

STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA SISTEMELOR EOLIENE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul Inginerie Mecanică de către

Ing. Doru-Ionuț PETRESCU

Conducător științific:
Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Liviu BERETEU
Prof.univ.dr.ing. Ioan-Adrian VIOREL
Prof.univ.dr.ing.Tiberiu VESSELENYI
Prof.univ.dr.fiz. Ioan BICA

Data susținerii tezei:05.05.2017

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2016

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

PREFAȚĂ

Teza de doctorat este rodul activității desfășurate în cadrul *Catedrei de Mecanică a Facultății de Mecanică din Timișoara*, sub îndrumarea permanentă, generoasă și plină de înțelegere a conducătorului științific, Prof.dr.ing Liviu BERETEU . Domniei sale îi adresez cele mai respectuoase și prețioase mulțumiri și pe această cale, pentru modul în care a știut să mă formeze în acești ani. Aportul său a fost cu totul remarcabil și sunt deosebit de încântat de a fi putut beneficia de această colaborare.

Lucrarea reprezintă o sinteză a rezultatelor de cercetare ale autorului, în perioada octombrie 2013 – august 2016, în cadrul studiilor doctorale desfășurate în domeniul *Inginerie Mecanică* la *Universitatea „Politehnica” din Timișoara*. În acești ani am fost permanent angrenat în activitatea unor echipe de cercetare din cadrul *Facultății de Mecanică* și a *Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică*. Am avut șansa să particip la soluționarea unor contracte de cercetare strâns legate de tema tezei de doctorat, în cadrul colectivului de energii regenerabile sub îndrumarea prof. dr. ing. Liviu BERETEU. Toate aceste activități de cercetare au avut o puternică influență asupra formării și orientării mele profesionale. În acest context, adresez alese mulțumiri Prof.dr.ing. Liviu BERETEU, pentru ajutorul permanent acordat la sistematizarea materialului și pentru observațiile și sfaturile primite, întotdeauna constructive.

Pentru condițiile de lucru create în vederea elaborării și finalizării tezei, doresc să adresez mulțumiri călduroase tuturor celor care mi-au dat sfaturi utile.

Mulțumesc cadrelor didactice din cadrul Universității „Politehnica” din Timișoara, care au contribuit la formarea și dezvoltarea mea profesională.

În mod special doresc să-mi exprim gratitudinea față de colegii mei.

Pe parcursul elaborării tezei am avut o colaborare fructuoasă cu colegii mei, cărora le mulțumesc pentru încurajările și ajutorul oferit ori de câte ori am avut nevoie.

Membrilor comisiei de recenzie a tezei de doctorat, Prof.dr.ing.Ioan Adrian VIOREL (Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca), Prof.dr.ing. Tiberiu VESSELENYI (Universitatea din Oradea) și Prof.dr.Ioan BICA (Universitatea de Vest Timișoara), le mulțumesc pentru atenția cu care au parcurs teza de doctorat, pentru criticile și aprecierile formulate, pentru sfaturile primite. Nu în ultimul rând, doresc să adresez călduroase mulțumiri soției mele, pentru suportul necondiționat și înțelegerea de care a dat dovadă în acești ani și, de asemenea, întregii mele familii.

Timișoara, 2017

Ing.Doru-Ionuț POPESCU

STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA SISTEMELOR EOLIENE

Teze de doctorat ale UPT, Seria ///////////////, Nr. //, Editura Politehnica, 2017, 204 pagini, 157 figuri, 10 tabele.

ISSN: ///

ISBN///

Cuvinte cheie: sisteme eoliene, viteza vântului, energie mecanică, energie electrică, optimizări, stabilitate, conducere.

Rezumat: Tematica tezei se încadrează în preocupările actuale din domeniul energiilor regenerabile, cu precădere energia eoliană. Teza tratează o serie de aspecte esențiale privind sistemele eoliene de mare putere care trebuie să funcționeze în condiții optime la viteze ale vântului variabile în timp. Abordarea funcționării sistemelor eoliene se face folosind modele matematice avansate pentru turbina de vânt și generatorul electric cuplat cu ea.

Metodologiile elaborate au la bază o abordare teoretică riguroasă și completă, finalizându-se prin realizarea unor instrumente soft de aplicabilitate generală, utile celor ce exploatează sistemele eoliene în condiții meteo date: viteze ale vântului variabile în timp.

Aplicațiile numerice concrete din cadrul tezei se referă la sistemele electroenergetice eoliene reale de putere medie și mare cu turbine cu ax orizontal cuplate cu generatoare sincrone cu magneti permanenți.

CUPRINS

1. Introducere	12
2. Studiul actual al cercetărilor privind sistemele electroenergetice eoliene.....	15
2.1. Structura sistemelor de conversie a energiei eoliene	18
2.1.1. Configurații și caracteristici de bază ale turbinelor eoliene.....	19
2.1.2. Generatoare electrice folosite în conversia energiei eoliene.....	21
2.1.3. Reglarea puterii la A.A.E.....	25
2.1.4. Structura unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic.....	27
2.2. Concluzii.....	28
3. Analiza surselor regenerabile de energie.....	29
3.1. Considerații preliminare.....	30
3.2. Principalele tipuri de surse de energie și caracteristica lor comparativă.....	30
3.3. Potențialul surselor regenerabile de energie din România.....	33
3.4. Energia și mediul.....	36
3.5. Influența producerii și consumului energiei asupra mediului.....	36
3.6. Politici privind sursele regenerabile de energie și valorificarea acestora.....	37
3.6.1. Politica Uniunii Europene în domeniul energiilor regenerabile.....	37
3.7. Premise de valorificare a surselor regenerabile de energie în Uniunea Europeană.....	39
3.8. Premise de valorificare a surselor regenerabile de energie în România.....	40
3.8.1. Măsurile orientative pe termen mediu și lung.....	41
3.9. Tehnologiile de utilizare.....	41
3.10. Configurații și caracteristici de bază ale turbinelor eoliene.....	43
3.11. Aeroagregatele eoliene cu viteză variabilă.....	46
3.12. Reglarea puterii A.A.E. prin unghiul paletelor.....	48
3.13. Eficiența rotorului turbinei eoliene utilizând controlul pasiv și activ al paletelor.....	49
3.14. Obiectivele sistemelor de conducere automată a agregatelor aeroelectrice.....	50
3.15. Concluzii.....	51
4. Energia furnizată de un sistem eolian funcționând la viteze ale vântului variabile în timp.....	54
4.1. Considerații preliminare.....	54
4.2. Modele matematice.....	55
4.2.1. Modelul matematic al TV _r (MM-TV).....	55
4.2.2. Modelul matematic al GSMP _r (MM-GSMP).....	59
4.3. Determinarea energiei dată de GSMP.....	61
4.4. Oscilațiile puterii și ale energiei.....	68
4.5. Conducerea sistemului.....	80
4.6. Determinarea experimentală a caracteristicii puterii.....	83
4.6.1. Caracteristica puterii la $V = ct$	83
4.6.2. Caracteristica puterii la $V \neq ct$	88
4.7. Concluzii.....	90
5. Determinarea optimului energetic la un sistem eolian funcționând la viteze ale vântului variabile în timp.....	92
5.1. Considerații preliminare.....	92
5.2. Modele matematice.....	92
5.2.1. Modelul matematic al TV _r (MM-TV).....	92
5.2.2. Modelul matematic al GSMP _r (MM-GSMP).....	93
5.3. Puterile la generator și turbină.....	94
5.4. Determinarea energiei dată de GSMP.....	102
5.5. Concluzii.....	104
6. Determinarea optimului energetic prin calculul energiei mecanice captate.....	105
6.1. Considerații preliminare.....	105
6.2. Modelele matematice la TV și GSMP.....	106
6.2.1. Modelul matematic al TV _r (MM-TV).....	106
6.2.2. Modelul matematic al GSMP _r (MM-GSMP).....	107
6.3. Determinarea vitezei unghiulare mecanice optime din ecuația mișcării și a energiei.....	108

6.4. Algoritmul de conducere optimal.....	116
6.5. Concluzii.....	116
7. Sistem eolian cu stocare în energie hidrolică.....	118
7.1. Considerații preliminare.....	118
7.2. Ecuațiile sistemului turbină, generator și motor.....	118
7.2.1 Modelul matematic al generatorului GSMP și motorului sincron cu magneti permanenți .	120
7.3. Modelul matematic al motorului asincron (MA).....	120
7.4. Ecuațiile sistemului GSMP+MA+PA	121
7.4.1. Studiu de caz la $V = 15 [m / s]$	121
7.4.2. Modelul simplificat.....	122
7.4.3. Dependența debitului de viteza vântului.....	123
7.5. Ecuațiile sistemului GSMP+MS+PA.....	124
7.6. Conducerea sistemului eolian cu stocare hidro.....	126
7.6.1. Acționarea pompei se face cu un MOTOR ASINCRON-MA.....	127
7.6.2. Acționarea pompei se face cu un MOTOR SINCRON-MS.....	135
7.7. Concluzii.....	139
8. Conducerea optimă a sistemului eolian cu regatoare de tip PI.....	140
8.1. Considerații preliminare	140
8.2. Conducerea sistemului prin măsurarea vitezei vântului la turbine.....	141
8.2.1. Viteza vântului variabilă în timp.....	142
8.3. Conducerea sistemului prin măsurarea vitezei vântului în avans.....	146
8.4. Concluzii.....	151
9. Metodă pentru determinarea maximului puterii echivalente la un sistem eolian.....	152
9.1. Considerații preliminare.....	152
9.2. Studiu de caz.....	153
9.2.1. Modelele matematice ale TV+GSMP.....	153
9.2.2. Viteza vântului constantă în timp: $V = 16 [m / s]$	154
9.2.3. Determinarea maximului energetic	156
9.2.4. Viteza vântului variabilă în timp.....	159
9.2.5. Determinarea optimului energetic printr-o probă la funcționarea în gol.....	161
9.2.5.1. Determinarea vitezei $V(t_k)$	163
9.2.5.2. Influența valorii VUM inițiale asupra valorii lui ω_{OPTIM}	164
9.2.5.3. Importanța cunoașterii momentului de inerție echivalent J	165
9.2.5.4. Importanța modelelor matematice în optimizarea funcționării sistemelor eoliene.	166
9.2.5.5. Ponderea momentului de frecări	166
9.2.6 Algoritmul de conducere.....	167
9.3. Determinarea puterii TV prin calculul derivatei VUM	168
9.3.1 Studiul de caz la $V=22[m/s]$	169
9.3.2. Studiu de caz la $V \neq ct$	172
9.3.3. Determinarea VUM optime prin măsurarea VUM și calculul derivatei VUM.....	180
9.3.4. Determinarea VUM optime prin calculul energiei mecanice captate.....	185
9.3. Concluzii.....	186
10. Determinarea zonelor de maxim energetic la un sistem eolian funcționând la viteze ale vântului variabile în timp.....	188
10.1. Considerații preliminare.....	188
10.2. Studiu de caz-simulări la viteza vântului de forma $V(t) = A + B \sin(0.17943t)$	188
10.2.1. Viteza vântului variază în timp sinusoidal.....	189
10.2.2. Determinarea vitezei unghiulare mecanice optime prin calculul energiei captate la diverse valori pentru VUM	191
10.2.3. Determinarea zonei de maxim energetic din variația VUM.....	191
10.2.4. Dinamica sistemului la diferite încărcări.....	194
10.2.5. Variațiile în timp ale puterilor.....	196
10.3. Concluzii.....	197
11. Concluzii generale și contribuții personale.....	198
Bibliografie.....	201

LISTĂ DE FIGURI

Nr. Figură	Descriere	Nr. Pagină
2.1	Sistem electroenergetic cu baterii solare și turbină de vânt	18
2.2	Sistem eolian cu turație constantă	19
2.3	Sistem eolian cu turație variabilă	20
2.4	Sistem eolian debitând pe acumulatele electrice	20
2.5	Agregate aero-electrice	21
2.6	Agregat aero-electric cu GI	21
2.7	SEE cu generator asincron cu inele	22
2.8	Sistem eolian cu GS	23
2.9	Configurații actuale de sisteme eoliene	24-26
2.10	Modificarea puterii cu viteza vântului	26
2.11	Structura de conducere	27
2.12	Sistemul hibrid eolian-fotovoltaic	28
3.1	Centrala nucleară de la Cernobâl, Ucraina	32
3.2	Centrala nucleară de la Gundremmingen, Germania	32
3.3	Poluarea mediului prin arderea combustibililor fosili	40
3.4	Schemele suport pentru utilizarea sursele regenerabile de energie	42
3.5	Utilizarea energiei vântului în navigația maritimă	47
3.6	Instalațiilor eoliene utilizate la măcinarea boabelor, Olanda	47
3.7	Configurații de bază ale agregatelor aero-electrice	49
3.8	Conversia electromecanică a energiei eoliene utilizând generatoarele de inducție	50
3.9	Sistemul de conversie al energiei eoliene	51
3.10	Configurațiile standard aplicate în energia eoliană utilizând generatoare sincrone și asincrone	52-54
3.11	Caracteristica mecanică a turbinelor eoliene	55
3.12	Diagrama bloc caracteristică controlului "active stall" al paletelor rotorului turbinelor eoliene	56
3.13	Diagrama bloc a principiului de "active stall" control	56
3.14	Puterea aerodinamică a unei turbine eoliene de 2 MW în funcție de viteza vântului pentru diferite unghiuri de reglare a paletelor	57
3.15	Caracteristica puterii active în funcție de viteza vântului pentru domeniul de funcționare a unei turbine eoliene cu un control pasiv comparativ cu un control activ al paletelor	58
3.16	Schema bloc a unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic	59
4.1	Conducerea sistemului TV+GSMP	63
4.2	Dependența puterii de VUM, ω	65
4.3	Dependența momentului de VUM, ω	65
4.4	Variația cuplului în timp	66
4.5	Dependența momentului mediu de amplitudinea vântului	67
4.6	Dependența lui M_{GSMP} de ω	69
4.7	Variația vitezei vântului în timp	69
4.8	Variația lui ω în timp la $R=268.65[\Omega]$	70
4.9	Dependențele momentelor M_{TV} și M_{GSMP} de ω	71
4.10	Dependența lui W_e de R	71
4.11	Variația în timp a lui ω_{OPTIM}	72

4.12	Variația lui ω în timp la $R = 339.84[\Omega]$	72
4.13	Variația lui ω în timp la $R = 359.84[\Omega]$	73
4.13.a	Variația lui ω la $R = 518.65[\Omega]$	73
4.13.b	Variația lui W_e la $R = 518.65[\Omega]$	73
4.13.c	Variația lui ω la $R = 618.65[\Omega]$	73
4.13.d	Variația lui ω la $R = 718.65[\Omega]$	73
4.13.e	Variația lui ω la $R = 818.65[\Omega]$	74
4.13.f	Variația lui ω la $R = 918.65[\Omega]$	74
4.13.g	Variația lui ω la $R = 1018.65[\Omega]$	74
4.13.h	Variația lui ω la $R = 1118.65[\Omega]$	74
4.13.i	Variația lui ω la $R = 1218.65[\Omega]$	74
4.13.j	Variația lui ω la $R = 1418.65[\Omega]$	74
4.13.k	Variația lui ω la $R = 1718.65[\Omega]$	75
4.13.l	Variația lui ω la $R = 418.65[\Omega]$	75
4.13.m	Variația lui ω la $R = 318.65[\Omega]$	75
4.14	Variația în timp a lui ω_{OPTIM} -varianta 2	76
4.15	Variația în timp a lui P_{TV}	77
4.16	Variația în timp a lui P_{GSMP}	78
4.17.a	Variația lui W_e la $R = 349.84[\Omega]$	79
4.17.b	Variația lui W_e (detaliu)	79
4.18	Variația lui ω la $R = 349.84[\Omega]$	79
4.19	Variația în timp a VUM la $J = 5[kgm^2]$	80
4.20	Variația lui ω_{OPTIM}	80
4.21	Variația în timp a lui P_{TV}	81
4.22	Variația în timp a lui P_{GSMP}	81
4.23.a	Energiile captate în intervalul $\Delta t = 5000 \div 5070[s]$	82
4.23.b	Variația în timp a lui ω	83
4.23.c	Variațiile energiilor în timp	83
4.24	Variația în timp a VUM la $J = 500[kgm^2]$	83
4.25	Variația în timp a lui ω (detaliu)	84
4.26	Variația în timp a lui P_{TV}	84
4.27	Variația în timp a lui P_{GSMP}	85
4.28	Variațiile energiilor în timp	85
4.29	Variația în timp a lui ω	85
4.30	Caracteristicile mecanice	86
4.31	Variația în timp a lui ω	87
4.32	Variația puterii în timp la TV	88
4.33	Conducerea sistemului TV+GSMP	90
4.34	Caracteristica puterii	92
4.35	Determinarea puterii la TV	93
4.36	Variația lui ω în timp	95
4.37	Variația în timp a VUM ω	95
4.38	Caracteristicile puterii	96
4.39.a	Variația în timp a VUM ω	97
4.39.b	Variația în timp a VUM ω (detaliu)	97
4.40	Caracteristicile puterii	98
5.1	Dependența puterii la generator de ω	102

5.2	Dependența puterii la turbina de ω	103
5.3	Variația VUM în timp	106
5.4	Variația VUM în timp	107
5.5	Variația puterii la generator în timp	107
5.6	Dependența puterii TV de ω la viteza minimă și maximă	108
5.7	Variația puterii TV în timp	109
5.8	Variația momentului TV în timp	109
5.9	Dependențele momentelor TV de ω	110
5.10	Dependențele puterilor TV de ω	110
5.11	Conducerea sistemului TV+GSMP	112
6.1	Variația în timp a lui M_{GSMP}	117
6.2	Variația în timp a lui M_{TV}	118
6.3	Variația puterii P_{GSMP} cu ω	119
6.4	Conducerea sistemului TV+GSMP	124
7.1	Caracteristicile mecanice experimentale	127
7.2	Dependența debitului de viteza vântului	132
7.3	Variația vitezei vântului în timp	134
7.4	Conducerea sistemului cu MA	135
7.5	Variația în timp a VUM ω și Ω	138
7.6	Variația în timp a debitului	138
7.7	Variația în timp a VUM ω și Ω	138
7.8	Variația în timp a debitului	138
7.9	Variația în timp a VUM ω și Ω	139
7.9.a	Variația în timp a VUM ω și Ω la $K_2 = -0.00001$	140
7.9.b	Variația în timp a VUM ω și Ω la $K_2 = -0.000001$	140
7.10	Variația în timp a debitului	139
7.10.a	Variația în timp a debitului la $K_2 = -0.00001$	140
7.10.b	Variația în timp a debitului la $K_2 = -0.000001$	140
7.11	Variația în timp a VUM ω	142
7.12	Variația în timp a debitului	142
7.13	Sistem eolian cu motor sincron	143
7.14	Variația în timp a VUM ω	144
7.15	Variația în timp a debitului	144
7.16	Variația în timp a VUM ω	144
7.17	Variația în timp a debitului	144
7.18	Variația în timp a VUM ω	145
7.19	Variația în timp a vitezei vântului	146
7.20	Variația în timp a debitului	146
7.21	Sistem eolian cu stocare hidro	146
8.1	Dependența puterii de VUM, ω	149
8.2	Variația vitezei vântului în timp	150
8.3	Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = 0.1$	152
8.4	Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = 0.001$	152
8.5	Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.001$	152
8.6	Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.01$	152
8.7	Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.1$	152
8.8	Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.9$	152
8.9	Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.3$	152
8.10	Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.2$	152
8.11	Variația lui ω și R la pasul 3	153
8.12	Variația lui ω și R la pasul 4	153
8.13	Variația lui ω și R la pasul 5	154
8.14	Variația lui ω și R la pasul 6	154

8.15	Conducerea sistemului TV+GSMP	154
8.16	Variația lui ω și R la pasul 1	155
8.17	Variația lui ω și R la pasul 2	156
8.18	Variația lui ω și R la pasul 3	157
8.19	Variația lui ω și R la pasul 4	158
9.1	Dependența puterii de VUM, ω	161
9.2	Dependența momentului generatorului de ω	162
9.3	Variația momentului generatorului cu R	162
9.4	Dependența lui R de ω	163
9.5	Dependența puterii de R	163
9.6	Caracteristicile puterii	164
9.7	Variația în timp a lui ω	165
9.8	Variația în timp a VUM	167
9.9	Variația vitezei vântului în timp	167
9.10	Caracteristicile puterii	168
9.11	Variația VUM în timp la funcționarea în gol și cu $\omega(0) = 550.07 [\text{rad} / \text{s}]$	169
9.12	Variația VUM în timp la funcționarea în gol și cu $\omega(0) = 222 [\text{rad} / \text{s}]$	170
9.13	Variația lui ω în timp la $\omega(0) = 333. [\text{rad} / \text{s}]$	170
9.14	Viteza vântului la momentul t_k	171
9.15	Valorile optime ale VUM	173
9.16	Zona de optim a puterii	174
9.17	Puterile reale și cele simplificate	175
9.18	Conducerea sistemului TV+GSMP	176
9.19	Variația în timp a VUM la $V=22[\text{m/s}]$	179
9.20	Caracteristica puterii la $V=22[\text{m/s}]$	179
9.21	Variația în timp a vitezei vântului	180
9.22	Variația în timp a VUM	180
9.23	Caracteristicile puterii la $V \neq \text{ct}$	186
9.24	Variația în timp a VUM	192
9.25	Caracteristicile puterii la $V(t) = 15 - 7 \sin 0.17943t$	192
10.1	Variația vitezei vântului în timp	197
10.2	Variația puterii în timp	198
10.3	Dependența puterii de VUM, ω	198
10.4	Variațiile în timp ale lui $\omega(t)$ și $a(t)$	200
10.5	Variațiile în timp ale VUM la două sarcini	202
10.6	Variația în timp a VUM (detaliu)	202
10.7	Dependențele momentelor de VUM	204
10.8	VUM la două rezistențe de sarcină	204
10.9	Variația în timp a puterilor	205

LISTĂ DE TABELE

Nr. Tabel	Denumire	Nr. Pagină
2.1	Rezervele globale de resurse energetice	16
2.2	Elemente tehnico-economice de exploatare a potențialului energetic al zonelor eoliene din România	17
3.1	Rezervele globale de resurse energetice	31
3.2	Emisiile specifice de gaze și substanțe poluante rezultate la arderea combustibililor fosili	32
3.3	Distribuția potențialului energetic solar din România	34
3.4	Elemente tehnico-economice de exploatare a potențialului energetic al zonelor eoliene din România	35
3.5	Consumul de biomasă în balanța resurselor energetice primare	36
3.6	Potențialul energetic al surselor regenerabile de energie din România	37
3.7	Analiză sintetică calitativă a resurselor și a potențialul de piață al surselor regenerabile în România	38
3.8	Cantitatea de emisii de CO ₂ ce rezultată în cursul diferitelor tehnologii de producere a energiei	39

INTRODUCERE

Companiile de producere a energiei electrice caută diferite surse alternative la producerea energiei în condițiile instabilității prețului energiei și a modificărilor privind reglementările referitoare la protecția mediului. În acest context, integrarea surselor de energie regenerabilă eoliană se impune din ce în ce mai mult.

Restructurarea companiilor de producere a energiei electrice, evoluția tehnologiilor din domeniul optimizării funcționării sistemelor eoliene, politicile recente privind mediul înconjurător asigură baza pentru progresul integrării surselor de energie eoliană ca opțiune importantă în viitorul apropiat.

Economia europeană se bazează pe surse de energie mai sigure, mai curate, mai competitive și sustenabile. Prioritățile energetice vizează asigurarea unei piețe interne europene funcționale, stabile și continue.

Având în vedere epuizarea resurselor convenționale în viitorul mai mult sau mai puțin apropiat, creșterea prețurilor petrolului și a gazelor naturale, precum și schimbările climatice, cauzate de emisiile de gaze cu efect de seră, Uniunea Europeană (UE) prin Directiva 77/2001 [EC/77/2001] și Propunerea de Directivă (publicată în ianuarie 2008 și menită să înlocuiască Directiva 77/2001 și Directiva 30/2003) privind promovarea utilizării energiei din surse regenerabile, încurajează din punct de vedere politic, tehnic, economic și juridic înlocuirea resurselor convenționale prin utilizarea resurselor regenerabile.

Se prevăd implementarea de scheme de sprijin, cofinanțări în etapa investițională și tratament preferențial față de ceilalți producători de energie electrică.

Se prevede în UE ca 20% din consumul de energie electrică să fie acoperit din producția surselor regenerabile de energie până în anul 2020. Pentru atingerea acestui obiectiv, statele membre, printre care și România, au obligația de a-și îndeplini propriile ținte, stabilite în funcție de potențialul de resurse regenerabile de care dispun.

În ceea ce privește România, creșterea producției de energie electrică bazate pe resurselor eoliene constituie una din componentele Strategiei guvernamentale în domeniul energiei electrice. Guvernul României s-a angajat, prin Tratatul de aderare, față de Uniunea Europeană ca ponderea energiei electrice produse din sursele regenerabile (inclusiv sursele hidro) în totalul consumului brut de energie electrică să fie de 33% în anul 2010, 35% în anul 2015 și 38% în anul 2020 [HG1069/2007].

Există proiecte importante în România pentru centrale electrice eoliene (CEE).

CEE au caracteristici tehnice și de exploatare care le deosebesc semnificativ de celelalte tipuri de centrale electrice:

- puterea disponibilă poate varia între zero și puterea instalată, în funcție de valoarea vitezei vântului, puterea turbinei depinzând de cubul vitezei vântului;
- performanțele tehnice ale centralelor eoliene sunt foarte diferite în funcție de anul de fabricație și de evoluția tehnologiilor din domeniul, în mod deosebit tehnologia electronicii de putere care facilitează mărirea randamentului energetic prin adaptarea sarcinii la viteza vântului;
- funcționarea optimală din punct de vedere energetic a CEE impune controlul, în permanență, a sarcinii în funcție de viteza vântului și prin această putere fluctuată dată în sistemul electroenergetic național, SEN, creează instabilități în acesta și deci, poate cauza și impune găsirea unor noi soluții de stocare a energiei eoliene;
- folosirea CEE pentru stocarea hidro a energiei eoliene este o soluție tehnică deosebit de avantajoasă și care nu perturbă stabilitatea SEN;
- stocarea energiei eoliene în variantă hidro nu mai pune probleme în curba de sarcină a SEN, în sensul că energia eoliană astfel stocată poate fi folosită la vârfurile de sarcină;
- producția centralelor eoliene pune probleme tehnice specifice.

Datorită caracteristicilor CEE și a cerinței mari de conectare a acestui tip de centrală la sistemul electroenergetic național, este justificată o analiză, optimală din punct de vedere energetic, foarte riguroasă asupra modului cum funcționează CEE.

În contextul prezentat, tematica tezei se încadrează în preocupările actuale din domeniul optimizării funcționării sistemelor eoliene. Teza tratează o gamă largă de aspecte legate de analiza regimurilor de funcționare, inclusiv situațiile speciale care pot să apară în regimurile tranzitorii.

Toate metodele utilizate au la bază o abordare teoretică riguroasă, finalizându-se prin realizarea și implementarea unor instrumente soft de aplicabilitate generală.

Teza de doctorat, extinsă pe 204 de pagini, este structurată pe 11 capitole, o prefață și o listă bibliografică, conținând un număr de 157 figuri, scheme, 10 tabele. Lista bibliografică cuprinde 81 de titluri, semnalându-se prezența unor lucrări reprezentative, atât cele considerate deja clasice, cât și cele de dată relativ mai recentă, apărute în țară sau în reviste din străinătate.

Capitolul 1 are un caracter introductiv. El cuprinde încadrarea și justificarea tematicii care constituie obiectul tezei de doctorat, în contextul stadiului actual al evoluției sistemelor electroenergetice și al preocupărilor existente pe plan mondial și la noi în țară, și prezentarea succintă a conținutului fiecărui capitol al tezei. În încheiere se evidențiază atât modul de valorificare a cercetărilor efectuate în cadrul elaborării tezei de doctorat (publicații, contracte de cercetare științifică, instrumente soft), cât și perspectivele privind direcțiile ulterioare de cercetare.

Capitolul al 2-lea este consacrat analizării stadiului actual al cercetărilor privind sistemele electroenergetice eoliene. Analiza pleacă de la situația pieței de energie în condițiile liberalizării acesteia și a necesității asigurării securității energetice pentru viitor, respectând normele naționale și internaționale privind protecția mediului. Problematika energetică actuală se amplifică devenind tot mai complicată ca urmare a epuizării resurselor energetice clasice: petrol, gaze, cărbune, uraniu, etc. Analizând literatura de specialitate s-a constatat faptul că în mai toate lucrările se preconizează captarea unei energii maxime de la vânt. Se tinde, deci, să se funcționeze cu sistemele electroenergetice eoliene la putere maximă. Este prezentată strategia energetică a României în domeniul surselor regenerabile de energie.

În capitolul al 3-lea se realizează o sinteză a principalelor aspecte ce privesc integrarea surselor regenerabile de energie de putere mare în sistemele electroenergetice actuale. Se analizează energia eoliană și implicit centralele electrice eoliene (CEE). Sunt prezentate atât problemele legate de epuizarea combustibililor fosili cât și implicațiile tehnice, economice și de mediu legate de sursele regenerabile de energie.

Sunt analizate problemele energetice globale și cele specifice României. O atenție deosebită se acordă protejării mediului mai ales ca acesta este semnificativ poluat de sectorul energetic.

În UE și România politicile energetice sprijină în mod semnificativ implementarea energiilor regenerabile în principal energia eoliană și cea solară.

Se determină, în capitolul 4, energia mecanică captată de turbina de vânt și transformată în energie electrică de către generatorul sincron cu magneti permanenți. Se pune problema determinării încărcării sistemului astfel încât energia obținută să fie maximă. Prin simulare se determină viteza unghiulară mecanică optimă și rezistența de sarcină optimă, la generator, la care energia este maximă, considerând viteza vântului variabilă în timp.

Capitolul 5 este consacrat determinării valorii turației la care energia captată este maximă. Aceasta constituie problema fundamentală în orice sistem de conducere performant. Deoarece viteza vântului variază ca și valoarea, semnificativ în timp și valoarea turației optime se modifică în timp. Conducerea optimă din punct de vedere energetic a sistemului eolian se poate realiza în timp util, dacă se cunoaște dependența valorii turației optime la viteza vântului.

Determinarea legăturii dintre viteza vântului și turația optimă este obiectivul principal al acestei lucrări.

Obiectivul capitolului 6 îl constituie determinarea vitezei unghiulare mecanice optime, la care energia captată este maximă. Calculul energiei se face prin integrarea puterii pe o perioadă de timp dată de valoarea perioadei de oscilație a vitezei vântului. Pe baza valorii turației optime se poate realiza o conducere optimă. Determinarea turației optime de funcționare, din punct de vedere energetic, este problema esențială la sistemele eoliene ce funcționează la viteze ale vântului variabile în timp. Sunt analizate dependențele vitezei unghiulare mecanice, (VUM), de viteza vântului. Se deduc VUM corespunzătoare energiilor maxime.

Se dă în capitolul 7 un mod de utilizare a energiei eoliene prin stocare în energie hidrolică. În acest fel nu se mai pune problema fluctuațiilor de putere ce apar la viteze ale vântului variabile în timp, fluctuații ce perturbă funcționarea sistemului electroenergetic național, (SEN), mai ales la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp, cum este în cazul României. Sistemul este compus dintr-o turbină de vânt cuplată cu un generator sincron cu magneti permanenți, (TV+GSMP), ce debitează putere electrică pe un motor asincron/sincron cuplat cu o pompă de apă.

Se pune problema determinării turației, numită de referință, astfel încât să se realizeze o captare maximă a energiei eoliene, pe un interval de timp mare (ordinul zilelor). Urmărirea maximului energetic, la viteze ale vântului variabile în timp, conduce la valori de puteri variabile în timp, ceea ce pentru sistemul energetic este un element destabilizator.

Din acest motiv se impune ca fluctuațiile de putere să fie înmagazinate într-un sistem de stocare a energiei. Acesta poate fi de natură hidro cu două rezervoare de apă la puteri mari, sau o baterie de acumulatori electrice la puteri medii și mici. Se determină comportarea sistemului (TV+GSMP) considerând turația/viteza unghiulară mecanică optimă, ca și mărime de referință, într-un sistem de conducere. Se realizează, astfel, o conducere optimă a sistemului eolian, astfel încât să se extragă maximul de energie mecanică, la viteze ale vântului variabile în timp. Structura de conducere se bazează pe măsurarea vitezei momentane a vântului și folosește un model original pentru turbina de vânt.

În capitolul 8 se face o analiză a dinamicii sistemelor eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Această analiză se bazează pe simulări numerice ce au la bază ecuația mișcării. Conducerea sistemului se realizează cu reglatoarele de tip PI ce au ca și mărime de referință viteza unghiulară mecanică, VUM, de la generator, calculată pe baza măsurătorilor de viteză a vântului în condițiile obținerii unei energii maxime. Prin simulări se face acordarea reglatoarelor, considerând viteza vântului variabilă în timp.

În capitolul 9 se dă o metodă originală de estimare a puterii echivalente la sisteme eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Această metodă se bazează pe o probă la funcționarea în gol a generatorului, făcându-se o singură dată în etapa de omologare a turbinei. Cunoașterea valorii turației, la care energia captată este maximă, constituie problema fundamentală în orice sistem de conducere performant. Conducerea optimă a unui sistem eolian presupune extragerea, (captarea), unei energii maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp. Aceasta impune controlul turației și cuplului la turbină și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului. Determinarea turației corespunzătoare energiei maxime date de turbina de vânt, (TV), este obiectivul principal al acestei lucrări. Prin simulări se verifică metoda dată, considerând viteza vântului variabilă în timp.

În capitolul 10 se determină zonele de maxim energetic la sistemele eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Această analiză se bazează pe simulări numerice ce au la bază ecuația mișcării. Pe baza măsurării vitezei vântului și a turației la generator se definesc două mărimi fundamentale: viteza echivalentă a vântului și viteza unghiulară mecanică optimă, aceasta din urmă fiind o funcție de viteza echivalentă a vântului. Prin analiza variației în timp a turației la generator se poate determina zona de funcționare optimă din punct de vedere energetic.

Datorită inerțiilor mecanice mari funcționarea sistemului în punctele de putere maximă, MPP, este posibilă doar la variații mici ale vitezei vântului și deci la variații mari ale vitezei vântului se impune o nouă strategie bazată pe captarea unei energii maxime pe o durată lungă de timp.

Se menționează că fiecare capitol se încheie cu un subcapitol final, de evidențierea concluziilor și a contribuțiilor originale.

Ultimul capitol cuprinde concluziile generale ale tezei de doctorat și prezentarea sistematizată a contribuțiilor originale ale autorului, precum și relieful direcțiilor și perspectivele viitoare de cercetare în acest domeniu în plină dezvoltare atât din punct de vedere tehnic cât și economic, prin energia obținută în condiții de rentabilitate mărite.

Analizele teoretice și practice realizate în cadrul tezei de doctorat, precum și rezultatele obținute, deschid o serie de perspective și direcții de continuare și aprofundare ulterioară a cercetărilor în domeniu:

- analiza integrării surselor regenerabile de energie în alte zone ale SEN, în funcție de evoluțiile viitoare pe plan european și național;
- analiza integrării sistemelor eoliene din zona Baziș-Orșova într-un microsistem hidroenergetic integrat, separat de SEN, cu stocare în hidro folosind pentru aceasta hidrocentrala de la Porțile de Fier I;
- se poate, cu sistemul menționat, realiza o stocare a energiei eoliene și în același timp a funcționa ca puteri variabile în funcție de viteza vântului fără a influența, prin aceasta stabilitatea SEN;
- extinderea instrumentului software pentru centralele mai vechi realizate cu tehnologii învechite și care funcționează în condiții de randament energetic scăzut în zone cu potențial eolian ridicat. Se pot evita, astfel, pierderile de energie și deci, mărirea eficienței fermelor eoliene, indiferent de puterea lor;
- folosirea sistemelor de stocaj hidro cu alimentare directă a motoarelor electrice ce acționează pompele de apă, la variații mari de putere datorate variațiilor în timp a vitezei vântului;
- funcționarea în zona optimă din punct de vedere energetic printr-o metodă simplă și deosebit de eficace: reglarea debitului de apă în funcție de viteza vântului.

2. STUDIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND SISTEMELE ELECTROENERGETICE EOLIENE

Capitolul al 2-lea este consacrat analizării stadiului actual al cercetărilor privind sistemele electroenergetice eoliene. Problematika energetică actuală se amplifică devenind tot mai complicată ca urmare a epuizării resurselor energetice clasice: petrol, gaze, cărbune, uraniu, etc[1,61,67].Analizând literatura de specialitate s-a constatat faptul că, în mai toate lucrările se preconizează captarea unei energii maxime de la vânt[70,72].Se tinde,deci,a se funcționa cu sistemele electroenergetice eoliene la putere maximă.

În ultimii ani, sursele de energie regenerabile, pentru alimentarea cu energie electrică, au primit o atenție considerabilă, ca urmare a preocupărilor globale asociate cu penuria de energie la nivel mondial[1-8]. În contextul unei expansiuni rapide a pieței, pentru energie distribuită, un interes major este reprezentat de sistemele de energie eoliană.

Principalele tipuri de surse de energie

În etapa actuală omenirea beneficiază, în fond, de trei categorii de surse de energie, bazate respectiv pe:

- arderea combustibililor fosili (cărbune, petrol, gaze);
- fuziunea nucleară;
- captarea și conversia energetică regenerabilă (energia solară, energia vântului, energia potențială a apelor, energia geotermală etc.).

Aceste trei categorii de surse se deosebesc considerabil prin:

- capacitatea lor de a produce energie în condițiile și în perioadele de timp solicitate;
- prețul energiei produse;
- gravitatea impactului asupra mediului ambiant.

a) Combustibilii fosili pe parcursul ultimelor două secole au servit drept bază a energiei moderne, constituind suportul energetic al industrializării și al progresului tehnico-științific înregistrat în perioada menționată. Astăzi circa 90% din cererea globală de energie e satisfăcută prin utilizarea combustibililor fosili[61,67].

Valoarea calorică mare, posibilitatea stocării în cantitățile necesare pentru utilizare, la locul și în timpul preconizat, constituie avantajele de bază care au determinat folosirea atât de masivă a acestui tip de combustibil.

Există însă, numeroase dezavantaje caracteristice pentru aceste surse energetice, printre care două, cu cele mai grave consecințe:

- volumul limitat al rezervelor explorabile de combustibili fosili [61,70];
- impactul puternic asupra mediului ambiant, trecut sub tăcere într-un trecut nu prea îndepărtat, pune sub semnul întrebării însă și posibilitatea existenței într-un viitor apropiat a energiei bazate pe arderea combustibililor fosili.

Tabelul 2.1.

Rezervele globale de surse energetice[1,7]

Tipul de resurse	Rezerve naturale* [Gtep]	Producție mondială	Rezerve [ani]
Petrol	140	3,45	40
Gaze naturale	135	2,2	64
Cărbune****	984205	2,2	155
Uraniu**	40->2000	0,34	60>2500***

* economic explorabile;

** în funcție de tehnologia utilizată ;

*** pornind de la un consum de 0,65 Gtep;

**** milioane tone.

b) Energia nucleară

Era energiei nucleare începe în anii '70 ai secolului XX, cunoaște o dezvoltare spectaculoasă și mult promițătoare în anii '80, cucerind, la sfârșitul anilor '90, electroenergetica celor mai dezvoltate țări europene, a Statelor Unite ale Americii și Canadei.

c) Sursele regenerabile sunt sursele care se regenerează pe măsură ce sunt consumate.

Cele mai importante surse regenerabile de energie (SER) sunt[61,67]:

- energia vântului (eoliană);
- energia soarelui;
- energia hidrolică a râurilor;
- energia fluxurilor-refluxurilor și a valurilor mării;
- energia geotermală;
- energia biomasei.

Criteriile principale care determină perspectivele exploatarei surselor de energie regenerabile sunt[1].:

- răspândirea destul de uniformă pe întregul glob și accesul la utilizarea lor al majorității țărilor lumii;
- aflarea lor în apropierea locului de consum și, ca urmare, lipsa necesității de a transporta energia la distanțe mari;
- accesul populației atât la producerea, cât și la folosirea energiei;
- majoritatea surselor de energie regenerabile sunt nonpoluante.

Aceste avantaje importante au determinat țările industrializate, dar și multe state în curs de dezvoltare să edifice treptat un sistem energetic nou, care să ia în calcul și sursele de energie netradiționale.

Dezavantajele care au reținut un timp îndelungat implementarea pe scară largă a acestora sunt:

- energia regenerabilă este dispersată, ceea ce determină costuri mari ale instalațiilor de producere a energiei finale, destinate pentru consum;
- neuniformitate de distribuție în timp;
- lipsa posibilităților de stocare, de formare a rezervelor.

Energia eoliană

În România s-au identificat, (tabelul 2.2), cinci zone eoliene distincte (I - V) în funcție de potențialul energetic existent, de condițiile de mediu și topogeografice. Harta eoliană a României s-a elaborat luând în considerare potențialul energetic al surselor eoliene la înălțimea medie de 50 metri, pe baza datelor și informațiilor meteorologice colectate începând din anul 1990, până în prezent.

Din rezultatele înregistrate a rezultat că România se află într-un climat temperat continental, cu un potențial energetic eolian ridicat în zona litoralului Mării Negre, podișurile din Moldova și Dobrogea ("climat blând") sau în zonele montane ("climat sever"). În regiuni cu potențial eolian relativ bun s-au localizat amplasamente favorabile, dacă se urmărește "exploatarea energetică a efectului de curgere peste vârf de deal" sau "a efectului de canalizare al curenților de aer".

Pe baza evaluării și interpretării datelor înregistrate rezultă că în România se pot amplasa instalații eoliene cu o putere totală de până la 14000 MW, ceea ce înseamnă un aport de energie electrică de aproape 23000 GWh/an[5,6,7]..

Tabelul 2.2.

Elemente tehnico-economice de exploatare a potențialului energetic al zonelor eoliene din România

Zona topogeografică	Montană înaltă [m/s; W/m ²]	Mare deschisă [m/s; W/m ²]	Zona litorală [m/s; W/m ²]
I	>11,0;>1800	>9,0;>800	>8,5;>700
II	10,0-1,5;1200-1800	8,0-9,0;300-800	7,0-8;400-700
III	8,5-10,0;700-1200	7,0-8,0;400-600	6,0-7,0;250-400
IV	7,0-8,5;400-700	5,5-7,0;200-400	5,0-6,0;150-250
V	<7,0;<400	<5,5;<200	<5,0;<150

(Sursa: ICEMENERG)

Valorificarea potențialului energetic eolian, în condiții de eficiență economică, impune folosirea unor tehnologii și echipamente adecvate (grupuri aerogeneratoare cu putere nominală de la 750 kW până la 3000 kW).

Pe plan mondial, "energetica vântului" se găsește într-o etapă de "maturitate tehnologică" însă, în România, ponderea energiei electrice din surse eoliene în balanța energetică rămâne deocamdată sub posibilitățile reale de valorificare eficientă a acestora.

O problemă majoră de conversie a energiei eoliene în ceea ce privește integrarea în sistemul energetic, este dependența directă a energiei de variațiile vitezei vântului în timp[6]. De asemenea, o problemă importantă este controlabilitatea sistemului, luând în considerare faptul că energia eoliană este fluctuantă. În general, majoritatea comunităților izolate în lume sunt alimentate cu energie electrică produsă de generatoare diesel care nu sunt destul de avantajoase, din cauza consumului de carburant și de preț. În scopul de a reduce costurile consumului de energie, investigarea surselor regenerabile de energie reprezintă o alternativă interesantă[9]. În acest caz, necesitatea de depozitare a energiei devine și mai importantă în special în ceea ce privește costurile mari cu energia în timpul perioadei de sarcină maximă și ridicarea constantă a sarcinii de bază în rețele[10].

Datele statistice referitoare la potențialele energiilor regenerabile din România demonstrează faptul că într-un viitor apropiat se impun și la noi investiții importante în acest domeniu din ce în ce mai important în balanța economică[4].

Datorită fluctuațiilor de putere cauzate de factorii meteo energia eoliană și cea solară se modifică semnificativ chiar și pe intervale de timp de ordinul orelor, ceea ce face necesar să se implementeze în locațiile respective sisteme de stocare a energiei care să poată oferi consumatorilor energia necesară la valorile și momentele de timp impuse de aceștia [73,74].

Sistemul electroenergetic reprezentat în figura 2.1 pe baza bateriilor solare și a turbinei de vânt poate oferi o soluție completă la o funcționare insulară, în sensul că atunci când nu este vânt energia electrică se obține de la soare și invers. Iar în perioadele fără vânt și soare, energia necesară consumatorilor se obține din sistemul de stocare.

Stocarea de energie în acumuloarele electrice(AE), poate fi considerată ca un suport pentru energia eoliană.

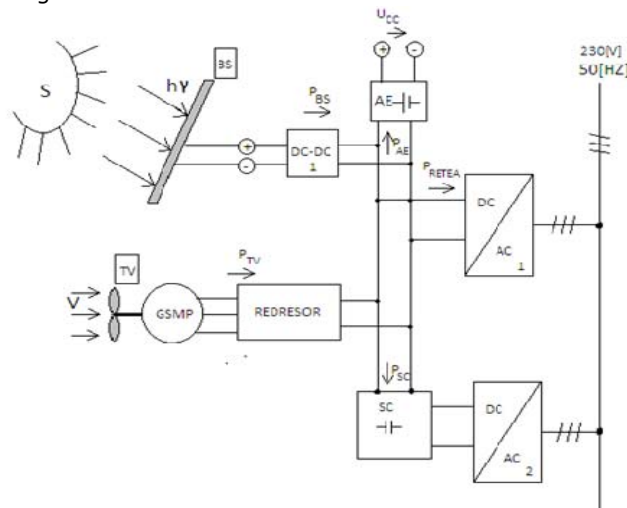


Fig.2.1. Sistem electroenergetic cu baterii solare și turbină de vânt

Sistemele de stocare trebuie să preia fluctuațiile de putere ce apar datorită variației vitezei vântului în timp și a modificării nivelului de radiații solare. Se transferă astfel, în sistemul electroenergetic național (SEN) o putere constantă pe un anumit interval de timp, fapt deosebit de pozitiv în ceea ce privește stabilitatea dinamică a Sistemului Electroenergetic Național (SEN). Preluarea surplusului de putere de la (TV+GSMP) și BS în acumuloarele electrice(AE) se realizează până la atingerea unei stări de încărcare (SOC) de 100%, stare estimată prin valoarea tensiunii la bornele AE. Transferul de putere din AE în rețea se face prin intermediul convertorului DC-AC1. Tensiunea la AE este în jurul tensiunii nominale (12.24[-V-] sau $k \cdot 12$). Preluarea surplusului de putere (de la GSMP și BS) în supercondensatoarele SC se face prin încărcarea succesivă acestora la tensiunea U_{off} .

Transferul de putere de la SC în rețea se face prin convertorul DC-AC2 într-un timp mult mai scurt. În acest mod AE și SC funcționează în mod separat. Supercondensatoarele SC se folosesc la puteri mici, unde și momentele de inerție mecanice sunt mici și deci rafalele de vânt influențează semnificativ valorile vârfurilor de putere. La puteri de ordinul MW folosirea SC nu se justifică și deci sistemul de stocare conține numai AE[75]. Sistemele electroenergetice integrate soare-vânt oferă o soluție de mare perspectivă în asigurarea necesarului de energie electrică mereu ascendent. Desigur implementarea acestor sisteme bazate pe energii regenerabile trebuie să aibă la bază studii aprofundate și de lungă durată privind radiația solară și vitezele medii ale vântului, știut fiind faptul că, de exemplu, sistemele electroenergetice eoliene devin rentabile economic doar la viteze medii multianuale ale vântului mai mari de 3 [m/s] [2,5,6,7].

Sistemele electroenergetice eoliene

Problema funcționării sistemului turbină de vânt+generator sincron, (TV+PMSG), este complexă sub următoarele aspecte:

1. variația vitezei vântului în timp este imprevizibilă [10,14,16];
2. valorile maxime și minime ale vitezei vântului sunt semnificative, deci domeniul de reglaj este mare [2,3];
3. captarea unei energii eoliene maxime impune un efort suplimentar tehnic și economic [5,6];
4. funcționarea în zona optimală din punct de vedere al energiei este imposibilă din cauza momentelor de inerție mari, [8,9], ceea ce face ca turația grupului TV+PMSG să nu poată urmări valorile optime prescrise (punctele de putere maximă). Pentru a funcționa în punctele de putere maximă este necesar să fie îndeplinite cel puțin una din cele două condiții:
 - viteza vântului să nu se modifice rapid în timp, sau
 - momentul de inerție echivalent să fie de valoare redusă.

În practica curentă la instalațiile eoliene care au atins ordinul MW și în condițiile reale în care viteza vântului variază semnificativ în timp, condițiile de mai sus nu pot fi realizabile [10,15].

5. la funcționarea la viteze ale vântului variabile în timp, generatorul -PMSG fiind conectat la rețeaua de tensiune și frecvență date, problemele se complică prin oscilațiile de putere ce pot să apară, oscilații ce pun în pericol stabilitatea sistemului electroenergetic [11,13];

6. acordarea reguletoarelor este mult diferită de aplicațiile industriale uzuale repetabile [12,14], (reglări ale mișcării, puterii, etc.), deoarece viteza vântului are o variație în timp imprevizibilă și deci constantele reguletoarelor trebuie să fie adaptate la noile condiții meteo de variație a vitezei vântului în timp.

Având în vedere cele de mai sus se pune problema: *la ce turație să funcționeze sistemul (tv+pmsg) pentru a se obține o valoare maximă a energiei electrice pe un interval de timp de ordinul orelor, zilelor - până când viteza vântului a scăzut sub limita funcțională admisă: 3[m/s].*

Din bibliografia consultată [1-79] nu s-a putut găsi rezolvarea la această problemă și din acest motiv, în prezenta lucrare s-a acordat o atenție deosebită acestui domeniu.

2.1. Structura sistemelor de conversie a energiei eoliene

Conversia energiei cinetice a vântului în energie cinetică de rotație se realizează de către turbina de vânt -TV- care este cuplată direct sau prin intermediul unui reductor, la un generator electric (figura 2.3). Conectarea GE la rețeaua electrică se poate face:

- direct: ieftin ,dar cu randament energetic scăzut;
- indirect: mai scumpe ca urmare a costului echipamentelor statice, dar cu randament mai mare deoarece se pot realiza strategii de conducere ce tind spre funcționarea în punctele de putere maximă, la viteze ale vântului variabile.

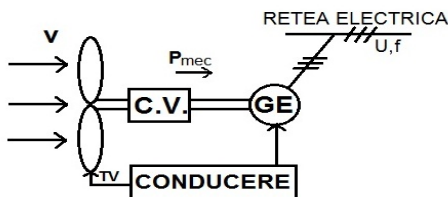


Fig 2.2. Sistem eolian cu turație constantă

În figura 2.2 generatorul electric –GE– este legat direct la rețeaua electrică de tensiune – U – și frecvență – f – ,iar în figura 2.4 indirect , cele două frecvențe pot fi diferite .

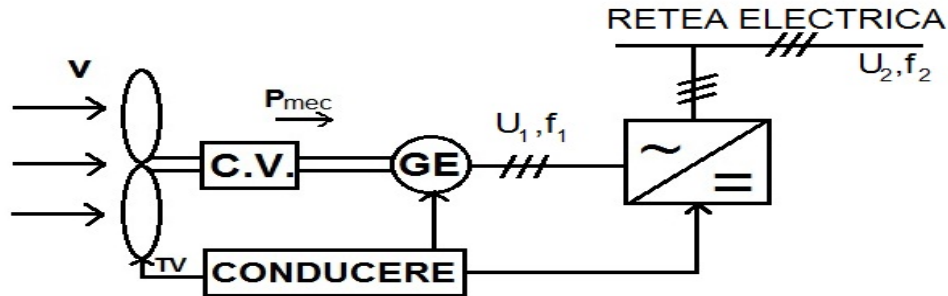


Fig 2.3.Sistem eolian cu turație variabilă

În primul caz turația generatorului este constantă ,iar în cel de-al doilea caz turația este variabilă, putându-se astfel adapta la viteza vântului care este aleatoriu variabilă în timp. În prezent sistemele de conducere eoliene ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp se construiesc în varianta a doua ,iar cele ce funcționează la o viteză a vântului aproximativ constantă, în prima variantă[29,66, 73]. În absența rețelei de tensiune și frecvență fixe, energia furnizată de GE poate fi stocată în acumuloarele electrice –AE, (figura 2.4).

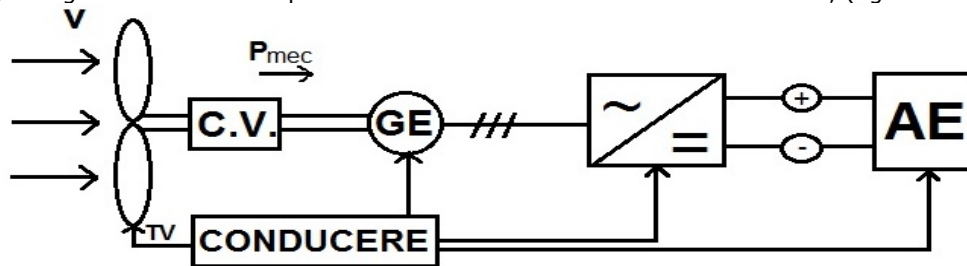


Fig 2.4. Sistem eolian debitând pe acumuloare electrice

În absența vântului energia necesară consumatorilor este dată din AE [73]. În acest caz fluctuațiile de putere, nu crează probleme consumatorilor electrice, deoarece tensiunea la AE este aproximativ constantă.

2.1.1. Configurații și caracteristici de bază ale turbinelor eoliene

Sistemul de bază care realizează conversia energiei eoliene este turbina de vânt. Există două configurații generale de bază în funcție de axa de rotație a paletelor rotorului turbinei (figura 2.5) [16,31,69]:

1. Turbine de vânt cu ax orizontal la care axa de rotație este paralelă cu direcția vântului
2. Turbine de vânt cu ax vertical la care axa de rotație este perpendiculară pe direcția vântului.

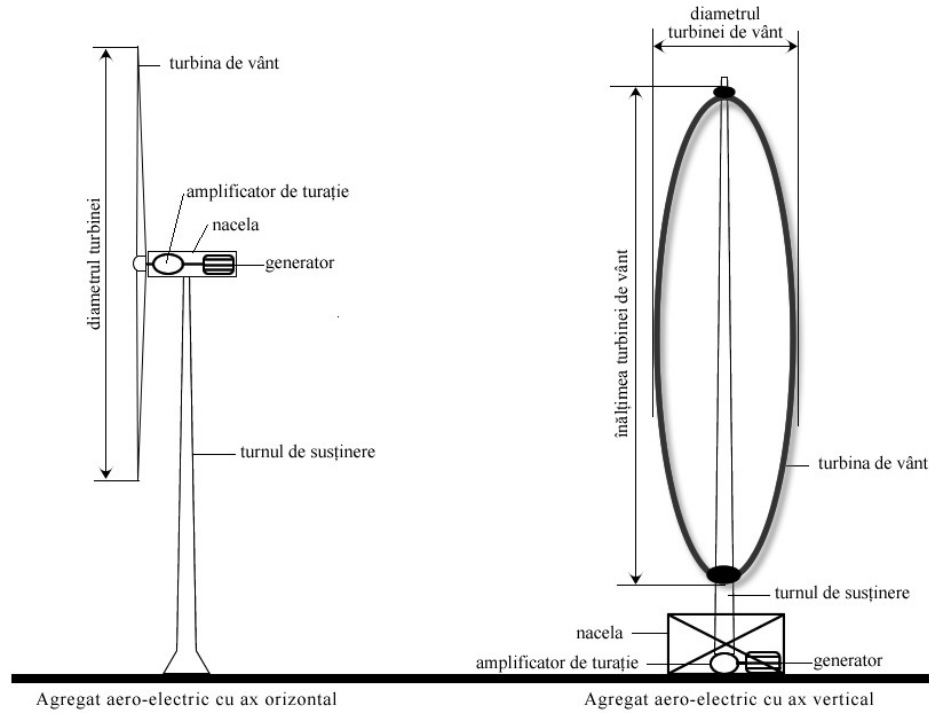


Fig 2.5 .Agregate aero-electrice

Conversia puterii de intrare a vântului (a energiei cinetice) în putere mecanică (P_{mec}) și apoi în putere electrică (P_{el}) este descrisă prin următoarele ecuații[15]:

$$P_{mec} = C_p \frac{V^3}{2} [W]$$

unde: C_p - reprezintă factorul global de putere,
 V - este viteza vântului

Sistemul care realizează conversia puterilor se prezintă schematic în figura 2.6. :

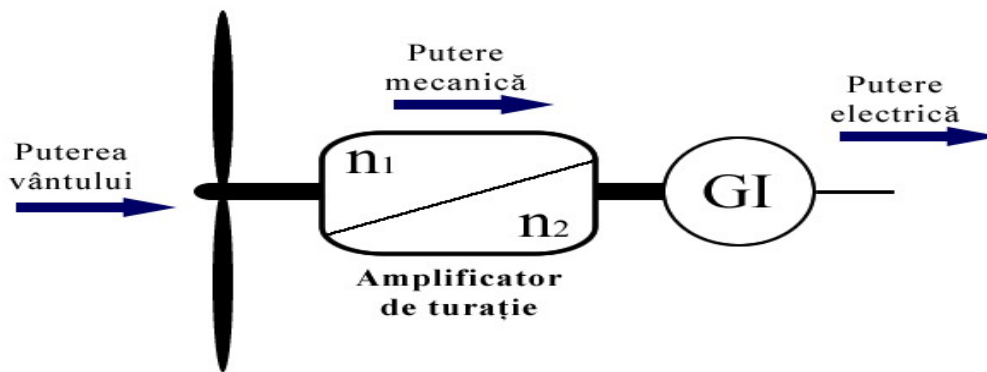


Fig 2.6. Agregat aero-electric cu GI

Puterea mecanică: P_{mec} este convertită în putere electrică P_{el} prin intermediul generatorului asincron (de inducție :GI)

2.1.2. Generatoare electrice folosite în converisa energiei eoliene

În prezent generatoarele electrice folosite în sistemele electroenergetice eoliene -SEE- sunt executate în două variante:

- Generatorul asincron
- Generatorul sincron

Generatoarele asincrone -GA- dau putere activă sunt consumatoare de putere reactivă, pot funcționa la turații variabile chiar și în absența convertoarelor statice de putere.

În practică se folosesc generatoare cu rotorul în scutcircuit, pe scară redusă, și mult mai des cele cu rotorul cu inele.

În varianta rotorului cu inele, folosită în prezent, modificarea turației se poate face relativ simplu prin folosirea unui convertor de putere în circuitul rotoric (figura 2.8).

Puterea mecanică - P_{mec} - dată de -TV- și convertită în putere electrică de către -GA- se transferă în rețea prin stator - P_1 și rotor - P_2 -, astfel se poate scrie :

$$P_{mec} = P_1 + P_2$$

Puterea transferată prin rotor în rețea - P_2 - are valoarea:

$$P_2 = M_{elmg} \cdot 2\pi n_1 \cdot |s|$$

- unde :
- M_{elmg} - cuplu electromagnetic la arborele generatorului electric;
 - n_1 - turația sincronă ($n_1 = f/p$) a GA;
 - $s = (n_1 - n) / n_1$; $|s| = (n - n_1) / n_1$ deoarece $n > n_1$ la GA;

Puterea transmisă prin stator în rețea - P_1 - are valoarea

$$P_1 = M_{elmg} \cdot 2\pi n_1$$

Prin însumare se obține :

$$P_1 + P_2 = M_{elmg} \cdot 2\pi n_1 \cdot (1 + (n - n_1) / n_1) = M_{elmg} \cdot 2\pi n$$

sau:

$$P_{mec} = M_{elmg} \cdot 2\pi n = P_1 + P_2$$

Modificarea puterii - P_2 -, prin unghiul de aprindere al tiristoarelor convertorului static -CS- se face având în vedere turația prescrisă - n -. De exemplu la o modificare a turației cu 20% puterea: - P_2 - trebuie modificată tot cu 20% ,deoarece :

$$P_2 = |s| \cdot P_1 = ((1.2 \cdot n_1 - n_1) / n_1) P_1 = 0.2 \cdot P_1$$

În această variantă convertorul static de putere -CS-, din circuitul rotorului, se dimensionează la o putere P_2 , sub valoarea lui P_1 .

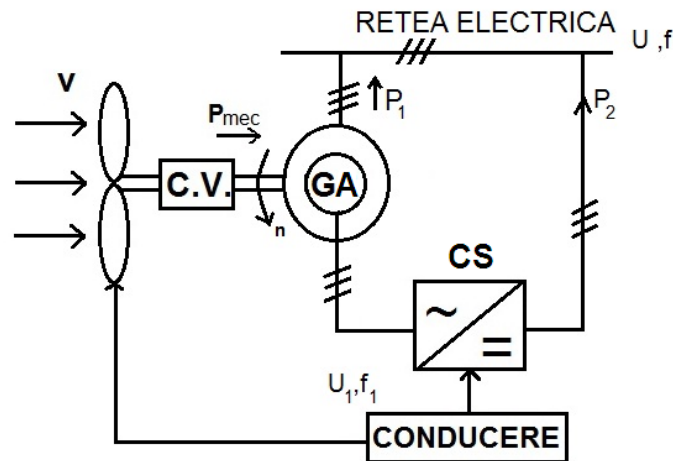


Fig2.7. SEE cu generator asincron cu inele

Generatoarele sincrone -GS- pot furniza atât putere activă cât și reactivă. Puterea activă dată de -GS- are valoarea :

$$P = 3UI \cos \varphi = M_{TV} 2\pi n_1 = P_{TV} = KV^3$$

și depinde de valoarea vitezei vântului la puterea 3.

Puterea reactivă dată de GS depinde de valoarea curentului de excitație al generatorului - I_E - are valoarea :

$$Q = 3UI \sin \varphi = KI_E$$

Turația la GS depinde de frecvența f - a tensiunii de la borne : $n_1 = f/p$ (unde $p=1,2,\dots$ numărul perechilor de poli).

La modificarea turației se modifică și frecvența f . Conectarea rețelelor de frecvență f_1 și f_2 se face prin intermediul convertorului static de putere CS (figura 2.8), dimensionat la valoarea puterii GS. Acesta este un dezavantaj față de GA reglat în rotor, la care convertorul static -CS- (figura 2.8), se dimensionează la o valoare redusă, (20-30 % din puterea generatorului). Comparând avantajele și dezavantajele ce rezultă din folosirea celor două tipuri de generatoare electrice se poate concluziona faptul că în prezent în exploatare se folosesc ambele variante, tendința de viitor fiind în favoarea GS.

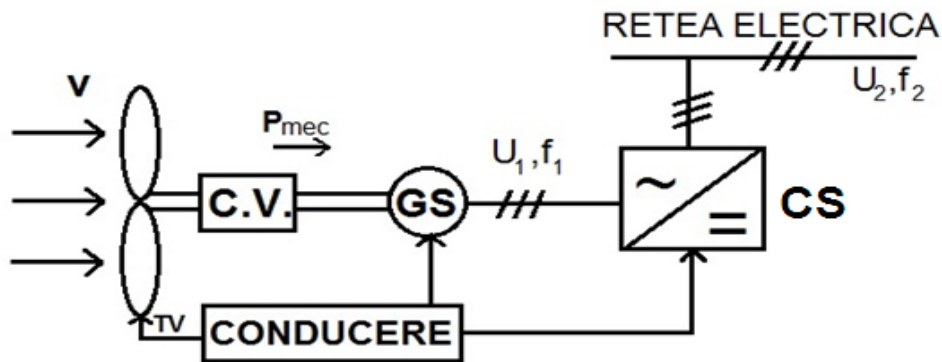


Fig 2.8. Sistem eolian cu GS

Diversele metode de conversie a energiei eoliene sunt prezentate în figura 2.9.

Varianta (a) prezintă conceptul standard utilizat de majoritatea companiilor daneze producătoare de turbine de vânt din anii 1980-1990. Aceasta topologie se referă la turbine de vânt cu viteză constantă, cu ax orizontal și trei palete, fără reglarea pasului paletelor, și cu mașini de inducție cu rotorul în colivie [11].

În perioada anilor '80 acest concept a fost îmbunătățit prin introducerea unei baterii de condensatoare pentru compensarea puterii reactive și cu un soft-starter pentru reducerea curenților tranzitorii de pornire și implicit pentru o conectare la rețea mai lină fără șocuri de curent (varianta b) [21]. În varianta (c) [28] bateria de condensatoare și soft-starterul au fost înlocuite de un convertor de frecvență.

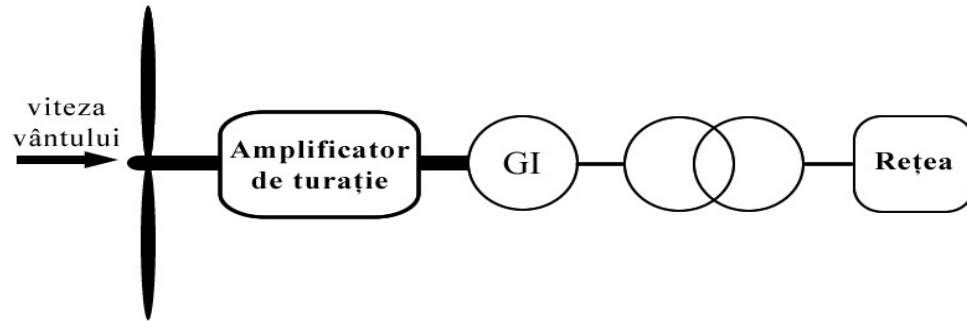
Configurația descrisă de varianta (d) [38] utilizează mașini de inducție cu rotorul bobinat și a fost utilizată de compania daneză, Vestas, încă de la mijlocul anilor '90. Ideea de bază a acestui concept numit Optislip, este să extindă domeniul de reglare al vitezei cu până la 10%, prin introducerea unui reostat variabil extern, controlat de un chopper, reducându-se șocurile electrice (de curent) și mecanice (la rotor).

Variantele (e) și (f) [48] prezintă 2 topologii de turbine eoliene cu viteză variabilă utilizând generatoarele de inducție cu dublă ieșire alături de diferite configurații de conversoare statice de frecvență. Varianta (f) necesită strategii performante de control permițând reglajul fluxului de putere activă și reactivă în toate cele 4 cadrane [31]. Această variantă este cel mai des utilizată astăzi în conversia energiei eoliene datorită avantajelor incontestabile, cum ar fi: puterea convertorului având o rată de putere de (20-30) % din puterea mașinii este mai ieftin și permite fluxul de putere în ambele sensuri, iar prin aceasta extinderea domeniului de viteză cu până la 70 % față de viteza de sincronism.

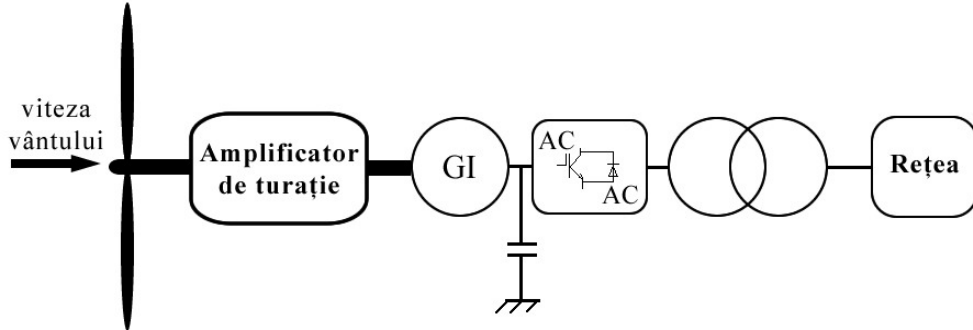
Pentru sistemele de conversie a energiei eoliene fără amplificator de turație sunt utilizate în prezent doar generatoare sincrone, cu excitație (j) sau cu magneți (k), (există și propuneri de utilizare a generatoarelor asincrone) [56,66]. Soluțiile (k) sunt utilizate mai ales pentru puteri reduse (sub 50 kW) și au în componență și o baterie pentru stocarea surplusului de energie. De asemenea aceste topologii sunt utilizate în sisteme hibride pentru locuri izolate. În anul 2000 compania ABB [67] a propus un sistem de conversie a energiei eoliene bazat pe aceste concepte,

un generator eolian de 3.5 MW cu generatoare sincrone cu magneți permanenți și număr mare de poli și un redresor cu diode.

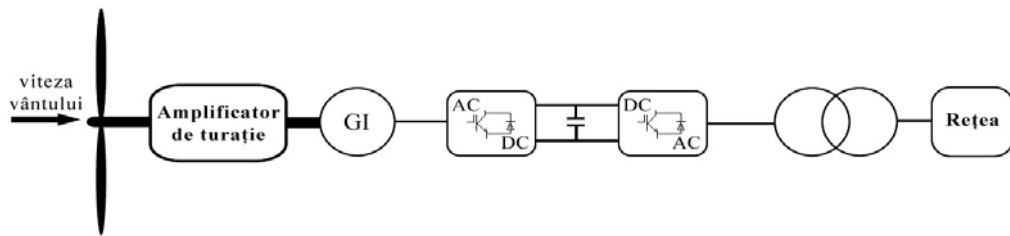
a)



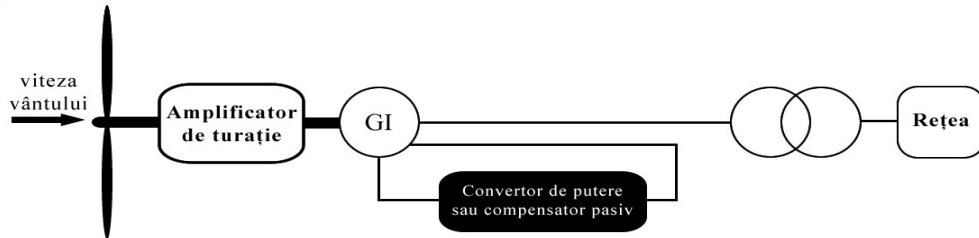
b)



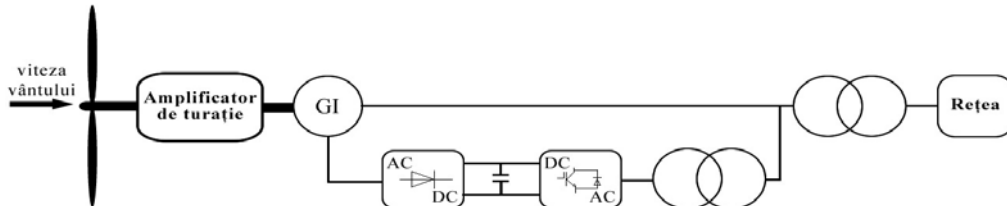
c)

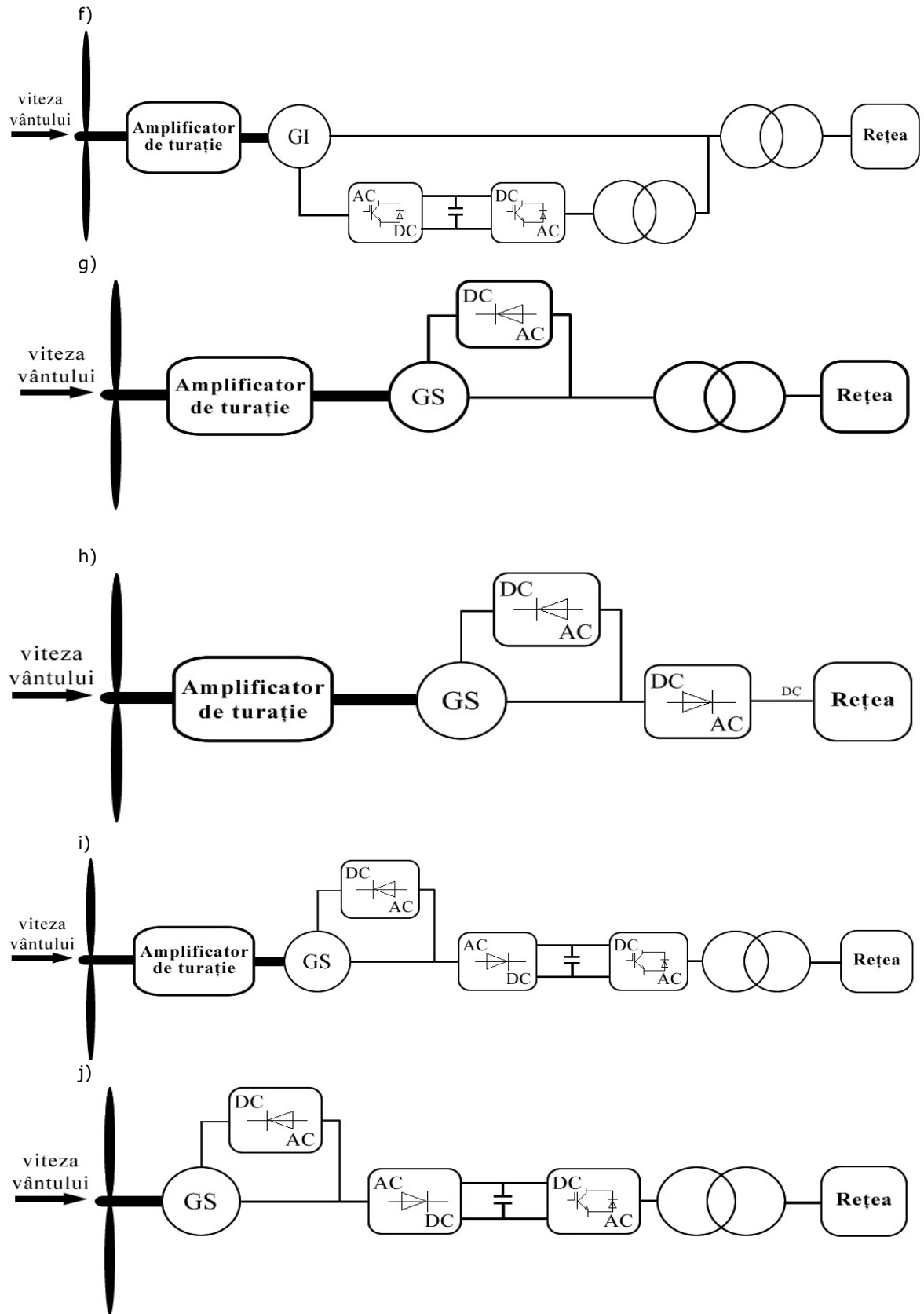


d)



e)





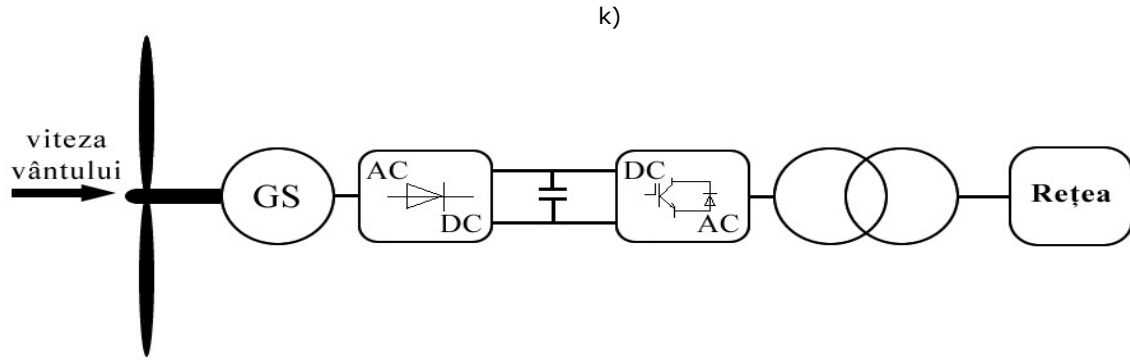


Fig 2.9. Configurații actuale de sisteme eoliene

Variantele (g, h, i) [77,78] reprezintă configurațiile unor turbine de vânt cu generatoare sincrone și cutie de viteze având diferite topologii de convertoare statice. Variantele (g, h) au în componență redresoare cu tiristoare sau diode, iar varianta (i) oferă suplimentar în componență un convertor de frecvență pentru asigurarea vitezei variabile. Aceste configurații de turbine eoliene nu sunt încă frecvent utilizate datorită dezavantajelor, cum ar fi : greutate mare, necesitatea unui circuit de comandă suplimentar pentru excitație, strategie de control complexă și un cost ridicat.

