

CONTRIBUȚII LA MODELAREA ȘI CONDUCEREA AGREGATELOR AEROELECTRICE ECHIPATE CU GENERATOARE DE INDUCȚIE ȘI SINCRONE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul AUTOMATICĂ
de către

Ing. Iosif Szeidert-Șubert

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean
Referenți științifici: Prof.univ.dr.ing. Mihail Abrudean
Prof.univ.dr.ing. Sergiu Stelian Iliescu
Prof.univ.dr.ing. Nicolae Budișan

Ziua susținerii tezei: 08.12.2009

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, 2006

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

CUVÂNT ÎNAINTE

Prezenta lucrare este rezultatul activității de cercetare întreprinse în calitate de cadru didactic și în același timp doctorand la Facultatea de Automatică și Calculatoare din Timișoara, Departamentul de Automatică și Informatică Aplicată.

În cadrul acestei teze au fost studiate agregatele aeroelectrice, modelarea și conducerea acestora, cu focalizare pe conducerea generatoarelor electrice cu care acestea sunt echipate.

Doresc să îmi exprim profunda recunoștință față de toți cei care, prin sprijinul moral și în special științific acordat de-a lungul ultimilor ani m-au ajutat efectiv la finalizarea acestei lucrări. Cu toate că numele tuturor nu este amintit explicit, le adresez calde mulțumiri.

Pentru realizarea acestei lucrări doresc să aduc alese și distinse mulțumiri conducătorului științific, Domnului Prof.univ.dr.ing. Octavian PROȘTEAN, Decanul Facultății de Automatică și Calculatoare, pentru sprijinul și îndrumarea deosebită acordată pe întreaga perioadă a elaborării tezei.

De asemenea, doresc să îmi exprim întreaga considerație față de Domnul Prof.univ.dr.ing. consultant Nicolae BUDIȘAN, a cărui exemplu de dăruire profesională și didactică, a constituit un adevărat model profesional pentru mine. Astfel, îi aduc mulțumiri sincere pentru observațiile critice și pentru timpul acordat lucrării.

Îmi exprim întreaga considerație față de membrii comisiei de doctorat, Domnul președinte al comisiei, Prof.univ.dr.ing. Mircea STRATULAT, Prodecanul Facultății de Automatică și Calculatoare din Timișoara și Domnii Prof.univ.dr.ing. Mihail ABRUDEAN de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca și Prof. dr.ing. Sergiu Stelian ILIESCU de la Universitatea „Politehnica” din București, care au răspuns solicitării de a face parte din comisia de analiză a tezei de doctorat și pentru timpul de studiu acordat prezentei lucrări.

Nu în ultimul rând, doresc să le aduc mulțumiri prietenilor mei din colectivul B027, în special Domnului Prof.univ.dr.ing. Ioan FILIP, respectiv As.univ.ing. Cristian VAȘAR și Prep.univ.ing. Andreea ROBU, colegiilor mei de la Departamentul de Automatică, dar și celor de la Facultatea de Electrotehnică - Dlui Prof.univ.dr.ing. Marius BABESCU, Prof.univ.dr.ing. Marius BIRIESCU, și nu numai.

Timișoara, noiembrie 2009

Cu deosebită considerație,
Iosif Szeidert-Șubert

Szeidert-Şubert, Iosif

**Contribuții la modelarea și conducerea agregatelor
aeroelectrice echipate cu generatoare de inducție și
sincrone**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 1, Nr. 14, Editura Politehnica,
2009, 180 pagini, 85 figuri, 16 tabele.

ISSN: 1842-5208

ISBN: 978-606-554-024-8

Cuvinte cheie: energie eoliana, generatoare de inducție,
generatoare sincrone, modelarea și conducerea agregatelor
aeroelectrice

Rezumat:

În cadrul acestei lucrări sunt abordate problematici specifice domeniului resurselor eoliene. După o succintă trecere în revistă a stadiului actual privind tehnologiile utilizate în domeniu se tratează problema modelării lanțului de conversie a energiei eoliene echipat cu generatoare de inducție și sincrone. S-a realizat proiectarea, implementarea și validarea unor structuri de conducere adaptivă autoacordabilă, particularizate pentru reglarea tensiunii la bornele unui generator de inducție cu înfășurări statorice separate de sarcină și excitație. Au fost implementate metode indirecte de determinare a valorilor mărimilor specifice agregatelor aeroelectrice, acestea fiind utilizate în vederea implementării unor strategii propuse de conducere planificată. În finalul lucrării se prezintă metode de conducere bazate pe urmărirea obținerii maximumului de putere.

CUPRINS

1. Introducere	9
1.1. Oportunitatea si obiectivele lucrarii	9
1.2. Prezentarea continutului lucrarii	10
2. Actualitatea cercetarii	12
2.1. Producerea energiei din surse neconvenționale.....	12
2.2. Stadiul actual și perspectiva utilizării energiilor neconvenționale pe plan mondial, în UE și în România.....	17
2.3. Potențialul eolian al României.....	21
3. Stadiul actual al sistemelor de conversie a energiei eoliene în energie electrică.....	23
3.1. Structura generală a sistemelor de conversie a energiei eoliene	23
3.2. Reabilitarea generatorului de inducție.....	24
3.3. Agregate aeroelectrice cu viteză constantă.....	26
3.4. Agregate aeroelectrice cu viteză variabilă.	27
3.4.1. Modificarea vitezei prin comutația polilor la mașinile de inducție utilizate în conversia energiei eoliene.....	27
3.4.2. Agregate aeroelectrice cu turație variabilă cu mașini de inducție cu rotorul în colivie.	28
3.4.3. Agregate aeroelectrice cu generator de inducție cu rotorul bobinat..	29
3.4.4. Sisteme de conversie a energiei eoliene cu viteză variabilă cu generatoare sincrone.	30
3.4.5. Configurații de agregate aeroelectrice. Sinteza.....	31
3.5. Agregate aeroelectrice conectate la rețea, cu cuplare directă a turbinei cu generatorul.	35
3.6. Sisteme de conversie a energiei eoliene cu generatoare de inducție conectate la rețea.	37
3.7. Conducerea agregatului aeroelectric cu viteza de rotație variabilă.	40
3.8. Convertoare statice de putere utilizate în sistemele de conversie a energiei eoliene.	42
3.9. Sisteme autonome de conversie a energiei eoliene.	47
3.10. Funcționarea unui agregat aeroelectric conectat la rețeaua electrică și regimuri de funcționare specifice.	48
3.10.1. Demararea, regimul de așteptare și conectarea/deconectarea la/de la rețea și oprirea agregatului aeroelectric.....	49
3.10.2. Determinarea indirectă, analitică, a vitezei vântului în funcție de puterea, tensiunea, intensitatea curentului și factorul de putere al generatorului.	50
3.10.3. Funcționarea grupului "turbina – generator" în cazul unei valori constante a vitezei vântului.....	51
3.10.4. Regimuri de funcționare optime, sau impuse din motive de limitare a turației și curentului în funcționare, la agregatele de vânt cu turbina fără autoplafonare a puterii.....	53
3.11. Abordarea integrată a proiectării fermelor de agregate aeroelectrice	55
3.12. Concluzii.	55

4. Modelarea matematica a principalelor elemente componente ale agregatelor aeroelectrice.	57
4.1. Modelul de variație a vitezei vântului.	57
4.2. Modelul rotorului turbinei de vânt.	59
4.3. Modelul sistemului de transmisie	60
4.4. Modelarea matematica a mașinii de inducție.	62
4.4.1. Modelul abc al mașinii de inducție.	63
4.4.2. Modelul mașinii de inducție bifazate virtuale în sistemul de referință dq0	68
4.4.3. Reducerea ordinului modelului matematic.	73
4.4.4. Modelarea mașinii de inducție cu considerarea saturatiei magnetice.....	75
4.5. Modele matematice ale mașinii sincrone cu magneți permanenți	76
4.5.1. Modelul matematic al mașinii sincrone cu magneți permanenți bifazate virtuale în sistemul de referință dq0	76
4.5.2. Modelul matematic al mașinii sincrone cu magneți permanenți în referențialul rotoric.	79
4.6. Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, conectat la o rețea de putere finită.....	80
4.6.1. Preliminarii.	80
4.6.2. Modelarea unui generator de inducție cu două înfășurări statorice conectat la un sistem de putere limitată printr-o linie de transmisie.	82
4.6.3. Studii de caz pentru validarea modelelor matematice ale generatorului de inducție cu două înfășurări statorice.	94
4.6.3.1 Analiza rezultatelor obținute prin simularea unor regimuri caracteristice de funcționare în vederea validării MM neliniar de ordinul 7.	99
4.6.3.2 Analiza rezultatelor obținute prin simularea unor regimuri caracteristice de funcționare în vederea validării MM liniar redus de ordinul 4	102
4.7. Concluzii.....	106
5. Metode indirecte de determinare a valorilor unor mărimi specifice agregatelor aeroelectrice echipate cu generatoare sincrone.	107
5.1. Preliminarii.	107
5.2. Determinarea randamentului generatorului sincron	108
5.2.1. Determinarea randamentului generatorului sincron utilizând funcții de regresie de o singură variabilă, și respectiv de două variabile.....	108
5.2.2. Studiu comparativ privind utilizarea funcțiilor de regresie de o variabilă, respectiv de două variabile pentru determinarea randamentului generatorului.....	114
5.3. Determinarea indirectă a turației și vitezei vântului generatorului sincron.....	115
5.4. Determinarea modelului matematic a turbinei de vânt utilizând rezultatele încercărilor / testelor efectuate în tunel aerodinamic.	116
5.5. Concluzii.	120
6. Structuri de conducere autoacordabile pentru comanda excitației unui generator de inducție de construcție specială.	122
6.1. Preliminarii	122
6.2. Sisteme de conducere adaptive autoacordabile (self-tuning)	123

6.3. Consideratii privind sinteza sistemelor de conducere adaptiva autoacordabila.	124
6.4. Sinteza legii de conducere adaptive autoacordabile.	126
6.5. Regulator autoacordabil cu compensare dupa reactie si referinta	127
6.6. Studii de caz	129
6.7. Concluzii.	144
7. Considerații privind metode de conducere cu urmărirea punctului de putere maximă a agregatelor aeroelectrice.	146
7.1. Preliminarii.	146
7.2. Metoda urmării maximului de putere.	146
7.2.1. Metoda urmării maximului de putere cu pas fix.....	146
7.2.2. Metoda urmării maximului de putere cu pas divizat.....	147
7.2.3. Metoda urmării maximului de putere cu pas adaptiv.....	148
7.2.4. Metoda urmării maximului de putere cu pas exponențial.....	149
7.2.5. Implementarea metodelor de tip urmării maximului de putere la agregate aeroelectrice.....	151
7.3. Studiu de caz asupra metodei MPPT pentru regimuri de functionare ale AAE echipate cu generator de inductie.	152
7.4. Concluzii.....	157
8. Concluzii finale și contribuții. Perspective de dezvoltare	158
8.1. Concluzii finale	158
8.2. Contributii personale.....	159
8.3. Perspective de dezvoltare	160
Bibliografie	162
Anexa A1 – Rezultate obtinute pe parcursul stagiului doctoral	172

Notații, abrevieri

AAE	- agregat aeroelectric
ACSCF	- viteză de rotație și frecvență aproape constante (almost constant speed, constant frequency)
c.a.	- curent alternativ
c.c.	- curent continuu
CET	- centrale de producere a căldurii și electricității
CFE	- celule fotoelectrice
CMMP	- cele mai mici patrate
Cp	- coeficient de putere
CSCF	- viteză de rotație și frecvență constante (constant speed, constant frequency)
CSI	- invertor sursă de curent (current source inverter)
DFIG	- generator de inducție cu dublă alimentare (doubly-fed induction generator)
EWEA	- Asociația Europeană pentru Energia Vântului (European Wind Energy Association)
GI	- generator de inducție (asincron)
GIDA	- generator de inducție (asincron) cu dubla alimentare
GS	- generator sincron
GSMP	- generator sincron cu magneti permanenți
IEB	- unități energetice cu biogaz
INMT	- Institutul Național de Motoare Termince
MEPT	- urmărirea punctului de randament maxim (maximum efficiency point tracking)
MM	- model matematic
MPPT	- urmărirea maximului de putere extrasă (maximum power point tracking)
PC	- proces condus
PWM	- modularea impulsului în durată (pulse width modulation)
RAA	- regulator autoacordabil
SAA	- sistem adaptiv autoacordabil
SAD	- sistem adaptiv
SAME	- sistem adaptiv cu model etalon
SCAD	- sistem de conducere adaptiv
SEPL	- sistem energetic de putere limitată (finită)
SRAC	- sistem de reglare automat convențional
SRAD	- sistem de reglare adaptiv
UE	- Uniunea Europeană
VSCF	- viteză de rotație variabilă și frecvență constantă (variable speed, constant frequency)
VSI	- invertor sursă de tensiune (voltage source inverter)
VSVF	- viteză de rotație și frecvență variabile (variable speed, variable frequency)

1. INTRODUCERE

1.1. Oportunitatea și obiectivele lucrării.

În lucrarea de față se abordează un domeniu de mare actualitate al energiei resurselor eoliene - cel al agregatelor aeroelectrice echipate cu generatoare de inducție și sincrone.

Oportunitatea acestor cercetări este dată de utilizarea pe o scară din ce în ce mai largă, a resurselor energetice regenerabile, în special a celor eoliene, în vederea producerii de energie electrică „ecologică”. Expansiunea energiei eoliene a fost posibilă datorită scăderii continue a prețurilor de cost al agregatelor aeroelectrice, colaborată cu politici coerente de promovare a acestor energii neconvenționale ale unor organizații internaționale de profil și state interesate. În plus, rezultatele cercetărilor efectuate în acest domeniu au condus la creșterea fiabilității componentelor, la îmbunătățirea performanțelor dinamice ale agregatelor aeroelectrice.

În cadrul tezei sunt studiate problematice importante ale agregatelor aeroelectrice cum ar fi:

- modelarea și validarea prin simulare a modelelor identificate ale componentelor agregatelor aeroelectrice.
- studiul unor structuri de conducere a agregatelor aeroelectrice.

Principalele obiective propuse în lucrarea de față sunt:

- O analiză critică a structurilor, configurațiilor, tehnologiilor specifice liniilor de conversie a energiei eoliene în energie electrică, precum și integrare a acestora în sistemele energetice de putere.
- Identificarea de modele matematice ale principalelor elemente componente ale agregatelor aeroelectrice în vederea analizei structurilor de conducere propuse.
- Analiza unor metode indirecte de determinare a valorilor unor mărimi specifice agregatelor aeroelectrice în vederea studierii unor metode de conducere, cu urmărirea maximului de putere extrasă din energia vântului.
- Dezvoltarea unor structuri de conducere autoacordabile pentru comanda excitației unui generator de inducție (cu înfășurări separate de sarcină și excitație) în vederea reglării tensiunii la bornele acestuia.
- Studiul unor metode de conducere cu urmărirea punctului de putere maximă a agregatelor aeroelectrice.

1.2. Prezentarea conținutului lucrării

Conținutul lucrării este dezvoltat pe parcursul a 8 capitole.

În primul capitol, sunt prezentate obiectivele principale ale lucrării și modul de structurare al acesteia funcție de obiectivele tezei și problematica abordată.

În urma studiului domeniului energeticii eoliene, s-a realizat o clasificare a principalelor tipuri constructive ale agregatelor aeroelectrice după mai multe criterii: ax, generatorul, convertor de putere, etc.

În cadrul capitolului trei, s-a realizat un amplu studiu bibliografic utilizând resurse bibliografice de specialitate, conturându-se stadiul actual în domeniul utilizării energiilor regenerabile, atât pe plan național, cât și pe plan internațional.

Capitolul patru tratează problematica modelării matematice a principalelor elemente componente ale agregatelor aeroelectrice. S-au dezvoltat și sintetizat modele utilizabile în implementarea și testarea unor strategii de conducere. Astfel, au fost dezvoltate modele ale: variației vitezei vântului, turbinei, sistemului de transmisie (amplificatorul de turație), generatorului electric (de inducție și sincron).

În cadrul acestui capitol, cercetările au fost orientate preponderent pe studiul mașinii electrice de inducție (cu înfasurări statorice separate - de sarcină și excitație) în regim de generator. Au fost identificate o serie de modele matematice ale generatorului considerat, acesta fiind validat atât prin simulare numerică, cât și experimental prin încercări de laborator. Au fost validate, de asemenea prin simulare numerică, modelul liniarizat de ordinul 7 și modelul liniarizat de ordinul redus la 4 (obținute utilizând un estimator de parametri).

În capitolul cinci, se dezvoltă și implementează metode indirecte de determinare a valorilor mărimilor specifice agregatelor electrice. Aceste mărimi sunt necesare în vederea implementării unei strategii propuse de conducere planificată (planning control). Se prezintă două metode de calcul a randamentului și de determinare a unui model matematic al turbinei de vânt, folosind funcții de regresie de o variabilă, respectiv funcții de 2 variabile.

În cadrul capitolului șase, s-a realizat proiectarea, implementarea și validarea unor structuri de conducere adaptivă autoacordabilă, particularizate pentru reglarea tensiunii la bornele unui generator de inducție cu înfășurări statorice separate de sarcină și excitație. Sinteza structurilor de conducere propuse a avut ca bază de pornire identificarea unui model matematic liniarizat de ordinul 7 (model obținut prin liniarizarea modelului matematic neliniar al procesului), precum și premiza unei reduceri a ordinului acestuia la 4, în scopul scăderii complexității algoritmului de conducere. Structurile de conducere proiectate, bazate pe minimizarea unei funcții criteriu, integrează o componentă de compensare după referință, respectiv o componentă de compensare după reacție.

1.2 - Prezentarea conținutului lucrării

În cadrul capitolului șapte s-au studiat și dezvoltat metode de conducere bazate pe urmărirea obținerii unui maxim de putere. Testarea strategiei de conducere cu urmărirea punctului de maxim s-a realizat pentru diverse regimuri de funcționare specifice generatorului de inducție cu rotorul în scurtcircuit (la diverse variații ale vitezei vântului), obținându-se performanțe bune ale acestora.

În finalul lucrării sunt prezentate concluziile, contribuțiile personale și posibile direcții de cercetare ulterioare în opinia autorului. Teza se întinde pe 180 pagini și conține 85 de figuri, 16 tabele și 130 de titluri bibliografice. O mare parte din contribuții a fost validată prin publicarea a 45 de lucrări științifice, la care autorul tezei este autor/prim-autor/coautor, acesta în marea majoritate fiind: lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate ISI Proceedings; lucrare publicată în volumul unei conferințe indexate Inspec și IEEEExplore; lucrări publicate în volumele unor conferințe internaționale neindexate; lucrări publicate la alte conferințe naționale cu participare internațională; lucrări la conferințe/manifestări științifice naționale.

2. ACTUALITATEA CERCETĂRII

2.1. Producerea energiei din surse neconvenționale.

Producerea energiei de la surse neconvenționale reprezintă un domeniu de mare interes în contextul energetic actual mondial. Unul dintre motivele cele mai importante care duc la necesitatea utilizării resurselor, neconvenționale este acela că la nivel global este consumată o cantitate din ce în ce mai mare de materii prime (combustibili), care însă evident sunt limitate. Calcule estimative conduc la concluzia că, în condițiile în care în ultimele decenii consumul s-a dublat la aproape fiecare 10 ani, rezervele mondiale ar putea să se epuizeze într-un termen relativ scurt.

Se dispune încă de resurse naturale suficiente, dar în condițiile unei exploatare corespunzătoare și a implementării unor surse alternative eficiente.

Principalele surse de energie neconvenționale sunt:

- Energia hidroelectrică - se preconizează utilizarea de centrale bazate pe energia marelui, a valurilor, diferența de temperatură dintre diferitele straturi de apă, respectiv între apa și atmosfera din regiunea polară.
- Energia solară - se preconizează utilizarea mult mai amplă a bateriilor solare cu celule fotovoltaice, respectiv a centralelor electrice solare cu ciclu termodinamic clasic.
- Energia combustibililor gazoși - energia biomaselor, biogazul (centrale biogaz), hidrogen.
- Energia termică a pământului - utilizarea apelor termale, a gheizerelor.
- Energia eoliană - utilizarea ei este în prezent de mare actualitate.

Energia solară, prezintă o problemă deosebit de vastă, fiind vizate aspecte de termotehnică, electrotehnică, materiale, chimie, etc. În Fig. 2.1. este prezentată principial o centrală electrică solară, aflată în funcțiune încă din 1967 în Munții Pirinei. Această centrală este cu ciclu termodinamic clasic. O suprafață de 1m² orientată perpendicular pe razele Soarelui captează, pe Pământ o putere de aproximativ 1kW. [1]

Conversia foto- termo- mecanică are la bază principiile termodinamicii, cu următoarele cicluri clasice: cicluri cu vapori de freon, butan; cicluri cu vapori de apă (Rankine); cicluri cu aer cald (Ericson, Stirling); ciclu cu turbină cu gaze (Brayton).[1]

În domeniul energiei solare s-au impus primele două soluții (cu vapori de freon, respectiv vapori de apă). Menținerea ușoară și durata mare de viață a sistemelor neconvenționale le oferă o competitivitate ridicată.

În Fig.2.2. este reprezentată o pompă solară care are un rezervor de apă dispus sub nivelul apei din puț, astfel că apa intră în rezervor printr-o suprafață datorită presiunii atmosferice. Agentul de lucru este, de regulă, pentanul sau un alt produs petrolier cu punct de fierbere între 350-450°C, acesta circulând datorită energiei solare, de la captatorul solar 1 înspre vasul reductor 2. Vaporii din vasul reductor trec în rezervorul din puț și astfel apa este împinsă din rezervor înspre zona irigată.

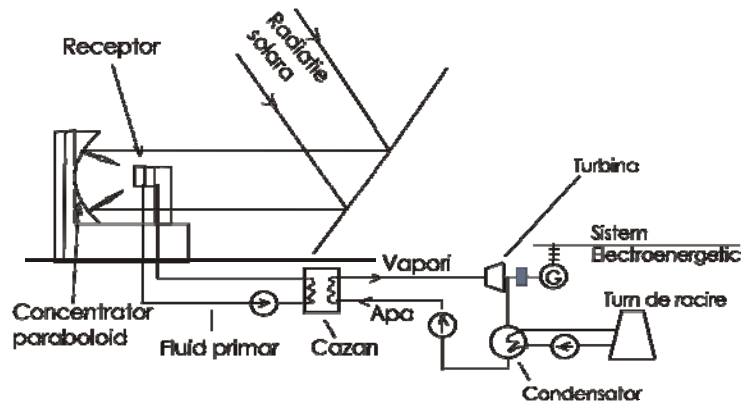


Fig. 2.1. Centrală electrică solară cu ciclu termodinamic clasic.

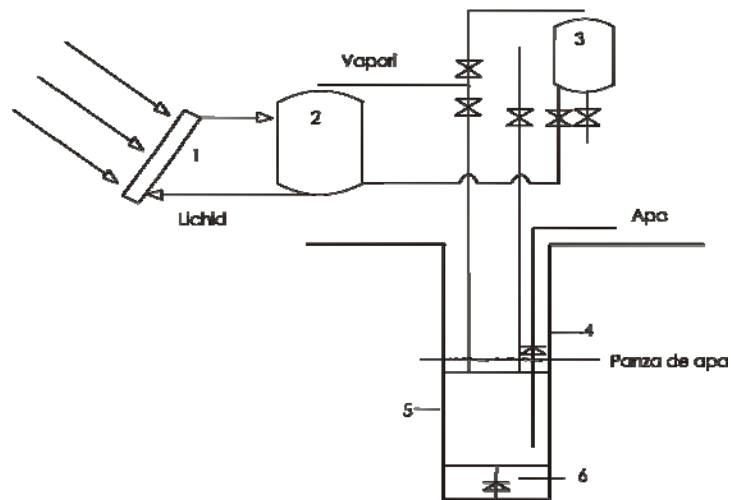


Fig. 2.2. Pompă solară.

Au fost folosite notațiile: 1 - captator solar; 2- vas reductor; 3- vas de recirculare; 4 - puț; 5 - rezervor de apă; 6 – supapă.(in Fig.2.2.)

Conversia foto-termo-electrochimică se bazează pe descompunerea termică a unor substanțe chimice prin absorbție de căldură. Sunt utilizate săruri topite: PbI_2 , LiI , LiH , SnI_2 , $BiCl_3$ care se descompun prin electroliză la temperatura T_1 în focarul captatorului solar cilindro-parabolic, astfel obținându-se o pilă de combustie cu regenerare termică și electrochimică. Puterea electrică produsă de pilă (P_{el}) din care o parte este ($P_{el.ut.}$) util furnizată spre consumator, iar o altă parte este folosită în celula de electroliză la temperatura ridicată T_1 ($P_{el.d}$). În Fig. 2.3, este reprezentat un astfel de sistem de conversie folosind o pilă de combustie cu regenerare termo-electrochimică. [1]

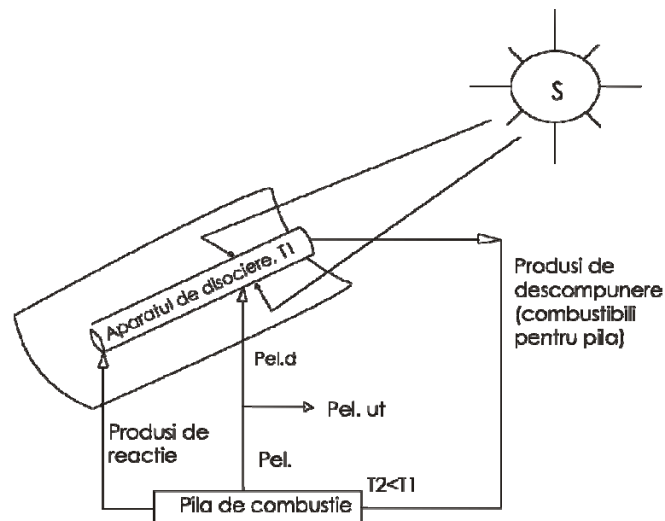


Fig. 2.3. Sistem de producere a energiei solare - cu pilă de combustie.

Bateriile solare sunt realizate prin conectarea paralel/serie a mai multor celule fotoelectrice (CFE). Tensiunea U la care lucrează bateria este determinată de numărul de celule conectate în paralel, respectiv curentul de sarcină I , impunând numărul de CFE înseriate. Fiabilitatea panourilor solare depinde de anumiți factori, dintre care cei mai importanți sunt:

- legăturile electrice între celule (prin încălziri și răciri succesive se pot produce desprinderi locale și celulele pot fi scoase din circuit);
- izolarea unor CFE conduce la supraîncălzirea celorlalte și la o deteriorare termică mai rapidă;
- producerea accidentală a unor scurtcircuite locale scade randamentul și conduce la un grad ridicat de uzură;
- expunerea la radiații de mare energie poate distruge acoperirile tehnologice ale straturilor utile și prin aceasta conduce la îmbătrânirea rapidă a celulelor din componența bateriilor solare.

Sistemele cu baterii solare pot fi cu orientare/urmărire după Soare, respectiv fixe. [1] [2]

Energia biogazului, prezintă un domeniu de interes, în contextul actual al preocupărilor ecologice, de protecție a mediului înconjurător. Există o serie de domenii (proces de epurare a apei, procesarea deșeurilor, procese de fermentație a unor excremente animale), unde au loc procese de fermentație, iar un produs secundar îl reprezintă biogazul. Un potențial domeniu de producere a biogazului ar putea fi recolta de alge marine. Astfel, algele marine (cu ritm de creștere de circa 50 cm/zi la adâncimi de aproximativ 10m) pot produce o vastă cantitate de biomasă. Se apreciază că o zonă de alge cu un diametru de 1000 km ar putea conduce la producerea unei energii de 100 MW. De asemenea, există posibilitatea de a utiliza deșeurile forestiere sau agricole pentru producerea energiei. [2][3] Actualmente, cele mai avansate sunt programele de obținere a biogazului în cadrul uzinelor de epurare a apelor uzate, respectiv a fermelor zootehnice. Studiile efectuate la Institutul Național de Motoare Termice (INMT), indică faptul că cea mai eficientă formă de utilizare a biogazului este direct la locul de producere, fără consum suplimentar de

2.1. Producerea energiei din surse neconvenționale. 15

energie pentru transportul acestuia. Cea mai eficientă formă de utilizare a biogazului este considerată, de către INMT, a fi în cadrul centralelor de producere a căldurii și electricității (CET) utilizând unități energetice cu biogaz (IEB) cu recuperare de căldură. Grupurile energetice IEB pot avea o eficiență energetică ridicată, doar în condițiile unei utilizări adecvate a căldurii recuperate la diverse niveluri de temperatură pentru procesele de fermentație, cât și pentru alte utilizări (uscare, condiționare aer, răcire). Cea mai bună utilizare a biogazului, cu investiție minimă este cazul unei singure stații de epurare a apei pentru mai multe unități agrozootehnice. Regimul de bază al unei unități IEB este acela în care se livrează energie electrică consumatorilor prin intermediul rețelei generale de distribuție în concordanță cu debitul de biogaz, variația sarcinii consumatorilor fiind compensată de rețea. În cadrul IEB-M cea mai indicată bună soluție, în privința generatorului, o constituie alegerea unei mașini de inducție care la pornirea unității va funcționa în regim de motor, conducând motorul termic la condițiile de operare de motor, moment în care corespunzător, debitului de biogaz, motorul termic va angrena mașina de inducție la viteza suprasincronă, deci acesta va funcționa în regim de generator cu încărcare în funcție de debitul de biogaz. Este de dorit ca aceste unități IEB să fie capabile să opereze și în regim autonom, deoarece căderile de tensiune ale rețelei generale pot conduce la perturbarea gravă a unităților zootehnice, în general. [3]

Energia eoliană. Elementul de bază care realizează conversia energiei eoliene este turbina de vânt. Există două configurații importante în funcție de poziția axei de rotație a paletelor rotorului turbinei (Fig. 2.5.). [3][4][5]

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.

După cum reiese din Fig. 2.4, elementele principale ale unui sistem de conversie a energiei eoliene sunt: generatorul electric, rotorul turbinei cu paletelile componente, arborele rotorului turbinei și arborele generatorului de inducție, cutia de viteze (amplificatorul de turație), care poate lipsi în unele cazuri, frâna mecanică și turnul de susținere, care are o înălțime corespunzătoare în funcție de puterea generatorului. De asemenea, agregatele sunt echipate și cu echipamente de monitorizare și reglare pasului paletelor, a turației și tensiunii generatorului, a poziției nacellei, etc.

Observație: Termenul de cutie de viteze (Gearbox), consacrat în literatura de specialitate este impropriu, deoarece de fapt se utilizează un amplificator mecanic de turație cu raport de amplificare fix, cu cuplaj rigid, elastic sau de siguranță, spre exemplu de 10:1, 15:1, 20:1, etc.. Utilizarea amplificatorului de turație este necesară deoarece acesta amplifică turația turbinei de vânt (de ex: 200 [rpm]) la valoarea necesară funcționării generatorului electric (de ex: 3000 [rpm] – turație de sincronism).

Sistemele de conversie a energiei eoliene utilizează frecvent generatoare de inducție, datorită avantajelor incontestabile ale acestora: robustețe, simplitate, fiabilitate, respectiv cost redus. [6].

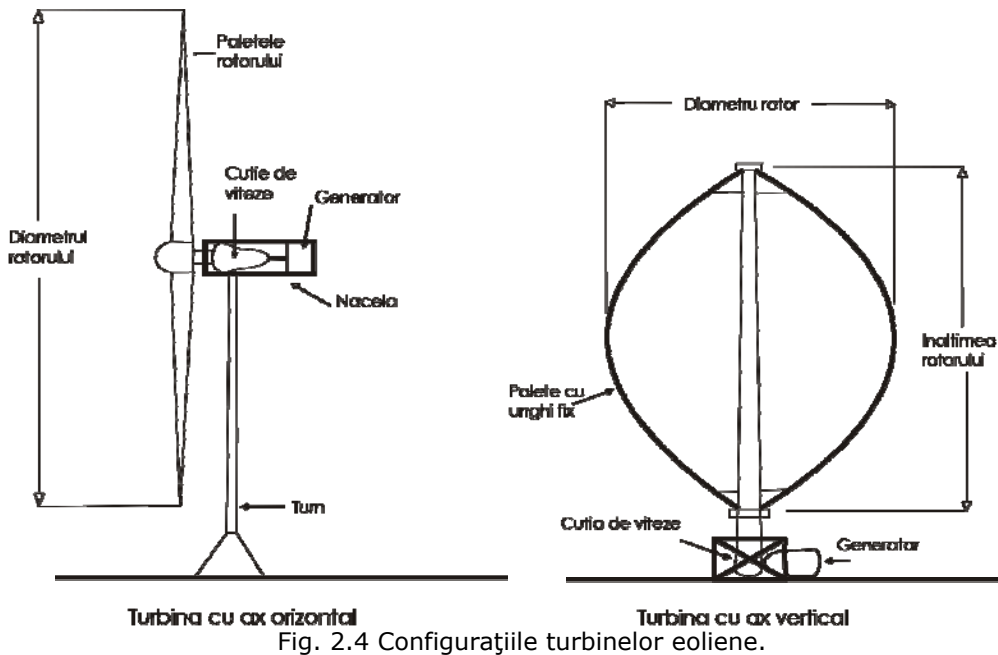


Fig. 2.4 Configurațiile turbinelor eoliene.

Cele mai recente moduri de abordare pentru sistemele de conversie a energiei eoliene utilizând generatoare de inducție, au fost posibile datorită dezvoltării și perfecționării controlului utilizând convertoarele statice de putere. Libertatea în ajustarea tensiunii, curentului, și frecvenței a permis funcționarea acestor mașini la turație reglabilă în funcție de viteza vântului. [3][4][5]

Se utilizează atât mașinile cu rotorul în colivie, care sunt ideale pentru a fi utilizate în aceste aplicații unde este necesară o întreținere ușoară, o construcție robustă și condiții de operare ușoare, cât și mașinile dublu alimentate, care pot funcționa în regim de generator, cu extinderea domeniului de viteză de la viteza subsincronă la aproape dublul vitezei sincrone [3][7].

Există două metode uzuale care utilizează generatoarele de inducție în sistemele de conversie a energiei cu turbine eoliene :

1. Prima metodă, care este de fapt și cea mai simplă, considera statorul mașinii de inducție conectat direct la rețea. Această metodă foarte comună face ca mașina să funcționeze la frecvență constantă și la viteză aproape constantă. Deoarece intensitatea vântului este variabilă, este de dorit ca turbina să funcționeze la viteză variabilă, pentru a putea opera la puterea maximă obținabilă. Acest lucru se realizează utilizând generatorul de inducție "cu dublă alimentare".

2. A doua metodă permite funcționarea la frecvență și tensiune variabile ale statorului mașinii, utilizând convertoare statice de putere, situate între stator și rețea. Aceste scheme, similare cu cele care utilizează un control U/f al motorului de inducție, se bazează pe menținerea relațiilor liniare între U și f . Utilizând această metodă, puterea poate fi produsă într-un domeniu larg de variație a vitezei vântului [6]

Dintre metodele menționate au dovedit o eficiență mai mare cea de-a doua metodă, cu considerarea funcționării optime atât pentru mașina electrică cât și pentru turbina eoliană.

2.2 - Stadiul actual și perspectiva utilizării energiilor 17

Se constată că până în prezent majoritatea turbinelor de vânt instalate în întreaga lume sunt conectate la rețea. Până în anul 2001, 60% din turbinele eoliene instalate erau cu viteză constantă. În ultimii ani majoritatea agregatelor aeroelectrice instalate sunt cu viteză variabilă.

2.2. Stadiul actual și perspectiva utilizării energiilor neconvenționale pe plan mondial, în UE și în România.

Conversia energiei eoliene este sursa de generare a electricității cu rata de creștere cea mai rapidă. La sfârșitul anului 2000 capacitatea instalată a agregate aeroelectrice, pe plan mondial a fost de 17.500 MW, din care aproximativ 12.800 MW (70 %) au fost instalate în Europa [WWW_01]. Asociația Europeană a Energiei Eoliene (EWEA) și-a propus ca scop (țintă) până în anul 2010, ca puterea instalată să ajungă la 60.000 MW.[8][9]

Agregatele aeroelectrice (AAE) s-au dezvoltat rapid în special în ultimii 20 de ani.

Tehnologia conversiei energiei eoliene în energie electrică este realizată cu mașini electrice de curent alternativ, sincrone și asincrone (de inducție), utilizate în regim de generator. Majoritatea sistemelor de conversie a energiei eoliene de puteri mari utilizează în prezent generatoarele de inducție datorită avantajelor incontestabile ale acestora: robustețe, simplitate, fiabilitate, cost redus, respectiv mentenanță facilă [8][9].

Cele mai recente procedee de conversie a energiei eoliene au fost realizate în baza progreselor strategiilor de reglare și conducere, implementate cu convertitoare statice de putere extrem de performante.

Energia care poate fi obținută de la vânt, prin intermediul AAE depinde pe de-o parte de energia cinetică a vântului, iar pe de altă parte de designul turbinei [10].

Recent, industria constructoare de AAE a arătat un real interes pentru sistemele de conversie a energiei cu viteză variabilă. Prin funcționarea la viteză variabilă se poate crește semnificativ eficiențarea captării energiei eoliene, micșorând totodată solicitările mecanice și zgomotul aerodinamic.

Problematika energiei eoliene ramane atractivă și în continuare punând accent pe reînnoirea structurilor, tehnologiilor și conducerii.

Directivele UE privind promovarea utilizării energiei surselor regenerabile în cadrul pieței interne a UE prevăd următoarele:

- necesitatea creșterii gradului de exploatare a surselor regenerabile de energie prin măsuri concrete în cadrul legal al pieței de energie a UE;
- directiva 96/92/EC a Consiliului și Parlamentului European stabilește regulile de bază ale pieței de energie europene;
- articolul 6 al tratatului necesită integrarea unor cerințe de protecție a mediului în definiția și implementarea unor acțiuni și politici comunitare;
- creșterea eforturilor comunitare, în special a țărilor membre ale uniunii în vederea atingerii indicatorului obiectiv - 12% din energia consumată să provină din surse regenerabile de energie (pana în anul 2010);
- un cadru armonizat privind Planul de Acțiuni Comunitar stabilite prin intermediul Cărtii Albe a resurselor regenerabile de energie;

- utilizarea crescută a electricității provenite din surse regenerabile constituie o parte esențială a pachetului de măsuri necesar respectării Convenției de la Kyoto;

- creșterea gradului de utilizare al energiilor regenerabile este necesară nu doar pentru reducerea efectului de seră ci și pentru reducerea emisiilor de gaze dăunătoare, toxice (CO₂, SO₂, NO_x, etc). [8]

Promovarea utilizării energiei surselor regenerabile este motivată prin:[6][8][9]

1. Efectele negative ale utilizării resurselor fosile de energie.

1.1. Provocarea unor efecte păguboase asupra climatului Terrei, la nivel global.

1.2. Micșorarea și, în final, epuizarea resurselor fosile care ar putea fi utilizate în alte scopuri mai utile, ceea ce va conduce, inevitabil, și la scumpirea energiei.

2. Scopul și oportunitățile oferite de utilizarea energiilor regenerabile.

2.1. Obținerea de energie electrică, termică, apă (pompare), hidrogen, etc.

2.2. Incetinirea epuizării resurselor fosile.

2.3. Diminuarea/eliminarea efectului de seră și a efectelor sale păguboase la nivel global, problemă asupra căreia s-a convenit prin importante tratate internaționale: Kyoto, Rio de Janeiro, Berlin, Johannesburg.

2.4. Siguranța ecologică sporită.

2.5. Contribuție la descentralizarea producției de energie electrică prin creșterea numărului de producători (societăți pe acțiuni, asociații de producători, producători particulari individuali, inclusiv fermieri și mici proprietari)

2.6. Un mare avantaj al fermelor eoliene este că agregatele lor pot fi construite pe etape, bucată cu bucată, după posibilitățile financiare ale diverșilor investitori, pe aceeași platformă.

3. Orientările și obligațiile asumate pe plan mondial și european (UE).

3.1. Comisia europeană, prin "Cartea Albă privind Sursele Regenerabile de Energie" a stabilit obiectivul obținerii, în anul 2010, a 12% din consumul de energie al UE din surse regenerabile.

3.2. Pentru același an 2010, s-a apreciat de către Asociația Europeană pentru Energia Vântului EWEA, că energia obținută din vânt va reprezenta 10% din energia consumată în UE.

3.3. În perspectiva anului 2020, organizațiile EWEA, Greenpeace și Forumul pentru Dezvoltare Industrială (1999) au apreciat că energia obținută din vânt va reprezenta 10% din energia electrică consumată în întreaga lume, în condițiile în care aceasta se va dubla față de 2010.

3.4. Danemarca are ca obiectiv pentru anul 2015, ca 30% din consumul intern să fie acoperit din energia vântului.

3.5. "Directivele Comisiei Europene de Utilizare a Energiilor Regenerabile", vor fi obligatorii pentru toate țările membre ale UE, prin PLANURI ANUALE, defalcate pe tipuri de energii regenerabile disponibile în țările respective, inclusiv investiții în alte țări cu potențial existent (există astfel de investiții în Polonia).

3.6. În România, a fost aprobată de către Parlamentul României (2003), Legea Energiei Electrice nr. 138, publicată în Monitorul Oficial al României, partea I, 16.07.2003, care dedică problemei capitolul V, "Surse regenerabile de energie", respectiv Hotărârea Guvernului României, H.G. 1533/2003 "Hotărâre privind

2.3. - Potențialul eolian al României 19

aprobarea strategiei de valorificare a surselor regenerabile de energie”, Monitorul Oficial al României, partea I, 07.01.2004.

Aceste hotărâri stabilesc următorul program de valorificare a surselor regenerabile:

a) surse energetice eoliene, 120 MW (putere instalată) în perioada 2003-2010, respectiv 280 MW în perioada 2011-2015.

b) surse hidroenergetice, 120 MW în perioada 2003-2010, respectiv 120 MW în perioada 2011-2015.

Programul orientativ de valorificare a surselor regenerabile de energie în România (extras din Monitorul Oficial al României, partea I, nr. 8/07.01.2004.) este prezentat în tabelul 2.1.

Tabel 2.1. (coloanele 0,1,2 și 3). Program orientativ de valorificare a surselor regenerabile de energie în România.

Nr. crt	Obiective	Acțiuni	Resurse financiare, din care:
0	1	2	3
1	Programul de măsuri privind valorificarea surselor energetice solare: - solar-termal: 7,34 mii tep; 16,00 mii tep; -solar-fotovoltaic: 1,5; 9,5 MW	Studii de fezabilitate, instalații pilot și demonstrative, proiecte de investiții solar-termale și solar-fotovoltaic;	75 mil. €; 93 mil. €; 7 mil. €; 48 mil. €;
2	Captatori solari și componente auxiliare (suprafața totală: 150.000 mp)	Instalarea de module solare pe bază de tehnologii fotovoltaice și	15 mil. €;
3	Programul de măsuri privind valorificarea surselor energetice eoliene: - realizarea de instalații eoliene cu o capacitate totală de circa 120 MW (putere instalată); - realizarea de instalații eoliene cu o capacitate totală de circa 280 MW (putere instalată);	Studii de fezabilitate, instalații pilot și demonstrative, proiecte de investiții eoliene;	120mil. €; 280 mil. €;
4	Programul de măsuri privind valorificarea surselor hidroenergetice (< 10 MW + putere instalată) pentru furnizarea a 6000 GWh/an: - unități hidro (120 MW - putere totală); - unități hidro (120 MW - putere totală);	Studii de fezabilitate, proiecte de execuție, investiții directe în amenajări hidroenergetice de mică putere	150 mil. €; 120 mil. €;
5	Programul de măsuri privind valorificarea surselor energetice	Studii de fezabilitate, stații pilot și de	

20 Actualitatea cercetării - 2

	pe bază de biomasă (biomasă-termal): - circa 3.250 mii tep; - circa 3.490 mii tep;	demonstrare, proiecte de execuție de valorificare energetică a biomasei	240 mil. €; 200 mil. €;
6	Programul de măsuri privind valorificarea surselor energetice geotermale : - 17,5 mii tep; - 23,9 mii tep.	Studii de fezabilitate, explorări geotermale, stații pilot și experimentale, proiecte de investiții hidrogeotermale	15 mil. €; 12 mil. €;

Tabel 2.1. continuare - (coloanele 0,4,5,6 și 7). Program orientativ de valorificare a surselor regenerabile de energie în România.

Nr. crt.	Surse financiare interne	Surse financiare externe	Responsabil	Termene estimative de implementare
0	4	5	6	7
1	25 mil. €; 33 mil. €; 2,5 mil. €; 18 mil. €;	50 mil. €; 60 mil. €; 5 mil. €; 30 mil. €;	Ministerul Economiei și Comerțului, ICEMENERG, autoritățile locale, rezidenți	2003-2010; 2011-2015; 2003-2010; 2011-2015;
2	5 mil. €; 10 mil. €;		Ministerul Economiei și Comerțului, ANRE, ARCE, ICEMENERG	2003-2010; 2011-2015;
3	40 mil. €; 80 mil. €;	80 mil. €; 200mil. €;	Ministerul Economiei și Comerțului, autoritățile locale, societăți private	2003-2010; 2011-2015;
4	75 mil. €; 60mil. €;	75 mil. €; 60mil. €;	Ministerul Economiei și Comerțului, HIDROELECTRICA, ISPH, Apele Române	2003-2010; 2011-2015;
5	100 mil. €; 80 mil. €;	140mil. €; 120mil. €;	Ministerul Economiei și Comerțului, Institutul Național al Lemnului (INL), Departamentul de Mediu	2003-2010; 2011-2015;
6	7.5 mil. €; 6 mil. €;	7,5 mil. €; 6 mil. €;	Ministerul Economiei și Comerțului, Ministerul Sănătății, autoritățile locale	2003-2010; 2011-2015;

În Fig.2.5, este reprezentată harta puterilor instalate (ale agregatelor aeroelectrice), în Europa la sfârșitul anului 2006, harta fiind întocmită de organizația internațională de profil, EWEA (The European Wind Energy Association) [8].

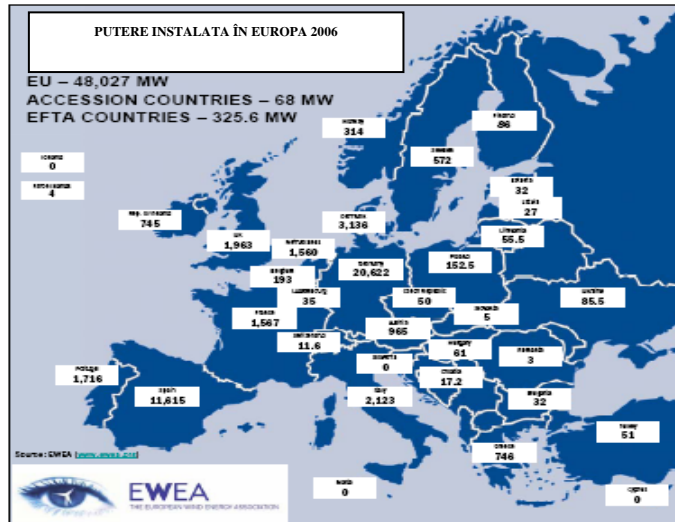


Fig.2.5. Puterea instalată în Europa la sfârșitul anului 2006.

Tabelul 2.2. prezintă puterile instalate în câteva dintre țările europene, [MW].

Tari	Sfârșitul 2005	Instalate 2006	Sfârșitul 2006
Austria	820	145	965
Belgia	167	26	193
Bulgaria	10	22	32
Cehia	28	22	50
Franta	757	810	1567
Germania	18415	2233	20647
Spania	10028	1587	11615
Romania	3	3	3
EU-15	40301	7404	47644
EU-10	199	187	383
EU-25	40500	7587	48027
EU-27	40511	7611	48062

Tabel 2.2. Tabelul cu puteri instalate în țările europene. [www_01]

2.3. Potențialul eolian al României

Cantitatea medie de energie solară de care beneficiază teritoriul țării noastre, într-un an, este estimată la circa 57 mil.t.c.c.(tone combustibil convențional).

Potențialul energetic eolian disponibil se estimează la circa 35 mil.t.c.c./an.

Convertirea în energie electrică a acestei energii se poate face cu un randament global de 0,40, deci energia utilă obținută ar putea fii de circa 111000 mil. Kwh/an. [10]

22 Actualitatea cercetării - 2

Viteza medie anuală a vânturilor, în România, pe baza datelor primite de la stațiile meteorologice, variază în mod normal, de la 0m/s la 15m/s și chiar mai mult. La nivelul culmilor muntoase și deluroase, pe văile orientate în direcția vânturilor, pe litoralul Mării Negre și în Delta Dunării viteza vânturilor și frecvența lor anuală corespundătoare cerințelor de sezabilitate ($v_{med} > 3.4$ m/s).

Cercetările de până acum evidențiază faptul că, vânturile, cu viteze de la 4 [m/s] la 15 [m/s] sunt capabile să pună în mișcare paletele unor centrale eoliene moderne.

Utilizând datele obținute pentru zona montana și pornind de la ipoteza că se instalează pe toți munții României, aeroagregate cu o densitate de 2buc/km liniar de creastă și respectiv 2buc/km² de versant, s-a estimat că potențialul amenajabil este de $20,3 \cdot 10^3 \cdot 3$ /an, în circa 4700 de instalații. [10][11]

Calculul potențialului permite detectarea masivelor montane care prezintă maximum de interes din punct de vedere energo-eolian, respectiv cu o productibilitate anuală de peste 2000 kwh/m² an: Țarcu, Bucegi, Godeanu, Retezat, Parâng, Făgăraș.

Îmbunătățirea estimărilor de potențial energo-eolian impune trecerea la o contorizare permanentă a vântului în timp și pe trepte de viteză. Trebuie reținut faptul că potențialul energo-eolian al României este de același ordin de mărime ca și potențialul hidroenergetic inventariat, evaluat la circa $40 \cdot 10^3 \cdot 3$ kwh/an. [10]

În Tabelul 2.3. sunt prezentate localitățile de pe cuprinsul României și numărul mediu de ore în care vântul bate cu viteze între 6 și 9 [m/s].

Tabel 2.3. Localitățile de pe cuprinsul României și numărul mediu de ore în care vântul suflă cu viteze între 6 și 9 [m/s]. [10]

Nr.Crt.	Localitatea	Nr.Mediu de Ore	Localitatea	Nr.Mediu de Ore
1	SATU MARE	693	BANEASA	888
2	SIGHETUL MARMATIEI	230	CALARASI	1223
3	BAIA MARE	362	PIATRA NEAMT	1372
4	CLUJ-NAPOCA	665	VF. TOACA	1929
5	BISTRITA	362	BACAU	1480
6	ORADEA	1495	ADJUD	1060
7	VLADESA	2092	GALATI	2255
8	ARAD	1339	FAURENI	1064
9	TIMISOARA	1406	GRIVITA	1083
10	DEVA	732	FETESTI	1364
11	TAROU	2292	MEDGIDIA	1311
12	SEMENIC	2505	ADAMOLISI	1311
13	CRAIOVA	1509	CONSTANTA	2084
14	DRAGASANI	1233	TULCEA	1911
15	PITESTI	742	SULINA	3280

Se apreciază că aproximativ 70% din potențialul eolian este concentrat în zona montană a țării.

3. STADIUL ACTUAL AL SISTEMELOR DE CONVERSIE A ENERGIEI EOLIENE ÎN ENERGIE ELECTRICĂ.

3.1. Structura generală a sistemelor de conversie a energiei eoliene.

Tehnologia conversiei energiei eoliene în energie electrică, este realizată cu mașini electrice de curent alternativ, sincrone și asincrone (de inducție), utilizate în regim de generator. Cele mai eficiente procedee de a obține energie electrică din vânt, au fost posibile ca urmare a dezvoltării cunoștințelor din domeniul sistemelor automate, respectiv cel al electronicii de putere.

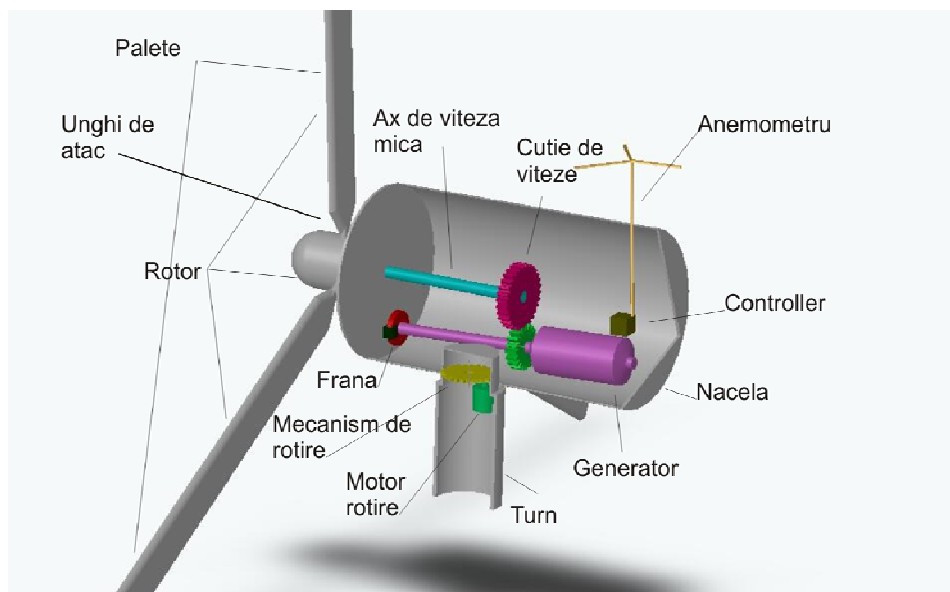


Fig. 3.1. Elementele principale ale agregatelor aeroelectrice (AAE).

Energia electrică care poate fi obținută prin intermediul agregatelor aeroelectrice (AAE) depinde în principiu de energia cinetică a vântului, iar pe de altă parte de structura sistemelor de conversie utilizate.

Elementele principale ale unui agregat aeroelectric (AAE) sunt: turbina de vânt, cutia de viteze, generatorul electric, frâna mecanică, sistemul de orientare față de vânt, traductoarele, sistemul de conducere și turnul de susținere. (Fig. 3.1). [3][5][8][9]

Agregatele aeroelectrice pot fi echipate în principal cu următoarele tipuri de mașini electrice: generatoare sincrone (GS) – cu excitație în curent continuu/magneți permanenți; generatoare asincrone (de inducție) (GA / GI)- cu rotorul în colivie/cu rotor bobinat/construcție specială (doua înfășurări statorice), conectate direct sau indirect la rețea.

Conectarea directă presupune conectarea rigidă la rețeaua electrică. **Conectarea indirectă** la rețea, presupune utilizarea unei serii de dispozitive electronice, de interfațare între generator și rețeaua electrică, având drept scop adaptarea parametrilor electrici (U, I, f). În cazul generatoarelor conectate direct la rețea acest lucru se realizează automat.

În cazul conectării indirecte, reglajul tensiunii și frecvenței, conectarea și deconectarea la/de la rețea, atenuarea vibrațiilor face importantă și necesară utilizarea convertoarelor electronice de putere. [3] [12]

Mașinile de inducție antrenate de turbine eoliene sunt frecvent utilizate în domeniul conversiei energiei eoliene datorită construcției robuste, prezentând avantajul unei întrețineri mai ușoare.

Generatoarele pot fi cuplate direct cu rotorul turbinei eoliene, în acest caz fiind eliminată cutia de viteze (amplificatorul de turatie) și inconveniente care derivă din utilizarea acesteia.

În Fig.3.2, este considerată o structură generală de conversie a energiei eoliene. Se prezintă legăturile dintre cele mai importante componente ale agregatelor aeroelectrice (AAE), precum și asocierea cu strategia de conducere și supervizare.

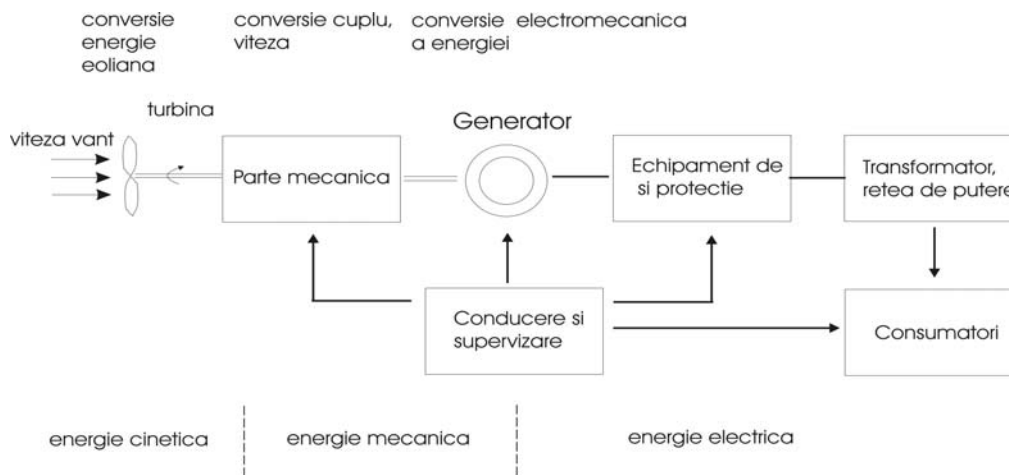


Fig. 3.2. Structura generală de conversie a energiei eoliene.

3.2. Reabilitarea Generatorului de Inducție

Prima centrala electrica comerciala, construita de către Thomas Edison în anul 1882 la New York, în partea de sud a insulei Manhattan, era echipata cu 4 generatoare de curent continuu (c.c.).[13]

În 1882, Nikola Tesla și, independent de el, Galileo Ferraris descoperă câmpul magnetic rotitor. În 1885, pe baza patentelor lui N. Tesla , sunt instalate la

3.2. - Reabilitarea Generatorului de Inducție

hidrocentrala de la Cascada Niagara doua generatoare sincrone de câte 3725 KW. Curând balanța în confruntarea dintre c.c. și c.a. inclina în favoarea celui de al doilea. În centralele electrice impunându-se definitiv generatoarele sincrone, ce domina energetica până în timpurile noastre.

În domeniul motoarelor electrice, dimpotrivă, cele de c.a. nu au putut înlătura motoarele de c.c., ce domina domeniul acționărilor electrice având o controlabilitate superioară. Totuși și aici, an ultimii ani, motoarele de c.a. câștigă tot mai mult teren în competiția cu motoarele de c.c. Dintre motoarele de c.a. s-au impus mai ales motoarele asincrone. Mașina asincronă trifazată, inventată de către G. Ferraris în anul 1887 sub forma unui aparat de laborator de 3 W, avea să cunoască, după construirea ei într-o formă utilizabilă industrial (de către Dolivo Dobrowolski), un mare succes.

În prezent mașina asincronă se execută într-o gamă largă de puteri, de la câțiva W până la ordinul MW. Utilizarea în sistemele energetice a mașinii asincrone ca generator nu s-a bucurat de interes până de curând. Aceasta se explică, în principal, prin dezavantajul acestei mașini, fata de cea sincronă, de a consuma din sistem energie reactivă, respectiv dezavantajul de a nu putea furniza puterea reactivă necesară în sistem (pentru motoarele asincrone mai ales), ceea ce, în condițiile unor sisteme energetice mai puțin dezvoltate, constituie un dezavantaj prohibitiv.

În rețelele izolate (autonome), de asemenea, generatorul asincron nu s-a impus datorită controlabilității sale greoaie - conectarea în trepte a condensatoarelor de excitație, respectiv datorită calității scăzute a energiei furnizate (armonici de tensiune în cazul reglajului cu bobina de saturație, etc.).

Numai schimbări majore în energetica, noi posibilități și noi elaborări puteau determina reorientarea spre utilizarea generatorului asincron, în cazul când el ar prezenta, în condiții schimbate, avantaje fata de generatorul sincron.

Condițiile favorizante pentru utilizarea **generatorului asincron** la care s-a făcut referire mai sus, au apărut treptat:[13][14]

1. Sisteme energetice mari ce pot asigura puterea reactivă a generatoarelor asincrone de puteri relativ mici din hidrocentrale (și altele), generatoarele asincrone oferind în schimb posibilitatea automatizării totale mai simple a microhidrocentralelor, odată cu o fiabilitate sporită.

2. Orientarea energeticii spre utilizarea unor noi surse de energie, ce reclama abordări neconvenționale, atât în privința echipamentelor energetice cât și a modului de funcționare (de exemplu funcționarea la turație variabilă, mod de funcționare reclamat de utilizarea energiei vântului s.a.).

3. Dezvoltarea tehnicii și tehnologiei dispozitivelor și circuitelor cu semiconductoare de putere și de reglare, ce permit implementarea mai simplă a unor principii care înainte nu s-au putut afirma (de exemplu realizarea, în circuitul rotor, a cascadei Scherbius statice, în locul celei realizate cu mașini electrice cu colector, a căror construcție complicată însoțită de o controlabilitate scăzută, fiabilitate scăzută și un preț de cost ridicat au împiedicat promovarea ideii; controlabilitatea sporită a circuitelor cu elemente semiconductoare de putere, de asemenea constituie un factor favorizant pentru noi elaborări cu performanțe tehnice și economice superioare.