2.1.3.Reglarea puterii la A.A.E.

Deoarece intensitatea vântului este variabilă, este de dorit ca turbina să funcționeze la viteză variabilă pentru a fi capabilă să producă maximum de putere.

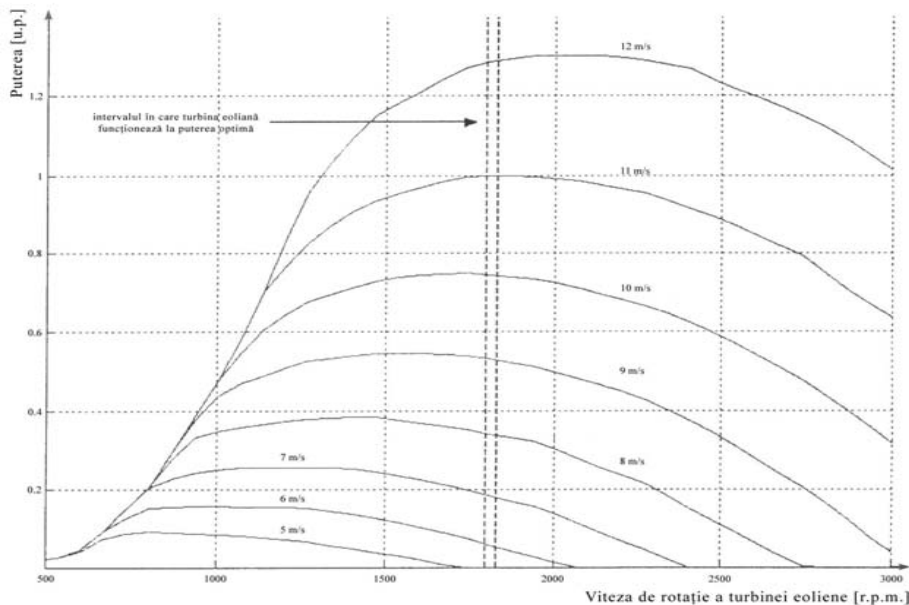


Fig 2.10. Modificarea puterii cu viteza vântului

Fiecărei curbe de variație a puterii de ieșire (puterea aerodinamică) funcție de o anumită viteză a vântului, îi corespunde un anumit punct de funcționare al turbinei la eficiență maximă (figura 2.10).

Puterea extrasă din vânt este direct proporțională cu cubul vitezei vântului:

$$P = k_1 \cdot V^3$$

unde:

P - este puterea aerodinamică,
V - este viteza vântului,

Cuplul la arborele rotorului are valoarea:

$$M = k_2 \cdot V^3$$

unde:

k_1, k_2 - sunt constante.

A.A.E. sunt proiectate în general pentru a produce putere electrică de la o viteză a vântului de 3-3.5 m/s până la o viteză a vântului de 20-25 m/s. Dacă vântul este mai puternic este necesar să se renunțe la excesul de energie care s-ar putea produce pentru a evita distrugerea turbinei.

Toate variantele de A.A.E. sunt, construite cu diferite moduri de control al puterii în funcție de tipul generatorului electric, de puterea acestuia, și/sau de locul unde este plasată turbina eoliană.

Cele mai frecvent utilizate metode (figura 2.11), care au ca scop utilizarea unui control cât mai simplu și eficient aplicabil ultimelor generații de A.A.E. sunt [21,53,56,75,77,79]:

1. Pitch Controlled: reglarea pasului elicei, caz în care unghiul paletelor rotorului poate fi reglat activ (online) de către sistemul de control al turbinei;

2. Stall Controlled: controlul limitării puterii turbinei:

- passive stall: controlul pasiv al limitării puterii -- soluție în care turbina nu conține nici o parte în mișcare și se bazează pe proprietățile aerodinamice inerente ale paletelor care determină puterea de ieșire (puterea aerodinamică) produsă de turbină;
- active stall: controlul activ (în timp real) al blocării paletelor la un anumit unghi în funcție de viteza vântului, combină avantajele oferite de controlul pasiv cu avantajele realizate prin controlul relativ al pasului elicelor (pitch control).

Controlul "pasive stall" de așezare a paletelor la un anumit unghi, constant pe direcția vântului, se bazează pe caracteristicile inerente ale turbinelor în sensul că puterea aerodinamică este limitată când viteza vântului crește peste valoarea nominală pentru care turbina a fost proiectată până la valoarea maximă a vitezei (20-25 m/s), iar turbina va fi oprită la această valoare mare a vântului.

Unele din principalele avantaje ale acestui tip de control este că evită părțile în mișcare ale rotorului și este realizat foarte simplu fără existența unui mecanism care să poată fi comandat activ (în timp real) pentru a putea opri turbina, fiind realizat astfel cu un cost scăzut.

Pe de altă parte controlul pasiv cu unghi fix de așezare a paletelor turbinei reprezintă o problemă complexă a designului aerodinamic. În jur de 2/3 din turbinele instalate în lume până în 2001 utilizează acest tip de control.

Controlul "active stall" al turbinelor cu turație constantă (sau variabilă), combină avantajele controlului pasiv, cu avantajele controlului puterii prin reglarea pasului paletelor. Astfel se realizează un control mai eficient decât controlul pasiv, destinat în special turbinelor de putere mare (figura 2.11).

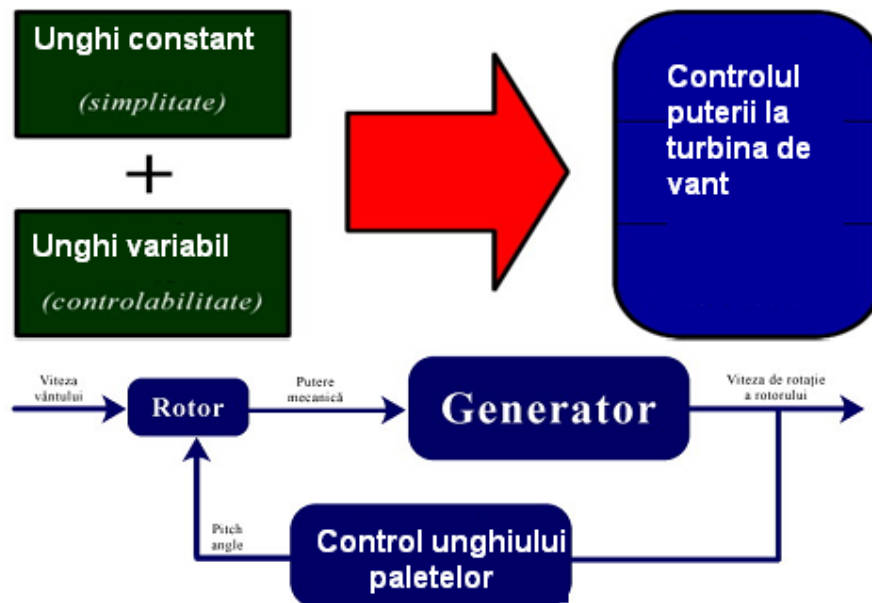


Fig 2.11. Structura de conducere

Paletel rotorului sunt rotite ușor de-a lungul axei lor longitudinale. Acest lucru e făcut pentru a realiza rotirea gradată a paletelor rotorului turbinei de fiecare dată când viteza vântului crește la valori critice ($v = 25-30$ m/s).

Creșterea numărului de instalații (uzine) cu turbine de vânt care utilizează generatoare de inducție cu puteri foarte mari (>1 MW) a fost posibilă prin utilizarea unui mecanism de comandă a puterii turbinelor controlate prin active stall. Din punct de vedere tehnic acest mecanism este asemănător celui de reglare a pasului relativ al elicelor capabil să modifice unghiul de atac al paletelor la fiecare modificare a intensității vântului.

Pentru a obține un cuplu de antrenare suficient de mare la o viteză relativ mică a vântului, turbinele sunt de obicei programate să regleze pasul de rotire a paletelor turbinei la valori foarte mici.

Dacă generatorul ajunge aproape la suprasarcină, mecanismul de reglare al paletelor trebuie să rotească paletel în direcția opusă de până atunci, cu alte cuvinte va crește unghiul de atac (reglare) al paletelor.

2.1.4. Structura unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic

Structura unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic este prezentată în figura 2.12.

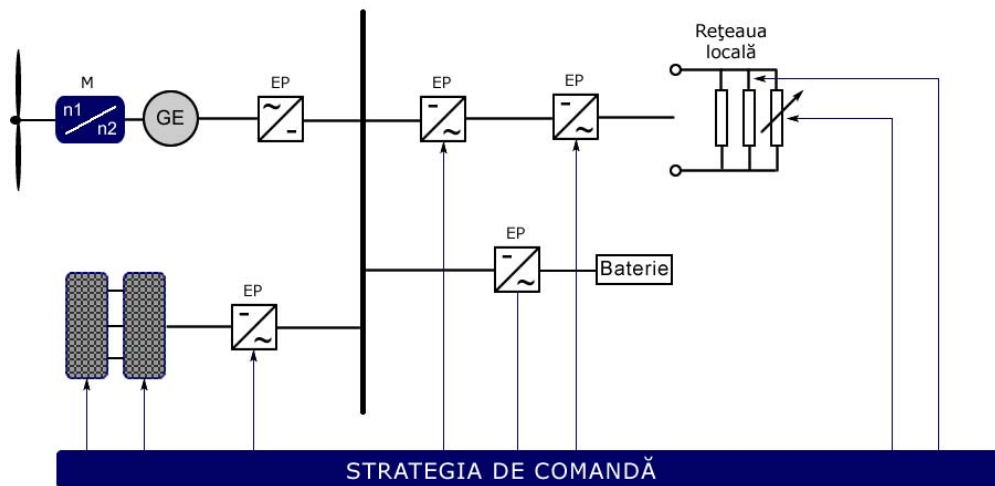


Fig 2.12. Sistemul hibrid eolian-fotovoltaic

Sistemul hibrid eolian-fotovoltaic realizează conversia energiei eoliene respectiv a energiei solare în energie electrică. Sistemul este compus dintr-un generator sincron cu magneți permanenți GE, o turbină eoliană cu viteză variabilă, un grup de panouri fotovoltaice, și un sistem de baterii cu rol de acumulare a surplusului de energie.

La sistemele cu turbine eoliene puterea activă depinde de viteza vântului la puterea a treia. Din acest motiv puterea activă este fluctuantă și se poate folosi doar între anumite limite (ex: firma VESTAS produce turbine eoliene funcționând între 5m/s și 25m/s).

Sub 5m/s, viteză a vântului, funcționarea nu este posibilă, deoarece puterea vântului nu acoperă pierderile de putere. Peste 25m/s funcționarea devine nesigură (această viteză a vântului este specifică furtunelor).

În zona Moldova Nouă-Baziaș sunt locații unde media anuală a vitezei vântului este foarte ridicată (în jur de 15m/s).

Acumulatorii electrice nu sunt surse de energie primară și doar de stocare a energiei electrice. Sistemele cu acumulatori sunt scumpe și puțin fiabile (durata de viață a unui acumulator cu plumb este sub 10 ani-2 ani garanție oferă firmele de acumulatori, față de 30 de ani cât poate să funcționeze în mod continuu un generator electric).

Bateriile solare devin din ce în ce mai atractive. În prezent sunt totuși scumpe și se justifică doar în zonele cu media zilelor senine mare (între Ecuator și Paralela 45). Energia obținută de la Soare este fluctuantă și cu o densitate redusă: $1 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ la insolație maximă.

Puterea reactivă

Puterea reactivă din sistem se obține de la:

- **generatoarele sincrone;**
- **bateriile de condensatoare** (și liniile electrice aeriene sunt condensatoare);
Consumul de putere reactivă are loc în elementele inductive care sunt:
- consumatori rezistivi-inductivi(motoare asincrone);
- generatoarele asincrone(puterea necesară magnetizării).

Generatoarele sincrone supraexcitate (și compensatoarele sincrone) sunt principala sursă de putere reactivă din sistemele electroenergetice.

Din mărirea sau micșorarea curentului de excitație la mașinile sincrone (deci atât la generatoare cât și la motoarele sincrone) se poate modifica puterea reactivă schimbată de mașină cu rețeaua.

Bateriile de condensatoare sunt foarte utile în sistemele izolate și unde nu se dispun de mașini sincrone.

Au câteva dezavantaje importante:

1. amplifică amplitudinile curenților armonicii de ordinul superior deoarece reactanța capacitivă se micșorează cu creșterea frecvenței (la armonica 3,de exemplu,este de 3 ori mai mică ;
2. Puterea reactivă furnizată în sistem depinde de pătratul tensiunii electrice din sistem și deci în regimul de avarie,(scurtcircuite,deconectări,conectări de mari consumatori),este puternic influențată de valoarea tensiunii care suferă modificări importante.

Trebuie menționat faptul că în prezent,s-au realizat condensatoare la gabarite reduse, de capacități foarte mari pe baza unor dielectrics cu permitivități foarte mari (de ordinul milioane). Aceste condensatoare se folosesc mai ales în sistemele izolate de producere a energiei electrice și mai puțin în stațiile electrice unde compensatoarele sincrone, așa cum s-a menționat mai sus ,sunt cele mai folosite deoarece permit un reglaj simplu și rapid al puterii reactive.

Analizând evoluția ultimilor ani se poate trage concluzia că pe plan mondial dezvoltarea energetică s-a făcut și prin atragerea surselor regenerabile de energie și în principal energia eoliană și cea solară. Acestea având, însă, un caracter oscilant se impune stocarea energiei obținute de la soare și vânt pentru perioadele în care captarea acestor energii este foarte mică sau chiar deloc: noaptea, sau la viteze mici ale vântului. După hidroenergie, energia eoliană și cea solară prezintă cea mai mare rată de integrare, atât în România cât și la nivel mondial.

2.2. Concluzii

În contextul ultimilor ani, analizând evoluția piețelor energetice precum și factorii de natură economică, politică și de mediu care influențează această evoluție, principalele cerințe cu privire la energie pot fi sintetizate astfel: energia să fie curată, sigură, disponibilă pentru toți și prețul ei să fie competitiv.

Sub aceste aspecte, asigurarea securității energetice și continuarea procesului de dezvoltare a societății, presupune urmărirea a două direcții: fie creșterea eficienței în utilizarea combustibililor fosili (în condițiile în care cărbunele rămâne combustibilul principal), fie utilizarea pe scară largă a energiei obținute din surse regenerabile.

Utilizarea pe scară largă a SRE reprezintă principala direcție ce este urmată deoarece determină creșterea gradului de siguranță energetică atât pentru prezent, cât mai ales pentru viitor.

Din multitudinea de SRE, chiar și în condițiile unor costuri inițiale destul de mari, energia eoliană prezintă cea mai mare rată de integrare și utilizare în SEE actuale, după hidroenergie, atât la nivel global cât și în România.

Contribuția personală se referă la realizarea unei prezentări sistematizate a SRE. Sinteza a cuprins definirea termenului de sursă regenerabilă de energie, prezentarea acestor particulare care definesc fiecare sursă în parte, precum și stadiul actual al utilizării acestora la nivel mondial și la nivelul României. De asemenea s-au prezentat aspecte particulare privind utilizarea SRE în cadrul tehnologiilor de producere distribuită, utilizate în cadrul rețelelor de distribuție.

Contribuția personală se referă la realizarea unei documentații la zi privind sursele regenerabile cu specificarea aspectelor particulare ce definesc fiecare sursă în parte. Stadiul actual al utilizării surselor regenerabile soare-vânt pe plan mondial și în România demonstrează interesul pentru abordarea acestui aspect. Contribuțiile personale ale autorului în acest capitol sunt:

- analiza integrării surselor regenerabile de energie în România și pe plan mondial;
- studiu bibliografic sistematizat referitor la sursele regenerabile de energie, în principal soare-vânt;
- analiza oportunității folosirii sistemelor de stocare pe bază de acumulate electrice și supercondensatoare;
- folosirea unor medii de soft destinate aplicațiilor matematice.
- prezentarea într-o manieră proprie, graduală a aspectelor privind piața actuală de energie electrică și a factorilor care determină utilizarea și integrarea pe scară largă a SRE;
- s-a realizat un studiu bibliografic sistematizat referitor la stadiul actual al utilizării la nivel mondial al SRE;
- s-au evidențiat principalele aspecte care definesc energia eoliană ca principala sursă regenerabilă de energie din punct de vedere al investițiilor și integrării în SEE.

3. ANALIZA SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE

Scopul capitolului 3 constă în a realiza o sinteză a principalelor aspecte ce privesc integrarea surselor regenerabile de energie de putere mare în sistemele electroenergetice actuale. Se analizează energia eoliană și implicit centralele electrice eoliene (CEE). Sunt prezentate atât problemele legate de epuizarea combustibililor fosili cât și implicațiile tehnice, economice și de mediu legate de sursele regenerabile de energie.

Sunt analizate problemele energetice globale și cele specifice României. O atenție deosebită se acordă protejării mediului mai ales ca acesta este semnificativ poluat de sectorul energetic.

În UE și România politicile energetice sprijină în mod semnificativ implementarea energiilor regenerabile în principal energia eoliană și cea solară.

3.1. Considerații preliminare

În condițiile în care cererea de energie este în continuă creștere utilizarea surselor regenerabile de energie, (SRE), în principal cea eoliană și cea solară, alături de cea hidraulică, devenită clasică, este soluția pentru a asigura necesarul de energie și funcționarea în condiții de siguranță și eficiență ridicată a sistemelor electroenergetice.

Se analizează principalele tipuri de surse de energie și caracteristica lor comparativă.

Potențialul surselor regenerabile de energie din România este ridicat și din acest motiv se justifică susținerea extinderii folosirii energiei eoliene. Avantajele folosirii acestei forme de energie este semnificativ în relația cu mediul ambiant.

3.2. Principalele tipuri de surse de energie și caracteristica lor comparativă

În etapa actuală omeni beneficiază, în fond, de trei categorii de surse de energie, bazate respectiv pe:

- arderea combustibililor fosili (cărbune, petrol, gaze);
- fisiunea nucleară;
- captarea și conversiunea energetică regenerabilă (energia solară, energia vântului, energia potențială a apelor, energia geotermală etc.).

Aceste trei categorii de surse se deosebesc considerabil prin:

- capacitatea lor de a produce energie în condițiile și în perioadele de timp solicitate;
- prețul energiei produse;
- gravitatea impactului asupra mediului ambiant. (*Univ)

a) Combustibili fosili

Pe parcursul ultimelor două secole au servit drept bază a energiei moderne, constituind suportul energetic al industrializării și al progresului tehnico-științific înregistrat în perioada menționată. Astăzi circa 90% din cererea globală de energie e satisfăcută prin utilizarea combustibililor fosili.

Valoarea calorică mare, posibilitatea stocării în cantitățile necesare pentru utilizare la locul și în timpul preconizat constituie avantajele de bază care au determinat folosirea atât de masivă a acestui tip de combustibil.

Există însă, numeroase dezavantaje caracteristice pentru aceste resurse energetice, printre care două, cu cele mai grave consecințe:

- volumul limitat al rezervelor explorabile de combustibili fosili;
- impactul puternic asupra mediului ambiant, trecut sub tăcere într-un trecut nu prea îndepărtat, pune sub semnul întrebării însă și posibilitatea existenței într-un viitor apropiat a energiei bazate pe arderea combustibililor fosili.

Zăcămintele de petrol, gaze naturale și cărbune, într-adevăr sunt limitate și, într-o perioadă scurtă, acestea pot fi epuizate (Tabelul 3.1.). Chiar și la o rată constantă a consumului, egală cu cea actuală, rezervele globale de petrol se vor epuiza în 40-50 ani; gazele naturale vor putea acoperi necesitățile energeticii globale pe o perioadă la fel de scurtă (60-70 ani). Rezervele de cărbune sunt ceva mai mari, însă este greu să ne imaginăm o energetică modernă bazată pe

cărbune cu toate problemele legate de extragerea, transportarea și folosirea acestuia sau un transport al secolului XXI ce folosește drept combustibil cărbunele.

Tabelul 3.1.

Rezervele globale de resurse energetice

Tipul de resurse	Rezerve naturale*, Gtep	Producție mondială	Rezerve, ani
Petrol	140	3,45	40
Gaze naturale	135	2,2	64
Cărbune****	984205	2,2	155
Uraniu**	40->2000	0,34	60->2500***

- * economic explorabile;
- ** în funcție de tehnologia utilizat ;
- *** pornind de la un consum de 0,65 Gtep;
- **** milioane tone.

A doua cauză care va determina apusul energiei, bazate pe utilizarea combustibililor fosili cu mult înainte de epuizarea rezervelor de aceste resurse este impactul asupra mediului. Procesul de ardere a cărbunelui, petrolului și a gazelor naturale este însoțit de emisii considerabile de bioxid de carbon (CO₂), bioxid de sulf (SO₂), oxizi de azot (NO_x), alte gaze și particule solide poluante (Tabelul 3.2.).

Energetica, cu un consum enorm de combustibili fosili, este responsabilă de schimbarea echilibrului de bioxid de carbon în atmosferă, gaz cu cel mai pronunțat efect de seră. În plus, bioxidul de sulf și oxizii de azot cauzează ploile acide, cu o influență distrugătoare asupra pădurilor și agriculturii.

Tabelul 3.2.

Emisiile specifice de gaze și substanțe poluante rezultate la arderea combustibililor fosili

Poluant	g/kWh
CO ₂	480-960
SO ₂	0,35-16
NO _x	0,9-5,6
Zgură	56
Praf	0,2

b) Energia nucleară

Era energiei nucleare începe în anii '70 ai secolului XX, cunoaște o dezvoltare spectaculoasă și mult promițătoare în anii '80, cucerind, la sfârșitul anilor '90, electroenergetica celor mai dezvoltate țări europene, a Statelor Unite ale Americii și Canadei.

Catastrofa de la Centrala nucleară de la Cernobîl (1986) a pus sub un mare semn de întrebare viitorul energiei bazate pe fisiunea nucleară. Riscul unor eventuale explozii amplificat de extinderea terorismului internațional, problema colectării, depozitării și prelucrării deșeurilor radioactive, provenite de la centralele nucleare, problema conservării centralelor după expirarea termenului de exploatare au determinat ca marile țări ale lumii să stopeze programele nucleare și să sisteze construcția de noi grupuri nucleare-electrice.



Fig. 3.1. Centrala nucleară de la Cernobâl, Ucraina



Fig. 3.2. Centrala nucleară de la Gundremmingen, Germania

Funcționarea centralelor nucleare nu este însoțită de emisii de gaze nocive, iar rezervele de materie primă nucleară sunt suficiente pentru multe secole de acum înainte. Pe termen lung, energetica nucleară are șanse de a-și restabili poziția sa deloc neglijabilă, îndeosebi în producerea energiei electrice, dar aceasta se va întâmpla doar după elaborarea unor tehnologii noi, capabile să asigure atât funcționarea sigură a centralelor, cât și prelucrarea deșeurilor radioactive.

c) Sursele regenerabile sunt sursele care se regenerează pe măsură ce sunt consumate.

Cele mai importante surse regenerabile de energie (SER) sunt:

- energia vântului (eoliană);
- energia soarelui;
- energia hidrolică a râurilor;
- energia fluxurilor-refluxurilor și a valurilor mării;
- energia geotermală;
- energia biomasei.

Criteriile principale care determină perspectivele exploatării surselor de energie regenerabile sunt:

- răspândirea destul de uniformă pe întregul glob și accesul la utilizarea lor al majorității țărilor lumii;
- aflarea lor în apropierea locului de consum și, ca urmare, lipsa necesității de a transporta energia la distanțe mari;
- accesul populației atât la producerea, cât și la folosirea energiei;
- majoritatea surselor de energie regenerabile sunt nonpoluante.

Aceste avantaje importante au determinat țările industrializate, dar și multe state în curs de dezvoltare, să edifice treptat un sistem energetic nou, care să ia în calcul și sursele de energie netradiționale.

Dezavantajele care au reținut un timp îndelungat implementarea pe scară largă a acestora sunt:

- energia regenerabilă este dispersată, ceea ce determină costuri mari ale instalațiilor de producere a energiei finale, destinate pentru consum;
- neuniformitate de distribuție în timp;
- lipsa posibilităților de stocare, de formare a rezervelor.

Datorită progreselor mari din ultimele două decenii, tehnologiile și instalațiile de producere a energiei electrice și termice din sursele de energie regenerabilă pot concura, din punct de vedere economic, cu cele tradiționale>(*SER)

Începută cu circa 30 de ani în urmă, utilizarea energiilor regenerabile în special a energiei solare, eoliene, apelor geotermale și a mareelor, provocată de prima criză a petrolului din 1972, a ajuns în prezent să reprezinte un procent important din balanța de furnizare a energiei în multe țări ce posedă potențial în acest domeniu.

Dintre aceste țări amintim:

- 1) Suedia : hidro 55%,
- 2) Islanda : hidro 17%, geotermală 55%
- 3) Elveția : hidro 43%
- 4) Turcia : biomasă 9%, geotermală 1%
- 5) Germania : eoliană 40% din capacitatea mondială

Este incontestabil faptul că, pe viitor, aceste surse vor fi o parte componentă importantă a sistemelor energetice.

Se prevede faptul că în anul 2020 sursele regenerabile de energie să acopere până la 12% din consumul mondial de energie, iar energetica mondială va cunoaște o creștere importantă a ponderii energiei regenerabile, odată cu scăderea considerabilă a ponderii energiei obținute prin arderea combustibilului fosil.

Actualul consum mondial de energie constituie circa 9400 Mtep (megatone echivalent petrol). Astfel că până în anul 2050 se așteaptă o dublare a consumului mondial de energie, în paralel cu creșterea populației. (*Univ)

3.3. Potențialul surselor regenerabile de energie din România

a) Energia solară

Potențialul energetic solar este dat de cantitatea medie de energie provenită din radiația solară incidentă în plan orizontal care, în România, este de circa 1100 kWh/m²-an.

Harta radiației solare din România s-a elaborat pe baza datelor medii multianuale înregistrate de Institutul Național de Meteorologie și Hidrologie (INMH), procesate și corelate cu observații și măsurători fizice efectuate pe teren de instituții specializate.

În România s-au identificat cinci zone geografice (0 - IV), diferențiate în funcție de nivelul fluxului energetic măsurat. Distribuția geografică a potențialului energetic solar relevă că mai mult de jumătate din suprafața României beneficiază de un flux anual de energie cuprins între 1000 kWh/m²-an și 1300 kWh/m²-an.

Tabelul 3.3.

Distribuția potențialului energetic solar din România

Zona	Potențial energetic solar înregistrat
0	Peste 1250 kWh/m ² -an
I	1250 kWh/m ² -an – 1150 kWh/m ²
II	1150 kWh/m ² -an – 1050 kWh/m ²
III	1050 kWh/m ² -an – 950 kWh/m ²
IV	Sub 950kWh/m ² -an

Sursa: Studii de cercetare-dezvoltare ICEMENERG

Aportul energetic al sistemelor solare-termale la necesarul de căldură și apă caldă menajeră din România este evaluat la circa 1434 mii tep (60 PJ/an), ceea ce ar putea substitui aproximativ 50% din volumul de apă caldă menajeră sau 15% din cota de energie termică pentru încălzirea curentă.

b) Energia eoliană

În România sunt cinci zone distincte (I - V) în funcție de potențialul eolian, cu cele mai semnificative zone în Dobrogea sau sudul Banatului. În zonele montane există potențial eolian dar valorificarea lui este dificilă din cauza condițiilor dure de relief.

Fluctuațiile de energie fiind mari se impune o stocare hidro sau în acumulatori electrice.

Viteza medie multianuală a vântului de peste 3 m/s le face rentabile din punct de vedere economic.

Elemente tehnico-economice de exploatare a potențialului energetic al zonelor eoliene din România

Zona topogeografică \ Viteză, energie	Montană înaltă (m/s; W/m ²)	Mare deschisă (m/s; W/m ²)	Zona litorală (m/s; W/m ²)	Terenuri plate (m/s; W/m ²)	Dealuri și podișuri (m/s; W/m ²)
I	>11,0; >1800	>9,0; >800	>8,5; >700	>7,5; >500	>6,0; >250
II	10,0-1,5; 1200-1800	8,0-9,0; 300-800	7,0-8; 400-700	6,5-7,5; 300-500	5,0-6,0; 150-250
III	8,5-10,0; 700-1200	7,0-8,0; 400-600	6,0-7,0; 250-400	5,5-8,5; 200-300	4,5-5,0; 100-150
IV	7,0-8,5; 400-700	5,5-7,0; 200-400	5,0-6,0; 150-250	4,5-5,5; 100-200	3,5-4,5; 50-100
V	<7,0; <400	<5,5; <200	<5,0; <150	<4,5; <100	<3,3; <50

(Sursa: ICEMENERG)

c) Energia obținută în microhidrocentrale

În amenajări de mică putere hidroenergetice se obțin anual în jur de 6000 GWh/an, comparativ cu energia obținută în hidrocentrale de mare putere care dau peste 34000 GWh/an.

d) Biomasa

Potențialul de biomasă se estimează a fi în România de 7594 mii tone petrol echivalent.

Biomasă se găsește:

- reziduri forestiere și din lemn de foc
- rumeguș din industria mobilei
- deșeuri agricole, porumb și alte cereale
- biogaz
- deșeuri urbane

Cantitatea de căldură rezultată din valorificarea energetică a biomasei deține ponderi diferite în balanța resurselor primare, în funcție de tipul de deșeuri utilizat sau după destinația consumului final.

Astfel, 54% din căldura produsă pe bază de biomasă se obține din arderea de reziduri forestiere sau 89% din căldura necesară încălzirii locuințelor și prepararea hranei (mediul rural) este rezultatul consumului de reziduri și deșeuri vegetale.

Tabelul 3.5.

Consumul de biomasă în balanța resurselor energetice primare

Specificații	u.m/an	1996	1997	1998	1999	2000
Consum total produse primare	PJ (MJ)	2341 (234x10 ⁹)	2146 (2146x10 ⁹)	1934 (1934x10 ⁹)	1666 (1666x 10 ⁹)	40390,0 mii tep (1689x10 ⁹)
Consum de biomasă	PJ (MJ)	205 (205x10 ⁹)	141 (141x 10 ⁹)	127 (127x 10 ⁹)	118 (118x 10 ⁹)	2772,5 mii tep (116x 10 ⁹)
Pondere biomasă	%	8,76	6,57	6,56	7,10	6,87

Sursa: Institutul Național al Lemnului (INL)

Valorificarea biomasei necesită costuri mai mici în raport cu combustibilii fosili.

În România, consumul în ultimii ani a înregistrat o diminuare datorită extinderii rețelei de gaze naturale sau GPL.

e) Energia geotermală

În România energia geotermală se bazează pe surse cu temperaturi cuprinse între 25°C și 60°C (în ape de adâncime), iar la temperaturi medii variază de la 60°C până la 125°C ("ape mezotermale").

Se folosesc sursele geotermale în sere, spații de învățământ, spații comerciale sau ferme agroindustriale.

Se forează la adâncimi de aproximativ 3300 m în diverse zone din țară.

Din cauza lipsei suportului financiar dezvoltarea instalațiilor geotermale se face în ritm lent și este posibil prin schimbarea legislației să se realizeze o mărire a valorificării potențialului geotermal.

În tabelul 3.6 se dau tipurile de resurse regenerabile din România.

Dezvoltarea regională cu asigurarea normelor restrictive de protecția mediului favorizează energiile regenerabile și conduc la diminuarea gazelor cu efect de seră.

Tabelul 3.6.

Potențialul energetic al surselor regenerabile de energie din România

Sursa de energie regenerabilă	Potențialul energetic anual	Echivalent economic energetic(mii tep)	Aplicație
Energie solară: - termică - fotovoltaică	60x10 ⁶ GJ 1200 GWh	1433,0 103,2	Energie termică Energie electrică
Energie eoliană	23000 GWh	1978,0	Energie termică
Energie hidro, din care: sub 10 MW	40000 GWh 6000GWh	516,0	Energie termică
Biomasă	60x10 ⁶ GJ	7597,0	Energie termică
Energie geotermală	7x10 ⁶ GJ	167,0	Energie termică

Sursa: Studii de specialitate - ICEMENERG, ICPE, INL, ISPH, ENERO

În tabelul 3.7 se dă calitativ potențialul de piață pentru surse regenerabile din România.

Tabelul 3.7.

Analiză sintetică calitativă a resurselor și a potențialul de piață al surselor regenerabile în România

Tehnologie	Resursă	Potențial
Eoliană	2-3	2
Solar - fotovoltaic	2-3	1
Solar - termal	2-3	2-3
Microhidro	3	3
Biomasă	3	3
Geotermal	3	2-3
Deșeuri valorificate energetic	2	2

În România există o experiență tehnico-științifică importantă în domeniul surselor regenerabile, dar care a rămas la nivelul aplicațiilor demonstrative. În prezent condițiile de piață nu favorizează competitivitatea lor directă. Cele mai apropiate de pragul comercial sunt aplicațiile folosind biomasa, microhidro, resursele geotermale.

În situația adoptării viitoarei Directive privind sursele regenerabile, România va trebui să facă eforturi pentru îndeplinirea condițiilor cerute, de producere a unei cote de energie electrică din surse regenerabile (din care se exceptează centralele hidro mari). În prezent energie electrică din surse regenerabile se produce numai în microhidrocentrale, această producție reprezentând mai puțin de 0,5% din total.

Atât Legea energiei cât și Legea eficienței energiei, menționează și prevăd dezvoltarea surselor regenerabile, iar ANRE are în plan realizarea unei reglementări specifice.

3.4. Energia și mediul

În economia națională problematica energiei este foarte importantă, cu implicații în industrie, transporturi, alimentație, agricultură.

Cele mai mari deșeuri se produc de către industrie în diverse tehnologii de producere a energiei termice în principal prin arderea cărbunului. Se diminuează stratul de ozon prin emisii de gaze CO₂ și apare efectul de seră.

Tabelul 3.8

Cantitatea de emisii de CO₂ ce rezultată în cursul diferitelor tehnologii de producere a energiei

Proces / Tehnologie	Extracția combustibilului	Construcție	Exploatare	Total
Arderea cărbunului	1	1	962	964
Ciclu combinat cu gazeificare integrată	1	1	748	750
Combustie păcură	-	-	726	726
Arderea gazelor	-	-	484	484
Geotermală	<1	1	56	57
Microhidro	-	10	-	10
Nucleară	2	1	5	8
Eoliană	-	7	-	7
Fotovoltaică	-	5	-	5
Hidro mare putere	-	4	-	4

(Sursa: World Energy Council)

Se preconizează o reducere cu până la 20% a emisiilor de carbon în anii următori.

Se dorește o înlocuire a tehnologiilor clasice bazate pe carbine cu tehnologii bazate pe energie nucleară, vânt, hidro, solar.

3.5. Influența asupra mediului a producerii și consumului energiei

La producerea energiei din surse energetice se elimină substanțe poluante cu impact negativ asupra mediului. La arderea combustibililor fosili se poluează aerul atmosferic cu oxizi de carbon (CO și CO₂), oxizi de sulf (SO₂ și SO₃), oxizi de azot (NO și NO₂), aldehide, hidrocarburi, praf, etc.



Fig. 3.3. Poluarea mediului prin arderea combustibililor fosili

Dereglarea ecosistemelor acvatice impurifică solul. Mediul ambiant poate fi poluat de sectorul energetic **direct** sau **indirect**. Tehnologiile poluante cu impact **direct** țin de transformarea energiei combustibilului fosil în energia electrică și termică, transformând energia potențială a carburanților în energie cinetică. În cazul tehnologiilor cu impact **indirect**, mediul este poluat de tehnologiile ergo-fage.

Prin arderea cărbunilor se produc:

- emisii de poluanți;
- gazele cu efect de seră;
- efecte negative asupra aerului, solului și apelor subterane;
- diverse alte deșeuri;

Petroul și gazele naturale:

- pot produce poluări ale marilor și oceanelor;
- modifică compoziția solului prin acumulări de hidrocarburi;
- generează ploaie acide.

3.6. Politici privind sursele regenerabile de energie și valorificarea acestora

3.6.1. Politica Uniunii Europene în domeniul energiilor regenerabile

Programul de acțiuni- Energie inteligentă pentru Europa -promovează în perioada 2003-2006, implementarea strategiei din Cartea Verde. În cadrul acestui program, un loc distinct îl are programul- ALTENER, cu un buget propus de 86 milioane euro, ce urmărește dezvoltarea utilizării surselor regenerabile.

În prezent, obiectivele majore ale politicii Uniunii Europene în energie sunt:

- siguranța alimentării cu energie
- sisteme de energie competitive
- protecția mediului

Încă din decembrie 1997, Cartea Alba pentru o Strategie Comunitară și un Plan de Acțiune "Energie pentru viitor: sursele regenerabile" a definit strategia în domeniu, și a lansat

"Campania de demarare" a investițiilor. Obiectivul strategic propus de Cartea Alba este dublarea până în 2010 a contribuției surselor regenerabile la totalul consumului de energie din țările Uniunii Europene, și anume de la 6% la 12%.

Obiectivele "Campaniei de demarare" desfășurată în perioada 1999-2003, au fost realizarea a:

- 1 milion de sisteme fotovoltaice
- 15 milioane m² colectoare solare
- 10000 MW turbine eoliene
- 10000 MWt în instalații de cogenerare cu biomasă
- 1 milion de gospodării încălzite cu biomasă
- 1000 MW instalații cu biogaz
- 5 milioane tone bio-combustibili lichizi
- 100 de comunități alimentate 100% din surse regenerabile

Cel mai important act legislativ în domeniu este Directiva 2001/77/EC din 27 septembrie 2001 privind Promovarea energiei electrice produse din surse regenerabile, pe piața unică de energie.

Alături de atingerea, până în anul 2010, a cotei de 12% privind contribuția surselor regenerabile la totalul consumului de energie, un alt obiectiv al Directivei este creșterea contribuției surselor regenerabile de la 14% la 22% din consumul brut de energie electrică, deasemenea până în anul 2010.

Directiva impune statelor membre o serie de măsuri de încurajare a producției de energie electrică din surse regenerabile și crearea de facilități pentru agenții economici ce valorifică astfel de surse.

Principalele prevederi ale Directivei sunt:

- stabilirea unei cote-țintă pentru fiecare țară privind consumul de energie electrică produsă din surse regenerabile ;
- introducerea unor scheme financiare de suport ;
- simplificarea procedurilor administrative pentru proiectele ce valorifică sursele regenerabile de energie;
- acces garantat și prioritar la rețelele de transport și distribuție;
- garantarea originii energiei electrice produse din surse regenerabile .

Comisia Europeană va monitoriza implementarea Directivei. Va impune cota energiei electrice produsă din surse regenerabile, ca și un model pentru schemele de suport. Pentru introducerea unor scheme suport este necesar mai întâi să existe procedura de garantare a originii energiei electrice produse din surse regenerabile. Astfel în Articolul 5 al Directivei se impunea ca această procedură să fie operațională cel târziu în octombrie 2003.

Schemele suport pentru sursele regenerabile, deja introduse în multe țări, se pot rezuma în esență la doua modele de bază:

1. Prețul energiei produse din surse regenerabile este stabilit administrativ,
2. Prețul certificatelor de energie verde este stabilit de piața energiei.

Cea de a doua schemă, este numită și comerț cu Certificate Verzi.

Certificatele Verzi sunt emise pentru producători, pentru fiecare unitate de energie produsă din surse regenerabile de către o instituție eligibilă și sunt denumite în unități de energie (de exemplu 1 MWh). Certificatele de origine emise la nivel național vor fi recunoscute mutual pe piața europeană de electricitate.

Procedurile principale pentru promovarea pe piață a comerțului cu Certificate Verzi, sunt:

- acreditarea producătorilor eligibili
- emiterea de certificate
- controlul calității (verificare și audit)
- mecanisme pentru transferul și comercializarea certificatelor

Pentru implementarea acestor proceduri sunt necesare instituții responsabile pentru control, implementare și funcționare.

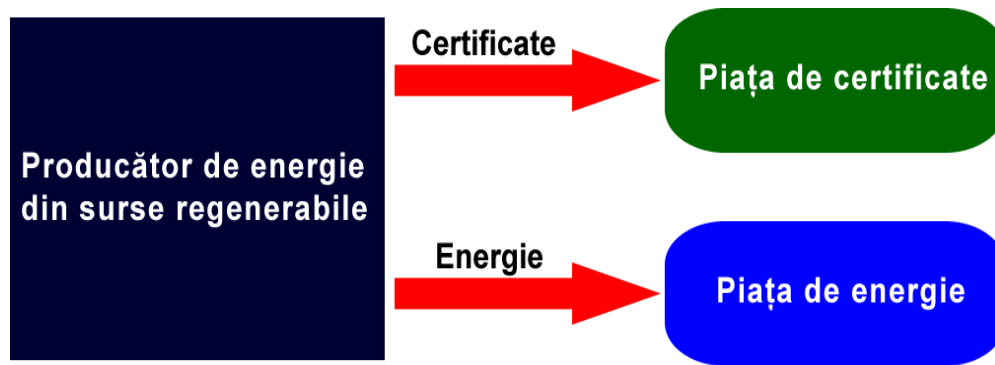


Fig. 3.4. Schemele suport pentru utilizarea sursele regenerabile de energie

În anul 2010, cifra de afaceri cu comerțul din Certificate Verzi în Europa se estimează la 20 miliarde euro.

Scheme suport pentru utilizarea surselor regenerabile de energie au fost legiferate nu numai în țările Uniunii Europene dar și în unele țări candidate la aderare.

Alte scheme suplimentare de suport a finanțării proiectelor cu surse regenerabile derivă din procedurile stabilite prin Protocolul de la Kyoto: **Comerțul cu emisiile de gaze cu efect de seră** (conform unei Directive europene ce va intra în curând în vigoare) și **Implementarea Asociată**, care permite contribuția unei alte țări la investiția proiectului, în schimbul cotei corespunzătoare de emisii reduse.

Politica de promovare a surselor regenerabile a dat roade evidente în ultimii ani. De exemplu, suprafața de captatoare solar-termale în Europa în anul 2000 a fost de 10,9 milioane m², în comparație cu 3,5 milioane m² în 1990. Germania este pe locul întâi, cu 3,3 milioane m².

Exemplul cel mai relevant însă privind efectele politicii de dezvoltare a surselor regenerabile este energia eoliană care este tehnologia cu rată de dezvoltare cea mai ridicată în energia de astăzi.

3.7. Premise de valorificare în Uniunea Europeană a surselor regenerabile de energie

Obiectivul strategic al Uniunii Europene este reducerea poluării în mod semnificativ în următorii ani.

Același deziderat este și în România prin folosirea energiei eoliene, solare, hidro și nucleare.

Energia regenerabilă este prioritară în politica energetică comunitară

În Cartea Verde "Spre o strategie europeană pentru siguranța în alimentarea cu energie" se precizează că sursele regenerabile de energie pot să contribuie efectiv la creșterea resurselor energetice interne, ceea ce conferă acestora o anumită prioritate în adoptarea politicii energetice comunitare.

a surselor regenerabile se concentrează pe creșterea eficienței energetice în baza unui management adecvat al cererii de energie ("demand side management"). În țările cu economie în curs de dezvoltare, la propunerea Comisiei Europene, se urmărește promovarea permanentă a surselor regenerabile și conștientizarea rolului eficienței energetice prin derularea unor programe specifice.

Principalele probleme înscrise în "Directiva 2001/77/EC" sunt:

- valorificare surselor regenerabile de energie în obținerea de energie electrică și termică;
- stabilirea unei valori de energie electrică obținută din surse regenerabile de energie, în mod separat de la o țară la alta;
- finanțarea cu prioritate a investițiilor în sectorul surselor regenerabile de energie;
- modificarea procedurilor administrative de finanțare a investițiilor de implementare a surselor regenerabile de energie;
- accesul la rețelele de transport și distribuție de energie;
- garantarea originii felului de energie obținută din sursele regenerabile de energie.

3.8. Valorificarea surselor regenerabile de energie în România

Valorificarea surselor regenerabile de energie în România pune următoarele probleme:

- integrarea noilor surse regenerabile de energie în structura actuală a sistemului energetic național;
- reducerea barierelor de ordin tehnic, social și creșterea eficienței economice;
- promovarea capitalului autonom și străin pe piața surselor regenerabile de energie;
- asigurarea independenței consumului de energie al economiei naționale;
- asigurarea alimentării cu energie a comunităților din zonele izolate prin valorificarea potențialului surselor regenerabile locale;
- participarea României la piața europeană de "Certificate verzi" pentru energie din surse regenerabile.

a) energia solară – este foarte indicată pentru zonele geografice izolate cu acces limitat la rețeaua energetică și se vor implementa proiecte pilot demonstrative de sisteme fotovoltaice.

Principalele tipuri de proiecte sunt:

- sisteme fotovoltaice de mică putere autonome pentru electrificarea rurală, cu aplicații în Munții Apuseni sau alte zone montane, în nordul Moldovei, parcuri naturale (ex.: Delta Dunării), etc.;
- realizarea sistemelor fotovoltaice conectate la rețeaua de transport a energiei electrice:
- minicentrale solar-fotovoltaice în zona Deltei Dunării);
- sisteme fotovoltaice urbane sau rurale conectate la rețea (în orașe mari, litoral, case de vacanță, etc.).

b) Energia eoliană: potențialul eolian al României se estimează la circa 14000 MW (putere instalată), care poate da o cantitate de energie de peste 23000 GWh/an.

S-au identificat amplasamentele cu potențial eolian ridicat pentru realizarea unor investiții rentabile.

În zona litoralului Mării Negre se evidențiază un potențial energetic eolian de aproximativ 2000 MW.

Amplasamentele de la 3 km până la 5 km în zona litoralului (până la adâncimea apei de 5 m), sunt eficiente pe termen lung (peste 20 ani).

c) Hidroenergie

Potențialul hidro-energetic din România oferă posibilități de realizare a unui număr de peste 780 unități hidro-energetice (cu puterea instalată de maxim 10 MW/unitate), cu o putere totală de peste 2150 MW, care pot furniza peste 6000 GWh/an.

Puterea instalată în unitățile energetice noi, va avea un nivel de circa 840 MW, din care 240 MW în microhidrocentralele de mică putere.

Creșterea rentabilității pentru investitorii din sectorul public sau privat se asigură prin acordarea de facilități financiare.

d) Biomasa

Biomasa poate să acopere aproximativ 70% din angajamentele României privind sursele regenerabile în energia totală consumată.

Acest obiectiv se materializează prin implementarea de capacități noi sau unități în cogenerare pe bază de biomasă.

Pe termen lung creșterea cantității de biomasă se poate asigura din plantații cu diferite soiuri de arbori energetici.

Pentru realizarea investițiilor specifice biomasei trebuie rezolvate următoarele probleme:

- creșterea cantității de biomasă prin atragerea diferitelor rezerve;
- prin ardere/gazeificare se pot valorifica diferite forme de biomasă, cu potențial energetic atestat în unități pilot;
- promovarea unor soluții tehnice noi prin arderea combinată de cărbune/biomasă și rețehnologizarea capacităților existente;

e) Energia geotermală

Obiectivele de valorificare în mod eficient a potențialului hidro-geotermal existent în România constau în:

- realizarea de studii de fezabilitate și consultanță și asimilarea de tehnologii și echipamente performante;
- valorificarea datelor și informațiilor legate de programele de tehnologizare și implementare curentă;
- adoptarea unor norme și reglementări pentru valorificarea surselor de energie geotermale, în condiții de eficiență economică ridicată.

3.8.1. Măsuri orientative pe termen mediu și lung

Principalele măsuri pe termen mediu și lung sunt orientate în următoarele direcții principale:

- transferul tehnologiilor neconvenționale de la firme cu tradiție în domeniu, conform standardelor internaționale în vigoare;
- elaborarea cadrului legislativ, instituțional și organizatoric aferent;
- atragerea capitalului privat și public la finanțarea și gestionarea în condiții de eficiență a tehnologiilor energetice moderne;
- elaborarea de programe științifice de cercetare orientate în realizarea procesului de integrare a surselor regenerabile de energie în ansamblul sistemul energetic național.

Principalele elemente de asistență tehnică de specialitate sunt:

- implicarea beneficiarului, de la început, în elaborarea documentației tehnice și pentru analiza economico-financiară a investiției;
- pregătirea profesională a personalului;
- identificarea proiectelor de investiții realizabile tehnic în condiții de eficiență economică superioară.

Cadrul instituțional, legislativ, financiar și informațional trebuie să rezolve următoarele aspecte:

- asigurarea eficienței economice ridicate;
- identificarea surselor autonome și externe de finanțare pentru realizarea proiectelor de investiții sustenabile;
- asigurarea măsurilor de recuperare a investiției specifice;
- respectarea normativelor și standardelor tehnice de construcții-montaj și de exploatare cu obținerea atestatelor de certificare;
- dezvoltarea de programe tehnico-științifice de cooperare internațională, transfer de tehnologie, schimb de experiență și cooperare bilaterală pentru proiecte de cercetare-dezvoltare și demonstrative;
- promovarea de acte legislative pentru asigurarea protecției mediului.

3.9. Tehnologii de utilizare

Energia eoliană disponibilă este de 5-10 ori mai mare decât cea transformată în biomasă.

Energia cinetică a vântului s-a folosit de acum 5000 de ani în urmă, figura 3.5.



Fig. 3.5. Utilizarea energiei vântului în navigația maritimă

În sec. XIV olandezii au îmbunătățit modelul turbinelor de vânt, răspândite în Orientul Mijlociu, și au început utilizarea unor instalații eoliene performante la măcinarea boabelor.



Fig. 3.6. Instalațiilor eoliene utilizate la măcinarea boabelor, Olanda

În 1854 în SUA se face o pompă de apă, acționată de vânti.

Folosirea petrolului a diminuat mult implementarea proiectelor pe bază de energie eoliană până la începutul anilor '70, când a apărut o creștere rapidă a prețurilor la petrol.

Tendențele de utilizare actuale a vântului sunt îndreptate în principal pentru producerea energiei electrice.

Potențialul eolian important este pe litoralurile marine, pe ridicături și în munți

Energia vântului depinde de schimbările sezoniere ale timpului.

Cantitatea energiei produse depinde de densitatea aerului, de raza elicei și de viteza vântului la puterea a treia.

Vegetația și construcțiile de la sol sunt factorii de bază, care influențează micșorarea vitezei vântului. Viteza vântului e mai mare la înălțimi și la suprafața mării, unde relieful practic nu influențează viteza vântului.

Vântul are o răspândire difuză, dar nu poluează pe parcursul producerii energiei.

Parametrul tehnico-economic principal care determină eficacitatea unei turbine eoliene este energia anuală produsă, care la rândul ei este determinată de parametrii cum ar fi viteza medie a vântului, distribuția statistică a vitezei vântului, distribuția direcțiilor vântului, intensitățile turbulențelor și asprimea terenului înconjurător. Parametrul cel mai important este viteza vântului, care crește cu înălțimea de la sol. Aceasta a dus la renunțarea în mare parte la turbinele eoliene cu axa verticală în favoarea configurației tradiționale mai înaltă cu axă orizontală.

Energia eoliană este considerată o sursă energetică ecologică, dar are unele influențe negative asupra mediului, în următorul sens:

- generează emisii acustice;
- influențează vizual terenului;

- deranjează păsările mecanic;
- influențează recepția semnalelor radio, TV și radar.

3.10. Configurații și caracteristici de bază ale turbinelor eoliene

Sistemul de bază care realizează conversia energiei eoliene este turbina de vânt. Există două configurații generale de bază funcție de axa de rotație a paletelor rotorului turbinei (figura 3.7) :

1. Turbine de vânt cu ax orizontal la care axa de rotație este paralelă cu direcția vântului;
2. Turbine de vânt cu ax vertical la care axa de rotație este perpendiculară pe direcția vântului;

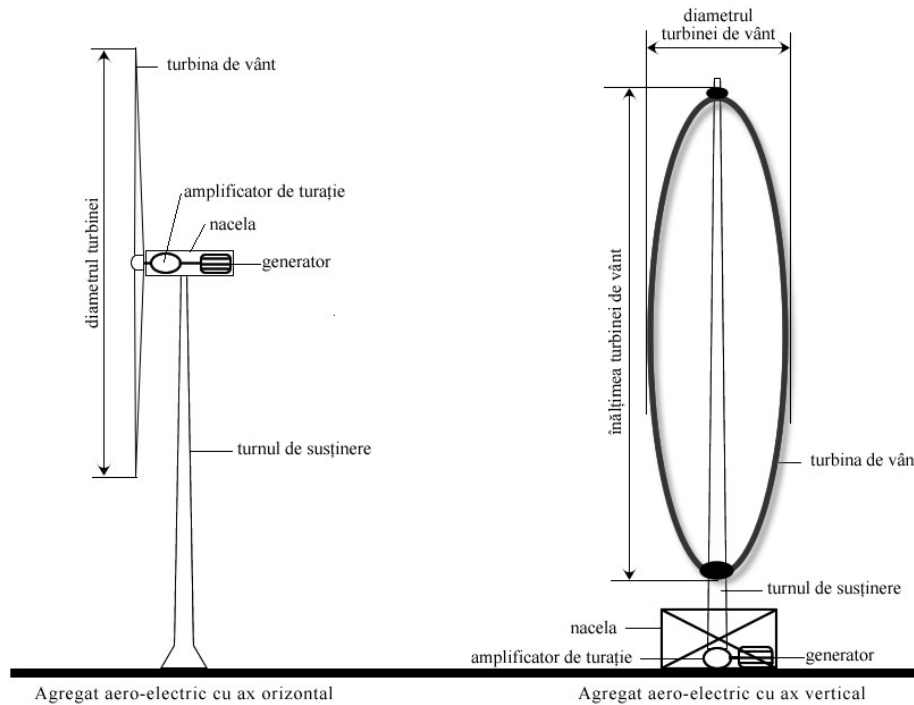


Fig. 3.7. Configurații de bază ale agregate aero-electrice

După cum reiese din figura de mai sus, elementele principale ale unui sistem de conversie a energiei eoliene sunt: rotorul turbinei cu paletele componente, generatorul electric, care poate fi sincron sau asincron (de inducție), arborele rotorului turbinei și arborele generatorului de inducție, cutia de viteze, care poate lipsi în cazul utilizării generatoarelor sincrone, frâna mecanică și turnul de susținere care poate avea o înălțime de peste 50 de metri, în funcție de locul în care este plasată turbina și de puterea generatorului. De asemenea, turbinele de vânt sunt sau nu echipate și cu un sistem de reglare a pasului paletelor și cu un echipament de monitorizare și control.

Conversia puterii de intrare a vântului P_{wind} (a energiei cinetice) în putere mecanică (P_{mec}) și apoi în putere electrică (P_{el}) este descrisă prin următoarele ecuații:

$$P_{mec} = \frac{C_p(\lambda) \cdot k \omega^3 \cdot r^3}{\lambda^3}$$

$$\lambda = \frac{\omega R \cdot r}{V}$$

$$k = \frac{1}{2} \rho \cdot A$$

$$P_{el} = \eta(\omega R) \cdot P_{mec}$$

unde:

C_p - reprezintă factorul de putere,

λ - reprezintă raportul de transmisie al vitezelor,

V - viteza vântului,

ω - reprezintă viteza rotorului,

r - raza rotorului în plan,

ρ - densitatea aerului,

A - reprezintă aria rotorului,

$\eta(\omega R)$ - descrie randamentul generatorului electric și al cutiei de viteze funcție de viteza rotorului turbinei.

Sistemului care realizează conversia puterilor se prezintă schematic în figura 3.8.:

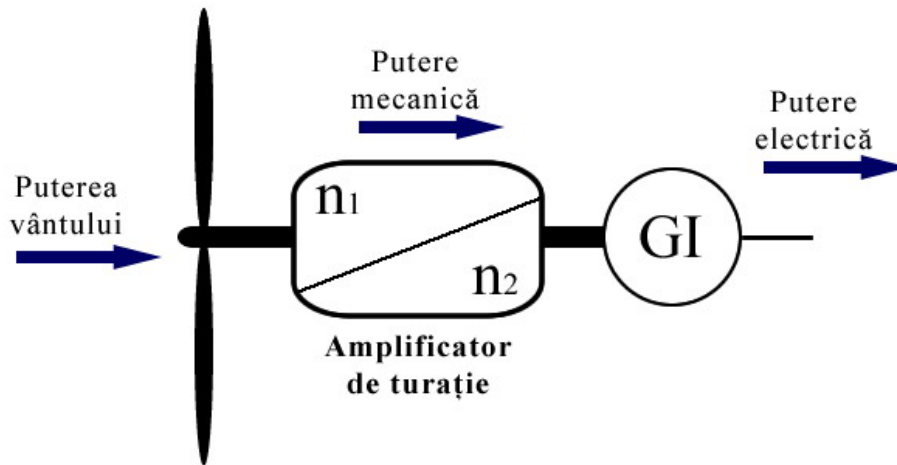


Fig. 3.8. Conversia electromecanică a energiei eoliene utilizând generatoarele de inducție

Puterea mecanică, convertită din energie cinetică în energie electrică, poate fi descrisă ca funcție de viteza vântului - V , funcție de viteza rotorului turbinei - ω și funcție de tipul raportului de transmisie al vitezelor - λ .

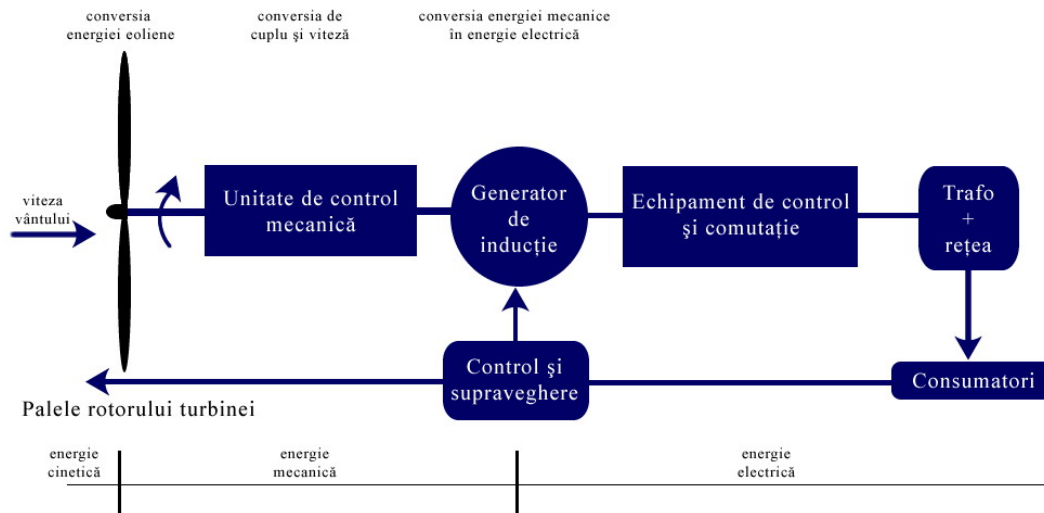


Fig. 3.9. Sistemul de conversie al energiei eoliene

Turbina eoliană extrage energia cinetică de la vânt, pe care o transformă în energie mecanică de rotație, apoi o furnizează prin intermediul unității mecanice (arbore, cutie de viteze) la rotorul generatorului electric și de asemenea la statorul acestuia, convertind energia mecanică în energie electrică [24]. De asemenea, această diagramă bloc ne arată legăturile între cele mai importante componente ale sistemelor eoliene, cât și asocierea cu strategia de conversie a energiei. Diagrama bloc prezentată în figura 3.9., descrie cum funcționarea turbinei poate fi influențată de procesul de control și supraveghere.

Turbinele de vânt pot fi construite atât cu generatoare sincrone, cu excitație în c.c. sau cu magneți permanenți, cât și cu generatoare asincrone cu rotor bobinat cât și cu rotorul în colivie, care pot fi conectate la rețea direct sau indirect sau pot funcționa în regim autonom.

Conectarea directă presupune conectarea rigidă la curentul alternativ (de obicei trifazat) al rețelei. Conectarea indirectă la rețea presupune trecerea curentului provenit de la generator printr-o serie de dispozitive electronice care au rolul de a ajusta curentul pentru a se potrivi cu cel al rețelei. În cazul generatoarelor asincrone acest lucru se realizează prin simpla conectare la rețea [21].

Conversia electromecanică a energiei eoliene poate fi realizată cu una din următoarele sisteme [9] :

1. sisteme cu viteză și frecvență constante - *constant speed, constant frequency (cscf) system*, unde generatoarele sincrone sunt utilizate, caz în care viteza este menținută constantă;
2. sisteme cu viteză și frecvență aproape constante - *an almost constant speed, constant frequency (acscf) system*, unde motoarele asincrone (de inducție) cu colivie sunt utilizate cu alunecare mică cuprinsă între (1-5) %; aceasta soluție nu necesită utilizarea unui control sofisticat și nici a unui convertor static;
3. sisteme cu viteză variabilă și frecvență constantă - *a variable speed, constant frequency (vscf) system*; în acest caz se utilizează mașinile de inducție cu rotor bobinat împreună cu diferite topologii de convertoare statice;
4. sisteme cu viteză variabilă și frecvență variabilă - *variable speed, variable frequency (vsfv) system*, care necesită generatoare sincrone sau de inducție cu diferite topologii de convertoare statice de putere plasate între generator și rețea cu scopul reglării curentilor și implicit a fluxului de putere.

Până la ora actuală există un număr impresionant de soluții (configurații) de sisteme pentru conversia energiei eoliene. Partea electrică a turbinei a devenit din ce în ce mai importantă. De aceea este necesar ca aceste subsisteme să fie integrate perfect în designul turbinei. De asemenea, datorită dezvoltării electronicii de putere care a crescut simțitor în ultimii ani, a crescut și puterea instalată pe unitate, fapt care a dus la și la scăderea prețului pe kW. Configurațiile cele mai utilizate la ora actuală pentru generatoarele electrice și convertoare statice sunt prezentate în figura 3.10.

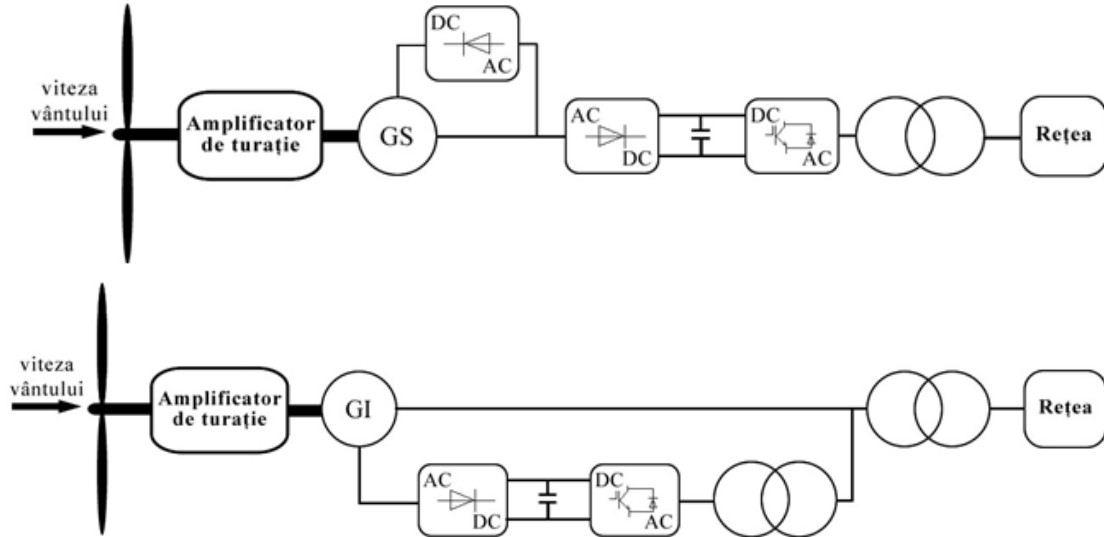


Fig. 3.10. Configurațiile standard aplicate în energia eoliană utilizând generatoare sincrone și asincrone

Generatoarele sincrone pot furniza atât putere activă cât și putere reactivă.

3.11. Aeroagregatele eoliene cu viteză variabilă

Aeroagregatele eoliene (A.A.E.), cu viteză variabilă au progresat semnificativ în ultimii ani. Operarea la viteză variabilă se poate realiza prin decuplarea frecvenței rețelei de frecvența generatorului, determinată de turația turbinei. Aceasta se poate realiza prin utilizarea convertoarelor statice de putere, în combinație cu un control avansat de comandă și control.

Prin funcționarea turbinei la viteză variabilă se poate crește semnificativ captarea energiei eoliene, micșorând totodată solicitările mecanice și zgomotul aerodinamic. Totodată prin utilizarea vitezei variabile energia captată de la vânt crește cu aproximativ 10% comparativ cu turbinele eoliene cu viteză constantă [30,37].

Atât mașinile de inducție cu rotorul în colivie cât și cele cu dublă alimentare în combinație cu diferite tipuri de convertoare statice formează diferite topologii de A.A.E. cu viteză variabilă.

A.A.E. de ultimă generație sunt proiectate pentru a produce maximul de energie electrică cu o investiție relativ redusă. În general, pentru a controla producerea energiei electrice de la vânt, se utilizează diferite metode de control ale puterii aerodinamice (putere de ieșire a rotorului turbinei) și a vitezei rotorului turbinei.

Deoarece intensitatea vântului este variabilă, este de dorit ca turbina să funcționeze la viteză variabilă pentru a fi capabilă să producă maximul de putere.

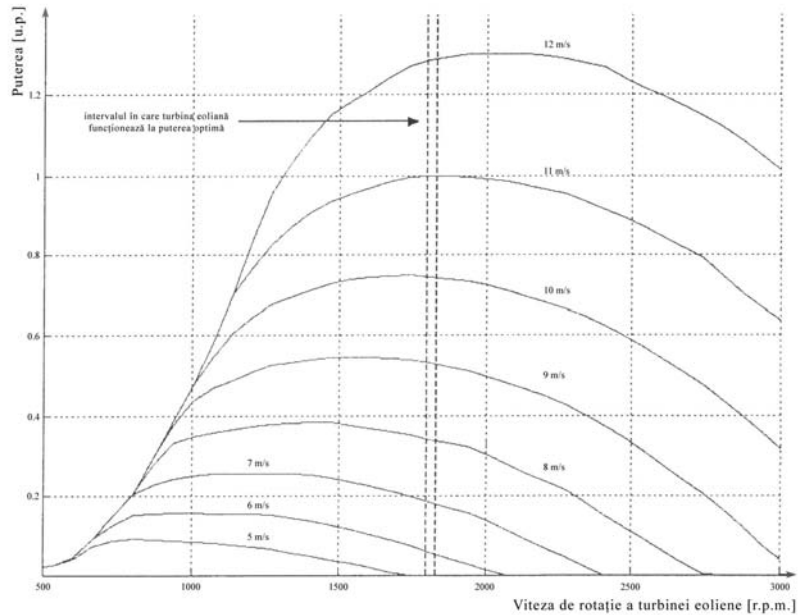


Fig. 3.11. Caracteristica mecanică a turbinelor eoliene

Fiecărei curbe de variație a puterii de ieșire (puterea aerodinamică) funcție de o anumită viteză a vântului, îi corespunde un anumit punct de funcționare al turbinei la eficiență maximă (figura 3.11).

Cantitatea de energie extrasă de vânt variază cu cubul vitezei vântului:

$$P_{aero} = k \cdot V^3$$

În general, puterea electrică produsă de A.A.E. ar trebui să fie fără fluctuații mari. Acest lucru este ușor de realizat, deoarece puterea convertită în putere electrică poate fi controlată instantaneu prin intermediul unui convertor static.

A.A.E. sunt proiectate în general pentru a produce putere electrică de la o viteză a vântului de 3-3.5 m/s până la o viteză a vântului de 20-25 m/s. Dacă vântul este mai puternic este necesar să se renunțe la excesul de energie care s-ar putea produce pentru a evita distrugerea turbinei.

Toate variantele de A.A.E. sunt, construite cu diferite moduri de control al puterii în funcție de tipul generatorului electric, de puterea acestuia, și/sau de locul unde este plasată turbina eoliană.

Cele mai frecvent utilizate metode, care au ca scop utilizarea unui control cât mai simplu și eficient aplicabil ultimelor generații de A.A.E. sunt:

Pitch Controlled: reglarea pasului elicei, caz în care unghiul paletei rotorului poate fi reglat activ (online) de către sistemul de control al turbinei;

Stall Controlled: controlul limitării puterii turbinei:

- *passive stall*: controlul pasiv al limitării puterii – soluție în care turbina nu conține nici o parte în mișcare și se bazează pe proprietățile aerodinamice inerente ale paletelor care determină puterea de ieșire (puterea aerodinamică) produsă de turbină;
- *active stall*: controlul activ (în timp real) al blocării paletelor la un anumit unghi funcție de viteza vântului, combină avantajele oferite de controlul pasiv cu avantajele realizate prin controlul relativ al pasului elicelor (pitch control).

3.12. Reglarea puterii A.A.E. prin unghiul paletelor

Controlul "pasive stall" de așezare a paletelor la un anumit unghi, constant pe direcția vântului, se bazează pe caracteristicile inerente ale turbinelor în sensul că puterea aerodinamică este limitată când viteza vântului crește peste valoarea nominală pentru care turbina a fost proiectată până la valoarea maximă a vitezei (20-25 m/s), iar turbina va fi oprită la această valoare mare a vântului.

Unele din principalele avantaje ale acestui tip de control este că evită părțile în mișcare ale rotorului și este realizat foarte simplu fără existența unui mecanism care să poată fi comandat activ (în timp real) pentru a putea opri turbina, fiind realizat astfel cu un cost scăzut.

Pe de altă parte controlul pasiv cu unghi fix de așezare a paletelor turbinei reprezintă o problemă complexă a designului aerodinamic. În jur de 2/3 din turbinele instalate în lume, [11,23,47,66], până în 2001 utilizează acest tip de control.

Pentru a realiza acest tip de control al puterii aerodinamice, este necesar ca unitatea centrală de control a turbinei să verifice puterea de ieșire a acesteia de câteva ori pe minut sau tot timpul. Când această putere devine mai mare decât valoarea nominală, controllerul transmite un semnal de comandă mecanismului de reglare al pasului relativ al paletelor, care va regla paletetele, astfel încât puterea furnizată să rămână constantă.

Proiectarea turbinelor eoliene care utilizează acest tip de control al puterii, necesită o construcție mecanică pretențioasă pentru a asigura reglarea pasului elicei. Pentru realizarea acestui tip de control, este necesar ca la fiecare modificare a intensității vântului să se modifice corespunzător și unghiul de reglare al paletelor la un unghi optim pentru a extrage maximul de energie pentru orice valoare a vitezei și direcției vântului.

Mecanismul de reglare al unghiului paletelor este în general pus în funcțiune de un sistem hidraulic sau de un servo-motor de curent alternativ [24, 31].

Controlul "active stall" al turbinelor cu turație constantă (sau variabilă), figura 3.12, combină avantajele controlului pasiv, cu avantajele controlului puterii prin reglarea pasului paletelor. Astfel se realizează un control mai eficient decât controlul pasiv, destinat în special turbinelor de putere mare.

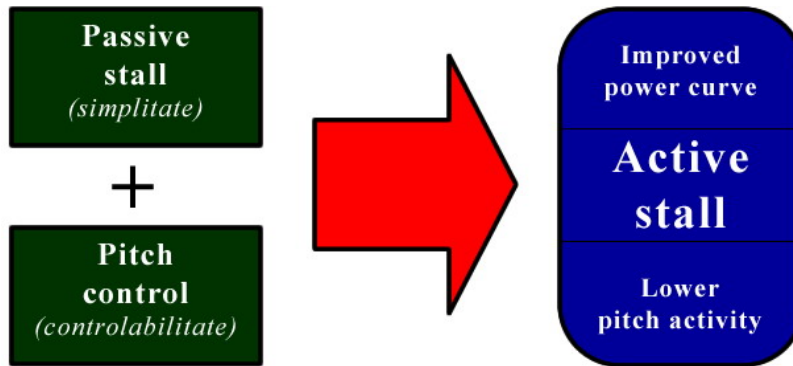


Fig. 3.12. Diagrama bloc caracteristică controlului "active stall" al paletelor rotorului turbinelor eoliene

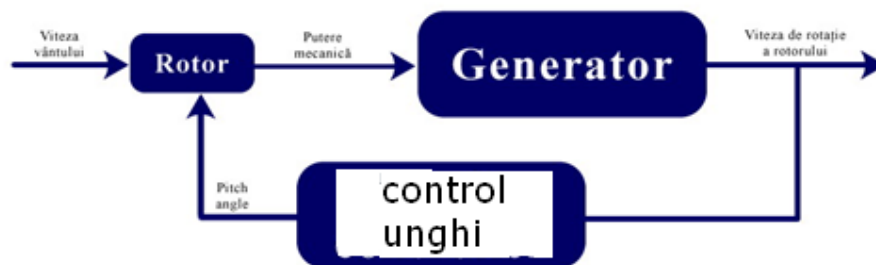


Fig. 3.13. Diagrama bloc a principiului de "active stall" control

Paletel rotorului sunt rotite ușor de-a lungul axei lor longitudinale. Acest lucru e făcut pentru a realiza rotirea gradată a paletelor rotorului turbinei de fiecare dată când viteza vântului crește la valori critice ($v = 25-30$ m/s), figura 3.13.

Creșterea numărului de instalații (uzine) cu turbine de vânt care utilizează generatoare de inducție cu puteri foarte mari (>1 MW) a fost posibilă prin utilizarea unui mecanism de comandă a puterii turbinelor controlate prin *active stall*. Din punct de vedere tehnic acest mecanism este asemănător celui de reglare a pasului relativ al elicelor capabil să modifice unghiul de atac al paletelor la fiecare modificare a intensității vântului.

Pentru a obține un cuplu de antrenare suficient de mare la o viteză relativ mică a vântului, turbinele sunt de obicei programate să regleze pasul de rotire a paletelor turbinei la valori foarte mici.

Dacă generatorul ajunge aproape la suprasarcină, mecanismul de reglare al paletelor trebuie să rotească paletel în direcția opusă de până atunci, cu alte cuvinte va crește unghiul de atac (reglare) al paletelor.

Mecanismul utilizat pentru controlul pasiv ("passive stall") este mai ieftin și mai simplu, nefiind necesar și un mecanism pentru reglarea pasului relativ al paletelor.

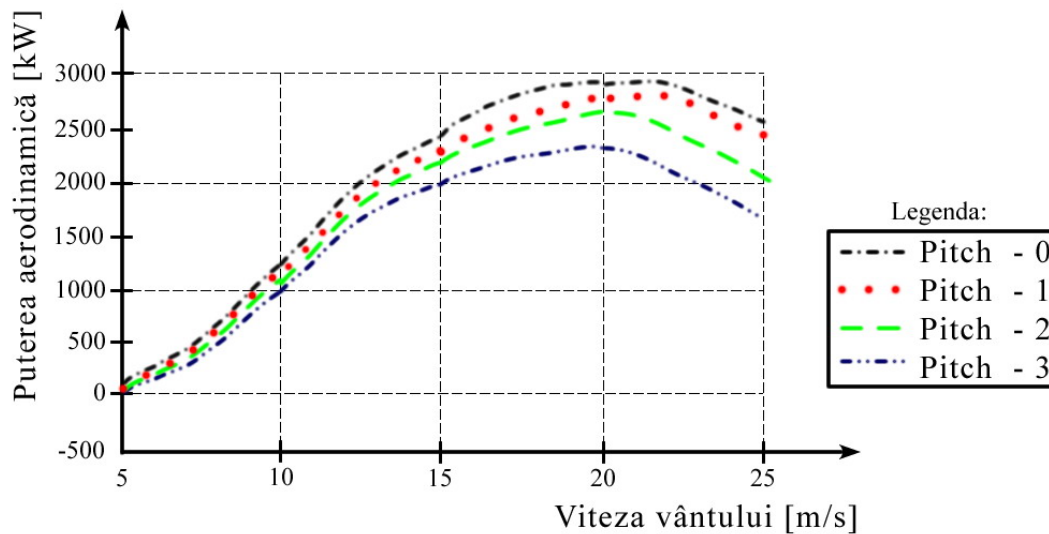


Fig. 3.14. Puterea aerodinamică a unei turbine eoliene de 2 MW în funcție de viteza vântului pentru diferite unghiuri de reglare a paletelor

Sistemul de control al modelului aerodinamic care are și rolul de a regla fluxul de putere odată cu creșterea vitezei vântului, utilizează de obicei reglarea pasului relativ al elicelor, după cum reiese și din figura 3.14, și se aplică în general turbinelor de putere mare (>500 kW).

3.13. Eficiența rotorului turbinei eoliene utilizând controlul pasiv și activ al paletelor

Puterea aerodinamică a unei turbine de vânt se modifică odată cu modificarea vitezei vântului. La o viteză foarte redusă a vântului 1-3 m/s, rotorul cu paletel turbinei sunt blocate, deoarece la această viteză turbina nu poate produce un cuplu mecanic necesar generării puterii electrice. În general turbinele de vânt funcționează de la o viteză a vântului de minim 2.5-5 m/s (cut-in-wind speed). Domeniul vitezei vântului la care turbinele eoliene sunt capabile să producă puterea nominală pentru care au fost proiectate este de aproximativ 12-15 m/s. Acest lucru este determinat și de puterea nominală acceptată a generatorului și de aria suprafeței rotorului turbinei. De asemenea, orice turbină de vânt este proiectată pentru o valoare maximă 20-25 m/s a vitezei vântului (cut-out-wind-speed) până la care poate produce energie, valoare a vitezei vântului peste care A.A.E. este oprit, după cum se poate vedea în figura 3.15.

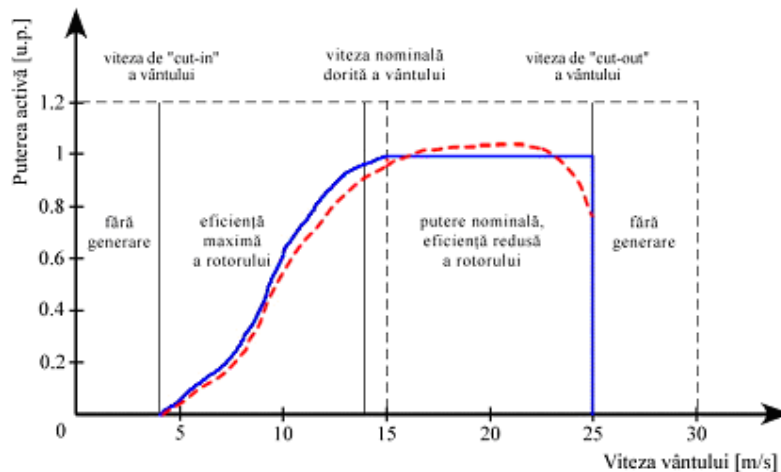


Fig. 3.15. Caracteristica puterii active în funcție de viteza vântului pentru domeniul de funcționare a unei turbine eoliene cu un control pasiv comparativ cu un control activ al paletelor

La o viteză a vântului mai scăzută de 12-15 m/s, scopul este să se obțină maximul eficienței rotorului. Eficiența rotorului depinde de designul și dimensiunea paletelor, de raportul vitezelor și de viteza vântului. Raportul vitezelor nu poate fi controlat la o turbină cu viteza constantă deoarece viteza rotorului turbinei este constantă. La o turbină cu viteză variabilă, raportul vitezelor este variabil și depinde în același timp atât de viteza vântului cât și de viteza rotorului turbinei. Pentru a obține eficiența rotorului maximă, raportul vitezelor trebuie menținut la o valoare optimă (de obicei 6-8). Acest lucru se poate realiza prin controlul vitezei rotorului. O eficiență aerodinamică mai mare duce la producerea unei cantități de energie mai mare pentru aceeași viteză a vântului. La o viteză a vântului mai mică de 12 m/s, scopul în funcționarea turbinei este să extragă (producă) energie cât mai eficient. La o viteză a vântului mai mare decât această valoare puterea mecanică (aerodinamică) produsă de rotorul turbinei trebuie menținută constantă. Pentru a realiza acest lucru eficiența rotorului trebuie să fie mai redusă cu creșterea vitezei vântului, după cum reiese din figura 3.15.

Avantajele controlului activ, (active stall), comparativ cu controlul pasiv de blocare a turbinei, (passive stall), prezentat mai sus, se referă la calitatea puterii. Cu alte cuvinte puterea aerodinamică (puterea de ieșire) poate fi controlată cu mare precizie.

Un alt avantaj se referă la generator care poate funcționa la puterea nominală la orice valoare ridicată a vitezei vântului.

În cazul controlului pasiv la viteze mari, turbina va avea unele căderi (fluctuații) ale puterii electrice de ieșire care în timp ar putea deteriora turbina.

3.14. Obiectivele sistemelor de conducere automată a agregatelor aeroelectrice

În cazul sistemelor de conducere automată a agregatelor aeroelectrice principalele obiective care trebuie atinse sunt:

- creșterea duratei de viață a agregatului aero-electric cât și a siguranței în funcționare a acestuia:
 - reducerea solicitării la oboseală a structurii mecanice ca urmare a acțiunii componentei de turbulență a vitezei vântului;
 - stabilizarea vitezei de rotație a turbinei eoliene la valoarea sa nominală atunci când viteza vântului crește prea mult.
- maximizarea cantității de energie extrase din vânt prin optimizarea conversiei energetice;
- obținerea și furnizarea unei energii electrice corespunzătoare calitativ prin:
 - reglarea puterii reactive debitate de aero-generator;
 - reducerea numărului de armonici prin intermediul buclor de reglare aferente filtrelor active introduse de electronica de putere cu care se echează agregatele aero-electrice;

- reducerea fluctuațiilor puterii debitate datorate componentelor de înaltă frecvență din spectrul vitezei vântului;

În cazul sistemelor hibride de conversie a energiei eoliene (SHCEE) apar dificultăți privind menținerea parametrilor esențiali (tensiune, frecvență, etc.) între anumite limite admise.

Pe lângă aceste obiective mai trebuie respectate și alte cerințe cum ar fi: optimizarea regimurilor de încărcare/descărcare a bateriei și menținerea regimului optim de funcționare (la capacitate nominală) al motorului Diesel. În acest scop se utilizează sistemele de acumulare a energiei electrice (volant de mare viteză, baterie-acumulator, etc.) care trebuie gestionate astfel încât să asigure continuitatea alimentării cu energie atât în cazul funcționării motorului Diesel cât și în cazul în care acesta este decuplat.

Structura unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic este prezentată în figura următoare:

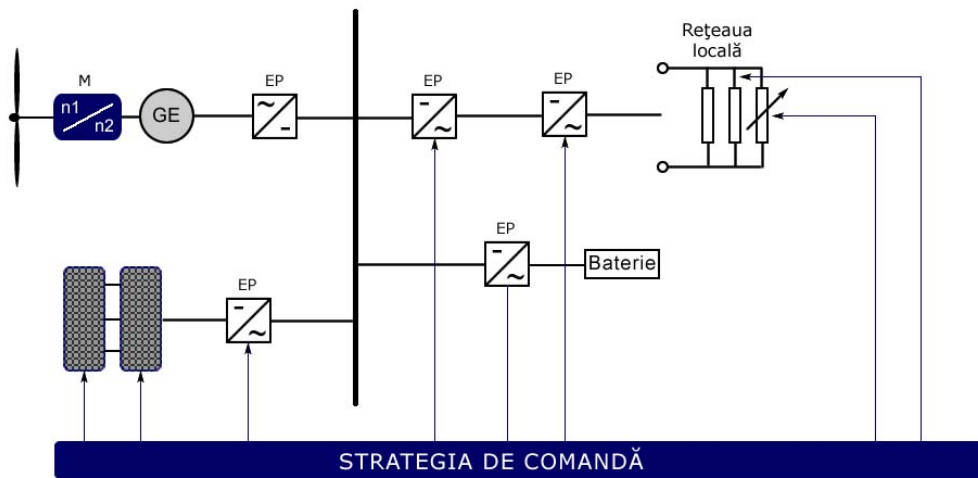


Fig. 3.16. Schema bloc a unui sistem hibrid eolian-fotovoltaic

Sistemul hibrid eolian-fotovoltaic realizează conversia energiei eoliene respectiv a energiei solare în energie electrică. Sistemul este compus dintr-un generator sincron cu magneți permanenți, o turbină eoliană cu viteză variabilă, un grup de panouri fotovoltaice, și un sistem de baterii cu rol de acumulare a surplusului de energie.

3.15. Concluzii

Sistemele eoliene au structură complexă deoarece ele implică fenomene de natură aerodinamică, mecanică, electro-mecanică, electro-energetică și de conversie a parametrilor prin electronica de putere.

În cazul sistemelor hibride Diesel-eolian ce funcționează în regim insular automatizarea lor este mult mai dificilă decât în cazul sistemelor eoliene ce funcționează în rețea.

Funcționarea unui sistem eolian hibrid depinde mai mult de alegerea turbinei eoliene decât de capacitatea de stocare a bateriei. Nu sunt necesare mai mult de 2 sau 3 zile de autonomie (stocarea energiei), peste această valoare stocarea energiei neinfluențând asupra performanței sistemului hibrid.

Pentru a îmbunătăți soluțiile existente și implicit pentru a aduce contribuții noi, acest capitol a încercat să facă o trecere în revistă a celor mai cunoscute sisteme de conversie a energiei eoliene cu avantajele și dezavantajele aferente.

Bazându-ne pe cele menționate anterior s-ar putea remarca următoarele :

A.A.E. cele mai răspândite la ora actuală în lume sunt cu ax orizontal și au în componență 3 palete;

Tendențele actuale în acest domeniu sunt îndreptate către sistemele cu viteză variabilă, în special pentru domenii de putere mare (>2 MW). De aceea un real interes trebuie acordat designului mașinilor electrice, și nu în ultimul rând unor noi tipuri de convertoare statice cu metodele aferente de reglare și control.

Una din cele mai importante provocări în acest domeniu se referă la aplicațiile de mică putere autonome, sisteme eoliene hibride destinate unor locuri izolate.

În ciuda succesului lor recent, în trecut sursele de energie regenerabile au avut dificultăți în a răzbate pe piețele care erau dominate de instalații tradiționale bazate pe combustibili fosili. Aceasta se datorează parțial faptului că tehnologiile energetice regenerabile și alte tehnologii noi sunt produse în serie abia acum în timp ce în trecut presupuneau cheltuieli de capital mari comparativ cu instalații mai tradiționale, dar și faptului că instalațiile bazate pe cărbune, țiței și gaz au beneficiat de o gamă de subvenții indirecte de-a lungul anilor. Cu toate acestea o altă limitare a fost dată de caracterul nepermanent a unora din sursele de energie regenerabile cum ar fi vântul și soarele. O soluție la această din urmă problemă o constituie crearea de instalații energetice diversificate care să maximizeze contribuția surselor de energie regenerabile dar care să folosească deasemenea producția ecologică de energie pe baza de gaze naturale și/sau biomasa pentru a asigura energie la sarcina de bază când soarele nu strălucește și vântul nu suflă.

Studiile realizate până în prezent au demonstrat că potențialul surselor de energie regenerabile este enorm, acestea putând acoperi în principiu de câteva ori cererea de energie.

Sursele de energie regenerabile cum ar fi biomasa, energia solară, eoliană, hidro și geotermală pot asigura servicii energetice bazate pe utilizarea resurselor locale disponibile.

Pornind de la această realitate, o tranziție către sisteme de energie bazate pe surse de energie regenerabile pare din ce în ce mai probabilă ținând cont de faptul că valoarea costurilor acestora scade în timp ce prețul țițeiului și al gazelor continuă să fluctueze. În ultimii 30 de ani vânzările de sisteme energetice solare și eoliene au crescut deoarece costurile de capital și cele pentru producerea electricității au scăzut, simultan cu îmbunătățirea performanțelor.

Este din ce în ce mai previzibil că viitoarea dezvoltare a sectorului energetic va avea loc în domeniul energiei regenerabile și într-o oarecare măsură la sistemele bazate pe gaze naturale și nu în ceea ce privește sursele tradiționale de țiței și cărbune. Este deasemenea important de obținut sprijinul guvernamental și a opiniei publice pentru dezvoltarea acestor surse alternative de energie care, printre altele, reduc emisiile atmosferice locale și globale, reprezintă soluții atractive pentru țările în curs de dezvoltare și zonele rurale și deschid calea către viitorul sectorului energetic.

Sursele de energie tradiționale bazate pe țiței, carbune și gaze naturale s-au dovedit a fi foarte eficiente din punctul de vedere al progresului economic dar în același timp dăunătoare pentru mediul înconjurător și sănătatea umană. Aceste surse tradiționale de energie bazate pe combustibili fosili se confruntă cu presiuni din ce în ce mai mari legate de problemele de mediu, în legătură cu aceasta putându-se menționa și obiectivele de reducere a efectului de seră specificate în protocolul de la Kyoto.

În prezent sursele de energie regenerabile asigură între 15 – 20 % din cererea totală de energie din lume.

Studii recente cu privire la dezvoltarea viitoare a sectorului energetic arată că în a doua jumătate a secolului XXI prin implementarea strategiilor corespunzătoare, ponderea surselor de energie regenerabile din total poate crește de la 20% la peste 50%.

În UE, sursele regenerabile de energie (fără a include centralele hidro mari) asigură circa 26% din consumul brut de energie. Creșterea dependenței Uniunii Europene de sursele externe de energie, combaterea schimbărilor climatice și liberalizarea piețelor de energie, au accentuat importanța siguranței alimentării cu energie, așa cum se reflectă și în **Cartea Verde "Spre o strategie europeană pentru siguranța în alimentarea cu energie" COM (2000) 769**. Acest document consideră că sursele regenerabile de energie pot contribui semnificativ la creșterea resurselor interne de energie, și definește sursele noi și regenerabile de energie drept o prioritate politică.

Utilizarea surselor regenerabile răspunde astfel atât limitării dependenței Europei de sursele de energie externe, cât și respectării obligațiilor de mediu asumate prin protocolul de la Kyoto, ratificat la 5 martie 2002 de către Uniunea Europeană.

Tehnologiile energetice regenerabile tind să fie caracterizate prin cheltuieli de mediu relativ scăzute. Într-o lume ideală, aceasta le-ar ajuta în concurența cu tehnologiile tradiționale, dar bineînțeles multe din aceste costuri de mediu sunt "externalizate" nefiind evaluate pe piață. Doar în anumite zone și pentru anumiți poluanți, sunt avute în vedere aceste costuri de mediu și evident o continuă internalizare a acestor costuri va duce la dezvoltarea surselor de energie regenerabile. Eforturile internaționale de limitare a creșterii emisiilor de gaze de seră prin Protocolul de la Kyoto poate duce la o formă de taxă pe conținutul de carbon, aceasta putând fi un stimulent enorm pentru industria surselor de energie regenerabile.

O problemă fundamentală pentru orice tehnologie nouă este că, prin definiție, nu are aceleași dovezi de performanță ca sistemele mai vechi, recunoscute. Noile tehnologii și procedurile operaționale respective prezintă riscuri mai mari, dar în același timp și oportunități mai mari pentru inovații și profit. Noile sisteme energetice au fost mult timp privite ca o zonă de investiții riscantă, istoricul energiilor regenerabile fiind o dovadă clară a acestei concepții.

Rezultate mai semnificative, atât pentru companii cât și pentru societate, provin de obicei din cercetări, inovații și implementări ale acestora atent orientate. Sistemele energetice regenerabile oferă aceeași combinație de incertitudine mărită, oportunități deosebite și potențial pentru inovații și profituri semnificative. Există două raționamente pentru asistența acordată de către Guvern cercetării și dezvoltării tehnologiilor energetice ecologice (CET). În primul rând prețurile energiilor tradiționale nu reflectă în general costul social al poluării. Aceasta asigură un raționament bazat pe o concepție economică acceptată pe scară largă cu privire la subvenționarea cheltuielilor de cercetare și dezvoltare pentru tehnologiile regenerabile ca potențiale alternative la combustibilii fosili poluanți. În al doilea rând, firmele private nu pot în general beneficia de toate beneficiile investițiilor lor în cercetare și dezvoltare.

În consecință, randamentul social al cheltuielilor de cercetare și dezvoltare depășește randamentele private disponibile și în consecință firmele nu investesc suficient în cercetare și dezvoltare pentru maximizarea bunăstării sociale.

Când se implementează pentru prima dată o tehnologie nouă, ea este invariabil mai scumpă decât cele existente. Cu toate acestea există o tendință clară ca acel cost unitar al produselor fabricate să scadă în funcție de experiența câștigată din domeniul producției. Reducerile costurilor sunt de obicei foarte rapide la început dar se temperează pe măsură ce industria se dezvoltă.

Atât tehnologiile solare fotovoltaice cât și energia eoliană au creșteri mari ale vânzărilor, micșorându-se cheltuielile de capital și cheltuielile cu energia produsă iar performanțele continuă să crească. Dezvoltarea și utilizarea acestor resurse pot crește diversitatea pe piețele surselor de energie, contribuie la asigurarea de surse de energie durabile pe termen lung, contribuie la reducerea emisiilor atmosferice locale și globale, asigură oportunități comerciale atractive pentru cerințe specifice ale serviciilor energetice în special în țările în curs de dezvoltare și zonele rurale și asigură noi oportunități de locuri de muncă.

Există multe posibilități de încorporare a surselor de energie regenerabile în cadrul sistemelor de producție a energiei. Acestea includ turbine combinate pe bază de combustibili fosili și biomasă și combinații de surse regenerabile nepermanente și sisteme tradiționale pentru sarcina de bază cu profile de capacitate complementară. Se preconizează că astfel de strategii împreună cu dezvoltarea surselor regenerabile în afara rețelei pentru zonele izolate să asigure vânzări crescute continue a tehnologiilor regenerabile și a altor tehnologii energetice ecologice pe o durată de mulți ani în viitor.

Cu toate acestea, în prezent nivelul investițiilor în inovații pentru tehnologii regenerabile și alte tehnologii energetice ecologice sunt prea scăzute. Aceasta se datorează imperfecțiunilor pieții care subvaluează costurile sociale ale producției de energie, faptului că firmele nu pot beneficia de obicei de întreaga valoare a investițiilor lor în cercetare și dezvoltare în domeniul inovațiilor și faptului că noile tehnologii sunt întotdeauna caracterizate de performanțe incerte existând un risc mai mare comparativ cu alternativele tradiționale. Aceste aspecte sugerează un rol pentru implicarea sectorului public în dezvoltarea piețelor pentru tehnologiile energetice regenerabile prin diverse forme de programe de transformare a pieții.

Am putea concluziona că producătorii de energie existenți sunt în poziția optimă de a acapara noile piețe de energii regenerabile. Acești producători au capitalul necesar pentru a pătrunde pe aceste piețe și în același timp au cel mai mult de pierdut dacă nu investesc în acest domeniu și tehnologiile regenerabile continuă să se dezvolte. Implementarea și integrarea corespunzătoare a tehnologiilor surselor de energie regenerabile în sistemele de producție a energiei, pot asigura o cale care să conducă în final la o utilizare consistentă a surselor de energie regenerabile în viitor. Acest viitor ar fi mai durabil din punct de vedere ecologic și social decât folosind continuu combustibilii fosili, care implică în multe privințe riscuri ridicate pentru oameni și sănătate.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- analiza principalelor tipuri de energie și caracteristica lor comparativă;
- analiza principalelor surse regenerabile de energie;
- identificarea potențialului surselor regenerabile de energie din România;
- analiza implicațiilor sectorului energetic asupra mediului și strategiile de dezvoltare economică, socială și politică;
- prezentarea politicilor privind sursele regenerabile de energie;
- prezentarea tehnologiilor de utilizare a energiei eoliene;
- prezentarea configurațiilor de bază ale turbinelor eoliene;
- analiza reglării puterii turbinei de vânt.

4. ENERGIA FURNIZATĂ DE UN SISTEM EOLIAN FUNCȚIONÂND LA VITEZE ALE VÂNTULUI VARIABLE ÎN TIMP

Se determină, în prezenta lucrare, energia mecanică captată de turbina de vânt, (TV), și transformată în energie electrică de către generatorul sincron cu magneți permanenți, (GSMP), cuplat la TV. Prin simulare se determină viteza unghiulară mecanică, VUM, ω_{OPTIM} și rezistența de sarcină optimă R_{OPTIM} , la GSMP, la care energia este maximă, considerând viteza vântului variabilă în timp.

4.1. Considerații preliminare

Se pune problema determinării încărcării sistemului **TV+GSMP**, [1-6], astfel încât energia obținută să fie maximă.

Obținerea energiei electrice maxime, în condițiile meteo date: viteza vântului fiind variabilă semnificativ în timp, este scopul conducerii sistemului **TV+GSMP**, figura 4.1, [7-16].

Mărimile principale măsurabile în proces sunt:

- viteza vântului, măsurată cu anemometrul **AN**, figura 1,
 - viteza unghiulară mecanică, ω , măsurată la arborele **GSMP**.
- Pe baza acestor mărimi se asigură controlul încărcării la **GSMP**.

În literatura de specialitate [1-21] este tratată pe larg funcționarea TV în zona energetică maximă, la viteze ale vântului constante în timp, folosind diverse modele matematice, date de firma constructoare și deduse în condiții de laborator, condiții mult diferite de cele existente în exploatare. [7,12,19]. Din acest motiv și energia electrică obținută are o valoare mai mică decât cea maximă posibilă obținută la o funcționare în punctul de putere maximă, MPP, la VUM optimă.

La viteze ale vântului variabile în timp problema funcționării în zona MPP devine complexă și nu în toate cazurile rezolvabilă în timp util, datorită inerțiilor mecanice mari și variațiilor rapide ale vitezei vântului în timp [5,8,11,21].

Estimarea valorii rezistenței de sarcină, de la generator, în condițiile în care viteza vântului variază în timp, este deosebit de importantă în realizarea unui reglaj optimal din punct de vedere energetic, [7,12,15]. În unele lucrări, [1,2,3], se folosesc algoritmi de reglare bazați pe măsurarea vitezei vântului și prescrierea turației optime din zona MPP.

Dependența puterii TV de VUM, adică funcția $P_{TV}(\omega)$, prezintă un maxim la valoarea optimului energetic pentru VUM.

Optimul energetic este la VUM optimă, valoare la care puterea captată de TV este maximă, punctul MPP de pe caracteristica puterii echivalente.

Punctele importante, de pe caracteristica puterii TV, sunt:

- punctul de putere maximă-MPP-
- punctul de putere nulă .

Determinarea corectă a acestor puncte, în condiții de exploatare, pe baza MM-TV determinat în timpul funcționării asigură o funcționare în zona MPP.

La viteze ale vântului variabile semnificativ în timp menținerea funcționării sistemului electroenergetic eolian, SEE, format din turbină și generator sincron cu magneți permanenți, TV+GSMP, în zona optimă din punct de vedere energetic, este o problemă complexă deoarece trebuie, în permanență, modificată sarcina la GSMP, în funcție de valoarea vitezei vântului. Problemele complicate apar la variațiile rapide ale vitezei vântului în timp. În aceste cazuri se determină, prin măsurători de VUM și energie la generator, MM-TV și pe baza lui se obține zona optimă .

Funcționarea în sarcină a sistemului nu este perturbată și modelele matematice ale TV sunt mereu actualizate în timp, deci valide în asigurarea unei funcționări în zona optimă din punct de vedere energetic. Prin înregistrarea variației în timp a vitezei vântului și a VUM și a energiei de la generator se estimează corect valoarea energiei eoliene captate de TV. În regim static, la viteze ale vântului variabile lent în timp, se poate determina o valoare optimă a sarcinii la generator pentru a se realiza o funcționare în zona MPP.

Variația rapidă în timp a vitezei vântului și valorile mari ale momentului de inerție echivalent al SEE pun probleme dificile în realizarea, în timpul util, a funcționării în zona optimă din punct de vedere energetic.

În prezenta lucrare rezultatele obținute, prin simulări, au la bază structura modelelor matematice uzuale ale TV și GSMP. Pe baza lor se determină valoarea rezistenței de sarcină optime din punct de vedere energetic, la GSMP, în regim static și se demonstrează că la diferite valori ale vitezei vântului, la aceeași rezistență de sarcină, funcționarea este în zona MPP.

4.2. Modele matematice

Simulările prezentate în lucrare se bazează pe modelele matematice clasice ale **TV** și **GSMP**, preluate din [14] și pe baza lor se deduc VUM optime, ω_{OPTIM} , corespunzătoare rezistențelor de sarcină R_{OPTIM} .

4.2.1. Modelul matematic al TV, (MM-TV)

Se are în vedere un model clasic, [14], pentru turbină, model ce permite estimarea cuplului la viteza unghiulară ω .

Pentru turbina de vânt, **TV**, se dau de către firma constructoare caracteristicile experimentale ale puterii sau ale cuplului, acestea din urmă denumite și caracteristici mecanice experimentale, adică funcțiile: $P_{TV}(\omega)$ și $M_{TV}(\omega)$.

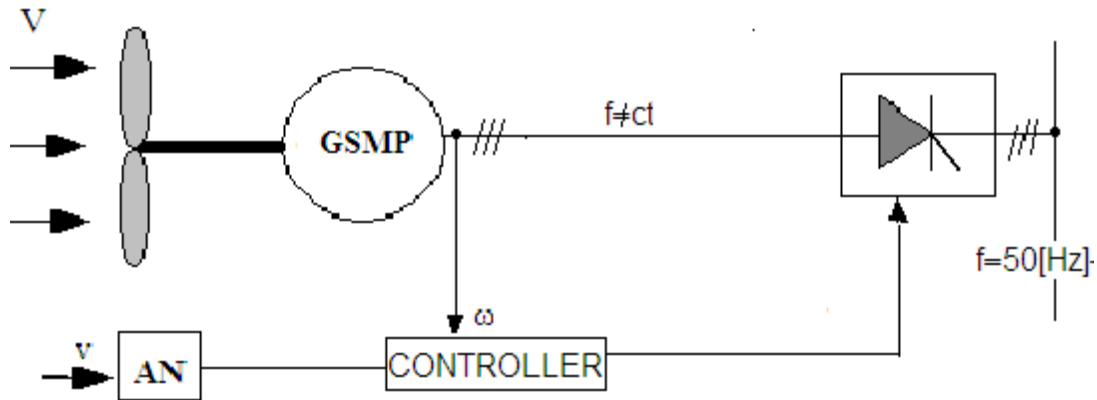


Fig.4.1. Conducerea sistemului TV+GSMP

CARACTERISTICA PUTERII

Puterea dată de **TV** se calculează cu relația

$$P_{TV} = \rho \pi R^2 C_p(\lambda) V^3$$

unde: ρ - densitatea aerului; R - raza paletelor; $C_p(\lambda)$ - coeficient de conversie al puterii;

$\lambda = R\omega / V$; V - viteza vântului; ω - viteza unghiulară mecanică, **VUM**

Coeficientul de conversie al puterii, $C_p(\lambda)$, se determină cu relația:

$$C_p(\lambda) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda}}, \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} - 0.035,$$

unde: $c_1 - c_4$ sunt constante date în catalog,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} - 0.035 = \frac{V}{R\omega} - 0.035 = \left(V / (1.5\omega) - 0.035 \right).$$

Prin înlocuire, coeficientul de conversie al puterii, $C_p(\lambda)$, se obține sub forma:

$$C_p(\lambda) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda} - c_3 \right) e^{-\frac{c_4}{\lambda}} = c_1 \left(c_2 (V / (1.5\omega)) - 0.035 \right) e^{-c_4 (V / (1.5\omega) - 0.035)}$$

și puterea dată de **TV** se calculează cu relația:

$$P_{TV} = \rho \pi R^2 C_p(\lambda) V^3 = 1.225 \pi 1.5^2 c_1 \left(c_2 (V / (1.5\omega)) - 0.035 \right) e^{-c_4 (V / (1.5\omega) - 0.035)} V^3 =$$

sau

$$k_1 \cdot \left(c_2 (V / (1.5\omega)) - 0.035 \right) e^{-c_4 (V / (1.5\omega) - 0.035)} V^3$$

$$P_{TV} = k_1 \cdot \left(k_2 (V / \omega - 0.0525) - c_3 \right) \cdot e^{-k_3 (V / \omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde: $k_1 = 1.225 \pi 1.5^2 c_1$; $k_2 = c_2 / 1.5$; $k_3 = c_4 / 1.5$.

În final pentru putere se obține relația [14]:

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot \left((V / \omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 (V / \omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

Valoarea maximă a funcției $P_{TV}(\omega)$ se obține pentru **VUM** de referință ω_{ref} , prin derivare :

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left(23.584 \cdot \left((V / \omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 (V / \omega - 0.0525)} \cdot V^3 \right) = 0,$$

obținându-se:

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V$$

Precizare:

Rezultatul obținut este valabil la $V = ct$. În cazurile în care viteza vântului variază semnificativ în timp rezultatul obținut trebuie reanalizat.

La viteze ale vântului, $V(t)$, variabile în timp, de exemplu, de forma:

$$V(t) = 16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi / 2)$$

se obțin rezultatele:

$$\omega_{ref1} = 572.74 [rad / s] - \text{la } V_{MAX} = 18 [m / s]$$

$$\omega_{ref2} = 509.09 [rad / s] - \text{la } V_{MEDIU} = 16 [m / s]$$

$$\omega_{ref3} = 445.46 [rad / s] - \text{la } V_{MIN} = 14 [m / s]$$

puterea variind între valoarea minimă: $P_{TV-MIN} = 5210.3 [kW]$ și valoarea maximă:

$P_{TV-MAX} = 11074. [kW]$, figura 4. 2.

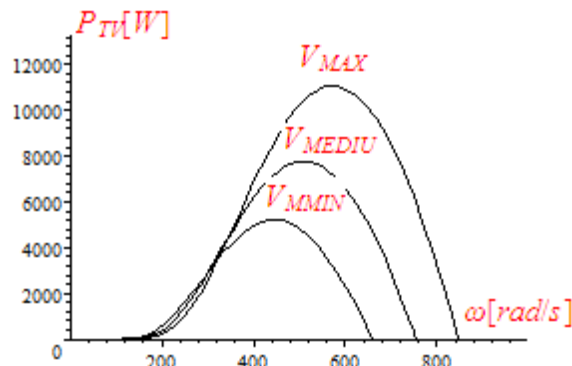


Fig.4.2 Dependența puterii de VUM, ω

Puterea fiind derivata energiei, energia mecanică, W_m , captată de **TV** se calculează din putere, astfel:

$$\frac{dW_m}{dt} = P_{TV}$$

sau

$$\frac{dW_m}{dt} = 23.584 \cdot \left((V / \omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

CARACTERISTICA MOMENTULUI

Momentul TV, M_{TV} , se obține din putere: $M_{TV} = P_{TV} / \omega$ și are forma:

$$M_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot \left((V / \omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3 / \omega$$

La $V(t) = 16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)$ caracteristicile mecanice sunt în zona hașurată, figura 4.3.

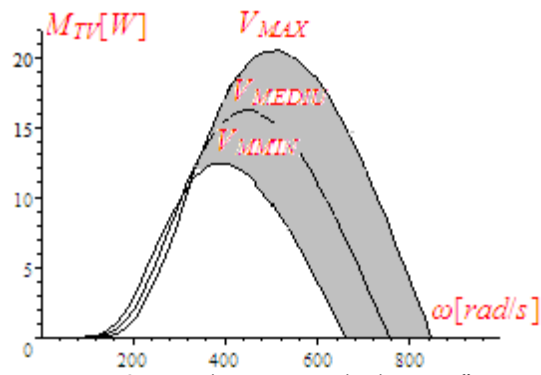


Fig.4.3. Dependența momentului de VUM, ω

Valorile maxime ale momentelor sunt:

$$M_{TV1} = 12.402 [Nm] - \text{la } V_{MIN} = 14 [m/s] \text{ și } \omega_{M1} = 394. [rad/s]$$

$$M_{TV2} = 16.198 [Nm] - \text{la } V_{MEDIU} = 16 [m/s] \text{ și } \omega_{M2} = 450.28 [rad/s]$$

$$M_{TV3} = 20.5 [Nm] - \text{la } V_{MAX} = 18 [m/s] \text{ și } \omega_{M3} = 506.57 [rad/s]$$

Comparativ cu valorile ω_{ref} , la care puterea este maximă, **VUM**, ω_M , la care momentul este maxim sunt mai mici, aceasta demonstrând faptul că sistemul funcționează stabil la putere maximă[1].

La o variație a vitezei vântului sub formă sinusoidală: $V(t) = V_{mediu} + A \sin(2\pi t / T + \pi/2)$, de perioadă $T = 35 [s]$, amplitudine A și cu viteza medie $V_{mediu} = 16 [m/s]$, se obține:

cazul 1

-momentul M_{TV1} la $V_1(t) = 16 - \sin(0.17943t + \pi/2)$, sub forma:

$$M_{TV1} = \left(23.584 \cdot \left(\left(\frac{16 - \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{16 - \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right)} \cdot \left(\frac{16 - \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} \right)^3 \right) / 500.$$

cu valoarea medie:

$$M_{TV1-MEDIU} = \frac{1}{35} \int_0^{35} \left(23.584 \cdot \left(\left(\frac{16 - \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{16 - \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right)} \cdot \left(\frac{16 - \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} \right)^3 \right) / 500. dt$$

$$= 15.476 [Nm]$$

cazul 2

-momentul M_{TV2} la $V_2(t) = 16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)$, sub forma:

$$M_{TV2} = \left(\begin{array}{l} 23.584 \cdot \left(\left(\frac{16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right)} \cdot \left(\frac{16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} \right)^3 / 500. \end{array} \right)$$

cu valoarea medie:

$$M_{TV2-MEDIU} = \frac{1}{35} \int_0^{35} \left(\begin{array}{l} 23.584 \cdot \left(\left(\frac{16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right)} \cdot \left(\frac{16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} \right)^3 / 500. \end{array} \right) dt$$

$$= 15.309 [Nm]$$

Variația cuplului în timp ,pentru cele două cazuri ,este dată în figura 4.4.

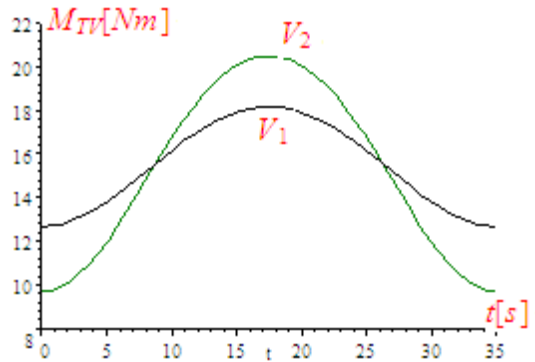


Fig.4.4.Variația cuplului în timp

Se observă că atât amplitudinile cât și valorile medii ale momentului diferă în cele două cazuri.

Dependența momentului mediu,

$M_{TV-MEDIU}$, de amplitudinea vitezei vântului

Pentru cazurile cu:

$$V_3(t) = 16 - 4 \sin(0.17943t + \pi/2)$$

$$V_4(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t + \pi/2)$$

se obțin valorile medii pentru momentul $M_{TV-MEDIU}$:

$$M_{TV3-MEDIU} = \frac{1}{35} \int_0^{35} \left(\begin{array}{l} 23.584 \cdot \left(\left(\frac{16 - 4 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{16 - 4 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right)} \cdot \left(\frac{16 - 4 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} \right)^3 / 500. \end{array} \right) dt$$

$$= 14.699 [Nm]$$

$$M_{TV4-MEDIU} = \frac{1}{35} \int_0^{35} \left(\begin{array}{l} 23.584 \cdot \left(\left(\frac{16 - 6 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{16 - 6 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} - 0.0525 \right)} \cdot \left(\frac{16 - 6 \sin(0.17943t + \pi/2)}{500} \right)^3 / 500. \end{array} \right) dt$$

Admițând

$$= 13.873 [Nm]$$

pentru $M_{TV4-MEDIU}(A)$ o variație de forma:

$$M_{TV-MEDIU} = aA^2 + bA + c = -0.0384A^2 + 0.0518A + 15.566$$

se poate concluziona faptul că valoarea momentului mediu $M_{TV4-MEDIU}$, la o viteză a vântului constantă: $V_{mediu} = ct = 16 [m/s]$, scade cu creșterea amplitudinii vitezei vântului A , figura 4.5.

Această scădere a lui $M_{TV-MEDIU}$ are implicații asupra determinării **VUM** optime:

ω_{OPTIM} , deoarece valoarea lui ω_{OPTIM} este direct proporțională cu valoarea lui $M_{TV-MEDIU}$, așa cum se va demonstra la modelul matematic al GSMP.

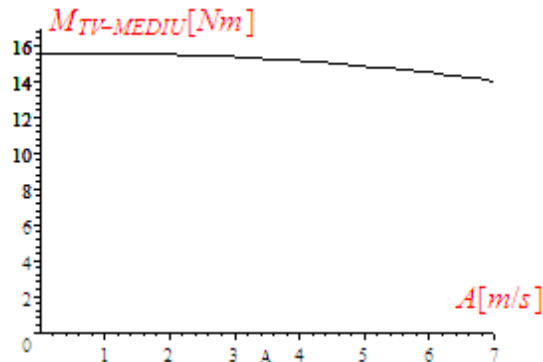


Fig.4.5.Dependența momentului mediu de amplitudinea vântului

Pe perioada $T = 35 [s]$ **VUM**, ω , variază între limitele $\omega_{initial}$ și ω_{final} , având valoarea medie:

ω_{mediu} .

În regim stabilizat, la $\omega_{final} = \omega_{initial}$, având în vedere ecuația mișcării :

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP}$$

cu J – momentul de inerție echivalent, M_{GSMP} – momentul la **GSMP**, prin integrare se obține:

$$J \int_{\omega_{initial}}^{\omega_{final}} d\omega = \int_0^T (M_{TV} - M_{GSMP}) dt$$

sau

$$J(\omega_{final} - \omega_{initial}) = 0 = \int_0^T (M_{TV} - M_{GSMP}) dt$$

Deoarece, așa cum se va demonstra la modelul matematic al GSMP pentru calculul momentului M_{GSMP} se poate folosi relația:

$$M_{GSMP} = k_M \cdot \omega$$

și se obține:

$$\int_0^T M_{TV} \cdot dt = k_M \cdot \omega_{mediu} \cdot T$$

sau:

$$\frac{1}{T} \int_0^T M_{TV} \cdot dt = k_M \cdot \omega_{mediu}$$

În concluzie, în regim stabilizat **VUM**, ω_{mediu} , se poate determina din valoarea medie $M_{TV-MEDIU}$, a momentului M_{TV} .

4.2.2.Modelul matematic al GSMP,(MM-GSMP)

Pentru a analiza funcționarea sistemului (TV+GSMP), la viteze ale vântului variabile în timp, se folosește modelul matematic ortogonal pentru generatorul sincron cu magneti permanenți,(GSMP), dat în continuare prin ecuațiile[5]:

$$\begin{cases} -U\sqrt{3} \sin\theta = R_1 I_d - \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3} \cos\theta = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_{motor} = p_1 (L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_{MP} \end{cases}$$

unde

R_1 – rezistența înfășurării statorice; L_d – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa d ;
 L_q – inductanța proprie a înfășurării rotorice din axa q; p_1 – numărul perechilor de poli; Ψ_{MP} -
 fluxul magnetului permanent.

Din datele de catalog [1] ale GSMP de putere: $P_N = 5 [kW]$ se obțin valorile:

$$R_1 = 1.6[\Omega], L_d = 0.07[H], L_q = 0.08[H], \Psi_{MP} = 3.3[Wb]$$

Din sistemul de ecuații ale GSMP

$$\begin{cases} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\ M_G = -0.01I_dI_q + \Psi_M I_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \end{cases}$$

se obțin:

$$\text{puterea- } P_G = 27225 \cdot R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \text{ și}$$

$$\text{momentul- } M_{GSMP} = -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

Cele două funcții: $P_G(R, \omega)$ și $M_{GSMP}(R, \omega)$ depind de : R – rezistența de sarcină și ω –
 VUM.

La $R = ct$ momentul M_{GSMP} :

$$M_{GSMP} = 5445.0\omega(5 \cdot 500 + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625 \cdot 500^2 + 2000 \cdot 500 + 1600.0}{(1250 \cdot 500^2 + 4000 \cdot 500 + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

- la $R = 500 [\Omega]$ depinde liniar de ω așa cum se observă din figura 4. 6.

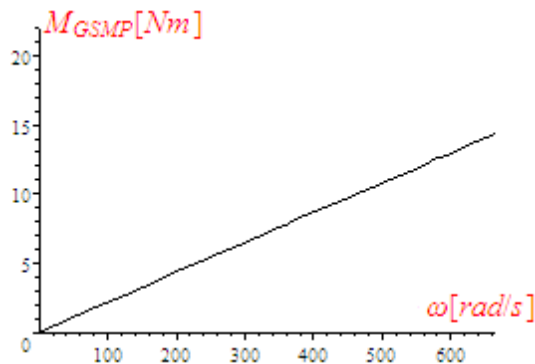


Fig.4.6. Dependența lui M_{GSMP} de ω

Prin urmare, la $R = ct$ momentul M_{GSMP} se poate pune sub forma

$$M_{GSMP} = k_M \cdot \omega$$

Puterea fiind derivata energiei, energia electrică, se calculează din putere, astfel

$$\frac{dW_e}{dt} = P_G \text{ sau } \frac{dW_e}{dt} = 27225 \cdot R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

4.3.Determinarea energiei dată de GSMP

Se consideră că viteza vântului se modifică sinusoidal cu perioada $T = 35[s]$ și cu viteza medie $V_{mediu} = 16[m/s]$.

Pentru a evalua influența amplitudinilor vântului asupra valorii energiei obținute se analizează

pentru $V_{mediu} = 16[m/s]$ două variante de variație a vitezei vântului:

$$\text{varianta 1 - } V(t) = 16 - \sin(0.17943t + \pi/2)$$

$$\text{varianta 2 - } V(t) = 16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)$$

varianta 1

La o variație a vitezei vântului, de la valoarea inițială $V_{INITIAL} = 15[m/s]$, la valoarea finală

$V_{FINAL} = 17[m/s]$, sub forma sinusoidală:

$V(t) = V_{mediu} + A \sin(2\pi t / T + \pi/2)$, de perioada $T = 35[s]$ și cu viteza medie

$V_{mediu} = 16[m/s]$, se obține $V(t) = 16 - \sin(0.17943t + \pi/2)$ cu reprezentarea din figura 4.7.

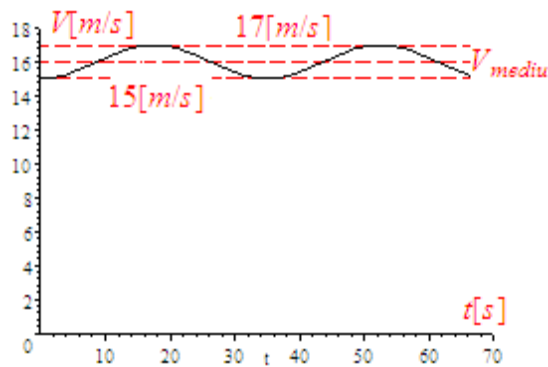


Fig.4.7.Variația vitezei vântului în timp

Ecuția mișcării:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP}$$

se obține sub forma:

$$50 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left(\frac{V}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{V}{\omega} - 0.0525 \right)}$$

$$\left(V \right)^3 / \omega - 5445 \cdot \omega (5 \cdot R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2}$$

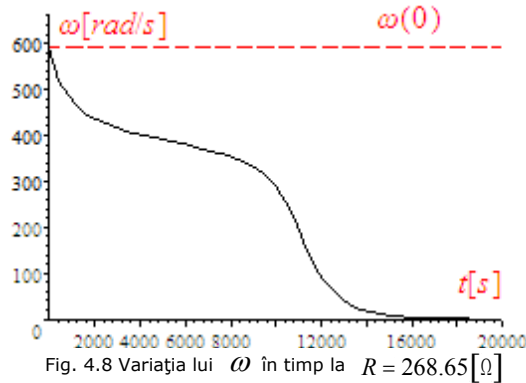
Puterea, P , fiind derivata energiei, W , adică $P = dW / dt$, pentru **GSMP** ce furnizează energia W_e , se obține:

$$\frac{dW_e}{dt} = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2}$$

Așadar, variațiile în timp ale lui ω și W_e se obțin din sistemul de ecuații diferențiale:

$$\begin{cases} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left(\frac{V}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{V}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot \left(V \right)^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot R + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (R)^2 + 2000 \cdot (R) + 1600}{(1250 \cdot (R)^2 + 4000 \cdot (R) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = \frac{dW_e}{dt} \end{cases}$$

La rezistențe de sarcină mai mici decât $R = 268.65[\Omega]$ sistemul este instabil, așa cum se observă și din figura 4.8.



Sub valoarea $R = 268.65[\Omega]$ sistemul devine instabil, momentul generatorului ,

M_{GSMP} , fiind mai mare decât cel dat de turbina de vânt M_{TV} , figura 4.9.

$$M_{GSMP}(\omega) = 5445 \cdot \omega (5 \cdot (268.65) + 8) \cdot \frac{4.0\omega^2 + 625 \cdot (268.65)^2 + 2000 \cdot (268.65) + 1600.0}{(1250 \cdot (268.65)^2 + 4000 \cdot (268.65) + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

$$M_{TV} = 23.584 \cdot (((16)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16)/\omega - 0.0525)} \cdot (16)^3/\omega$$

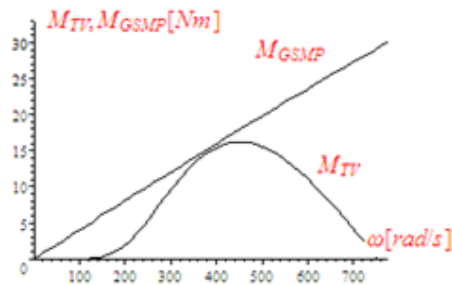


Fig.4.9. Dependentele momentelor M_{TV} și M_{GSMP} de ω

Pentru rezistențe de sarcină în domeniul : $318.65[\Omega] - 468.65[\Omega]$, pe intervalul $t = 0 - 11111[s]$, se obține W_e :

$$W_e(11111) = 8.7053 \times 10^7 \text{ [J] la- } R = 318.65[\Omega]$$

$$W_e(11111) = 8.7403 \times 10^7 \text{ [J] la- } R = 368.65[\Omega]$$

$$W_e(11111) = 8.4966 \times 10^7 \text{ [J] la- } R = 418.65[\Omega]$$

$$W_e(11111) = 8.1634 \times 10^7 \text{ [J] la- } R = 468.65[\Omega]$$

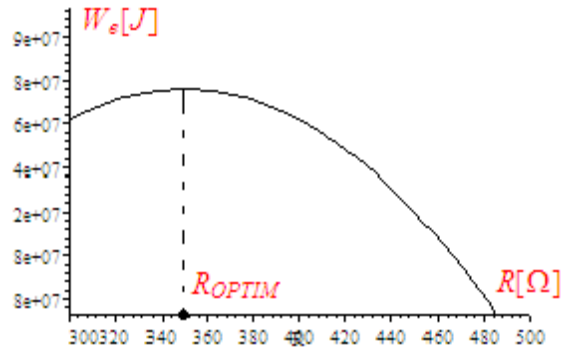
Punând funcția $W_e(R)$ sub forma : $W_e(R) = a \cdot R^2 + b \cdot R + c$ și folosind valorile de mai sus rezultă:

$$W_e = -557.4 \cdot R^2 + 3.9 \times 10^5 \cdot R + 1.9344 \times 10^7,$$

cu reprezentarea din figura 4.10.

Rezistența optimă R_{OPTIM} are valoarea $R_{OPTIM} = 349.84[\Omega]$, obținută din anularea derivatei:

$$\frac{d}{dR}(-557.4 \cdot R^2 + 3.9 \times 10^5 \cdot R + 1.9344 \times 10^7) = 0,$$

Fig.4.10.Dependența lui W_e de R

La $R_{OPTIM} = 349.84 [\Omega]$ se obține variația lui ω_{OPTIM} din ecuația

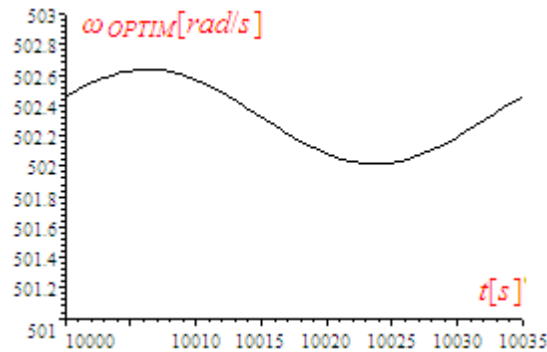
$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left(\frac{16 - \sin(0.17943t + \pi/2)}{\omega - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{16 - \sin(0.17943t + \pi/2)}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot (16 - \sin(0.17943t + \pi/2))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 349.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600}{(1250 \cdot (349.84)^2 + 4000 \cdot (349.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ 27225 \cdot 349.84 \cdot \omega^2 \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = \frac{dW_e}{dt} \\ \omega(0) = 590.75 \\ W_e(0) = 0 \end{array} \right.$$

mișcării:

Vari

ția lui ω_{OPTIM} , pe intervalul : $t = 1000 \div 1035 [s]$, este dată în figura 4.11.

Valorile lui ω_{OPTIM} sunt în domeniul : $(502 \div 502.65) [rad / s]$

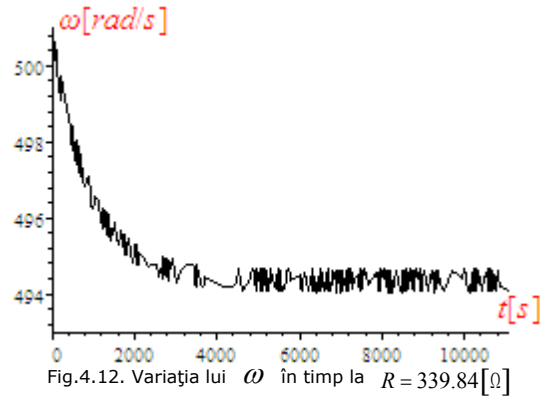
Fig.4.11.Variația în timp a lui ω_{OPTIM}

Energia obținută la $R_{OPTIM} = 349.84 [\Omega]$, pe intervalul : $t = 0 \div 11111 [s]$ are valoarea :

$$W_e(11111) = 8.7789 \times 10^7 [J].$$

VERIFICĂRI

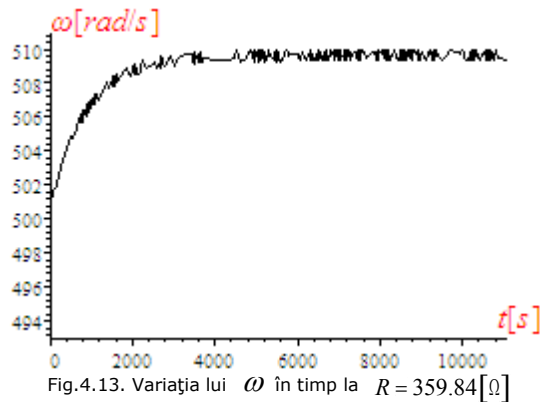
La $R = 339.84 [\Omega]$ se obține energia $W_e(11111) = 8.552 \times 10^7 [J]$ de valoare mai mică. **VUM** se stabilizează în jurul valorii $\omega = 495 [rad / s]$, figura 4.12, diferită de ω_{OPTIM} ce este în domeniul $(502 \div 502.65) [rad / s]$.



La $R = 359.84[\Omega]$ energia este:

$$W_e(11111) = 8.5514 \times 10^7 [J] \ll W_{eOPTIM} = 8.7789 \times 10^7 [J]$$

și **VUM** se stabilizează în jurul valorii: $\omega(11111) = 509.32 [rad / s]$, figura 4.13.



Se dau în continuare **VUM**, ω și energiile $W_e(11111)$ obținute după un timp $t = 11111 [s]$, la diferite valori ale rezistenței de sarcină. În toate cazurile se obține o energie mai mică decât cea obținută la $R_{OPTIM} = 349.84[\Omega]$ și $\omega_{OPTIM} \approx 502.3 [rad / s]$, de valoare : $W_e(11111) = 8.7789 \times 10^7 [J]$.

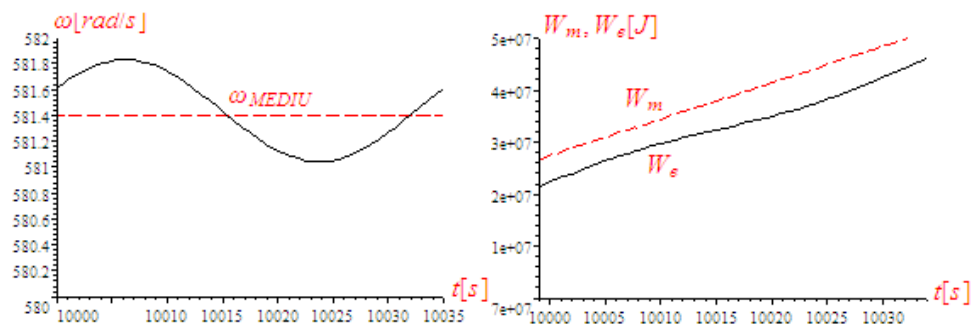
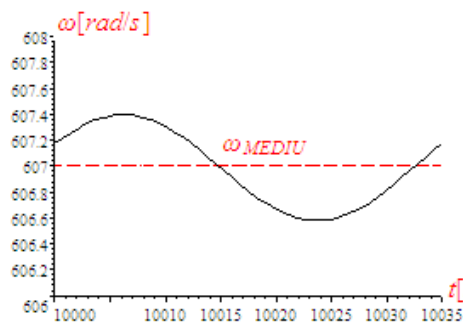
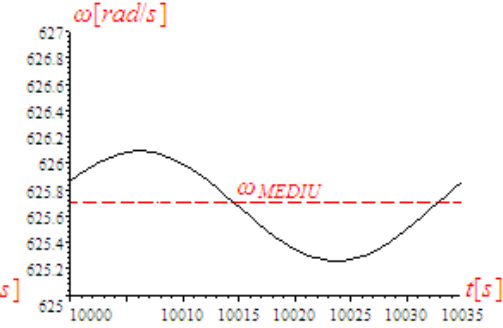


Fig.4.13.a. Variația lui ω la $R = 518.65[\Omega]$

Fig4. 13.b. Variația lui W_m, W_e la $R = 518.65[\Omega]$

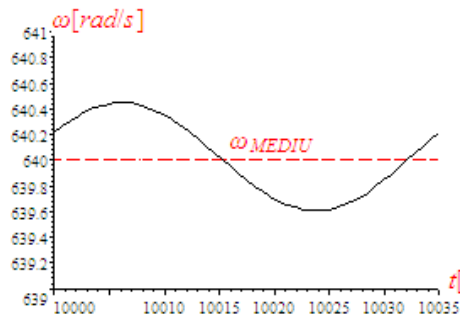
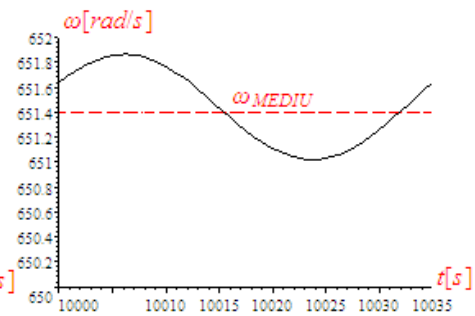
2) La $R = 618.65[\Omega], W_e(11111) = 7.1143 \times 10^7 [J]$, $\omega_{MEDIU} = 607 [rad / s]$

3) La $R = 718.65[\Omega], W_e(11111) = 6.497 \times 10^7 [J], \omega_{MEDIU} = 625.6 [rad / s]$

Fig.4.13.c.Variația lui ω la $R = 618.65[\Omega]$ Fig.4.13.d.Variația lui ω la $R = 718.65[\Omega]$

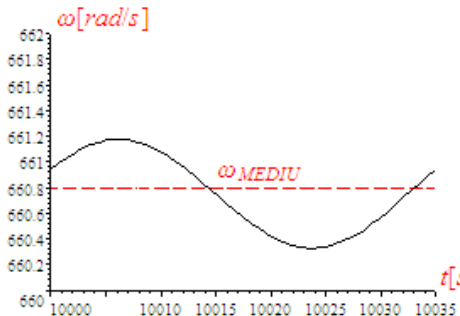
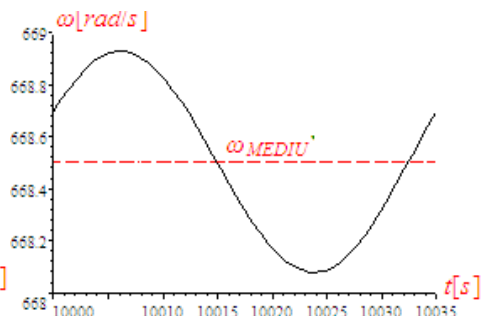
4) $R = 818.65[\Omega], W_e(11111) = 5.9615 \times 10^7 [J], \omega_{MEDIU} = 640. [rad / s]$

5) $R = 918.65[\Omega], W_e(11111) = 5.499 \times 10^7 [J], \omega_{MEDIU} = 651.4 [rad / s]$

Fig.4.13.e.Variația lui ω la $R = 818.65[\Omega]$ Fig.4.13.f.Variația lui ω la $R = 918.65[\Omega]$

6) $R = 1018.65[\Omega], W_e(11111) = 5.0985 \times 10^7 [J], \omega_{MEDIU} = 660.8 [rad / s]$

7) $R = 1118.65[\Omega], W_e(11111) = 4.7496 \times 10^7 [J], \omega_{MEDIU} = 668.5 [rad / s]$

Fig.4.13.g.Variația lui ω la $R = 1018.65[\Omega]$ Fig.4.13.h.Variația lui ω la $R = 1118.65[\Omega]$

8) $R = 1218.65[\Omega], W_e(11111) = 4.4436 \times 10^7 [J], \omega_{MEDIU} = 675 [rad / s]$

9) $R = 1418.65[\Omega], W_e(11111) = 3.9337 \times 10^7 [J], \omega_{MEDIU} = 685.55 [rad / s]$

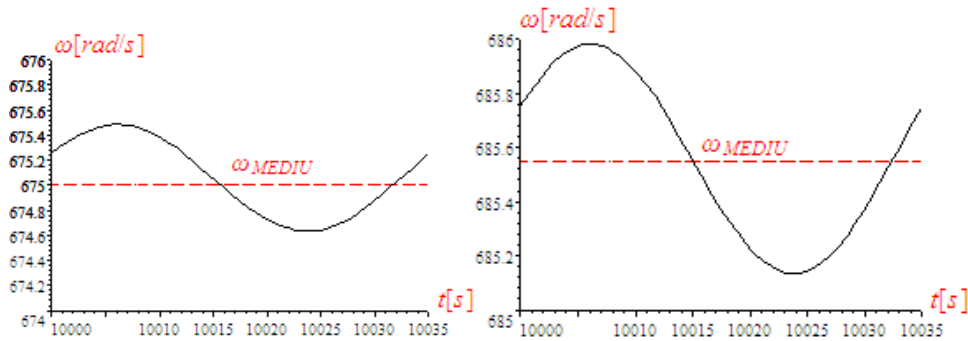


Fig.4.13.i.Variația lui ω la $R = 1218.65 [\Omega]$ Fig.4.13.j.Variația lui ω la $R = 1418.65 [\Omega]$

10) $R = 1718.65 [\Omega]$, $W_e(11111) = 3.3529 \times 10^7 [J]$, $\omega_{MEDIU} = 696.89 [rad / s]$

11) $R = 418.65 [\Omega]$, $W_e(11111) = 8.4966 \times 10^7 [J]$, $\omega_{MEDIU} = [543.41 rad / s]$

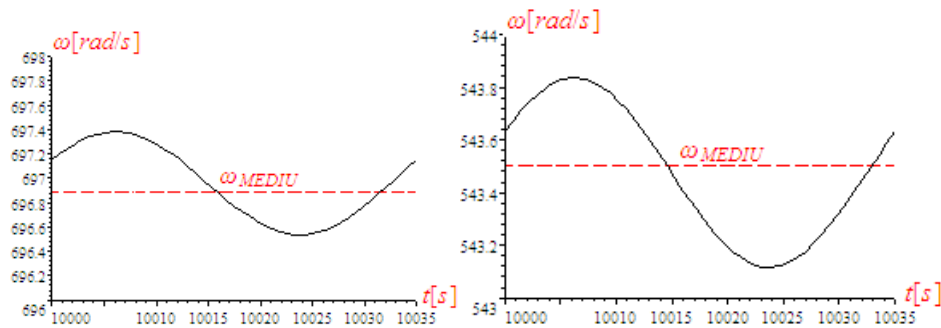


Fig.4.13.k.Variația lui ω la $R = 1718.65 [\Omega]$ Fig.4.13.l.Variația lui ω la $R = 418.65 [\Omega]$

12) $R = 318.65 [\Omega]$, $W_e(11111) = 8.7053 \times 10^7 [J]$, $\omega_{MEDIU} = 474.4 [rad / s]$

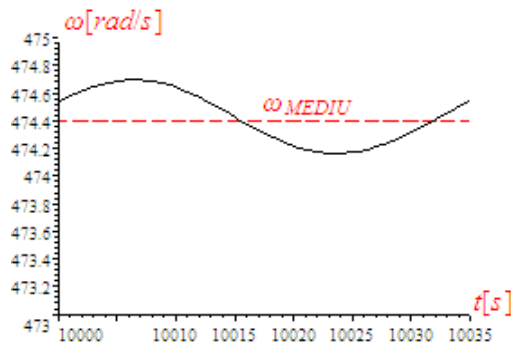


Fig.4.13.m.Variația lui ω la $R = 318.65 [\Omega]$

Observația 1

Parametrii optimi : ω_{OPTIM} și R_{OPTIM} s-au obținut prin simulare într-un timp $t = 11111 [s]$. Pentru a fi utile aceste mărimi trebuie să fie determinate în timp real și acest fapt se poate realiza doar prin măsurarea vitezei vântului.

Observația 2

Valorile obținute sunt deosebit de utile în a valida metoda de calcul a lui ω_{OPTIM} în timp real, dată în continuare .

Varianta 2

La o variație a vitezei vântului sub formă sinusoidală:

$$V(t) = 16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)$$

și la $R = 349.84 [\Omega]$ se obține ecuația mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left((16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 349.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600}{(1250 \cdot (349.84)^2 + 4000 \cdot (349.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ 27225 \cdot 349.84 \cdot \omega^2 \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = \frac{dW_e}{dt} \\ \omega(0) = 590.75 \\ W_e(0) = 0 \end{array} \right.$$

Pentru rezistențe de sarcină în domeniul : $318.65 [\Omega] - 468.65 [\Omega]$, pe intervalul $t = 0 - 11111 [s]$, se obține W_e :

$$W_e(11111) = 8.57 \times 10^7 \text{ [J]} \text{ la } R = 318.65 [\Omega]$$

$$W_e(11111) = 8.6929 \times 10^7 \text{ [J]} \text{ la } R = 348.65 [\Omega]$$

$$W_e(11111) = 8.6934 \times 10^7 \text{ [J]} \text{ la } R = 349.84 [\Omega]$$

$$W_e(11111) = 8.6738 \times 10^7 \text{ [J]} \text{ la } R = 368.65 [\Omega]$$

$$W_e(11111) = 8.4627 \times 10^7 \text{ [J]} \text{ la } R = 418.65 [\Omega]$$

$$W_e(11111) = 8.149 \times 10^7 \text{ [J]} \text{ la } R = 468.65 [\Omega]$$

Punând funcția $W_e(R)$ sub forma : $W_e(R) = a \cdot R^2 + b \cdot R + c$ și folosind valorile de mai sus rezultă:

$$W_e = -553.4 \cdot R^2 + 3.872 \times 10^5 \cdot R + 1.9205 \times 10^7,$$

Rezistența optimă R_{OPTIM} are valoarea $R_{OPTIM} = 349.84 [\Omega]$, obținută din anularea derivatei.

S-a obținut aceeași valoare pentru R_{OPTIM} ca la varianta 1

Valorile lui ω_{OPTIM} sunt în domeniul : $(498.7 \div 499.9) [rad/s]$. Variația lui ω_{OPTIM} , pe intervalul : $t = 1000 \div 1035$, este dată în figura 4.14 și se poate pune sub forma:

$$\omega_{OPTIM}(t) = a + b \sin(0.17943t + \phi) = 499.3 + 0.6 \sin(0.17943t + 0.5236)$$

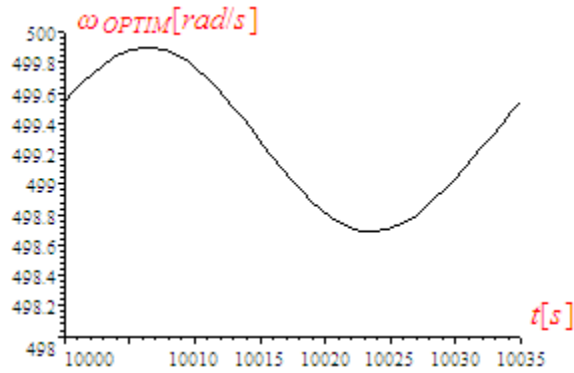
Constantele a, b, ϕ se determină din valorile extreme:

$$\omega_{OPTIM-MAX} = 499.9 [rad/s], \omega_{OPTIM-MIN} = 498.7 [rad/s]$$

și din $\omega_{OPTIM}(0) = a + b \sin(\phi)$, mărimi ce formează sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 499.9 = a + b \\ 499.6 = a + b \sin(\phi) \\ 498.7 = a - b \end{array} \right.$$

cu soluția: $\{b = 0.6, \phi = 0.5236, a = 499.3\}$

Fig.4.14. Variația în timp a lui ω_{OPTIM} - varianta 2

Energia obținută, la $R_{OPTIM} = 349.84 [\Omega]$, pe intervalul : $t = 0 \div 11111 [s]$ are valoarea :

$W_e(11111) = 8.6934 \times 10^7 [J]$, fiind mai mică decât cea obținută în varianta 1:

$$W_e(11111) = 8.7789 \times 10^7 [J]$$

Observația 3

Valorile lui ω_{OPTIM} și a energiei scad cu mărirea amplitudinii valorii vitezei vântului.

4.4. Oscilațiile puterii și ale energiei

Se analizează oscilațiile puterii și ale energiei la viteza vântului variabilă în timp de forma:

$$V(t) = 16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)$$

Puterea P_{TV} , dată de **TV**, oscilează între valorile extreme P_{TV-MAX} și $P_{TV-MIN} = 5 [kW]$, obținute din:

$$P_{TV}(t) = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) / (\omega) - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left((16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) / (\omega) - 0.0525 \right)^3} \cdot (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^3$$

Puterea furnizată de **GSMP** se obține din sistemul de ecuații ale **GSMP**, rezultând:

$$P_{GSMP}(t) = 27225 \cdot 349.84 \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 \cdot 7 \cdot \omega^2)^2}$$

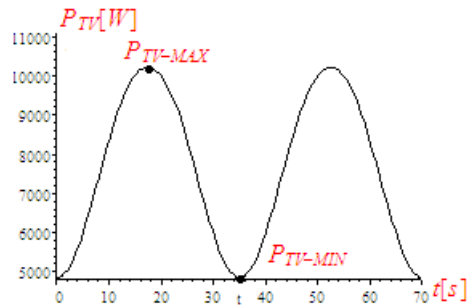
Oscilațiile puterii mecanice sau electrice sunt semnificativ influențate de valoarea momentului de inerție $-J-$. Se analizează în continuare 3 cazuri:

- 1) $J = 50 [kgm^2]$ -valoare reală
- 2) $J = 5 [kgm^2]$ -valoare mică
- 3) $J = 500 [kgm^2]$ -valoare mare

Cazul 1 - $J = 50 [kgm^2]$

Puterea P_{TV} dată de **TV**, la $\omega_{OPTIM}(t) = (499.3 + 0.6 \sin(0.17943t + 0.5236))$, dedus anterior, oscilează între valorile extreme $P_{TV-MAX} = 10.2 [kW]$ și $P_{TV-MIN} = 5 [kW]$, fig.4.15.

$$P_{TV}(t) = 23.584 \cdot \left(\left(\frac{(16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))}{(499.3 + 0.6 \sin(0.17943t + 0.5236))} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))}{(499.3 + 0.6 \sin(0.17943t + 0.5236))} - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^3$$

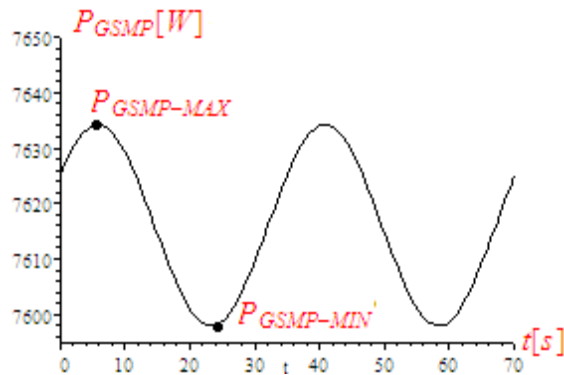
FIG.4.15.Variația în timp a lui P_{TV}

Puterea furnizată de **GSMP** la $R_{OPTIM} = 349.84 [\Omega]$ se obține din:

$$P_{GSMP}(t) = 27225 \cdot 349.84 \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} =$$

$$= 27225 \cdot 349.84 \cdot (499.3 + 0.6 \sin(0.17943t + 0.5236))^2 \frac{4 \cdot (499.3 + 0.6 \sin(0.17943t + 0.5236))^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 + 7 \cdot (499.3 + 0.6 \sin(0.17943t + 0.5236))^2)^2}$$

și variația ei este reprezentată în figura 4.16.

Fig.4.16.Variația în timp a lui P_{GSMP}

Valorile extreme ale puterii P_{GSMP} sunt :

$$P_{GSMP-MAX} = 7.62 [kW] \text{ și } P_{GSMP-MIN} = 7.58 [kW].$$

Observația 4

Oscilațiile puterii P_{TV} față de valoarea medie:

$$P_{TV-MEDIU} = \frac{P_{TV-MAX} + P_{TV-MIN}}{2} = \frac{10.2 + 5}{2} = 7.6 [kW]$$

sunt mari : $\Delta P_{TV} = \frac{10.2 - 5}{7.6} 100 = 68.421\%$.

La generator oscilațiile puterii față de valoarea medie :

$$P_{GSMP-MEDIU} = \frac{P_{GSMP-MAX} + P_{GSMP-MIN}}{2} = \frac{7.62 + 7.58}{2} = 7.6 [kW]$$

sunt mici : $\Delta P_{GSMP} = \frac{7.62 - 7.58}{7.6} 100 = 0.52632\%$.

Puterea, P , fiind derivata energiei, W , adică $P = dW / dt$, pentru **GSMP** ce furnizează energia W_e , se obține:

$$\frac{dW_e}{dt} = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2}$$

iar pentru **TV** rezultă :

$$\frac{dW_m}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left((16 - \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - \sin(0.17943t + \pi/2))^3$$

Ecuția mișcării și a energiei se rezolvă numeric pentru o perioadă de timp $\Delta t = 5000 \div 5070 [s]$, perioadă în care sistemul funcționează stabil:

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left((16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 349.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600}{(1250 \cdot (349.84)^2 + 4000 \cdot (349.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} - \\ 27225 \cdot 349.84 \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = \frac{dW_e}{dt} \\ \frac{dW_m}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left((16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^3 \\ \omega(0) = 500.75 \\ W_e(0) = 0 \\ W_m(0) = 0 \end{array} \right.$$

Energiile

obținute în intervalul de timp $\Delta t = 0 \div 5070 [s]$ sunt:

$$W_e(5070) = 3.8653 \times 10^7 [J] \text{ energia electrică; } W_e(5000) = 3.8120 \times 10^7 [J]$$

$$\Delta W_e = 3.8653 \times 10^7 - 3.8120 \times 10^7 = 5.33 \times 10^5 [J]$$

$$W_m(5070) = 3.8808 \times 10^7 [J] \text{ -energia mecanică; } W_m(5000) = 3.8273 \times 10^7 [J] -$$

$$\Delta W_m = 3.8808 \times 10^7 - 3.8273 \times 10^7 = 5.35 \times 10^5 [J]$$

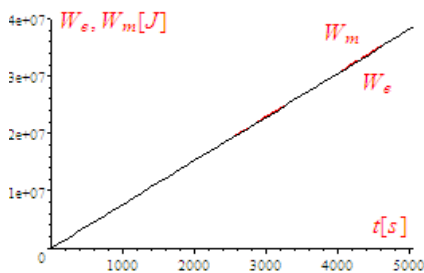


Fig4. 17.a. Variația lui W_e la $R = 349.84 [\Omega]$

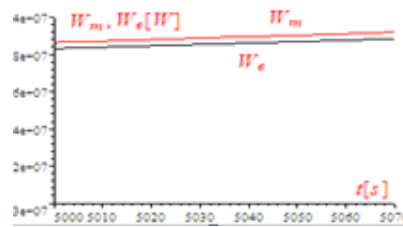


Fig4. 17.b. Variația lui W_e [detaliu].

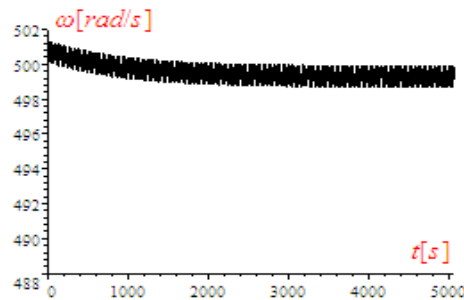


Fig.4.18. Variația lui ω la $R = 349.84 [\Omega]$.