4. Dezvoltarea automatizării și a tehnicii de calcul, fac posibilă implementarea de soluții care astfel nici nu ar putea fi realizate; astfel, de exemplu, reglarea rapidă, a puterii reactive de excitație a unui generator asincron, la pornirea unui motor asincron alimentat de către generator, nici nu ar fi de conceput fără

culegerea rapidă automată a informației și intervenția rapidă, automată adecvată. [3]

Problematicile privind echipamentele de generare a energiei electrice cu generatoare asincrone, pentru energetica resurselor regenerabile, au fost studiate în cadrul UPT de peste 40 de ani. [13][14] Au fost propuse și studiate problemele:

- generatorul asincron funcționând la turație constantă cu frecvența variabilă-comandabilă (1957),
- generatorul asincron cu frecvență constantă la turație variabilă comandabilă (1959),
- generatorul asincron cu condensatoare de excitație de capacitate constantă cu tensiunea stabilizată prin reglarea turației (1960),
- generatorul asincron cu capacitate de excitație constantă cu tensiunea stabilizată, la variația puterii utilizatorilor, prin reglarea rezistenței sarcinii, utilizând un sistem de încărcare/descărcare /dump-load (1981),
- generatorul asincron cu excitație capacitivă continuu reglabilă (1987),

Au fost proiectate și realizate, în conformitate cu ideile colectivelor de la UPT [3]:

- microhidrocentrala "Sarata" din Munții Făgăraș (1961),
- agregate aeroelectrice cu frecvența constantă la turație variabilă - reglabilă la Universitatea "Politehnica" din Timișoara, Hidrotim S.A. Timișoara, Platforma Montana "Semenic" din Munții Banatului (1981),
- grupuri electrogene automate funcționând cu biogaz având excitația reglabilă cu C=const. și L-var.

3.3. Agregate aeroelectrice cu viteză constantă

Cele mai multe AAE construite în prezent utilizează „Conceptul Danez”, [15] în care energia captată de la vânt este transformată în energie electrică utilizând generatoare de inducție cu rotorul în colivie conectate direct la rețeaua trifazată, după cum se prezintă schematic în Fig.3.3. [3][15]

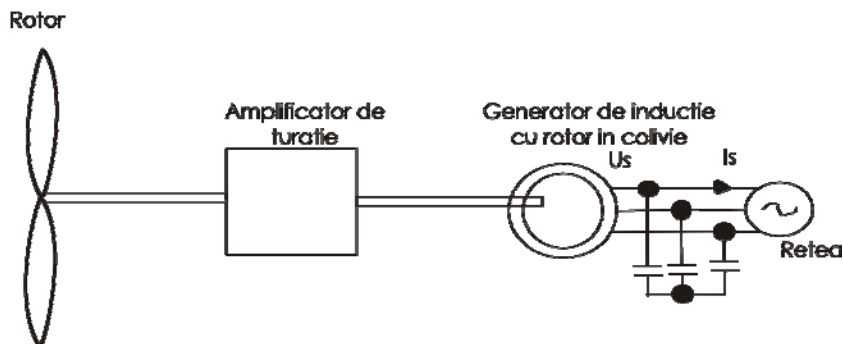


Fig. 3.3. AAE cu viteză constantă și generator de inducție cu rotorul în colivie.

După cum se poate remarca, rotorul turbinei e cuplat la arborele generatorului printr-un amplificator de turație (gear-box). Pentru compensarea puterii reactive se utilizează o baterie de condensatoare, iar pentru o conectare la

3.4. Agregate aeroelectrice cu viteză variabilă

rețea, fără șocuri, se utilizează un atenuator (soft-starter) (la puteri mai mari de 500 kW). Unele generatoare de inducție sunt construite cu mai multe înfășurări în stator, pentru modificarea vitezei de rotație de funcționare, prin modificarea numărului de perechi de poli. Deoarece alunecarea generatorului se modifică la modificarea puterii, viteza de fapt este aproape constantă.

Construcția și performanțele acestei configurații de agregate depind mult de caracteristicile mecanice ale sistemului. De aceea, aceste topologii utilizează o construcție mecanică mai pretențioasă și implicit mai scumpă pentru a fi capabilă să preia/atenueze solicitările mecanice provocate de rafalele puternice de vânt.

3.4. Agregate aeroelectrice cu viteză variabilă

Agregatele eoliene cu viteză variabilă au progresat mult în ultimii ani. [16][17] Acest concept este cel mai răspândit la ora actuală în întreaga lume, 75 % din turbinele eoliene instalate în 2001 și 80 % dintre cele instalate în anul 2002 utilizează acest concept. Funcționarea la viteză variabilă se poate realiza prin decuplarea frecvenței rețelei și a frecvenței generatorului. Acesta se poate realiza prin utilizarea convertoarelor statice de putere, de tensiune sau de curent, în combinație cu tehnicile avansate de comandă și control.

Prin funcționarea turbinei la viteză variabilă se poate crește semnificativ gradul de captare a energiei eoliene și implicit creșterea semnificativă a puterii generate, micșorând totodată solicitările mecanice și zgomotul aerodinamic. Totodată prin utilizarea vitezei variabile, energia captată de la vânt crește cu cca 10%, comparativ cu turbinele eoliene cu viteză constantă [18].

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 AAE cu viteză variabilă. [19]

3.4.1 Modificarea vitezei prin comutația polilor la mașinile de inducție utilizate în conversia energiei eoliene.

Modificarea vitezei agregatului poate fi realizată și prin modificarea numărului de perechi de poli, domeniul de viteză putând fi astfel extins. [14]

Această metodă se poate aplica numai la mașinile de inducție cu rotorul în colivie, deoarece acestea pot fi construite cu orice număr de perechi de poli ai înfășurărilor statorice. [14]

Modificarea vitezei prin schimbarea numărului de perechi de poli, se poate realiza:

- fie prin modificarea conexiunii înfășurării statorice, care trebuie să fie de execuție specială. În acest caz statorul este prevăzut cu două înfășurări diferite, construite fiecare pentru un alt număr de poli;
- fie printr-o singură înfășurare statorică ale cărei bobine se trec de la conexiunea serie cu $p = p_1$, la conexiunea paralel cu $p = p_1 / 2$, sau se conectează în serie;

În [6] este prezentat "Principiul celor 3 ecuații" și o metodă de proiectare denumită "Metoda vectorială pentru concentrarea creștăturilor", utilizată în cadrul unei mașini de inducție cu o singură înfășurare și 2 viteze. (comutația polilor se realizează cu conexiunile (Δ / Δ) sau ($3Y+2Y / 3Y$), configurații prezentate în Fig. 3.4). În cadrul conexiunii (Δ / Δ) grupul de bobine A1, B1, C1 sunt conectate la

cele 3 faze A, B, C, atât pentru ($2p1$) cât și pentru ($2p2$) și nu este necesar ca ele să se modifice în timp, odată cu modificarea vitezei motorului. Grupurile de bobine A2, B2, C2 sunt conectate la A, B, C pentru un mod de operare cu ($2p1$) perechi de poli, iar pentru ($2p2$) perechi de poli sunt legate la a, b, c și este necesară interconectarea bobinelor odată cu modificarea vitezei mașinii. „Principiul celor 3 ecuații” este un suport teoretic de bază pentru determinarea numărului de bobine pentru fiecare grup (A1, B1, C1 și A2, B2, C2, ..., etc) conform Fig.3.4, iar „metoda vectorială pentru concentrarea creștăturilor” realizează selecția numărului de bobine din fiecare grup.

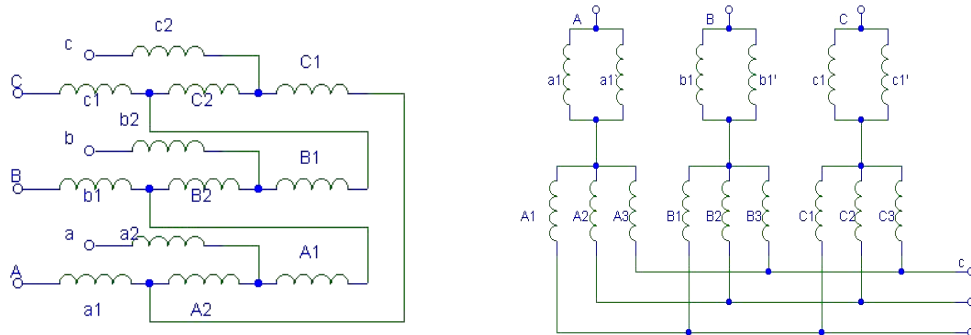


Fig. 3.4. Realizarea conexiunilor (Δ / Δ) și ($3Y+2Y / 3Y$)

În cele 2 tipuri de înfășurări fiecare bobină are același număr de spire, aceeași dimensiune și configurație.

Comparând aceste tipuri de conexiuni cu cele convenționale $2Y / Y$ sau $2Y / \Delta$ rezulta că înfășurările speciale cu poli comutabili conțin mai puține solenții cu armonici superioare, un factor de dispersie mai mare, un raport al densității de flux din întrefier corespunzător între cele 2 viteze, o mult mai bună utilizare a înfășurărilor și a miezului și o largă capacitate de comutație a modificării vitezei.

Metoda este recomandată în cazul utilizării mașinilor cu 2 viteze (cu variantele de perechi de poli $2/4, 4/8, 4/10, 6/8, 6/10, 6/12, 8/10, 10/12, 12/14$), conducând la performanțe mai bune ale mașinii la viteze mici și o caracteristică cuplu – viteză mai convenabilă, recomandând utilizarea acestui tip de mașini de construcție specială ca soluție posibilă în sistemele de conversie a energiei eoliene.

3.4.2. Agregate aeroelectrice cu turație variabilă cu mașini de inducție cu rotorul în colivie

Una dintre cele mai actuale topologii conține un convertor de 4 cadrane (2 invertoare de tensiune cu circuit intermediar de c.c.) și un filtru de rețea, structura prezentată în Fig. 3.5.

Această schemă prezintă avantaje semnificative [3][6], cum ar fi: capabilitatea inerentă a circulației bidirecționale de putere (necesară pentru pornirea agregatului în regim de motor, în cazul turbinelor eoliene cu control pasiv al paletelor rotorului turbinei), creșterea puterii generate, controlul puterii reactive, un număr redus de armonici injectate în rețea. Ca dezavantaj trebuie menționat

3.4. Agregate aeroelectrice cu viteză variabilă

convertorul, care are aceeași putere cu a generatorului și implicit prețul ridicat și gabaritul mare al condensatorului din circuitul intermediar.

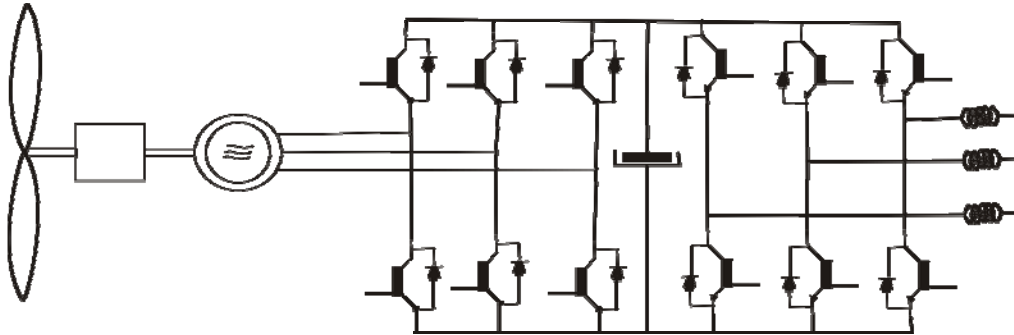


Fig. 3.5. Schema bloc a unei turbine eoliene cu viteză variabilă și convertor de 4 cadrane.

Alte tipuri de convertoare utilizate în conjuncție cu mașinile de inducție cu rotorul în colivie pot fi: invertoarele sursă de curent [20] cu tiristoare sau IGBT-uri, pentru invertoarele pe partea generatorului, și un inverter convențional complet controlat cu 6 pulsuri pe partea de rețea.

3.4.3. Agregate aeroelectrice cu generator de inducție cu rotorul bobinat

Mașinile de inducție cu rotorul bobinat permit operarea cu turație variabilă, domeniul de viteză putând fi extins:

- Până la 10 % prin controlul alunecării (utilizând elemente pasive adiționale în rotor);
- Până la 30 % prin utilizarea convertoarelor în circuit rotoric, în modul supra-sincron;
- Până la 40 % în modul sub-sincron și până la (60-70) % în modul supra-sincron, prin utilizarea convertoarelor de frecvență sursă de tensiune în 4 cadrane.

Agregatele de vânt cu viteză variabilă care utilizează mașinile de inducție cu „dublă alimentare” și convertoare bidirecționale de frecvență sursă de tensiune, plasate în circuitul rotorului, cu statorul conectat direct la rețea (sau printr-un soft-starter la puteri mai mari de 800 kW), sunt cele mai performante și utilizate topologii la ora actuală. Aceste topologii cu invertoare cu cost redus au o eficiență ridicată, îmbunătățind totodată și calitatea puterii prin controlul puterilor activă și reactivă. Ceea mai mare companie producătoare de turbine de vânt din lume, Vestas, promovează această soluție (topologie denumită Optispeed – Fig.3.6). [3][21]

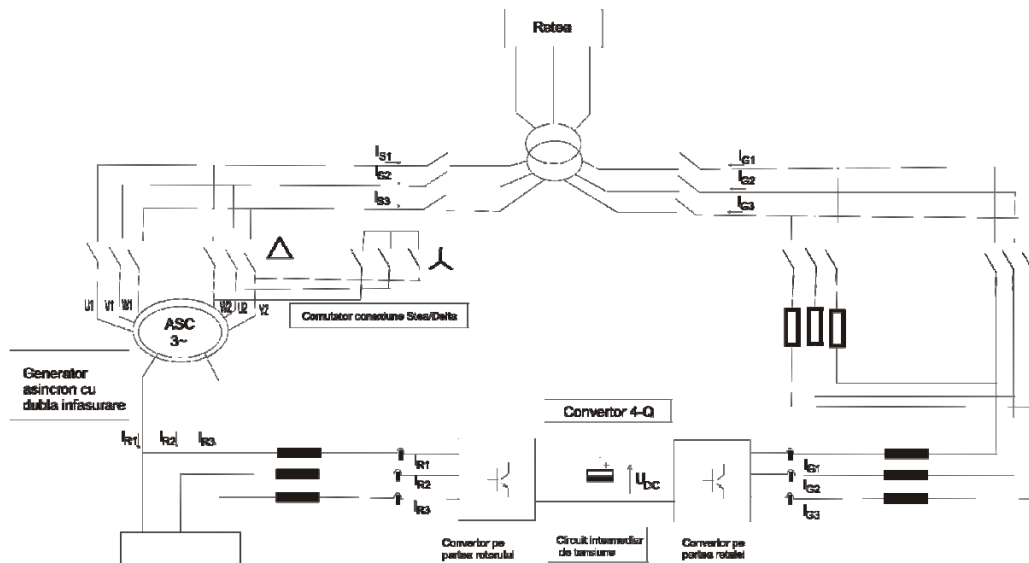


Fig. 3.6. Diagrama bloc a unui AAE cu viteză variabilă și generator de inducție cu "dublă alimentare" de 2 MW și convertor de frecvență de 4 cadrane.

3.4.4. Sisteme de conversie a energiei eoliene cu viteză de rotație variabilă cu generatoare sincrone.

Un exemplu de structura de sistem pentru conversia energiei eoliene utilizând generatoare sincrone cu viteză variabilă este prezentat în Fig.3.7:[22]

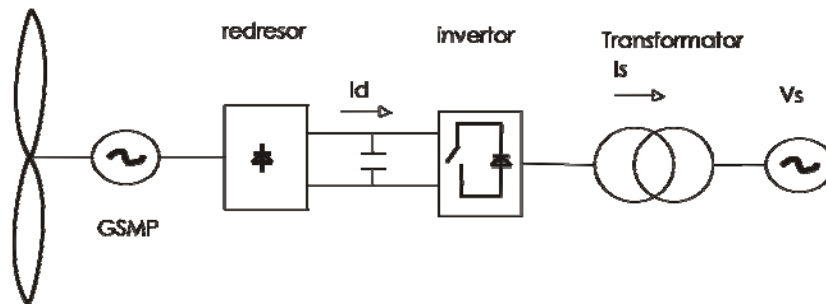


Fig. 3.7. Sistem de conversie a energiei eoliene la viteză variabilă.

Printr-o conducere adecvata, viteza de rotație, poate fi ajustata în concordanță cu viteza vântului astfel încât să rezulte o viteză optimă a raportului viteza la arbore / viteza vântului, având ca efect un maxim de energie extrasa. Mărimile electrice de la ieșirea generatorului, frecvența și tensiunea, fiind variabile, vor fi aduse la intrarea unui convertor de frecvență și circuit intermediar de curent continuu, având în componență un redresor necomandat cu diode și un invertor, (comutație forțată) pentru a obține la ieșire tensiunea dorită. Pentru eliminarea

3.4. Agregate aeroelectrice cu viteză variabilă

armonicilor se poate utiliza un inverter PWM, cu frecvență de comutație ridicată, dar care prezintă dezavantajul costului ridicat.

Invertoarele cu tiristoare în varianta cu 6 pulsuri, care controlează tensiunea din circuitul intermediar de curent continuu sunt mai ieftine, dar prezintă dezavantajul poluării rețelei de putere cu armonici de curent, și în plus inverterul absorbind putere reactivă, face ca, corecția factorului de putere să devină o problemă. Acest inconvenient se poate elimina prin utilizarea filtrelor pentru rețea, sau prin utilizarea unui inverter cu 12, sau mai multe pulsuri pentru reducerea armonicilor.

Puterea extrasă din circuitul intermediar de curent continuu și transmisă spre rețea poate fi controlată prin reglarea unghiului de fază dintre tensiunea rețelei și fundamentala tensiunii de ieșire din inverter.

Efectele sistemului de conversie a energiei eoliene asupra rețelei, depind într-o mare măsură de tipul și configurația convertorului conectat la rețea.

În vederea extragerii unei cantități mai mari de energie, odată cu creșterea unghiului de putere va crește și puterea extrasă din circuitul intermediar de curent continuu (în timp ce tensiunea scade).

Sistemul prezintă avantajul că circuitul intermediar este alimentat cu un redresor necomandat, ceea ce simplifică și reduce costul convertorului de interfațare, soluția permițând o întreținere facilă.

3.4.5. Configurații de AAE. Sinteza

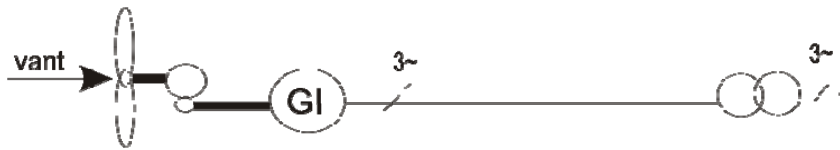
Conversia energiei eoliene în energie electrică este realizată în principal cu una din următoarele metode [3][6][23]:

1. Sisteme cu viteză de rotație și frecvență constante – (Constant Speed, Constant Frequency (CSCF) System), fiind utilizate generatoarele sincrone;
2. Sisteme cu viteză de rotație și frecvență aproape constante – (Almost Constant Speed, Constant Frequency (ACSCF) System), fiind utilizate generatoarele asincrone (de inducție) cu colivie cu alunecare mică (cuprinsă între (1-5) %);
3. Sisteme cu viteză de rotație variabilă și frecvență constantă – (Variable Speed, Constant Frequency (VSCF) System) fiind utilizate ambele tipuri de generatoare ;
4. Sisteme cu viteză de rotație variabilă și frecvență variabilă – (Variable Speed, Variable Frequency (VSVF) system), care necesită generatoare de inducție dublu alimentate.

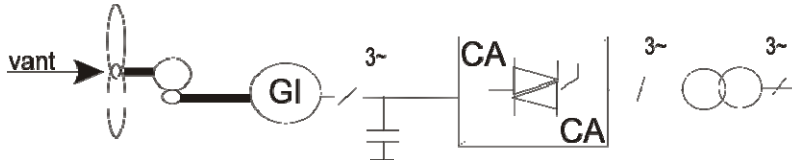
Observație: Termenul de generator de inducție cu dubla alimentare GIDA (DFIG - doubly-fed induction generator), consacrat în literatura de specialitate este impropriu, deoarece în fapt înfășurările generatorului nu sunt alimentate ci generează energie electrică, în regim suprasincron, iar în regim subsincron este alimentată doar înfășurarea rotorică.

Cele mai importante configurații care realizează conversia energiei eoliene în energie electrică cu GI, respectiv GS, sunt prezentate în Fig.urile următoare 3.8. a - f, și respectiv Fig. 3.9. a - f:

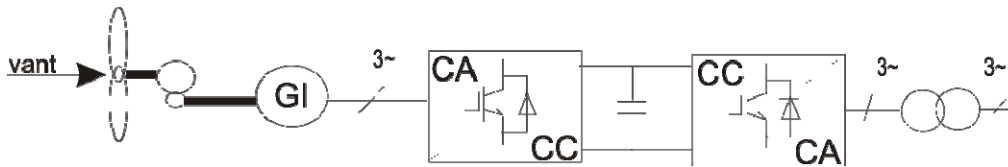
Stadiul actual al sistemelor de conversie a energiei eoliene - 3



a) Conectare directă la rețea.

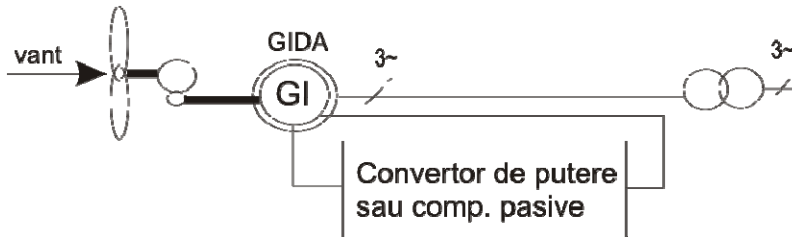


b) Conectare la rețea prin convertor direct c.a.-c.a.

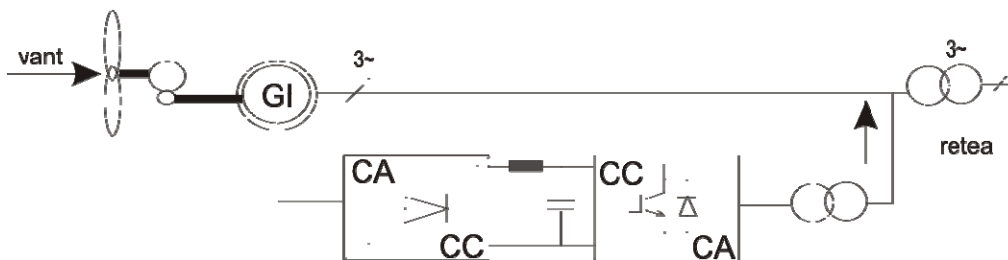


c) Conectare la rețea prin convertor de frecvență bidirecțional c.a.- c.c.

- c.a.

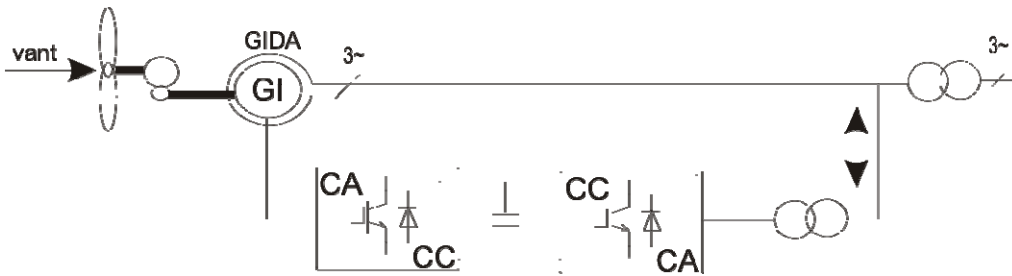


d) Sistem cu generator de inducție cu rotor bobinat și circuite active/pasive în rotor.



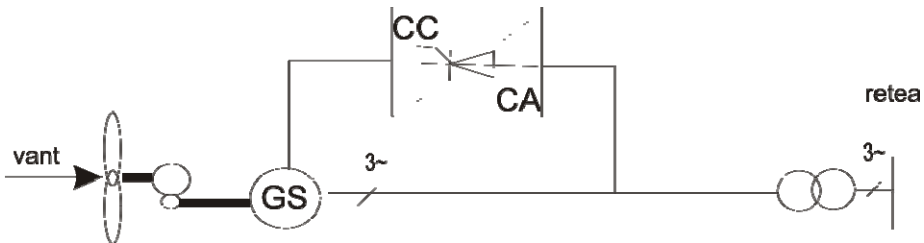
e) Sistem static suprasincron cu convertor de frecvență unidirecțional în rotor, cu circuit intermediar de c.c.

3.4. Agregate aeroelectrice cu viteză variabilă

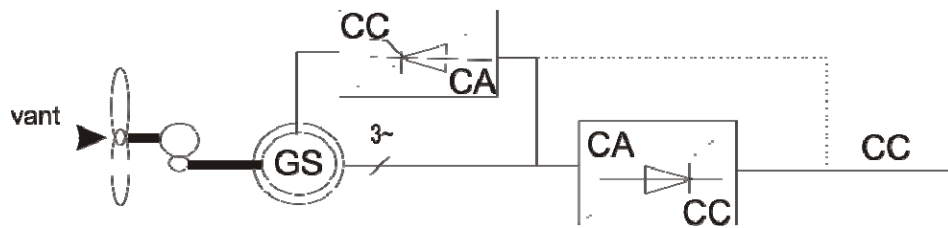


f) Sistem cu generator de inducție cu rotor bobinat cu convertor de frecvență bidirecțional c.a. – c.c. – c.a.

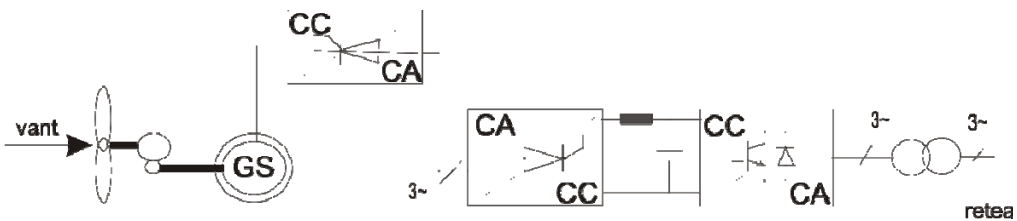
Fig. 3.8. Sisteme de conversie cu generatoare de inducție.



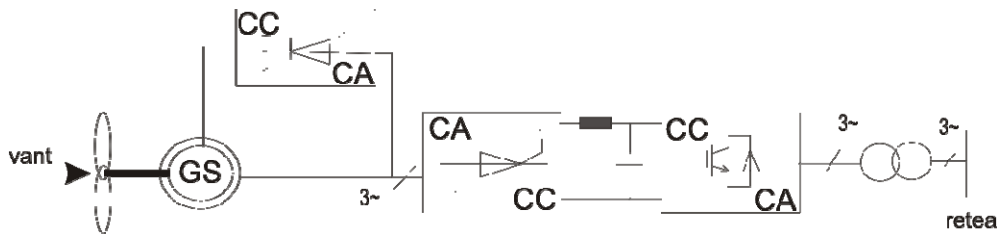
a) Conectare directă la rețea.



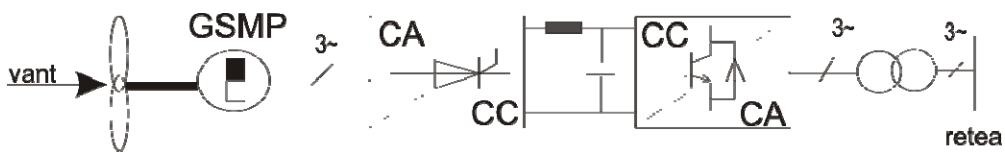
b) Cuplare directă la rețea de curent continuu.



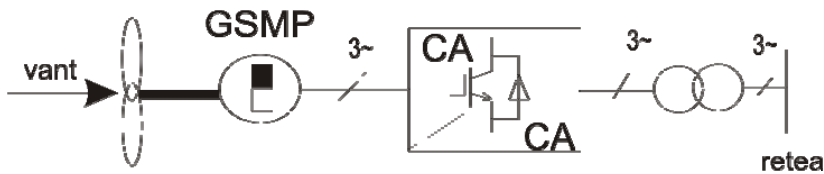
c) Conectare la rețea cu convertor unidirecțional cu circuit intermediar de c.c.



d) Conectare directă a turbinei cu generatorul și convertor unidirecțional cu circuit intermediar direct de c.c.



e) Conectarea directă a turbinei cu generator sincron cu magneți permanenți, și conectare la rețea cu convertor unidirecțional cu circuit intermediar direct de c.c.



f) Conectare la rețea prin convertor c.a.-c.a. (cicloconvertor)

Fig.3.9. Sisteme de conversie cu generatoare sincrone.

În prezent există un număr important de soluții (configurații) de sisteme pentru conversia energiei eoliene în energie electrică. Partea electrică a sistemului de conversie a devenit din ce în ce mai importantă. Dezvoltarea impetuoasă a electronicii de putere din ultimii ani a permis o creștere substanțială a puterii instalate pe unitate, fapt care a condus concomitent la scăderea prețului per kW.

În Fig.3.9, sistemele de conversie electro- mecanică a energiei eoliene (a) și (g) indică o cuplare extrem de rigidă cu rețeaua. În toate celelalte sisteme, soluțiile permit decuplarea vitezei mecanice de rotație (viteza rotorului turbinei) de mărimile electrice (frecvență sau tensiune), prin intermediul dispozitivelor electronice de putere de curent alternativ și curent continuu, care sunt asociate cu procedee diverse de conducere.

Varianta (a) prezintă conceptul standard utilizat de majoritatea companiilor daneze producătoare de turbine de vânt din anii 1980 – 1990. Această topologie se referă la turbine de vânt cu viteza constantă, cu ax orizontal și trei palete, fără reglarea pasului paletelor, și cu mașini de inducție cu rotorul în colivie. În perioada anilor `80 acest concept a fost extins (îmbunătățit) prin introducerea unei baterii

3.4. Agregate aeroelectrice cu viteză variabilă

de condensatoare pentru compensarea puterii reactive și a unui soft-starter pentru reducerea curenților tranzitorii de pornire și implicit pentru o conectare la rețea mai lină, fără șocuri (varianta b). În varianta (c) bateria de condensatoare și soft-starterul au fost înlocuite de un convertor de frecvență.

Configurația descrisă de varianta (d) utilizează mașini de inducție cu rotorul bobinat (dublu alimentate) și a fost utilizată de compania Vestas, încă de la mijlocul anilor '90. Scopul de bază al 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.[24]

Variantele (e) și (f) prezintă 2 topologii de AAE cu viteză variabilă utilizând generatoarele de inducție cu rotorul bobinat, cu diferite configurații de conversoare statice de frecvență în circuitul rotoric. Varianta (f) necesită strategii performante de control, permițând reglajul fluxului de putere activă și reactivă în toate cele 4 cadrane. Această variantă este cel mai des utilizată astăzi în conversia energiei eoliene datorită avantajelor incontestabile, cum ar fi: utilizarea unor conversoare de putere mai mica fata de puterea generatorului (20-30 % din puterea mașinii), cost redus al AAE și circulație bidirecțională a fluxului de putere, conducând la extinderea domeniului de viteză cu până la 70 % peste viteza de sincronism.

Pentru sistemele de conversie a energiei eoliene fără amplificator de turație, sunt utilizate generatoare sincrone, cu excitație (Fig. j) sau cu magneti permanenți (Fig. k, l). Soluțiile (k, l) sunt destinate în general pentru puteri reduse (sub 50 kW) și au în componența și o baterie pentru stocarea surplusului de energie. De asemenea aceste topologii sunt utilizate în sisteme hibride pentru plasamente izolate.

În anul 2000 compania ABB a propus un sistem de conversie a energiei eoliene bazat pe aceste concepte, utilizând un AAE de 3.5 MW cu generatoare sincrone cu MP și nr. mare de poli, respectiv un redresor cu diode.

Generatoarele sincrone furnizează puterea electrică (activă) spre rețea, iar pentru comutația dispozitivelor electronice din invertoare trebuie să extragă putere reactivă de la rețea (modelele i, j, k).

Variantele (g, h, i) reprezintă configurațiile unor AAE cu generatoare sincrone și cutie de viteza, având diferite topologii de conversoare statice. Variantele (g, h) au în componență redresoare cu tiristoare sau diode iar varianta (i) oferă suplimentar în componență un convertor de frecvență pentru reglarea vitezei. Aceste configurații de turbine prezintă câteva dezavantaje, cum ar fi: greutate mare, necesitatea unui circuit de comandă suplimentar pentru excitație, strategie de conducere complexă și cost ridicat. [6][25][26]

3.5. Agregate aeroelectrice conectate la rețea, cu cuplare directă a turbinei cu generatorul.

Diametrul turbinelor a crescut de la (15 – 20) metri în anii '80, la (80 – 100) metri în prezent și se previzionează o continuă creștere în viitorul apropiat. Odată cu creșterea diametrului a crescut și puterea nominală a turbinelor eoliene de la cca 100 [kW] până la 4 [MW] în prezent.

Turbinele cu un diametru mare au o viteză de rotație scăzută. Amplificatorul de turație având rolul de-a crește viteza de rotație a generatorului la valoarea impusă de conectarea directă la rețea, prezintă câteva dezavantaje care

limitează dezvoltarea acestor sisteme, conducând la soluția cuplării directe a generatorului cu rotorul turbinei de vânt. Prin aceasta se elimină costul mare al amplificatorului de turație și pierderile (mecanice) care derivă din utilizarea acestuia. (costul amplificatorului de turație putând reprezenta până la 40% din costul agregatului)

Pentru conectarea directă la rețea sunt necesare generatoare de construcție specială – de lungime redusă și diametru mare – referite generatoare inelare (ring generator).

În cazul generatorului sincron excitația se realizează fie cu electromagneți, fie cu magneți permanenți. [27]. O structură de generator cu magneți permanenți, este prezentată în Fig.3.10, forma circuitului magnetic utilizat permițând obținerea unei densități de flux din întrefier având inducția $B = 1$ [T], dimensiunea polului de 41 mm, utilizând un magnet permanent cu un preț scăzut, având inducția remanentă $B_r = 0.4$ [T]. Generatorul are puterea $P = 455$ [kW] și 83 de perechi de poli, rotorul turbinei rotindu-se până la viteza de 36.14 [rpm]. Viteza de rotație, în general, depinde de diametrul rotorului.

Avantajele utilizării acestor tipuri de generatoare sunt:

- greutate scăzută;
- structură simplă, utilizând magneți permanenți standard;
- utilizarea statoarelor și rotoarelor obișnuite;
- rotoarele sunt cele convenționale în cazul realizărilor cu electromagneți, respectiv au o construcție neconvențională în cazul utilizării magneților permanenți;
- ventilație ușoară.

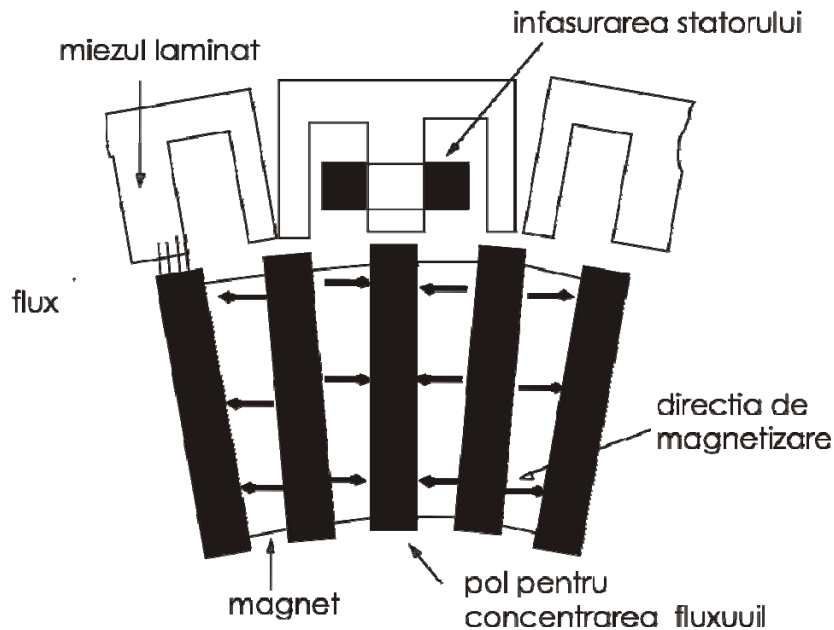


Fig. 3.10. Generator sincron cu magneți permanenți și nr. mare de poli (circuitul magnetic)

3.6. Sisteme de conversie a energiei eoliene cu generatoare de inducție conectate la rețea.

Cele mai recente soluții pentru sistemele de conversie a energiei eoliene utilizând generatoare de inducție au fost posibile datorită dezvoltării și perfecționării sistemelor de conducere utilizând convertoare statice de putere.

Sunt utilizate atât mașini de inducție cu rotorul în colivie, fiind recomandate pentru a fi utilizate în aplicațiile unde se pune accent deosebit pe o construcție robustă și condiții de operare și întreținere ușoară, cât și cele cu statorul bobinat care se utilizează în situațiile când se dorește optimizarea funcționării prin modificarea vitezei de rotație.

Există principial, trei configurații care utilizează generatoarele de inducție în AAE:

1. Statorul mașinii de inducție conectat direct la rețea.

În acest caz, mașina funcționează ca generator când viteza rotorului acesteia depășește viteza sincronă. Mașina funcționează la frecvență constantă și la viteză aproape constantă. În această situație la conectarea la rețea, nu e nevoie de un sistem de conducere pretențios, nefiind necesară sincronizarea la parametri rețelei înainte de pornire.

2. Statorul mașinii conectat la rețea prin intermediul convertoarelor statice de putere.

Soluția permite funcționarea la turație variabilă și la frecvență și tensiune variabile a statorului mașinii. Un astfel de sistem are structura prezentată în Fig. 3.11. [3][6][28]

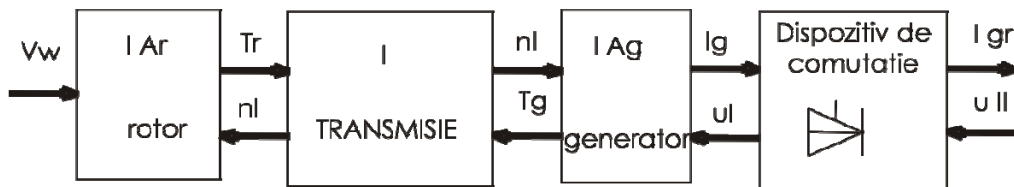


Fig. 3.11 Structura de AAE cu stator conectat la convertor.

Legenda: - V_w [m/s] este viteza vântului, T_g [Nm] e cuplul la arborele generatorului, T_r e cuplul la arborele rotorului, I_{Ar} și I_{Ag} [Kg m^2] sunt inerțiile rotorului și generatorului, n_g și n_r [rpm] sunt turațiile arborilor generatorului și rotorului, U_g și U_{gr} [V] sunt tensiunile generatorului și rețelei, I_g și I_{gr} [A] sunt curentii generatorului și rețelei iar (i) este factorul de transmisie.

Conducerea e mai eficientă în acest caz – fiind posibilă optimizarea atât a generatorului cât și a turbinei.

3. Stator conectat direct la rețea și rotor conectat la rețea prin intermediul unor convertoare electronice.

Un sistem de conversie a energiei eoliene cu viteza de rotație variabilă și mașină de inducție cu rotor bobinat, cu variație de la subsincron la suprasincron, este prezentat în Fig.3.12.

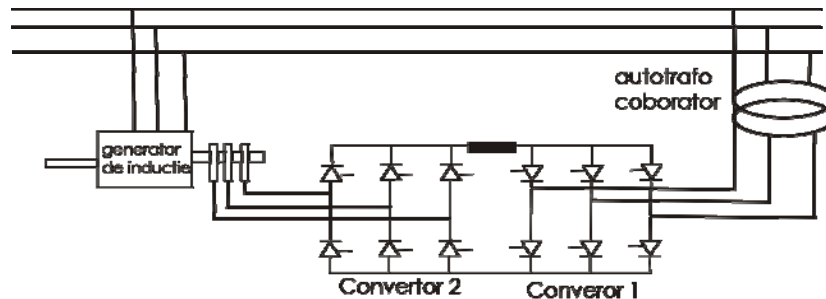


Fig. 3.12. AAE cu generator cu rotor bobinat.

Statorul mașinii este conectat direct la rețea, în timp ce circuitul rotoric este conectat la rețea prin două convertoare în punte, complet comandate, cu circuit intermediar de curent continuu.

În majoritatea aplicațiilor convertorul 1 este înlocuit de o punte cu diode, datorită simplității și costului mai redus, caz în care comanda se aplică convertorului 2 care va funcționa în regim de invertor.

Toate sistemele eoliene cu mașini de inducție cu rotor bobinat, care utilizează redresoare necomandate în circuitul rotoric, pot fi ușor analizate și implementate, dar limitează generarea de putere doar într-un domeniu al vitezei de până la cca 145 % din viteza sincronă. La această viteză mașina dezvoltă putere activă, care poate ajunge cu aproximație la 150% din puterea nominală. [3][29]

O soluție de îmbunătățire a performanțelor acestui sistem, o reprezintă înlocuirea redresorului necomandat cu un redresor comandat cu tiristoare/tranzistoare IGBT.

Puterea care circulă bidirecțional între circuitul rotoric și rețea poate fi controlată prin ajustarea unghiului de aprindere al tiristoarelor/tranzistoarelor IGBT din cele două convertoare.

Valorile unghiurilor de aprindere a tiristoarelor/tranzistoarelor IGBT din invertor cât și din redresorul comandat, alături de puterea activă, puterea reactivă, amplitudinea tensiunii rotorice, unghiul de fază și factorul de putere pot fi calculate la diferite viteze ale rotorului pentru a obține maximum de putere generată.

Nevoia creșterii eficienței energiei eoliene a impus AAE cu viteză variabilă. Utilizarea acestora implică însă, convertoare de putere complexe, care cresc semnificativ costul acestor sisteme. Mașinile de inducție cu rotor bobinat permit reducerea puterii convertoarelor (față de cele de la pct. 2) și a costului acestora. [3]

Pentru comanda sistemelor cu viteză variabilă se utilizează anemometre sau estimatoare pentru detectarea intensității vântului, bazate pe detectarea punctelor în care turbina eoliană funcționează la putere maximă și respectiv modele euristice bazate pe detectarea punctelor de eficiență maximă ale mașinii în vederea optimizării puterii debitate a sistemului. Detectarea punctelor în care turbina de vânt funcționează la putere maximă prezintă importanță în soluțiile de conducere (fiind mărime prescrisă pentru sistemul de reglare automată).

3.6. - Sisteme de conversie a energiei eoliene cu generatoare

Aceasta strategie de conducere poate fi utilizată la toate configurațiile cu două înfașurări statorice și la mașinile cu reluctanță variabilă. Un sistem cu rotor bobinat este prezentat în Fig. 3.13. [3] [6]

Această soluție de conducere, bazată pe un model simplu, realizează adaptarea strategiei de detectare a punctelor de randament maxim, prin implementarea unei bucle de reglare a curentului și a unei bucle de reglare a vitezei, fără măsurarea parametrilor mecanici ai sistemului. Sistemul necesită două mărimi: frecvența – pentru a stabili punctele de putere în care turbina de vânt funcționează la parametri maximi și curentul – în scopul obținerii unei eficiențe maxime.

Sistemul considerat realizează o creștere a puterii debitate, practic fără a complica prea mult conducerea. Pentru obținerea unei conduceri simple, fără mărimi de intrare mecanice, cum ar fi cuplul la arbore sau viteza, s-a utilizat o buclă de reglare a parametrilor electrici.

Strategia de conducere propusă conține două bucle de reglare (MPPT - maximum power point tracking și MEPT - maximum efficiency point tracking) care sunt dependente de sistem și de aplicație.

Conducerea MPPT e bazată pe un algoritm de căutare, unde viteza de rotație a turbinei eoliene și implicit viteza de rotație a arborelui generatorului electric este variabilă. Acest lucru este realizat printr-un reglaj variabil, mecanic – prin reglarea pasului elicei sau electric – prin reglajul frecvenței de excitație, în scopul menținerii constante a vitezei turbinei în cadrul plajei de operare.

Conducerea MEPT are rolul de a regla curentul în scopul obținerii unei eficiențe maxime a generatorului electric dublu alimentat. Problema de optimizare a sistemului, pentru partea mecanică (turbina) și partea electrică (generatorul) este rezolvată pentru obținerea maximului de putere la ieșire ca o funcție de viteză și curentul controlat. [30][31][32]

Sistemul prezentat (cu viteză variabilă și frecvență constantă) utilizează generatoare de inducție dublu alimentate cu rotorul bobinat (în acest caz rotorul mașinii este cuplat mecanic cu turbina prin intermediul cutiei de viteze). Aceste configurații sunt singurele în care puterea de ieșire generată este mai mare decât puterea nominală a mașinii utilizate și datorită acestui fapt, realizându-se o creștere a eficienței producerii puterii în aceste sisteme. Al doilea avantaj este că puterea nominală a mașinii este obținută la dublul valorii vitezei de sincronism, obținându-se astfel un domeniu relativ larg al vitezei în care poate fi generată puterea activă, de la alunecarea nominală până la aproape $s = -1$, făcând astfel mașinile dublu alimentate mult mai eficiente și potrivite pentru a fi utilizate în conjuncție cu sistemele de vânt cu viteză variabilă.

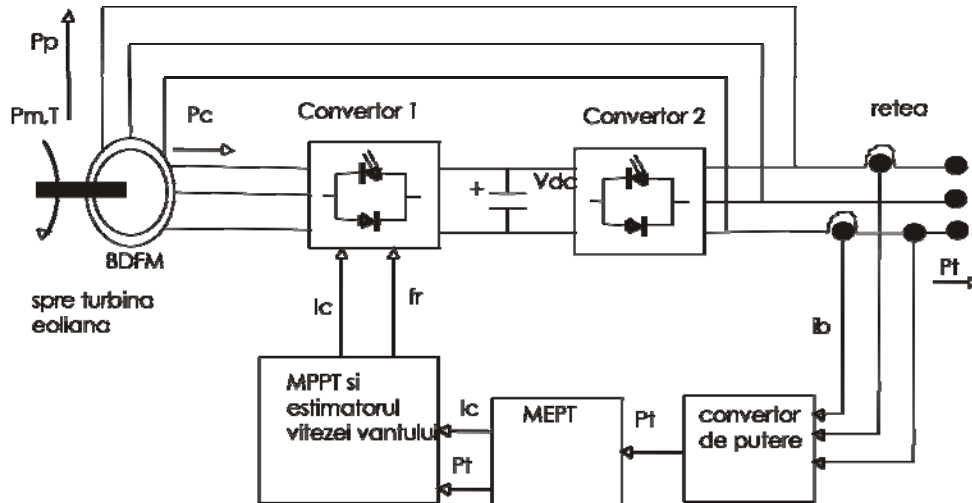


Fig.3.13. Sistem cu rotor bobinat - conducere bazata pe estimarea vitezei vântului.

3.7. Conducerea agregatului aeroelectric cu viteza de rotație variabilă.

Viteza vântului fiind variabilă este de dorit ca turbina să funcționeze la viteză de rotație variabilă, pentru obținerea unui optim de putere. În Fig.3.14. este prezentată familia de caracteristici mecanice ale turbinelor eoliene. Unele dintre tehnicile de reglare a puterii turbinelor eoliene necesită și metode de măsurare/estimare a vitezei vântului, ceea ce complica sistemul de conducere și reduce gradul de fiabilitate al întregului AAE (ex: preț ridicat și fiabilitate scăzută a sistemului anemometric – depuneri de chiciura, gheata), implicând reglajul vectorial cu orientare după câmp (FOC), utilizând senzori de curent și traductoare pentru poziție. [33][34]

3.7. Conducerea agregatului aeroelectric cu viteza de rotație variabilă.

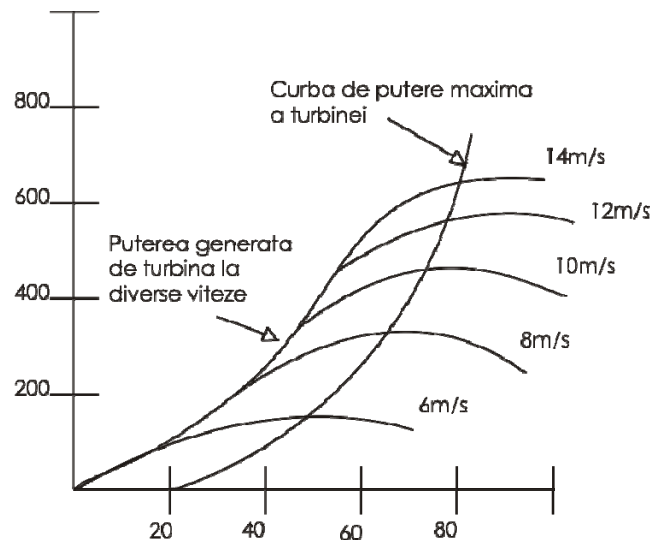


Fig. 3.14. Caracteristica mecanică uzuală a turbinelor eoliene.

O soluție de reglare simplă, bazată pe menținerea constantă a raportului U / f , este capabilă să optimizeze funcționarea generatorului, pentru un domeniu larg de variație a puterii. Structura unei astfel de configurații de sisteme este prezentată în Fig.3.15.

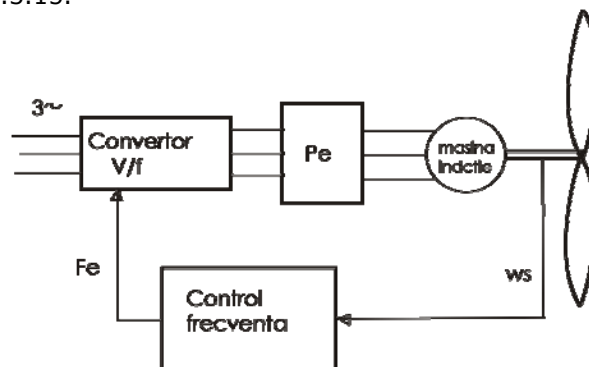


Fig. 3.15. Structura sistemului bazat pe menținerea constantă a raportului U / f .

În scopul optimizării și a funcționării turbinei, valoarea prescrisă pentru viteza de rotație a acestuia se determină din familia caracteristicilor mecanice pentru fiecare viteză a vântului.

Este important ca AAE să funcționeze în anumite limite de viteză și putere (Fig. 3.16) pentru evitarea suprasolicităților mecanice și electrice. Pentru încadrarea între aceste limite, conducerea mașinii este divizată în 3 zone de funcționare: factor de putere maxim (C_p), limită de putere și limită de viteză, conform Fig.3.16. Regiunea cu coeficientul de putere maxim reprezintă modul normal de funcționare. Când viteza vântului crește până la atingerea limitei de

viteză de funcționare a turbinei (pct. 1 din Fig. 3.16), comanda asigură limitarea vitezei agregatului. Dacă viteza vântului continuă să crească sistemul funcționează în zona de limitare a puterii convertorului.

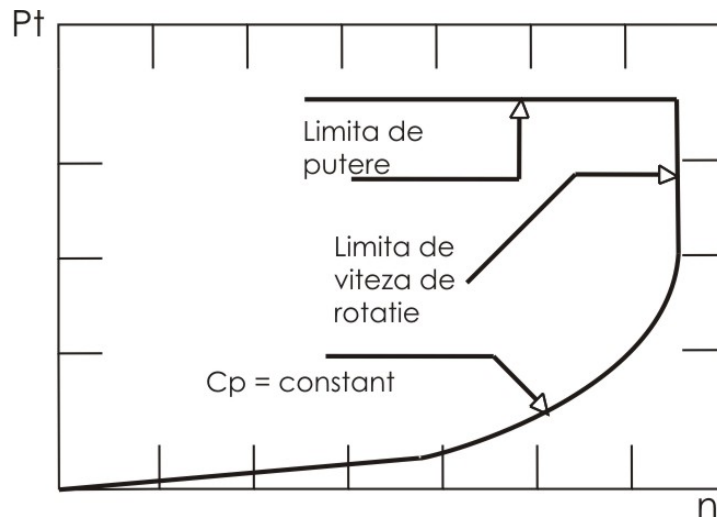


Fig. 3.16. Zonele de limitare a funcționării AAE.

Conducerea nu necesită un algoritm sofisticat ca și alte scheme cu viteză variabilă și poate fi implementată simplu, utilizând o mașină de inducție standard și o structura realizată cu un minim de senzori. [35]

Considerațiile făcute sunt valabile în cazul AAE cu ax orizontal.

Cele mai recente moduri de abordare ale sistemelor de conversie a energiei eoliene utilizând generatoare de inducție cu rotorul în colivie, funcționând la turație variabilă au fost posibile în special datorită perfecționării tehnicilor de conducere, bazate pe utilizarea electronicii de putere. Posibilități de ajustare a turației, tensiunii, curentului și frecvenței au permis obținerea caracteristicilor dorite atât ale turbinei cât și a generatorului. [3][35]

3.8. Convertoare statice de putere utilizate în sistemele de conversie a energiei eoliene.

Odată cu creșterea puterii AAE s-au dezvoltat și noi strategii de conducere bazate pe noile tehnologii ale electronicii de putere.

Dezvoltarea rapidă a tehnologiei electronicii de putere a condus și la creșterea capabilității turbinelor odată cu reducerea costului investiției. În Fig.3.17 sunt prezentate câteva configurații uzuale actuale, cu generatoare de inducție și structurile de convertoare statice de putere aferente diverselor metode de conducere.

3.9. Sisteme autonome de conversie a energiei eoliene.

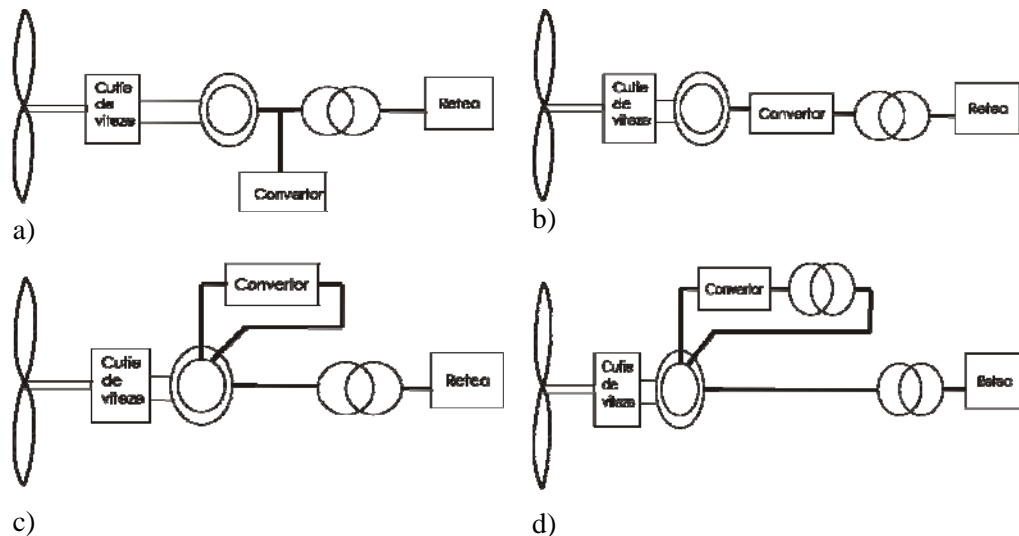


Fig. 3.17. Configurații standard ale AAE cu generatoare de inducție și convertoare statice.

Convertorul de putere poate fi un dispozitiv electronic de putere cum ar fi: redresor cu diode sau tiristoare, invertor sau convertor de frecvență (care poate fi compus dintr-un circuit intermediar de curent continuu pentru stocarea energiei și un invertor de rețea - care reglează frecvența pe partea de curent alternativ), sau un atenuator („soft-starter”).

Tabelul 3.1. Tipurile caracteristice de convertoare statice și configurațiile aferente.

Configurația	Convertor de putere	Metoda de reglare	Observații
a)	Structuri cu condensatoare cu interfața electronică	Autoreglare sau Reglare activă	Mașină cu două infasurări
b)	Convertor de frecvență	Autoreglare sau Reglare activă	Viteză variabilă
c)	Convertor static sau structuri cu elemente pasive	Reglarea poziției paletelor	Viteză variabilă limitată
d)	Convertor de frecvență	Reglarea poziției paletelor	Viteză variabilă (Generator de inducție cu rotor bobinat)

Observații:

Observația 1. În acest context, termenul de **autoreglare** („Stall”) este folosit pentru situația în care la viteze foarte mari ale vântului (nominala) turația se autopăstrează constantă chiar pentru creșteri în continuare ale vitezei vântului datorita fenomenului de desprindere a „stratului limita” [3] [35]

Observația 2. De asemenea, prin termenul de **reglare activa** („Active stall”) se înțelege reglarea optimala a turației prin modificarea poziției paletelor și de la o anumita viteza (mare) a vântului (nominala), turația se autopăstrează constantă pentru creșteri în continuare ale vitezei vântului, datorita fenomenului de desprindere a „stratului limita”.

Observația 3. Prin **reglarea poziției paletelor** se înțelege situația în care poziția paletelor este fixă până la atingerea regimului nominal și doar la depășirea acestuia se intervine la reglarea poziției paletelor. [3] [35]

Observația 4. Mașinile cu doua înfășurări sunt mașini electrice speciale cu doua înfășurări statorice, cu număr diferiți de poli, care funcționează când pe o înfășurare sau pe alta, corespunzător la doua turații constante distincte. [3] [35]

Observația 5. Atenuatorul („Soft-starter”) reprezintă un dispozitiv alcătuit din componente pasive și active destinat evitării șocurilor electrice (implicit mecanice) la conectarea la rețea. [3]

Configurația caracteristică structurii din Fig. 2.12.a) a fost utilizată frecvent în anii 80, 90 și se aplică turbinelor cu ax vertical și 3 palete, cu autoreglare, echipate cu generatoare de inducție cu rotorul în colivie.

Unele firme (ex: NEG Micon) aplica și în prezent aceasta configurație utilizând suplimentar o baterie de condensatoare pentru compensarea puterii reactive (factorului de putere) și un atenuator pentru conectarea generatorului de inducție la rețea, în cazul turbinelor de vânt cu viteză constantă.

Configurația din figurii 2.12.b) înlocuiește bateria de condensatoare și soft starterul cu un convertor de frecvență. Acesta e scurtcircuitat la funcționarea normală a turbinei, fiind utilizat doar pentru compensarea puterii reactive, când viteza vântului crește peste limita nominala. Convertorul de frecvență are puterea nominală mai mică cu 20, 30 % decât puterea nominală a generatorului de inducție cu rotorul în colivie.[3][6]

Structura din figura 2.12.c) utilizează generatoare de inducție cu rotorul bobinat și este utilizată de firma Vestas, structura denumită „Optislip”. [24] Ideea de bază a acestei structurii este de a modifica viteza generatorului utilizând un convertor de frecvență, prin modificarea rezistenței echivalente a circuitului rotor, utilizând o rezistență externă suplimentară. Rolul convertorului de putere, conectat în circuitul rotoric este deci de a modifica alunecarea într-o plajă de pana la 10 %.

O alta varianta prezentata în [3][36] utilizează numai componente pasive, în locul sistemului cu convertor de frecvență, realizându-se de asemenea modificarea alunecării într-o plajă de pana la 10 %.

Configurația din figura 2.12.d) utilizează generatoare de inducție cu rotorul bobinat cu convertor de frecvență plasat în rotorul mașinii. Aceasta configurație denumită și „Optispeed” este cea mai utilizată în prezent. Curenții din rotor sunt

3.9. Sisteme autonome de conversie a energiei eoliene.

controlați direct de către convertorul de frecvență. Avantajele principale ale acestei soluții sunt:

- permite funcționarea AAE într-un domeniu larg de variație a turatiei
- investiția este redusă datorită faptului că utilizează un convertor cu puterea de 25-30 % din puterea generatorului, comparativ cu soluția cu convertor interpus între generator și rețea.

Convertoarele utilizate în configurațiile AAE cu viteză variabilă pot fi realizate utilizând două structuri de baza (separate sau în combinație) cu:

1. VSI (voltage source inverter) - inverter sursă de tensiune și
2. CSI (current source inverter) - inverter sursă de curent.

O soluție frecvent utilizată în cazul structurii 1, este *Back – to – back PWM – VSI* care este un convertor bidirecțional de putere care conține un redresor și un inverter cu circuit intermediar sursă de tensiune și este comandat prin modularea impulsului în durată (PWM). Configurația este prezentată în figura 3.18.

Pentru a realiza controlul curentului introdus în rețea, tensiunea în circuitul intermediar de curent continuu trebuie crescută la un nivel mai mare decât amplitudinea tensiunii rețelei.

Comanda convertorului dinspre rețea realizează și menținerea constantă a tensiunii din circuitul intermediar de c.c., în timp ce comanda convertorului dinspre generator asigură cerințele de magnetizare și de viteză de rotație.

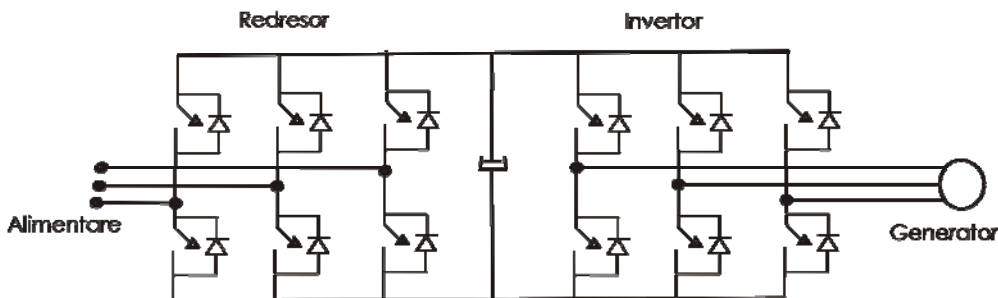


Figura 3.18. Structura convertorului bidirecțional Back – to – back PWM – VSI

Această structură a convertorului este cel mai frecvent utilizată ca și convertor de frecvență între generatorul de inducție cu rotorul în colivie și rețea.

O altă soluție de convertor care utilizează o combinație a celor 2 structuri prezentate, și care este caracteristică generatoarelor de inducție, este prezentată în figura 3.19 .