Cazul 2 - $J = 5 [kgm^2]$

La o variație a vitezei vântului sub forma sinusoidală $V(t) = 16 - 2\sin(0.17943t + \pi/2)$, la $J = 5 [kgm^2]$ și $R = 349.84 [\Omega]$ se obține ecuația mișcării:

$$\begin{cases} 5 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{(16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{(16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 349.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600}{(1250 \cdot (349.84)^2 + 4000 \cdot (349.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \end{cases}$$

$$\omega(0) = 590.75$$

de unde se

obține variația în timp a lui ω , figura 4.19:

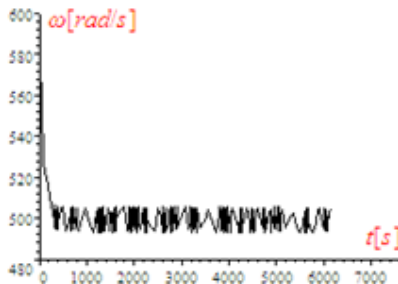


Fig.4.19. Variația în timp a VUM la $J = 5 [kgm^2]$

În regim stabilizat valorile lui ω_{OPTIM} sunt în domeniul : $(493 \div 505) [rad / s]$. Variația lui ω_{OPTIM} , pe intervalul : $t = 5000 \div 5070$, este dată în figura 4.20 și se poate pune sub forma:

$$\omega_{OPTIM}(t) = a + b \sin(0.17943t + \pi/2) = 499 + 6 \sin(0.17943t + \pi/2)$$

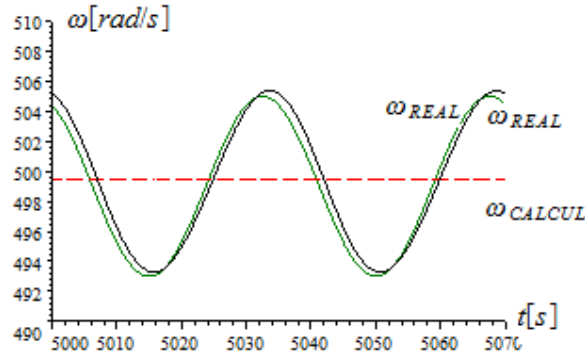
Constantele a și b se determină din valorile extreme:

$$\omega_{OPTIM-MAX} = 505. [rad / s], \omega_{OPTIM-MIN} = 493. [rad / s]$$

, din sistemul

$$\begin{cases} 505. = a + b \\ 493. = a - b \end{cases}$$

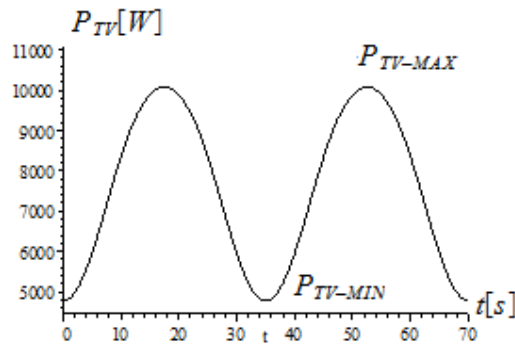
, cu soluția: $\{b = 6., a = 499.\}$

Fig.4.20. Variația lui ω_{OPTIM}

La $\omega_{OPTIM}(t) = 499 + 6 \sin(0.17943t + \pi/2)$ puterea P_{TV} oscilează între valorile extreme

$P_{TV-MAX} = 10. [kW]$ și $P_{TV-MIN} = 4.8 [kW]$, figura 4.21.

$$P_{TV}(t) = 23.584 \cdot \left(\left(\frac{16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)}{499 + 6 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)}{499 + 6 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)} - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^3$$

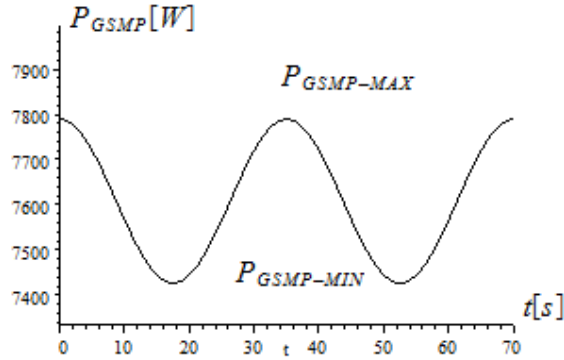
Fig.4.21. Variația în timp a lui P_{TV}

Puterea furnizată de **GSMP** la $\omega_{OPTIM}(t) = 499 + 6 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)$ se obține din:

$$P_{GSMP}(t) = 27225 \cdot 349.84 \cdot$$

$$(499 + 6 \sin(0.17943t + \pi/2))^2 \frac{4(499 + 6 \sin(0.17943t + \pi/2))^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 + 7(499 + 6 \sin(0.17943t + \pi/2))^2)^2}$$

și este reprezentată în figura 4.22.

Fig.4.22.Variația în timp a lui P_{GSMP}

Valorile extreme ale puterii P_{GSMP} sunt : $P_{GSMP-MAX} = 7.79[kW]$ și $P_{GSMP-MIN} = 7.43[kW]$.

Observația 5

Oscilațiile puterii P_{TV} față de valoarea medie:

$$P_{TV-MEDIU} = \frac{P_{TV-MAX} + P_{TV-MIN}}{2} = \frac{10.4 + 4.8}{2} = 7.4[kW]$$

sunt cu puțin mai mari, față de cazul anterior:

$$\Delta P_{TV} = \frac{10.4 - 4.8}{7.4} 100 = 70.271\%$$

La generator oscilațiile puterii față de valoarea medie :

$$P_{GSMP-MEDIU} = \frac{P_{GSMP-MAX} + P_{GSMP-MIN}}{2} = \frac{7.79 + 7.43}{2} = 7.61[kW]$$

sunt mult mai mari, față de cazul anterior:

$$\Delta P_{GSMP} = \frac{7.79 - 7.43}{7.61} 100 = 4.7306\%$$

când erau:

$$\Delta P_{GSMP} = 0.52632\%$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left((16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2))^3 - \\ 5445 \omega^2 (5 \cdot 349.84 + 8) \cdot \frac{4\omega^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600}{(1250 \cdot (349.84)^2 + 4000 \cdot (349.84) + 3200 + 7\omega^2)^2} \\ 27225 \cdot 349.84 \cdot \omega^2 \cdot \frac{4\omega^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 + 7\omega^2)^2} = \frac{dW_e}{dt} \\ \frac{dW_m}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left((16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2))^3 \\ \omega(0) = 500.75 \\ W_e(0) = 0 \\ W_m(0) = 0 \end{array} \right.$$

$$W_e(5070) = 3.8621 \times 10^7 [J] \text{ energia electrică}$$

$$W_e(5000) = 3.8087 \times 10^7 [J] \text{ energia electrică}$$

$$\Delta W_e = 3.8621 \times 10^7 - 3.8087 \times 10^7 = 5.34 \times 10^5 [J]$$

$$W_m(5070) = 3.8808 \times 10^7 [J] \text{ -energia mecanică}$$

$$W_m(5000) = 3.8273 \times 10^7 [J] \text{ -energia mecanică}$$

$$\Delta W_m = 3.8808 \times 10^7 - 3.8273 \times 10^7 = 5.35 \times 10^5 [J]$$

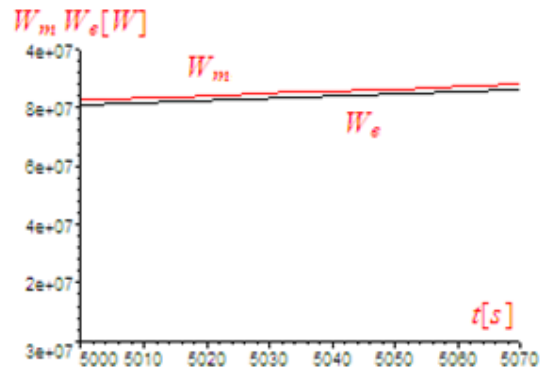
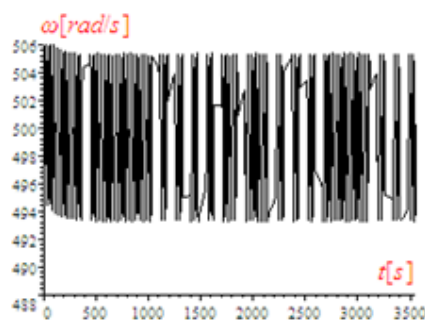
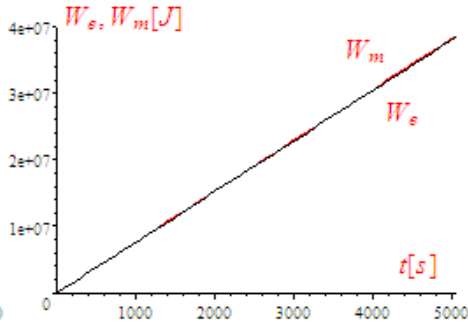
Fig.4.23.a. Energiile captate în intervalul $\Delta t = 5000 \div 5070 [s]$ Fig.4.23.b. Variația în timp a lui ω 

Fig.4.23.c. Variațiile energiilor în timp

Cazul 3- $J = 500 [kgm^2]$

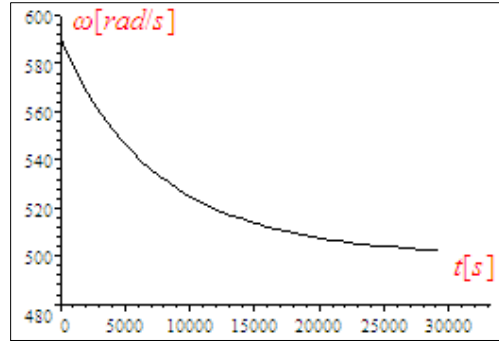
La o variație a vitezei vântului sub forma sinusoidală:

$$V(t) = 16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2),$$

la $J = 500 [kgm^2]$ și $R = 349.84 [\Omega]$ se obține ecuația mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 500 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left((16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 349.84 + 8) \cdot \frac{4\omega^2 + 625(349.84)^2 + 2000(349.84) + 1600}{(1250(349.84)^2 + 4000(349.84) + 3200 + 7\omega^2)^2} \\ \omega(0) = 590.75 \end{array} \right.$$

de unde se obține valoarea în timp a lui $\omega(28000.) = 502.77 [rad / s]$, figura 4.24.:

Fig.4.24. Variația în timp a VUM la $J = 500 [kgm^2]$

valorile lui ω_{OPTIM} sunt în domeniul : $(502.65 \div 502.78) [rad / s]$. Variația lui ω_{OPTIM} , pe intervalul : $t = 28000 \div 28070$, este dată în figura 4.25. și se poate pune sub forma

$$\omega_{OPTIM}(t) = a + b \sin(0.17943t + \pi/2) = 502.72 + 0.065 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)$$

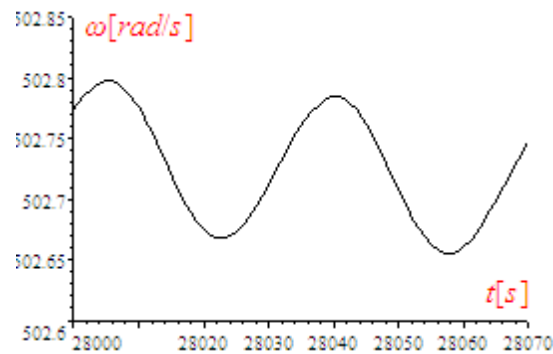
Constantele a și b se determină din valorile extreme:

$$\omega_{OPTIM-MAX} = 502.78 [rad / s], \omega_{OPTIM-MIN} = 502.65 [rad / s]$$

, din sistemul:

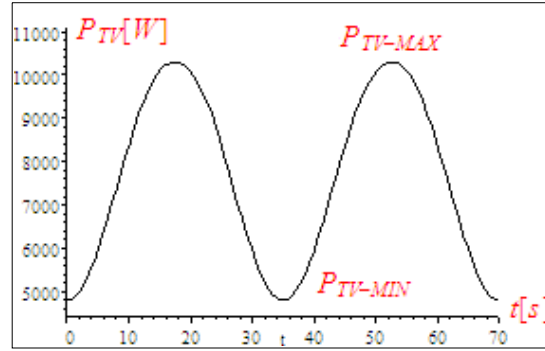
$$\begin{cases} 502.78 = a + b \\ 502.65 = a - b \end{cases}$$

, cu soluția: $\{b = 0.065, a = 502.72\}$.

Fig.4.25. Variația în timp a lui ω (detaliu)

La $\omega_{OPTIM}(t) = 502.72 + 0.065 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)$ puterea P_{TV} oscilează între valorile extreme $P_{TV-MAX} = 10.2 [kW]$ și $P_{TV-MIN} = 4.8 [kW]$, figura 4.26.

$$P_{TV}(t) = 23.584 \cdot \left(\left(\frac{(16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))}{(502.72 + 0.065 \sin(0.17943t + \pi/2)) - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))}{(502.72 + 0.065 \sin(0.17943t + \pi/2)) - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^3$$

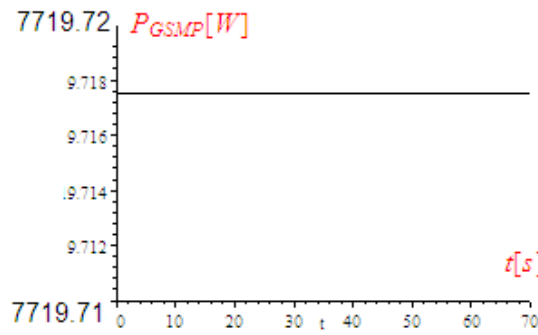
Fig.4.26.Variația în timp a lui P_{TV}

Puterea furnizată de **GSMP** la $\omega_{OPTIM}(t) = 499 + 6 \sin(0.17943t + \pi/2)$ se obține din:

$$P_{GSMP}(t) = 27225 \cdot 349.84 \cdot (502.72 + 0.065 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^2$$

$$\frac{4(502.72 + 0.065 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 + 7(502.72 + 0.065 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^2)^2}$$

și este reprezentată în figura 4.27.

Fig.4.27.Variația în timp a lui P_{GSMP}

Puterea P_{GSMP} nu se modifică: $P_{GSMP-MAX} = P_{GSMP-MIN} = 7719.7177 [kW]$

$$\left\{ \begin{array}{l} 500 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left((16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2))^3 - \\ 5445 \omega^2 (5 \cdot 349.84 + 8) \frac{4\omega^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600}{(1250 \cdot (349.84)^2 + 4000 \cdot (349.84) + 3200 + 7\omega^2)^2} \\ 27225 \cdot 349.84 \cdot \omega^2 \frac{4\omega^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 + 7\omega^2)^2} = \frac{dW_e}{dt} \\ \frac{dW_m}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left((16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2))^3 \\ \omega(0) = 500.75 \\ W_e(0) = 0 \\ W_m(0) = 0 \\ W_e(5070) = 3.8785 \times 10^7 [J] \text{ energia electrică} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}
 W_e(5000) &= 3.8250 \times 10^7 [J] \text{ energia electrică} \\
 \Delta W_e &= 3.8785 \times 10^7 - 3.8250 \times 10^7 = 5.35 \times 10^5 [J] \\
 W_m(5070) &= 3.8824 \times 10^7 [J] \text{ -energia mecanică} \\
 W_m(5000) &= 3.8288 \times 10^7 [J] \text{ -energia mecanică} \\
 \Delta W_m &= 3.8824 \times 10^7 - 3.8288 \times 10^7 = 5.36 \times 10^5 [J]
 \end{aligned}$$

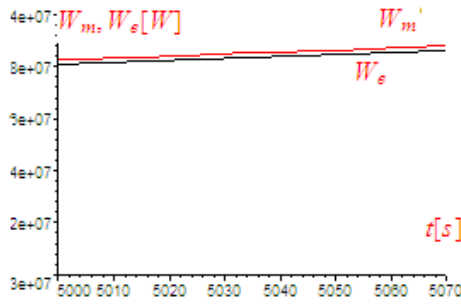
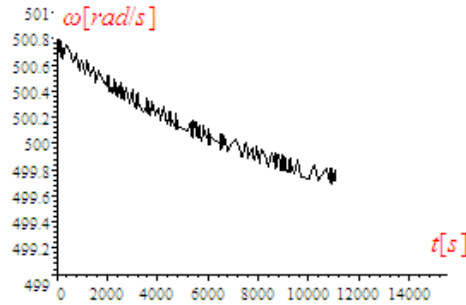


Fig.4.28. Variațiile energiilor în timp

Fig.4.29. Variația în timp a lui ω

Observația 6

Oscilațiile puterii P_{TV} față de valoarea medie:

$$P_{TV-MEDIU} = \frac{P_{TV-MAX} + P_{TV-MIN}}{2} = \frac{10.2 + 4.8}{2} = 7.5 [kW]$$

sunt, aproximativ, aceleași în toate cazurile:

$$\Delta P_{TV} = \frac{10.2 - 4.8}{7.5} 100 = 72. \%$$

La generator oscilațiile puterii față de valoarea medie sunt neglijabile

Cazul limită $J \Rightarrow 0$

Estimarea energiei captate în acest caz este analizată în 2 variante

- Varianta 1 - Rezistența de sarcină este constantă
- Varianta 2 - Rezistența de sarcină este variabilă

Varianta 1

La $J \Rightarrow 0$ cele două momente sunt egale, momentul M_{TV} este egal cu M_{GSMP} .

La $V = 14 [m/s]$ momentul M_{TV} are valoarea minimă:

$$M_{TV-MIN} = 23.584 \cdot \left(\left(\frac{14}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{14}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (14)^3 / \omega$$

Din egalitatea momentelor:

$$\begin{aligned}
 &23.584 \cdot \left(\left(\frac{14}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{14}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (14)^3 / \omega \\
 &= 5445 (5 \cdot 349.84 + 8.) \frac{4\omega^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600}{(1250 \cdot (349.84)^2 + 4000 \cdot (349.84) + 3200 + 7\omega^2)^2} \quad \text{rez}
 \end{aligned}$$

ultă $\{\omega_{MIN} = 402.2 [rad/s]\}$.

La $V = 18 [m/s]$ momentul M_{TV} are valoarea maximă:

$$M_{TV-MAX} = 23.584 \cdot \left(\left(\frac{18}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{18}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (18)^3 / \omega$$

Egalând cele două momente M_{TV} și M_{GSMP} se obține:

$$23.584 \cdot \left(\left(\frac{18}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{18}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (18)^3 / \omega =$$

$$5445 \omega (5 \cdot 349.84 + 8) \frac{4\omega^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600}{(1250 \cdot (349.84)^2 + 4000 \cdot (349.84) + 3200 + 7\omega^2)^2}$$

cu soluția $\{\omega_{MAX} = 598.96 [\text{rad/s}]\}$.

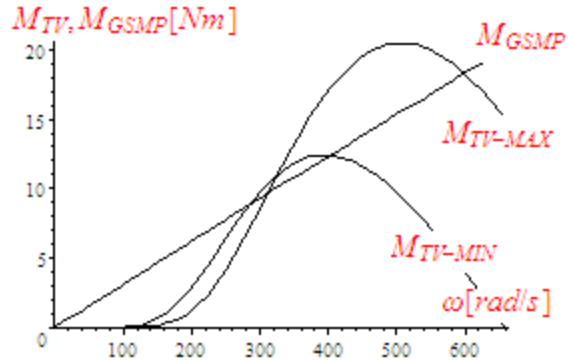


Fig.4.30. Caracteristicile mecanice

Considerând pentru ω o variație sinusoidală între ω_{MIN} și ω_{MAX} se obține:

$$\omega(t) = a - b \sin(0.17943t + \pi/2) = (500.58 + 98.38 \sin(0.17943t + \pi/2))$$

Constantele a și b s-au determinat din sistemul:

$$\begin{cases} 598.96 = a + b \\ 402.2 = a - b \end{cases}$$

, cu soluția: $\{a = 500.58, b = 98.38\}$.

Din ecuația mișcării:

$$\begin{cases} 0.001 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left(\frac{16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 349.84 + 8) \frac{4\omega^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600}{(1250 \cdot (349.84)^2 + 4000 \cdot (349.84) + 3200 + 7\omega^2)^2} \end{cases} \quad \text{se}$$

$$\omega(0) = 500.75$$

obține o variație similară pentru ω , figura 4.31.

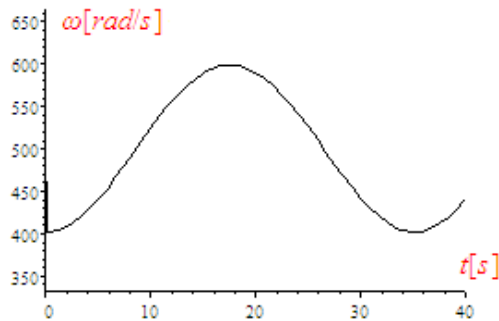


Fig.4.31. Variația în timp al lui ω

În intervalul de timp $\Delta t = 0 \div 5070 [\text{s}]$ energiile obținute au valorile:

$$W_m = \int_0^{5070} \left(\frac{5445 \cdot (500.58 + 98.38 \sin(0.17943t + \pi/2))^2 (5 \cdot 349.84 + 8)}{4(500.58 + 98.38 \sin(0.17943t + \pi/2))^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600} \right) dt = 3.9687 \times 10^7 [J]$$

$$W_e = \int_0^{5070} \left(\frac{27225 \cdot 349.84 \cdot (500.58 + 98.38 \sin(0.17943t + \pi/2))^2}{4(500.58 + 98.38 \sin(0.17943t + \pi/2))^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600} \right) dt = 3.9507 \times 10^7 [J]$$

Considerând rezultatele în cele 4 cazuri:

1) $J = 500 [kgm^2]$

$$W_e(5070) = 3.8785 \times 10^7 [J] \text{ energia electrică}$$

$$W_m(5070) = 3.8824 \times 10^7 [J] \text{ -energia mecanică}$$

2) $J = 50 [kgm^2]$

$$W_e(5070) = 3.8653 \times 10^7 [J] \text{ energia electrică}$$

$$W_m(5070) = 3.8808 \times 10^7 [J] \text{ -energia mecanică}$$

3) $J = 5 [kgm^2]$

$$W_e(5070) = 3.8621 \times 10^7 [J] \text{ energia electrică}$$

$$W_m(5070) = 3.8808 \times 10^7 [J] \text{ energia mecanică}$$

4) $J \Rightarrow 0$

$$W_m(5070) = 3.9687 \times 10^7 [J] \text{ - energia mecanică}$$

$$W_e(5070) = 3.9507 \times 10^7 [J] \text{ - energia electrică}$$

Se observă că la $J \Rightarrow 0$ energia electrică W_e obținută este maximă, fiind cu

$$\frac{3.9507 \times 10^7 - 3.8621 \times 10^7}{3.8621 \times 10^7} 100 = 2.2941\% \text{ mai mare decât media celor 3 cazuri. Energia mecanică } W_m$$

este mai mare cu $\frac{3.9687 \times 10^7 - 3.8808 \times 10^7}{3.8808 \times 10^7} 100 = 2.265\%$ la $J \Rightarrow 0$ decât media celor 3 cazuri.

Varianta 2

Printr-o rezistență de sarcină variabilă la generator se poate asigura funcționarea în **MPP**.
Coordonatele acestui punct se pot determina astfel:

- anulând derivata puterii P_{TV} :

$$P_{TV} = 23.584 \cdot (((V)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((V)/\omega - 0.0525)} \cdot (V)^3 \text{ sau}$$

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d(23.584 \cdot (((V)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((V)/\omega - 0.0525)} \cdot (V)^3)}{d\omega} = 0$$

, cu soluția: $\{\omega = 31.817V\}$.

$$\text{La } V(t) = 16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2) \text{ și } \omega(t) = (31.817(16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)))$$

puterea maximă este:

$$P_{TV-MAX} = (7777.5 - 2916.6 \cos 0.17943t + 364.57 \cos^2 0.17943t - 15.19 \cos^3 0.17943t)$$

Energia mecanică captată în intervalul de timp $\Delta t = 5070 [s]$ are valoarea:

$$W_m = \int_0^{5070} \left(\left(\begin{array}{l} 7777.5 - 2916.6 \cos 0.17943t + \\ 364.57 \cos^2 0.17943t - 15.19 \cos^3 0.17943t \end{array} \right) \right) dt = 4.0372 \times 10^7 [J]$$

fiind cu $\frac{4.0372 \times 10^7 - 3.9507 \times 10^7}{3.9507 \times 10^7} \cdot 100 = 2.1895\%$ mai mare comparativ cu valorile anterioare.

Puterea maximă variază între limitele $P_1 = 5.2[kW]$ și $P_2 = 11.2[kW]$, figura 4.32.

$$P_{TV-MAX} = (7777.5 - 2916.6 \cos 0.17943t + 364.57 \cos^2 0.17943t - 15.19 \cos^3 0.17943t)$$

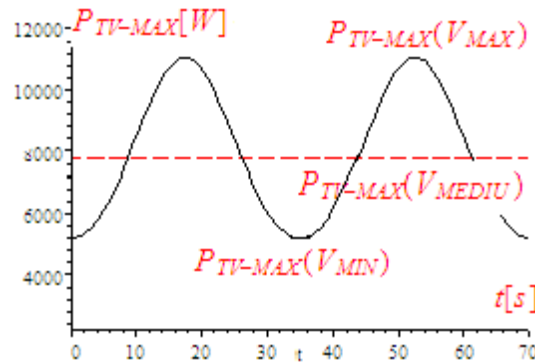


Fig.4.32. Variația puterii în timp la TV

La $V_{MEDIU} = 16.[m/s]$ puterea este:

$$P_{TV} = 23.584 \cdot (((16.)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16.)/\omega - 0.0525)} \cdot (16.)^3$$

având
 maximul $P_{TV-MAX}(V_{MEDIU}) = 7777.5[W]$ la $\omega = 509.09[rad/s]$.

Observația 7

Diferențele foarte mari între ΔP_{TV} și ΔP_{GSMP} sunt datorită inerțiilor din sistem,

importanța semnificativă având-o valoarea momentului de inerție J .

Cu cât valoarea lui J crește cu atât se reduc oscilațiile în putere.

4.5. Conducerea sistemului

Valoarea **VUM**, ω_{OPTIM} , determinată prin simulare și la care energia captată este maximă, va trebui să fie determinată într-un timp scurt pentru a fi utilă în conducerea sistemului.

Valoarea maximă a puterii, sau energiei, se obține pentru **VUM** de referință, ω_{ref} , estimată, la

$V = ct$, prin formula:

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V$$

La $V \neq ct$ valoarea ω_{OPTIM} se poate determina în timp util din V_{mediu} , dar valoarea astfel determinată nu este cea optimă [2], din punct de vedere a energiei mecanice captate și din acest motiv se pune problema determinării unei viteze echivalente, V_{ech} , derivată din cea reală, în cazul de față:

$$V(t) = 16 - A \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)$$

4.5.1. Determinarea lui ω_{OPTIM} din viteza echivalentă a vântului

Calculul vitezei echivalente, V_{ech} , se face având în vedere valoarea puterii generate de

TV:

$$P_{TV}(V) = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3 = K \cdot V^3$$

Deoa

rece $P_{TV}(V)$ depinde de cubul vitezei vântului se propune, pentru V_{ech} , pe intervalul de

timp: T , o relație de forma:

$$V_{ech} = \sqrt[3]{\frac{1}{T} \int_0^T (V)^3 dt}$$

sau

$$V_{ech1} = \sqrt[3]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (16 - 1 \sin(0.17943t + \pi/2))^3 dt} = 16.032[m/s]$$

-la $V(t) = 16 - 1 \sin(0.17943t + \pi/2)$.

$$V_{ech2} = \sqrt[3]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2))^3 dt} = 16.125[m/s]$$

-la $V(t) = 16 - 2 \sin(0.17943t + \pi/2)$.

Valoarea maximă a energiei se obține pentru **VUM** ω_{OPTIM} calculată analog ca și $\omega_{ref} = 31.817 \cdot V$, astfel:

$$\omega_{OPTIM} = a \cdot (V_{mediu}/V_{ech})^b$$

Constantele a și b se determină pe baza rezultatelor anterioare obținute la viteza vântului de forma:

$$V(t) = V_{mediu} - A \sin(0.17943t + \pi/2) = 16 - A \sin(0.17943t + \pi/2)$$

La două valori ale lui A : $1[m/s]$ și $2[m/s]$ s-au obținut rezultatele:

$$\omega_{OPTIM} = 499.4[rad/s] \text{ -la } A = 2[m/s]$$

$$\omega_{OPTIM} = 502.32[rad/s] \text{ -la } A = 1[m/s]$$

și deci se pot determina constantele a și b din sistemul:

$$\begin{cases} 502.32 = a \cdot (16/V_{ech1})^b \\ 499.4 = a \cdot (16/V_{ech2})^b \end{cases}$$

sau

$$\begin{cases} 502.32 = a \cdot (16/16.032)^b \\ 499.4 = a \cdot (16/16.125)^b \end{cases}$$

, cu soluția: $\{a = 503.33, b = 1.0079\}$

A rezultat, astfel relația de bază în conducerea sistemelor eoliene prin măsurarea vitezei vântului:

$$\omega_{OPTIM} = 503.33 \cdot (V_{mediu}/V_{ech})^{1.0079} \simeq 503.33 \cdot (V_{mediu}/V_{ech})$$

Așadar, calculul **VUM**, ω_{OPTIM} , la $V_{mediu} = 16[m/s]$ se poate face în timp util cu relația:

$$\omega_{OPTIM} = 503.33 \cdot (V_{mediu}/V_{ech})$$

Rezultatele obținute sunt pentru $V_{mediu} = 16[m/s]$. În cazul general, la viteza vântului având valoarea medie: V_{mediu} se obține:

$$\omega_{OPTIM} = 31.458 \cdot V_{mediu} \cdot (V_{mediu}/V_{ech}) = 31.458 \cdot (V_{mediu}^2/V_{ech})$$

sau

$$\omega_{OPTIM} = 31.458 \cdot (V_{mediu}^2/V_{ech})$$

Coeficientul $k = 31.458$ este specific turbinei și se dă de firma constructoare sau se poate determina experimental.

Conoscând **VUM** pentru care energia captată este maximă, prin comanda convertoarelor de putere interpușe între **GSMP** și rețea, figura 4.33, se asigură captarea unei energii maxime.

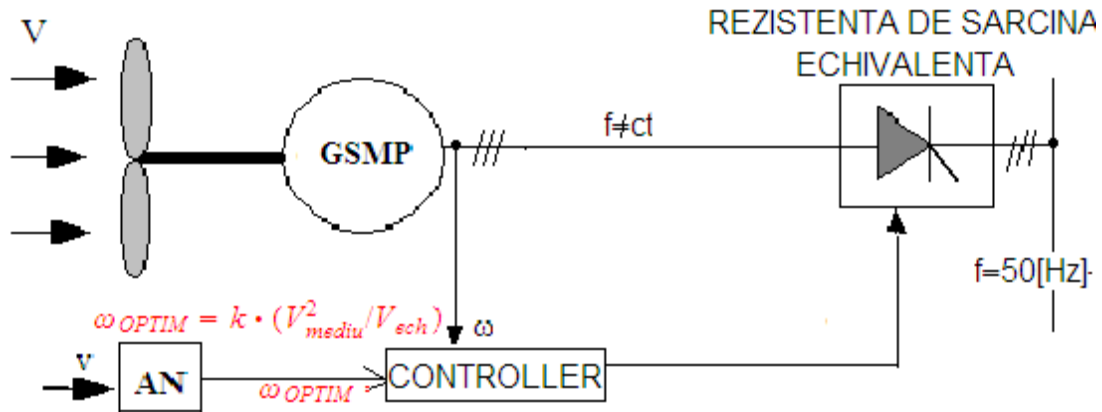


Fig.4.33. Conducerea sistemului TV+GSMP

În concluzie, algoritmul de conducere este următorul, figura 4.33.:

- 1) se măsoară viteza vântului și se determină $V_{ech} = \sqrt[3]{\frac{1}{T} \int_0^T (V)^3 dt}$
- 2) se determină ω_{OPTIM} din $\omega_{OPTIM} = k \cdot (V_{mediu}^2 / V_{ech})$
- 3) se menține, prin sarcina la **GSMP, VUM** în jurul lui ω_{OPTIM}

Simplificarea 1

Calculul simplificat a lui ω_{OPTIM} se poate face și folosind numai V_{mediu} și în acest caz se obține:

$$\omega_{OPTIM} = 31.458 \cdot V_{mediu}$$

Precizarea 1

Deoarece valoarea momentului mediu, $M_{TV-MEDIU}$, este influențată de valoarea amplitudinii vitezei vântului, A , pentru aplicațiile de putere mare, ordinul MW, trebuie măsurată viteza momentană, nefiind suficientă cunoașterea vitezei medii, V_{mediu} .

Precizarea 2

Variația în timp a vitezei vântului scoate în evidență faptul că ponderea componentelor continue, V_{mediu} , sau alternative, amplitudinile A , sunt diferite de la o locație la alta. Prin măsuratori meteo se pot observa valorile lui V_{mediu} și A , alegându-se metoda de conducere cea mai potrivită a sistemului:

- cu viteza medie, V_{mediu} ,
- sau
- cu viteza momentană.

Precizarea 3

Înregistrările meteo multianuale scot în evidență faptul că în România, în zonele litoralului, componenta V_{mediu} este cea mai importantă iar în zonele montane importante sunt V_{mediu} și amplitudinile A .

Precizarea 4

În realizarea unui sistem de conducere optimal, din punct de vedere energetic, un rol esențial îl au constantele ce intervin în determinarea mărimilor fundamentale, dintre care cea mai importantă este k , ce intervine în calculul lui ω_{OPTIM} . Aceste constante pot fi date de firma constructoare, dar cele mai bune rezultate se obțin când acestea se determină experimental în timpul funcționării, din caracteristica puterii, prin măsurarea vitezei vântului și a puterii dată de **GSMP**.

Precizarea 5

Realizarea lui ω_{OPTIM} se face prin modificare sarcinii la **GSMP** modificare ce se realizează prin folosirea unui regulator ce are ca și mărime de intrare eroarea de **VUM**, $\Delta\omega$:

$$\Delta\omega = \omega_{OPTIM} - \omega$$

iar ca și mărime de ieșire rezistența de sarcină echivalentă de la bornele **GSMP**. Acordarea acestor regulatoare este însă o problemă complicată deoarece sistemul este neliniar și deci pentru acordarea lor se pot folosi doar metode bazate pe simulări.

4. 6.Determinarea experimentală a caracteristicii puterii

Caracteristica puterii, sau funcția $P_{TV}(\omega)$, la o anumită viteză a vântului prezintă un maxim la **VUM**, ω_{ref} . Determinarea experimentală a lui ω_{ref} , la viteza vântului V permite determinarea constantei k și astfel se poate obține dependența lui ω_{ref} de V :

$$\omega_{ref} = k \cdot V$$

Problema trebuie rezolvată la viteze ale vântului $V = ct$ și la $V \neq ct$.

4.6.1. Caracteristica puterii la $V = ct$

Viteza vântului are valoarea constantă în timp, de exemplu $V = 16 [m/s]$. La această viteză a vântului caracteristica puterii $P_{TV}(\omega, 16)$ este:

$$P_{TV}(\omega, 16) = 23.584 \cdot ((16/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(16/\omega - 0.0525)} \cdot 16^3$$
 și are forma din figura 4.34.:

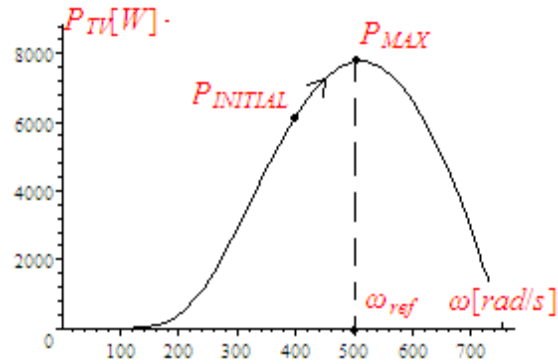


Fig.4.34. Caracteristica puterii

Puterea maximă se obține pentru ω_{ref} determinat din anularea derivatei puterii:

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} (23.584 \cdot ((16/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(16/\omega - 0.0525)} \cdot 16^3)_{\text{sau}}$$

$$2.3817 \times 10^9 \omega - 1.2125 \times 10^{12} = 0$$

,cu soluția: $\{\omega_{ref} = 509.09 [\text{rad} / \text{s}]\}$.

La **VUM** $\omega(0) = 400 [\text{rad} / \text{s}]$ punctul de funcționare este: $P_{INITIAL} (400, 6176.7)$.

Deoarece momentul la **TV** este mai mare decât momentul la **GSMP**: $M_{TV} > M_{GSMP}$, punctul de funcționare se va deplasa spre: $P_{MAX} (509.09, 7777.5)$.

Prin monitorizarea puterii la **GSMP**, P_G , și a **VUM**, ω , figura 4.35 se va putea determina caracteristica reală a puterii la **TV** într-un număr de pași dependent de valoare rezistenței de sarcină. Intervalul de timp între care se fac măsurătorile este $\Delta t = 60 [s]$.

Puterea P_{TV} , la neglijarea pierderilor, este suma dintre P_G și variația energiilor cinetice:

$$\Delta W_c = J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2 \cdot \Delta t},$$

obținându-se

$$P_{TV} = P_G + J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2 \cdot \Delta t}$$

unde:

J – momentul de inerție echivalent;

ω_k – **VUM** la momentul t_k ;

ω_{k-1} – **VUM** la momentul t_{k-1} .

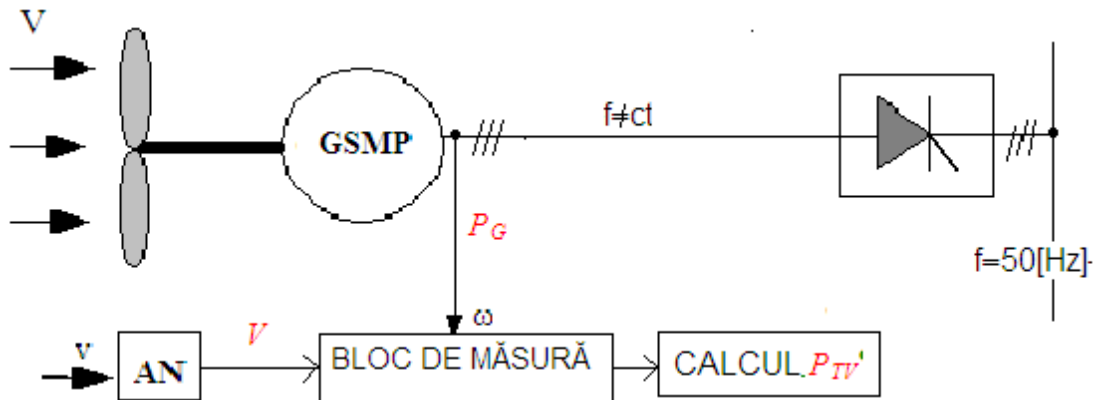


Fig.4.35. Determinarea puterii la TV

La o rezistență $R = 349.84 [\Omega]$ momentul **GSMP** este:

$$M_{GSMP}(\omega) = 5445 \cdot \omega \left(5 \cdot (268.65) + 8 \right) \frac{4\omega^2 + 625 \cdot (268.65)^2 + 2000 \cdot (268.65) + 1600}{(1250 \cdot (268.65)^2 + 4000 \cdot (268.65) + 3200 + 7\omega^2)^2}$$
 Momentul turbinei fiind:

$$M_{TV} = 23.584 \cdot \left(\frac{(16)}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(16)}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (16)^3 / \omega_{se}$$

obține ecuația mișcării:

$$\begin{cases} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{(16)}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(16)}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (16)^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 \left(5 \cdot 349.84 + 8 \right) \frac{4\omega^2 + 625 \cdot (349.84)^2 + 2000 \cdot (349.84) + 1600}{(1250 \cdot (349.84)^2 + 4000 \cdot (349.84) + 3200 + 7\omega^2)^2} \\ \omega(0) = 400. \end{cases}$$

Din ecuația mișcării se obțin valorile **VUM** ω la momentele de timp: $t = 60, 120, \dots, 2040 [s]$ și din sistemul:

$$\begin{cases} 27225 \cdot 349.84 \cdot \omega^2 \frac{4\omega^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 + 7\omega^2)^2} = P_G \\ \omega = 403.75 \end{cases}$$

se obține puterea **GSMP**, P_G . Cunoscând **VUM** și puterea P_G , din măsurători în realitate, iar în simulări din calcul, se pot calcula variațiile energiilor cinetice:

$$\Delta W_c = 50 \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2 \cdot 60} = 0.41667(\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)$$

În final, se obține puterea la turbină:

$$P_{TV} = P_G + 0.41667(\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)$$

$$\omega(60) = 403.75 P_G = 4996.6 [rad / s]$$

$$\omega(120) = 407.48 P_G = 5088.8 + (407.48^2 - 403.75^2) 0.41667 = 6349.6 [rad / s]$$

$$\omega(180) = 411.2 P_G = 5181.5 + (411.2^2 - 407.48^2) 0.41667 = 6450.5 [rad / s]$$

$$\omega(240) = 414.89 P_G = 5274.3 + (414.89^2 - 411.2^2) 0.41667 = 6544.4 [rad / s]$$

$$\omega(300) = 418.53 P_G = 5366.6 + (418.53^2 - 414.89^2) 0.41667 = 6630.6 [rad / s]$$

$$\omega(360) = 422.13 P_G = 5458.7 + (422.13^2 - 418.53^2) 0.41667 = 6719.7 [rad / s]$$

$$\omega(420) = 425.67 P_G = 5550 + (425.67^2 - 422.13^2) 0.41667 = 6800.5 [rad / s]$$

$$\omega(480) = 429.14 P_G = 5640.2 + (429.14^2 - 425.67^2) 0.41667 = 6876.1 [rad / s]$$

$$\omega(540) = 432.54 P_G = 5729.3 + (432.54^2 - 429.14^2) 0.41667 = 6950.0 [rad / s]$$

$$\omega(600) = 435.86 P_G = 5816.9 + (435.86^2 - 432.54^2) 0.41667 = 7018.2 [rad / s]$$

$$\omega(660) = 439.09 P_G = 5902.8 + (439.09^2 - 435.86^2) 0.41667 = 7080.3 [rad / s]$$

$$\omega(720) = 442.23 P_G = 5986.9 + (442.23^2 - 439.09^2) 0.41667 = 7140.0 [rad / s]$$

$$\omega(780) = 445.28 P_G = 6069.1 + (445.28^2 - 442.23^2) 0.41667 = 7197.0 [rad / s]$$

$$\omega(840) = 448.23 P_G = 6149.2 + (448.23^2 - 445.28^2) 0.41667 = 7247.5 [rad / s]$$

$$\omega(900) = 451.08 P_G = 6227. + (451.08^2 - 448.23^2) 0.41667 = 7294.9 [rad / s]$$

$$\omega(960) = 453.82 P_G = 6302.3 + (453.82^2 - 451.08^2) 0.41667 = 7335.4 [rad / s]$$

$$\omega(1020) = 456.46 P_G = 6375.2 + (456.46^2 - 453.82^2) 0.41667 = 7376.5 [rad / s]$$

$$\omega(1080) = 458.99 P_G = 6445.5 + (458.99^2 - 456.46^2) 0.41667 = 7410.5 [rad / s]$$

$$\omega(1140) = 461.43 P_G = 6513.7 + (461.43^2 - 458.99^2) 0.41667 = 7449.5 [rad / s]$$

$$\begin{aligned} \omega(1200) &= 463.75P_G = 6578.8 + (463.75^2 - 461.43^2)0.41667 = 7473.1[\text{rad/s}] \\ \omega(1260) &= 465.98P_G = 6641.7 + (465.98^2 - 463.75^2)0.41667 = 7505.6[\text{rad/s}] \\ \omega(1320) &= 468.10P_G = 6701.8 + (468.1^2 - 465.98^2)0.41667 = 7526.9[\text{rad/s}] \\ \omega(1380) &= 470.12P_G = 6759.2 + (470.12^2 - 468.1^2)0.41667 = 7548.9[\text{rad/s}] \\ \omega(1440) &= 472.04P_G = 6814.1 + (472.04^2 - 470.12^2)0.41667 = 7567.8[\text{rad/s}] \\ \omega(1500) &= 473.87P_G = 6866.6 + (473.8^2 - 472.04^2)0.41667 = 7560.2[\text{rad/s}] \\ \omega(1560) &= 475.61P_G = 6916.6 + (475.61^2 - 473.8^2)0.41667 = 7632.6[\text{rad/s}] \\ \omega(1620) &= 477.26P_G = 6964.3 + (477.26^2 - 475.61^2)0.41667 = 7619.4[\text{rad/s}] \\ \omega(1680) &= 478.82P_G = 7009.5 + (478.82^2 - 477.26^2)0.41667 = 7631.0[\text{rad/s}] \\ \omega(1740) &= 480.3P_G = 7052.5 + (480.3^2 - 478.82^2)0.41667 = 7644.0[\text{rad/s}] \\ \omega(1800) &= 481.70P_G = 7093.3 + (481.7^2 - 480.3^2)0.41667 = 7654.5[\text{rad/s}] \\ \omega(1860) &= 483.02P_G = 7131.9 + (483.02^2 - 481.7^2)0.41667 = 7662.5[\text{rad/s}] \\ \omega(1920) &= 484.27P_G = 7168.5 + (484.27^2 - 483.02^2)0.41667 = 7672.3[\text{rad/s}] \\ \omega(1980) &= 485.44P_G = 7202.9 + (485.44^2 - 484.27^2)0.41667 = 7675.6[\text{rad/s}] \\ \omega(2040) &= 486.55P_G = 7235.6 + (486.55^2 - 485.44^2)0.41667 = 7685.1[\text{rad/s}] \\ \omega(2140) &= 488.26, \omega(2340) = 491.20, \omega(2540) = 493.59, \omega(2740) = \\ &495.52, \omega(2940) = 497.08, \omega(3140) = 498.33[\text{rad/s}] \\ \omega(3340) &= 499.34, \omega(3540) = 500.14, \omega(4040) = 501.51, \omega(4540) = \\ &502.29, \omega(5540) = 502.98, \omega(6540) = 503.2[\text{rad/s}] \\ t &= 6540[\text{s}] \\ \omega(6540000) &= 503.3 = 503.3 = 503.3[\text{rad/s}] \end{aligned}$$

Datorită alegerii necorespunzătoare a rezistenței de sarcină, valoarea lui $\omega_{ref} = 503.3[\text{rad/s}]$ se atinge într-un timp foarte lung $t = 6540[\text{s}]$ deoarece $\omega(6540) = 503.3[\text{rad/s}]$.

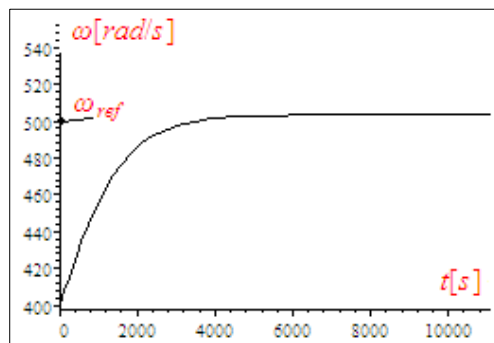


Fig.4.36.Variația lui ω în timp

La $R = 649.84[\Omega]$ ecuația mișcării devine

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{16}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{16}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (16)^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 649.84 + 8) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (649.84)^2 + 2000 \cdot (649.84) + 1600}{(1250 \cdot (649.84)^2 + 4000 \cdot (649.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 400. \end{array} \right.$$

și la $t = 600[s]$ și $800[s]$, **VUM** au valorile: $\omega(600) = 500.91[rad/s]$, respectiv $\omega(800) = 527.02[rad/s]$. Variația în timp a lui ω la $R = 649.84[\Omega]$ este dată în figura 4.37.

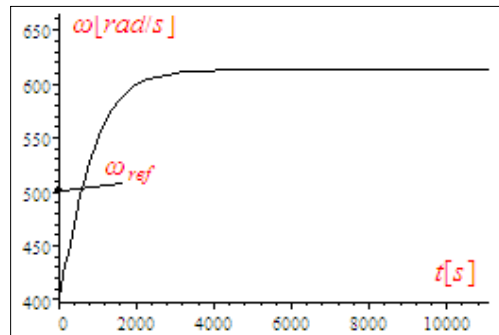


Fig.4.37.Variația în timp a VUM ω

În acest caz ω_{ref} se atinge într-un timp scurt, aproximativ $600[s]$.

La $t = 100, 200, \dots, 1300[s]$ se obțin valorile pentru P_{TV} :

$$P_{TV} = P_G + J \frac{\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2}{2 \cdot \Delta t} = P_G + 0.25(\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)$$

$$\omega(100) = 417.71[rad/s]$$

$$P_{TV} = 2903.9 + (417.71^2 - 400^2)0.25 = 6524.3[W]$$

$$\omega(200) = 435.53[rad/s]$$

$$P_{TV} = 3156.4 + (435.53^2 - 417.71^2)0.25 = 6957.6[W]$$

$$\omega(300) = 453.07[rad/s]$$

$$P_{TV} = 3415.1 + (453.07^2 - 435.53^2)0.25 = 7311.6[W]$$

$$\omega(400) = 469.98[rad/s]$$

$$P_{TV} = 3674.2 + (469.98^2 - 453.07^2)0.25 = 7576.4[W]$$

$$\omega(500) = 486.00[rad/s]$$

$$P_{TV} = 3928.3 + (486.00^2 - 469.98^2)0.25 = 7757.0[W]$$

$$\omega(600) = 500.91[rad/s]$$

$$P_{TV} = 4172.3 + (500.91^2 - 486.00^2)0.25 = 7851.0[W]$$

$$\omega(700) = 514.6[rad/s]$$

$$P_{TV} = 4402.8 + (514.6^2 - 500.91^2)0.25 = 7878.4[W]$$

$$\omega(800) = 527.02[rad/s]$$

$$P_{TV} = 4617.2 + (527.02^2 - 514.6^2)0.25 = 7851.4[W]$$

$$\omega(900) = 538.16[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 4813.8 + (538.16^2 - 527.02^2)0.25 = 7780.3[W]$$

$$\omega(1000) = 548.08[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 4992.3 + (548.08^2 - 538.16^2)0.25 = 7686.2[W]$$

$$\omega(1100) = 556.85[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 5152.8 + (556.85^2 - 548.08^2)0.25 = 7575.4[W]$$

$$\omega(1200) = 564.54[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 5295.6 + (564.54^2 - 556.85^2)0.25 = 7451.5[W]$$

$$\omega(1300) = 571.27[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 5422.1 + (571.27^2 - 564.54^2)0.25 = 7333.1[W]$$

Caracteristica puterii **TV** obținută prin calcul aproximează pe cea reală cu o abatere sub 2%, figura 4.38.

$$P_{TV}(\omega, 16) = 23.584 \cdot \left((16.1 / \omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(16.1/\omega - 0.0525)} \cdot 16.1^3$$

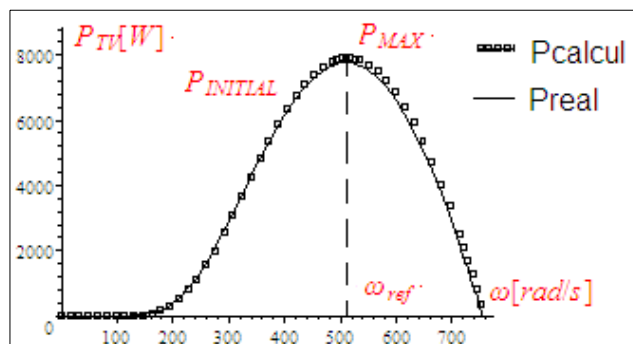


Fig.4.38. Caracteristicile puterii

În cazul real $\omega_{ref} = 509.09[\text{rad} / \text{s}]$, iar prin calcul s-a obținut

$$\omega_{ref} = 514.6[\text{rad} / \text{s}], \text{ eroarea fiind de } 1.082\% .$$

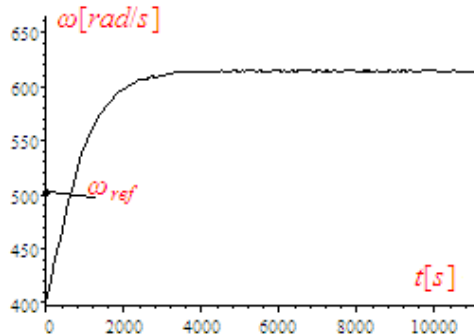
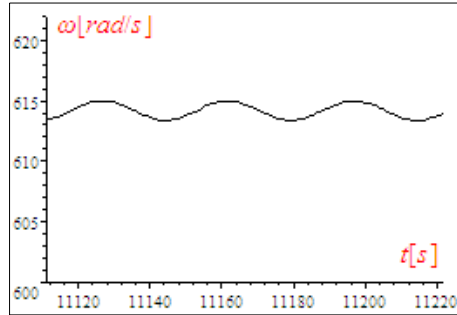
4.6.2. Caracteristica puterii la $V \neq ct$

La $R = 649.84[\Omega]$ ecuația mișcării devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left((16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2))^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 649.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (649.84)^2 + 2000 \cdot (649.84) + 1600}{(1250 \cdot (649.84)^2 + 4000 \cdot (649.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \end{array} \right. \quad \text{și se}$$

$$\omega(0) = 400$$

obține variația în timp al lui ω .

Fig.4.39.a. Variația în timp a VUM ω Fig.4.39.b. Variația în timp a VUM ω (detaliu)

Deoarece $V \neq ct$ **VUM**, ω , are o variație în timp asemănătoare vitezei vântului. Cu **VUM**: $\omega(100), \omega(200) \dots \omega(1300)$ se calculează puterea dată de **TV**

$$\omega(100) = 417.27[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 2897.8 + (417.71^2 - 400^2)0.25 = 6518.2[W]$$

$$\omega(200) = 434.49[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 3141.4 + (434.49^2 - 417.71^2)0.25 = 6716.4[W]$$

$$\omega(300) = 451.21[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 3387.3 + (451.21^2 - 434.49^2)0.25 = 7089.5[W]$$

$$\omega(400) = 467.22[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 3631.3 + (467.22^2 - 451.21^2)0.25 = 7307.3[W]$$

$$\omega(500) = 482.53[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 3872.5 + (482.53^2 - 467.22^2)0.25 = 7507.7[W]$$

$$\omega(600) = 497.26[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 4111.9 + (497.26^2 - 482.53^2)0.25 = 7720.0[W]$$

$$\omega(700) = 511.32[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 4347. + (511.32^2 - 497.26^2)0.25 = 7892.2[W]$$

$$\omega(800) = 524.23[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 4568 + (524.23^2 - 511.32^2)0.25 = 7910[W]$$

$$\omega(900) = 535.54[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 4767.2 + (535.54^2 - 524.23^2)0.25 = 7763.7[W]$$

$$\omega(1000) = 545.19[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 4940 + (545.19^2 - 535.54^2)0.25 = 7547.3[W]$$

$$\omega(1100) = 553.52[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 5091.5 + (553.52^2 - 545.19^2)0.25 = 7379.6[W]$$

$$\omega(1200) = 561.07[\text{rad} / \text{s}]$$

$$P_{TV} = 5230.9 + (561.07^2 - 553.52^2)0.25 = 7334.7 [W]$$

$$\omega(1300) = 568.25 [rad/s] \quad P_{TV} = 5365.1 + (568.25^2 - 561.07^2)0.25 = 7392.2 [W]$$

Viteza vântului fiind variabilă în timp, caracteristicile puterii $P_{TV}[\omega]$ sunt în zona hașurată, figura 4.40 și se poate defini o caracteristică echivalentă denumită aici $P_{TV-CALCUL}$.

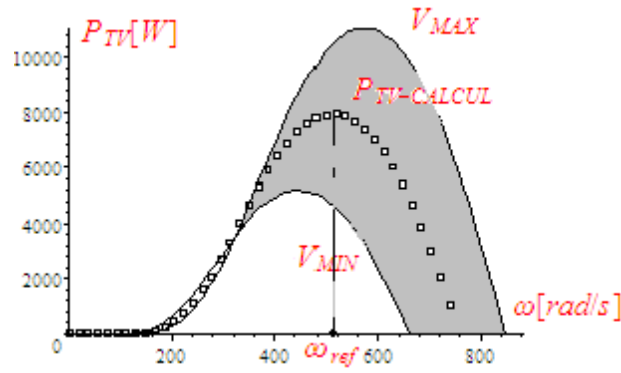


Fig.4.40.Caracteristicile puterii

VUM de referință, ω_{ref} , obținute în cazurile analizate sunt:

$$\omega_{ref1} = 509.09 [rad/s] \text{ -calculat din anularea derivatei puterii la } V = 16 [m/s]$$

$$\omega_{ref2} = 514.6 [rad/s] \text{ -calculat cu } P_G \text{ și } \omega \text{ măsurate, la } V = 16 [m/s]$$

$$\omega_{ref3} = 524.23 [rad/s] \text{ -calculat cu } P_G \text{ și } \omega \text{ măsurate, la}$$

$$V = (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) [m/s].$$

Precizare

Valorile ω_{ref} date mai sus sunt apropiate lui ω_{OPTIM} dar nu identice.

La $V = (16 - 2 \cdot \sin(0.17943t + \pi/2)) [m/s]$ valorile lui ω_{OPTIM} sunt în domeniul $(498.7 \div 499.9) [rad/s]$, față de $\omega_{ref3} = 524.23 [rad/s]$, calculat cu P_G și ω măsurate.

La $V = 16 [m/s]$ valoarea lui ω_{OPTIM} este aceeași cu $\omega_{ref1} = 509.09 [rad/s]$, dar acest fapt este valabil numai la viteze ale vântului ce au o valoare constantă, situație rar întâlnită în practică

4.7. Concluzii

În cadrul acestui capitol, pe baza ecuației mișcării, s-a determinat valoarea optimă pentru **VUM**, ω_{OPTIM} , la variații ale vitezei vântului. S-a determinat și dependența lui ω_{OPTIM} de viteza vântului.

Prin măsurarea vitezei vântului se determină ω_{OPTIM} și astfel se extrage maximum de energie mecanică la viteze ale vântului variabile în timp. Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili marimile de baza ce conduc la o funcționare optimă. S-a demonstrat, prin simulări, că valoarea momentului mediu la turbină scade la creșterea valorilor amplitudinii vitezei vântului. Tot prin simulări s-a dedus turația și rezistența de sarcină optime la generator, astfel încât să se obțină o energie maximă la o viteză a vântului variabilă în timp. S-au dedus oscilațiile puterii la **TV** și **GSMP** și s-a demonstrat faptul că inerția mecanică, prin momentul de inerție echivalent, micșorează oscilațiile puterii la **GSMP**. În conducerea sistemului s-au dat metodele de calcul a turației de referință în funcție de viteza vântului la **GSMP**, astfel încât să se obțină o energie

maximă. La viteza vântului variabilă în timp s-au dedus turațiile optime la **GSMP**. S-a dat o metodă de calcul a puterii la **TV** bazată pe măsurători.

În continuare se prezintă contribuțiile personale din acest capitol:

- construirea unor modele matematice performante pentru turbina de vant și generatorul electric;
- deducerea turației la care puterea dată de turbină este maximă și determinarea dependenței acesteia de viteza vântului;
- deducerea influenței valorii amplitudinii vitezei vântului asupra momentului mediu la **TV** ;
- determinarea, din putere, a energiilor mecanice și electrice obținute;
- determinarea turațiilor la care energia captată este maximă;
- deducerea influenței valorii amplitudinii vitezei vântului asupra energiei captate;
- analiza oscilațiilor puterii și energiei la o viteză a vântului sinusoidală în timp;
- determinarea influenței valorii **VUM** inițiale asupra funcționării în timp a sistemului;
- analiza influenței momentului de inerție mecanic asupra energiei captate;
- conceperea unui sistem de conducere bazat pe măsurarea vitezei vântului și având în vedere dependența turației optime de viteză a vântului;
- determinarea experimentală a caracteristicii puterii la turbina de vânt;

5. DETERMINAREA OPTIMULUI ENERGETIC LA UN SISTEM EOLIAN FUNCȚIONÂND LA VITEZE ALE VÂNTULUI VARIABILE ÎN TIMP

Capitolul 5, în întregime original, este consacrat determinării valorii turației la care energia captată este maximă. Aceasta constituie problema fundamentală în orice sistem de conducere performant. Deoarece viteza vântului variază ca și valoare, semnificativ în timp și valoarea turației optime se modifică în timp. Conducerea optimală din punct de vedere energetic a sistemului eolian se poate realiza în timp util, dacă se cunoaște dependența valorii turației optime de viteza vântului.

Determinarea legăturii dintre viteza vântului și turația optimă este obiectivul principal al acestei lucrări. Se determină, în prezenta lucrare, energia mecanică captată de turbina de vânt, (TV), și transformată în energie electrică de către generatorul sincron cu magneți permanenți, (GSMP), cuplat la TV. Prin simulare se determină viteza unghiulară mecanică, ω_{OPTIM} , și rezistența de sarcină

ω_{OPTIM} și rezistența de sarcină

optimă $-R_{OPTIM}$, la GSMP, la care energia este maximă, considerând viteza vântului variabilă în timp.

5.1. Considerații preliminare

Funcționarea sistemului eolian în MPP este imposibil de realizat [2] la viteze ale vântului variabile în timp, cum este cazul real al României [1]. La puteri mari inerțiile mecanice sunt mari și nu se poate realiza, în timp util, valorile turațiilor corespunzătoare MPP [3], la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp [4].

Literatura de specialitate abundă în lucrări ce tratează funcționarea în MPP [1-17], viteza vântului fiind constantă în timp.

Funcționarea la viteze ale vântului variabile și semnificative în timp și în condiții energetice optime este foarte puțin tratată în literatură [1].

În lucrarea de față se tratează tocmai acest aspect: optimul energetic la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp. Se dă dependența vitezei unghiulare mecanice optime: ω_{OPTIM} , de viteza echivalentă a vântului: V_{ECH} , calculată prin integrarea valorii vitezei în timp.

Se pune problema determinării încărcării sistemului **TV+GSMP**, [1-6], astfel încât energia obținută să fie maximă.

5.2. Modele matematice

Modele matematice folosite sunt cele uzuale atât pentru turbine cât și pentru generator

5.2.1. Modelul matematic al TV, (MM-TV)

Pentru turbina de vânt, **TV**, puterea dată are valoarea

$$P_{TV} = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde: V – viteza vântului; ω – viteza unghiulară mecanică, **VUM**

Momentul TV , M_{TV} , se obține din putere: $M_{TV} = P_{TV}/\omega$ și are forma

$$M_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3/\omega$$

5.2.2. Modelul matematic al GSMP, (MM-GSMP)

Se folosește modelul matematic ortogonal pentru generatorul sincron cu magneți permanenți, (GSMP), dat în continuare prin ecuațiile [5]:

$$\begin{cases} -U\sqrt{3}\sin\theta = R_1 I_d - \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3}\cos\theta = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_{motor} = p_1(L_d - L_q)I_d I_q + I_q \Psi_{MP} \end{cases}$$

unde

R_1 – rezistența înfășurării statorice; L_d – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa **d** ;

L_q – inductanța proprie a înfășurării rotorice din axa **q**; p_1 – numărul perechilor de poli; Ψ_{MP} – fluxul magnetului permanent.

Din datele de catalog [1] ale **GSMP** de putere: $P_N = 5[kW]$ se obțin valorile:

$$R_1 = 1.6[\Omega], L_d = 0.07[H], L_q = 0.08[H], \Psi_{MP} = 3.3[Wb].$$

Din sistemul de ecuații ale **GSMP**

$$\begin{cases} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega \Psi_M \\ M_G = -0.01I_d I_q + \Psi_M I_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \end{cases}$$

se obțin:

$$\begin{aligned} \text{puterea-} \quad P_G &= 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \text{ și} \\ \text{momentul-} \quad M_{GSMP} &= -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \end{aligned}$$

Cele două funcții: $P_G(R, \omega)$ și $M_{GSMP}(R, \omega)$ depind de : R – rezistența de sarcină și ω – **VUM**.

Prin urmare, la $R = ct$ momentul M_{GSMP} se poate pune sub forma

$$M_{GSMP} = k_M \cdot \omega$$

Puterea fiind derivata energiei, energia electrică, W_e , se calculează din putere, astfel

$$\frac{dW_e}{dt} = P_G$$

sau

$$\frac{dW_e}{dt} = 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

5.3. Puterile la generator și turbină

PUTEREA LA GSMP

Valoarea puterii la GSMP depinde de valoarea rezistenței de sarcină R : $R = 349.84 [\Omega]$

și de VUM, ω și are o variație așa ca în figura 1. Puterea debitată crește cu ω și nu prezintă un maxim ,așa cum este cazul la puterea dată de TV, figura 2. Din acest motiv nu se poate realiza o conducere a sistemului la putere maximă având în vedere numai puterea dată de GSMP

Puterea dată de GSMP la $R = 349.84 [\Omega]$ se calculează cu relația:

$$P_{GSMP}(\omega) = 27225 \cdot 349.84 \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 349.84^2 + 2000 \cdot 349.84 + 1600}{(1250 \cdot 349.84^2 + 4000 \cdot 349.84 + 3200 \cdot 7 \cdot \omega^2)^2}$$

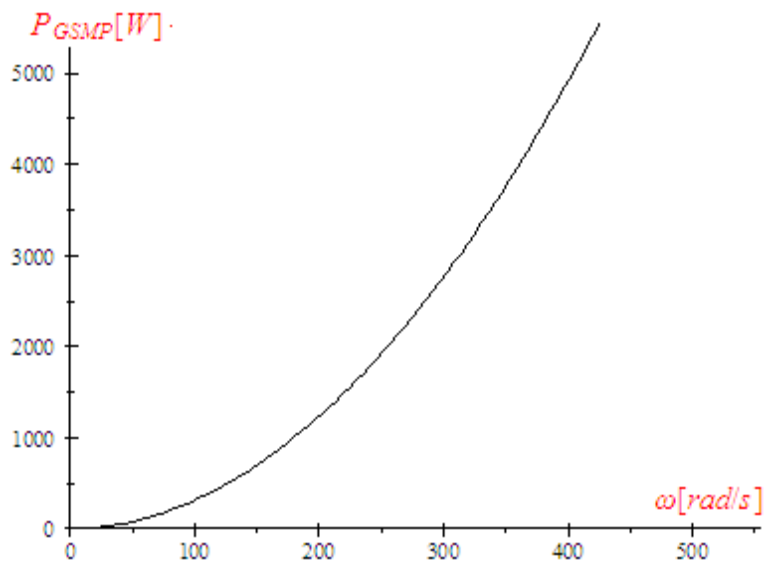


Fig.5.1. Dependența puterii la generator de ω

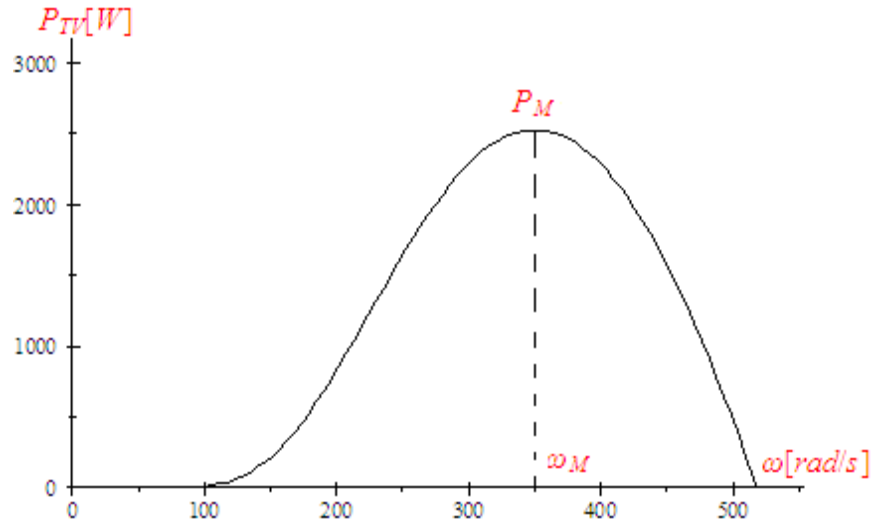
PUTEREA LA TV

Puterea dată de GSMP nu depinde explicit de viteza vântului. Puterea dată de TV depinde, însă, explicit de viteza vântului. Se analizează în continuare două variante

- **varianta 1**- viteza vântului este constantă în timp
- **varianta 2**- viteza vântului este variabilă în timp
- **varianta 1**- $V(t) = 11 [m/s] = ct$

Puterea dată de TV, la viteza vântului $V = 11 [m/s]$, figura 2, se calculează cu relația [1]:

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3$$

Fig.5.2.Dependența puterii la turbina de ω

Puterea dată de TV, la o anumită viteză a vântului, prezintă un maxim la ω_M . Pentru a determina experimental coordonatele acestui maxim se egalează momentul TV cu cel al GSMP:

$$23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 / \omega = 5445.0\omega (5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

sau:

$$23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 = 5445.0\omega^2 (5.R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

Necunoscutele P_{GSMP} , R și ω se calculează din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 = 5445.0\omega^2 (5.R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \text{ egalitatea momentelor} \\ P = 27225.0 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \text{ puterea dată de TV} \\ \omega = 333. \end{array} \right.$$

$$\{[P = 2490.8, R = 480.49, \omega = 333.0]\}$$

La mai multe valori pentru ω se obțin rezultatele:

$$\left\{ \begin{array}{l} 23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 = 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8.) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.0\omega^2)^2} \\ \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4.\omega^2 + 625.R^2 + 2000.R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ \\ \omega = 343. \end{array} \right.$$

$$\{[P = 2514.6, R = 505.19, \omega = 343.0]\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 = 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8.) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.0\omega^2)^2} \\ \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4.\omega^2 + 625.R^2 + 2000.R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ \\ \omega = 348. \end{array} \right.$$

$$\{[P = 2519.2, R = 519.19, \omega = 348.0]\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 = \\ 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8.) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.0\omega^2)^2} \\ \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4.\omega^2 + 625.R^2 + 2000.R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ \\ \omega = 350. \end{array} \right.$$

$$: \{[P = 2519.6, R = 525.13, \omega = 350.0]\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 = \\ 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8.) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.0\omega^2)^2} \\ \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4.\omega^2 + 625.R^2 + 2000.R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ \\ \omega = 351. \end{array} \right.$$

$$\{[P = 2519.6, R = 528.17, \omega = 351.0]\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 = \\ 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8.) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.0\omega^2)^2} \\ \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4.\omega^2 + 625.R^2 + 2000.R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ \\ \omega = 352. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \{[P = 2519.3, R = 531.26, \omega = 352.0]\} \\ 23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 = \\ 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8) \cdot \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.0\omega^2)^2} \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \frac{4.\omega^2 + 625.R^2 + 2000.R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ \omega = 353. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \{[P = 2518.9, R = 534.4, \omega = 353.0]\} \\ 23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 = \\ 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8) \cdot \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.0\omega^2)^2} \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \frac{4.\omega^2 + 625.R^2 + 2000.R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ \omega = 363. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \{[P = 2503.7, R = 568.82, \omega = 363.0]\} \\ 23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 = \\ 5445 \cdot \omega^2 (5.R + 8) \cdot \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.0\omega^2)^2} \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \cdot \frac{4.\omega^2 + 625.R^2 + 2000.R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ \omega = 373. \end{array} \right.$$

$$\{[P = 2469.0, R = 609.36, \omega = 373.0]\}$$

La $\omega = 350. [rad/s]$ se obține puterea maximă.

Același rezultat se obține și din anularea derivatei puterii:

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = 0$$

sau

$$\frac{d}{d\omega} (23.584 \cdot ((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3) = 0, \text{ cu soluția}$$

$$\omega = 350. [rad / s]$$

Modificarea sarcini la GSMP trebuie făcută la intervale de timp suficient de mari. Valorile acestor intervale de timp depind de momentul de inerție echivalent:-J, așa cum se observă din evoluția în timp a lui ω , figura 5.3, obținută prin rezolvarea ecuației mișcării la modificarea lui R de la valoarea : $R = 505.19 [\Omega]$ la valoarea: $R = 519.19 [\Omega]$

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left((11/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06(11/\omega - 0.0525)} \cdot 11^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 519.19 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (519.19)^2 + 2000 \cdot (519.19) + 1600}{(1250 \cdot (519.19)^2 + 4000 \cdot (519.19) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 343. \end{array} \right.$$

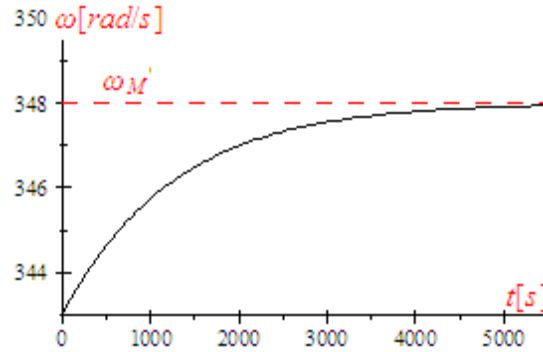


Fig.5.3.Variația VUM în timp

-varianta 2- $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))$

În regim stabilizat sau calculat VUM, în paragraful următor la : $R = 441.84, 451.84$ și $461.84 [\Omega]$ și s-au obținut rezultatele:

$$\omega = 543.78 [\text{rad/s}], \text{ la } R = 441.84 [\Omega]$$

$$\omega = 550.07 [\text{rad/s}], \text{ la } R = 451.84 [\Omega]$$

$$\omega = 555.98 [\text{rad/s}], \text{ la } R = 461.84 [\Omega]$$

Cu aceste valori se obțin puterile P_{GSMP} din sistemele de ecuații:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = 441.84 \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega = 543.78 \end{array} \right. , \text{cu soluția:}$$

$$\{\omega = 543.78, R = 441.84, P_{GSMP} = 7183.7\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = 451.84 \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega = 550.07 \end{array} \right. , \text{cu soluția:}$$

$$\{R = 451.84, \omega = 550.07, P_{GSMP} = 7190.4\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = 461.84 \\ P = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega = 555.98 \end{array} \right. , \text{cu soluția:}$$

$$\{R = 461.84, \omega = 555.98, P_{GSMP} = 7188.9\}$$

La $\omega = 550.07 [\text{rad/s}], R = 451.84 [\Omega]$ se obține puterea maximă: $P_{GSMP} = 7190.4 [W]$

La $R = 451.84[\Omega]$ și la viteze ale vântului variabile în timp, VUM nu au valori constante și oscilează între: $\omega_{MIN} = 547.6[rad / s]$ și $\omega_{MAX} = 551.6[rad / s]$, așa cum rezultă din ecuația mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \\ \left((16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 451.84 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (451.84)^2 + 2000 \cdot (451.84) + 1600}{(1250 \cdot (451.84)^2 + 4000 \cdot (451.84) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \right) \end{array} \right.$$

$$\omega(0) = 550.07$$

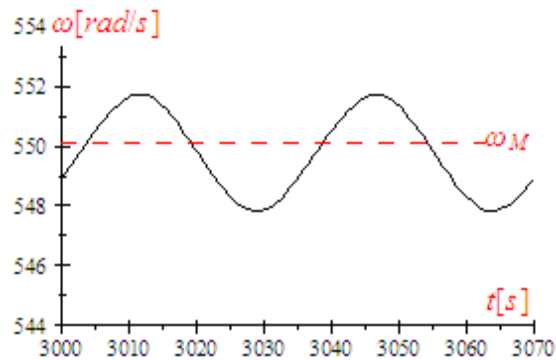


Fig.5.4.Variația VUM în timp

Datorită oscilațiilor VUM: $\omega(t) = (549.6 + 2 \cdot \sin(0.17943t))$ și P_{GSMP} va oscila, figura 5.5, între valorile: $P_{GSMP-MIN} = 7124[W]$ și $P_{GSMP-MAX} = 7225[W]$

$$P_{GSMP} = 27225 \cdot 451.84 \cdot \left(549.6 + 2 \cdot \sin(0.17943t) \right)^2 \cdot \frac{4 \cdot (549.6 + 2 \cdot \sin(0.17943t))^2 + 625 \cdot 451.84^2 + 2000 \cdot 451.84 + 1600}{(1250 \cdot 451.84^2 + 4000 \cdot 451.84 + 3200 + 7 \cdot (549.6 + 2 \cdot \sin(0.17943t))^2)^2}$$

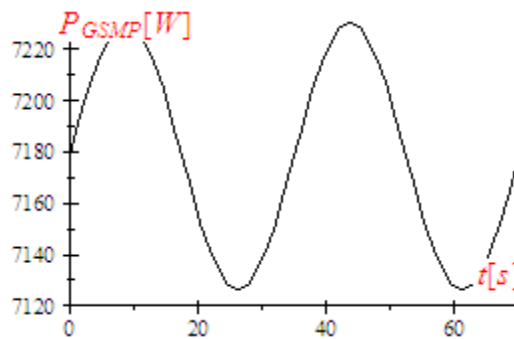


Fig.5.5.Variația puterii la generator în timp

Oscilațiile valorilor P_{GSMP} complică și mai mult deducerea optimului energetic, mai ales că aceste oscilații determină ca $P_{GSMP-MIN} = 7124[W]$ să fie mai mic decât $P_{GSMP} = 7183.7[W]$ corespunzător la $R = 441.84[\Omega]$ și $\omega = 543.78[rad / s]$

Datorită variației vitezei vântului în timp puterea la TV se modifică semnificativ între: $P_{TV-MAX} = 20000 [W]$ și $P_{TV-MIN} = 2400 [W]$. Aceasta face ca VUM corespunzătoare MPP să fie într-un interval destul de mare: $\Delta\omega_M = 310 [rad/s] \div 700 [rad/s]$ cu $\omega_{M2} = 310 [rad/s]$ la P_{TV-MIN} și $\omega_{M1} = 700 [rad/s]$ la P_{TV-MAX} .

La mijlocul intervalului valoarea lui ω_M este :

$$\omega_M = (310 + 700)/2 = 505 [rad/s]$$

mult diferită de cea obținută anterior la maximumul puterii P_{GSMP} :

$$\omega = 550.07 [rad/s],$$

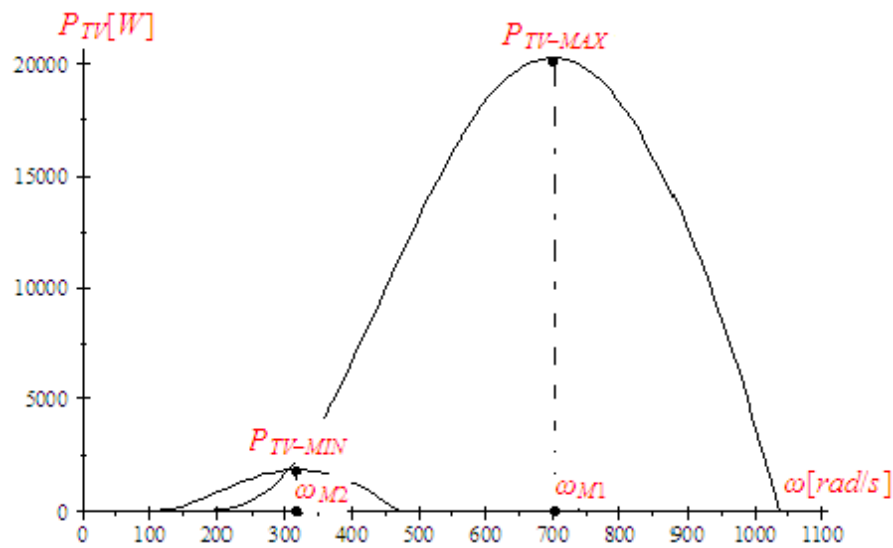


Fig.5.6. Dependența puterii TV de ω la viteza minimă și maximă

Puterea maximă dată de TV este:

$$P_{TV-MAX} = 23.584 \cdot (((22)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3$$

Puterea la viteza medie a vântului dată de TV este:

$$P_{TV-MEDIU} = 23.584 \cdot (((16)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16)/\omega - 0.0525)} \cdot (16)^3$$

Puterea minimă dată de TV este:

$$P_{TV-MIN} = 23.584 \cdot (((10)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((10)/\omega - 0.0525)} \cdot (10)^3$$

Momentul maxim dat de TV este:

$$M_{TV-MAX} = 23.584 \cdot (((22)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((22)/\omega - 0.0525)} \cdot (22)^3 / \omega$$

Momentul la viteza medie a vântului dat de TV este:

$$M_{TV-MEDIU} = 23.584 \cdot (((16)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16)/\omega - 0.0525)} \cdot (16)^3 / \omega$$

Momentul minim dat de TV este:

$$M_{TV-MIN} = 23.584 \cdot (((10)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((10)/\omega - 0.0525)} \cdot (10)^3 / \omega$$

La $V(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t)$ și $\omega(t) = (549.6 + 2. \sin(0.17943t))$ se obțin variațiile puterii P_{TV} și momentului M_{TV} în timp:

$$P_{TV}(t) = 23.584 \cdot (((16 - 6 \sin(0.17943t))/(549.6 + 2. \sin(0.17943t)) - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t))/(549.6 + 2. \sin(0.17943t)) - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3$$

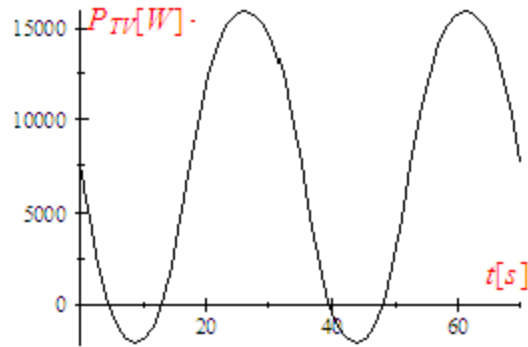


Fig.5.7.Variația puterii TV în timp

$$M_{TV}(t) = 23.584 \cdot (((16 - 6 \sin(0.17943t))/(549.6 + 2. \sin(0.17943t)) - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t))/(549.6 + 2. \sin(0.17943t)) - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 / (549.6 + 2. \sin(0.17943t))$$

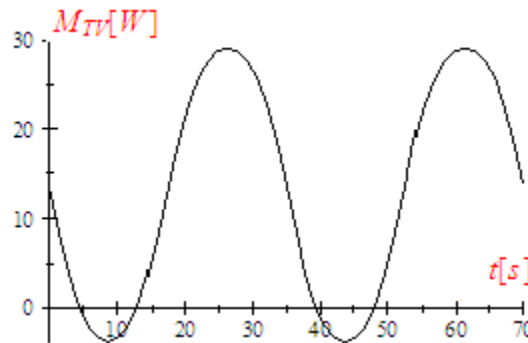


Fig.5.8.Variația momentului TV în timp

Se observă din rezultatele de mai sus că atât puterea cât și momentul devin negative pe intervale scurte de timp, intervale în care viteza vântului este mică. În aceste situații se produce o frânare a turbinei.

La o rezistență de sarcină : $R = 451.84[\Omega]$ și la viteza vântului:

$V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))$, VUM oscilează: $\omega(t) = (549.6 + 2. \sin(0.17943t))$ și astfel

M_{TV} ia valori de la valoarea maximă de la M_{TV-MAX} și până la valori negative, zona hașurată din figura 5.9.

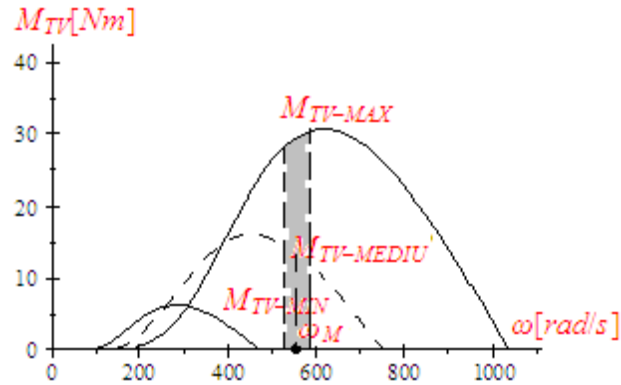


Fig. 5.9. Dependințele momentelor TV de ω
Același fenomen apare și la putere, zona hașurată din figura 5.10.

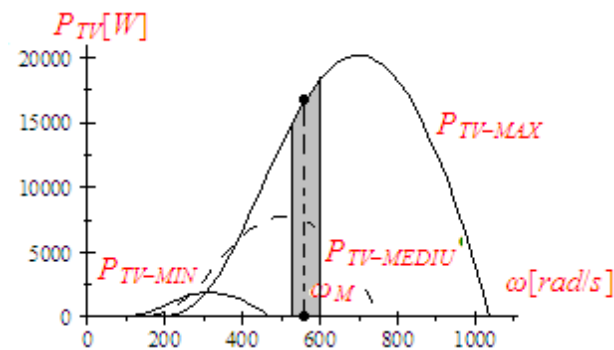


Fig. 5.10. Dependințele puterilor TV de ω

5.4. Determinarea energiei dată de GSMP

Determinarea încărcării optime a sistemului TV+GSMP presupune cunoașterea turației la generator, astfel ca energia captată să fie maximă, la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp.

La o viteză a vântului variabilă în timp, de forma $V(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t)$, încărcarea optimă se obține prin simulări succesive, după următorul procedeu:

- 1) se alege o valoare pentru rezistența de sarcină R și cu aceasta
- 2) se determină VUM stabilizată, din ecuația mișcării la $t = 4000[s]$
- 3) se determină energia captată în intervalul de timp $\Delta t = 4000[s]$
- 4) se repetă calculele pentru diferite valori ale rezistenței de sarcină R
- 5) se determină valorile lui R și ω pentru care energia captată este maximă

Se aleg valori ale rezistenței de sarcină în domeniul $R = 349.84[\Omega] \div 491.84[\Omega]$

- 1) La $R = 349.84[\Omega]$ se obține : $\omega(4000.) = 441.27[rad/s]$, $W_e(4000) = 2.3783 \times 10^7[J]$
- 2) La $R = 369.84[\Omega]$ se obține : $W_e(4000) = 2.6446 \times 10^7[J]$, $\omega(4000.) = 478.41[rad/s]$
- 3) La $R = 379.84[\Omega]$ se obține : $W_e(4000) = 2.7139 \times 10^7[J]$, $\omega(4000.) = 491.08[rad/s]$

- 4)La $R = 389.84[\Omega]$ se obține : $W_e(4000) = 2.7639 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 501.99[rad/s]$
 5)La $R = 399.84[\Omega]$ se obține : $W_e(4000) = 2.8004 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 511.65[rad/s]$
 6)La $R = 411.84[\Omega]$ se obține : $W_e(4000) = 2.8312 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 522.01[rad/s]$
 7)La $R = 421.84[\Omega]$ se obține : $W_e(4000) = 2.8485 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 529.83[rad/s]$
 8)La $R = 441.84[\Omega]$ se obține : $W_e(4000) = 2.8667 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 543.78[rad/s]$
 9)La $R = 451.84[\Omega]$ se obține : $W_e(4000) = 2.8694 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 550.07[rad/s]$
 10)La $R = 461.84[\Omega]$ se obține :
 $W_e(4000) = 2.8689 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 555.98[rad/s]$
 11)La $R = 471.84[\Omega]$ se obține: $W_e(4000) = 2.8655 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 561.55[rad/s]$
 12)La $R = 481.84[\Omega]$ se obține: $W_e(4000) = 2.8598 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 566.81[rad/s]$
 13)La $R = 491.84[\Omega]$ se obține: $W_e(4000) = 2.8522 \times 10^7 [J], \omega(4000.) = 571.81[rad/s]$
 La $R = 451.84[\Omega]$ se obține energia maximă

$$W_{e-MAXIM-2} = 2.8694 \times 10^7 [J]$$

În acest caz, VUM are valoarea

$$\omega_{OPTIM-2} = 550.07[rad/s]$$

Considerând viteza medie a vântului se obține o valoare eronată pentru ω_{OPTIM} .

Observația 1

Parametrii optimi : ω_{OPTIM} și R_{OPTIM} s-au obținut prin simulare într-un timp $t = 4000[s]$. Pentru a fi utile aceste mărimi trebuie să fie **determinate în timp real și acest fapt se poate realiza doar prin măsurarea vitezei vântului.**

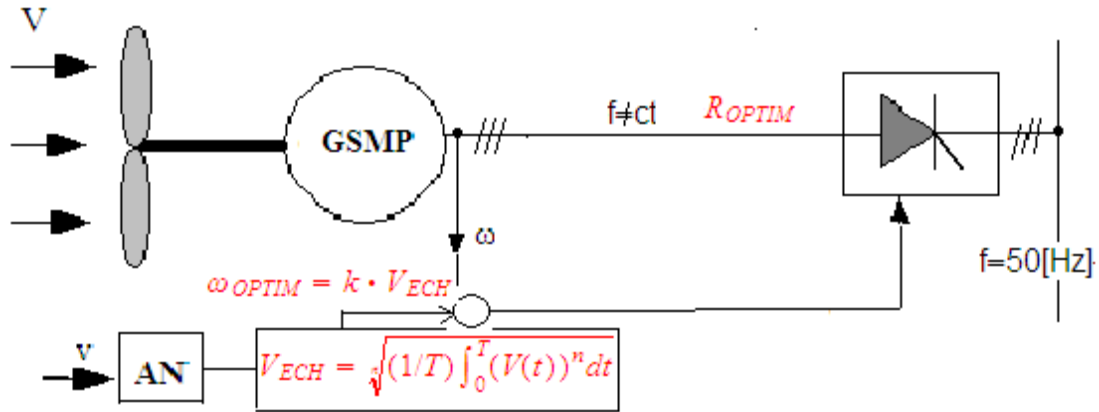
Observația 2

Valorile obținute sunt deosebit de utile în a valida metoda de calcul a lui ω_{OPTIM} în timp real, dată în continuare .

Conoscând **VUM** pentru care energia captată este maximă, prin comanda convertoarelor de putere interpusse între **GSMP** și rețea, figura 5.11, se asigură captarea unei energii maxime

În concluzie, algoritmul de conducere este următorul:

- 1) se masoară viteza vântului și se determină $V_{ECH} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^n dt}$
- 2) se determină ω_{OPTIM} din $\omega_{OPTIM} = k \cdot V_{ECH}$
- 3) se menține, prin sarcina la **GSMP, VUM** în jurul lui ω_{OPTIM}



ig.5.11. Conducerea sistemului TV+GSMP

F

5.5. Concluzii

În cadrul acestui capitol s-a determinat legătura dintre viteza vântului și turația optimă la care trebuie să funcționeze sistemul, astfel încât energia eoliană captată să fie maximă. Prin cunoașterea valorii turației optime se poate regla încărcarea la generator astfel încât să se realizeze o funcționare la maximum energetic. Pe baza ecuației mișcării s-a determinat valoarea optimă pentru VUM , ω_{OPTIM} , la variații ale vitezei vântului. S-a determinat și dependența lui ω_{OPTIM} de viteza vântului.

- Prin măsurarea vitezei vântului se determină ω_{OPTIM} și astfel se extrage maximum de energie mecanică la viteze ale vântului variabile în timp. Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili marimile de bază ce conduc la o funcționare optimă. Prin simulări s-a dedus turația și rezistența de sarcină optime la generator, astfel încât să se obțină o energie maximă la o viteză a vântului variabilă în timp. În conducerea sistemului s-au dat metodele de calcul a turației de referință în funcție de viteza vântului, astfel încât să se obțină o energie maximă. La viteza vântului variabilă în timp s-au dedus turațiile optime la **GSMP**.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- determinarea dependenței puterii de turație, la generator;
- determinarea dependenței puterii de turație, la turbină;
- determinarea turației corespunzătoare maximumului puterii la turbină, la viteze ale vântului constante în timp;
- determinarea turației corespunzătoare maximumului puterii la generator, la viteze ale vântului variabile în timp;
- determinarea oscilațiilor puterilor la turbină și generator;
- determinarea variațiilor în timp a puterilor la turbină și generator;
- determinarea maximumului energetic la viteze ale vântului variabile în timp;
- elaborarea unei metodologii de conducere a sistemelor eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp;

6. DETERMINAREA OPTIMULUI ENERGETIC PRIN CALCULUL ENERGIEI MECANICE CAPTATE

Capitolul de față prezintă calculul energiei mecanice captate la diferite viteze unghiulare mecanice. Obiectivul capitolului îl constituie determinarea vitezei unghiulare mecanice optime, la care energia captată este maximă. Calculul energiei se face prin integrarea puterii pe o perioadă de timp dată de valoarea perioadei de oscilație a vitezei vântului. Pe baza valorii turației optime se poate realiza o conducere optimală. Determinarea turației optime de funcționare, din punct de vedere energetic, este problema esențială la sistemele eoliene ce funcționează la viteze ale vântului variabile în timp. Sunt analizate dependențele vitezei unghiulare mecanice, (VUM), ω , de viteza vântului. Se deduc VUM corespunzătoare energiilor maxime, ω_{ref} .

6.1. Considerații preliminare

Viteza vântului în domeniul exploatabil tehnico-economic este $V=4 \div 25$ [m/s] cu cele mai bune rezultate în intervalul: $V=12 \div 15$ [m/s] [9]. În decursul unei zile viteza vântului poate varia semnificativ, așa cum se observă din înregistrările pe o durată lungă de timp [2].

Se pune problema determinării turației la GSMP, astfel încât energia captată să fie maximă, realizându-se o funcționare optimă [3]. Scopul conducerii sistemului TV+GSMP, [1-6], este de a obține o energie electrică maximă în condițiile meteo date: viteza vântului fiind variabilă semnificativ în timp. Problema fundamentală în asigurarea funcționării sistemului TV+GSMP în MPP este determinarea VUM, ω , corespunzătoare energiei maxime și notată cu ω_{ref} .

Sistemele electroenergetice eoliene de mare putere sunt conduse având în vedere viteza medie a vântului [8 ÷ 17]. Recent s-au propus și structuri de conducere bazate pe măsurarea vitezei momentane a vântului [1 ÷ 5] și folosind un model matematic adecvat pentru turbina de vânt, (TV)[14].

Din cauza momentelor de inerție -J- foarte mari ale -TV- modificarea turației la GSMP este lentă și deci nu poate urmări variația rapidă în timp a vitezei vântului, așa cum ar fi necesar pentru a funcționa în punctele de putere maximă [7], [1], [15]. Cum vitezele vântului sunt semnificativ variabile în timp se pune problema determinării turației optime, astfel încât economic să se obțină un profit maxim pe locația unde se vor instala turbinele de vânt, [2].

Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate teoretice și practice trebuie să aibă la bază intervale de timp de minimum câteva ore, (de regulă peste 10[h]), [3]. Sistemele de conducere performante trebuie să asigure maximul de energie eoliană, captată pe un interval lung de timp [15]. Conducerea sistemului (TV+GSMP) la putere maximă obținută de la generatorul electric duce la frânarea turbinei și mărirea artificială, pe moment, a puterii electrice din variațiile energiilor cinetice a maselor în mișcare de rotație, dar, în final, pe o perioadă lungă de timp, energia obținută este mai mică decât în cazul funcționării la maximul energetic [2].

Conducerea optimală a unui sistem eolian presupune extragerea, (captarea), unei energii maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp. Aceasta impune controlul turației și cuplului la turbină și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului. Generatorul electric trebuie să preia energiile: eoliană disponibilă, plus diferența de energii cinetice a maselor în mișcare de rotație și, astfel, turația reală a generatorului tinde spre turația de referință (optimă). Energia eoliană maximă disponibilă, la viteza vântului $V(t)$, pe intervalul Δt se extrage prin impunerea turației/vitezei de referință ω_{ref} și, astfel sistemul eolian funcționează optimal la maximul energetic, turbina de vânt -TV- captând o energie maxim posibilă pe un interval de timp dat, de ordinul zilelor.

6.2. Modelele matematice la TV și GSMP

Simulările prezentate în lucrare se bazează pe modelele matematice clasice ale **TV** și **GSMP**, preluate din [14].

6.2.1. Modelul matematic al TV, (MM-TV)

Se are în vedere un model clasic, [14] pentru turbină, model ce permite estimarea vitezei unghiulare de referință - ω_{ref} . Modelul matematic al TV permite determinarea, orientativă, a turației optime de funcționare, astfel ca energia captată să fie maximă. Din datele de catalog [2] la o turbină de vânt, **TV**, de 5[kW] se obține:

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

Momentul TV, M_{TV} , se obține din putere: $M_{TV} = P_{TV} / \omega$ și are forma:

$$M_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3 / \omega$$

Coordonatele punctelor de putere maximă, **MPP**, se găsesc ușor din anularea derivatei:

$$\frac{dP_{TV}(\omega, V)}{d\omega} = 0$$

sau

$$\frac{d(23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3)}{d\omega} =$$

$$-1.0 \times 10^{-8} V^4 \exp(0.24515 - \frac{400.0V + 21.0\omega}{\omega}) \frac{7.2684 \times 10^9 \omega - 2.3126 \times 10^{11} V}{\omega^3} = 0$$

obținându-se soluția :

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V$$

La viteze ale vântului având valoarea constantă în timp, așa cum se vede din rezultatul obținut, funcționarea optimă a sistemului eolian se realizează simplu prin prescrierea vitezei unghiulare de referință ω_{ref} , calculată din viteza vântului.

În condițiile în care viteza vântului variază în timp problema devine complexă. Rezolvarea ei se face prin simulări considerând viteze ale vântului variabile sinusoidal în timp.

Deoarece considerând viteza medie a vântului nu se obține valoarea sarcinii la **GSMP**, astfel ca energia captată W_m să fie maximă, [2], se pune problema determinării vitezei unghiulare mecanice de referință, ω_{ref} , pentru a obține $W_{m-MAXIM}$.

6.2.2. Modelul matematic al GSMP, (MM-GSMP)

Pentru a analiza funcționarea sistemului (**TV+GSMP**), la viteze ale vântului variabile în timp, se folosește modelul matematic ortogonal pentru generatorul sincron cu magneți permanenți, (**GSMP**), dat în continuare prin ecuațiile [5]:

$$\begin{cases} -U\sqrt{3}\sin\theta = R_1 I_d - \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3}\cos\theta = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_{motor} = p_1 (L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_{MP} \end{cases}$$

Unde:

R_1 – rezistența înfășurării statorice;

L_d – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa **d**;

L_q – inductanța proprie a înfășurării rotorice din axa **q**;

p_1 – numărul perechilor de poli;

Ψ_{MP} - fluxul magnetului permanent.

Din datele de catalog [1] ale **GSMP** de putere: $P_N = 5[kW]$ se obțin valorile:

$$R_1 = 1.6[\Omega], L_d = 0.07[H], L_q = 0.08[H], \Psi_{MP} = 3.3[Wb].$$

Din sistemul de ecuații ale **GSMP**

$$\begin{cases} -R I_d = 1.6 I_d - \omega \cdot 0.08 I_q \\ -R I_q = 1.6 I_q + \omega \cdot 0.07 I_d + \omega \Psi_M \\ M_G = -0.01 I_d I_q + \Psi_M I_q \\ \Psi_M = 3.3 \end{cases}$$

se obține momentul la generator, M_{GSMP} , sub forma:

$$M_{GSMP} = -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2},$$

dependent de : R – rezistența de sarcină și ω – **VUM**.

Puterea electrică, P_G , are forma :

$$P_G = 27225.R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

depinzând, la fel, de : R și ω .

6.3.Determinarea vitezei unghiulare mecanice optime din ecuația mișcării și a energiei

Alegând o viteză a vântului variabilă în timp de formă sinusoidală:

$$V(t) = (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)$$

se determină valoarea energiei mecanice captate într-un interval de timp $\Delta t = T$ egal cu perioada $T = 35[s]$ a vitezei $V(t)$. Considerând regimul periodic stabilizat din punct de vedere al turației se poate considera:

$$\omega_{initial} = \omega_{final}$$

unde : $\omega_{initial}$ – este VUM la $t = 0$ și ω_{final} este VUM la $t = T$.

Determinarea lui ω_{ref} din ecuația mișcării se face astfel :

$$\omega_{initial} = \omega_{final}$$

Ecuația mișcării fiind:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP}$$

Prin integrare la $\omega_{initial} = \omega_{final}$ se obține :

$$0 = \int_0^T (M_{TV} - M_{GSMP}) dt - \text{ecuația 1}$$

Energia stă la baza celei de-a 2-a ecuații:

- Energia mecanică:

$$W_m = \int_0^T P_{TV} \cdot dt = \int_0^T \left(\frac{23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2})}{e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3} \right) dt - \text{ecuația 2.a}$$

- Energia electrică:

$$W_e = \int_0^T P_G \cdot dt = \int_0^T \left(\frac{27225 \cdot R \omega^2}{\left(\frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \right)} \right) dt - \text{ecuația 2.b}$$

La valoarea $R = 798.55[\Omega]$ și admitând pentru VUM o variație sinusoidală cu perioada $T = 35[s]$, de forma:

$$\omega(t) = a + b \sin 0.17943t = (275.4 + 0.4 \sin 0.17943t)$$

rezultă pentru M_{GSMP} expresia:

$$M_{GSMP} = 5445.0 \cdot \omega (5.0R + 8.0) \frac{4 \cdot \omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7 \cdot \omega^2)^2} =$$

$$5445 \cdot (275.4 + 0.4 \sin 0.17943t) (5 \cdot 798.55 + 8) \frac{4.0(275.4 + 0.4 \sin 0.17943t)^2 + 625 \cdot 798.55^2 + 2000 \cdot 798.55 + 1600}{(1250 \cdot 798.55^2 + 4000 \cdot 798.55 + 3200 + 7 \cdot (275.4 + 0.4 \sin 0.17943t)^2)^2}$$

având o variație în timp așa ca în figura 6.1.

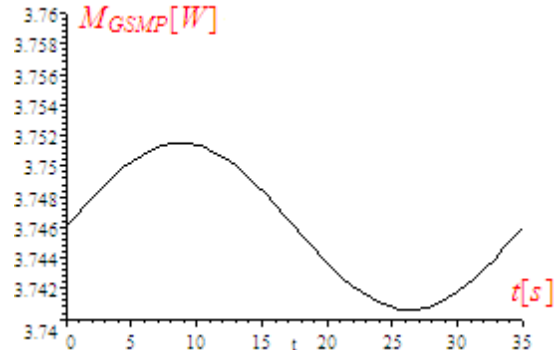


Fig.6.1.Variația în timp a lui M_{GSMP}

Aceiași formă, figura 6.2, o are și M_{TV} la $\omega = 275$ [rad / s] și $V(t) = (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)$, așa cum rezultă din:

$$M_{TV}(275, V(t)) = 23.584 \cdot \left(\left((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 275 - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 275 - 0.0525 \right)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3 / 275$$

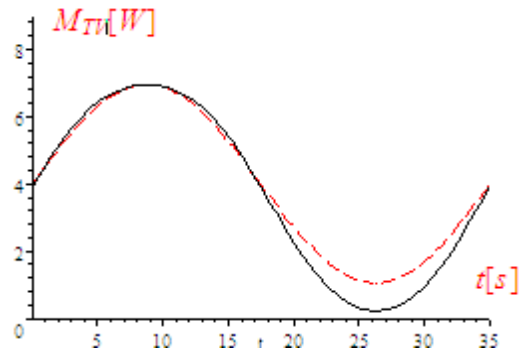


Fig.6.2.Variația în timp a lui M_{TV}

Prin urmare, pentru M_{TV} și M_{GSMP} se poate considera o variație în timp de forma:

$$M_{TV}(t) = a_T + b_T \sin 0.17943t$$

$$M_{GSMP}(t) = a_G + b_G \sin 0.17943t$$

Folosind ecuația 1 rezultă:

$$0 = \int_0^T (M_{TV} - M_{GSMP}) dt = \int_0^T (a_T + b_T \sin 0.17943t - a_G + b_G \sin 0.17943t) dt = (a_T - a_G)T$$

S-a obținut, în fond egalitatea valorilor medii ale momentelor:

$$a_T = a_G \quad \text{sau} \quad M_{TV-MEDIU} = M_{GSMP-MEDIU}$$

Valoarea momentului mediu dat de TV la VUM, ω , și $V(t) = (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)$ este :

$$M_{TV-MEDIU} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(23.584 \cdot \left(\frac{(8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot \left(\frac{(8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)}{\omega} \right)^3 dt$$

Valorile maxime ale energiilor electrice și mecanice la o viteză a vântului dată:

$$V(t) = (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)$$

depind de ω și R .

La $R = ct$ pe perioada $T = 35[s]$ energia electrică maximă se obține din anularea derivatei:

$$\frac{dW_e}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left(\int_0^T \left(27225 \cdot R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \right) dt \right) = 0$$

sau

$$\frac{d}{d\omega} \left(27225 \cdot R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \right) = 0$$

, cu soluția $\{\omega = 0\}$,

S-a obținut doar soluția banală: $\omega = 0$, deoarece puterea la generator,

$$P_{GSMP}(\omega) = 27225 \cdot 798.55\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625 \cdot 798.55^2 + 2000 \cdot 798.55 + 1600}{(1250 \cdot 798.55^2 + 4000 \cdot 798.55 + 3200 + 7\omega^2)^2}$$

nu are un maxim, așa cum se observă din figura 6.3:

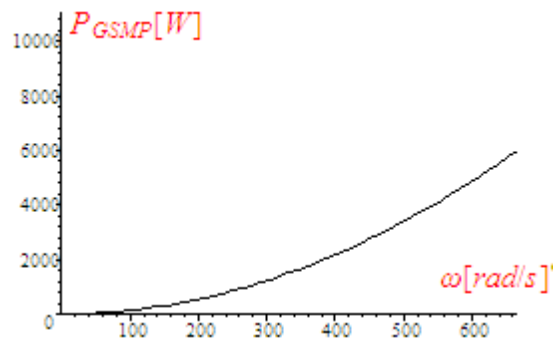


Fig.6.3.Variația puterii P_{GSMP} cu ω

Din acest motiv se face o maximizare a energiei mecanice: W_m , prin derivare

$$\frac{d}{d\omega} W_m = \frac{d}{d\omega} \int_0^T \left(\frac{23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2})}{e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3} \right) dt = 0$$

sau

$$\frac{d}{d\omega} \left(\frac{23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2})}{e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3} \right) = 0, \text{ cu soluția: } \{\omega = 31.818V\}.$$

Variația VUM în timp nu poate fi de forma:

$$\omega(t) = 31.818V(t)$$

deoarece inerția mecanică impune, prin momentul de inerție J , o cu totul altă variație în timp. Din acest motiv se abordează optimul energetic prin calcule succesive la diferite valori ale lui ω la $V(t) = (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)$.

Pentru valori ale lui ω în domeniul: $200 \div 350 [\text{rad} / \text{s}]$ se obțin rezultatele:

$$1) \omega = 200 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot (((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 200 - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2})}{e^{-98.06((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 200 - 0.0525)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3} \right) dt = 24978 [J]$$

$$2) \omega = 250 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot (((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 250 - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2})}{e^{-98.06((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 250 - 0.0525)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3} \right) dt = 34668 [J]$$

$$2a) \omega = 260 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot (((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 260 - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2})}{e^{-98.06((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 260 - 0.0525)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3} \right) dt = 35522 [J]$$

$$2b) \omega = 270 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot (((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 270 - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2})}{e^{-98.06((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 270 - 0.0525)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3} \right) dt = 35952 [J]$$

$$2b1) \omega = 272 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot (((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 272 - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2})}{e^{-98.06((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 272 - 0.0525)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3} \right) dt = 35986 [J]$$

$$2b2) \omega = 274 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot (((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 274 - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2})}{e^{-98.06((8.3 + 2.3 \sin 0.17943t) / 274 - 0.0525)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3} \right) dt = 36002 [J]$$

$$2c) \omega = 275 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{275 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{275 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3}{276} \right) dt = 36004[J]$$

$$2c1) \omega = 276 [rad / s]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{276 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{276 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3}{280} \right) dt = 36001[J]$$

$$2d) \omega = 280 [rad / s]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{280 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{280 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3}{300} \right) dt = 35945[J]$$

$$3) \omega = 300 [rad / s]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{300 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{300 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3}{350} \right) dt = 34602[J]$$

$$4) \omega = 350 [rad / s]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{350 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{350 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3}{275} \right) dt = 23667[J]$$

Din datele de mai sus a rezultat $\omega_{OPTIM1} = 275 [rad / s]$, iar cu relația $\omega = 31.818V$ și cu $V_{MEDIU} = 8.3 [m / s]$ se obține $\omega_{OPTIM2} = 31.818 \cdot 8.3 = 264.09 [rad / s]$ deci o valoare mai mică cu $\frac{275 - 264.09}{275} 100 = 3.9673\%$.

Verificarea 1

Rezultatele de mai sus au fost obținute la $\omega = ct$ pe perioada $T = 35 [s]$. În realitate $\omega \neq ct$ și are o variație de forma:

$$\omega(t) = a + b \sin 0.17943t$$

În cazul 2c)

$\omega = 275 [rad / s]$ și cu $\omega(t) = (275 + 0.4 \sin 0.17943t)$ rezultă

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{275 + 0.4 \sin 0.17943t} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 2.3 \sin 0.17943t}{275 + 0.4 \sin 0.17943t} - 0.0525 \right)} \cdot (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^3}{275} \right) dt = 36070[J]$$

față de rezultatul anterior $W_m = 36004 [J]$ Diferența este mică: 0.18298%.

Verificarea 2

La $V(t) = (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)$ se obțin rezultatele:

$$1) \omega = 200 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{200} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right)}{e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{200} - 0.0525 \right)}} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 18969 [J]$$

$$2) \omega = 250 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{250} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right)}{e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{250} - 0.0525 \right)}} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 30026 [J]$$

$$2a) \omega = 260. [\text{rad/s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{260} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right)}{e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{260} - 0.0525 \right)}} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 31754 [J]$$

$$2b) \omega = 270 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{270} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right)}{e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{270} - 0.0525 \right)}} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 33232 [J]$$

$$2b1) \omega = 272 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{272} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right)}{e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{272} - 0.0525 \right)}} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 33495 [J]$$

$$2b2) \omega = 274 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{274} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right)}{e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{274} - 0.0525 \right)}} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 33747 [J]$$

$$2c) \omega = 275 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{275} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right)}{e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{275} - 0.0525 \right)}} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 33868 [J]$$

$$2c1) \omega = 276 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{276} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right)}{e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{276} - 0.0525 \right)}} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 33987 [J]$$

$$2d) \omega = 280 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{280} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right)}{e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{280} - 0.0525 \right)}} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 34431 [J]$$

$$3) \omega = 300 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{300 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{300 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3}{\cdot} \right) dt = 35897[J]$$

$$3)1 \quad \omega = 305 [rad / s]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{305 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{305 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3}{\cdot} \right) dt = 36056[J]$$

$$3)2 \quad \omega = 310 [rad / s]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{310 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{310 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3}{\cdot} \right) dt = 36127[J]$$

$$3)a \quad \omega = 320 [rad / s]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{320 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{320 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3}{\cdot} \right) dt = 36006[J]$$

$$3)b \quad \omega = 330 [rad / s]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{330 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{330 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3}{\cdot} \right) dt = 35523[J]$$

$$4) \quad \omega = 350 [rad / s]$$

$$W_m = \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{350 - 0.0525} \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3 + 4.3 \sin 0.17943t}{350 - 0.0525} \right)} \cdot (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3}{\cdot} \right) dt = 33459[J]$$

Se obține $\omega_{OPTIM3} = 310 [rad / s]$, mult diferit față de $\omega_{OPTIM1} = 275 [rad / s]$ la aceeași viteză medie: $V_{MEDIU} = 8.3 [m / s]$.

La ω_{OPTIM1} viteza vântului avea amplitudinea $2.3 [m / s]$, iar la amplitudinea $4.3 [m / s]$ se obține ω_{OPTIM3} .

Comparativ cu VUM calculată cu $\omega = 31.818V$ la ω_{OPTIM3} eroarea este și mai mare : 14. 81%

În acest sens trebuie evaluată valoarea lui V din relația $\omega = 31.818V$ pentru a obține rezultate cu erori mai mici la determinarea lui ω_{OPTIM} .

Se propune, pentru determinarea lui ω_{OPTIM} o relație de forma:

$$\omega_{OPTIM} = k \cdot V_{ECH}$$

La $V = 8.3 [m / s] = ct$ din putere prin derivare se obține:

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{23.584 \cdot \left(\left(\frac{8.3}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{8.3}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot 8.3^3}{\cdot} \right) = 0$$

, cu soluția: $\{\omega = 264.09[\text{rad} / \text{s}]\}$, sau $264.09 = k \cdot 8.3$, cu soluția: $\{k = 31.818\}$.

Considerând pentru calculul lui V_{ECH} o relație de forma:

$$V_{ECH} = \sqrt[n]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (V)^n dt}$$

rezultă:

-la $n = 3$ și $V(t) = 8.3 + 4.3 \sin 0.17943t$ se obține:

$$V_{ECH} = \sqrt[3]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^3 dt =$$

$$9.2913[\text{m/s}], \omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot 9.2913 = 295.63[\text{rad/s}]$$

-la $n = 4$ și $V(t) = 8.3 + 4.3 \sin 0.17943t$ se obține:

$$V_{ECH} = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^4 dt =$$

$$9.6571[\text{m/s}], \omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot 9.6571 = 307.27[\text{rad/s}]$$

-la $n = 5$ și $V(t) = 8.3 + 4.3 \sin 0.17943t$ se obține:

$$V_{ECH} = \sqrt[5]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^5 dt =$$

$$9.9516[\text{m/s}], \omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot 9.9516 = 316.64[\text{rad/s}]$$

-la $n = 4.5$ și $V(t) = 8.3 + 4.3 \sin 0.17943t$ se obține:

$$V_{ECH} = \sqrt[4.5]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^{4.5} dt =$$

$$9.8122[\text{m/s}], \omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot 9.8122 = 312.2[\text{rad/s}]$$

-la $n = 4.4$ și $V(t) = 8.3 + 4.3 \sin 0.17943t$ se obține:

$$V_{ECH} = \sqrt[4.4]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^{4.4} dt =$$

$$9.7825[\text{m/s}], \omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot 9.7825 = 311.26[\text{rad/s}]$$

-la $n = 4.3$ și $V(t) = 8.3 + 4.3 \sin 0.17943t$ se obține:

$$V_{ECH} = \sqrt[4.3]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^{4.3} dt =$$

$$9.7522[\text{m/s}], \omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot 9.7522 = 310.3[\text{rad/s}]$$

-la $n = 4.27$ și $V(t) = 8.3 + 4.3 \sin 0.17943t$ se obține:

$$V_{ECH} = \sqrt[4.27]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (8.3 + 4.3 \sin 0.17943t)^{4.27} dt =$$

$$9.7429[\text{m/s}], \omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot 9.7429 = 310. [\text{rad/s}]$$

Pentru $n = 4.27$ se obține $\omega_{OPTIM3} = 31.818 \cdot 9.7429 = 310. [\text{rad/s}]$, iar la

$V(t) = 8.3 + 2.3 \sin 0.17943t$ rezultă:

$$V_{ECH} = \sqrt[4.27]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (8.3 + 2.3 \sin 0.17943t)^{4.27} dt = 8.78[\text{m/s}],$$

$$\omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot 8.78 = 279.36[\text{m/s}],$$

În concluzie pentru ω_{OPTIM} se poate folosi o relație de forma:

$$\omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot \sqrt[4.27]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (V(t))^{4.27} dt}$$

6.4. Algoritm de conducere optimal

Algoritm de conducere al sistemului **TV+GSMP**, în scopul obținerii unei energii captate maxime, presupune determinarea cât mai exactă a lui ω_{OPTIM} .

Viteza unghiulară mecanică de referință ω_{OPTIM} se poate determina din viteza vântului pe baza relației

$$\omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot V_{ECH} = 31.818 \cdot \sqrt[4.27]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (V(t))^{4.27} dt}$$

asa cum s-a demonstrat anterior.

Cu ω_{OPTIM} corect determinată, sarcina la **GSMP** se stabilește prin folosirea unui regulator cu mărime de intrare $\Delta\omega = \omega - \omega_{OPTIM}$ și mărime de ieșire unghiul de comandă la tiristoarele redresorului comandat ce preia puterea de la **GSMP**, figura 6.4.

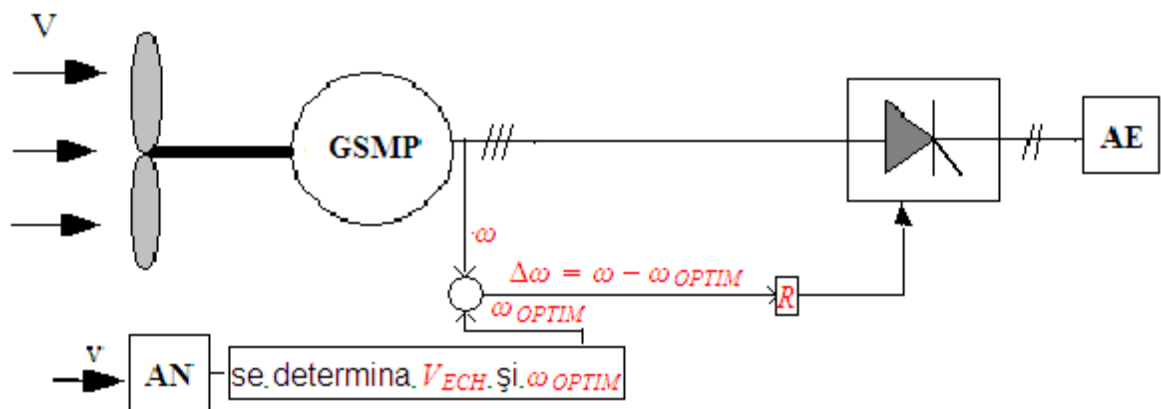


Fig.6.4. Conducerea sistemului TV+GSMP

Conoscând **VUM** pentru care puterea dată de **TV** este maximă, prin comanda convertoarelor de putere interpusse între **GSMP** și rețea, se asigură captarea unei energii maxime

În concluzie, algoritmul de conducere este următorul:

- 1) se măsoară viteza vântului și se determină V_{ECH}
- 2) se determină ω_{OPTIM} din $\omega_{OPTIM} = 31.818 \cdot V_{ECH}$
- 3) se menține, prin sarcina la **GSMP**, **VUM** în jurul lui ω_{OPTIM}

6.5 Concluzii

În cadrul acestui capitol s-a determinat dependența lui ω_{OPTIM} de viteza vântului. Prin măsurarea vitezei vântului se determină V_{ECH} și ω_{OPTIM} și astfel se realizează o conducere optimă a sistemului TV+GSMP. Se extrage maximum de energie mecanică la viteze ale vântului variabile în timp. Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- elaborarea unei metodologii destinate determinării turației optime;
- determinarea valorilor maxime ale energiilor electrice și mecanice la o viteză a vântului dată;
- determinarea vitezei unghiulare mecanice optime din ecuația mișcării și a energiei;
- elaborarea unei metodologii destinate conducerii optime având în vedere valoarea turației optime;
- realizarea unei aplicații software de calcul a energiei mecanice captate.

7. SISTEM EOLIAN CU STOCARE ÎN ENERGIE HIDRAULICĂ

Se dă în capitolul de față, un mod de utilizare a energiei eoliene prin stocare în energie hidraulică. În acest fel nu se mai pune problema fluctuațiilor de putere ce apar la viteze ale vântului variabile în timp, fluctuații ce perturbă funcționarea sistemului electroenergetic național,(SEN),mai ales la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp ,cum este în cazul României.Sistemul este compus dintr-o turbină de vânt ,(TV),cuplată cu un generator sincron cu magneți permanenți,(GSMP),ce debitează putere electrică pe un motor asincron/sincron ,(M), cuplat cu o pompă de apă ,(PA).

Se pune problema determinării turației, numită de referință, notată cu n_{ref} ,astfel încat să se realizeze o captare maximă a energiei eoliene, pe un interval de timp mare(ordinul zilelor).Urmărirea maximumului energetic,la viteze ale vântului variabile în timp, conduce la valori de puteri variabile în timp,ceea ce pentru sistemul energetic este un element destabilizator. Din acest motiv se impune ca fluctuațiile de putere să fie înmagazinate într-un sistem de stocare a energiei. Acesta poate fi de natură hidro cu două rezervoare de apa la puteri mari, sau o baterie de acumuloare electrice la puteri medii și mici.

În prezenta lucrare se determină comportarea sistemului (TV+GSMP) considerând turația/viteza unghiulară mecanică, n_{ref} / ω_{ref} ,ca și mărime de referință într-un sistem de conducere.Se realizează, astfel, o conducere optimă a sistemului eolian , astfel încât să se extragă maximum de energie mecanică, la viteze ale vântului variabile în timp.Structura de conducere se bazează pe măsurarea vitezei momentană a vântului și folosește un model original pentru turbina de vânt, (TV).

7.1. Considerații preliminare

La viteze ale vântului variabile semnificativ în timp valorile puterii captate de TV sunt variabile în timp și acest fapt poate crea instabilități în SEN ,dacă ponderea centralelor electrice eoliene devine importantă : peste 10% din puterea SEN [2,7].Eliminarea acestor dezavataje importante ce decurg din folosirea energiei eoliene se poate face prin stocarea energiei eoliene în acumulări hidro[1,18,19].

Datorită vitezelor vântului variabile în timp ,la sistemele electroenergetice eoliene de mare putere ce au momente de inerție mari, turația turbinei de vânt(TV) și a generatorului sincron cu magneți permanenți(GSMP), nu pot fi modificate în timp util,astfel încât să se asigure o funcționare a turbinei în punctele de putere maximă[11,13,14].

În sistemul de reglaj se preconizează obținerea unei energii eoliene maxime la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp[8]. Pentru acesta se măsoară viteza vântului și folosind un model matematic original pentru turbina de vânt(TV) se calculează valoarea turației/vitezei unghiulare mecanice pentru care energia captată este maximă

Aceasta s-a denumit valoare de referință și se notează cu $n_{ref} (\omega_{ref})$. Turația/viteza unghiulară mecanică ω_{ref} ,de referință are o importanță deosebită deoarece permite conducerea optimă a sistemului TV+GSMP și astfel se extrage maximum de energie mecanică, la viteze ale vântului variabile în timp.

7.2. Ecuațiile sistemului turbină,generator și motor

Pentru a analiza funcționarea sistemului (TV+GSMP), la viteze ale vântului variabile în timp se folosesc modele matematice originale date în continuare:

Folosind rezultatele din [3,15] pentru caracteristica mecanică a TV se folosește un model matematic de forma

$$M_{TV} = (-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot V^{0.6} \cdot \omega + 2.25V^{1.8}) \frac{20}{314}$$

bazat pe caracteristicile mecanice experimentale,obținute în zona stabilă și date în figura

7.1, pentru 3 viteze ale vântului: $V = 9, 12, 15[m/s]$

$$M_{TV} = (-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot 15^{0.6} \cdot \omega + 2.25 \cdot 15^{1.8}) \frac{20}{314},$$

$$(-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot 12^{0.6} \cdot \omega + 2.25 \cdot 12^{1.8}) \frac{20}{314}, (-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot 9^{0.6} \cdot \omega + 2.25 \cdot 9^{1.8}) \frac{20}{314}$$

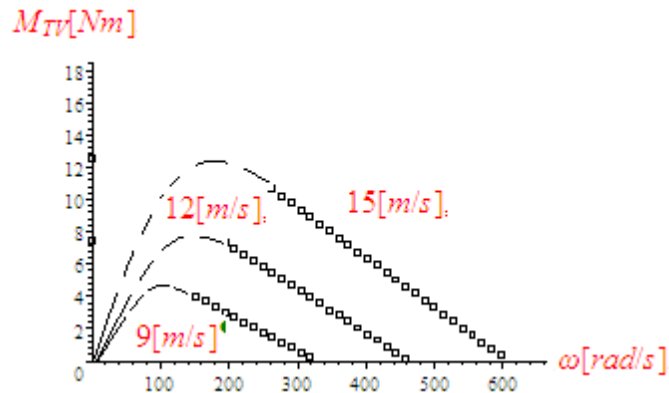


Fig.7.1.Caracteristicile mecanice experimentale

unde: V - viteza vântului ; ω - viteza unghiulară mecanică la GSMP

Valoarea turației/vitezei unghiulare mecanice pentru care energia captată este maximă s-

a denumit valoare de referință și se notează cu n_{ref} (ω_{ref}).

Deducerea lui ω_{ref} se poate face prin maximizarea energiei mecanice W_m pe o perioadă de timp T

Valoarea lui ω_{ref} , se determină din maximizarea energiei mecanice W_m pe o perioadă de timp T dependentă din variația vitezei vântului, obținându-se:

$$W_m = \omega_{ref} \int_0^T M_{TV} dt = \omega_{ref} \int_0^T \left(-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (V)^{0.6} \cdot \omega_{ref} + 2.25 \cdot (V)^{1.8} \right) \frac{20}{314} dt =$$

$$= -\omega_{ref}^2 \int_0^T 9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (V)^{0.6} \frac{20}{314} dt + \omega_{ref} \int_0^T 2.25 \cdot (V)^{1.8} \frac{20}{314} dt$$

deoarece s-a considerat că $\omega_{ref} = ct$ pe intervalul de timp $t = 0 \div T$.

La $\frac{dW_m}{d\omega_{ref}} = 0$ rezultă:

$$\omega_{ref} = \frac{\int_0^T (2.25 \cdot (V)^{1.8}) \frac{20}{314} dt}{2 \cdot \int_0^T (9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (V)^{0.6}) \frac{20}{314} dt} = 11.775 \frac{\int_0^T (V)^{1.8} dt}{\int_0^T (V)^{0.6} dt}$$

7.2.1 Modelul matematic al generatorului GSMP și motorului sincron cu magneți permanenți MS

Mașina sincronă cu magneți permanenți este caracterizată, în modelul ortogonal, prin ecuațiile[5]:

$$\begin{cases} -U\sqrt{3} \sin \theta = R_1 I_d - \omega L_q I_q \\ U\sqrt{3} \cos \theta = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega \Psi_{MP} \\ M_s = p_1 (L_d - L_q) I_d I_q + I_q \Psi_{MP} \end{cases}$$

unde

R_1 – rezistența înfășurării statorice;

L_d – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa **d** ;

L_q – inductanța proprie a înfășurării rotorice din axa **q**;

p_1 – numărul perechilor de poli.

Ψ_{MP} - fluxul magnetului permanent

7.3. Modelul matematic al motorului asincron (MA)

La MA ecuațiile modelului ortogonal sunt de forma[6]:

$$\begin{cases} U_d = R_1 I_d - \omega_1 L_1 I_q - \omega_1 M I_{qr} \\ U_q = R_1 I_q + \omega_1 L_1 I_d + \omega_1 M I_{dr} \\ 0 = -M (\omega_1 - \Omega) I_q + R_2 I_{dr} - L_2 (\omega_1 - \omega) I_{qr} \\ 0 = M (\omega_1 - \Omega) I_d + L_2 (\omega_1 - \omega) I_{dr} + R_2 I_{qr} \\ M_{MA} = p_1 M (I_q I_{dr} - I_d I_{qr}) \end{cases}$$

unde

R_1 – rezistența înfășurării statorice;

R_2 – rezistența înfășurării rotorice;

L_1 – inductanța proprie a înfășurării statorice din axa d și q;

L_2 – inductanța proprie a înfășurării rotorice din axa d și q;

M – inductanța mutuală dintre înfășurarea statorică și înfășurarea rotorică;

p_1 – numărul perechilor de poli.

7.4. Ecuațiile sistemului GSMP+MA+PA

Aționarea pompei se face cu un MOTOR ASINCRON-MA

Puterea mecanică primită de GSMP de la TV, P_T , este transformată în putere electrică ,

P_G și transmisă MA.

7.4.1. Studiu de caz la $V = 15[m/s]$

Prin măsurarea vitezei vântului: $V = 15[m/s]$, se poate determina turajia/viteza

unghiulară mecanică de referință ω_{ref}

$$\omega_{ref} = 11.775 \frac{\int_0^T (V)^{1.8} dt}{\int_0^T (V)^{0.6} dt} = 11.775 \frac{(15)^{1.8}}{(15)^{0.6}} = 303.58 [rad/s]$$

și astfel se cunosc toate celălalte marimi funcționale importante din sistem: curenți, tensiuni, puteri.

La această valoare pentru ω_{ref} cuplul la GSMP este:

$$M_G = M_{TV} = \left(-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (15)^{0.6} \cdot 303.58 + 2.25 \cdot (15)^{1.8} \right) \frac{20}{314} = 9.3803 [Nm]$$

Ecuatia de legătură dintre MA și PA este [17]:

$$M_A \cdot \Omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = 9800 \cdot Q \cdot 11$$

la o diferență de nivel: $H = 11[m]$

Încărcarea GSMP, la aceste valori, se face prin impunerea puterii la arborele MA:

$P_A = M_A \cdot \Omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$, rezultând debitul Q , a cărui valoare $Q_{INITIAL} = 1.5.683 [l/s]$ se determină din sistemul de ecuații al ansamblului GSMP+MA:

$$\left\{ \begin{array}{l} -(1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q) = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q - \text{GS} \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega \Psi_M - \text{GS} \\ M_G = -0.01I_d I_q + \Psi_M I_q - \text{GS} \\ U_d = -RI_d \\ U_q = -RI_q \\ U_d^2 + U_q^2 = U^2 \\ I_d^2 + I_q^2 = I_1^2 + I_2^2 \\ U = 1.6 \cdot I_1 - \omega \cdot 0.19 \cdot I_2 - \omega \cdot 0.185 \cdot I_4 - \text{MA} \\ 0 = 1.6 \cdot I_2 + \omega \cdot 0.19 \cdot I_1 + \omega \cdot 0.185 \cdot I_3 - \text{MA} \\ 0 = -(\omega - \Omega) \cdot 0.185 \cdot I_2 + 1.6 \cdot I_3 - (\omega - \Omega) \cdot 0.19 \cdot I_4 - \text{MA} \\ 0 = (\omega - \Omega) \cdot 0.185 \cdot I_1 + (\omega - \Omega) \cdot 0.19 \cdot I_3 + 1.6 \cdot I_4 - \text{MA} \\ M_A = 0.185 \cdot (I_2 \cdot I_3 - I_1 \cdot I_4) - \text{MA} \\ M_A \cdot \Omega = 9800 \cdot Q \cdot 11 - \text{MA} + \text{PA} \\ P_P = M_A \cdot \Omega \\ P_G = U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q \\ P_T = -M_G \cdot \omega \\ \omega = 303.58 \\ \Psi_M = 1.3 \\ M_G = -9.3803 \end{array} \right.$$

$$\text{GSMP+MA : } \left\{ \begin{array}{l} \Omega = 295.68, \\ U_d = 164.17, \\ I_1 = 5.3375, \\ U_q = 302.61, \\ R = 43.166, \\ P_G = -2745.9, \\ P_P = 1690.6, \\ I_q = -7.0105, \\ I_3 = -5.3129, \\ I_4 = 0.10873, \\ U = 344.28, \\ I_d = -3.8034, \\ M_A = 5.7178, \\ P_T = 2847.7, \\ I_2 = -5.9266, \\ \Psi_M = 1.3, \\ Q = 1.5683 \times 10^{-2}, \\ M_G = -9.3803, \\ \omega = 303.58 \end{array} \right.$$

7.4.2. Modelul simplificat

Modelele matematice clasice pentru generator și motorul ce acționează pompa de apă sunt deosebit de dificile din punct de vedere al rezolvării ecuațiilor algebrice, de regim staționar și a ecuațiilor diferențiale, de regim tranzitoriu și din acest motiv se propune un model simplificat similar mașinii de curent continuu. Generatorul și motorul electric sunt identice.

Generatorul electric cu VUM ω , este caracterizat prin ecuațiile :

$$U = k_U \cdot \omega - \text{ecuația tensiunii}$$

$$M_G = k_M \cdot I - \text{ecuația momentului}$$

Motorul electric cu VUM Ω , are ecuațiile

$$U = R \cdot I + k_U \cdot \Omega - \text{ecuația tensiunii}$$

$$M_A = k_M \cdot I - \text{ecuația momentului}$$

Prin eliminarea lui I se obțin

$$M_A = M_G = k_m \cdot (\omega - \Omega) - \text{ecuațiile momentelor}$$

La pompa, pentru o diferență de nivel $H=11$ [m] și un debit Q , puterea hidraulică, P_p , este [16]:

$$P_p = 9800 \cdot Q \cdot 11.$$

și egalind-o cu puterea dată de motorul electric rezultă

$$M_A \cdot \Omega = 9800 \cdot Q \cdot 11.$$

În punctul de funcționare optim la turbina și la $V = 15$ [m/s] se obține:

$$\omega_{ref} = 11.775 \frac{\int_0^T (V)^{1.8} dt}{\int_0^T (V)^{0.6} dt} = 11.775 \frac{(15)^{1.8}}{(15)^{0.6}} = 303.58 [\text{rad} / \text{s}]$$

$$M_G = M_{TV} = \left(-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (15)^{0.6} \cdot 303.58 + 2.25 \cdot (15)^{1.8} \right) \frac{20}{314} = 9.3803 [\text{Nm}]$$

Sistemul de ecuații complet al ansamblului generator+motor,devine:

$$\begin{cases} M_A \cdot \Omega = 9800 \cdot Q \cdot 11 \text{ -puterea la pompă} \\ M_A = 1.1874(\omega - \Omega) \text{ -momentul la motor} \\ \omega = \omega_{ref} \\ M_G = M_{TV} \text{ -momentul la turbină} \end{cases}$$

sau:

$$\begin{cases} M_A \cdot \Omega = 9800 \cdot Q \cdot 11 \\ M_A = 1.1874(\omega - \Omega) \\ \omega = 303.58 \\ M_A = 9.3803 \end{cases} \text{ ,cu solutia: } \begin{cases} \omega = 303.58, \\ M_A = 9.3803, \\ \Omega = 295.68, \\ Q = 2.5729 \times 10^{-2} \end{cases}$$

Se obține un debit de valoare $Q = 25.729 [l / s]$

7.4.3. Dependența debitului de viteza vântului

Pentru mai multe viteze ale vântului în domeniul 15-25 [m/s] se obțin valorile:

$$1) V = 17 [m / s]$$

$$\begin{aligned} \text{viteza unghiulară mecanică de referință} \quad \omega_{ref} &= 11.775(17)^{1.2} = 352.78 [\text{rad/s}] \\ \text{momentul la TV} \\ M_{TV} &= \left(-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (17)^{0.6} \cdot 303.58 + 2.25 \cdot (17)^{1.8} \right) \frac{20}{314} = 13.389 [\text{Nm}] \end{aligned}$$

$$\text{debitul de apă} \quad Q = 4.2416 \times 10^{-2} [m^3 / s]$$

$$2) V = 19 [m / s]$$

$$\begin{aligned} \text{viteza unghiulară mecanică de referință} \quad \omega_{ref} &= 11.775 \frac{(19)^{1.8}}{(19)^{0.6}} = 403.15 [\text{rad/s}] \\ \text{momentul} & \text{ la TV} \\ M_{TV} &= \left(-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (19)^{0.6} \cdot 403.15 + 2.25 \cdot (19)^{1.8} \right) \frac{20}{314} = 14.355 [\text{Nm}] \end{aligned}$$

$$\text{debitul de apă} \quad Q = 5.2075 \times 10^{-2} [m^3 / s]$$

$$3) V = 21 [m / s]$$

$$\begin{aligned} \text{viteza unghiulară mecanică de referință} \quad \omega_{ref} &= 11.775 \frac{(21)^{1.8}}{(21)^{0.6}} = 454.59 [\text{rad/s}] \\ \text{momentul} & \text{ la TV} \\ M_{TV} &= \left(-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (21)^{0.6} \cdot 454.59 + 2.25 \cdot (21)^{1.8} \right) \frac{20}{314} = 17.189 [\text{Nm}] \end{aligned}$$

$$\text{debitul de apă} \quad Q = 7.0177 \times 10^{-2} [m^3 / s]$$

$$4) V = 23 [m / s]$$

$$\text{viteza unghiulară mecanică de referință} \quad \omega_{ref} = 11.775 \frac{(23)^{1.8}}{(23)^{0.6}} = 507.03 [\text{rad/s}]$$

momentul la TV

$$M_{TV} = \left(-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (23)^{0.6} \cdot 507.03 + 2.25 \cdot (23)^{1.8} \right) \frac{20}{314} = 20.247 [Nm]$$

$$Q = 9.2028 \times 10^{-2} [m^3 / s]$$

$$5) V = 25 [m / s]$$

viteza unghiulară mecanică de referință $\omega_{ref} = 11.775 \frac{(25)^{1.8}}{(25)^{0.6}} = 560.39 [rad/s]$ TV

momentul la

$$M_{TV} = \left(-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (25)^{0.6} \cdot 560.39 + 2.25 \cdot (25)^{1.8} \right) \frac{20}{314} = 23.526 [Nm]$$

$$Q = 0.11797 [m^3 / s]$$

La o dependență a debitului de viteza vântului de forma:

$$Q = k \cdot V^3$$

se obține:

$$Q = 7.5501 \times 10^{-6} \cdot V^3$$

Această dependență a debitului de viteza vântului este dată în figura 7.2 și se observă că este similară dependenței puterii turbinei de viteza vântului.

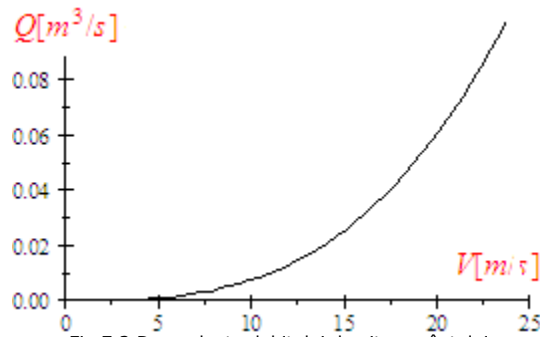


Fig.7.2. Dependența debitului de viteza vântului

7.5. Ecuațiile sistemului GSMP+MS+PA

Aționarea pompei se face cu un **MOTOR SINCRON-MS**

Viteza unghiulară mecanică de referință ω_{ref} , la viteza vântului: $V = 15 [m / s]$, are valoarea

$$\omega_{ref} = 11.775 \frac{\int_0^T (V)^{1.8} dt}{\int_0^T (V)^{0.6} dt} = 11.775 \frac{(15)^{1.8}}{(15)^{0.6}} = 303.58 [rad / s]$$

La aceasta valoare pentru ω_{ref} cuplul la GSMP este:

$$M_G = M_{TV} = \left(-9.5541 \cdot 10^{-2} \cdot (15)^{0.6} \cdot 303.58 + 2.25 \cdot (15)^{1.8} \right) \frac{20}{314} = 9.3803 [Nm]$$

Ecuația de legătură dintre MS și PA este [4]:

$$M_S \cdot \omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = 9800 \cdot Q \cdot 11$$

la o diferență de nivel: $H = 11 [m]$

Încărcarea GSMP, la aceste valori, se face prin impunerea puterii la arborele MS:

$P_S = M_S \cdot \Omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$, rezultând debitul Q , a cărui valoare $Q = 2.6416 [l / s]$ se determină din sistemul de ecuații al ansamblului: GSMP+MS :

$$\left. \begin{aligned}
 -RI_d &= 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\
 -RI_q &= 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\
 M_G &= -0.01I_dI_q + \Psi_M I_q \\
 M_G &= -9.3803 \\
 U &= R \cdot \sqrt{(I_d^2 + I_q^2)} \\
 I_d^2 + I_q^2 &= I_1^2 + I_2^2 \\
 U^2 &= (1.6I_1 - \omega \cdot 0.08I_2)^2 + (1.6I_2 + \omega \cdot 0.07I_1 + \omega\Psi_M)^2 \\
 M_S &= 0.01I_1I_2 - \Psi_M I_2 \\
 M_S \cdot \omega &= 9800 \cdot Q \cdot 11. \\
 \omega &= 303.58 \\
 \Psi_M &= 1.3
 \end{aligned} \right\} \text{ ,cu soluția:}$$

$$\left. \begin{aligned}
 Q &= 2.6416 \times 10^{-2}, \\
 M_S &= 9.3803, \\
 I_1 &= -15.509, \\
 I_2 &= -6.4465, \\
 M_G &= -9.3803, \\
 R &= 8.4950, \\
 U &= 142.68, \\
 I_d &= -15.509, \\
 I_q &= -6.4465, \\
 \omega &= 303.58, \\
 \Psi_M &= 1.3
 \end{aligned} \right\}$$

Fata de cazul sistemului cu motor asincron, la care debitul Q ,avea valoare $Q = 1.5683 [l/s]$,în acest caz valoarea debitului este cu 40.631% mai mare.

7.6. CONDUCEREA SISTEMULUI EOLIAN CU STOCARE HIDRO

La o viteză $V(t)$ variabilă în timp, figura 3, de formă sinusoidală de perioadă $T = 35$ [s], se obține

$$V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}$$

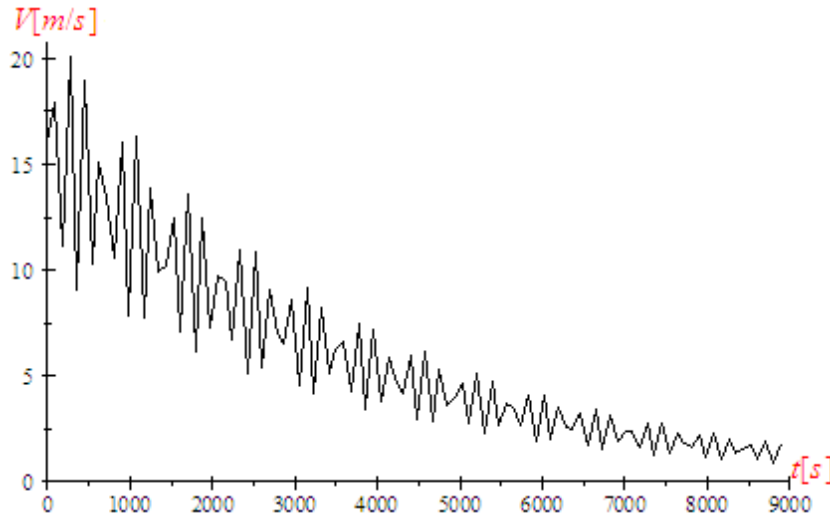


Fig.7.3. Variația vitezei vântului în timp

Sistemul TV+GSMP+M+PA are două ecuații diferențiale mecanice fundamentale:

$$J_1 \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP} \quad \text{- ecuația mișcării pentru subsistemul TV+GSMP}$$

$$J_2 \frac{d\omega}{dt} = M_M - M_{POMPA} \quad \text{- ecuația mișcării pentru subsistemul M+PA}$$

unde: J_1 - momentul de inerție echivalent pentru TV+GSMP, J_2 - momentul de inerție echivalent pentru M+PA

Încărcarea optimă a GSMP se face eșantionat la intervale de timp de 100 [s] și în

continuare se dau rezultatele simulărilor, obținându-se o funcționare în zona ω_{ref} .

În aceste condiții debitul la pompă se modifică în timp astfel încât sistemul să funcționeze optim, captând o energie maximă.

7.6.1. Acționarea pompei se face cu un MOTOR ASINCRON-MA

Prin măsurarea vitezei vântului și a VUM de la generator, la momentele de timp: $t = 100, 200 \dots 500 [s]$ se obțin valorile lui ω_{ref} , figura 7.4, valori de referință ale regulatorului de debit.

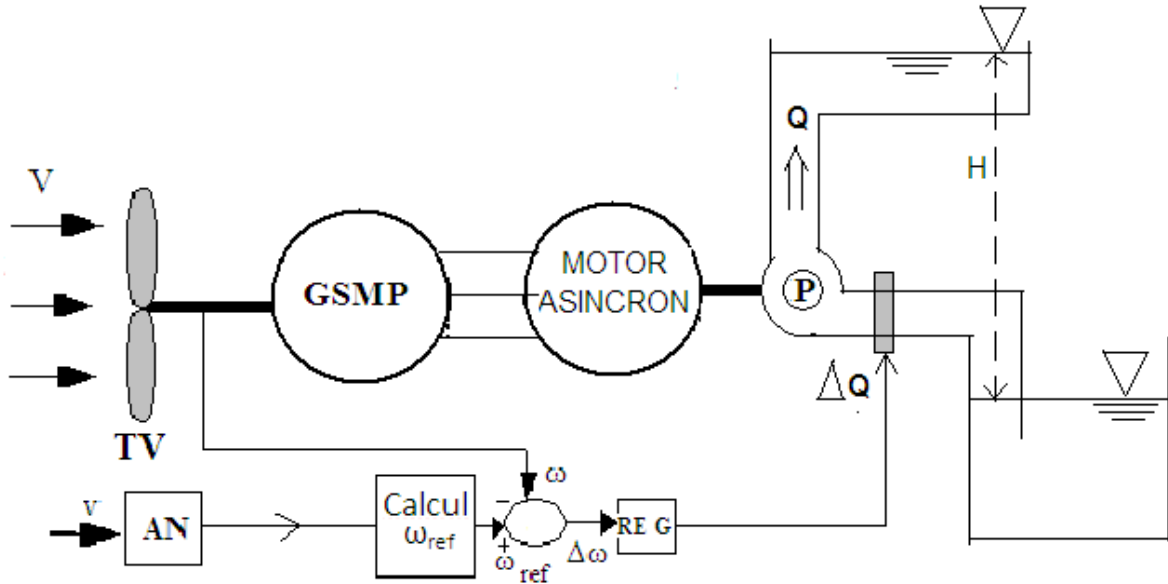


Fig.7.4. Conducerea sistemului cu MA

1) la $t = 100 [s]$

$$\text{rezultă } \omega_{ref} = 11.775 \frac{\int_0^{100} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8} dt}{\int_0^{100} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{0.6} dt} = 339. [rad / s]$$

Cuplul $M_{TV-MEDIU}$ este:

$$M_{TV-MEDIU} = \frac{1}{100} \int_0^{100} 0.14331 \left(\frac{-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{0.6} \cdot 339. +}{((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8}} \right) dt$$

$$= 10.647 [Nm]$$

$$\begin{cases} M_A \cdot \Omega = 9800 \cdot Q \cdot 11. - \text{puterea la pompă} \\ M_A = 1.1874(\omega - \Omega) - \text{momentul la motor} \\ \omega = 339. \\ M_A = 10.647 \end{cases} \quad \text{debitul } Q = 3.2596 \times 10^{-2} [m^3 / s], \text{ VUM la}$$

pompa $\Omega = 330.03 [rad / s]$

$$\begin{cases} M_A \cdot \Omega = 9800 \cdot Q \cdot 11. \\ M_A = 1.1874(\omega - \Omega) \\ \omega = 339. \\ M_A = 10.647 \end{cases}$$

Soluția :

$$\{\omega = 339.0, M_A = 10.647, \Omega = 330.03, Q = 3.2596 \times 10^{-2}\}$$

Comportarea în timp a sistemului se obține prin rezolvarea ecuațiilor mișcării de la generator și de la motor.

Se impune VUM optimă: ω_{OPTIM} , ca și mărime de referință în sistemul de reglare:

$$\omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$$

Prin reglarea debitului la pompa de apa se aduce VUM la valoarea optimă. Se dă în continuare o aplicație cu un regulator de tip PI de ecuație [12]:

$$\Delta Q = K_1 \Delta \omega + K_2 \int \Delta \omega dt = K_1 (\omega - \omega_{ref}) + K_2 \int (\omega - \omega_{ref}) dt$$

sau

$$\frac{dQ}{dt} = K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2 (\omega - \omega_{ref})$$

ce are la intrare eroarea $\Delta \omega$, iar la ieșire valoarea debitului la pompa de apă, figura4. Marimea de referință a regulatorului este ω_{ref} . Acordarea regulatorului este o problemă mai dificilă deoarece sistemul este neliniar și acordarea se poate face doar prin simulări succesive cu ajutorul ecuațiilor mișcării:

$$\begin{cases} 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_G & \text{-ecuația mișcării la TV+G} \\ 20 \cdot \frac{d\Omega}{dt} = M_M - M_P & \text{-ecuația mișcării la M+P} \\ \frac{dQ}{dt} = K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2 (\omega - \omega_{ref}) & \text{-ecuația regulatorului} \end{cases}$$

Momentul la pompa se poate calcula din putere astfel [9]:

$$M_P = 9800 \cdot Q \cdot 11 / \Omega$$

La:

$$M_{TV} = 0.14331 \left(\frac{-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{0.6} \cdot \omega + ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8}}{((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8}} \right)$$

și cu

$$M_M = M_G = 1.1874(\omega - \Omega)$$

rezultă ecuațiile mișcării și a regulatorului.

Ecuațiile mișcării și a regulatorului $-PI-$ formează sistemul de ecuații diferențiale ce modelează comportarea ansamblului (TV+G+M+P).

$$\begin{cases} 40 \frac{d\omega}{dt} = 0.14331 \left(\frac{-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{0.6} \cdot \omega + ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8}}{((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8}} \right) - 1.1874(\omega - \Omega) \\ 20 \frac{d\Omega}{dt} = 1.1874(\omega - \Omega) - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \Omega \\ \frac{dQ}{dt} = K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2 (\omega - \omega_{ref}) \\ \omega(0) \text{-VUM inițială la generator} \\ \Omega(0) \text{-VUM inițială la motor} \end{cases}$$

2) la $t = 200 [s]$

$$\omega_{ref} = 11.775 \frac{\int_{100}^{200} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8} dt}{\int_{100}^{200} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{0.6} dt} = 323.34 [rad / s]$$

Cuplul $M_{TV-MEDIU}$ este:

$$M_{TV-MEDIU} = \frac{1}{100} \int_{100}^{200} 0.14331 \left(\frac{-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^{0.6} \cdot 323.34 +}{\left((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} \right)^{1.8}} \right) dt$$

$$= 9.9337 [Nm]$$

$$\begin{cases} M_A \cdot \Omega = 9800 \cdot Q \cdot 11 \\ M_A = 1.1874(\omega - \Omega) \\ \omega = 323.34 \\ M_A = 9.9337 \end{cases}$$

Soluția:

$$\{M_A = 9.9337, \Omega = 314.97, Q = 2.9025 \times 10^{-2}, \omega = 323.34\}$$

Constanta de proporționalitate, K_1 , a regulatorului se deduce având în vedere valorile debitului la momentele de timp: $t=100$ [s] și $t=200$ [s]:

$$\Delta Q = K_1 \cdot \Delta \omega, \text{ sau } (3.2596 - 2.9025) \cdot 10^{-2} = K_1 \cdot (330.03 - 323.34), \text{ cu soluția:}$$

$$\{K_1 = 5.3378 \times 10^{-4}\}$$

Se analizează acordarea regulatorului prin alegerea mai multor valori pentru constanta K_2 a regulatorului

$$a) \frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} - 0.000005(\omega - 323.34)$$

$$\text{Condițiile inițiale se obțin la } t=200[s], \{[Q = 2.9025 \times 10^{-2}, \Omega = 330.03, \omega = 339.]\}$$

și condițiile finale la $t=300[s]$ $\{[Q = 3.6809 \times 10^{-2}, \Omega = 312.65, \omega = 323.34]\}$, din sistemul de mai jos:

$$\begin{cases} 0 = 0.14331 \left(\frac{-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943 \cdot (300))) e^{-(300)/3600} \right)^{0.6} \cdot \omega +}{\left((16 - 6 \sin(0.17943 \cdot (300))) e^{-(300)/3600} \right)^{1.8}} \right) \\ -1.1874(\omega - \Omega) \\ 0 = 1.1874(\omega - \Omega) - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \Omega \\ \omega = 323.34 \end{cases}$$

În aceste condiții ecuațiile mișcării și ale regulatorului pentru acest caz, sunt:

$$\begin{cases} 40 \frac{d\omega}{dt} = 0.14331 \left(\frac{-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+100))) e^{-(t+100)/3600} \right)^{0.6} \cdot \omega +}{\left((16 - 6 \sin(0.17943(t+100))) e^{-(t+100)/3600} \right)^{1.8}} \right) \\ -1.1874(\omega - \Omega) \\ 20 \frac{d\Omega}{dt} = 1.1874(\omega - \Omega) - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \Omega \\ \frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} - 0.000005(\omega - 323.34) \\ \omega(0) = 339 \\ \Omega(0) = 330.03 \\ Q(0) = 2.9025 \times 10^{-2} \end{cases}$$

Se obțin variațiile în timp ale VUM ω și Ω și ale debitului Q .