Convertorul în tandem din figura 3.19 este format din 2 convertoare statice de putere, unul principal cu circuit intermediar sursă de curent (CSI) și unul secundar cu circuit intermediar sursă de tensiune (VSI). Deși această topologie conține 4 invertoare, există posibilitatea de a obține atât la intrare cât și la ieșire curenți aproape sinusoidali.

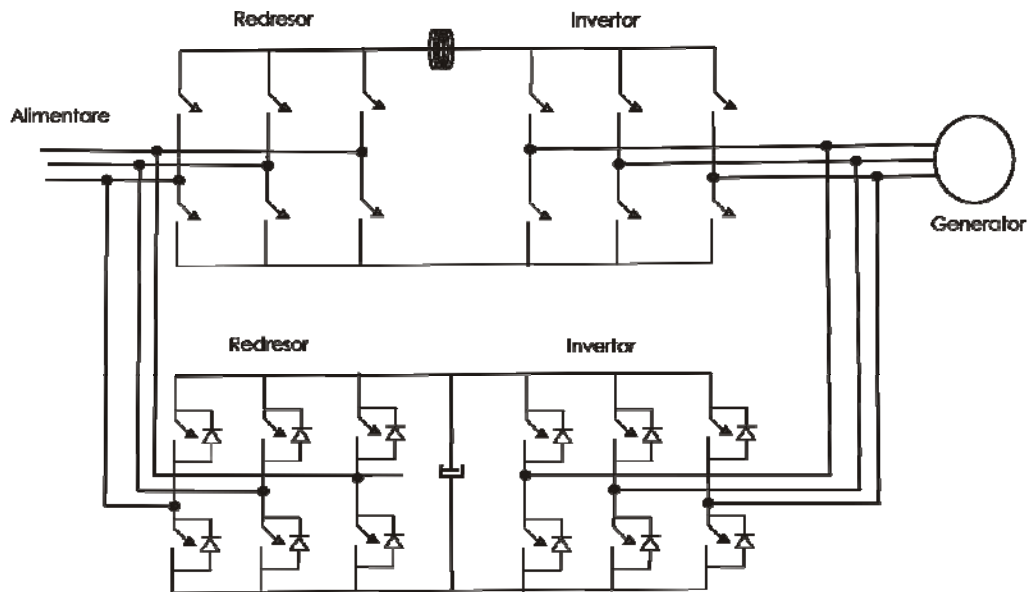


Figura 3.19. Structura de convertor în tandem, utilizată în AAE cu generatoare de inducție.

În acest context, cel mai important avantaj referitor la controlul invertorului principal este forma de undă în scara a curentului, caz în care comutația se realizează utilizând GTO-uri sau IGBT-uri în serie cu diode. Un dezavantaj este faptul că pentru convertorul principal, al doilea convertor, cel secundar trebuie să funcționeze la frecvență de comutație ridicată, deși comutația curentului reprezintă doar o fracțiune din curentul principal prin sarcină [35].

Și în acest caz, pentru a realiza controlul curentului la $\frac{1}{2}$ de la convertorul static de tensiune, tensiunea din circuitul intermediar de curent continuu trebuie crescută peste valoarea tensiunii rețelei.

Avantajele principale ale utilizării acestui tip de convertor ar fi: randament ridicat, frecvența de comutație scăzută în convertorul principal și un nivel scăzut al comutației curentului în convertorul secundar, cât și pierderile de comutație reduse (mai mici cu 70 % comparativ cu alte convertoare statice echivalente cum ar fi VSI și CSI).

Pe de altă parte, pierderile în conducție corespunzătoare acestor convertoare statice sunt mari ceea ce duce la scăderea randamentului, iar numărul mare de componente și senzori duc la creșterea costului și complexității (hard și soft).

O altă problemă în cazul utilizării numai a unui convertor CSI, este faptul că tensiunea la ieșirea convertorului ar fi doar din tensiunea rețelei, ceea ce ar reclama și utilizarea unui transformator ridicător de tensiune.

3.9. Sisteme autonome de conversie a energiei eoliene.

Sistemele autonome sunt destinate locurilor izolate, independente de rețeaua națională de putere. Avându-se în vedere ca vântul nu e permanent, aceste sisteme de conversie sunt utilizate frecvent în combinație cu sisteme de acumulare (acumulatoare) și/sau cu alte surse de energie alternativa (panouri solare sau generatoare diesel cu baterii de încărcare (stocare) a surplusului de energie).

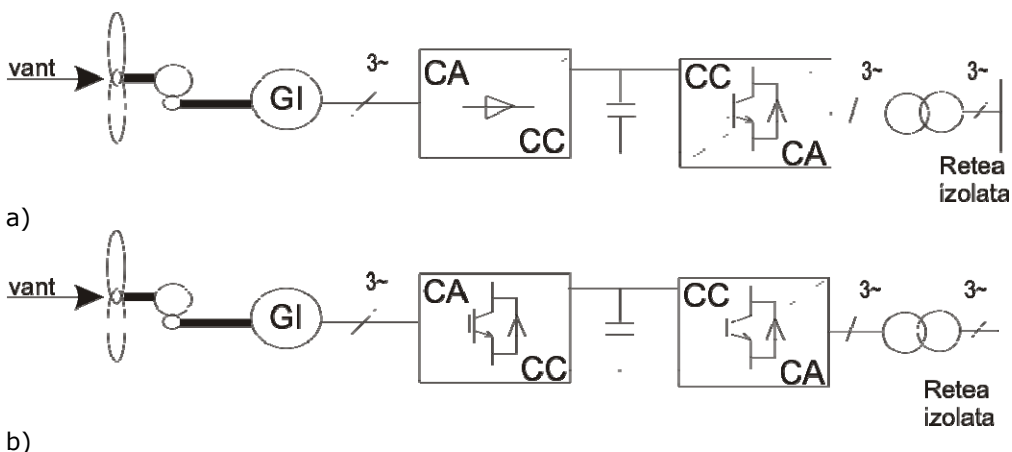
Există câteva configurații de sisteme hibride ale conversiei energiei eoliene pentru aplicații de acest tip.

Sistemele autonome pot utiliza generatoare de inducție cât și generatoare sincrone cu magneți permanenți, atât cu viteza constantă cât și variabilă, fiind de puteri mici (pana la zeci de kW).

În cazul soluțiilor cu turație variabilă care optimizează energia anuală obținută, sunt necesare convertoare statice de putere, implicit o conducere relativ complexă.

Cele mai utilizate configurații de convertoare statice de putere destinate turbinelor de vânt cu mașini de inducție / mașini sincrone pentru locuri izolate sunt prezentate în figurile 3.20 și 3.21. [3][6][35]

Redresorul cu diode (fig 3.15.a) poate fi utilizat doar într-un cadran și nu poate fi controlat, dar e o soluție simplă și ieftină, potrivită pentru turbine cu viteză constantă, fără reglarea pasului paletelor. Utilizând un convertor cc-cc (chopper) între redresorul cu diode și un invertor sursă de tensiune se poate obține o funcționare la viteză variabilă. Convertorul back-to-back (figura 3.20b) este un convertor bidirecțional sursa de tensiune, conținând 2 invertoare cu circuit intermediar de tensiune, putându-se realiza controlul complet al fluxului de puteri, în scopul menținerii constante a tensiunii din circuitul intermediar de tensiune. Avantajul utilizării acestei soluții este decuplarea bateriei de condensatoare dintre convertorul de rețea și cel al generatorului, permițând controlul separat al celor 2 convertoare, realizându-se astfel compensarea independentă a asimetriilor, atât pe partea de generator cât și pe partea de rețea.



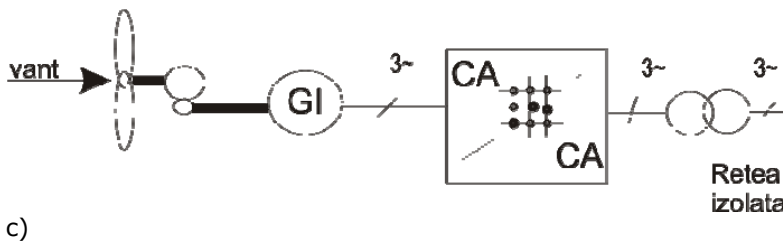


Figura 3.20. Configurațiile AAE autonome utilizând generatoarele de inducție (GI) și redresor cu diode și inverter cu circuit intermediar de tensiune (a), GI și convertor de tensiune back-to-back (b), respectiv GI cu convertor matricial (c).

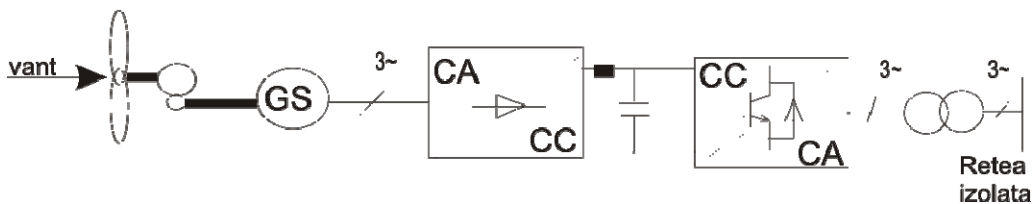


Figura 3.21. Configurație AAE autonomă utilizând generatoarele sincrone (GS) și redresor cu diode și inverter cu circuit intermediar.

Unul din dezavantajele acestor structuri (fig. 3.20.a și 3.20.b) este prezența bateriei de condensatoare din circuitul intermediar, care este voluminoasă și are o durată de viață relativ scăzută.

Soluția cu convertor matricial (fig. 3.20.c) are avantajul unei soluții simple, care nu utilizează componente pasive în circuitul de putere. De asemenea, absența condensatorului din circuitul intermediar de cc poate crește randamentul și fiabilitatea convertorului, pierderile în comutație fiind mai mici decât la celelalte convertitoare. Ca dezavantaje pot fi menționate limitarea tensiunii de ieșire, indisponibilitatea unei comutații bidirecționale și lipsa unui circuit de decuplare între intrarea și ieșirea convertorului.

3.10. Funcționarea unui agregat aeroelectric conectat la rețeaua electrică și regimuri de funcționare specifice.

Condițiile impuse conectării și funcționării AAE la rețeaua electrică sunt dependente de structura acestora, de numărul lor (în cazul centralelor), de puterea acestora, etc. AAE funcționând la turație variabilă cu tensiune și frecvență variabilă, impune utilizarea unor convertitoare de conectare la rețea care să asigure parametri necesari (tensiune și frecvență constantă). [3]

Se permite conectarea la rețea numai dacă rețeaua nu prezintă deranjamente.

Efectele convertitoarelor grupurilor energetice asupra rețelei se manifestă, pe de o parte, prin puterea transmisă și modul de conectare, iar pe de alta parte, prin echipamentul de protecție. De asemenea, sunt posibile și influențele ale rețelei asupra AAE conducând la modificări ale armonicilor și tensiunii, cu efecte negative asupra rețelei (un "efect în lanț"). [3][35][37]

Conectarea grupurilor electrogene la rețea trebuie să respecte normativele în vigoare, privind modul de realizare a conectării și să îndeplinească pe subsisteme următoarele **condiții și funcții**:

- Dispozitive de conectare/deconectare și de comutație: trebuie să aibă capacitatea de a întrerupe circuitul (în varianta paralela de lucru poate fi realizată de circuitele de protecție ale convertorului AAE). Se vor dimensiona pentru curentul maxim de scurtcircuit al convertorului AAE respectiv al rețelei.
- Dispozitive de protecție: pentru generator se asigură o protecție de tensiune (la supracreștere în domeniul $1,0 U_N \dots 1,15 U_N$, la subcreștere în domeniul $1,0 U_N \dots 0,7 U_N$) și o protecție de frecvență a rețelei (la supracreștere în domeniul 50Hz...52Hz, la subcreștere în domeniul 50Hz...48Hz); pentru invertor este necesară numai o protecție de tensiune, nu și de frecvență.
- Reacția rețelei (grid feedback): trebuie păstrată compatibilitatea indicatorilor de perturbații conform standardelor în vigoare (variația tensiunii și armonicilor de curent). Sistemul de control al pulsațiilor trebuie să funcționeze continuu.
- Compensarea puterii reactive: factorul de putere trebuie să se încadreze în limitele 0,9 capacitiv...0,8 inductiv. Pentru grupuri electrogene având mai puțin de 4,6 kVA, nu este necesară compensarea factorului de putere.
- Pentru generatorul sincron este necesară utilizarea unui sistem de sincronizare care să asigure încadrarea în limitele de sincronizare (abaterea de tensiune $\Delta U \pm 10\% U_N$; abaterea de frecvență $\Delta f \pm 0,5 \text{ Hz}$; defazaj $\Delta \varphi \pm 10^\circ$).
- Pentru generatorul asincron se permite conectarea la rețea numai dacă turația este în domeniul $0,95 n_{\text{sinc}} \dots 1,05 n_{\text{sinc}}$, invertorul putând fi conectat numai dacă este deconectată sarcina de pe partea de c.a. (în cazul funcționării autonome) sau dacă sunt îndeplinite condițiile de conectare la rețeaua generală.

Se impune de asemenea dotarea AAE cu sisteme de supraveghere, semnalizare și control pentru verificarea funcționării unor subsansamble (semnalizarea deconectării sau defecțiunii), elemente de măsură pentru diverse mărimi (tensiune, curent, putere, factor de putere, etc.), detectarea defecțiunilor rețelei (lipsa/întreruperea unei faze a rețelei, deviații ale frecvenței, deconectări/conectări automate, etc.), verificarea îndeplinirii condițiilor de conectare.

3.10.1. Demararea, regimul de așteptare și conectarea / deconectarea la / de la rețea și oprirea agregatului aeroelectric

Demararea poate avea loc, în funcție de tipul și particularitățile agregatului, în diferite moduri posibile: [3][37]

a) Autodemararea (fără dispozitive auxiliare de demarare), începând de la o anumită valoare a vitezei vântului, (ce poate asigura funcționarea în gol), și aducerea agregatului în o așa numită "stare de așteptare" a condițiilor (viteza vântului) de conectare la rețea, adică numai când se atinge o viteză a vântului suficientă pentru generarea de energie în rețea (energie mai mare decât pierderile în toate elementele agregatului de vânt). După îndeplinirea condițiilor de conectare la rețea, conectarea propriu-zisă se realizează după trecerea unui interval de timp

τ_{conect} (se estimează) ce tine seama de tendința de persistenta a valorilor vitezei vântului în jurul celei considerate

b) Demararea cu ajutorul unor dispozitive auxiliare aerodinamice (turbina auxiliara de tip Savonius etc.), și aducerea agregatului pana la o turație la care este asigurata funcționarea independenta a turbinei AAE "în regim de așteptare" și apoi conectarea la rețea în condițiile de la pct.a

c) Demararea și aducerea în "stare de așteptare" cu ajutorul convertorului de frecvență de interfațare cu rețeaua, alimentând "generatorul", ce devine motor, cu energie provenita de la rețea sau alta sursa (baterie de acumulate, etc.). Conectarea la rețea, în modul arătat, se va face la viteza vântului la care AAE este capabil să genereze (nu sa consume) energie electrica (vezi pct.a)

Deconectarea AAE de la rețea se va face la viteza vantului (ce urmeaza a fi determinata prin incercari) la care energia mecanica dezvoltata de turbina este egala cu pierderile în agregat,, in sa cu o temporizare τ_{deconect} care sa evite conectari și deconectari repetate la fluctuatiile vitezei vantului în jurul celei mentionate. Dupa deconectare, AAE continua sa se roteasca (daca este vant suficient pentru acest lucru) în "regim de asteptare", preferabil opririi, el favorizand, de exemplu, evitarea depunerii de chiciura (gheata) pe paletele turbinei. Temporizarile la care s-a facut referire mai sus devin superflue daca se face apel la metode de predictie a vitezei vantului.

Controlul conditiilor de vant (viteza vantului) în vederea stabilirii indeplinirii conditiilor de demarare/conectare la rețea/deconectare de la rețea cat și a strategiilor de conducere a liniei de conversie dupa conectarea la rețea (asa cum se va arata în paragraful urmator) se poate face în diferite moduri (în functie de echiparea AAE):

a. Masurarea vitezei vantului cu ajutorul unui anemometru.

b. Determinarea indirecta, prin calcul, a vitezei vantului în functie de tensiunea și intensitatea curentului, asa cum se va arata în paragraful urmator, pentru cazul utilizarii generatoarelor sincrone.

3.10.2. Determinarea indirecta, analitica, a vitezei vantului în functie de puterea, tensiunea, intensitatea curentului și factorul de putere al generatorului.

Deoarece masurarea vitezei vantului cu anemometrul presupune investitii suplimentare (stalp anemometric, etc.) și măsuri de protecție a acestuia împotriva depunerii de chiciură-zăpadă, în unele situatii (agregate de mica putere) este preferabila o metoda indirecta de estimare pe baza cunoasterii altor marimi disponibile.

Cercetarile au condus la o metoda de estimare a vitezei vantului în functie de puterea, tensiunea, intensitatea curentului și valoarea factorului de putere al generatorului.

Algoritmul de calcul din cadrul metodei, în cazul utilizarii generatorului sincron, consta în urmatoarele:

1. Se masoara la functionarea curenta: puterea, tensiunea, intensitatea curentului, factorul de putere (daca este cazul).

3.11. Abordarea integrată a proiectării fermelor de AAE

2. Utilizând valorile mărimilor menționate și relațiile de interdependență (2a/2b) dintre acestea și frecvența, turația și puterea electrică debitată de către generator, pot fi determinate:

- turația agregatului n ,
- viteza periferică a paletelor turbinei u
- randamentul generatorului $\eta_G = F(P_{el}, n)$ (din tabelul η funcție de n, I)

3. Considerând modelul analitic al caracteristicii de putere la arborele turbinei pentru diverse viteze ale vântului:

$$P_T = \rho \left(\frac{v_k^3}{2} \right) S \left[a \left(\frac{u}{v_k} \right)^\alpha - b \left(\frac{u}{v_k} \right)^\beta \right], \quad k = 1, 2, \dots \quad (3.1)$$

rezulta expresia **puteri la iesirea generatorului**

$$P_G = \rho \left(\frac{v_k^3}{2} \right) S \left[a \left(\frac{u}{v_k} \right)^\alpha - b \left(\frac{u}{v_k} \right)^\beta \right] \cdot \eta_G \quad (3.2)$$

respectiv expresia **puterii liniei de conversie**

$$P_{el} = \rho \left(\frac{v_k^3}{2} \right) S \left[a \left(\frac{u}{v_k} \right)^\alpha - b \left(\frac{u}{v_k} \right)^\beta \right] \cdot \eta_G \cdot \eta_{convertor}, \quad (3.3)$$

(adică P_{el} pentru $\eta_{convertor} = 1$)

unde :

ρ - densitatea aerului

v_k - valoarea (necunoscută) a vitezei vântului

S - secțiunea "tubului" de aer ce străbate secțiunea verticală a turbinei,

$u = 2\pi R_T n$ - viteza periferică de rotație a paletelor turbinei

n - turația turbinei (la generatoarele cu poli din magneti permanenți $n \cong k_p U$)

R_T - raza periferică a paletelor turbinei

a, b, α, β - parametrii constructivi ai turbinei (dependenți de tipul ei de aerodinamică paletelor)

η_{el} - randamentul electric al liniei de conversie, egal cu produsul randamentelor generatorului (η_G) și convertorului de frecvență ($\eta_{convertor}$)

Pentru diferite valori ale vitezei vântului $v_k, k = 1, 2, \dots$, din (1) poate fi obținută familia caracteristicilor de putere ale turbinei în funcție de turație, iar din (3.2)/(3.3) rezulta familia caracteristicilor de putere în funcție de turație a liniei de conversie turbină - generator - convertor de frecvență. [3]

3.10.3. Funcționarea grupului "turbină - generator" în cazul unei valori constante a vitezei vântului.

Pentru explicarea intuitivă a funcționării grupului turbină-generator în cazul unei valori constante a vitezei vântului (caz idealizat) este necesar a considera:

1. Caracteristica de putere P_{el} a liniei de conversie
2. Familia caracteristicilor de putere ale generatorului

$$P_G = U \cdot I_j \cdot \cos \varphi_j, \quad I_j = \text{const}$$

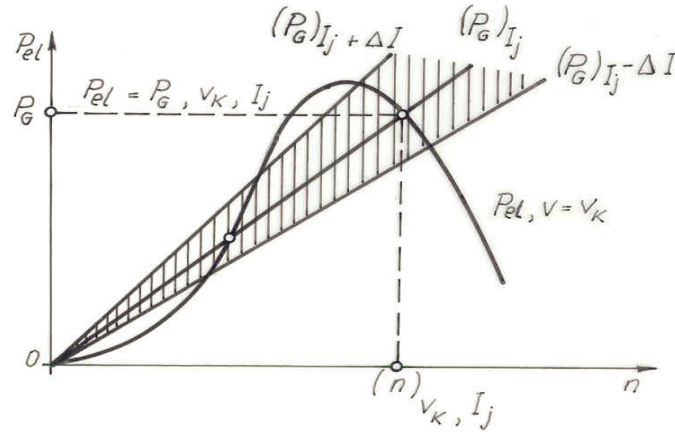


Figura 3.22. Regimurile staționare de echilibru – punctele A' și A'' ale sistemului turbină – generator.

În Figura 3.22 sunt reprezentate: caracteristica $P_{el} = f(n)$ modelată de relația (2b) a liniei de conversie, corespunzătoare unei valori constante v_k a vitezei vântului și trei caracteristici de putere $P_G = f(n)$ modelate de relația (2a) a generatorului, corespunzătoare la trei valori ale intensității curentului generatorului: $I_j, I_j + \Delta I, I_j - \Delta I$, neglijând reacția indusului generatorului. În cazul generatoarelor asincrone având tensiunea reglata (aproximativ optimal) după legea $U/f = \text{const}$, cât și în cazul generatoarelor sincrone cu excitație constantă, factorul de putere, în cazul $I_j = \text{const}$, $n = \text{var}$, este constant

$$\cos \varphi_j \cong \text{const}, U/f = \text{const}, I = I_j = \text{const}, \quad (4)$$

adică caracteristicile de putere ale generatoarelor asincrone și sincrone sunt liniare cu turația.

Regimurile staționare de echilibru ale sistemului turbină – generator, corespunzător unei valori I_j a curentului generatorului, sunt cele în care $P_{el} = (P_G)_{I_j}$, adică la intersecția caracteristicii $P_{el} = f_{el}(n), v = v_k = \text{const}$ cu caracteristica generatorului $P_G = f_G(n)$, adică regimurile corespunzătoare punctelor A' și A''. Se poate observa că funcționarea sistemului în punctul A' corespunde unui regim de echilibru staționar nestabil, în timp ce punctul A'' corespunde unui regim de echilibru stabil. Din considerente de "zgomot" și rezistență mecanică, dimensiuni, greutate și cost, se preferă funcționarea sistemului la turații mai mici, deci pe ramura din stanga, zisă "instabilă", a caracteristicii $P_{el} = f_{el}(n), v = v_k = \text{const}$. Funcționarea pe ramura instabilă poate fi asigurată numai prin reglarea automată a intensității curentului generatorului în vecinătatea $I = I_j \pm \Delta I$. [3]

3.10.4. Regimuri de funcționare optime, sau impuse din motive de limitare a turatiei și curentului în funcționare, la agregatele de vânt cu turbina fara autoplafoanare a puterii.

Pentru orientarea initiala în alegerea/delimitarea tipurilor de regimuri de funcționare de realizat, se face o analiza preliminară, utilizand reprezentarea din Fig. 3.23 a caracteristicilor $(P_{el})_k = f_{el, k}(n)$, v_k (la diferite viteze ale vantului) și reprezentarea grafica a caracteristicilor $(P_G)_{I_N} = f(n)$ și $(P_G)_{I_{max}} = f(n)$ ale generatorului (pentru $I = I_N$ și $I = I_{max}$ (a se vedea standardele [] [], de exemplu $I_{max, 15 \text{ sec}} = 1,5 I_N$). Aceasta analiza permite stabilirea unor orientari de principiu, detaliile de calcul urmand a fi facute dupa metodologii matematice sau experimentale specifice fiecarei metode de conducere.

Spre exemplificare se considera caracteristicile unui agregat aeroelectric cu turbina cu ax vertical, avand diametrul $D = 2,5 \text{ m}$, $n_{max} = 275 \text{ RPM}$ (proiectata la "Centrul pentru Aeroenergetica" al Universitatii "Politehnica" din Timisoara) [] și un generator sincron cu poli din magneti permanenti (proiectat la Filiala din Timisoara a Academiei Romane) [] avand $P_N = 2,5 \text{ KW}$, $U_N = 115 \text{ V}$, $n_N = 250 \text{ RPM}$, $f_N = 33,2 \text{ Hz}$, $I_{max, 15 \text{ sec}} = 1,5 I_N$ (cele prezentate au o valabilitate generala, independent de tipul generatorului utilizat):

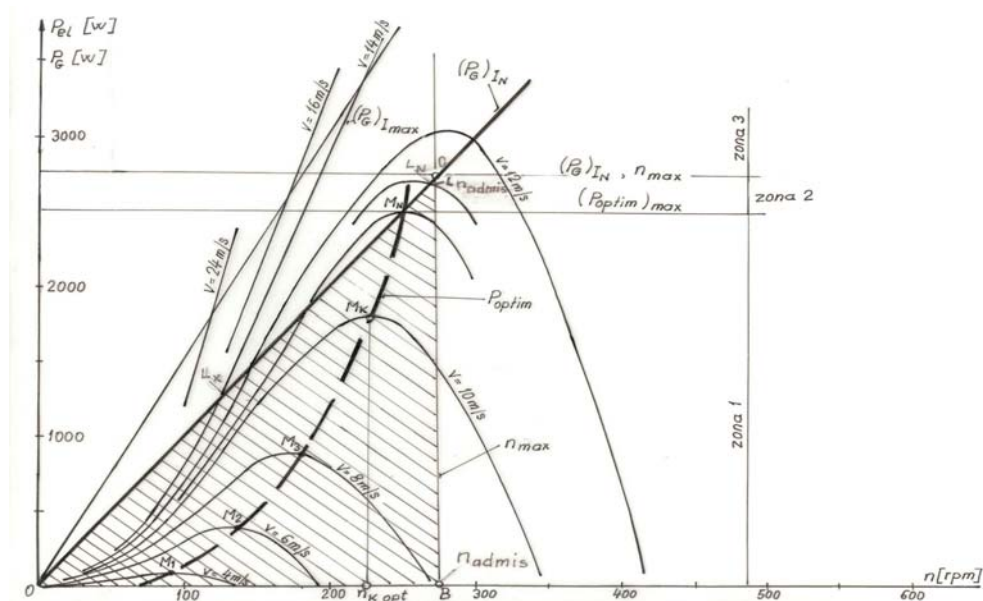


Figura 3.23. Caracteristicile de putere electrica ale liniei de conversie ale AAE T34, 2,5 KW, cu turbina cu ax vertical, avand diametrul $D = 2,5 \text{ m}$ și respectiv ale generatorului sincron cu poli din magneti permanenti, avand puterea $P_N = 2,5 \text{ KW}$.

Considerand caracteristicile prezentate în fig. 3.23, se fac urmatoarele precizari:

1. Este admisa functionarea de lunga durata a grupului numai în regimurile corespunzatoare punctelor din interiorul triunghiului hasurat OBC, delimitat de caracteristica de putere electrica corespunzatoare curentului nominal, verticala

ce intersectează axa absciselor în punctul B la valoarea $n = 275$ RPM și axa absciselor O_n ,

2. Domeniul de la pct. 1, la randul lui, se subdivide în:
 - 2.1. *Zona 1* - un domeniu al triunghiului OBC limitat superior de punctul M_N , adică de optimul caracteristicii $P_{el} = f(n)$, corespunzătoare vitezei vantului pentru care puterea maximă/optimală corespunde, la generator, curentului nominal al acestuia I_N . În această zonă, printr-o conducere adecvată, grupul va fi determinat să funcționeze, la fiecare viteză a vantului, la puterea optimă obținabilă la viteza respectivă a vantului, adică în punctele $M_1, M_2, \dots, M_k, \dots, M_N$
 - 2.2. *Zona 2* - un domeniu din partea superioară a domeniului admisibil de funcționare OBC, corespunzător intersecției caracteristicii de putere electrică a liniei de conversie pentru $I = I_N = \text{const}$ și verticala corespunzătoare turatiei maxime admisibile, în care puterea optimă s-ar obține, pentru viteze ale vantului corespunzătoare acestei zone, la curenti mai mari decât I_N . Acest lucru nu se poate accepta și, drept urmare, printr-o conducere adecvată grupul va fi determinat să funcționeze în punctul L_N , cu curentul I_N , dar la o putere suboptimală pentru viteza respectivă a vantului.

Pentru simplificare (evitarea unor calcule complicate), se poate adopta funcționarea cu turatia maximă admisă n_{admis} în regimul corespunzător punctului

$L_{n_{\text{admis}}}$.

- 2.3. *Zona 3* - un domeniu deasupra triunghiului OBC la care s-a făcut referire la pct. 2. 1. Pentru viteze ale vantului superioare celor din "Zona 2" este posibilă numai o funcționare de scurtă durată și tranzitorie, deoarece intensitatea curentului generatorului ar fi mai mare decât valoarea nominală $I > I_N$. De asemenea, funcționarea în zonă este permisă numai dacă intensitatea curentului generatorului este mai mică decât cea admisibilă pe o scurtă durată de timp $I_{\text{max}, 15 \text{ sec}}$, pentru a putea fi posibilă franarea agregatului la această valoare a curentului și aducerea lui la un regim de funcționare (punctul L_x) corespunzător curentului $I = I_N$. Acest regim corespunde intersecției caracteristicii de putere electrică a liniei de conversie a agregatului aeroelectric $P_{el} = f(n)$, v_k (pentru viteza respectivă a vantului), cu caracteristica de putere a generatorului $P_G = f(n)$, $I = I_N$.

Se poate remarca că, în cazul analizat al turbinelor fără autoplafonare se poate asigura:

- funcționarea optimă a turbinei numai în prima din zonele de funcționare discutate
- funcționare neoptimală a turbinei, dar cu puteri apropiate celei nominale
- funcționarea la turatii și puteri mici, la vitezele foarte mari ale vantului, ceea ce ar putea apărea ca nefiresc, dar necesar din motive de limitare a solicitărilor electrice și mecanice a agregatului. Funcționarea în aceste regimuri corespunde la situații ce au o frecvență anuală de repetiție foarte scăzută, ceea ce împiedică într-o măsură redusă asupra cantumului anual de energie electrică furnizată.

3.11. Abordarea integrată a proiectării fermelor de agregate aeroelectrice.

În vederea implementării unor soluții pentru fermele de vânt, o modalitate modernă de abordare o reprezintă abordarea integrată. În figura 3.24, a fost elaborată o posibilă organigramă vizând abordarea integrată a implementării AAE.[26][38]

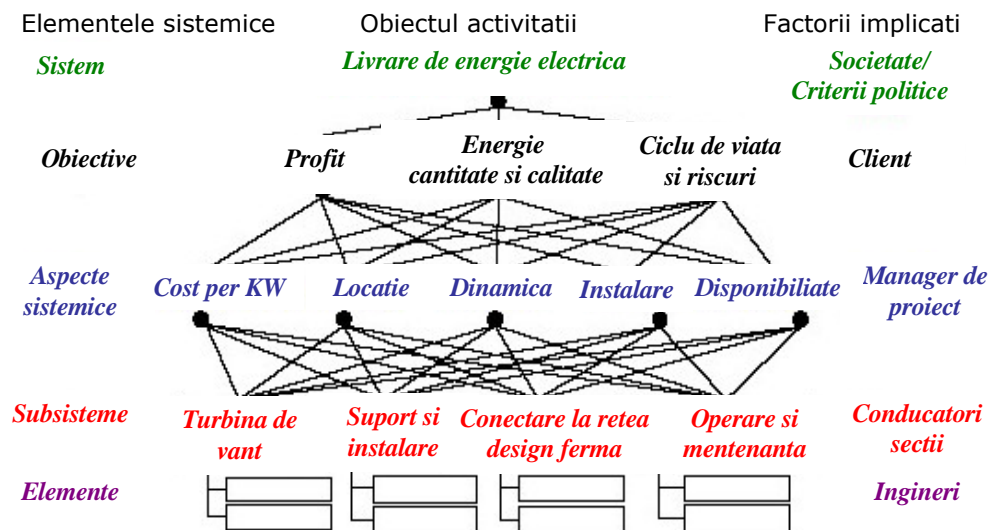


Figura 3.24. Abordarea integrată a design-ului fermei de vânt.

În cazul AAE software-ul de management trebuie să abordeze următoarele considerente:

- standardele IEC în domeniu (pentru turbine de vânt IEC 61400, de compatibilitate electromagnetică EMC) [6]
- strategii de operare și comutare
- strategii de protecție
- probleme de monitorizare și diagnoză a AAE
- efectele fermelor de AAE asupra rețelei generale [3]

3.12. Concluzii.

În examinarea funcționalității și comportării agregatelor aeroelectrice, o atenție deosebită trebuie acordată generatoarelor electrice, modalități de cuplare a acestora cu rotorul turbinei și modalitatea de conectare / deconectare la rețea.

Sistemele de conversie a energiei eoliene comparativ cu alte surse de producere a electricității, cum ar fi hidrogeneratoarele sau grupurile diesel, prezintă unele avantaje cum ar fi:

Stadiul actual al sistemelor de conversie a energiei eoliene - 3

- Simplitate în utilizare
- Viață lungă în exploatare
- Eșalonarea în timp a implementării AAE ce urmează să formeze centrala eoliană
- Costuri inițiale reduse
- Întreținere ușoară
- Ecologice

În conversia energiei eoliene, în prezent sunt utilizate atât generatoare de inducție cât și generatoare sincrone, competiția în privința simplității, a costului redus și construcției robuste, fiind foarte strânsă. Se cercetează, noi tipuri de generatoare (de ex: generatorul de inducție cu două înfășurări statorice și cu rotorul în colivie, samd).

În prezent, se observă două tendințe majore:

- funcționarea AAE la turatie variabila pentru obținerea unei puteri optime la fiecare viteză a vântului;
- AAE cu cuplarea directă a turbinei cu generatorul ceea ce elimină amplificatorul de turatie dintre turbina și generator și prin aceasta se reduce pretul de cost al AAE, se elimină zgomotul datorat acestuia și se reduc costurile de funcționare.

4. MODELAREA MATEMATICĂ A PRINCIPALELOR ELEMENTE COMPONENTE ALE AGREGATELOR AEROELECTRICE.

4.1. Modelul de variație a vitezei vântului

Acest model descrie variația, în funcție de timp, a vitezei vântului, variație care influențează puterea și caracteristicile de funcționare, respectiv de control ale turbinei eoliene. Acțiunea vântului asupra planului rotorului turbinei este complexă incluzând un efect determinist (vântul echivalent la rotor, caracteristicile turnului de susținere, etc.) și unul stohastic (turbulențele care apar în variația vântului, etc.). [39][40][41]

Modelarea vitezei vântului se bazează pe spectrul Kaimal, [6][42] viteza vântului fiind calculată ca valoare medie a vitezei în diferitele puncte ale rotorului și ia în considerație caracteristicile turnului de susținere și turbulențele rotaționale.

O componentă principală a acestui model este un generator de zgomot alb, normal distribuit, care a fost dezvoltat în cadrul lucrării utilizând o funcție S-Function, bazată pe algoritmul Ziggurat. [6][43]

A fost utilizat de asemenea și generatorul de zgomot alb din mediul Matlab-Simulink (SB- Simulink block built-in).

Sunt generate în acest mod serii de timp, care reprezintă modele ale vitezei vântului, utilizate în simulări la intrarea liniei de conversie electromecanică a energiei eoliene.

Structura generală a acestor modele Simulink este prezentată în Fig. 4.1. Parametrii definiți în masca aferentă blocului sunt: diametrul rotorului turbinei de vânt, viteza medie a vântului, înălțimea stâlpului de susținere, intensitatea perturbațiilor și pasul de timp.

În Fig. 4.2 se prezintă seriile de timp, furnizate de cele două modele, pentru un interval de 3600 secunde, cu pasul 0.05, în cazul unei viteze medii a vântului de 10 m/s și 12 % intensitatea perturbațiilor.

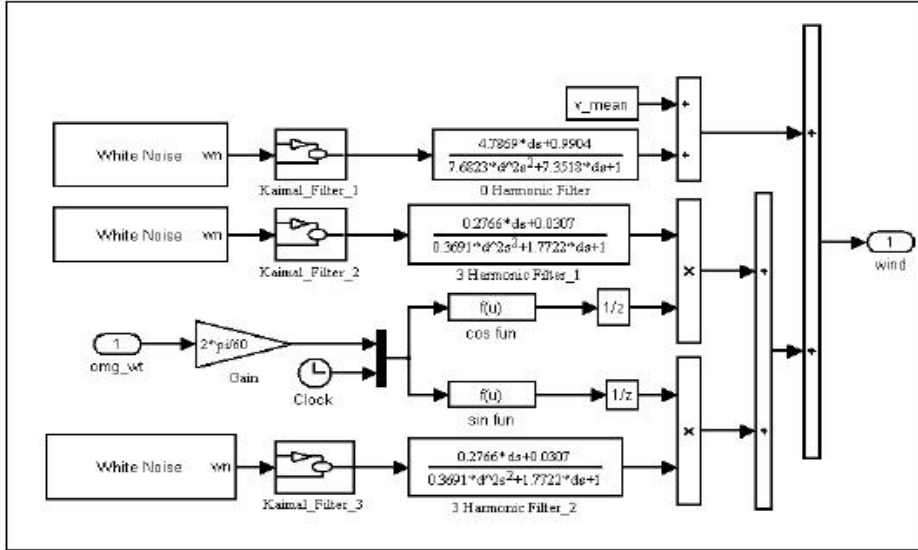


Fig. 4.1. Implementarea Simulink a modelului vântului.

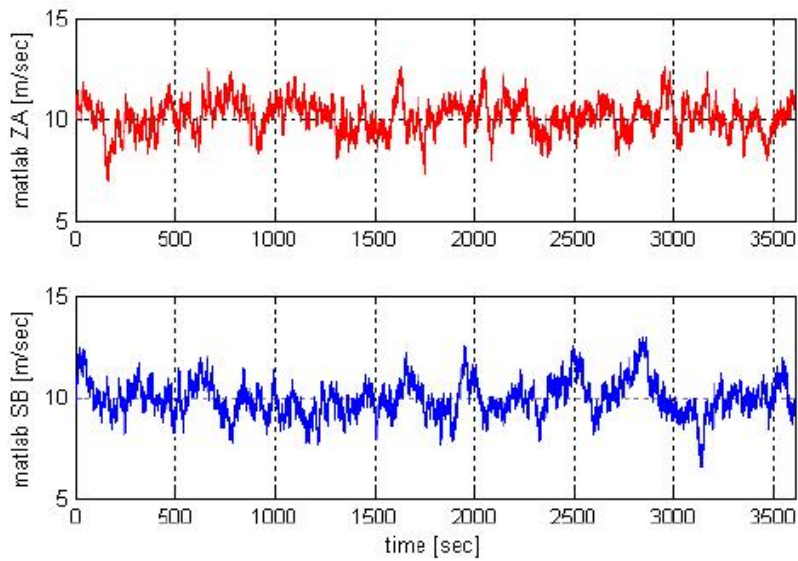


Fig. 4.2. Seriile de timp ale vântului pentru modelele considerate (ZA – Ziggurat Algorithm, SB – built-in Simulink Block).

4.4. - Modelarea matematica a mașinii de inducție.

4.2. Modelul rotorului turbinei de vânt

Implementarea în mediul Matlab a modelului aerodinamic al rotorului turbinei de vânt se bazează pe utilizarea blocului Simulink, tabel cu valori (look-up table), pentru coeficientul cuplului C_T , sau coeficientul puterii C_p .

Coeficientul cuplului C_T este utilizat pentru determinarea cuplului aerodinamic direct folosind relația: [3][6]

$$T_{wt} = 0.5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^3 \cdot v_{\infty}^2 \cdot C_T \quad (4.1)$$

unde: ρ este densitatea aerului, R este raza paletei, v este viteza vântului și C_T este coeficientul cuplului.

Cuplul aerodinamic mai poate fi determinat utilizând coeficientul de putere C_p pe baza relației:

$$T_{wt} = 0.5 \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^2 \cdot v_{\infty}^3 \cdot C_p \quad (4.2)$$

Modelul rotorului turbinei de vânt cu pas variabil este prezentat în Fig. 4.3.

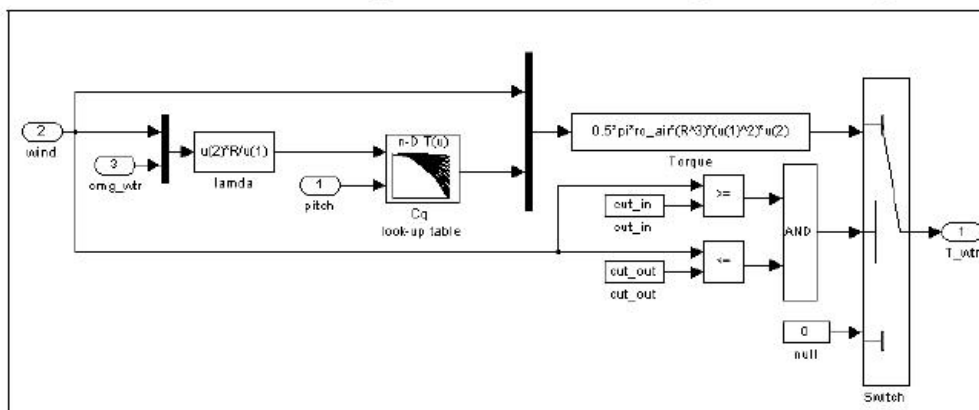


Fig. 4.3. Modelul Simulink al rotorului turbinei de vânt

Parametrii din interfața măștii blocului definit sunt: raza paletei, densitatea aerului, viteza vântului de "cut-in" și "cut-out" .

Utilizând un tabel de valori de dimensiuni reduse, care conține variația coeficientului cuplului de putere în funcție de unghiul de orientare ($-10^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$), se obține modelul pentru turbine de vânt cu control activ.

Impunând valoarea 0 pentru unghiul de orientare θ , se obține modelul pentru turbina de vânt cu control aerodinamic pasiv. [6]

4.3. Modelul sistemului de transmisie

Modelul echivalent cu trei mase inerțiale al sistemului de transmisie al turbinei de vânt este prezentat în Fig. 4.4. Masele corespund rotorului turbinei de vânt, amplificatorului de turație și generatorului.

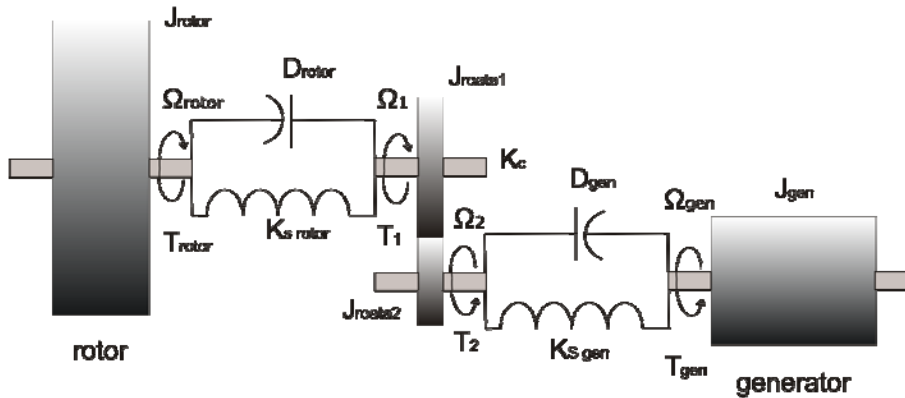


Fig. 4.4. Modelul cu trei mase al sistemului de transmisii.

Luând în considerare factorii de amortizare și torsiune (răsucire) pentru ambii arbori, ecuațiile dinamice pot fi scrise astfel:

$$\begin{aligned}
 T_{rotor} &= J_{rotor} \frac{d\Omega_{rotor}}{dt} + D_{rotor} \Omega_{rotor} + k_{rotor} (\theta_{rotor} - \theta_1) \\
 T_1 &= J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} + D_{rotor} \Omega_1 + k_{s\ rotor} (\theta_1 - \theta_{rotor}) \\
 T_2 &= J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} + D_{gen} \frac{d\Omega_2}{dt} + k_{s\ gen} (\theta_2 - \theta_{gen}) \\
 -T_{gen} &= J_{gen} \frac{d\Omega_{gen}}{dt} + D_{gen} \Omega_{gen} + k_{s\ gen} (\theta_{gen} - \theta_2) \\
 \frac{d\theta_{rotor}}{dt} &= \Omega_{rotor}, \quad \frac{d\theta_1}{dt} = \Omega_1 \\
 \frac{d\theta_2}{dt} &= \Omega_2, \quad \frac{d\theta_{gen}}{dt} = \Omega_{gen}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

unde: T_{rotor} – cuplul turbinei de vânt; J_{rotor} – momentul de inerție al turbinei de vânt; Ω_{rotor} – viteza mecanică a turbinei de vânt; k_{rotor} – constanta de torsiune care indică rigiditatea torsiunii arborelui de pe partea turbinei; T_{gen} – cuplul generatorului; J_{gen} – momentul de inerție al generatorului; Ω_{gen} – viteza mecanică a generatorului; $k_{s\ gen}$ – constanta de torsiune care indică rigiditatea torsiunii

4.4. - Modelarea matematica a mașinii de inducție.

arborelui de pe partea generatorului; T_1 – cuplul care intră în amplificatorul de turație; T_2 – cuplul de la ieșirea amplificatorului de turație; k_{gear} – coeficientul amplificatorului de turație.

Modelul cu trei mase inerțiale poate fi redus unul cu două mase inerțiale, considerând un sistem echivalent, cu factor de amortizare și torsiune echivalent (Fig.4.5). Momentul de inerție pentru arbori și amplificatorul de turație se pot neglija având în vedere că sunt mici în comparație cu momentul de inerție al turbinei și al generatorului. Modelul rezultat este în esență un model cu două mase conectate printr-un arbore flexibil. Doar coeficientul amplificatorului de turație influențează noul sistem echivalent. [6]

Ecuțiile dinamice pot fi scrise în funcție de raportarea la turbina de vânt și respectiv, la generator.

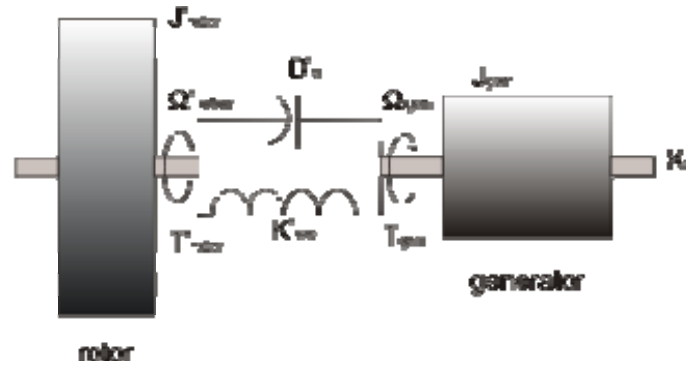


Fig. 4.5. Diagrama echivalentă a sistemului de transmisii a turbinei de vânt pe partea generatorului.

Ecuțiile dinamice ale sistemului de transmisii raportate la generator sunt:

$$\begin{aligned}
 T'_{rotor} &= J'_{rotor} \frac{d\Omega'_{rotor}}{dt} + D'_e (\Omega'_{rotor} - \Omega_{gen}) + k'_{se} (\theta'_{rotor} - \theta_{gen}) \\
 \frac{d\theta'_{rotor}}{dt} &= \Omega'_{rotor} \\
 -T'_{gen} &= J_{gen} \frac{d\Omega_{gen}}{dt} + D'_e (\Omega_{gen} - \Omega'_{rotor}) + k'_{se} (\theta_{gen} - \theta'_{rotor}) \quad (4.4.) \\
 T'_{rotor} &= J'_{rotor} \frac{d\Omega'_{rotor}}{dt} + D'_e (\Omega'_{rotor} - \Omega_{gen}) + k'_{se} (\theta'_{rotor} - \theta_{gen}) \\
 \frac{d\theta_{gen}}{dt} &= \Omega_{gen}
 \end{aligned}$$

unde: coeficientul de torsiune echivalent este dat de:

$$\frac{1}{k'_{se}} = \frac{1}{k_{rotor}} + \frac{1}{k_{gen}} \quad (4.5.)$$

și momentul de inerție echivalent al rotorului este:

$$J'_{rotor} = \frac{1}{k_{gear}^2} \cdot J_{rotor} \quad (4.6.)$$

Implementarea Simulink a relației (4.3.) este ilustrată în Fig. 4.6.

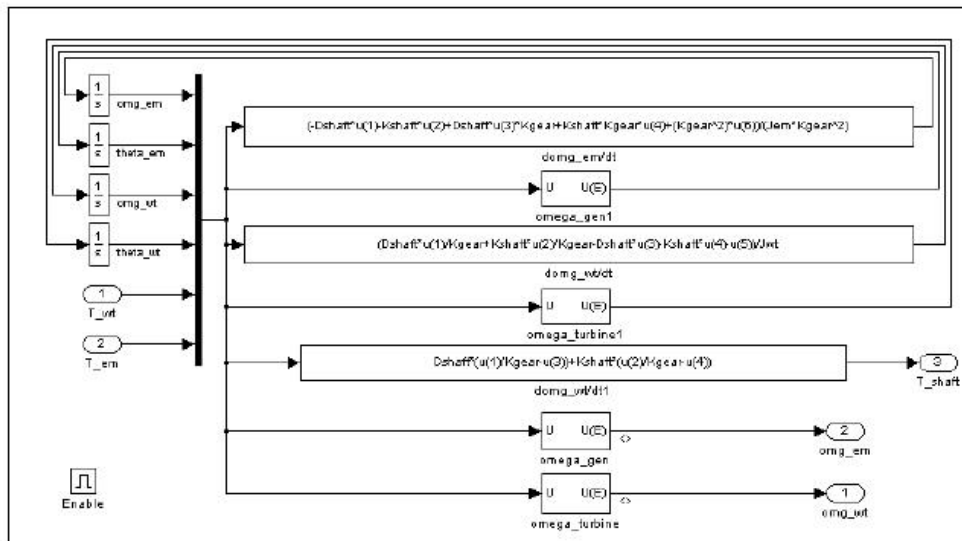


Fig. 4.6. Implementarea Simulink a sistemului de transmisie al turbinei de vânt.

Parametrii din interfața măștii blocului Simulink sunt: momentul de inerție pentru mașină și pentru rotorul turbinei de vânt, rigiditatea echivalentă și coeficienții de amortizare pentru arbori, amplificatorul de turație și condițiile inițiale pentru variabilele de stare (vitezele și unghiurile pentru arborele de viteza mică și cel de viteză mare).

4.4. Modelarea matematică a mașinii de inducție.

Tehnologia conversiei energiei eoliene în energie electrică, se bazează pe utilizarea mașinilor electrice de curent alternativ (de inducție (asincrone) sau sincrone), utilizate în regim de generator. Cele mai recente soluții de a obține energie electrică din vânt, sunt posibile ca urmare a rezultatelor cercetărilor întreprinse în domeniul sistemelor automate, respectiv cel al electronicii de putere.

În acest paragraf sunt prezentate ecuațiile dinamice ale mașinii de inducție, atât în sistemul de referință convențional abc , cât și în sistemul de referință virtual $dq0$. Aceste ecuații sunt exprimate utilizând fluxurile și curenții ca și variabile de stare.

4.4.1. Modelul abc al mașinii de inducție

Ecuțiile primare ale mașinii, având ca ipoteză simplificatoare neglijarea saturației și a pierderilor din miez, conform diagramei din Figura 4.7. sunt următoarele: [3][44]

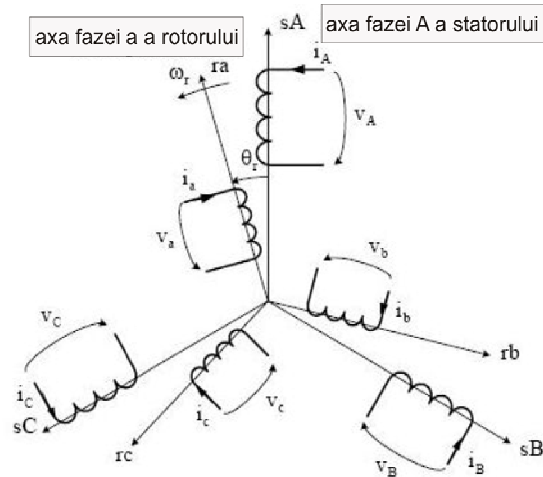


Fig.4.7. Diagrama simplificată a mașinii de inducție cu înfășurare rotorică și statorică

$$[V] = [R] \cdot [I] + \frac{d[\Psi]}{dt} \quad (4.7.)$$

$$[\Psi] = [L] \cdot [I] \quad (4.8.)$$

unde:

- $[V] = [V_A \ V_B \ V_C \ V_a \ V_b \ V_c]^t$ - tensiunile fazelor statorice și rotorice;
- $[I] = [i_A \ i_B \ i_C \ i_a \ i_b \ i_c]^t$ - curenții fazelor statorice și rotorice;
- $[\Psi] = [\varphi_A \ \varphi_B \ \varphi_C \ \varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$ - fluxurile fazelor statorice și rotorice;
- $[R]$ - matricea rezistențelor și $[L]$ - matricea inductanțelor. [1][44]

Înlocuind (4.7.) în (4.8.) se obține modelul de stare de forma:

$$\frac{d[I]}{dt} = [L]^{-1} \cdot \left\{ -[R] - \frac{d[L]}{dt} \right\} \cdot [I] + [L]^{-1} \cdot [V] \quad (4.9.)$$

64 Modelarea matematică a principalelor elemente componente ale AAE - 4.

Majoritatea elementelor din matricea inductanțelor $[L]$ sunt funcții de poziția rotorului θ_r .

Derivata matricii inductanțelor din (4.9.) poate fi scrisă sub forma:

$$\frac{d[L]}{dt} = \frac{d[L]}{d\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d[L]}{d\theta_r} \cdot \omega_r \quad (4.10.)$$

unde ω_r este viteza unghiulară a rotorului.

Grupând (4.9.) și (4.10.) se obține:

$$\frac{d[I]}{dt} = [L]^{-1} \cdot \left\{ -[R] - \omega_r \frac{d[L]}{d\omega_r} \right\} \cdot [I] + [L]^{-1} \cdot [V] \quad (4.11.)$$

care reprezintă *modelul în spațiul stărilor corespunzător ecuațiilor dinamice ale mașinii de inducție.*

Matricea inductanțelor este definită ca:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & -0.5M_s & -0.5M_s & M_{sr}f_1 & M_{sr}f_2 & M_{sr}f_3 \\ -0.5M_s & L_s & -0.5M_s & M_{sr}f_3 & M_{sr}f_1 & M_{sr}f_2 \\ -0.5M_s & -0.5M_s & L_s & M_{sr}f_2 & M_{sr}f_3 & M_{sr}f_1 \\ M_{sr}f_1 & M_{sr}f_3 & M_{sr}f_2 & L_r & -0.5M_r & -0.5M_r \\ M_{sr}f_2 & M_{sr}f_1 & M_{sr}f_3 & -0.5M_r & L_r & -0.5M_r \\ M_{sr}f_3 & M_{sr}f_2 & M_{sr}f_1 & -0.5M_r & -0.5M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (4.12.)$$

unde:

- $L_s = L_{\sigma s} + M_s$ - inductanța statorică;
- $L_r = L_{\sigma r} + 1.5M_r$ - inductanța rotorică;
- $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$ - inductanța pierderilor statorice și rotorice;
- M_s, M_r - inductanța mutuală statorică și rotorică;
- M_{sr} - inductanța mutuală stator-rotor;

Coeficienții f_1, f_2, f_3 sunt:

$$f_1 = \cos \theta_r, \quad f_2 = \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right), \quad f_3 = \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right); \quad (4.13.)$$

În cazul mașini de inducție cu rotorul în scurtcircuit, inductanțele pot fi determinate din teste de laborator, în condiții de mers în gol.

Considerând legătura între parametrii rotorului și ai statorului, inductanța mutuală devine:

4.4. - Modelarea matematica a mașinii de inducție.

$$M_s = M_r = M_{sr} \quad (4.14.)$$

In cazul în care se consideră ipoteza că înfășurările motorului formează un sistem simetric și:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad \text{și} \quad i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4.15.)$$

matricea inductanțelor [L] poate fi rescrisă sub forma:

$$[L] = \begin{bmatrix} L'_s & 0 & 0 & M_{sr}f_1 & M_{sr}f_2 & M_{sr}f_3 \\ 0 & L'_s & 0 & M_{sr}f_3 & M_{sr}f_1 & M_{sr}f_2 \\ 0 & 0 & L'_s & M_{sr}f_2 & M_{sr}f_3 & M_{sr}f_1 \\ M_{sr}f_1 & M_{sr}f_3 & M_{sr}f_2 & L'_r & 0 & 0 \\ M_{sr}f_2 & M_{sr}f_1 & M_{sr}f_3 & 0 & L'_r & 0 \\ M_{sr}f_3 & M_{sr}f_2 & M_{sr}f_1 & 0 & 0 & L'_r \end{bmatrix} \quad (4.16.)$$

unde:

$$L'_s = L_{\sigma s} + 1.5M_s$$

$$L'_r = L_{\sigma r} + 1.5M_s$$

Din (4.16) rezultă:

$$\frac{d[L]}{d\theta_r} = -M_{sr} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & g_1 & g_2 & g_3 \\ 0 & 0 & 0 & g_3 & g_1 & g_2 \\ 0 & 0 & 0 & g_2 & g_3 & g_1 \\ g_1 & g_3 & g_2 & 0 & 0 & 0 \\ g_2 & g_1 & g_3 & 0 & 0 & 0 \\ g_3 & g_2 & g_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

unde:

$$g_1 = \sin \theta_r$$

$$g_2 = \sin \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (4.18)$$

$$g_3 = \sin \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right)$$

Pornind de la forma generală (4.16.), inversa matricii inductanței poate fi scrisă:

$$[L]^{-1} = [B] = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Utilizând un mediu software, cu facilități de calcul simbolic (Matlab, Maple sau Mathcad), coeficienții din (4.19) pot fi determinați ușor.[44]

Inițial se calculează coeficienți:

$$K_1 = \frac{L_s L_r}{M_{sr}^2} \quad K_2 = \frac{K_1 - \frac{3}{4}}{K_1 - \frac{9}{4}} \quad K_3 = \frac{-\frac{3}{4}}{K_1 - \frac{9}{4}} \quad K_4 = \frac{-\frac{1}{M_{sr}^2}}{K_1 - \frac{9}{4}} \quad (4.20.)$$

și ulterior toate celelalte elemente ale matricii B:

$$\begin{aligned} b_{11} &= b_{22} = b_{33} = \frac{K_2}{L_s} \\ b_{44} &= b_{55} = b_{66} = \frac{K_2}{L_r} \\ b_{12} &= b_{13} = b_{21} = b_{23} = b_{31} = b_{32} = \frac{K_3}{L_s} \\ b_{45} &= b_{46} = b_{54} = b_{56} = b_{64} = b_{65} = \frac{K_3}{L_r} \\ b_{14} &= b_{25} = b_{36} = b_{41} = b_{52} = b_{63} = K_4 f_1 \\ b_{15} &= b_{26} = b_{34} = b_{43} = b_{51} = b_{62} = K_4 f_2 \\ b_{16} &= b_{24} = b_{35} = b_{42} = b_{53} = b_{61} = K_4 f_3 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Cuplul electromagnetic poate fi obținut pornind de la ecuațiile tensiunii, utilizând curenții ca variabile de stare:

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}([L][I]) = [R][I] + \frac{d[L]}{dt}[I] + [L]\frac{d[I]}{dt} \quad (4.22.)$$

4.4. - Modelarea matematica a mașinii de inducție.

și înmulțind cu transpusa matricii curenților se obține:

$$[I]^t [V] = [I]^t [R][I] + [I]^t \left(\frac{d}{dt} [\psi] \right) = [I]^t [R][I] + [I]^t \frac{d[L]}{dt} [I] + [I]^t [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (4.23)$$

Folosind:

$$\frac{d[L]}{dt} = \frac{d[L]}{d\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d[L]}{d\theta_r} \cdot \omega_r,$$

unde ω_r este viteza unghiulară a rotorului, rezultă:

$$[I]^t [V] = [I]^t [R][I] + \omega_r [I]^t \frac{d[L]}{d\theta_r} [I] + [I]^t [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (4.24)$$

Termenii din (4.24.) au următoarele semnificații:

- $P_i = [I]^t [V]$ - puterea instantanee;
- $P_{cupru} = [I]^t [R][I]$ - pierderile în cupru din înfășurările mașinii;
- $P_{mag} = [I]^t [L] \frac{d[I]}{dt}$ - puterea magnetică a mașinii;
- $P_m = \omega_r [I]^t \frac{d[L]}{d\theta_r} [I]$ - puterea mecanică.

Cuplul electromagnetic devine:

$$T_e = \frac{P_m}{\Omega_r} = p \frac{P_m}{\omega_r} = p [I]^t \frac{d[L]}{d\theta_r} [I] \quad (4.25)$$

unde:

- p este numărul de perechi de poli
- Ω_r este viteza de rotație a rotorului.

Înlocuind (4.17) în (4.25), cuplul electromagnetic, în funcție de curenți, devine:

$$T_e = -pM_{sr} \left\{ (i_A i_a + i_B i_b + i_C i_c) \sin \theta + (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a) \sin(\theta + 2\pi/3) + (i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) \sin(\theta - 2\pi/3) \right\} \quad (4.26)$$

În baza relațiilor (4.11.) și (4.26), modelul dinamic al mașinii de inducție a fost implementat în mediul Matlab/Simulink, model prezentat în Fig. 4.8.