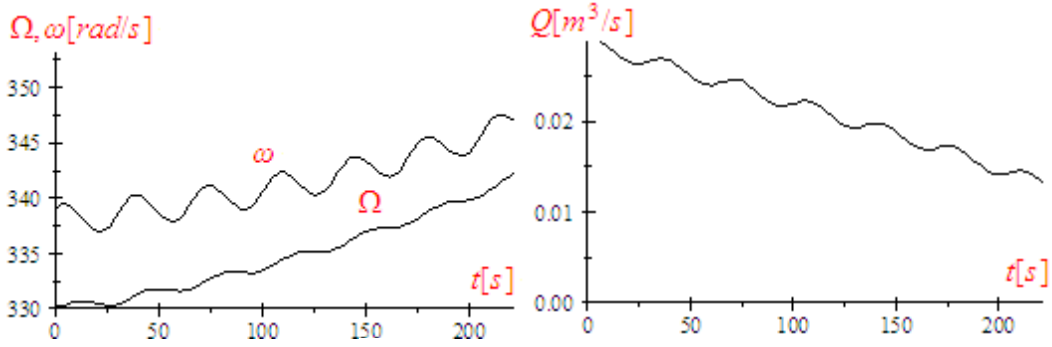


Fig.7.5.Variația în timp a VUM ω și Ω

Fig.7.6.Variația în timp a debitului

b) $\frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.000005(\omega - 323.34)$

$$\left\{ \begin{aligned} 40 \frac{d\omega}{dt} &= 0.14331 \left(-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+100))) e^{-(t+100)/3600} \right)^{0.6} \cdot \omega + \right. \\ &\quad \left. \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+100))) e^{-(t+100)/3600} \right)^{1.8} \right. \\ &\quad \left. - 1.1874(\omega - \Omega) \right) \\ 20 \frac{d\Omega}{dt} &= 1.1874(\omega - \Omega) - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \Omega \\ \frac{dQ}{dt} &= 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.000005(\omega - 323.34) \\ \omega(0) &= 339 \\ \Omega(0) &= 330.03 \\ Q(0) &= 3.2596 \times 10^{-2} \end{aligned} \right.$$

Rezultatele sunt date în figurile 7.7 și 7.8.

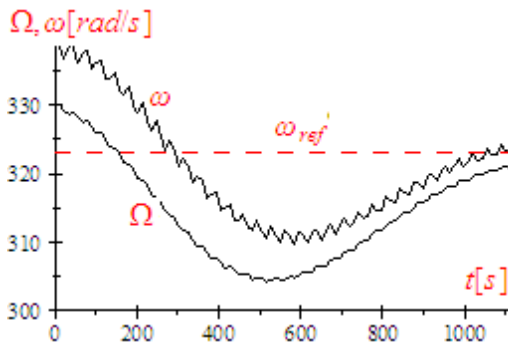


Fig.7.7.Variația în timp a VUM ω și Ω

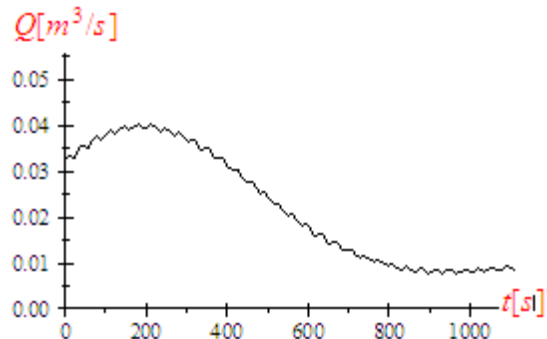


Fig.7.8.Variația în timp a debitului

c) $\frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.000005(\omega - 323.34)$

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \frac{d\omega}{dt} = 0.14331 \left(\begin{array}{l} -4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+100))) e^{-(t+100)/3600} \right)^{0.6} \cdot \omega + \\ \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+100))) e^{-(t+100)/3600} \right)^{1.8} \\ - 1.1874(\omega - \Omega) \end{array} \right) \\ 20 \frac{d\Omega}{dt} = 1.1874(\omega - \Omega) - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \Omega \\ \frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.00005(\omega - 323.34) \\ \omega(0) = 339 \\ \Omega(0) = 330.03 \\ Q(0) = 3.2596 \times 10^{-2} \end{array} \right.$$

În figurile 7.9 și 7.10 se dau rezultatele pentru acest caz.

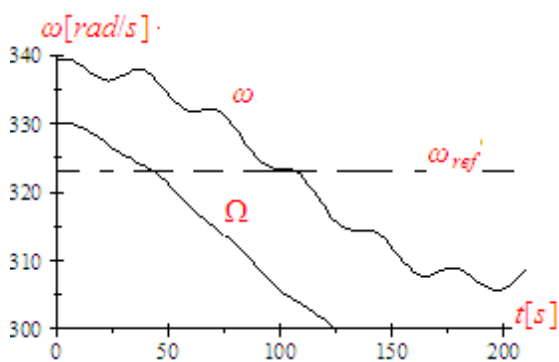


Fig. 7.9. Variația în timp a VUM ω și Ω

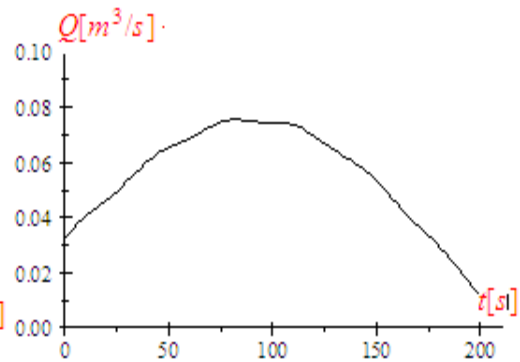


Fig. 7.10. Variația în timp a debitului

Problema acordării regulatorului

Așa cum s-a menționat și anterior, constanta K_2 influențează semnificativ procesul tranzitoriu.

Exemplu 1

Condițiile inițiale se deduc, la $t=0$, din sistemul algebric:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = 0.14331 \left(\begin{array}{l} -4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.179430)) e^{-(200)/3600} \right)^{0.6} \cdot \omega + \\ \left((16 - 6 \sin(0.17943(200))) e^{-(200)/3600} \right)^{1.8} \\ - 1.1874(\omega - \Omega) \end{array} \right) \\ 0 = 1.1874(\omega - \Omega) - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \Omega \\ \omega = 339 \end{array} \right. ,$$

Soluția: $[Q = 6.8854 \times 10^{-2}, \Omega = 319.43, \omega = 339.0]$,

Condițiile finale se deduc, la $t=100$ [s], din sistemul algebric:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = 0.14331 \left(\begin{array}{l} -4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943(100+200))) e^{-(100+200)/3600} \right)^{0.6} \cdot \omega + \\ \left((16 - 6 \sin(0.17943(100+200))) e^{-(100+200)/3600} \right)^{1.8} \\ - 1.1874(\omega - \Omega) \end{array} \right) \\ 0 = 1.1874(\omega - \Omega) - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \Omega \\ \omega = 323.34 \end{array} \right. ,$$

Soluția: $[Q = 3.6809 \times 10^{-2}, \Omega = 312.65, \omega = 323.34]$

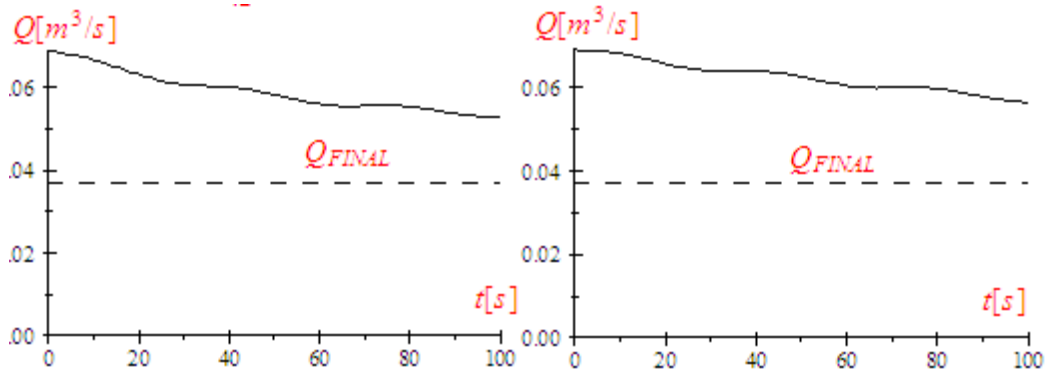


Fig.7.10.a.Variația în timp a debitului la $K_2 = -0.00001$

Fig.7.10.b.Variația în timp a debitului la $K_2 = -0.000001$

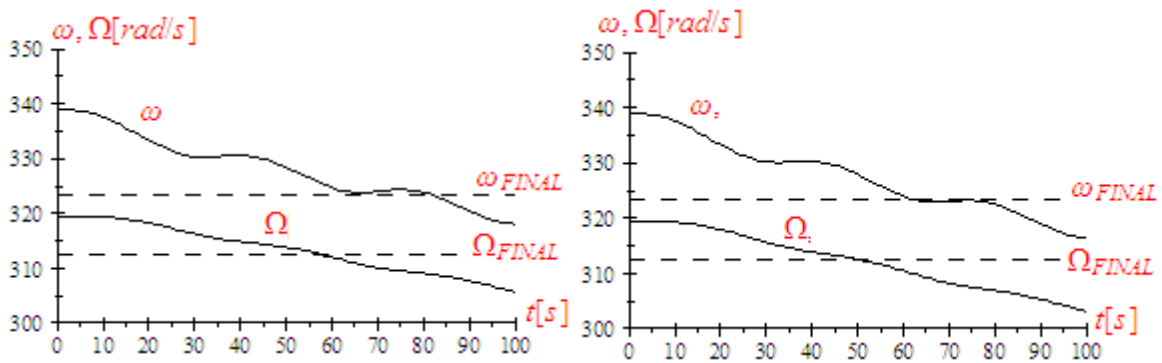


Fig.7.9.a.Variația în timp a VUM ω și Ω la $K_2 = -0.00001$

Fig.7.9.b.Variația în timp a VUM ω și Ω la $K_2 = -0.000001$

Se observă că se ating condițiile finale, la $t=100[s]$, pentru VUM ω și Ω , mai rapid, dar, datorită inerției mecanice și a scăderii valorii vitezei vântului în timp, aceste mărimi scad sub valorile finale. Debitul nu atinge valoarea finală.

Pentru pașii următori se fac simulări la momentele de timp $t=300, 400, 500 [s]$.

3) la $t = 300 [s]$

$$\omega_{ref} = 11.775 \frac{\int_{200}^{300} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8} dt}{\int_{200}^{300} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{0.6} dt} = 315.12 [rad / s]$$

Cuplul $M_{TV-MEDIU}$ este:

$$M_{TV-MEDIU} = \frac{1}{100} \int_{200}^{300} 0.14331 \left(\frac{-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{0.6} \cdot 315.12 +}{((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8}} \right) dt$$

$$= 9.5431 [Nm]$$

$$\begin{cases} M_A \cdot \Omega = 9800 \cdot Q \cdot 11 \\ M_A = 1.1874(\omega - \Omega) \\ \omega = 315.12 \\ M_A = 9.5431 \end{cases},$$

Cu soluția: $\{M_A = 9.5431, \omega = 315.12, \Omega = 307.08, Q = 2.7185 \times 10^{-2}\}$

4) la $t = 400 [s]$

$$\omega_{ref} = 11.775 \frac{\int_{300}^{400} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8} dt}{\int_{300}^{400} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{0.6} dt} = 310.86 [rad / s]$$

Cuplul $M_{TV-MEDIU}$ este:

$$M_{TV-MEDIU} = \frac{1}{100} \int_{300}^{400} 0.14331 () dt = 9.3385 [Nm]$$

$$\begin{cases} M_A \cdot \Omega = 9800 \cdot Q \cdot 11 \\ M_A = 1.1874 (\omega - \Omega) \\ \omega = 310.86 \\ M_A = 9.3385 \end{cases}$$

Soluția:

$\{\omega = 310.86, M_A = 9.3385, Q = 2.6248 \times 10^{-2}, \Omega = 303.00\}$

5) la $t = 500 [s]$

$$\omega_{ref} = 11.775 \frac{\int_{400}^{500} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8} dt}{\int_{400}^{500} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{0.6} dt} = 304.12 [rad / s]$$

$$M_{TV-MEDIU} = \frac{1}{100} \int_{400}^{500} 0.14331 \left(\frac{-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{0.6} \cdot 304.12 +}{((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^{1.8}} \right) dt$$

$$= 9.0664 [Nm]$$

$$\begin{cases} M_A \cdot \Omega = 9800 \cdot Q \cdot 11 \\ M_A = 1.1874 (\omega - \Omega) \\ \omega = 304.12 \\ M_A = 9.0664 \end{cases}$$

Soluția:

$\{M_A = 9.0664, \Omega = 296.48, \omega = 304.12, Q = 2.4936 \times 10^{-2}\}$

La acționarea pompei cu un motor asincron și folosind un regulator de debit de tip PI, de ecuație

$$\frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.00005 (\omega - 323.34)$$

și având condițiile inițiale de la $t=100 [s]$, $\omega(0) = 339 [rad / s]$, $\Omega(0) = 330.03 [rad / s]$

și $Q(0) = 3.2596 \times 10^{-2} [m^3 / s]$, se obțin ecuațiile mișcărilor sub forma:

$$\left. \begin{aligned}
 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} &= 0.14331 \left(\begin{aligned}
 &-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+200.))) e^{-(t+200.)/3600} \right)^{0.6} \cdot \omega + \\
 &\left((16 - 6 \sin(0.17943(t+200.))) e^{-(t+200.)/3600} \right)^{1.8} \\
 &-1.1874(\omega - \Omega) \\
 &20 \cdot \frac{d\Omega}{dt} = 1.1874(\omega - \Omega) - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \Omega \\
 &\frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.00005(\omega - 323.34) \\
 &\omega(0) = 339. \\
 &\Omega(0) = 330.03 \\
 &Q(0) = 3.2596 \times 10^{-2}
 \end{aligned} \right)
 \end{aligned} \right\} \text{Pe}$$

intervalul de timp $t=200 - 500$ [s] se obțin variațiile VUM, ω și Ω , figura 7.11.

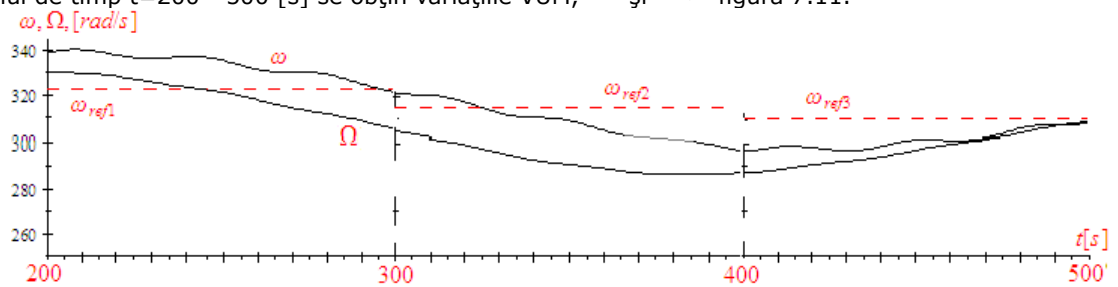


Fig.7.11.Variația în timp a VUM ω

În același interval de timp valorile debitului se modifică semnificativ, atingând la $t=442$ [s] valoarea minimă, figura 7.12.

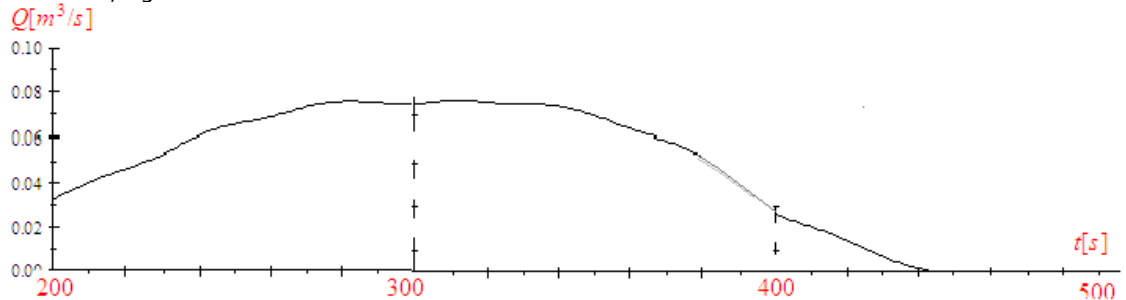


Fig.7.12.Variația în timp a debitului

7.6.2. Acționarea pompei se face cu un MOTOR SINCRON-MS

Prin modificarea debitului Q , figura 7.13, se poate controla sistemul astfel încât **VUM** să aibe valoarea ω_{ref}

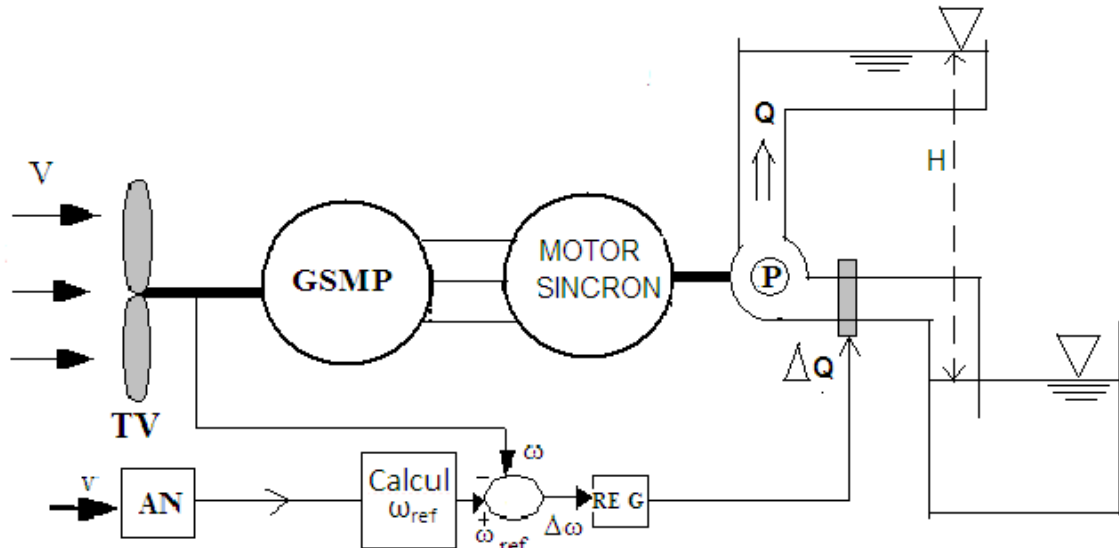


Fig.7.13 Sistem eolian cu motor sincron

Folosind rezultatele pentru ω_{ref} și $M_{TV-MEDIU}$ de la cazul anterior, rezultă:

1) la $t = 100[s]$, $\omega_{ref} = 339. [rad/s]$, $M_{TV-MEDIU} = 10.647[Nm]$

$$\begin{cases} M_S \cdot \omega = 9800 \cdot Q \cdot 11 \\ \omega = 339. \\ M_S = 10.647 \end{cases} \quad \text{debitul } Q = 3.3482 \times 10^{-2} [m^3/s],$$

2) la $t = 200[s]$, $\omega_{ref} = 323.34 [rad/s]$

$$M_{TV-MEDIU} = 9.9337 [Nm], Q = 2.9796 \times 10^{-2} [m^3/s]$$

În cazul sistemului generator sincron+motor sincron legătura dintre TV și pompa de apă, prin lanțul cinematic generator sincron+motor sincron, se comportă ca și cum ar fi rigidă și comportarea sistemului este similară cu a unui cuplaj direct.

Cu un regulator de debit de tip PI de ecuație A)

$$\frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.000005(\omega - 323.34) \quad \text{se obține ecuația mișcării sub forma}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 60 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0.14331 \left(-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+100.))) e^{-(t+100.)/3600} \right)^{0.6} \cdot \omega + \right. \\ \left. \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+100.))) e^{-(t+100.)/3600} \right)^{1.8} \right) \\ - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \omega \\ \frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.000005(\omega - 323.34) \\ \omega(0) = 339. \\ Q(0) = 3.3482 \times 10^{-2} \end{array} \right.$$

Variațiile în timp ale lui ω și Q , date în figurile 7.14 și 7.15, arată caracterul instabil al sistemului.

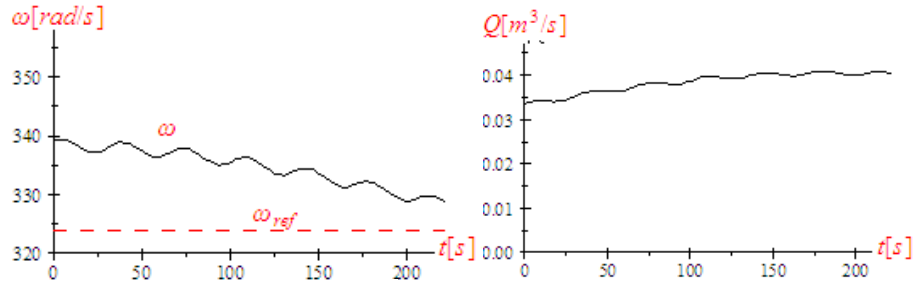
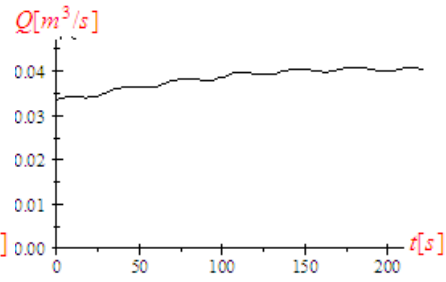
Fig. 7.14. Variația în timp a VUM ω 

Fig. 7.15. Variația în timp a debitului

$$b) \frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.00005(\omega - 323.34)$$

La o altă valoare a constantei K_2 a regulatorului, $K_2 = 0.00005$, se obține o funcționare stabilă, figurile 7.16 și 7.17.

$$\left\{ \begin{array}{l} 60 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0.14331 \left(-4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+100.))) e^{-(t+100.)/3600} \right)^{0.6} \cdot \omega + \right. \\ \left. \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+100.))) e^{-(t+100.)/3600} \right)^{1.8} \right) \\ - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \omega \\ \frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.00005(\omega - 323.34) \\ \omega(0) = 339. \\ Q(0) = 3.3482 \times 10^{-2} \end{array} \right.$$

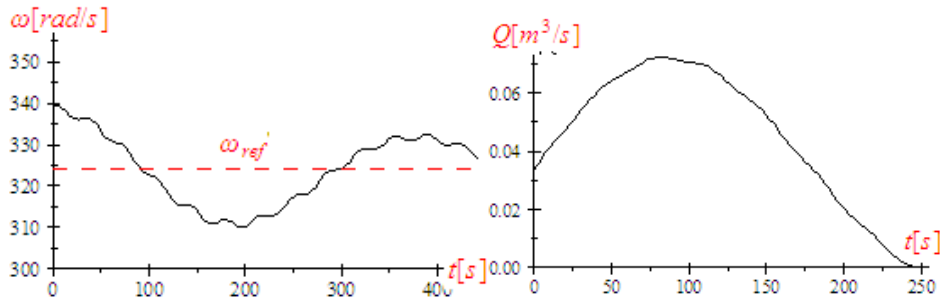
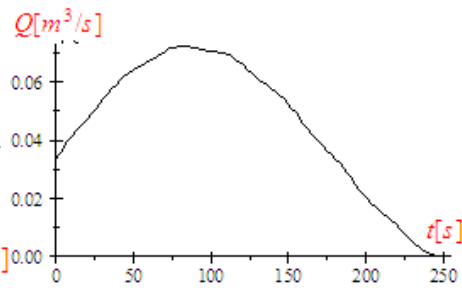
Fig. 7.16. Variația în timp a VUM ω 

Fig. 7.17. Variația în timp a debitului

$$3) \text{ la } t = 300[s]$$

$$\text{VUM } \omega_{ref} = 315.12[rad/s]$$

$$\text{Cuplul } M_{TV-MEDIU} = 9.5431[Nm]$$

$$M_S \cdot \omega = 9800 \cdot Q \cdot 11$$

$$\omega = 315.12$$

$$M_S = 9.5431$$

$$\text{debitul } Q = 2.7896 \times 10^{-2}[m^3/s],$$

$$4) \text{ la } t = 400[s]$$

$$\text{VUM } \omega_{ref} = 310.86[rad/s]$$

$$\text{Cuplul } M_{TV-MEDIU} = 9.3385[Nm]$$

$$\begin{cases} M_S \cdot \omega = 9800 \cdot Q \cdot 11 \\ \omega = 310.86 \\ M_S = 9.3385 \end{cases} \quad \text{debitul } Q = 2.6929 \times 10^{-2} [m^3/s],$$

5) la $t = 500[s]$

VUM $\omega_{ref} = 304.12 [rad/s]$

Cuplul $M_{TV-MEDIU} = 9.0664 [Nm]$

$$\begin{cases} M_S \cdot \omega = 9800 \cdot Q \cdot 11 \\ \omega = 304.12 \\ M_S = 9.0664 \end{cases} \quad \text{debitul } Q = 2.5578 \times 10^{-2} [m^3/s],$$

Evoluția în timp a sistemului, cu un regulator de debit de tip PI de ecuație:

$$\frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.00005(\omega - 323.34)$$

se observă, la condițiile inițiale de la $t=100[s]$, $\omega(0) = 339. [rad/s]$ și $Q(0) = 3.3482 \times 10^{-2} [m^3/s]$, prin rezolvarea ecuației mișcării:

$$\left\{ \begin{array}{l} 60 \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0.14331 \left(\begin{array}{l} -4.2463 \cdot 10^{-2} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+200.))) e^{-(t+200.)/3600} \right)^{0.6} \cdot \omega + \\ \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+200.))) e^{-(t+200.)/3600} \right)^{1.8} \\ - 9800 \cdot Q \cdot 11 / \omega \end{array} \right) \\ \frac{dQ}{dt} = 5.3378 \times 10^{-4} \frac{d\omega}{dt} + 0.00005(\omega - 323.34) \\ \omega(0) = 339. \\ Q(0) = 3.3482 \times 10^{-2} \end{array} \right.$$

Pe intervalul de timp analizat: $t=100-600[s]$ se obține variația în timp a VUM ω , dată în figura 7.18

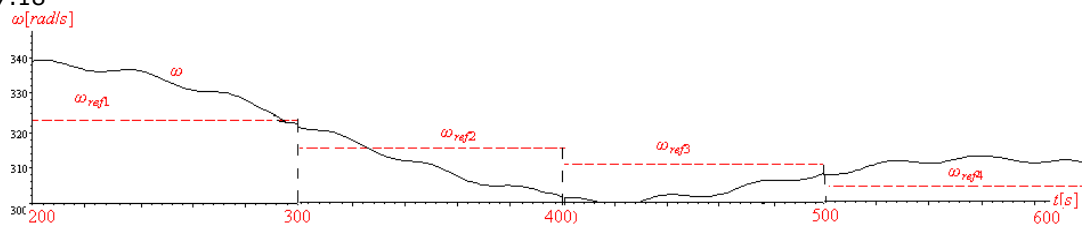


Fig.7.18.Variația în timp a VUM ω

Mărimile de referință s-au calculat, din viteza vântului: $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600}$, la momentele de timp $t=200, 300, 400, 500[s]$, viteză a cărei variație în timp este dată în figura 7.19. VUM reală, ω , tinde spre aceste valori, funcționarea fiind stabilă

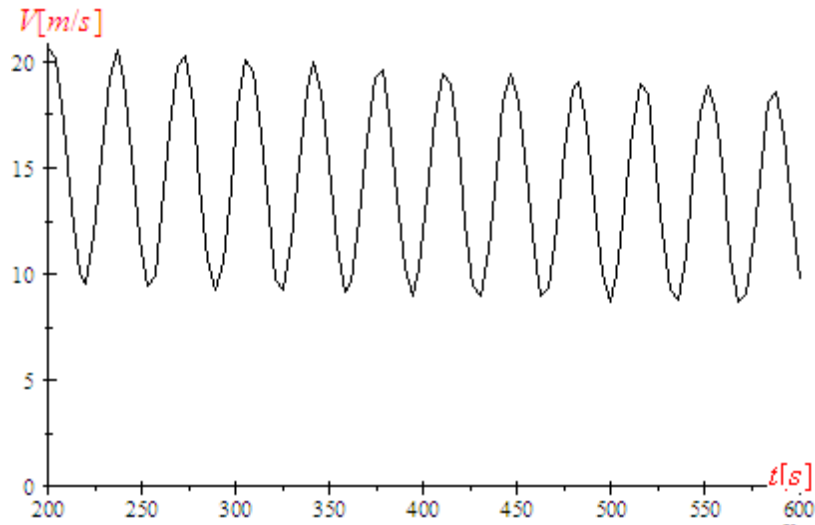


Fig.7.19.Variația în timp a vitezei vântului

Variația în timp a debitului este dată în figura 7.20.

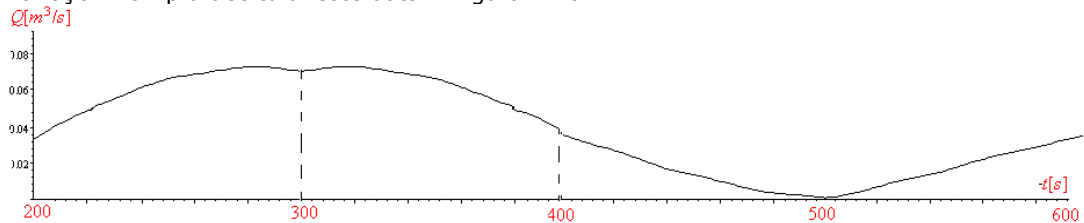


Fig.7.20.Variația în timp a debitului

Variația debitului în timp este impusă de variația vitezei vântului în timp și de caracteristicile regulatorului PI folosit.

În concluzie sistemul eolian cu stocare hidro, figura 7.21, poate fi condus după următorul algoritm de calcul :

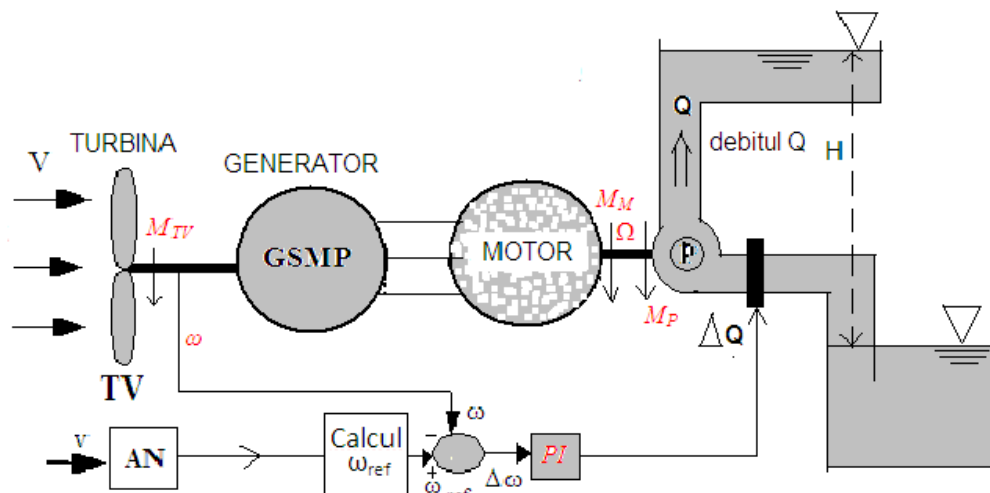


Fig.7.21 Sistem eolian cu stocare hidro

Din rezultatele de mai sus se observă că sistemul este lent și urmărește cu întârziere variația vitezei vântului în timp

Reglând debitul Q în modul prezentat mai sus se asigură funcționarea sistemului în jurul valorilor de referință, ω_{ref} , valori definite de variația vitezei vântului în timp și prin aceasta se realizează o funcționare optimă din punct de vedere energetic.

7.7. CONCLUZII

Prin stocarea energiei eoliene în energie hidrolică se realizează un sistem energetic performant la care fluctuațiile vitezei vântului nu sunt deranjante. Prin modificarea debitului de

apă Q se poate controla sistemul astfel încât VUM să ajungă la valorile ω_{ref} impuse de variația vitezei vântului în timp și în acest mod să se realizeze o captare maximă a energiei eoliene. Valorile debitului depind de valorile vitezei vântului și de inerția mecanică a sistemului și sunt astfel calculate încât energetic se realizează o funcționare optimă. În ansamblul său sistemul este deosebit de fiabil și ieftin, deoarece presupune doar un reglaj de debit, generatorul sincron debitând direct pe motorul asincron/sincron, deci fără convertoare statice scumpe și sensibile la suprasarcinile ce pot apărea accidental.

Energia hidrolică obținută din energia eoliană se poate folosi atât în scopuri electroenergetice, cât și în alte scopuri ca de exemplu : irigații, alimentări cu apă menajeră.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- acest capitol este în întregime original;
- se dă un sistem de stocare hidro al energiei eoliene;
- toate aplicațiile dezvoltate permit utilizarea lor în cazul unor sisteme reale, de mari dimensiuni;
- studiile efectuate cu ajutorul aplicațiilor soft dezvoltate sunt realizate folosind modelele matematice ale turbinei, generatorului și pompelor de apă;
- implementarea sistemului hidroenergetic se poate face, în soluțiile originale date, cu motoare sincrone sau asincrone ce acționează pompele de apă, direct fără convertoare de putere interpușe între generator și motoare;
- reglarea sistemului se face foarte simplu prin modificarea debitului la pompele de apă în funcție de viteza vântului;
- se da un algoritm de conducere bazat pe măsurarea vitezei vântului și determinarea turăției optime.

8.CONDUCEREA OPTIMALĂ A SISTEMULUI EOLIAN CU REGULATOARE DE TIP PI

În capitolul de față se face o analiză a dinamicii sistemelor eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Această analiză se bazează pe simulări numerice ce au la bază ecuația mișcării. Se folosesc modelele matematice uzuale pentru turbina de vânt, (TV). și generatorul sincron cu magneti permanenți, (GSMP). Conducerea sistemului se realizează cu regulatoarele de tip PI ce au ca și mărime de referință viteza unghiulară mecanică, VUM , de la generator, calculată pe baza măsurătorilor de viteză a vântului în condițiile obținerii unei energii maxime Prin simulări se face acordarea regulatoarelor, considerând viteza vântului variabilă în timp.

8.1.Considerații preliminare

Viteza vântului în domeniul exploatabil tehnico-economic este: $V = 4 \div 25 [m / s]$ cu cele mai bune rezultate în intervalul: $V = 12 \div 15 [m / s]$ [9]. Din cauza momentelor de inerție -J- foarte mari ale TV modificarea turației la generatorul sincron cu magneti permanenți, GSMP, este lentă și deci nu poate urmări variația rapidă în timp a vitezei vântului, așa cum ar fi necesar pentru a funcționa în punctele de putere maximă, MPP, [7], [1], [15] Cum vitezele vântului sunt semnificativ variabile în timp se pune problema determinării turației corespunzătoare energiei maxime, astfel încât economic să se obțină un profit maxim pe locația unde se vor instala turbinele de vânt [2].

Sistemele de conducere performante trebuie să asigure maximul de energie eoliană captată pe un interval lung de timp. Conducerea sistemului, TV+GSMP, la putere maximă obținută de la generatorul electric duce la frânarea turbinei și mărirea artificială, pe moment, a puterii electrice din variațiile energiilor cinetice a maselor în mișcare de rotație, dar, în final, pe o perioadă lungă de timp, energia obținută este mai mică decât în cazul funcționării sistemului eolian la energiei maxime [4]. Din acest motiv conducerea optimală a unui sistem eolian trebuie concepută în sensul obținerii energiei maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp. Aceasta impune controlul VUM prin impunerea vitezei de referință ω_{ref} , pe intervalul $-\Delta t -$ și, astfel, se extrage energia eoliană maximă disponibilă, la viteza vântului $V(t)$.

Sistemul eolian funcționează optimal la maximul energetic, dacă TV captează o energie maxim posibilă pe un interval de timp dat, de ordinul zilelor [7]. Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate teoretice și practice trebuie să aibe la bază intervale de timp de minimum câteva ore, (de regulă peste 10[h]). Sistemele electroenergetice eoliene de mare putere sunt conduse având în vedere viteza medie a vântului [8 ÷ 17], dar acestea nu realizează maximul energetic. Recent s-au propus și structuri de conducere bazate pe măsurarea vitezei momentane a vântului [1 ÷ 5]. și folosind un model matematic adecvat pentru TV.

În lucrarea de față se tratează tocmai acest aspect: optimul energetic la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp. Se determină valoarea vitezei unghiulare mecanice optime:

ω_{OPTIM} , la o viteză a vântului măsurată, [1-6], astfel încât energia obținută să fie maximă. Se au în vedere modelele clasice, [14], pentru turbină și generator, modele ce permit estimarea cuplului la viteza unghiulară ω .

8.2. Conducerea sistemului prin măsurarea vitezei vântului la turbină

Se analizează, în cele ce urmează un sistem eolian de putere: $P_N = 22 [kW]$, la viteze ale vântului variabile în timp într-un domeniu larg: 5-22[m/s]

Pentru turbina de vânt de putere: $P_N = 22 [kW]$, se dau de către firma constructoare,

[14], caracteristicile experimentale ale puterii, $P_{TV}(\omega, V)$:

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde: V – viteza vântului; ω – viteza unghiulară mecanică, VUM

Valoarea maximă a funcției $P_{TV}(\omega)$ se obține pentru VUM de referință ω_{ref} , prin derivare:

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} (23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3) = 0,$$

obținându-se:

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V$$

Rezultatul obținut este valabil la $V = ct$. În cazurile în care viteza vântului variază semnificativ în timp rezultatul obținut trebuie reanalizat.

Așa cum se observă, din figura 8.1, funcția $P_{TV}(\omega, V)$ prezintă un maxim. Se demonstrează în cele ce urmează ca și puterea debitată de generator prezintă un maxim la viteze ale vântului constante în timp și mai multe maxime la viteze ale vântului variabile în timp.

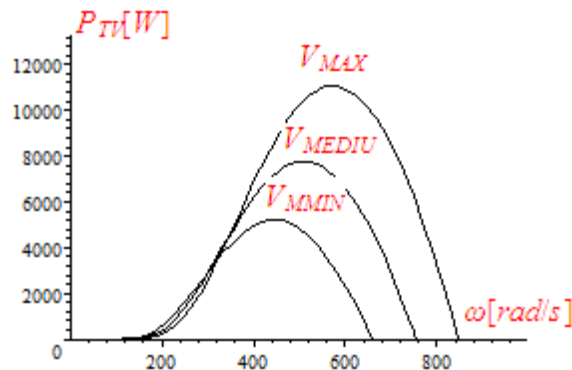


Fig.8.1. Dependența puterii de VUM, ω

Din datele de catalog [1] ale GSMP de putere: $P_N = 22 [kW]$ se obțin valorile:

$$R_l = 1.6 [\Omega], L_d = 0.07 [H], L_q = 0.08 [H], \Psi_M = 3.3 [Wb]$$

Din sistemul de ecuații ale GSMP

$$\left\{ \begin{array}{l} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\ M_G = -0.01I_dI_q + \Psi_M I_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right.$$

se obțin:

$$\text{puterea- } P_{GSMP}(\omega, R) = 27225 \cdot R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \text{ și}$$

$$\text{momentul- } M_{GSMP}(\omega, R) = -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

Cele doua functii: $P_{GSMP}(R, \omega)$ și $M_{GSMP}(R, \omega)$ depind de :

R – rezistența de sarcină și ω – VUM.

8.2.1. Viteza vântului variabilă în timp

VITEZA VÂNTULUI SCADĂ ÎN TIMP SINUSOIDAL ATENUAT

La o viteză $V(t)$ descrescătoare în timp, cu $e^{-t/3600}$, figura 8.2, de formă sinusoidală de perioadă $T = 35. [s]$, se obține :

$$V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}$$

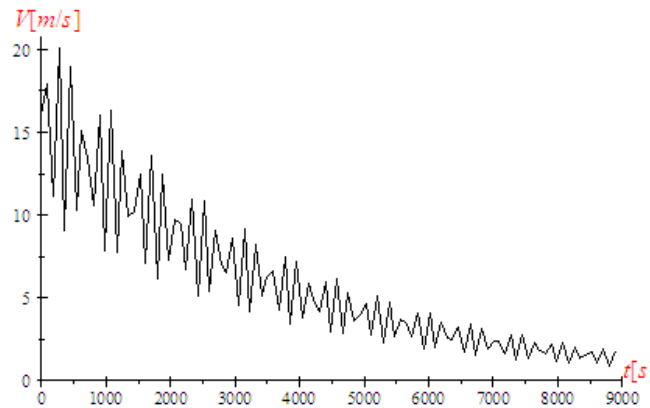


Fig.8.2. Variația vitezei vântului în timp

Perioada de eșantionare pentru măsurarea vitezei vântului este de 100[s]. La începutul fiecărui interval se înregistrează viteza vântului pe o perioadă de timp $T = 35. [s]$ și se determină viteza echivalentă a vântului V_{ECH} pe baza rezultatelor din [1]. Se prezintă în continuare, comportarea sistemului la 6 pași de reglare la $t=0, 100, \dots, 600 [s]$.

$$1) t = 35 [s]$$

Viteza echivalentă a vântului și ω_{ref} , la $t=35 [s]$, au valorile :

$$V_{ECH} = \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^4 dt} = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_0^{35} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^4 dt} = 17.379 [m/s]$$

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 17.379 = 552.95 [rad/s]$$

Momentul mediu al TV, la această VUM, are valoarea

$$M_{TV} = \frac{1}{35} \int_0^{35} \left(23.584 \cdot \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})/552.95 - 0.0525}{3.1269 \times 10^{-2}} + e^{-98.06 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})/552.95 - 0.0525} \cdot \frac{((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^3}{552.95} \right) \right) dt = 12.831 [Nm]$$

Din egalitatea momentelor la TV și GSMP se obține valoarea rezistenței de sarcină de la generator,

$R(0) = 464.55 [\Omega]$, mărime inițială în ecuația mișcării.

$$\left\{ \begin{array}{l} 12.831 = 5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \\ \omega = 552.95 \end{array} \right. \quad , \text{Soluția: } \left\{ \begin{array}{l} R = 464.55, \\ \omega = 552.95 \end{array} \right.$$

2) $t=135[s]$ Viteza echivalentă a vântului și ω_{ref} , la $t=135[s]$, au valorile

$$V_{ECH} = \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^4 dt} = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_{100}^{135} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^4 dt} = 16.908 [m/s]$$

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 16.908 = 537.96 [rad/s]$$

Ecuția regulatorului de tip PI fiind : $\frac{dR}{dt} = K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2 (\omega - \omega_{ref})$, se obține sistemul diferențial :

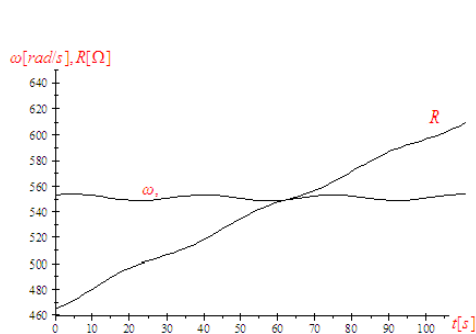
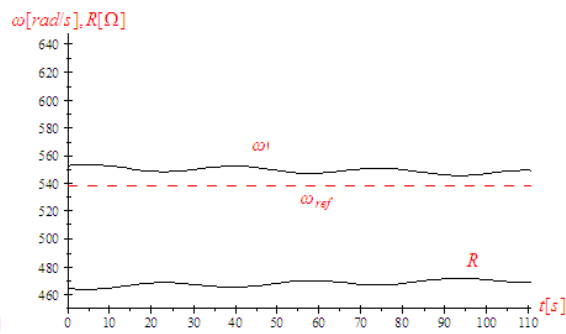
$$\begin{cases} \frac{dR}{dt} = K_1 \frac{d\omega}{dt} + K_2 (\omega - \omega_{ref}) - \text{ecuația regulatorului} \\ 40 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_G - \text{ecuația mișcării la TV+G} \end{cases}$$

La $K_1 = -0.89393, K_2 = 0.1$ ecuația regulatorului este :

$$\frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} + 0.1(\omega - 537.96)$$

și se obține :

$$\left\{ \begin{aligned} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = & \left(23.584 \cdot \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943(t + 135))) e^{-(t+135)/3600}) / \omega - 0.0525}{3.1269 \times 10^{-2}} \right) \cdot \right. \\ & e^{-98.06 \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943(t+135))) e^{-(t+135)/3600})}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot \\ & \left. \left((16 - 6 \sin(0.17943(t + 135))) e^{-(t+135)/3600} \right)^3 \right) \\ & - 5445.0 \omega^2 (5.R + 8.) \frac{4.0 \omega^2 + 625.0 R^2 + 2000.0 R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ & \frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} + 0.1(\omega - 537.96) \\ & \omega(0) = 552.95 \\ & R(0) = 464.55 \end{aligned} \right.$$

Fig.8.3.Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = 0.1$ Fig.8.4.Variația lui ω și R la

$$K_1 = -0.89393, K_2 = 0.001$$

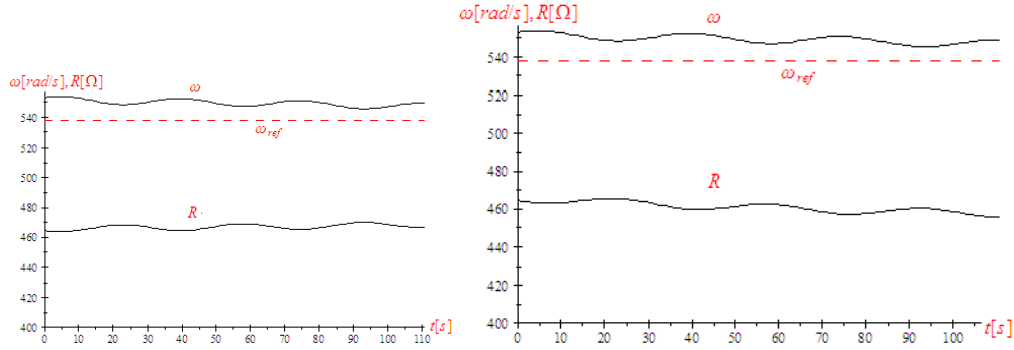


Fig.8.5.Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.001$
 $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.01$

Fig.8.6.Variația lui ω și R la

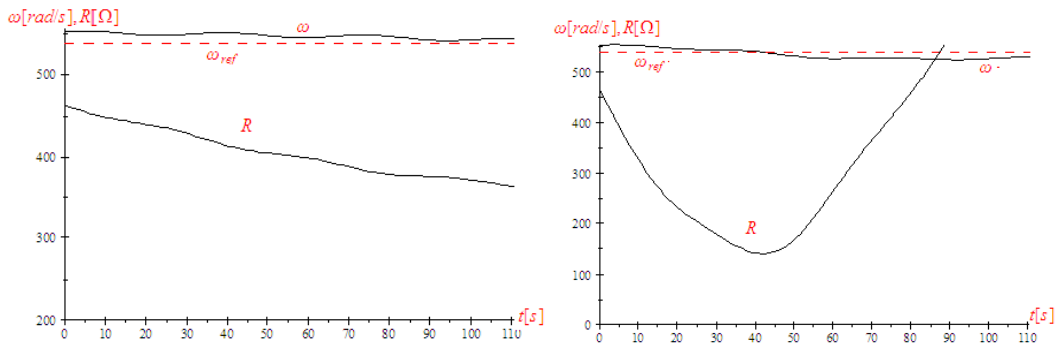


Fig.8.7.Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.1$
 $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.9$

Fig.8.8.Variația lui ω și R la

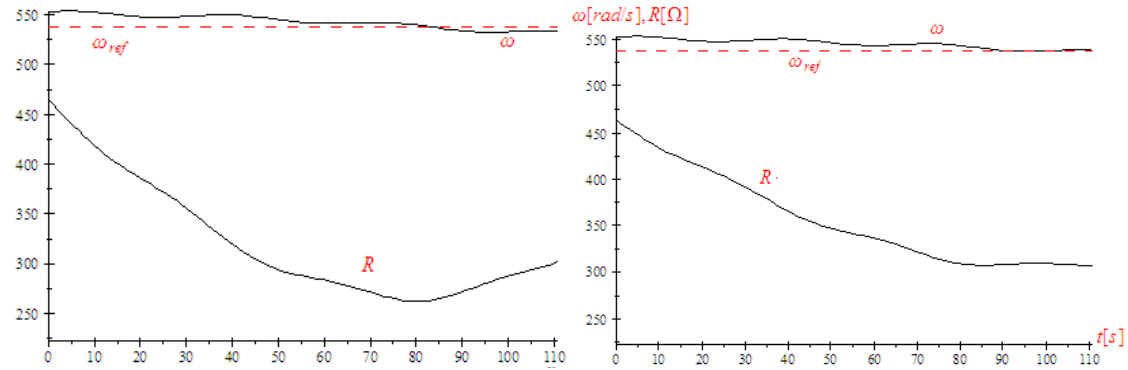


Fig.8.9.Variația lui ω și R la $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.3$

Fig.8.10.Variația lui ω și

R la $K_1 = -0.89393, K_2 = -0.2$

Din simulările de mai sus se observă că la $K_2 = -0.2$ se obține, la $t=100[s]$, valoarea de referință $\omega = \omega_{ref} = 537.96 [rad / s]$, deci cu ecuația regulatorului de forma :

$$\frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} - 0.2(\omega - 537.96)$$

Rezistența de sarcină la generator este reglată la valoarea $R = 311 [\Omega]$.

Pentru pașii următori, la $t = 235, 335, 435 [s]$, rezultă :

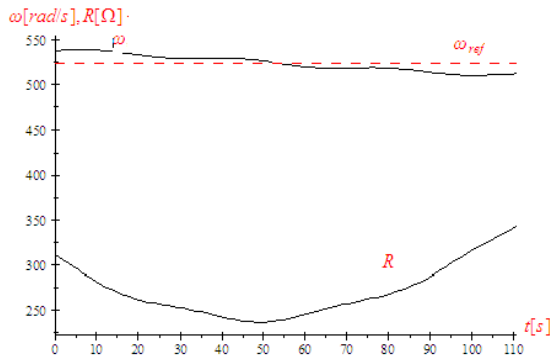
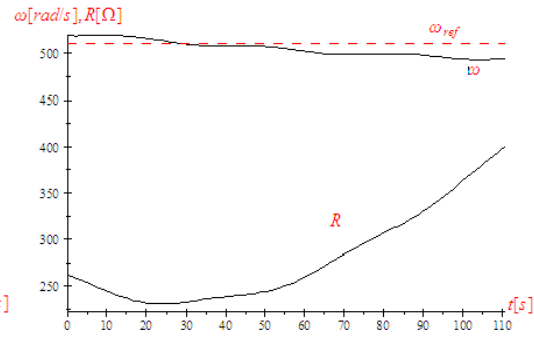
$$3)t=235[s]$$

Viteza echivalentă a vântului și ω_{ref} , la $t=235[s]$, au valorile

$$V_{ECH} = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_{200}^{235} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^4 dt} = 16.475 [m/s]$$

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 16.475 = 524.19 [\text{rad/s}]$$

$$\text{-ecuația regulatorului } \frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} - 0.2(\omega - 524.19)$$

Fig.8.11. Variația lui ω și R la pasul 3Fig.8.12. Variația lui ω și R la pasul 4

La $t=300[\text{s}]$ VUM și rezistența de sarcină au valorile $\omega(75) = 518.98 [\text{rad/s}]$, respectiv $R(75) = 262.11 [\Omega]$. Acestea sunt datele inițiale pentru pasul următor.

$$4)t=335[\text{s}]$$

Viteza echivalentă a vântului și ω_{ref} , la $t=335[\text{s}]$, au valorile

$$V_{ECH} = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_{300}^{335} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^4 dt} = 16.046 [\text{m/s}]$$

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 16.046 = 510.54 [\text{rad/s}]$$

$$\text{-ecuația regulatorului } \frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} - 0.2(\omega - 524.19)$$

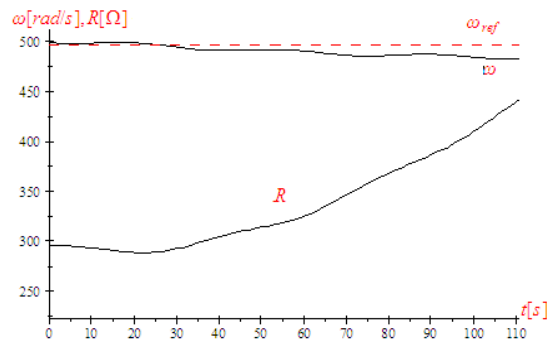
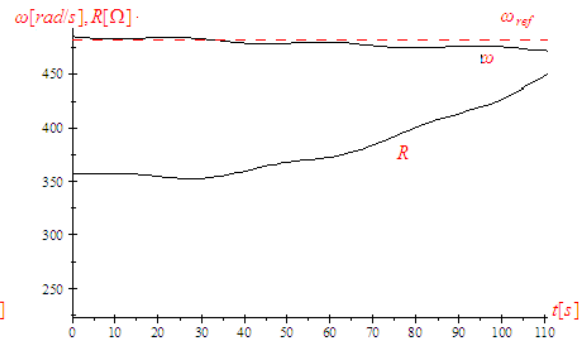
La $t=400[\text{s}]$ se obțin valorile: $\omega(75) = 498.91 [\text{rad/s}]$ și $R(75) = 295.39 [\Omega]$

$$5)t=435[\text{s}]$$

Viteza echivalentă a vântului și ω_{ref} , la $t=435[\text{s}]$, au valorile

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 15.602 = 496.41 [\text{rad/s}]$$

$$\text{-ecuația regulatorului } \frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} - 0.2(\omega - 524.19)$$

Fig.8.13. Variația lui ω și R la pasul 5Fig.8.14. Variația lui ω și R la pasul 6

La $t=500[\text{s}]$ se obțin valorile: $\omega(75) = 485.12 [\text{rad/s}]$ și $R(75) = 357.27 [\Omega]$

$$6)t=535[\text{s}]$$

Viteza echivalentă a vântului și ω_{ref} , la $t=535[s]$, au valorile :

$$V_{ECH} = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_{500}^{535} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^4 dt} = 15.157[m/s]$$

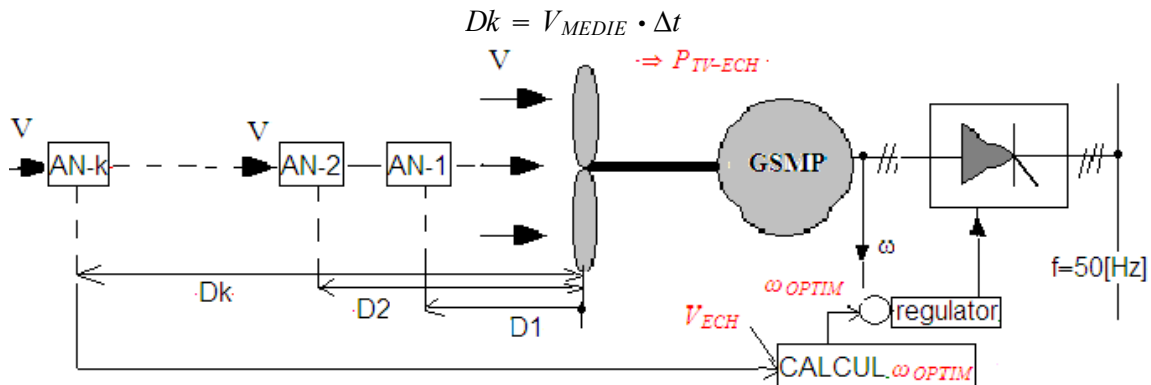
$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot 15.157 = 482.25[rad/s]$$

$$\text{-ecuația regulatorului } \frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} - 0.2(\omega - 524.19)$$

Din rezultatele obținute se observă că VUM este în zona optimă .Cu regulatorul PI bine acordat se obține în timp util ω_{ref} printr-o modificare corespunzătoare a valorii sarcinii la generator. Modificarea lui R, la toți pașii analizați, este semnificativă pe durata de eșantionare: 100[s], valoarea finală fiind uneori de 2 ori mai mare decât cea inițială.

8.3. Conducerea sistemului prin măsurarea vitezei vântului în avans

Prin plasarea anemometrelor în fața TV, la distanțe calculate după vitezele medii ale vântului, se poate elimina timpul mort, specific măsurătorilor de viteză a vântului la locul TV. Măsurând viteza medie a vântului cu anemometrele AN-1, AN-2, ... AN-k, figura 8.15, se poate estima VUM de referință ω_{ref} , corespunzătoare valorii vitezei vântului la locul TV și astfel se poate realiza, prin valoarea sarcinii de la generator funcționarea la $\omega = \omega_{ref}$, eliminându-se timpii morți. În funcție de timpul de eșantionare, Δt , și de viteza medie a vântului, V_{MEDIE} , se folosesc valorile furnizate de anemometrul AN-k plasat în fața TV la distanța :



La o viteză $V(t)$ descrescătoare în timp, cu $e^{-t/3600}$, de formă sinusoidală de perioadă $T = 35.[s]$, se obține :

$$V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}$$

Timpul de eșantionare pentru măsurarea turației la generator este $\Delta t = 100[s]$

Algoritmul de conducere este următorul :

1) Condițiile inițiale, VUM și rezistența de sarcină se pot stabili prin folosirea modelelor matematice ale TV și GSMP, în cazul de față $\omega(0) = 551.5[rad/s]$ și $R(0) = 463.4[\Omega]$

2) Se înregistrează cu anemometrul AN-k viteza vântului în intervalul de timp $T=35[s]$, T fiind perioada de oscilație a vitezei vântului. Se determină la pasul 1) $t=0$, ω_{ref-1} :

$$\omega_{ref-1} = 31.817 \cdot V_{ECH} = 31.817 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_0^{35} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^4 dt} = 552.95[rad/s]$$

3) Anemometrul AN-k este plasat la distanța

$$D_1 = V_{MEDIE} \cdot \Delta t = \frac{1}{35} \int_0^{35} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}) dt \cdot \Delta t = 15.913 \cdot (100 - 35) = 1034.3[m]$$

4) Evoluția în timp a sistemului, pe intervalul de timp $0 \div 100[s]$, se observă cu ecuația mișcării

$$40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = \left(\begin{array}{c} 23.584 \cdot \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943(t)))e^{-t/3600}}{\omega - 0.0525})}{+3.1269 \times 10^{-2}} \right) \\ e^{-98.06 \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943(t)))e^{-t/3600}}{\omega - 0.0525}) \right)} \\ ((16 - 6 \sin(0.17943(t)))e^{-t/3600})^3 \end{array} \right) \cdot$$

$$-5445.0\omega^2(5.R + 8.) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2}$$

$$\frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} - 0.2(\omega - 552.95)$$

$$\omega(0) = 551.5$$

$$R(0) = 464.4$$

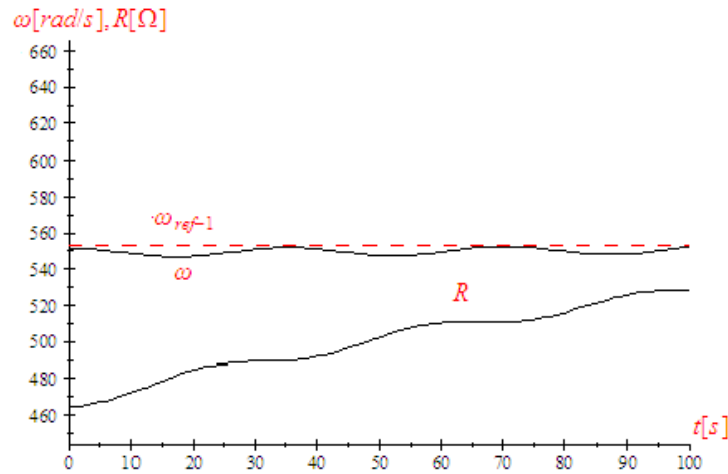


Fig.8.16.Variația lui ω și R la pasul 1

Rezistența de sarcină și VUM, la sfârșitul intervalului au valorile:

$$R(100) = 527.95[\Omega], \text{ respectiv } \omega(100) = 552.2[rad/s]$$

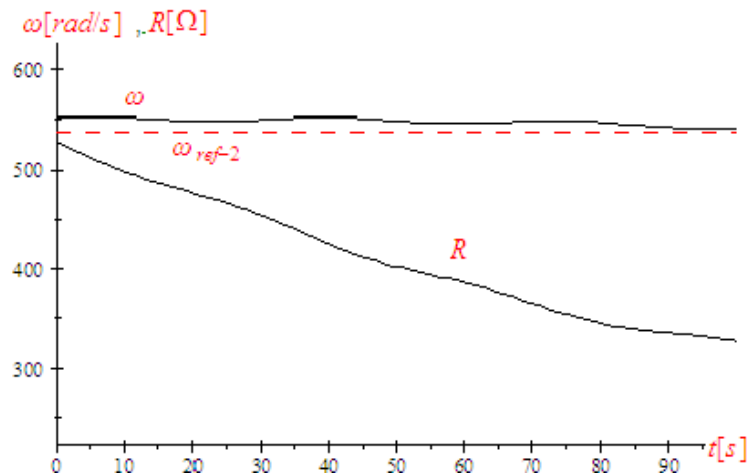
Pentru pașii următori procedeul este similar și se obțin rezultatele :

pasul 2)t=100[s]

$$\omega_{ref-2} = 31.817 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_{100}^{135} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^4 dt} = 537.97[rad/s]$$

$$D_2 = V_{MEDIE} \cdot \Delta t = \frac{1}{35} \int_{100}^{135} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}) dt \cdot (100 - 35) = 1006.1[m]$$

$$40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = \left(\begin{aligned} & 23.584 \cdot \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943(t + 100)))e^{-(t+100)/3600})/\omega - 0.0525}{+3.1269 \times 10^{-2}} \right) \cdot \\ & e^{-98.06 \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943(t+100)))e^{-(t+100)/3600})/\omega - 0.0525}{((16 - 6 \sin(0.17943(t + 100.)))e^{-(t+100.)/3600})^3} \right)} \cdot \\ & -5445.0\omega^2(5.R + 8.) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ & \frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} - 0.2(\omega - 537.97) \\ & \omega(0) = 552.2 \\ & R(0) = 527.95 \end{aligned} \right)$$

Fig.8.17.Variația lui ω și R la pasul 2

Rezistența de sarcină și VUM, la sfârșitul intervalului au valorile:

$$R(100) = 326.58 [\Omega] \text{ și } \omega(100) = 542.44 [\text{rad} / \text{s}]$$

pasul 3)t=200[s]

$$\omega_{ref-3} = 31.817 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_{200}^{235} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^4 dt} = 524.2 [\text{rad/s}]$$

$$D_3 = V_{MEDIE} \cdot \Delta t = \frac{1}{35} \int_{200}^{235} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}) dt \cdot (100 - 35) = 978.99 [m]$$

$$40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = \left(\begin{aligned} & 23.584 \cdot \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943(t + 200)))e^{-(t+200)/3600})/\omega - 0.0525}{+3.1269 \times 10^{-2}} \right) \cdot \\ & e^{-98.06 \left((16 - 6 \sin(0.17943(t+200)))e^{-(t+200)/3600} \right) / \omega - 0.0525} \cdot \\ & ((16 - 6 \sin(0.17943(t + 200.)))e^{-(t+200.)/3600})^3 \\ & -5445.0\omega^2(5.R + 8.) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ & \frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} - 0.2(\omega - 524.2) \\ & \omega(0) = 542.44 \\ & R(0) = 326.58 \end{aligned} \right)$$

Rezistența de sarcină și VUM, la sfârșitul intervalului au valorile:

$$\omega(100) = 510.25[\text{rad/s}] R(100) = 275.06[\Omega]$$

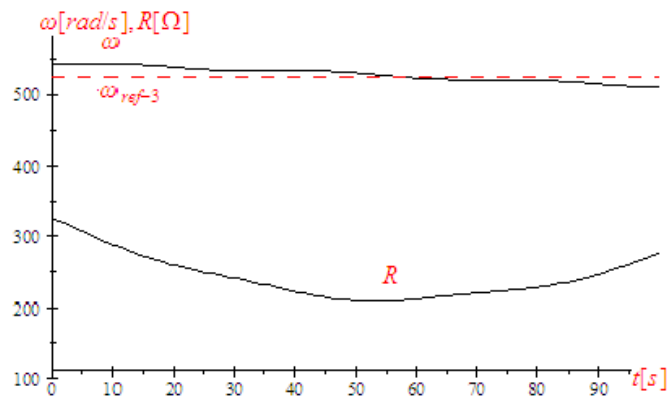


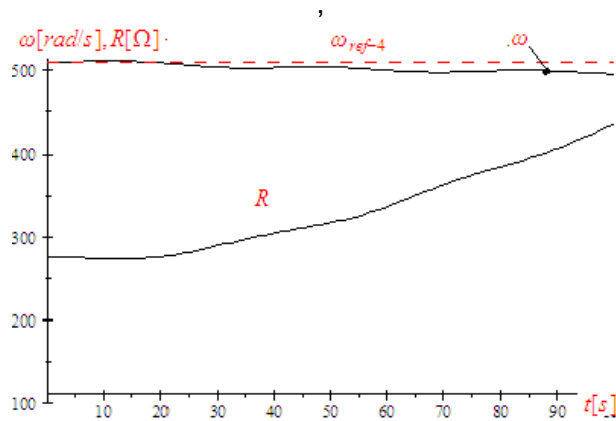
Fig.8.18.Variația lui ω și R la pasul 3

pasul 4) $t=300$ [s]

$$\omega_{ref-4} = 31.817 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_{300}^{335} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^4 dt} = 510.55[\text{rad/s}]$$

$$D_4 = V_{MEDIE} \cdot \Delta t = \frac{1}{35} \cdot \int_{300}^{335} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}) dt \cdot (100 - 35) = 952.64[m]$$

$$40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = \left(\begin{array}{l} 23.584 \cdot \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943(t + 300)))e^{-(t+300)/3600})/\omega - 0.0525}{+3.1269 \times 10^{-2}} \right) \cdot \\ e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943(t+300)))e^{-(t+300)/3600})/\omega - 0.0525} \cdot \\ ((16 - 6 \sin(0.17943(t + 300.)))e^{-(t+300.)/3600})^3 \\ -5445.0\omega^2(5.R + 8.) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.}{(1250.R^2 + 4000.R + 3200. + 7.\omega^2)^2} \\ \frac{dR}{dt} = -0.89393 \frac{d\omega}{dt} - 0.2(\omega - 510.55) \\ \omega(0) = 510.25 \\ R(0) = 275.06 \end{array} \right)$$

Fig.8.19.Variația lui ω și R la pasul 4

Din rezultatele obținute se observă că VUM se apropie de valoarea de referință, similar cazului anterior. Important este determinarea lui $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$ și adaptarea sarcinii la generator astfel încât să se realizeze o funcționare în zona optimă, energia captată fiind maximă.

Din simularile prezentate rezultă:

1) Determinarea VUM optime energetic este o problemă complexă la viteze ale vântului variabile în timp.

2) Determinarea VUM optime nu se poate face doar prin cunoașterea valorii vitezei medii a vântului și se impune înregistrarea variației reale a vitezei vântului, adică cunoașterea funcției $V(t)$.

3) În calculul valorii VUM optime intervin integralele vitezei vântului la puterile 4, 5 și 6, integrale care se pot calcula relativ simplu, deoarece se cunoaște, din măsurători funcția $V(t)$.

8.4. Concluzii

Prin măsurarea vitezei vântului se determină valoarea VUM optime și apoi printr-un regulator de tip PI se modifică sarcina la generator, astfel încât să se realizeze o funcționare optimă în zona optimă din punct de vedere energetic. Acordarea regulatorului este o problemă complexă datorită sistemului neliniar care face imposibil folosirea criteriilor clasice specifice sistemelor liniare.

S-a folosit legătura dintre viteza vântului și turația optimă la care trebuie să funcționeze sistemul, astfel încât energia eoliană captată să fie maximă. Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă. Prin simulări s-a dedus turația optimă la generator, astfel încât să se obțină o energie maximă la o viteză a vântului variabilă în timp. În conducerea sistemului s-au dat metodele de calcul a turației de referință în funcție de viteza vântului, astfel încât să se obțină o energie maximă.

În continuare se prezintă contribuțiile personale din acest capitol:

- analiza metodei de conducere a sistemului prin măsurarea vitezei vântului la turbină în două variante: viteza vântului constantă și viteza vântului variabilă semnificativă în timp;
- analiza metodei de conducere a sistemului prin măsurarea vitezei vântului în avans;
- acordarea regulatorului PI prin simulări la o viteză a vântului variabilă în timp;
- analiza naturii punctelor de funcționare, stabil sau instabil, în funcție de sarcina la turbină și viteza vântului.

9.METODĂ PENTRU DETERMINAREA MAXIMULUI PUTERII ECHIVALENTE LA UN SISTEM EOLIAN

În prezentul capitol 9 se dă o metodă originală de estimare a puterii echivalente la sisteme eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Această metodă se bazează pe o probă la funcționarea în gol a generatorului, făcându-se o singură dată în etapa de omologare a turbinei. Cunoașterea valorii turației, la care energia captată este maximă, constituie problema fundamentală în orice sistem de conducere performant. Conducerea optimă a unui sistem eolian presupune extragerea, (captarea), unei energii maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp. Aceasta impune controlul turației și cuplului la turbină și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului. Determinarea turației corespunzătoare energiei maxime date de turbina de vânt, (TV), este obiectivul principal al acestei lucrări. Prin simulări se verifică metoda dată, considerând viteza vântului variabilă în timp. Se poate determina, astfel, la o anumită viteză a vântului coordonatele punctului de putere maximă-MPP. Metoda, bazându-se pe date experimentale certe este deosebit de utilă în realizarea unei funcționări optime din punct de vedere energetic putând fi folosită și la determinarea modelului matematic al TV, MM-TV.

9.1.Considerații preliminare

Literatura de specialitate abundă în lucrări ce tratează funcționarea în MPP[1-17], viteza vântului fiind constantă în timp. Funcționarea la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp și în condiții energetice optime este foarte puțin tratată în literatură[1]. La viteze ale vântului variabile semnificativ în timp[4], cum este cazul real al României, determinarea MPP este o problemă complexă cu implicații majore în calitatea reglajului.[2,4].

Sistemul eolian funcționează optimal la maximum energetic, dacă TV captează o energie maxim posibilă pe un interval de timp dat, de ordinul zilelor[7]. Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate teoretice și practice trebuie să aibe la bază intervale de timp de minimum câteva ore, (de regulă peste 10[h]). Sistemele electroenergetice eoliene de mare putere sunt conduse având în vedere viteza medie a vântului[8 ÷ 17], dar acestea nu realizează maximum energetic. Recent s-au propus și structuri de conducere bazate pe măsurarea vitezei momentane a vântului [1 ÷ 5] și folosind un model matematic adecvat pentru TV.

În lucrarea de față se tratează tocmai acest aspect: optimul energetic la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp. Se determină valoarea vitezei unghiulare mecanice optime:

ω_{OPTIM} , la o viteză a vântului măsurată, [1-6], astfel încât energia obținută să fie maximă.

Variația în timp a VUM se obține, la funcționarea în gol, direct din măsurători de turație, iar în simulări prin rezolvarea ecuației mișcării. Simulările se bazează pe un model matematic uzual al turbinei, preluat din [14].

Se au în vedere modelele clasice, [14], pentru turbină și generator, modele ce permit estimarea cuplului la viteza unghiulară ω .

În literatura de specialitate [1-21] se folosesc diverse MM-TV date de firma constructoare și deduse în condiții de laborator, condiții mult diferite de cele existente în exploatare.[7,12,19]. Din acest motiv și rezultatul final, în principal, energia electrică obținută are o valoare mai mică decât cea maximă posibilă la o funcționare în MPP, la VUM ω_{OPTIM} . Deducerea puterii la turbină în mod corect este esențială în a realiza o funcționare optimă [3,5,11,21].

Această problemă se poate realiza simplu și cu un grad ridicat de precizie, în timpul funcționării TV, prin măsurarea VUM la anumite intervale de timp a căror valoare este dependentă de valoarea momentului de inerție, J și de rapiditatea variației în timp a vitezei vântului

Se determină, astfel, dependența puterii TV de VUM și se poate determina VUM optimă, ω_{OPTIM} , la care puterea este maximă, putându-se realiza, în acest mod, o funcționare în zona MPP.

9.2.STUDIUL DE CAZ

Se analizează, în cele ce urmează un sistem eolian de putere: $P_N = 22[kW]$, la viteze ale vântului variabile în timp într-un domeniu larg: 5-22[m/s]

9.2.1.Modelele matematice ale TV+GSMP

Pentru turbina de vânt de putere: $P_N = 22[kW]$, se dau de către firma constructoare, [14], caracteristicile experimentale ale puterii, $P_{TV}(\omega, V)$:

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde: V – viteza vântului; ω – viteza unghiulară mecanică, VUM

Valoarea maximă a funcției $P_{TV}(\omega)$ se obține pentru VUM de referință ω_{ref} , prin derivare:

$$\frac{dP_{TV}}{d\omega} = \frac{d}{d\omega}(23.584 \cdot ((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3) = 0,$$

obținându-se:

$$\omega_{ref} = 31.817 \cdot V$$

Precizare:

Rezultatul obținut este valabil la $V = ct$. În cazurile în care viteza vântului variază semnificativ în timp rezultatul obținut trebuie reanalizat.

Așa cum se observă, din figura 9.1, funcția $P_{TV}(\omega, V)$ prezintă un maxim. Se demonstrează în cele ce urmează ca și puterea debitată de generator prezintă un maxim la viteze ale vântului constante în timp și mai multe maxime la viteze ale vântului variabile în timp.

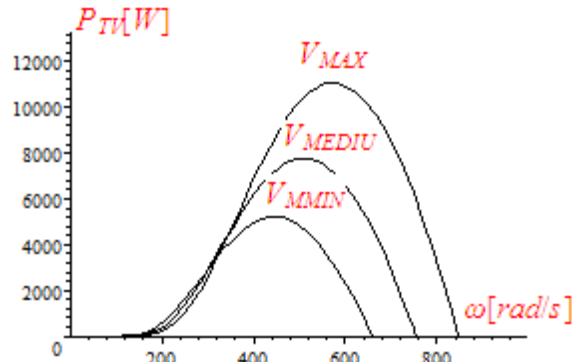


Fig.9.1. Dependența puterii de VUM, ω

Din datele de catalog [1] ale GSMP de putere: $P_N = 22[kW]$ se obțin valorile:

$$R_1 = 1.6[\Omega], L_d = 0.07[H], L_q = 0.08[H], \Psi_{MP} = 3.3[Wb].$$

Din sistemul de ecuații ale GSMP

$$\left\{ \begin{array}{l} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\ M_G = -0.01I_dI_q + \Psi_M I_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \end{array} \right.$$

se obțin:

$$\text{puterea- } P_{GSMP}(\omega, R) = 27225 \cdot R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \text{ și}$$

$$\text{momentul- } M_{GSMP}(\omega, R) = -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

Cele doua functii: $P_{GSMP}(R, \omega)$ și $M_{GSMP}(R, \omega)$ depind de : R – rezistența de sarcină și ω – VUM.

Se analizează doua cazuri:

- 1) viteza vântului constantă în timp și
- 2) viteza vântului variabilă în timp

9.2.2 Viteza vântului constantă în timp: $V = 16 [m/s]$

În acest caz momentul la turbina devine:

$$M_{TV}(\omega) = 23.584 \cdot (((16)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16)/\omega - 0.0525)} \cdot (16)^3/\omega$$

și momentul la GSMP este [1]:

$$M_{GSMP}(\omega, R) = 5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

La $R = 444. [\Omega]$ se poate considera ca momentul generatorului depinde liniar de ω , așa ca în figura 9.2.

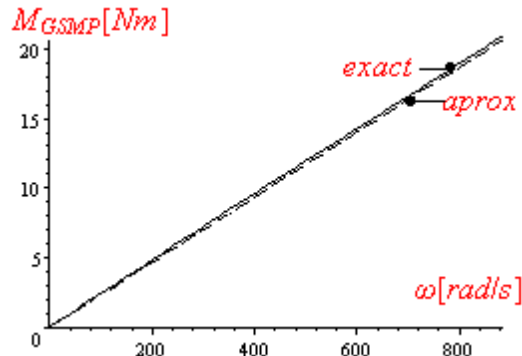


Fig.9.2. Dependenta momentului generatorului de ω

În aceste condiții se poate aproxima momentul generatorului sub forma:

$$M_{GSMP}(\omega, R) = 2.3738 \times 10^{-2} \cdot \omega$$

În figura 9.3 este reprezentată dependența momentului de rezistență de sarcină, la $\omega = \text{ct}$:

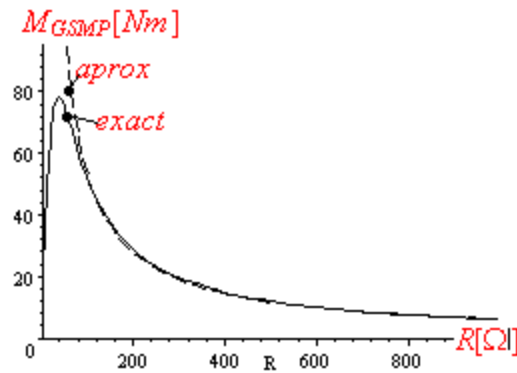


Fig.9.3. Variația momentului generatorului cu R

În regim staționar, la $M_{TV} = M_{GSMP}$ se obține:

$$23.584 \cdot (((16)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16)/\omega - 0.0525)} \cdot (16)^3/\omega =$$

$$5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2},$$

sau simplificat:

$$23.584 \cdot (((16.)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot$$

$$e^{-98.06((16.)/\omega-0.0525)} \cdot (16.)^3/\omega = 7.0263 \cdot \omega \cdot R^{-0.93348}$$

Din egalitatea momentelor se poate determina dependența rezistenței de sarcină de ω , obținându-se:

$$R(\omega) = 72.736 \frac{\omega^3}{1.6 \times 10^7 - 21231 \cdot \omega} \exp\left(-0.24515 \frac{-6400 + 21 \cdot \omega}{\omega}\right)$$

cu reprezentarea grafică dată în figura 9.4.

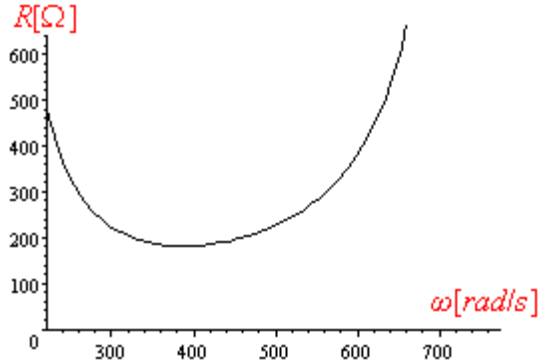


Fig.9.4. Dependența lui R de ω

Puterea dată de GSMP, P_{GSMP} , se calculează cu relația [1]:

$$P_{GSMP}(\omega) = 27225 \cdot R \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot R^2 + 2000 \cdot R + 1600}{(1250 \cdot R^2 + 4000 \cdot R + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2}$$

și la $\omega = 555 [rad/s]$ are graficul dat în figura 9.5.

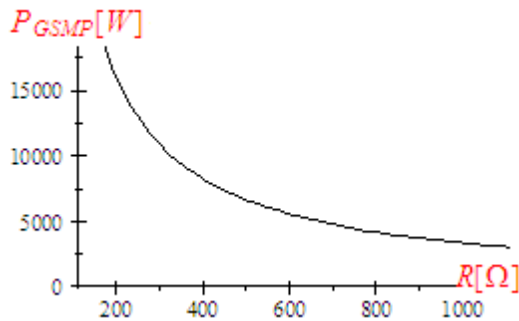


Fig.9.5. Dependența puterii de R

Având în vedere această dependență a puterii de R, se propune pentru funcția: $P_{GSMP}(R(\omega))$ relația:

$$P_{GSMP}(R(\omega)) = a/R(\omega)^b$$

sau

$$P_{GSMP}(\omega) = a/R(\omega)^b = 2.9018 \times 10^6 / \left(72.736 \frac{\omega^3}{1.6 \times 10^7 - 21231 \cdot \omega} \exp\left(-0.24515 \frac{-6400 + 21 \cdot \omega}{\omega}\right) \right)^b$$

În figura 9.6 se dau cele doua caracteristici ale puterii: $P_{GSMP}(\omega)$ și $P_{TV}(\omega)$:

$$P_{TV}(\omega) = 23.584 \cdot (((16)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16)/\omega-0.0525)} \cdot (16)^3$$

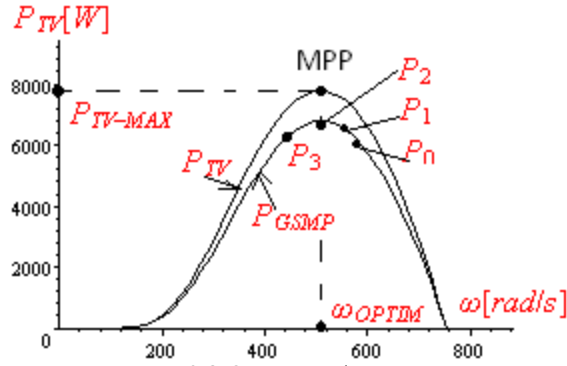


Fig.9.6. Caracteristicile puterii

Din anularea derivatelor puterilor: $dP_{TV}(\omega)/d\omega = 0$ și $dP_{GSMP}(\omega)/d\omega = 0$ se obține același

ω_{OPTIM} :

$$\frac{d(23.584 \cdot ((16)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16)/\omega - 0.0525)} \cdot (16)^3}{d\omega} = 0 \quad \text{cu soluția:}$$

$$\{\omega_{OPTIM} = 509.09[\text{rad/s}]\}$$

9.2.3. Determinarea maximului energetic

Determinarea maximului energetic se poate face în două moduri :

1) prin încărcarea succesivă a generatorului cu diferite valori a rezistenței de sarcină și măsurarea puterii la aceasta în regim staționar;

2) prin măsurarea puterii și turației la generator pentru o rezistență de sarcină constantă; În primul caz după fiecare modificare a sarcinii la generator se citește puterea la acesta numai după ce s-a terminat procesul tranzitoriu și din acest motiv această probă necesită un timp de ordinul orelor ,practic inutilizabil pentru exploatare.

În cazul al doilea puterea dată de turbină este suma puterii date de generator și a energiilor cinetice a maselor în mișcare de rotație. Pentru calculul acestor energii este necesară și cunoașterea cât ma exactă a valori momentului de inerție echivalent.

Cazul 1) -se măsoară puterea dată de generator;

La o rezistență de sarcină dată se măsoară ,în exploatare și se calculează în simulări puterea dată de generator.

Punctul inițial, P_0 , are coordonatele, $\omega(0)$ și $R(0)$ calculate din sistem:

$$\begin{cases} M_{TV} = M_{GSMP} \\ 27225 \cdot \mathbf{R} \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot \mathbf{R}^2 + 2000 \cdot \mathbf{R} + 1600}{(1250 \cdot \mathbf{R}^2 + 4000 \cdot \mathbf{R} + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = P_{GSMP} \\ \omega = \omega(0) \end{cases}$$

sau la $\omega(0) = 550.07[\text{rad/s}]$ se obține:

$$\begin{cases} 23.584 \cdot (((16)/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16)/\omega - 0.0525)} \cdot (16)^3 \\ = 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot \mathbf{R} + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (\mathbf{R})^2 + 2000 \cdot (\mathbf{R}) + 1600}{(1250 \cdot (\mathbf{R})^2 + 4000 \cdot (\mathbf{R}) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ 27225 \cdot \mathbf{R} \cdot \omega^2 \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot \mathbf{R}^2 + 2000 \cdot \mathbf{R} + 1600}{(1250 \cdot \mathbf{R}^2 + 4000 \cdot \mathbf{R} + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = P_G \\ \omega = 550.07 \end{cases}$$

cu soluția: $\{\omega(0) = 550.07[\text{rad/s}], R(0) = 432.17[\Omega], P_{G-0} = 7190.4[W]\}$

Prin micșorarea rezistenței de sarcină la valoarea $R_1 = 400[\Omega]$ VUM se va micșora, după un timp $t=3333$ [s] la valoarea $\omega_1 = 534.64[\text{rad/s}]$, așa cum rezultă din ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP}$$

sau

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{(16)}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(16)}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (16)^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot \mathbf{400} + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (\mathbf{400})^2 + 2000 \cdot (\mathbf{400}) + 1600}{(1250 \cdot (\mathbf{400})^2 + 4000 \cdot (\mathbf{400}) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 550.07 \end{array} \right.$$

Variația în timp a lui ω este dată în figura 9.7.

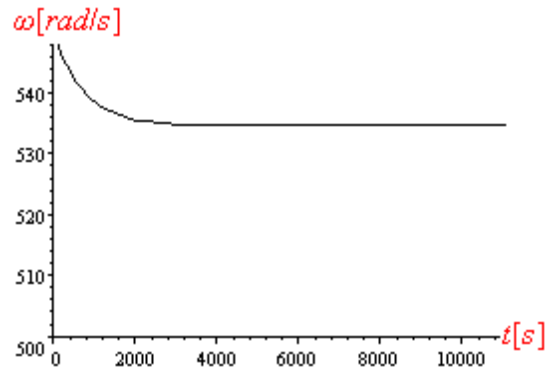


Fig.9.7. Variația în timp a lui ω

La această valoare a VUM puterea la generator are valoarea $P_{GSMP-1} = 7653.8[W]$, obținută în simulări din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 23.584 \cdot \left(\frac{(16)}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(16)}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (16)^3 = \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot \mathbf{R} + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (\mathbf{R})^2 + 2000 \cdot (\mathbf{R}) + 1600}{(1250 \cdot (\mathbf{R})^2 + 4000 \cdot (\mathbf{R}) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ 27225 \cdot \mathbf{R} \cdot \omega^2 \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot \mathbf{R}^2 + 2000 \cdot \mathbf{R} + 1600}{(1250 \cdot \mathbf{R}^2 + 4000 \cdot \mathbf{R} + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = P_G \\ \omega = 534.64 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = 534.64[\text{rad/s}], \\ R_1 = 400.06[\Omega], \\ P_{G-1} = 7653.8[W] \end{array} \right.$$

iar în exploatare, prin măsurare. Micșorând rezistența de sarcină la valoarea $R_2 = 350[\Omega]$, ecuația mișcării devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{(16)}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(16)}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (16)^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot \mathbf{350} + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (\mathbf{350})^2 + 2000 \cdot (\mathbf{350}) + 1600}{(1250 \cdot (\mathbf{350})^2 + 4000 \cdot (\mathbf{350}) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 534.64 \end{array} \right.$$

și se obține la $t=5555$ [s]: $\omega(5555) = 503.47$ [rad/s]. La această valoare a VUM, puterea debitată de generator este: $P_{GSMP-2} = 7737.7$ [W]

Micșorând, în continuare, rezistența de sarcină la valoarea $R_3 = 300$ [Ω] se obține:

$$\omega(5555) = 454.01$$
 [rad/s] și $P_{GSMP-3} = 7313.3$ [W]

La rezistențe de sarcină R_1, R_2 și R_3 puncte de funcționare sunt: P_1, P_2 și P_3 , figura 9.6.

Din rezultatele de mai sus se observă că puterea maximă la generator $P_{GSMP-2} = 7737.7$ [W], se obține la $\omega_{OPTIM} = 503.47$ [rad/s], în punctul P_2 , figura 9.6.

S-a putut determina, astfel, VUM optimă, însă timpul necesar pentru estimarea acestei valori este foarte mare: $t = 3333 + 5555 + 5555 = 14443$ [s] = 4 [h] și aceasta în condițiile unei viteze a vântului constante în timp. La viteze ale vântului variabile în timp, acest timp necesar pentru determinarea lui ω_{OPTIM} este inacceptabil de mare, deoarece viteza vântului își modifică, între timp, valoarea. Din acest motiv, se impun găsirea unor soluții mult mai rapide pentru determinarea lui ω_{OPTIM} .

Cazul 2) -se măsoară puterea și turația la generator;

La o rezistență de sarcină mai mare decât valoarea critică R^* se fac măsurători de putere și turație la generator. Valoarea rezistenței critice se obține din momentul maxim al turbinei:

M_{TV-MAX} , care se calculează prin anularea derivatei momentului :

$$\frac{dM_{TV}(\omega)}{d\omega} = 0, \text{ cu soluția: } \omega = 450.28$$
 [rad/s]

Se obține $R^* = 297.87$ [Ω] și deci se poate considera, în ecuația mișcării

$$R = 5 \cdot R^* = 1489.4$$
 [Ω], obținându-se

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{16}{\omega} - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \cdot e^{-98.06 \left(\frac{16}{\omega} - 0.0525 \right)} \cdot (16)^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 1489.4 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (1489.4)^2 + 2000 \cdot (1489.4) + 1600}{(1250 \cdot (1489.4)^2 + 4000 \cdot (1489.4) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 450. \end{array} \right.$$

Puterea P_{GSMP} la VUM la momentul t_k , $\omega = \omega(t_k)$ se obține din sistemul :

$$\left\{ \begin{array}{l} 27225 \cdot 1489.4 \cdot \omega^2 \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot 1489.4^2 + 2000 \cdot 1489.4 + 1600}{(1250 \cdot 1489.4^2 + 4000 \cdot 1489.4 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} = P_{GSMP} \\ \omega = \omega(t_k) \end{array} \right.$$

La momentele de timp $t = 50, 100, \dots, 350$ [s] se obțin VUM : $\omega(50), \omega(100), \dots, \omega(350)$ și puterea echivalentă a turbinei rezultă din :

$$P_{TV-ECH} = P_{GSMP} + W_{MEC} / \Delta t = P_{GSMP} + J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2\Delta t)$$

unde: J – momentul de inerție echivalent; ω_k – VUM la momentul t_k ; ω_{k-1} – VUM la momentul t_{k-1} . $J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2\Delta t)$

unde: J – momentul de inerție echivalent; ω_k – VUM la momentul t_k ; ω_{k-1} – VUM la momentul t_{k-1} .

Se obține puterea maximă la $\omega_{OPTIM} = \omega(250) = 511.67$ [rad/s], VUM având o variație în timp așa ca în figura 9.8

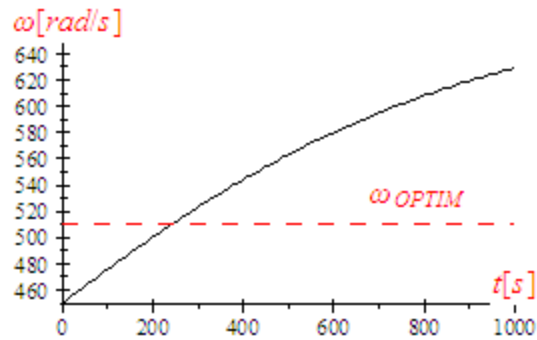


Fig.9.8.Variația în timp a VUM.

În concluzie ,la $V= ct$ și cu $\omega(0)$ în zona lui ω_{OPTIM} s-a putut determina VUM optimă într-un timp scurt : sub 350[s].

9.2.4.Viteza vântului variabilă în timp

VITEZA VÂNTULUI SCADĂ ÎN TIMP SINUSOIDAL ATENUAT

La o viteză $V(t)$ descrescătoare în timp, cu $e^{-t/3600}$, figura 9.9, de formă sinusoidală de perioadă $T = 35$ [s], se obține

$$V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}$$

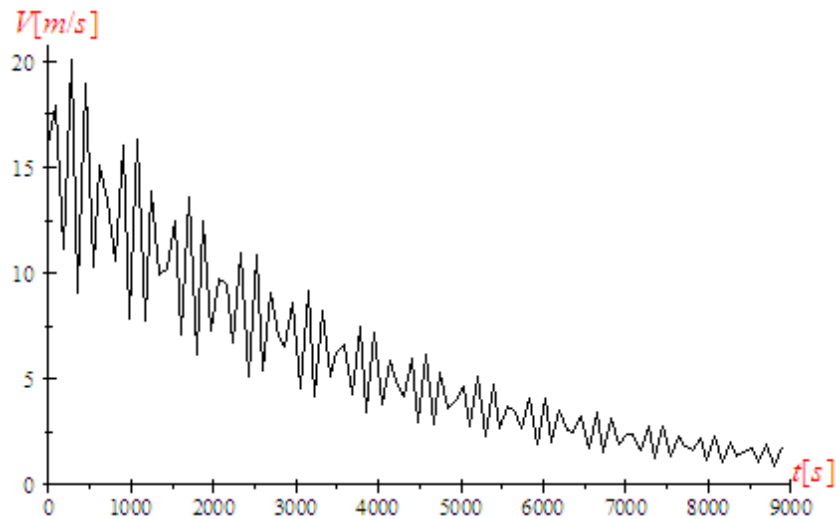


Fig.9.9.Variația vitezei vântului în timp

Punctul inițial are coordonatele:

$$\{\omega(0) = 550.07 [\text{rad} / \text{s}], R(0) = 432.17 [\Omega], P_{G-0} = 7190.4 [W]\}.$$

Rezistența de sarcină se modifică la valoarea $R_1 = 400 [\Omega]$. Din ecuația mișcării

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot \left(\frac{((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})}{\omega - 0.0525} \right)^3 - \\ 5445 \cdot \omega^2 (5 \cdot 400 + 8) \cdot \frac{4 \cdot \omega^2 + 625 \cdot (400)^2 + 2000 \cdot (400) + 1600}{(1250 \cdot (400)^2 + 4000 \cdot (400) + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ \omega(0) = 550.07 \end{array} \right.$$

se obțin VUM: $\omega(100), \omega(200), \dots, \omega(1100)$ și nu se găsește un maxim al puterii la generator, valoarea acesteia scăzând în timp, așa ca și VUM, figura 9.9.

Prin urmare numai din măsurarea puterii la generator nu se poate deduce VUM optimă, ω_{OPTIM} .

Pe intervalul $\Delta t = 0 \div 1111[s]$ puterea la turbină variază între limitele;

$$P_{MAX} = 23.584 \cdot \left(\frac{(22)}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(22)}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot (22)^3 \quad \text{și}$$

$$P_{MIN} = 23.584 \cdot \left(\frac{(10)e^{-1111/3600}}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(10)e^{-1111/3600}}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot (10e^{-1111/3600})^3$$

fiind în zona hașurată din figura 9.10.

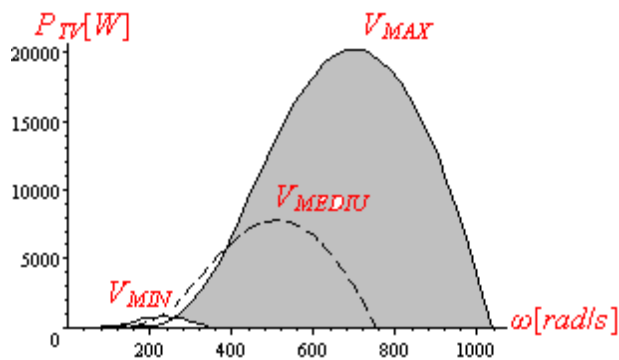


Fig.9.10. Caracteristicile puterii

Puterea la viteza medie: $V_{MEDIU} = 16[m/s]$ este:

$$P_{MEDIU} = 23.584 \cdot \left(\frac{(16)}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(16)}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot (16)^3$$

Considerând și variațiile energiei cinetice ΔW_{MEC} puterea echivalentă a turbinei rezultă din

$$P_{TV-ECH} = P_{GSMP} + W_{MEC}/\Delta t = P_{GSMP} + J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/(2\Delta t)$$

unde: J – momentul de inerție echivalent; ω_k – VUM la momentul t_k ; ω_{k-1} – VUM la momentul t_{k-1} .

La $\Delta t = t_k - t_{k-1} = 100[s]$ și cu VUM anterior calculate nu se obține un maxim. Acest fapt se poate vedea și din variația în timp a VUM, figura 9.9, aceasta scăzând mereu fără a se stabiliza la o anumită valoare, ca în cazul $V=ct$.

În această situație se pune următoarea problemă :-cum să se încarce generatorul pentru a obține o energie captată maximă pe intervalul analizat : $t = 9000[s]$?

9.2.5. Determinarea optimului energetic printr-o probă la funcționarea în gol

Variația VUM în timp, la funcționarea în gol, se obține din ecuația mișcării

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right)^3 \\ \omega(0) = 550.07 \end{array} \right.$$

Se analizează 3 cazuri cu valori diferite pentru $\omega(0)$

Cazul 1) $\omega(0) = 550.07 [rad / s]$

La funcționarea în gol VUM crește de la $\omega(0) = 550.07 [rad / s]$ la $\omega(888) = 645 [rad / s]$ la $V(t) = 16 - 6 \sin 0.17943t$, respectiv la $\omega(666) = 622 [rad / s]$ la $V(t) = 16 [m / s]$, figura 9.10. În acest interval de timp și cu valoarea $\omega(0) = 550.07 [rad / s]$ puterea nu are un maxim, aceasta deoarece valoarea lui $\omega(0)$ este mai mare decât valoarea lui ω_{OPTIM} așa cum se va demonstra în cele ce urmează :

La funcționarea în gol și cu $\omega(0) = 550.07 [rad / s]$ variația VUM în timp este dată în figura 9.11.

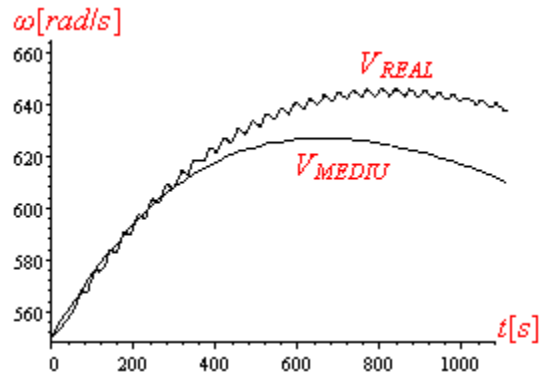


Fig.9.11. Variația VUM în timp la funcționarea în gol și cu $\omega(0) = 550.07 [rad / s]$

Cazul 2) $\omega(0) = 222 [rad / s]$

Pentru $\omega(0) = 222 [rad / s]$ ecuațiile mișcării cu $V_{REAL} = V(t) = 16 - 6 \sin 0.17943t$ și $V_{MEDIU} = 16 [m / s]$ devin:

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}}{\omega - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right)^3 \\ 50 \cdot a \cdot \frac{da}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{(16)e^{-t/3600}}{a - 0.0525} + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\frac{(16)e^{-t/3600}}{a - 0.0525} \right)} \cdot \left((16)e^{-t/3600} \right)^3 \\ \omega(0) = 222 \\ a(0) = 222 \end{array} \right.$$

și se obține variația în timp a VUM la $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}$ și la $V(t) = V_{MEDIU} = 16e^{-t/3600}$ [m/s], figura 9.12.

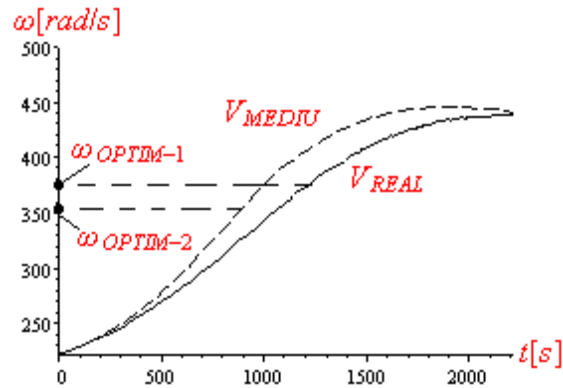


Fig.9.12. Variația VUM în timp la funcționarea în gol și cu $\omega(0) = 222$ [rad/s]

Considerând momentele de timp $t=300,600\dots2100$ [s] și, deci cu $\Delta t = t_k - t_{k-1} = 300$ [s] se obțin VUM, respectiv variațiile energiilor cinetice, adică puterea dată de TV, pentru 2 variante:

$$\text{varianta 1) } V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600}$$

$$\text{varianta 2) } V(t) = V_{MEDIU} = 16e^{-t/3600}$$

Valoarea maximă a puterii se obține la $\omega(1200) = 373.19$ [rad/s] la

$$V(t) = 16 - 6 \sin(0.17943t) \text{ și cu } a(900) = 355.29$$
 [rad/s] la $V(t) = V_{MEDIU} = 16$ [m/s]

într-un timp scurt, sub 1500 [s] = 0.41667 [h], față de 4 [h] la o probă cu generatorul în sarcină. Aceasta motivează folosirea testelor cu generatorul în gol la determinarea în timp real a VUM optime.

Cazul 3) $\omega(0) = 333$ [rad/s]

Din graficul funcției $\omega(t)$, figura 9.13 și din variația energiilor cinetice se determină

$$\omega_{OPTIM} = 441.11$$
 [rad/s]

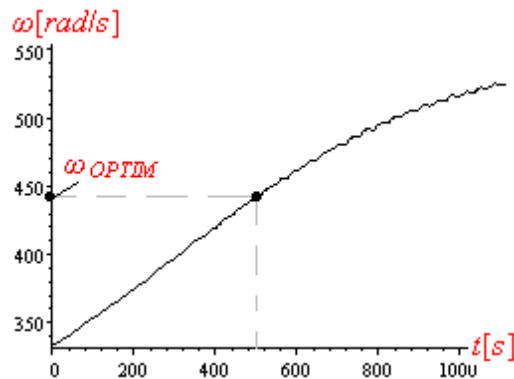


Fig.9.13. Variația lui ω în timp la $\omega(0) = 333$. [rad/s]

Putera P_{TV-ECH} se obține din variația energiilor cinetice, astfel:

$$P_{TV-ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2\Delta t)$$

La $\omega_{OPTIM} = \omega(500) = 441.11$ [rad/s] viteza vântului avea valoarea :

$$V(500) = (16 - 6 \sin(0.17943 \cdot 500))e^{-500/3600} = 8.7872$$
 [m/s]

Valoarea vitezei vântului $V(500) = 8.7872 [m/s]$ depinde de momentul de timp la care s-a făcut măsurarea, în cazul de față $t=500[s]$. La momentul $t=500+T/2$ viteza vântului are o valoare maximă $V_M = 18.972 [m/s]$, cum se observă din figura 9.14. Se impune deci, a stabili un procedeu de estimare a vitezei la momentul t_k .

9.2.5.1. Determinarea vitezei $V(t_k)$

La momentul de timp t_k valoarea vitezei vântului este în intervalul: $V(t_k) \in [V_m = 8.7872 [m/s], V_M = 18.972 [m/s]]$, figura 9.14, deoarece funcția $V(t)$ are o variație cvasiperiodică de perioadă T .

Se propun două posibilități de calcul a vitezei $V(t_k)$:

1) considerând valoarea medie, V_{MEDIU} , pe perioada T ,

$$V_{MEDIU} = \int_{482.5}^{517.5} (16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600} dt / 35 = 13.921 [m/s] \text{ sau}$$

2) definind o viteză echivalentă V_{ECH} calculată prin integrare sub forma:

$$V_{ECH} = \sqrt[n]{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^n dt}, \text{ unde factorul } n \text{ se deduce din ecuația:}$$

$$\omega_{OPTIM} = k \cdot V_{ECH}, \text{ } k - \text{constantă dimensională a turbinei.}$$

La $V(t) = (16 - 6 \sin(0.17943t))$ se obține $\omega_{OPTIM} = 552. [rad/s]$, $k = 31.817$ și $n = 4$:
Prin urmare, viteza echivalenta se poate calcula cu relația:

$$V_{ECH} = \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^4 dt} = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_{482.5}^{517.5} ((16 - 6 \sin(0.17943t)) e^{-t/3600})^4 dt} = 15.217 [m/s]$$

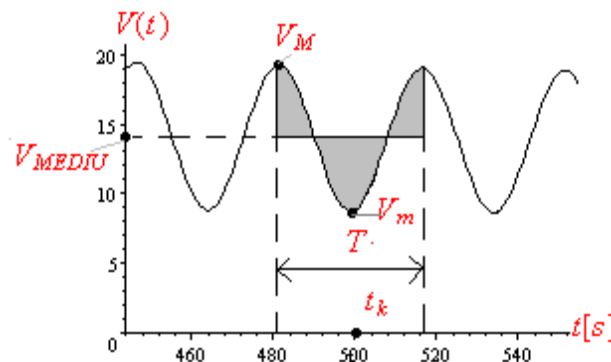


Fig.9.14. Viteza vântului la momentul t_k

Cu $V(t_k)$ astfel calculată se determină relația de legătură dintre ω_{OPTIM} și viteza vântului de forma:

$$\omega_{OPTIM} = k \cdot V_{ECH}$$

sau la $\omega_{OPTIM} = 441.11 [rad/s]$ și $V_{ECH} = 15.217 [m/s]$ rezultă:

$$\omega_{OPTIM} = 28.988 \cdot V_{ECH}$$

Prin urmare s-a putut stabili dependența lui ω_{OPTIM} de viteza vântului, acest fapt fiind deosebit de util în procesul de conducere. Această calibrare se face periodic în timp, de câteva ori anual.

9.2.5.2. Influența valorii VUM inițiale asupra valorii lui ω_{OPTIM}

Valoarea inițială a VUM, $\omega(0)$, impune timpul la care se obține puterea maximă și deci, valoarea lui ω_{OPTIM} , așa cum se poate observa din cele 3 exemple de mai jos

Exemplul 1-La $\omega(0) = 333 [rad / s]$ se obține $\omega_{OPTIM1} = 462.24 [rad / s]$ la $t=600[s]$:
Viteza echivalentă a vântului, la $t=600[s]$, are valoarea

$$V_{ECH1} = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_{582.5}^{617.5} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^4 dt} = 14.829 [m/s]$$

și din $\omega_{OPTIM1} = k_1 \cdot V_{ECH}$ se obține $k_1 = 31.171$.

Exemplul 2-La $\omega(0) = 300 [rad / s]$ se obține $\omega_{OPTIM2} = 417.55 [rad / s]$, la $t=600[s]$ și se obține $k_2 = 28.158$.

Exemplul 3-La $\omega(0) = 222 [rad / s]$ se obține $\omega_{OPTIM3} = 373.19 [rad / s]$ la $t=1200[s]$, viteza echivalentă fiind:

$$V_{ECH2} = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_{1182.5}^{1217.5} ((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600})^4 dt} = 12.53 [m/s]$$

și se obține $k_3 = 29.784$.

Pentru cele 3 exemple, anterior prezentate, se poate observa evoluția în timp a VUM cu ecuațiile mișcării prezentate mai jos

$$\left\{ \begin{array}{l} 50 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left(\left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right) / \omega - 0.0525 \right)} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right)^3 \\ 50 \cdot a \cdot \frac{da}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left(\left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right) / a - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right) / a - 0.0525 \right)} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right)^3 \\ 50 \cdot b \cdot \frac{db}{dt} = 23.584 \cdot \left(\left(\left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right) / b - 0.0525 \right) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06 \left(\left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right) / b - 0.0525 \right)} \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943t))e^{-t/3600} \right)^3 \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} a(0) = 300 \\ b(0) = 333 \\ \omega(0) = 222 \end{array}$$

Valorile optime ale VUM sunt:

$$\omega_{OPTIM1} = b(600) = 462.24 [rad/s]$$

$$\omega_{OPTIM2} = a(600) = 417.55 [rad/s]$$

$$\omega_{OPTIM3} = \omega(1200) = 373.19 [rad/s]$$

și se obțin la momentele de timp t_1, t_2, t_3 , așa cum se observă din figura 9.15.

Valorile diferite ale lui ω_{OPTIM} se exemplifică prin faptul că și viteza vântului, modificându-se în timp, ia diferite valori :

$$V(600) = 9.7487 [m/s] \text{ -la } t = 600 [s]$$

$$V(1200) = 7.1947 [m/s] \text{ -la } t = 1200 [s]$$

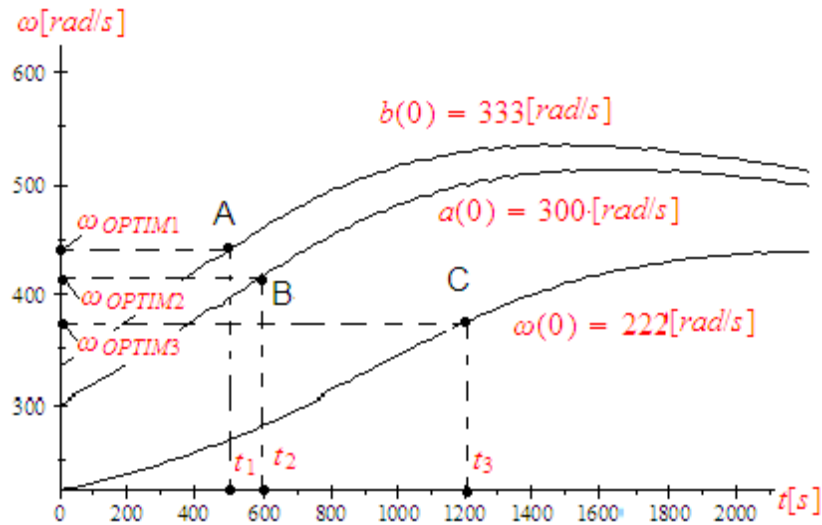


Fig.9.15. Valorile optime ale VUM.

Se observă din figura 9.15 că în punctele A, B, C produsele $\omega \cdot \frac{d\omega}{dt}$ sunt maxime, adică puterea P_{TV} este maximă, așa cum rezultă din ecuația mișcării prin înmulțire cu ω :

$$J \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

Cunoscând dependența dintre ω_{OPTIM} și valoarea vitezei vântului se poate asigura o funcționare energetic optimă prin corelarea sarcinii la generator cu valoarea măsurată a vitezei vântului, prin cele două posibilități: V_{MEDIU} și V_{ECH} .

Intervalele de timp la care se măsoară VUM, în exploatare, sau la funcționarea în gol sunt diferite ca și valoare.

Intervalele de timp $\Delta t = t_k - t_{k-1}$, în exploatare, se redimensionează în funcție de două elemente esențiale:

- 1) momentul de inerție echivalent J și
- 2) perioada de oscilație a vitezei vântului.

9.2.5.3. Importanța cunoașterii momentului de inerție echivalent J

Valoarea momentului de inerție echivalent la arborele generatorului intervine în:

- 1) ecuația mișcării și impune variația în timp a turației;
- 2) calculul variației energiilor cinetice $\Delta W = J(\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2$.

În cazul 1 valoarea lui J este importantă în simulări, dar în exploatare variația în timp a turației/VUM se obține prin măsurători directe și, deci, nu este necesară cunoașterea valorii lui J . În cazul 2 valoarea lui J este importantă în calculul valorii momentane a puterii turbinei în situația în care aceasta se calculează ca suma dintre variațiile energiilor cinetice și a puterii dată de generator:

$$P_{TV-ECH} = P_{GSMP} + W_{MEC} / \Delta t = P_{GSMP} + J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2\Delta t)$$

La probele de gol, însă nu este necesară cunoașterea exactă a valorilor lui J deoarece importanță este valoarea lui ω la care P_{TV-ECH} este maximă și nu valoarea maximă a puterii P_{TV-ECH} :

$$P_{TV-ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2\Delta t) = k \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)$$

unde k poate lua orice valoare.

Acest fapt se observă și din figura 9.16, la care ω_{OPTIM} are aceeași valoare la 3 valori diferite ale lui J .

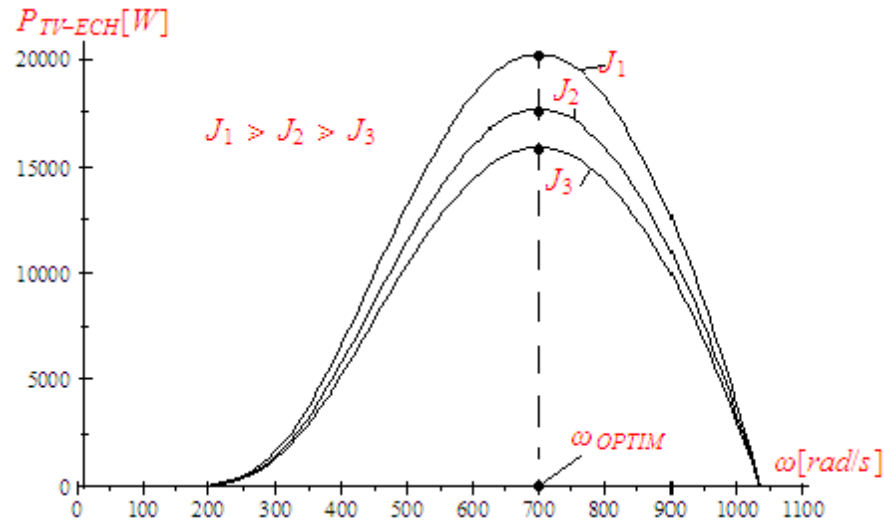


Fig.9.16 Zona de optim a puterii

9.2.5.4. Importanța modelelor matematice în optimizarea funcționării sistemelor eoliene.

Modelele matematice pentru turbină și generator sunt date de obicei de firmele constructoare și sunt valabile în anumite condiții de laborator bine precizate. În exploatarea acestor condiții se modifică mereu în funcție de datele meteo: precizia instrumentelor de măsură, solicitările fizico-chimice și prin urmare, modelele matematice ar trebui mereu modificate și adaptate noilor condiții, fapt imposibil de realizat în practică, mai ales că viteza vântului se modifică rapid în timp și imprevizibil.

Din acest motiv determinarea exactă a valorilor lui ω_{OPTIM} nu se poate realiza pe baza modelelor matematice.

Modelele matematice sunt, totuși, utile în determinarea unor legături de ordin calitativ ce există între mărimile fundamentale și se pot calcula, pe baza lor, valorile aproximative ale lui ω_{OPTIM} .

9.2.5.5. Ponderea momentului de frecări

Frecările în lagare și cu aerul determină un moment de franare, M_F , care intervine în ecuația mișcării sub forma:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_F$$

Prin înmulțire cu ω și integrare se obține:

$$J \cdot \omega \cdot d\omega = \omega \cdot (M_{TV} - M_F) dt$$

sau

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = \int_0^T (P_{TV} - P_F) dt$$

La $P_{TV} = ct$ și $P_F = ct$, pe perioada T , rezultă:

$$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2 = (P_{TV} - P_F) T$$

unde: J – momentul de inerție echivalent; ω_k – VUM la momentul t_k ; ω_{k-1} – VUM la momentul t_{k-1} .

Așadar, puterea P_{TV} , pe perioada T , se regăsește în variația energiilor cinetice, pe perioada T :

$J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / 2$ și în energia pierdută:

$$P_{TV} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2T) + P_F$$

Deoarece puterea P_F este greu de estimat, în practică se determină ω_{OPTIM} , la neglijarea

pierderilor și acest fapt duce la o sub evaluare a puterii reale, $P_{TV-REAL}$, așa cum se observă din figura 9.17.

Influența valorii puterii corespunzătoare frecărilor, P_F , asupra lui ω_{OPTIM} este redusă: sub 1%, așa cum rezultă din simularile obținute cu M_F de forma:

$$M_F = \sum k_i \cdot \omega_i^2 + M_{F-lagăre}$$

unde: $\sum k_i \cdot \omega_i^2$ -momentele echivalente frecărilor cu aerul; $M_{F-lagăre}$ -momentele echivalente frecărilor în lagăre.

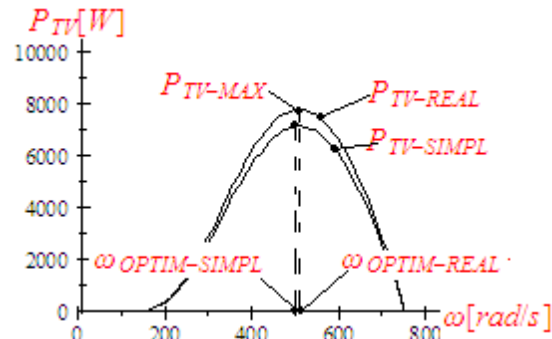


Fig.9.17 Puterile reale și cele simplificate

Rezultatele obținute au o precizie ridicată, similară claselor de precizie a instrumentelor de măsură.

Dat fiind faptul că în procesul de conducere intervine numai ω_{OPTIM} și nu valoarea maximă a puterii: P_{TV-MAX} , metoda propusă nu este influențată de pierderile prin frecări. În concluzie așa cum sa precizat și la cele referitoare la valoarea momentului de inerție, J , estimarea pierderilor nu este necesară în determinarea lui ω_{OPTIM} .

9.2.6 Algoritm de conducere

Cunoscând, la o anumită valoare a vitezei vântului, VUM optimă, ω_{OPTIM} se poate realiza o conducere optimală a sistemului eolian în sensul următor:

- prin măsurarea vitezei vântului se calculează viteza echivalentă: V_{ECH} și pe baza ei se determină ω_{OPTIM} ;
- se compară VUM curentă, ω , cu ω_{OPTIM} și prin intermediul unui regulator se aduc la egalitate cele două mărimi;

În concluzie, algoritmul de conducere, figura 9.18, este următorul:

- 1) se înregistrează viteza vântului și se determină V_{ECH} ;
- 2) se determină ω_{OPTIM} din $\omega_{OPTIM} = k \cdot V_{ECH}$;
- 3) se menține, prin sarcina la GSMP, VUM în jurul lui ω_{OPTIM} .

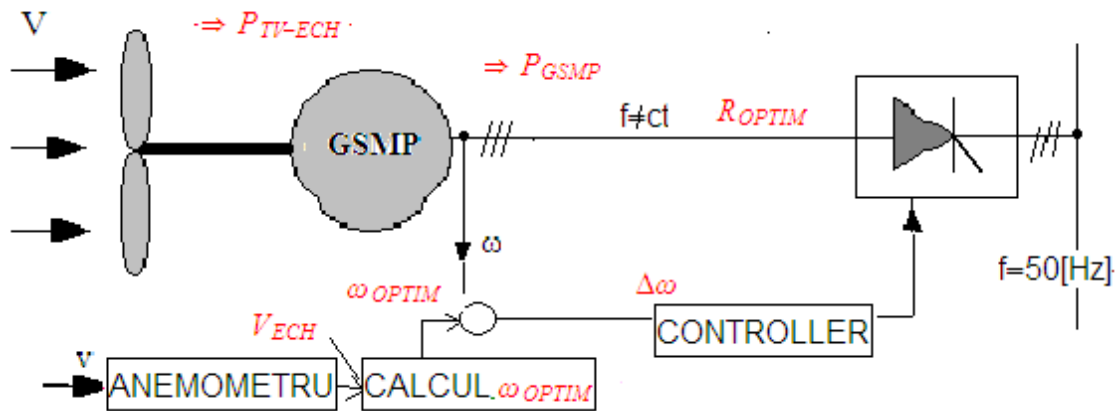


Fig.9.18. Conducerea sistemului TV+GSMP

Diferențele ce apar la estimarea lui ω_{OPTIM} sunt generate de:

- 1) Valorile perioadelor de eșantionare ce au valori diferite în funcție de evoluția în timp a vitezei vântului;
- 2) Defazașele în timp dintre viteza vântului și prescrierea valorilor optime;
- 3) Metodele de estimare a valorilor optime în timp real.

Din simulările prezentate rezultă:

- 1) Determinarea VUM optime energetic este o problemă complexă la viteze ale vântului variabile în timp.
- 2) Determinarea VUM optime nu se poate face doar prin cunoașterea valorii vitezei medii a vântului și se impune înregistrarea variației reale a vitezei vântului, adică cunoașterea funcției $V(t)$.
- 3) În calculul valorii VUM optime intervin integralele vitezei vântului la puterile 4,5 și 6, integrale care se pot calcula relativ simplu, deoarece se cunoaște, din măsuratori funcția $V(t)$.

9.3. Determinarea puterii TV prin calculul derivatei VUM

La funcționarea în gol a TV energia vântului este transformată în energie cinetică a maselor în mișcare de rotație. Variația energiilor cinetice a maselor în mișcare de rotație raportată la valoarea intervalului de timp Δt în care se fac măsurătorile de turație dă valoarea puterii generate de TV, la VUM la care s-au făcut măsurătorile.

Din ecuația mișcării:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{TV}$$

prin înmulțire cu ω se obține

$$J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = \omega \cdot M_{TV} = P_{TV}$$

unde: $J = 45 [kg \cdot m^2]$ – momentul de inerție echivalent;

$$P_{TV}(\omega) = 1191.5 (V / \omega - 0.02) e^{-98.06(V/\omega)} V^3 \text{ -caracteristica puterii folosită în simulări[1];}$$

V – viteza vântului; ω – VUM .

Măsurând VUM, la o funcționare în gol, la intervale de timp

$$\Delta t = 1000 [s], 100 [s], 50 [s], 35 [s], \text{ dependete de valoarea momentului de inerție } J \text{ și de}$$

variația vitezei vântului în timp, se deduce puterea turbinei prin calculul derivatei VUM și a

produsului $J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega$.

Metoda determinării puterii TV se prezintă în două variante:

- 1) la viteza vântului constantă în timp și
- 2) la viteza vântului variabilă în timp.

9.3.1 Studiul de caz la $V=22[m/s]$

La momentele de timp $t=100,200,\dots,800[s]$, VUM măsurate au valorile

$$\omega(100) = 621.62[rad/s].$$

$$\omega(200) = 643.37[rad/s].$$

$$\omega(300) = 665.07[rad/s].$$

$$\omega(400) = 686.58[rad/s].$$

$$\omega(500) = 707.75[rad/s].$$

$$\omega(600) = 728.44[rad/s].$$

$$\omega(700) = 748.57[rad/s].$$

$$\omega(800) = 768.05[rad/s].$$

Cu aceste valori se calculează puterea TV

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega$$

sau

$$P_{TV} = 45 \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \cdot \omega$$

unde: $\Delta t = 100[s]$

Derivata $\frac{d\omega}{dt}$ s-a aproximat prin $\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ la valoarea medie a VUM, ω_m , de forma

$$\omega_m = (\omega(t_{k-1}) + \omega(t_k))/2$$

unde:

$\omega(t_{k-1})$ - VUM la momentul t_{k-1} ; $\omega(t_k)$ - VUM la momentul t_k

Se obțin, astfel, rezultatele:

$$\omega_m = (621.62 + 643.37)/2 = 632.5[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{643.37 - 621.62}{100} = 0.2175$$

$$P_{TV} = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 632.5 \cdot 0.2175 = 6190.6[W]$$

$$\omega_m = (643.37 + 665.07)/2 = 654.22[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{665.07 - 643.37}{100} = 0.217$$

$$P_{TV} = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 654.22 \cdot 0.217 = 6388.5[W]$$

$$\omega_m = (665.07 + 686.58)/2 = 675.83[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{686.58 - 665.07}{100} = 0.2151$$

$$P_{TV} = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 675.83 \cdot 0.2151[W]$$

$$\omega_m = (686.58 + 707.75)/2 = 697.17[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{707.75 - 686.58}{100} = 0.2117$$

$$P_{TV} = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 697.17 \cdot 0.2117 = 6641.6[W]$$

$$\omega_m = (707.75 + 728.44)/2 = 718.1[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{728.44 - 707.75}{100} = 0.2069$$

$$P_{TV} = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 718.1 \cdot 0.2069 = 6685.9[W]$$

$$\omega_m = (728.44 + 748.57)/2 = 738.51[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{748.57 - 728.44}{100} = 0.2013$$

$$P_{TV} = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 738.51 \cdot 0.2013 = 6689.8[W]$$

$$\omega_m = (748.57 + 768.05)/2 = 758.31[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{768.05 - 748.57}{100} = 0.1948$$

$$P_{TV} = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 758.31 \cdot 0.1948 = 6647.3[W]$$

Puterea maximă, $P_{TV-MAX} = 6689.8[W]$, se obține la VUM optimă

$$\omega_{OPTIM-1} = 738.51[rad/s]$$

Puterea P_{TV} se poate determina și din variația energiilor cinetice. Variația energiilor cinetice se determină, la funcționarea în gol, prin măsurarea VUM la intervale de timp, Δt , bine alese.

Variațiile energiilor cinetice, $\Delta W_{cinetic}$, se obțin din

$$\Delta W_{cinetic} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2)/2$$

unde: J – momentul de inerție echivalent; ω_k – VUM la momentul t_k ; ω_{k-1} – VUM la momentul t_{k-1} ; $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ intervalul de eșantionare.

Din variația energiilor cinetice se calculează puterea TV, astfel

$$P_{TV} = \Delta W_{cinetic}/\Delta t$$

$$P_{TV} = \Delta W_{cinetic}/\Delta t = 45 \cdot (643.37^2 - 621.62^2)/200 = 6190.5[W]$$

$$P_{TV} = \Delta W_{cinetic}/\Delta t = 45 \cdot (665.07^2 - 643.37^2)/200 = 6388.5[W]$$

$$P_{TV} = \Delta W_{cinetic}/\Delta t = 45 \cdot (686.58^2 - 665.07^2)/200 = 6541.6[W]$$

$$P_{TV} = \Delta W_{cinetic}/\Delta t = 45 \cdot (707.75^2 - 686.58^2)/200 = 6641.5[W]$$

$$P_{TV} = \Delta W_{cinetic}/\Delta t = 45 \cdot (728.44^2 - 707.75^2)/200 = 6685.8[W]$$

$$P_{TV} = \Delta W_{cinetic}/\Delta t = 45 \cdot (748.57^2 - 728.44^2)/200 = 6689.7[W]$$

$$P_{TV} = \Delta W_{cinetic}/\Delta t = 45 \cdot (768.05^2 - 748.57^2)/200 = 6647.3[W]$$

Puterea maximă, $P_{TV-MAX} = 6689.7[W]$, se obține la VUM optimă

$$\omega_{OPTIM-2} = (748.57 + 728.44)/2 = 738.51[rad/s]$$

Cu ambele metode s-au obținut aceleași rezultate.

La funcționarea în MPP, coordonatele punctului de putere maximă se pot determina și din anularea derivatei puterii folosind MM-TV, astfel

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} (1191.5(22/\omega - 0.02)e^{-98.06(22/\omega)} 22^3) = 0$$

sau

$$(5.1657 \times 10^{11} \omega - 3.7634 \times 10^{14}) = 0, \text{ cu soluția: } \omega_{OPTIM} = 728.54[rad/s]$$

În timpul funcționării se folosește, pentru determinarea lui ω_{OPTIM} , dependența lui de viteza vântului, V , în forma

$$\omega_{OPTIM} = \frac{728.54}{22} V = 33.115 V = k \cdot V,$$

Punctul de putere maximă, determinat din anularea derivatei puterii, are coordonatele:

$$\omega_{OPTIM} = 728.53[rad/s]$$

$$P_{TVMAXIM} = 6696.3[W]$$

La funcționarea în gol, la viteza vântului $V=22[m/s]$, s-a obținut VUM maximă de valoare

$$\omega_{MAX} = 1100[rad/s].$$

Valoarea raportului $\omega_{OPTIM} / \omega_{MAX}$, la $V=22[m/s]$ este :

$$\frac{\omega_{OPTIM}}{\omega_{MAX}} = \frac{728.54}{1100} = 0.66231,$$

mărime deosebit de importantă în procesul de conducere deoarece, pentru o TV dată, valoarea raportului nu se modifică, indiferent de valoarea vitezei vântului, așa cum se va demonstra în cele ce urmează.

În simulări cu momentul de inerție echivalent, $J = 45 [kg \cdot m^2]$, se obține variația VUM în timp, figura 9.19, folosind ecuația mișcării de forma:

$$\begin{cases} 45 \cdot \frac{d\omega}{dt} \omega = 1191.5 \left(\frac{22}{\omega} - 0.02 \right) e^{-98.06 \left(\frac{22}{\omega} \right)} (22)^3 \\ \omega(0) = 300. \end{cases}$$

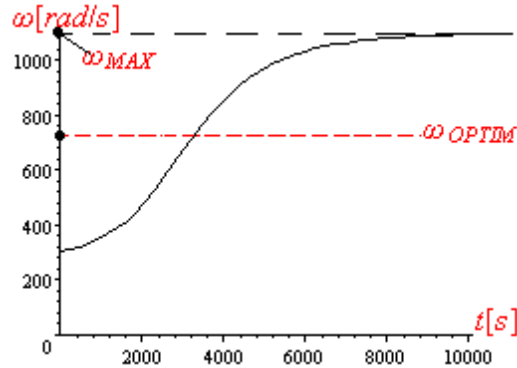


Fig.9.19.Variația în timp a VUM la $V=22[m/s]$

Problema valorii momentului de inerție

Exactitatea estimării valorii momentului de inerție nu influențează precizia de determinare a lui ω_{OPTIM} . Valoarea momentului de inerție, J , intervine ca și o constantă de proporționalitate și deci în maximumul funcției $P_{TV}(\omega)$ calculat, de exemplu, prin anularea derivatei, valoarea lui J intervine numai în calculul valorii maxime a puterii, $P_{TV MAXIM}$, nu și în cea a VUM ω_{OPTIM} .

În concluzie, la viteza vântului având valoarea constantă: $v=22[m/s]$, s-a obținut, din măsurători de turație caracteristica puterii TV, așa ca în figura 9.20.

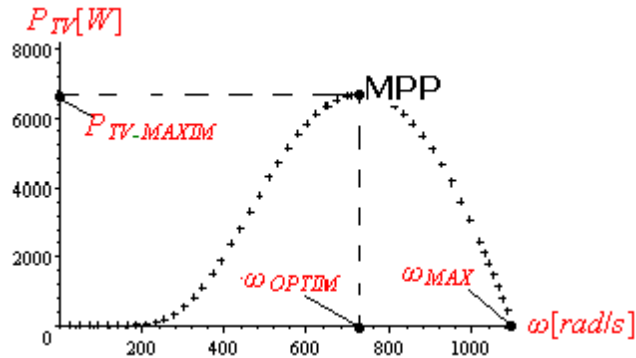


Fig.9.20.Caracteristica puterii la $V=22[m/s]$

9.3.2. Studiu de caz la $V \neq ct$

Viteza vântului, $V(t)$, variabilă în timp cu perioada T , [s], așa ca în figura 9.20, se modelează printr-o sumă: viteza medie V_{MEDIU} + sinusoida $A \sin(2\pi/T)t$.

La forma de variație în timp a vitezei vântului din figura 9.21 se poate considera

$$T = 35[s], A = 7[m/s] \text{ și } V_{MEDIU} = 15[m/s] \text{ și rezultă}$$

$$V(t) = 15 - 7 \sin 0.17943t$$

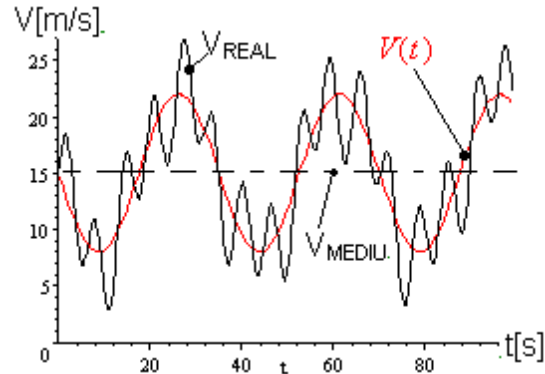


Fig.9.21. Variația în timp a vitezei vântului

La funcționarea în gol VUM crește de la valoarea inițială $\omega(0) = 200[rad/s]$ la valoarea maximă

$$\omega_{MAX} = 852.68[rad/s]$$

așa cum se poate observa și din figura 9.22.

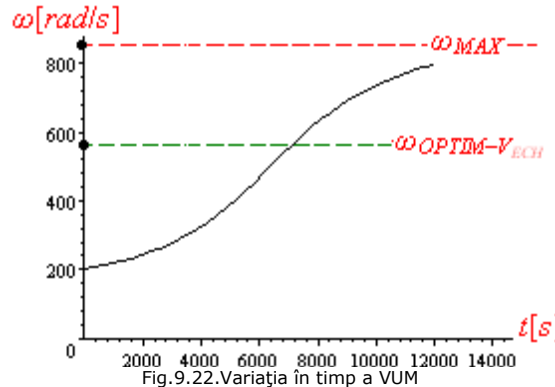


Fig.9.22. Variația în timp a VUM

La momentele de timp $t=100,200,\dots,13000[s]$, VUM măsurate au valorile

$$\omega(100) = 201.68[rad/s]$$

$$\omega(200) = 203.43[rad/s].$$

$$\omega(300) = 205.21[rad/s].$$

$$\omega(400) = 206.98[rad/s].$$

$$\omega(500) = 208.74[rad/s].$$

$$\omega(600) = 210.55[rad/s].$$

$$\omega(700) = 212.43[rad/s].$$

$$\omega(800) = 214.44[rad/s]$$

$$\omega(900) = 216.55[rad/s]$$

$$\omega(1000) = 218.7[rad/s]$$

$$\omega(1100) = 220.83[\text{rad/s}]$$

În această zonă puterea TV se calculează din derivata VUM astfel

$$\omega_m = (218.7 + 220.83)/2 = 219.77[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{220.83-218.7}{100} = 0.0213$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0213 \cdot 219.77 = 210.65[\text{W}]$$

$$\omega(1200) = 222.98[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1300) = 225.22[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1400) = 227.51[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1500) = 229.97[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1600) = 232.54[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1700) = 235.17[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1800) = 237.77[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1900) = 240.46[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2000) = 243.25[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2100) = 246.10[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2200) = 249.14[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2300) = 252.32[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2400) = 255.56[\text{rad/s}]$$

$$\omega(7000) = 553.43[\text{rad/s}]$$

$$\omega(7100) = 561.06[\text{rad/s}]$$

La $t=7000,7100,7200,7300$ [s] puterea TV se calculează din derivata VUM astfel

$$\omega_m = (553.43 + 561.06)/2 = 557.25[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{561.06-553.43}{100} = 0.0763$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0763 \cdot 557.25 = 1913.3[\text{W}]$$

$$\omega(7200) = 568.55[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (568.55 + 561.06)/2 = 564.81[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{568.55-561.06}{100} = 0.0749$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0749 \cdot 564.81 = 1903.7[\text{W}]$$

$$\omega(7300) = 576.35[\text{rad/s}]$$

$$\omega(7400) = 584.64[\text{rad/s}]$$

$$\omega(7500) = 592.95[\text{rad/s}]$$

$$\omega(7600) = 601.0[\text{rad/s}]$$

$$\omega(7700) = 608.33[\text{rad/s}]$$

$$\omega(7800) = 615.01[\text{rad/s}]$$

$$\omega(7900) = 621.53[\text{rad/s}]$$

$$\omega(8000) = 628.46[\text{rad/s}]$$

$$\omega(8100) = 635.81[\text{rad/s}]$$

La $t=8000,8100[s]$ puterea TV este

$$\omega_m = (628.46 + 635.81)/2 = 632.14[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{635.81-628.46}{100} = 0.0735$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0735 \cdot 632.14 = 2090.8[W]$$

$$\omega(8200) = 643.09[\text{rad/s}]$$

$$\omega(8300) = 650.09[\text{rad/s}]$$

$$\omega(8400) = 656.33[\text{rad/s}]$$

$$\omega(8500) = 661.86[\text{rad/s}]$$

$$\omega(8600) = 667.28[\text{rad/s}]$$

$$\omega(8700) = 673.20[\text{rad/s}]$$

$$\omega(8800) = 679.46[\text{rad/s}]$$

$$\omega(8900) = 685.61[\text{rad/s}]$$

$$\omega(10000) = 736.35[\text{rad/s}]$$

$$\omega(10100) = 740.40[\text{rad/s}]$$

În această zonă, la $t=10000,10100,10200,10300[s]$ puterea TV are valorile

$$\omega_m = (736.35 + 740.4)/2 = 738.38[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{740.4-736.35}{100} = 0.0405$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0405 \cdot 738.38 = 1345.7[W]$$

$$\omega(10200) = 744.67[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (740.4 + 744.67)/2 = 742.54[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{744.67-740.4}{100} = 0.0427$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 742.54 \cdot 0.0427 = 1426.8[W]$$

$$\omega(10300) = 748.82[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (748.82 + 744.67)/2 = 746.75[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{748.82-744.67}{100} = 0.0415$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 746.75 \cdot 0.0415 = 1394.6[W]$$

$$\omega(10400) = 752.75[\text{rad/s}]$$

$$\omega(10500) = 755.93[\text{rad/s}]$$

$$\omega(10600) = 758.48[\text{rad/s}]$$

$$\omega(10700) = 761.17[\text{rad/s}]$$

$$\omega(10800) = 764.48[\text{rad/s}]$$

În zona ω_{MAX} valorile VUM sunt

$$\omega(500) = 722.88[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1000) = 742.59[\text{rad/s}]$$

$$\omega(1500) = 761.19[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2000) = 775.89[\text{rad/s}]$$

$$\omega(2500) = 787.44[\text{rad/s}]$$

$$\omega(3000) = 797.97[\text{rad/s}]$$

$$\omega(3500) = 807.95[\text{rad/s}]$$

$$\omega(5000) = 826.31[\text{rad/s}]$$

$$\omega(6000) = 833.94[\text{rad/s}]$$

$$\omega(7000) = 840.5[\text{rad/s}]$$

$$\omega(8000) = 843.28[\text{rad/s}]$$

$$\omega(9000) = 847.26[\text{rad/s}]$$

La valori cvazistabilizate ale VUM, apropiate de ω_{MAX} , la funcționarea în gol, valorile puteri sunt foarte mici, chiar negative, așa ca și în realitate:

$$\omega_m = (847.26 + 843.28)/2 = 845.27[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{847.26 - 843.28}{1000} = 0.00398$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 845.27 \cdot 0.00398 = 151.39[W]$$

$$\omega(10000) = 847.92[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (847.92 + 847.26)/2 = 847.59[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{847.92 - 847.26}{1000} = 0.00066$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 847.59 \cdot 0.00066 = 25.173[W]$$

$$\omega(11000) = 850.28[\text{rad/s}]$$

$$\omega(12000) = 850.6[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (850.28 + 850.6)/2 = 850.44[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{850.6 - 850.28}{1000} = 0.00032$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 850.44 \cdot 0.00032 = 12.246[W]$$

$$\omega(13000) = 851.62[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (850.6 + 851.62)/2 = 851.11[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{851.62 - 850.6}{1000} = 0.00102$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 851.11 \cdot 0.00102 = 39.066[W]$$

Folosind rezultatele din [1] valoarea maximă a energiei captate se obține la

$$\omega_{OPTIM-2} = 571[\text{rad/s}],$$

rezultat obținut prin integrarea puterii, apropiat valorii $\omega_{OPTIM-V_{ECH}} = 564.76[\text{rad/s}]$,

rezultat obținut prin anularea derivatei puterii

În zona MMPP se obțin rezultatele

$$\omega(7000) = 553.43[\text{rad/s}]$$

$$\omega(7100) = 561.06[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (553.43 + 561.06)/2 = 557.25[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{561.06-553.43}{100} = 0.0763$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0763 \cdot 557.25 = 1913.3[W]$$

$$\omega(7150) = 565.35[rad/s]$$

$$\omega_m = (561.06 + 565.35)/2 = 563.21[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{565.35-561.06}{50} = 0.0858$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0858 \cdot 563.21 = 2174.6[W]$$

$$\omega(7200) = 568.55[rad/s]$$

$$\omega_m = (565.35 + 568.55)/2 = 566.95[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{568.55-565.35}{50} = 0.064$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.064 \cdot 566.95 = 1632.8[W]$$

$$\omega(7250) = 573.83[rad/s]$$

$$\omega_m = (568.55 + 573.83)/2 = 571.19[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{573.83-568.55}{50} = 0.1056$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.1056 \cdot 571.19 = 2714.3[W]$$

$$\omega(7300) = 576.35[rad/s]$$

$$\omega_m = (573.83 + 576.35)/2 = 575.09[rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{576.35-573.83}{50} = 0.0504$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0504 \cdot 575.09 = 1304.3[W]$$

Se observă că la $\omega_m = 563.21[rad/s]$ puterea este maximă

$$P_{TV-MAX} = 2174.6[W]$$

Prin calculul energiei mecanice W_{mec} captate în intervalul de timp T:

$$W_{mec} = \int_0^T P_{TV} \cdot dt = \int_0^T 1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / \omega - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7 \sin 0.17943t)/\omega)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \cdot dt$$

la $\omega = 571[rad/s]$ se obține

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 571 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7 \sin 0.17943t)/571)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71943.[J]$$

Acești valoare a energiei se obține la puterea echivalență P_{ECH}

$$P_{ECH} \cdot 35 = 71943.[J]$$

Se obține o putere echivalentă de valoare

$$P_{ECH} = 71943./35 = 2055.5[W]$$

1) Verificare prin simulare la $\Delta t = 100[s]$

În zona MMPP valorile VUM, obținute prin simulare cu ecuația mișcării

$$\left\{ \begin{array}{l} 45 \cdot \frac{d\omega}{dt} \omega = 1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / \omega - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7 \sin 0.17943t)/\omega)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \\ \omega(0) = 500. \end{array} \right.$$

sunt

$$\omega(200) = 516.28[\text{rad/s}]$$

$$\omega(400) = 532.72[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (516.28 + 532.72)/2 = 524.5[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{532.72 - 516.28}{200} = 0.0822$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0822 \cdot 524.5 = 1940.1[\text{W}]$$

$$\omega(600) = 550.44[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (532.72 + 550.44)/2 = 541.58[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{550.44 - 532.72}{200} = 0.0886$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0886 \cdot 541.58 = 2159.3[\text{W}]$$

$$\omega(800) = 566.73[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (550.44 + 566.73)/2 = 558.59[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{566.73 - 550.44}{200} = 0.08145$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.08145 \cdot 558.59 = 2047.4[\text{W}]$$

$$\omega(1000) = 581.50[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (566.73 + 581.5)/2 = 574.12[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{581.5 - 566.73}{200} = 0.07385$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.07385 \cdot 574.12 = 1907.9[\text{W}]$$

$$\omega(1200) = 597.55[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (581.5 + 597.55)/2 = 589.53[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{597.55 - 581.5}{200} = 0.08025$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.08025 \cdot 589.53 = 2128.9[\text{W}]$$

În zona $\omega_m = (541.58 \div 589.53)[\text{rad/s}]$ puterea TV, calculată prin derivata VUM, are valori apropiate de $P_{ECH} = 2055.5[\text{W}]$, valoare dedusă din energia captată calculată anterior.

Valoarea puterii calculate la viteza echivalentă a vântului: V_{ECH} și la

$\omega_{OPTIM-V_{ECH}} = 564.76[\text{rad/s}]$, obținut prin anularea derivatei puterii, folosind MM-TV, este

$$P_{TV-MAX}(\omega)_{V_{ECH}} = 1191.5(17.054/564.76 - 0.02)e^{-98.06(17.054/564.76)}17.054^3 = 3119.2[\text{W}]$$

mult diferită de P_{ECH} , cea ce demonstrează faptul că NU se poate folosi calculul cu

$V_{ECH} = 17.054[\text{m/s}]$ calculată mai jos din ω_{MAX} , pe toată zona VUM.

Folosind MM-TV viteza echivalentă rezultă din ecuația :

$$V_{ECH}/\omega_{MAX} - 0.02 = 0$$

sau

$$V_{ECH}/852.68 - 0.02 = 0$$

cu soluția $V_{ECH} = 17.054[\text{m/s}]$.

La viteza echivalentă a vântului, $V_{ECH} = 17.054 [m/s]$, caracteristica puterii este :

$$P_{TV}(\omega)_{V_{ECH}} = 1191.5(17.054/\omega - 0.02)e^{-98.06(17.054/\omega)}17.054^3$$

La viteza maximă a vântului, $V_{MAX} = 22 [m/s]$, caracteristica puterii este :

$$P_{TV}(\omega)_{V_{MAX}} = 1191.5(22/\omega - 0.02)e^{-98.06(22/\omega)}22^3,$$

iar la viteza minimă, $V_{MIN} = 8 [m/s]$, caracteristica puterii devine:

$$P_{TV}(\omega)_{V_{MIN}} = 1191.5(8/\omega - 0.02)e^{-98.06(8/\omega)}8^3$$

Caracteristicile de funcționare sunt în zona hașurată, figura 9.23, în condițiile în care viteza vântului variază între cele 2 limite, V_{MAX} și V_{MIN} .

Valorile puterii calculate cu derivata VUM, $P_{TV}(\omega)_{DER}$, sunt sub cele calculate cu viteza echivalentă $P_{TV}(\omega)_{V_{ECH}}$

Zona VUM corespunzătoare puteri maxime este aceeași indiferent cum sunt estimate puterile TV și acest fapt este deosebit de util în realizarea unei funcționări optime din punct de vedere a maximului energetic

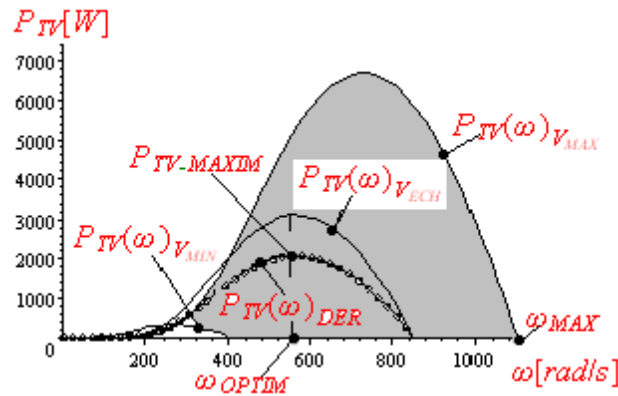


Fig.9.23.Caracteristicile puterii la $v \neq ct$

2) Verificare prin simulare la $\Delta t = 1000 [s]$

Valorile VUM și ale puterii obținute prin simulare cu ecuația mișcării,

$$\left\{ \begin{array}{l} 45. \frac{d\omega}{dt} = 1191.5((15 - 7 \sin 0.17943t)/\omega - 0.02)e^{-98.06((15 - 7 \sin 0.17943t)/\omega)}(15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \\ \omega(0) = 500. \end{array} \right.$$

sunt

$$\omega(1000) = 581.5 [rad/s]$$

$$\omega_m = (500. + 581.5)/2 = 540.75 [rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{581.5 - 500.}{1000} = 0.0815$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45. \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45. \cdot 0.0815 \cdot 540.75 = 1983.2 [W]$$

$$\omega(2000) = 654.02 [rad/s]$$

$$\omega_m = (581.5 + 654.02)/2 = 617.76 [rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{654.02 - 581.5}{1000} = 0.07252$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45. \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45. \cdot 0.07252 \cdot 617.76 = 2016.0 [W]$$

$$\omega(3000) = 708.87[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (708.87 + 654.02)/2 = 681.45[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{708.87-654.02}{1000} = 0.05485$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.05485 \cdot 681.45 = 1682. [W]$$

$$\omega(4000) = 750.83[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (708.87 + 750.83)/2 = 729.85[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{750.83-708.87}{1000} = 0.04196$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.04196 \cdot 729.85 = 1378.1 [W]$$

Se observă că la $\omega_m = (581.5 \div 654.02)[\text{rad/s}]$ puterea este maximă

$$P_{TV-MAX} = 2016. [W]$$

Prin calculul energiei mecanice captate, W_{mec} , la $\omega = 571[\text{rad/s}]$ s-au obținut rezultate apropiate pentru ω_{OPTIM} și P_{TV-MAX} .

Precizarea 1

Deoarece în funcționare viteza vântului variază semnificativ în timp se impune ca determinarea lui ω_{OPTIM} să se facă într-un timp foarte scurt. Din acest motiv în timpul funcționării se folosește, pentru determinarea lui ω_{OPTIM} , dependența lui de viteza V_{ECH} , în forma

$$\omega_{OPTIM} = k \cdot V_{ECH},$$

relație mai sus determinată

Observația 1

Printr-o probă la funcționarea în gol se poate ușor și rapid identifica MPP, prin înregistrarea în timp a VUM, ω și calcularea puterii echivalente a turbinei din variația energiilor cinetice

$$P_{ECH} = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2 \cdot \Delta t),$$

sau prin calculul derivatei VUM și a produsului $J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega$.

Observația 2

Din observația variației în timp a VUM, figura 9.23, se poate deduce VUM,

ω_{OPTIM} , corespunzătoare maximului energetic.

La ω_{OPTIM} produsul $\omega \frac{d\omega}{dt}$ este maxim, așa cum se poate ușor demonstra, având în vedere ecuația miscării.

Observația 3

Din înregistrările în timp a VUM și printr-un soft adecvat se poate stabili valoarea lui

ω_{OPTIM} prin calcularea maximului produsului $\omega \frac{d\omega}{dt}$

În concluzie, la determinarea puterii TV se impune:

1) atingerea turației de gol, ω_{MAX} , pentru determinarea lui V_{ECH} ;

2) măsurarea VUM și calculul derivatei acesteia

Determinarea puterii TV este importantă în cunoașterea solicitărilor mecanice și electrice la care funcționează sistemul eolian .

Estimarea cât mai exactă a lui ω_{OPTIM} este o problemă fundamentală în conducerea optimală din punct de vedere energetic ,mai importantă decât determinarea valorii puterii maxime și din acest motiv rezultatele obținute, prin derivarea VUM, se vor folosi la calculul lui ω_{OPTIM} , în condițiile în care viteza vântului este variabilă semnificativ în timp

9.3.3. Determinarea lui ω_{OPTIM} prin măsurarea VUM și calculul derivatei VUM

Observând variația în timp a VUM, figura 9.23, rezultă că sunt necesare teste într-un interval mare de timp, de ordinul orelor, aproximativ 4 ore, ceea ce, la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp, este imposibil de realizat din cauza faptului că în acest interval mare de timp viteza vântului se modifică sensibil față de valorile inițiale.

Din acest motiv se impune a determina o metodă simplă și rapidă pentru calculul lui ω_{OPTIM} . Acest fapt se poate realiza prin determinarea unei legături directe între ω_{OPTIM} și viteza echivalentă a vântului, în sensul următor:

$$\omega_{OPTIM} = k \cdot V_{echivalent}$$

Determinarea lui $V_{echivalent}$ se face prin prelucrarea măsurătorilor vitezei vântului în timp.