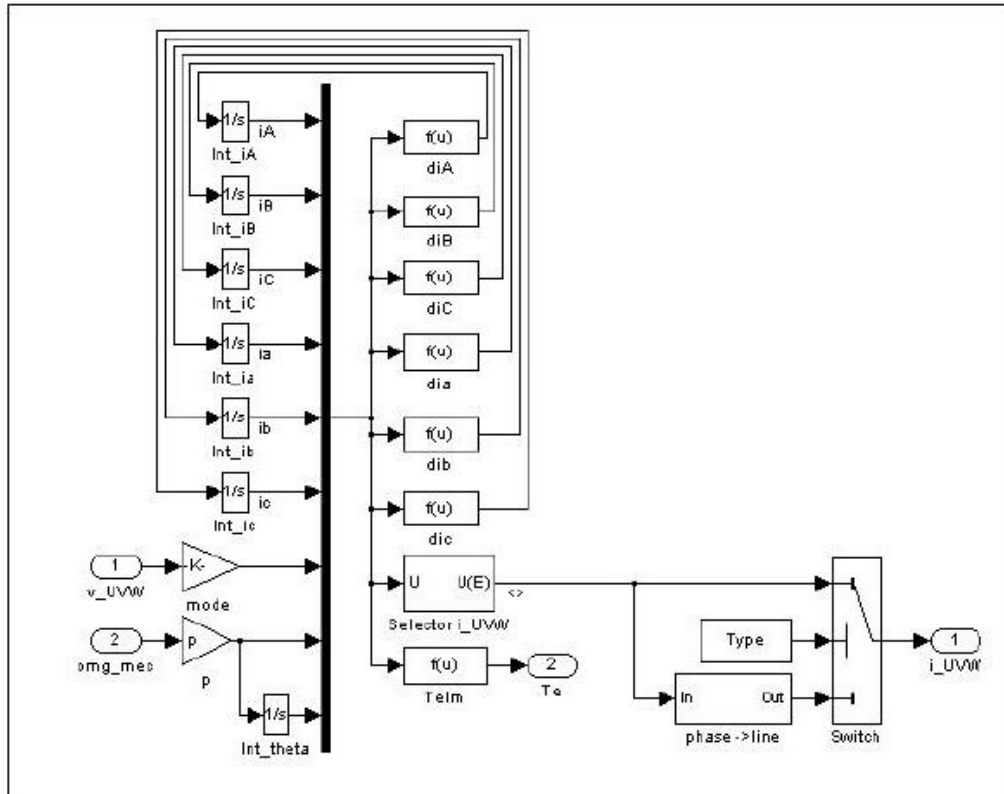


Fig. 4.8. Implementarea Simulink a modelului abc pentru mașina de inducție în rotorul în scurtcircuit

Interfața măștii pentru modelul dezvoltat elaborat cuprinde următorii parametri de configurare: rezistența și inductanța înfășurările statorului și rotorului, inductanța magnetică, numărul de perechi de poli și condițiile inițiale pentru variabilele de stare (curenții și unghiul electric al rotorului). De asemenea se pot prestabili atât modul de operare (motor sau generator), cât și tipul conexiunii pentru înfășurările statorice, stea sau delta.

4.4.2. Modelul mașinii de inducție bifazate virtuale în sistemul de referință dq0

Inductanțele mașinii sunt funcție de poziția unghiulară a rotorului, iar coeficienții ecuațiilor de stare (ecuațiile tensiunii), care descriu comportarea mașinii de inducție, sunt funcții de timp (cu excepția cazului când rotorul este în repaus).

4.4. - Modelarea matematica a mașinii de inducție.

Astfel devine necesară schimbarea variabilelor pentru a reduce complexitatea ecuațiilor de stare, utilizându-se un nou sistem de referință. În acest sistem de referință, mașina reală este înlocuită cu o mașină virtuală bifazată echivalentă, conform celor prezentate în Fig. 4.9. [44]

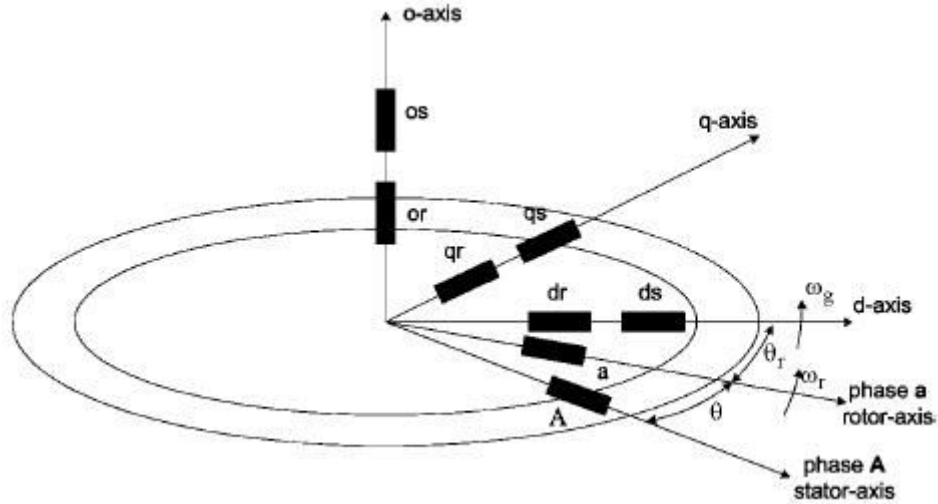


Fig. 4.9. Înfășurările mașinii de inducție în sistemul de referință arbitrar d-q

Pe baza relației (4.7.) și utilizând transformarea generală, ecuațiile tensiunii în sistemul de referință arbitrar pot fi scrise astfel:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{so} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \\ v_{ro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & & & & & \\ & R_s & & & & \\ & & R_s & & & \\ & & & R_r & & \\ & & & & R_r & \\ & & & & & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{so} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{ro} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{so} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{ro} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(\omega_g - \omega_r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\omega_g - \omega_r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{so} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{ro} \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

unde: ω_r este viteza unghiulară a mașinii și ω_g este viteza sistemului de referință general.

Forma compactă a relației (4.27) este:

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}[\psi] + [\Omega][\psi] \quad (4.28)$$

Relația dintre fluxul mutual și curenți este dată de:

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{so} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{ro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{\sigma s} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{\sigma r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{so} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{ro} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

sau în formă compactă:

$$[\psi] = [L][I] \quad (4.30.)$$

unde:

$L_m = \frac{3}{2} M_{sr}$ este inductanța mutuală în sistemul de referință general;

$L_s = L_{\sigma s} + L_m$ este inductanța statorică;

$L_r = L_{\sigma r} + L_m$ este inductanța rotorică.

Dacă se consideră fluxurile ca variabile de stare, curenții pot fi exprimați sub formă compactă prin relația:

$$[I] = [L]^{-1}[\Psi] \quad (4.31.)$$

Inversa matricii inductanței este:

$$[L]^{-1} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 & -L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_{\sigma r}} & 0 & 0 & 0 \\ -L_m & 0 & 0 & L_s & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{L_{\sigma s}} \end{bmatrix} \quad (4.32.)$$

unde: $D = L_s L_r - L_m^2$.

4.4. - Modelarea matematica a mașinii de inducție.

Pornind de la (4.27) se ajunge la modelul de stare de forma:

$$\frac{d}{dt}[\psi] = -[R][L]^{-1}[\psi] + [V] \quad (4.33)$$

sau sub formă extinsă:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{so} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{ro} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{R_s L_r}{D} & -\omega_g & 0 & -\frac{R_s L_m}{D} & 0 & 0 \\ \omega_g & \frac{R_s L_r}{D} & 0 & 0 & -\frac{R_s L_m}{D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_s r}{L_\infty} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{R_r L_m}{D} & 0 & 0 & \frac{R_r L_s}{D} & -(\omega_g - \omega_r) & 0 \\ 0 & -\frac{R_r L_m}{D} & 0 & (\omega_g - \omega_r) & \frac{R_r L_s}{D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_r}{L_\sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{so} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{ro} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{so} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \\ v_{ro} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Dacă se consideră curenții ca variabile de stare, fluxurile se înlocuiesc pe baza relației (4.29.). Considerând că toți parametrii sunt constanți neglijând saturația, relația (4.33) devine:

$$\frac{d[I]}{dt} = -([L]^{-1}[R] + [L]^{-1}[\Omega][L])[I] + [L]^{-1}[V] \quad (4.35)$$

Astfel, utilizând curenții ca și variabile de stare se ajunge pentru modelul de stare la:

$$\frac{d[I]}{dt} = [A][I] + [B][V] \quad (4.36)$$

unde matricile A și B au următoarea formă:

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_r}{D} + \frac{L_s L_r}{D} \omega_g - \frac{L_m^2}{D} (\omega_g - \omega_r) & 0 & \frac{R_s L_m}{D} & \frac{L_r L_m}{D} \omega_g & 0 \\ -\frac{L_s L_r}{D} \omega_g + \frac{L_m^2}{D} (\omega_g - \omega_r) & -\frac{R_s L_r}{D} & 0 & -\frac{L_r L_m}{D} \omega_g & \frac{R_s L_m}{D} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s D}{L_\infty} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{R_s L_m}{D} & -\frac{L_s L_m}{D} \omega_g & 0 & -\frac{R_r L_s}{D} & -\frac{L_m^2}{D} \omega_g + \frac{L_s L_r}{D} (\omega_g - \omega_r) & 0 \\ \frac{L_s L_m}{D} \omega_g & \frac{R_s L_m}{D} & 0 & \frac{L_m^2}{D} \omega_g - \frac{L_s L_r}{D} (\omega_g - \omega_r) & -\frac{R_r L_s}{D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{R_r D}{L_\sigma} \end{bmatrix}$$

$$[B] = [L]^{-1} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 & -L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{L_{\sigma r}} & 0 & 0 & 0 \\ -L_m & 0 & 0 & L_s & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{L_{\sigma s}} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Cuplul electromagnetic se obține pornind de la relația (4.35) multiplicând-o la stânga cu transpusa vectorului curenților:

$$[I]^t [V] = [I]^t [R][I] + [I]^t \frac{d[\Psi]}{dt} + [I]^t [\Omega][\Psi] \quad (4.38)$$

unde:

- $P_i = [I]^t [V]$ - puterea instantanee;
- $P_{Cupru} = [I]^t [R][I]$ - pierderile din cupru din înfășurările mașinii;
- $P_{mag} = [I]^t \frac{d[\Psi]}{dt}$ - puterea magnetică;
- $P_m = [I]^t [\Omega][\Psi]$ - puterea mecanică.

Cuplul electromagnetic devine:

$$T_e = \frac{P_m}{\Omega_r} = p \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{3}{2} p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}) \quad (4.39)$$

unde:

- p - numărul de perechi de poli;
- Ω_r - viteza (mecanică) a rotorului.

Alte expresii echivalente pentru cuplul electromagnetic a mașinii de inducție sunt:

- $T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_{rd} i_{rq} - \Psi_{rd} i_{rq})$
- $T_e = \frac{3}{2} p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq})$ (4.40)
- $T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{D} (\Psi_{sd} \Psi_{rd} - \Psi_{sd} \Psi_{rq})$

4.4.3. Reducerea ordinului modelului matematic.

Pentru operarea în regim staționar, variabilele în sistemul de referință sincron sunt constante. Prin urmare, tranzițiile electrice ale statorului pot fi neglijate prin egalarea cu zero a derivatei fluxului statorului în axele dq, astfel:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\Psi}_{sd} \\ \dot{\Psi}_{sq} \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_s L_{rr}}{D} & -\omega_e & \frac{R_s L_m}{D} & 0 \\ \omega_e & \frac{R_s L_{rr}}{D} & 0 & -\frac{R_s L_m}{D} \\ -\frac{R_r L_m}{D} & 0 & \frac{R_r L_{ss}}{D} & -(\omega_e - \omega_r) \\ 0 & -\frac{R_r L_m}{D} & (\omega_e - \omega_r) & \frac{R_r L_{ss}}{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} \quad (4.41.)$$

Pentru a se evita posibile probleme de calcul (datorate buclor algebrice), relația (4.40) trebuie scrisă sub forma ecuațiilor de stare a fluxurilor rotorului:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Psi}_{rd} \\ \dot{\Psi}_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\alpha \tau_{rm} \sigma_r - \frac{\tau_{rm}}{\sigma_s} \right) & \left(\left(\frac{\alpha \tau_{rm}}{\tau_{sr}} L_m + 1 \right) \omega_e - \omega_r \right) \\ - \left(\left(\frac{\alpha \tau_{rm}}{\tau_{sr}} L_m + 1 \right) \omega_e - \omega_r \right) & \left(\alpha \tau_{rm} \sigma_r - \frac{\tau_{rm}}{\sigma_s} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\alpha \tau_{rm}}{\tau_{sr}} & \frac{\alpha \tau_{rm}}{\tau_{sr}^2} & 1 & 0 \\ -\frac{\alpha \tau_{rm}}{\tau_{sr}^2} & \frac{\alpha \tau_{rm}}{\tau_{sr}} & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{rd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (4.42.)$$

unde:

$$\tau_{sr} = \frac{R_s L_{rr}}{D}, \quad \tau_{rm} = \frac{R_r L_m}{D}, \quad \sigma_r = \frac{L_m}{L_{rr}}, \quad \sigma_s = \frac{L_m}{L_{ss}}, \quad \alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega_e}{\tau_{sr}} \right)^2}.$$

Pe baza fluxurilor rotorului și a tensiunilor de intrare, fluxurile statorului pot fii obținute folosind:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \sigma_r & \frac{\alpha}{\tau_{sr}} L_m \omega_e \\ -\frac{\alpha}{\tau_{sr}} L_m \omega_e & \alpha \sigma_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{\tau_{sr}} & \frac{\alpha}{\tau_{sr}^2} \omega_e \\ -\frac{\alpha}{\tau_{sr}^2} \omega_e & \frac{\alpha}{\tau_{sr}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Corespunzător, cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$T_e = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_m}{D} (\psi_{sq} \cdot \psi_{rd} - \psi_{rq} \cdot \psi_{sd}) \quad (4.44)$$

Modelul de ordin 4, redus care neglijează tranzițiile din stator, poate fi obținut din modelul de ordin complet dat de relația (4.34), scrisă în sistemul de referință sincron, utilizând Control System Toolbox din Matlab. Modelul Simulink pentru mașina de inducție se bazează pe relațiile (4.43)-(4.44) și este prezentat în Fig 4.10.

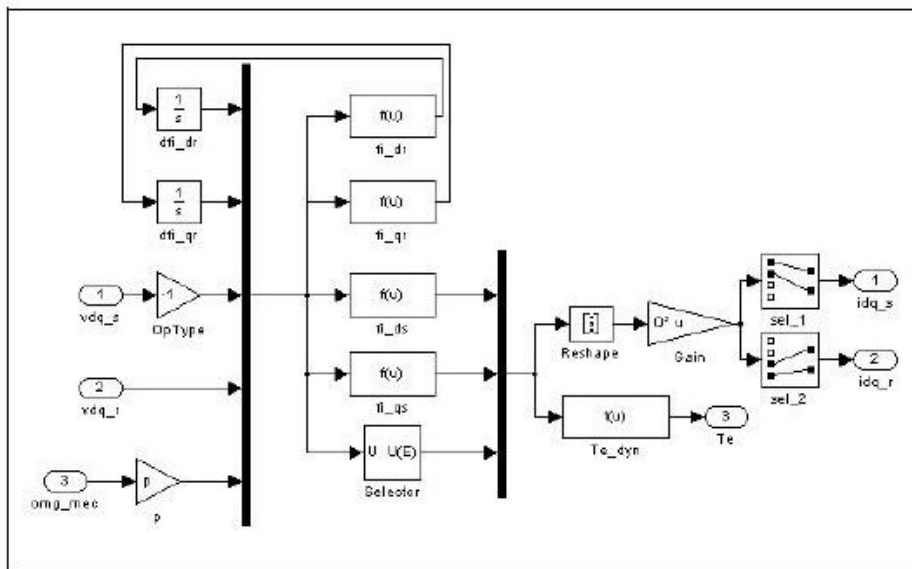


Fig. 4.10. Implementarea Simulink a modelului de ordin redus (4) al mașinii de inducție.

Interfața măștii pentru acest model are aceeași structură ca în cazul modelului abc, diferența constând în condițiile inițiale pentru variabilele de stare, care sunt în acest caz, fluxurile.

4.4.4. Modelarea mașinii de inducție cu considerarea saturației magnetice.

Ecuatiile fluxului conțin termenii dependenți de saturația magnetică și prin urmare introduc neliniarități. Se consideră că saturația fluxurilor de scăpări într-o mașină de inducție de putere mare pot fi neglijate, și deci, inductanțele pierderilor din stator și rotor sunt constante. [44]

Inductanța magnetică este o funcție de curentul de magnetizare, așa cum arată în Fig. 4.11.

4.4. - Modelarea matematica a mașinii de inducție.

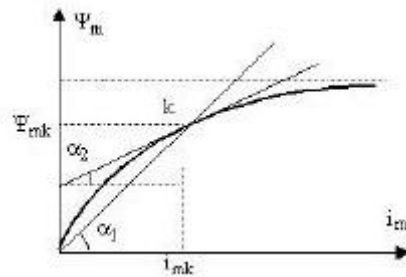


Fig. 4.11. Dependenta fluxului de magnetizare de curentul de magnetizare.

Presupunând că mașina prezintă simetrie cilindrică magnetică, electrică și geometrică, saturația magnetică cauzată de câmpul magnetic principal este independentă de direcția acestui câmp și depinde doar de valoarea lui absolută.

Fluxul magnetic poate fi scris în acest caz:

$$\frac{d}{dt}(\Psi_m) = \frac{d}{dt}(L_m \cdot i_m) = \frac{d(L_m \cdot i_m)}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt} \quad (4.45)$$

Curentul de magnetizare este dependent de sistemul de referință. Pe baza curbei de magnetizare din Fig. 4.11, rezultă:

$$L_m = \frac{\Psi_m}{i_m} = \operatorname{tg} \alpha_1 = f_1(i_m) \quad (4.46)$$

$$L_d = \frac{d(L_m \cdot i_m)}{di_m} = \frac{d\Psi_m}{di_m} = \operatorname{tg} \alpha_2 = f_2(i_m) \quad (4.47)$$

unde L_m este inductanța magnetică și L_d este inductanța dinamică.

Fig 4.12 prezintă dependențe tipice ale inductanțelor considerate în funcție de curentul de magnetizare.

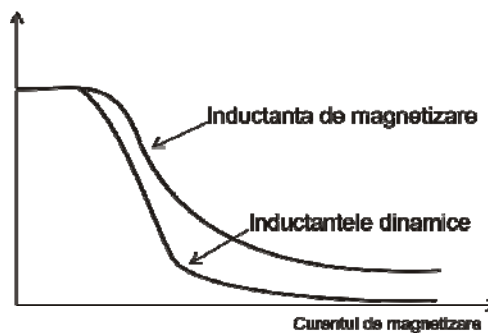


Fig. 4.12. Inductanța magnetică și dinamică în funcție de curentul de magnetizare

Pe baza curbei de mers în gol pentru mașina de inducție, inductanțele considerate pot fi determinate ca funcție de curentul de mers în gol.

Utilizând o aproximare matematică, de exemplu o funcție sau un tabel de căutare, pot fi determinate valorile dorite pentru aceste inductanțe pentru un curent dat.

Luând în considerare cele menționate mai sus, ecuațiile tensiunii mașinii de inducție, în sistem de referință general incluzând saturația căii principale, pot fi scrise:

$$\begin{aligned}\bar{v}_s &= R_s \bar{i}_s + L_{\sigma s} \frac{d}{dt}(\bar{i}_s) + L_d \frac{d\bar{i}_m}{dt} + j\omega_g (L_{\sigma s} \bar{i}_s + L_m \bar{i}_m) \\ \bar{v}_r &= R_r \bar{i}_r + L_{\sigma r} \frac{d}{dt}(\bar{i}_r) + L_d \frac{d\bar{i}_m}{dt} + j(\omega_g - \omega_r)(L_{\sigma r} \bar{i}_r + L_m \bar{i}_m) \\ \bar{i}_m &= \bar{i}_s + \bar{i}_r \\ L_m &= f_1(|\bar{i}_m|) \\ L_d &= f_2(|\bar{i}_m|)\end{aligned}\quad (4.48)$$

4.5 Modele matematice al mașinii sincrone cu magneți permanenți

4.5.1. Modelul matematic al mașinii sincrone cu magneți permanenți bifazate virtuale în sistemul de referință dq0.

Ecuția vectorială a tensiunii statorice în referențialul $\alpha\beta$ este:

$$\lambda_{\text{stator}} = \mathbf{u}_{\text{stator}} - R \mathbf{i}_{\text{stator}} \quad (4.49)$$

unde

- R este rezistența unei faze statorice.
- \mathbf{u} este vectorul tensiune statoric
- \mathbf{i} este vectorul curent statoric

Pentru a scrie ecuația vectorială a tensiunii pentru rotor, se alege un referențial comun pentru stator și rotor. Fie acesta un sistem care se rotește față de stator cu o turație oarecare (la alegere) ω_b constantă, sau variabilă în timp.

Ecuțiile vectoriale ale tensiunilor statorice \mathbf{u} și rotorice \mathbf{u}_r în acest referențial rotitor, devin:

$$\lambda_s^\circ = -j \omega_b \lambda_s + u_s - R_s i_s, \quad \lambda_s(0) = \lambda_{s0} \quad (4.50)$$

4.5 - Modele matematice al mașinii sincrone cu magneți permanenți

$$\lambda r^\circ = -j (\omega b - \omega r) \lambda r + u r - R_r i r, \quad \lambda r(0) = \lambda r_0 \quad (4.51)$$

unde: i , u și λ sunt vectorii curent, tensiune și flux statoric, ω_r - turația electrică a rotorului, R_r - rezistența echivalentă rotorică, iar i_r , u_r și λ_r sunt, respectiv, vectorii curent, tensiune și flux rotoric.

Prin proiecția vectorilor din relațiile (4.50), (4.51) pe cele două axe ortogonale ale referențialului ales, se obține o echivalare a mașinii m-fazate cu o mașină bifazată.

Pentru anumite valori ω_b rezultă următoarele referențiale particulare:

$\omega_b = 0$ - referențial $\alpha\beta$ sau abc , fix față de stator;

$\omega_b = \omega_r$ - referențial dq , fix față de rotor;

$\omega_b = \omega$ - referențial sincron, unde ω este pulsația curenților statorici.

La mașini sincrone $\omega_r = \omega$, caz în care modelul dq se identifică cu modelul Park. [27]

Modelul mașinii sincrone cu magneți permanenți (MSMP) bifazate virtuale (modelul bifazat), în referențialul ortogonal dq fix față de rotor, cu axa reală d de-a lungul fluxului magnetului permanent λ_0 , este prezentat în Fig. 4.13. [27]

Înfășurările statorice a , b , c s-au înlocuit cu înfășurări echivalente d și q , plasate pe axele d , q . Colivia de amortizare din rotor, existentă în unele variante constructive, s-a înlocuit cu două înfășurări echivalente D și Q , plasate respectiv pe axele d , q .

Magnetul permanent (MP) din rotor se poate înlocui printr-o înfășurare echivalentă supraconductoare E plasată pe axa d , înfășurare a cărei curent echivalent I_e este constant, indiferent de regimul de funcționare și deci fluxul MP este $\lambda_0 = L_e I_e$. [And99]

Componentele ecuațiilor vectoriale ale tensiunilor în referențialul dq , pentru $\omega_b = \omega_r = \omega$, se obțin prin proiectarea relațiilor (4.50), (4.51) pe axele d , q , rezultând:

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_d \\ \dot{\lambda}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - R_s \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \lambda_d(0) \\ \lambda_q(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{d0} \\ \lambda_{q0} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_D \\ \dot{\lambda}_Q \end{bmatrix} = -R_r \cdot \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \lambda_D(0) \\ \lambda_Q(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{D0} \\ \lambda_{Q0} \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

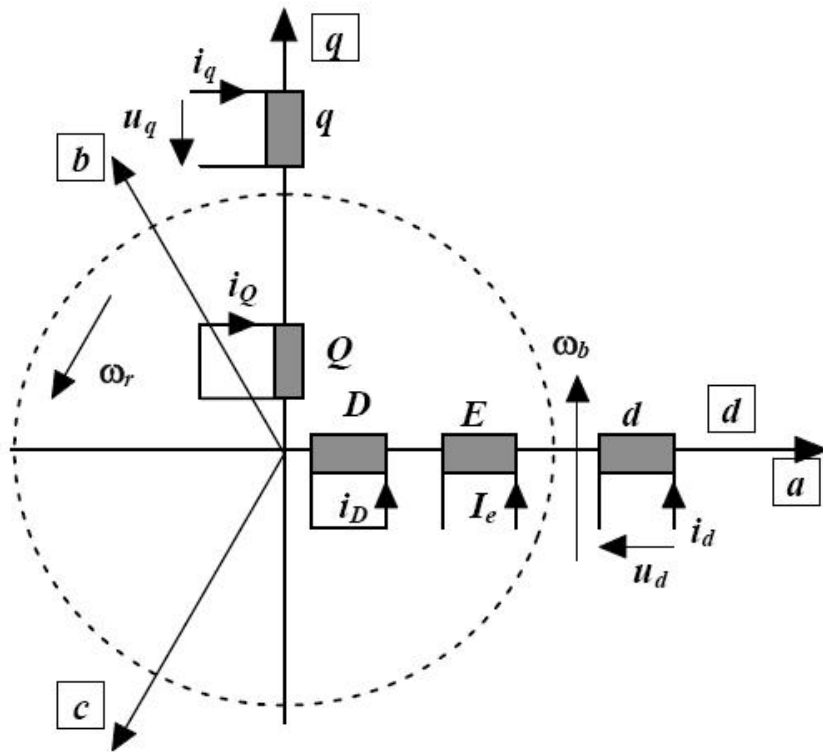


Fig 4.13. Modelul bifazat al MSMP în referențialul dq0

- $u(u_d, u_q)$, $i(i_d, i_q)$, $\lambda(\lambda_d, \lambda_q)$ sunt vectorii tensiune, curent și flux statoric având componentele d, q ;
- $i_r(i_D, i_Q)$, $\lambda_r(\lambda_D, \lambda_Q)$ sunt vectorii curent și flux rotoric, având componentele D, Q ;

În ecuațiile (4.52) și (4.53) nu s-au luat în considerare pierderile în fier. Considerarea acestora impune adăugarea unor înfășurări (și deci ecuații) după fiecare axă în stator, și în consecință ordinul modelului crește cu doi.

În relațiile (4.52) - (4.53) nu apar explicit inductanțele, deci aceste relații au avantajul că înglobează, sub această formă, fenomenul de saturație magnetică. [27]

4.5.2. Modelul matematic al mașinii sincrone cu magneti permanenți în referențialul rotor

Relații între fluxuri și curenți

Având în vedere că axele magnetice ale mașinii bifazate echivalente în referențialul dq sunt ortogonale, rezultă:

$$\lambda_d = L_d i_d + L_{dD} i_D + \lambda_0 \quad \lambda_q = L_q i_q + L_{qQ} i_Q \quad (4.54)$$

$$\lambda_D = L_D i_D + 3/2 L_{Dd} i_d + \lambda_0 \quad \lambda_Q = L_Q i_Q + 3/2 L_{Qq} i_q \quad (4.55)$$

unde:

L_d, L_q - inductanțe sincrone, longitudinală și respectiv transversală;

L_D, L_Q - inductanțe proprii ale înfășurărilor D, Q ;

L_{dD}, L_{qQ} - inductanțe de cuplaj mutual.

Aceste inductanțe sunt independente de poziția rotorului și, în absența saturației magnetice, ele sunt independente și de curenți, deci sunt constante. [27]

Cuplul electromagnetic

Cuplul electromagnetic momentan T_e , în orice referențial, este dat de interacțiunea dintre vectorul flux și vectorul curent:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \text{Im}(\lambda \cdot i) \quad (4.56)$$

unde: λ^* - mărimea conjugată a vectorului flux, i - vectorul curentului, p - număr de perechi de poli și Im - operatorul părții imaginare.

În particular, în referențialul dq, respectiv $\alpha\beta$, T_e are expresia [27]:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\lambda_d \cdot i_q - \lambda_q \cdot i_d) \quad (4.57)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\lambda_\alpha \cdot i_\beta - \lambda_\beta \cdot i_\alpha) \quad (4.58)$$

Modelul matematic al subsistemului mecanic

Se consideră motorul de antrenare cuplat rigid cu mașina electrică, având un moment de inerție echivalent, redus la arborele mașinii, J - constant.

Ecuția de mișcării este caracterizată de legea a doua a dinamicii corpului solid în mișcare de rotație, cu T_r - cuplul total de sarcină:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ p/J \end{bmatrix} \cdot T_e + \begin{bmatrix} 0 \\ -p/J \end{bmatrix} \cdot T_r, \quad \begin{bmatrix} \theta(0) \\ \omega(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \omega_0 \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

$$\omega = p\Omega$$

unde:

T_r - cuplul total de sarcină

Ω - viteza unghiulară (mecanică) a rotorului.

Modelul Matlab/Simulink este redat în Fig. 4.14.

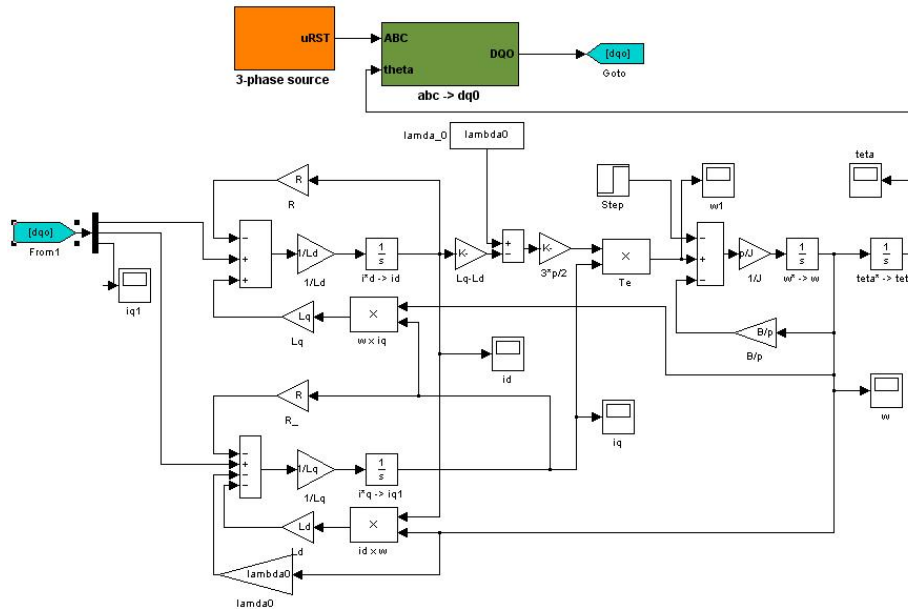


Fig. 4.14. Modelul matematic al mașinii sincrone cu magneti permanenți, implementare în Simulink

4.6. Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, conectat la o rețea de putere finită

4.6.1. Preliminarii

Acest subcapitol își propune ca obiective următoarele:

- determinarea modelului matematic al generatorului de inducție cu două înfășurări statorice separate;
- determinarea unui model al ansamblului generator – rețea de putere finită;
- validarea, prin simulare numerică, a modelului matematic determinat pentru mașina de inducție de construcție specială, cu două înfășurări statorice;
- validarea, prin simulare numerică a modelului liniarizat de ordinul 7 și respectiv, a unui model liniarizat de ordinul redus (de ordin 4), modele utilizabile pentru studierea și analiza unor structuri de comandă a excitației generatorului considerat.

Se preconizează că structurile analizate și propuse pot avea ca și efect simplificarea conducerii generatoarelor de inducție (asincrone) și implicit a agregatelor aeroelectrice echipate cu acestea, și în consecință a reducerii costurilor de implementare.

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

Mărimile de baza care intervin în conducerea agregatelor aeroelectrice sunt viteza vântului (pentru sistemul mecanic – turbina) și respectiv cuplul turbinei (mărimile de intrare pentru generator).

Generatorul de inducție (asincron) reprezintă un echipament de bază al agregatelor aeroelectrice conectate la sistemele energetice. Datorită rolului său activ în cadrul sistemului energetic (furnizarea de energie electrică, modificarea tensiunii și transferul de putere activă și reactivă), conducerea automată a generatorului de inducție prezintă un interes deosebit pentru proiectanții și inginerii care lucrează în domeniul automatizărilor industriale.

În prezent, ecuațiile de funcționare ale mașinilor electrice (atât a celor de inducție cât și a celor sincrone) se bazează aproape exclusiv pe teoria celor două axe (d,q), introduse de Park-Kron.[45][46][47] Datorită faptului că această teorie a fost preluată simultan de școli diferite de cercetare, există în prezent un număr mare de forme de exprimare a acestor ecuații. Deosebirile esențiale care se remarcă între diferitele forme de exprimare a ecuațiilor, se referă la asocierea sensurilor pozitive ale curentului și tensiunii la bornele înfășurărilor, la modul de scriere a legii inducției electromagnetice, la alegerea poziției relative a celor două axe de simetrie rotorică, la alegerea coeficienților din matricile de transformare, la alegerea mărimilor de bază, etc.

Ecuațiile mașinii de inducție trebuie să descrie fenomenele esențiale din mașină. În acest scop se acceptă anumite simplificări față de caracteristicile și fenomenele din mașina reală, simplificări care scot în evidență, în primul rând, mărimile care reliefează fenomenele energetice esențiale, specifice mașinii de inducție.

Considerând, ecuațiile primare ale generatorului de inducție, sunt necesare următoarele etape inițiale în vederea obținerii pe cale analitică a unui model matematic al generatorului de inducție [48][49]:

- Transformarea variabilelor din sistemul de coordonate al fazelor, raportat la stator (a, b, c), în sistemul de coordonate d,q;
- Raportarea mărimilor rotorice la stator (reducerea mărimilor din mașina de inducție la nivelul mărimilor statorice);
- Exprimarea tuturor variabilelor în unități relative și corespunzător trecerea la un sistem de ecuații în unități relative.

Aceste etape conduc la un sistem de ecuații cunoscut în literatura de specialitate sub denumirea de ecuațiile lui Park-Kron, constituindu-se ca punct de pornire în construcția analitică a modelului matematic al generatorului de inducție cu două înfășurări statorice.

Identificarea analitică a unui model matematic al generatorului de inducție care să descrie cât mai precis, dar succint, dinamica și fenomenologia esențială a procesului, presupune luarea în calcul și a câtorva *ipoteze simplificatoare*:

- neglijarea efectului saturației magnetice a mașinii;
- neglijarea pierderilor de curent datorate fluxurilor mutuale statorice;
- neglijarea pierderilor datorate fluxurilor mutuale;
- neglijarea histerezei.

Saturația magnetică este un fenomen complex, care conduce la modele matematice cu parametri variabili în timp. În prezenta saturației, inductanțele depind de curenți și, în plus, apar cuplaje magnetice suplimentare între circuitele electrice de pe cele două axe ortogonale (dq). Principial, evitarea degradării

performanțelor datorită saturației circuitelor magnetice se poate evita prin limitarea curenților din cadrul mașinii electrice prin intermediul sistemelor de conducere. În majoritatea cazurilor, în literatura de specialitate, [50] modelele matematice ale mașinilor electrice de inducție neglijează efectele fenomenului de saturație magnetică.

Implementarea unor strategii de conducere a excitației generatorului considerat impune, pentru faza preliminară de testare, determinarea unor modele matematice complexe ale procesului.

Obținerea analitică a unor asemenea modele matematice neliniare ale generatorului de inducție (asincron), cât mai complete din punct de vedere informațional, constituie unul dintre obiectivele principale al prezentului subcapitol, ele permițând simularea unor multitudini de regimuri și condiții de funcționare ale procesului (încărcare/descărcare de putere activă/reactivă, cuplare/decuplare de consumatori locali rezistivi/reactivi, efectul cuplării la un sistem energetic de putere, etc).

4.6.2. Modelarea unui generator de inducție cu două înfășurări statorice, conectat la o rețea de putere limitată printr-o linie de transmisie.

Se consideră cazul unui generator de inducție (GI), cuplat la un sistem energetic de putere limitată (SEPL), printr-o linie lungă de transmisie (caracterizată printr-o impedanță Z).

Față de situația generatoarelor funcționând în regim insularizat, cuplarea generatorului la un sistem energetic de putere limitată conduce la anumite caracteristici specifice unui astfel de ansamblu (GI+SEPL). În principal, o astfel de cuplare presupune existența în sistem a unei tensiuni constante v_b a SEPL. Un astfel de nod energetic de potențial constant, exercită o influență majoră asupra întregului proces de funcționare a GI conectat, și deci, implicit asupra mărimii reglate (tensiunea v_t de la bornele GI) (Fig. 3.25). Un astfel de SEPL este întâlnit în literatura de specialitate și sub denumirea de sistem de putere finită sau limitată. [51][52][53]

Structura considerată - generator de inducție (GI) conectat la un sistem de putere printr-o linie lungă de transmisie, poate fi completată prin adăugarea unui consumator local, cuplat la bornele generatorului. Situația este în deplina concordanță cu realitatea practică, mare parte din echipamentele și dispozitivele anexe mașinii de inducție (care asigură anumite funcții conexe dar absolut necesare unei funcționări în condiții normale a agregatului aeroelectric) sau chiar unii consumatori industriali, apropiați AAE, sunt alimentați direct de la bornele generatorului.

Fig. 4.15. prezintă schematic modul de conectare a generatorului de inducție la un sistem energetic de putere limitată, printr-o linie de transmisie, având și un consumator local legat la borne.

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

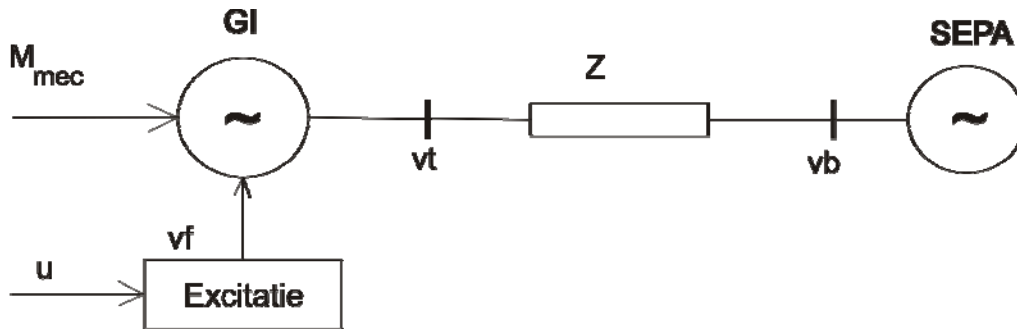


Fig 4.15. Generator de inducție cu două înfășurări statorice conectat la un sistem energetic de putere limitată printr-o linie lungă de transmisie.

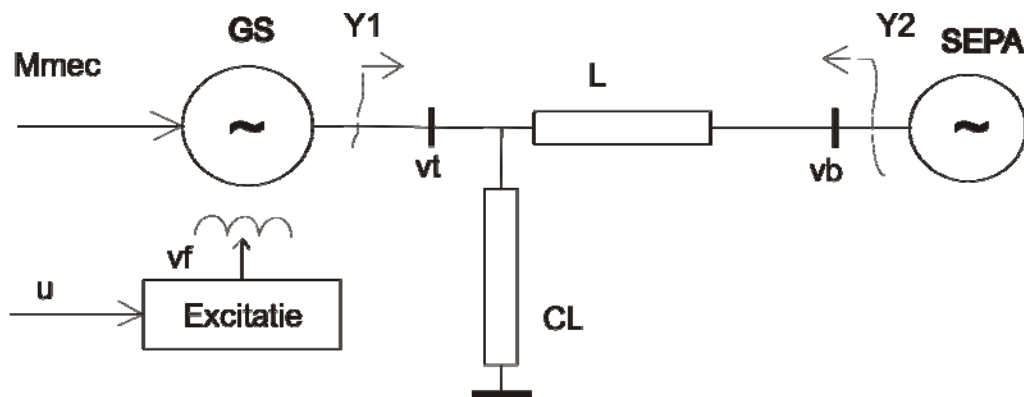


Fig 4.16. Generator de inducție cu două înfășurări statorice conectat la un sistem energetic de putere finită printr-o linie lungă de transmisie, având și un consumator local legat la borne.

Notățiile din Fig 4.15 și Fig. 4.16 au următoarele semnificații: - GI - generator de inducție, SEPL - sistem energetic de putere finită, Z- impedența liniei de transmisie, M_{mec} - cuplul mecanic de antrenare a generatorului, v_b - tensiunea sistemului (bar voltage), v_t - tensiunea la bornele generatorului (terminalele) (terminal voltage), v_f - tensiunea de excitație, u - comanda excitației, L - linia de transmisie, CL - consumator local, Y1 - admitanța proprie a rețelei văzută la bornele GI, Y2 - admitanța de transfer a ansamblului GI-SEPL. [54]

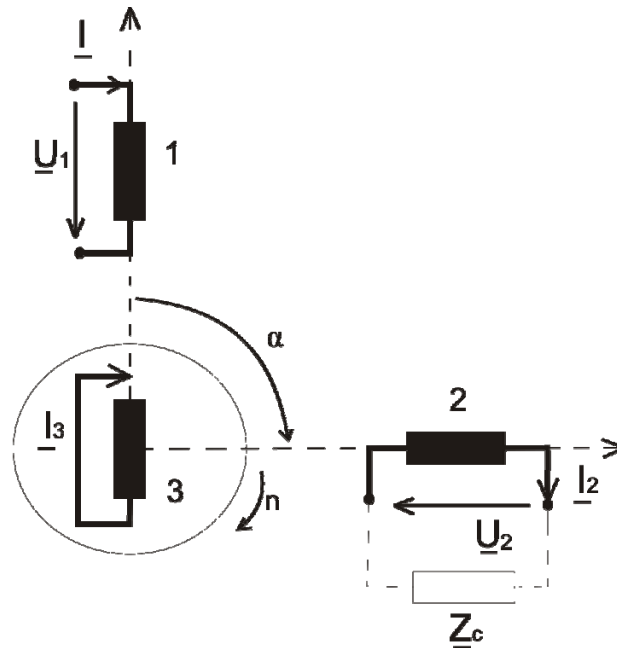


Fig 4.17. Generatorul de inducție de construcție specială cu două înfășurări statorice, amplasate decalat cu unghiul α în creștăturile statorice.

În Fig. 4.17. se prezintă generatorul de inducție cu două înfășurări, fiind considerat cazul general, având înfășurările de excitație și de sarcina decalate spațial cu unghiul $\alpha = 90^\circ$ (constructiv α poate avea valori cuprinse între $[0 - 180]$ grade electrice).

Pentru circuitele de excitație și respectiv sarcina, au fost stabilite următoarele ecuații de regim staționar:

$$\underline{U}'_{e2} = \underline{U}_{e1} \cdot e^{-j\alpha} \quad (4.60)$$

$$\underline{U}'_{e3} = \underline{U}_{e1} \quad (4.61)$$

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + jX'_{12} b' \underline{I}'_2 - \underline{U}_{e1} \quad (4.62)$$

$$\underline{U}'_{e2} = \underline{Z}'_2 \underline{I}'_2 + jX'_{12} b'' \underline{I}_1 + \underline{Z}'_c \cdot \underline{I}'_2 \quad (4.63)$$

$$\underline{U}'_{e3} = \underline{Z}'_3 \underline{I}'_3$$

(4.64)

$$\underline{I}_{01} = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 e^{j\alpha} + \underline{I}'_3 \quad (4.65)$$

$$\underline{U}_{e1} = -\underline{Z}_{1m} \underline{I}_{01} \quad (4.66)$$

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

Considerând setul de valori inițiale, pot fi determinate valorile de interes

(ex: $\underline{U}_{e1}, \underline{U}'_2, \underline{I}_1, \underline{I}'_2, \underline{I}'_3, \underline{I}_{01}$).

Notând:

$$\underline{N} = (\underline{Z}'_C + \underline{Z}'_2) [\underline{Z}_{1m} \underline{Z}'_3 + \underline{Z}'_1 (\underline{Z}_{1m} + \underline{Z}'_3)] + (\underline{X}'_{12})^2 \underline{b} \underline{b}'' (\underline{Z}_{1m} + \underline{Z}'_3) + \underline{Z}_{1m} \underline{Z}'_3 [-j\underline{X}'_{12} (\underline{b} e^{-j\alpha} + \underline{b}'' e^{j\alpha}) + \underline{Z}'_1] \quad (4.67)$$

Se obține

$$\underline{I}_1 = \frac{(\underline{Z}'_C + \underline{Z}'_2)(\underline{Z}_{1m} + \underline{Z}'_3) + \underline{Z}_{1m} \underline{Z}'_3}{\underline{N}} \underline{U}_1 \quad (4.68)$$

$$\underline{I}'_2 = -\frac{j\underline{X}'_{12} \underline{b}'' (\underline{Z}_{1m} + \underline{Z}'_3) + \underline{Z}_{1m} \underline{Z}'_3 e^{-j\alpha}}{\underline{N}} \underline{U}_1 \quad (4.69)$$

$$\underline{I}'_3 = -\frac{\underline{Z}_{1m} (\underline{Z}'_C + \underline{Z}'_2 - j\underline{X}'_{12} \underline{b}'' e^{j\alpha})}{\underline{N}} \underline{U}_1 \quad (4.70)$$

$$\underline{I}_{01} = \frac{\underline{Z}'_3 (\underline{Z}'_C + \underline{Z}'_2 - j\underline{X}'_{12} \underline{b}'' e^{j\alpha})}{\underline{N}} \underline{U}_1 \quad (4.71)$$

$$\underline{U}_{e1} = -\frac{\underline{Z}_{1m} \underline{Z}'_3 (\underline{Z}'_C + \underline{Z}'_2 - j\underline{X}'_{12})}{\underline{N}} \underline{U}_1 \quad (4.72)$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{I}'_2 \underline{Z}'_C \quad (4.73)$$

unde

$$\underline{b}' = 1 + \frac{3\alpha}{\pi} a; \underline{b}'' = 1 + \frac{3\alpha}{\pi} a^2; a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (4.74)$$

Parametri electrici din relațiile anterioare (4.60, ..., 4.74) sunt următorii:

$$\underline{Z}'_1 = R_1 + jX_1 \quad (4.75)$$

$$\underline{Z}'_2 = R_2 + jX_2 \quad (4.76)$$

$$\underline{Z}'_3 = \frac{R_3}{s} + jX_3 \quad (4.77)$$

$$\underline{Z}_{1m} = R_{1m} + jX_{1m} \quad (4.78)$$

unde:

\underline{Z}'_1 - impedența înfășurării w1 de excitație;

\underline{Z}'_2 - impedența înfășurării w2 de sarcina, în raport cu înfășurarea w1 de excitație;

\underline{Z}'_3 - impedența rotorului în raport cu înfășurarea w_1 de excitație;

\underline{Z}'_{1m} - impedența de magnetizare.

Parametri electrici raportați la înfășurarea w_1 de excitație au fost calculați cu ajutorul relațiilor următoare:

$$R'_2 = K^2 R_2 \quad X'_2 = K^2 X_2 \quad (4.79)$$

$$R'_3 = K_e K_i R_3 \quad X'_3 = K_e K_i X_3 \quad (4.80)$$

$$\underline{Z}'_C = K^2 \underline{Z}_C \quad (4.81)$$

$$K = \frac{N_1 k_{b1}}{N_2 k_{b2}} \quad K_e = \frac{N_1 k_{b1}}{N_3 k_{b3}} \quad K_i = \frac{m_1 N_1 k_{b1}}{m_3 N_3 k_{b3}} \quad (4.82)$$

unde:

- N_1, N_2, N_3 - reprezintă numărul de spire în înfășurările de excitație, sarcină și respectiv rotorică;
- K_{b1}, K_{b2}, K_{b3} - sunt factorii de bobinaj corespunzători înfășurărilor;
- m_1, m_3 - numărul fazelor din înfășurarea de excitație și respectiv rotorica.

Mașina experimentată (mașina de inducție cu două înfășurări separate) a fost obținută prin transformarea unei mașini de serie având următorii parametri: $P_N = 1.5$ [kW], $U_N = 230/400$ [V], $I_N = 2.06/3.57$ [A], $n_0 = 1500$ [RPM], $\cos \varphi_N = 0.776$, $s_N = 5.79\%$, $R_{f,20 \text{ grade Celsius}} = 3.67$ [Ω].

Au fost efectuate următoarele modificări față de mașina de serie:

- înfășurările statorice w_1 și w_3 sunt plasate în aceleași creștături statorice,
- înfășurarea w_2 este decalată spațial față de înfășurarea w_1 cu 90 grade electrice,
- modificarea numărului de spire ale înfășurărilor: 66 în loc de 70
- modificarea ariei secțiunii firelor din înfășurări: 0.45 mm^2 în loc de $2 \times 0.6 \text{ mm}^2$
- parametri nominali ai mașinii modificate sunt: $P_N = 0.51$ [kW], $U_N = 207/359$ [V], $I_N = 1/1.73$ [A], $n_0 = 1500$ [RPM],

$$R_{f,20 \text{ grade Celsius}} = 16 [\Omega], X_1 = X'_2 = X'_3 = 5.3 [\Omega], X'_{rot} = 4.35 \Omega, R_m = 10.4 \Omega,$$

$$X_m = 93.2 \Omega.$$

Au fost considerate trei variante de amplasare a înfășurării de sarcină față de cea de excitație: $\alpha = 0, \alpha = 90, \alpha = 180$ grade electrice, în cazul

$$\underline{U}_1 = 220V, f = 50Hz, n_0 = 1500RPM, \underline{I}_1 = -j2.08A$$

Folosind relațiile (y.1),(y.2),..., (y.15), au fost obținute caracteristicile de sarcină prezentate în tabelul y.1. Se pot observa îmbunătățiri ale caracteristicii de sarcină a generatorului de inducție, corelat cu creșterea unghiului de decalare spațială a înfășurărilor α , și anume:

$$\Delta U'_2 \approx -21\%, \text{ pentru cazul } \alpha = 0, \text{ (grade electrice)}$$

$$\Delta U'_2 \approx -15\%, \text{ pentru cazul } \alpha = 90,$$

$$\Delta U'_2 \approx -2.3\%, \text{ pentru cazul } \alpha = 180,$$

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

pentru o variație a sarcinii egala cu puterea nominală

$$\Delta P \approx P_N = 500W$$

Se poate observa că pentru $\alpha = 180$, rezultă un $\Delta U_2' \approx -2.3\%$, în raport cu variația sarcinii de încărcare, deci acesta este cazul cel mai favorabil pentru amplasarea înfășurărilor decalate spațial, conform rezultatelor experimentale sintetizate în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Rezultate experimentale obținute pentru unghiul $\alpha = 0, 90, 180$ (grade electrice).

α	$Z_s'[\Omega]$	s	$I_2'[A]$	$I_3'[A]$	$I_{01}[A]$	$U_{e1}[V]$	$P [W]$ încarcare	$U_2'[V]$
0	10^8	-0.012	0	0.651	2.288	211.610	0	222.503
	200	-0.032	1.030	1.717	2.289	211.723	212.224	206.021
	150	-0.038	1.340	2.043	2.290	211.784	269.492	201.057
	100	-0.050	1.918	2.651	2.291	211.933	367.922	191.813
	80	-0.057	2.318	3.072	2.293	212.061	492.753	185.419
90	10^8	-0.012	0	0.651	2.288	211.610	0	226.18
	200	-0.033	1.054	1.761	2.304	213.060	222.010	210.71
	150	-0.039	1.373	2.102	2.309	213.529	282.960	206.01
	100	-0.051	1.972	2.743	2.318	214.430	388.960	197.22
	80	-0.059	2.389	3.189	2.326	215.090	456.480	191.09
180	10^8	-0.012	0	0.651	2.288	211.610	0	223.247
	200	-0.032	1.104	1.798	2.448	226.442	243.688	220.766
	150	-0.037	1.466	2.18	2.501	231.355	322.499	219.943
	100	-0.048	2.183	2.937	2.607	241.122	476.562	218.303
	95	-0.050	2.300	3.055	2.623	242.656	500.000	218.045

In Fig. 4.18, este prezentat standul experimental realizat, cu mașina de inducție de construcție specială cu înfășurări separate de excitație și sarcina, cuplată cu o mașină de antrenare de inducție, având atașat pe axul comun un tahogenerator pentru măsurarea turației. [55]



Fig. 4.18. Stand experimental cu mașina de inducție de construcție specială cu înfășurări de excitație și sarcină separate.

A fost identificat modelul matematic dinamic al generatorului de inducție considerat (4.83,...,4.89).

$$R_1 i d_1 + L d_1 d i d_1 + L d_{21} d i d_2 + L_{1h} d i d_3 - \omega_1 (L q_1 i q_1 + L q_{21} i q_2 + L_{1h} i q_3) - U = 0 \quad (4.83)$$

$$R_1 i q_1 + L q_1 d i q_1 + L q_{21} d i q_2 + L_{1h} d i q_3 + \omega_1 (L d_1 i d_1 + L d_{21} i d_2 + L_{1h} i d_3) = 0 \quad (4.84)$$

$$-(R_2 + R_C) i d_2 - L d_{12} d i d_1 - L d_2 d i d_2 - L_{1h} d i d_3 + \omega_1 (L q_{12} i q_1 + L q_2 i q_2 + L_{1h} i q_3) = 0 \quad (4.85)$$

$$-(R_2 + R_C) i q_2 - L q_{12} d i q_1 - L q_2 d i q_2 - L_{1h} d i q_3 - \omega_1 (L d_{12} i d_1 + L d_2 i d_2 + L_{1h} i d_3) = 0 \quad (4.86)$$

$$R_3 i d_3 + L_{1h} d i d_1 + L_{1h} d i d_2 + L d_3 d i d_3 - (\omega_1 - \omega) (L_{1h} i q_1 + L_{1h} i q_2 + L q_3 i q_3) = 0 \quad (4.87)$$

$$R_3 i q_3 + L_{1h} d i q_1 + L_{1h} d i q_2 + L q_3 d i q_3 + (\omega_1 - \omega) (L_{1h} i d_1 + L_{1h} i d_2 + L d_3 i d_3) = 0 \quad (4.88)$$

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

$$pL_{1h}(iq_1id_3 + id_3iq_2 - id_1iq_3 - iq_3id_2) + M_m - \frac{J}{p}d\omega = 0 \quad (4.89)$$

Implementarea directă a sistemului de 7 ecuații (4.83-4.89) în forma dată, într-un mediu software dedicat (Matlab, Simulink, Simnon), în vederea rezolvării lui nu este posibilă, în general, datorită apariției unei bucle algebrice infinite (testele inițiale au fost realizate în limbajul Simnon, acesta semnalând o astfel de eroare).

Mărimile de intrare se consideră a fi tensiunea de comandă a excitației (u) respectiv cuplul mecanic (M_{mec})(perturbație). Mărimea de ieșire este tensiunea la bornele generatorului (v_t).

Obținerea unor relații explicite de calcul ale tensiunii la bornele generatorului (v_t) implică, determinarea unor relații explicite de calcul ale proiecțiilor lui v_t pe axele d,q (v_d și v_q).

Sistemul de ecuații (4.83-4.89) se poate rescrie considerând etapele de transformare precizate în paragraful 4.6.1., ținând cont de ipotezele simplificatoare enunțate. Se obține un model matematic general neliniar, al generatorului de inducție conectat, printr-o linie lungă de transmisie, la o rețea de putere limitată, (Fig.4.16) descris de un set de 12 ecuații (4.90,...,4.101), primele 7 ecuații (4.90,...,4.96), descriind generatorul de inducție considerat iar ultimele 2 descriind conexiunea la linia lungă de transmisie și consumatorul local.

a) Ecuațiile mașinii (generatorului) de inducție cu două înfășurări statorice și una rotorică (ecuațiile lui Park):

$$\begin{aligned} \frac{did_1}{dt} = & (((\omega_1 \cdot (Lq_1 \cdot iq_1 + Lq_{21} \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3) + U - R_1 \cdot id_1) + \\ & ((R_2 + R_C) \cdot id_2 - \omega_1 \cdot (Lq_{12} \cdot iq_1 + Lq_2 \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3))) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_2 \cdot Ld_3) - \\ & (((R_2 + R_C) \cdot id_2 - \omega_1 \cdot (Lq_{12} \cdot iq_1 + Lq_2 \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3)) \cdot Ld_3 + \\ & ((\omega_1 - \omega) \cdot (L_{1h} \cdot iq_1 + L_{1h} \cdot iq_2 + Lq_3 \cdot iq_3) - R_3 \cdot id_3) \cdot L_{1h}) \cdot (Ld_{21} - Ld_2)) / \\ & ((Ld_1 - Ld_{12}) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_2 \cdot Ld_3) - (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_{12} \cdot Ld_3) \cdot (Ld_{21} - Ld_2)) \end{aligned} \quad (4.90)$$

$$\begin{aligned} \frac{did_2}{dt} = & (((\omega_1 \cdot (Lq_1 \cdot iq_1 + Lq_{21} \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3) + U - R_1 \cdot id_1) + \\ & ((R_2 + R_C) \cdot id_2 - \omega_1 \cdot (Lq_{12} \cdot iq_1 + Lq_2 \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3))) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_{12} \cdot Ld_3) - \\ & (((R_2 + R_C) \cdot id_2 - \omega_1 \cdot (Lq_{12} \cdot iq_1 + Lq_2 \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3)) \cdot Ld_3 + \\ & ((\omega_1 - \omega) \cdot (L_{1h} \cdot iq_1 + L_{1h} \cdot iq_2 + Lq_3 \cdot iq_3) - R_3 \cdot id_3) \cdot L_{1h}) \cdot (Ld_1 - Ld_{12})) / \\ & ((Ld_{21} - Ld_2) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_{12} \cdot Ld_3) - (Ld_1 - Ld_{12}) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_2 \cdot Ld_3)) \end{aligned} \quad (4.91)$$

$$\begin{aligned}
\frac{did_3}{dt} = & ((\omega_1 \cdot (Lq_1 \cdot iq_1 + Lq_{21} \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3) + U - R_1 \cdot id_1) - \\
& Ld_1 \cdot (((\omega_1 \cdot (Lq_1 \cdot iq_1 + Lq_{21} \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3) + U - R_1 \cdot id_1) + \\
& ((R_2 + R_C) \cdot id_2 - \omega_1 \cdot (Lq_{12} \cdot iq_1 + Lq_2 \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3))) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_2 \cdot Ld_3) - \\
& (((R_2 + R_C) \cdot id_2 - \omega_1 \cdot (Lq_{12} \cdot iq_1 + Lq_2 \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3))) \cdot Ld_3 + \\
& ((\omega_1 - \omega) \cdot (L_{1h} \cdot iq_1 + L_{1h} \cdot iq_2 + Lq_3 \cdot iq_3) - R_3 \cdot id_3) \cdot L_{1h}) \cdot (Ld_{21} - Ld_2)) / \\
& ((Ld_1 - Ld_{12}) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_2 \cdot Ld_3) - (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_{12} \cdot Ld_3) \cdot (Ld_{21} - Ld_2)) - \\
& Ld_{21} \cdot (((\omega_1 \cdot (Lq_1 \cdot iq_1 + Lq_{21} \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3) + U - R_1 \cdot id_1) + \\
& ((R_2 + R_C) \cdot id_2 - \omega_1 \cdot (Lq_{12} \cdot iq_1 + Lq_2 \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3))) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_{12} \cdot Ld_3) - \\
& (((R_2 + R_C) \cdot id_2 - \omega_1 \cdot (Lq_{12} \cdot iq_1 + Lq_2 \cdot iq_2 + L_{1h} \cdot iq_3))) \cdot Ld_3 + \\
& ((\omega_1 - \omega) \cdot (L_{1h} \cdot iq_1 + L_{1h} \cdot iq_2 + Lq_3 \cdot iq_3) - R_3 \cdot id_3) \cdot L_{1h}) \cdot (Ld_1 - Ld_{12})) / \\
& ((Ld_{21} - Ld_2) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_{12} \cdot Ld_3) - (Ld_1 - Ld_{12}) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Ld_2 \cdot Ld_3))) / L_{1h}
\end{aligned}
\tag{4.92}$$

$$\begin{aligned}
\frac{diq_1}{dt} = & (((-\omega_1 \cdot (Lq_1 \cdot id_1 + Ld_{21} \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3) - R_1 \cdot iq_1) + \\
& ((R_2 + R_C) \cdot iq_2 + \omega_1 \cdot (Ld_{12} \cdot id_1 + Ld_2 \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3))) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Lq_2 \cdot Lq_3) - \\
& (((R_2 + R_C) \cdot iq_2 + \omega_1 \cdot (Ld_{12} \cdot id_1 + Ld_2 \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3))) \cdot Lq_3 + \\
& (-\omega_1 - \omega) \cdot (L_{1h} \cdot id_1 + L_{1h} \cdot id_2 + Ld_3 \cdot id_3) - R_3 \cdot iq_3) \cdot L_{1h}) \cdot (Lq_{21} - Lq_2)) / \\
& ((Lq_1 - Lq_{12}) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Lq_2 \cdot Lq_3) - (L_{1h} \cdot L_{1h} - Lq_{12} \cdot Lq_3) \cdot (Lq_{21} - Lq_2))
\end{aligned}
\tag{4.93}$$

$$\begin{aligned}
\frac{diq_2}{dt} = & (((-\omega_1 \cdot (Lq_1 \cdot id_1 + Ld_{21} \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3) - R_1 \cdot iq_1) + \\
& ((R_2 + R_C) \cdot iq_2 + \omega_1 \cdot (Ld_{12} \cdot id_1 + Ld_2 \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3))) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Lq_{12} \cdot Lq_3) - \\
& (((R_2 + R_C) \cdot iq_2 + \omega_1 \cdot (Ld_{12} \cdot id_1 + Ld_2 \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3))) \cdot Lq_3 + \\
& (-\omega_1 - \omega) \cdot (L_{1h} \cdot id_1 + L_{1h} \cdot id_2 + Ld_3 \cdot id_3) - R_3 \cdot iq_3) \cdot L_{1h}) \cdot (Lq_1 - Lq_{12})) / \\
& ((Lq_{21} - Lq_2) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Lq_{12} \cdot Lq_3) - (Lq_1 - Lq_{12}) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - Lq_2 \cdot Lq_3))
\end{aligned}
\tag{4.94}$$

$$\begin{aligned}
\frac{diq_3}{dt} = & (((-\omega_1 \cdot (Lq_1 \cdot id_1 + Ld_{21} \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3) - R_1 \cdot iq_1) - \\
& Lq_1 \cdot (((-\omega_1 \cdot (Lq_1 \cdot id_1 + Ld_{21} \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3) - R_1 \cdot iq_1) +
\end{aligned}$$

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

$$\begin{aligned}
 & ((R_2 + R_C) \cdot i_{q2} + \omega_1 \cdot (L_{d12} \cdot id_1 + L_{d2} \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3)) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - L_{q2} \cdot L_{q3}) - \\
 & (((R_2 + R_C) \cdot i_{q2} + \omega_1 \cdot (L_{d12} \cdot id_1 + L_{d2} \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3)) \cdot L_{q3} + \\
 & (-\omega_1 - \omega) \cdot (L_{1h} \cdot id_1 + L_{1h} \cdot id_2 + L_{d3} \cdot id_3) - R_3 \cdot iq_3) \cdot L_{1h} \cdot (L_{q21} - L_{q2}) / \\
 & ((L_{q1} - L_{q12}) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - L_{q2} \cdot L_{q3}) - (L_{1h} \cdot L_{1h} - L_{q12} \cdot L_{q3}) \cdot (L_{q21} - L_{q2})) - \\
 & L_{q21} \cdot (((-\omega_1 \cdot (L_{q1} \cdot id_1 + L_{d21} \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3) - R_1 \cdot iq_1) + \\
 & ((R_2 + R_C) \cdot i_{q2} + \omega_1 \cdot (L_{d12} \cdot id_1 + L_{d2} \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3)) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - L_{q12} \cdot L_{q3}) - \\
 & (((R_2 + R_C) \cdot i_{q2} + \omega_1 \cdot (L_{d12} \cdot id_1 + L_{d2} \cdot id_2 + L_{1h} \cdot id_3)) \cdot L_{q3} + \\
 & (-\omega_1 - \omega) \cdot (L_{1h} \cdot id_1 + L_{1h} \cdot id_2 + L_{d3} \cdot id_3) - R_3 \cdot iq_3) \cdot L_{1h} \cdot (L_{q1} - L_{q12})) / \\
 & ((L_{q21} - L_{q2}) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - L_{q12} \cdot L_{q3}) - (L_{q1} - L_{q12}) \cdot (L_{1h} \cdot L_{1h} - L_{q2} \cdot L_{q3}))) / L_{1h}
 \end{aligned} \tag{4.95}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = (p \cdot L_{1h} \cdot (iq_1 \cdot id_3 + id_3 \cdot iq_2 - id_1 \cdot iq_3 - iq_3 \cdot id_2) + M_m) \cdot p / J \tag{4.96}$$

$$n = 60 \cdot \omega / (6.28 \cdot 2) \tag{4.97}$$

$$i_2 = (i_{d2} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t - \text{alfa}) - i_{q2} \cdot \sin(\omega_1 \cdot t - \text{alfa})) \cdot \sqrt{2/3} \tag{4.98}$$

$$u_2 = i_2 \cdot R_C \tag{4.99}$$

b) Ecuțiile de conectare a generatorului inducție la o rețea energetică de putere limitată, printr-o linie de transmisie de rezistență γ_e și reactanță x_e :

$$v_d = v_b \sin \delta + \gamma_e i_{d2} - x_e i_{q2} \tag{4.100}$$

$$v_q = v_b \cos \delta + \gamma_e i_{q2} + x_e i_{d2} \tag{4.101}$$

unde notațiile au următoarele semnificații:

- δ - unghiul rotor;
- ω_1 - viteza de sincronism;
- ω - viteza unghiulară;
- M_m - cuplul mecanic;
- i_d, i_q - proiecțiile curentului pe axele d și q;
- k_d - coeficient de amortizare;
- J - momentul de inerție;
- v_d, v_q - proiecțiile tensiunii la borne pe axele d și q;
- U - tensiune de excitație;
- U2 - tensiune la borne (tensiune terminală);
- v_b - tensiunea rețelei;

92 Modelarea matematică a principalelor elemente componente ale AAE - 4.

R1 – rezistența înfășurării statorice de excitație;
 R2 – rezistența înfășurării statorice de sarcină;
 R3 – rezistența înfășurării rotorice;
 Ld1, Lq1 – proiecțiile inductanțelor pe axele d și q ale înfășurării statorice de excitație;
 Ld2, Lq2 – proiecțiile inductanțelor pe axele d și q ale înfășurării statorice de sarcină;
 Ld3, Lq3 – proiecțiile inductanțelor pe axele d și q ale înfășurării rotorice;
 Ld12, Ld21, Lq12, Lq21, L1h – inductanțele de cuplaj și inductanța proprie;
 x_e – reactanța liniei de transmisie;
 γ_e – rezistența liniei de transmisie;
 s – alunecare;
 p – numărul de perechi de poli;

Sistemul de ecuații (4.90,...,4.96), (4.100), (4.101) reprezintă deci *modelul neliniar de ordinul 7, care descrie funcționarea unui generator de inducție cu două înfășurări statorice legat printr-o linie lungă de transmisie la un sistem energetic de putere limitată, având conectat la bornele generatorului un consumator local.*

Includerea consumatorului local la bornele generatorului diversifică plaja de teste (regimuri de funcționare) cu cele aferente unor încărcări/descărcări de putere activă/reactivă, datorate conectării/deconectării unor consumatori ai SEPL. Acest model matematic neliniar de ordinul 7 este utilizat ca model al procesului (generator de inducție legat la un sistem energetic de putere limitată printr-o rețea de conexiune) în simularea unor strategii/tehnici/structuri de conducere adaptivă autoacordabilă. Prin modificarea excitației se obțin regimuri de funcționare specifice unor încărcări/descărcări de putere reactivă. Mărimile perturbatoare stochastice, intrinseci sistemului global (generator de inducție - rețea de conectare - sistem energetic de putere limitată), pot fi modelate și simulate prin suprapunerea unui semnal (zgomot) aleator (de medie nulă și dispersie σ^2) peste mărimea constantă, reprezentată de tensiunea sistemului (v_b), ceea ce corespunde realității, sistemul energetic de putere limitată fiind principala sursă de perturbații (zgomote) stochastice. Sunt considerate ca mărimi de intrare, dar având rolul unor perturbații, cuplul mecanic (M_{mec}) (prin care se obțin regimuri de încărcare/descărcare de putere activă) și valorile conductanței G_1 și/sau susceptanței B_1 , corespunzătoare admitanței echivalente proprii rețelei văzută la bornele generatorului (care permit simularea unor regimuri de funcționare de cuplare/decuplare de consumatori locali la borne).

Prin discretizarea modelului matematic continuu intrare-stare-ieșire utilizând mediul Matlab, se obțin pentru funcțiile de transfer discrete de ordinul 7 (4.102), respectiv de ordinul 4 (4.103) expresiile:

$$H_7(z^{-1}) = z^{-1} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = z^{-1} \frac{b_6 z^{-6} + b_5 z^{-5} + b_4 z^{-4} + b_3 z^{-3} + b_2 z^{-2} + b_1 z^{-1} + b_0}{a_7 z^{-7} + a_6 z^{-6} + a_5 z^{-5} + a_4 z^{-4} + a_3 z^{-3} + a_2 z^{-2} + a_1 z^{-1} + 1} \quad (4.102)$$

$$H_4(z^{-1}) = z^{-1} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = z^{-1} \frac{b_3 z^{-3} + b_2 z^{-2} + b_1 z^{-1} + b_0}{a_4 z^{-4} + a_3 z^{-3} + a_2 z^{-2} + a_1 z^{-1} + 1} \quad (4.103)$$

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

Modelul matematic stohastic al generatorului de inducție legat la un sistem energetic de putere se poate obține prin completarea cu termenii corespunzători zgomotului stohastic respectiv componenteii staționare a ieșirii și are forma:[56][57][58]

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-1}B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})e(t) + d \quad (4.104)$$

unde

$y(t)$ - ieșirea procesului (abaterea tensiunii la borne)
 $u(t)$ - intrarea procesului (abaterea tensiunii de comanda a excitației)
 $e(t)$ - secvența perturbatoare (zgomot) de medie nulă și dispersie σ^2
 d - ieșirea în regim staționar a procesului (pentru o intrare nulă).
 z^{-1} - operator de întârziere pe un pas
 $C(z^{-1}) = I + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + c_3z^{-3} + c_4z^{-4} + c_5z^{-5} + c_6z^{-6} + c_7z^{-7}$ -
 polinom stabil (filtru de zgomot).

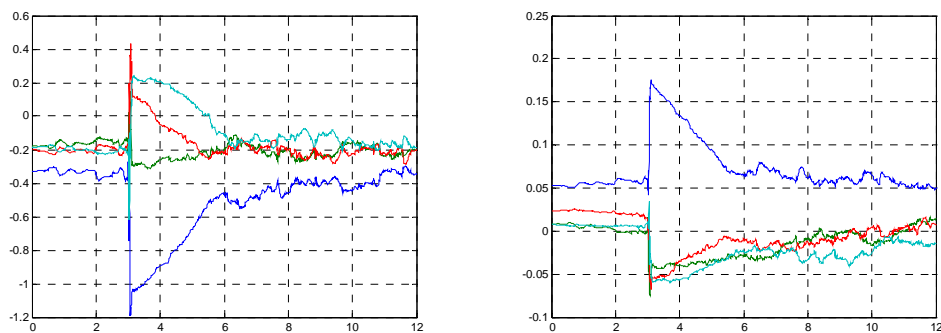
Ecuția cu diferențe stohastice (4.104) este utilizată pentru sinteza unor strategii (legi) de conducere adaptivă autoacordabilă corespunzătoare procesului condus.

Determinarea modelelor liniarizate, complet (ordin 7) și respectiv redus (de ordin 4), care aproximează dinamica modelului neliniar complet, s-a efectuat utilizând tehnica estimării parametrilor în buclă deschisă.

În acest scop a fost considerat un estimator CMMP on-line, utilizând secvențe ale mărimilor de intrare și ieșire determinate pe baza modelului neliniar complet.

S-au simulat situații considerate ca fiind elocvente în ceea ce privește evidențierea unor concluzii referitoare la corectitudinea estimării valorii parametrilor, convergența și stabilitatea numerică.

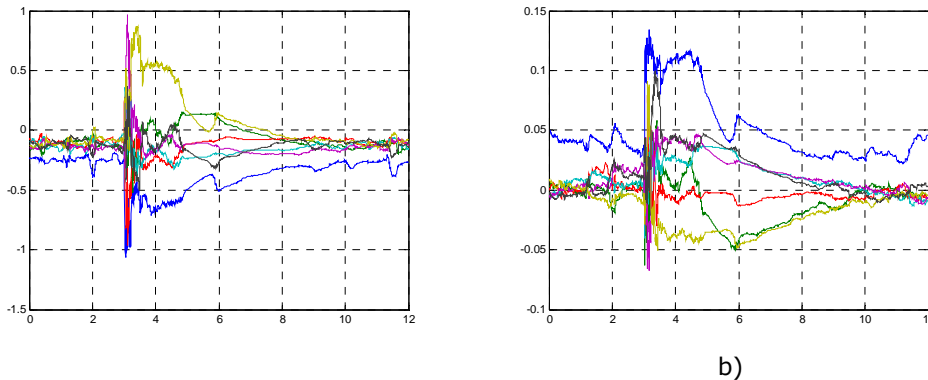
În acest sens, procesul a fost perturbat considerând un regim specific de funcționare al generatorului de inducție: încărcare de putere activă printr-o creștere a cuplului mecanic la momentul $t=3$ [sec].



a)

b)

Fig. 4.19. Estimări cu CMMP - cazul liniarizării de ordinul 4 (a - parametrii A; b - parametrii B).



a) b)
Fig. 4.20. Estimații cu CMMP – cazul liniarizării de ordinul 7 (a – parametrii A; b- parametrii B).

În Fig. 4.19 respectiv Fig.4.20 s-a reprezentat rezultatul procesului de estimare a coeficienților polinomului $A(z^{-1})$ (Fig a) respectiv a polinomului $B(z^{-1})$ (Fig b) pentru cazurile model redus de ordin 4 respectiv model complet de ordin 7.

Estimatorul (algoritmul) CMMP a fost startat cu valori ale estimațiilor nule, unitare și respectiv cu valori de regim staționar corespunzătoare unui regim de funcționare arbitrar.

Viteza de convergența a estimațiilor spre valorile staționare este convenabilă, în toate cazurile considerate.

Nivelul zgomotului aleator din ieșire – aplicat direct peste tensiunea constantă a sistemului v_b a fost considerat de $\sigma^2 = 10^{-6}$, valoare recomandată de literatura de specialitate pentru tipul de proces studiat.

Se poate observa o bună stabilitate numerică a estimațiilor parametrilor (Fig.4.19.a,b, Fig.4.20.a,b) în fiecare nou punct de funcționare (în care se ajunge la sfârșitul regimului tranzitoriu provocat de o modificare a condițiilor de operare ale procesului). Rezultatele validează corectitudinea procedurii utilizate confirmând implicit faptul că modelul neliniar, complet (de ordin 7), al GI poate fi aproximat suficient de bine cu un model liniarizat de ordin redus cu parametrii variabili în timp, funcție de modificarea punctului de funcționare, deci a condițiilor de operare. Fiecărui nou punct de funcționare îi corespunde o invarianță structurală a modelului liniarizat (acesta conservându-și ordinul), concomitent cu un nou set de valori pentru setul de parametrii A, respectiv B.

Studiul realizat a permis de asemenea o primă apreciere asupra corectitudinii funcționării estimatorului CMMP considerat.

4.6.3. Studii de caz pentru validarea modelelor matematice ale generatorului de inducție cu două înfășurări statorice.

Pentru analiza funcționării structurii considerate, formate dintr-un generator de inducție conectat la un sistem de putere limitată, printr-o linie lungă de transmisie și având un consumator local legat la borne, au fost utilizate următoarele modele matematice:

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

- modelul matematic complet, neliniar, de ordinul 7 (4.90,...,4.96) (utilizat în toate studiile de caz ca model propriu zis al procesului);
- un model matematic complet, liniarizat de ordinul 7 obținut în Matlab (folosit doar în faza de proiectare a legii de comandă adaptivă);
- un model matematic redus, liniarizat (în jurul unui punct de funcționare), de ordinul 4 obținut în Matlab (folosit doar în faza de proiectare a legii de comandă adaptivă).

Schema bloc de implementare în Simulink pentru primul model este prezentată în Fig. 4.15, incluzând rețeaua de conectare la sistemul energetic de putere limitată și consumatorul local (Fig.4.16). Pentru modelul neliniar, complet, de ordinul 7, este prezentat programul sursă de simulare în limbajul Simnon (rezultatele testelor pe ambele tipuri de implementări Simulink/Simnon fiind perfect identice).

Următoarele două modele matematice (liniarizate) realizează o modelare doar a dependenței directe dintre abaterea tensiunii de comandă a excitației (intrare) și abaterea tensiunii terminale la bornele generatorului (ieșire), sub forma unei ecuații cu diferențe (4.104) sau a unei funcții de transfer discrete (4.102).

Datorita complexității ecuațiilor generatorului de inducție, aceste modele matematice au fost obținute utilizând tehnica estimării parametrice în bucla deschisă, și nu pe cale analitică.

Valorile numerice ale parametrilor modelului generatorului de inducție utilizate în simulări sunt următoarele (exprimate în unități absolute - u.a.):

$L_{d21}=0.333[H]; L_{d12}=0.333[H]; L_{q21}=0.333[H]; L_{q12}=0.333[H]; L_{1h}=0.318[H];$

$L_{q1}=0.334[H]; L_{d1}=0.334[H]; L_{d2}=0.334[H]; L_{q2}=0.334[H]; L_{d3}=0.331[H];$

$L_{q3}=0.331[H]; R_1=16[\Omega]; R_2=16[\Omega]; R_3=4[\Omega]; J=0.004153 [kg*m^2]; p=2$

Valorile numerice ale parametrilor rețelei de conectare la sistemul energetic de putere sunt (exprimate în unități relative în u.r.):

$x_e=1.1; g_e=0.12;$

În vederea validării modelelor matematice, s-au efectuat studii de simulare (cu procesul evoluând liber, în buclă deschisă) specifice unor regimuri de funcționare ale generatorului de inducție și anume:

- încărcare de putere reactivă (prin modificarea tensiunii de excitație);
- încărcare de putere activă (prin modificarea cuplului mecanic);
- cuplare/decuplare de consumatori locali (prin modificarea conductanței G_l și/sau a susceptanței B_l).

S-a studiat efectul asupra mărimii considerate ca ieșire a procesului (tensiunea la borne) a variațiilor mărimilor fizice (excitație, cuplu mecanic, admitanța consumator local), considerate, fie ca intrări propriu-zise, fie ca intrări perturbatoare.

Testele de validare s-au efectuat în jurul unui punct de funcționare corespunzător unui regim de putere activă debitată în sistem $P=0.625$ u.r. (cuplul mecanic $M_{mec}=0.6$ u.r., 2 [Nm] u.a.).

Toate testele au presupus o variație treaptă a unor mărimi considerate ca intrări propriu-zise sau ca intrări perturbatoare.

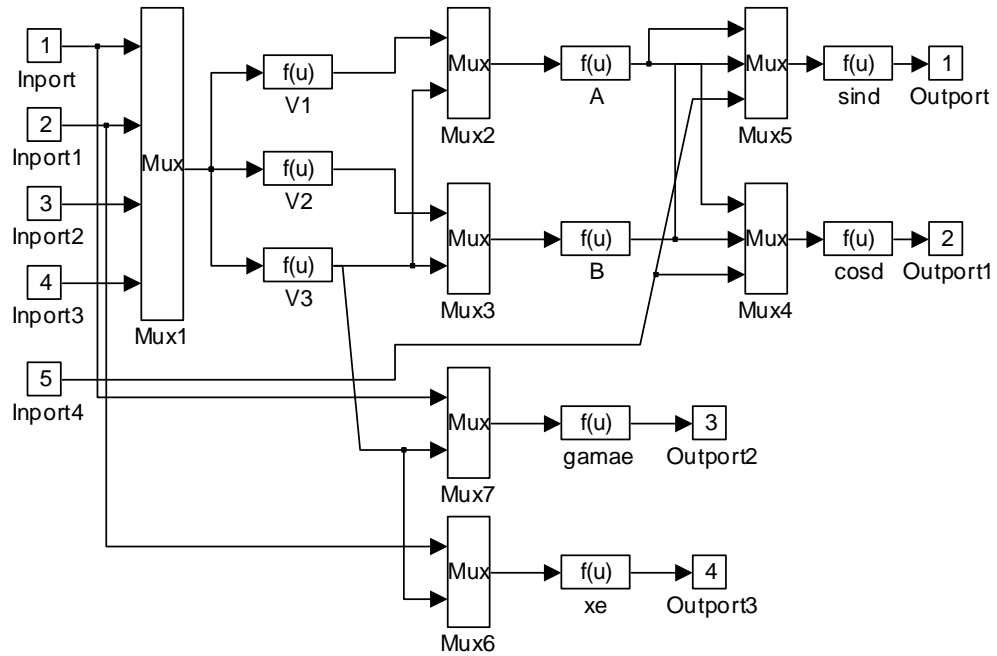


Fig 4.21. Modelul Simulink al rețelei de conectare a generatorului de inducție la sistemul energetic de putere finită (linie lungă de transmisie și un consumator local).

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

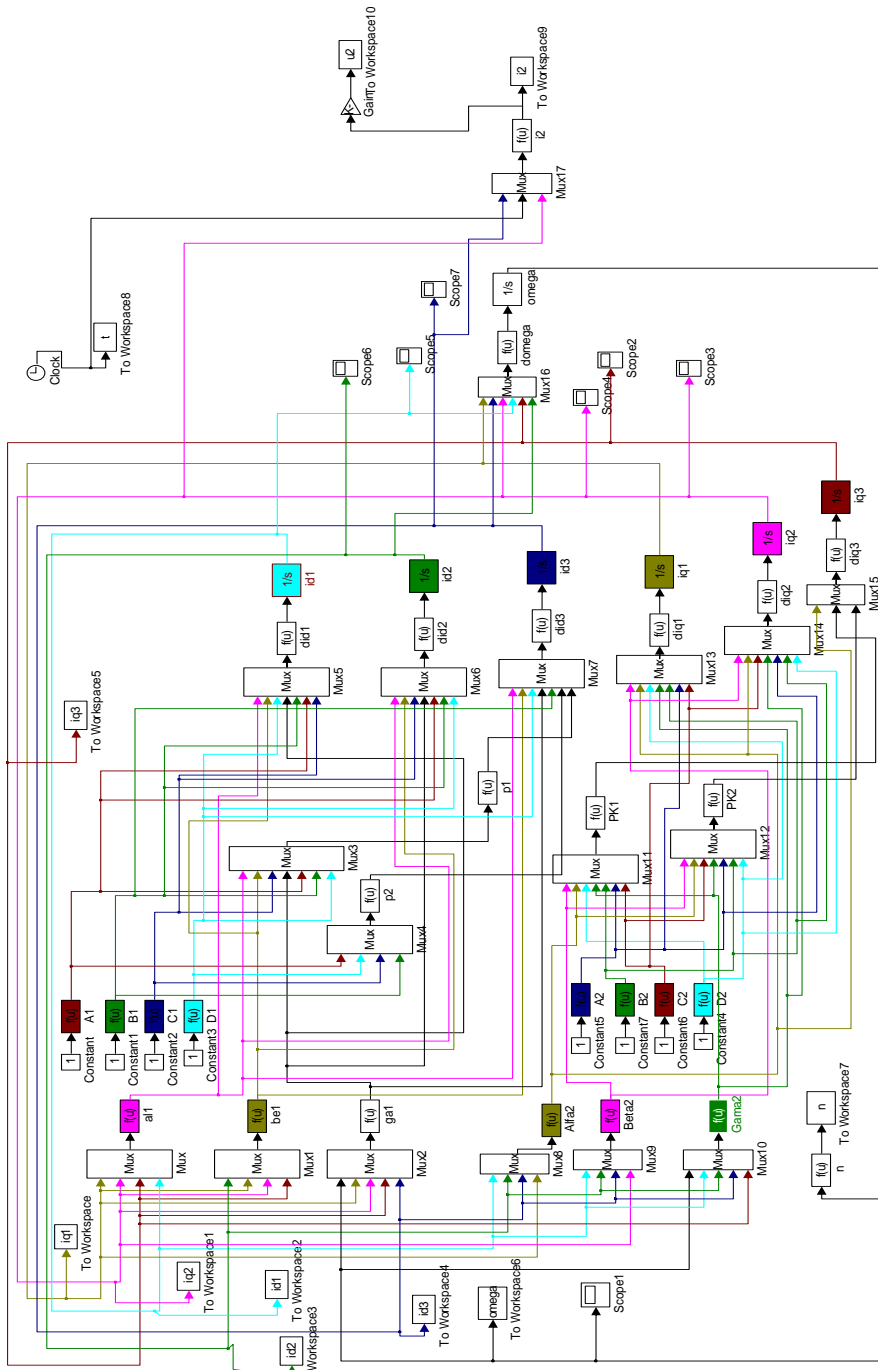


Fig 4.22. Modelul Simulink al procesului – generator de inducție (modelat printr-un sistem nelinier de ordinul 7).

PROGRAM SIMNON PENTRU SIMULAREA MODELULUI NELINIAR AL GENERATORULUI DE INDUCTIE CU INFASURARI SEPARATE DE EXCITATIE SI SARCINA DE ORDINUL 7

```

CONTINUOUS SYSTEM ioji0
STATE id1 id2 id3 iq1 iq2 iq3 omega
DER did1 did2 did3 diq1 diq2 diq3 domega
TIME t
INITIAL
id1:4.07
iq1:-2.6
id2:-3.71
iq2:-0.39
id3:0
iq3:0
"omega:314.159
omega:157
SORT
al1= omega1*(Lq1*iq1+Lq21*iq2+L1h*iq3)+U-R1*id1
be1=(R2+RC)*id2-omega1*(Lq12*iq1+Lq2*iq2+L1h*iq3)
ga1=(omega1-omega)*(L1h*iq1+L1h*iq2+Lq3*iq3)-R3*id3

A1=Ld1-Ld12
B1=Ld21- Ld2
C1=L1h* L1h-Ld12*Ld3
D1= L1h* L1h-Ld2*Ld3

p1=-Ld21*(((al1+be1)*C1-(be1*Ld3+ ga1*L1h)*A1)/(B1*C1-A1*D1))/L1h
p2=A1*D1-C1*B1

did1=((al1+be1)*D1-(be1* Ld3+ ga1* L1h)*B1)/(A1*D1-C1*B1)
did2=((al1+be1)*C1-(be1* Ld3+ ga1* L1h)*A1)/(B1*C1-A1*D1)
did3=(al1-Ld1*(((al1+be1)*D1-(be1*Ld3+ga1*L1h)*B1)/p2))+p1

Alfa2= omega1*(Ld1*id1+Ld21*id2+L1h*id3) + R1*iq1
Beta2= omega1*(Ld12*id1+Ld2*id2+L1h*id3) + (R2+RC)*iq2
Gama2= (omega1-omega)*(L1h*id1+L1h*id2+Ld3*id3) + R3*iq3

A2= Lq1+Lq12
B2= Lq21-Lq2
C2= Lq12*Lq3+L1h*L1h
D2= L1h*L1h-Lq2*Lq3

PK1=((beta2-alfa2)*D2-(beta2*Lq3-gama2*L1h)*B2)/(A2*D2-C2*B2)
PK2=((beta2-alfa2)*C2-(beta2*Lq3-gama2*L1h)*A2)/(B2*C2-A2*D2)

diq1=(( beta2-alfa2)*D2-( beta2*Lq3-gama2*L1h)*B2)/ (A2*D2-C2*B2)
diq2=((beta2-alfa2)*C2-( beta2*Lq3-gama2*L1h)*A2)/ (B2*C2-A2*D2)
diq3=(-alfa2-Lq1*pk1-Lq21*pk2)/L1h

domega =(p*L1h*(iq1*id3+id3*iq2-id1*iq3-iq3*id2)+Mm)*p/J
n=60*omega/(6.28*2)

i2=(id2*cos(omega1*t-alfa)-iq2*sin(omega1*t-alfa))*sqrt(2/3)
u2=i2*rc

```

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

```
R1:16
Ld1:0.334
Ld21:0.333
Ld12:0.333
Lq21:0.333
Lq12:0.333

L1h:0.318
Lq1:0.334
J:0.004153
R2:16
"R2:1000000
Ld2:0.334
Lq2:0.334
"RC:100
RC=if t<2 then 100 else 3000
"alfa=if t<3 then 0 else 3.14
alfa:3.14
"alfa:0
R3:4
Ld3:0.331
Lq3:0.331
p:2
ti:0
tf:4
"n:1000
"k:0...n-1
Mm:2
f:50
pi:3.1415926
omega1=2*pi*f
U:380
theta=(tf-ti)/n
jj=if t<0 then 0 else 1500
END
```

4.6.3.1 Analiza rezultatelor obținute prin simularea unor regimuri caracteristice de funcționare în vederea validării MM neliniar de ordinul 7.

Modelul matematic considerat în acest studiu este cel descris de setul de ecuații (4.90,...,4.96), cu notațiile aferente (4.100), (4.101), iar schema Simulink de simulare este data în Fig. 4.22 (cu rețeaua de conectare reprezentată în Fig. 4.21). Rezultatele testelor au fost validate și prin simulare în Simnon (programul sursă a fost prezentat în cadrul paragrafului 4.6.3). [55]

Încărcare de putere activă

Un astfel de regim de funcționare a fost obținut printr-o variație (creștere) a cuplului mecanic T_m , abaterea acestuia (10%) fiind de formă treaptă.

În acest caz, modificarea cuplului mecanic produce modificări semnificative ale puterii active P debitate în sistem (Fig.4.23.c). Variația puterii reactive este mult mai redusă (Fig.4.23.d.). Are loc de asemenea o scădere a tensiunii la bornele

generatorului de inducție (Fig.4.23, a, b) Rezultatele obținute respectă dinamica fenomenologică a mașinii electrice, fiind comparabile cu cele întâlnite de literatura de specialitate în cazul unei mașini electrice asemănătoare, și anume cazul mașinii de inducție cu dublă alimentare. [55][59].

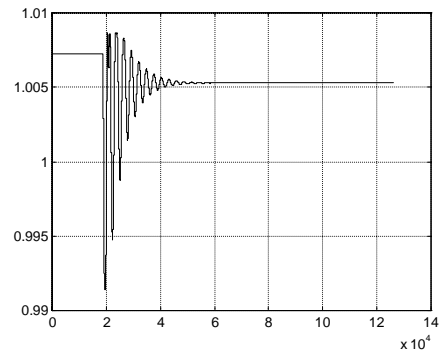
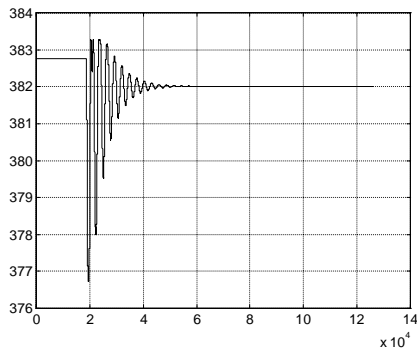


Fig 4.23.a Variația tensiunii la borne (vt) (u.a.)

Fig 4.23.b. Variația relativă a tensiunii la borne (vt) (u.r.)

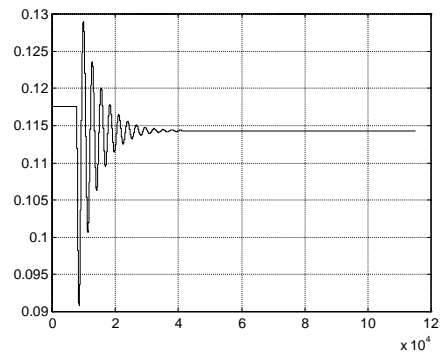
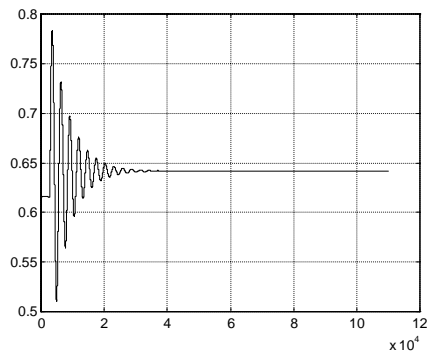


Fig 4.23.c. Variația relativă a puterii active (P) (u.r.)

Fig 4.23.d. Variația relativă a puterii reactive (Q) (u.r.)

Încărcare de putere reactivă

Un astfel de regim de funcționare a fost obținut printr-o variație (creștere) a tensiunii de excitație, abaterea acesteia (5%) fiind de forma unei trepte.

Rezultatele simulărilor (Fig. 4.24.c, d.) relevă faptul că o modificare a tensiunii de excitație produce variații ale puterii reactive (Q), în timp ce puterea activă, după un regim tranzitoriu, revine la valoarea apropiată de cea inițială, iar tensiunea la borne (Fig. 4.24.a,b) înregistrează o ușoară creștere.

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

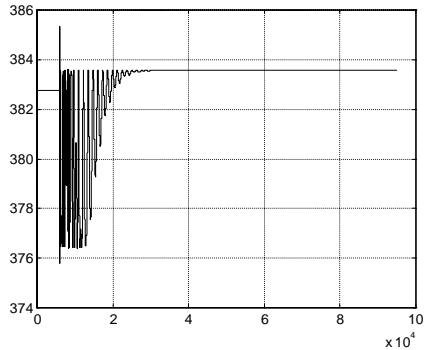


Fig 4.24.a. Variația tensiunii la borne (vt) (u.a.)

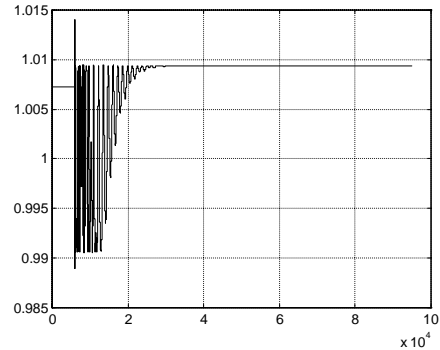


Fig 4.24.b. Variația relativă a tensiunii la borne (vt) (u.r.)

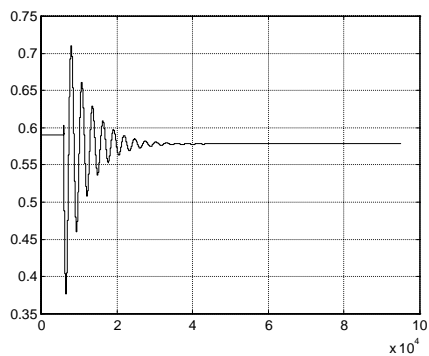


Fig 4.24.c. Variația relativă a puterii active (P) (u.r.)

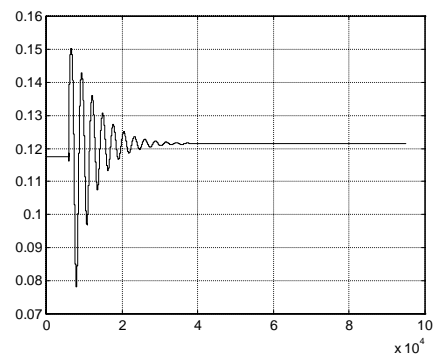


Fig 4.24.d. Variația relativă a puterii reactive (Q) (u.r.)

Cuplarea la borne a unui consumator rezistiv suplimentar

Acest de regim de funcționare a fost simulat printr-o variație (creștere) a conductanței echivalente G_1 , abaterea acesteia (10%) fiind de formă treaptă.

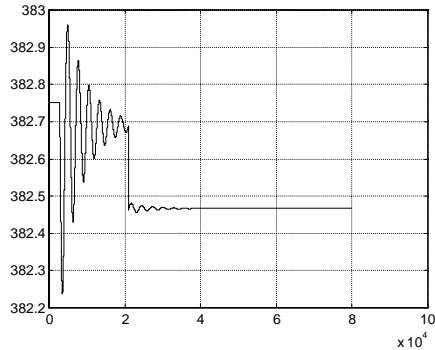


Fig 4.25.a. Variația tensiunii la borne (vt) (u.a.)

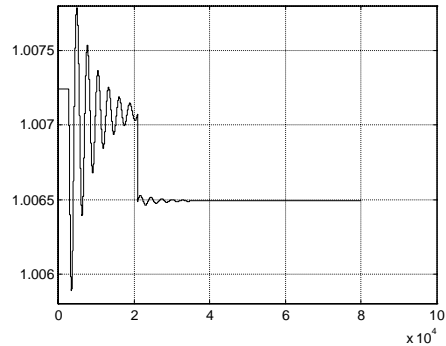


Fig 4.25.b. Variația relativă a tensiunii la borne (vt) (u.r.)

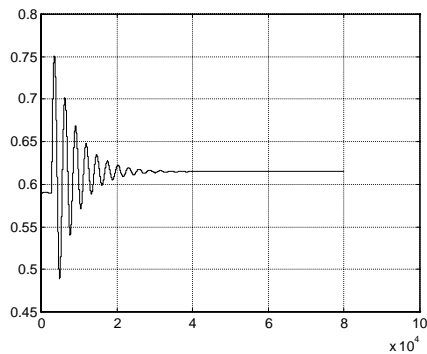


Fig 4.25.c. Variația relativă a puterii active (P) (u.r.)

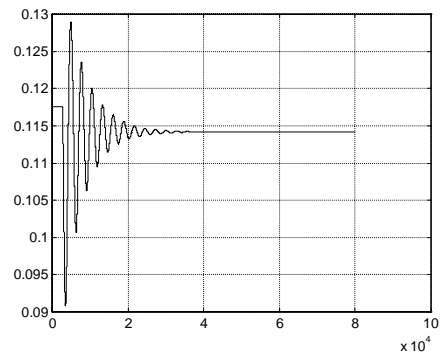


Fig 4.25.d. Variația relativă a puterii reactive (Q) (u.r.)

După cum era de așteptat, tensiunea la bornele generatorului (Fig. 4.25.a,b) scade în urma conectării unui consumator suplimentar. Totuși, aceasta scădere este mică (0,1 - 0,5 %), datorată variantei constructive a mașinii de inducție speciale, acesta fiind și unul dintre principalele avantaje ale acesteia. Rezultatele obținute prin simulare validează modelul matematic neliniar de ordin 7. Variațiile celorlalte mărimi sunt descrise în figurile 4.25.c,d

4.6.3.2 Analiza rezultatelor obținute prin simularea unor regimuri caracteristice de funcționare în vederea validării MM liniar redus de ordinul 4.

Modelul matematic considerat în acest studiu este cel descris de setul de ecuații (4.90,...,4.96), cu notațiile aferente, iar schema Simulink de simulare este

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

cea prezentată în Fig.4.21 și Fig.4.22. Rezultatele testelor au fost validate și prin simulare în Simnon (programul sursă a fost prezentat anterior în paragraful 4.6.3.).

Încărcare de putere activă

Acest regim de funcționare a fost obținut printr-o variație (creștere) a cuplului mecanic T_m , abaterea acestuia (5%) fiind de formă treaptă.

În acest caz, modificarea cuplului mecanic produce modificări semnificative ale puterii active P debitate în sistem (Fig. 4.26.c). Variația puterii reactive fiind mult mai redusă (Fig 4.26.d.). Are loc de asemenea o scădere a tensiunii la bornele generatorului de inducție (Fig.4.26.a,b.) Rezultatele obținute sunt conforme cu cele ale comportării mașinii electrice reale.

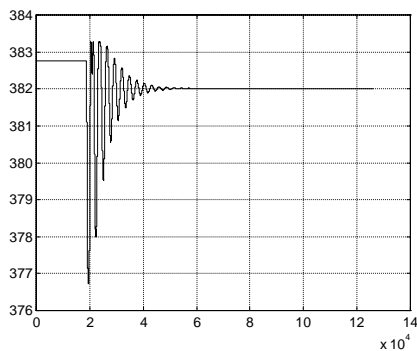


Fig 4.26.a. Variația tensiunii la borne (vt) (u.a.)

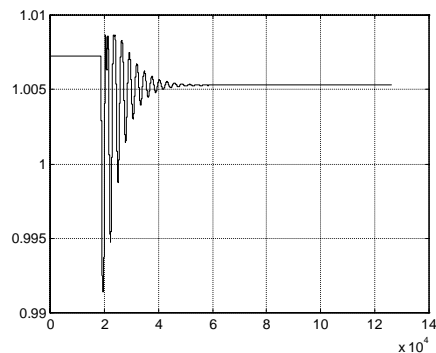


Fig 4.26.b. Variația relativă a tensiunii la borne (vt) (u.r.)

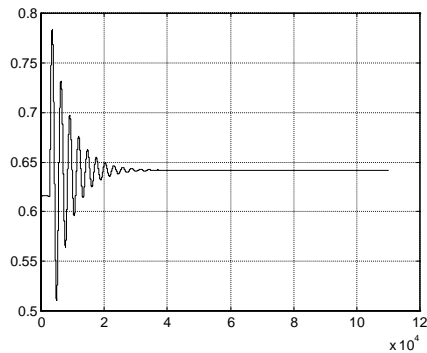


Fig 4.26.c. Variația relativă a puterii active (P) (u.r.)

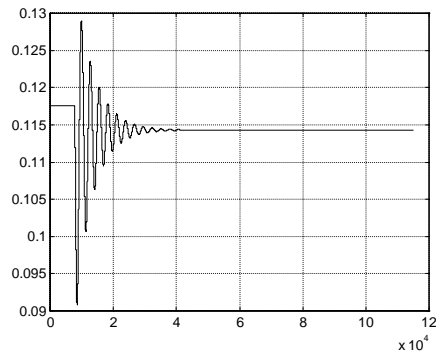
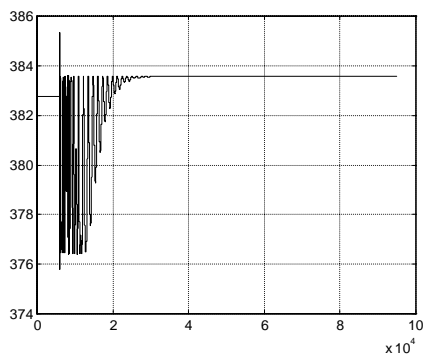
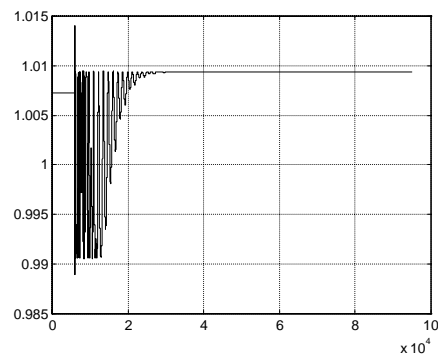
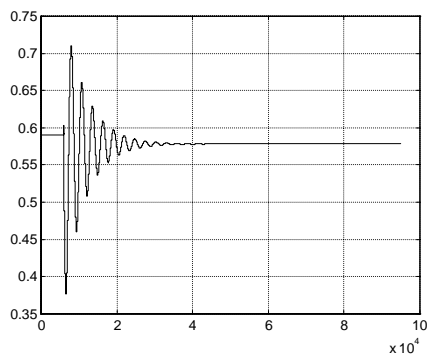
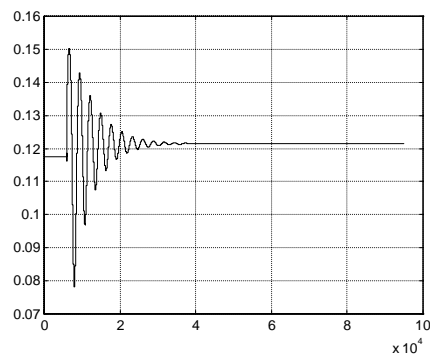


Fig 4.26.d. Variația relativă a puterii reactive (Q) (u.r.)

Încărcare de putere reactivă

Acest regim de funcționare a fost obținut printr-o variație (creștere) a tensiunii de excitație, abaterea acesteia (5%) fiind de forma unei trepte.

Rezultatele simulărilor (Fig. 4.27.c,d.) indică, că o modificare a tensiunii de excitație produce variații ale puterii reactive (Q), în timp ce puterea activă, după un regim tranzitoriu, revine la valoarea apropiată de cea inițială, iar tensiunea la borne (Fig. 4.27.a,b) înregistrează o ușoară creștere.

Fig 4.27.a. Variația tensiunii la borne (v_t) (u.a.)Fig 4.27.b. Variația relativă a tensiunii la borne (v_t) (u.r.)Fig 4.27.c. Variația relativă a puterii active (P) (u.r.)Fig 4.27.d. Variația relativă a puterii reactive (Q) (u.r.)**Cuplarea la borne a unui consumator rezistiv suplimentar**

Acest de regim de funcționare a fost simulat printr-o variație (creștere) a conductanței echivalente G_1 , abaterea acesteia (5%) fiind de formă treaptă.

4.6. - Modelarea generatorului de inducție cu două înfășurări statorice, i

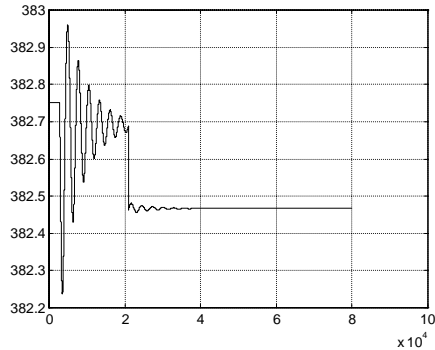


Fig 4.28.a. Variația tensiunii la borne (vt) (u.a.)

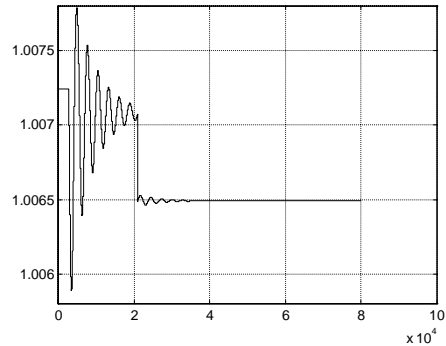


Fig 4.28.b. Variația relativă a tensiunii la borne (vt) (u.r.)

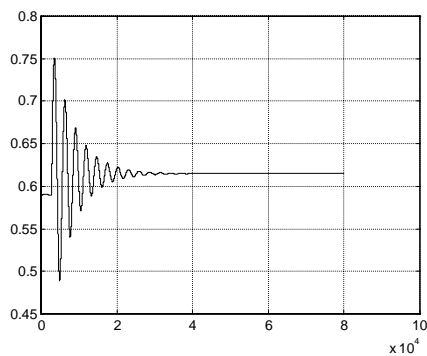


Fig 4.28.c. Variația relativă a puterii active (P) (u.r.)

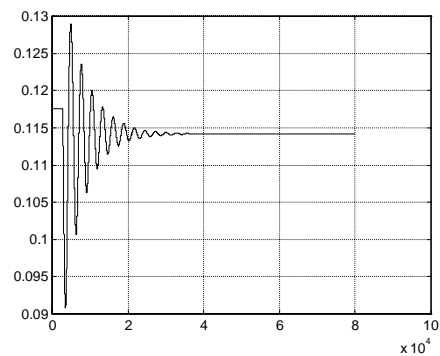


Fig 4.28.d. Variația relativă a puterii reactive (Q) (u.r.)

Tensiunea la bornele generatorului (Fig 4.28.a,b) scade în urma conectării unui consumator suplimentar. Si în acest caz, scăderea este una mică, fapt datorat variantei constructive ale mașinii de inducție speciale. Rezultatele obținute prin simulări validează modelul matematic neliniar de ordin 7, respectiv cel de ordin 4, fiind asemănătoare din punct de vedere calitativ dar cu mici diferențe, explicabile de altfel, din punct de vedere cantitativ. De asemenea, rezultatele coincid calitativ și fenomenologic cu cele obținute experimental în condiții de laborator, utilizând prototipul mașinii de inducție de construcție specială. Rezultatele experimentale au fost prezentate sintetizat în tabelul 4.1.

Observație: Mașina de inducție cu două înfășurări statorice prezintă avantajul unei variații relativ mici a tensiunii la borne pentru o variație relativ mare a sarcinii (când unghiul de decalare a înfășurărilor este $\alpha=180$). Această afirmație este valabilă, de regulă, în cazul mașinilor electrice care sunt proiectate pentru funcționare nominală în zona de tranziție spre saturația magnetică.

Variațiile celorlalte mărimi sunt descrise în figurile 4.28.c,d.

4.7. Concluzii.

În capitolul de față, s-au sintetizat o serie de modele matematice ale principalelor elemente componente ale agregatelor aeroelectrice, utilizabile pentru testarea prin simulare a unor structuri de conducere. Astfel, au fost dezvoltate modele ale: variației vitezei vântului, turbinei, sistemului de transmisie (amplificatorul de turație), generatorul electric (de inducție/sincron).

Cercetările au fost focalizate pe studiul mașinii electrice de inducție cu rotorul în scurtcircuit și două înfășurări statorice – de excitație și de sarcină, în regim de generator.

Generatorul de inducție reprezintă un echipament de baza al agregatelor aeroelectrice conectate la sistemele energetice de putere. Datorită rolului său activ în cadrul sistemului energetic (furnizarea de energie electrică, reglarea tensiunii și transferul de putere activă și reactivă), conducerea automată a generatorului de inducție prezintă un interes deosebit. Automatizarea agregatelor aeroelectrice (în care generatorul de inducție reprezintă elementul principal) concură la asigurarea optimizării producerii energiei electrice furnizate.

În scopul obținerii unor modele matematice viabile ale obiectului automatizat considerat (generatorul), au fost admise simplificări față de caracteristicile și fenomenele din mașina reală.

Având ca baza de pornire ecuațiile primare ale generatorului de inducție, sunt necesare următoarele etape în vederea obținerii pe cale analitică a unui model matematic al generatorului de inducție: transformarea variabilelor din sistemul de coordonate al fazelor, raportat la stator (a, b, c), în sistemul de coordonate d, q raportat la rotor, raportarea mărimilor rotorice la stator (reducerea mărimilor din mașina de inducție la nivelul mărimilor statorice), exprimarea tuturor variabilelor în unități relative.

A fost determinat modelul matematic al generatorului de inducție de construcție specială cu înfășurări statorice separate - de sarcină și excitație, acesta fiind validat prin simulare numerică, cât și experimental prin încercări de laborator. De asemenea, a fost determinat și modelul ansamblului generator – rețea de putere limitată.

Au fost validate, prin simulări numerice, modelul liniarizat de ordinul 7 și respectiv de ordinul redus 4, modele obținute utilizând un estimator de tip CMMP, modele utilizabile pentru studiul și analiza unor structuri de conversie diferite precum pentru sinteza sistemului de reglare a tensiunii la bornele generatorului prin comanda excitației.

5. METODE INDIRECTE DE DETERMINARE A VALORILOR UNOR MĂRIMI SPECIFICE AGREGATELOR AEROELECTRICE

5.1. Preliminarii.

Implementarea unor solutii de conversie a energiei eoliene, a parcurilor de agregate aeroelectrice, necesită o abordare tehnică și economică, acestea trebuind sa fie atât fiabile cât și ieftine. Din acest motiv este necesară considerarea unor strategii de conducere adecvate acestor deziderate. Principial, problema conducerii reclamă utilizarea senzorilor/traductorilor specifici (anemometre, etc), concomitent cu utilizarea de tehnici/metode de estimare/determinare a mărimilor specifice agregatelor aeroelectrice.

Considerând ca premiză costurile de achiziție și mai ales de întreținere a dispozitivelor dedicate, de măsurare a diferitelor informații din proces, precum și vulnerabilitatea acestora în cazul condițiilor meteorologice nefavorabile, se justifică studierea celei de a doua modalitati, și anume implementarea unor metode indirecte de determinare a valorilor marimilor specifice agregatelor aeroeetrice.

Obiectivele propuse ale acestui capitol sunt în principal următoarele:

- determinarea randamentului generatorului utilizând funcții de regresie de o singură variabilă;
- determinarea randamentului generatorului utilizând funcții de regresie de două variabile;
- studiu comparativ critic privind determinarea randamentului generatorului prin utilizarea funcțiilor de regresie de o variabilă, respectiv de două variabile;
- determinarea indirectă a turației și a vitezei vântului;
- identificarea modelului matematic al turbinei de vant utilizând rezultatele încercărilor / testelor efectuate în cadrul unui tunel aerodinamic, utilizând funcții de regresie de o variabilă, respectiv de două variabile;
- studiu comparativ critic privind determinarea modelului matematic al turbinei de vânt, prin utilizarea funcțiilor de regresie de o variabilă, respectiv de două variabile.

Se estimează că metodele studiate și propuse pot avea ca și efect simplificarea sistemelor de conducere a agregatelor aeroeetrice, și în consecință a reducerii costurilor de implementare. Mărimile de baza considerate, care intervin în conducerea agregatelor aeroelectrice sunt viteza vântului și turația.[60]

În cadrul acestui capitol se prezintă metode de determinare indirectă a celor două mărimi utilizând valorile obținute prin măsurarea directă a frecvenței, tensiunii, curentului, coeficientului de putere.

Determinarea valorilor momentane ale randamentului generatorului se bazează pe utilizarea unor determinări experimentale prealabile și a funcțiilor de regresie, fiind prezentate două metode de implementare. Prima metodă folosește

funcții de regresie de o singură variabilă sau valori tabelate ale randamentului, iar cea de a doua se bazează pe identificarea unei funcții de regresie de două variabile.

Metodele indirecte de determinare analizate în cadrul capitolului, ca și studiile de caz realizate, sunt utilizate pentru un generator electric de tip sincron (prototip) de 2,5kW, produs de firma Bega Electromotor Timisoara (România), respectiv pe un agregat aeroelectric cu ax vertical, echipat cu acest generator. Datele utilizate în cadrul metodelor studiate și implementate cu ajutorul software-ului specializat CurveExpert și respectiv Matlab, sunt cele obținute la testarea în tunel aerodinamic a turbinei, respectiv testele uzinale, pentru generator.

5.2. Determinarea randamentului generatorului sincron.

În cadrul acestui paragraf, se determina valorile momentane ale randamentului generatorului sincron, utilizând valori experimentale prealabile, prin intermediul funcțiilor de regresie de o singură variabilă, respectiv utilizând funcții de regresie de două variabile. Funcțiile de regresie sunt determinate cu ajutorul unui software specializat, CurveExpert, iar rezultatele grafice sunt prezentate cu ajutorul mediului Matlab.

5.2.1. Determinarea randamentului generatorului sincron utilizând funcții de regresie de o singură variabilă, și respectiv de două variabile

Funcția de regresie de o singură variabilă

Etapele implementării metodei:

- se utilizează ca și date de intrare, caracteristicile funcționării în sarcină pentru diferite turații ale generatorului sincron de 2.5kW (mașina prototip);
- pe baza datelor de intrare se determină o funcție care să permită calculul randamentului generatorului, aceasta fiind o funcție de 2 variabile (turație și curent);
- la măsurarea valorilor momentane ale marimilor ce intervin în calculul randamentului, se consideră ca și ipoteză simplificatoare, turația constantă (menținută de regulatorul de turație);
- pentru diferite perechi de valori I_i, η_i , corespunzător unor turații n_i , se determină o funcție de regresie $\eta=f(I)$, cu ajutorul software-ului specializat CurveExpert;
- pentru a se determina care dintre funcții va fi aleasă, se fac teste de validare utilizând mediul Matlab - în care se calculează randamentul pornind de la funcțiile de regresie identificate cu ajutorul software-ului CurveExpert;
- se alege funcția de regresie și se determină tabelul de prescriere pentru randamentul generatorului sincron, calculat cu funcții de regresie de o variabilă.[60]

În cadrul tabelului 5.1. sunt prezentate caracteristicile la funcționarea în sarcină pentru diferite turații ale generatorului sincron Bega Electromotor (România) de $P_n=2.5kW$.

5.2. Determinarea randamentului generatorului sincron.

Tabel 5.1. Caracteristici la funcționarea în sarcină pentru diferite turații ale generatorului sincron Bega Electromotor (România) 2.5kW – primul prototip.

n [rpm]	M [Nm]	U [V]	I [A]	P [W]	η
150	52.0	106.0	3.49	648.75	0.8440
150	64.5	105.0	4.61	810.00	0.8510
150	88.0	99.0	6.70	1147.50	0.8390
150	109.0	93.0	8.84	1417.50	0.8110
250	74.5	172.0	5.84	1755.00	0.8750
250	92.0	170.0	7.34	2126.25	0.8710
250	117.0	163.5	9.20	2621.25	0.8550
250	135.5	159.0	10.8	2970.00	0.8370
350	100.0	242.0	7.91	3296.25	0.8860
350	118.0	236.0	9.43	3870.00	0.8770
350	133.0	233.0	10.79	4275.00	0.8685
350	170.0	220.0	13.90	5276.25	0.8330

Observatie: In vederea obținerii unei mai mari precizii a metodelor ce vor fi expuse în continuare, de determinare a randamentului, se recomandă ca testele uzinale sa fie efectuate pentru mai multe valori ale turației generatorului.

Considerând ca și date de intrare, datele experimentale sintetizate în tabelul 5.1, se dorește determinarea unei funcții care să permită calculul randamentului $\eta = f(n, I)$.

Datorită faptului că unei turații din tabel îi corespund mai multe măsurători ale curentului, respectiv randamentului, pentru seturile de valori (I, η) care au aceeași turație, aceasta poate fi considerată constantă, ceea ce reprezintă o ipoteză simplificatoare.

Având în vedere că o funcție de regresie de 2 variabile este mult mai dificil de identificat, se consideră turația constantă și se calculează dependența $\eta_{ni} = f_i(I)$.

Astfel, pentru fiecare set de valori, corespunzător unei turații n din tabel, se determină o funcție de regresie utilizând perechi (I_i, η_i) : $\eta_{ni} = f_i(I)$, pentru turații constante.

De exemplu, se utilizează cele 4 linii din tabel, pentru care turația $n=250$ rpm, și pentru $I=0$ [A] se consideră $\eta=0$.

Se introduc valorile corespunzătoare pentru I și η în mediul CurveExpert, în vederea determinării dependenței $\eta(I)$, identificandu-se o serie de tipuri de funcții de regresie. Funcțiile care redau cel mai bine dependența sunt generate primele, calitatea aproximării scăzând de la primele înspre ultimele.

In vederea determinării funcției care va fi considerată, s-au efectuat teste de validare utilizand mediul Matlab, care calculează randamentul pornind de la funcțiile generate.

Rezultă pentru valoarea considerată a lui n , (250 [rpm]), cele mai bune funcții ca fiind cele menționate în tabel:

Tabel 5.2. Rezultatele obținute pentru randament cu funcțiile „Rational” și „Quadratic Fit” .

		η		
n	I	Valoarea inițială (experimentală)	Funcția „Rational”	Funcția „Quadratic Fit”
250	0	0	$1.329 \cdot 10^{-8}$	0.0052
250	5.84	0.875	0.8750	0.8370
250	7.34	0.871	0.8709	0.8972
250	9.2	0.855	0.8551	0.8911
250	10.8	0.837	0.8370	0.8108

Din tabelul 5.2, se observă că utilizând funcția „Rational” (5.1)

$$\eta = \frac{a + b \cdot I}{1 + c \cdot I + d \cdot I^2} \quad (5.1)$$

se obțin exact valorile experimentale considerate inițial: $a = -1.3294194e-008$; $b = 1.0828189$; $c = 0.90740109$; $d = 0.027199441$

Pentru alte valori ale turației vor rezulta valori diferite ale coeficienților a , b , c , și d .

În Fig. 5.1. sunt reprezentate grafic funcțiile „Rational” $\eta(I)$, pentru turațiile 150 rpm, 250 rpm și 350 rpm.

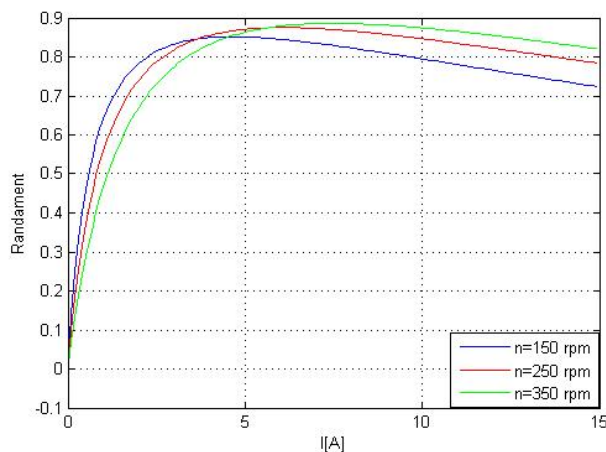


Fig 5.1. Reprezentarea randamentului în funcție de curent.

5.2. Determinarea randamentului generatorului sincron.

Folosind funcțiile determinate, se poate determina dependența $\eta(n)$, de această dată curentul fiind considerat constant. [104] [105] [106] [107][108]

Pentru exemplificare, se alege valoarea $I=9.2$ [A], acesta fiind curentul ce corespunde puterii nominale a generatorului sincron ($P_n=2.5$ [kW]). Se calculează randamentul pentru acest curent cu ajutorul funcției 5.1. corespunzătoare valorilor turației $n=150, 250$ și 350 [rpm]. Astfel, se obțin valorile prezentate în tabelul 5.3.

Tabel 5.3. Valorile randamentului calculate pentru $I=9.2$ [A]

I [A]	N [rpm]	η
9.2	150	0.8062
9.2	250	0.8551
9.2	350	0.8800

Având acest grup de valori pentru randament η și turație n , se poate determina funcția de regresie $\eta(n)$, cu ajutorul software-ului CurveExpert. Funcția de regresie care aproximează cel mai bine este funcția denumită „Quadratic Fit”.

Tabel 5.4 Rezultate obținute pentru randament cu funcția „Quadratic Fit”.

		η	
n	I	Valoare inițială (experimentală)	„Quadratic Fit”
150	9.2	0.8062	0.8062
250	9.2	0.8551	0.8551
350	9.2	0.8800	0.8800

Funcția identificată este:

$$\eta(n)_{I=9.2[A]} = a + b \cdot n + c \cdot n^2 \quad (\text{Quadratic Fit}) \quad (5.2)$$

unde coeficienții funcției de regresie au valorile: $a = 0.68785$; $b = 0.000969$; $c = -1.2e-006$.

În Fig. 5.2 sunt reprezentate grafic funcțiile $\eta(n)$ calculate pentru câteva valori semnificative ale curentului ($I=2,6,9$, respectiv 12 [A]).

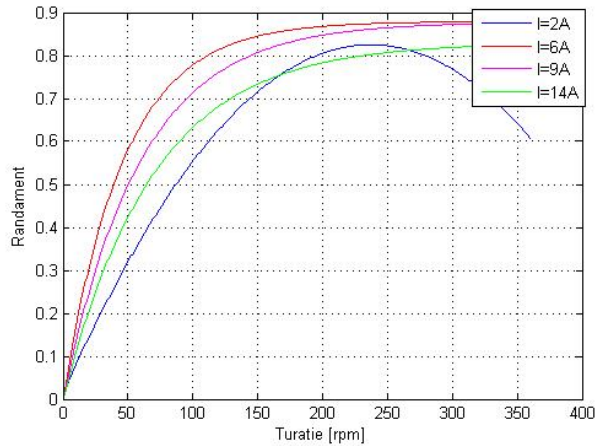


Fig 5.2. Reprezentarea randamentului în funcție de turație.

Cu ajutorul funcțiilor determinate pentru diferitele valori ale curentului I , se obține tabelul valorilor de prescriere pentru randamentul generatorului sincron, calculat cu funcții de regresie de o variabilă. [85][86][102][103]

Se calculează randamentele pentru curenți, de la valorile de 1 [A] la 14 [A] (valoarea cea mai mare a curentului experimental), cu pasul 0.1 [A], pentru fiecare turație în parte, utilizând funcțiile aferente (4.1).

Dintre rezultatele obținute, în tabelul 5.5., au fost prezentate doar cele corespunzătoare valorilor $I=1-3$ [A].

În Fig.5.3. au fost reprezentate grafic randamentele, în funcție de toate valorile pentru curenți ($I=1-14$ [A]), pentru turațiile $n=150, 250, 350$ [rpm].

Tabel 5.5. Valorile ale randamentului pentru diferite valori ale curenților.

$I \backslash n$	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
150	0.6641	0.6844	0.7023	0.7182	0.7323	0.7450	0.7564	0.7665	0.7757
250	0.5864	0.6106	0.6325	0.6524	0.6705	0.6871	0.7023	0.7162	0.7290
350	0.4952	0.5209	0.5447	0.5668	0.5874	0.6065	0.6244	0.6410	0.6566

$I \backslash n$	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
150	0.7914	0.7982	0.8042	0.8097	0.8141	0.8192	0.8233	0.8269	0.8302
250	0.7516	0.7616	0.7708	0.7794	0.7873	0.7946	0.8014	0.8077	0.8135
350	0.6848	0.6975	0.7095	0.7208	0.7313	0.7413	0.7506	0.7594	0.7676

5.2. Determinarea randamentului generatorului sincron.

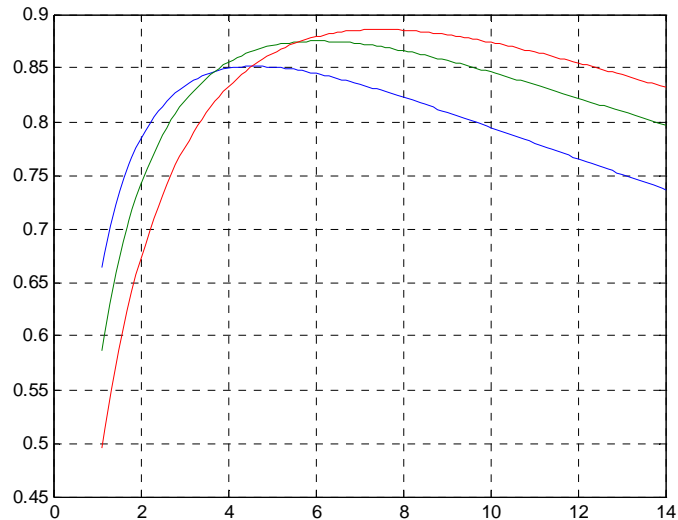


Fig. 5.3. Reprezentarea grafică a randamentelor generatorului, în funcție de curenți, pentru fiecare dintre turațiile $n=150, 250, 350$ [rpm].

Observatie: Pentru turație nu s-a dispus decât de 3 valori experimentale furnizate de firma producătoare. Pentru evaluarea corectă a rezultatelor metodelor propuse ar fi fost necesare furnizarea mai multor date experimentale pentru turații cuprinse în domeniul 0-350 [rpm] (cu un pas de 10 [rpm]).

Soluția propusă în cadrul paragrafului pentru determinarea randamentului generatorului sincron constă în obținerea unei funcții de regresie pentru fiecare curent în parte. [94][95][96][97][98]

Disponând de aceste funcții, se poate calcula randamentul pentru orice valoare a turației și pentru cei n curenți considerați (în exemplu $n=140$).

Se poate genera astfel un tabel de valori ale randamentului funcție de curent și turație, utilizabil în cadrul unor soluții de conducere „planificată” (planning control). [99][100][101]

În studiul efectuat s-au considerat 18 valori ale turației de la 20 la 360 [rpm], cu pas de 20 [rpm]. Cu aceste valori, prin interpolare se pot obține valori intermediare celor din tabel, așa cum apar în situații reale. Astfel, rezultă pentru randament un număr de 2520 valori.

În cadrul studiului efectuat s-a utilizat o funcție de regresie de forma:

$$\eta(n) = a + b \cdot \cos(c \cdot n + d) \quad (5.3)$$

Pentru a determina randamentul corespunzător unei turații intermediare celor din tabel, s-a folosit algoritmul Aitken (algoritm de interpolare). [1][2] Algoritmul este exemplificat pentru un curent de valoare $I=13.6$ [A]. Aceasta înseamnă că se furnizează ca date de intrare: valoarea turației pentru care este necesară determinarea randamentului și cei doi vectori corespunzători turațiilor de la 20 la 360, cu pasul 20, respectiv vectorul care conține cele 18 valori ale randamentului corespunzătoare turațiilor pentru curentul considerat ($I=13.6$ [A])

Algoritmul caută valoarea randamentului care corespunde cu cel mai mare grad de probabilitate turației considerate. Pentru exemplificare s-a considerat valoare turației $n=50$ [rpm].

Astfel, în această manieră, dispunând de o valoare pentru turație și una pentru curent, achiziționate on-line din proces, trebuie parcurși doi pași/etape în vederea determinării randamentului corespunzător:

- se alege o coloană din tabel, care corespunde curentului celui mai apropiat de cel determinat experimental;
- se aplică algoritmul de interpolare Aitken pentru coloana aleasă la pasul 1 și pentru valoarea turației momentane măsurată.

Funcția de regresie de două variabile

În vederea determinării unei funcții de regresie de două variabile se urmăresc pașii descriși în paragraful anterior (care se referă la calcularea funcțiilor de regresie de o variabilă), adaptând metoda acestui caz. Se consideră că dependența randamentului în funcție de curent și turație este reprezentată prin funcția de regresie liniară bidimensională:

$$\eta(n, I) = c_1 \cdot n + c_2 \cdot I + c_3 \quad (5.4)$$

Rezolvând setul de ecuații aferent, se calculează valorile parametrilor c_1, c_2, c_3 (utilizând o secvență Matlab dedicată). Astfel, rezultă în final pentru regresia liniară de două variabile expresia:

$$\eta(n, I) = 0.0003 \cdot n - 0.0078 \cdot I + 0.8362 \quad (5.5)$$

Pentru calculul valorilor parametrilor s-a utilizat metoda CMMP. [87][88][90][91]

5.2.2. Studiu comparativ privind utilizarea funcțiilor de regresie de o variabilă, respectiv de două variabile pentru determinarea randamentului generatorului.

Prima metodă care se referă la funcții de regresie de o variabilă, folosește un software specializat, CurveExpert, care are la dispoziție o bază de date în care caută funcția cea mai potrivită, pentru a descrie dependența dintre valorile experimentale pe care le primește ca parametri/date de intrare. Deoarece randamentul depinde de două variabile: turație și curent, prin această metodă dependența dintre ele nu se poate afla direct, fiind necesare mai multe etape intermediare, afectate fiecare de erori, în rezultatul final erorile fiind cumulative.

A doua metodă dezvoltată în cadrul paragrafului folosește funcții de regresie de două variabile, este mai rapidă, nu presupune determinarea unor funcții de regresie intermediare și consumă mai puțină memorie decât metoda anterioară. În cadrul metodei s-a aplicat metoda celor mai mici pătrate.

5.2. Determinarea randamentului generatorului sincron.

Tabel 5.6. Rezultatele obținute prin utilizarea funcțiilor de regresie de o variabilă (η^*) și respectiv de două variabile (η^{**}).

n [rpm]	I[A]	η experimental	η^{**}	η^*
150	3.49	0.844	0.854	0.775
150	4.61	0.851	0.845	0.785
150	6.70	0.839	0.828	0.775
150	8.84	0.811	0.812	0.760
250	5.84	0.875	0.865	0.950
250	7.34	0.871	0.853	0.946
250	9.20	0.855	0.839	0.926
250	10.8	0.837	0.827	0.900
350	7.91	0.886	0.879	0.859
350	9.43	0.877	0.867	0.853
350	10.79	0.868	0.857	0.843
350	13.9	0.833	0.832	0.810

Comparând rezultatele obținute prin cele două metode cu valorile inițiale experimentale din tabelul 5.1, se ajunge la concluzia predictibilă, că metoda care folosește funcții de regresie de două variabile este mai apropiată de valorile obținute experimental. Rezultatele sunt prezentate sintetizat în tabelul 5.6, unde η^{**} reprezintă randamentul calculat cu funcția de regresie de 2 variabile, iar η^* reprezintă randamentul calculat cu funcțiile de regresie de o variabilă.

5.3. Determinarea indirectă a turației generatorului sincron și vitezei vântului.

Determinarea turației generatorului sincron.

Turația generatoarelor sincrone poate fi determinată indirect, utilizând următoarea relație de calcul: [] []

$$n = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (5.6)$$

în care :

f – frecvența generatorului, măsurată cu ajutorul unui senzor/traductor de frecvență;

p – numărul de perechi de poli ai generatorului;

Determinarea vitezei vântului.

Folosind turația determinată anterior, valorile măsurate ale tensiunii U și curentului I , precum și puterea generatorului ($P=IU$), etapele *algoritmului de calcul ale vitezei momentane a vântului* sunt următoarele:

- se măsoară tensiunea, curentul și frecvența generatorului sincron;
- se determină turația generatorului cu relația (5.6);
- se caută în tabel, valoarea randamentului corespunzător turației calculate și a curentului măsurat;
- având disponibile toate valorile mărimilor de mai sus, viteza vântului se calculează din ecuația:

$$P_{el} = \rho \cdot \left(\frac{v^3}{2}\right) \cdot S \cdot \left[a \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n}{v}\right)^\alpha - b \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n}{v}\right)^\beta \right] \cdot \eta_G \quad (5.7)$$

în care notațiile au următoarele semnificații:

P_{el} - [W] - puterea de la ieșirea agregatului de vânt;

$\rho = 1.255 \left[\frac{kg}{m^3}\right]$ - densitatea aerului;

$v \left[\frac{m}{s}\right]$ - viteza vântului;

$S = 7.5 [m^2]$ - suprafața descrisă de paletel agregatului aeroelectric

$R = 1.25 [m]$ - raza descrisă de palete

n - turația generatorului [rpm]

$n_N = 250 [rpm]$ - turația nominală a generatorului

η_G - randamentul generatorului

$a = 0,384$; $b = 0.24$; $\alpha = 2$; $\beta = 2.3$ coeficienți constructivi ai turbinei considerate pentru studiul de caz.

$P_N = 2500 [W]$ - puterea nominală a generatorului

$U_N = 115 [V]$ - tensiunea nominală a generatorului

Utilizând algoritmul prezentat anterior se determină viteza momentană a vântului.

5.4. Determinarea modelului matematic a turbinei de vânt, utilizând rezultatele încercărilor / testelor efectuate în tunel aerodinamic.

În cadrul acestui paragraf, în vederea determinării modelelor matematice, s-au utilizat valori ale puterii la ieșirea turbinei $P_t [W]$, ale coeficientului puterii C_p și ale raportului dintre λ viteza periferică a paletelor și viteza vântului obținute în urma unor teste efectuate în tunel aerodinamic. Testele au fost efectuate asupra

5.5. Concluzii.

unui agregat aeroelectric echipat cu generator de 2.5 kW, având turbină cu ax vertical. [][]

Rezultatele testelor în tunelul aerodinamic sunt prezentate în tabelul.5.7.

Tabelul 5.7. Valorile C_p și λ pentru diferite viteze ale vântului, determinate experimental în tunel aerodinamic.

v [m/s]	C_p	λ		C_p	λ		C_p	λ
6	0	0		0.2	1.25		0.044	2.25
6	0.008	0.5		0.254	1.568			
6	0.11	1		0.2	1.886			
8	0	0		0.22	1.25		0.15	2
8	0.012	0.5		0.282	1.568		0.05	2.272
8	0.14	1		0.258	1.7497			
10	0	0		0.044	0.726		0.15	2
10	0.006	0.15		0.216	1.136		0.05	2.27
10	0.012	0.306		0.294	1.568			
10	0.036	0.5902		0.262	1.7497			
12.4	0	0		0.044	0.726		0.282	1.568
12.4	0.006	0.15		0.09	0.8853		0.258	1.7497
12.4	0.012	0.306		0.192	1.102		0.15	2
12.4	0.03	0.5902		0.212	1.204		0.05	2.27
14	0	0		0.044	0.726		0.25	1.3178
14	0.006	0.15		0.09	0.8853		0.282	1.568
14	0.012	0.306		0.2	1.079		0.258	1.7497
14	0.03	0.5902		0.232	1.204		0.15	2
16	0	0		0.124	0.9534		0.212	1.204
16	0.012	0.306		0.144	1		0.236	1.340
16	0.044	0.726		0.172	1.090			

Determinarea modelului matematic al turbinelor utilizând funcții de regresie de o variabilă.

Disponându-se de valorile din tabelul 5.7, se pot calcula funcțiile de regresie de o variabilă, pentru coeficientul de putere: $C_p(\lambda)$, $\lambda = u/v$, $u = 2\pi Rn$ pentru diferite viteze ale vântului.

Înlocuind aceste funcții în expresia puterii turbinei, se obține dependența $P_t(n)$.

Funcțiile de regresie corespunzătoare diferitelor valori ale vitezei vântului, determinate cu ajutorul programului CurveExpert, sunt prezentate în tabelul 5.8.

Tabel 5.8. Funcții de regresie $C_p(\lambda)$ pentru diferite viteze ale vântului.

$C_p(\lambda)_{v=6} = \frac{a + b \cdot \lambda}{1 + c \cdot \lambda + d \cdot \lambda^2}$ $a=0.0086281916 \quad c=-1.2495377$ $b=0.0090899558 \quad d=0.42508843$	$C_p(\lambda)_{v=8} = \frac{a + b \cdot \lambda}{1 + c \cdot \lambda + d \cdot \lambda^2}$ $a=0.015841062 \quad c=-1.2371792$ $b=0.0054188127 \quad d=0.41552594$
$C_p(\lambda)_{v=10} = \frac{a + b \cdot \lambda}{1 + c \cdot \lambda + d \cdot \lambda^2}$ $a=0.0042324166 \quad c=-1.3273722$ $b=0.016368579 \quad d=0.47867931$	$C_p(\lambda)_{v=12.4} = \frac{a + b \cdot \lambda}{1 + c \cdot \lambda + d \cdot \lambda^2}$ $a=0.0055847788 \quad c=-1.2971039$ $b=0.014587819 \quad d=0.45927257$
$C_p(\lambda)_{v=14} = \frac{a + b \cdot \lambda}{1 + c \cdot \lambda + d \cdot \lambda^2}$ $a=0.0032466933 \quad c=-1.3239272$ $b=0.017962476 \quad d=0.48036497$	$C_p(\lambda)_{v=16} = \frac{a + b \cdot \lambda}{1 + c \cdot \lambda + d \cdot \lambda^2}$ $a=-0.00091667635 \quad c=-1.4165624$ $b=0.021642369 \quad d=0.56707484$

Transformarea din $C_p(\lambda)$ în $P_t(n)$

Transformarea se face considerând: [] []

$A = 7.5m^2$ - aria descrisă de palete.

$\rho = 1.255kg/m^3$ - densitatea aerului

$R = 1.25$ m - raza la vârful paletei.

$$P_T = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \quad (5.8)$$

$$P_T = 4.70625 \cdot C_p \cdot v^3 \quad (5.9)$$

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (5.10)$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot R}{v} = \frac{3.925 \cdot n}{30 \cdot v} = 0.1308 \cdot \frac{n}{v} \quad (5.11)$$

Spre exemplificare, se prezintă cazul pentru viteza vântului de 8 [m/s].

$$P_T = C_p \cdot 0.5 \cdot 1.255 \cdot 512 \cdot 7.5$$

$$P_{T_{v=8}} = C_p \cdot 2409.6$$

$$C_p(\lambda)_{v=8} = \frac{0.015841062 + 0.0054188127 \cdot n}{1 - 1.2371792 \cdot n + 0.41552594 \cdot n^2}$$

$$P_T(\lambda)_{v=8} = 2409.6 \cdot \frac{0.015841062 + 0.0054188127 \cdot n}{1 - 1.2371792 \cdot n + 0.41552594 \cdot n^2}$$

$$\lambda_{v=8} = 0.1308 \cdot \frac{n}{8} = 0.0164 \cdot n$$

5.5. Concluzii.

$$P_T(n)_{v=8} = \frac{38.161 + 0.2141 \cdot n}{1 - 0.0203 \cdot n + 0.000117 \cdot n^2}$$

Dependențele $C_p(\lambda)$ și $P_t(n)$, determinate cu ajutorul funcțiilor de regresie de o variabilă, pot fi reprezentate grafic prin curbele : (Fig. 5.4., Fig. 5.5.)

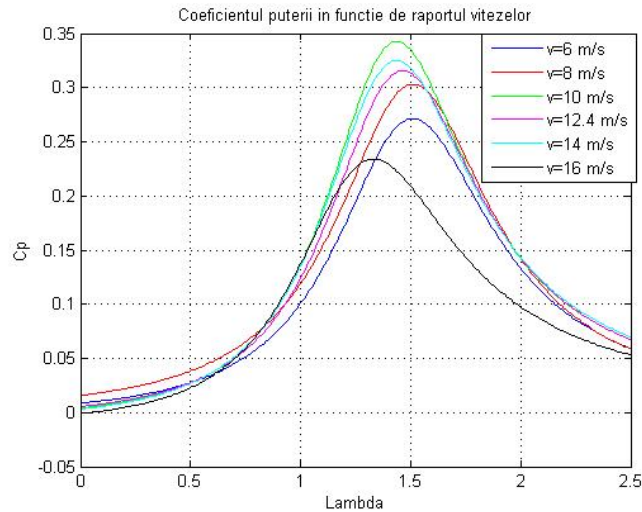


Fig. 5.4. Reprezentarea coeficientului puterii C_p în funcție de λ pentru diferite viteze ale vântului.

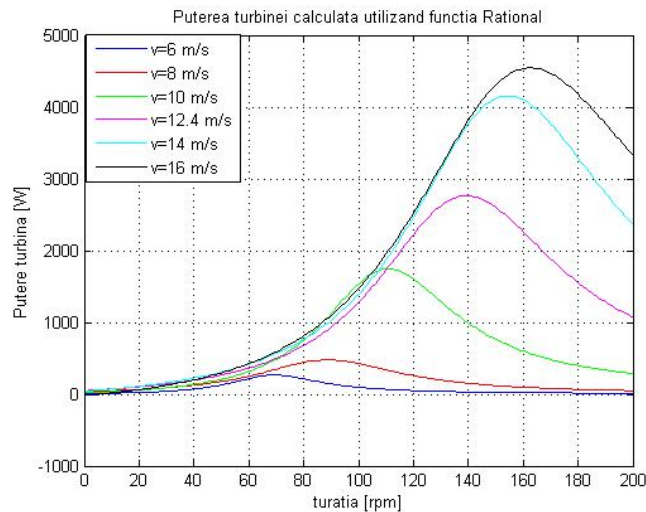


Fig. 5.5. Reprezentarea puterii turbinei P_t în funcție de turația, acesteia pentru diferite viteze ale vântului.

Determinarea modelului matematic al turbinelor utilizând funcții de regresie de două variabile.

Dezavantajul metodei anterioare constă în faptul că pentru fiecare viteză a vântului se obține un alt model matematic pentru turbină, întrucât acesta depinde atât de turația paletelor cât și de viteza vântului. Soluția propusă constă în determinarea unei funcții de regresie de două variabile: turație și viteză, care să fie valabilă pentru orice viteză a vântului.

Considerând și adaptând metodologia determinării funcției de regresie de două variabile utilizate pentru randament, s-a determinat un model matematic pentru turbină, aplicabil pentru orice viteză a vântului. [92][93]

Pentru funcția de regresie determinată prin aplicarea metodei celor mai mici pătrate s-a obținut relația:

$$C_p = 0.0029 * v + 0.077 * \lambda + 0.0087 \quad (5.12)$$

Rezultatele obținute sunt prezentate sintetizat în tabelul 5.9.

Tabel 5.9. Valorile experimentale ale lui C_p și cele obținute prin calcul.

v	λ	C_p experimental	C_p calculat
6	0.500	0.008	0.0646
6	1.250	0.200	0.1224
6	2.250	0.044	0.1993
8	0.500	0.012	0.0328
8	1.000	0.140	0.1089
8	1.568	0.282	0.1526
10	0.306	0.012	0.0613
10	0.726	0.044	0.0936
10	2.000	0.150	0.0492

Observatie: Intre rezultatele obținute pentru C_p utilizând expresia 5.12 și cele determinate experimental, rezultă diferențe semnificative, datorită faptului că dependența coeficientului puterii de turația paletelor și viteza vântului nu este o funcție liniară așa cum s-a considerat.

5.5. Concluzii.

În vederea implementării unor strategii de conducere (planificată, cu urmărirea extragerii maximului de putere, etc.), a agregatelor aeroelectrice, este necesară cunoașterea apriori a turației impuse/prescrise la fiecare viteză a vântului. Datorită faptului că măsurarea acestor două mărimi cu ajutorul senzorilor/traductorilor implică costuri suplimentare, reducerea fiabilității, etc., la agregatele aeroelectrice de putere mică (sub 100 kW), în special, este preferabilă determinarea indirectă a acestora pe baza altor mărimi accesibile: frecvența, tensiunea, curentul generatorului și respectiv factorul de putere. De asemenea este necesară și cunoașterea randamentului generatorului determinat în prealabil off-line și modelul matematic al turbinei. În acest fel, viteza vântului și turația generatorului se determină, relativ simplu, pe baza celorlalte mărimi măsurate.

5.5. Concluzii.

Strategia de conducere planificată presupune determinarea turației optime de lucru a generatorului în funcție de viteza vântului, astfel încât puterea obținută/extrasă din energia vântului, să fie maximă, precum și determinarea turației de siguranță în cazul unor viteze mari ale vântului. Valorile turației la care se face referire, se obțin prin intermediul convertorului de interfață cu rețeaua, care, comandat corespunzător încarcă/descarcă generatorul, respectiv turbina, modificând turația acestora până la valoarea prescrisă.

Determinarea turației optime presupune cunoașterea randamentului generatorului. Acesta este justificarea atenției acordate determinării randamentului generatorului.

În cadrul capitolului sunt prezentate două metode de calcul a randamentului. Ambele au fost dezvoltate utilizând date experimentale achiziționate în cadrul testărilor efectuate în laboratorul de încercări al producătorului prototipului de generator sincron - Bega Electromotor Timișoara. Deși randamentul depinde de două variabile, prima metodă utilizează funcții de regresie de o singură variabilă, identificate cu ajutorul unui software specializat, generând o funcție care modelează cu acuratețe dependența dată $\eta=f(n,I)$. Această primă metodă presupune memorarea unui tabel de dimensiuni relativ mari în memoria echipamentului de conducere (în cazul sistemelor „embedded” cu microcontroller, acestea dispunând de memorie limitată). În plus, în cazul în care se dorește găsirea unui randament care să corespundă unei valori de turație intermediare (față de cele prezentate în tabel, este necesară aplicarea unui algoritm de interpolare (de ex: algoritmul lui Aitken).

Cea de a doua metodă de determinare a randamentului generatorului se bazează pe identificarea unei funcții de regresie de două variabile, caz în care echipamentul de conducere are de efectuat un număr mai redus de calcule. Valorile obținute prin calcul și valorile experimentale de la care s-a pornit sunt apropiate, fiind mai precise decât cele obținute cu prima metodă. Necunoscând forma dependenței randamentului de cele două mărimi, funcția pentru care s-a aplicat metoda celor mai mici pătrate este o regresie liniară de două variabile. S-a considerat aceeași funcție de regresie liniară în cazul determinării unui model matematic pentru turbină pe baza rezultatelor experimentale obținute în tunel (fiind ineficientă utilizarea unui model matematic diferit, distinct pentru fiecare viteză a vântului).

Funcția de regresie liniară nu este cea mai potrivită pentru a descrie dependența puterii turbinei de viteza vântului și turația generatorului sau paletelor.

În concluzie, testele efectuate au validat soluțiile de determinare a randamentului generatorului sincron cu funcții de regresie de una/două variabile și a modelului matematic al turbinei de vânt, bazate pe funcții de regresie de o singură variabilă, utilizând rezultate ale testelor uzinale pentru generator, respectiv rezultate ale testelor efectuate în tunel aerodinamic, pentru turbină.

6. STRUCTURI DE CONDUCERE AUTOACORDABILA PENTRU COMANDA EXCITAȚIEI UNUI GENERATOR DE INDUCȚIE DE CONSTRUCȚIE SPECIALĂ.

6.1. Preliminarii.

Sinteza sistemelor de reglare automate convenționale (SRAC) are ca obiectiv satisfacerea unor condiții de performanță impuse, presupunându-se disponibile pentru procesul condus (PC) modele matematice (MM) deterministe, liniarizate în jurul unor puncte de funcționare, în ipoteza parametrilor constanți. În plus se consideră cunoscut un model matematic (MM) al semnalelor exogene care acționează asupra procesului. Astfel, rezultatul sintezei SRAC îl reprezintă un algoritm de reglare a cărui implementare pe un suport hardware (regulatorul) asigură dinamica dorită în prezența acțiunii perturbațiilor externe, în ipoteza că aceste perturbații nu modifică MM, efectul lor cumulându-se în efectul comenzii.

În condițiile în care atât MM al procesului cât și modelul semnalelor exogene se modifică în timpul funcționării procesului se justifică considerarea unor tipuri speciale de sisteme de reglare (conducere): sisteme de reglare (conducere) adaptive (SRAD/SCAD) sau pe scurt sisteme adaptive (SAD). Utilizarea pe scară largă a sistemelor de calcul numerice în sistemele automate a determinat un interes deosebit pentru sistemele discrete de conducere adaptivă. Deși problema conducerii adaptive nu este de dată foarte recentă [61][62], dezvoltarea și fundamentarea teoriei moderne a conducerii, au creat baza teoretică și practică fără de care implementarea unor sisteme adaptive de conducere este imposibil de realizat.

Sistemele adaptive necesită informație apriori redusă și își modifică structura și/sau parametrul pe măsură ce se obțin informații despre procesul condus. Deoarece estimarea parametrilor procesului se face permanent, sistemele adaptive sunt utilizabile chiar și în cazul proceselor neliniare sau variante în timp (cazurile de altfel întâlnite des în realitatea practică).

Literatura de specialitate prezintă o varietate foarte mare de tipuri de sisteme de conducere adaptivă [61][62][63]. Formularea și rezolvarea problemei de sinteză a SCAD impune o clasificare a acestor structuri adaptive, existând în acest sens o multitudine de posibilități/criterii de abordare. În cele ce urmează se propune o clasificare pornind de la tehnicile conducerii stohastice. Evident că prezintă interes sistemele care realizează adaptarea în bucla închisă, ele impunându-se ori de câte ori modificările structurale ale procesului nu pot fi observate direct, mărimile exogene nefiind accesibile măsurătorilor. Aceasta este de fapt situația practică în conducerea proceselor industriale complexe.

O posibilă clasificare împarte sistemele de conducere adaptivă în două mari categorii [63]:

a) Sisteme adaptive cu model etalon (SAME);

b) Sisteme adaptive autoacordabile sau autoadaptive (SAA).

În cadrul acestui capitol, s-a realizat proiectarea, sinteza și validarea prin simulare numerică a unor structuri de conducere autoacordabilă pentru comanda excitației unui generator de inducție cu înfășurări statorice separate de excitație și sarcină.

Au fost impuse ca și obiective principale următoarele problematice:

- prezentarea conceptului de sisteme de conducere adaptivă;
- aspecte privind sinteza sistemelor de conducere autoacordabile și a funcțiilor obiectiv tipice care se impun a fi rezolvate în cadrul acestora;
- sinteza unui regulator autoacordabil cu compensare după reacție și referință;
- efectuarea unor seturi de studii de caz comparative asupra structurii de conducere adaptive, considerând estimatorul de parametrii CMMP de ordinul 4 și 7, pentru diverse regimuri de funcționare și analiza calitativă a performanțelor acestora.

6.2. Sisteme de conducere adaptivă autoacordabilă (self-tuning).

Noțiunea de sistem adaptiv autoacordabil (SAAc) a fost formulată de către Kalman [63], principiul conducerii (reglării) autoacordabile fiind fundamentat de Astrom [64] și extins de către Clarke și Gawthrop [65][66], care au denumit clasă de regulatoare corespunzătoare - regulatoare autoacordabile (self-tuning controler).

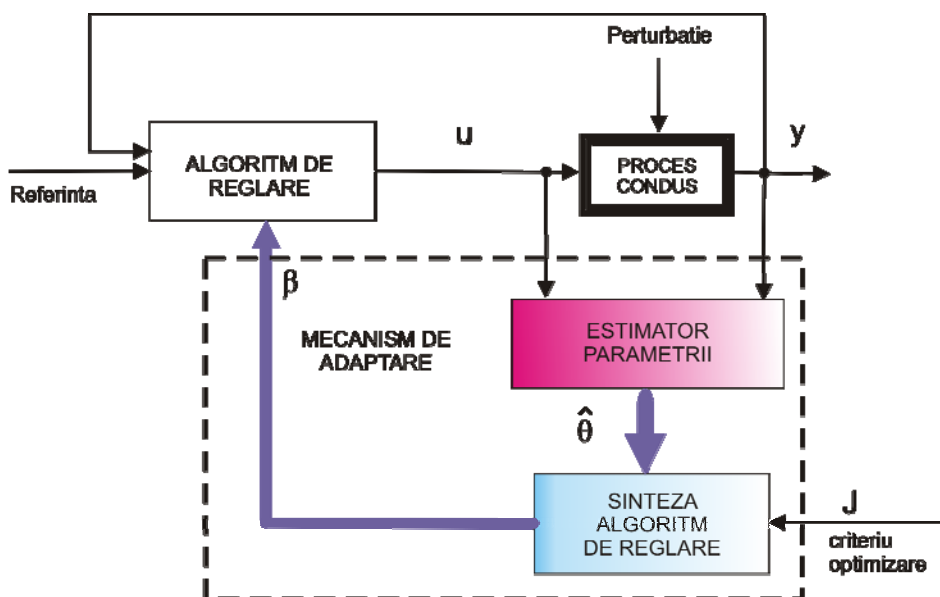


Fig. 6.1. Structura unui sistem adaptiv autoacordabil (SAAc).

În cadrul unui sistem adaptiv autoacordabil (SAAc), pornind de la informațiile disponibile prin măsurători, intrarea $u(t)$ și respectiv ieșirea $y(t)$, se construiește un model (structura acestuia stabilindu-se off-line) al procesului, estimându-se vectorul parametrilor $\hat{\theta}(t)$ la fiecare pas de eșantionare (utilizându-se o metoda de estimare on-line), valorile estimate fiind ulterior utilizate în sinteza on-line a algoritmului de reglare (Fig.6.1). Procedura de estimare a parametrilor procesului elimină nedeterminismul cauzat de necunoașterea lor apriorică.

Principiul SAAc are la bază o combinație între o procedură de estimare a parametrilor și o schemă de reglare (conducere), funcțiile de identificare și de sinteză a algoritmului de reglare putând fi izolate, rezultând un regulator autoacordabil (RAA) explicit, sau contopite într-o singură procedură de calcul direct al parametrilor regulatorului, rezultând un RAA implicit.

6.3. Considerații privind sinteza sistemelor de conducere adaptivă autoacordabilă.

Principial, sinteza unui sistem adaptiv autoacordabil presupune rezolvarea următoarelor problematici:

- construcția unui model matematic (MM) al procesului condus (PC) și al semnalelor exogene care acționează asupra acestuia;
- stabilirea obiectivelor conducerii și alegerea criteriului de performanță ce urmează a fi minimizat;
- selectarea procedurii de sinteză în funcție de tipul MM utilizat și de tipul criteriului de performanță adoptat;
- sinteza propriu-zisă a algoritmului de conducere adaptivă autoacordabilă;
- analiza proprietăților de convergență și stabilitate;
- analiza posibilităților de implementare hardware a algoritmului de conducere rezultat din sinteză.

În cazul în care modelul procesului este liniar, funcția de cost pătratică, iar mărimile exogene procese gaussiene, problema sintezei SAAc se reduce la o problemă de optimizare clasică, de tipul liniar pătratică gaussiană, regulatorul rezultat fiind unul optimal.

Avându-se în vedere, că procesele reale conțin neliniarități, că cerințele de performanță nu pot fi în general incluse într-un criteriu pătratic standard, iar mărimile exogene adesea nu sunt gaussiene, regulatoarele obținute prin sinteză sunt deci suboptimale.

Acesta este și cazul SAAc, pentru care modelele matematice ale proceselor conduse includ neliniarități determinate și de necunoașterea parametrilor procesului. Într-o astfel de situație, sinteza sistemului autoacordabil presupune determinarea prealabilă a unui model matematic liniar al procesului, obținut printr-o liniarizare în jurul unui punct fix de funcționare. Un astfel de model matematic (liniarizat) aproximează funcționarea procesului într-o vecinătate restrânsă a punctului de funcționare. La o modificare a punctului de funcționare, modelul liniar (considerat cu parametrii constanți) își pierde validitatea. Considerând că o liniarizare în orice punct al plajei de operare a procesului conduce la un model matematic invariant ca structură (în cazul liniar - invariant ca și ordin), rezultă că,

practic un nou punct de funcționare implică doar o modificare valorică a parametrilor acestuia.

Astfel, generalizând, se poate afirma că, caracterul neliniar al procesului poate fi aproximat suficient de bine printr-un model liniar cu parametri variabili în timp, fiecărui nou punct de funcționare fiindu-i specific un alt set de parametri.

Pentru elaborarea algoritmului de comandă, utilizând parametri obținuți printr-o procedură de estimare recursivă, se pot folosi algoritmi de comandă cu criteriu pătratic, pe un orizont de timp redus, pentru sisteme stochastice.

Pentru acest din urmă caz, în funcție de obiectivele impuse conducerii (prin alegerea corespunzătoare a funcției obiectiv) și de MM adoptat pentru proces și semnalele exogene, se pot dezvolta diferite metode de sinteză a strategiei de comandă adaptivă. [49]

În continuare se prezintă succint funcțiile obiectiv tipice care definesc principalele probleme ce se impun a fi rezolvate în cadrul sintezei SAAC pentru sisteme monovariabile (extinderea la cazul multivariabil reprezintă o chestiune formală):

P1 - Problema minimizării varianței ieșirii

Avându-se în vedere că ieșirea $y(t)$ a procesului este perturbată de zgomot stohastic, unul dintre obiectivele naturale ale conducerii îl constituie obținerea unei varianțe minime a acesteia. Strategia de comandă admisibilă se obține în acest caz minimizând un criteriu de forma :

$$J = E\{y^2(t+k)\} \quad (6.1)$$

unde, $E\{.\}$ este operatorul de mediere.

P2 - Problema de urmărire

Criteriul de performanță (5.1) poate fi modificat astfel încât strategia de comandă obținută să permită și rezolvarea problemei de urmărire. În acest caz obiectivul comenzii constă în minimizarea unui criteriu de forma:

$$J = E\{[y(t+k) - w(t)]^2\} \quad (6.2)$$

unde $w(t)$ reprezintă mărimea de referință cunoscută.

P3 - Problema penalizării comenzii

Algoritmii de comandă autoacordabili cu criteriu de varianță minimă sunt simpli dar nu sunt adecvați unor situații practice, deoarece nu iau în considerare valoarea amplitudinii comenzii care se aplică procesului. Astfel comanda poate prezenta valori inadmisibil de mari, care să împingă sistemul de reglare adaptivă în zona de instabilitate sau, în situațiile practice, să ducă la o saturare a elementului de execuție. Aceasta problemă poate fi rezolvată prin introducerea unei limitări a mărimii de comandă, considerând în funcția obiectiv un factor de penalizare a comenzii, notat cu ρ . În acest caz strategia de comandă se obține minimizând o funcție criteriu pătratică, care se obține prin adăugarea la funcția dată de relația (5.2) și a unei componente de minimizare a varianței comenzii:

$$J = E\{[y(t+k) - w(t)]^2 + \rho u^2(t)\} \quad (6.3)$$

6.4. Sinteza legii de conducere adaptive autoacordabile.

Sinteza unei legi generalizate de conducere adaptivă autoacordabilă constă în proiectarea unui RAA (deci a unui algoritm de reglare numerică), care să genereze o secvență de comandă $u(t)$, capabilă să asigure atingerea unor obiective aprioric impuse: minimizarea varianței ieșirii procesului supus acțiunii unor perturbații stochastice, rezolvarea problemei de urmărire în raport cu referința, respectiv asigurarea unei penalizări corespunzătoare a mărimii comenzii [49][67][68].

Cele menționate conduc la o structură de model a procesului descrisă de următoarea ecuație cu diferențe stochastice:

$$A(z^{-1})y(t) = q^{-k} B(z^{-1})u(t) + C(z^{-1})e(t) + d \quad (6.4)$$

unde A,B,C sunt polinoame stabile (neavând nici un factor comun), în operatorul de întârziere z^{-1} (întârziere cu o perioadă de eșantionare), de forma:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n} \\ \hat{B}(z^{-1}) &= \hat{b}_0 + \hat{b}_1 z^{-1} + \hat{b}_2 z^{-2} + \dots + \hat{b}_m z^{-m} \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_n z^{-n} \end{aligned}$$

iar: $y(t)$, $u(t)$ - ieșirea respectiv intrarea procesului;
 $e(t)$ - zgomot stohastic de medie nulă $E[e(t)] = 0$ și varianță $E[e^2(t)] = \sigma^2$ (necorelat cu celelalte semnale);
 d - constantă care descrie ieșirea în regim staționar a procesului pentru o intrare nulă;
 k - timpul mort ca număr întreg de perioade de eșantionare.

Strategia de comandă implică minimizarea unei funcții criteriu pătratică cu orizont de timp redus, de forma generală, dată de relația (6.5) [49][66][67]:

$$J = E\left\{ \left[P(z^{-1})y(t+k) - R(z^{-1})w(t) \right]^2 + \left[Q'(z^{-1})u(t) \right]^2 \right\} \quad (6.5)$$

unde $w(t)$ - referința sistemului, $P(z^{-1})$, $R(z^{-1})$ și $Q'(z^{-1})$ polinoame (în operatorul de întârziere z^{-1}) care pot fi particularizate în funcție de obiectivele impuse conducerii adaptive.

6.5. Regulator autoacordabil cu compensare după reacție și referință.

Funcția criteriu de minimizat în acest caz are expresia:

$$J = E \left\{ [y(t+1) - w(t)]^2 + [Q(z^{-1})[u(t) - u_r(t)]]^2 \right\} \quad (6.6)$$

unde: $w(t)$ - referința
 $u_r(t)$ - comanda în regim staționar

Dezvoltând, se obține comanda:

$$u(t) = \frac{C(z^{-1})w(t) - F(z^{-1})y(t) + Q(z^{-1})u_r(t) - d}{B(z^{-1}) + Q(z^{-1})C(z^{-1})} \quad (6.7)$$

Pentru $d=0$ și $C(z^{-1})=1$ se obține (Fig. 6.2):

$$u(t) = \frac{w(t) - F(z^{-1})y(t) + Q(z^{-1})u_r(t)}{B(z^{-1}) + Q(z^{-1})} \quad (6.8)$$

O alegere convenabilă pentru expresia polinomul $Q(z^{-1})$ este $Q(z^{-1})=\rho$, (considerarea unei compensări după referință asigurând eliminarea erorii de regim staționar), rezultând în acest caz:

$$u(t) = \frac{w(t) - z[1 - A(z^{-1})]y(t)}{B(z^{-1}) + \rho} + \frac{\rho}{B(z^{-1}) + \rho} u_r(t) \quad (6.9)$$

În regim staționar $y(t)=w(t)$ și deci $A(z^{-1})w(t) = z^{-1}B(z^{-1})u_r(t)$ rezultând:

$$u_r(t) = q \frac{A(z^{-1})}{B(z^{-1})} w(t) \quad (6.10)$$

Deci $u_r(t) = kw(t)$, unde $k = A(1)/B(1)$

Dacă $w(t)=ct.$, rezultă $u_r(t)=ct.$, iar $1/k$ este coeficientul de amplificare al procesului în regim staționar.

Deoarece pentru $w(t)$ sunt cunoscute apriori variațiile în timp, f poate fi determinat pentru diverse puncte de funcționare ($k=f(w)$). [66]

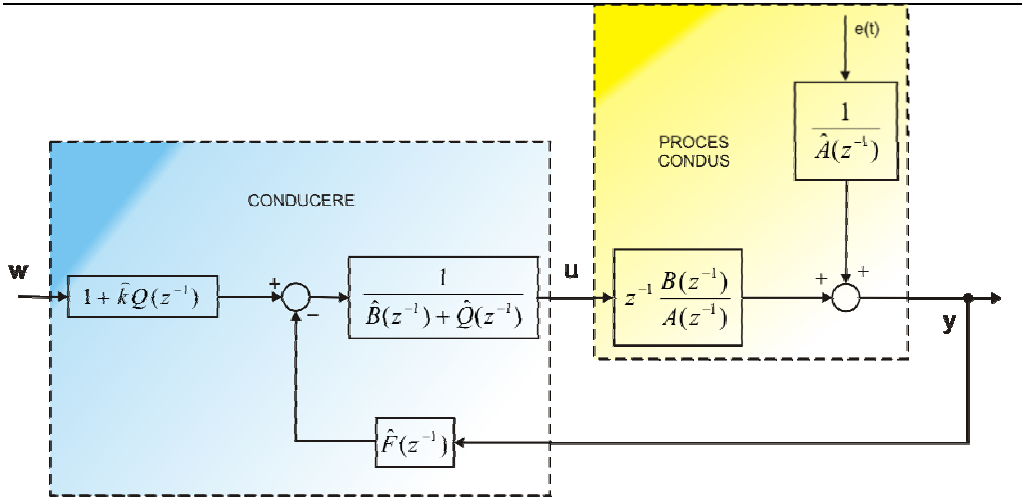


Fig. 6.2 Structura generală a sistemului adaptiv ($d=0, C(z^{-1})=1$) [][]

O situație aparte o constituie cea în care pentru o referință constantă ($w=ct.$), procesul nelinier evoluează dintr-un regim staționar în alt regim staționar. În acest caz $u_r(t)$ nu mai este constant, parametri procesului nelinier fiind și ei variabili în timp și implicit amplificarea unui astfel de proces este variabilă în timp. Rezultă că și factorul k este variabil în timp și ar trebui estimat în orice moment de timp.

Soluția propusă este

$$\hat{k} = \hat{A}(1) / \hat{B}(1),$$

deci trebuie calculat permanent factorul \hat{k} pe baza estimațiilor parametrilor procesului. Această soluție satisface și situația în care referința este variabilă în timp.

Ca și în cazul precedent, ținând cont că parametri care intervin în legea de comandă sunt practic estimații ale parametrilor procesului, legea de comandă se poate rescrie:

$$u(t) = \frac{w(t) - z[1 - \hat{A}(z^{-1})]y(t)}{\hat{B}(z^{-1}) + \rho} + \frac{\rho \hat{k}}{\hat{B}(z^{-1}) + \rho} w(t) \quad (6.11)$$

unde prin „^” s-au notat estimațiile mărimilor respective.

Relația (5.14) poate fi rescrisă, Fig. 6.2 obținându-se particularizarea $Q(z^{-1})=\rho$:

$$u(t) = \frac{-z[1 - \hat{A}(z^{-1})]y(t)}{\hat{B}(z^{-1}) + \rho} + \frac{1 + \rho \hat{k}}{\hat{B}(z^{-1}) + \rho} w(t) \quad (6.12)$$

Factorul estimat notat:

$$\hat{k}_{comp} = 1 + \rho \hat{k} = 1 + \rho \frac{\hat{A}(1)}{\hat{B}(1)} \quad (6.13)$$

a fost denumit parametru de compensare (după referința), și după cum se poate observa din Fig. 6.2 asigură o compensare a valorii referinței $w(t)$ în scopul eliminării unei eventuale erori de regim staționar.

6.6. Studii de caz.

În cadrul paragrafului s-au efectuat studii de caz comparative ale structurii de conducere adaptive autoacordabile considerate pentru regimuri de funcționare ale generatorului de inducție cu două înfășurări .

În Fig. 6.3. și Fig. 6.4., se prezintă schemele bloc Simulink ale structurii de conducere adaptivă autoacordabilă cu compensare după reacție și referința (cazurile de ordin 7, respectiv 4), proiectate și elaborate pe baza minimizării funcției criteriu J . Simulările au fost efectuate în mediul Matlab-Simulink.

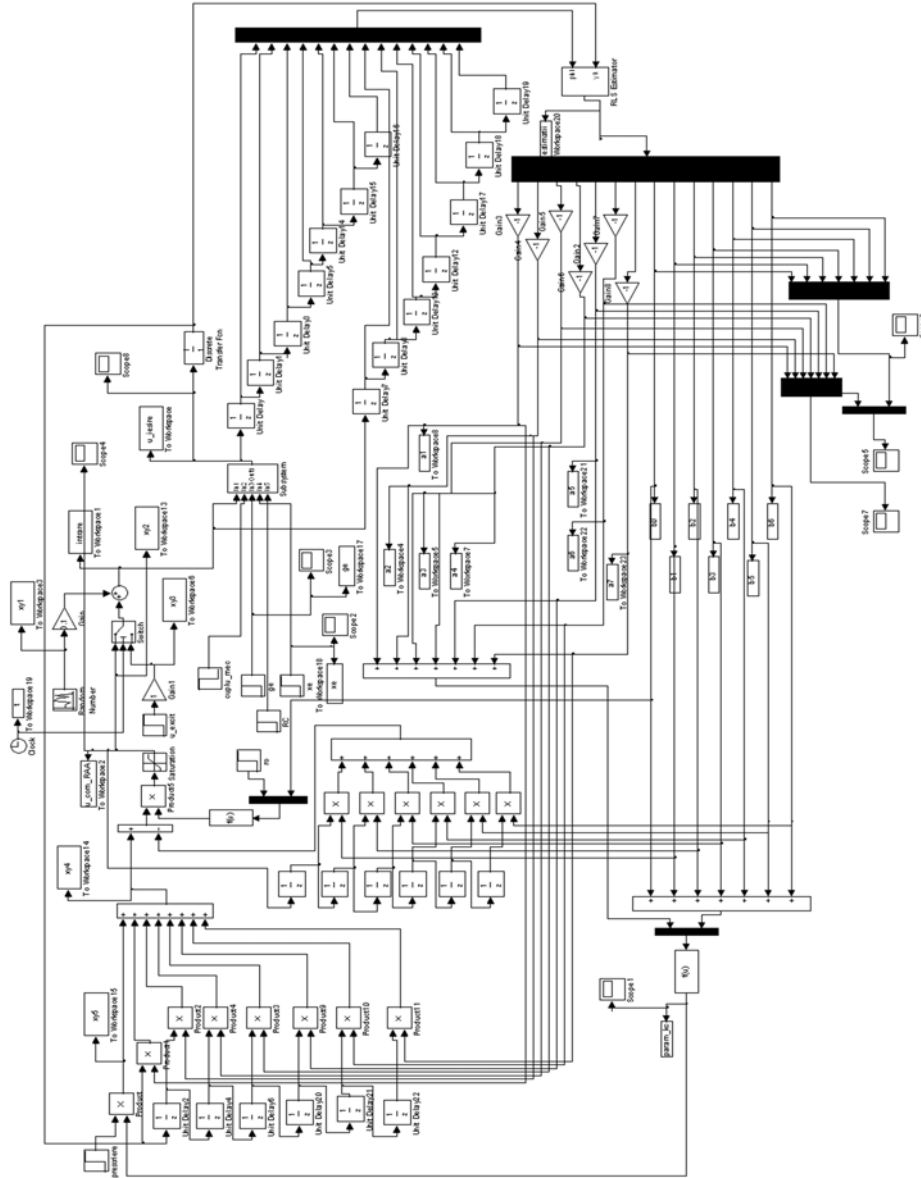


Fig. 6.3. Schema bloc Matlab-Simulink corespunzătoare modelului de ordin 7.

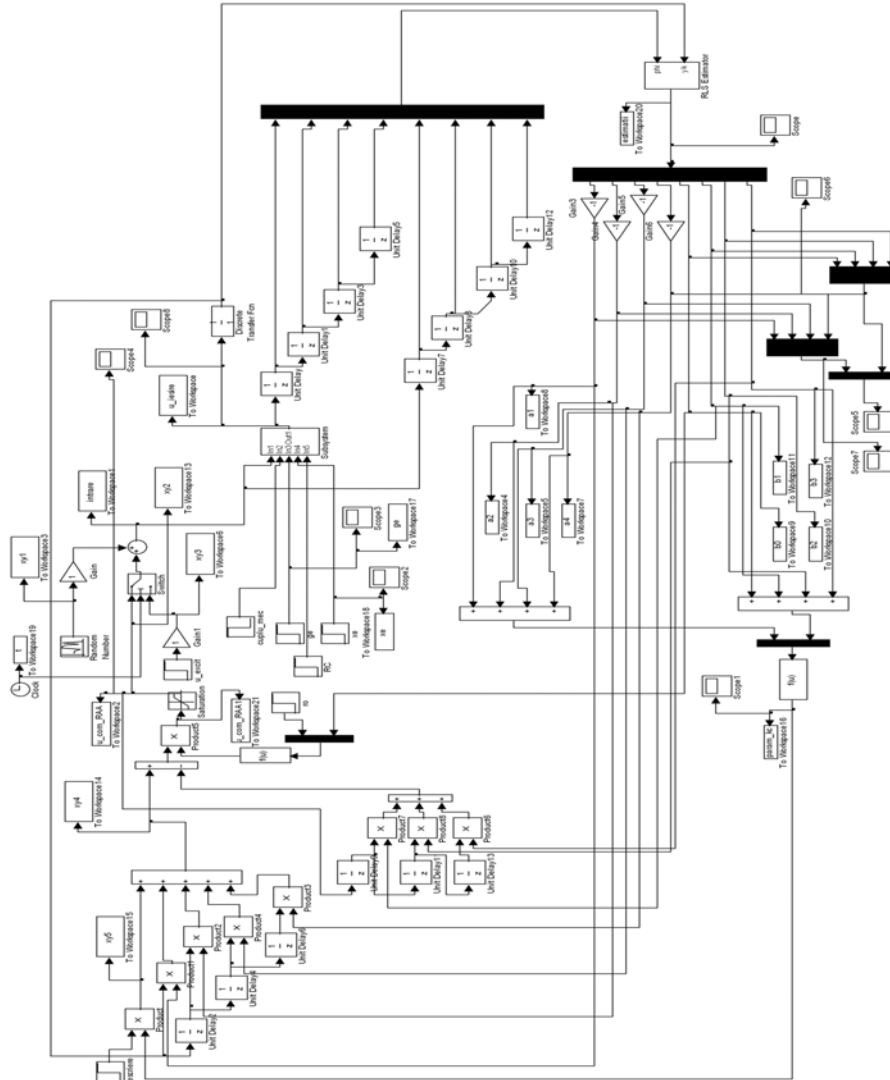


Fig. 6.4. Schema bloc Matlab-Simulink corespunzătoare modelului de ordin 4.

În tabelul 6.1. sunt prezentate sintetic cazurile de studiu efectuate. Studiile de caz notate cu A_i ($i=1...4$), sunt cele aferente modelului liniarizat de ordinul 7, iar cele notate cu B_j ($j=1...7$) sunt cele care se referă la modelul de ordinul 4 (modele utilizate în sinteza structurilor de conducere adaptivă autoacordabilă).

Coloanele tabelului au următoarele semnificații: Ordin – ordinul modelului matematic liniarizat; p – valoarea factorului de penalizare al comenzii; λ – valoarea factorului de uitare al estimatorului CMMP; ultimele două coloane reprezintă abaterea cuplului mecanic (specifică unor regimuri de încărcare/descărcare de

putere activă), respectiv abaterea rezistenței consumatorului cuplat la borne (încărcare/descărcare de putere reactivă), ambele exprimate procentual.

Se poate observa din tabel că, practic aceste ultime două coloane prezintă perturbațiile care acționează asupra generatorului de inducție, determinând regimul de funcționare al acestuia.

Tabel 6.1. Tabel sintetizator privind studiile de caz efectuate.

Caz de studiu.	Ordin	ρ	λ	Abatere cuplu mecanic [%]	Abatere rezistența consumator [%]
A1.	7	0.001	0.95	-10	constant
A2.		0.001	0.99	-10	constant
A3.		0.01	0.995	constant	+5
A4.		0.01	0.998	constant	+5
B1.	4	0.001	0.99	-10	constant
B2.		0.005	0.998	-10	constant
B3.		0.005	0.995	constant	+5
B4.		0.01	0.995	constant	+5
B5.		0.01	0.995	+10	constant

Pentru cele două categorii de studii de caz efectuate (pornind de la un model de ordin 7, respectiv ordin 4), primele simulări au considerat un factor de penalizare a comenzii ρ de valoare mică, în vederea obținerii unui minim al funcției criteriu de din punct de vedere al erorii ieșirii reglate ($\rho=0$ ar conduce la o valoare optimă, dar sistemul de conducere în aceste condiții prezintă instabilitate, comanda fiind excesiv de mare). Variația celui de al doilea parametru, factorul de uitare λ , a pornit de la valori mici (memorie redusă a estimatorului), crescând succesiv cu fiecare test.

Studiile de caz efectuate consideră generatorul de inducție cu două înfășurări statorice, cuplat la o rețea de putere finită, având un consumator local conectat la bornele acestuia.

În cadrul simulărilor bazate pe strategia de conducere adaptivă autoacordabilă propusă, mărimile analizate sunt:

- tensiunea la bornele generatorului (mărima reglată);
- tensiunea de excitație (ieșirea regulatorului);
- evoluția în timp a parametrilor estimați ai polinoamelor $A(z^{-1})$ și $B(z^{-1})$;
- evoluția în timp a parametrului de compensare (calculat pe baza parametrilor estimați ai polinoamelor $A(z^{-1})$ și $B(z^{-1})$).

Strategia de conducere autoacordabilă sintetizată pe baza minimizării criteriului de optimizare J (relatia 6.6), realizează o compensare atât după reacție, cât și după referința sistemului. Componenta de compensare după reacție, realizează minimizarea erorii de reglare, dar nu reușește anularea completă a acestei erori (sistem cu statism) datorită lipsei unui componente integratoare. Componenta compensatoare după referința este cea care asigură o eroare de regim staționar nulă, menținând automat un nivel corespunzător (mai ridicat sau mai scăzut) al referinței sistemului realizând o ponderare a acesteia. Diferența dintre referința compensată și ieșirea predictată nu este nulă, această eroare de regim

staționar în raport cu referința compensată fiind egală chiar cu eroarea de regim staționar a sistemului, care trebuie anulată.

Studiile au fost realizate pentru regimuri de funcționare specifice GI, urmărind atât performanțele structurii de conducere din punct de vedere al cerințelor impuse de specificul procesului condus, cât și aspectele legate de problema acordării regulatorului autoacordabil (ρ , λ), în vederea obținerii unor indicatori de calitate cât mai buni. [89]

Studiile întreprinse au impus necesitatea alegerii unui factor de penalizare a comenzii de valoare suficient de mare, pentru a preveni intrarea în saturație a elementului de execuție (menținând o variație a comenzii în limite admisibile). Procesul condus este afectat de un zgomot stocastic, de medie nulă și $\sigma^2=10^{-6}$. Deși, în general zgomotul se consideră aditiv în ieșire (rețeaua perturbând în permanență tensiunea de la bornele generatorului), în cadrul simulărilor acesta a fost aplicat aditiv pe mărimea de comandă. Astfel, se rezolvă problema unor eventuale instabilități numerice ale estimatorului CMMP, acesta necesitând o intensă excitabilitate a semnalelor.[49] [66]

În cadrul tuturor simulărilor, pe axa abscisei s-a considerat timpul exprimat în secunde, iar pe axa ordonatelor s-a considerat mărimea analizată (tensiuni [V], respectiv parametri – mărimi adimensionale). De asemenea, toate simulările au folosit modelul nelinier de ordin 7 al procesului (GI) asigurând astfel o acuratețe cât mai mare a testelor efectuate.

Testul A1.

Condiții de simulare: $\lambda=0.95$, $\rho=0.001$, abatere cuplu -10%.

În acest caz, se poate observa că, mărimea de ieșire reglată (Fig.6.5.a) prezintă o variantă de amplitudine relativ mare (până la 12 [V]), respectiv regimul tranzitoriu este de lungă durată (aprox. 4 sec). De asemenea mărimea de comandă (Fig.6.5.b) înregistrează o variație în amplitudine de valori mari (aproape 100% față de valoarea nominală). Evident rezultatele sunt nesatisfăcătoare, și asta datorită faptului ca factorul de penalizare al comenzii este prea scăzut.

Al doilea parametru, factorul de uitare, s-a considerat de valoare relativ mică, ceea ce conduce la o evoluție mai lentă a parametrului de compensare k_{comp} spre o valoare de regim staționar (Fig. 6.5. e), respectiv la un regim tranzitoriu de durată mai lungă.

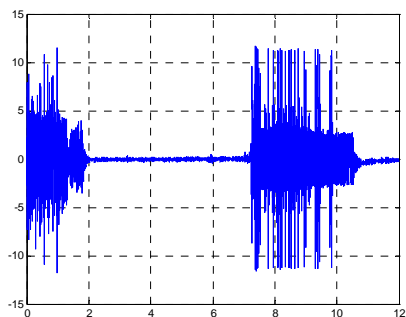


Fig.6.5.a. Abaterea tensiunea la borne (ieșire reglată).

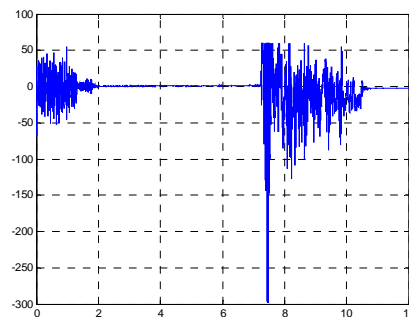


Fig.6.5.b. Mărimea de comandă.

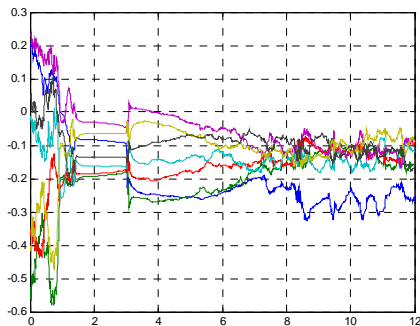


Fig.6.5.c. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului A.

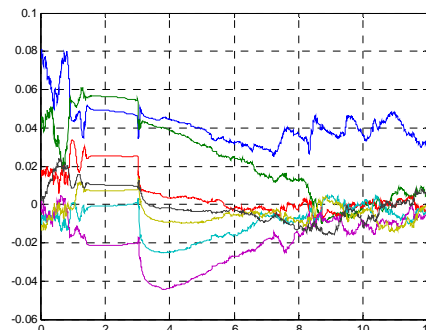
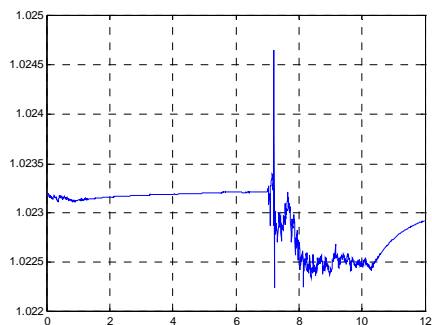


Fig.6.5.d. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului B.

Fig.6.5.e. Evoluția parametrului k_{comp} .

În Fig 6.5. (c și d), sunt reprezentate evoluțiile în timp ale valorilor parametrilor estimați ai polinoamelor A și B, corespunzătoare modelului de ordin 7.

Se poate observa că evoluția în timp a acestora nu este constantă, datorită faptului că estimarea parametrilor se realizează în buclă închisă, în cadrul structurii de conducere (apar inclusiv constrângeri datorate algoritmului de reglare).

În acest context, valorile parametrilor nu sunt relevante ei nefiind marcați explicit pe grafic (observația este valabilă pentru toate testele efectuate în continuare).

Important este faptul că, pe baza valorilor estimate, s-a calculat un parametru de compensare: $k_{comp}=1+k$, unde k este **coeficientul de amplificare estimat al procesului**.

Din Fig.6.5.e. se observă evoluția constantă a lui k_{comp} în regimuri staționare, evoluție care poate constitui un criteriu privitor la setarea factorului de uitare λ .

Studiile efectuate (multe dintre ele neprezentate explicit în lucrare) au arătat că o scădere prea mare a factorului de uitare λ , poate conduce la apariția unei instabilități numerice a estimatorului CMMP.

Testul A2.

Condiții de simulare: $\lambda=0.99$, $\rho=0.001$, abatere cuplu -10%.

Rezultatele studiului precedent, au relevat un regim tranzitoriu de lungă durată și o variantă importantă a mărimilor analizate.

Durata regimului tranzitoriu este influențată după cum se va constata, de evoluția parametrilor estimați ai polinoamelor A și B și implicit de valoarea factorului de uitare λ . În acest sens, se consideră o valoare mai mare a factorului de uitare λ

(„memorie mai puternică” a estimatorului), menținând momentan aceeași valoare pentru factorul de penalizare a comenzii. Rezultatele prezentate în graficele din Fig.6.6.a și b indică o ameliorare a performanțelor în sensul unei scăderi sensibile a duratei regimului tranzitoriu. De asemenea, parametrul de compensare se stabilizează mai rapid spre o valoare de regim staționar (Fig.6.6.e). Totuși îmbunătățirile obținute nu sunt semnificative, impunându-se și o modificare (creștere) a valorii celui de al doilea parametru - factor de penalizare a comenzii.

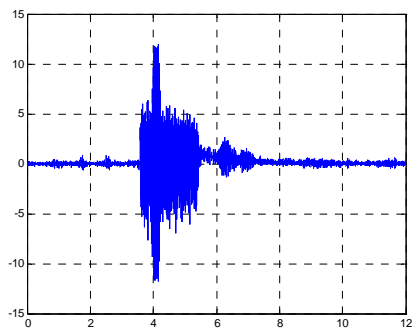


Fig.6.6.a. Abaterea tensiunea la borne (ieșire reglată).

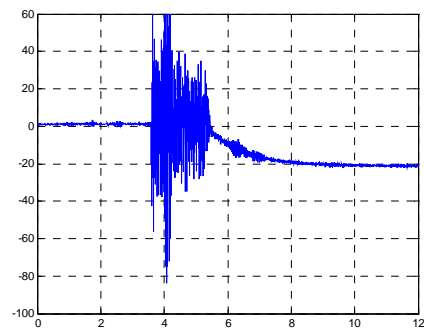


Fig.6.6.b. Mărimea de comandă.

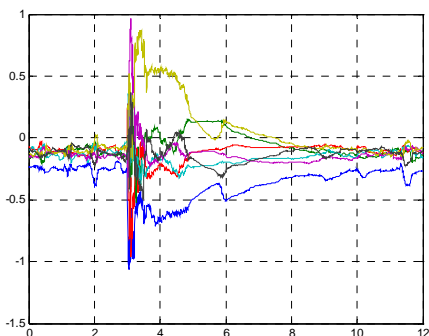


Fig.6.6.c. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului A.

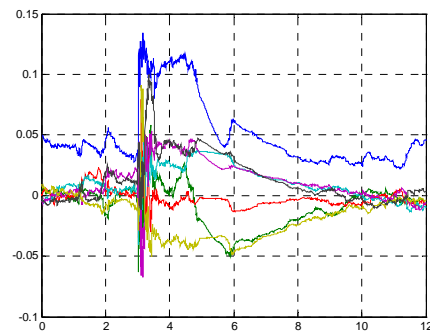


Fig.6.6.d. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului B.

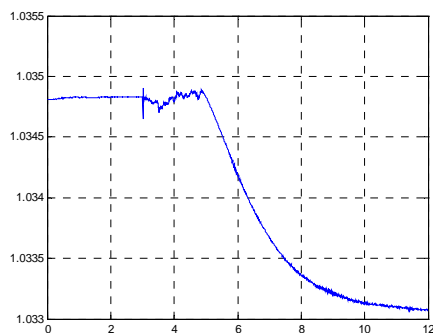


Fig.6.6.e. Evoluția parametrului k_{comp} .

Testul A3.

Condiții de simulare: $\lambda=0.995$, $\rho=0.01$, abatere rezistența consumator +5% (regimul corespunde unei descărcări de putere reactivă).

Specificul acestui studiu de caz (comparativ cu cel anterior) îl constituie creșterea factorului de penalizare a comenzii ($\rho=0.01$), în scopul reducerii variației acesteia.

Ieșirea reglată prezintă în acest caz o variantă mai mică (Fig.6.7.a), inclusiv un supreglaj de amplitudine mai redusă. S-a realizat de asemenea și o ușoară creștere a factorului de uitare al estimatorului ($\lambda=0.995$), având ca efect o evoluție mult mai rapidă a parametrului de compensare spre o valoare de stabilizare, specifică unui regim staționar (Fig. 6.7, d). cât și la scăderea timpului de reglare (vezi comparativ Fig. 6.6.a și 6.7.a).

În Fig. 6.7.c se prezintă evoluția procesului de estimare a parametrilor polinoamelor A și B.

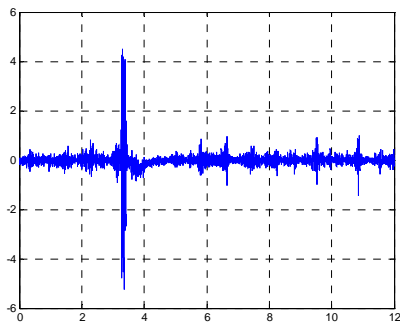


Fig.6.7.a. Abaterea tensiunea la borne (ieșire reglată).

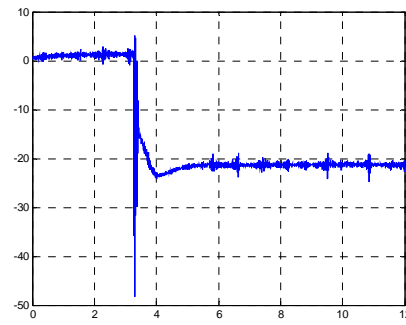


Fig.6.7.b. Mărimea de comandă.

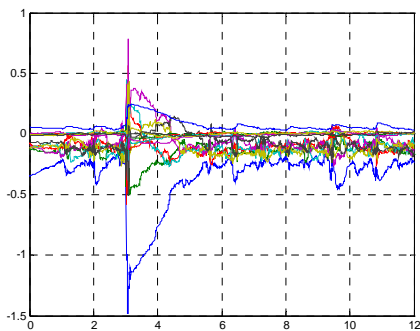


Fig.6.7.c. Evoluția parametrilor A și B.

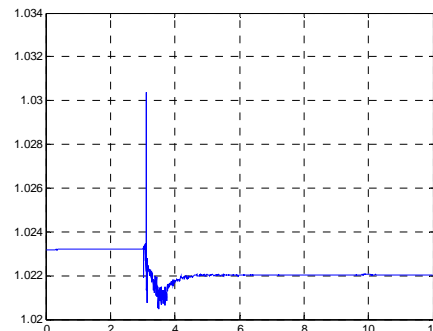


Fig.6.7.d. Evoluția parametrului k_c .

Performanțele corespunzătoare acestui studiu de caz sunt mult mai bune decât cele obținute în cazurile precedente (variația tensiunii la borne se încadrează în plaja de -4 [V] până la +4 [V], față de -12 [V] până la +12 [V]) (cazurile A1 și A2)

Testul A4.

Condiții de simulare: $\lambda=0.998$, $\rho=0.01$, abatere rezistența consumator +5%.

Acest ultim studiu (afereent structurii de reglare sintetizate pe baza modelului liniarizat de ordin 7) considera o creștere suplimentară a factorului de uitare λ (menținând factorul de penalizare a comenzii la o valoare $\rho=0.01$), ceea ce a condus la cele mai bune rezultate în cazurile anterioare.

Se poate observa în acest caz că evoluția ieșirii reglate prezintă o variantă mică (Fig.6.8.a), concomitent cu un suprareglaj mic (un vârf de amplitudine de max 3[V]), respectiv mărimea de comandă (Fig.6.8.b) are o variație în limite acceptabile (amplitudine maximă de aprox. 20 [V]). De asemenea timpul de reglare este foarte redus.

Valoarea mai mare a factorului de uitare, care conduce la o evoluție mai rapidă a parametrului de compensare spre o valoare de regim staționar (Fig. 6.7, d). În Fig. 6.7. c și d sunt prezentate evoluțiile parametrilor polinoamelor A și B.

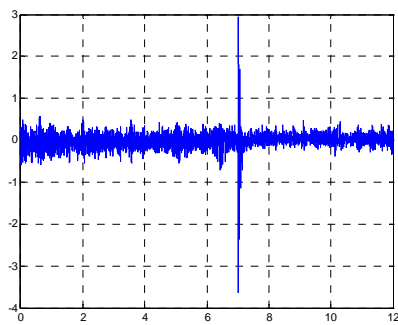


Fig.6.8.a. Abaterea tensiunea la borne (ieșire reglată).

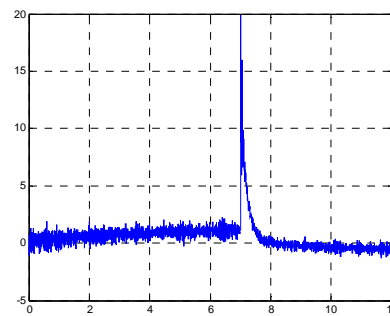


Fig.6.8.b. Mărimea de comanda.

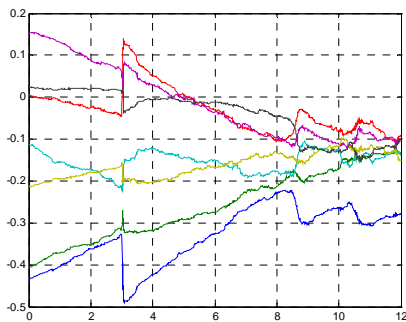


Fig.6.8.c. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului A.

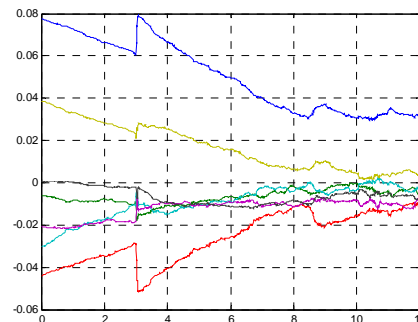
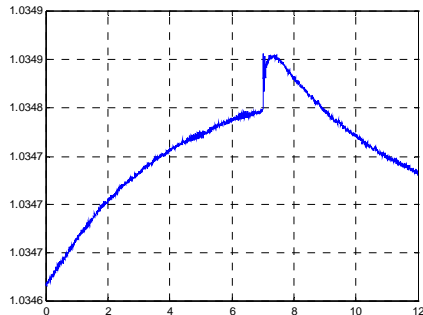


Fig.6.8.d. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului B.

Fig.6.8.e. Evoluția parametrului k_{comp} .

Se poate remarca că o setare inițială a parametrilor $\lambda=0.998$ și $\rho=0.010$ (test A4) oferă cele mai bune rezultate (varianta redusă a ieșirii și implicit a comenzii) pentru structura de ordin 7.

Ținând cont că structura sistemului autoacordabil bazat pe modelul de ordinul 7 conduce la calcule complexe, în continuare, sunt prezentate câteva studii de caz efectuate în vederea evaluării performanțelor structurii de conducere cu regulator autoacordabil bazat pe model de ordin 4 și care sunt notate cu B_j , $j=1..7$.

Testul B1.

Condiții de simulare: $\rho=0.001$, $\lambda=0.99$.

Studiul de caz consideră o descărcare de putere activă (o scădere a cuplului mecanic de 10%, la momentul de timp $t=4$ [sec]). Abaterea tensiunii la borne (Fig.6.8.a) se încadrează în limitele impuse de standarde, chiar dacă atingerea valorii referinței se realizează după un interval de timp mai lung. Varianta mare a ieșirii reglate se datorează faptului că s-a considerat aplicarea aditivă în intrare a unui zgomot stochastic, inițial de $\sigma^2=10^{-4}$, iar de la momentul de timp $t=7$ [sec] $\sigma^2=10^{-6}$. Durata perioadei tranzitorii este în strânsă corelație și cu tendința de evoluție a parametrului k_{comp} de compensare a referinței (Fig.6.8.e).

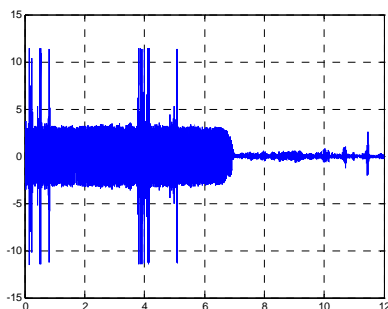


Fig.6.9.a. Abaterea tensiunea la borne (ieșire reglată).

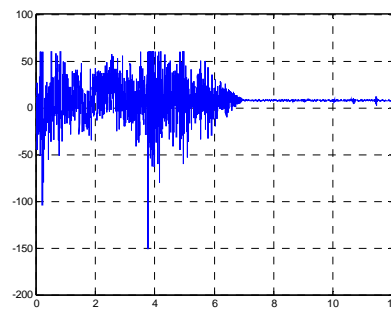


Fig.6.9.b. Mărimea de comandă.

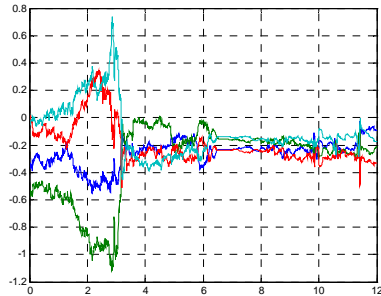


Fig.6.9.c. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului A.

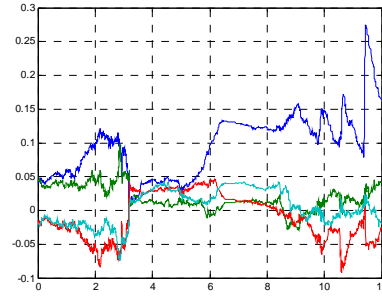
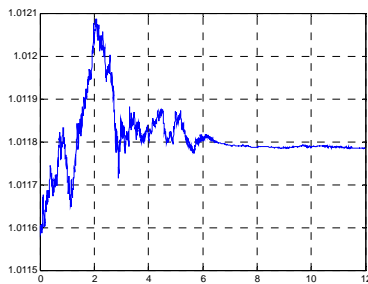


Fig.6.9.d. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului B.

Fig.6.9.e. Evoluția parametrului k_{comp} .

După cum s-a mai menționat, factorul de uitare al estimatorului recursiv CMMP are valori cuprinse în intervalul $\lambda=[0.95, 1]$, rolul său fiind de a realiza o deponderare a importanței măsurărilor mai îndepărtate temporal, permițând o mai bună convergență a estimațiilor, în cazul unor variații în timp a parametrilor procesului. Se observă un regim tranzitoriu de lungă durată a mărimii de ieșire (tensiunea la borne), și o variantă relativ mare a acesteia.

Analizând comparativ rezultatele din Fig 6.9.a și Fig. 6.9.e, se poate observa că factorul de compensare înregistrează și el o variație importantă, ceea ce conduce la ideea că valoarea factorului de uitare al estimatorului (influențând direct estimațiile parametrilor) este necorespunzătoare (prea mică).

Testul indică performanțele slabe pentru valorile considerate al factorilor implicați: $\rho=0.001$ și $\lambda=0.99$.

Testul B2.

Condiții de simulare: $\rho=0.005$, $\lambda=0.998$.

Performanțele slabe ale cazului anterior, au impus o reconsiderare a setărilor inițiale prin creșterea lui ρ și λ .

În Fig 6.10.a este prezentată abaterea tensiunii la borne, având o variantă mai mică. În acest studiu de caz s-a ales un factor de uitare $\lambda=0.998$ („memorie medie spre mare, dar nu infinită”, a estimatorului), care a condus la o evoluție a parametrilor polinoamelor A, B și implicit a factorului de compensare de forma reprezentată în Fig. 6.10.c, d, remarcându-se o dinamică mai bună a estimatorului. Parametrii estimați ai polinoamelor A și B evoluează fără oscilații către valori

corespunzătoare unui regim staționar. De asemenea comanda (Fig.6.10.b) inregistreaza o penalizare eficienta.

In acest caz performanțele sunt mai bune comparativ cu cazul precedent, fapt datorat efectului cumulat al creșterii valorilor celor doi factori de acordare (ρ , λ).

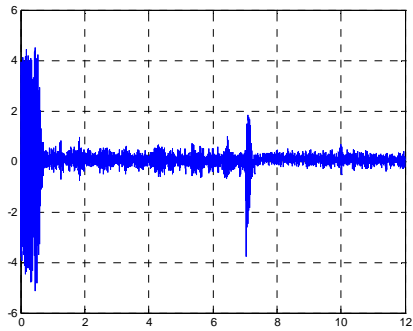


Fig.6.10.a. Abaterea tensiunea la borne (ieșire reglată).

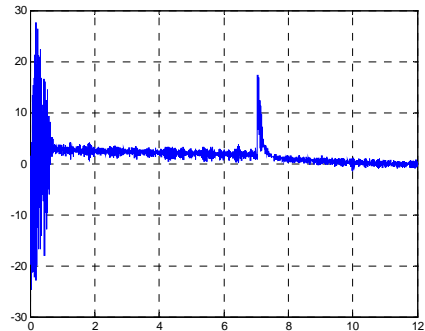


Fig.6.10.b. Mărimea de comandă.

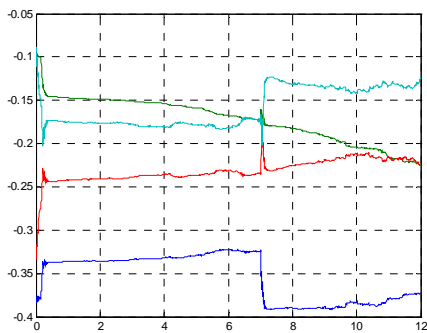


Fig.6.10.c. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului A.

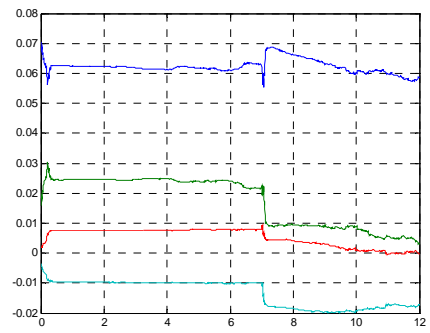


Fig.6.10.d. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului B.

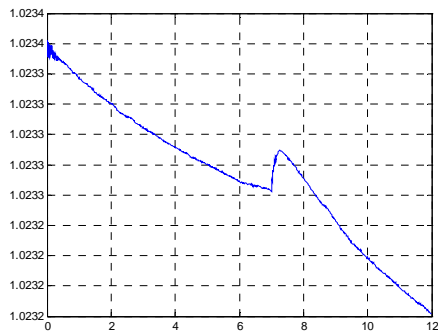


Fig.6.10.e. Evoluția parametrului k_{comp} .

Testul B3.

Condiții de simulare: $\rho=0.005$, $\lambda=0.995$.

În Fig. 6.11.a este prezentată abaterea tensiunii la borne. Se poate observa o variație mică a acesteia, respectiv un suprareglaj cu amplitudine de aprox. 5 [V]. Fig. 6.11.b prezintă mărimea de comandă. Rezultatele obținute în acest studiu de caz sunt mult mai bune, comparativ cu cazul precedent (vezi Fig. 6.10.a și Fig. 6.11.a). S-a considerat un factor de uitare de valoare $\lambda=0.995$ (practic o memorie mare a estimatorului), care a condus la o evoluție a parametrilor polinoamelor A și B, respectiv a factorului de compensare de forma din Fig. 6.10.c și d).

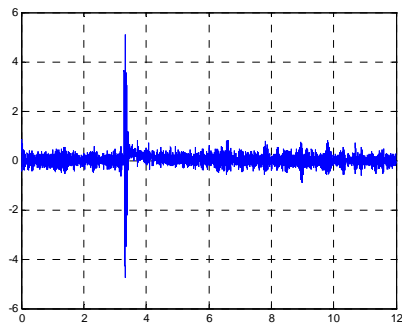


Fig.6.11.a. Abaterea tensiunea la borne (ieșire reglată).

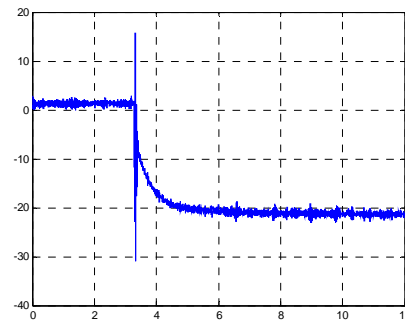


Fig.6.11.b. Mărimea de comandă.

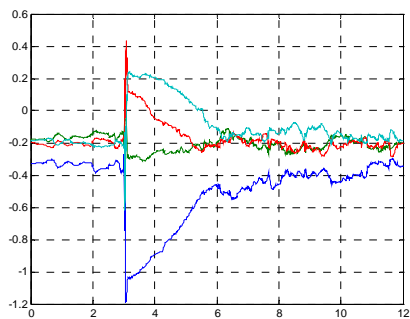


Fig.6.11.c. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului A.

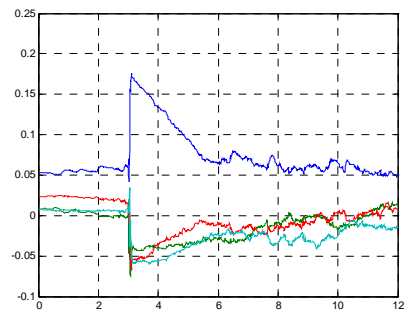


Fig.6.11.d. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului B.

Testul B4.

Condiții de simulare: $\rho=0.01$, $\lambda=0.995$.

Durata regimului tranzitoriu, respectiv suprareglajul mării de ieșire sunt foarte reduse (Fig. 6.11.d), putându-se vorbi de performanțe foarte bune corespunzătoare acestui regim de descarcare de putere reactivă prin variația rezistenței consumatorului. Mărimea de comandă (Fig. 6.11.b) este penalizată corespunzător.

Rezultatele au fost obtinute pentru o crestere (fata de cazul anterior) a factorului de penalizare a comenzii la o valoare $\rho=0.01$.

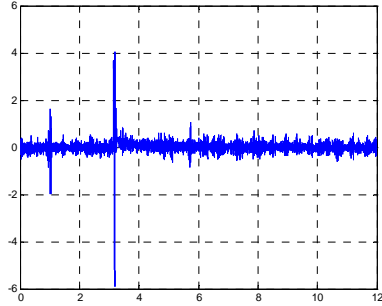


Fig.6.12.a. Abaterea tensiunea la borne (ieșire reglată).

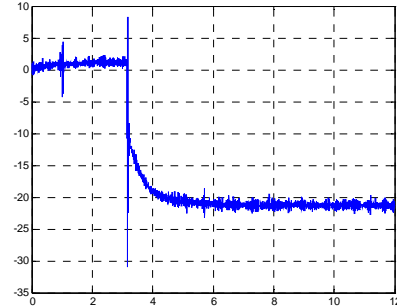


Fig.6.12.b. Mărimea de comandă.

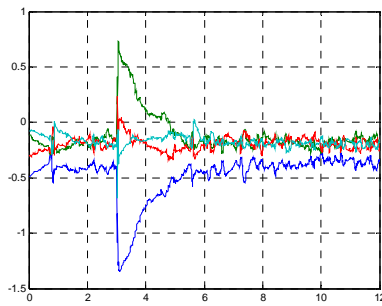


Fig.6.12.c. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului A.

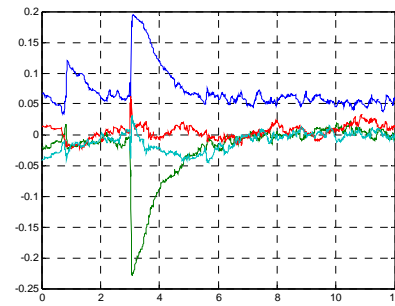


Fig.6.12.d. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului B.

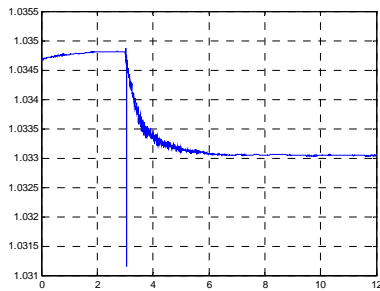


Fig.6.12.e. Evoluția parametrului k_{comp} .

Analizand formele de variatie ale comenzii (Fig.6.12.b), respectiv de factorul de compensare (k_{comp}) (Fig.6.12.e), se poate observa o similitudine a lor. Astfel, evolutia in timp a parametrului de compensare – foarte asemanatoare ca forma cu cea a comenzii, poate oferi un criteriu de apreciere asupra faptului ca, setul de valori alese pentru parametrii λ si ρ asigura o acordare (a regulatorului) ce confera performante bune reglariei.

Testul B5.

Conditii de simulare: $\rho=0.01$, $\lambda=0.995$.

Acest ultim studiu de caz mentine valorile parametrilor λ si ρ ca si in cazul anterior, insa considera un regim de incarcare de putere activa (prin variatia cuplului mecanic). Se pot remarca performantele foarte bune: timp de reglare redus, suprareglaj mic, comandă corespunzător penalizată (Fig. 6.13.a, respectiv 6.13.b).

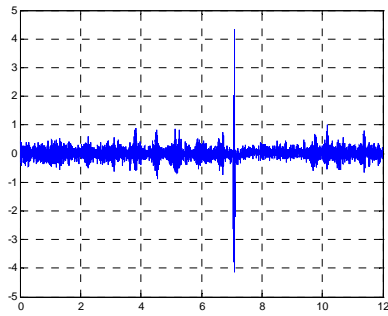


Fig.6.13.a. Abaterea tensiunea la borne (ieșire reglată).

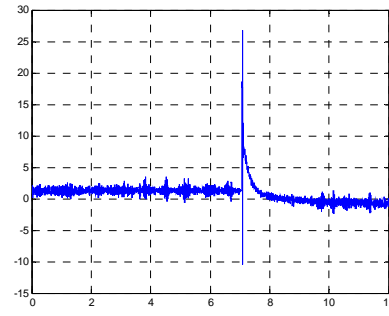


Fig.6.13.b. Mărimea de comandă.

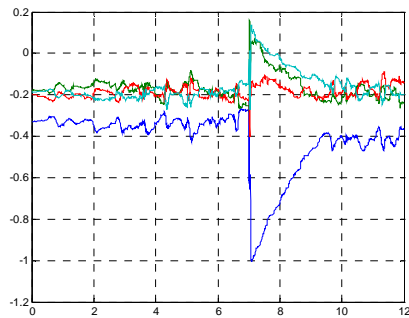


Fig.6.13.c. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului A.

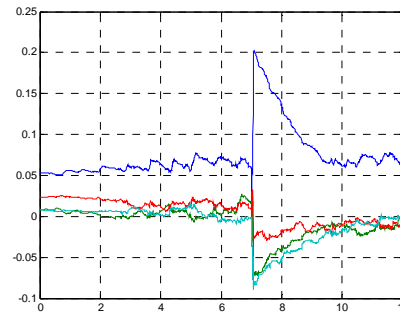


Fig.6.13.d. Evoluția parametrilor estimați ai polinomului B.

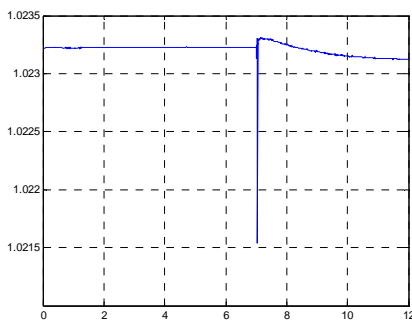


Fig.6.13.e. Evoluția parametrului k_{comp} .

Rezultatele obtinute sunt similare ca performante cu cele ale cazului precedent. Se poate concluziona ca, setul de valori $\lambda=0.995$ si $\rho=0.01$, determinat pe parcursul seriei de teste, constituie o setare corespunzătoare pentru regulatorul autoacordabil sintetizat, asigurand performante foarte bune pentru ambele regimuri de functionare considerate.

Observație: Numărul de teste efectuate pentru fiecare din cele două regimuri de funcționare (încărcare/descărcare de putere activă/reactivă), pentru variația factorilor ρ si λ , a fost mult mai mare, în cadrul paragrafului de față prezentându-se

doar cele mai relevante atât în cazul structurii de conducere adaptivă autoacordabilă bazate pe modelul liniarizat de ordin 7 cât și pe cel de ordin 4.

6.7. Concluzii.

În capitolul de față s-a realizat sinteza, implementarea și validarea unor structuri de conducere autoacordabilă, particularizate pentru reglarea tensiunii la bornele unui generator de inducție de construcție specială, cu înfășurări statorice separate de sarcină și excitație.

Agregatele aeroelectrice cu structură clasică (fără echipamente complexe de interfațare cu rețeaua), echipate cu generatoare de inducție convenționale, absorb putere reactivă din rețea, degradând performanțele rețelei.

Astfel, în conformitate cu cerințele actuale ale organizațiilor de profil, care elaborează standardele de conectare la rețea a unităților de generare a energiei electrice, inclusiv a agregatelor aeroelectrice, se impune, ca cerință obligatorie, existența unor dispozitive de reglare a tensiunii și a puterii reactive (prin intermediul excitației) în punctele de conectare la rețea. Aceste dispozitive au rolul de a menține tensiunea între anumite limite admise și de a evita astfel posibile probleme de stabilitate a tensiunii rețelei de putere.

Fiecare agregat aeroelectric, trebuie să contribuie la „menținerea” tensiunii rețelei și să compenseze puterea reactivă.

Aceste standarde sunt într-o actualizare permanentă, pentru a acoperi cât mai bine situațiile posibile de funcționare (normale/avarie) ale rețelei de putere.

Sinteza structurilor de conducere propuse a avut ca bază de pornire identificarea unui model matematic liniarizat de ordinul 7 (model obținut prin liniarizarea modelului matematic neliniar al procesului) precum și a unui model liniarizat redus de ordin 4, în scopul scaderii complexității algoritmului de conducere. Structurile de conducere proiectate, luând în considerare o funcție criteriu de minimizat (asigurând varianta minimă a ieșirii, respectiv o penalizare a comenzii), asigură o componentă de compensare după referință, respectiv o componentă de compensare după reacție.

Pe baza unor studii de caz, printr-o analiză calitativă și cantitativă a rezultatelor obținute (bazată pe criterii de calitate specifice sistemelor de reglare) s-a ajuns la concluzia că, regulatorul autoacordabil proiectat pornind de la modelul redus de ordin 4 asigură performanțe foarte bune, astfel încât ipoteza simplificatoare de reducere a ordinului este justificată. Structura de conducere proiectată pornind de la modelul de ordin complet 7, nu aduce îmbunătățiri semnificative, astfel încât, punând în balanță complexitatea celor două structuri de conducere adaptiva autoacordabila, respectiv performantele oferite de acestea, regulatorul cu structura redusa este mai convenabil.

În cadrul strategiei de conducere, componenta de compensare după referință asigură practic doar eliminarea erorii de regim staționar, în timp ce componenta de compensare după reacție (inclusă în legea de comandă) asigură efectiv varianta minimă a ieșirii reglate, simultan cu o penalizare a comenzii (excitației).

De asemenea, studiile efectuate au demonstrat că evoluția în timp a parametrului de compensare după referință poate constitui un criteriu suficient de bun referitor la validarea corectitudinii fazei de acordare a estimatorului recursiv CMMP (alegerea potrivită a factorului de uitare λ).

Parametrul de compensare a referinței este determinat practic doar de seturile de estimări ale parametrilor polinoamelor A și B ale procesului liniarizat, factorul de penalizare al comenzii fiind considerat constant.

Testarea strategiilor de conducere s-a realizat pentru diverse regimuri de funcționare specifice generatorului de inducție, de construcție neconvențională (încărcare/descărcare de putere activă/reactivă, cuplare/decuplare consumatori), determinându-se o configurație de acordare optimă a structurii de conducere (setul de parametri fixati (λ, ρ)).

Concluzia care poate fi desprinsă la finele capitolului este că, structura de conducere adaptivă autoacordabilă proiectată, implementată și validată prin simulare numerică, bazată pe minimizarea unui criteriu de optimizare, asigură performanțe foarte bune pentru aplicația considerată (reglajul tensiunii la borne prin comanda excitației generatorului de inducție de construcție neconvențională cu înfășurare statorică separată de excitație).

7. CONSIDERAȚII ASUPRA UNOR METODE DE CONDUCERE CU URMĂRIREA PUNCTULUI DE PUTERE MAXIMĂ A AGREGATELOR AEROELECTRICE

7.1. Preliminarii.

Principalele obiective urmărite în cadrul strategiilor de conducere, dedicate agregatelor aeroelectrice care funcționează la turație variabilă, cu urmărirea punctului de putere maximă (MPPT – Maximum power point tracking, HCC – hill climbing control), sunt creșterea randamentului de conversie a agregatului aeroelectric (reglajul turației) simultan cu menținerea calității energiei electrice debitate în rețea (reglajul tensiunii și factorului de putere).

Scopul principal al conducerii cu MPPT este realizarea puterii maxime în orice regim de funcționare, într-un interval dat de viteze ale vântului.

În vederea implementării strategiilor de conducere a agregatelor care funcționează la turație variabilă, sunt necesari de regulă doi traductori specifici: pentru măsurarea vitezei vântului (anemometru) și turației (traductor de rotație optic sau tahogenerator). Utilizarea conducerii cu MPPT evită utilizarea traductorului de viteză a vântului, care poate să ridice probleme în practică (probleme meteo, depuneri de chiciura, gheata, etc).

7.2. Metode de urmărire a maximumului de putere (MPPT)

În literatura de specialitate se întâlnesc mai multe variante ale metodelor de tip MPPT, particularizate la diverse aplicații (agregate aeroelectrice, sisteme de conversie a energiei solare, etc). Prin termenul de MPPT se acoperă de fapt o întreaga clasă de algoritmi de căutare.[3][6][19][69][109][112][113][114][115]

7.2.1. Metode de urmărire a maximumului de putere (MPPT) cu pas fix

Una dintre cele mai uzuale și simple metode pentru obținerea maximumului de putere este metoda cu pas fix.

Algoritmul se bazează pe urmărirea puterii de ieșire P ($P=V \cdot I$) care este măsurată pentru fiecare nou pas, increment sau (decrement) a curentului ΔI , urmărindu-se creșterea (sau scăderea) puterii, corespunzător reglării turației.

Dacă diferența de putere și ultima variație a curentului de sarcină sunt pozitive ($+\Delta P$, $+\Delta I$), căutarea maximumului de putere (MP) continuă în aceeași direcție.

Dacă, pe de altă parte, pentru $+\Delta I$ (ultima variație este pozitivă) se obține $-\Delta P$ (diferența de putere este negativă), direcția căutării se schimbă (inversează).

În Fig. 7.1. este ilustrat principiul metodei MPPT cu pas fix, în care se observa că la depășirea punctului de maxim al caracteristicii putere mecanică-curent, odată cu schimbarea pantei caracteristicii, direcția de căutare a punctului MP se schimbă continuu apărând oscilații. Acesta este și principalul dezavantaj al acestei metode, putând apărea oscilații mari în jurul punctului corespunzător puterii maxime. [6][35][116][117][118][119]

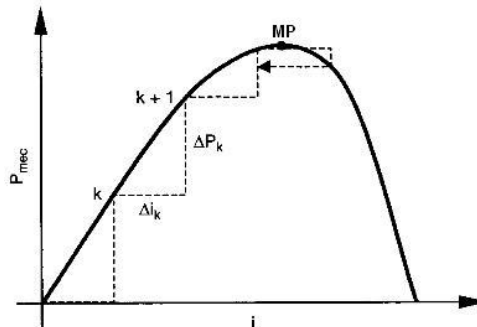


Fig. 7.1. Caracteristica putere mecanică – curent. Ilustrarea principiului metodei MPPT cu pas fix.

Principalele variante ale metodelor de tip MPPT constau practic în soluții de minimizare a acestor oscilații prin reconsiderarea pasului de căutare.

7.2.2. Metode de urmărire a maximului de putere (MPPT) cu pas divizat

Algoritmul este similar cu cel precedent, prezentând în schimb avantajul reducerii oscilațiilor din jurul punctului de maximă putere (MP). De fiecare dată când se atinge MP, incrementul pasului curentului este împărțit la doi și își schimbă semnul. (Fig 7.2). Valoarea curentului de sarcină, se determină cu relația:

$$i_{k+1} = i_k + \Delta i_{k+1} \quad (7.1)$$

respectiv, la atingerea punctului MP, pasul se modifica:

$$\Delta i_{k+2} = \Delta i_{k+1} / 2 \quad (7.2)$$

Atunci când se înregistrează variații ale sarcinii sau ale puterii turbinei, pasul se modifica la valoarea inițială, fapt care poate duce la apariția de oscilații în curentul de sarcină, dezavantajul metodei precedente nefiind înlăturat. [6][35][120]

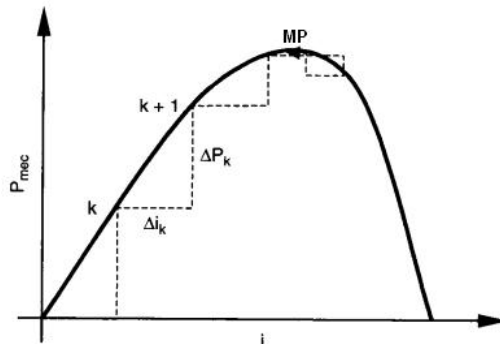


Fig. 7.2. Caracteristica putere mecanică – curent. Ilustrarea principiului metodei MPPT cu pas divizat

7.2.3. Metode de urmărire a maximului de putere (MPPT) MPPT cu pas adaptiv

Abordarea cu pas adaptiv se bazează pe utilizarea unui parametru denumit factor de accelerare, care se obține din tangenta în punctul de funcționare a generatorului de pe curba P-I. Aceasta dreaptă trece prin punctele k și k+1. (Fig. 7.3).

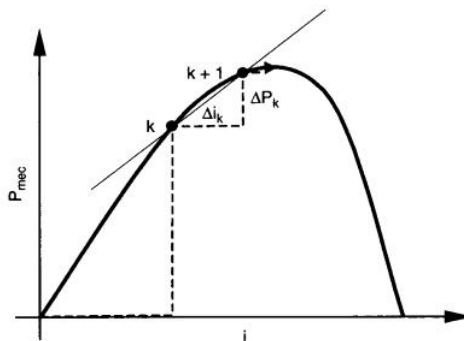


Fig. 7.3. Caracteristica putere mecanică – curent. Ilustrarea principiului metodei MPPT cu pas adaptiv

Factorul de accelerare în punctul k+1 de pe caracteristica, se definește ca:

$$k_{ak+1} = \frac{\Delta P_{k+1}}{\Delta i_{k+1}} \quad (7.3)$$

iar valoarea curentului este:

$$i_{k+1} = i_k + k_{ak+1} \Delta i \quad (7.4)$$

Pe măsură ce procesul se apropie de maximum de putere, panta dreptei tinde la zero, incrementul curentului de asemenea tinde la zero, eliminând aproape în totalitate oscilațiile.

În timpul stărilor tranzitorii, algoritmul generează un factor de accelerare proporțional cu panta dreptei. Astfel, se atinge mai rapid un nou punct de funcționare stabil.

Pentru a accelera incrementul curentului generatorului cu pasul adaptiv, se generează o tensiune de prescriere V de valoare mai mare care descrește pe măsură apropierea de punctul maxim. Rezultatul este un proces mai lent și mai stabil al creșterii curentului de sarcină. [35]

7.2.4. Metode de urmărire a maximului de putere (MPPT) cu pas exponențial

O altă variantă a metodei o reprezintă cea cu pas exponențial (Fig. 7.4.)

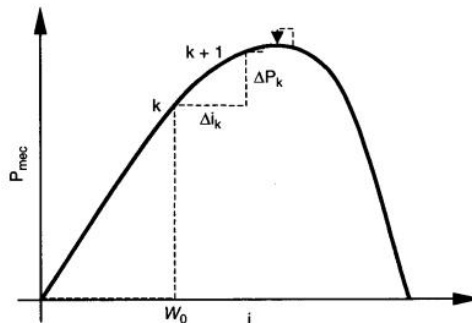


Fig. 7.4. Caracteristica putere mecanică - curent. Ilustrarea principiului metodei MPPT cu pas exponențial

Pasul exponențial Δi se determină introducând o valoare de aproximare incrementală exponențială ξ_i , până la atingerea punctului de maxim, dată de relația:

$$f_k = 1 - \xi_i = 1 - e^{-ki} \quad \text{pentru } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7.5)$$

Prima iterație ($i = 1$) va furniza pasul inițial:

$$f_1 = 1 - e^{-k} = W_0 \quad (7.6)$$

din care se poate obține:

$$k = -\ln(1 - W_0) \quad (7.7)$$

Pasul curentului i este dat de relația:

$$\Delta i = f_i - f_{i-1} = (1 - e^{-ki}) - [1 - e^{-k(i-1)}] = e^{-ki}(e^k - 1) \quad (7.8)$$

Din relația (7.5), pentru $i = n$ se poate determina:

$$n = -\frac{1}{k} \cdot \ln(\xi_n) \quad (7.9)$$

Abordarea exponențială conduce la un răspuns de tranziție mult mai rapid. Pentru implementarea metodei este suficient să se determine incrementul inițial W_0

Considerații asupra unor metode de conducere MPPT - 7

și valoarea de apropiere ξ , care determină numărul de iterații n ale variației incrementului și W_0 , rezultând constanta k . În implementarea metodei există două constrângeri: (1) starea de tranziție este dependentă de incrementul inițial W_0 ; (2) starea de procesare este legată de valoarea de apropiere, ξ . [6] [35]

În Fig. 7.5. se prezintă diagrama corespunzătoare algoritmului prin care se determină pasul de incrementare ΔW .

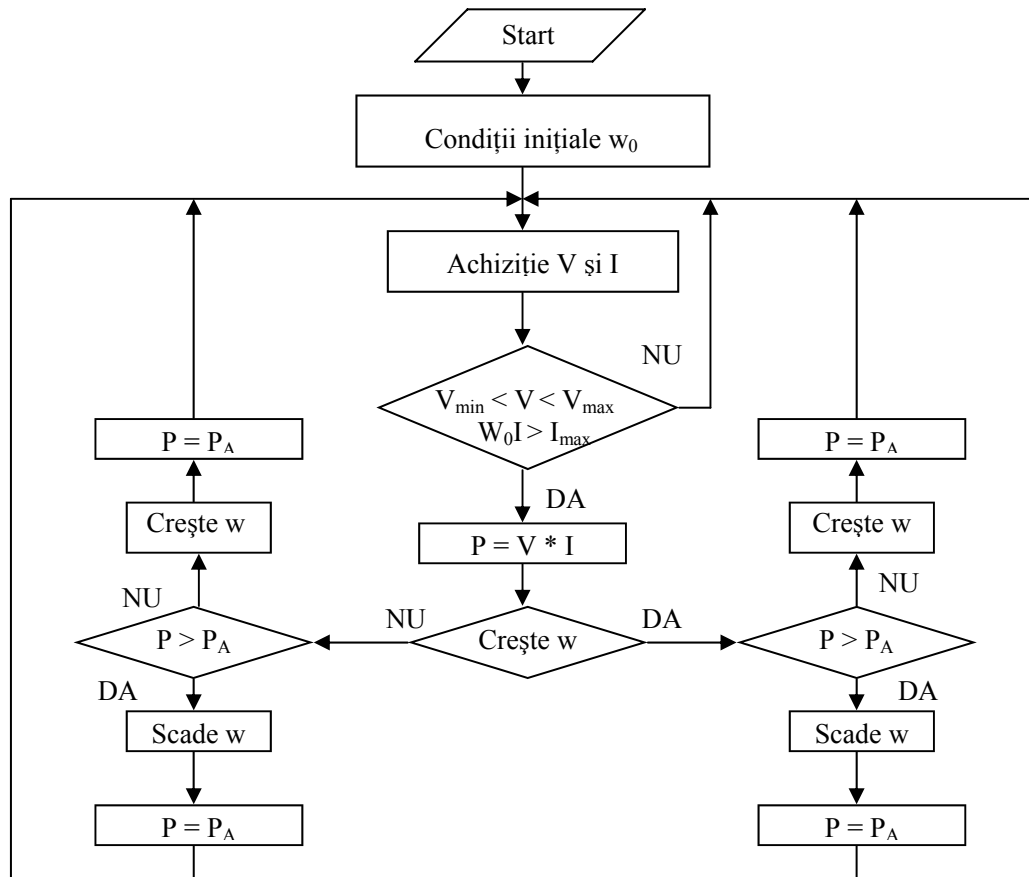


Fig. 7.5. Diagrama algoritmului de determinare a pasului incrementului ΔW .

Pașii algoritmului sunt următorii:

- se achiziționează curentul I și tensiunea V ;
- se calculează puterea ca produsul dintre cele două mărimi:
 $P = V \cdot I$;
- dacă incrementul w , la pasul anterior a fost pozitiv:
 - dacă puterea P este mai mare decât cea calculată la pasul anterior:
→ se adună incrementul w (+ w)

151 7.2. Metode de urmărire a maximumului de putere (MPPT)

- dacă puterea P este mai mică decât cea calculată la pasul anterior:
 - se scade incrementul w ($-w$)
- dacă incrementul w , la pasul anterior a fost negativ:
 - dacă puterea P este mai mare decât cea calculată la pasul anterior:
 - se scade incrementul w ($-w$)
 - dacă puterea P este mai mică decât cea calculată la pasul anterior:
 - se adună incrementul w ($+w$)

În Fig.7.6 este prezentată schemă implementată în mediul Matlab/Simulink care calculează valoarea incrementului la pasul k conform algoritmului prezentat, considerând MPPT cu pas fix.

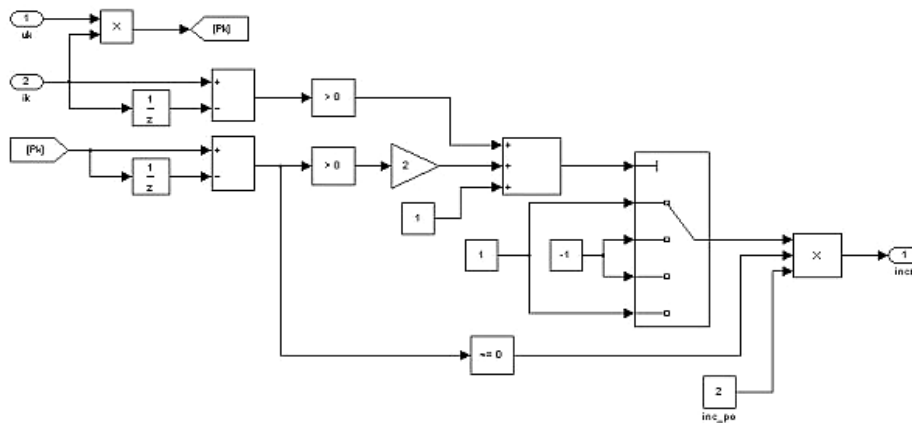


Fig. 7.6. Schemă Simulink pentru determinarea incrementului la pasul k .

7.2.5. Implementarea metodelor de tip MPPT la AAE.

Aceste metode de tip MPPT de regula, sunt situate la nivelul ierarhic superior al structurii de conducere, completând conducerea de la nivelul ierarhic inferior, care reglează mărimile de baza. În majoritatea situațiilor, ieșirile structurilor de tip MPPT reprezintă prescrieri pentru structura de conducere de la nivelul ierarhic inferior. (Fig 7.7)

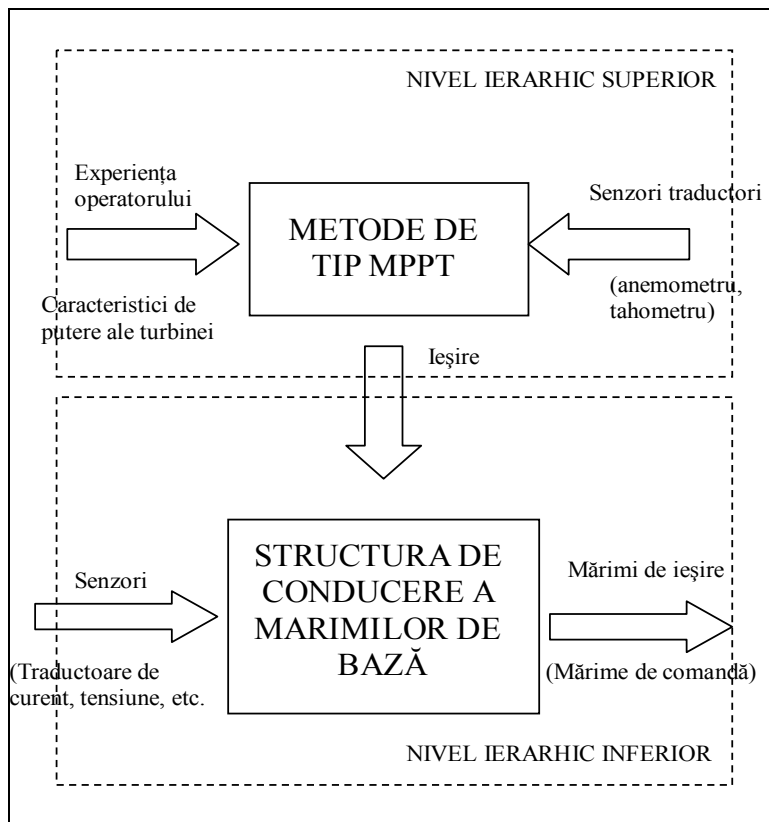


Fig. 7.7. Structura de conducere de tip MPPT – diagrama pe nivele ierarhice.

7.3. Studiu de caz asupra metodei MPPT pentru regimuri de funcționare ale agregatelor aeroelectrice echipate cu generatoare de inducție.

Dintre metodele la care s-a făcut referire anterior, în cadrul prezentului paragraf este implementată structura de conducere cu metoda „cățăării” cu pas fix. (Fig.7.8).

Ținând seama de faptul că parametrii agregatului aeroelectric sunt necunoscuți (raportul optim între viteza la extremitatea paletelor agregatului și viteza vântului (λ), eficiența aerodinamică, etc), algoritmul de tip MPPT urmărește menținerea punctului optim de funcționare, prin anularea derivatei $\partial P / \partial \Omega$, unde P – este puterea turbinei de vânt și Ω – turația AAE. Astfel, conducerea de la nivelul ierarhic superior (metoda MPPT) furnizează mărimea de prescriere (referința) pentru nivelul ierarhic inferior și anume turația prescrisă. Aceasta depinde de punctul de funcționare și de tendința de evoluție, fapt exprimat prin semnul pozitiv sau negativ la derivatei $\partial P / \partial \Omega$. Sintetizând, în tabelul 7.1, se prezintă algoritmul de reglare (logica MPPT), aferent cazurilor posibile, împreună cu acțiunea ce trebuie întreprinsă.

Tabelul 7.1. Logica de control cu urmărirea maximului de putere.

$\frac{\partial P}{\partial \Omega}$ \ / \ $\frac{\partial \Omega}{\partial t}$	Negativ	Pozitiv
Negativ	Ω creste (cazul A)	Ω scade (cazul B)
Pozitiv	Ω scade (cazul C)	Ω creste (cazul D)

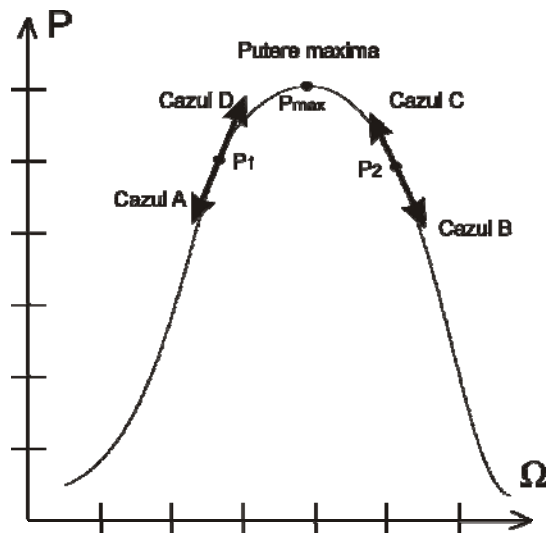


Fig 7.8 . Exemplificarea metodei de urmărire a maximului de putere pe o caracteristica statica de putere tipica a unui agregat aeroelectric.

In Fig. 7.9, este prezentata schema bloc a subsistemului de conducere cu urmărire a maximului de putere extrasa implementata in Simulink, conform algoritmului descris mai sus.

Considerații asupra unor metode de conducere MPPT - 7

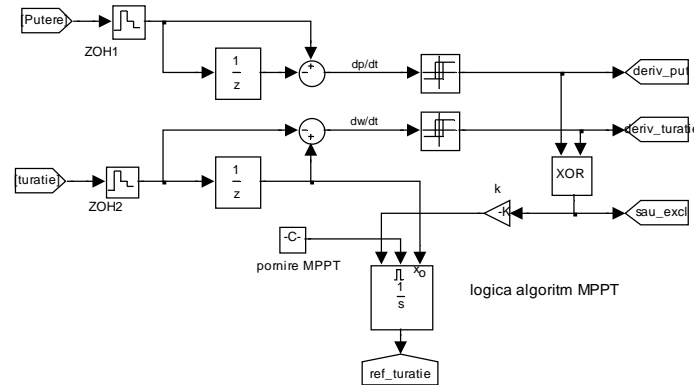


Fig 7.9. Schema Simulink a subsistemului – conducere MPPT.

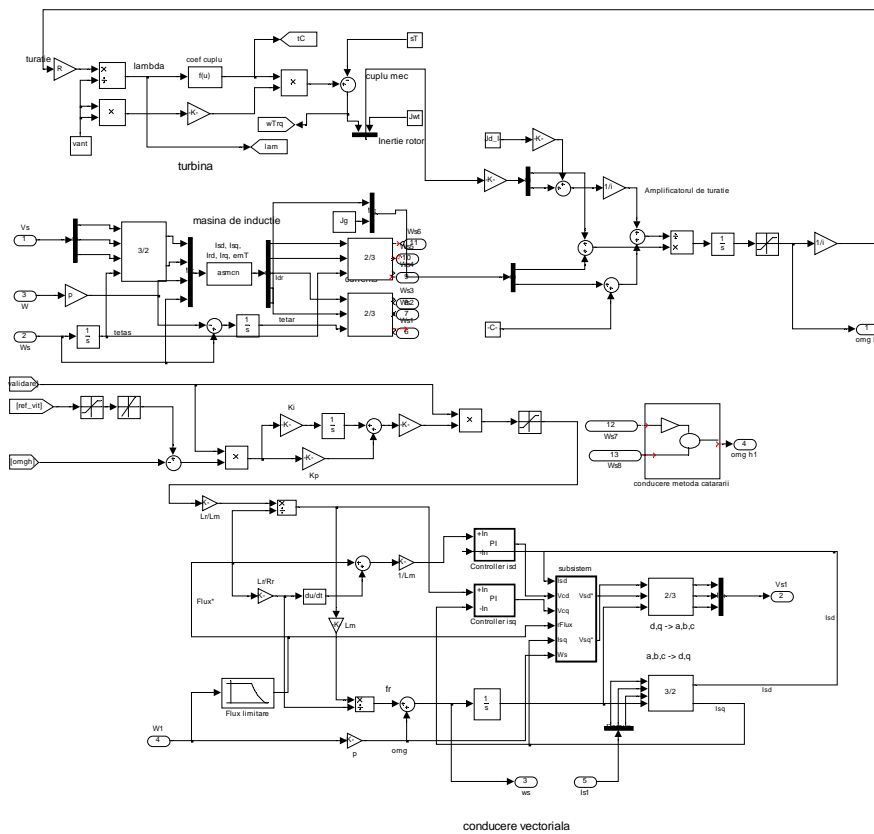


Fig. 7.10. Schema bloc Matlab-Simulink a structurii de conducere bazate pe metoda „cășării” a agregatului aeroelectric.

. Concluzii 7 - 4

In cadrul nivelului de conducere inferior s-a implementat o structura de conducere cu orientare după câmp (variante indirecta). (Fig. 7.10).

In capitol, nu se prezintă aspectele de implementare a conducerii la nivelul ierarhic inferior deoarece cercetările au fost focalizate pe conducerea de la nivelul ierarhic superior, vizând aspecte legate de metodele de tip MPPT. [121][122][123]

Agregatul aeroelectric s-a considerat a fi echipat cu un generator de inducție cu rotorul in scurtcircuit. [127][128][129]

In cadrul testelor (simulărilor) efectuate structura de conducere de tip MPPT se pornește abia după un interval de $t=5$ [sec] după ce agregatul aeroelectric atinge un punct de funcționare staționar. [130]

Au fost efectuate o multitudine de teste, variind o serie de parametri in cadrul simulărilor (viteza medie a vântului, modalitatea de generare a seriei de timp a vitezei vântului, pasul de simulare, etc), in capitolul de fata fiind prezentate doar doua dintre acestea. Rezultatele obținute in majoritatea cazurilor sunt bune si validează structura de conducere considerata.

In cadrul tuturor simulărilor, pe axa abscisei s-a considerat timpul exprimat in secunde, iar pe axa ordonatelor s-a considerat mărimea analizata (viteza vântului [m/s], tensiune [V], respectiv putere [W]).

Testul T1 $v=6$ m/s (viteza medie a vântului)

In Fig. 7.11.a se prezintă seria de timp utilizata in cadrul simulării, ca intrare in linia de conversie electromecanica a energiei eoliene. Acesta a fost generata, utilizând blocul generator de zgomot alb normal distribuit din cadrul mediului Matlab. Modelele matematice utilizate in simularea funcționarii agregatului aeroelectric sunt cele prezentate in cadrul capitolului patru. In Fig. 7.11b. este reprezentata evoluția puterii active unde se observa ca acesta prezintă variații semnificative in amplitudine, corespunzător variației vitezei vântului.

In Fig. 7.11.c este reprezentata evoluția puterii reactive a agregatului considerat, observându-se ca structura de conducere de tip MPPT reușește urmărirea unui punct de putere maxima extrasa din vânt. In Fig. 7.11.d. se prezintă evoluția tensiunii statorice pe axa q care se menține la o valoare de regim staționar.

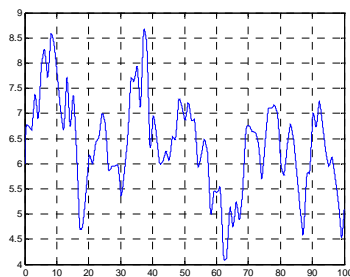


Fig.7.11.a Evoluția vitezei vântului.

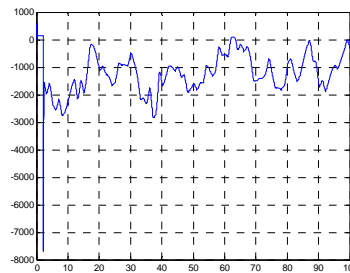


Fig. 7.11.b. Evoluția puterii active (P).

Considerații asupra unor metode de conducere MPPT - 7

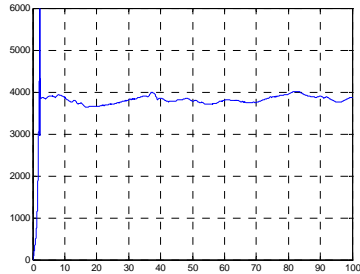


Fig. 7.11.c. Evoluția puterii reactive (Q).

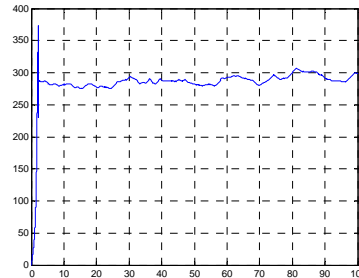


Fig. 7.11.d. Evoluția tensiunii vsq (statorice pe axa q).

Testul T2 $v=8$ m/s (viteza medie a vântului)

In Fig. 7.12.a se prezintă seria de timp utilizata in cadrul acestui test. In Fig. 7.12b. este reprezentata evoluția puterii active unde se observa ca aceasta prezintă variații relativ mari in amplitudine, dar explicabile ale AAE (turbina generează un cuplu mecanic care se poate considera in anumite condiții proporțional cu mărimea de intrare – seria de timp a vitezei vântului, cuplul mecanic fiind cel care generează puterea activa).

Fig. 7.12.c reprezintă evoluția puterii reactive a agregatului considerat. In Fig. 7.12.d. se prezintă evoluția tensiunii statorice pe axa q care se menține la o anumita valoare de regim staționar.

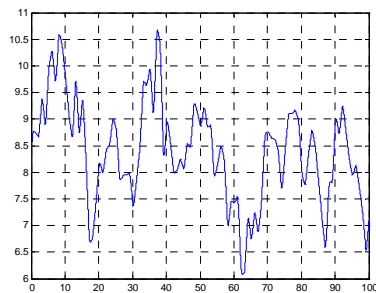


Fig. 7.12.a. Evoluția vitezei vântului.

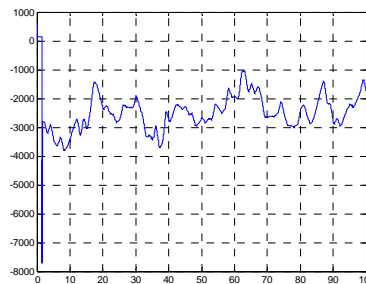


Fig. 7.12.b. Puterea activa

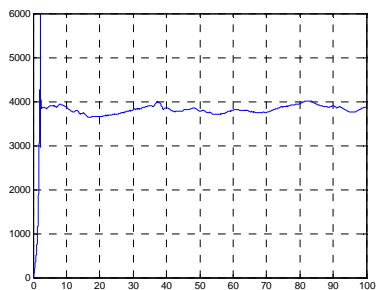


Fig. 7.12.c. Puterea reactiva.

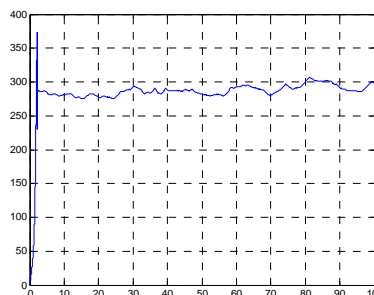


Fig. 7.12.d. Tensiunea vsq

In concluzie, rezultatele obținute in ambele cazuri prezentate sunt bune, confirmând viabilitatea structurii de conducere de tip MPPT cu pas fix. [124][125][126]

7.4. Concluzii.

În capitolul de față s-au studiat metode de conducere cu urmărirea maximului de putere și s-au prezentat câteva variante uzuale ale acestora. Aceste metode de tip MPPT se pretează în mod natural la conducerea agregatelor aeroelectrice. Termenul de MPPT semnifică de fapt o întreaga clasă de algoritmi de căutare.

Strategiile de conducere cu urmărirea extragerii a maximului de putere implică o structură de conducere cu două nivele, algoritmul MPPT fiind plasat la nivelul ierarhic superior al structurii de conducere, iar la nivelul ierarhic inferior se realizează reglarea mărimilor de bază. Astfel, ieșirile structurilor de tip MPPT reprezintă mărimi de referință pentru structura de conducere situată la nivelul ierarhic inferior.

Testarea strategiilor de conducere de tip MPPT s-a realizat pentru diverse regimuri de funcționare specifice generatorului de inducție cu rotorul în scurtcircuit (la diverse variații ale vitezei vântului), obținându-se performanțe bune ale acestora.

Concluzia care poate fi desprinsă este că, structura de conducere bazată pe metoda de tip MPPT, implementată și validată prin simulare numerică, asigură performanțe bune pentru aplicația considerată (urmărirea maximului de putere a unui agregat aeroelectric echipat cu generator de inducție cu rotorul în scurtcircuit).

8. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE

8.1. Concluzii finale

În lucrarea de față se abordează domeniul de mare actualitate al energiei eoliene, cu particularizare la problematica modelării și conducerii agregatelor aeroelectrice echipate cu generatoare de inducție și sincrone.

Lucrarea este concepută ca o dezvoltare progresivă de probleme legate de sistemele de conversie a energiei eoliene care se completează continuu, sfârșitul fiecărei etape evidențiind particularități, recomandări și concluzii utilizabile în etapele ulterioare.

În prezent se manifestă un interes deosebit pentru agregatele aeroelectrice care operează la turație variabilă (acestea fiind agregatele la care se poate eficientiza randamentul de conversie al energiei electrice), respectiv pentru agregatele aeroelectrice cu cuplare directă a turbinei cu generatorul, care elimină amplificatorul de turație dintre turbină și generator (rezultând un pret de cost mai redus).

Realizarea unor studii preliminare, respectiv a unor teste prin simulare a funcționării agregatelor aeroelectrice în diverse regimuri, impune sinteza unor modele matematice cât mai fidele pentru principalele componente ale acestora.

De asemenea, obținerea unui randament maxim necesită dezvoltarea unor structuri de conducere corespunzătoare, bazate pe metode de urmărire a extragerii maximului de putere. În cadrul lucrării, randamentul generatorului și modelul matematic al turbinei de vânt, au fost determinate folosind funcții de regresie de o variabilă, respectiv funcții de 2 variabile.

Una dintre cele mai performante conducători în domeniul energetic o reprezintă conducerea adaptivă autoacordabilă, particularizată în cazul față pentru reglarea tensiunii la bornele unui generator de inducție cu înfășurări statorice separate, de sarcină și excitație. Sinteza structurilor de conducere propuse a avut ca bază de pornire identificarea unui model matematic liniarizat de ordinul 7 (model obținut prin liniarizarea modelului matematic neliniar al procesului), precum și premiza unei reduceri a ordinului acestuia la 4, în scopul scăderii complexității algoritmului de conducere. Pe baza unor ample studii de caz, s-a ajuns la concluzia că regulatorul autoacordabil proiectat, pornind de la modelul redus de ordin 4, asigură performanțe bune, astfel încât ipoteza simplificatoare de reducere a ordinului este justificată, fiind recomandată o configurație de acordare inițială optimă a structurii de conducere.

8.2 Contribuții personale

Pornind de la obiectivele declarate ale acestei lucrări, în continuare sunt prezentate principalele contribuții:

- Elaborarea unui studiu critic asupra problematicilor de baza ale agregatelor aeroelectrice în vederea conducerii acestora.
- Realizarea unei clasificari a configuratiilor actuale ale agregatelor aeroelectrice.
- Analiza regimurilor de functionare specifice ale agregatelor aeroelectrice (demararea, regimul de asteptare, conectarea, deconectarea de la retea, oprirea).
- Propunerea unei abordari integrate a proiectarii configuratiilor fermelor de agregate aeroelectrice.
- Dezvoltarea unor modele ale variatiei vitezei vantului, implementate in mediul Matlab-Simulink.
- Dezvoltarea si implementarea unui model matematic al turbinei de vant.
- Modelarea sistemului mecanic de transmisie a agregatelor aeroelectrice (amplificatorul de turatie) – modele cu trei, respectiv doua mase inertiiale.
- Identificarea unor modele matematice ale generatorului de inductie cu rotorul in scurtcircuit (modelul in axele „abc” si respectiv axele „dq”), de diverse ordine.
- Implementarea si validarea modelelor matematice identificate ale generatorului de inductie cu rotorul in scurtcircuit folosind mediul Matlab.
- Dezvoltarea unor modele ale generatorului sincron cu magneti permanenti si implementarea acestora in Matlab- Simulink.
- Identificarea unor modele matematice ale generatorului de inducție cu două înfășurări statorice separate, de sarcina și excitație, conectat la un sistem energetic de putere finită:
 - model matematic neliniar al generatorului de inducție considerat, conectat la un sistem energetic de putere finita printr-o linie lungă de transmisie (model complet de ordin 7).
 - model matematic liniarizat de ordin 7, direct utilizabil in sinteza unei strategii de conducere adaptiva autoacordabila a sistemului de excitație a generatorului de inducție.
 - model matematic liniarizat de ordin redus la 4, utilizat în sinteza unei strategii de conducere adaptiva autoacordabila a sistemului de excitație a generatorului de inducție.
- Realizarea unui stand de laborator echipat cu un generator de inductie (cu doua infasurari separate, de excitatie si de sarcina) si un motor de inductie (cu rotorul in scurtcircuit) pentru antrenare destinat determinarii caracteristicilor generatorului.
- Implementarea modelului matematic neliniar de ordin 7 al generatorului de inductie considerat, in mediul de simulare Matlab-Simulink.
- Realizarea unor studii de validare, in regimuri specifice de functionare ale generatorului de inductie, a modelului matematic neliniar propus, cu implementari in Simulink.
- Elaborarea unor programe si fisiere de macro comenzi in mediul Simnon, pentru simularea unor regimuri de functionare specifice ale generatorului de inductie cu doua infasurari statorice.
- Analiza comparativa a rezultatelor obtinute in cadrul simularii unor regimuri caracteristice de functionare, in vederea validarii modelului matematic liniar de ordin redus la 4, al generatorului de inductie.
- Determinarea randamentului unui generator sincron cu magneti permanenti, utilizând funcții de regresie de o singură variabilă, utilizand mediul CurveExpert.

- Determinarea randamentului unui generator sincron cu magneti permanenți, utilizând funcții de regresie de două variabile prin metoda CMMP.
- Realizarea unui studiu comparativ critic privind determinarea randamentului generatorului, prin utilizarea funcțiilor de regresie de o variabilă, respectiv de două variabile.
- Determinarea indirectă a turației și a vitezei vântului.
- Identificarea modelului matematic al turbinei de vânt utilizând rezultatele încercărilor efectuate în cadrul unui tunel aerodinamic, bazate pe funcții de regresie de o variabilă, respectiv de două variabile.
- Studiu comparativ critic privind determinarea modelului matematic al turbinei de vânt, prin utilizarea funcțiilor de regresie de o variabilă, respectiv de două variabile.
- Elaborarea unei sinteze asupra problematicilor de baza ale proiectării structurilor conventionale de conducere adaptiva autoacordabila.
- Validarea identificării modelului liniarizat prin analiza convergenței estimațiilor spre valori de regim staționar.
- Sinteza unei structuri de conducere adaptiva autoacordabila cu compensare după reacție și referință.
- Definirea unui parametru de compensare, calculat pe baza estimațiilor parametrilor procesului, a cărei evoluție constituie un criteriu de apreciere asupra corectitudinii setării estimatorului CMMP, utilizat în cadrul structurilor de conducere autoacordabila.
- Acordarea regulatorului propus, pe baza unor studii de caz specifice regimurilor de funcționare ale generatorului de inducție.
- Realizarea unui studiu sintetic asupra metodelor de conducere ale agregatelor aeroelectrice cu urmărirea punctului de maximă putere (în corelație cu familiile de caracteristici „putere-turație” ale turbinelor de vânt).
- Implementarea unui studiu de caz aferent conducerii agregatelor aeroelectrice utilizând metoda urmăririi extragerii maximului de putere cu pas fix, în cazul unui agregat echipat cu generator de inducție cu rotorul în scurtcircuit.
- Elaborarea unui set de programe și de funcții Matlab și Simnon, precum și a modelelor Simulink destinate implementării, analizei și validării metodelor de determinare a valorilor marimilor specifice agregatelor aeroelectrice și a structurilor de conducere adaptiva autoacordabila, respectiv cu urmărirea maximului de putere extrasă tratate.

Problemele prezentate, precum și rezultatele obținute în urma soluționării lor, conferă prezentei lucrări un real caracter de aplicabilitate practică, deschizând noi perspective ale cercetărilor în domeniul conversiei energiei eoliene în energie electrică.

8.3. Perspective de dezvoltare

Noile metode de conducere bazate pe urmărirea extragerii maximului de putere sunt abordate în mod neunitar în literatura de specialitate, fiind prezentate soluții adaptate unor cazuri particularizate. Aceste metode de conducere nu necesită o modelare foarte exactă a tuturor subansamblelor agregatelor aeroelectrice.

161 . Perspective de dezvoltare 8 – 3

Cercetările viitoare pot fi axate pe studiul unor noi variante ale strategiilor de conducere de urmarire a extragerii maximului de putere, cum ar fi strategia de conducere „planificata”. Se va urmarii implementarea acestor strategii pe agregate aeroelectrice cu ax vertical, de putere redusă echipate atât cu generator sincron cu magneți permanenți (2,5 [kW]) cât și pe cele echipate cu generator de inducție cu două înfășurări statorice (1,5 [kW]). Aceste cercetări, reprezintă și unele dintre obiectivele unui nou grant de cercetare în care este implicat autorul tezei de doctorat.

Bibliografie

- [1] M. Babescu - „Generatoare electrice”, Colectia “Energetica”, Editura Politehnica, Timisoara, 1998.
- [2] Mihet-Popa Lucian, Prostean Gabriela, Szeidert Iosif, Solar Energy Systems - Power Configuration and Topologies for photovoltaic systems, Scientific Buletin of “Politehnica” University of Timisoara Transactions on MECHANICS (Buletinul Științific al Universității POLITEHNICA din Timișoara, România-Seria Macanică), fascicolul 1, 2008, Tomul 53 (67), ISSN 1224-6077, pag. 111-114
- [3] N. Budisan, - „Problems of induction generator systems – at wind/diesel/hydro unconventional electric groups/plants/farms”, Colectia “Energetica”, Editura Politehnica, Timisoara, 2003.
- [4] I. Szeidert, N. Budisan, I.Filip, Consideration and Perspectives about Wind Energy Usage in Romania, Simpozion Electrotehnica si Energetica, Zilele Academice Timisene, 26-27 mai 2005, ISBN: 973-625-253-3, CD-ROM
- [5] I. Szeidert, G.Prostean, I. Filip, C.Vasar, Considerations Regarding The Usage Of Wind Energy Conversion Systems, Manufacturing and Management, Macedonia,2004
- [6] S. Heier, „Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”. 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 2006., ISBN 0-470-86899-6
- [7] N. Budisan, Fr. Gyulai, T. Hentea, S. Mahil - „Wind energy conversion systems”, State of the Art. ENERGEX'2000 Conference, Las Vegas, Nevada, USA, 23-28 July, 2000.
- [8] <http://www.ewea.org>
- [9] <http://www.awea.org>
- [10] I. Vlad – „Energia vantului”, Editura Tehnica Bucuresti, 1982.
- [11] I. Szeidert, O. Prostean, N. Budisan, I. Filip, V. Balas , G. Prostean, Viewpoint on Wind Energy Usage in Romania - Banat Region, WSEAS 2009, Timisoara
- [12] D. Popovici – „Bazele convertoarelor statice”, Editura Politehnica, Timisoara, 1999.
- [13] B. Adkins – “The general theory of electrical machine”, Chapman Hall, London, 1962.
- [14] T. Dordea – „Masini electrice”, Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1977.
- [15] N. Budisan - „Contributii Romanesti privind Echipamentele Electrice ale Agregatelor Aeroelectrice”, Zilele Academice Timisene, Academia Romana, Simpozion Electrotehnica si Energetica, 23 Mai 2003, Editura Politehnica, ISBN 973-625-050-4, Timisoara.
- [16] N. Budisan – „Sistem de conversie a energiei, de frecventa constanta la turatie variabila reglabila”, Rev. Electrotehnica, Electronica si Automatica, nr.6, 1982.

163 Bibliografie

- [17] Mihet, Groza, Prostean, Szeidert, Modeling and Design of a Grid Connection Control Mode for a Small Variable-speed Wind Turbine System, IEEE I2MTC-International instrumentation & measurement technology conference, May 12-15, 2008, ISSN 1091-5281
ISBN 978-1-4244-1540-3, INSPEC Accession Number:10059215, Vancouver Island-Canada [ISI-Inspec, IEEE Explore]
- [18] S. K. Salman, A. L. J. Teo - „Windmill Modeling Consideration and Factors Influencing the Stability of a Grid-Connected Wind Power-Based Embedded Generator”, IEEE Transactions on Power Systems, vol.18, no.2, May 2003, pag.793-802.
- [19] A. Tapia, G. Tapia, J.X. Ostolaza, J. R. Saenz - „Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.18, no.2, June 2003, pag.194-204.
- [20] I. Boldea, G. Atanasiu - „Analiza unitara a masinilor electrice”, Editura Academiei, Bucuresti, 1983.
- [21] www.vestas.com, Vestas wind aggregates V-5x series with opti-speed
- [22] Vladimir V. Trezija, M. Akke - „Synchronous and Asynchronous Generators Frequency and Harmonics Behavior After a Sudden Load Rejection”, IEEE Transactions on Power Systems, vol.18, no.2, May 2003, pag.730-736.
- [23] I. Szeidert, O. Prostean, I. Filip, N. Budisan - „Considerations Regarding the Modelling of Wind Energy Conversion Systems”, Zilele Academice Timisene, Academia Romana, Simpozion Electrotehnica si Energetica, 23 Mai 2003, Editura Politehnica, ISBN 973-625-050-4, Timisoara.
- [24] www.vestas.com, Vestas wind aggregates V-37 with opti-slip
- [25] Mihet Groza, G.Prostean, Filip, Szeidert, Variable Speed Wind Turbines Using Cage Rotor Induction Generators Connected to the Grid, Electrical Power Conference-IEEE EPC 2007, October 25-26, Montreal, Quebec-Canada, pag. 8-13, [ISI-INSPEC, IEEE Explore]
- [26] I. Szeidert, O. Prostean, Filip, Vasar, Issues regarding the wind farm's design and implementation, Scientific Buletin of “Politehnica” University of Timisoara Transactions on Mechanics,2008
- [27] Gh. D. Andreescu - „Estimatoare in sisteme de conducere a actionarilor electrice”, Editura Orizonturi Universitare, Timisoara, 1999.
- [28] O. Prostean, I.Szeidert, N. Budisan,G. Prostean, Vasar, Mathematical Models of Specific Elements of Wind Energy Conversion Systems Based on Induction Generator, Simpozion Electrotehnica si Energetica, Zilele Academice Timisene, 26-27 mai 2005, ISBN: 973-625-253-3, CD-ROM
- [29] J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, X. Wu, N. Jenkins - „Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines”, IEEE Transactions on Power Systems, vol.18, no.2, May 2003, pag.803-809.
- [30] N. Budisan, I. Filip, O. Prostean, I. Szeidert, Considerations regarding the induction generator's self excitation within Energy Power Systems, SACI 2007

164 Bibliografie

- [31] N. Budisan, I. Filip, V. Balas, O. Prostean, I. Szeidert, Considerations Regarding the Induction Generator's Compound Excitation, Proceedings of the 2nd IASME/WSEAS International Conference on Energy & Environment, Portorose, Slovenia, May 15-17, 2007, ISSN: 1790-5095, ISBN: 978-960-8457-69-0, pag.140-146 [ISI Proceedings]
- [32] N. Budisan, I. Filip, O. Prostean, I. Szeidert, Considerations regarding the Induction Generator's Self-Excitation within Energy Power Stations, Proceedings of the, 4th International Symposium on Applied Computational Intelligence SACI 2007, Timisoara, Romania, May 17-18, 2007, IEEE Catalog Number: 07EX1788, ISBN 1-4244-1234-X, Library of Congress: 2007925118, pag. 257-261 [ISI Proceedings, IEEEExplore, Compedex]
- [33] A. Kelemen, M. Imecs - „Sisteme de reglare cu orientare dupa camp ale masinilor de curent alternativ”, Editura Academiei, Bucuresti, 1989.
- [34] A. Kelemen - „Actionari electrice”, Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1979.
- [35] G. Simoes, F. Farret, „Renewable Energy Systems – Design and Analysis with Induction Generator”, CRC Press, 2004, ISBN 0-8493-2031-3
- [36] B. Wahlberg - „On model reduction in system identification”, Proc. Americ. Control Conf. Seattle, Wash., 1986.
- [37] T. Dordea, N.Budisan, O. Prostean, G. Madescu, D. Craiovan - „Low Speed Induction Generators for Gearless Windmills”, 1st World Wind Energy Conference and Exhibition, Berlin, 2002.
- [38] Szeidert , Prostean Robu Andreea, Jurca Lucian, Windmill's design and implementation aspects, The 19th International DAAAM Symposium, 2008 Slovakia, ISSN 1726-9679
- [39] Mihet-Popa Lucian, Szeidert Iosif, Vasar Cristian, 2 MW Active Stall Controlled Wind Turbines Versus Pitch Controlled Wind Turbines, ELS 2007, International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters, Suceava, Romania
- [40] L. Mihet-Popa,O. Proștean, I. Szeidert, A Comprehensive Laboratory System for Monitoring and Detection of Electrical Drives Systems, ICAE Serbia, 2007
- [41] Mihet, Prostean, Filip, Szeidert, Vasar, Fault Detection Methods for Frequency Converters Fed Induction Machine, IEEE ETFA 2007, Grecia
- [42] D. Hiriart, J. L. Ochoa, and B. Garcia, „Wind power spectrum measured at the San Pedro sierra”, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, 37, 213{220 (2001)
- [43] Marsaglia, G. and Tsang, W. W. 2000, „The ziggurat method for generating random variables”, Journal of Statistical Software 5, 1–7. www.jstatsoft.org.
- [44] M. Babescu, D. Paunescu - „Masini Electrice. Analiza matematica a regimurilor tranzitorii”, Editura Politehnica Timisoara, 2001.
- [45] I. Szeidert, O. Prostean, I.Filip, N. Budisan, Consideration Regarding the Modelling of Wind Energy Conversion Systems, Zilele Academice Timisene, 22-23 mai 2003
- [46] I. Szeidert, O.Prostean, I.Filip, N.Budisan, Considerations Above Modelling And Control Of Windmills, Proceedings of 2nd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, SACI 2005, Timisoara, Romania, May 12-14, 2005, ISBN: 963 7154 39 6, pag 417-425

165 Bibliografie

- [47] I. Szeidert, O. Prostean, N.Budisan, I.Filip - "Two axis – modelling of induction generators for windmills", Proceedings of Global Windpower Conference and Exhibition, Paris, France, 2-5 April, 2002.
- [48] O.Prostean, I.Filip N.Budisan,I. Szeidert, Comparative Studies about Modeling of a Synchronous Generator, AWEA ENERGEX 2000 USA
- [49] I. Filip, „Structuri si algoritmi de conducere adaptiva“, Editura Orizonturi Universitare, Timisoara, 2002, ISBN 973-8109-92-2
- [50] I.Filip, O.Prostean, C.Vasar, I.Szeidert, Adaptive Fuzzy Controller for Synchronous Generator, SACI 2006, 3rd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, Timisoara, May 25-26, 2006, ISBN: 963 7154 46 9 , pag 154-163
- [51] I.Filip, O. Prostean,I. Szeidert., C. Vasar, Design and Simulation of an Adaptive Control System with Application to Excitation Control of a Synchronous Generator, IASTED (MIC 2003), Austria
- [52] O.Prostean, I.Filip, I.Szeidert, C.Vasar, Design An Simulation Of Two Adaptive Self-Tuning Controllers With Application To A Power System, Proceedings of 2nd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, SACI 2005, Timisoara, Romania, May 12-14, 2005, ISBN: 963 7154 39 6, pag 121-129
- [53] I. Filip, O. Prostean, I.Szeidert, V. Balas, G. Prostean, Adaptive Fuzzy Controller and Adaptive Self-Tuning Controller: Comparative Analysis for the Excitation Control of a Synchronous Generator, Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on AUTOMATION & Information (ICAI'06), Cavtat, Croatia, June 12-15, 2006, CD-ROM pp.89-94, ISSN 1790-5109, ISBN 960-8457-46-7
- [54] I. Filip, O. Prostean, I.Szeidert, G. Prostean, Self-tuning Control Using External Integrator Loop for a Synchronous Generator Excitation System, Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA2006, Prague September 20-22, 2006, IEEE Industrial Electronics Society, IEEE Catalog Number: 06TH8897C, ISBN: 1-4244-0681-1, Library of Congress: 2006927951 [cotat ISI INSPEC]
- [55] I.Szeidert, I. Filip, Modeling and Simulation of a Doubly-Fed Induction Machine Operating in Generator Regime with α Angle Lagged Windings, 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, May 28-29 2009, Timisoara, Romania, ISBN: 978-1-4244-4478-6, IEEE Catalog Number CFP0945C-CDR
- [56] I. Filip , O. Prostean, I.Szeidert, C. Vasar, Consideration regarding the convergence and stability of an adaptive self-tuning control system, Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Computational Cybernetics, Gammarth, Tunisia, Oct. 19-21, 2007, ISBN 1-4244-1146-7, pag. 75-79 [IEEExplore]
- [57] I. Filip, O. Prostean, I. Szeidert, A Comparative Study Above Two Self-Tuning Controllers with Application to the Control of Synchronous Generator Excitation System, Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, 2000

166 Bibliografie

- [58] I. Filip, O. Prostean, I. Szeidert, V. Balas, G. Prostean, Comparative Study Regarding an Adaptive Fuzzy Controller and a Self-Tuning Controller with Application to the Excitation Control of a Synchronous Generator, WSEAS Transaction on SYSTEMS, Issue 7, Vol.5, July 2006, pp. 1587-1692, ISSN 1109-2777 [cotat ISI INSPEC]
- [59] I. Szeidert, O. Prostean, I. Filip, C. Vasar, Issues regarding the modeling and simulation of wind energy conversion system's components, Proceedings of International Conference on Automation, Quality & Testing, Robotics (AQTR 2008), May 22-25, Cluj-Napoca, 2008 IEEE-TTLC [ISI Proceedings, IEEEExplore]
- [60] N. Budisan, B. Groza, O. Prostean, I. Filip, I. Szeidert, Rotation Speed and Wind Speed Indirect Measurement Methods for the Control of Windmills with Fixed Blades Turbine, Proceedings of IEEE I2MTC-International Instrumentation & Measurement Technology Conference, May 12-15, 2008, Vancouver -Canada, ISBN 1-4244-1541-1, ISSN 1091-5281, pag. 912-916 [IEEEExplore, ISI INSPEC]
- [61] B. Widrow, S. Stearns - „Adaptive Filters”, Prentice Hall, 1985.
- [62] O. Prostean, D. Curiac, I. Filip - „Experience with Adaptive Control in Stochastic Environment with Application for the Power Systems”, Conti'94, vol.3, Nov. 1994, Timisoara.
- [63] Calin S., Popescu T., Jora B., Sima V. - “Conducerea adaptiva si flexibila a proceselor industriale”, Editura Tehnica, Bucuresti, 1988.
- [64] J.H. Lee, B.L. Cooley - „Optimal Feedback Control Strategies for State-Space Systems with Stochastic Parameter”, IEEE Transaction on Automatic Control, vol.43, nr.10, Oct. 1998.
- [65] L. Ljung, T. Soderstrom - „Theory and Practice of Recursive Identification”, M.I.T. Press, Mass, 1983.
- [66] O.Prostean, „Sisteme de conducere autoacordabile”, Editura Orizonturi Universitare, Timisoara, 2004, ISBN 973-638-154-4
- [67] M. Tertisco, P. Stoica - „Identificarea si Estimarea Parametrilor Sistemelor”, Editura Academiei, 1980.
- [68] M. Tertisco, P. Stoica, Th. Popescu - „Identificarea asistata de calculator a sistemelor”, Editura Tehnica, 1987.
- [69] J. C. Pidre, C. J. Carrillo, A. E. F. Lorenzo - „Probabilistic Model for Mechanical Power Fluctuations in Asynchronous Wind Parks, IEEE Transactions on Power Systems, vol.18, no.2, May 2003, pag.761-768.
- [70] Prostean, Szeidert, Filip, Vasar, Wind Energy Conversion Systems - Modeling in Simulink Environment, Buletin of “Politehnica” University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, 2004
- [71] Mihet-Popa Lucian, Prostean Octavian, Szeidert Iosif, The Soft-starters Modeling, Simulations and Control Implementation for 2 MW Constant Speed Wind Turbines, IREE-the International Review of Electrical Engineering, No. 1, Vol. 3, January-February 2008, pp. 129-135, ISSN 1827-6660 [ISI Thomson, ISI-Inspecc]

167 Bibliografie

- [72] O.Prostean, C.Vasar, I.Szeidert, I.Filip, Comparative Study Regarding Classic PI and Fuzzy Control Solutions Applied at Electrical Drives Equipped with Permanent Magnet Synchronous Machine, Proceedings of the 7th International Conference on Technical Informatics (CONTI'2006), Timisoara, Romania, June 8-9, 2006, Vol.1 pag.51-54, ISBN (10) 973-625-319-8
- [73] O. Prostean, I. Filip, C.Vaşar, I. Szeidert, Neuro-Fuzzy Control and Classic PI Control - Comparative Analysis for Electrical Drives Equipped with Permanent Magnet Synchronous Machine, Scientific Buletin of "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, Vol. 51(65), 2006 No.4, Editura Politehnica, ISSN 1224-600X
- [74] Mihet, Volosencu, Jurca Prostean, Szeidert, Simulation Algorithm Developed to Investigate the Effects of Various Rotor Faults in Cage Rotor Induction Machines, 8th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PS 2008), Santander, Cantabria, Spain, Sept 23-25, 2008, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-006-2, pag. 205-209 [ISI Proc]
- [75] Mihet-Popa Lucian, Prostean Octavian, Szeidert Iosif, An Experimental Laboratory System for Monitoring and Detection of Electrical Drives Systems with Induction Machines, International Scientific Journal Facta Universitatis - NIS, series Electronics and Energetics, April 2008, Vol. 21, No. 1 [Inspec]
- [76] M. Anuradha, S. Hin Yu - "θ-Adaptive Neural Networks: A New Approach to Parameter Estimation", IEEE Transaction on Neural Networks, vol.7, no.4, July 1996, pag. 907-918.
- [77] K.J. Astrom, B. Wittenmark - "On Self-Tuning Regulators", Automatica, vol.9, 1973.
- [78] K.J. Astrom, B. Wittenmark - "Adaptive Control", Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1989.
- [79] I. Filip - „Adaptive controller with external integrative loop with application to a power system”, A&Q'2000 International Conference on Automation and Quality Control, Cluj-Napoca, 28-29 Mai 2000, vol.II, ISBN 973-386-058-2
- [80] I. Filip, O. Prostean, I. Szeidert, C. Vasar - „Comparative Studies About an Adaptive Controller with Application to a Power System, Simpozionul International CONTI'2000, Timisora, Buletin Stiintific al UPT, seria Automatica Calculatoare, vol.1, ISSN 1224-600X.
- [81] I.N.I.D. - „Energia vantului, valurilor si mareelor”, Institutul National de Informare si Documentare, Bucuresti, 1989
- [82] L. Ljung - „System Identification - Theory for the User”, Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs Nw Jersey, 1987.
- [83] O. Prostean, I. Muresan - "Tehnici de identificare si modelare" - vol. 1 si 2, Lito IPTVT, 1985.
- [84] I. Szeidert, O. Prostean, N.Budisan, I.Filip - "Two axis - modelling of induction generators for windmills", Proceedings of Global Windpower Conference and Exhibition, Paris, France, 2-5 April, 2002.
- [85] E. Masry, Jianqing Fan, Local polynomial estimation of regression functions for mixing processes, 1994 IEEE-IMS Workshop on Information Theory and Statistics, 1994. Proceedings., 27-29 Oct. 1994 Page(s):38

168 Bibliografie

- [86] Guojun Wang, J. Cao, H. Wang, Minyi Guo, Polynomial Regression for Data Gathering Global Telecommunications Conference in Environmental Monitoring Applications, 2007. GLOBECOM '07. IEEE 26-30 Nov. 2007 Page(s):1307 – 1311
- [87] Yu Zhefu, L. Huibiao, J. Chuanying, A New Feature Extraction Based on Linear Support Vector Regression, International Seminar on Future BioMedical Information Engineering, 2008. FBIE '08, 18-18 Dec. 2008 Page(s):23 – 25
- [88] Ning Zhou; Trudnowski, D.J.; Pierre, J.W.; Mittelstadt, W.A.; Electromechanical Mode Online Estimation Using Regularized Robust RLS Methods, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 23, Issue 4, Nov. 2008 Page(s):1670 – 1680
- [89] Yunmin Zhu; Keshu Zhang; Li, X.R.; Fusion of distributed extended forgetting factor RLS state estimators, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Volume 44, Issue 2, April 2008 Page(s):457 – 467
- [90] Tu, Y.X.; Wernsdorfer, A.; Honda, S.; Tomita, Y.; Estimation of conduction velocity distribution by regularized-least-squares method, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Volume 44, Issue 11, Nov. 1997 Page(s):1102 – 1106
- [91] Chi Sing Leung; Young, G.H.; Sum, J.; Wing-Kay Kan; On the regularization of forgetting recursive least square, IEEE Transactions on Neural Networks, Volume 10, Issue 6, Nov. 1999 Page(s):1482 – 1486
- [92] Kueiming Lo; Kimura, H.; Recursive estimation methods for discrete systems IEEE Transactions on Automatic Control, Volume 48, Issue 11, Nov. 2003 Page(s):2019 – 2023
- [93] Abjadi, N.R.; Askari, J.; Soltani, J., Adaptive Control of Doubly Fed Field-Oriented Induction Machine Based On Recursive Least Squares Method Taking the Iron Loss Into account, IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, Volume 3, 14-16 Aug. 2006 Page(s):1 – 5
- [94] Abjadi, N.R.; Soltani, J.; Pahlavaninizhad, M.; Askari, J.; A nonlinear adaptive controller for speed sensorless PMSM taking the iron loss resistance into account ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005. Volume 1, 27-29 Sept. 2005 Page(s):188 - 193 Vol. 1
- [95] Zhang Mei; Zhang Chenghui; Zhang Huanshui; Cui Peng; Du Yanchun; Robust Least Square Method and Its Application to Parameter Estimation, 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 18-21 Aug. 2007 Page(s):1483 – 1486
- [96] Qingling He; Xiaohua Bao; Qunjing Wang; Analyzing on structure parameters for low-speed permanent magnet synchronous generator, ICEMS 2008. International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008., 17-20 Oct. 2008 Page(s):3060 - 3063
- [97] Ming Yin; Gengyin Li; Ming Zhou; Chengyong Zhao; Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration, 2007. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 24-28 June 2007 Page(s):1 – 6

169 Bibliografie

- [98] Haque, M.E.; Muttaqi, K.M.; Negnevitsky, M.; Control of a stand alone variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator, 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, , 20-24 July 2008 Page(s):1 – 9
- [99] Shuhui Li; Haskew, T.A.; Characteristic study of vector-controlled direct driven permanent magnet synchronous generator in wind power generation, 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 20-24 July 2008 Page(s):1 – 9
- [100] Di Tommaso, A.O.; Miceli, R.; Ricco Galluzzo, G.; Trapanese, M.; Efficiency Maximization of Permanent Magnet Synchronous Generators Coupled to Wind Turbines, PESC 2007. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007. 17-21 June 2007 Page(s):1267 – 1272
- [101] Di Tommaso, A.O.; Miceli, R.; Galluzzo, G.R.; Trapanese, M.; Efficiency Control for Permanent Magnet Synchronous Generators, IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006. ICIT 2006, 15-17 Dec. 2006 Page(s):2079 – 2084
- [102] Popesci, M.; Cistelecan, M.V.; Melcescu, L.; Covrig, M.; Low Speed Directly Driven Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Energy Applications, ICCEP '07. International Conference on Clean Electrical Power, 2007. 21-23 May 2007 Page(s):784 – 788
- [103] Grabic, S.; Celanovic, N.; Katic, V.A.; Permanent Magnet Synchronous Generator Cascade for Wind Turbine Application, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 23, Issue 3, May 2008 Page(s):1136 – 1142
- [104] Dong, Lei; Gao, Shuang; Liu, Mi; Liao, Xiaozhong; Non-grid-connected wind power generating system with permanent magnet synchronous generator and buck/boost converter, 2009. WNWEC 2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, 24-26 Sept. 2009 Page(s):1 – 5
- [105] Miyabukuro, S.; Takiguchi, M.; Takahashi, R.; Murata, T.; Tamura, J.; Tsuchiya, T.; Modeling and simulation of wind turbine -fed Interior Permanent Magnet Synchronous Generator, ICEM 2008. 18th International Conference on Electrical Machines, 2008. 6-9 Sept. 2008 Page(s):1 – 6
- [106] Rolan, A.; Luna, A.; Vazquez, G.; Aguilar, D.; Azevedo, G.; Modeling of a variable speed wind turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2009. ISIE 2009, 5-8 July 2009 Page(s):734 – 739
- [107] Hui Li; Zhe Chen; Design optimization and evaluation of different wind generator systems, 2008. International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 17-20 Oct. 2008 Page(s):2396 - 2401
- [108] Liangping Shen; Hao Wang; Xianzhong Duan; Operational mechanism and characteristic analysis of directly driven wind turbine with complex structure and permanent magnet synchronous generator, ICEMS 2008. International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008. 17-20 Oct. 2008 Page(s):4215 – 4219
- [109] Yiguang Chen; Zhiqiang Wang; Yonghuan Shen; Lingbing Kong; A control strategy of direct driven permanent magnet synchronous generator for maximum power point tracking in wind turbine application, 2008. International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 17-20 Oct. 2008 Page(s):3921 - 3926

170 Bibliografie

- [110] Srighakollapu, N.; Sensarma, P.S.; Sensorless maximum power point tracking control in wind energy generation using permanent magnet synchronous generator
IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008. 10-13 Nov. 2008 Page(s):2225 – 2230
- [111] Morimoto, S.; Kato, H.; Sanada, M.; Takeda, Y.; Output Maximization Control for Wind Generation System with Interior Permanent Magnet Synchronous Generator
41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference, 2006. Volume 1, 8-12 Oct. 2006 Page(s):503 – 510
- [112] Haque, M.E.; Negnevitsky, M.; Muttaqi, K.M.; A Novel Control Strategy for a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator, 2008. IAS '08. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 5-9 Oct. 2008 Page(s):1 – 8
- [113] Modran, L.N.; Power flow control on wind power plant with permanent magnet synchronous generator, 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM 2008, 22-24 May 2008 Page(s):419 – 426
- [114] Lavanya, V.; Gounden, N.A.; Rao, P.M.; A Simple Controller using Line Commutated Inverter with Maximum Power Tracking for Wind-Driven Grid-Connected Permanent Magnet Synchronous Generators, PEDES '06. International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. 12-15 Dec. 2006 Page(s):1 – 6
- [115] Amei, K.; Takayasu, Y.; Ohji, T.; Sakui, M.; A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuit, PCC Osaka 2002. Proceedings of the Power Conversion Conference, 2002, Volume 3, 2-5 April 2002 Page(s):1447 – 1452 vol.3
- [116] Pahlevaninezhad, Majid; Safaee, Alireza; Eren, Suzan; Bakhshai, Alireza; Jain, Praveen; Adaptive nonlinear maximum power point tracker for a WECS based on permanent magnet synchronous generator fed by a matrix converter, 2009. ECCE. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 20-24 Sept. 2009 Page(s):2578 – 2583
- [117] Thongam, J.S.; Bouchard, P.; Ezzaidi, H.; Ouhrouche, M.; Wind speed sensorless maximum power point tracking control of variable speed wind energy conversion systems, 2009. IEMDC '09. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 3-6 May 2009 Page(s):1832 – 1837
- [118] Singh, M.; Chandra, A.; Power maximization and voltage sag/swell ride-through capability of PMSG based variable speed wind energy conversion system, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008, 10-13 Nov. 2008 Page(s):2206 – 2211
- [119] Shuhui Li; Haskew, T.A.; Energy capture, conversion, and control study of DFIG wind turbine under weibull wind distribution, 2009. PES '09. IEEE Power & Energy Society General Meeting, 26-30 July 2009 Page(s):1 – 9
- [120] Li, S.; Haskew, T.A.; Xu, L.; DFIG characteristic and control integration study under decoupled d-q vector control in stator flux oriented frame, PEMD 2008. 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2008. 2-4 April 2008 Page(s):391 – 395

171 Bibliografie

- [121] Feng Wu; Xiao-Ping Zhang; Ping Ju; Sterling, M.J.H.; Decentralized Nonlinear Control of Wind Turbine With Doubly Fed Induction Generator, IEEE Transactions on Power Systems, Volume 23, Issue 2, May 2008 Page(s):613 – 621
- [122] Foster, S.; Lie Xu; Fox, B.; Coordinated control and operation of DFIG and FSIG based Wind Farms, 2007 IEEE Lausanne Power Tech, 1-5 July 2007 Page(s):522 – 527
- [123] Yu Fang; Liu Qi-hui; Zhang Jian-hua; Flexible Grid-connection Technique and Novel Maximum Wind Power Tracking Algorithm for Doubly-Fed Wind Power Generator, IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2007, 5-8 Nov. 2007 Page(s):2098 – 2103
- [124] Yu Lan; Song Xiaoliang; Chen Guocheng; Yue Yan; Research on idle load grid-connection Control strategy for double-fed induction generator (DFIG) based on Direct Power Control, ICMA 2009. International Conference on Mechatronics and Automation, 9-12 Aug. 2009 Page(s):5014 – 5018
- [125] Holdsworth, L.; Wu, X.G.; Ekanayake, J.B.; Jenkins, N.; Direct solution method for initialising doubly-fed induction wind turbines in power system dynamic models, IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Volume 150, Issue 3, May 2003 Page(s):334 – 342
- [126] Ghennam, T.; Berkouk, E.M.; Francois, B.; Modeling and control of a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) based Wind Conversion System, POWERENG '09. International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 18-20 March 2009 Page(s):507 – 512
- [127] Wei Qiao; Wei Zhou; Aller, J.M.; Harley, R.G.; Wind Speed Estimation Based Sensorless Output Maximization Control for a Wind Turbine Driving a DFIG, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 23, Issue 3, May 2008 Page(s):1156 - 1169
- [128] Wekhande, S.; Agarwal, V.; A simple wind driven self-excited induction generator with regulated output voltage, 1999. INTELEC '99. The 21st International Telecommunications Energy Conference, 6-9 June 1999
- [129] Kumar, C.H.S.; Sarma, A.V.R.S.; Prasad, P.V.N.; Fuzzy Logic Based Control of Wind Turbine Driven Squirrel Cage Induction Generator Connected to Grid, PEDES '06. International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, 12-15 Dec. 2006 Page(s):1 – 6
- [130] Orabi, M.; Youssef, M.Z.; Jain, P.K.; Investigation of self-excited induction generators for wind turbine applications, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Volume 4, 2-5 May 2004 Page(s):1853 - 1856 Vol.4

Anexe

A1. Rezultate obținute pe parcursul stagiului doctoral

A. Articole publicate în reviste de specialitate de circulație internațională

1. L. Mihet-Popa, O. Prostean, **I. Szeidert**, *The Soft-starters Modeling, Simulations and Control Implementation for 2 MW Constant Speed Wind Turbines*, IREE-the International Review of Electrical Engineering, No. 1, Vol. 3, January-February 2008, pp. 129-135, ISSN 1827-6660 [ISI Thomson, ISI-Inspec]
2. L. Mihet-Popa, O. Prostean, **I. Szeidert**, *An Experimental Laboratory System for Monitoring and Detection of Electrical Drives Systems with Induction Machines*, International Scientific Journal Facta Universitatis - NIS, series Electronics and Energetics, April 2008, Vol. 21, No. 1 [Inspecc]
3. **I. Szeidert**, O. Prostean, I. Filip, C. Vasar, *Above Flux Estimation Issues in Induction Generators with Application at Energy Conversion Systems*, Acta Polytechnica Hungarica, Journal of Applied Sciences, Volume 3, Issue Number 3, 2006, Special Issue on Applied Computational Intelligence, pp. 137-148, ISSN 1785-8860

B. Articole publicate in volumele unor manifestari stiintifice internationale cotate ISI

1. **I. Szeidert**, O. Prostean, I. Filip, C. Vasar, *Issues regarding the modeling and simulation of wind energy conversion system's components*, Proceedings of International Conference on Automation, Quality & Testing, Robotics (AQTR 2008), May 22-25, Cluj-Napoca, 2008 IEEE-TTLC [ISI Proceedings, IEEEExplore]
2. L. Mihet-Popa, C. Volosencu, L. Jurca, O. Prostean, **I. Szeidert**, *Simulation Algorithm Developed to Investigate the Effects of Various Rotor Faults in Cage Rotor Induction Machines*, 8th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS (PS 2008), Santander, Cantabria, Spain, Sept 23-25, 2008, ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-474-006-2, pag. 205-209 [ISI Proc]
3. L. Mihet-Popa, B. Groza, O. Prostean, **I. Szeidert**, *Modeling and Design of a Grid Connection Control Mode for a Small Variable-speed Wind Turbine System*, IEEE I2MTC-International instrumentation & measurement technology conference, May 12-15, 2008, ISSN 1091-5281 ISBN 978-1-4244-1540-3, INSPEC Accession Number:10059215, Vancouver Island-Canada [ISI-Inspecc, IEEE Explore]
4. N. Budisan, B. Groza, O. Prostean, I. Filip, **I. Szeidert**, *Rotation Speed and Wind Speed Indirect Measurement Methods for the Control of Windmills with Fixed Blades Turbine*, Proceedings of IEEE I2MTC-International Instrumentation & Measurement Technology Conference, May 12-15, 2008, Vancouver -Canada, ISBN 1-4244-1541-1, ISSN 1091-5281, pag. 912-916 [IEEEExplore, ISI INSPEC]
5. **I. Szeidert**, O. Prostean, A. Robu, L. Jurca, *Windmill's design and implementation aspects*, DAAAM 2008, The 19th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 22-25th October, Trnava, Slovakia, 2008, ISI Proceedings, ISSN 1726-9679
6. **I. Szeidert**, O. Prostean, I. Filip, C. Vașar, L. Mihet-Popa, *Issues Regarding the Modeling and Simulation of Wind Energy Conversion System's Components*, Proceedings of International Conference on Automation, Quality & Testing, Robotics (AQTR 2008), May 22-25, Cluj-Napoca, 2008 IEEE-TTLC [ISI Proceedings, IEEEExplore]
7. I. Filip, O. Prostean, **I.Szeidert**, G. Prostean, *Self-tuning Control Using External Integrator Loop for a Synchronous Generator Excitation System*, Proceedings of the

- 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA2006, Prague September 20-22, 2006, IEEE Industrial Electronics Society, IEEE Catalog Number: 06TH8897C, ISBN: 1-4244-0681-1, Library of Congress: 2006927951 [cotat ISI INSPEC]
8. Mihet Groza, G. Prostean, I. Filip, **I. Szeidert**, *Variable Speed Wind Turbines Using Cage Rotor Induction Generators Connected to the Grid*, Electrical Power Conference-IEEE EPC 2007, October 25-26, Montreal, Quebec-Canada, pag. 8-13, [ISI-INSPEC, IEEE Explore]
 9. N. Budisan, I. Filip, O. Prostean, **I. Szeidert**, *Considerations regarding the Induction Generator's Self-Excitation within Energy Power Stations*, Proceedings of the, 4th International Symposium on Applied Computational Intelligence SACI 2007, Timisoara, Romania, May 17-18, 2007, IEEE Catalog Number: 07EX1788, ISBN 1-4244-1234-X, Library of Congress: 2007925118, pag. 257-261 [ISI Proceedings, IEEEExplore, Compedex]
 10. N. Budisan, I. Filip, V. Balas, O. Prostean, **I. Szeidert**, *Considerations Regarding the Induction Generator's Compound Excitation*, Proceedings of the 2nd IASME/WSEAS International Conference on Energy & Environment, Portorose, Slovenia, May 15-17, 2007, ISSN: 1790-5095, ISBN: 978-960-8457-69-0, pag.140-146 [ISI Proceedings]
 11. I. Filip, O. Prostean, **I. Szeidert**, V. Balas, G. Prostean, *Comparative Study Regarding an Adaptive Fuzzy Controller and a Self-Tuning Controller with Application to the Excitation Control of a Synchronous Generator*, WSEAS Transaction on SYSTEMS, Issue 7, Vol.5, July 2006, pp. 1587-1692, ISSN 1109-2777 [cotat ISI INSPEC]

C. Articole publicate in volumele unor manifestari stiintifice internationale, indexate in baze de date internationale (BDI) (IEEEExplore, INSPEC, etc)

1. **I.Szeidert**, I. Filip, *Modeling and Simulation of a Doubly-Fed Induction Machine Operating in Generator Regime with a Angle Lagged Windings*, , 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, May 28-29 2009, Timisoara, Romania, ISBN: 978-1-4244-4478-6, IEEE Catalog Number CFP0945C-CDR
2. D. Paunescu, M. Babescu, O. Prostean, **I. Szeidert**, *Stability of the Synchronous Generators within Wind Energy Power Systems*, , 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, May 28-29 2009, Timisoara, Romania, ISBN: 978-1-4244-4478-6, IEEE Catalog Number CFP0945C-CDR
3. **I. Szeidert**, O. Prostean, N. Budisan, I. Filip, V. Balas , G. Prostean, *Viewpoint on Wind Energy Usage in Romania - Banat Region*, WSEAS 2009, Timisoara
4. **I. Szeidert**, M. Biriescu, L. Mihet-Popa, D. Toader, *Analysis by Numerical Simulation regarding the Stability of the Synchronous Generator Operating in Autonomous or Grid Connected Regime*, , 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, May 28-29 2009, Timisoara, Romania, ISBN: 978-1-4244-4478-6, IEEE Catalog Number CFP0945C-CDR
5. I. Filip , O. Prostean, **I.Szeidert**, C. Vasar, *Consideration regarding the convergence and stability of an adaptive self-tuning control system*, Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Computational Cybernetics, Gammarrh, Tunisia, Oct. 19-21, 2007, ISBN 1-4244-1146-7, pag. 75-79 [IEEEExplore]
6. **I. Szeidert**, O.Prostean, N. Budisan, I.Filip, *Considerations regarding the induction generator's self excitation within Energy Power Systems*, SACI 2007 [IEEEExplore]
7. I.Filip, O. Prostean, **I. Szeidert**., C. Vasar, *Design and Simulation of an Adaptive Control System with Application to Excitation Control of a Synchronous Generator*, IASTED (MIC 2003), Austria
8. I. Filip, O. Prostean, **I. Szeidert**, V. Balas, G. Prostean, *Adaptive Fuzzy Controller and Adaptive Self-Tuning Controller: Comparative Analysis for the Excitation Control*

of a Synchronous Generator, Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on AUTOMATION & Information (ICAI'06), Cavtat, Croatia, June 12-15, 2006, CD-ROM pp.89-94, ISSN 1790-5109, ISBN 960-8457-46-7

D. Articole publicate in reviste de specialitate din tara, cu circulatie internationala recunoscuta, indexate in baze de date internationale (BDI), reviste B+ in clasificarea CNCSIS

1. L. Mihet-Popa, G. Proștean, **I. Szeidert**, *Solar Energy Systems - Power Configuration and Topologies for photovoltaic systems*, Scientific Buletin of "Politehnica" University of Timisoara Transactions on MECHANICS (Buletinul Științific al Universității POLITEHNICA din Timișoara, România-Seria Macanică), fascicolul 1, 2008, Tomul 53 (67), ISSN 1224-6077, pag. 111-114
2. **I. Szeidert**, O. Proștean, Filip, Vasar, *Issues regarding the wind farm's design and implementation*, Scientific Buletin of "Politehnica" University of Timisoara Transactions on Mechanics, 2008, (Buletinul Științific al Universității POLITEHNICA din Timișoara, România-Seria Macanică), fascicolul 1, 2008, Tomul 53 (67), ISSN 1224-6077
3. O. Proștean, I. Filip, C.Vașar, **I. Szeidert**, *Neuro-Fuzzy Control and Classic PI Control - Comparative Analysis for Electrical Drives Equipped with Permanent Magnet Synchronous Machine*, Scientific Buletin of "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, Vol. 51(65), 2006 No.4, Editura Politehnica, ISSN 1224-600X
4. O. Proștean, I. Filip, C.Vașar, **I. Szeidert**, *Inverse control based on neural networks*, Scientific Buletin of "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, Vol. 50(64), 2005 No.1, Editura Politehnica, ISSN 1224-600X, pag.35-40
5. O. Proștean, **I. Szeidert**, I. Filip, C. Vasar, *Wind Energy Conversion Systems - Modeling in Simulink Environment*, Buletin of "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, 2004
6. C.Vasar, I.Filip, **I.Szeidert**, *Consideration Regarding System Identification by Using Neural Networks*, Periodica "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, 2002

E. Articole publicate in volumele unor manifestari stiintifice internationale din tara sau strainatate

1. L. Mihet-Popa, G. Proștean, **I. Szeidert**, *The comparison between annual energy loss distribution for two variable speed wind turbine concepts of 3 MW*, ELS 2007, International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters, Suceava, Romania
2. L. Mihet-Popa, **I. Szeidert**, C. Vasar, *2 MW Active Stall Controlled Wind Turbines Versus Pitch Controlled Wind Turbines*, ELS 2007, International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters, Suceava, Romania
3. L. Mihet-Popa, O. Proștean, **I. Szeidert**, *A Comprehensive Laboratory System for Monitoring and Detection of Electrical Drives Systems*, ICAE Serbia, 2007
4. C. Vasar, **I. Szeidert**, I. Filip, G.Proștean, *Short Term Electric Load Forecast with Artificial Neural Networks*, Preprints of the 4th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL 2007), Sibiu, Sept. 27-30, 2007, ISBN 978-976-739-481-1, pag.443-450
5. M. Babescu, O. Proștean, G. Proștean, **I. Szeidert**, C. Vasar, *Considerations above Synchronous Machine Stability Analysis by using Phase Portraits*, Proceedings of the 6th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2007, 4-6 Oct. Chisinau, Republica Moldova, Analele Universitatii din Craiova, Seria

- Inginerie Electrica, Anul 31, nr.31, 2007, vol II, ISSN 1842-4805
6. I.Filip, O.Prostean, C.Vasar, **I.Szeidert**, *Adaptive Fuzzy Controller for Synchronous Generator*, SACI 2006, 3rd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, Timisoara, May 25-26, 2006, ISBN: 963 7154 46 9 , pag 154-163
 7. **I.Szeidert**, *Comparative Study Regarding Control of Wind Energy Conversion Systems Based on the Usage of Classical and Adaptive Neuro Fuzzy Controllers*, SACI 2006, 3rd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, Timisoara, May 25-26, 2006, ISBN: 963 7154 46 9 , pag 614-620
 8. **I. Szeidert**, O. Prostean, I. Filip, C. Vasar, *Considerations regarding the flux estimation in induction generator with application at the control of unconventional energetic conversion systems*, SACI 2006, 3rd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, Timisoara, Romania, May 25-26, 2006 ISBN 963 7154 46 9, pag 77-86
 9. O.Prostean, C.Vasar, **I.Szeidert**, I.Filip, *Comparative Study Regarding Classic PI and Fuzzy Control Solutions Applied at Electrical Drives Equipped with Permanent Magnet Synchronous Machine*, Proceedings of the 7th International Conference on Technical Informatics (CONTI'2006), Timisoara, Romania, June 8-9, 2006, Vol.1 pag.51-54, ISBN (10) 973-625-319-8
 10. O.Prostean, I.Filip, **I.Szeidert**, C.Vasar, *Design An Simulation Of Two Adaptive Self-Tuning Controllers With Application To A Power System*, Proceedings of 2nd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, SACI 2005, Timisoara, Romania, May 12-14, 2005, ISBN: 963 7154 39 6, pag 121-129
 11. O. Prostean, **I.Szeidert**, N. Budisan, G. Prostean, C. Vasar, *Mathematical Models of Specific Elements of Wind Energy Conversion Systems Based on Induction Generator*, Simpozion Electrotehnica si Energetica, Zilele Academice Timisene, 26-27 mai 2005, ISBN: 973-625-253-3, CD-ROM
 12. **I. Szeidert**, N. Budisan, I.Filip, *Consideration and Perspectives about Wind Energy Usage in Romania*, Simpozion Electrotehnica si Energetica, Zilele Academice Timisene, 26-27 mai 2005, ISBN: 973-625-253-3, CD-ROM
 13. **I. Szeidert**, O.Prostean, I.Filip, N.Budisan, *Considerations Above Modelling And Control Of Windmills* , Proceedings of 2nd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, SACI 2005, Timisoara, Romania, May 12-14, 2005, ISBN: 963 7154 39 6, pag 417-425
 14. **I. Szeidert**, G.Prostean, I. Filip, C.Vasar, *Considerations Regarding The Usage Of Wind Energy Conversion Systems*, Manufacturing and Management, Macedonia,2004
 15. **I. Szeidert**, O. Prostean, I.Filip, N. Budisan, *Consideration Regarding the Modelling of Wind Energy Conversion Systems*, Zilele Academice Timisene, 22-23 mai 2003
 16. **I. Szeidert**, O.Prostean, N. Budisan, I.Filip, *"Two Axis" Modeling of Induction Generators for Windmills*, EWEA WINDPOWER France, 2002
 17. O.Prostean, I.Filip, N.Budisan, **I. Szeidert**, *Comparative Studies about Modeling of a Synchronous Generator*, AWEA ENERGEX 2000 USA

Granturi de cercetare-dezvoltare-inovare obținute prin competiție la nivel național, în calitate de director, in domeniul tezei de doctorat

1. SISTEME DE CONDUCERE UTILIZATE ÎN ENERGIA NECONVENȚIONALĂ, Grant CNCISIS nr. 5 / 01.10.2007, Cod CNCISIS 7, nivel de finanțare 5000 RON, Universitatea Politehnica Timisoara, durata 1 an.
2. CERCETĂRI PRIVIND METODE DE IDENTIFICARE ȘI CONDUCERE A SISTEMELOR CU GENERATOARE DE INDUCȚIE DESTINATE ENERGETICII RESURSELOR ECOLOGICE, Grant CNCISIS nr. 2739/ 19.05.2006, Tema 11, cod CNCISIS 97, nivel de finanțare 13000 RON, Universitatea Politehnica Timisoara, durata 1 an.

Granturi de cercetare-dezvoltare-inovare obținute prin competiție la nivel național, în calitate de membru, în domeniul tezei de doctorat

1. CERCETĂRI PRIVIND CONDUCEREA UNOR NOI STRUCTURI DE AGREGATE AEROELECTRICE, CU TURBINE NEREGLABILE ȘI GENERATOR SINCRON CU POLI PERMANENȚI, Grant CNC SIS nr.98GR / 11.06.2008, Cod CNC SIS 372, nivel de finanțare 68000 RON, Universitatea Politehnica Timisoara, durata 1 an.
2. CERCETĂRI PRIVIND CONDUCEREA UNOR NOI STRUCTURI DE AGREGATE AEROELECTRICE, CU TURBINE NEREGLABILE ȘI GENERATOR SINCRON CU MAGNEȚI PERMANENȚI, Grant CNC SIS nr. 46GR / 11.05.2007, Cod CNC SIS 372, nivel de finanțare 90000 RON, Universitatea Politehnica Timisoara, durata 1 an.
3. CERCETĂRI PRIVIND SINTEZA ȘI IMPLEMENTAREA PE PROCESOARE DE SEMNAL A UNOR STRATEGII DE CONDUCERE BAZATE PE REȚELE NEURONALE CU APLICAȚIE LA COMANDA SISTEMULUI DE EXCITAȚIE A GENERATOARELOR SINCRONE, Grant CNC SIS nr. 46GR / 11.05.2007, Tema 5, Cod CNC SIS 359, nivel de finanțare 15000 RON, Universitatea Politehnica Timisoara, durata 1 an.
4. GENEX: OPTIMIZAREA FUNCȚIONĂRII HIDROGENERATOARELOR ELECTRICE PRIN MODERNIZAREA SISTEMELOR DE EXCITAȚIE ÎN VEDEREA CREȘTERII EFICIENȚEI ENERGETICE ȘI COMPETITIVITĂȚII LOR, PNCDI II, Program 4 "Parteneriate în Domeniile Prioritare" (PDP) Contract nr. 21-040/2007
5. CERCETĂRI PRIVIND SINTEZA ȘI IMPLEMENTAREA PE PROCESOARE DE SEMNAL A UNOR STRATEGII DE CONDUCERE ADAPTIVĂ AUTOACORDABILĂ CU APLICAȚIE LA COMANDA SISTEMULUI DE EXCITAȚIE A GENERATOARELOR SINCRONE, Grant CNC SIS nr. 27688 /14.03.2005, Tema 13, cod CNC SIS 659
6. CERCETĂRI PRIVIND NOI SISTEME AUTOMATE DE CONVERSIE ELECTROMECHANICĂ A ENERGIEI, CU MAȘINI DE INDUCȚIE, CU APLICAȚIE LA AGREGATELE AEROELECTRICE, Grant CNC SIS, (2738/19.05.2006), Tema 29, cod CNC SIS 628, nivel de finanțare 16000 RON, Universitatea Politehnica Timisoara, durata 1 an.
7. CERCETĂRI PRIVIND SINTEZA ȘI IMPLEMENTAREA PE PROCESOARE DE SEMNAL A UNOR STRATEGII DE CONDUCERE FUZZY CU APLICAȚIE LA COMANDA SISTEMULUI DE EXCITAȚIE A GENERATOARELOR SINCRONE, Grant CNC SIS A1 / GR181 (2739/19.05.2006), Tema 6, cod CNC SIS 349, nivel de finanțare 15000 RON, Universitatea Politehnica Timisoara, durata 1 an.
8. CERCETĂRI PRIVIND SINTEZA ȘI IMPLEMENTAREA PE PROCESOARE DE SEMNAL A UNOR STRATEGII DE CONDUCERE FUZZY CU APLICAȚIE LA COMANDA SISTEMULUI DE EXCITAȚIE A GENERATOARELOR SINCRONE, Grant CNC SIS A1 / GR181 (2739 /2006), Tema 6, cod CNC SIS 349
9. STRUCTURI, METODE ȘI STRATEGII DE IDENTIFICARE, SIMULARE ȘI CONDUCERE A SISTEMELOR CU GENERATOARE ASINCRONE DESTINATE ENERGETICII RESURSELOR REGENERABILE, Grant CNC SIS nr. 33550 / 2003, cod CNC SIS 26, tema nr. 24 (în continuare)
10. STRUCTURI, METODE ȘI STRATEGII DE IDENTIFICARE, SIMULARE ȘI CONDUCERE A SISTEMELOR CU GENERATOARE ASINCRONE DESTINATE ENERGETICII RESURSELOR REGENERABILE, Grant CNC SIS nr. 33501 / 2002 cod CNC SIS 521, tema nr.39 (în continuare)
11. STRUCTURI, METODE ȘI STRATEGII DE IDENTIFICARE, SIMULARE ȘI CONDUCERE A SISTEMELOR CU GENERATOARE ASINCRONE DESTINATE ENERGETICII RESURSELOR REGENERABILE, Grant CNC SIS nr. 34977 / 2001
cod CNC SIS 868, tema nr.36
12. ATELIER PENTRU INGINERIE CONCURENȚĂ - CONTRACT MAJOR, Nr. 10429/12.09.2000
Cod CNFIS: 56 runda 2
13. DEZVOLTAREA UNOR STRUCTURI DE CONDUCERE ADAPTIVĂ AUTOACORDABILĂ ȘI FUZZY A PROCESELOR COMPLEXE, CU APLICAȚIE LA CONDUCEREA SISTEMELOR ENERGETICE DE PUTERE, Grant CNC SIS nr. 512 /1999, tema nr. 7

14. CERCETARI PRIVIND DEZVOLTAREA UNOR STRUCTURI DE CONDUCERE AUTOACORDABILA A PROCESELOR COMPLEXE, CU APLICATIE LA CONDUCERE SISTEMELOR DE EXCITATIE A GENERATOARELOR SINCRONE, Nr.5199/21.11.1999, Nr.tema B3

Granturi de cercetare-dezvoltare-inovare obținute prin competiție la nivel internațional, în calitate de membru, in domeniul tezei de doctorat

1. IMPROVEMENT OF THE STRUCTURES AND EFFICIENCY OF SMALL HORIZONTAL AXIS WIND GENERATORS WITH NON-REGULATED BLADES, Mecanismul Financiar SEE - Programul Norwegian de Cooperare, Grant RO0018 / 24.04.2009, nivel de finanțare 1.2 mil EUR

Cărți publicate în domeniul tezei

1. Prostean Octavian, Filip Ioan, Vasar Cristian, Szeidert Iosif, *Modelare și simulare*, 2006, 232 pagini, Editura Orizonturi Universitare, ISBN (10)973-638-273-7
2. Filip Ioan, Prostean Octavian, Szeidert Iosif, Vasar Cristian, *Medii de simulare*, 2007, 204 pagini, Editura Orizonturi Universitare, ISBN 978-973-638-335-9