Factorul de proporționalitate k se determină, la $V=ct$, în felul următor -se anulează derivata puterii TV, la $V=22$

$$P_{TV}(\omega) = 1191.5(22/\omega - 0.02)e^{-98.06(22/\omega)}22^3$$

sau

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = \frac{d}{d\omega}(1191.5(22/\omega - 0.02)e^{-98.06(22/\omega)}22^3) = 0,$$

$$\text{cu soluția: } \omega_{OPTIM} = 728.57[\text{rad/s}]$$

și se obține

$$728.57 = k \cdot 22, \text{ cu soluția: } k = 33.117$$

La $V(t) = 15 - 7 \sin 0.17943t$ VUM optimă este în zona

$$\omega_{OPTIM} = 571[\text{rad/s}],$$

de unde rezultă $V_{echivalent}$

$$571 = 33.117 \cdot V_{echivalent}$$

sau

$$V_{echivalent} = 571/33.117 = 17.242[\text{m/s}]$$

Această valoare a vitezei echivalente se determină prin integrarea vitezei reale a vântului, astfel

$$V_{echivalent} = \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^a \cdot dt}$$

sau

$$17.242 = \sqrt[4]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (15 - 7 \sin 0.17943t)^a \cdot dt}$$

de unde rezultă $a=4.35$, deoarece valoarea integralei

$$\sqrt[4.35]{\frac{1}{35} \int_0^{35} (15 - 7 \sin 0.17943t)^{4.35} dt} = 17.24$$

se apropie de valoarea lui $V_{echivalent}$

În concluzie, VUM ω_{OPTIM} se determină din viteza vântului prin integrare

$$\omega_{OPTIM} = 33.117 \sqrt[4.35]{\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^{4.35} \cdot dt}$$

Rezultatul obținut este de o importanță fundamentală în procesul de conducere, impunând un timp scurt pentru măsurarea și procesarea valori momentane a vitezei vântului.

La momentele de timp $t=200, 400, \dots, 1400$ [s], VUM au valorile:

$$\omega(200) = 516.28[\text{rad/s}]$$

$$\omega(400) = 532.72[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (516.28 + 532.72)/2 = 524.5[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{532.72-516.28}{200} = 0.0822$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0822 \cdot 524.5 = 1940.1 [W]$$

$$\omega(600) = 550.44 [rad/s]$$

$$\omega_m = (532.72 + 550.44)/2 = 541.58 [rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{550.44-532.72}{200} = 0.0886$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0886 \cdot 541.58 = 2159.3 [W]$$

$$\omega(800) = 566.73 [rad/s]$$

$$\omega_m = (550.44 + 566.73)/2 = 558.59 [rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{566.73-550.44}{200} = 0.08145$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.08145 \cdot 558.59 = 2047.4 [W]$$

$$\omega(1000) = 581.50 [rad/s]$$

$$\omega_m = (566.73 + 581.5)/2 = 574.12 [rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{581.5-566.73}{200} = 0.07385$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.07385 \cdot 574.12 = 1907.9 [W]$$

$$\omega(1200) = 597.55 [rad/s]$$

$$\omega_m = (597.55 + 581.5)/2 = 589.53 [rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{597.55-581.5}{200} = 0.08025$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.08025 \cdot 589.53 = 2128.9 [W]$$

$$\omega(1400) = 613.29 [rad/s]$$

$$\omega_m = (597.55 + 613.29)/2 = 605.42 [rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{613.29-597.55}{200} = 0.0787$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0787 \cdot 605.42 = 2144.1 [W]$$

$$\omega(1600) = 626.48 [rad/s]$$

$$\omega_m = (613.29 + 626.48)/2 = 619.89 [rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{626.48-613.29}{200} = 0.06595$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.06595 \cdot 619.89 = 1839.7 [W]$$

$$\omega(1800) = 639.86 [rad/s]$$

$$\omega_m = (626.48 + 639.86)/2 = 633.17 [rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{639.86-626.48}{200} = 0.0669$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0669 \cdot 633.17 = 1906.2 [W]$$

$$\omega(2000) = 654.02 [rad/s]$$

$$\omega_m = (639.86 + 654.02)/2 = 646.94 [rad/s]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{654.02-639.86}{200} = 0.0708$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0708 \cdot 646.94 = 2061.2 [W]$$

Puterile TV au fost calculate din VUM măsurate la intervale de timp $\Delta t = 200[s]$ - intervalul de eşantionare.

Zona maximului energetic este la

$$\omega_m = 541.58[\text{rad/s}]; P_{TV} = 2159.3[W]$$

$$\omega_m = 589.53[\text{rad/s}]; P_{TV} = 2128.9[W]$$

$$\omega_m = 605.42[\text{rad/s}]; P_{TV} = 2144.1[W]$$

Puterile sunt în domeniu:

$$P_{TV} = (2128.9 \div 2144.1)[W]$$

iar VUM într-o zonă largă:

$$\omega_m = (541.58 \div 605.42)[\text{rad/s}]$$

La $\Delta t = 50[s]$ -intervalul de eşantionare, se obțin rezultatele:

$$\omega(750) = 561.65[\text{rad/s}]$$

$$\omega(800) = 566.72[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (561.65 + 566.72)/2 = 564.19[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{566.72 - 561.65}{50} = 0.1014$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.1014 \cdot 564.19 = 2574.4[W]$$

$$\omega(850) = 570.23[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (566.72 + 570.23)/2 = 568.48[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{570.23 - 566.72}{50} = 0.0702$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0702 \cdot 568.48 = 1795.8[W]$$

$$\omega(900) = 574.1[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (570.23 + 574.1)/2 = 572.17[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{574.1 - 570.23}{50} = 0.0774$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0774 \cdot 572.17 = 1992.9[W]$$

$$\omega(950) = 578.76[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (574.1 + 578.76)/2 = 576.43[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{578.76 - 574.1}{50} = 0.0932$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0932 \cdot 576.43 = 2417.5[W]$$

$$\omega(1000) = 581.50[\text{rad/s}]$$

$$\omega_m = (578.76 + 581.5)/2 = 580.13[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{581.5 - 578.76}{50} = 0.0548$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45 \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45 \cdot 0.0548 \cdot 580.13 = 1430.6[W]$$

În acest caz zona optimă din punct de vedere energetic s-a restrâns și valorile puterilor calculate sunt mai mari:

$$\omega_m = 564.19[\text{rad/s}] ; P_{TV} = 2574.4[W]$$

$$\omega_m = 576.43[\text{rad/s}]; P_{TV} = 2417.5[W]$$

La $\omega = 571[\text{rad} / \text{s}]$ se obține, prin calculul energiei mecanice captate, optimul din punct de vedere energetic și o putere echivalentă de valoare:

$$P_{ECH} = 2055.5[W]$$

Analizând, mai în detaliu această zonă a MPP, figura 6, cu $\Delta t = 35[s]$ -intervalul de eșantionare, egal cu perioada $T = 35[s]$ de variație a vitezei vântului se obțin rezultatele:

-punctul A- $\omega(35) = 562.85[\text{rad} / \text{s}]$

$$\omega_m = (560. + 562.85)/2 = 561.43[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{562.85-560.}{35} = 8.1429 \times 10^{-2}$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45. \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45. \cdot 8.1429 \times 10^{-2} \cdot 561.43 = 2057.3[W]$$

-punctul B- $\omega(70) = 565.69[\text{rad} / \text{s}]$

$$\omega_m = (562.85 + 565.69)/2 = 564.27[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{565.69-562.85}{35} = 8.1143 \times 10^{-2}$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45. \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45. \cdot 8.1143 \times 10^{-2} \cdot 564.27 = 2060.4[W]$$

-punctul C- $\omega(105) = 568.51[\text{rad} / \text{s}]$

$$\omega_m = (565.69 + 568.51)/2 = 567.1[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{568.51-565.69}{35} = 8.0571 \times 10^{-2}$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45. \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45. \cdot 8.0571 \times 10^{-2} \cdot 567.1 = 2056.1[W]$$

-punctul D- $\omega(140) = 571.33[\text{rad} / \text{s}]$

$$\omega_m = (568.51 + 571.33)/2 = 569.92[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{571.33-568.51}{35} = 8.0571 \times 10^{-2}$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45. \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45. \cdot 8.0571 \times 10^{-2} \cdot 569.92 = 2066.4[W]$$

-puterea maximă

-punctul E- $\omega(175) = 574.13[\text{rad} / \text{s}]$

$$\omega_m = (571.33 + 574.13)/2 = 572.73[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{574.13-571.33}{35} = 0.08$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45. \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45. \cdot 0.08 \cdot 572.73 = 2061.8[W]$$

-punctul F- $\omega(210) = 576.91[\text{rad} / \text{s}]$

$$\omega_m = (574.13 + 576.91)/2 = 575.52[\text{rad/s}]$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{576.91-574.13}{35} = 7.9429 \times 10^{-2}$$

$$P_{TV} = J \frac{d\omega}{dt} \cdot \omega = 45. \cdot \omega_m \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 45. \cdot 7.9429 \times 10^{-2} \cdot 575.52 = 2057.1[W]$$

Maximul energetic se obține la:

$$\omega = 569.92[\text{rad/s}]; P_{TV} = 2066.4[W]$$

foarte aproape de cel obținut anterior prin calculul energiei mecanice captate, atât din punct de vedere a lui ω_{OPTIM} , cât și din punct de vedere a valorii puterii maxime, P_{TV-MAX} .

În figura 9.24 se poate observa variația în timp și valorile VUM în acest caz.

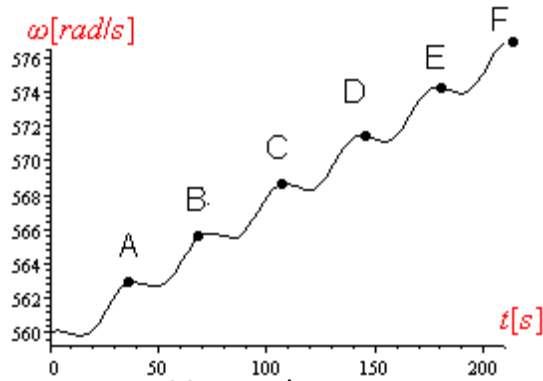


Fig.9.24.Variația în timp a VUM

În concluzie, din exemplele de mai sus se poate observa importanța valorii intervalului de eșantionare, Δt , în localizarea coordonatelor punctului optim de funcționare: MPP, în următorul sens:

-coordonatele MPP: $\omega = 571[\text{rad} / \text{s}]$; $P_{ECH} = 2055.5[W]$

1) la $\Delta t = 200[s]$ -intervalul de eșantionare,.

$$P_{TV} = (2128.9 \div 2144.1)[W]$$

$$\omega_m = (541.58 \div 605.42)[\text{rad/s}]$$

2) la $\Delta t = 50[s]$ -intervalul de eșantionare,.

$$P_{TV} = (2417.5 \div 2574.4)[W]$$

$$\omega_m = (564.19 \div 576.43)[\text{rad/s}]$$

3) la $\Delta t = 35[s]$ -intervalul de eșantionare,.

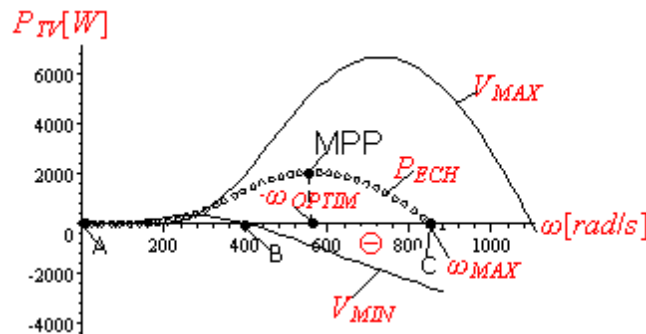
$$\omega = 569.92[\text{rad/s}]; P_{TV} = 2066.4[W]$$

Cele mai bune rezultate se obțin la valorii ale intervalului de eșantionare Δt corelate cu perioada de variație a vitezei vântului în timp, $\Delta t = T'35[s]$.

Prin calculul derivatei VUM se poate localiza atât zona de funcționare optimă cât și valorile puterii TV la diferite VUM.

Precizarea 2

Datorită variației în timp a vitezei vântului puterea TV se modifică, în timp, între o valoare minimă corespunzătoare vitezei $V_{MIN} = 8[m/s]$ și o valoare maximă corespunzătoare vitezei $V_{MAX} = 22[m/s]$. În funcție de valoarea VUM puterea TV poate atinge și valori negative, zona BC, așa ca în figura 9.25.

Fig.9.25. Caracteristicile puterii la $V(t) = 15 - 7 \sin 0.17943t$

Inerția mecanică, prin valoarea lui J , impune o funcționare pe curba $P_{ECH}(\omega)$.

9.3.4. Determinarea lui ω_{OPTIM} prin calculul energiei mecanice

captate

Valorile optime din punct de vedere energetic se pot determina și prin calculul energiei mecanice W_{mec} captate în intervalul de timp T:

$$W_{mec} = \int_0^T P_{TV} \cdot dt = \int_0^T 1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / \omega - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/\omega)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \cdot dt$$

Calculul integralei presupune cunoașterea lui ω și în acest sens se iau mai multe valori pentru ω .

a) $\omega = 540 [rad/s]$

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 540 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/540)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71004. [J]$$

b) $\omega = 550 [rad/s]$

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 550 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/550)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71503. [J]$$

c) $\omega = 560 [rad/s]$

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 560 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/560)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71816. [J]$$

d) $\omega = 565 [rad/s]$

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 565 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/565)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71902. [J]$$

e) $\omega = 568 [rad/s]$

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 568 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/568)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71931. [J]$$

f) $\omega = 570 [rad/s]$

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 570 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/570)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71940. [J]$$

g) $\omega = 571 [rad/s]$

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 571 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/571)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71943. [J]$$

$$l) \omega = 572 [rad/s]$$

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 572 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/572)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71943. [J]$$

$$m) \omega = 575 [rad/s]$$

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 575 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/575)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71932. [J]$$

$$n) \omega = 580 [rad/s]$$

$$W_{mec} = \int_0^{35} \left(1191.5 \left((15 - 7 \sin 0.17943t) / 580 - 0.02 \right) e^{-98.06((15-7\sin 0.17943t)/580)} (15 - 7 \sin 0.17943t)^3 \right) dt = 71875. [J]$$

Valoarea maximă a energiei captate se obține la

$$\omega_{OPTIM-2} = 571 [rad/s],$$

rezultat apropiat valorii $\omega_{OPTIM-V_{ECH}} = 564.76 [rad/s]$.

Valoarea raportului $\omega_{OPTIM}/\omega_{MAX}$, la $V(t) = (15 - 7 \sin 0.17943t) [m/s]$, este :

$$\frac{\omega_{OPTIM-2}}{\omega_{MAX}} = \frac{571}{852.68} = 0.66965,$$

mărime deosebit de importantă în procesul de conducere deoarece, pentru o TV dată, valoarea raportului nu se modifică, indiferent de valoarea vitezei vântului, așa cum s-a demonstrat și anterior.

9.4. CONCLUZII

Determinarea zonelor de optim energetic se poate face prin probe de funcționare în gol. Cea mai rapidă metodă de localizare a lui ω_{OPTIM} este proba de funcționare în gol, din care se cunosc, prin măsurători directe, VUM la diferite momente de timp. Din calculul energiilor cinetice se poate calcula puterea dată de TV la diferite valori ale lui ω și astfel rezultă ω_{OPTIM} la care puterea este maximă.

S-a determinat legătura dintre viteza vântului și turația optimă la care trebuie să funcționeze sistemul, astfel încât energia eoliană captată să fie maximă. Determinarea maximumului

energetic, deci a lui ω_{OPTIM} , printr-o proba de funcționare în gol se poate realiza într-un timp foarte scurt, de ordinul minutilor, ceea ce este foarte important în aplicațiile în care viteza vântului variază semnificativ în timp. Se poate considera această metodă ca și esențială în conducerea optimă a sistemului eolian prin prescrierea VUM de referință: $\omega_{ref} = \omega_{OPTIM}$, deoarece realizează:

- timp de răspuns cel mai mic și
- valori corecte pentru VUM optimă.

Metoda se bazează pe date certe experimentale și nu pe modele matematice care introduc erori și deci pierderi de energie.

Prin cunoașterea valorii turației optime se poate regla încărcarea la generator astfel încât să se realizeze o funcționare la maximul energetic. Pe baza ecuației mișcării s-a determinat valoarea optimă pentru VUM, ω_{OPTIM} , la variații ale vitezei vântului. S-a determinat și dependența

lui ω_{OPTIM} de viteza vântului.

Prin măsurarea vitezei vântului se determină ω_{OPTIM} și astfel se extrage maximul de energie mecanică la viteze ale vântului variabile în timp. Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă. Prin simulări s-a dedus turația optimă la generator, astfel încât să se obțină o energie maximă la o viteză a vântului variabilă în timp. În conducerea sistemului s-au dat metodele de calcul a turației de referință în funcție de viteza vântului, astfel încât să se obțină o energie maximă.

Prin înregistrarea variației în timp a vitezei vântului și a turației la TV se determină puterea turbinei

La sistemele eoliene ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp s-a determinat zona de maxim energetic, zonă caracterizată de VUM ω_{OPTIM} , în câteva zeci de secunde.

Prin măsurarea VUM se poate determina, într-un timp foarte scurt, de ordinul secundelor, VUM optimă, ω_{OPTIM} . Determinarea lui ω_{OPTIM} se poate face în două moduri:

1) prin măsurarea vitezei vântului și folosind dependența $\omega_{OPTIM} = k_1 \cdot V$

2) prin măsurarea VUM la funcționarea în gol, ω_{MAX} și folosind relația $\omega_{OPTIM} = k_2 \cdot \omega_{MAX}$

Pentru determinarea lui ω_{OPTIM} s-a introdus noțiunea de putere echivalentă a turbinei, P_{ECH} , care este dependentă de VUM, ω . Maximul P_{ECH} este la ω_{OPTIM} . Estimarea funcției $P_{ECH}(\omega)$ și determinarea lui ω_{OPTIM} se bazează pe valorile măsurate ale VUM de la arborele generatorului sau turbinei, la o funcționare în gol a sistemului, deci cu generatorul declupat de la sarcină. Puterea echivalentă, P_{ECH} , corespunde vitezei echivalente a vântului, V_{ECH} . Aceasta se calculează din valoarea reală a vântului măsurată cu anemometrul atașat turbinei, folosind un model matematic original și deosebit de util în aplicațiile curente, mai ales în locațiile în care viteza vântului variază, ca și valoarea, semnificativ în timp. Prin urmare, realizarea optimului energetic, la un sistem eolian ce funcționează la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp, se bazează pe date certe, măsuratori ale vitezei vântului și turației la turbină.

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- determinarea maximului energetic prin încărcarea succesivă a generatorului cu diferite valori a rezistenței de sarcină și măsurarea puterii la aceasta în regim staționar;
- determinarea maximului energetic prin măsurarea puterii și turației la generator pentru o rezistență de sarcină constantă, în regim tranzitoriu;
- determinarea optimului energetic printr-o probă la funcționarea în gol;
- dimensionarea intervalelor de timp pentru măsurarea turației în funcție de două elemente esențiale:

1) momentul de inerție echivalent J și

2) perioada de oscilație a vitezei vântului.

- demonstrarea faptului ca nu este necesară cunoașterea exactă a valorii turației optime, din punct de vedere energetic;
- analiza ponderii momentului de frecare;
- demonstrarea faptului că la probele de gol nu este necesară cunoașterea exactă a valorilor lui J

10.DETERMINAREA ZONELOR DE MAXIM ENERGETIC LA UN SISTEM EOLIAN FUNCȚIONÂND LA VITEZE ALE VÂNTULUI VARIABLE ÎN TIMP

În acest capitol se determină zonele de maxim energetic la sistemele eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp. Această analiză se bazează pe simulări numerice ce au la bază ecuația mișcării. Se folosesc modelele matematice uzuale pentru turbina de vânt, (TV), și generatorul sincron cu magneți permanenți, (GSMP). Pe baza măsurării vitezei vântului și a turației la generator se definesc două mărimi fundamentale: viteza echivalentă a vântului, V_{ECH} și viteza unghiulară mecanică, VUM , optimă, ω_{OPTIM} , aceasta din urmă fiind o funcție de V_{ECH} . Prin analiza variației în timp a turației la generator se poate determina zona de funcționare optimă din punct de vedere energetic, caracterizată prin ω_{OPTIM} . Viteza vântului fiind variabilă în timp ω_{OPTIM} ia diverse valori, determinând și o reglare corespunzătoare a sarcinii la generator. Datorită inerțiilor mecanice mari funcționarea sistemului în punctele de putere maximă, MPP, este posibilă doar la variații mici ale vitezei vântului și deci la variații mari ale vitezei vântului se impune o nouă strategie bazată pe captarea unei energii maxime pe o durată lungă de timp.

10.1.Considerații preliminare

Funcționarea la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp și în condiții energetice optime este foarte puțin tratată în literatură [1]. La viteze ale vântului variabile semnificativ în timp [4], cum este cazul real al României, determinarea MPP este o problemă complexă cu implicații majore în calitatea reglajului. [2,4]. determinarea turației corespunzătoare energiei maxime.

Viteza vântului în domeniul exploatabil tehnico-economic este: $V = 4 \div 25 [m/s]$ cu cele mai

bune rezultate în intervalul: $V = 12 \div 15 [m/s]$ [9]. Din cauza momentelor de inerție -J- foarte mari ale TV modificarea turației la generatorul sincron cu magneți permanenți, GSMP, este lentă și deci nu poate urmări variația rapidă în timp a vitezei vântului, așa cum ar fi necesar pentru a funcționa în MPP, [7], [1], [15]. Cum vitezele vântului sunt semnificativ variabile în timp se pune problema determinării turației corespunzătoare energiei maxime, astfel încât economic să se obțină un profit maxim pe locația unde se vor instala turbinele de vânt [2].

Sistemul eolian funcționează optimal la maximum energetic, dacă TV captează o energie maxim posibilă pe un interval de timp dat, de ordinul zilelor [7].

Datorită inerțiilor mecanice mari, simulările și toate celelalte rezultate teoretice și practice trebuie să aibe la bază intervale de timp de minimum câteva ore, (de regulă peste 10[h]). Sistemele electroenergetice eoliene de mare putere sunt conduse având în vedere viteza medie a vântului [8

$\div 17]$, dar acestea nu realizează maximum energetic. Recent s-au propus și structuri de conducere

bazate pe măsurarea vitezei momentane a vântului [1 \div 5]. și folosind un model matematic adecvat pentru TV.

În lucrarea de față se tratează tocmai acest aspect: optimul energetic la viteze ale vântului variabile semnificativ în timp. Se determină valoarea vitezei unghiulare mecanice optime:

ω_{OPTIM} , la o viteză a vântului măsurată, [1-6], astfel încât energia obținută să fie maximă.

10.2.Studiu de caz-simulări la viteza vântului de forma

$$V(t) = A + B \sin(0.17943t)$$

Se analizează, în cele ce urmează un sistem eolian de putere: $P_N = 22 [kW]$, la viteze ale vântului variabile în timp într-un domeniu larg: 5-22[m/s]

Modelele matematice ale TV+GSMP

Pentru turbina de vânt de putere: $P_N = 22 [kW]$, se dau de către firma constructoare,

[14], caracteristicile experimentale ale puterii, $P_{TV}(\omega, V)$:

$$P_{TV}(\omega, V) = 23.584 \cdot \left((V/\omega - 0.0525) + 3.1269 \times 10^{-2} \right) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3$$

unde : V – viteza vântului; ω – viteza unghiulară mecanică, VUM
Puterea maximă, la V dat se obține prin anularea derivatei

$$\frac{dP_{TV}(\omega)}{d\omega} = \frac{d(23.584(V/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06(V/\omega - 0.0525)} \cdot V^3)}{d\omega} = 0$$

sau

$$3.6135 \times 10V - 1.1357\omega = 0 ,$$

rezultând

$$\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V$$

Rezultatul obținut este valabil la $V = ct$. În cazurile în care viteza vântului variază semnificativ în timp rezultatul obținut trebuie reanalizat.

Din datele de catalog [1] ale GSMP de putere: $P_N = 22[kW]$ se obțin valorile:

$$R_1 = 1.6[\Omega], L_d = 0.07[H], L_q = 0.08[H], \Psi_{MP} = 3.3[Wb] .$$

Din sistemul de ecuații ale GSMP

$$\begin{cases} -RI_d = 1.6I_d - \omega \cdot 0.08I_q \\ -RI_q = 1.6I_q + \omega \cdot 0.07I_d + \omega\Psi_M \\ M_G = -0.01I_dI_q + \Psi_M I_q \\ \Psi_M = 3.3 \\ P = R(I_d^2 + I_q^2) \end{cases}$$

se obțin:

$$\text{puterea- } P_{GSMP}(\omega, R) = 27225 \cdot R\omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} \text{ și}$$

$$\text{momentul- } M_{GSMP}(\omega, R) = -5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

Cele două funcții: $P_{GSMP}(R, \omega)$ și $M_{GSMP}(R, \omega)$ depind de : R – rezistența de sarcină și ω – VUM.

10.2.1. Viteza vântului variază în timp sinusoidal

La o viteză $V(t)$ variabilă în timp de formă sinusoidală, figura 10.1, de perioadă $T = 35. [s]$, se obține

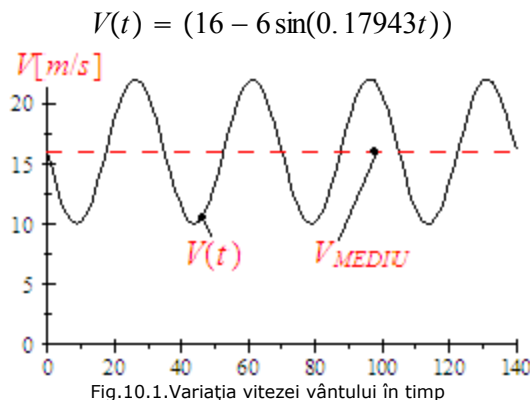


Fig.10.1.Variația vitezei vântului în timp

La această formă de variație a vitezei vântului se obține variația puterii turbinei în timp dată în

figura 10.2.

$$P_{TV}(V, \omega) = \left(23.584 \cdot \left(\frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{(16 - 6 \sin(0.17943t))}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \right)$$

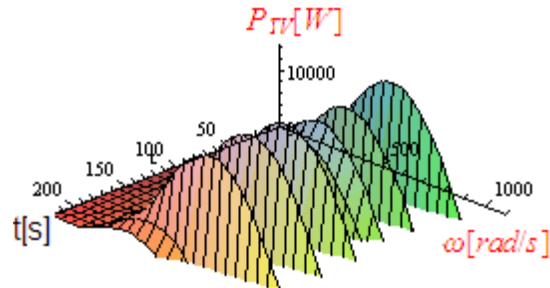


Fig.10.2. Variația puterii în timp

Așa cum se observă, din figura 10.3, funcția $P_{TV}(V, \omega)$ prezintă mai multe maxime.

La $V = 22[m/s]$ puterea are un maxim la $\omega_{ref-1} = [rad/s]$, valoarea obținută din anularea derivatei funcției $P_{TV}(\omega)$

$$P_{TV}(\omega) = 23.584 \cdot \left(\frac{((22))}{\omega - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{((22))}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot ((22))^3$$

sau

$$\frac{d \left(23.584 \cdot \left(\frac{((22))}{\omega - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{((22))}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot ((22))^3 \right)}{d\omega} = 0$$

cu soluția: $\omega_{ref-1} = 699.96[rad/s]$

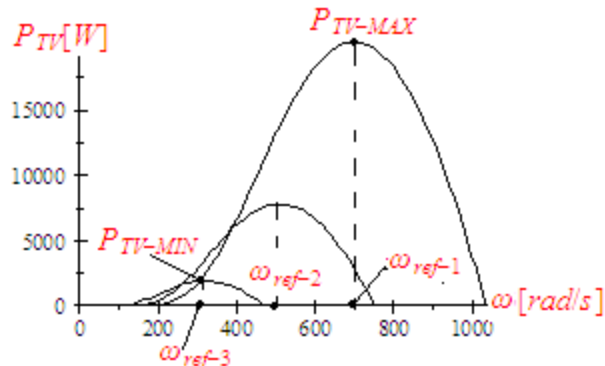


Fig.10.3. Dependența puterii de VUM, ω

În mod similar se obțin VUM optime: $\omega_{ref-2} = 509.09[rad/s]$ la $V_{MEDIU} = 16[m/s]$ și $\omega_{ref-3} = 318.18[rad/s]$ la $V = 10[m/s]$

Pentru ca punctul de funcționare să se deplaseze din P_{TV-MAX} în P_{TV-MIN}

în, aproximativ, $t = T/2 = 17.5[s]$ este nevoie de un moment de valoare: $M = 290.97[Nm]$ obținut din ecuația mișcării

$$\left\{ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} \right.$$

unde: J – momentul de inerție echivalent

$$40 \cdot \frac{699.96 - 318.18}{17.5} = 872.64[Nm],$$

Acest fapt este imposibil de realizat deoarece la TV momentul maxim are valoarea

$$M_{TV-MAX} = \left(23.584 \cdot \left(\frac{((22))}{699.96 - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{((22))}{699.96 - 0.0525} \right)} \cdot ((22))^3 \right) / 699.96 = 28.885[Nm]$$

Prin urmare, sistemul eolian neputând funcționa în MPP, se pune problema la ce VUM să funcționeze pentru a capta o energie maximă. Prin calculul energiilor captate la diverse VUM se

poate determina zona maximului energetic, așa cum se prezintă în continuare.

10.2.2. Determinarea vitezei unghiulare mecanice optime prin calculul energiei captate la diverse valori pentru ω

Sistemul funcționează, la momentul t_k , la o VUM de valoare $\omega(t_k) = ct$, aproximativ constantă pe un interval scurt de timp. Se pune problema determinării valorii lui $\omega(t_k)$, astfel încât sistemul să funcționeze mereu la un maxim energetic.

Considerând intervalul de timp, la care $\omega(t_k) \simeq ct$, același cu perioada de oscilație a vitezei vântului $T=35[s]$, se obține valoarea energiei captate la diverse valori pentru ω .

$$W(\omega) = \int_0^{35} \left(23.584 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16-6 \sin(0.17943t))/\omega - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \right) dt$$

$$W(400) = 1.7576 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 400. [rad / s]$$

$$W(450) = 2.1582 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 450. [rad / s]$$

$$W(500.) = 2.4263 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 500. [rad / s]$$

$$W(548.) = 2.5704 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 548. [rad / s]$$

$$W(549.) = 2.5236 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 549. [rad / s]$$

$$W(550.) = 2.5237 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 550. [rad / s]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W(551.) = 2.5238 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 551. [rad / s] \text{-maxim energetic} \\ W(552.) = 2.5237 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 552. [rad / s] \\ W(555.) = 2.5232 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 555. [rad / s] \\ W(560.) = 2.5167 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 560. [rad / s] \\ W(600.) = 2.4725 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 600. [rad / s] \\ W(650.) = 2.1772 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 650. [rad / s] \end{array} \right.$$

$$W(552.) = 2.5237 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 552. [rad / s]$$

$$W(555.) = 2.5232 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 555. [rad / s]$$

$$W(560.) = 2.5167 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 560. [rad / s]$$

$$W(600.) = 2.4725 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 600. [rad / s]$$

$$W(650.) = 2.1772 \times 10^5 [J] \text{-la } \omega = 650. [rad / s]$$

Așa cum se observă, din rezultatele de mai sus, maximul energetic, la $t=0$, se obține la

$$\omega_{OPTIM-1} = 551 [rad/s]$$

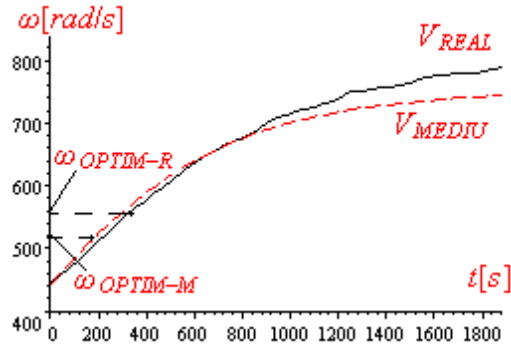
Prin măsurarea VUM, la o funcționare în gol, se poate deduce și prin altă metodă valoarea lui ω

10.2.3. Determinarea zonei de maxim energetic din variația VUM, ω

Ecuțiile mișcărilor cu VUM $\omega(t)$ pentru $V_1(t) = V_{REAL} = (16 - 6 \sin(0.17943t))$ și cu VUM $a(t)$ pentru $V_2(t) = V_{MEDIU} = 16 [m/s]$, au forma

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16-6 \sin(0.17943t))/\omega - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 \\ 40 \cdot a \cdot \frac{da}{dt} = 23.584 \cdot ((16.) / a - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16./a - 0.0525)} \cdot (16.)^3 \\ \omega(0) = 444. \\ a(0) = 444. \end{array} \right.$$

Variațiile în timp ale lui $\omega(t)$ și $a(t)$ sunt date în figura 10.4.

Fig.10.4 Variațiile în timp ale lui $\omega(t)$ și $a(t)$

La momentele de timp $t = 70, 140, \dots, 560$ [s] și la $V_1(t) = V_{REAL} = (16 - 6 \sin(0.17943t))$ se obțin VUM : $\omega(70), \omega(140), \dots, \omega(560)$ și puterea turbinei rezultă din :

$$P_{TV-ECH}(t) = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2\Delta t)$$

unde: J – momentul de inerție echivalent; ω_k – VUM la momentul t_k ; ω_{k-1} – VUM la momentul t_{k-1} .

$$\omega(70) = 468.33 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(70) = 40 \cdot (468.33^2 - 444^2) / (140) = 6240.3 [\text{W}]$$

$$\omega(140) = 492.91 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(140) = 40 \cdot (492.91^2 - 468.33^2) / (140) = 6750.7$$

$$\omega(210) = 517.34 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(210) = 40 \cdot (517.34^2 - 492.91^2) / (140) = 7051.5 [\text{W}]$$

$$\omega(280) = 541.24 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(280) = 40 \cdot (541.24^2 - 517.34^2) / (140) = 7228.6 [\text{W}]$$

$$\omega(350) = 564.31 [\text{rad/s}] \text{ -maxim energetic}$$

$$P_{TV-ECH}(350) = 40 \cdot (564.31^2 - 541.24^2) / (140) = 7287.2 [\text{W}] \text{ -maxim energetic}$$

$$\omega(420) = 586.29 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(420) = 40 \cdot (586.29^2 - 564.31^2) / (140) = 7225.8 [\text{W}]$$

$$\omega(490) = 607.01 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(490) = 40 \cdot (607.01^2 - 586.29^2) / (140) = 7064.3 [\text{W}]$$

Se obține puterea maximă, $P_{TV-ECH}(350) = 7287.2 [\text{W}]$, la

$$\omega_{OPTIM-2} = \omega(350) = 564.31 [\text{rad/s}]$$

La momentele de timp $t = 70, 140, \dots, 560$ [s] și la $V_2(t) = V_{MEDIU} = 16 [\text{m/s}]$ se obțin VUM :

$a(70), a(140), \dots, a(560)$ și puterea turbinei rezultă din :

$$P_{TV-ECH}(t) = J \cdot (\omega_k^2 - \omega_{k-1}^2) / (2\Delta t)$$

$$a(70) = 472.28 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(70) = 40 \cdot (472.28^2 - 444^2) / (140) = 7403.5 [\text{W}]$$

$$a(140) = 499.98 [\text{rad/s}]$$

$$P_{TV-ECH}(140) = 40 \cdot (499.98^2 - 472.28^2)/(140) = 7694.7[W]$$

$$a(210) = 526.46[rad/s] \text{ -maxim energetic}$$

$$P_{TV-ECH}(210) = 40 \cdot (526.46^2 - 499.98^2)/(140) = 7765.8[W] \text{ -maxim energetic}$$

$$a(280) = 551.28[rad/s]$$

$$P_{TV-ECH}(280) = 40 \cdot (551.28^2 - 526.46^2)/(140) = 7642.7[W]$$

$$a(350) = 574.17[rad/s]$$

$$P_{TV-ECH}(350) = 40 \cdot (574.17^2 - 551.28^2)/(140) = 7360.4[W]$$

$$a(420) = 595.01[rad/s]$$

$$P_{TV-ECH}(420) = 40 \cdot (595.01^2 - 574.17^2)/(140) = 6961.6[W]$$

$$a(490) = 613.81[rad/s]$$

$$P_{TV-ECH}(490) = 40 \cdot (613.81^2 - 595.01^2)/(140) = 6493.1[W]$$

Calculat cu viteza medie , V_{MEDIU} ,valoarea lui $\omega_{OPTIM-3}$ este

$$\omega_{OPTIM-3} = 526.46[rad/s]$$

Comparativ cu valoarea lui $\omega_{OPTIM-1} = 551[rad/s]$ diferențele sunt

$$\frac{564.31-551}{551} 100 = 2.4156\% \text{ -la } \omega_{OPTIM-2} = 564.31[rad/s]$$

$$\frac{526.46-551}{551} 100 = -4.4537 \times 10^{-2}\% \text{ -la } \omega_{OPTIM-3} = 526.46[rad/s]$$

În exploatare determinarea lui ω_{OPTIM} ,prin măsurarea VUM,la o funcționare în gol este deosebit de utilă în conducerea optimală a sistemului. Metoda necesită doar măsurarea VUM și nu se bazează pe modelele matematice care sunt doar orientative și nu conduc la maximul energetic real datorită condițiilor din exploatare diferite de cele din laborator.

Valoarea maximă a funcției $P_{TV}(\omega)$ se obține pentru VUM , $\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V$,determinat prin anularea derivatei $dP_{TV}/d\omega = 0$:

$$\omega_{OPTIM} = 31.817 \cdot V$$

sau

$$551 = 31.817 \cdot V,$$

de unde rezultă viteza echivalentă

$$V_{ECH} = 551/31.817 = 17.318[m/s],$$

diferită de valoarea $V_{MEDIU} = 16[m/s]$.

Se impune,deci,a estima viteza echivalentă a vântului sub forma

$$V_{ECH} = \sqrt[N]{\left(\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^N dt\right)}$$

Ecuția

$$17.318 = \sqrt[N]{\left(\frac{1}{35} \int_0^{35} (16 - 6 \sin(0.17943t))^N dt\right)}$$

are soluția $N = 3.8$

Prin urmare viteza echivalentă a vântului se poate calcula cu relația

$$V_{ECH} = \sqrt[N]{\left(\frac{1}{T} \int_0^T (V(t))^N dt\right)} = \sqrt[3.8]{\left(\frac{1}{35} \int_0^{35} (V(t))^{3.8} dt\right)}$$

10.2.4. Dinamica sistemului la diferite încărcări

Pentru două valori ale rezistenței de sarcină : $R_1 = 464.55[\Omega]$ și $R_2 = 264.55[\Omega]$,cu ecuațiile mișcării

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t)) / \omega - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - \\ 5445.0 \omega^2 (5 \cdot 464.55 + 8) \cdot \frac{4.0 \omega^2 + 625 \cdot 464.55^2 + 2000 \cdot 464.55 + 1600}{(1250 \cdot 464.55^2 + 4000 \cdot 464.55 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \\ 40 \cdot a \cdot \frac{da}{dt} = 23.584 \cdot \left((16 - 6 \sin(0.17943t)) / a - 2.1231 \times 10^{-2} \right) \cdot \\ e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t)) / a - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3 - \\ 5445.0 a^2 (5 \cdot 264.55 + 8) \cdot \frac{4.0 a^2 + 625 \cdot 264.55^2 + 2000 \cdot 264.55 + 1600}{(1250 \cdot 264.55^2 + 4000 \cdot 264.55 + 3200 + 7 \cdot a^2)^2} \end{array} \right. ,$$

$$\omega(0) = 552.95$$

$$a(0) = 552.95$$

se obțin variațiile în timp ale VUM, fig.4

La $R_1 = 464.55[\Omega]$ sistemul funcționează stabil, VUM având o variație sinusoidală de forma

$$\omega(t) = 550.77 + 2.46 \cos(0.17943t)$$

așa cum se observă din fig.10.6.

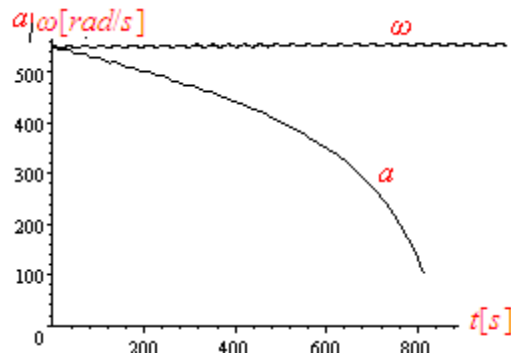


Fig.10.5 Variațiile în timp ale VUM la două sarcini

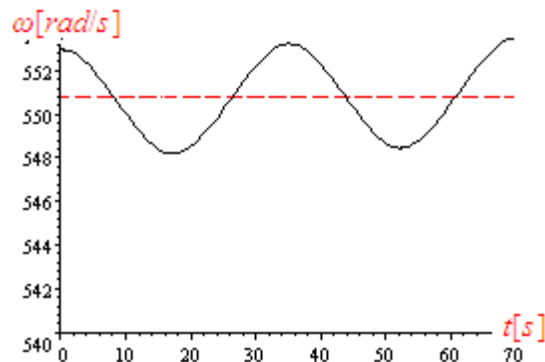


Fig.10.6. Variația în timp a VUM (detaliu)

Vizualizarea în timp a VUM la $R_2 = 264.55[\Omega]$ demonstrează faptul că, la această valoare a rezistenței de sarcină, sistemul funcționează instabil, valoarea VUM, a , scăzând în timp și turbina se oprește după aproximativ 900[s], așa cum rezultă din fig.10.5

Funcționarea stabilă la $R_1 = 464.55[\Omega]$ este analizată, în cele ce urmează și din punct de vedere a puterilor pentru a se observa oscilațiile puterilor la TV și GSMP
Din ecuația mișcării

$$\left\{ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{TV} - M_{GSMP} \right.$$

prin integrare se obține

$$J \cdot (\omega_{final} - \omega_{initial}) = \int_0^T (M_{TV} - M_{GSMP}) dt$$

La $\omega_{final} = \omega_{initial}$, rezultă

$$0 = \int_0^T (M_{TV} - M_{GSMP}) dt$$

sau

$$\int_0^T M_{TV} \cdot dt = \int_0^T M_{GSMP} \cdot dt$$

sau

$$M_{TV-MEDIU} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{GSMP} \cdot dt$$

Momentul mediu al TV, la $\omega(t) = (550.77 + 2.46 \cos(0.17943t))$, are valoarea

$$M_{TV-MEDIU} = \frac{1}{35} \int_0^{35} \left(\frac{23.584 \cdot ((16 - 6 \sin(0.17943t)) / (550.77 + 2.46 \cos(0.17943t)) - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06((16 - 6 \sin(0.17943t))(550.77 + 2.46 \cos(0.17943t)) - 0.0525)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3}{(550.77 + 2.46 \cos(0.17943t))} \right) dt =$$

13.092[Nm]

Momentul la generator fiind

$$M_{GSMP}(\omega, R) = 5445.0\omega(5.0R + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

se obține ecuația în R

$$13.092 = 5445.0 \cdot 550.77(5.0R + 8.0) \frac{4 \cdot 550.77^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0 \cdot 550.77^2)^2},$$

cu soluția, $\{R = 453.33[\Omega]\}$

Momentul maxim la TV, la $V=22$ [m/s], are valoarea

$$M_{TV-MAX} = (23.584 \cdot ((22.)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06 \cdot ((22.)/\omega - 0.0525)} \cdot (22.)^3) / \omega$$

iar cel minim, la $V=10$ [m/s], este

$$M_{TV-MIN} = (23.584 \cdot ((10.)/\omega - 2.1231 \times 10^{-2}) \cdot e^{-98.06 \cdot ((10.)/\omega - 0.0525)} \cdot (10.)^3) / \omega$$

Momentul la generator, la $R = 453.33[\Omega]$, are valoarea

$$M_{GSMP}(\omega) = 5445.0\omega(5.0(453.33) + 8.0) \frac{4.0\omega^2 + 625.0(453.33)^2 + 2000.0(453.33) + 1600.0}{(1250.0(453.33)^2 + 4000.0(453.33) + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2}$$

În figura 10.7 s-au reprezentat momente la TV și GSMP în funcție de VUM și se observă că la $R = 453.33[\Omega]$ momentul la GSMP este egal cu valoarea maximă a momentului TV la viteza minimă, $V=10$ [m/s]. Sub această valoare a rezistenței de sarcină se pierde stabilitatea în

funcționare și din acest motiv respectiva valoare s-a denumit valoare critică $R_{critic} = 453.33[\Omega]$

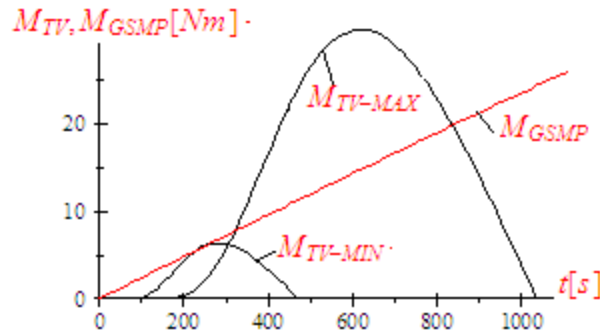


Fig.10.7. Dependentele momentelor de VUM

Ecuțiile mișcării, cu VUM ω la $R = 453.33[\Omega]$ și cu VUM a la $R = 444[\Omega]$, se scriu sub forma

$$\left\{ \begin{array}{l} 40 \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{16 - 6 \sin(0.17943t)}{\omega - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{16 - 6 \sin(0.17943t)}{\omega - 0.0525} \right)} \cdot \\ \left(16 - 6 \sin(0.17943t) \right)^3 - 5445.0 \omega^2 \left(5 \cdot 453.33 + 8 \cdot \frac{4.0 \omega^2 + 625 \cdot 453.33^2 + 2000 \cdot 453.33 + 1600}{(1250 \cdot 453.33^2 + 4000 \cdot 453.33 + 3200 + 7 \cdot \omega^2)^2} \right) \\ 40 \cdot a \cdot \frac{da}{dt} = 23.584 \cdot \left(\frac{16 - 6 \sin(0.17943t)}{a - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{16 - 6 \sin(0.17943t)}{a - 0.0525} \right)} \cdot \\ \left(16 - 6 \sin(0.17943t) \right)^3 - 5445.0 a^2 \left(5 \cdot 444 + 8 \cdot \frac{4.0 a^2 + 625 \cdot 444^2 + 2000 \cdot 444 + 1600}{(1250 \cdot 444^2 + 4000 \cdot 444 + 3200 + 7 \cdot a^2)^2} \right) \\ \omega(0) = 552.95 \\ a(0) = 552.95 \end{array} \right.$$

și se obțin variațiile în timp a VUM, a și ω , date în figura 10.8.

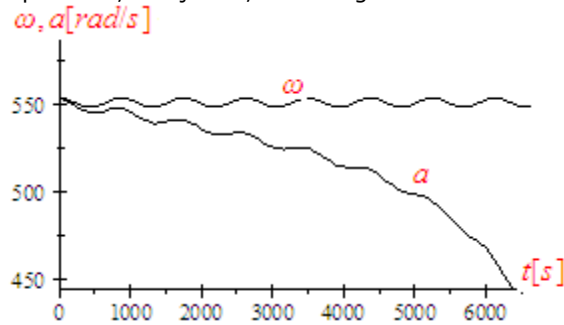


Fig.10.8. VUM la două rezistențe de sarcină

Se observă că la $R = 444[\Omega] < R_{critic} = 453.33[\Omega]$, sistemul devine instabil și turbina se oprește după aproximativ 6400 [s].

10.2.5. Variațiile în timp ale puterilor

Analizând variația în timp a lui ω , din figura 10.5 se poate determina funcția $\omega(t)$ sub forma

$$\omega(t) = 550.77 + 2.46 \cos(0.17943t)$$

Puterea dată de TV, la această formă de variație în timp a lui ω , este

$$P_{TV}(t) = 23.584 \cdot \left(\frac{16 - 6 \sin(0.17943t)}{(550.77 + 2.46 \cos(0.17943t)) - 2.1231 \times 10^{-2}} \right) \cdot e^{-98.06 \left(\frac{16 - 6 \sin(0.17943t)}{(550.77 + 2.46 \cos(0.17943t)) - 0.0525} \right)} \cdot (16 - 6 \sin(0.17943t))^3$$

În mod similar se obține și puterea debitată de generator

$$P_{GSMP}(t) = 27225 \cdot R \omega^2 \frac{4.0\omega^2 + 625.0R^2 + 2000.0R + 1600.0}{(1250.0R^2 + 4000.0R + 3200.0 + 7.0\omega^2)^2} =$$

$$27225 \cdot 464.55 \left(550.77 + 2.46 \cos(0.17943t) \right)^2 \frac{4.0(550.77 + 2.46 \cos(0.17943t))^2 + 625.0 \cdot 464.55^2 + 2000.0 \cdot 464.55 + 1600.0}{(1250.0 \cdot 464.55^2 + 4000.0 \cdot 464.55 + 3200.0 + 7.0(550.77 + 2.46 \cos(0.17943t))^2)^2}$$

În figura 10.9 sunt date variațiile în timp ale puterilor date de turbină și generator.

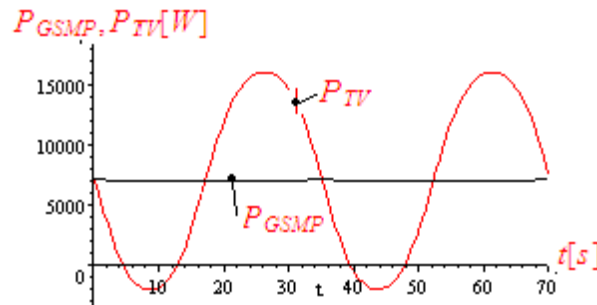


Fig.10.9. Variația în timp a puterilor

Oscilațiile mari ale puterii la TV, $P_{TV}(t)$ nu se regasesc în puterea la generator

$P_{GSMP}(t)$, această datorită inerției mecanice mari a sistemului $J = 40 [kg \cdot m^2]$ În acest caz inerția mecanică este utilă în atenuarea oscilațiilor de putere.

La momente de inerție mici, oscilațiile puterii la turbină sunt mult mai pronunțate și, deci din acest punct de vedere inerția mecanică mare are rol pozitiv în stabilitatea sistemului mai ales în locațiile în care vitezele vântului se modifică semnificativ în timp. Prin elementul de reglare din sistemul de reducere, se poate mări sau atenua oscilațiile puterii, respectiv oscilațiile VUM, acordarea regulatorului fiind hotărâtoare în evoluția funcționării sistemului. Dacă elementul de reglare este un regulator PI, componentă integratoare este esențială și acordarea regulatorului trebuie realizată având în vedere aceste aspecte fundamentale.

10.3. CONCLUZII

Prin măsurarea vitezei vântului se determină valoarea VUM optime și apoi printr-un regulator se modifică sarcina la generator, astfel încât să se realizeze o funcționare optimă din punct de vedere energetic. S-a folosit legătura dintre viteza vântului și turația optimă la care trebuie să funcționeze sistemul, astfel încât energia eoliană captată să fie maximă. Prin analiza mai multor cazuri s-au putut stabili mărimile de bază ce conduc la o funcționare optimă. Prin simulări, în prezenta lucrare și prin măsurători ale turației la generator în exploatare, se poate deduce turația optimă la generator, astfel încât să se obțină o energie maximă la o viteză a vântului variabilă în timp. În conducerea sistemului s-au dat metodele de calcul a turației de referință în funcție de viteza vântului, astfel încât să se obțină o energie maximă. La viteze ale vântului, variabile semnificativ în timp, s-au definit vitezele echivalente ale vântului și puterile echivalente, mărimi fundamentale în determinarea lui ω_{OPTIM}

În continuare se prezintă o sinteză a contribuțiilor personale:

- determinarea zonei de maxim energetic din variația VUM în timp;
- analiza dinamicii sistemului la diferite încărcări;
- determinarea vitezei unghiulare mecanice optime prin calculul energiei captate la diverse valori pentru VUM;
- determinarea zonei de maxim energetic din variația VUM;
- analiza oscilațiilor puterilor la TV și GSMP;
- determinarea VUM optime, prin măsurarea VUM, la o funcționare în gol și conceperea unui sistem de conducere optimală a sistemului.

11. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Acest capitol sintetizează concluziile generale ale lucrării, contribuțiile originale aduse în cadrul tezei, modul de valorificare a rezultatelor obținute și direcțiile posibile de continuare și aprofundare a cercetărilor în domeniul abordat.

Elementele teoretice și practice prezentate în cadrul tezei de doctorat evidențiază următoarele concluzii cu caracter mai general:

Pe baza analizei situației actuale a optimizărilor centralelor electroenergetice, eoliene pe plan intern și internațional în producția de energie electrică, se pot afirma următoarele:

- Prin folosirea energiei eoliene în producția de energie se asigură: energie curată, sigură, disponibilă pentru toți și având un preț competitiv;
- utilizarea pe scară largă a surselor regenerabile de energie în general și a centralelor electrice eoliene în particular reprezintă principala direcție atât pentru prezent, cât mai ales pentru viitor și, de asemenea, asigură îndeplinirea condițiilor referitoare la protecția mediului;
- la nivel mondial se observă o creștere accentuată a puterilor instalate în unități de producere care utilizează energii regenerabile precum și preocupări pentru dezvoltarea de echipamente și tehnologii cât mai eficiente care să folosească sursele eoliene de energie.

Analiza aspectelor de natură tehnică și economică, care privesc centralelor electrice eoliene, conduc la următoarele concluzii:

- funcționarea optimă a centralelor eoliene se poate realiza simplu și ieftin numai la valori ale vitezei vântului constante în timp;
- în decursul unei zile viteza vântului poate varia semnificativ și se pune problema determinării turației la TV, astfel încât energia captată să fie maximă, realizându-se o funcționare optimă;
- problema fundamentală în asigurarea funcționării sistemului TV+GSMP, în MPP, este determinarea VUM corespunzătoare energiei maxime;
- sistemele de conducere performante trebuie să asigure maximul de energie eoliană captată pe un interval lung de timp;
- conducerea optimală a unui sistem eolian presupune extragerea, (captarea), unei energii maxime la o viteză a vântului variabilă semnificativ în timp;
- se impune controlul turației și cuplului la turbină și adaptarea sarcinii generatorului la viteza vântului;
- la viteze ale vântului variabile rapid și semnificativ în timp inerția mecanică impune o strategie de încărcare bazată pe valoarea momentului de inerție echivalent.

Din punct de vedere al aplicațiilor software dezvoltate pentru calculul optim al sistemelor eoliene, se pot evidenția următoarele concluzii:

- conceperea modelelor matematice complete în parte originale, pentru turbina de vânt, generatorul electric și acumulatorul electric;
- studiile de caz din literatura de specialitate se referă, în marea lor majoritate, la sistemele eoliene funcționând la viteze ale vântului constante în timp;
- în cadrul acestei lucrări calculul optimal sa bazat pe cazurile în care viteza vântului variaza ca și valoare semnificativ în timp;
- toate instrumentele software elaborate sunt destinate sistemelor eoliene reale, de mari dimensiuni; de altfel, marea majoritate a studiilor de caz prezentate în teză se referă la ansamblul sistemului electroenergetic eolian inclusiv cu elementele de stocare a energiei: hidro sau acumulatori electrice.

În continuare se prezintă sinteza principalelor contribuții originale, teoretice și aplicative, cuprinse în cadrul tezei de doctorat.

În capitolul al 2-lea, consacrat analizării stadiului actual al cercetărilor privind sistemele electroenergetice eoliene, pot fi enumerate următoarele contribuții:

- s-a realizat un studiu bibliografic sistematizat referitor la stadiul actual al utilizării la nivel mondial al sistemelor electroenergetice eoliene;
- s-au evidențiat principalele aspecte care definesc energia eoliană ca principala sursă regenerabilă de energie ;

În capitolul 3, destinat prezentării principalelor aspecte ce privesc integrarea surselor regenerabile de energie de putere mare în sistemele electroenergetice actuale, se pot scoate în evidență următoarele contribuții originale:

- s-a realizat o analiză a principalelor tipuri de energie și caracteristica lor comparativă;
- s-a identificat potențialul surselor regenerabile de energie din România;
- s-a făcut o prezentare a tehnologiilor de utilizare a energiei eoliene;
- s-a făcut o prezentare a configurațiilor de baza ale turbinelor eoliene;
- s-a făcut o prezentare a problematicei reglării puterii turbinei de vânt.

În cadrul capitolului 4, cuprinzând partea aplicativă a tezei de doctorat, pe baza ecuației mișcării, s-a determinat valoarea optimă pentru VUM, la variații ale vitezei vântului. Contribuțiile personale din acest capitol sunt:

- construirea unor modele matematice performante pentru turbina de vânt și generatorul electric;
- deducerea turației la care puterea dată de turbină este maximă și determinarea dependenței acesteia de viteza vântului;
- deducerea influenței valorii amplitudinii vitezei vântului asupra momentului mediu la TV ;
- determinarea, din putere, a energiilor mecanice și electrice obținute;
- determinarea turațiilor la care energia captată este maximă;
- deducerea influenței valorii amplitudinii vitezei vântului asupra energiei captate;
- analiza oscilațiilor puterii și energiei la o viteză a vântului sinusoidală în timp;
- determinarea influenței valorii VUM inițiale asupra funcționării în timp a sistemului;
- analiza influenței momentului de inerție mecanic asupra energiei captate;
- conceperea unui sistem de conducere bazat pe măsurarea vitezei vântului și având în vedere dependența turației optime de viteză a vântului;
- determinarea experimentală a caracteristicii puterii la turbina de vânt;

Capitolul 5 este în întregime original și cuprinde partea aplicativă a tezei de doctorat. Se pot scoate în evidență următoarele contribuții originale:

- determinarea dependenței puterii de turație, la generator ;
- determinarea dependenței puterii de turație, la turbină;
- determinarea turației corespunzătoare maximului puterii la turbină, la viteze ale vântului constante în timp;
- determinarea turației corespunzătoare maximului puterii la generator la viteze ale vântului variabile în timp;
- determinarea oscilațiilor puterilor la turbină și generator;
- determinarea variațiilor în timp a puterilor la turbină și generator;
- determinarea maximului energetic la viteze ale vântului variabile în timp ;
- elaborarea unei metodologii de conducere a sistemelor eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp ;

În capitolul al 6-lea, consacrat calculului energiei mecanice captate și determinarea vitezei unghiulare mecanice optime la care energia captată este maximă, contribuțiile personale sunt:

- elaborarea unei metodologii destinate determinării turației optime;
- determinarea valorilor maxime ale energiilor electrice și mecanice la o viteză a vântului dată;
- determinarea vitezei unghiulare mecanice optime din ecuația mișcării și a energiei;
- elaborarea unei metodologii destinate conducerii optimale având în vedere valoarea turației optime;
- realizarea unei aplicații software de calcul a energiei mecanice captate.

Capitolul 7 este în întregime original și cuprinde următoarele contribuții originale:

- se dă un sistem de stocare hidro al energiei eoliene;
- toate aplicațiile dezvoltate permit utilizarea lor în cazul unor sisteme reale, de mari dimensiuni;
- studiile efectuate cu ajutorul aplicațiilor soft dezvoltate sunt realizate folosind modelele matematice ale turbinei, generatorului și pompelor de apă;

- implementarea sistemului hidroenergetic se poate face, în soluțiile originale date, cu motoare sincrone sau asincrone ce acționează pompele de apă, direct fără convertoare de putere interpușe între generator și motoare;
- reglarea sistemului se face foarte simplu prin modificarea debitului la pompele de apă în funcție de viteza vântului;
- se da un algoritm de conducere bazat pe măsurarea vitezei vântului și determinarea turației optime.

În capitolul al 8-lea se face o analiză a dinamicii sistemelor eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp în condițiile obținerii unei energii maxime. Contribuțiile personale din acest capitol sunt:

- analiza metodei de conducere a sistemului prin măsurarea vitezei vântului la turbină în două variante: viteza vântului constantă și viteza vântului variabilă semnificativă în timp;
- analiza metodei de conducere a sistemului prin măsurarea vitezei vântului în avans;
- acordarea regulatorului PI prin simulări la o viteză a vântului variabilă în timp;
- analiza naturii punctelor de funcționare, stabil sau instabil, în funcție de sarcina la turbină și viteza vântului;

În capitol al 9 -lea se dă o metodă originală de estimare a puterii echivalente la sistemele eoliene funcționând la viteze ale vântului variabile în timp, bazată pe o probă la funcționarea în gol a generatorului. Se pot scoate în evidență următoarele contribuții originale:

- determinarea maximului energetic prin încărcarea succesivă a generatorului cu diferite valori a rezistenței de sarcină și măsurarea puterii la aceasta în regim staționar;
- determinarea maximului energetic prin măsurarea puterii și turației la generator pentru o rezistență de sarcină constantă, în regim tranzitoriu;
- determinarea optimului energetic printr-o probă la funcționarea în gol;
- dimensionarea intervalelor de timp pentru măsurarea turației în funcție de două elemente esențiale:

- 1) momentul de inerție echivalent J și
- 2) perioada de oscilație a vitezei vântului.

- demonstrarea faptului ca nu este necesara analiza ponderii momentului de frecări;
- demonstrarea faptului că la probele de gol nu este necesară cunoașterea exactă a valorilor lui J pentru cunoașterea exactă a valorii turației optime, din punct de vedere energetic;

Capitolul 10 este în întregime original și cuprinde următoarele contribuții originale:

- determinarea vitezei unghiulare mecanice optime prin calculul energiei captate la diverse valori pentru VUM;
- determinarea zonei de maxim energetic din variația VUM în timp;
- analiza dinamicii sistemului la diferite încărcari;
- determinarea zonei de maxim energetic din variația VUM;
- analiza oscilațiilor puterilor la TV și GSMP;
- determinarea VUM optime, prin măsurarea VUM, la o funcționare în gol și conceperea unui sistem de conducere optimală a sistemului.

O parte a rezultatelor obținute în cadrul tezei au fost publicate, iar restul sunt în curs de publicare, în reviste de prestigiu și în volumele unor manifestări științifice recunoscute din străinătate sau din ISI Thomson și BDI.

Analizele teoretice și practice realizate în cadrul tezei de doctorat, precum și rezultatele obținute, deschid o serie de perspective și direcții de continuare și aprofundare ulterioară a cercetărilor în domeniu:

- optimizărilor, din punct de vedere energetic, a sistemelor eoliene;
- extinderea instrumentului software pentru mărirea randamentului energetic la centralele eoliene actuale;
- folosirea probelor de funcționare în gol la determinarea VUM optime din punct de vedere energetic.

BIBLIOGRAFIE

1. Ackermann T., Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, England, 2005.
2. Amaris H., Power Quality Solutions for Voltage dip compensation at wind farms, IEEE PES General Meeting 2007, Tampa, USA, 2007, pp.1-3.
3. Babescu M, Borlea I, Jigoria Oprea D."Fundamental aspects concerning Wind Power System Operattion Part.2, Case Study"Medina Tunisia 2012 IEEE MELECON, 2012,25-28 March978-1-4673-0783-3
4. M. Babescu,O.Gana,L.Clotea"Fundamental Problems related to the Control of Wind Energy Conversion Systems-Maximum Power Extraction and Smoothing the Power Fluctuations deliveres to the Grid"OPTIM-13th International Conference on Optimizytion of Electrical and Electronic Equipment ,Optim 2012,Brasov,24-26 May
5. Babescu M, Borza I.,Gana O., Lăcătușu F."Comportarea sistemului electroenergetic eolian la variații rapide ale vitezei vântului" Producerea , transportul si utilizarea energiei, pp 11-24,Editura RISOPRINT Cluj-Napoca, 2010, ISSN 2066-4125.
6. Babescu M, Boraci.R, Chioreanu C, Koch C, Gana O On Functioning of the Electric Wind System at its Maximum Power ICCO-CONTI 2010, Timișoara, Romania, May 27-29, 2010.
7. Babescu.M, Petrescu.D, Vasar.C, Prostean.O, Boraci.R- Maximum Power Point Control Approach for Wind Generators –SOFA 24-26 July 2014-Timișoara,România
8. Balog.F, Ciocârlie.H,Babescu.M,Petrescu.D-Maximizing the Captured Energy of a Wind System-IEE – International Symposion on applied Computational intelligence and informatics-SACI 2014- Polytechnic University, Timișoara, Romania
9. Balog.F, Ciocârlie.H, Erdodi.G, Petrescu.D- Peak Energy Determination by a Sample at Idle Mode Operation- IEE – International Symposion on applied Computational intelligence and informatics-SACI 2014- Polytechnic University, Timișoara, Romania
10. Borza.I, Erdodi.G, Petrescu.D, Lăcătușu.F- Sistem Eolian cu Stocare în Acumulatori Electrice-SME 2014-Conferința Știința Modernă și Energia-Cluj-Napoca-15-16 Mai 2014
11. Balog.F, Ciocârlie.H,Babescu.M,Erdodi.G- Equivalent speed and equivalent power of the wind systems that works at variable wind speed- SOFA 24-26 July 2014-Timișoara,România
12. Balog.F,Ciocârlie.H, Petrescu.D, Erdodi.G- Behavior of the wind systems optimally controlled at variable wind speeds- SOFA 24-26 July 2014-Timișoara,România
13. Badelin A., Large-scale integration of wind power in the Russian power supply: analysis, issues, strategy, PhD. Thesis, Kassel University Press GmbH, Kassel, Germany, 2007.
14. Bej,A-Turbine de vânt-ISBN 973-625-098-9,Editura POLITEHNICA Timișoara,2003
15. Borbely A., Kreider J., Distributed Generation – The Power Paradigm for the New Millennium, CRC Press, USA, 2001.
16. Caixia Wang, Zongxiang Lu, Ying QiaoA Consideration of the Wind Power Benefits in Day-Ahead Scheduling of Wind-Coal Intensive Power Systems, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 28, No. 1, February 2013.
17. Dany G., Power reserve in interconnected systems with high wind power production, IEEE 2001 Porto Power Tech Conference, vol.4, Porto, Portugal, 2001, pp.1-6.
18. Diedrichs V. et al., Analysis of large scale integration of wind power in regional HV-grids using probabilistic power flow, Proceedings of the 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Trans-mission Networks for Offshore Wind Farms, Billund, Denmark, 2003, pp.1-6.
19. Dondi P., Bayoumi D., Haederli C., Julian D., Suter M., Network integration of distributed power generation, Journal of Power Sources, vol. 106, 2002, pp.1-9.
20. Driesen J., Belmans R, Distributed generation: challenges and possible solutions, Power Engineering Society General Meeting, 2006, pp.1-8.
21. Erdodi G. M., Petrescu D. I., Sorandaru C., - The determination of the Maximum Energetic Zones for a Wind System, Operating at Variable Wind Speeds, October 17-19, 2014 , Sinaia, Romania
22. Gilbert D., Exploration in Romania from Yesterday to Tomorrow, Conferința 150 de ani de petrol românesc, București, 2007.
23. Greenwood C., Market capitalization statistics and analysis, New Energy Finance, 2009, <http://www.newenergymarket.com>.
24. Hermina A., Șerban C.A., Condiții impuse de structura SEN pentru preluarea puterii produse de CEE, SUSPLAN Workshop, Bucharest, 2009.
25. Hafidi G., Jonathan C.- Wind speed estimation for wind turbine control, 2012 IEEE International Conference on Control Applications Part of 2012 IEEE Multi-Conference on Systems and Control October 3-5, Dubrovnik, Croatia, 2012.
26. Hao Sipeng Zhang Yangfei Li Xianyun, Yuan Yue-Equivalent wind speed model in wind farm dynamic analysis, 978-1-4577-0365-2/11, IEEE 2011.

27. Haseeb Ahmad, Steven Coppens, Bahri Uzunoglu-Connection of an offshore wind park to HVDC converter platform without using offshore AC collector platforms, 2013 IEEE Green Technologies Conference, 978-0-7695-4966-8/13, DOI 10.1109/GreenTech.2013.68.
28. Heir S., Grid integration of wind energy conservation systems, 2nd Edition, John Willey & Sons Ltd., England, 2006.
29. Hossein Hosseini S., Choon Yik Tang, John N. Jiang- Calibration of a Wind Farm Wind Speed Model With Incomplete Wind Data, IEEE Transactions On Sustainable Energy, Vol. 5, No. 1, January 2014.
30. Hlusov V., Contribuții la evaluarea rentabilității și fezabilității utilizării surselor distribuite de energie pentru condițiile specifice Republicii Moldova, Teză de doctor în Științe Tehnice, Chișinău, 2007.
31. Holttinen H., The impact of large scale wind power on the Nordic electricity system, PhD. Thesis, VTT Publications 554, 2004.
32. Holttinen, H. Koreneff, G., Imbalance costs of wind power for a hydro power producer in Finland, Proceedings of European Wind Energy Conference EWEC2007, Milan, Italy, 2007, pp.1-6.
33. Huajie Ding, Zechun Hu, Yonghua Song, Jincheng Wu, Xiaoxu Fan-Coordinated Operational Strategy of Energy Storage System and Wind Farm, 2013 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Copenhagen.
34. Jianxiao Zou, Junping Yao, Qingze Zou, Hongbing Xu-A Multi-Objective Optimization Approach to Active Power Control of Wind Farms, 2012 American Control Conference Fairmont Queen Elizabeth, Montreal, Canada, 2012, 978-1-4577 -1096-4/12.
35. Kaigui Xie, Zefu Jiang, Wenyuan Li, Fellow- Effect of Wind Speed on Wind Turbine Power Converter Reliability, IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 27, No. 1, March 2012.
36. Lai L.L., Power Systems Restructuring: Engineering and economics and deregulation: trading, performance and technology, John Wiley & Sons, 2001.
37. Libao Shi, Chen Wang, Liangzhong Yao, Yixin Ni, Masoud Bazargan-Optimal Power Flow Solution Incorporating Wind Power, IEEE Systems Journal, Vol. 6, No. 2, June 2012.
38. Lin Cheng, JinLin, Yuan-Zhang Sun, Chanan Singh, Wen-Zhong Gao, Xing-Mei Qin - A Model for Assessing the Power Variation of a Wind Farm Considering the Outages of Wind Turbines, IEEE Transactions On Sustainable Energy, Vol. 3, No. 3, July 2012.
39. Matevosyan J., Evaluation of wind energy storage in hydro reservoirs in areas with limited transmission capacity, Proceedings of the 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Billund, Denmark, 2003.
40. Milborrow D., Goodbye gas and squaring up to coal, Wind Power Monthly, January 2005, pp.31-35.
41. Miller N., Ye Z., Kroposki B., Report on Distributed Generation Penetration Study, National Renewable Energy Laboratory USA, NREL/SR-560-34715, August 2003.
42. Nicholas Miller, Jason MacDowell, Gary Chmiel, Ryan Konopinski, Durga Gautam, Grant Laughter, Dave Hagen-Coordinated Voltage Control for Multiple Wind Plants in Eastern Wyoming: Analysis and Field Experience, IEEE PEMWA Denver, July 2012.
43. Patel M., Wind and Solar Power Systems, CRC Press, 1999.
44. Poller M., Achilles S., „Aggregated Wind Park Models for Analyzing Power System Dynamics”, 4th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Off-shore Wind Farms, Billund, Denmark 2003.
45. Porrua F., Chabar R., Thome L.M., Barroso L.A., Pereira M., Incorporating large scale renewable to the transmission grid: Technical and regulatory issues, IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES09, 2009, pp.1-7.
46. Rudion K., Orths A., Lebioda A., Styczynski Z., Wind Farms with DFIG as Virtual Power Plants, Proceedings of the Fifth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Glasgow, Scotland, 2005.
47. Sorandaru.C., Babescu.M., Mușuroi.S-Load Control Method for Photovoltaic Solar Panels Based on the Measurement of Short Circuit Currents-ICSTCC-October 11-13, 2013 Sinaia-Romania
48. Verseille J., Growth and Grids – Panel discussion on issues of grid extension, supply predictability and power quality, Proceedings of European Wind Energy Conference, Madrid, 2003, 8pp.
49. Quaschnig V.- Understanding Renewable Energy Systems, ISBN 1-84407-128-6 ,London Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2005.
50. Rebecca J. Barthelmie, Kurt S. Hansen, Sara C. Pryor K., S. Hansen-Meteorological Controls on Wind Turbine Wakes, IEEE | Vol. 101, No. 4, April 2013 0018-9219

51. Sairaj V. Dhople, Alejandro D. Domínguez-García-A Framework to Determine the Probability Density Function for the Output Power of Wind Farms, 978-1-4673-2308-6/12, IEEE 2012.
52. Shupo Bu, Xunwen Su- Analysis of Temporal and Spatial Characteristics on Output of Wind Farms with Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines, Second International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control, 978-0-7695-4935-4/12, IEEE, DOI 10.1109/IMCCC.2012.297, 2012.
53. Xiaoqing Han, Ying Qu, Peng Wang, Junhu Yang-Four-Dimensional Wind Speed Model for Adequacy Assessment of Power Systems With Wind Farms, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 28, No. 3, August 2013

RAPOARTE

1. [BEI2009] Raport privind activitatea și responsabilitatea corporativă – Volumul I, Raportul anual pentru 2008 al Grupului BEI, Banca Europeană de Investiții, 2009, <http://www.eib.org/report>.
2. [CIRED1999] Dispersed generation, Preliminary report of CIRED working group WG04, 1999, pp.1-39.
3. [CNTEE20014] CNTEE Transelectrica S.A., 2014, Annual Report.
4. [DENA2005] DENA: Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020, Dena, Deutschland, 2005.
5. IEA Wind Energy Annual Report, International Energy Agency, IEA Wind, Paris, 2007.
6. IEA Wind Energy Annual Report, International Energy Agency, IEA Wind, Paris, 2007.
7. World Energy Outlook Fact Sheet, International Energy Agency, 2009.
8. Wind turbine generator systems. Part 1: Safety requirements, IEC 61400-1/2005, International Electrotechnical Commission, 2005.
9. Pachetul pentru energie al Comunității Europene, Buletinul IRE, anul IV, nr. 4, 2007.
10. The Kyoto Protocol, United Nations Framework Convention on Climate Change, Kyoto, Japan, 1995, http://unfccc.int/kyoto_protocol.
11. Legea pentru stabilirea sistemului de promovare a producerii energiei din surse regenerabile de energie, Monitorul Oficial, 2008.
12. European distributed energy resources projects, European Commission, Luxembourg, 2004.
13. Towards Smart Power Networks - Lessons learned from European research FP5 projects, European Commission, Belgium, 2005.
14. Commission of the European Communities - Communication from the Commission to the European Council and the European Parliament - An Energy Policy for Europe, Brussels, 2007.
15. Directive 2001/77/EC of the European Parliament and the Council of 27.09.2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market, Official Journal no. L283/27.10.2001.
16. International Energy Outlook 2009, Energy Information Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, May 2009.
17. Integration of Renewable Energy Sources. Targets and benefits of large-scale deployment of renewable energy sources, Workshop – Renewable Energy Market Development, Status and Prospects, European Renewable Energy Council (EREC), 2004.
18. Large Scale Integration of Wind Energy in the European Power Supply: analysis, issues and recommendation, A report by EWEA, European Wind Energy Association, December 2005.
19. Delivering energy and climate solutions, EWEA 2007 Annual Report, European Wind Energy Association, March 2008.
20. Winning with European Wind – Creating power, helping the environment, EWEA 2008 Annual Report, European Wind Energy Association, June 2009.
21. The Economics of Wind Energy, A report by the European Wind Energy Association, European Wind Energy Association, March 2009.
22. 2004 State of the markets report. Staff report by the office of market oversight and investigations, Federal Energy Regulatory Commission, Washington, USA, 2005.
23. Renewables 2007 - Global status report, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21, 2007.
24. Renewables global status report 2009 Update, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21, 2009.
25. Riso DTU, Sustainable energy generation, storage and distribution, Riso DTU National Laboratory for Sustainable Energy, 2006.
26. World Energy and Climate Policy: 2009 Assessment, World Energy Council, 2009.
27. Certificate Verzi emise producătorilor de E-SRE pentru energia produsă în perioada 2012-2014, 2009, <http://www.transelectrica.ro>.
28. Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy.