

STABILITATEA DINAMICĂ A SISTEMELOR ELECTROENERGETICE ALIMENTATE DE LA GENERATOARE SINCRONE ȘI GENERATOARE ASINCRONE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitate 'Politehnica' din Timișoara
In domeniul INGINERIE ELECTRICA
de către

Ing.Ovidiu Stoian

Conducător științific:
Referenți științifici:

Prof.dr.ing Ioan Novac
Prof.dr.ing Petru Chioncel
Prof.dr.ing Marius Babescu
Prof.dr.ing Valentin Muller

Ziua susținerii tezei: 28.01.2008

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, 2008

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

Teza de doctorat a fost elaborată în cadrul catedrei de Mașini, Acționări și Utilizări Electrice.

Folosirea generatoarelor asincrone este analizată și implementată ca și o soluție complementară de dată recentă, mai ales prin atragerea în circuitul electroenergetic a noilor forme de energie: eoliană, microhidrocentrale.

Aceasta impune modelarea, simularea și reglarea sistemelor electroenergetice cu generatoare sincrone și asincrone.

În cadrul sistemelor electroenergetice cu generatoare sincrone și asincrone se pune problema stabilității dinamice și statice la diverse sarcini.

Stabilitatea statică are loc la variații mici și lente ale sarcinii, iar cea dinamică la variații rapide ale sarcinii. Sistemul este static sau dinamic stabil atunci când funcționarea se stabilizează într-un punct bine definit de sarcina electrică impusă.

Se face remarcă că sistemele generator sincron-turbină de antrenare și generator asincron-generator sincron-turbine de antrenare, pot funcționa static stabil în unul sau mai multe puncte (la anumite sarcini și pentru anumite valori ale curentului de excitație în trei puncte: două stabile și unul instabil).

Stabilitatea dinamică este analizată cu ajutorul modelului ortogonal prin rezolvarea sistemelor de ecuații diferențiale, neliniare și neomogene.

Sunt studiate influențele reguletoarelor de frecvență și de tensiune asupra sistemului.

Pentru ajutorul acordat pe parcursul editării tezei de doctorat, autorul aduce mulțumiri conducătorului științific d-lui prof.dr.ing. Novac Ioan precum și celorlalți profesori de la POLITEHNICA din Timișoara care m-au format ca om și mai apoi ca inginer.

Timișoara, decembrie 2007

Ovidiu Stoian

Stoian, Ovidiu

Stabilitatea dinamică a sistemelor electroenergetice alimentate de la generatoare sincrone și generatoare asincrone

Teze de doctorat ale UPT, Seria 6, Nr. 8, Editura Politehnica, 2008, 182 pagini, 127 figuri, 4 tabele.

ISSN: 1842-7022

ISBN: 978-973-625-586-1

Cuvinte cheie:

generator sincron, generator asincron, stabilitate statică, stabilitate dinamică, sisteme de ecuații algebrice, sisteme de ecuații diferențiale, regulator de tensiune, regulator de frecvență, modelări, simulări, sistem energetic, generator, turbină, sarcină electrică, sarcină activă, încărcări proporționale.

Rezumat:

Cercetările de dată recentă (ultimii 10 ani) au scos în evidență utilitatea folosirii și a generatorului asincron, alături de cel sincron, la producerea de energie electrică din energie eoliană, hidroenergetică, etc.

Sistemul energetic format din generator sincron+turbină de antrenare, generator asincron+turbină de antrenare și sarcină, poate funcționa în unele cazuri, în trei puncte de funcționare (două static stabile și unul instabil).

La alegerea punctului de funcționare (din cele trei posibile) se are în vedere zona de funcționare anterioară.

Stabilitatea dinamică este analizată în cele două cazuri [(generator sincron + turbină+sarcină) sau(generator sincron + turbină; generator asincron+turbină+sarcină)] în prezenta unor regulatoare de tip PI.

Se face remarcă că sistemele energetice cu generator sincron și asincron sunt dinamic stabile indiferent de valoarea sarcinii electrice.

Lucrarea conține și măsurători experimentale la microhidrocentrale cu generatoare sincrone și asincrone. Au fost validate astfel rezultatele obținute prin simulare pentru diverse sarcini electrice și pentru diverse situații: cu sau fără regulatoare de tensiune și de frecvență.

CUPRINS

1.	INTRODUCERE.....	7
1.1.	Oportunitatea și obiectivele tezei.....	7
1.2.	Studiul actual al cercetărilor privind stabilitatea dinamică a sistemelor electroenergetice cu generatoare sincrone și asincrone....	8
1.2.1.	Stabilitatea statică a generatorului sincron.....	9
1.2.2.	Stabilitatea statică a generatorului asincron.....	15
1.3.	Modele matematice folosite în analiza stabilității generatoarelor electrice.....	20
1.3.1.	Modele matematice folosite în analiza stabilității statice a generatoarelor electrice.....	21
1.3.2.	Modele matematice folosite în analiza stabilității dinamice a generatoarelor electrice.....	27
1.4.	Stabilitatea GS + GA debitând pe o rețea de tensiune și frecvență dată.....	28
1.5.	Influența reguletoarelor asupra stabilității statice și dinamice.....	32
1.6.	Calculul turației rotorului GA într-un sistem izolat la modificări ale sarcinii.....	36
1.7.	Prezentarea conținutului tezei de doctorat.....	38
2.	DETERMINAREA CONDIȚIILOR INIȚIALE ÎN ESTIMAREA STABILITĂȚII DINAMICE LA UN SISTEM ELECTROENERGETIC CU GS ȘI GA.....	40
2.1.	Comportarea sistemului TURBINĂ -- GS -- SARCINĂ la variații ale sarcinii.....	40
2.1.1.	Punctele de funcționare la sistemul TURBINĂ -- GS -- SARCINĂ.....	43
2.1.2.	Influența curentului de excitație asupra caracteristicii mecanice.....	49
2.2.	Încărcarea generatoarelor GS + GA la sarcina variabilă.....	52
2.2.1.	Punctele de funcționare la sistemul TURBINĂ -- GS -- GA- Sarcină.....	63
2.3.	Stabilitatea statică la generatoarele electrice	67
2.3.1.	Stabilitatea statică la sistemul : turbină -- generator sincron -- sarcină.....	68
2.3.2.	Stabilitatea statică la sistemul : turbine - generatoare sincron și asincron --sarcină.....	72
2.3.2.1.	Caracteristica mecanică a GA în sistemul GS + GA.....	72

2.3.2.2.	Caracteristica mecanică a GS în sistemul GS + GA.....	81
2.4.	Comportarea sistemului GS + GA la modificări ale sarcinii.....	87
2.4.1.	Comportarea sistemului GS + GA la modificări ale sarcinii capacitive.....	87
2.4.2.	Comportarea sistemului GS + GA la modificări ale sarcinii rezistive.....	94
2.4.3.	Comportarea sistemului GS + GA la modificări ale curentului de excitație.....	100
2.5.	Estimarea stabilității dinamice prin simulări numerice.....	104
2.6.	Concluzii.....	109
3.	STABILITATEA DINAMICĂ A GENERATOARELOR SINCRON ȘI ASINCRON REGLATE, AVÂND ÎN VEDERE VALOAREA SARCINII DIN SISTEM.....	111
3.1.	Stabilitatea dinamică a sistemului la controlul cuplurilor și a curentului de excitație prin prescrierea tensiunii și a frecvenței...116	
3.1.1.	Stabilitatea dinamică prin controlul tensiunii și frecvenței la sistemul TURBINĂ -- GS – SARCINĂ.....	117
3.1.2.	Stabilitatea dinamică prin controlul tensiunii și frecvenței la sistemul TURBINĂ -- GS + GA – SARCINĂ.....	129
3.2.	Concluzii.....	147
4.	STABILITATEA DINAMICĂ A GENERATOARELOR SINCRONE PRIN MĂSURAREA TENSIUNII ȘI FRECVENȚEI DIN SISTEM.....	149
4.1.	Stabilitatea dinamică a sistemului la controlul frecvenței prin cuplul de la turbină.....	149
4.2.	Stabilitatea dinamică a sistemului la controlul tensiunii prin curentul de excitație de la GS.....	152
4.3.	Tensiunea și frecvența la GS , în regim staționar.....	153
4.4.	Stabilitatea dinamică a sistemului GS + SARCINĂ.....	154
4.4.1.	Tensiunea este controlată prin măsurarea directă a valorilor sale din sistem.....	159
4.5.	Concluzii.....	165
5.	VERIFICĂRI EXPERIMENTALE.....	167
6.	CONCLUZII.....	173
6.1.	Concluzii finale.....	173
6.2.	Contribuții originale.....	174
6.3.	Perspective.....	176
	BIBLIOGRAFIE.....	177

1. INTRODUCERE

1.1. Oportunitatea și obiectivele tezei

Creșterea consumului energetic global și reducerea permanentă a rezervelor energetice, în special cele fosile : cărbuni, petrol, gaze naturale, necesită atragerea unor noi surse alternative, regenerabile cum ar fi : energia vântului și energia hidroelectrică.

Folosirea, pe lângă generatoarele sincrone (GS) clasice și a generatoarelor asincrone (GA) face ca sistemele electroenergetice funcționând în regim insular să fie în atenția specialiștilor, în ultima perioadă de timp.

Absența fenomenului de pendulare , în aceste sisteme izolate și funcționarea **dinamic stabilă** pentru orice valori ale sarcinii, face ca această soluție să se impună în viitor.

Problematika abordată de autor, în prezenta teză de doctorat, se referă la sistemele electroenergetice formate din **TURBINE + GENERATOR SINCRON + GENERATOR ASINCRON + SARCINĂ (T + GS + GA)**.

Analiza **STATICĂ ȘI DINAMICĂ** a acestor sisteme se impune în mărirea fiabilității în funcționare și reducerea avariilor, făcând **oportună și necesară** această lucrare.

Cunoașterea comportării acestor sisteme electroenergetice izolate este esențială în:

- estimarea valorilor de șoc permise pentru sarcină ;
- aprecierea comportării dinamice a sistemului ;
- alegerea corectă a punctelor de funcționare având în vedere faptul că la aceeași sarcină sistemul poate funcționa, uneori , în 3 puncte ;
- stabilirea caracterului : **stabil sau instabil** a punctelor de funcționare.

În regim insular funcționarea sistemului T – GS – GA este puțin abordată în literatura de specialitate și elaborarea acestei lucrări a rezultat ca urmare a extinderii folosirii cu precădere a energiei eoliene.

În elaborarea tezei de doctorat s-au avut în vedere următoarele **obiective** :

- elaborarea modelelor matematice ale sistemelor cu GS și GA funcționând în regim izolat sau insular ;
- modelarea și simularea sistemului cu GS și GA ;
- stabilirea limitelor de funcționare **statice și dinamice** la modificări ale sarcinii;
- stabilirea naturii ,**stabil sau instabil**, a punctului (sau punctelor) de funcționare ;
- determinarea limitelor de variație a tensiunii și frecvenței din sistem la modificări ale sarcinii ;
- realizarea unor **sisteme de reglaj static și dinamic stabile**, astfel încât tensiunea și frecvența să fie în limitele impuse ;

- verificarea experimentală a modelelor matematice folosite în modelarea și simularea sistemului T – GS – GA ;
- prezentarea contribuțiilor autorului în problematica teoretică de modelare, simulare și estimare a stabilității dinamice, cât și în cea practică de testare, validare, experimentare.

Contribuțiile de ordin teoretic : modelarea și simularea sistemelor electroenergetice T – GS – GA și analiza **stabilității dinamice** a acestor sisteme, corelarea rezultatelor teoretice cu cele experimentale, conferă lucrării un caracter de originalitate și aplicabilitate practică în energetica resurselor regenerabile.

1.2. Studiul actual al cercetărilor privind stabilitatea dinamică a sistemelor electroenergetice cu generatoare sincrone și asincrone

Perturbațiile de sarcină ce intervin în sistemele electroenergetice sunt de două tipuri[A1]:

-perturbații (variații) mici ale sarcinii și lente ca evoluție în timp în raport cu constantele de timp ale circuitelor electrice. Aceste perturbații determină o funcționare statică stabilă dacă generatorul continuă să funcționeze normal un timp nelimitat;

-perturbații (variații) mari și rapide ale sarcinii la bornele generatorului electric (modificări bruște ale puteri electrice) sau la arborele său (modificări bruște ale puterii mecanice). Generatorul funcționează dinamic stabil dacă în urma acestor modificări violente și semnificative ale sarcinii continuă să funcționeze normal un timp nelimitat.

Variațiile mici ale sarcinii sunt date de conectarea sau deconectarea consumatorilor electrice la rețeaua de alimentare. Cum în general un consumator are puterea mult mai mică comparativ cu cea a sistemului electroenergetic la care se conectează (deconectează), aceste schimbări ale sarcinii pot fi considerate mici. Influența lor asupra generatoarelor sistemului depinde de locul unde este amplasat consumatorul în sistem și în cele mai multe cazuri perturbă în mică măsură funcționarea generatoarelor [C5,B9,A2,C4].

Variațiile mari ale sarcinii sunt consecința unor scurtcircuite, întreruperea căilor primare, conectarea (deconectarea) unor zone din sistem prin intermediul liniilor de MT și IT. Foarte important este locul unde are loc variația de sarcină deoarece aceasta se transmite prin liniile electrice la generatoarele sistemului și distanța electrică până la acestea determină hotărâtor stabilitatea întregului sistem[A3].

La funcționarea în regim staționar necesarul de putere activă este asigurat din turbinele ce antrenează generatoarele sincrone și asincrone.

În procesele tranzitorii necesarul de putere activă provine atât de la turbinele primare ce furnizează putere mecanică, cât și din variațiile energiilor cinetice ale rotoarelor generatoarelor sincrone și asincrone[D1].

La generatoarele sincrone energiile cinetice inițiale și finale ale rotoarelor sunt aceleași deoarece vitezele unghiulare în regim staționar sunt aceleași.

La generatoarele asincrone energiile cinetice ale generatoarelor nu sunt constante

și depind de vitezele unghiulare ale rotoarelor, viteze ce se pot schimba prin modificarea cuplului la arbore sau a tensiunii la borne[B1].

La o încărcare bruscă prin conectarea unei sarcini de valoare mare la bornele sistemului energetic, sarcina se distribuie pe generatoarele sincrone și asincrone într-un mod bine determinat având în vedere specificul fiecărui generator. Problemele de încărcare dinamică presupun rezolvarea unor seturi de sisteme de ecuații diferențiale neliniare, rezolvări care se pot face numai prin metode numerice[P1].

Încărcările statice au la bază sisteme algebrice de rezolvare sau se pot intui fizic și pe caracteristicile statice ale generatoarelor.

1.2.1. Stabilitatea statică a generatorului sincron

Se are în vedere un generator sincron conectat la o rețea de putere infinită.

Determinarea limitelor încărcărilor statice stabile presupune cunoașterea tensiunii la bornele generatorului și a unghiului de sarcină θ [N5].

Determinarea tensiunii la bornele generatorului sincron și a unghiului de sarcină

Fie U_s -tensiunea rețelei de putere infinită (și plasată în axa reală);

U_{eE} -tensiunea electromotoare a generatorului sincron;

X_G -reactanța sincronă a generatorului sincron;

X_T -reactanța de transfer a liniei;

U_b -tensiunea la bornele generatorului sincron.

La neglijarea pierderilor pe linia de transport(figura 1.1) și la GS (generatorul sincron) se poate scrie[B2]:

$$\underline{U}_{eE} = \underline{U}_s + j(X_G + X_T)\underline{I} = \underline{U}_s + jX_T\underline{I} + jX_G\underline{I} = \underline{U}_b + jX_G\underline{I}$$

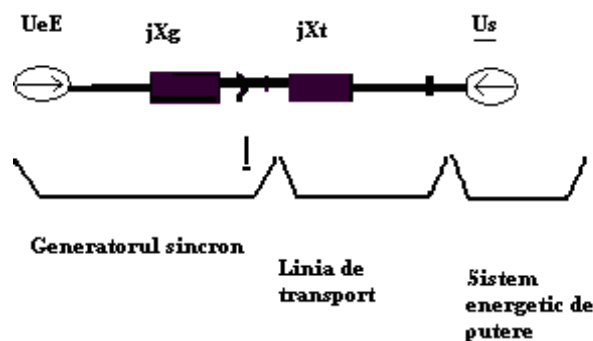


Fig1.1. Generator sincron conectat la o rețea de putere infinită

Excitația generatorului se presupune constantă deci modulul lui U_{eE} este dat și vectorul său descrie un cerc de diametru $2U_{eE}$ cu centrul în origine[N7].

Diagrama fazorială a sistemului se dă în figura 1.2.

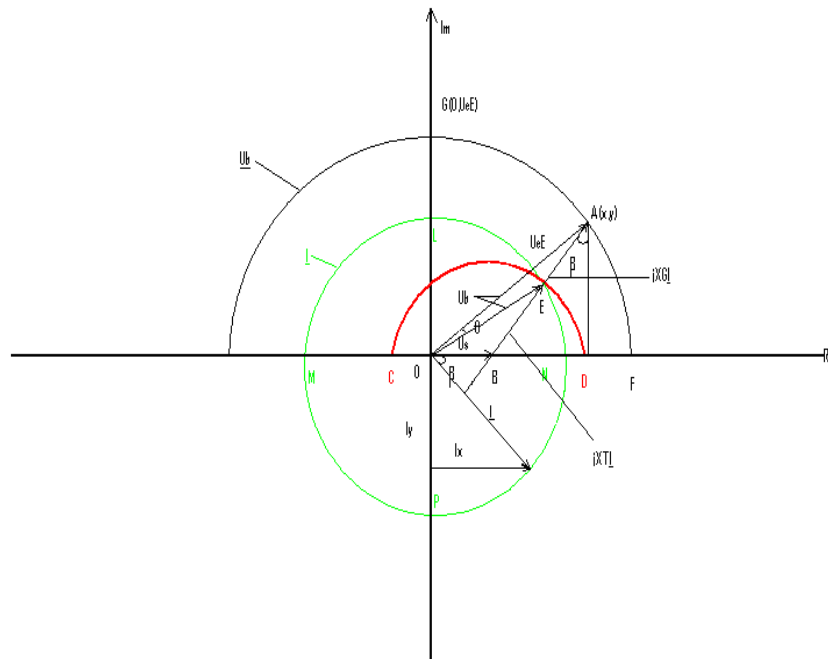


Fig1.2. Diagrama fazorială a generatorului sincron + sistem energetic

Pe cercul determinat de vectorul $U_e E$ se alege punctul de funcționare $A(x,y)$. Segmentul AB are valoarea:

$$AB = (X_T + X_G)I$$

sau

$$AB = \sqrt{(x - U_s)^2 + y^2}$$

și deci curentul debitat de generatorul sincron este:

$$I = \frac{AB}{X_T + X_G} = \frac{\sqrt{(x - U_s)^2 + y^2}}{X_T + X_G}$$

cu componentele sale:

$$I_X = I \cos(\beta) = \frac{\sqrt{(x - U_s)^2 + y^2}}{X_T + X_G} \frac{y}{\sqrt{(x - U_s)^2 + y^2}} = \frac{y}{X_T + X_G}$$

$$I_y = I \sin(\beta) = \frac{\sqrt{(x - U_s)^2 + y^2}}{X_T + X_G} \frac{(x - U_s)}{\sqrt{(x - U_s)^2 + y^2}} = \pm \frac{x - U_s}{X_T + X_G}$$

deoarece:

$$\begin{aligned} \tan(\beta) &= \pm \frac{x - U_s}{y} \\ \sin(\beta) &= \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{1 + \tan(\beta)^2}} = \pm \frac{x - U_s}{\sqrt{(x - U_s)^2 + y^2}} \\ \cos(\beta) &= \frac{1}{\sqrt{1 + \tan(\beta)^2}} = \frac{y}{\sqrt{(x - U_s)^2 + y^2}} \end{aligned}$$

Tensiunea la borne U_b fiind:

$$U_b = U_s + jX_T I = U_{bx} + jU_{by}$$

sau

$$U_{bx} + jU_{by} = U_s + jX_T \left(I_x - j \frac{x - U_s}{X_T + X_G} \right)$$

se obțin componentele sale :

$$\begin{aligned} U_{bx} &= U_s + \frac{X_T(x - U_s)}{X_T + X_G} = \frac{U_s X_G + X_T x}{X_T + X_G} \\ U_{by} &= \frac{X_T y}{X_T + X_G} \end{aligned}$$

de unde:

$$\begin{aligned} x &= \frac{(U_{bx} - U_s)(X_T + X_G)}{X_T} + U_s \\ y &= \frac{U_{by}(X_T + X_G)}{X_T} \end{aligned}$$

Deoarece U_{eE} este constant:

$$U_{eE}^2 = x^2 + y^2$$

rezultă:

$$\left[\frac{(U_{bx} - U_s)(X_T + X_G)}{X_T} + U_s \right]^2 + \left[\frac{U_{by}(X_T + X_G)}{X_T} \right]^2 = U_{eE}^2$$

Vectorul tensiunii $U_b(U_{bx}, U_{by})$ va descrie un cerc de diametru CD ce intersectează axa OX în punctele:

$$C\left(\frac{X_G U_s - U_{eE} X_T}{X_T + X_G}, 0\right)$$

și

$$D\left(\frac{X_G U_s + U_{eE} X_T}{X_T + X_G}, 0\right)$$

iar axa Oy în :

$$U_{by} = \frac{\sqrt{(U_{eE} X_T)^2 - (U_s X_G)^2}}{X_T + X_G}$$

pentru $U_{bx}=0$

12 Introducere - 1

Se obține, astfel, valoarea maximă a tensiunii la borne[N6] :

$$U_{b\max} = U_s + \frac{U_{eE}X_T - U_sX_T}{X_T + X_G} = \frac{U_sX_G + U_{eE}X_T}{X_T + X_G} = OD$$

și valoarea sa minimă :

$$U_{b\min} = U_s - \frac{(U_{eE} + U_s)X_T}{X_T + X_G} = \frac{U_sX_G - U_{eE}X_T}{X_T + X_G} = OC$$

Unghiul de sarcină θ al G.S. se calculează din triunghiul OEA(figura 1.2) :

$$EA^2 = OE^2 + OA^2 - 2OE * OA \cos \theta$$

și rezultă :

$$\cos \theta = \frac{OE^2 + OA^2 - EA^2}{2OE * OA} = \frac{U_b^2 + U_{eE}^2 - (X_G I)^2}{2U_b U_{eE}}$$

Tensiunea la borne U_b are valoarea :

$$U_b^2 = U_{bx}^2 + U_{by}^2 = \left[U_s + \frac{X_T(X - U_s)}{X_T + X_G} \right]^2 + \left[\frac{X_T * y}{X_T + X_G} \right]^2$$

Prin urmare la funcționarea în punctul A(x,y) se cunosc x și y și astfel se poate calcula U_b și I, unghiul de sarcină θ fiind perfect determinat.

Încărcarea statică maximă posibilă rezultă pentru :

$$\theta = \frac{\pi}{2} (\cos \theta = 0)$$

sau

$$U_b^2 + U_{eE}^2 - (X_G I)^2 = 0$$

sau :

$$U_b^2 + U_{eE}^2 = \frac{X_G^2 [(X - U_s)^2 + y^2]}{(X_T + X_G)^2}$$

și deoarece

$$U_b^2 = U_{bx}^2 + U_{by}^2 = \left(\frac{U_s X_G + X_T X}{X_T + X_G} \right)^2 + \left(\frac{X_T * y}{X_T + X_G} \right)^2$$

rezultă

$$U_{eE}^2 = x^2 + y^2 = \frac{X_G^2 [(X - U_s)^2 + y^2]}{(X_T + X_G)^2} - \frac{(U_s X_G + X_T X)^2 + (X_T * y)^2}{(X_T + X_G)^2}$$

sau

$$U_{eE}^2 = \frac{U_{eE}^2 (X_G^2 - X_T^2) - 2X U_s X_G (X_T + X_G)}{(X_T + X_G)^2}$$

de unde

$$X = \frac{U_{eE}^2 X_T}{U_s X_G^2}$$

și din

$$U_{eE}^2 = x^2 + y^2$$

rezultă :

$$y = \frac{U_{eE} \sqrt{U_s^2 X_G^2 - X_T^2 U_{eE}^2}}{U_s U_G}$$

Cum $U_{eE} \geq X$ rezultă că:

$$U_{eE} \geq \frac{U_{eE}^2 X_T}{U_s X_G}$$

sau

$$U_s X_G \geq U_{eE} X_T$$

și deoarece, în general, G.S. funcționează supraexcitat $U_{eE} > U_s$, se impune ca reactanța sincronă X_G a G.S. să fie mai mare decât reactanța de transfer a liniei X_T [N8].

La limită când

$$U_s X_G = X_T U_{eE}$$

se obține

$$X = U_{eE}$$

$$y = 0$$

și G.S. funcționează în punctul F cu tensiunea la borne de valoare maximă :

$$U_b = \frac{U_{eE} X_T + U_s X_G}{X_T + X_G} = \frac{2U_s X_G}{X_T + X_G}$$

În cazul general, însă, $U_s X_G \neq X_T U_{eE}$ și încărcarea statică maxim admisă (la $\theta = \frac{\pi}{2}$) are loc pentru tensiunea la borne U_b de valoare :

$$U_{bx} = \frac{U_s X_G + X_T X}{X_T + X_G} = \frac{U_s X_G + \frac{(U_{eE} X_T)^2}{U_s X_G}}{X_T + X_G} = \frac{(U_s X_G)^2 + (U_{eE} X_T)^2}{U_s X_G (X_T + X_G)}$$

$$U_{by} = \frac{X_T * y}{X_T + X_G} = \frac{X_T U_{eE} \sqrt{(U_s X_G)^2 - (X_T U_{eE})^2}}{U_s X_G (X_T + X_G)}$$

$$U_b = \sqrt{U_{bx}^2 + U_{by}^2} = \frac{\sqrt{(U_s X_G)^2 + 3(U_{eE} X_T)^2}}{(X_T + X_G)}$$

În concluzie, la un generator sincron cuplat cu o rețea de putere infinită, încărcarea statică se poate realiza pentru tensiunile la borne cuprinse în intervalul [P3]:

$$U_{b \min} \leq U_b \leq U_{b \max}$$

Pe caracteristica unghiulară a cuplului aceste limite de încărcare statică se dau în figura 1. 3.

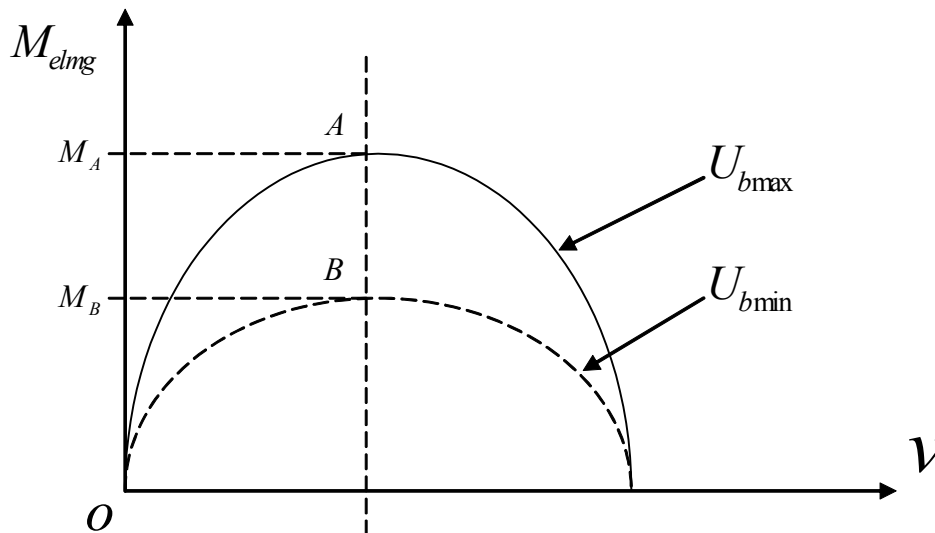


Fig.1.3. Caracteristicile unghiulare ale cuplului

La U_{bmin} generatorul sincron (GS) prezintă o stabilitate statică redusă putând fi încărcat la arbore cu un cuplu motor $\leq M_B$, iar la U_{bmax} cuplul motor maxim la încărcarea statică este M_A .

O măsură a stabilității statice a generatorului sincron (GS) este derivata puterii active în raport cu unghiul de sarcină [C1]:

$$P_{static} = \frac{dP}{d\theta} = \frac{3U_b U_{eE} \cos \theta}{X_G}$$

Stabilitatea statică maximă se obține la funcționarea în gol ($\theta = 0$) situație în care mașina dispune de o rezervă de încărcare, maxim posibilă: $\frac{3U_b U_{eE}}{X_G}$ [B13].

Puterea debitată de generatorul sincron (GS) la încărcarea statică este [B18]:

$$P = \frac{3U_b U_{eE} \sin \theta}{X_s}$$

și deoarece :

$$|\underline{U}_b \otimes \underline{U}_{eE}| = U_b U_{eE} \sin \theta$$

iar

$$\underline{U}_b \otimes \underline{U}_{eE} = \begin{matrix} i^{\rightarrow} & j^{\rightarrow} & k^{\rightarrow} \\ U_{bx} & U_{by} & 0 \\ x & y & 0 \end{matrix} = k^{\rightarrow} (yU_{bx} - xU_{by}),$$

se obține:

$$P = \frac{3|yU_{bx} - xU_{by}|}{X_s} = \frac{3U_s x_G y}{x_T + x_G} = \frac{3U_s * x_G * U_{eE}}{x_T + x_G}$$

Puterea statică debitată este maximă pentru $y = U_{eE} = y_{max}$ adică în punctul $G(0, U_{eE})$.

În acest punct tensiunea la bornele generatorului sincron (GS) are valoarea:

$$U_b^2 = U_{bx}^2 + U_{by}^2 = \left(\frac{U_s X_G}{X_T + X_G} \right)^2 + \left(\frac{X_T U_{eE}}{X_T + X_G} \right)^2 = \frac{(U_s X_G)^2 + (U_{eE} X_G)^2}{(X_T + X_G)^2}$$

și componentele curentului **I** devin:

$$I_x = \frac{y}{X_T + X_G} = \frac{U_{eE}}{X_T + X_G}$$

$$I_y = \frac{x - U_s}{X_T + X_G} = \frac{-U_s}{X_T + X_G}$$

Curentul debitat la putere maximă este:

$$I^2 = I_x^2 + I_y^2 = \frac{U_{eE}^2 + U_s^2}{(X_T + X_G)^2}$$

Valoarea unghiului de sarcină θ , în acest caz, se calculează din:

$$\cos\theta = \frac{U_b^2 + U_{eE}^2 - (X_G I)^2}{2U_b U_{eE}} = \frac{(U_s X_G)^2 + (X_T U_{eE})^2 + (U_{eE}(X_T + X_G))^2 - (U_{eE} X_G)^2 - (U_s X_G)^2}{2U_b U_{eE}(X_T + X_G)^2} =$$

$$= \frac{X_T U_{eE}}{U_b(X_T + X_G)} = \frac{X_T U_{eE}}{\sqrt{(X_T U_{eE})^2 + (X_G U_s)^2}}$$

În concluzie, stabilitatea statică a generatorului sincron (GS) depinde de[R1]:

- parametrii liniei și ai generatorului (X_T, X_G);
- tensiunea polară U_{eE} ;
- tensiunea din sistem U_s .

Cum parametrii electrici ai liniei de transport și ai generatorului sincron (GS) nu pot fi modificați, la un sistem cu U_s dat, singura posibilitate de a **mări stabilitatea statică este creșterea tensiunii electromotoare induse (t.e.m.)** U_{eE}

În acest mod este pusă problema stabilității statice la generatorul sincron (GS) ,în literatura de specialitate [B15,B7,B 9, B4, D6, D7].

1.2.2. Stabilitatea statică a generatorului asincron

Ponderea generatoarelor asincrone (GA) în sistemele electrice actuale este în creștere ca urmare a atragerii resurselor energetice regenerabile:

- energia eoliană;
- energia hidrolică și microhidrocentrale;
- energia valurilor;

Prin specificul său, generatorul asincron (GA) [B6]cuplat la sistemul energetic, figura 1.4, poate funcționa cu o turație variabilă a rotorului, turație ce se modifică odată cu încărcarea sa.

Determinarea tensiunii la bornele generatorului asincron și a turației

Fie U_s - tensiunea rețelei de putere infinită (și plasată în axa reală);

- R_1, R_2 rezistențele generatorului asincron (GA) (stator, rotor);
- $x_{1\sigma}, x_{2\sigma}$ reactanțele de dispersie ale generatorului asincron (GA) (stator, rotor);
- $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$ alunecarea la generatorul asincron (GA) (are valoare negativă);

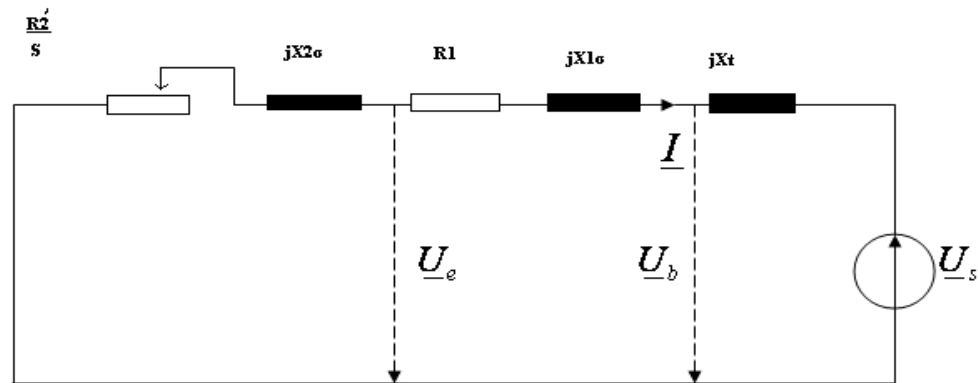


Fig.1.4. Generatorul asincron conectat la o rețea de putere infinită

Puterea mecanică dată generatorului asincron (GA) este egală cu[B5]:

$$P_{mec} = 3 \frac{R_2'}{s} I^2$$

unde curentul I rezultă din:

$$\left(\frac{R_2'}{s} + R_1 \right) \underline{I} + j(x_{1\sigma} + x_{2\sigma} + x_T) \underline{I} + \underline{U}_s = 0$$

sau:

$$\underline{I} = \frac{-\underline{U}_s}{\frac{R_2'}{s} + R_1 + jx} \simeq \frac{-\underline{U}_s \left(\frac{R_2'}{s} - jx \right)}{\left(\frac{R_2'}{s} \right)^2 + X^2} = \frac{-\underline{U}_s (R_2 s - jX_s^2)}{R^2 + (sX)^2} = I_x + jI_y$$

unde:

$$X = x_{1\sigma} + x_{2\sigma}' + x_T = x_{sc} + x_T$$

$$R_2' = R_2 = R$$

pentru simplificarea calculelor.

Tensiunea la bornele GA, $\underline{U}_b \simeq jX_T \underline{I} + \underline{U}_s$ depinde prin "s" de curentul debitat \underline{I} , care la rândul său depinde de încărcarea statică a generatorului.

Componentele curentului \underline{I} sunt:

$$I_x = \frac{-sRU_s}{R^2 + (sX)^2}$$

$$I_y = \frac{s^2 XU_s}{R^2 + (sX)^2}$$

și deci

$$I^2 = I_X^2 + I_Y^2 = \frac{s^2 U_s^2 [R^2 + (sX)^2]}{(R^2 + (sX)^2)^2} = \frac{s^2 U^2}{R^2 + (sX)^2}$$

Fiind dată puterea mecanică la arborele GA, deci încărcarea: P_{mec} se poate calcula alunecarea "s" din egalitatea:

$$I^2 = \frac{P_{mec} s}{3R}$$

sau

$$\frac{s^2 U_s^2}{R^2 + (sX)^2} = \frac{P_{mec} s}{3R}$$

sau

$$X^2 s^2 = \frac{3R U_s^2}{P_{mec}} s + R^2 = 0$$

de unde

$$s = \frac{\frac{3R U_s^2}{P_{mec}} s + \sqrt{\left(\frac{3R U_s^2}{P_{mec}}\right)^2 - 4(RX)^2}}{2X^2}$$

Locul geometric al curentului $I(s)$ se obține prin eliminarea lui "s" din ecuațiile parametriche ale lui $I_X(s)$ și $I_Y(s)$, obținându-se un cerc cu diametrul după axa imaginară de ecuație[S2]:

$$I_X^2 + I_Y^2 - I_Y \frac{U}{X} = 0$$

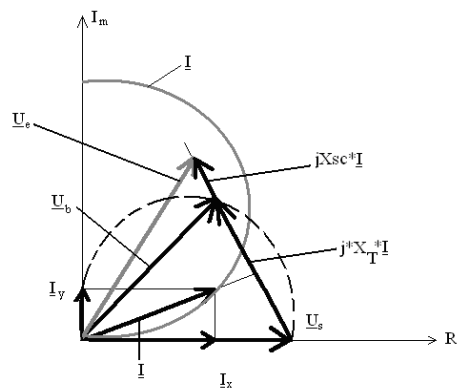


Fig.1.5. Diagrama fazorială la generatorul

Tensiunea la bornele GA se obține din:

$$\underline{U}_b = U_s + jX_T \underline{I} = U_s + jX_T(I_x + jI_y) = U_s - \frac{s^2 X X_T U_s}{R^2 + (sX)^2} - j \frac{s R X_T U_s}{R^2 + (sX)^2}$$

sau:

$$U_{bX} = \frac{s^2 X X_{sc} + R^2}{R^2 + (sX)^2} U_s = \frac{R^2 U_s}{R^2 + (sX)^2}$$

$$U_{bY} = -\frac{s^2 R X_T}{R^2 + (sX)^2} U_s$$

$$U_b = \frac{R U_s}{\sqrt{R^2 + (sX)^2}}$$

și prin eliminarea lui "s" se obține traiectoria lui U_b :

$$2U_Y^2 X X_{sc} (X_{sc} - X) + U_X^2 X_T^3 + U_X X_{sc} X_T \sqrt{(X_T U_X)^2 - 4U_Y^2 X X_{sc}} = 0$$

sau în forma simplificată:

$$U_{bX} = \frac{R^2 U_s}{R^2 + (sX)^2}$$

la $s^2 X X_{sc} \ll R^2$ rezultă:

$$U_X^2 + U_Y^2 - U_X U_s = 0$$

Puterea mecanică primită de GA pe la arbore:

$$P = 3 \frac{R}{s} I^2 = 3 \frac{R}{s} \frac{s^2 U_s^2}{(R^2 + (sX)^2)} = \frac{3 R s U_s^2}{R^2 + (sX)^2}$$

este maximă pentru

$$P'(s) = 0$$

adică :

$$s = -\frac{R}{X}$$

și are valoarea :

$$P_{\max} = -\frac{3R^2 U_s^2}{X(2R^2)} = -\frac{3U_s^2}{2X}$$

La putere maximă valoarea curentului este:

$$I_X = -\frac{U_s}{2X}$$

$$I_Y = \frac{U_s}{2X}$$

rezultă :

$$I = \frac{\sqrt{2} U_s}{2X}$$

iar tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$U_{bX} = \frac{U_s}{2}$$

$$U_{bY} = \frac{U_s}{2}$$

din care rezultă :

$$U_b = \frac{\sqrt{2} U_s}{2}$$

Turația generatorului, la putere maximă, are valoarea :

$$n = n_2(1-s) = n_1 \frac{(R+X)}{X}$$

Variațiile puterii mecanice, a tensiunii și curentului debitat de GA, cu alunecarea (turația) sunt date în figura 1.6:

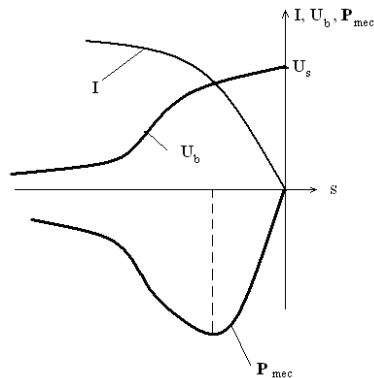


Fig.1.6. Dependenta tensiunii curentului și puterii de alunecare

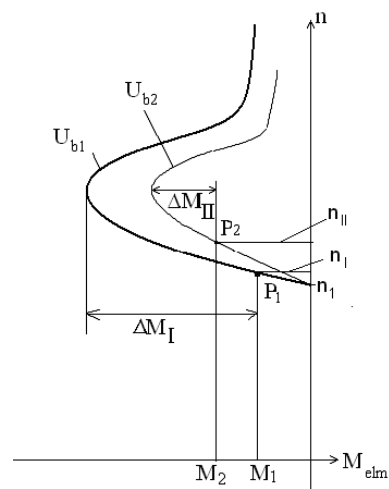


Fig.1.7. Caracteristicile mecanice ale G.A. la două încărcări

Prin încărcarea GA din P_1 la cuplul $M_1 = M_{elmag}$ și turația n_1 în P_2 la cuplul $|M_2| = |M_1|$ și $n_2 > n_1$ rezerva de încărcare statică ΔM_{II} a scăzut semnificativ față de ΔM_I (figura.1 7).

Concluzii privind stabilitatea statică[S4] :

1. La G.S. limita stabilității statice poate fi modificată prin valoarea t.e.m. (tensiunii electromotoare) induse U_{eE} , deci prin curentul de excitație I_E .

2. La G.A. nu se poate influența limita de stabilitate statică, generatorul putând să fie încărcat static la valoarea P_{max} , valoare dependentă de parametrii săi și de tensiunea sistemului U_s .
3. Atât la G.S. cât și la G.A. prin creșterea încărcării lor scade rezerva de încărcare statică.
4. Ambele generatoare au cea mai mare rezervă de încărcare statică la funcționarea în gol.
5. Deoarece turația rotorului se modifică numai la G.A., la încărcările statice, o parte din energia cinetică rotorică la G.A. este transformată în energie electromagnetică și din acest motiv modificările de sarcină produc pendulări ale puterii electrice numai la G.S. cuplate la un sistem de tensiune și frecvență date.
6. Pendulările G.S. sunt un factor perturbator în sistem iar rezistențele (generatoarelor, transformatoarelor și sarcinii) și G.A. sunt "amortizoarele" șocurilor de sarcină.

1.3. Modele matematice folosite în analiza stabilității generatoarelor electrice

Încărcările statice (lente) ale generatoarelor sincrone și asincrone din sistem au loc la variații mici și lente ale sarcinii conectări/deconectări de consumatori electrice (uzinali sau casnici) normali[T1].

Repartizarea sarcinii pe generatoare se face având în vedere parametrii statici ai generatoarelor, ale liniilor electrice de transport și ale sarcinii, cu sau fără regulatoare de tensiune și frecvență.

Calculul distribuției de sarcină (calculul fluxului de putere, curenții și tensiunile) se face prin rezolvarea unor sisteme de ecuații algebrice.

Încărcările dinamice (rapide) ale generatoarelor din sistem au loc la variații mari și bruște ale sarcinii, ca de exemplu: scurtcircuite, deconectarea unor linii de MT sau ÎT prin care se alimentau zone importante de consumatori[S5].

Repartizarea sarcinii, în acest caz, pe generatoarele sistemului se face având în vedere parametrii dinamici ai generatoarelor, ai liniei electrice de transport și ai sarcinii.

La încărcările dinamice un rol important îl au valorile momentelor de inerție ale rotoarelor generatoarelor sincrone și asincrone și într-o mai mică măsură momentele de inerție ale rotoarelor motoarelor electrice conectate la sistem, deoarece acestea fiind de puteri mult mai mici ca generatoarele au valori reduse.

Calculul solicitărilor în cazul încărcărilor dinamice se face prin rezolvarea unor seturi de sisteme de ecuații diferențiale neliniare, rezolvări care se pot face numai prin metode numerice.

1.3.1. Modele matematice folosite în analiza stabilității statice a generatoarelor electrice

În literatura de specialitate [B8,B10,B17,P5,S6,T2,V2,C3,] încărcările statice și dinamice se analizează de regulă în ipoteza unei rețele de putere infinită. Se are în vedere cazul unui singur generator (sincron sau asincron) cuplat la o rețea de putere infinită.

În cele ce urmează se tratează cazul real a două generatoare: sincron + asincron, ce alimentează consumatori de tip rezistiv-inductiv.

Cele două generatoare (sincron și asincron) debitează pe un consumator variabil în timp, lent ca valoare.

Generatorul sincron GS

Generatorul sincron (GS) este caracterizat prin:

- U_{eE} -tensiunea electromotoare a generatorului sincron;
- X_G -reactanța sincronă a generatorului sincron;

Generatorul asincron (GA) are mărimile semnificative:

- R_2/s -rezistența rotorică redusă la stator;
- X_{sc} -reactanța de scurtcircuit (formată din suma reactanțelor de dispersie).

Liniile electrice de transport au reactanțele de transfer X_{TG} pentru generatorul sincron și X_{TA} pentru generatorul asincron și sarcina are impedanța $Z = R + jX$.

Schema electrică a sistemului este dată în figura 1. 8.

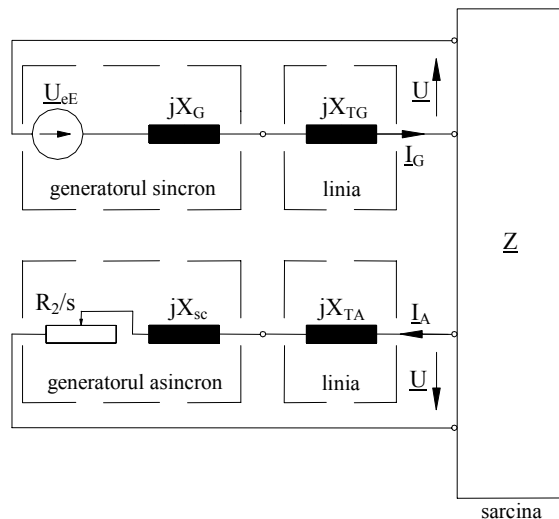


Fig.1.8. Sistem electroenergetic cu GS și GA.

În regim staționar la GS din modelul ortogonal se obține sistemul:

$$\begin{aligned}
 -U\sqrt{3}\sin\theta &= -RI_d + \omega L_q I_q \\
 U\sqrt{3}\cos\theta &= -RI_q - \omega L_d I_d + \omega M_E I_E \\
 M_{rez} &= p_1[(L_d - L_q)I_d I_q - M_E I_q I_E + M_Q I_d I_Q - M_D I_q I_D]
 \end{aligned}$$

La neglijarea rezistențelor satorice la GS sistemul se simplifică și se obține:

$$\begin{aligned}
 -U\sqrt{3}\sin\theta &= \omega L_q I_q \\
 U\sqrt{3}\cos\theta &= -\omega L_d I_d + \omega M_E I_E \\
 M_{rez} &= p_1[(L_d - L_q)I_d I_q - M_E I_q I_E + M_Q I_d I_Q - M_D I_q I_D]
 \end{aligned}$$

La GS cu poli plini $L_d = L_q$ și $\omega L_d = \omega L_q = X_G$ și se obține sistemul:

$$\begin{aligned}
 -U\sqrt{3}\sin\theta &= X_G I_q \\
 U\sqrt{3}\cos\theta &= -X_G I_d + \omega M_E I_E / \cdot j \\
 M_{rez} &= p_1[(L_d - L_q)I_d I_q - M_E I_q I_E + M_Q I_d I_Q - M_D I_q I_D]
 \end{aligned}$$

Înmulțind ecuația a doua cu "j" și adunând prima ecuație cu a doua se regăsește forma fazorială cunoscută:

$$\underline{U} = -jX_G I_G + \underline{U}_{eE}$$

sau

$$\underline{U}_{eE} = \underline{U} + jX_G I_G$$

unde

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_G &= I_d + jI_q \\
 \underline{U} &= U_d + jU_q \\
 \underline{U}_{eE} &= j\omega M_E I_E \text{ (t.e.m. polară)}
 \end{aligned}$$

Precizări: 1) deoarece $\omega = 2\pi f$ este constantă, t.e.m. polară U_{eE} se poate modifica doar prin modificarea curentului de excitație I_E ;

2) valoarea maximă a curentului I_E (limitată din motive de încălzire) definește t.e.m. polară plafon (maximă)[N2];

3) reactanța X_G a GS este cu cel puțin un ordin de mărime mai mare decât reactanța de scurtcircuit X_{sc} a GA (la același ordin de mărime a puterii).

Limita stabilității statice este semnificativ influențată de valorile lui U_{eE} și prin urmare GS ce funcționează static stabil posedă o limită de stabilitate statică cu atât mai mare cu cât raportul U_{eE}/U_N este mai mare. Desigur unghiul de sarcină θ

influențează limita de stabilitate și din acest motiv este indicat a se funcționa cu toate GS dintr-o centrală la același unghi de sarcină. În acest fel nu apar diferențe între diferitele generatoare din punct de vedere al stabilității statice.

În concluzie, limita stabilității statice la funcționarea GS analizată pe caracteristica unghiulară a cuplului: $M_{elmag}(\theta)$ este determinată de:

- 1) t.e.m. polară \underline{U}_{eE} care poate fi crescută până la valoarea maximă: U_{eE} plafon;
- 2) unghiul de sarcină θ care poate fi crescut până la valoarea maximă $\frac{\pi}{2}$, valoare peste care GS funcționează static instabil;
- 3) fluctuațiile tensiunii U (din sistem) determină modificări ale cuplului

electromagnetic, având în vedere relația de calcul pentru cuplu:

$$M_{elmagGS} = \frac{3p_1 U_{eE} U \sin\theta}{\omega X_G}$$

și deci aceste fluctuații de tensiune din sistem determină fluctuații ale stabilității statice.

În literatura de specialitate [N2] se definește un **coeficient al stabilității statice**: K_{static} , ca o dependență de unghiul de sarcină θ de forma:

$$K_{static} = \cos\theta$$

Stabilitatea statică maximă este la $\theta = 0$ și $K_{static} = 1$, iar stabilitatea minimă (zero) la $\theta = \frac{\pi}{2}$. **Rezerva stabilității statice (R_{STS})** se definește [N2] prin raportul:

$$R_{STS} = \frac{M_{elmagmax} - M_1}{M_{elmagmax}} = 1 - \sin\theta_1$$

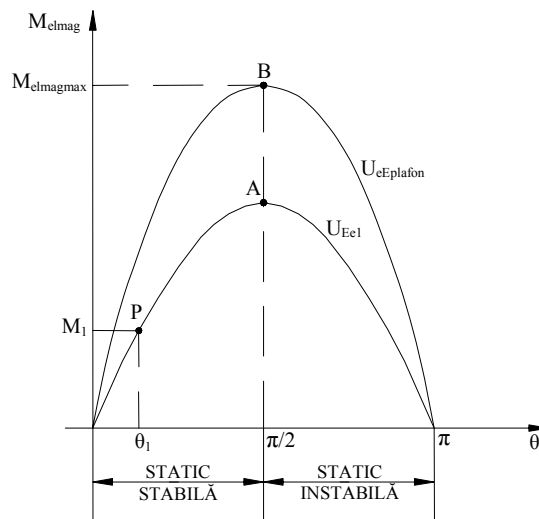


Fig.1.9. Modificarea zonei de stabilitate statică prin valorile lui U_{eE} .

În punctele A și B rezerva [figura 1.9] de stabilitate este zero.

Generatorul asincron GA

În mod analog ca la GS, în regim staționar și la neglijarea rezistențelor statorice ($R_1 \rightarrow 0$), rezultă:

$$U_d = -\omega_1 L_1 I_q - \omega_1 M I_{qr}$$

$$U_q = \omega_1 L_1 I_d + \omega_1 M I_{dr} / \cdot j$$

$$0 = -M(\omega_1 - \omega) I_q + R_2 I_{dr} - L_2(\omega_1 - \omega) I_{qr}$$

$$0 = M(\omega_1 - \omega) I_d + L_2(\omega_1 - \omega) I_{dr} + R_2 I_{qr} / \cdot j$$

$$M_{elmag} = p_1 M (I_q I_{dr} - I_d I_{qr})$$

Prin înmulțirea ecuațiilor 2 și 4 cu "j" și adunare, obținem:

$$\underline{U} = j\omega_1(L_1\underline{I}_s + M\underline{I}_r)$$

$$0 = R_2\underline{I}_r + jL_2(\omega_1 - \omega)\underline{I}_r + jM(\omega_1 - \omega)\underline{I}_s$$

unde:

$$\underline{U} = U_d + jU_q$$

$$\underline{I}_s = I_d + jI_q$$

$$\underline{I}_r = I_{dr} + jI_{qr}$$

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}$$

și eliminând curentul rotoric \underline{I}_r , rezultă:

$$\underline{U} = \underline{I}_s \frac{R_2L_1 + j(\omega_1 - \omega)(L_1L_2 - M^2)}{R_2 + j(\omega_1 - \omega)L_2} j\omega_1 = \underline{I}_s \left[\frac{s\omega_1^2(M^2 - L_1L_2) + j\omega_1L_1R_2}{R_2 + j\omega_1sL_2} \right]$$

Deoarece în schema electrică simplificată se presupune X_m ($X_m = \omega_1 M$) foarte mare ($X_m \rightarrow \infty$) se face limita:

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{s\omega_1^2(M^2 - L_1L_2) + j\omega_1L_1R_2}{R_2 + j\omega_1sL_2} = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{s\omega_1^2[-M(L_{1\sigma} + L_{2\sigma})] + j\omega_1(M + L_{1\sigma})R_2}{R_2 + j\omega_1s(M + L_{2\sigma})} =$$

$$= \frac{-L_{sc}s\omega_1^2 + j\omega_1R_2}{j\omega_1s} = \frac{R_2}{s} + jX_{sc}$$

și astfel ecuația simplificată a GA devine:

$$\underline{U} = \underline{I}_s \left(\frac{R_2}{s} + jX_{sc} \right)$$

Se face remarcă că la GA alunecarea s este negativă și deci termenul $\underline{I}_s \frac{R_2}{s}$ reprezintă t.e.m. indusă a generatorului ce debitează pe sarcina \underline{Z} (figura 1.10).

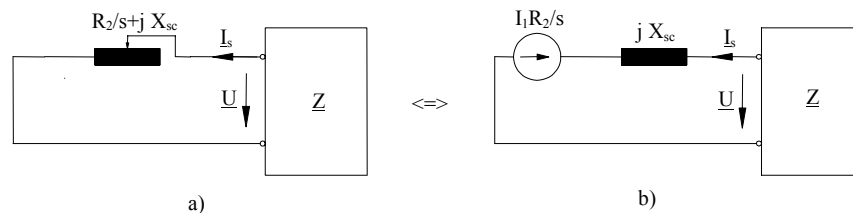


Fig.1.10. Schema electrică simplificată a GA.

Precizări:

1) deoarece alunecarea $s = \frac{n_1 - n}{n_1}$ depinde de turație, t.e.m. indusă $\underline{I}_s \frac{R_2}{s}$ depinde de turația la care este antrenat rotorul GA;

2) la alunecarea s , t.e.m. indusă $\underline{I}_s \frac{R_2}{s}$ are valoarea:

$$\left| \underline{I}_s \frac{R_2}{s} \right| = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{sc}^2}} \frac{R_2}{s} = \frac{UR_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{sc})^2}}$$

3) deoarece $s \in (0, s_m)$, t.e.m. indusă are valori în intervalul:

$$U \div \frac{UR_2}{\sqrt{R_2^2 + (s_m * X_{sc})^2}} = \dot{U} \div \frac{U}{\sqrt{2}}$$

unde s_m - alunecarea critică, dependentă de parametrii GA:

$$s_m = -\frac{R_2}{X_{sc}}$$

4) reactanța de dispersie a GA (X_{sc}) este cu un ordin de mărime mai mare ca valoare decât valoarea rezistenței rotorice R_2 .

Limita stabilității statice este semnificativ influențată de valorile tensiunii U și ale lui s (figura 1.11).

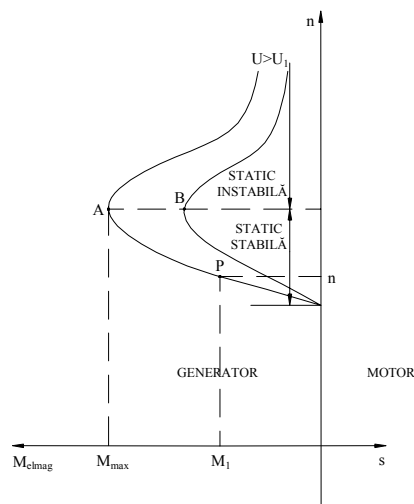


Fig.1.11. Modificarea cuplului maxim cu tensiunea.

Turația maximă a rotorului la care rezerva de stabilitate statică devine zero (punctele A sau B) este:

$$n_{max} = n_1(1 - s_m) = n_1 \left(1 + \frac{R_2}{X_{sc}} \right)$$

Cuplul electromagnetic: M_{elmag} este proporțional cu U^2 :

$$M_{elmag} = \frac{3U^2 p_1}{\omega_1} \frac{R_2 s}{R_2^2 + (s X_{sc})^2} = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

unde :

$$M_{max} = \frac{3U^2}{2R_2 \omega_1} p_1$$

și deci rezerva de stabilitate statică depinde de pătratul tensiunii de la bornele GA, spre deosebire de GS la care depindea numai de U .

Cu modificarea tensiunii U nu se modifică intervalul de turație în care GA funcționa stabil.

În concluzie, limita stabilității statice la funcționarea GA, analizată pe caracteristica mecanică $n_{(M_{elmag})}$, este determinată de:

- 1) alunecarea critică s_m , GA funcționând static stabil în intervalul: $s = (0 \div s_m)$ în punctele A și B (figura 1.11) rezerva de stabilitate statică este zero;
- 2) turația GA, la o funcționare static stabilă, este cuprinsă în zona: $n = (n_1 \div n_{max})$, unde $n_{max} = n_1(1 - s_m)$;
- 3) valoarea tensiunii de la bornele GA influențează pătratic zona stabilității statice, influența fiind mai importantă ca la GS;
- 4) fluctuațiile de tensiune sunt resimțite mai pregnant la GA (cuplul depinde de U^2), comparativ cu GS (la care cuplul depinde de U).

În literatura de specialitate, din cauza importanței reduse ce o avea GA, în comparație cu cel sincron, nu s-au impus mărimi care să caracterizeze funcționarea stabilă a GA.

În cele ce urmează se definește, analog cu K_{static} de la GS, **coeficientul stabilității statice**: $K_{staticGA}$ ca fiind o dependență de turația GA, de forma:

$$K_{staticGA} = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_1}$$

sau

$$K_{staticGA} = \frac{s_m - s}{s_m}$$

deoarece

$$n_{max} = n_1(1 - s_m)$$

$$n = n_1(1 - s)$$

Stabilitatea statică maximă: $K_{staticGA} = 1$ este la $n = n_1$ ($s = 0$), adică la funcționarea în gol, iar stabilitatea minimă (zero)

la $n = n_{max}$ ($s = s_m$).

Rezerva stabilității statice (R_{STSGA}) se definește analog ca la GS prin raportul:

$$R_{STSGA} = \frac{M_{max} - M_1}{M_{max}} \cong \frac{M_{max} - \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{2m}{s}}}{M_{max}}$$

sau

$$R_{STSGA} = \frac{(s - s_m)^2}{s^2 + s_m^2}$$

La $s = 0$ ($n = n_1$) rezerva stabilității statice (R_{STSGA}) este maximă ($R_{STSGA} = 1$) și la $s = s_m$ ($n = n_{max}$) este minimă ($R_{STSGA} = 0$). În punctele A și B (figura 4) rezerva de stabilitate este zero.

1.3.2. Modele matematice folosite în analiza stabilității dinamice a generatoarelor electrice

În regim dinamic GS este caracterizat în modelul ortogonal prin ecuațiile[B5]:

$$\begin{aligned}
 -U\sqrt{3}\sin\theta &= -R_d I_d - L_d \frac{dI_d}{dt} + \omega L_q I_q + M_E \frac{dI_E}{dt} + M_D \frac{dI_D}{dt} - \omega M_Q I_Q \\
 U\sqrt{3}\cos\theta &= -\omega L_d I_d - R_q I_q - L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega M_E I_E + \omega M_D I_D + M_Q \frac{dI_Q}{dt} \\
 U_E &= -M_E \frac{dI_d}{dt} + R_E I_E + L_E \frac{dI_E}{dt} + M_{ED} \frac{dI_D}{dt} \\
 0 &= -M_D \frac{dI_d}{dt} + M_{ED} \frac{dI_E}{dt} + R_D I_D + L_D \frac{dI_D}{dt} \\
 0 &= -M_Q \frac{dI_q}{dt} + R_Q I_Q + L_Q \frac{dI_Q}{dt} \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= p_1 [(L_d - L_q) I_d I_q + M_E I_q I_E - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D] - M_{rez}
 \end{aligned}$$

La GA ecuațiile modelului ortogonal sunt de forma:

$$\begin{aligned}
 U_d &= R_1 I_d + L_1 \frac{dI_d}{dt} - \omega_1 L_1 I_q + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_1 M I_{qr} \\
 U_q &= \omega_1 L_1 I_d + R_1 I_q + L_1 \frac{dI_q}{dt} + \omega_1 M I_{dr} + M \frac{dI_{qr}}{dt} \\
 0 &= M \frac{dI_d}{dt} - M(\omega_1 - \omega) I_q + R_2 I_{dr} + L_2 \frac{dI_{dr}}{dt} - L_2(\omega_1 - \omega) I_{qr} \\
 0 &= M(\omega_1 - \omega) I_d + M \frac{dI_q}{dt} + L_2(\omega_1 - \omega) I_{dr} + R_2 I_{qr} + L_2 \frac{dI_{qr}}{dt} \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= p_1 M (I_q I_{dr} - I_d I_{qr}) - M_{rez}
 \end{aligned}$$

Stabilitatea dinamică a sistemului electroenergetic format dintr-un generator sincron și unul asincron se analizează cu un set de ecuații diferențiale.

Cele două generatoare (sincron și asincron) debitează pe o sarcină a cărei valoare se modifică semnificativ și într-un timp foarte scurt- încărcare dinamică.

Încărcarea dinamică a GS și GA depinde de punctul inițial de funcționare, parametrii de regim tranzitoriu ai generatoarelor ,momentul de inerție J .

Stabilitatea dinamică se analizează cu un sistem de ecuații diferențiale în care condițiile inițiale se obțin din rezolvarea unui sistem algebric.

La GA condițiile inițiale se obțin din rezolvarea sistemului:

$$\begin{aligned}
 U_d &= -\omega_1 L_1 I_q - \omega_1 M I_{qr} \\
 U_q &= \omega_1 L_1 I_d + \omega_1 M I_{dr} / \cdot j \\
 0 &= -M(\omega_1 - \omega) I_q + R_2 I_{dr} - L_2(\omega_1 - \omega) I_{qr} \\
 0 &= M(\omega_1 - \omega) I_d + L_2(\omega_1 - \omega) I_{dr} + R_2 I_{qr} \\
 M_{rez} &= p_1 M (I_q I_{dr} - I_d I_{qr})
 \end{aligned}$$

La GS condițiile inițiale (punctul inițial de funcționare) se deduc având în vedere sistemul algebric definit de cuplul rezistent inițial M_{rez} :

$$-U\sqrt{3}\sin\theta = -RI_d + \omega L_q I_q$$

$$U\sqrt{3}\cos\theta = -RI_q - \omega L_d I_d + \omega M_E I_E$$

$$M_{rez} = p_1[(L_d - L_q)I_d I_q + M_E I_q I_E - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D]$$

1.4. Stabilitatea GS + GA debitînd pe o rețea de tensiune și frecvență date

Se analizează cazul elementar a două generatoare: unul sincron (GS) și altul asincron (GA). Generatorul sincron este furnizor de putere activă și reactivă. Generatorul asincron (GA) este furnizor numai de putere activă.

Curentul debitat de GS este I_G , iar cel debitat de GA este I_A .

Tensiunea la bornele consumatorului Z este \underline{U} :

$$\underline{U} = (-\underline{I}_A + \underline{I}_G)Z$$

Pentru GS, la neglijarea pierderilor, se poate scrie că:

$$\underline{U}_{eE} = \underline{U} + (jX_G + jX_{TG})\underline{I}_G = \underline{U} + jX_{GSE}\underline{I}_G$$

În mod similar pentru GA rezultă relația:

$$\underline{U} = \underline{I}_A \left(\frac{R_2}{s} + jX_{sc} + jX_{TA} \right) = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{GAE} \right) \underline{I}_A$$

Tensiunea U și frecvența f sunt date, într-un sistem electroenergetic și deci turația rotorului GS este bine definită, indiferent de valoarea sarcinii.

Se menționează faptul că numai GS poate furniza putere reactivă în sistem, GA fiind totdeauna un consumator de putere reactivă, așa cum rezultă și din diagrama dată în figura 1.12:

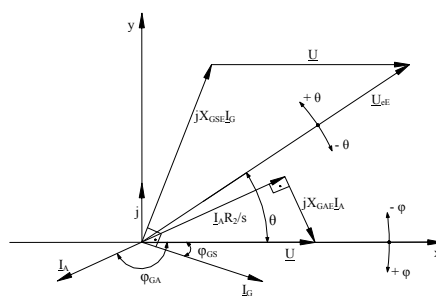


Fig.1.12. Diagrama fazorială la un sistem electroenergetic GS+GA.

La o funcționare static stabilă datele inițiale sunt:

- tensiunea $-U$ -impusă ca valoare;
- sarcina - $\underline{Z}_i = R_i + jX_i$;
- parametrii: R_2, X_{GAE}, X_{GSE} ;
- tensiunea electromotoare polară - U_{eE} -impusă ca valoare;
- alunecarea - s (a GA ce determină încărcarea activă a GA).

Prin modificarea lentă a sarcinii Z rezultă datele finale:

- tensiunea $-U$ -impusă ca valoare;
- sarcina finală - $\underline{Z}_f = R_f + jX_f$;
- parametrii: R_2, X_{GAE}, X_{GSE} (aceeași cu cele inițiale);
- tensiunea electromotoare polară - U_{eE} (aceeași cu cea inițială dacă nu se modifică curentul de excitație I_E);
- alunecarea - s .

Din relațiile curenților:

$$\underline{I}_G = \frac{U_{eE} - \underline{U}}{jX_{GSE}}$$

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}}{\frac{R_2}{s} + jX_{GAE}}$$

înlocuind în $\underline{U} = (\underline{I}_G - \underline{I}_A)Z$ se obține:

$$\underline{U} = -\frac{\underline{U}Z}{\frac{R_2}{s} + jX_{GAE}} + \frac{U_{eE}Z - \underline{U}Z}{jX_{GSE}}$$

sau

$$\underline{U} \left[-X_{GAE}X_{GSE} - XX_{GSE} + \frac{RR_2}{s} - XX_{GAE} + j \left(\frac{R_2}{s} X_{GSE} + RX_{GSE} + \frac{XR_2}{s} + RX_{GAE} \right) \right] =$$

$$= \underline{U}_{eE} \left[\frac{RR_2}{s} - XX_{GAE} + j \left(RX_{GAE} + \frac{XR_2}{s} \right) \right]$$

sau

$$\underline{U}(a + jb) = \underline{U}_{eE}(c + jd)$$

unde:

$$a = \frac{RR_2}{s} - X_{GAE}X_{GSE} - XX_{GAE} - XX_{GSE}$$

$$b = \frac{R_2X_{GSE}}{s} + RX_{GSE} + \frac{XR_2}{s} + RX_{GAE}$$

$$c = \frac{RR_2}{s} - XX_{GAE}$$

$$d = RX_{GAE} + \frac{XR_2}{s}$$

obținându-se astfel unghiul de sarcină θ al GS așa ca în figura 1.13.

$$\underline{U}_{eE} = \underline{U} \frac{a + jb}{c + jd} = \underline{U}(e + jf)$$

cu

$$e = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2}$$

$$f = \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{f}{e}$$

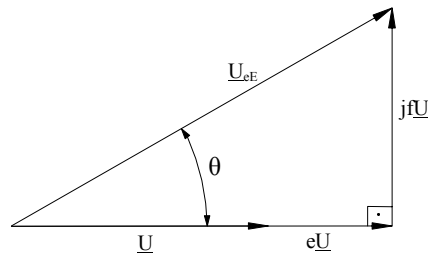


Fig.1.13. Unghiul de sarcină al GS.

Condițiile inițiale la GA se obțin din rezolvarea sistemului:

$$U_d = -\omega_1 L_1 I_q - \omega_1 M I_{qr}$$

$$U_q = \omega_1 L_1 I_d + \omega_1 M I_{dr} / \cdot j$$

$$0 = -M(\omega_1 - \omega) I_q + R_2 I_{dr} - L_2(\omega_1 - \omega) I_{qr}$$

$$0 = M(\omega_1 - \omega) I_d + L_2(\omega_1 - \omega) I_{dr} + R_2 I_{qr}$$

$$M_{rez} = p_1 M (I_q I_{dr} - I_d I_{qr})$$

Condițiile inițiale (punctul inițial de funcționare) la GS se deduc având în vedere sistemul algebric definit de cuplul rezistent inițial M_{rez} :

$$-U\sqrt{3} \sin\theta = -R I_d + \omega L_q I_q$$

$$U\sqrt{3} \cos\theta = -R I_q - \omega L_d I_d + \omega M_E I_E$$

$$M_{rez} = p_1 [(L_d - L_q) I_d I_q + M_E I_q I_E - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D]$$

Pe caracteristica unghiulară a cuplului electromagnetic la GS funcționarea statică stabilă este în zona OP_M (figura 1.14).

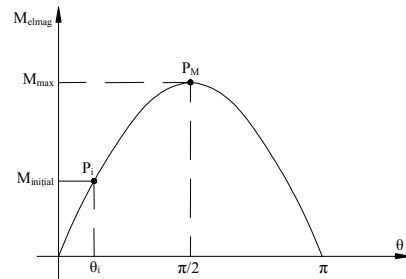


Fig.1.14. Zona stabilităii statice a

Rezerva de putere la o încărcare static stabilă a GS este cu atât mai mare cu cât unghiul de sarcină (sau cuplul electromagnetic) este mai mic.

Încărcarea statică maximă este în punctul P_M (la $\theta = \frac{\pi}{2}$).

Pe caracteristica mecanică a GA [figura 1.15] funcționarea static stabilă este în zona AB.

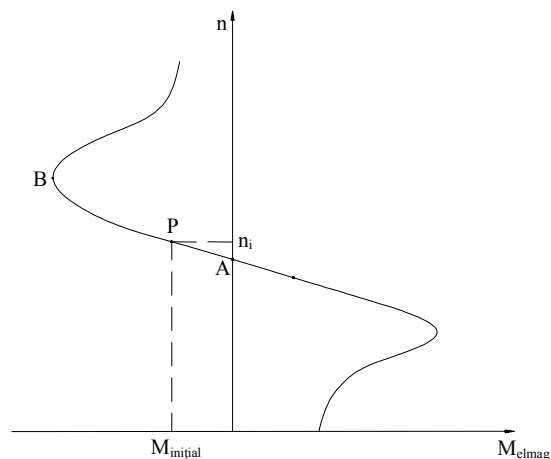


Fig.1.15. Zona stabilităii statice a GA.

Rezerva de încărcare este dată de diferența:

$$\Delta s = s_{critic} - s_i$$

Așa cum s-a menționat anterior la GS și la GA rezerva de încărcare static stabilă este cu atât mai mare cu cât cuplul electromagnetic (deci puterea debitată în sistem) este mai mic.

Încărcarea statică maximă este în punctul B (la M_{elmag} maxim).

La GS prin mărirea tensiunii electromotoare induse U_{eE} se mărește zona de stabilitate statică și dinamică (figura 1.16):

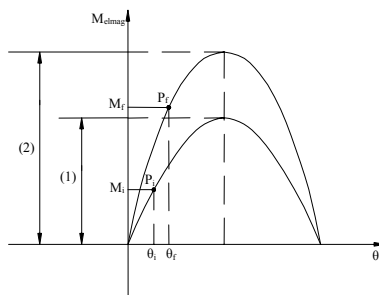


Fig.1.16. Modificarea zonei de

În punctul inițial de funcționare $P_i(\theta_i, M_i)$, determinat de sarcina inițială \underline{Z}_i rezerva de stabilitate statică era:

$$R_{STS} = 1 - \sin\theta_i$$

În punctul final de funcționare $P_f(\theta_f, M_f)$, determinat de sarcina finală \underline{Z}_f , rezerva de stabilitate statică este:

$$R_{STS} = 1 - \sin\theta_f$$

În concluzie:

- 1) Funcționarea static stabilă atât la GS cât și la GA este în zona $0 \div M_{elmag}$ maxim;
- 2) Rezerva de încărcare static stabilă este cu atât mai mare cu cât sarcina pe generatoare este mai mică;
- 3) La GA rezerva de încărcare la o funcționare static stabilă coincide cu rezerva de încărcare de la încărcarea dinamică, în regim stabil;
- 4) La GS, datorită fenomenului de pendulare, rezerva de încărcare la o funcționare static stabilă este mult mai mare față de cea de la încărcarea dinamică, în regim stabil;
- 5) Încărcările dinamice și cele statice la GA coincid, din punct de vedere al valorilor maxime de încărcare;
- 6) La încărcările static stabile diferențe esențiale între GS și GA nu sunt. Diferențe notabile între cele două generatoare apar la încărcările dinamice.

1.5. Influența reguletoarelor asupra stabilității statice și dinamice la un sistem electroenergetic izolat format din GS și GA

Se remarcă că prin creșterea necesarului de putere (sarcina \underline{Z}) în sistemul electroenergetic format din GS și GA va apare:

- 1) o scădere a tensiunii pe sarcina \underline{Z} și
- 2) o scădere a frecvenței.

Evident că la aceste scăderi vor interveni reguletoarele pe tensiune și pe frecvență care vor readuce tensiunea și frecvența în limitele impuse[T1].

Intervenția reguletoarelor (la GS) va supraîncărca GS și va descărca GA deoarece ele vor impune:

- 1) mărirea debitului la turbina cuplată cu GS, deci se va mări cuplul la GS, pentru a se atinge turația de sincronism puterea debitată de acesta crescând;
- 2) mărirea excitației la GS pentru creșterea tensiunii de alimentare la sarcină mărită.

Pentru a folosi în mod egal cele două generatoare (dacă sunt de aceeași putere activă) surplusul de putere activă ar trebui luat în mod egal de la cele două generatoare. Dacă, însă, tensiunea și frecvența sunt date de GS (prin reguletoarele de tensiune de pe excitația GS, respectiv de turație pentru frecvență), suprasarcina din sistem este preluată integral de GS. Practic GA debitează aceeași putere, dacă tensiunea și frecvența nu s-au modificat, punctul de funcționare P_i rămânând la aceleași coordonate (n_i, M_i - figura 1.19).

Prin micșorarea frecvenței în sistem, turația n^* corespunzătoare cuplului maxim:

$$n^* = n_1 \left(1 + \frac{R_2}{X_{sc}} \right) = \frac{f_1}{p_1} \left(1 + \frac{R_2}{2\pi f_1 L_{sc}} \right) = \frac{f_1}{p_1} + \frac{R_2}{2\pi L_{sc} p_1}$$

se va micșora la valoarea n^{**} :

$$n^{**} = \frac{f}{p_1} + \frac{R_2}{2\pi L_{sc} p_1}$$

Valoarea cuplului maxim se reduce cu pătratul tensiunii (curba punctată din figura 1.17)[P4].

Prin micșorarea tensiunii în sistem, datorită inerției mecanice a rotoarelor GA + turbină punctul de funcționare se va modifica din punctul inițial P_i în punctul P_1 , ajungând în final în punctul P_2 prin intervenția reguletoarelor de turație de la GA și de tensiune de la GS:

- regulatorul de turație de la grupul GA - turbină ,va determina creșterea cuplului turbinei GA și astfel turația se va mări;
- regulatorul de tensiune de la GS prin creșterea curentului de excitație I_E de la GS va readuce tensiunea U la valoarea nominală U_N .

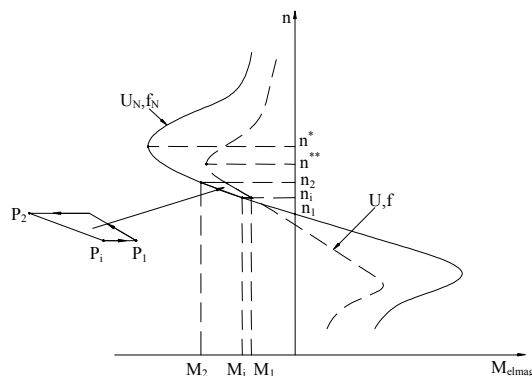


Fig.1.17. Modificarea turației GA cu sarcina.

Puterea debitată de GA (la neglijarea pierderilor de putere din generator) are

valoarea:

$$P_{iGA} = M_i \Omega_i = M_i 2\pi n_i$$

Pentru ca GA să debiteze o putere mai mare este necesar ca să i se mărească turația la arbore, de exemplu de la n_i la n_2 (figura 1.19) și astfel puterea ce o va debita GA va fi:

$$P_{2GA} = M_2 \Omega_2 = M_2 2\pi n_2$$

Diferența de putere:

$$\Delta P_{GA} = P_{2GA} - P_{iGA}$$

ce o dă GA ar trebui să fie de aceeași valoare cu diferența de putere ce o dă GS, pentru ca cele două generatoare să fie în același mod încărcate.

Se impune, așadar, folosirea unui regulator de turație la turbina ce antrenează GA în așa fel ca la scăderea tensiunii în sistem (creșterea puterii), cuplul la arborele GA să crească, crescând, astfel turația rotorului GA.

Regulatele de turație și de tensiune pot fi de tip:

- PI- proporțional integrator- de ecuație:

$$KT_i \frac{dE_r}{dt} + KE_r = T_i \frac{d\alpha}{dt}$$

-PID- proporțional integrator derivativ -de ecuație:

$$KT_D \frac{d^2 E_r}{dt^2} + KT_i \frac{dE_r}{dt} + KE_r = T_i \frac{d\alpha}{dt}$$

unde:

K - factorul de amplificare al regulatorului;

T_i, T_D - constantele de timp ale regulatelelor;

E_r sau $(\alpha^* - \alpha)$ - eroarea mărimii de reglat;

α^* - mărimea prescrisă;

α - mărimea reglată.

La GA în cazul de față mărimea reglată (prin intermediul cuplului la turbina cuplată cu GA) este turația la arborele GA ($\alpha = n$), mărimea prescrisă fiind turația finală n_2 ($\alpha^* = n_2$).

La GS sunt două regulate:

1) de turație, cu mărimea reglată turația arborelui GS prin controlul cuplului la turbina cuplată cu GS, prin mărirea cuplului la arbore;

2) de tensiune, cu mărimea reglată- tensiunea pe excitația GS prin controlul curentului de excitație.

Prin micșorarea tensiunii de la U_N la U [figura 1.18]punctul de funcționare la GS trece din P_i (la U_N) în P_1 (la $U < U_N$).

Prin intervenția celor două regulate (de tensiune ce determină mărirea curentului de excitație I_E și de turație ce mărește cuplul la arbore la valoarea M_2) se va atinge punctul final de funcționare P_2 de coordonate:

$$\theta_2 > \theta_i$$

$$M_2 > M_i$$

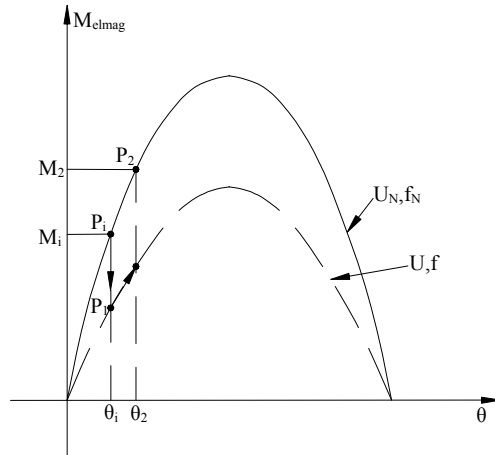


Fig.1.18. Modificarea cuplului la GS cu

La GA, prin intervenția reguletoarelor care mențin tensiunea și frecvența la valorile standard, punctul de funcționare nu se modifică (figura 1.19) și astfel necesarul de putere activă cerut de sarcină va fi obținut numai de la GS. La mărirea sarcinii pe care debitează cele două generatoare, GA nu dă putere în plus. Pentru a mări puterea activă pe care o dă GA trebuie să se intervină în reglajul debitului la turbină.

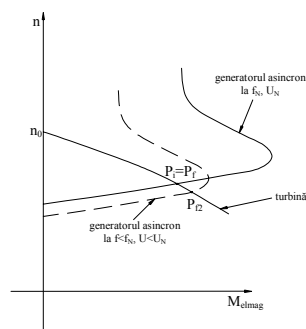


Fig.1.19. Modificarea punctului de funcționare la GA.

În absența reguletoarelor, așa cum s-a menționat anterior, frecvența și tensiunea se vor micșora la valorile $f < f_N$, $U < U_N$ și astfel punctul final de funcționare va deveni P_{f2} . În acest punct P_{f2} , puterea cedată de turbină GA este mai mare ca în punctul P_f , deoarece caracteristica turbinei are un maxim la $n = \frac{n_0}{2}$ și arată așa ca în figura 1.20 deoarece:

$$P_{turbina} = M_{turbina} 2\pi n = K(n_0 - n)n$$

și

$$\frac{dP_{turbină}}{dn} = 0 \Rightarrow n^* = \frac{n_0}{2}$$

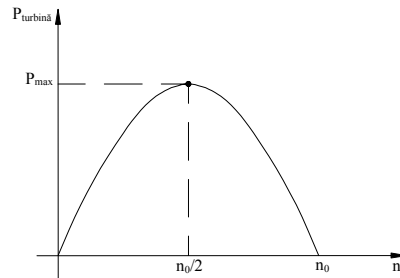


Fig.1.20. Dependenta puterii de turație la turbină.

Așadar, în absența reguletoarelor de tensiune și turație (la GS) la surplusul de putere cerut de sarcină participă și GA.

Dintre toate cele trei reguletoare din sistem (două la GS și unu la GA) doar regulatorul de tensiune contribuie la mărirea stabilității statice a GS și GA, celelalte două reguletoare, prin mărirea cuplurilor la cele două generatoare, vor micșora zona de stabilitate statică.

1.6. Calculul turației rotorului GA într-un sistem izolat ,la modificări ale sarcinii

Pentru a se încărca ambele generatoare în mod proporțional cu puterile lor nominale este necesar ca regulatorul de turație la GA să fie mult mai rapid decât cele două reguletoare de la GS, astfel încât GA să preia o parte din suprasarcina cerută de consumatorii electrici, cele două generatoare funcționând static stabil cu aceeași rezervă de stabilitate[S2].

În punctul inițial P_i caracterizat prin parametrii sarcinii: R_i și X_i , ecuațiile în regim staționar ale sistemului GS, GA, sarcină, sunt:

$GS + T_{GS}$

$$U_d = \omega L I_q$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{0GS} - \omega)$$

$GA + T_{GA}$

$$U_d = -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr}$$

$$U_q = \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr}$$

$$0 = Ms\omega i_d + L_2s\omega i_{dr} + R_2i_{qr}$$

$$0 = -Ms\omega i_q + R_2i_{dr} - L_2s\omega i_{qr}$$

$$p_{1GA}M(i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) = K_{TGA}[\omega_{0GA} - \omega(1-s)]$$

sarcina

$$(I_d - i_d)R_i - (I_q - i_q)X_i = U_d$$

$$(I_d - i_d)X_i + (I_q - i_q)R_i = U_q$$

Necunoscutele din sistem sunt:

-curenții: $I_d, I_q, i_d, i_q, i_{dr}, i_{qr}$;

-viteza unghiulară: ω ;

-alunecarea rotorică la GA: s ;

-tensiunile: U_d, U_q .

În punctul final P_f , caracterizat prin parametrii sarcinii: R_f și X_f sistemul de ecuații este asemănător cu cel din punctul P_i , mai puțin ultimele două ecuații unde se înlocuiește R_i, X_i cu R_f, X_f .

Inițial sistemul energetic funcționa la parametrii standard:

$$U_N = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} - \text{tensiunea nominală din sistem};$$

$$\omega = \omega_N = 2\pi f_N = 2\pi 50 = 314 \text{ rad/s (la frecvența nominală } f_N = 50\text{Hz)}.$$

Prin modificarea sarcinii tensiunea și frecvența în sistem se modifică:

$$U \neq U_N$$

$$\omega \neq \omega_N$$

și aceste valori trebuie readuse la valorile nominale în așa fel încât cele două generatoare să se încarce în mod direct proporțional cu puterile lor nominale.

Așadar, la funcționarea în condiții standard:

$$\omega = \omega_N = 314 \text{ rad/s}$$

$$U_N = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$$

sistemul algebric ce definește funcționarea în regim staționar a celor două generatoare devine:

$GS + T_{GS}$

$$U_d = 314LI_q$$

$$U_q = 314(M_E I_E - LI_d)$$

$$p_{1GS}M_E I_E I_q = k_{TGS} \left(\frac{\omega_{0GS} - 314}{p_{1GS}} \right)$$

$GA + T_{GA}$

$$U_d = -314(L_1 i_q + 314M i_{qr})$$

$$U_q = 314(L_1 i_d + M i_{dr})$$

$$0 = -314s(M i_q + L_2 i_{qr}) + R_2 i_{dr}$$

$$0 = 314s(M i_d + L_2 i_{dr}) + R_2 i_{qr}$$

$$p_{1GA}M(i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) = k_{TGA} \left[\frac{\omega_{0GA} - 314(1-s)}{p_{1GA}} \right]$$

Sarcina

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)X = U_d$$

$$(I_d - i_d)X + (I_q - i_q)R = U_q$$

Tensiunea

$$U_N = U_d^2 + U_q^2$$

Încărcarea proportională la cele două generatoare

$$\frac{k_{TGS} \left(\frac{\omega_{0GS} - 314}{P_{1GS}} \right)}{P_{NGS}} = \frac{k_{TGA} \left[\frac{\omega_{0GA} - 314(1-s)}{P_{1GA}} \right] 314(1-s)}{P_{NGA}}$$

unde P_{NGS} și P_{NGA} sunt puterile nominale ale celor două generatoare.

Se obțin, astfel 12 ecuații cu 12 necunoscute:

$I_E, I_d, I_q, i_d, i_q, i_{dr}, i_{qr}, U_d, U_q, s, k_{TGS}, k_{TGA}$;

Reglările în sistem sunt la:

- excitația GS (prin modificarea lui I_E);
- turbina GS (prin reglajul unghiului de la paletetele turbinei: k_{TGS});
- turbina GA (prin reglajul unghiului de la paletetele turbinei: k_{TGA});

și în acest mod cele două generatoare se încarcă proporțional cu puterile lor nominale.

Variabilele în sistem sunt:

- sarcina rezistivă R ;
- sarcina inductivă X .

În punctul inițial de funcționare P_i sarcina are valoarea: R_i, X_i iar în punctul final P_f : R_f, X_f . Între cele două regimuri ($P_i \rightarrow P_f$) funcționarea este determinată de sistemul de ecuații diferențiale neliniar și neomogen. Acest sistem se rezolvă prin metode numerice (cu programul MAPLE sau MATHEMATICA, în cazul de față), rezultatele obținute fiind sub formă grafică [B12.V1, T3, I2]

1.7. Prezentarea conținutului tezei de doctorat

Obiectivele propuse au condus la structurarea lucrării pe 6 capitole al căror conținut este, sumar, dat în cele ce urmează.

În **capitolul 1** se ilustrează oportunitatea și obiectivele lucrării și stadiul actual al cercetărilor din acest domeniu. Sunt analizate cele mai importante lucrări, pe baza cărora autorul își va construi modelele matematice pentru analiza sistemului **T + GS și T + GS + GA**.

În **capitolul 2**, în mare parte original, folosind modelul ortogonal pentru cele două generatoare de 1 MW fiecare, se analizează variația cu sarcina a tensiunii și frecvenței din sistem. Se face remarcă că, pentru anumite valori ale sarcinii, există 3 puncte de funcționare: 2 stabile și unul instabil static. Tensiunile și frecvențele diferă semnificativ între cele 2 puncte stabile de funcționare.

Alegerea corectă a punctului de funcționare (din cele 3 posibile) se poate face numai cunoscând situația anterioară în care funcționa sistemul.

Punctele de funcționare se găsesc la intersecția caracteristicilor mecanice a

turbinei și a generatorului. Din acest motiv este necesară determinarea **caracteristicilor mecanice la GS și la GA**. Prin liniarizarea caracteristicilor mecanice în jurul punctului de funcționare se demonstrează natura punctului de funcționare (**stabil sau instabil**).

În **capitolul 3**, în întregime original, se analizează stabilitatea dinamică a sistemului T – GS – GA și a sistemului T – GS, având în vedere modelele matematice construite cu ecuațiile diferențiale, din capitolele anterioare.

Se dă **algoritmul de reglare**, bazat pe coordonatele **punctului inițial** și pe reglarea **tensiunii și frecvenței prin curentul de excitație și cuplurile la cele două turbine**. Reglarea sistemului, în acest capitol, presupune calcularea sarcinii electrice existente în sistem, la un moment dat.

Se face remarcă că sistemul este **stabil dinamic pentru orice valoare a sarcinii**.

În **capitolul 4**, original în întregime, se propune o altă metodă de reglare, bazată pe măsurarea tensiunii și a frecvenței și compararea lor cu mărimile nominale : UN și fN. Folosirea acestui algoritm de reglare evită calcularea sarcinii electrice existente în sistem la un anumit moment, calculul bazat pe valorile unor parametrii care se pot modifica în timp și deci pot apare erori, uneori industriale.

Se estimează **stabilitatea dinamică prin simulări numerice** bazate pe rezolvarea ecuațiilor diferențiale neliniare și neomogene. Și în acest caz sistemul este **stabil dinamic** pentru orice valoare a sarcinii.

În **capitolul 5**, se dau rezultatele experimentale obținute la MHC- Bistrița și la MHC – Surduc la punerea în funcțiune, după reparațiile capitale din 2004 și 2005. Rezultatele experimentale au validat modelele matematice folosite , făcând astfel posibilă generalizarea metodelor propuse și la alte grupuri energetice ce funcționează în regim insular.

Capitolul 6 este consacrat concluziilor finale.

Se dau în acest capitol, cele mai importante contribuții originale aduse de autor în prezenta lucrare. Cu excepția primului capitol, care este o sinteză a literaturii din acest domeniu, toate celelalte capitole sunt originale în întregime.

2. DETERMINAREA CONDIȚIILOR INIȚIALE LA SISTEMUL CU GS ȘI GA

La sarcină rezistiv – inductivă (R,L), așa cum este în realitate, se calculează pentru sistemul GS + SARCINĂ, tensiunea, frecvența și circulația puterilor în sistem. Pentru consumatorul standard este deosebit de importantă valoarea tensiunii și a frecvenței și determinarea limitelor între care acestea se modifică.

Importantă este și distribuția sarcinii pe cele două generatoare GS și GA.

Determinarea punctelor de funcționare static stabile se face pentru un anumit curent de excitație la GS și pentru o valoare dată a sarcinii R, L.

În estimarea stabilității dinamice stabilirea punctului inițial în care funcționează sistemul este esențială mai ales că pentru anumite valori ale rezistenței de sarcină se obțin 3 puncte de funcționare (2 stabile și unul instabil).

Stabilirea în unul din cele 2 puncte stabile de funcționare depinde de zona anterioară în care a funcționat sistemul.

Se analizează, la aceeași sarcină, valorile de tensiune, frecvență și putere, între care poate funcționa sistemul, fapt deosebit de important în exploatarea centralelor în regim izolat (sau insular). Aceste limite de funcționare apar ca urmare a faptului că sistemul format din generatoarele electrice și sarcină pot funcționa **static stabil** în două puncte de funcționare.

În partea a doua a capitolului se analizează stabilitatea statică a sistemului, folosind în acest scop ecuația mișcării și **criteriul de stabilitate Hurwitz**.

Pentru a rezolva, însă, ecuația mișcării se deduc caracteristicile mecanice ale sistemelor GS + SARCINĂ și GS + GA + SARCINĂ. Aceste caracteristici mecanice se limitează în jurul punctului de funcționare prin drepte de ecuații date și se demonstrează cum punctul de funcționare este stabil și prin urmare funcționarea în regim dinamic (**stabilitatea dinamică**) poate fi **stabilă sau instabilă**.

Generatorul sincron GS putând debita putere activă și reactivă poate funcționa în regim autonom, spre deosebire de generatorul asincron GA, care fiind consumator de putere reactivă, funcționează numai în paralel cu generatoare sincrone furnizoare și de putere reactivă [B19].

În cele ce urmează se prezintă comportarea sistemelor:

-TURBINĂ - GS - SARCINĂ

-TURBINĂ - GS+GA - SARCINĂ

2.1. Comportarea sistemului TURBINĂ-GS- SARCINĂ la variații ale sarcinii

Generatorul sincron -GS- este antrenat de turbina T_{GS} ce are cuplul motor M_{TGS} [B5]:

$$M_{TGS} = K_{TGS}(\omega_{0TGS} - \omega) = p_1 M_E I_E I_q$$

(primul termen este cuplul turbinei, iar al doilea este cuplul generatorului sincron) unde:

- ω_{0TGS} -viteza unghiulară la funcționarea în gol;
 $\omega = 2\pi f$ -viteza unghiulară în punctul P de funcționare (figura 2.1)
 f -frecvența tensiunilor și curenților din sistem.

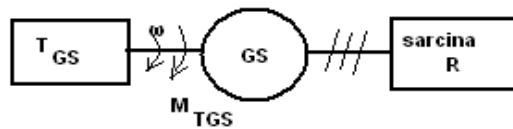
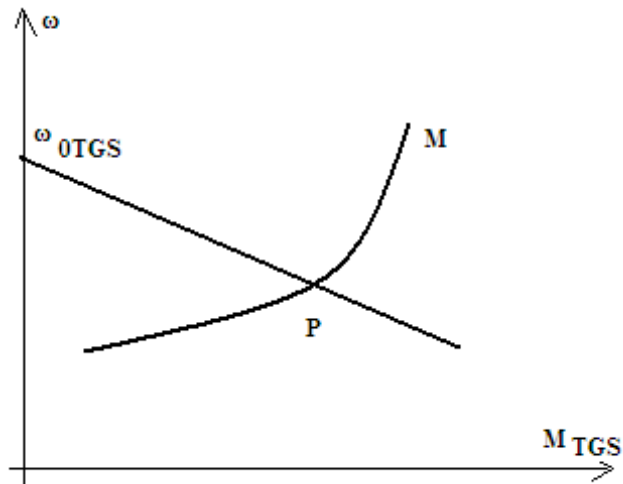


Fig.2.1. Sistemul Turbină-GS

Ecuțiile, în regim staționar, a sistemului turbină- GS -sarcină sunt:

Generator sincron+turbină

$$\underline{GS + T_{GS}}$$

$$U_d = \omega L I_q$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{0GS} - \omega)$$

sarcina

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L = U_d$$

$$(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R = U_q$$

Se folosesc notațiile:

$$a = i_q$$

$$g = i_d$$

$$c = i_{qr}$$

$$b = i_{dr}$$

$$z = I_d$$

$$x = I_q$$

$$y = I_E$$

Generatorul sincron are datele:

$$P_N = 1MW$$

$$U_N = 6000V$$

$$L_1 = L_2 = L = 0.09[H]$$

$$M_E = 20[H];$$

$$K_{TGS} = 10.14$$

$$\omega_{oGA} = 628 \frac{rad}{s}$$

$$R + j\omega L = sarcina$$

puterea activă la GS:

$$P = U_d I_d + U_q I_q = (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x$$

puterea reactivă la GS:

$$Q = U_q I_d - U_d I_q = (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x$$

cuplul la GS:

$$M = p_1 M_E I_E I_q = M_E xy$$

tensiunea în sistem:

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2}$$

curentul statoric la GS:

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

2.1.1. Punctele de funcționare la sistemul TURBINĂ-GS-SARCINĂ

Curentul de excitație este constant și se modifică rezistența R de la 200Ω la 1Ω :

$$I_E = y = 2A \quad \text{-curentul de excitație}$$

Sarcina are un caracter rezistiv-inductiv :

$$Z = R + j\omega L$$

unde:

$$R = 1 \div 200 [\Omega]$$

$$L = 0.054 [H]$$

$$\omega = 2\pi f \text{ (frecvența din sistem)}$$

Pentru:

$$R = 200 [\Omega]$$

sistemul de ecuații ce definește funcționarea GS este dat alăturat:

$$\mathbf{R = 200\Omega}$$

$$\begin{aligned}
 R &= 200 \\
 L &= 0.054 \\
 Rz - x\omega L &= 0.09\omega x \\
 Rx + z\omega L &= -0.09\omega z + 20\omega y \\
 10.14(628 - \omega) &= 20xy \\
 y &= 2 \\
 M &= 20xy \\
 U &= \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2} \\
 P &= (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x \\
 Q &= (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x \\
 T &= \omega L[(z)^2 + (x)^2] \\
 W &= \sqrt{x^2 + z^2}
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 y = 2.0, R = 200.0, Q = 95285.61288, L = 0.054, \mathbf{U} = \mathbf{14046.58293}, \\
 P = 977241.6692, x = 67.65196177, T = 95285.61288, \omega = \mathbf{361.1283559}, \\
 M = 2706.078471, z = 17.59035005, W = 69.90141877
 \end{array} \right\}$$

Pentru diferite rezistențe, rezolvările sistemelor, sunt date în anexa 1.1

Sistemul de ecuații de mai sus are soluțiile respective, în funcție de valoarea sarcinii. La o anumită valoare a sarcinii, intersecția dintre caracteristica mecanică a **GS** cu caracteristica mecanică a turbinei, are loc într-un singur punct, așa ca în figura 2.2:

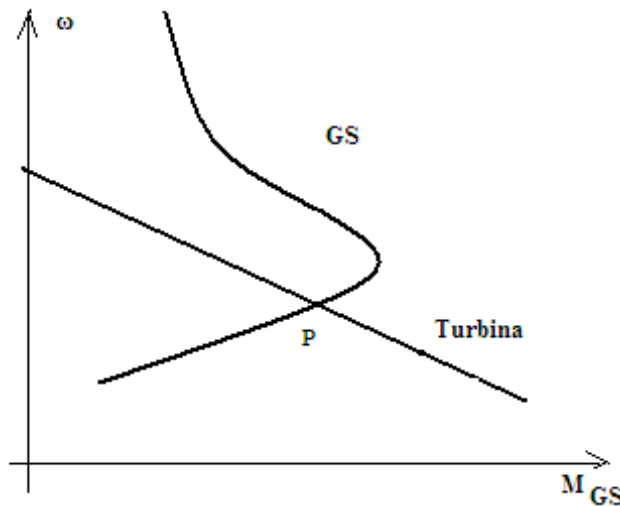


Fig.2.2. Funcționarea sistemului **turbină-GS-sarcină într-un singur punct**

La alte valori ale sarcinii se pot obține trei puncte de funcționare: P_1, P_2, P_3 , așa ca în figura 2.3:

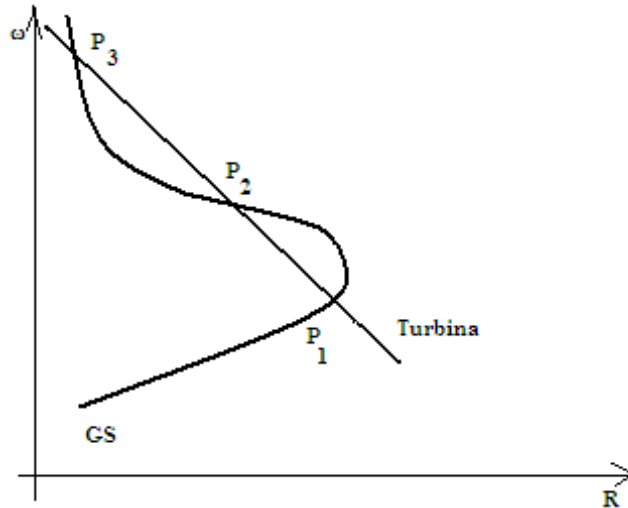


Fig.2.3. Funcționarea sistemului **turbină-GS-sarcină în trei puncte**

Din cele trei soluții obținute din sistemul algebric

$$\mathbf{R} = 11\Omega$$

$$R = 11$$

$$L = 0.054$$

$$Rz - x\omega L = 0.09\omega x$$

$$Rx + z\omega L = -0.09\omega z + 20\omega y$$

$$10.14(628 - \omega) = 20xy$$

$$y = 2$$

$$M = 20xy$$

$$U = \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2}$$

$$P = (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x$$

$$Q = (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x$$

$$T = \omega L[(z)^2 + (x)^2]$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

$$\text{Solution: } \left\{ \begin{array}{l} \omega = \mathbf{445.4626889}, x = 46.27320836, W = 273.7815175, Q = 1803073.153, \\ T = 1803073.153, M = 1850.928334, P = 824519.5128, \mathbf{U} = \mathbf{7241.727187}, \\ z = 269.8427496, y = 2.0, R = 11.0, L = 0.054 \end{array} \right\}$$

$$x = 133.4813083, z = 177.2667964, \omega = \mathbf{101.4465155}, W = 221.9026291,$$

$$T = 269746.4823, P = 541648.5447, Q = 269746.4823, M = 5339.252333,$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{2726.872822}, y = 2.0, R = 11.0, L = 0.054$$

$$Q = 179018.2818, P = 449701.9271, M = 5545.659333, z = 147.1751761,$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{2393.872361}, T = 179018.2818, \omega = \mathbf{81.09079554}, W = 202.1929607,$$

$$x = 138.6414833, y = 2.0, R = 11.0, L = 0.054$$

respectiv din cele trei puncte de funcționare $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3$, se alege soluția potrivită, care defapt este soluția în care funcționează sistemul **TURBINĂ-GS-SARCINĂ**, având în vedere soluția imediat anterioară.

De exemplu sistemul a funcționat cu $\mathbf{R} = \mathbf{10}[\Omega]$ (cu $\mathbf{L} = \mathbf{0.054H}$) la $\omega = \mathbf{469}[\frac{rad}{s}]$ (sistemul de mai jos), deci într-un punct de funcționare (**A**).

$$\mathbf{R} = \mathbf{10}\Omega$$

$$R = 10$$

$$L = 0.054$$

$$Rz - x\omega L = 0.09\omega x$$

$$Rx + z\omega L = -0.09\omega z + 20\omega y$$

$$10.14(628 - \omega) = 20xy$$

$$y = 2$$

$$M = 20xy$$

$$U = \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2}$$

$$P = (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x$$

$$Q = (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x$$

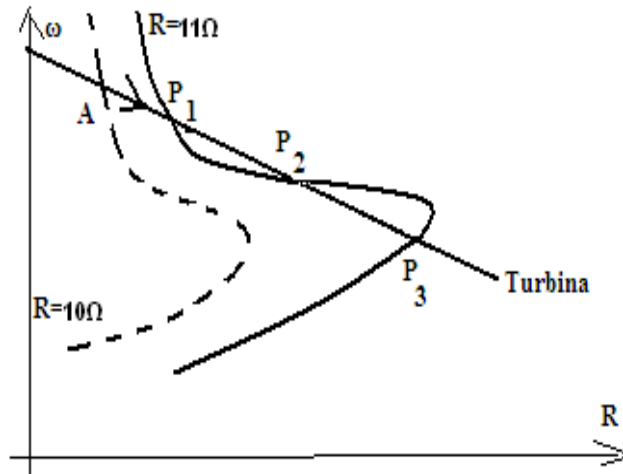
$$T = \omega L[(z)^2 + (x)^2]$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = 10.0, y = 2.0, x = 40.21986039, Q = 1913695.036, M = 1608.794415, \\ \omega = \mathbf{469.3417736}, z = 271.8267928, W = 274.7861758, \mathbf{U} = \mathbf{7486.808628}, \\ P = 755074.4244, T = 1913695.036, L = 0.054 \end{array} \right.$$

Rezistența modificându-se de la $\mathbf{10}\Omega$ la $\mathbf{11}\Omega$ ($L=0.054H$) se obțin trei soluții pentru ω : $\omega_1 = \mathbf{445}[\frac{rad}{s}]$, $\omega_2 = \mathbf{101}[\frac{rad}{s}]$, $\omega_3 = \mathbf{81}[\frac{rad}{s}]$, rezultate din sistemul cu $\mathbf{R} = \mathbf{11}\Omega$ (caracteristica cu linie continuă din figura 2.4) și deci trei puncte de funcționare ($\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3$).

Fig.2.4. Deplasarea punctului de funcționare la modificarea lui R

Din punctul A de funcționare (figura.2.4) se va trece în punctul P_1 și nu în P_2 sau P_3 , care sunt unele instabile (P_2), iar altele stabile (P_3).

Tabelul rezultat în urma sistemelor de ecuații (anexa 1.1), cu rezistența variabilă de la $1[\Omega]$ până la $200[\Omega]$ este dat alăturat:

$R [\Omega]$	$\omega [\frac{rad}{s}]$	$U[V]$	$M[Nm]$
200	361	14046	2706
100	264	9971	3690
50	180	6515	4541
40	157	5606	4769
30	135	4590	5027
20	103	3441	5320
16	90	2944	5445
15	87	2818	5476
14	333;209;85	6087;4531;2693	2983;4246;5505
13	383;161;82	6614;3800;2572	2477;4726;5532
12	417;129;80	6961;3247;2462	2131;5052;5552
11	445;101;81	7241;2726;2393	1850;5339;5545
10	469	7486	1608
5	560	8503	685
2	602	9056	255
1	615	9238	125

$P[kW]$	$Q[kVAR]$	$I[A]$
977	95	69
974	138	98
817	159	127
751	160	137
664	158	148
549	153	165
495	151	175
481	152	179
995;888;468	1282;716;153	266;251;182
950;765;455	1514;514;156	270;242;187
890;655;446	1674;382;161	272;233;192
824;541;449	1803;269;179	273;221;202
755	1913	274
384	2325	277
152	2510	277
77	2564	277

Se dau în continuare variațiile cu sarcina a vitezei unghilare ω ,a tensiunii \mathbf{U} și a puterii active \mathbf{P} .

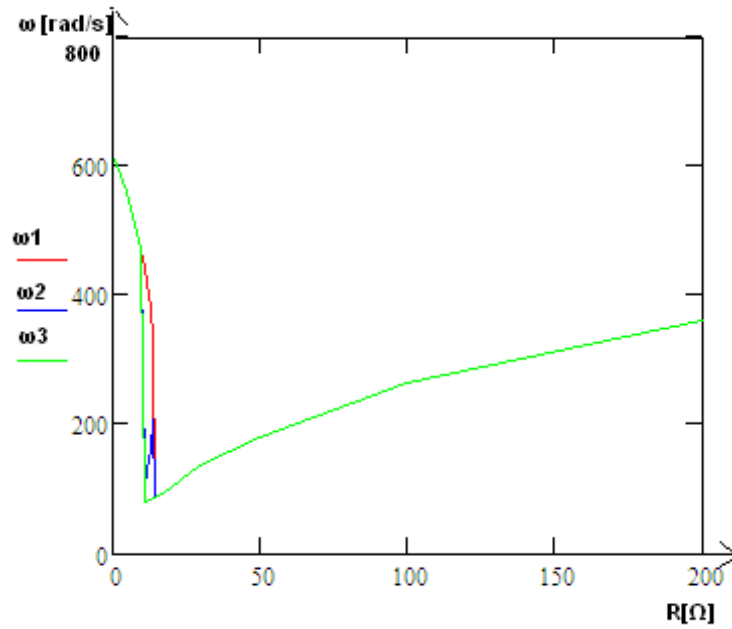


Fig.2.5. Variația vitezei unghiulare cu sarcina

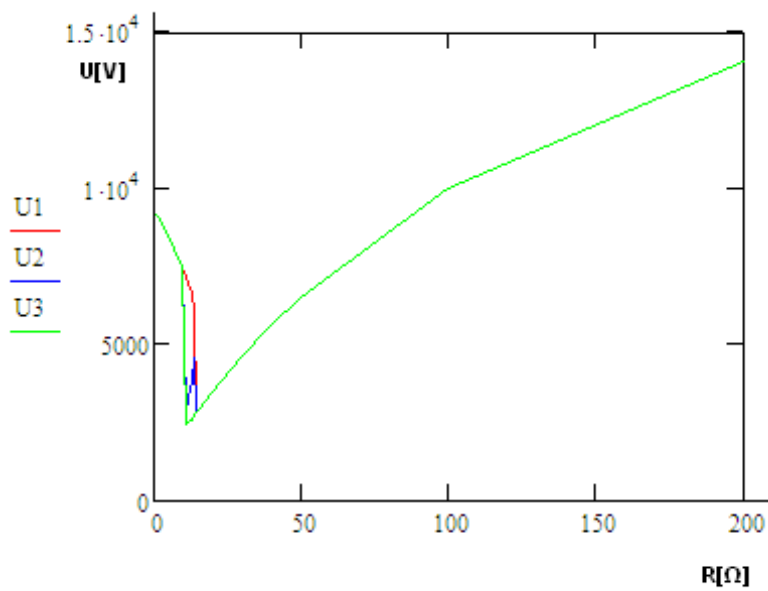


Fig.2.6. Variația tensiunii cu sarcina

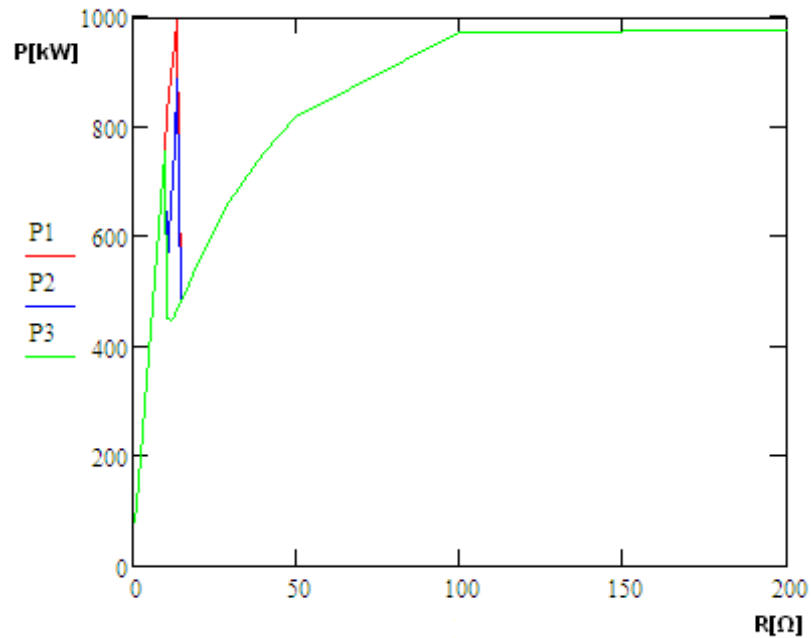


Fig.2.6. Variația puterii cu sarcina

Pentru anumite valori ale sarcinii R , sistemul poate funcționa în trei puncte ,pe grafice fiind 3curbe.Cele 3curbe sunt mult diferite între ele.

2.1.2 Influența curentului de excitație asupra caracteristicii mecanice

Funcționarea sistemului în unul sau trei puncte se poate influența prin modificarea curentului de excitație la **GS**. Mărirea curentului de excitație la **GS** deplasează caracteristicile mecanice ale generatorului înspre zona cu un singur punct de intersecție (R sau S) așa ca în figura 2.8[H1].

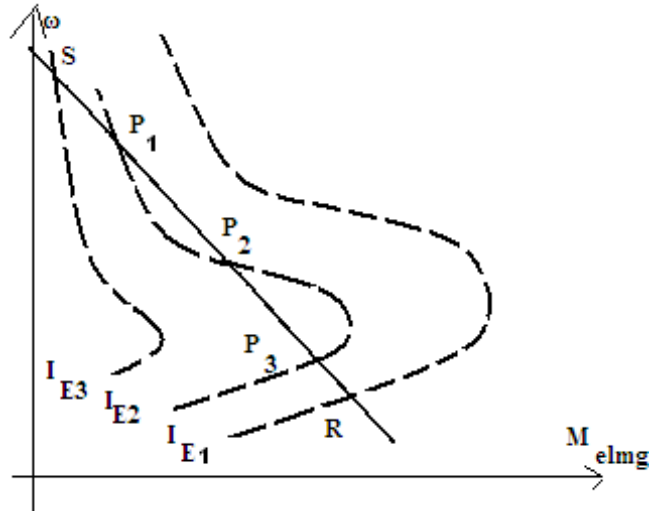


Fig.2.7. Deplasarea caracteristicilor mecanice prin modificarea curentului de excitație.

La un curent de excitație $I_{E2} > I_{E3}$ funcționarea este posibilă în punctele P_1 , P_2 și P_3 (punctul P_2 este static instabil, iar punctele P_1 și P_3 sunt static stabile).

Sistem cu 3 soluții la $I_{E2} = 2[A]$

$$R = 14$$

$$L = 0.054$$

$$Rz - x\omega L = 0.09\omega x$$

$$Rx + z\omega L = -0.09\omega z + 20\omega y$$

$$10.14(628 - \omega) = 20xy$$

$$y = 2$$

$$M = 20xy$$

$$U = \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2}$$

$$P = (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x$$

$$Q = (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x$$

$$T = \omega L[(z)^2 + (x)^2]$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

$$\text{Solution} \left\{ \begin{array}{l} y = 2.0, R = 14.0, z = 256.0580902, \mathbf{U} = \mathbf{6087.121428}, P = 995781.4619, \\ Q = 1282146.847, x = 74.57547669, M = 2983.019067, T = 1282146.847, \\ \omega = \mathbf{333.81666}, W = 266.6969203, L = 0.054 \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 2.0, R = 14.0, M = 4246.923653, x = 106.1730913, Q = 716711.064, \\ P = 888334.2755, \omega = \mathbf{209.1712373}, T = 716711.064, z = 228.4288137, \\ W = 251.897694, \mathbf{U = 4531.236942}, L = 0.054 \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 2.0, R = 14.0, M = 5505.897279, \omega = \mathbf{85.01210265}, T = 153481.2561, \\ W = 182.8480838, z = 120.3603183, \mathbf{U = 2693.980315}, P = 468067.9047, \\ Q = 153481.2561, x = 137.647432, L = 0.054 \end{array} \right\}$$

Pentru un curent de excitație $I_{E1} > I_{E2}$ caracteristica mecanică a generatorului intersectează caracteristica mecanică a turbinei într-un singur punct – **R**.

Sistem cu o soluție la $I_{E1} = 30[A]$

$$R = 14$$

$$L = 0.054$$

$$Rz - x\omega L = 0.09\omega x$$

$$Rx + z\omega L = -0.09\omega z + 20\omega y$$

$$10.14(628 - \omega) = 20xy$$

$$y = 30$$

$$M = 20xy$$

$$U = \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2}$$

$$P = (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x$$

$$Q = (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x$$

$$T = \omega L[(z)^2 + (x)^2]$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = 14.0, y = 30.0, L = 0.054, M = 6365.40989, Q = 1.504532414, \\ \omega = \mathbf{0.2475453228}, \mathbf{U = 148.5267799}, x = 10.60901648, W = 10.60905087, \\ P = 1575.727446, T = 1.504532414, z = 0.0270124705 \end{array} \right\}$$

La valori foarte mici ale curentului de excitație (I_{E3}) funcționarea are loc tot într-un singur punct – **S**.

Sistem cu o soluție la $I_{E1} = 0.01[A]$

$$R = 14$$

$$L = 0.054$$

$$Rz - x\omega L = 0.09\omega x$$

$$Rx + z\omega L = -0.09\omega z + 20\omega y$$

$$10.14(628 - \omega) = 20xy$$

$$y = 0.01$$

$$M = 20xy$$

$$U = \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2}$$

$$P = (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x$$

$$Q = (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x$$

$$T = \omega L[(z)^2 + (x)^2]$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} R = 14.0, L = 0.054, y = 0.01, \omega = 627.9958583, U = 50.35567148, \\ W = 1.372538319, z = 1.356380235, x = 0.2099859401, T = 63.88508776, \\ Q = 63.88508776, P = 26.37406013, M = 0.04199718802 \end{array} \right\}$$

Observații:

1. Oricare ar fi valoarea curentului de excitație I_E la **GS** sistemul are cel puțin un punct de funcționare static stabil sau cel mult trei puncte de funcționare, care sunt două stabile și unul este static instabil.

2. Analog curentului de excitație I_E și valoarea rezistenței **R** determină numărul de puncte de funcționare.

Aceste precizări reies din expresia caracteristicii mecanice la **GS** dedusă anterior :

$$M_{elm} = \frac{p_1(M_E I_E)^2 \omega R}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

Din această relație se vede clar cum prin valorile lui I_E și **R** se pot modifica punctele de funcționare.

2.2. Încărcarea generatoarelor GS+GA la sarcină variabilă

Generatorul asincron -GA- este antrenat de turbina T_{GA} ce are cuplul motor M_{TGA} :

$$M_{TGA} = K_{TGA}(\Omega_{0TGA} - \Omega) = p_{1GA}M(i_q i_{dr} - i_d i_{qr})$$

(primul termen este cuplul turbinei, iar al doilea termen este cuplul generatorului asincron)

unde:

Ω_{0TGA} -viteza unghiulară la funcționarea în gol;

Ω -viteza unghiulară în punctul P_1 de funcționare (fig 2.9)

Generatorul sincron -GS- este antrenat de turbina T_{GS} ce are cuplul motor M_{TGS} :

$$M_{TGS} = K_{TGS}(\omega_{0TGS} - \omega) = p_1 M_E I E I_q$$

(primul termen este cuplul turbinei, iar al doilea este cuplul generatorului sincron) unde:

ω_{0TGS} - viteza unghiulară la funcționarea în gol;

$\omega = 2\pi f$ - viteza unghiulară în punctul P_2 de funcționare (fig 2.9)

f - frecvența tensiunilor și curenților din sistem.

Sistemul GS+GA debitează pe rezistența R variabilă (Fig.2.9)

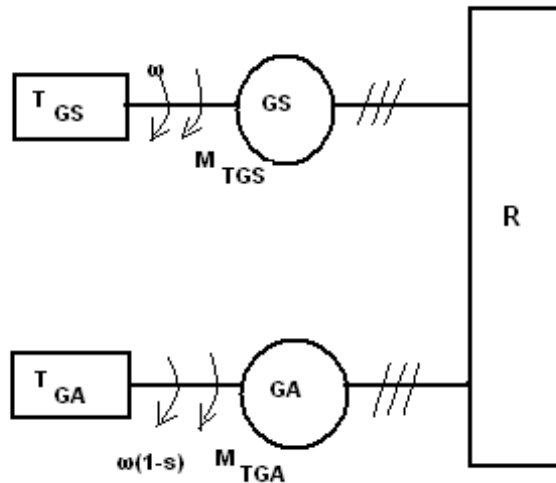
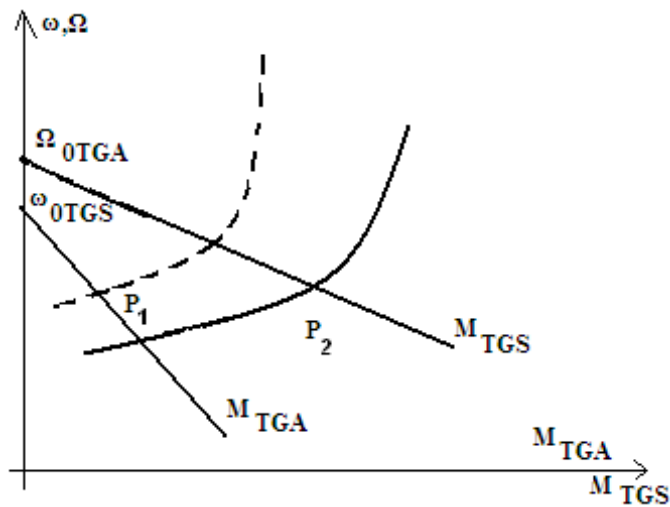


Fig.2.8. Sistemul **GS+GA**

Ecuțiile algebrice ce definesc regimul staționar al sistemului GS+GA ce debitează

pe sarcina $Z = R + j\omega L$, variabilă, sunt:

Generator sincron+turbină

$$\underline{GS + T_{GS}}$$

$$U_d = \omega L I_q$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{0GS} - \omega)$$

Generator asincron + turbină

$$\underline{GA + T_{GA}}$$

$$U_d = -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr}$$

$$U_q = \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr}$$

$$0 = -M s \omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s \omega i_{qr}$$

$$0 = M s \omega i_d + L_2 s \omega i_{dr} + R_2 i_{qr}$$

$$p_{1GA} M (i_{qdr} - i_{diqr}) = K_{TGA} [\omega_{0GA} - \omega(1-s)]$$

sarcina

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L = U_d$$

$$(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R = U_q$$

sau

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L = \omega L I_q$$

$$(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{0GS} - \omega)$$

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L = -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr}$$

$$(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R = \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr}$$

$$-M s \omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s \omega i_{qr} = 0$$

$$M s \omega i_d + L_2 s \omega i_{dr} + R_2 i_{qr} = 0$$

$$p_{1GA} M (i_{qdr} - i_{diqr}) = K_{TGA} [\omega_{0GA} - \omega(1-s)]$$

—Parametrii generatoarelor—

Generatorul asincron are datele:

$$P_N = 1MW$$

$$U_N = 6000V$$

$$s_N = 0.01$$

$$L_1 = L_2 = 0.71[H]$$

$$M = 0.69[H];$$

$$R_2 = 0.053[\Omega]$$

$$K_{TGS} = 10.14$$

$$\omega_{0GA} = 640 \frac{rad}{s}$$

Generatorul sincron are datele:

$$P_N = 1MW$$

$$U_N = 6000V$$

$$L_1 = L_2 = L = 0.09[H]$$

$$M_E = 20[H];$$

$$K_{TGS} = 10.14$$

$$\omega_{oGA} = 628 \frac{rad}{s}$$

Notații

$$a = i_q$$

$$g = i_d$$

$$c = i_{qr}$$

$$b = i_{dr}$$

$$z = I_d$$

$$x = I_q$$

$$y = I_E$$

$$R + j\omega L = sarcina$$

alunecarea la GA:

$$s = \frac{\omega - \Omega}{\omega}$$

puterea activă la GA:

$$p = U_d i_d + U_q i_q = (R(z - g) - (x - a)\omega L)g + (R(x - a) + (z - g)\omega L)a$$

puterea reactivă la GA:

$$q = U_q i_d - U_d i_q = (R(x - a) + (z - g)\omega L)g - (R(z - g) - (x - a)\omega L)a$$

puterea activă la GS:

$$P = U_d I_d + U_q I_q = (R(z - g) - (x - a)\omega L)z + (R(x - a) + (z - g)\omega L)x$$

puterea reactivă la GS:

$$Q = U_q I_d - U_d I_q = (R(x - a) + (z - g)\omega L)z - (R(z - g) - (x - a)\omega L)x$$

cuplul la GA:

$$m = p_1 M (i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) = 0.69(gc - ab)$$

cuplul la GS:

$$M = p_1 M_E I_E I_q = 20xy$$

tensiunea în sistem:

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = \sqrt{(R(z - g) - (x - a)\omega L)^2 + (R(x - a) + (z - g)\omega L)^2}$$

curentul statoric la GS:

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

curentul statoric la GA:

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = w = \sqrt{a^2 + g^2}$$

Funcționarea sistemului GS+GA la sarcină variabilă

La $I_E = ct$ ($\gamma=2[A]$) , $L=0.01347[H]$ se modifică **R** de la 200[Ω] la 2[Ω], pentru

R = 200[Ω] obținându-se:

$$R = 200$$

$$L = 0.01347$$

$$R(z - g) - (x - a)\omega L = -\omega(0.71a + 0.69c)$$

$$R(x - a) + (z - g)\omega L = \omega(0.71g + 0.69b)$$

$$0.053b = \omega(0.69sa + 0.71sc)$$

$$0.053c = -\omega(0.69sg + 0.71sb)$$

$$10.14(640 - \omega + \omega s) = 0.69(gc - ab)$$

$$R(z - g) - (x - a)\omega L = 0.09\omega x$$

$$R(x - a) + (z - g)\omega L = -0.09\omega z + 20\omega y$$

$$10.14(628 - \omega) = 20xy$$

$$\Omega = \omega(1 - s)$$

$$y = 2$$

$$m = 0.69(gc - ab)$$

$$M = 20xy$$

$$U = \sqrt{(R(z - g) - (x - a)\omega L)^2 + (R(x - a) + (z - g)\omega L)^2}$$

$$p = (R(z - g) - (x - a)\omega L)g + (R(x - a) + (z - g)\omega L)a$$

$$q = (R(x - a) + (z - g)\omega L)g - (R(z - g) - (x - a)\omega L)a$$

$$P = (R(z - g) - (x - a)\omega L)z + (R(x - a) + (z - g)\omega L)x$$

$$Q = (R(x - a) + (z - g)\omega L)z - (R(z - g) - (x - a)\omega L)x$$

$$w = \sqrt{a^2 + g^2}$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

$$T = \omega L[(z - g)^2 + (x - a)^2]$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} L = 0.01347, y = 2.0, R = 200.0, M = 1425.489202, a = -48.80666504, \\ U = 17030.20581, \Omega = 487.4904986, \omega = 487.4192109, p = -753767.6566, \\ W = 67.95980935, m = 1546.446344, T = 47553.47632, c = 45.57301663, \\ Q = 925603.6805, w = 67.95051379, g = 47.27770904, q = 878050.2042, \\ s = -1.462555479 \times 10^{-4}, z = 57.86642828, x = 35.63723004, \\ b = 1.775142081, P = 694810.8218 \end{array} \right.$$

Pentru diferite rezistențe, rezolvările sistemelor, sunt date în anexa 1.2

Tabelul a rezultat în urma sistemelor (anexa 1.2), cu rezistența variabilă de la 2[Ω] până la 200[Ω]:

2 - Determinarea condițiilor inițiale la sistemul cu GS și GA 57

R[Ω]	ω [$\frac{rad}{s}$]	T [k AR]	U [kV]	M [kNm]	m [Nm]
200	487	47	17	1.4	1500
100	404;556;586	102;32;39	13;6;7	2.2;0.72;0.4	2300;58;434
50	315;504;554	172;88;129	10;5.7;6.6	3.1;1.2;0.74	3200;31;814
40	289;487;540	196;116;182	9;5.3;6.4	3.4;1.4;0.8	3500;26;969
30	260;467;519	230;161;277	7.7;4.9;6.1	3.7;1.6;1.1	3800;20;1100
20	239;450;480	308;248;481	6.2;4.2;5.7	3.9;1.8;1.4	4000;15;1600
17	257;445;450	400;599;291	5.8;5.6;3.9	3.7;1.8;1.8	3800;1900;13
16	310;392;451	531;634;309	5.8;5.8;3.8	3.2;2.3;1.7	3300;2400;12
15	453	329	3.7	1.7	11
14	456	350	3.6	1.7	11
13	461	375	3.5	1.6	10
10	484	463	3.1	1.4	8
5	553	632	2.6	0.75	8300
2	600;612;616	715;1000;861	2.4;3;2.7	0.28;0.15;0.11	14;265;218
P [kW]	-p [kW]	Q [MVAR]	W [A]	w [A]	
694	753	0.9	67	67	
917;405;247	966;32;254	0.8;2;2.1	90;313;310	88;302;304	
999;632;414	1000;15;451	0.7;1.7;2	124;323;312	118;288;295	
993;695;481	1000;12;523	0.7;1.6;1.9	138;328;314	129;280;288	
970;761;573	1000;9;619	0.7;1.4;1.8	157;337;317	145;266;276	
942;811;719	971;6;768	0.7;1.2;1.6	196;353;319	173;237;248	
967;825;811	997;873;5.6	0.9;1.5;1.1	228;313;360	191;230;222	
999;937;808	1000;981;5	1.1;1.4;1.1	261;296;363	206;219;216	
802	5.4	1.1	366	210	
793	5.1	1	369	202	
780	4.9	1	372	194	
705	4	0.9	382	166	
420	4.6	0.9	395	119	
168;93;72	8.5;162;134	0.9;1.1;1	399;389;394	104;67;94	

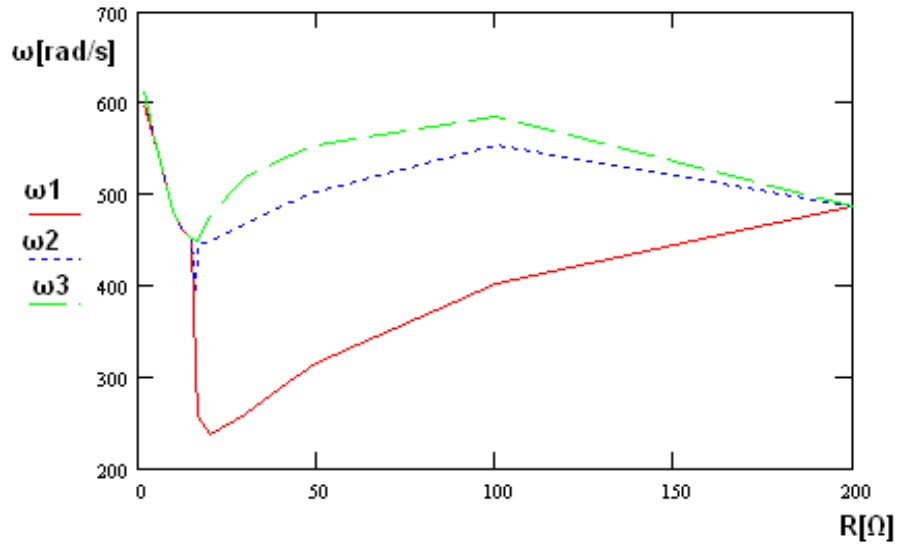


Fig.2.9 Variația vitezei unghilare ($\omega = 2\pi f$) cu sarcina

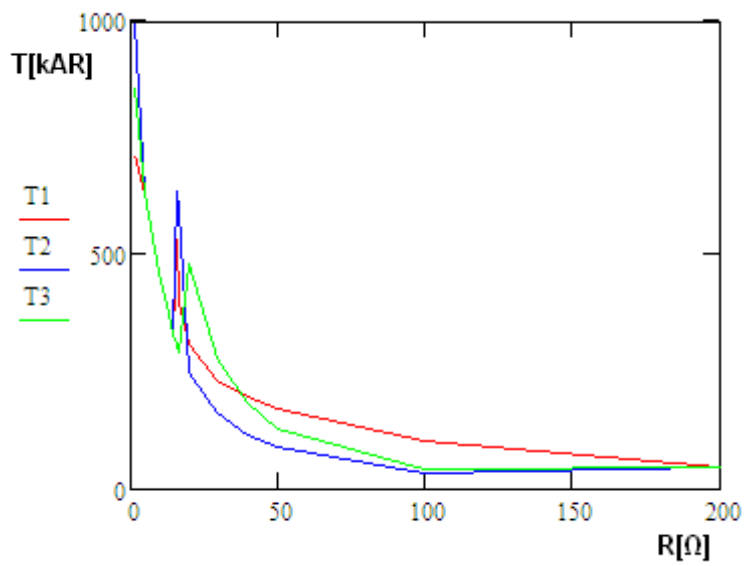


Fig.2.10. Variația puterii reactive cu sarcina

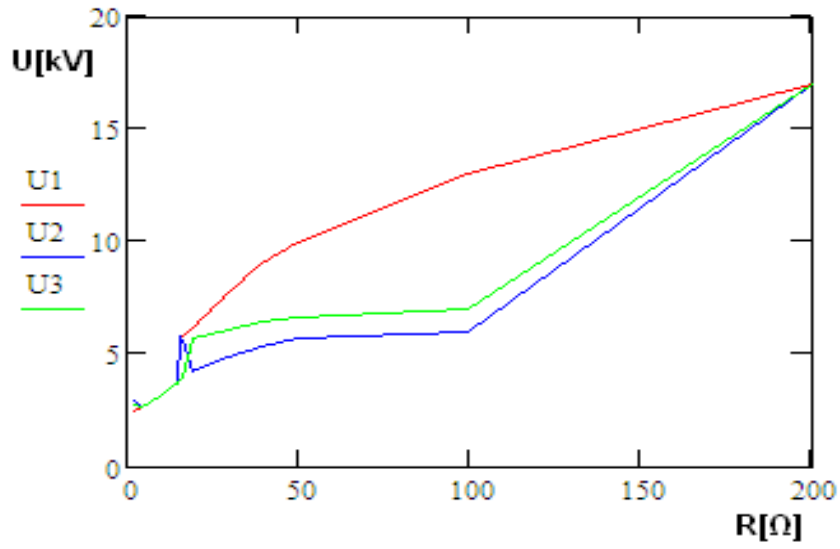


Fig.2.11. Variația tensiunii cu sarcina

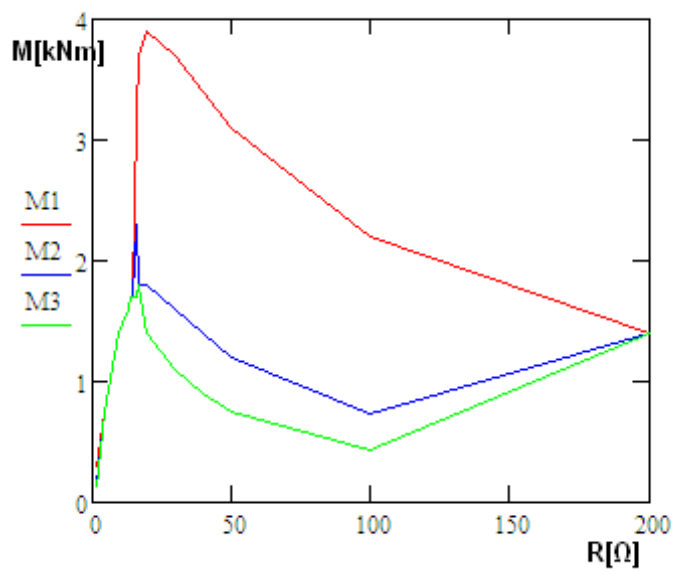


Fig.2.12. Variația cuplului la GS cu sarcina

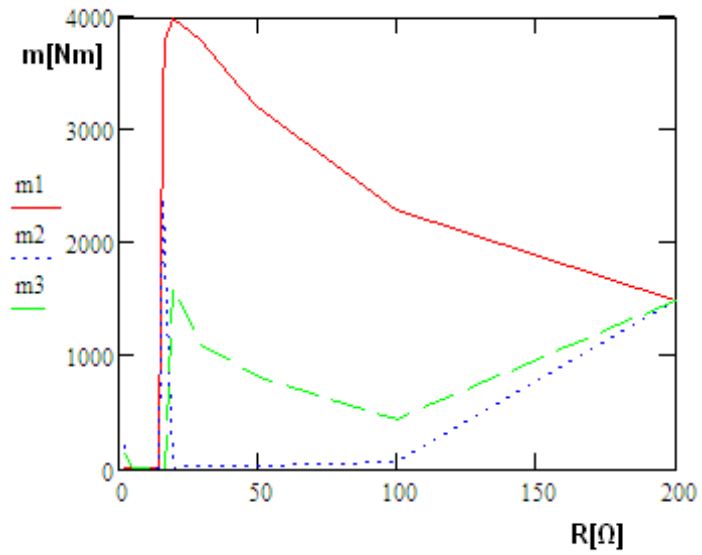


Fig.2.13. Variația cuplului la GA cu sarcina

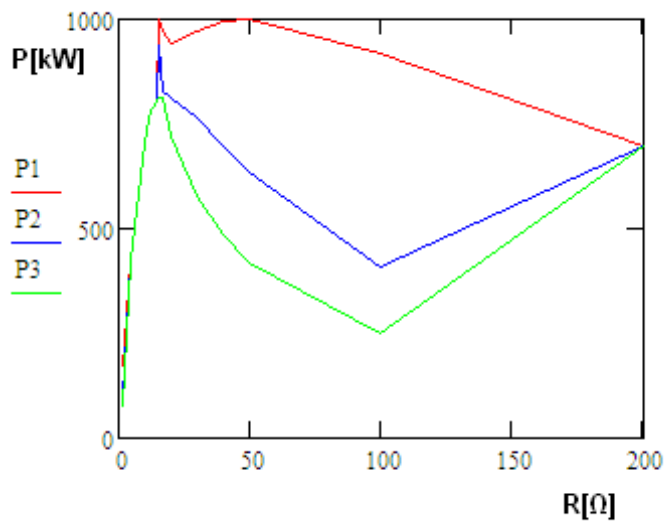


Fig.2.14. Variația puterii active la GS cu sarcina

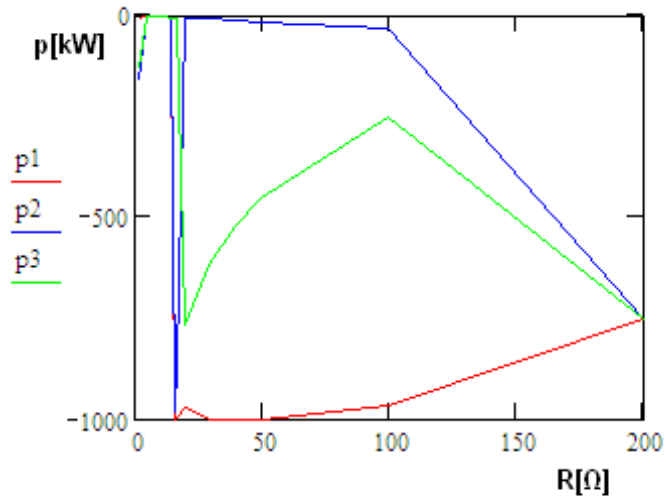


Fig.2.15. Variația puterii active la GA cu sarcina

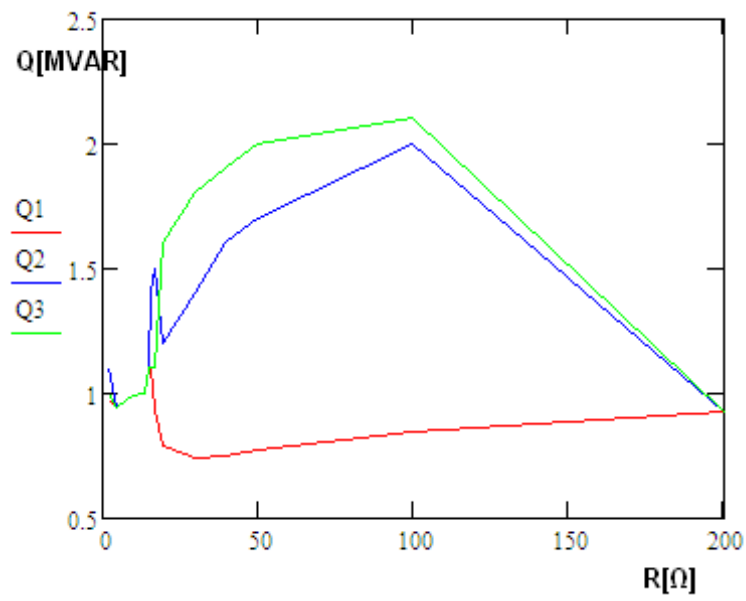


Fig.2.16. Variația puterii reactive la GA cu sarcina

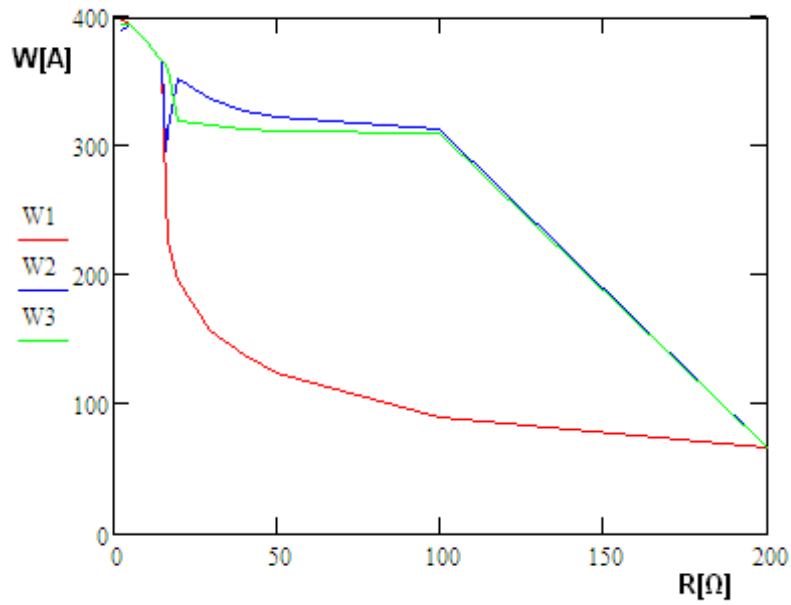


Fig.2.17. Variația cu sarcina a curentului I debitat de GS

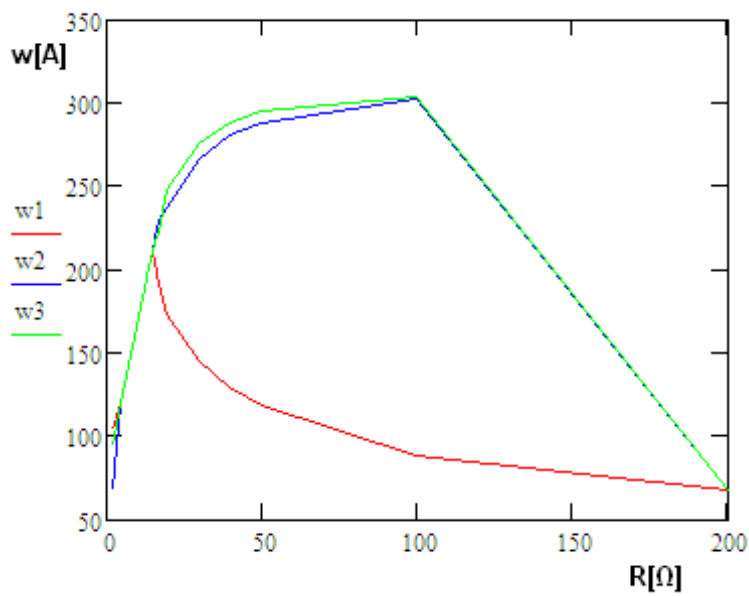


Fig.2.18. Variația cu sarcina a curentului i debitat de GA

2.2.1. Punctele de funcționare la sistemul Turbină-GS+GA-Sarcină

Punctele de funcționare statice (în regim staționar) se obțin din rezolvarea sistemelor de mai sus.

Aceste sisteme au una sau trei soluții, depinzând de valoarea sarcinii. Numărul de soluții depinde de forma caracteristicilor mecanice ale **GS și GA**.

În cazul dat în figura 2.20 se obține o singură soluție: - punctul P_{GA} - pentru GA, punctul P_{GS} - pentru GS de funcționare

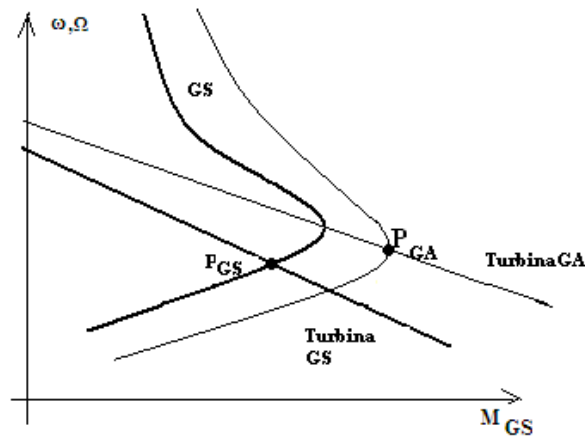


Fig.2.19. Sistemul **GS+GA** cu un punct de funcționare

În cazul din figura 2.20 se obțin trei puncte de funcționare: P_1, P_2, P_3

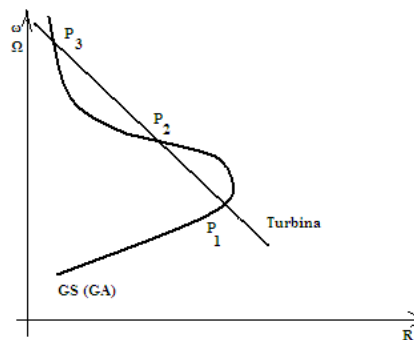


Fig.2.20 Sistemul **GS+GA** cu trei puncte de funcționare

Dacă în cazul funcționării sistemului într-un singur punct, nu se pune problema de alegere a soluțiilor (fiind o singură soluție), în cazul funcționării sistemului în trei puncte se pune problema importantă în a alege soluția corectă din cele trei.

Funcționarea sistemului **GS+GA** în unul din cele trei puncte: $P_{1GA}, P_{2GA}, P_{3GA}$ (sau

$\mathbf{P}_{1GS}, \mathbf{P}_{2GS}, \mathbf{P}_{3GS}$) este determinată de starea de funcționare anterioară a sistemului. Problema fundamentală este de a alege soluția corectă din cele trei în care sistemul **GS+GA** funcționează defapt.

De exemplu sistemul a funcționat cu $\mathbf{R} = 15[\Omega]$ (cu $L = 0.0134H$) la $\omega = 453[\frac{rad}{s}]$ (sistemul de mai jos), deci într-un punct de funcționare (**A**).

$$R = 15$$

$$L = 0.01347$$

$$R(z - g) - (x - a)\omega L = -\omega(0.71a + 0.69c)$$

$$R(x - a) + (z - g)\omega L = \omega(0.71g + 0.69b)$$

$$0.053b = \omega(0.69sa + 0.71sc)$$

$$0.053c = -\omega(0.69sg + 0.71sb)$$

$$10.14(640 - \omega + \omega s) = 0.69(gc - ab)$$

$$R(z - g) - (x - a)\omega L = 0.09\omega x$$

$$R(x - a) + (z - g)\omega L = -0.09\omega z + 20\omega y$$

$$10.14(628 - \omega) = 20xy$$

$$\Omega = \omega(1 - s)$$

$$y = 2$$

$$m = 0.69(gc - ab)$$

$$M = 20xy$$

$$U = \sqrt{(R(z - g) - (x - a)\omega L)^2 + (R(x - a) + (z - g)\omega L)^2}$$

$$p = (R(z - g) - (x - a)\omega L)g + (R(x - a) + (z - g)\omega L)a$$

$$q = (R(x - a) + (z - g)\omega L)g - (R(z - g) - (x - a)\omega L)a$$

$$P = (R(z - g) - (x - a)\omega L)z + (R(x - a) + (z - g)\omega L)x$$

$$Q = (R(x - a) + (z - g)\omega L)z - (R(z - g) - (x - a)\omega L)x$$

$$w = \sqrt{a^2 + g^2}$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

$$T = \omega L[(z - g)^2 + (x - a)^2]$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} L = 0.01347, y = 2.0, R = 15.0, W = 366.3489573, q = 790006.0132, \\ z = 363.667529, T = 329002.8014, m = 11.92989778, c = 99.4194839, \\ M = 1769.739827, b = -178.4308077, g = 183.6439151, w = 210.1796883, \\ s = -0.4087464733, U = 3758.805346, p = -5409.844125, \\ \Omega = 638.8234815, Q = 1119008.815, x = 44.24349568, \\ a = -102.2272655, \omega = 453.4694451, P = 802522.9373 \end{array} \right.$$

Rezistența modificându-se de la 15Ω la 16Ω ($L=0.0134H$) se obțin trei soluții pentru ω : $\omega_1 = 451[\frac{rad}{s}]$, $\omega_2 = 392[\frac{rad}{s}]$, $\omega_3 = 310[\frac{rad}{s}]$, rezultate din sistemul cu $\mathbf{R} = 16\Omega$ (caracteristica cu linie continuă din figura 2.22) și deci trei puncte de funcționare ($\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3$).

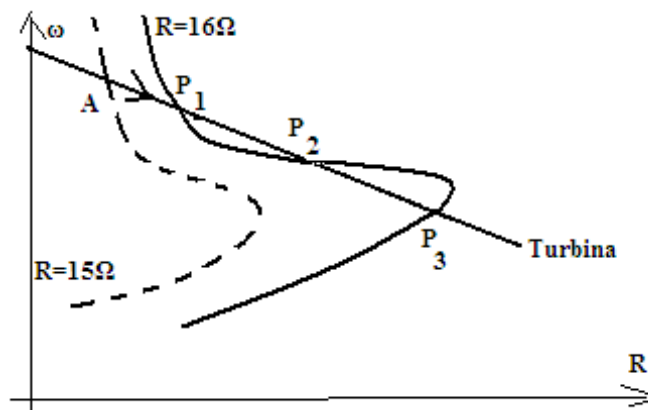
$$\begin{aligned}
 R &= 16 \\
 L &= 0.01347 \\
 R(z-g) - (x-a)\omega L &= -\omega(0.71a + 0.69c) \\
 R(x-a) + (z-g)\omega L &= \omega(0.71g + 0.69b) \\
 0.053b &= \omega(0.69sa + 0.71sc) \\
 0.053c &= -\omega(0.69sg + 0.71sb) \\
 10.14(640 - \omega + \omega s) &= 0.69(gc - ab) \\
 R(z-g) - (x-a)\omega L &= 0.09\omega x \\
 R(x-a) + (z-g)\omega L &= -0.09\omega z + 20\omega y \\
 10.14(628 - \omega) &= 20xy \\
 \Omega &= \omega(1 - s) \\
 y &= 2 \\
 m &= 0.69(gc - ab) \\
 M &= 20xy \\
 U &= \sqrt{(R(z-g) - (x-a)\omega L)^2 + (R(x-a) + (z-g)\omega L)^2} \\
 p &= (R(z-g) - (x-a)\omega L)g + (R(x-a) + (z-g)\omega L)a \\
 q &= (R(x-a) + (z-g)\omega L)g - (R(z-g) - (x-a)\omega L)a \\
 P &= (R(z-g) - (x-a)\omega L)z + (R(x-a) + (z-g)\omega L)x \\
 Q &= (R(x-a) + (z-g)\omega L)z - (R(z-g) - (x-a)\omega L)x \\
 w &= \sqrt{a^2 + g^2} \\
 W &= \sqrt{x^2 + z^2} \\
 T &= \omega L[(z-g)^2 + (x-a)^2]
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left. \begin{aligned}
 L = 0.01347, y = 2.0, R = 16.0, w = 206.916252, \Omega = 310.8695334, \\
 g = 34.28141912, M = 3222.12518, p = -1035376.917, b = -9.806768027, \\
 q = 645849.1464, x = 80.55312951, c = 199.4644137, Q = 1177349.75, \\
 T = 531500.6039, U = 5897.544004, P = 999619.793, a = -204.0566579, \\
 \omega = 310.2361755, z = 249.1873596, \\
 s = -2.041534723 \times 10^{-3}, W = 261.8838423, m = 3337.382931
 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 L = 0.01347, y = 2.0, R = 16.0, M = 2386.447089, p = -981006.8907, \\
 b = -52.33911182, T = 634033.7763, Q = 1454603.305, x = 59.66117723, \\
 c = 205.8318273, q = 820569.5291, W = 296.5590371, z = 290.4957942, \\
 \omega = 392.6501884, s = -2.436909038 \times 10^{-3}, a = -207.5964321, \\
 m = 2498.424602, w = 219.2020458, \\
 \Omega = 393.6070412, g = 70.37938828, U = 5834.563912, P = 937038.8993
 \end{aligned} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L = 0.01347, y = 2.0, R = 16.0, x = 44.77177314, b = -185.1973749, \\ p = -5671.852174, M = 1790.870925, c = 100.6257045, \\ q = 837299.4467, Q = 1146644.846, s = -0.4151114542, m = 12.5654281, \\ T = 309345.3989, W = 363.3848446, \omega = 451.3855103, a = -103.4664728, \\ w = 216.8783337, \Omega = 638.7608059, \\ P = 808373.1866, U = 3860.77596, g = 190.6066647, z = 360.6161861 \end{array} \right\}$$

Fig.2.21 Deplasarea punctului de funcționare la modificarea lui **R**

Din punctul **A** de funcționare (figura 2.22) se va trece în punctul **P₁** și nu în **P₂** sau **P₃**, care sunt unele instabile (**P₂**), iar altele stabile (**P₃**). Evident s-ar putea stabili sistemul și în **P₃**, care este punct stabil, dar numai în situația în care punctul de funcționare anterior ar fi fost pe caracteristica mecanică a turbinei, sub punctul **P₃**. Trecerea dintr-un punct în altul de funcționare se face prin modificarea lentă a sarcinii, deci are loc o funcționare statică.

Stabilirea dacă funcționarea este static stabilă sau instabilă se face folosind ecuația mișcării

Sistemul electroenergetic format din turbine, generatoare, linii de transport și sarcinile electrice își modifică tensiunea și frecvența în limite largi.

S-a demonstrat, atât la sistemul **GS – SARCINĂ** cât și la sistemul **GS – GA – SARCINĂ**, existența a cel puțin unui punct de funcționare.

Există, pentru anumite valori ale curentului de excitație, trei puncte posibile de funcționare.

Din punct de vedere al **stabilității dinamice** este foarte important de cunoscut punctul inițial în care funcționează sistemul stabil static și acest fapt este rezolvat pentru ambele variante : GS sau GS – GA.

1. **Tensiunea** se modifică cu rezistența de sarcină, în ambele variante, în raportul 1 : 3. În varianta **GS – SARCINĂ**, la valori ale rezistenței în plaja 11 – 15, tensiunea prezintă un minim. Cele mai mari valori ale tensiunii sunt pentru valori mari ale rezistenței de sarcină. La aceeași rezistență de sarcină sunt posibile trei puncte de funcționare : la tensiuni mari dacă sistemul a funcționat în zona

turațiilor mari – varianta GS, sau la tensiuni mari dacă sistemul a funcționat în zona turațiilor mici – varianta GS+GA. Autorul le consideră originale aceste aspecte prezentate în premieră în literatură.

2. **Frecvența** are și ea un minim la valori mici ale rezistenței de sarcină **R**. Domeniul de variație al frecvenței este : 16 – 100 [Hz].

Cele mai mici valori ale frecvenței le are sistemul GS – SARCINĂ.

3. **Puterea activă** furnizată de GS (varianta 1), sau de GS + GA (varianta 2) la o sarcină R depinde de turația la care a funcționat anterior sistemului.

În varianta GS la turații mari puterile sunt mari, iar în varianta GS + GA la turații mari puterile sunt mici.

4. **Distribuția puterilor pe cele două generatoare : GS și GA** este echilibrată la valori mari pentru R și devine dezechilibrată la valori mici ale lui R.

5. În mod similar ca la puterea activă, **curentul de sarcină se distribuie echilibrat pe cele două generatoare la sarcini de valoare mică (R-mare) și dezechilibrat la sarcini de valoare mare (R-mică).**

6. **Cuplul electromagnetic** al GS depinde de pătratul curentului de excitație și deci prin valoarea curentului de excitație se poate influența poziția punctului de funcționare pe caracteristica mecanică.

La aceeași rezistență de sarcină curentul și puterea debitate în sistem, depind de punctul anterior în care a funcționat sistemul : la turații joase sau la turații mari. Modificarea poziției punctului de funcționare se poate face prin impunerea unui curent de excitație de valoare corespunzătoare.

La aceeași rezistență de sarcină curentul și puterea debitate în sistem, depind de punctul anterior în care a funcționat sistemul : la turații joase sau la turații mari. Modificarea poziției punctului de funcționare se poate face prin impunerea unui curent de excitație de valoare corespunzătoare.

2.3. Stabilitatea statică la generatoarele electrice

Încărcările **statice** sau **lente** ale generatoarelor au loc la variații mici ale sarcinii. Repartizarea sarcinii pe generatoare se face având în vedere parametrii statici ai generatoarelor, ale liniilor electrice de transport și ale sarcinii. Calculul distribuției de sarcină(calculul fluxului de putere, curenții și tensiunile) se face prin rezolvarea unor **sisteme de ecuații algebrice**.

Studiul stabilității statice se bazează pe forma caracteristicilor mecanice ale generatorului și turbinei. Caracteristicile mecanice reprezintă dependența cuplului de turație.

2.3.1 Stabilitatea statică la sistemul: turbină-generator sincron-sarcină

Din sistemul:

$$\begin{aligned} \underline{GS} \\ U_d &= \omega L I_q \\ U_q &= -\omega L I_d + \omega M_E I_E \\ I_E &= I_{E(0)} \\ M_{elmg} &= p_1 M_E I_E I_q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{sarcina} \\ I_d R - I_q \omega L &= U_d \\ I_d \omega L + I_q R &= U_q \end{aligned}$$

sau

$$\begin{aligned} I_d R - I_q \omega L_{sarc} &= \omega L I_q \\ I_d \omega L_{sarc} + I_q R &= -\omega L I_d + \omega M_E I_E \\ M_{elmg} &= p_1 M_E I_E I_q \end{aligned}$$

rezultă pentru o sarcină pur rezistivă:

$$\begin{aligned} I_q &= \frac{\omega R M_E I_E}{R^2 + (\omega L)^2} \\ I_d &= \frac{\omega^2 M_E I_E L}{R^2 + (\omega L)^2} \end{aligned}$$

se obține ecuația caracteristicii mecanice $M_{elmg}(\omega)$ sub forma:

$$M_{elmg} = \frac{p_1 (M_E I_E)^2 \omega R}{R^2 + \omega^2 (L_{sarc} + L)^2}$$

Cuplul maxim rezultă pentru valoarea ω^* obținută din derivata funcției $M_{elmg}(\omega)$:

$$\left(\frac{p_1 (M_E I_E)^2 \omega R}{R^2 + \omega^2 (L_{sarc} + L)^2} \right)' = 0$$

sau

$$R^2 = \omega^2 (L + L_{sarc})^2$$

rezultând :

$$\omega^* = \pm \frac{R}{L + L_{sarc}}$$

Valoarea cuplului maxim este la $\omega = \omega^*$ și este dat de relația:

$$M_{max} = \frac{p_1 (M_E I_E)^2}{2(L + L_{sarc})}$$

Cuplul electromagnetic se poate pune sub forma:

$$M_{elmg} = \frac{A\omega}{B^2 + \omega^2}$$

unde

$$A = \frac{p_1(M_{EI_E})^2 R}{(L_{sarc} + L)^2}$$

$$B = \frac{R}{(L_{sarc} + L)^2}$$

având o alătură așa ca în figura 2.23:

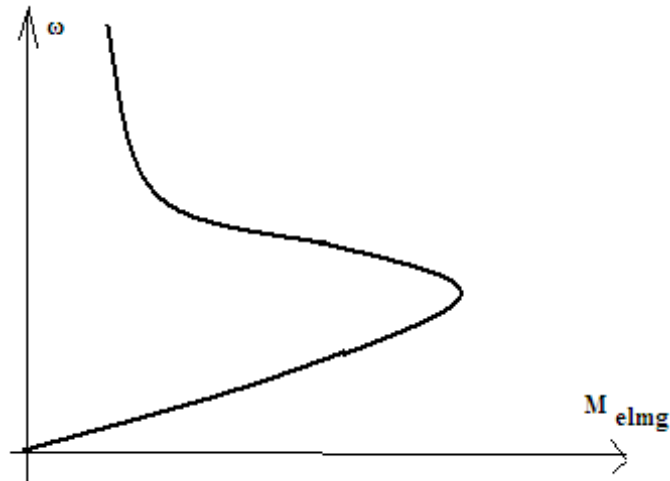


Fig.2.22. Caracteristica mecanică a **GS**

Punctele de funcționare rezultate în urma intersecțiilor caracteristicilor mecanice ale **GS** și turbinei **T** sunt prezentate în figura 2.24:

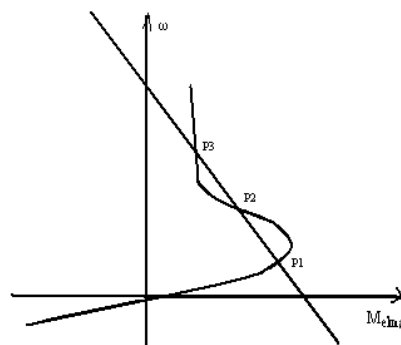


Fig.2.23. Funcționarea static stabilă a sistemului **T+GS**

Punctele de funcționare **P1**, **P2**, **P3** sunt unele static stabile, iar altele static instabile.

Folosind criteriul Hurwitz se demonstrează, prin liniarizare în zona de funcționare

că punctele **P1** și **P3** sunt static stabile, iar punctul de funcționare **P2** este instabil.

La modificarea curentului de excitație I_E al **GS**, punctele stabile **P1** și **P3** trec în **F1** și **F3**, energia cinetică a rotorului fiind minimă în zona acestor puncte (figura 2.25) și din acest motiv sunt static stabile, deoarece un sistem fizic ocupă poziția de energie minimă în zona de stabilitate.

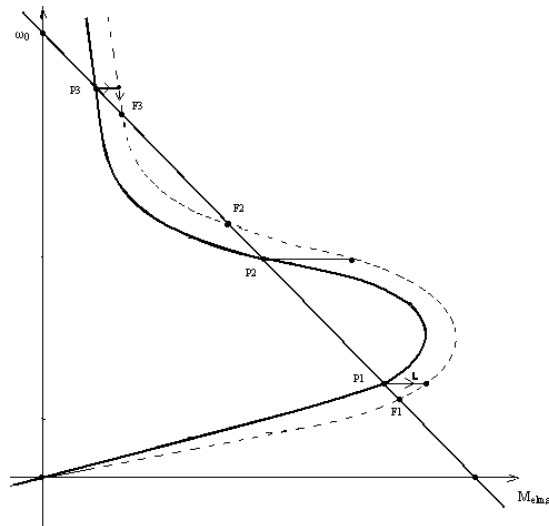


Fig.2.24. Sistemul T+GS având 3 puncte de funcționare

Punctul de funcționare **P2** este static instabil deoarece la creșterea curentului de excitație I_E se trece pe caracteristica mecanică în punctul **F1** static stabil și nu în **F2** unde energia rotorului se mărește și deci devine instabil.

Caracteristica mecanică a **GS** la o încărcare pur rezistivă, așa cum s-a demonstrat anterior, este dată de următoarea ecuație a caracteristicii mecanice:

$$M_{GS} = \frac{p_1 (M_E I_E)^2 \omega R}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

unde : R -rezistența de sarcină la GS

L -inductanța proprie la GS;

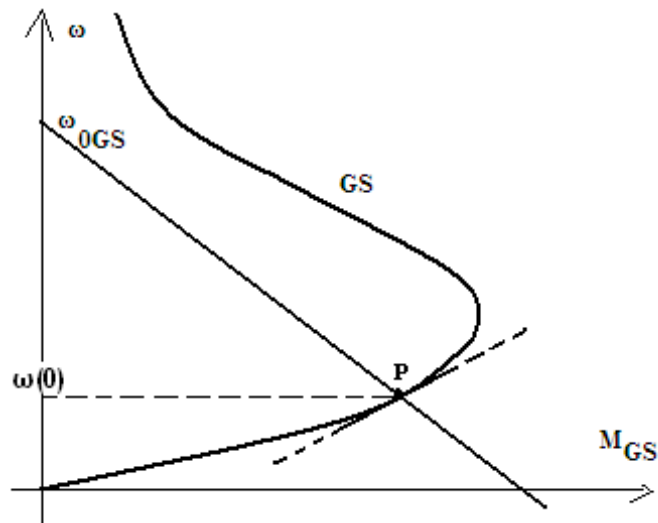
ω -pulsăția unghiulară;

M_E -inductanța mutuală dintre excitație și înfașurarea statorică;

I_E -curent de excitație;

p_1 -numărul perechilor de poli;

În situația din figura de mai jos, funcționarea are loc într-un singur punct de funcționare.

Fig.2.25. Funcționarea **GS** într-un singur punct

La funcționarea statică a sistemului în punctul **P** la viteza unghiulară $\omega = \omega(0)$, cele două caracteristici mecanice ale sistemului **T+GS** se pot liniariza.

(T)-turbina

$$M_T = K_T(\omega_{0GS} - \omega)$$

(GA)-generatorul asincron

$$M_{GS} = K_{GS}\omega + A$$

Ecuția mișcării scrisă pentru sistemul **T + GS** este :

$$M_T - M_{GS} = J \frac{d\omega}{dt}$$

Se obține, astfel, ecuația diferențială a sistemului **T + GS** :

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_T(\omega_0 - \omega) - K_{GS}\omega - A$$

Sistemul este cu un grad de libertate – mișcare de rotație – și ecuația sa de mișcare este reprezentată printr-o ecuație liniară având în vedere coordonata generalizată θ - unghiul de poziție. Viteza unghiulară Ω se obține din derivarea lui θ :

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Ecuția diferențială liniară a sistemului devine :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + (K_T + K_{GS}) \frac{d\theta}{dt} - K_T \omega_0 + A = 0$$

Ecuția caracteristică de gradul doi este :

$$Jr^2 + (K_T + K_{GS})r = 0$$

și deci, neavând termen liber ($a_2=0$), **criteriul Hurwitz** nu poate stabili dacă sistemul este stabil sau instabil. Din acest motiv se folosește calculul operațional în rezolvarea ecuației diferențiale a mișcării

Prin rezolvare cu metoda Laplace a ecuației diferențiale :

$$J \frac{d\omega}{dt} + (K_T + K_{GS})\omega = K_T \omega_0 - A$$

se obține :

$$Js\omega(s) - J\omega(0) + (K_T + K_{GS})\omega(s) = \frac{K_T \omega_0 - A}{s}$$

sau:

$$\omega(s) = \frac{K_T \omega_0 - A}{(K_T + K_{GS})s} + \frac{\omega(0) + \frac{A - K_T \omega_0}{K_T + K_{GS}}}{s + \frac{K_T + K_{GS}}{J}}$$

Prin transformarea inversă Laplace se obține :

$$\omega(t) = \frac{K_T \omega_0 - A}{K_T + K_{GS}} + \left(\omega(0) + \frac{A - K_T \omega_0}{K_T + K_{GS}} \right) e^{-\frac{K_T + K_{GS}}{J} t}$$

La $t \rightarrow \infty$ sistemul se va stabili la viteza unghiulară :

$$\omega(\infty) = \frac{K_T \omega_0 - A}{K_T + K_{GS}}$$

și deci în punctul P funcționarea este static stabilă.

2.3.2. Stabilitatea statică la sistemul : turbine - generatoare sincron și asincron - sarcină

Pentru a se putea analiza stabilitatea statică la sistemul : turbine - generatoare sincron și asincron - sarcina, este necesară cunoașterea caracteristicilor mecanice la **GA** și **GS**.

2.3.2.1. Caracteristica mecanică a GA în sistemul GS+GA

Caracteristica mecanică a GA în sistemul GS+ GA se deduce prin modificarea cuplului la arborele GA și obținând astfel diferite turații. La GS, curentul de

excitație nu se modifică și sarcina electrică este fixă.

Mașina asincronă funcționând la tensiune și frecvență date (constante) are o caracteristică mecanică cunoscută, așa ca în figura 2.27.

În sistem izolat, însă, tensiunea și frecvența nu mai sunt constante și deci caracteristica mecanică a GA își modifică forma.

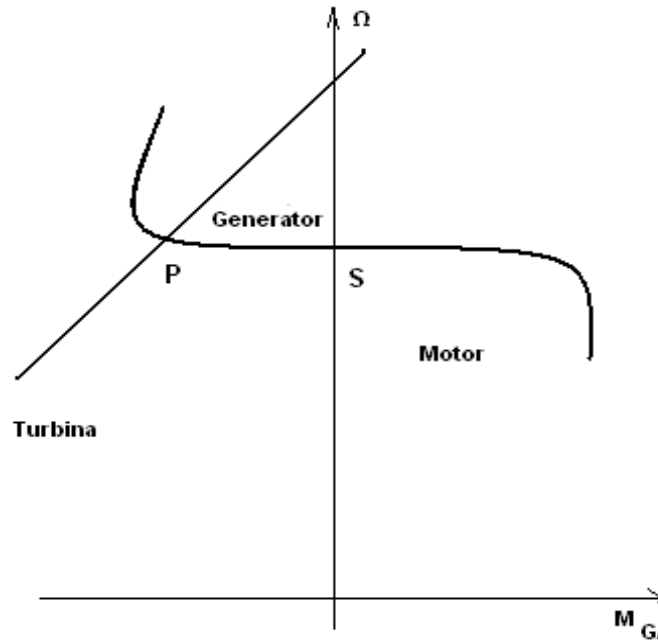


Fig.2.26. Caracteristicile mecanice la GA și turbină

Considerând pentru turbina ce antrenează **GA** o caracteristică mecanică liniară și căzătoare se obține, din intersecția celor două caracteristici, punctul **P** de funcționare.

La ansamblu **GS + GA**, fără reglare, tensiunea și frecvența nu mai sunt constante și se modifică o dată cu încărcarea. În această situație caracteristica mecanică a **GA** nu mai are forma celei de mai sus și se deduce în cele ce urmează.

Viteza unghiulară de la arborele **GA** este dată de relația :

$$\Omega = \omega(1 - s)$$

unde ω - pulsația electrică a sistemului **GS + GA** ;

s - alunecarea (negativă la **GA**).

Generatorul sincron (**GS**) este antrenat de turbina **T_{GS}** ce are o caracteristică mecanică asemănătoare cu cea de la **GA**, de ecuație :

$$M_{TGS} = K_{TGS}(\omega_{0TGS} - \omega)$$

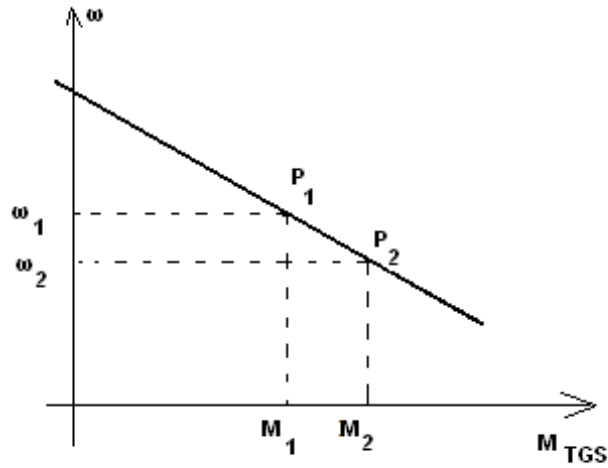


Fig.2.27. Caracteristica mecanică a turbinei ce antrenează **GS**

Punctul de funcționare se va deplasa (**P1**, **P2**, etc) pe caracteristica mecanică M_{TGS} (ω) în funcție de :

- variația sarcinii din sistem (figura 2.29) ;
- modificarea cuplului la **GA** (M_{TGA} – figura 2.29) ;

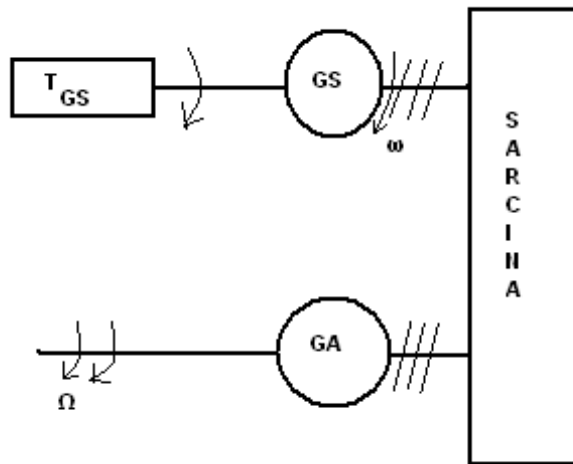


Fig.2.28. Obținerea caracteristicii mecanice la **GA** prin modificarea cuplului la **GA**

Din acest motiv, în sistemul **GS** + **GA**, tensiunea și frecvența nu mai sunt

constante și deci caracteristica mecanică a **GA** nu mai este cea clasică (figura 2.27) dată la tensiune și frecvență constante.

Pentru deducerea caracteristicii mecanice la **GA** se presupun cunoscute :

1. ansamblu turbină – generator sincron ($T_{GS} + GS$) este legat prin ecuația ce dă egalitatea cuplurilor :

$$K_{TGS}(\omega_{0TGS} - \omega) = p_1(M_E I_E I_q)$$

2. ecuațiile, în regim staționar, a sistemului **GS + GA** ;

Generator sincron + turbină

GS + T_{GS}

$$U_d = \omega L I_q$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS}(\omega_{0GS} - \omega)$$

Generator asincron

$$U_d = -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr}$$

$$U_q = \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr}$$

$$0 = -M s \omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s \omega i_{qr}$$

$$0 = M s \omega i_d + L_2 s \omega i_{dr} + R_2 i_{qr}$$

$$p_{1GA} M (i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) = K_{TGA}(\omega_{0GA} - \omega)$$

sarcina

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L = U_d$$

$$(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R = U_q$$

Generatorul asincron are datele:

$$P_m = 1MW$$

$$U_N = 6000V$$

$$s_N = 0.01$$

$$L_1 = L_2 = 0.71[H]$$

$$M = 0.69[H];$$

$$R_2 = 0.053[\Omega]$$

$$K_{TGS} = 10.14$$

$$\omega_{oGA} = 640 \frac{rad}{s}$$

Generatorul sincron are datele:

$$P_m = 1MW$$

$$U_N = 6000V$$

$$L_1 = L_2 = L = 0.09[H]$$

$$M_E = 20[H];$$

$$K_{TGS} = 10.14$$

$$\omega_{oGA} = 628 \frac{rad}{s}$$

Sistemul complet de ecuații a sistemului **T-GS+GA-sarcina** devine:

se dă $m =$ cuplul motor la GA

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L = \omega L I_q$$

$$(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS}(\omega_{0GS} - \omega)$$

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L = -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr}$$

$$(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R = \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr}$$

$$-M s \omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s \omega i_{qr} = 0$$

$$M s \omega i_d + L_2 s \omega i_{dr} + R_2 i_{qr} = 0$$

$$p_{1GA} M (i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) = m$$

sau cu notațiile:

$$a = i_q$$

$$g = i_d$$

$$c = i_{qr}$$

$$b = i_{dr}$$

$$z = I_d$$

$$x = I_q$$

$$y = I_E$$

și cu valorile numerice ale parametrilor se obține sistemul:

$$18(z - g) = -\omega(0.71a + 0.69c)$$

$$18(x - a) = \omega(0.71g + 0.69b)$$

$$0.053b = \omega(0.69sa + 0.71sc)$$

$$0.053c = -\omega(0.69sg + 0.71sb)$$

$$m = 0.69(gc - ab)$$

$$18(z - g) = 0.09\omega x$$

$$18(x - a) = -0.09\omega z + 20\omega y$$

$$M = 20xy$$

$$\Omega = \omega(1 - s)$$

$$20xy = 10.14(628 - \omega)$$

$$m = 0.01$$

$$y = 3$$

$$U = 18\sqrt{(z - g)^2 + (x - a)^2}$$

$$p = 18(z - g)g + 18(x - a)a$$

$$q = 18(x - a)g - 18(z - g)a$$

$$P = 18(z - g)z + 18(x - a)x$$

$$Q = 18(z - g)x - 18(x - a)z$$

$$w = \sqrt{a^2 + g^2}$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

3. La $R=18[\Omega]$, $I_E = 3[A]$, și la $K_{TGS} = 10.14$ se modifică cuplul motor m la arborele **GA** în limitele 0.01-14000Nm, obținându-se astfel dependența $M_{elmagGA} = f(\Omega)$, adică caracteristica mecanică a GA în sistemul **TURBINE-GS+GA-SARCINĂ**.

Cuplul motor la GA=0.01 [Nm]

$$18(z - g) = -\omega(0.71a + 0.69c)$$

$$18(x - a) = \omega(0.71g + 0.69b)$$

$$0.053b = \omega(0.69sa + 0.71sc)$$

$$0.053c = -\omega(0.69sg + 0.71sb)$$

$$m = 0.69(gc - ab)$$

$$18(z - g) = 0.09\omega x$$

$$18(x - a) = -0.09\omega z + 20\omega y$$

$$M = 20xy$$

$$\Omega = \omega(1 - s)$$

$$20xy = 10.14(628 - \omega)$$

$$m = 0.01$$

$$y = 3$$

$$U = 18\sqrt{(z - g)^2 + (x - a)^2}$$

$$p = 18(z - g)g + 18(x - a)a$$

$$q = 18(x - a)g - 18(z - g)a$$

$$P = 18(z - g)z + 18(x - a)x$$

$$Q = 18(z - g)x - 18(x - a)z$$

$$w = \sqrt{a^2 + g^2}$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 3.0, g = 72.814, p = -0.39048, P = 2.3319 \times 10^5, q = 1.514 \times 10^5, \\ Q = -1.514 \times 10^5, U = 2048.8, M = 5972.0, c = 1.9324 \times 10^{-4}, b = 3.3483 \times 10^{-5}, \\ \Omega = 39.048, a = -12.617, w = 73.899, x = 99.533, \omega = 39.048, \\ m = 0.01, s = -5.2204 \times 10^{-9}, W = 135.71, z = 92.247 \end{array} \right\}$$

Pentru alte valori ale cuplului, rezultatele sunt date în anexa 2.1.

Sarcina

$$\underline{z} = R + j\omega L$$

a fost menținută fixă.

Modificând cuplul la GA (M_{TGA}) s-au obținut rezultatele (anexa 2.1) din tabelul 2.1.

Tabelul 2.1. Caracteristica mecanică $\Omega(M_{TGA})$ la GA

M_{TGA} [Nm]	Ω [rad / s]	ω [rad / s]
0.01	39.01	39
10	39,11	39,1
100	39,69	39,6
150	40,1	40
500	42,2	42,1
1000	45,2	45,1
1500	48,3	48,2
10000	110,8	110,6
11000	121,1	120,8
12000	133,1	132,8
13000	148,2	147,8
15000	nu are soluții	

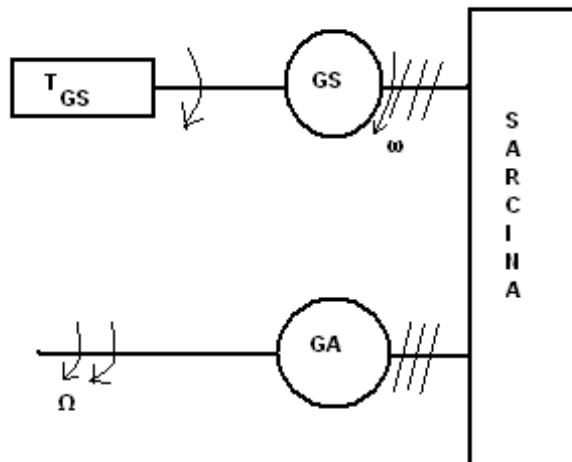


Fig.2.29. Modificarea cuplului la GA

Mărimile de intrare din sistemul **GS + GA** (figura 2.30) sunt :

- cuplul la **GA** – M_{TGA} ;
- sarcina $\underline{z} = \mathbf{R} + \mathbf{j}\omega\mathbf{L}$
- curentul de excitație \mathbf{I}_E la GS.

Ultimele două se mențin constante și se modifică numai prima : cuplul M_{TGA}
($\underline{z} = 18\Omega; I_E = 3A$)

Mărimile de ieșire sunt :

- curenții din GA și GS ;
- viteza unghiulară ω la GA ;
- viteza unghiulară Ω la GA ;

Din punct de vedere a caracteristicii mecanice a GA se rețin doar cele două coloane din tabelul 2.1 :

- Ω - viteza unghiulară a GA ;
- M_{TGA} - cuplul la Ga

Pentru caracteristica mecanică a GA se obține curba dată în figura 2.31

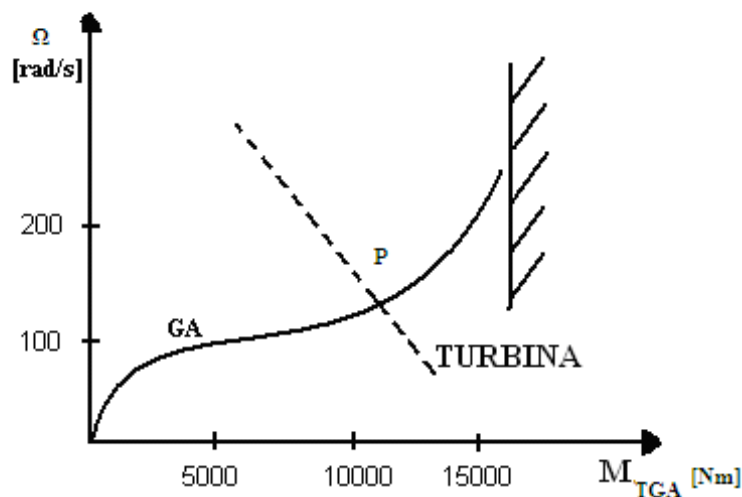


Fig.2.30. Caracteristica mecanică a **GA**

Din figura 2.31 , având în vedere forma caracteristicii mecanice a **GA**, se pot face unele precizări importante :

- 1) Punctul de funcționare **P**, obținut la intersecția celor două caracteristici este static stabil deoarece la mici perturbații punctul de funcționare revine în punctul de intersecție al celor două caracteristici.
- 2) Caracteristica mecanică a GA este neliniară și depinde de
 - valoarea sarcinii ;
 - parametrii GS și ai GA ;
 - valoarea curentului de excitație de la GS.

3) Prin liniarizare în jurul punctului de funcționare **P** se poate demonstra, aplicând **criteriul lui Hurwitz**, că acest punct este static stabil.

La funcționarea statică a sistemului în punctul **P**(figura 2.31), cele două caracteristici mecanice **T + GA** se pot liniariza sub forma :

(**T**)-turbina

$$M_T = K_T (\Omega_0 - \Omega)$$

- pozitiv

(**GA**)-generatorul asincron

$$M_{TGA} - M_P = K_{GA}(\Omega - \Omega_P)$$

- pozitiv

Ecuția mișcării scrisă pentru sistemul **T + GA** este :

$$M_T - M_{TGA} = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Se obține, astfel, ecuația diferențială a sistemului **T + GA** :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = K_T(\Omega_0 - \Omega) - K_{GA}(\Omega - \Omega_P) - M_P$$

sau

$$J \frac{d\Omega}{dt} + \Omega(K_T + K_{GA}) - K_T\Omega_0 - K_{GA}\Omega_P + M_P = 0$$

Sistemul este cu un grad de libertate - mișcare de rotație - și ecuația sa de mișcare este reprezentată printr-o ecuație liniară având în vedere coordonata generalizată θ - unghiul de poziție. Viteza unghiulară Ω se obține din derivarea lui θ :

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Ecuția diferențială liniară a sistemului devine :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + (K_T + K_{GA}) \frac{d\theta}{dt} - K_T\Omega_0 - K_{GA}\Omega_P + M_P = 0$$

Ecuția caracteristică de gradul doi este :

$$Jr^2 + (K_T + K_{GA})r = 0$$

și deci, neavând termen liber ($a_2=0$), criteriul Hurwitz nu poate stabili dacă sistemul este stabil sau instabil.

Prin rezolvare cu metoda Laplace a ecuației diferențiale :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + (K_T + K_{GA})\Omega = K_T\Omega_0 + K_{GA}\Omega_P - M_P$$

se obține :

$$J \cdot s\Omega(s) - J \cdot \Omega(0) + (K_T + K_{GA})\Omega(s) = \frac{K_T\Omega_0 + K_{GA}\Omega_P - M_P}{s}$$

sau :

$$\Omega(s) = \frac{K_T\Omega_0 + K_{GA}\Omega_P - M_P}{(K_T + K_{GA})s} + \frac{\Omega(0) - \frac{K_T\Omega_0 + K_{GA}\Omega_P - M_P}{K_T + K_{GA}}}{s + \frac{K_T + K_{GA}}{J}}$$

Prin transformarea inversă Laplace se obține :

$$\Omega(t) = \frac{K_T\Omega_0 + K_{GA}\Omega_P - M_P}{(K_T + K_{GA})} + \left(\Omega(0) - \frac{K_T\Omega_0 + K_{GA}\Omega_P - M_P}{K_T + K_{GA}} \right) e^{-\frac{K_T + K_{GA}}{J}t}$$

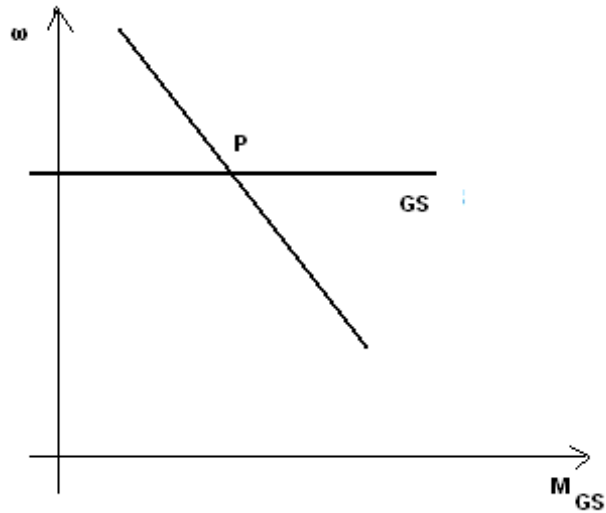
La $t \rightarrow \infty$ sistemul se va stabiliza la viteza unghiulară :

$$\Omega_{(\infty)} = \frac{K_T\Omega_0 + K_{GA}\Omega_P - M_P}{K_T + K_{GA}}$$

și deci punctul de funcționare P este static stabil.

2.3.2.2. Caracteristica mecanică a GS în sistemul GS + GA

Generatorul sincron – **GS** – funcționând la tensiune și frecvență date (constante) are o caracteristică mecanică $\omega(M_{GS})$ dură, așa ca în figura 2.32

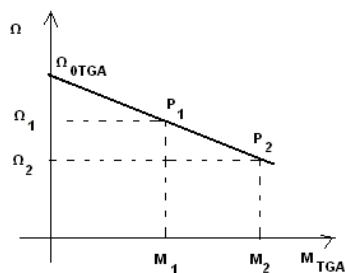
Fig.2.31. Caracteristicile mecanice la **turbină** și **GS**.

Considerând pentru turbina ce antrenează **GS** o caracteristică mecanică liniară și căzătoare, se obține, din intersecția celor două caracteristici, punctul **P** de funcționare.

Deoarece, însă, la ansamblu **GS + GA** nereglat, tensiunea și frecvența se modifică o dată cu elementul perturbator : sarcina, caracteristica mecanică a **GS** se modifică radical de cea cunoscută.

Forma caracteristicii mecanice a **GS** are în vedere sistemul **GS + GA**, cu **GA** antrenat de la o turbină ce dă un cuplu dependent liniar de turație (figura 2.33), de ecuație

$$M_{TGA} = K_{TGA}(\Omega_{0TGA} - \Omega)$$

Fig.2.32. Caracteristica mecanică a turbinei ce antrenează **GA**

Punctul de funcționare se va deplasa (din P_1 în P_2 , etc) pe caracteristica mecanică $M_{TGA}(\Omega)$ în funcție de :

- variația sarcinii din sistem (figura 2.34) ;
- modificarea cuplului la GS (M_{TGS} - figura 2.34)

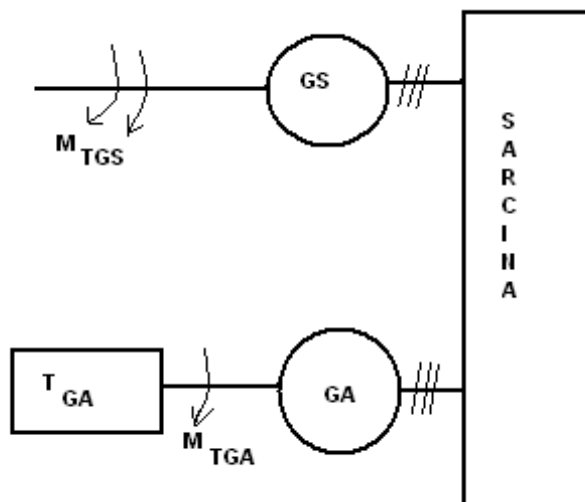


Fig.2.33. Obținerea caracteristicii mecanice la **GS** prin modificarea cuplului la GS.

Mărimile de intrare din sistemul **GS + GA** (figura 2.34) sunt :

- cuplul la GS - M_{TGS} ;
- sarcina $\underline{z} = R + j\omega L$
- curentul de excitație I_E la GS.

Ultimele două se mențin constante și se modifică numai prima : cuplul M_{TGS} .

Mărimile de ieșire sunt :

- curenții din GA și GS ;
- vitezele unghiulare ω și Ω la generatoare.

Din punct de vedere a caracteristicii mecanice a **GS** se rețin doar două mărimi :

- ω viteza unghiulară a GS
- M_{TGS} - cuplul la GS

Sistemul **GS+GA** va funcționa la tensiune și frecvență dependente de încărcare și deci caracteristica mecanică a **GS** diferă mult de cea clasică, cunoscută, la U și f constante.

Deducerea caracteristicii mecanice a **GS** se face în modul următor :

1.ansamblu turbină - generator asincron+generator sincron-sarcina, este definit de sistemul de ecuații :

Se modifică cuplul M la arborele GS

$$\begin{aligned}
(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L &= \omega L I_q \\
(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R &= -\omega L I_d + \omega M_E I_E \\
I_E &= I_{E(0)} \\
p_{1GS} M_E I_E I_q &= M \\
(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L &= -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr} \\
(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R &= \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr} \\
-Ms\omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s\omega i_{qr} &= 0 \\
Ms\omega i_d + L_2 s\omega i_{dr} + R_2 i_{qr} &= 0 \\
p_{1GA} M(i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) &= K_{TGA}[\omega_{0GA} - \omega(1-s)]
\end{aligned}$$

2. sarcina este fixă : $\underline{z} = \mathbf{R} + \mathbf{j}\omega\mathbf{L}$.

3. se modifică cuplul la **GS** (M_{TGS}) de la zero la valoarea maximă și se rezolvă sistemul :

Cuplul motor la GS=0.01 [Nm]

$$\begin{aligned}
18(z - g) &= -\omega(0.71a + 0.69c) \\
18(x - a) &= \omega(0.71g + 0.69b) \\
0.053b &= \omega(0.69sa + 0.71sc) \\
0.053c &= -\omega(0.69sg + 0.71sb) \\
m &= 0.69(gc - ab) \\
18(z - g) &= 0.09\omega x \\
18(x - a) &= -0.09\omega z + 20\omega y \\
M &= 20xy \\
\Omega &= \omega(1 - s) \\
10.14(700 - \omega + \omega s) &= 0.69(gc - ab) \\
M &= 0.01 \\
y &= 3 \\
U &= 18\sqrt{(z - g)^2 + (x - a)^2} \\
p &= 18(z - g)g + 18(x - a)a \\
q &= 18(x - a)g - 18(z - g)a \\
P &= 18(z - g)z + 18(x - a)x \\
Q &= 18(x - a)z - 18(z - g)x \\
w &= \sqrt{a^2 + g^2} \\
W &= \sqrt{x^2 + z^2}
\end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l}
y = 3.0, M = 0.01, x = 1.666666667 \times 10^{-4}, g = 86.64662018, m = 6651.110186, \\
Q = 198716.3609, p = -292206.9033, q = 198716.3609, z = 86.64665679, \\
W = 86.64665679, \Omega = 44.07197373, a = -127.4115332, b = -13.50333252, \\
c = 131.1045994, \omega = 43.93355321, s = -3.150678699 \times 10^{-3}, \\
P = 0.4393355321, w = 154.0822364, U = 2293.410597
\end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 3.0, M = 0.01, x = 1.66666667 \times 10^{-4}, U = 4194.974328, b = -401.2918863, \\ \omega = 189.8203793, c = 239.8091282, \Omega = 192.0692865, g = 421.1142341, \\ q = 1766564.065, P = 1.898203793, m = 5150.417435, p = -977654.1913, \\ W = 421.1143923, z = 421.1143923, a = -233.0539627, \\ s = -0.01184755376, Q = 1766564.065, w = 481.3017221 \end{array} \right\}$$

Pentru alte valori ale cuplului la **GS**, rezultatele sunt date în anexa 2.2.
Se obțin, modificând cuplul la **GS** (anexa 2.2), rezultatele date în tabelul 2.2 :

Tabelul 2.2 Caracteristica mecanică a GS în sistemul GS+GA

M_{TGS} [Nm]	ω [rad / s]	Ω [rad / s]
0.01	0,83	698
10	1,37	698
100	44	698
1000	50	50,2
10000	115	115,6
11000	125	125,2
12000	135,7	135,74
13000	147,7	147,9
15000	179,1	179,2
17000	248	248,18
20000	nu are soluție	

Pe baza acestor rezultate s-a trasat caracteristica mecanică la **GS**:

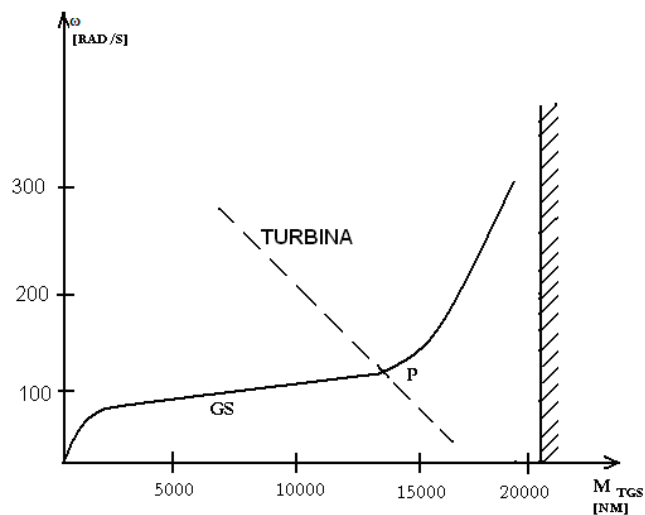


Fig.2.34. Caracteristica mecanică a GS

Din figura 2.35, având în vedere forma caracteristicii mecanice a GS, așa ca în

cazul anterior se pot trage următoarele **concluzii**:

1) Punctul de funcționare **P**, obținut la intersecția celor două caracteristici este static stabil deoarece la mici perturbații punctul de funcționare revine în punctul de intersecție al celor două caracteristici.

2) Caracteristica mecanică a **GS** este neliniară și depinde de

- valoarea sarcinii ;
- parametrii GS și ai GA ;
- valoarea curentului de excitație de la GS.

3) Prin liniarizare în jurul punctului de funcționare **P** se poate demonstra, aplicând **criteriul lui Hurwitz**, că acest punct este static stabil.

La funcționarea statică a sistemului în punctul **P**(figura 2.13), cele două caracteristici mecanice **T + GS** se pot liniariza sub forma :

(**T**)

$$M_T = K_T(\omega_0 - \omega)$$

- pozitiv

(**GS**)

$$M_{TGS} - M_P = K_{GS}(\omega - \omega_P)$$

- pozitiv

Ecuția mișcării scrisă pentru sistemul **T + GS** este :

$$M_T - M_{TGS} = J \frac{d\omega}{dt}$$

Se obține, astfel, ecuația diferențială a sistemului **T + GS** :

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_T(\omega_0 - \omega) - K_{GS}(\omega - \omega_P) - M_P$$

sau

$$J \frac{d\omega}{dt} + \omega(K_T + K_{GS}) - K_T\omega_0 - K_{GS}\omega_P + M_P = 0$$

Sistemul este cu un grad de libertate – mișcare de rotație – și ecuația sa de mișcare este reprezentată printr-o ecuație liniară având în vedere coordonata generalizată θ - unghiul de poziție. Viteza unghiulară ω se obține din derivarea lui θ :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Ecuția diferențială liniară a sistemului devine :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + (K_T + K_{GS}) \frac{d\theta}{dt} - K_T\omega_0 - K_{GS}\omega_P + M_P = 0$$

Ecuția caracteristică de gradul doi este :

$$Jr^2 + (K_T + K_{GS})r = 0$$

și deci, neavând termen liber ($a_2=0$), criteriul Hurwitz nu poate stabili dacă sistemul este stabil sau instabil.

Prin rezolvare cu metoda Laplace a ecuației diferențiale :

$$J \frac{d\omega}{dt} + (K_T + K_{GS})\omega = K_T\omega_0 + K_{GS}\omega_P - M_P$$

se obține :

$$Js\omega(s) - J\omega(0) + (K_T + K_{GS})\omega(s) = \frac{K_T\omega_0 + K_{GS}\omega_P - M_P}{s}$$

sau :

$$\omega(s) = \frac{K_T \omega_0 + K_{GS} \omega_P - M_P}{(K_T + K_{GS})s} + \frac{\omega(0) - \frac{K_T \omega_0 + K_{GS} \omega_P - M_P}{K_T + K_{GS}}}{s + \frac{K_T + K_{GS}}{J}}$$

Prin transformarea inversă Laplace se obține :

$$\omega(t) = \frac{K_T \omega_0 + K_{GS} \omega_P - M_P}{(K_T + K_{GS})} + \left(\omega(0) - \frac{K_T \omega_0 + K_{GS} \omega_P - M_P}{K_T + K_{GS}} \right) e^{-\frac{K_T + K_{GS}}{J} t}$$

La $t \rightarrow \infty$ sistemul se va stabili la viteza unghiulară :

$$\omega(\infty) = \frac{K_T \omega_0 + K_{GS} \omega_P - M_P}{K_T + K_{GS}}$$

Caracteristicile mecanice ale **GS** și **GA** în sistemul TURBINE - GS+GA - SARCINĂ au o formă similară și intersecția lor cu caracteristicile mecanice ale turbinelor demonstrează faptul că **pentru orice valoare a sarcinii există un punct de funcționare**. Acest punct de funcționare este **static stabil**.

Funcționarea în acest punct, dacă sistemul nu are reguletoare și deci nu se intervine asupra lui prin controlul:

- curentului de excitație I_E ;
- cuplului motor la arborele **GS**;
- cuplului la arborele **GA**;

va funcționa la :

- tensiunea $U \neq U_N$ și
- frecvența $f \neq f_N$ ($\omega \neq \omega_N$).

Realizarea funcționării sistemului la

- tensiune nominală U_N și
- frecvența nominală f_N

se face prin controlul acelor mărimi enumerate mai sus.

2.4. Comportarea sistemului GS+GA la modificări ale sarcinii

Parametrii sarcinii R și X se modifică în timpul funcționării.

2.4.1. Comportarea sistemului GS+GA la modificări ale sarcinii capacitive

În punctul inițial P_i caracterizat prin parametrii sarcinii: R_i și X_i , ecuațiile în regim staționar ale sistemului GS, GA, sarcină, sunt:

$$\underline{GS} + T_{GS}$$

$$U_d = \omega L I_q$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{0GS} - \omega)$$

$$\underline{GA} + T_{GA}$$

$$U_d = -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr}$$

$$U_q = \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr}$$

$$0 = -Ms\omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s\omega i_{qr}$$

$$0 = Ms\omega i_d + L_2 s\omega i_{dr} + R_2 i_{qr}$$

$$p_{1GA} M(i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) = K_{TGA} [\omega_{0GA} - \omega(1-s)]$$

sarcina

$$(I_d - i_d)R_i - (I_q - i_q)X_i = U_d$$

$$(I_d - i_d)X_i + (I_q - i_q)R_i = U_q$$

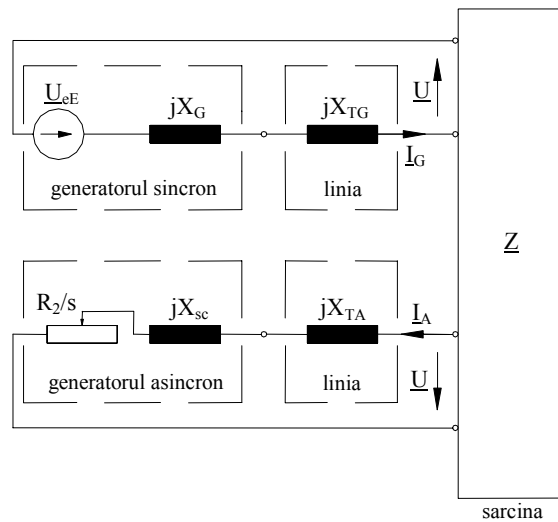


Fig.2.35. Sistem electroenergetic cu GS și GA.

Necunoscutele din sistem sunt:

-curenții: $I_d, I_q, i_d, i_q, i_{dr}, i_{qr}$;

-viteza unghiulară: ω ;

-alunecarea rotorică la GA: s ;

-tensiunile: U_d, U_q .

În punctul final P_f , parametrii sarcinii sunt R_f și X_f .

Inițial sistemul energetic funcționa la parametrii standard:

$$U_N = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} - \text{tensiunea nominală din sistem};$$

$$\omega = \omega_N = 2\pi f_N = 2\pi 50 = 314 \text{ rad/s (la frecvența nominală } f_N = 50\text{Hz)}.$$

Prin modificarea sarcinii tensiunea și frecvența în sistem se modifică:

$$U \neq U_N$$

$$\omega \neq \omega_N$$

și aceste valori trebuie readuse la valorile nominale în așa fel încât cele două generatoare să se încarce în mod direct proporțional cu puterile lor nominale.

Se folosesc datele de la punerea în funcțiune în regim insular a centralei hidroelectrice Bistrița 2 ce are un GS și un GA.

GA are datele nominale:

$$U_{Nf} = \frac{6000}{\sqrt{3}} \text{ V}$$

$$I_N = 3500 \text{ A}$$

$$P_N = 29 \text{ MW}$$

$$X_{sc} = 0.15 \Omega$$

$$R_2 = 0.08 \Omega$$

$$s_N = -0.02$$

$$s_{critic} = \frac{R_2}{X_{sc}} = -0.53$$

Parametrii la GA

$$R_1 = 0\Omega$$

$$L_1 = L_2 = 0.02\text{H}$$

$$R_2 = 0.08\Omega$$

$$M = 0.015\text{H}$$

GS are următoarele date:

$$S_N = 10 \text{ MVA}$$

$$I_N = 963 \text{ A}$$

$$U_{Nf} = \frac{6000}{\sqrt{3}} \text{ V}$$

$$Z_N \cong X_{GS} = 3.6 \Omega$$

Parametrii la GS

$$R = 0\Omega$$

$$L_d = L_q = 0.013\text{H}$$

$$R_E = 10\Omega$$

$$L_E = 1200\text{H}$$

$$R_D = 0.01\Omega$$

$$L_D = 0.1\text{H}$$

$$R_Q = 0.02\Omega$$

$$L_Q = 0.2\text{H}$$

$$M_E = 3.64\text{H}$$

$$M_{ED} = 80\text{H}$$

$$M_D = 0.03\text{H}$$

$$M_Q = 0.04\text{H}$$

Se folosesc următoarele notații:

$$\begin{aligned}i_q &= a \\i_d &= g \\i_{dr} &= b \\i_{qr} &= c \\I_q &= x \\I_E &= y \\I_d &= z \\I_D &= h \\I_Q &= f\end{aligned}$$

sarcini capacitive

La diverse sarcini capacitive (X_c) se rezolvă sistemul :

$$R = 2.762500375[\Omega] = ct; X = \text{variabil}$$

$$X_c = -0.547690[\Omega]$$

$$\begin{aligned}2.762500375(z-g) + \frac{0.5476902988\omega}{314}(x-a) &= -0.02\omega a - 0.015\omega c \\-0.013\omega x + 2.762500375(z-g) + \frac{0.5476902988\omega}{314}(x-a) &= 0 \\2.762500375(x-a) - \frac{0.5476902988\omega}{314}(z-g) &= 0.02\omega g + 0.015\omega b \\0.013\omega z - 3.64\omega y + 2.762500375(x-a) - \frac{0.5476902988\omega}{314}(z-g) &= 0 \\10y &= 112 \\95.5(628 - \omega) - 3.64xy &= 0 \\-0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c &= 0 \\0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c &= 0 \\35.75[628 - \omega(1-s)] + 0.015ab - 0.015gc &= 0 \\2.762500375(z-g) + \frac{0.5476902988\omega}{314}(x-a) &= U_d \\2.762500375(x-a) - \frac{0.5476902988\omega}{314}(z-g) &= U_q \\U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}\end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 11.2, U = 5998, x = 835., g = 932., a = -1179.147122, \\ U_q = 5225., s = -0.016, c = 847., \omega = 271., \\ z = 1653., U_d = 2946., b = 41.88 \end{array} \right\}$$

și se obține

$$\begin{aligned}U &= 5225[V] \\ \omega &= 271[rad/s] \\ s &= -0.016\end{aligned}$$

La $\{X = -0.996[\Omega], R = 2.762500375[\Omega]\}$ se rezolvă sistemul :

$$\begin{aligned}
 & 2.762500375(z-g) + \frac{0.996\omega}{314}(x-a) = -0.02\omega a - 0.015\omega c \\
 & -0.013\omega x + 2.762500375(z-g) + \frac{0.996\omega}{314}(x-a) = 0 \\
 & 2.762500375(x-a) - \frac{0.996\omega}{314}(z-g) = 0.02\omega g + 0.015\omega b \\
 & 0.013\omega z - 3.64\omega y + 2.762500375(x-a) - \frac{0.996\omega}{314}(z-g) = 0 \\
 & 10y = 112 \\
 & 95.5(628 - \omega) - 3.64xy = 0 \\
 & -0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c = 0 \\
 & 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c = 0 \\
 & 35.75[628 - \omega(1-s)] + 0.015ab - 0.015gc = 0 \\
 & 2.762500375(z-g) + \frac{0.996\omega}{314}(x-a) = U_d \\
 & 2.762500375(x-a) - \frac{0.996\omega}{314}(z-g) = U_q \\
 & U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{aligned}
 y &= 11.2, U = 6062.94826, g = 1018.62795, a = -1169.684039, x = 892.7769291, \\
 z &= 1471.19587, b = 84.65964597, U_q = 5343.141124, \omega = 246.88241, \\
 s &= -0.01500322323, c = 785.8387128, U_d = 2865.341958
 \end{aligned} \right\}$$

și se obține

$$\begin{aligned}
 U &= 6062[V] \\
 \omega &= 246.[rad/s] \\
 s &= -0.015
 \end{aligned}$$

La $\{X = -5.996[\Omega], R = 2.762500375[\Omega]\}$ se rezolvă sistemul :

$$\begin{aligned}
 & 2.762500375(z-g) + \frac{5.996\omega}{314}(x-a) = -0.02\omega a - 0.015\omega c \\
 & -0.013\omega x + 2.762500375(z-g) + \frac{5.996\omega}{314}(x-a) = 0 \\
 & 2.762500375(x-a) - \frac{5.996\omega}{314}(z-g) = 0.02\omega g + 0.015\omega b \\
 & 0.013\omega z - 3.64\omega y + 2.762500375(x-a) - \frac{5.996\omega}{314}(z-g) = 0 \\
 & 10y = 112 \\
 & 95.5(628 - \omega) - 3.64xy = 0 \\
 & -0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c = 0 \\
 & 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c = 0 \\
 & 35.75[628 - \omega(1-s)] + 0.015ab - 0.015gc = 0 \\
 & 2.762500375(z-g) + \frac{5.996\omega}{314}(x-a) = U_d \\
 & 2.762500375(x-a) - \frac{5.996\omega}{314}(z-g) = U_q \\
 & U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}
 \end{aligned}$$

92 Determinarea condițiilor inițiale la sistemul cu GS și GA - 2

Solution is:

$$\begin{cases} y = 11.2, b = 15.83522342, z = 166.3206058, a = -429.2710904, \omega = 451.7945337, \\ U_q = 17441.90392, c = 214.6313937, s = -1.306335606 \times 10^{-3}, U = 17609.57916, \\ U_d = 2424.307286, x = 412.7654541, g = 1918.415189 \end{cases}$$

și se obține

$$\begin{aligned} U &= 17609[V] \\ \omega &= 451[rad/s] \\ s &= -0.0013 \end{aligned}$$

La $\{X = -30.596[\Omega], R = 2.762500375[\Omega]\}$ se rezolvă sistemul:

$$\begin{aligned} 2.762500375(z-g) + \frac{30.596\omega}{314}(x-a) &= -0.02\omega a - 0.015\omega c \\ -0.013\omega x + 2.762500375(z-g) + \frac{30.596\omega}{314}(x-a) &= 0 \\ 2.762500375(x-a) - \frac{30.596\omega}{314}(z-g) &= 0.02\omega g + 0.015\omega b \\ 0.013\omega z - 3.64\omega y + 2.762500375(x-a) - \frac{30.596\omega}{314}(z-g) &= 0 \\ 10y &= 112 \\ 95.5(628 - \omega) - 3.64xy &= 0 \\ -0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c &= 0 \\ 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c &= 0 \\ 35.75[628 - \omega(1-s)] + 0.015ab - 0.015gc &= 0 \\ 2.762500375(z-g) + \frac{30.596\omega}{314}(x-a) &= U_d \\ 2.762500375(x-a) - \frac{30.596\omega}{314}(z-g) &= U_q \\ U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \end{aligned}$$

Solution is:

$$\begin{cases} g = 1343.813631, y = 11.2, x = 5.996684978, U = 16809.60857, U_d = 48.75737232, \\ s = -2.860860754 \times 10^{-5}, c = 4.508422121, U_q = 16809.53786, a = -7.279161827, \\ z = 1068.589506, \omega = 625.4400748, b = 4.253826509 \times 10^{-3} \end{cases}$$

și se obține

$$\begin{aligned} U &= 16809[V] \\ \omega &= 625[rad/s] \\ s &= -2.860860754 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

La $X_c = -300.596[\Omega]$ rezultă sistemul:

$$\begin{aligned} 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) &= -0.02\omega a - 0.015\omega c \\ -0.013\omega x + 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) &= 0 \\ 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) &= 0.02\omega g + 0.015\omega b \\ 0.013\omega z - 3.64\omega y + 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 10y &= 112 \\
 95.5(628 - \omega) - 3.64xy &= 0 \\
 -0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c &= 0 \\
 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c &= 0 \\
 35.75[628 - \omega(1 - s)] + 0.015ab - 0.015gc &= 0 \\
 2.762500375(z - g) + \frac{300.596\omega}{314}(x - a) &= U_d \\
 2.762500375(x - a) - \frac{300.596\omega}{314}(z - g) &= U_q \\
 U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 c = 0.04317189202, U_q = 15644.74108, U_d = 0.4350360847, z = 1219.622267, \\
 \omega = 627.9772514, x = 0.05328905487, U = 15644.74109, g = 1245.645526, \\
 a = -0.06701680468, b = 3.276688531 \times 10^{-7}, s = -2.94348228 \times 10^{-7}, y = 11.2
 \end{array} \right\}$$

și se obține

$$\begin{aligned}
 U &= 15644[V] \\
 \omega &= 627[rad/s] \\
 s &= -2.94348228 \times 10^{-7}
 \end{aligned}$$

Tensiunea crește cu mărirea sarcinii capacitive.

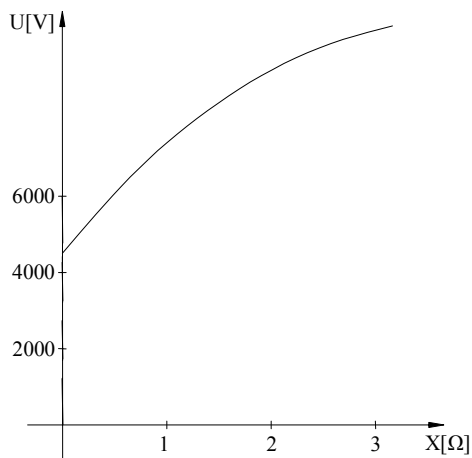


Fig.2.36. Modificarea tensiunii cu reactanta de sarcină.

2.4.2. Comportarea sistemului GS+GA la modificări ale sarcinii rezistiveModificarea numai a rezistenței R : R – variabil; X – constant

Pentru sarcina

$$\begin{aligned}
 R &= 0.00162[\Omega] \\
 0.00162500375(z-g) + \frac{0.01\omega}{314}(x-a) &= -0.02\omega a - 0.015\omega c \\
 -0.013\omega x + 0.00162500375(z-g) + \frac{0.01\omega}{314}(x-a) &= 0 \\
 0.00162500375(x-a) - \frac{0.01\omega}{314}(z-g) &= 0.02\omega g + 0.015\omega b \\
 0.013\omega z - 3.64\omega y + 0.00162500375(x-a) - \frac{0.01\omega}{314}(z-g) &= 0 \\
 10y &= 112 \\
 95.5(628 - \omega) - 3.64xy &= 0 \\
 -0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c &= 0 \\
 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c &= 0 \\
 35.75[628 - \omega(1-s)] + 0.015ab - 0.015gc &= 0 \\
 0.00162500375(z-g) + \frac{0.01\omega}{314}(x-a) &= U_d \\
 0.00162500375(x-a) - \frac{0.01\omega}{314}(z-g) &= U_q \\
 U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 U = 63.15565274, b = 0.02791151771, a = -0.2205511196, g = -5.034754118, \\
 \omega = 627.7314467, c = -0.2511451865, U_d = 5.133713437, z = 3143.71357, \\
 s = -4.269662331 \times 10^{-4}, x = 0.6290923223, U_q = -62.94665567, y = 11.2
 \end{array} \right\}$$

se obține

$$\begin{aligned}
 U &= 63.155[V] \\
 \omega &= 627.731[rad/s] \\
 s &= -4.269662331 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

Pentru sarcina

$$\begin{aligned}
 R &= 0.762[\Omega] \\
 0.762500375(z-g) + \frac{0.01\omega}{314}(x-a) &= -0.02\omega a - 0.015\omega c \\
 -0.013\omega x + 0.762500375(z-g) + \frac{0.01\omega}{314}(x-a) &= 0 \\
 0.762500375(x-a) - \frac{0.01\omega}{314}(z-g) &= 0.02\omega g + 0.015\omega b \\
 0.013\omega z - 3.64\omega y + 0.762500375(x-a) - \frac{0.01\omega}{314}(z-g) &= 0 \\
 10y &= 112
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 95.5(628 - \omega) - 3.64xy &= 0 \\
 -0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c &= 0 \\
 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c &= 0 \\
 35.75[628 - \omega(1 - s)] + 0.015ab - 0.015gc &= 0 \\
 0.762500375(z - g) + \frac{0.01\omega}{314}(x - a) &= U_d \\
 0.762500375(x - a) - \frac{0.01\omega}{314}(z - g) &= U_q \\
 U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{aligned}
 y &= 11.2, x = 360.3609693, U_q = 642.4543608, \omega = 474.1654869, a = -539.5428337, \\
 b &= -91.52982236, g = 136.3931621, U = 2312.359864, c = 407.0776049, \\
 z &= 3031.775699, s = -0.3190004104, U_d = 2221.319548
 \end{aligned} \right.$$

se obține

$$\begin{aligned}
 U &= 2312.359[V] \\
 \omega &= 474.165[rad/s] \\
 s &= -0.319
 \end{aligned}$$

Pentru sarcina

$$\begin{aligned}
 R &= 1.762[\Omega] \\
 1.762500375(z - g) + \frac{0.01\omega}{314}(x - a) &= -0.02\omega a - 0.015\omega c \\
 -0.013\omega x + 1.762500375(z - g) + \frac{0.01\omega}{314}(x - a) &= 0 \\
 1.762500375(x - a) - \frac{0.01\omega}{314}(z - g) &= 0.02\omega g + 0.015\omega b \\
 0.013\omega z - 3.64\omega y + 1.762500375(x - a) - \frac{0.01\omega}{314}(z - g) &= 0 \\
 10y &= 112 \\
 95.5(628 - \omega) - 3.64xy &= 0 \\
 -0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c &= 0 \\
 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c &= 0 \\
 35.75[628 - \omega(1 - s)] + 0.015ab - 0.015gc &= 0 \\
 1.762500375(z - g) + \frac{0.01\omega}{314}(x - a) &= U_d \\
 1.762500375(x - a) - \frac{0.01\omega}{314}(z - g) &= U_q \\
 U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{aligned}
 y &= 11.2, \omega = 357.1483692, z = 2534.994552, c = 729.4049065, s = -0.7357893135, \\
 x &= 634.4763231, U_q = 2790.425502, U_d = 2945.828393, g = 873.8892706, \\
 b &= -644.3143061, U = 4057.632241, a = -959.4632899
 \end{aligned} \right.$$

se obține

$$U = 4057.632[V]$$

$$\omega = 357.148[rad/s]$$

$$s = -0.735$$

Pentru sarcina

$$R = 2.762[\Omega]$$

$$2.762500375(z-g) + \frac{0.01\omega}{314}(x-a) = -0.02\omega a - 0.015\omega c$$

$$-0.013\omega x + 2.762500375(z-g) + \frac{0.01\omega}{314}(x-a) = 0$$

$$2.762500375(x-a) - \frac{0.01\omega}{314}(z-g) = 0.02\omega g + 0.015\omega b$$

$$0.013\omega z - 3.64\omega y + 2.762500375(x-a) - \frac{0.01\omega}{314}(z-g) = 0$$

$$10y = 112$$

$$95.5(628 - \omega) - 3.64xy = 0$$

$$-0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c = 0$$

$$0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c = 0$$

$$35.75[628 - \omega(1-s)] + 0.015ab - 0.015gc = 0$$

$$2.762500375(z-g) + \frac{0.01\omega}{314}(x-a) = U_d$$

$$2.762500375(x-a) - \frac{0.01\omega}{314}(z-g) = U_q$$

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 11.2, b = -921.9055462, U_d = 2891.831785, g = 1244.615253, a = -909.1874449, \\ z = 2284.944472, c = 697.1715322, \omega = 374.2901815, x = 594.3212241, \\ U_q = 4141.042465, s = -0.6447445356, U = 5050.833968 \end{array} \right.$$

se obține

$$U = 5050.833[V]$$

$$\omega = 374.290[rad/s]$$

$$s = -0.644$$

Pentru sarcina

$$R = 20000.762[\Omega]$$

$$20000.762500375(z-g) + \frac{0.01\omega}{314}(x-a) = -0.02\omega a - 0.015\omega c$$

$$-0.013\omega x + 20000.762500375(z-g) + \frac{0.01\omega}{314}(x-a) = 0$$

$$20000.762500375(x-a) - \frac{0.01\omega}{314}(z-g) = 0.02\omega g + 0.015\omega b$$

$$0.013\omega z - 3.64\omega y + 20000.762500375(x-a) - \frac{0.01\omega}{314}(z-g) = 0$$

$$10y = 112$$

$$95.5(628 - \omega) - 3.64xy = 0$$

$$-0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c = 0$$

$$\begin{aligned}
 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c &= 0 \\
 35.75[628 - \omega(1 - s)] + 0.015ab - 0.015gc &= 0 \\
 20000.762500375(z - g) + \frac{0.01\omega}{314}(x - a) &= U_d \\
 20000.762500375(x - a) - \frac{0.01\omega}{314}(z - g) &= U_q \\
 U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{aligned}
 y &= 11.2, U_q = 15512.9315, a = -0.4328132126, x = 0.3428037922, U = 15512.93175, \\
 \omega &= 627.8536605, U_d = 2.797998005, c = 0.2799876635, g = 1235.393878, \\
 s &= -1.925190644 \times 10^{-6}, b = 1.348415099 \times 10^{-5}, z = 1235.394018
 \end{aligned} \right.$$

se obține

$$\begin{aligned}
 U &= 15512.931[V] \\
 \omega &= 627.853[rad/s] \\
 s &= -1.925190644 \times 10^{-6}
 \end{aligned}$$

La modificarea sarcinii rezistive (cuptoare electrice mari, conectarea/deconectarea unor consumatori zonali importanți) pulsația unghiulară ω se modifică sensibil.

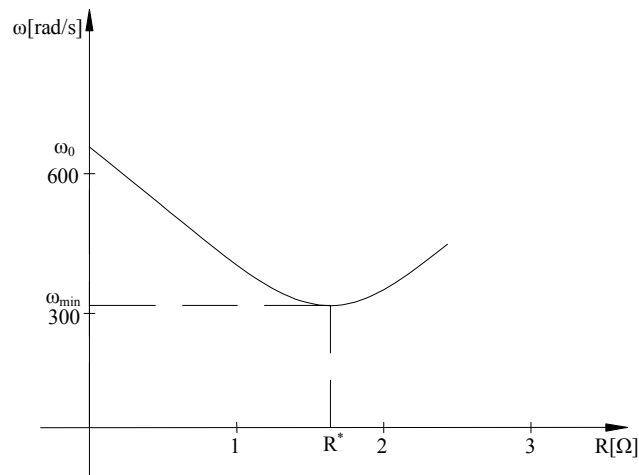


Fig.2.37. Modificarea pulsației unghiulare cu sarcina rezistivă.

Cu încărcarea viteza unghiulară ω (deci și frecvența $f = \frac{\omega}{2\pi}$) scade atingând un minim la $R = R^*$ de valoare $\omega_{min} = 350 \text{ rad/s}$ și deci frecvența se modifică cu valoarea Δf :

$$\Delta f = \frac{628 - 350}{2\pi \cdot 50} 100 = 88\%$$

de 3.68 ori mai mult ca în cazul încărcărilor reactive.

Alunecarea la GA depinde de rezistența de sarcină mult mai sensibil ca de reactanță. În zona rezistențelor mici (scurtcircuite) alunecarea tinde spre zero

deoarece și tensiunea (deci puterea) tinde spre zero.

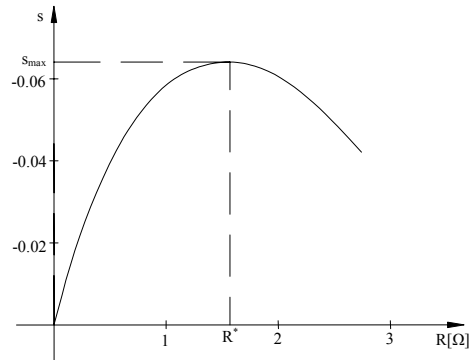


Fig.2.38. Dependenta alunecării de sarcina rezistivă.

Valoarea maximă (în modul) a alunecării se atinge la încărcarea activă maximă pentru $R = R^*$, unde și frecvența ω este minimă.

Curentul la GA crește uniform cu sarcina rezistivă R (prin creșterea componentei sale active determinată de creșterea puterii active și prin mărirea componentei sale reactive datorită creșterii tensiunii la bornele GA). Evident că la rezistențe mari (apropriate de funcționarea în gol) curentul are valori reduse: curentul de la funcționarea în gol.

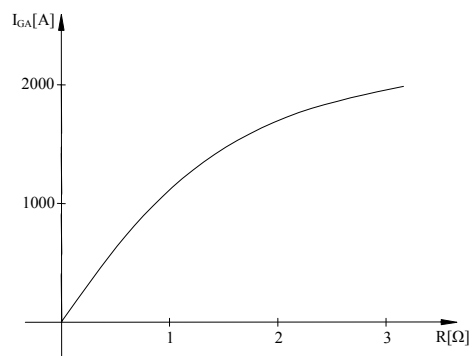


Fig.2.39. Modificarea curentului la GA cu sarcina rezistivă.

La GS curentul I_{GS} scade la mărirea lui R prin faptul că se micșorează componenta sa reactivă care are ponderea cea mai mare. Componenta reactivă I_d scade deoarece tensiunea la borne se modifică.

Tensiunea la borne fiind aceeași la cele două generatoare influențează semnificativ încărcarea celor două generatoare, deci și curenții debitați de aceste generatoare la modificările lente ale sarcinii.

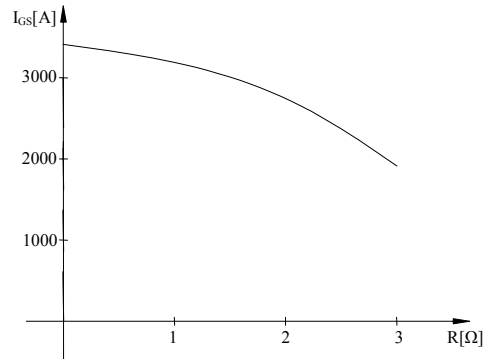


Fig.2.40. Modificarea curentului la GS cu sarcina rezistivă.

Modificarea tensiunii la borne

La modificarea sarcinii sau a curentului de excitație I_E , tensiunea la borne variază. Tensiunea la borne U este determinată de cele două componente ale sale:

$$U^2 = U_d^2 + U_q^2$$

unde:

$$U_d = (I_d - i_d)R + (I_q + i_q)X$$

$$U_q = (I_d - i_d)X + (I_q - i_q)R$$

a) dependența lui U de sarcină

1) sarcina rezistivă (R)

Tensiunea se modifică semnificativ cu sarcina rezistivă.

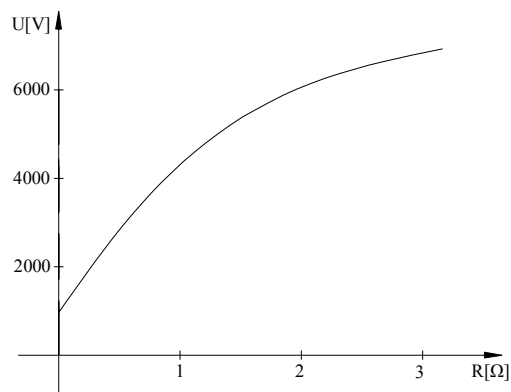


Fig.2.41. Modificarea tensiunii cu rezistența de sarcină.

2.4.3. Comportarea sistemului GS+GA la modificări ale curentului de excitație

Modificarea curentului de excitație:

$$I_E = \text{variabil}$$

Pentru

$$I_E = 1[A]$$

$$2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) = -0.02\omega a - 0.015\omega c$$

$$-0.013\omega x + 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) = 0$$

$$2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) = 0.02\omega g + 0.015\omega b$$

$$0.013\omega z - 3.64\omega y + 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) = 0$$

$$10y = 10$$

$$95.5(628 - \omega) - 3.64xy = 0$$

$$-0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c = 0$$

$$0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c = 0$$

$$35.75[628 - \omega(1-s)] + 0.015ab - 0.015gc = 0$$

$$2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) = U_d$$

$$2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) = U_q$$

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 1.0, g = 111.2183505, U_d = 0.04496354843, b = 4.559581916 \times 10^{-8}, \\ U_q = 1396.902016, z = 108.8948453, x = 5.507540845 \times 10^{-3}, U = 1396.902017, \\ s = -1.694108683 \times 10^{-7}, \omega = 627.9997901, a = -5.243849558 \times 10^{-3}, \\ c = 2.218597346 \times 10^{-3} \end{array} \right\}$$

se obține

$$U = 1396[V]$$

$$\omega = 627[rad/s]$$

$$s = -1.694108683 \times 10^{-7}$$

Pentru

$$I_E = 2[A]$$

$$2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) = -0.02\omega a - 0.015\omega c$$

$$-0.013\omega x + 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) = 0$$

$$2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) = 0.02\omega g + 0.015\omega b$$

$$\begin{aligned}
 0.013\omega z - 3.64\omega y + 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) &= 0 \\
 10y &= 20 \\
 95.5(628 - \omega) - 3.64xy &= 0 \\
 -0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c &= 0 \\
 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c &= 0 \\
 35.75[628 - \omega(1-s)] + 0.015ab - 0.015gc &= 0 \\
 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) &= U_d \\
 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) &= U_q \\
 U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}
 \end{aligned}$$

se obține

$$\begin{aligned}
 U &= 2793[V] \\
 \omega &= 627.999[rad/s] \\
 s &= -2.494523609 \times 10^{-7}
 \end{aligned}$$

Pentru

$$\begin{aligned}
 I_E &= 3[A] \\
 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) &= -0.02\omega a - 0.015\omega c \\
 -0.013\omega x + 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) &= 0 \\
 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) &= 0.02\omega g + 0.015\omega b \\
 0.013\omega z - 3.64\omega y + 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) &= 0 \\
 10y &= 30 \\
 95.5(628 - \omega) - 3.64xy &= 0 \\
 -0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c &= 0 \\
 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c &= 0 \\
 35.75[628 - \omega(1-s)] + 0.015ab - 0.015gc &= 0 \\
 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) &= U_d \\
 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) &= U_q \\
 U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}
 \end{aligned}$$

se obține

$$\begin{aligned}
 U &= 4190[V] \\
 \omega &= 627.998[rad/s] \\
 s &= -2.733714126 \times 10^{-7}
 \end{aligned}$$

Pentru

$$\begin{aligned}
 I_E &= 5[A] \\
 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) &= -0.02\omega a - 0.015\omega c
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) &= 0.02\omega g + 0.015\omega b \\
 -0.013\omega x + 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) &= 0 \\
 0.013\omega z - 3.64\omega y + 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) &= 0 \\
 10y &= 50 \\
 95.5(628-\omega) - 3.64xy &= 0 \\
 -0.015s\omega a + 0.08b - 0.02s\omega c &= 0 \\
 0.015s\omega g + 0.02s\omega b + 0.08c &= 0 \\
 35.75[628-\omega(1-s)] + 0.015ab - 0.015gc &= 0 \\
 2.762500375(z-g) + \frac{300.596\omega}{314}(x-a) &= U_d \\
 2.762500375(x-a) - \frac{300.596\omega}{314}(z-g) &= U_q \\
 U &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{aligned}
 y &= 5.0, U = 6984.461562, b = 1.562394423 \times 10^{-7}, a = -0.02971475228, \\
 U_d &= 0.1958893074, s = -2.874873011 \times 10^{-7}, c = 0.01882447503, g = 556.0917528, \\
 U_q &= 6984.461559, \omega = 627.9954272, x = 0.02399445539, z = 544.4742262
 \end{aligned} \right.$$

se obține

$$\begin{aligned}
 U &= 6984[V] \\
 \omega &= 627.995[rad/s] \\
 s &= -2.874873011 \times 10^{-7}
 \end{aligned}$$

Dependența lui U de curentul de excitație I_E

La o sarcină fixă (R, X -constanți) tensiunea se modifică sensibil cu I_E . Prin mărirea curentului de excitație I_E , tensiunea U crește uniform până se atinge nivelul de saturație al miezului feromagnetic.

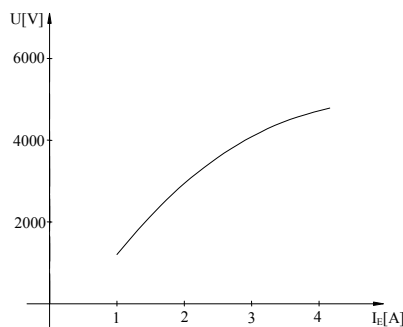


Fig.2.42. Dependența tensiunii U de curentul de excitație.

Influența curentului de excitație I_E asupra pulsației unghiulare ω [sau frecvenței f]

Rzistența de sarcină R și reactanța X se mențin constante. Prin curentul de excitație I_E se modifică puterea reactivă din sistem. Prin mărirea lui I_E se mărește puterea reactivă debitată de GS în sistem.

Pulsația unghiulară ω rămâne aproape neschimbată (figura 2.44).

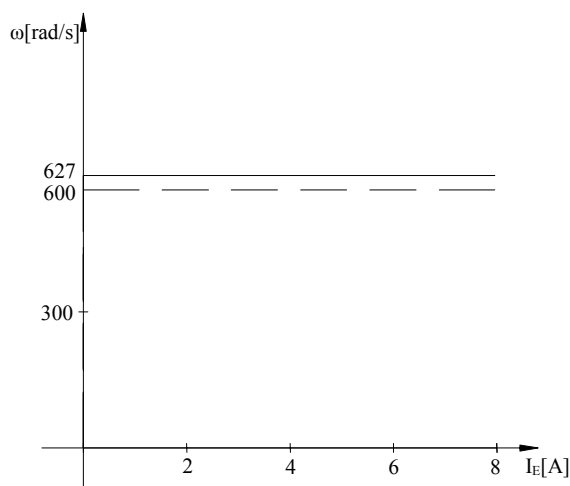


Fig.2.43. Dependentă pulsatiei unghiulare de curentul de excitație.

Prin urmare, frecvența în sistem ($f = \frac{\omega}{2\pi}$) nu depinde de curentul de excitație I_E . Curentul I_{GS} debitat de GS, prin componenta sa reactivă $I_{d,r}$, crește aproximativ liniar cu I_E (figura 2.45).



Fig.2.44. Dependentă curentului la GS de curentul de excitație.

La GA curentul debitat I_{GA} , la fel ca la GS, crește liniar cu I_E .

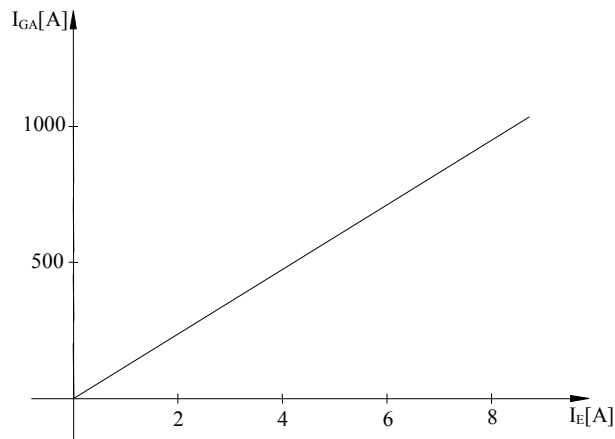


Fig.2.45. Dependentă curentului la GA de curentul de excitație.

2.5 Estimarea stabilității dinamice prin simulări numerice

Estimarea stabilității dinamice prin simulări numerice s-a făcut pentru sistemul **GS+GA+SARCINĂ** de la microhidrocentrala SURDUC-BEGA.

Datele nominale ale generatoarelor sunt:

GS

$$P_N = 1 \text{ MW}, M_{elmag} = 3185 \text{ Nm}, U_N = 6000 \text{ V}, I_N = 96 \text{ A}, I_{EN} = 20 \text{ A}$$

$$R_D = 0.5 \Omega,$$

$$L = 0.2 \text{ H}, L_D = 0.04 \text{ H}, M_D = 0.08 \text{ H}$$

$$L_Q = 0.02 \text{ H}, M_Q = 0.05 \text{ H}, R_Q = 0.1 \Omega$$

$$L_E = 6 \text{ H}, R_E = 5 \Omega, M_E = 0.98 \text{ H}$$

$$M_{ED} = 0.4 \text{ H}$$

$$K_{TGS} = 10.142$$

$$M_{elmagGS} = -0.98xy + 0.05zf - 0.08xh$$

$$M_{elmagGS} = -M_E I_q I_E + M_Q I_d I_Q - M_D I_q I_D - \text{are valori negative}$$

GA

$$P_N = 1 \text{ MW}, M_{elmag} = 3122 \text{ Nm}, U_N = 6000 \text{ V}, I_N = 96 \text{ A}$$

$$L_1 = 0.6 \text{ H}, L_2 = 0.7 \text{ H}, R_2 = 0.65 \Omega, M = 0.5 \text{ H}, s_N = -0.02$$

$$K_{TGA} = 9.943$$

$$M_{elmagGA} = 0.5(ab - gc)$$

$$M_{elmagGA} = p_1 M(i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) - \text{are valori negative}$$

În regim dinamic, se poate urmări comportarea generatoarelor în timp prin rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale de mai jos.

Generatoarele au fost antrenate de 2 turbine hidraulice și sistemul a funcționat în regim insular pe o rezistență de sarcină dată.

Cu următoarele notații:

$$i_q = a$$

$$i_d = g$$

$$i_{dr} = b$$

$$i_{qr} = c$$

$$I_q = x$$

$$I_d = z$$

$$I_E = y$$

$$I_D = h$$

$$I_Q = f$$

sistemul de ecuații diferențiale se scrie sub forma:

$$3(z - g) = -0.2 \frac{dz}{dt} + 0.2\omega x + 0.98 \frac{dy}{dt} + 0.08 \frac{dh}{dt} - 0.05\omega f$$

$$3(x - a) = -0.2\omega z - 0.2 \frac{dx}{dt} + 0.98\omega y + 0.08\omega h + 0.05 \frac{df}{dt}$$

$$200 = -0.98 \frac{dz}{dt} + 5y + 6 \frac{dy}{dt} + 0.4 \frac{dh}{dt}$$

$$0 = -0.08 \frac{dz}{dt} + 0.4 \frac{dy}{dt} + 0.5h + 0.04 \frac{dh}{dt}$$

$$0 = -0.05 \frac{dx}{dt} + 0.1f + 0.02 \frac{df}{dt}$$

$$3(z - g) = 0.6 \frac{dg}{dt} - 0.6\omega a + 0.5 \frac{db}{dt} - 0.5\omega c$$

$$3(x - a) = 0.6\omega g + 0.6 \frac{da}{dt} + 0.5\omega b + 0.5 \frac{dc}{dt}$$

$$0 = 0.5 \frac{dg}{dt} - 0.5s\omega a + 0.65b + 0.7 \frac{db}{dt} - 0.7s\omega c$$

$$0 = 0.5s\omega g + 0.5 \frac{da}{dt} + 0.7s\omega b + 0.65c + 0.7 \frac{dc}{dt}$$

$$0 = 9.943(628 - \omega + \omega s) + 0.5ab - 0.5gc + 2\omega \frac{ds}{dt} - 2(1 - s) \frac{d\omega}{dt}$$

$$\omega(0) = 514.8$$

$$a(0) = -24.186$$

$$\begin{aligned}
 s(0) &= -0.21 \\
 g(0) &= 6.85 \\
 c(0) &= 17.314 \\
 b(0) &= -4.75 \\
 x(0) &= 29.271 \\
 z(0) &= 187.33 \\
 y(0) &= 40 \\
 h(0) &= 0 \\
 f(0) &= 0
 \end{aligned}$$

Prin rezolvarea numerică a sistemului de mai sus se obțin următoarele rezultate

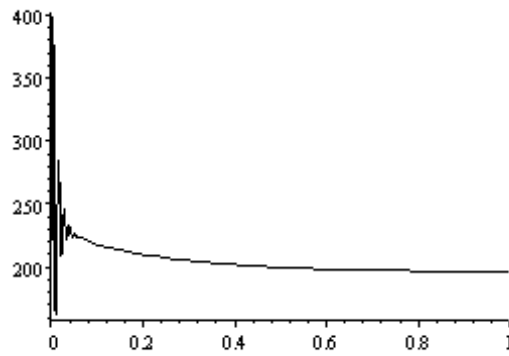


Fig.2.46. Variația în timp a curentului statoric I_d la GS

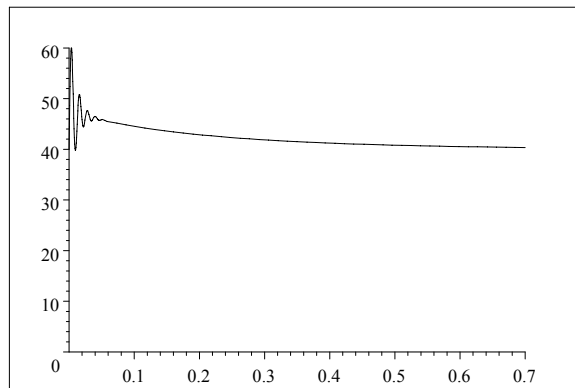


Fig.2.47. Variația în timp a curentului de excitație I_E la GS

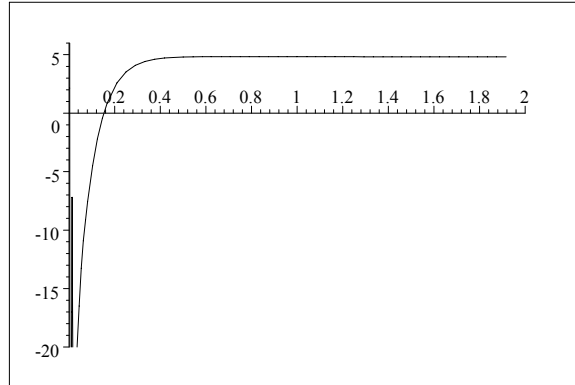


Fig.2.48. Variația în timp a curentului statoric I_q la GS

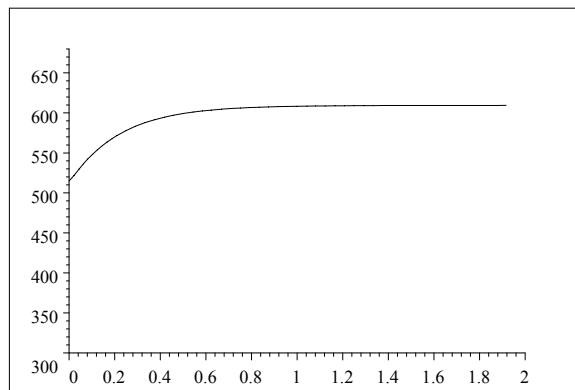


Fig.2.49. Variația în timp a vitezei unghiulare ω la GS

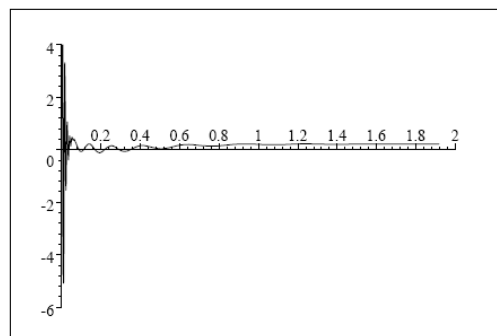


Fig.2.50. Variația în timp a curentului rotoric i_{dr} la GA

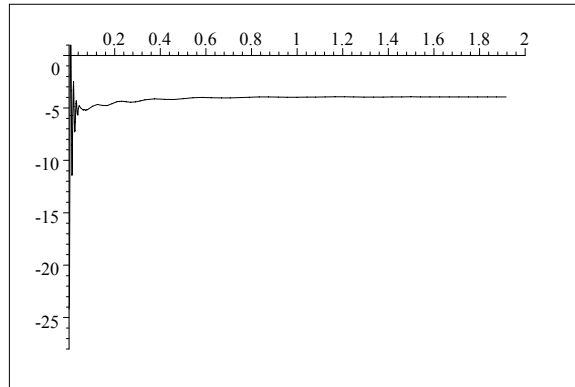


Fig.2.51. Variația în timp a curentului statoric i_q la GA

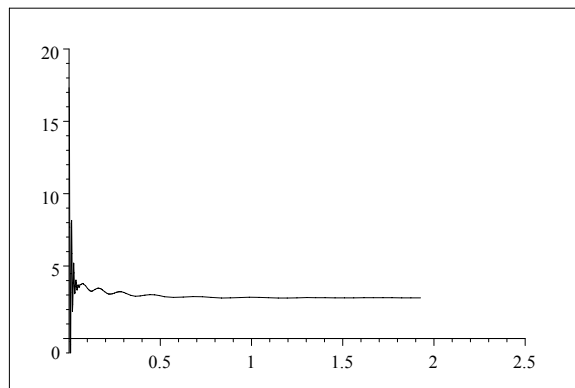


Fig.2.52. Variația în timp a curentului rotoric i_{qr} la GA

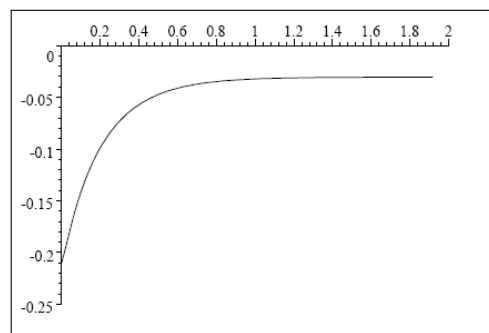


Fig.2.53. Variația în timp a alunecării s la GA

Având în vedere rezultatele simulării, rezultă că sistemul este dinamic stabil, toate

mărimile stabilizându-se la valorile finale. În capitolele următoare se tratează mai în detaliu problema stabilității dinamice la generatoarele la care frecvența și tensiunea se reglează.

2.6. Concluzii

Funcționarea în unul din cele trei puncte, obținute prin calcul, **prin rezolvarea unor sisteme de ecuații algebrice**, poate fi **stabilă** sau **instabilă** și acest fapt se demonstrează folosind **criteriul de stabilitate Hurwitz sau rezolvând direct, cu Laplace, ecuația mișcării**.

În acest sens se deduc caracteristicile mecanice ale GA în sistemul GS + GA + SARCINĂ, respectiv caracteristicile mecanice ale GS în respectivul sistem.

S-a demonstrat, în acest capitol, că există cel puțin un punct de funcționare **stabil static**.

Funcționarea dinamică, plecând din acest punct inițial, se analizează prin rezolvarea unor **sisteme de ecuații diferențiale**, care pot stabili dacă punctul final este sau nu **dinamic stabil**.

3. STABILITATEA DINAMICĂ A GENERATOARELOR SINCRON ȘI ASINCRON REGLATE

Elementul perturbator din sistemul electroenergetic cu GS și GA este sarcina electrică. Ca urmare a modificării continue a sarcinii, tensiunea și frecvența din sistem nu rămân fixe. Pentru a readuce tensiunea și frecvența la valorile nominale, în sistem se folosesc regulatoare de tip PI la excitația GS și la cele două turbine de la GS, respectiv GA.

În acest capitol este analizată **stabilitatea dinamică folosind un algoritm de reglare cu 4 etape** :

- **etapa I – calculul sarcinii din sistem din valorile tensiunii și frecvenței;**
- **etapa II – calculul curentului de excitație și a coeficienților de cuplu de la turbină pentru a realiza valorile nominale ale tensiunii și frecvenței;**
- **etapa III – realizarea valorilor nominale ale tensiunii și frecvenței cu cele două regulatoare de tip PI;**
- **etapa IV – analiza stabilității dinamice prin simulare numerică.**

Sunt analizate două sisteme energetice :

- GS + SARCINĂ și
- GS + GA + SARCINĂ.

Strategia de control a sistemului și **stabilitatea sa dinamică** sau comportarea lui în timp la modificări mai rapide ale sarcinii sunt date în continuare.

Sistemul energetic format din :

- TURBINĂ – GENERATOR SINCRON – SARCINĂ
- TURBINĂ – GENERATOR ASINCRON – SARCINĂ

și notat în lucrare cu GS + GA funcționează la U_N și f_N (tensiune și frecvență nominale) numai prin folosirea a trei regulatoare.

Două regulatoare sunt la GS și modifică :

- curentul de excitație I_E și
- cuplul motor M_{GS} la arborele GS ;

și un regulator la GA pentru a-i modifica :

- cuplul motor la arborele GA (figura 3.1)

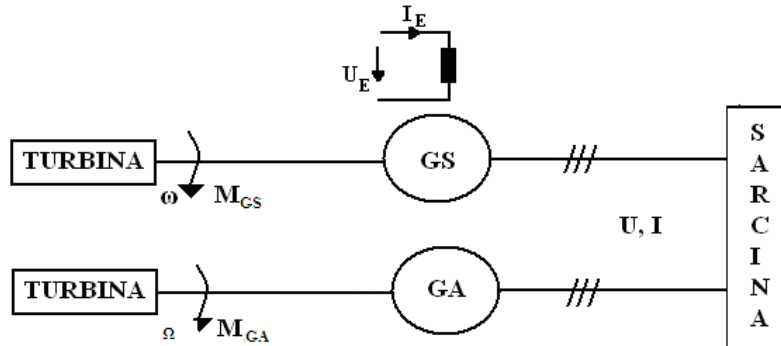


Fig.3.1. Sistem energetic format din două generatoare (GS+GA)

Condițiile ce se pot impune sistemului sunt :

1. tensiunea nominală :

$$U_N^2 = U_d^2 + U_q^2$$

2. frecvența nominală :

$$f_N = \frac{\omega}{2\pi}$$

3. încărcarea în mod proporțional a celor două generatoare :

$$M_{GS}\omega = \alpha M_{GA}\Omega$$

unde : $\alpha = \frac{\text{puterea nominală a GA}}{\text{puterea nominală a GS}}$ ($\alpha = 1$ când cele două generatoare au aceeași putere nominală)

Mărimile ce se reglează :

- I_E (curentul de excitație) ;
- K_{TGS} (cuplul la GS) ;
- K_{TGA} (cuplul la GA) ;

se pot determina din sistemul :

$$\overline{GS + T_{GS}}$$

$$U_d = \omega L I_q$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{0GS} - \omega)$$

$$\begin{aligned} & \underline{GA + T_{GA}} \\ U_d &= -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr} \\ U_q &= \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr} \\ 0 &= -M s \omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s \omega i_{qr} \\ 0 &= M s \omega i_d + L_2 s \omega i_{dr} + R_2 i_{qr} \\ p_{1GA} M (i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) &= K_{TGA} [\omega_{0GA} - \omega(1-s)] \end{aligned}$$

sarcina

$$\begin{aligned} (I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L &= U_d \\ (I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R &= U_q \end{aligned}$$

completat cu cele trei condiții :

$$U_N^2 = U_d^2 + U_q^2$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$M_{GS}\omega = aM_{GA}\Omega$$

Având în vedere notațiile de mai jos:

$$a = i_q$$

$$g = i_d$$

$$c = i_{qr}$$

$$b = i_{dr}$$

$$z = I_d$$

$$x = I_q$$

$$y = I_E$$

se obțin:

$$\text{tensiunea la borne: } U = \sqrt{(R(z-g) - (x-a)\omega L)^2 + (R(x-a) + (z-g)\omega L)^2}$$

$$\text{puterea activă la GA: } p = (R(z-g) - (x-a)\omega L)g + (R(x-a) + (z-g)\omega L)a$$

$$\text{puterea reactivă la GA: } q = (R(x-a) + (z-g)\omega L)g - (R(z-g) - (x-a)\omega L)a$$

$$\text{puterea activă la GS: } P = (R(z-g) - (x-a)\omega L)z + (R(x-a) + (z-g)\omega L)x$$

$$\text{puterea reactivă la GS: } Q = (R(x-a) + (z-g)\omega L)z - (R(z-g) - (x-a)\omega L)x$$

$$\text{curentul la GA: } w = \sqrt{a^2 + g^2}$$

$$\text{curentul la GS: } W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

$$\text{puterea reactivă absorbită de sarcină: } T = \omega L[(z-g)^2 + (x-a)^2]$$

$$\text{cuplul la GA: } m = 0.69(gc - ab)$$

$$\text{cuplul la GS: } M = 20xy$$

Cu datele generatoarelor:

Generatorul asincron :

$$P_N = 1MW$$

$$U_N = 6000V$$

$$s_N = 0.01$$

$$L_1 = L_2 = 0.71[H]$$

$$\begin{aligned}
M &= 0.69[H]; \\
R_2 &= 0.053[\Omega] \\
K_{TGS} &= 10.14 \\
\omega_{oGA} &= 640[rad/s]
\end{aligned}$$

Generatorul sincron:

$$\begin{aligned}
P_N &= 1MW \\
U_N &= 6000V \\
L_1 = L_2 = L &= 0.09[H] \\
M_E &= 20[H]; \\
K_{TGS} &= 10.14 \\
\omega_{oGA} &= 628 \frac{rad}{s}
\end{aligned}$$

sistemul devine:

$$\begin{aligned}
R &= 100 \\
L &= 0.3 \\
R(z-g) - (x-a)\omega L &= -\omega(0.71a + 0.69c) \\
R(x-a) + (z-g)\omega L &= \omega(0.71g + 0.69b) \\
0.053b &= \omega(0.69sa + 0.71sc) \\
0.053c &= -\omega(0.69sg + 0.71sb) \\
10.14(640 - \omega + \omega s) &= 0.69(gc - ab) \\
R(z-g) - (x-a)\omega L &= 0.09\omega x \\
R(x-a) + (z-g)\omega L &= -0.09\omega z + 20\omega y \\
10.14(628 - \omega) &= 20xy \\
\Omega &= \omega(1-s) \\
y &= 2 \\
m &= 0.69(gc - ab) \\
M &= 20xy \\
U &= \sqrt{(R(z-g) - (x-a)\omega L)^2 + (R(x-a) + (z-g)\omega L)^2} \\
p &= (R(z-g) - (x-a)\omega L)g + (R(x-a) + (z-g)\omega L)a \\
q &= (R(x-a) + (z-g)\omega L)g - (R(z-g) - (x-a)\omega L)a \\
P &= (R(z-g) - (x-a)\omega L)z + (R(x-a) + (z-g)\omega L)x \\
Q &= (R(x-a) + (z-g)\omega L)z - (R(z-g) - (x-a)\omega L)x \\
w &= \sqrt{a^2 + g^2} \\
W &= \sqrt{x^2 + z^2} \\
T &= \omega L[(z-g)^2 + (x-a)^2]
\end{aligned}$$

Acest sistem de ecuații global devine:

$$\begin{aligned}
 (I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L &= \omega LI_q \\
 (I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R &= -\omega LI_d + \omega M_E I_E \\
 I_E &= I_{E(0)} \\
 p_{1GS} M_E I_E I_q &= K_{TGS}(\omega_{0GS} - \omega) \\
 (I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L &= -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr} \\
 (I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R &= \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr} \\
 -Ms\omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s\omega i_{qr} &= 0 \\
 Ms\omega i_d + L_2 s\omega i_{dr} + R_2 i_{qr} &= 0 \\
 p_{1GAM}(i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) &= K_{TGA}[\omega_{0GA} - \omega(1-s)]
 \end{aligned}$$

La un moment dat valoarea sarcinii $(R + j\omega L)$, formată din rezistența \mathbf{R} și inductanța \mathbf{L} se poate determina din :

-valoarea tensiunii \mathbf{U} și

-valoarea frecvenței \mathbf{f} ,

având în vedere sistemul de ecuații :

$$\begin{aligned}
 U &= \sqrt{[(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L]^2 + [(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R]^2} \\
 \omega &= 2\pi f \\
 (I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L &= \omega LI_q \\
 (I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R &= -\omega LI_d + \omega M_E I_E \\
 I_E &= I_{E(0)} \\
 p_{1GS} M_E I_E I_q &= K_{TGS}(\omega_{0GS} - \omega) \\
 (I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L &= -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr} \\
 (I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R &= \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr} \\
 -Ms\omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s\omega i_{qr} &= 0 \\
 Ms\omega i_d + L_2 s\omega i_{dr} + R_2 i_{qr} &= 0 \\
 p_{1GAM}(i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) &= K_{TGA}[\omega_{0GA} - \omega(1-s)]
 \end{aligned}$$

sau numeric

$$\begin{aligned}
 U &= 5900 \\
 \omega &= 313 \\
 U &= \sqrt{[R(z-g) - (x-a)\omega L]^2 + [R(x-a) + (z-g)\omega L]^2} \\
 R(z-g) - (x-a)\omega L &= -\omega(0.71a + 0.69c) \\
 R(x-a) + (z-g)\omega L &= \omega(0.71g + 0.69b) \\
 0.053b &= \omega(0.69sa + 0.71sc) \\
 0.053c &= -\omega(0.69sg + 0.71sb) \\
 10.14(640 - \omega + \omega s) &= 0.69(gc - ab) \\
 R(x-a) + (z-g)\omega L &= 0.09\omega x \\
 R(z-g) - (x-a)\omega L &= -0.09\omega x + 20\omega y
 \end{aligned}$$

$$10.14(628 - \omega) = 20xy$$

$$\Omega = \omega(1 - s)$$

$$y = 2$$

$$m = 0.69(gc - ab)$$

$$M = 20xy$$

$$U = \sqrt{(R(z - g) - (x - a)\omega L)^2 + (R(x - a) + (z - g)\omega L)^2}$$

$$p = (R(z - g) - (x - a)\omega L)g + (R(x - a) + (z - g)\omega L)a$$

$$q = (R(x - a) + (z - g)\omega L)g - (R(z - g) - (x - a)\omega L)a$$

$$P = (R(z - g) - (x - a)\omega L)z + (R(x - a) + (z - g)\omega L)x$$

$$Q = (R(x - a) + (z - g)\omega L)z - (R(z - g) - (x - a)\omega L)x$$

$$w = \sqrt{a^2 + g^2}$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

$$T = \omega L[(z - g)^2 + (x - a)^2]$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} m = 3309.271411, \Omega = 313.6418727, W = 263.2259322, M = 3194.1, \\ Q = 1188446.397, q = 651348.087, z = 250.8215892, p = -1035801.952, \\ x = 79.8525, w = 207.3858864, P = 999753.3, s = -2.050711457 \times 10^{-3}, \\ c = 199.8984545, g = 35.12510178, R = 15.9878884, a = -204.38966, \\ L = 0.01347775822, b = -10.88806564, T = 537098.31, y = 2.0, \omega = 313.0, U = 5900.0 \end{array} \right.$$

La

$$U = 5900[V]$$

$$\omega = 313[rad/s]$$

s-a obținut:

$$R = 15.9878884[\Omega]$$

$$L = 0.01347775822[H]$$

3.1. Stabilitatea dinamică a sistemului la controlul cuplurilor și a curentului de excitație prin prescrierea tensiunii și a frecvenței

Comportarea sistemului la controlul cuplurilor și a curentului de excitație prin prescrierea tensiunii și a frecvenței se face folosind reglatoare de tip PI.

Ecuția regulatorului de tip **PI** este :

$$KT_i \frac{dE_r}{dt} + KE_r = T_i \frac{d\beta}{dt}$$

unde :

K – factorul de amplificare al regulatorului ;

T_i – constanta de timp a regulatorului ;

E_r - eroarea mărimii de reglat ;

β^* - mărimea prescrisă ;

β - mărimea reglată.

În cazul regulatorului pe excitație ecuația sa se poate scrie sub forma :

$$KT_i \frac{dU}{dt} + K(U_N - U) = T_i \frac{dU_E}{dt}$$

unde :

U_E - tensiunea pe excitație;

U_N - tensiunea nominală ;

U - tensiunea la un moment dat.

Pentru regulatorul de la turbină ce modifică valoarea cuplului motor, ecuația devine :

$$KT_i \frac{df}{dt} + K(f_N - f) = T_i \frac{dK_{GS}}{dt}$$

unde : f_N - frecvența nominală ;

f - frecvența la un moment dat.

3.1.1. Stabilitatea dinamică prin controlul tensiunii și frecvenței la sistemul TURBINĂ – GS – SARCINĂ

Generatorul sincron în regim autonom nu are frecvența și tensiunea impusă de la sistemul electroenergetic așa cu era în cazul **GS** cuplat la rețea.

Problematika reglării numai a generatorului sincron este mai simplă decât în cazul a două generatoare.

În continuare, se analizează acest caz simplu al generatorului sincron funcționând în regim autonom.

Condițiile ce se pot impune sistemului sunt :

1. tensiunea nominală :

$$U_N^2 = U_d^2 + U_q^2$$

2. frecvența nominală :

$$f_N = \frac{\omega}{2\pi}$$

Sistemul **TURBINĂ – GS – SARCINĂ** poate funcționa autonom deoarece **GS** debitează atât putere activă cât și putere reactivă, spre deosebire de **GA** care absoarbe puterea reactivă și deci nu poate funcționa fără o sursă separată de putere reactivă (care poate fi ori un alt **GS** sau o baterie de condensatoare).

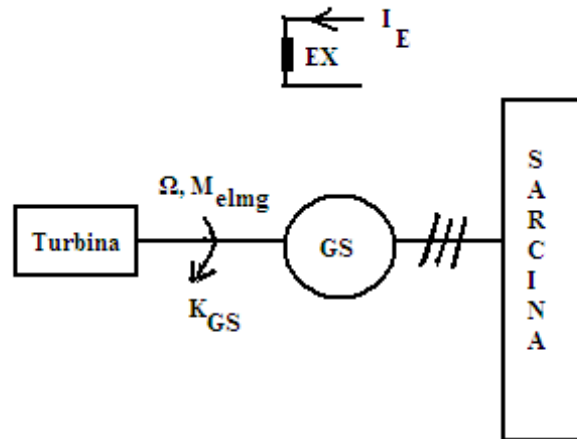


Fig.3.2. Sistem **TURBINĂ - GS - SARCINĂ**

Mărimile de intrare sunt :

- curentul de excitație I_E ;
- cuplul la arborele GS dat prin factorul de cuplu K_{GS}

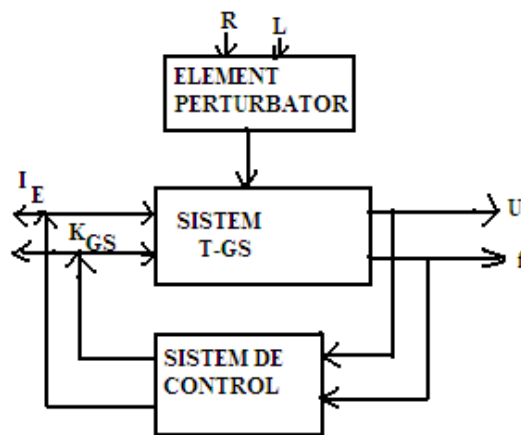


Fig.3.3. Controlul la sistemul **T+GS**

Mărimile de ieșire sunt :

- tensiunea U la bornele GS ;
- frecvența f .

Elementul perturbator este sarcina electrică dată prin rezistența R și inductanța L .

Se cunosc parametrii electrici și mecanici ai sistemului din:

- diagrama fazorială a GS cu poli plini în regim nominal (figura 3.4).

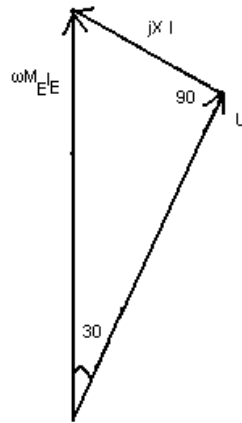


Fig.3.4. Diagrama fazorială la regim nominal

Parametrii GS cu poli plini sunt:

$$U = 6000[V]$$

$$\omega = 314[\frac{rad}{s}]$$

$$U_E = 110[V]$$

$$P_{ex} = (1.1\%)P_n \text{ sau: } I_E U_E = 1000000 \times 0.01 \Rightarrow I_E = 100[A]$$

$$\omega M_E I_E \cos 30 = 6000 \Rightarrow M_E = 0.22[H]$$

$$\frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{X}{U} \Rightarrow L_{d,q} = 0.19[H]$$

$$L_E L_d < M_E \Rightarrow L_E = 0.31[H]$$

$$L_D = L_Q = 0.02[H]$$

$$M_{ED}^2 < L_E L_D \Rightarrow M_{ED} = 0.06[H]$$

$$M_{Dd}^2 < L_D L_d \Rightarrow M_{Dd} = M_Q = 0.05[H]$$

deci:

$$M_D = M_Q = 0.05[H]$$

$$M_{ED} = 0.06[H]$$

$$M_E = 0.22[H]$$

$$L_d = L_q = 0.19[H]$$

$$L_D = L_Q = 0.02[H]$$

$$L_E = 0.31[H]$$

$$R_E = 2[\Omega]$$

$$R_D = R_Q = 0.5[\Omega]$$

Algoritmul de reglare este format din următoarele etape :

1. Etapa I

În punctul inițial la cuplu și curent de excitație dați ($K_{GS} + I_E$) și la tensiunea U și frecvența f cunoscute, din sistemul :

DATE : I_E , K_{GS} , U ;

NECUNOSCUTE : R , L

GS + T_{GS}

$$U_d = \omega L I_q$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{0GS} - \omega)$$

sarcina

$$I_d R - I_q \omega L = U_d$$

$$I_d \omega L + I_q R = U_q$$

$$U^2 = U_d^2 + U_q^2$$

$$\omega = 2\pi f$$

sau

$$U_d = \omega L I_q$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{0GS} - \omega)$$

$$U_d = I_d R - I_q \omega L$$

$$U_q = I_d \omega L + I_q R$$

$$U^2 = U_d^2 + U_q^2$$

$$\omega = 2\pi f$$

se obține valoarea sarcinii : R și L.

Având în vedere notațiile de mai jos:

$$z = I_d$$

$$x = I_q$$

$$y = I_E$$

$$C = K_{GS}$$

$$U_E = m$$

rezultă:

$$\text{tensiunea la borne: } U = \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2}$$

$$\text{puterea activă la GS: } P = (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x$$

$$\text{puterea reactivă la GS: } Q = (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x$$

$$\text{curentul la GS: } W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

$$\text{puterea reactivă absorbită de sarcină: } T = \omega L (z^2 + x^2)$$

$$\text{cuplul la GS: } M = 20xy$$

În regim staționar se folosesc următoarele date nominale ale generatorului sincron:

$$P_N = 1 [MW]$$

$$U_N = 6000 [V]$$

$$L_1 = L_2 = L = 0.19 [H]$$

$$M_E = 0.22 [H];$$

$$K_{TGS} = 10.14$$

$$\omega_{oGA} = 628 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$J = 100 [\text{kgm}^2]$$

$$U = 5900$$

$$\omega = 313$$

$$Rz - x\omega L = 0.19\omega x$$

$$Rx + z\omega L = -0.19\omega z + 0.22\omega y$$

$$10.14(628 - \omega) = 0.22xy^3$$

$$y = 100$$

$$M = 0.22xy^3$$

$$U = \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2}$$

$$P = (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x$$

$$Q = (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x$$

$$T = \omega L[(z)^2 + (x)^2]$$

$$W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 100.0, U = 5900.0, \omega = 313.0, x = 48.395, M = 3194.1, P = 3.3325 \times 10^5, \\ z = 29.184, W = 56.514, L = 1.1029 \times 10^{-2}, R = 104.34, T = 11026., Q = 11026. \end{array} \right\}$$

Sarcina rezistivă este $R=104.34[\Omega]$

Sarcina inductivă este $L=1.1029 \times 10^{-2}[H]$

2. Etapa a-II-a

Fiind impuse valorile tensiunii U și frecvenței f la valorile nominale, sarcina R, L fiind cunoscute din etapa precedentă, din sistemul :

$$\omega = 2\pi f$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{oGS} - \omega)$$

$$U_d = I_d R - I_q \omega L$$

$$U_q = I_d \omega L + I_q R$$

$$U_N^2 = U_d^2 + U_q^2$$

$$\omega = 2\pi f_N$$

$$R = R_{anterior}$$

$$L = L_{anterior}$$

se obțin valorile curentului de excitație I_E și ale cuplului K_{GS} .

DATE : $U=U_N$; $f=f_N$ ($\omega = 2\pi f$);

tensiunea nominală $U_N = 6000V$

frecvența nominală $f_N = 50Hz$

sarcina rezistivă $R = 104.34\Omega$

sarcina inductivă $L = 1.1029 \times 10^{-2}H$

$$\begin{aligned}
U &= 6000 \\
\omega &= 314 \\
R &= 104.34 \\
L &= 1.1029 \times 10^{-2} \\
Rz - x\omega L &= 0.19\omega x \\
Rx + z\omega L &= -0.19\omega z + 0.22\omega y \\
C(628 - \omega) &= 0.22xy3 \\
M &= 0.22xy3 \\
U &= \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2} \\
P &= (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x \\
Q &= (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x \\
T &= \omega L[(z)^2 + (x)^2] \\
W &= \sqrt{x^2 + z^2}
\end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} L = 1.1029 \times 10^{-2}, M = 3292.8, C = 10.487, R = 104.34, y = 101.46, \\ \omega = 314.0, Q = 11439., W = 57.473, x = 49.174, z = 29.749, \\ P = 3.4465 \times 10^5, U = 6000.0, T = 11439 \end{array} \right\}$$

NECUNOSCUTE : \mathbf{I}_E , \mathbf{K}_{GS}

Curentul de excitație $\mathbf{I}_E = 101.46[A]$

Coeficientul de cuplu $\mathbf{C}=10.487$

3. Etapa a-III-a

Realizarea valorilor de cuplu \mathbf{K}_{GS} și de curent de excitație \mathbf{I}_E prin folosirea celor două regulatoare de tip PI:

VALORI PRESCRISE : CUPLUL (\mathbf{K}_{GS}), CURENT DE EXCITAȚIE \mathbf{I}_E

ERORI : $\Delta U = U_N - U$ (tensiune);

$\Delta f = f_N - f$ (frecvența) sau

$\Delta \omega = \omega_N - \omega$

$$KT_i \frac{d(U_{E(\infty)} - U_E)}{dt} + K(U_{E(\infty)} - U_E) = T_i \frac{dU_E}{dt}$$

$$KT_i \frac{d(K_{GS(\infty)} - K_{GS})}{dt} + K(K_{GS(\infty)} - K_{GS}) = T_i \frac{dK_{GS}}{dt}$$

La regulatorul pe excitație datele sunt : $K = 10; T_i = 0.01; U_E = R_E I_{E(\infty)} = 2 * 101.46 = 202.92$ și se obține

$$0.1 \frac{d(202.92 - U_E)}{dt} + 10(202.92 - U_E) = 0.01 \frac{dU_E}{dt}$$

sau

$$10(202.92 - U_E) = 0.11 \frac{dU_E}{dt}$$

La regulatorul de cuplu datele sunt : $K = 10; T_i = 1, K_{GS(\infty)} = 10.487$ și se obține

$$10 \frac{d(10.487 - K_{GS})}{dt} + 10(10.487 - K_{GS}) = \frac{dK_{GS}}{dt}$$

sau

$$10(10.487 - K_{GS}) = 11 \frac{dK_{GS}}{dt}$$

4. Etapa a-IV-a

Observarea fenomenului tranzitoriu al trecerii din punctul inițial în cel final se face prin rezolvarea numerică a sistemului de ecuații diferențiale.

$$\begin{aligned} U_d &= -L_d \frac{dI_d}{dt} + \omega L_q I_q + M_E \frac{dI_E}{dt} + M_D \frac{dI_D}{dt} - \omega M_Q I_Q \\ U_q &= -\omega L_d I_d - L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega M_E I_E + \omega M_D I_D + M_Q \frac{dI_Q}{dt} \\ U_E &= -M_E \frac{dI_d}{dt} + R_E I_E + L_E \frac{dI_E}{dt} + M_{ED} \frac{dI_D}{dt} \\ 0 &= -M_D \frac{dI_d}{dt} + M_{ED} \frac{dI_E}{dt} + R_D I_D + L_D \frac{dI_D}{dt} \\ 0 &= -M_Q \frac{dI_q}{dt} + R_Q I_Q + L_Q \frac{dI_Q}{dt} \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_{turbina} - (M_E I_q I_E - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D) \\ T_i \frac{dU_E}{dt} &= K T_i \frac{d(U_{(\infty)} - U_E)}{dt} + K(U_{(\infty)} - U_E) \\ T_i \frac{dK_{GS}}{dt} &= K T_i \frac{d(K_{GS(\infty)} - K_{GS})}{dt} + K(K_{GS(\infty)} - K_{GS}) \end{aligned}$$

Condițiile inițiale pentru :

- tensiunea U ;
- curentul de excitație I_E ;
- coeficientul de cuplu K_{GS} ;
- sarcina rezistivă R ;
- sarcina inductivă L ;
- viteza unghilară ω ;
- curentul statoric I_q ;
- curentul statotic I_d ;

sunt cele de la etapa I, adică:

$$\begin{aligned} U &= 5900[V] \\ I_E &= 100[A] \\ K_{GS} &= 10.14[Nms/rad] \\ R &= 104.34[\Omega] \\ L &= 0.011029[H] \\ \omega &= 313[rad/s] \\ I_q &= 48.395[A] \\ I_d &= 29.184[A] \end{aligned}$$

Condițiile finale pentru :

- tensiunea U ;
- curentul de excitație I ;
- coeficientul de cuplu K_{GS} ;
- sarcina rezistivă R ;

- sarcina inductivă L ;
- viteza unghilară ω ;
- curentul statoric I_q ;
- curentul statotic I_d ;

sunt cele de la etapa a-II-a, adică:

$$\begin{aligned}
 U &= 6000[V] \\
 I_E &= 101.46[A] \\
 U_E &= 202.92[V] \\
 K_{GS} &= 10.487[Nms/rad] \\
 R &= 104.34[\Omega] \\
 L &= 0.011029[H] \\
 \omega &= 314[rad/s] \\
 I_q &= 49.174[A] \\
 I_d &= 29.749[A]
 \end{aligned}$$

Rezultă sistemul numeric:

$$\begin{aligned}
 U_d &= -0.19 \frac{dI_d}{dt} + \omega 0.19 I_q + 0.22 \frac{dI_E}{dt} + 0.05 \frac{dI_D}{dt} - \omega 0.05 I_Q \\
 U_q &= -\omega 0.19 I_d - 0.19 \frac{dI_q}{dt} + \omega 0.22 I_E + \omega 0.05 I_D + 0.05 \frac{dI_Q}{dt} \\
 U_E &= -0.22 \frac{dI_d}{dt} + 2I_E + 0.31 \frac{dI_E}{dt} + 0.06 \frac{dI_D}{dt} \\
 0 &= -0.05 \frac{dI_d}{dt} + 0.06 \frac{dI_E}{dt} + 0.5 I_D + 0.02 \frac{dI_D}{dt} \\
 0 &= -0.05 \frac{dI_q}{dt} + 0.5 I_Q + 0.02 \frac{dI_Q}{dt} \\
 0.11 \frac{dU_E}{dt} &= 10(202.92 - U_E) \\
 11 \frac{dK_{GS}}{dt} &= 10(10.487 - K_{GS}) \\
 100 \frac{d\omega}{dt} &= M_{turbina} - 3(0.22 I_q I_E - 0.05 I_d I_Q + 0.05 I_q I_D)
 \end{aligned}$$

Între punctul inițial și cel final funcționarea este descrisă de următorul sistem de ecuații diferențiale, neliniare și neomogene:

$$\begin{aligned}
 104.34z - 0.01\omega x &= -0.19 \frac{dz}{dt} + 0.19\omega x + 0.22 \frac{dy}{dt} + 0.05 \frac{dh}{dt} - 0.05\omega f \\
 104.34x + 0.01\omega z &= -0.19\omega z - 0.19 \frac{dx}{dt} + 0.22\omega y + 0.05\omega h + 0.05 \frac{df}{dt} \\
 m &= -0.22 \frac{dz}{dt} + 2y + 0.31 \frac{dy}{dt} + 0.06 \frac{dh}{dt} \\
 0 &= -0.05 \frac{dz}{dt} + 0.06 \frac{dy}{dt} + 0.5h + 0.02 \frac{dh}{dt} \\
 0 &= -0.05 \frac{dx}{dt} + 0.5f + 0.02 \frac{df}{dt} \\
 w(628 - \omega) + 3(-0.22xy + 0.05zf - 0.05xh) &= 100 \frac{d\omega}{dt} \\
 0.11 \frac{dm}{dt} &= 10(202.92 - m)
 \end{aligned}$$

$$11 \frac{dw}{dt} = 10(10.487 - w)$$

$$\omega(0) = 313.$$

$$x(0) = 48.395$$

$$z(0) = 29.184$$

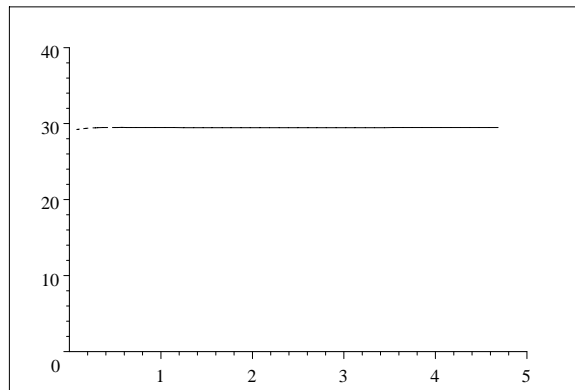
$$y(0) = 100.$$

$$m(0) = 200.$$

$$w(0) = 10.14$$

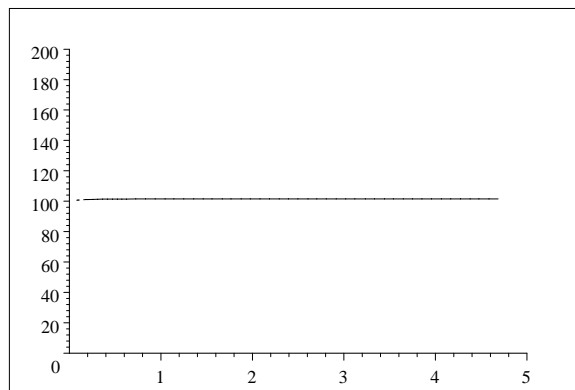
$$h(0) = 0$$

$$f(0) = 0$$



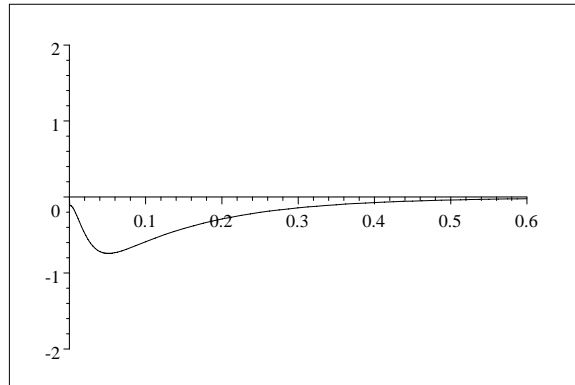
$$I_{d(\infty)} = 29.597A$$

Fig.3.5. Variația în timp a curentului statoric I_d



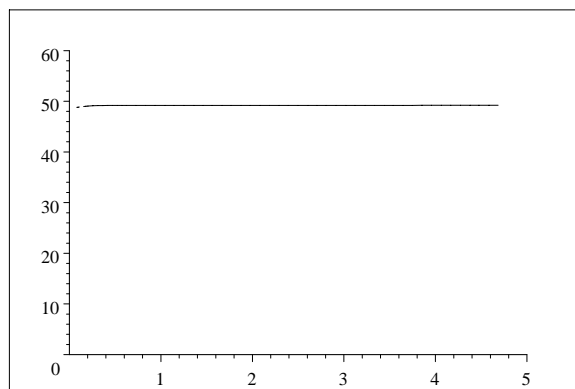
$$I_{E(\infty)} = 101.46A$$

Fig.3.6. Variația în timp a curentului de excitație I_E



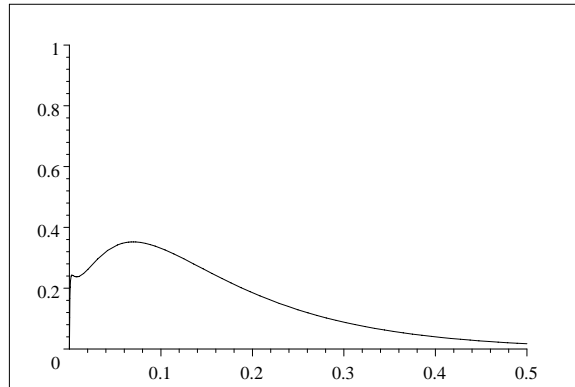
$$I_{D(\infty)} = 0$$

Fig.3.7. Variația în timp a curentului de amortizare I_D



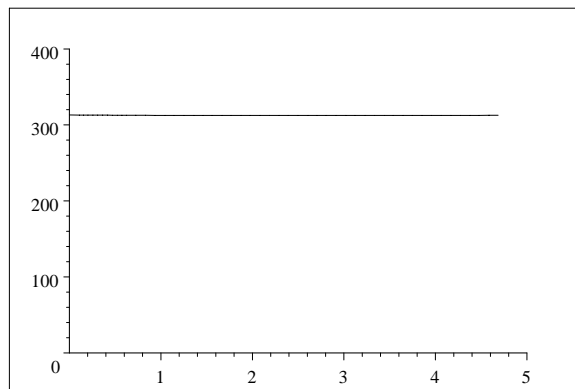
$$I_{q(\infty)} = 49.267A$$

Fig.3.8. Variația în timp a curentului statoric I_q



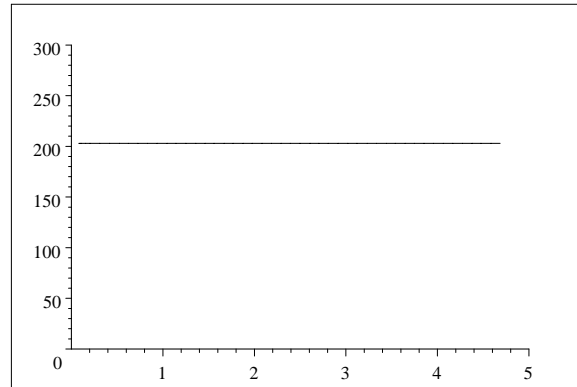
$$I_{Q(\infty)} = 0$$

Fig.3.9. Variația în timp a curentului de amortizare I_Q



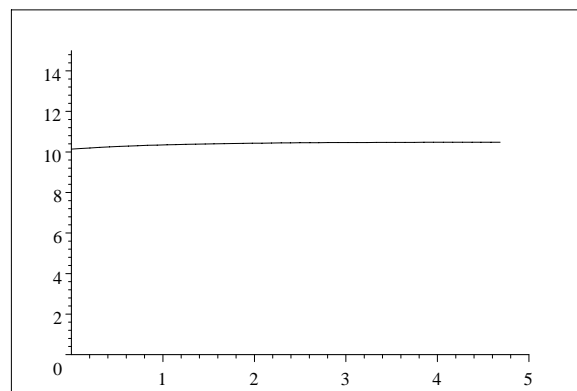
$$\omega_{(\infty)} = 313.41 \text{ rad/s}$$

Fig.3.10. Variația în timp a vitezei unghiulare ω



$$U_{E(\infty)} = 202.92V$$

Fig.3.11. Variația în timp a tensiunii de excitație U_E



$$K_{TGS(\infty)} = 10.487$$

Fig.3.12. Variația în timp a factorului de cuplu K_{TGS}

Condițiile finale rezultate din sistemul obținut din anularea derivatelor sunt:

$$104.34z - 0.01\omega x = 0.19\omega x$$

$$104.34x + 0.01\omega z = -0.19\omega z + 0.22\omega y$$

$$m = 2y$$

$$w(628 - \omega) + 3(-0.22xy) = 0$$

$$0 = 10(202.92 - m)$$

$$0 = 10(10.487 - w)$$

Solution is: $\{w = 10.487, y = 101.46, m = 202.92, \omega = 313.41, x = 49.267, z = 29.597\}$

$$I_E = 101.46[A];$$

$$K_{GS} = 10.487[Nms/rad]$$

Se observă că sistemul **TURBINĂ - GS - SARCINĂ** funcționează în regim autonom **dinamic stabil deoarece toate mărimile se stabilizează la valorile finale.**

3.1.2. Stabilitatea dinamică prin controlul tensiunii și frecvenței la sistemul **TURBINĂ - GS + GA - SARCINĂ**

Sistemul **TURBINĂ - GS + GA - SARCINĂ** funcționează în regim autonom obținându-se :

- puterea activă de la cele două generatoare : **GS + GA** și
- puterea reactivă numai de la generatorul **GS,**

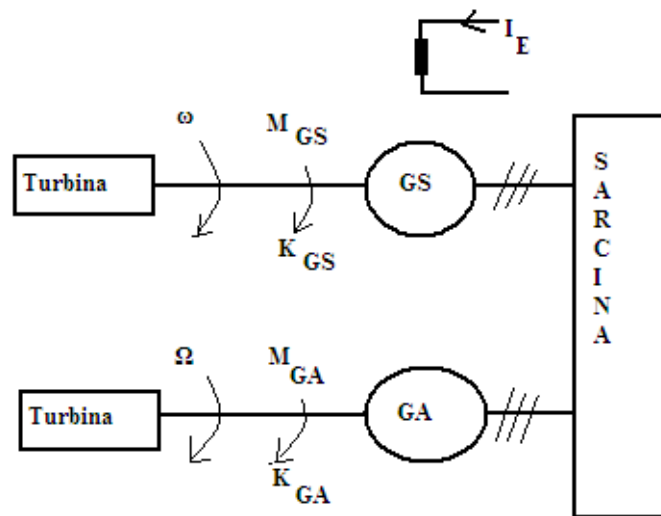
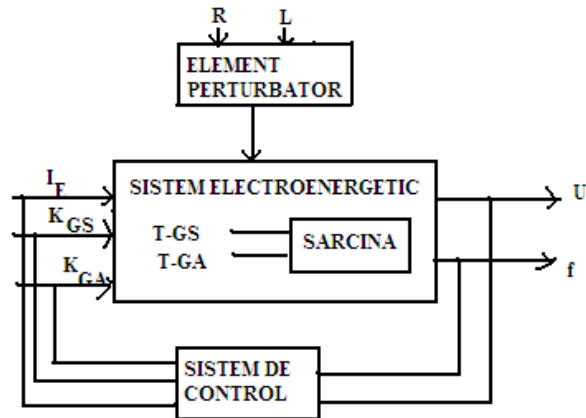


Fig.3.13. Sistem **TURBINĂ - GS + GA - SARCINĂ**

Mărimile de intrare sunt :

- curentul de excitație : I_E ;
- cuplul la arborele GS : K_{GS} ;
- cuplul la arborele GA : K_{GA} .

Fig.3.14. Sistem de control la sistemul **T - GS + GA - SARCINĂ**

Parametrii generatorului sincron **GS** :

$$P_N = 1[MW]$$

$$U = 6000[V]$$

$$\omega = 314[\frac{rad}{s}]$$

$$U_E = 110[V]$$

$$P_{EX} = (1.1\%)P_N$$

$$I_E U_E = 1000000 \times 0.011 \Rightarrow I_E = 100[A]$$

$$\omega M_E I_E \cos 30 = 6000 \Rightarrow M_E = 0.22[H]$$

$$\frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{X_l}{U} \Rightarrow L_{d,q} = 0.19[H]$$

$$L_E L_d < M_E \Rightarrow L_E = 0.31[H]$$

$$L_D = L_Q = 0.02[H]$$

$$M_{ED}^2 < L_E L_D \Rightarrow M_{ED} = 0.06[H]$$

$$M_{Dd}^2 < L_D L_d \Rightarrow M_{Dd} = M_Q = 0.05[H]$$

deci:

$$M_D = M_Q = 0.05[H]$$

$$M_{ED} = 0.06[H]$$

$$M_E = 0.22[H]$$

$$L_d = L_q = 0.19[H]$$

$$L_D = L_Q = 0.02[H]$$

$$L_E = 0.31[H]$$

$$R_E = 2[\Omega]$$

$$R_D = R_Q = 0.5[\Omega]$$

$$J = 100[kgm^2]$$

Parametrii generatorului asincron **GA** :

$$P_N = 1[MW]$$

$$U = 6000[V]$$

$$I_N = 60[A]$$

$$L_1 = L_2 = 0.7[H]$$

$$M = 0.6[H]$$

$$R = 1.14[\Omega]$$

$$J = 100[kgm^2]$$

Algoritmul de reglare este asemănător cazului precedent.

Etapele de control sunt :

1. Etapa I .

În punctul inițial la coeficienții de cuplu dați: K_{GS} la **GS** și K_{GA} la **GA** și la curentul de excitație I_E cunoscut, pentru tensiunea U și frecvența f cunoscute, se obțin necunoscutele R și L , (sarcina), din sistemul :

DATE : I_E, K_{GS}, K_{GA}, U

NECUNOSCUTE : R, L (sarcina)

Generator sincron + turbină

$$\underline{GS + T_{GS}}$$

$$U_d = \omega L I_q$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{0GS} - \omega)$$

Generator asincron + turbină

$$\underline{GA + T_{GA}}$$

$$U_d = -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr}$$

$$U_q = \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr}$$

$$0 = -M s \omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s \omega i_{qr}$$

$$0 = M s \omega i_d + L_2 s \omega i_{dr} + R_2 i_{qr}$$

$$p_{1GA} M (i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) = K_{TGA} [\omega_{0GA} - \omega(1-s)]$$

sarcina

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L = U_d$$

$$(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R = U_q$$

sau

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L = \omega L I_q$$

$$(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$p_{1GS} M_E I_E I_q = K_{TGS} (\omega_{0GS} - \omega)$$

$$(I_d - i_d)R - (I_q - i_q)\omega L = -\omega L_1 i_q - \omega M i_{qr}$$

$$\begin{aligned}
(I_d - i_d)\omega L + (I_q - i_q)R &= \omega L_1 i_d + \omega M i_{dr} \\
-Ms\omega i_q + R_2 i_{dr} - L_2 s\omega i_{qr} &= 0 \\
Ms\omega i_d + L_2 s\omega i_{dr} + R_2 i_{qr} &= 0 \\
p_{1GA}M(i_q i_{dr} - i_d i_{qr}) &= K_{TGA}[\omega_{0GA} - \omega(1-s)] \\
U^2 &= U_d^2 + U_q^2 \\
\omega &= 2\pi f
\end{aligned}$$

Notății:

$$a = i_q$$

$$g = i_d$$

$$c = i_{qr}$$

$$b = i_{dr}$$

$$z = I_d$$

$$x = I_q$$

$$y = I_E$$

$$R + j\omega L = \text{sarcina}$$

alunecarea la GA:

$$s = \frac{\omega - \Omega}{\omega}$$

puterea activă la GA:

$$p = U_d i_d + U_q i_q = (R(z - g) - (x - a)\omega L)g + (R(x - a) + (z - g)\omega L)a$$

puterea reactivă la GA:

$$q = U_q i_d - U_d i_q = (R(x - a) + (z - g)\omega L)g - (R(z - g) - (x - a)\omega L)a$$

puterea activă la GS:

$$P = U_d I_d + U_q I_q = (R(z - g) - (x - a)\omega L)z + (R(x - a) + (z - g)\omega L)x$$

puterea reactivă la GS:

$$Q = U_q I_d - U_d I_q = (R(x - a) + (z - g)\omega L)z - (R(z - g) - (x - a)\omega L)x$$

cuplul la GA:

$$m = p_1 M(i_q i_{dr} - i_d i_{qr})3 = 0.6(gc - ab)3$$

cuplul la GS:

$$M = p_1 M_E I_E I_q = 0.22xy3$$

tensiunea în sistem:

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = \sqrt{(R(z - g) - (x - a)\omega L)^2 + (R(x - a) + (z - g)\omega L)^2}$$

curentul statoric la GS:

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = W = \sqrt{x^2 + z^2}$$

curentul statoric la GA:

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = w = \sqrt{a^2 + g^2}$$

La generatorul asincron funcționând la o rețea fixă, de frecvență și tensiune dată,

curenții sunt:

$$\begin{aligned} 6000 &= -\omega(0.7a + 0.6c) \\ 0 &= \omega(0.7g + 0.6b) \\ 1.14b &= \omega(0.6sa + 0.7sc) \\ 1.14c &= -\omega(0.6sg + 0.7sb) \\ M &= 0.6(ab - gc) \\ s &= -0.01 \\ \omega &= 314 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = 314.0, s = -0.01, g = -30.649, M = -585.64, b = 35.757, \\ c = 18.291, a = -42.975 \end{array} \right\}$$

adică valori apropiate de valorile nominale (în acest fel am verificat corectitudinea parametrilor).

La egalitatea cuplurilor de la arbore la cele două generatoare

$$\mathbf{M}_{GA} = \mathbf{M}_{GS} = 2000[nm]$$

și la

$$\begin{aligned} U_N &= 5900[V] \\ \omega &= 304[rad/s] \\ f &= 40.48[Hz] \end{aligned}$$

se obțin valorile sarcinii **R** și **L** din sistemul complet **GS+GA** :

$$\begin{aligned} U &= 5900[V] \\ \omega &= 304 \\ 5900^2 &= (R(z-g) - (x-a)\omega L)^2 + (R(x-a) + (z-g)\omega L)^2 \\ R(z-g) - (x-a)\omega L &= -\omega(0.7a + 0.6c) \\ R(x-a) + (z-g)\omega L &= \omega(0.7g + 0.6b) \\ 1.14b &= \omega(0.6sa + 0.7sc) \\ 1.14c &= -\omega(0.6sg + 0.7sb) \\ C(640 - \omega + \omega s) &= 0.6(gc - ab)3 \\ R(z-g) - (x-a)\omega L &= 0.19\omega x \\ R(x-a) + (z-g)\omega L &= -0.19\omega z + 0.22\omega y \\ D(628 - \omega) &= 0.22xy3 \\ \Omega &= \omega(1 - s) \\ m &= M \\ m &= 2000 \\ y &= 150 \\ m &= 0.6(gc - ab)3 \\ M &= 0.22xy3 \\ U &= \sqrt{(R(z-g) - (x-a)\omega L)^2 + (R(x-a) + (z-g)\omega L)^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p &= (R(z-g) - (x-a)\omega L)g + (R(x-a) + (z-g)\omega L)a \\
 q &= (R(x-a) + (z-g)\omega L)g - (R(z-g) - (x-a)\omega L)a \\
 P &= (R(z-g) - (x-a)\omega L)z + (R(x-a) + (z-g)\omega L)x \\
 Q &= (R(x-a) + (z-g)\omega L)z - (R(z-g) - (x-a)\omega L)x \\
 w &= \sqrt{a^2 + g^2} \\
 W &= \sqrt{x^2 + z^2} \\
 T &= \omega L[(z-g)^2 + (x-a)^2]
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left. \begin{aligned}
 C &= 6.0204, w = 59.82, q = 2.8895 \times 10^5, R = 79.699, T = 1.1288 \times 10^5, \\
 s &= -1.2491 \times 10^{-2}, L = 0.07301, b = -16.375, a = -43.358, g = 41.213, \\
 c &= 44.187, \Omega = 307.80, P = 2.0267 \times 10^5, W = 76.279, m = 2000.0, \\
 U &= 5900.0, z = 73.555, Q = 4.0183 \times 10^5, p = -2.0267 \times 10^5, D = 6.1728, \\
 M &= 2000.0, \omega = 304.0, x = 20.202, y = 150.0
 \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 R &= 79.699[\Omega] \\
 L &= 0.07301[H]
 \end{aligned}$$

La etapa I, în sistem mărimile care se reglează au valorile:

$$\begin{aligned}
 I_E = y &= 150[A] \\
 K_{GS} = D &= 6.1728 \\
 K_{GA} = C &= 6.0204 \\
 U &= 5900[V] \\
 \omega &= 304[rad/s]
 \end{aligned}$$

Pentru sarcină s-au obținut soluțiile:

$$\begin{aligned}
 R &= 79.699[\Omega] \\
 L &= 0.07301[H]
 \end{aligned}$$

2. Etapa a-II-a .

Se impune ca cele două generatoare să se încarce în mod proporțional cu puterile lor nominale (α - raportul dintre puterile nominale ale celor două generatoare).

Încărcarea proporțională cu puterea la cele două generatoare impune condiția:

$$\frac{K_{TGS1}(\omega_{0GS1} - \omega)\omega}{P_{1GS1}^2 P_{NGS1}} = \frac{K_{TGS2}(\omega_{0GS2} - \omega(1-s))\omega(1-s)}{P_{1GS2}^2 P_{NGS2}}$$

sau la aceeași putere se obține:

$$w_1(\omega_{01} - \omega) = w_2(\omega_{02} - \omega(1-s))(1-s)$$

DATE : $U = U_N$; $f = f_N$

NECUNOSCUTE : I_E, K_{GS}, K_{GA}

Fiind impuse valorile tensiunii U și frecvenței f , la valorile nominale, sarcina R , L fiind cunoscută din etapa precedentă, se obțin mărimile reglate

- I_E - curentul de excitație;

$-K_{GS}, K_{GA}$ - factorul de cuplu;
din sistemul :

$$\begin{aligned} \omega &= 314 \\ R &= 79.699 \\ L &= 0.07301 \\ 6000^2 &= (R(z-g) - (x-a)\omega L)^2 + (R(x-a) + (z-g)\omega L)^2 \\ R(z-g) - (x-a)\omega L &= -\omega(0.7a + 0.6c) \\ R(x-a) + (z-g)\omega L &= \omega(0.7g + 0.6b) \\ 1.14b &= \omega(0.6sa + 0.7sc) \\ 1.14c &= -\omega(0.6sg + 0.7sb) \\ C(640 - \omega + \omega s) &= 0.6(gc - ab)3 \\ R(z-g) - (x-a)\omega L &= 0.19\omega x \\ R(x-a) + (z-g)\omega L &= -0.19\omega z + 0.22\omega y \\ D(628 - \omega) &= 0.22xy3 \\ \Omega &= \omega(1 - s) \\ m &= M \\ m &= 0.6(gc - ab)3 \\ M &= 0.22xy3 \\ U &= \sqrt{(R(z-g) - (x-a)\omega L)^2 + (R(x-a) + (z-g)\omega L)^2} \\ p &= (R(z-g) - (x-a)\omega L)g + (R(x-a) + (z-g)\omega L)a \\ q &= (R(x-a) + (z-g)\omega L)g - (R(z-g) - (x-a)\omega L)a \\ P &= (R(z-g) - (x-a)\omega L)z + (R(x-a) + (z-g)\omega L)x \\ Q &= (R(x-a) + (z-g)\omega L)z - (R(z-g) - (x-a)\omega L)x \\ w &= \sqrt{a^2 + g^2} \\ W &= \sqrt{x^2 + z^2} \\ T &= \omega L[(z-g)^2 + (x-a)^2] \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} U = 6000.0, m = 1992.9, q = 3.0158 \times 10^5, W = 78.393, w = 61.114, \\ T = 1.2 \times 10^5, M = 1992.9, s = -1.2914 \times 10^{-2}, C = 6.1902, D = 6.3468, \\ \Omega = 318.05, Q = 4.2158 \times 10^5, P = 2.0859 \times 10^5, p = -2.0859 \times 10^5, \\ \omega = 314.0, R = 79.699, L = 0.07301, a = -44.09, \\ x = 20.055, g = 42.321, z = 75.784, b = -18.166, y = 150.56, c = 45.088 \end{array} \right.$$

Fiind date $U = U_N$; $f = f_N$, se obțin valorile curentului de excitație \mathbf{I}_E și ale factorilor de cuplu : \mathbf{K}_{GS} și \mathbf{K}_{GA}

$$\begin{aligned}
 I_E &= y = 150.56[A] \\
 K_{GS} &= D = 6.3468 \\
 K_{GA} &= C = 6.1902 \\
 U &= 6000[V] \\
 \omega &= 314[rad/s]
 \end{aligned}$$

3. Etapa a-III-a .

Realizarea valorilor de cuplu K_{GS} și K_{GA} și a curentului de excitație I_E prin folosirea celor trei reglatoare :

VALORI PRESCRISE : CUPLURILE : K_{GS} , K_{GA} , CURENT DE EXCITAȚIE I_E

ERORI : $\Delta U = U_N - U$ (tensiune);

$\Delta f = f_N - f$ (frecvența) sau

$\Delta \omega = \omega_N - \omega$

- regulatorul pe excitație:

$$KT_i \frac{d(U_{E(\infty)} - U_E)}{dt} + K(U_{E(\infty)} - U_E) = T_i \frac{dU_E}{dt}$$

- regulatorul de cuplu la **GS**:

$$KT_i \frac{d(K_{GS(\infty)} - K_{GS})}{dt} + K(K_{GS(\infty)} - K_{GS}) = T_i \frac{dK_{GS}}{dt}$$

-regulatorul de cuplu la **GA**:

$$KT_i \frac{d(K_{GA(\infty)} - K_{GA})}{dt} + K(K_{GA(\infty)} - K_{GA}) = T_i \frac{dK_{GA}}{dt}$$

La regulatorul pe **excitație** datele sunt : $K = 10; T_i = 0.01; U_E = R_E I_{E(\infty)} = 2 * 150.56 = 301$ și se obține

$$0.1 \frac{d(301 - U_E)}{dt} + 10(301 - U_E) = 0.01 \frac{dU_E}{dt}$$

sau

$$10(301 - U_E) = 0.11 \frac{dU_E}{dt}$$

La regulatorul de cuplu de la **turbina-GS** datele sunt : $K = 10; T_i = 1, K_{GS(\infty)} = 6.3468$ și se obține

$$10 \frac{d(6.3468 - K_{GS})}{dt} + 10(6.3468 - K_{GS}) = \frac{dK_{GS}}{dt}$$

sau

$$10(6.3468 - K_{GS}) = 11 \frac{dK_{GS}}{dt}$$

La regulatorul de cuplu de la **turbina-GA** datele sunt : $K = 10; T_i = 1, K_{GA(\infty)} = 6.1902$ și se obține

$$10 \frac{d(6.1902 - K_{GA})}{dt} + 10(6.1902 - K_{GA}) = \frac{dK_{GA}}{dt}$$

sau

$$10(6.1902 - K_{GA}) = 11 \frac{dK_{GA}}{dt}$$

4. Etapa a-IV-a.

Stabilitatea dinamică se analizează prin observarea fenomenului tranzitoriu al

tregerii din punctul inițial în cel final, prin rezolvarea numerică a sistemului de ecuații diferențiale :

GS

$$\begin{aligned}
 U_d &= -L_d \frac{dI_d}{dt} + \omega L_q I_q + M_E \frac{dI_E}{dt} + M_D \frac{dI_D}{dt} - \omega M_Q I_Q \\
 U_q &= -\omega L_d I_d - L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega M_E I_E + \omega M_D I_D + M_Q \frac{dI_Q}{dt} \\
 U_E &= -M_E \frac{dI_d}{dt} + R_E I_E + L_E \frac{dI_E}{dt} + M_{ED} \frac{dI_D}{dt} \\
 0 &= -M_D \frac{dI_d}{dt} + M_{ED} \frac{dI_E}{dt} + R_D I_D + L_D \frac{dI_D}{dt} \\
 0 &= -M_Q \frac{dI_q}{dt} + R_Q I_Q + L_Q \frac{dI_Q}{dt} \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= M_{turbina} - (M_E I_q I_E - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D) \\
 T_i \frac{dU_E}{dt} &= K T_i \frac{d(U_{(\infty)} - U_E)}{dt} + K(U_{(\infty)} - U_E) \\
 T_i \frac{dK_{GS}}{dt} &= K T_i \frac{d(K_{GS(\infty)} - K_{GS})}{dt} + K(K_{GS(\infty)} - K_{GS})
 \end{aligned}$$

GA

$$\begin{aligned}
 U_d &= R_1 I_d + L_1 \frac{dI_d}{dt} - \omega_1 L_1 I_q + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_1 M I_{qr} \\
 U_q &= \omega_1 L_1 I_d + R_1 I_q + L_1 \frac{dI_q}{dt} + \omega_1 M I_{dr} + M \frac{dI_{qr}}{dt} \\
 0 &= M \frac{dI_d}{dt} - M(\omega_1 - \omega) I_q + R_2 I_{dr} + L_2 \frac{dI_{dr}}{dt} - L_2(\omega_1 - \omega) I_{qr} \\
 0 &= M(\omega_1 - \omega) I_d + M \frac{dI_q}{dt} + L_2(\omega_1 - \omega) I_{dr} + R_2 I_{qr} + L_2 \frac{dI_{qr}}{dt} \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= M_{turbina} - p_1 M (I_q I_{dr} - I_d I_{qr})
 \end{aligned}$$

sau având în vedere parametrii celor două regulatoare se obține sistemul general:

$$\begin{aligned}
 R(z - g) - \omega T(x - a) &= -0.19 \frac{dz}{dt} + 0.19 \omega x + 0.22 \frac{dy}{dt} + 0.05 \frac{dh}{dt} - 0.05 \omega f \\
 R(x - a) + \omega T(z - g) &= -0.19 \omega z - 0.19 \frac{dx}{dt} + 0.22 \omega y + 0.05 \omega h + 0.05 \frac{df}{dt} \\
 U_E &= -0.22 \frac{dz}{dt} + 2y + 0.31 \frac{dy}{dt} + 0.06 \frac{dh}{dt} \\
 0 &= -0.05 \frac{dz}{dt} + 0.06 \frac{dy}{dt} + 0.5h + 0.02 \frac{dh}{dt} \\
 0 &= -0.05 \frac{dx}{dt} + 0.5f + 0.02 \frac{df}{dt} \\
 w(628 - \omega) + 3(-0.22xy + 0.05zf - 0.05xh) &= 100 \frac{d\omega}{dt} \\
 R(z - g) - \omega T(x - a) &= 0.7 \frac{dg}{dt} - 0.7\omega a + 0.6 \frac{db}{dt} - 0.6\omega c \\
 R(x - a) + \omega T(z - g) &= 0.7\omega g + 0.7 \frac{da}{dt} + 0.6\omega b + 0.6 \frac{dc}{dt}
 \end{aligned}$$

$$0 = 0.6 \frac{dg}{dt} - 0.6s\omega a + 1.14b + 0.7 \frac{db}{dt} - 0.7s\omega c$$

$$0 = 0.6s\omega g + 0.6 \frac{da}{dt} + 0.7s\omega b + 1.14c + 0.7 \frac{dc}{dt}$$

$$0 = v(640 - \omega + \omega s) + 3(0.6ab - 0.6gc) + 100\omega \frac{ds}{dt} - (1 - s)100 \frac{d\omega}{dt}$$

$$0.11 \frac{dU_E}{dt} = 10(301 - U_E)$$

$$11 \frac{dK_{GS}}{dt} = 10(6.3468 - K_{GS})$$

$$11 \frac{dK_{GA}}{dt} = 10(6.1902 - K_{GA})$$

$$U_E(0) = 300$$

$$K_{GS}(0) = 6.17$$

$$K_{GA}(0) = 6.02$$

$$\omega(0) = 304$$

$$a(0) = -43.36$$

$$s(0) = -0.0125$$

$$g(0) = 41.21$$

$$c(0) = 44.19$$

$$b(0) = -16.37$$

$$x(0) = 20.202$$

$$z(0) = 73.55$$

$$y(0) = 150$$

$$h(0) = 0$$

$$f(0) = 0$$

Condițiile inițiale s-au dedus la etapa I:

$$U_E = m = 310[V]$$

$$I_E = y = 150[A]$$

$$K_{GS} = D = w = 6.1728$$

$$K_{GA} = C = v = 6.0204$$

$$U = 5900[V]$$

$$\omega = 304[rad/s]$$

$$R = 79.699[\Omega]$$

$$L = 0.07301[H]$$

Condițiile finale se obțin din sistemul:

$$79.699(z - g) - \omega 0.073(x - a) = 0.19\omega x$$

$$79.699(x - a) + \omega 0.073(z - g) = -0.19\omega z + 0.22\omega y$$

$$m = 2y$$

$$0 = w(628 - \omega) - 0.22xy3$$

$$79.699(z - g) - \omega 0.073(x - a) = -0.7\omega a - 0.6\omega c$$

$$79.699(x - a) + \omega 0.073(z - g) = 0.7\omega g + 0.6\omega b$$

$$\begin{aligned} 0 &= -0.6s\omega a + 1.14b - 0.7s\omega c \\ 0 &= 0.6s\omega g + 0.7s\omega b + 1.14c \\ 0 &= v(640 - \omega + \omega s) + 0.6ab3 - 0.6gc3 \\ 301 &= m \\ 6.3468 &= w \\ 6.1902 &= v \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 150.5, v = 6.1902, w = 6.3468, c = 45.1, b = -18.240, z = 75.838, g = 42.349, \\ s = -1.2935 \times 10^{-2}, a = -44.096, x = 20.036, \omega = 314.42, m = 301.0 \end{array} \right\}$$

$$U = 6000$$

$$\mathbf{I_E = 150.5}$$

$$U_E = 301$$

$$\mathbf{K_{GS} = 6.3468}$$

$$\mathbf{K_{GA} = 6.1902}$$

$$R = 79.699$$

$$L = 0.073$$

$$\omega = \mathbf{314.42}$$

$$I_q = 20.036$$

$$I_d = 75.838$$

$$i_q = -44.096$$

$$i_{qr} = 45.1$$

$$i_d = 42.349$$

$$i_{dr} = -18.240$$

$$s = -0.0129$$

Numeric, sistemul general este:

$$79.699(z - g) - \omega 0.073(x - a) = -0.19 \frac{dz}{dt} + 0.19\omega x + 0.22 \frac{dy}{dt} + 0.05 \frac{dh}{dt} - 0.05\omega f$$

$$79.699(x - a) + \omega 0.073(z - g) = -0.19\omega z - 0.19 \frac{dx}{dt} + 0.22\omega y + 0.05\omega h + 0.05 \frac{df}{dt}$$

$$m = -0.22 \frac{dz}{dt} + 2y + 0.31 \frac{dy}{dt} + 0.06 \frac{dh}{dt}$$

$$0 = -0.05 \frac{dz}{dt} + 0.06 \frac{dy}{dt} + 0.5h + 0.02 \frac{dh}{dt}$$

$$0 = -0.05 \frac{dx}{dt} + 0.5f + 0.02 \frac{df}{dt}$$

$$w(628 - \omega) + 3(-0.22xy + 0.05zf - 0.05xh) = 100 \frac{d\omega}{dt}$$

$$79.699(z - g) - \omega 0.073(x - a) = 0.7 \frac{dg}{dt} - 0.7\omega a + 0.6 \frac{db}{dt} - 0.6\omega c$$

$$79.699(x - a) + \omega 0.073(z - g) = 0.7\omega g + 0.7 \frac{da}{dt} + 0.6\omega b + 0.6 \frac{dc}{dt}$$

$$0 = 0.6 \frac{dg}{dt} - 0.6s\omega a + 1.14b + 0.7 \frac{db}{dt} - 0.7s\omega c$$

$$0 = 0.6s\omega g + 0.6 \frac{da}{dt} + 0.7s\omega b + 1.14c + 0.7 \frac{dc}{dt}$$

$$0 = v(640 - \omega + \omega s) + 3(0.6ab - 0.6gc) + 100\omega \frac{ds}{dt} - (1 - s)100 \frac{d\omega}{dt}$$

$$0.11 \frac{dm}{dt} = 10(301 - m)$$

$$11 \frac{dw}{dt} = 10(6.3468 - w)$$

$$11 \frac{dv}{dt} = 10(6.1902 - v)$$

$$m(0) = 301$$

$$v(0) = 6.02$$

$$w(0) = 6.1728$$

$$\omega(0) = 304$$

$$a(0) = -43.36$$

$$s(0) = -0.0125$$

$$g(0) = 41.21$$

$$c(0) = 44.19$$

$$b(0) = -16.37$$

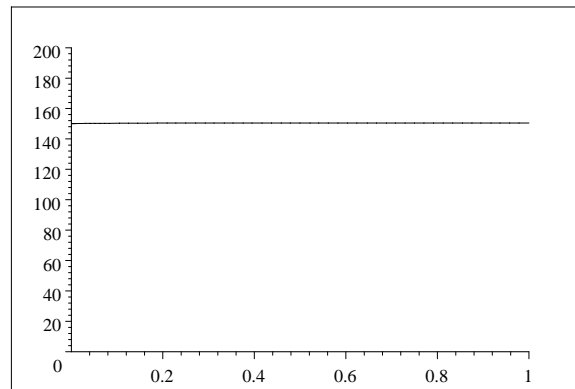
$$x(0) = 20.202$$

$$z(0) = 73.55$$

$$y(0) = 150$$

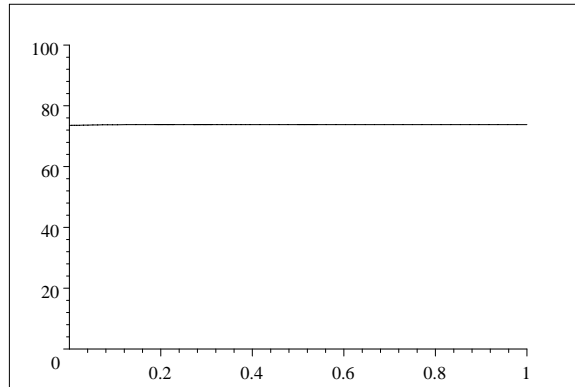
$$h(0) = 0$$

$$f(0) = 0$$



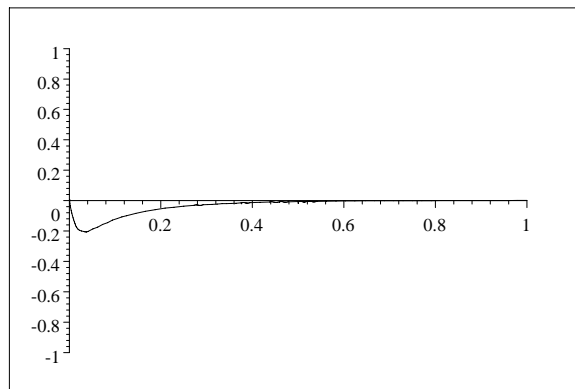
$$I_{E(\infty)} = 150.5A$$

Fig.3.15. Variația în timp a curentului de excitație I_E



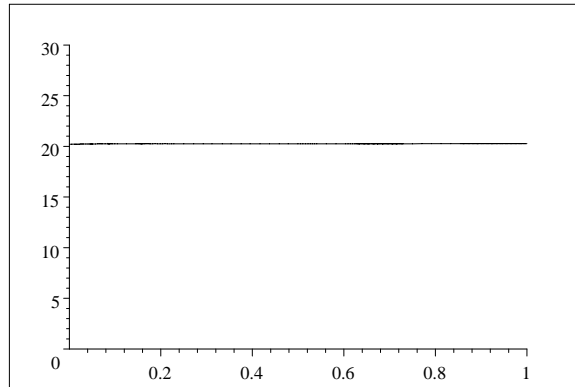
$$I_{d(\infty)} = 75.838A$$

Fig.3.16. Variația în timp a curentului statoric I_d la GS



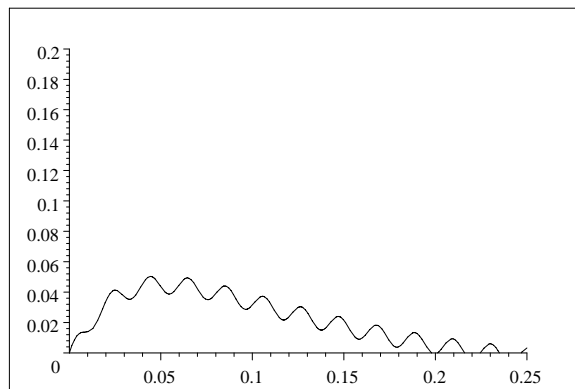
$$I_{D(\infty)} = 0$$

Fig.3.17. Variația în timp a curentului de amortizare I_D la GS



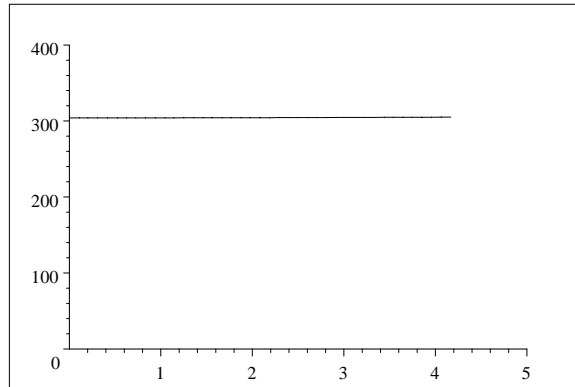
$$I_{q(\infty)} = 20.036A$$

Fig.3.18 Variația în timp a curentului statoric I_q la GS



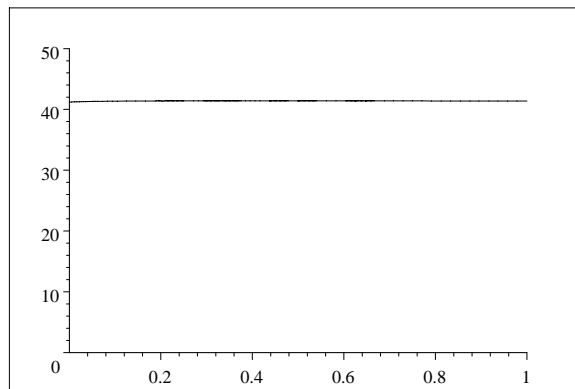
$$I_{Q(\infty)} = 0$$

Fig.3.19 Variația în timp a curentului de amortizare I_Q la GS



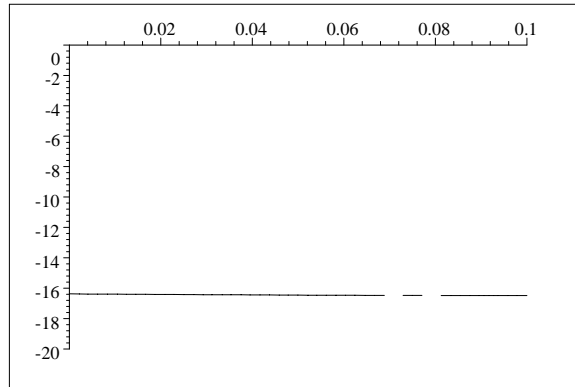
$$\omega_{(\infty)} = 314.42 \text{ rad/s}$$

Fig.3.20 Variația în timp a vitezei unghiulare ω la GS



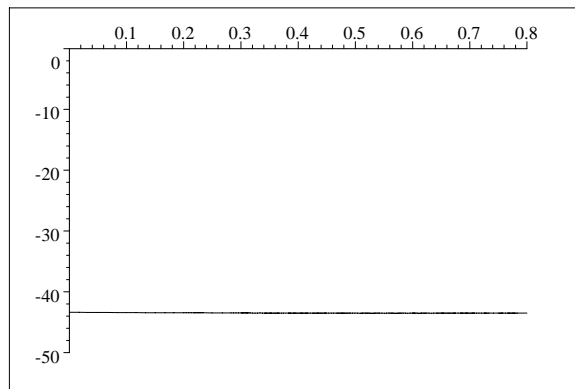
$$i_{d(\infty)} = 42.349 \text{ A}$$

Fig.3.21 Variația în timp a curentului statoric i_d la GA



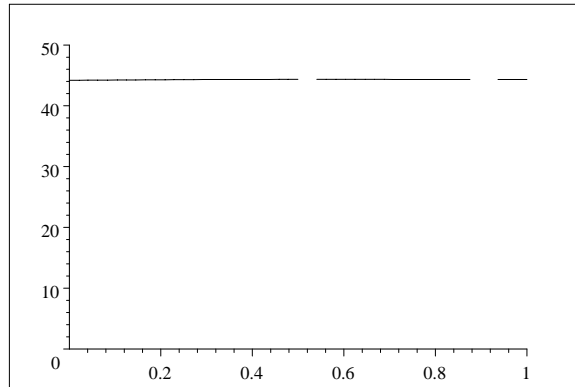
$$i_{dr(\infty)} = -18.240A$$

Fig.3.22 Variația în timp a curentului rotoric i_{dr} la GA



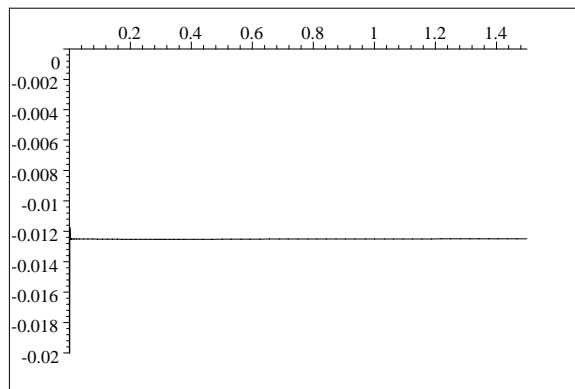
$$i_{q(\infty)} = -44.096A$$

Fig.3.23 Variația în timp a curentului statoric i_q la GA



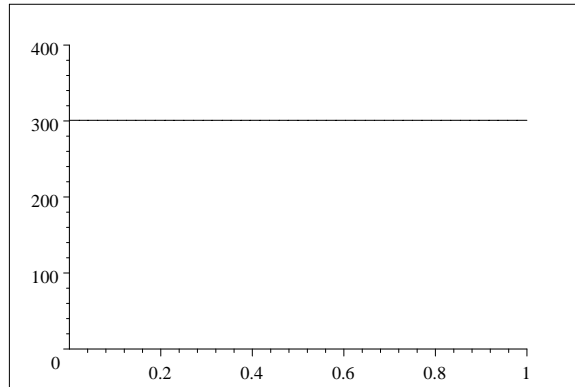
$$i_{qr(\infty)} = 45.1A$$

Fig.3.24 Variația în timp a curentului rotoric i_{qr} la GA



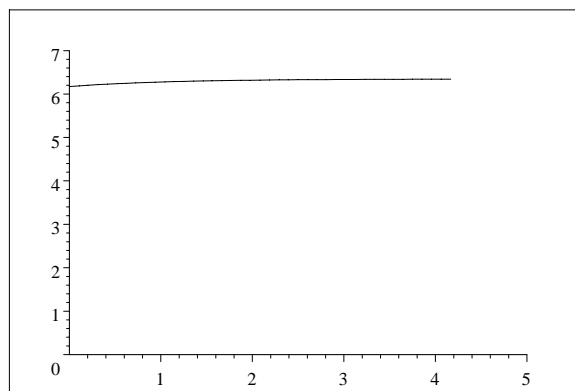
$$s_{(\infty)} = -0.0129$$

Fig.3.25 Variația în timp a alunecării s la GS



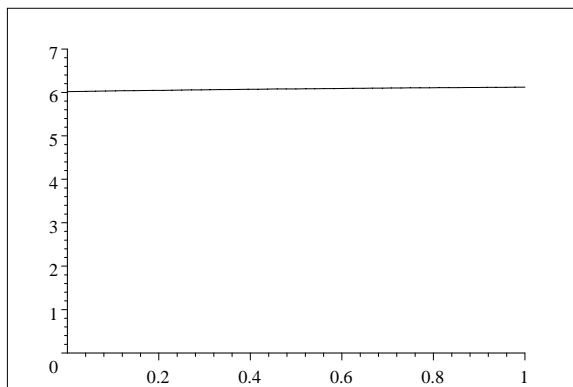
$$U_{E(\infty)} = 301V$$

Fig.3.26 Variația în timp a tensiunii de excitație U_E la GS



$$K_{TGS(\infty)} = 6.3468$$

Fig.3.27 Variația în timp a factorului de cuplu K_{TGS} la GS



$$K_{TGA(\infty)} = 6.1902$$

Fig.3.28 Variația în timp a factorului de cuplu K_{TGA} la GA

Curentul de amortizare I_Q la GS este singura mărime ce prezintă mici oscilații, după care se stabilizează la valorile finale.

Se observă că sistemul **TURBINĂ – GS+GA – SARCINĂ** funcționează în regim autonom **dinamic stabil deoarece toate mărimile se stabilizează la valorile finale.**

3.2. Concluzii

Stabilitatea dinamică, la cele două sisteme GS + SARCINA, respectiv GS + GA + SARCINA, se poate analiza din simulările numerice a celor două sisteme date prin graficele din figurile (3.5 – 3.12) – pentru GS + SARCINA, respectiv figurile 3.15 – 3.28 – pentru GS + GA + SARCINĂ.

În ambele cazuri sistemele sunt **stabile dinamic** la modificări ale sarcinii în limite largi.

Aceasta este foarte important de subliniat deoarece un GS nu funcționează dinamic stabil la variații mari ale sarcinii, datorată apariției **fenomenului de pendulare care apare la un GS cuplat la un sistem rigid (de tensiune și frecvență date).**

La funcționarea **GS în regim autonom sau în paralel cu un GA, nu apare fenomenul de pendulare** ce limitează încărcarea dinamică a GS.

Curenții din colivia de amortizare la GS în cazul II –GS + GA + SARCINĂ – prezintă unele mici oscilații, cu precădere cei din axa q (axa transversală).

Durata procesului tranzitoriu, din punct de vedere electric, este de două ori mai mare în cazul I – GS + SARCINA.

În general în cazul analizat atingerea valorilor finale se face asimptotic, fără oscilații, spre deosebire de sistemul cu tensiune și frecvență constante unde orice modificare a sarcinii introduce oscilații.

Inductanțele și rezistențele din sistem (ale generatoarelor respectiv sarcinii) sunt elemente **amortizoare în sistem alături de GA care în ansamblu său este un element de atenuare a oscilațiilor care apar ca urmare a modificării sarcinii electrice. Aceasta face ca procesul tranzitoriu să dureze de două ori mai puțin în sistemele cu GA.**

Reglarea tensiunii și frecvenței la valorile nominale se realizează prin calculul sarcinii electrice din sistem la un moment dat. Acest calcul se realizează având în vedere abaterile tensiunii și frecvenței de la valorile nominale, ca urmare a modificării sarcinii din sistem.

4. STABILITATEA GENERATOARELOR SINCRONE PRIN MĂSURAREA TENSIUNII ȘI FRECVENȚEI DIN SISTEM

Tensiunea de la bornele consumatorului electric și frecvența sunt elementele esențiale ale sistemului electroenergetic. În acest capitol valorile nominale ale tensiunii și ale frecvenței se compară cu cele măsurate la un moment dat și abaterile se transmit reguletoarelor de cuplu și de curent de excitație.

Stabilitatea dinamică este analizată având în vedere tocmai valorile reale ale tensiunii și frecvenței din sistem. Se evită, astfel, calculul sarcinii electrice existente la un moment dat, calculul care poate genera uneori erori prin modificarea parametrilor din sistem.

La finele capitolului se pot observa variabilele în timp ale tuturor mărimilor și timpul cât durează procesul tranzitoriu.

Comparativ cu sistemul clasic : GS debitând într-o rețea de tensiune și frecvență fixe, GS funcționând în regim insular prezintă o zonă a **stabilității dinamice** mult mai largă (practic pentru $R = (0 \div \infty)$, adică nelimitată).

Comportarea sistemului prin măsurarea

- tensiunii și
- frecvenței

și transmiterea celor două valori la reguletoarele PI, impunând controlul:

- curentului de excitație și al
- cuplului motor de la arborele GS.

Se poate evita calculul prin ecuații algebrice sau diferențiale a mărimilor ce se reglează, folosind în acest sens măsurarea directă a frecvenței și tensiunii în sistem.

4.1. Stabilitatea dinamică a sistemului la controlul frecvenței prin cuplul de la turbină

Din sistemul:

GS

$$U_d = \omega L I_q$$

$$U_q = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$I_E = I_{E(0)}$$

$$M_{elm} = p_1 M_E I_E I_q$$

sarcina

$$I_d R - I_q \omega L = U_d$$

$$I_d \omega L + I_q R = U_q$$

sau

$$I_d R - I_q \omega L_{sarc} = \omega L I_q$$

$$I_d \omega L_{sarc} + I_q R = -\omega L I_d + \omega M_E I_E$$

$$M_{elm} = p_1 M_E I_E I_q$$

rezultă pentru o sarcină pur rezistivă:

$$I_q = \frac{\omega R M_E I_E}{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$I_d = \frac{\omega^2 M_E I_E L}{R^2 + (\omega L)^2}$$

Se obține ecuația caracteristicii mecanice $\mathbf{M}_{elm}(\omega)$ sub forma:

$$\mathbf{M}_{elm} = \frac{p_1 (\mathbf{M}_E \mathbf{I}_E)^2 \omega \mathbf{R}}{\mathbf{R}^2 + \omega^2 \mathbf{L}^2}$$

Cuplul maxim rezultă pentru valoarea ω^* obținută din derivata funcției $M_{elm}(\omega)$:

$$\left(\frac{p_1 (M_E I_E)^2 \omega R}{R^2 + \omega^2 L^2} \right)' = 0$$

sau

$$R^2 = \omega^2 L^2$$

rezultând:

$$\omega^* = \pm \frac{R}{L}$$

Valoarea cuplului maxim este la $\omega = \omega^*$ și este dată de relația:

$$M_{\max} = \frac{p_1 (M_E I_E)^2}{2L}$$

Cuplul electromagnetic se poate pune sub forma:

$$M_{elm} = \frac{A \omega}{B^2 + \omega^2}$$

unde

$$A = \frac{p_1 (M_E I_E)^2 R}{L^2}$$

$$B = \frac{R}{L^2}$$

având o alătură așa ca în figura 4.1:

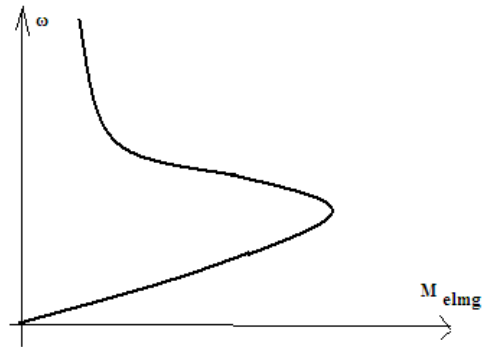


Fig.4.1 Variația cuplului la **GS** cu frecvența

Se observă dependența aproximativ liniară a frecvenței de cuplu în zona stabilă. Prin urmare, măririi cuplului se mărește frecvența în sistem.

Punctele de funcționare rezultate în urma intersecțiilor caracteristicilor mecanice ale **GS** și turbinei **T** sunt prezentate în figura 4.2:

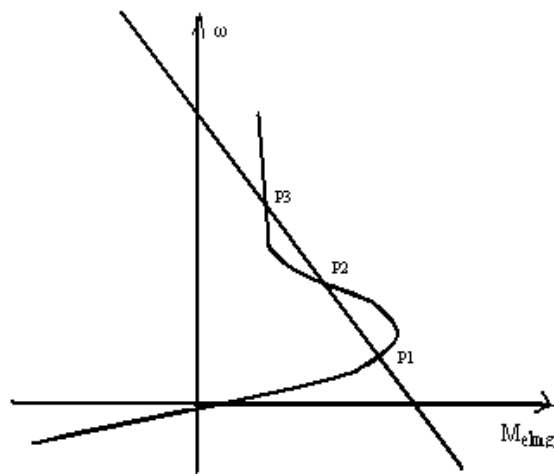


Fig.4.2 Funcționarea static stabilă a sistemului **T+GS**

Punctele de funcționare **P1**, **P2**, **P3** sunt unele static stabile, iar altele static instabile.

Folosind criteriul Hurwitz se demonstrează, prin liniarizare în zona de funcționare că punctele **P1** și **P3 sunt static stabile**, iar punctul de funcționare **P2 este**

instabil.

În zona **stabilă** prin mărirea cuplului la arbore, se mărește frecvența, astfel că regulatorul de cuplu are mărirea prescrisă frecvența. În acest fel, fără a mai calcula rezistența echivalentă în sistem și mărimile ce se reglează, se poate readuce **frecvența la valoarea nominală prin reglajul cuplului la arbore.**

Comportarea sistemului la controlul cuplurilor și a curentului de excitație prin măsurarea frecvenței se face folosind regulatoarele de tip PI.

Ecuția regulatorului de tip **PI** este :

$$KT_i \frac{dE_r}{dt} + KE_r = T_i \frac{d\beta}{dt}$$

unde :

K – factorul de amplificare al regulatorului ;

T_i – constanta de timp a regulatorului ;

E_r - eroarea mărimii de reglat:

$$E_r = f_N - f$$

f_N - frecvența nominală;

f - frecvența la un anumit moment de timp;

β - mărirea reglată, factorul de cuplu:

$$\beta = K_{GS}$$

Pentru regulatorul de la turbină ce modifică valoarea cuplului motor, ecuația devine

$$-KT_i \frac{df}{dt} + K(f_N - f) = T_i \frac{dK_{GS}}{dt}$$

sau având în vedere pulsația unghiulară $\omega = 2\pi f$, rezultă:

$$-KT_i \frac{d\omega}{dt} + K(\omega_N - \omega) = T_i \frac{dK_{GS}}{dt}$$

4.2. Stabilitatea dinamică a sistemului la controlul tensiunii prin curentul de excitație de la GS

În cazul regulatorului pe excitație ecuația sa se poate scrie sub forma :

$$-KT_i \frac{dU}{dt} + K(U_N - U) = T_i \frac{dU_E}{dt}$$

unde :

U_N – tensiune nominală ;

U_E - tensiunea pe excitație ($U_E = R_E I_E$ în regim staționar);

U – tensiunea la un moment dat.

Controlul tensiunii se bazează pe modificarea curentului de excitație așa cum se demonstrează în cele ce urmează:

Tensiunea la bornele **GS** are valoarea:

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$$

unde la o sarcină pur rezistivă

$$U_d = RI_d$$

$$U_q = RI_q$$

și deci:

$$U = R\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

Deoarece, așa cum se cunoaște din paragraful anterior, curenții I_d și I_q au valorile:

$$I_q = \frac{\omega RM_E I_E}{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$I_d = \frac{\omega^2 M_E I_E L}{R^2 + (\omega L)^2}$$

și deci tensiunea U se poate scrie sub forma:

$$\mathbf{U} = \frac{\omega \mathbf{R} M_E \mathbf{I}_E}{\sqrt{\mathbf{R}^2 + (\omega \mathbf{L})^2}}$$

Prin controlul lui I_E se poate readuce tensiunea în limitele impuse, deoarece așa cum se observă din relația de mai sus, tensiunea depinde liniar de curentul de excitație.

În varianta în care se elimină calculul mărimilor ce se reglează cu algoritmul precizat în capitolul anterior și se apelează la măsurarea directă a tensiunii din sistem, regulatorul pe excitație are ecuația:

$$-KT_i \frac{dU}{dt} + K(U_N - U) = T_i \frac{dU_E}{dt}$$

unde:

- tensiunea \mathbf{U} se cunoaște prin măsuratori experimentale;
- tensiunea \mathbf{U}_E este impusă la bornele excitației.

4.3 Tensiunea și frecvența la GS, în regim staționar

La $U=5900V$ și $\omega = 313[rad/s]$ din sistemul :

$$U = 5900$$

$$\omega = 313$$

$$Rz - x\omega L = 0.19\omega x$$

$$Rx + z\omega L = -0.19\omega z + 0.22\omega y$$

$$10.14(628 - \omega) = 0.22xy^3$$

$$y = 100$$

$$M = 0.22xy^3$$

$$\begin{aligned}
 U &= \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2} \\
 P &= (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x \\
 Q &= (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x \\
 T &= \omega L[(z)^2 + (x)^2] \\
 W &= \sqrt{x^2 + z^2}
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 100.0, U = 5900.0, \omega = 313.0, x = 48.395, M = 3194.1, P = 3.3325 \times 10^5, \\ W = 56.514, z = 29.184, R = 104.34, L = 1.1029 \times 10^{-2}, T = 11026., Q = 11026. \end{array} \right\}$$

se obține valoare sarcinii $R=104.34\Omega$ și $L=0.011H$

Problema se poate pune și invers, în sensul că dând valoare sarcinii $R=104.34\Omega$ și $L=0.011H$ se poate determina tensiunea și frecvența la care funcționează sistemul:

$$\begin{aligned}
 R &= 104.34 \\
 L &= 0.011029 \\
 Rz - x\omega L &= 0.19\omega x \\
 Rx + z\omega L &= -0.19\omega z + 0.22\omega y \\
 10.14(628 - \omega) &= 0.22xy^3 \\
 y &= 100 \\
 M &= 0.22xy^3 \\
 U &= \sqrt{(Rz - x\omega L)^2 + (Rx + z\omega L)^2} \\
 P &= (Rz - x\omega L)z + (Rx + z\omega L)x \\
 Q &= (Rx + z\omega L)z - (Rz - x\omega L)x \\
 T &= \omega L[(z)^2 + (x)^2] \\
 W &= \sqrt{x^2 + z^2}
 \end{aligned}$$

Solution is:

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 100.0, U = 5900.0, M = 3194.1, z = 29.185, W = 56.515, T = 11026., \\ R = 104.34, x = 48.396, P = 3.3325 \times 10^5, Q = 11026., L = 1.1029 \times 10^{-2}, \omega = 313.00 \end{array} \right.$$

Sistemul funcționează la frecvența

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{313}{2\pi} = 49.841[Hz]$$

și tensiunea

$$U = 5900[V]$$

4.4. Stabilitatea dinamică a sistemului GS+SARCINĂ

Reglajul de cuplu se face cunoscând frecvența (sau ω) din sistem.

Ecuțiile reguletoarelor

Ecuțiile regulatorului de cuplu la frecvența $f=50Hz$ ($\omega = 314rad/s$) este:

$$-10 \frac{d\omega}{dt} + 10(\omega_{(\infty)} - \omega) = \frac{dK_{GS}}{dt}$$

sau numeric:

$$-10 \frac{d\omega}{dt} + 10(314 - \omega) = \frac{dw}{dt}$$

Tensiunea este controlată prin măsurarea curentului de excitație.

Ecuția regulatorului de pe excitație pentru tensiunea nominală ($U=U_N$) se scrie sub forma:

$$-\frac{dI_E}{dt} + 10(I_{E(\infty)} - I_E) = 0.1 \frac{dU_E}{dt}$$

sau numeric:

$$-\frac{dy}{dt} + 10(101.46 - y) = 0.1 \frac{dm}{dt}$$

Sistemul poate fi observabil în timp, în cazul în care tensiunea este controlată prin măsurarea curentului de excitație, prin rezolvarea ecuațiilor diferențiale de mai jos.

Comportarea sistemului prin măsurarea

-curentului de excitație I_E (y) și a

-frecvenței f (sau ω)

și transmiterea celor două valori la regulatoarele PI, impunând controlul:

-curentului de excitație și al

-cuplului motor de la arborele GS.

se poate observa prin rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale, neliniar și neomogen.

Sistemul electromagnetic funcționează **dinamic stabil** într-o plajă largă de valori pentru sarcina electrică z .

Din acest motiv este mai avantajos de a funcționa în regim insular, comparativ cu funcționarea GS cuplat la o rețea de tensiune și frecvență fixe.

Stabilitatea dinamică este analizată prin sistemul de ecuații diferențiale alăturat:

$$104.34z - 0.01\omega x = -0.19 \frac{dz}{dt} + 0.19\omega x + 0.22 \frac{dy}{dt} + 0.05 \frac{dh}{dt} - 0.05\omega f$$

$$104.34x + 0.01\omega z = -0.19\omega z - 0.19 \frac{dx}{dt} + 0.22\omega y + 0.05\omega h + 0.05 \frac{df}{dt}$$

$$m = -0.22 \frac{dz}{dt} + 2y + 0.31 \frac{dy}{dt} + 0.06 \frac{dh}{dt}$$

$$0 = -0.05 \frac{dz}{dt} + 0.06 \frac{dy}{dt} + 0.5h + 0.02 \frac{dh}{dt}$$

$$0 = -0.05 \frac{dx}{dt} + 0.5f + 0.02 \frac{df}{dt}$$

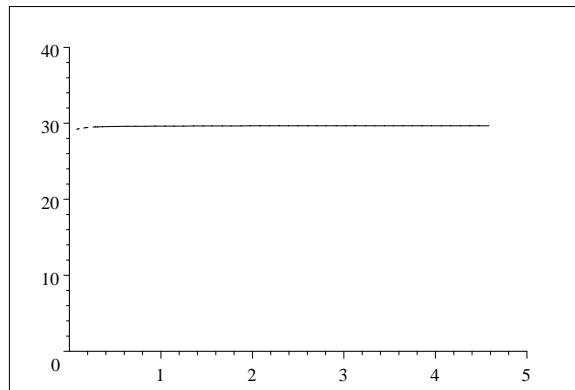
$$w(628 - \omega) + 3(-0.22xy + 0.05zf - 0.05xh) = 100 \frac{d\omega}{dt}$$

$$0.1 \frac{dm}{dt} = -\frac{dy}{dt} + 10(101.46 - y)$$

$$\frac{dw}{dt} = -10 \frac{d\omega}{dt} + 10(314 - \omega)$$

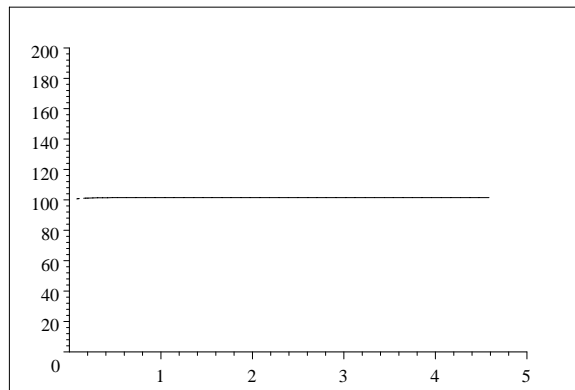
$$\omega(0) = 313.$$

$$\begin{aligned}x(0) &= 48.395 \\z(0) &= 29.184 \\y(0) &= 100. \\m(0) &= 200. \\w(0) &= 10.14 \\h(0) &= 0 \\f(0) &= 0\end{aligned}$$



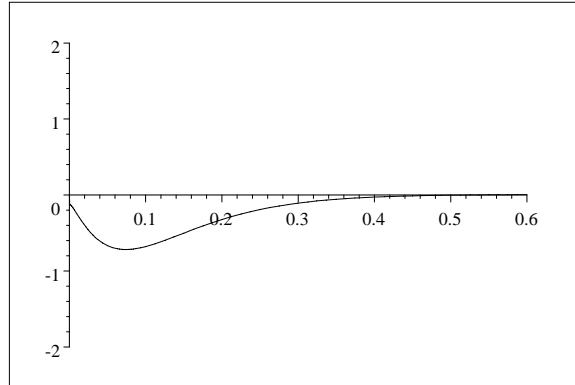
$$I_{d(\infty)} = 29.597A$$

Fig.4.3 Variația în timp a curentului statoric I_d



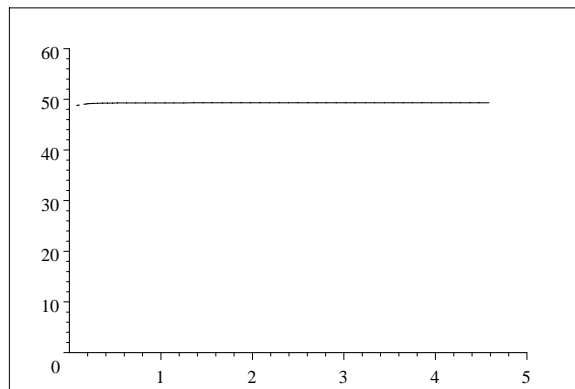
$$I_{E(\infty)} = 101.46A$$

Fig.4.4 Variația in timp a curentului de excitație I_E



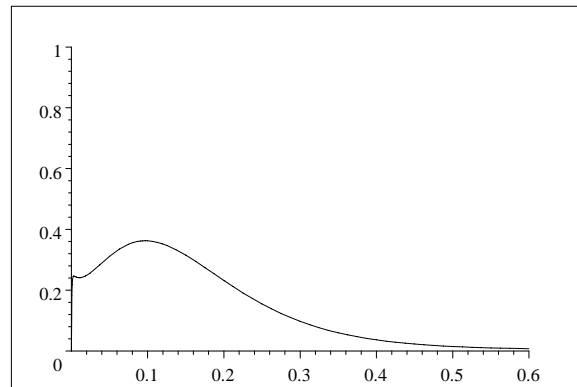
$$I_{D(\infty)} = 0$$

Fig.4.5 Variația în timp a curentului de amortizare I_D



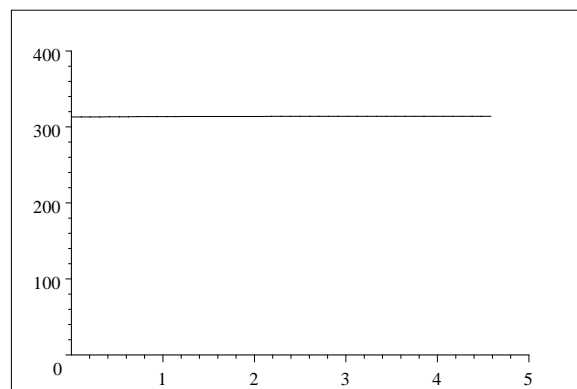
$$I_{q(\infty)} = 49.267A$$

Fig.4.6 Variația în timp a curentului statoric I_q



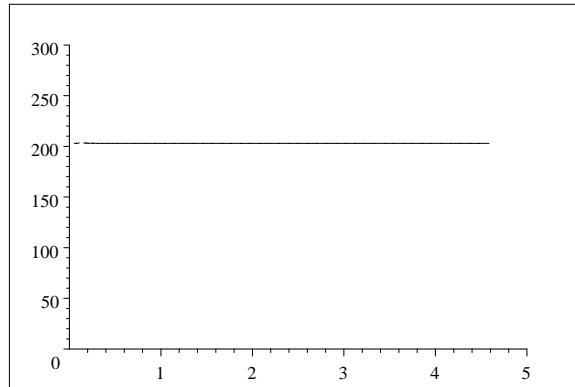
$$I_{Q(\infty)} = 0$$

Fig.4.7. Variația în timp a curentului de amortizare I_Q



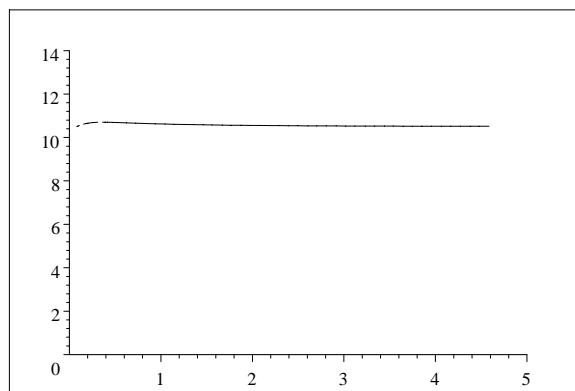
$$\omega_{(\infty)} = 313.41 \text{ rad/s}$$

Fig.4.8. Variația în timp a vitezei unghiulare ω



$$U_{E(\infty)} = 202.92V$$

Fig.4.9. Variația în timp a tensiunii de excitație U_E



$$K_{TGS(\infty)} = 10.487$$

Fig.4.10. Variația în timp a factorului de cuplu K_{TGS}

Evoluția în timp a procesului este dinamic stabilită deoarece toate mărimile tind spre valori finale.

4.4.1. Tensiunea este controlată prin măsurarea directă a valorilor sale din sistem

Ecuțiile reguletoarelor

Ecuțiile regulatorului de cuplu la frecvența $f=50\text{Hz}$ ($\omega = 314\text{rad/s}$) este:

$$-10 \frac{d\omega}{dt} + 10(314 - \omega) = \frac{dw}{dt}$$

Ecuția regulatorului de pe excitație pentru tensiunea nominală ($U=U_N$) se scrie sub forma:

$$0.1 \frac{dE_r}{dt} + 10E_r = 0.1 \frac{dU_E}{dt}$$

unde

$$E_r = U_N - U = 6000 - U$$

Tensiunea **U** fiind compusă din U_d și U_q :

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$$

prin derivare complică sistemul de ecuații diferențiale, făcând imposibilă rezolvarea în MAPLE a sa:

$$0.1 \frac{d(6000 - U)}{dt} + 10(6000 - U) = 0.01 \frac{dm}{dt}$$

Din acest motiv se consideră componeta de bază a tensiunii U, doar U_q :

$$U_q = -\omega L_d I_d + \omega M_E I_E$$

sau numeric:

$$U_q = -0.19\omega z + 0.22\omega y$$

În acest caz nu se mai pune problema calculării curentului de excitație.

În aceste condiții regulatorul de pe excitație are ecuația:

$$-\frac{dU_q}{dt} + 100(5234 + 0.19\omega z - 0.22\omega y) = 0.1 \frac{dm}{dt}$$

sau numeric:

$$(1.9z - 2.2y) \frac{d\omega}{dt} + \omega(1.9 \frac{dz}{dt} - 2.2 \frac{dy}{dt}) + 100(5234 + 0.19\omega z - 0.22\omega y) = \frac{dm}{dt}$$

Sistemul poate fi observabil în timp, în cazul în care tensiunea este controlată prin U_q , prin rezolvarea ecuațiilor diferențiale de mai jos.

Comportarea sistemului prin măsurarea

- tensiunii U , respectiv U_q (modificând tensiunea de excitație U_E (m)) și a
- frecvenței f (sau ω), modificând cuplul turbinei

și transmiterea celor două valori la regulatoarele PI, impunând controlul:

- tensiunii de excitație U_E și al
- cuplului motor K_{GS} de la arborele GS.

se poate observa prin rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale, neliniar și neomogen.

$$104.34z - 0.01\omega x = -0.19 \frac{dz}{dt} + 0.19\omega x + 0.22 \frac{dy}{dt} + 0.05 \frac{dh}{dt} - 0.05\omega f$$

$$104.34x + 0.01\omega z = -0.19\omega z - 0.19 \frac{dx}{dt} + 0.22\omega y + 0.05\omega h + 0.05 \frac{df}{dt}$$

$$m = -0.22 \frac{dz}{dt} + 2y + 0.31 \frac{dy}{dt} + 0.06 \frac{dh}{dt}$$

$$0 = -0.05 \frac{dz}{dt} + 0.06 \frac{dy}{dt} + 0.5h + 0.02 \frac{dh}{dt}$$

$$0 = -0.05 \frac{dx}{dt} + 0.5f + 0.02 \frac{df}{dt}$$

$$w(628 - \omega) + 3(-0.22xy + 0.05zf - 0.05xh) = 100 \frac{d\omega}{dt}$$

$$\frac{dw}{dt} = -10 \frac{d\omega}{dt} + 10(314 - \omega)$$

$$\frac{dm}{dt} = (1.9z - 2.2y) \frac{d\omega}{dt} + \omega(1.9 \frac{dz}{dt} - 2.2 \frac{dy}{dt}) + 100(5234 + 0.19\omega z - 0.22\omega y)$$

$$\omega(0) = 313.$$

$$x(0) = 48.395$$

$$z(0) = 29.184$$

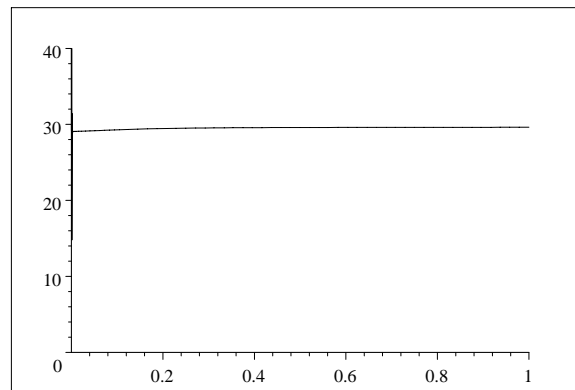
$$y(0) = 100.$$

$$m(0) = 200.$$

$$w(0) = 10.14$$

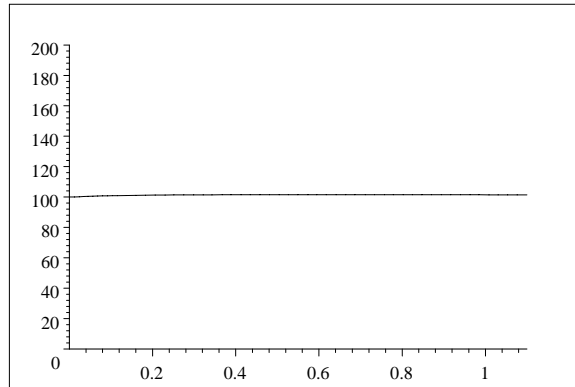
$$h(0) = 0$$

$$f(0) = 0$$



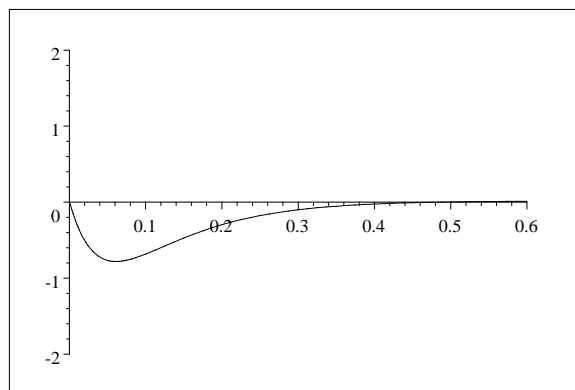
$$I_{d(\infty)} = 29.597A$$

Fig.4.11 Variația în timp a curentului statoric I_d



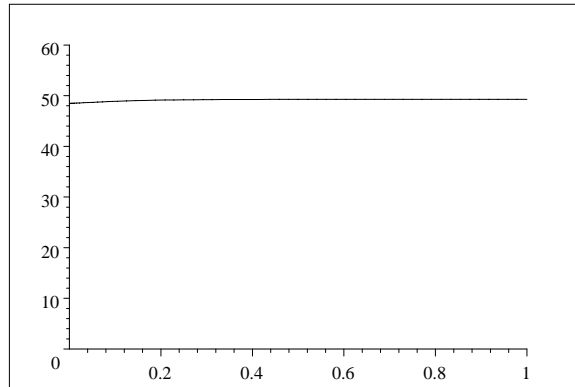
$$I_{E(\infty)} = 101.46A$$

Fig.4.12. Variația în timp a curentului de excitație I_E



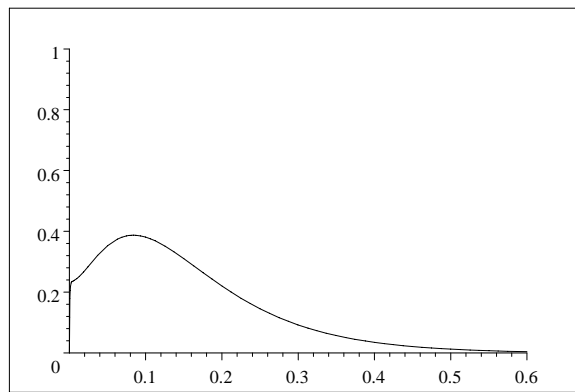
$$I_{D(\infty)} = 0$$

Fig.4.13. Variația în timp a curentului de amortizare I_D



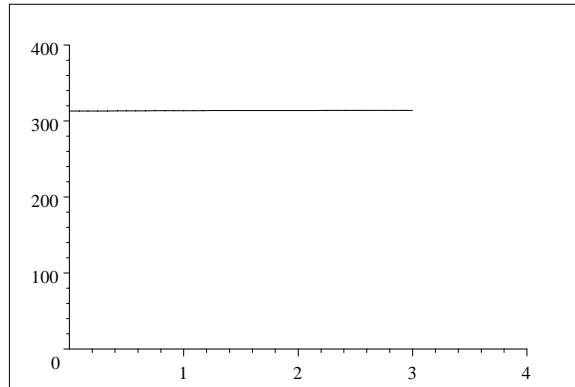
$$I_{q(\infty)} = 49.267A$$

Fig.4.14. Variația în timp a curentului statoric I_q



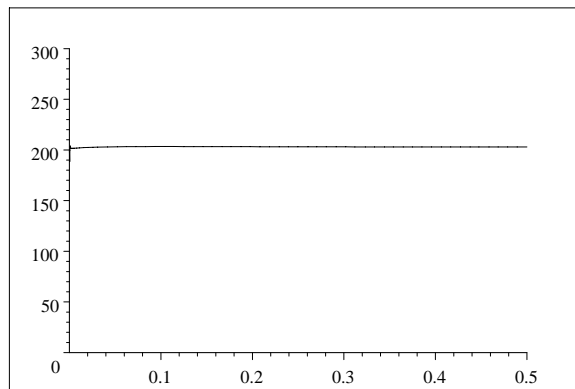
$$I_{Q(\infty)} = 0$$

Fig.4.15. Variația in timp a curentului de amortizare I_Q



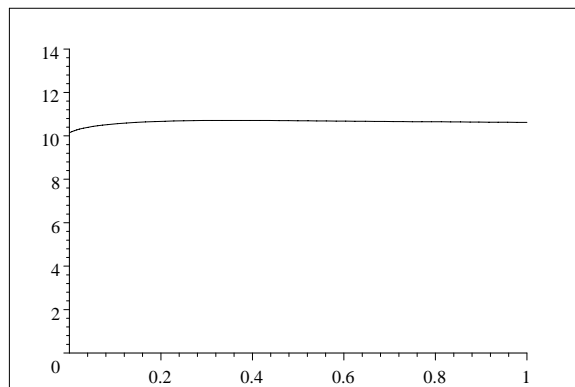
$$\omega_{(\infty)} = 313.41 \text{ rad/s}$$

Fig.4.16. Variația în timp a vitezei unghiulare ω



$$U_{E(\infty)} = 202.92 \text{ V}$$

Fig.4.17. Variația în timp a tensiunii de excitație U_E



$$K_{TGS(\infty)} = 10.487$$

Fig.4.18. Variația în timp a factorului de cuplu K_{TGS}

Evoluția în timp a procesului este dinamic stabilă deoarece toate mărimile tind spre valori finale.

4.5. Concluzii:

În acest capitol s-a realizat o reglare a tensiunii și frecvenței prin compararea valorilor nominale cu cele măsurate la bornele sarcinii.

Se evită, astfel calculul sarcinii existente în sistem la un anumit moment de timp, calcul care depinde de parametrii elementelor din sistem și care modificându-se în timp pot introduce erori.

Procesul este **dinamic stabil pentru orice valoare a sarcinii**.

În procesul tranzitoriu oscilațiile cele mai semnificative le au curenții din înfășurarea de amortizare a GS, însă și aceste oscilații sunt aperiodice și se amortizează în 0.6[s].

Indiferent de metoda de reglare, durata procesului tranzitoriu este aceeași, aceasta deoarece inductanțele și rezistențele din sistem nu se modifică în cele două cazuri.

Sistemul astfel reglat, ca și în cazul anterior tratat, în capitolul 3, nu prezintă **fenomenul de pendulare** și încărcare dinamică este **stabilă**, indiferent de valoarea sarcinii.

Prin reglarea tensiunii și frecvenței stabilitatea statică și dinamică la sistemul energetic format din GS și GA se modifică, deoarece au loc schimbări ale curentului de excitație la GS și a cuplurilor la cele două turbine. Evaluarea stabilității statice se poate face din sistemul de ecuații algebrice de mai sus, unde pentru mărimile din sistem se obțin condițiile finale, în urma modificării sarcinii la consumatori.

Procesul este de lungă durată datorită momentelor de inerție mari ale celor două

grupuri. Prin folosirea GA se realizează o amortizare în sistem, amortizare ce completează rolul înfășurărilor de amortizare de la GS.

În lucrare s-au propus mai multe metode de control prin:

- controlul tensiunii,
- controlul tensiunii pe excitație,
- controlul curentului din excitație,
- controlul cuplurilor motoare de la turbine.

Aceste strategii de control diferă între ele prin două proceduri de bază:

- primul algoritm de reglare se bazează pe calculul unor mărimi din sistem (tensiune, frecvență, curent de excitație, impedanța de sarcină),
- al doilea algoritm de reglare se bazează pe măsurarea experimentală a unor mărimi din sistem (tensiune, frecvență, curent de excitație).

5. VERIFICĂRI EXPERIMENTALE

Verificările experimentale s-au făcut pentru sistemul **GS+GA+SARCINĂ** la microhidrocentrala SURDUC-BEGA.

Datele nominale ale generatoarelor sunt:

GS

$$P_N = 1 \text{ MW}, M_{elmag} = 3185 \text{ Nm}, U_N = 6000 \text{ V}, I_N = 96 \text{ A}, I_{EN} = 20 \text{ A}$$

$$R_D = 0.5 \text{ } \Omega, M_{ED} = 0.4 \text{ H}, K_{TGS} = 10.142$$

$$L = 0.2 \text{ H}, L_D = 0.04 \text{ H}, M_D = 0.08 \text{ H}$$

$$L_Q = 0.02 \text{ H}, M_Q = 0.05 \text{ H}, R_Q = 0.1 \text{ } \Omega$$

$$L_E = 6 \text{ H}, R_E = 5 \text{ } \Omega, M_E = 0.98 \text{ H}$$

GA

$$P_N = 1 \text{ MW}, M_{elmag} = 3122 \text{ Nm}, U_N = 6000 \text{ V}, I_N = 96 \text{ A}$$

$$L_1 = 0.6 \text{ H}, L_2 = 0.7 \text{ H}, R_2 = 0.65 \text{ } \Omega, M = 0.5 \text{ H}, s_N = -0.02, K_{TGA} = 9.943$$

Verificările experimentale s-au făcut atât în regim static cât și în regim dinamic, urmărindu-se astfel comportarea generatoarelor în timp.

Generatoarele au fost antrenate de 2 turbine hidraulice și sistemul a funcționat în regim insular pe o rezistență de sarcină dată.

S-au înregistrat următoarele mărimi importante:

- curentul statoric la GS (I_{GS});
- curentul statoric la GA (I_{GA});
- curentul de excitație la GS (I_E);
- frecvența tensiunii în sistem ($f = \frac{\omega}{2\pi}$);
- turația la arborele GA ($n_{GA} = \frac{\omega}{2\pi}(1-s)$);

Montajul folosit este cel din figura 5.1.:

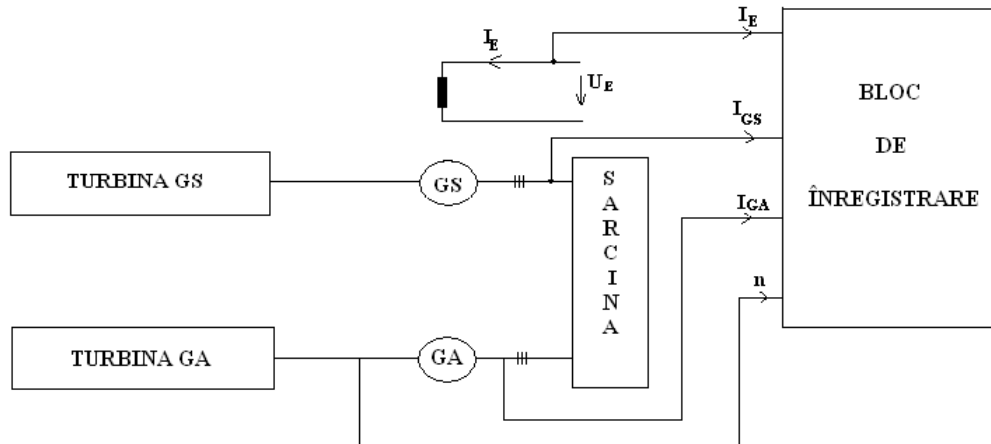


Fig.5.1. Înregistrările la grupul GS+GA+SARCINĂ

Încercările s-au făcut pentru două valori ale rezistenței de sarcină. ($R_{initial} = 2[\Omega]$ și $R_{final} = 3[\Omega]$)

În punctul inițial de funcționare mărimile măsurate au valorile:

$I_{GA\ initial} = 25.1[A]$	-curentul statoric la GA;
$I_{GS\ initial} = 189.6[A]$	-curentul statoric la GS;
$f_{initial} = 82[Hz]$	-frecvența în sistem;
$n_{GA\ initial} = 5951[rot/min]$	-turația la GA;
$I_E\ initial = 40[A]$	-curentul de excitație la GS;
$U_{initial} = 377[V]$	-tensiunea la bornele rezistenței de sarcină

Valorile mărimilor calculate în punctul inițial de funcționare sunt:

$I_{GA\ initial} = 26.3[A]$	-curentul statoric la GA;
$I_{GS\ initial} = 188.7[A]$	-curentul statoric la GS;
$f_{initial} = 83[Hz]$	-frecvența în sistem;
$n_{GA\ initial} = 5953[rot/min]$	-turația la GA;
$I_E\ initial = 40[A]$	-curentul de excitație la GS;
$U_{initial} = 378[V]$	-tensiunea la bornele rezistenței de sarcină

În punctul final mărimile măsurate sunt:

$I_{GA\ final} = 6.3[A]$	-curentul statoric la GA;
$I_{GS\ final} = 201.3[A]$	-curentul statoric la GS;
$f_{final} = 95[Hz]$	-frecvența în sistem;
$n_{GA\ final} = 6016[rot/min]$	-turația la GA;
$I_{E\ final} = 40[A]$	-curentul de excitație la GS;
$U_{final} = 621[V]$	-tensiunea la bornele rezistenței de sarcină

Valorile mărimilor calculate în punctul final de funcționare sunt:

$I_{GA\ final} = 5.8[A]$	-curentul statoric la GA;
$I_{GS\ final} = 200.8[A]$	-curentul statoric la GS;
$f_{final} = 95.5[Hz]$	-frecvența în sistem;
$n_{GA\ final} = 6017[rot/min]$	-turația la GA;
$I_{E\ final} = 40[A]$	-curentul de excitație la GS;
$U_{final} = 622[V]$	-tensiunea la bornele rezistenței de sarcină

Diferența dintre mărimile calculate și mărimile măsurate este sub 1% ,validându-se în acest fel modelele matematice folosite.

Înregistrările experimentale făcute în regim dinamic sunt date în continuare.

Mărimile înregistrate sunt:

- curentul statoric la GA;
- curentul statoric la GS;
- frecvența în sistem;
- turația la GA;
- curentul de excitație la GS;
- tensiunea la bornele rezistenței de sarcină.

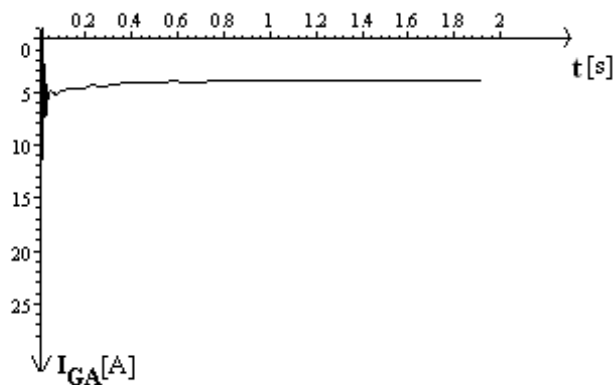


Fig.5.2. Variația în timp a curentului statoric I_{GA} la GA

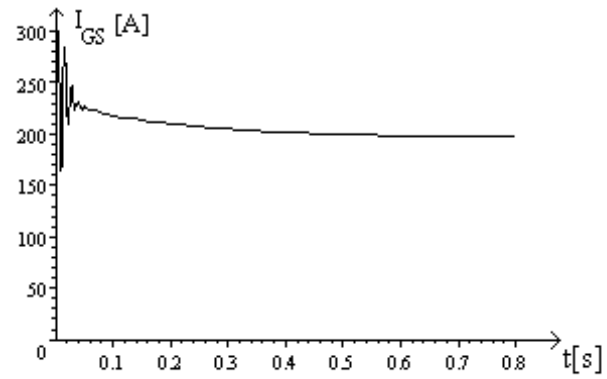


Fig.5.3. Variația în timp a curentului statoric I_{GS} la GS

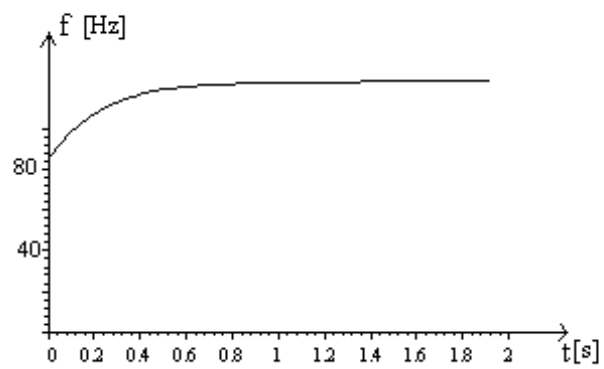


Fig.5.4. Variația în timp a frecvenței

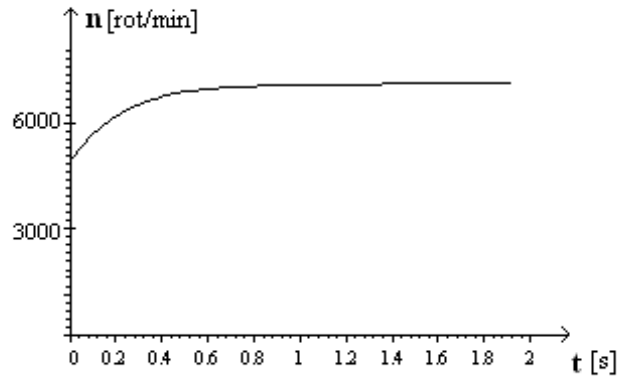
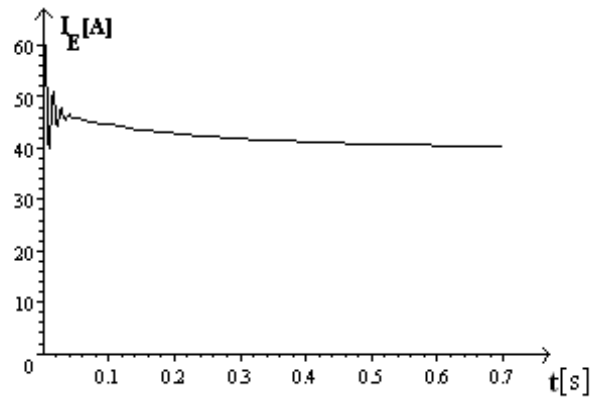


Fig.5.5. Variația în timp a turației la GA

Fig.5.6. Variația în timp a curentului de excitație I_E la GS

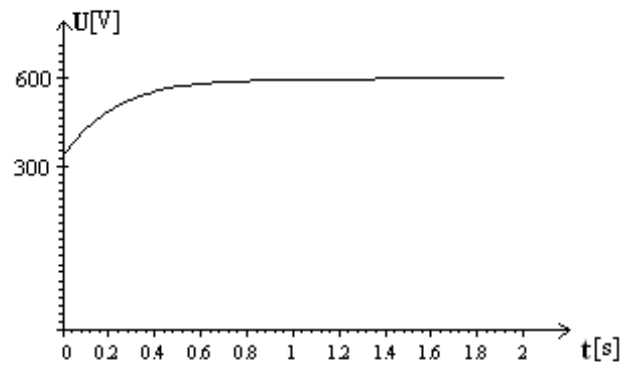


Fig.5.7. Variația în timp a tensiunii

Verificările experimentale s-au făcut atât în regim static cât și în regim dinamic, urmărindu-se astfel comportarea generatoarelor în timp.

Comparându-se cu rezultatele teoretice date în paragraful 2.5 se constată abateri sub 1.5%.

6. CONCLUZII

Lucrarea de față tratează problema generatoarelor sincrone și asincrone ce funcționează în paralel, în regim insular.

Această problemă a energiei este deosebit de actuală prin atragerea unor noi resurse energetice : eoliene, solare, hidraulice.

6.1. Concluzii finale

Lucrarea de față analizează **stabilitatea dinamică a sistemelor electroenergetice alimentate de la generatoare sincrone și generatoare asincrone.**

În contextul actual al atragerii de noi resurse energetice nepoluante și regenerabile : eoliene, hidraulice, solare, producerea de energie electrică prin folosirea generatoarelor asincrone și sincrone funcționând în regim insular devine din ce în ce mai extinsă.

În acest sens autorul a analizat diverse modele matematice ale mașinilor electrice și a construit pe baza modelului ortogonal (d – q) un model matematic complet : GENERATOR SINCRON + GENERATOR ASINCRON + SARCINĂ.

Studiul **stabilității dinamice a sistemului electroenergetic cu generatoare sincrone și asincrone** a scos în evidență următoarele aspecte importante :

- stabilitatea dinamică presupune existența și cunoașterea punctului inițial de funcționare ;
- punctul inițial de funcționare poate fi **static stabil sau static instabil** ;
- alegerea corectă a punctului inițial de funcționare (uneori din 3 puncte posibile) este foarte importantă și se arată în lucrare cum acesta se alege având în vedere funcționarea anterioară a sistemului ;
 - pentru stabilirea naturii punctului inițial de funcționare (**stabil sau instabil**) se determină **caracteristica mecanică a GA în sistemul GS + GA + SARCINĂ, respectiv caracteristica mecanică a GS în sistemul GS + GA + SARCINĂ** ;
 - prin liniarizarea caracteristicilor mecanice în zona punctului de funcționare și folosind **criteriul de stabilitate Hurwitz** se stabilește natura punctului de funcționare : **stabil sau instabil**
 - sistemul **GS + GA + SARCINĂ NEREGLAT** este static și dinamic stabil , însă prezintă variații mari cu sarcina ale tensiunii și frecvenței și din acest motiv se impune o reglare a tensiunii și frecvenței la valorile nominale ;
- **reglarea sistemului GS + GA + SARCINĂ** se realizează în două moduri :
 - a) prin calcularea sarcinii din sistem ;
 - b) prin măsurarea directă a tensiunii și frecvenței din sistem.
- oricare ar fi modul de reglare, sistemul este **stabil dinamic** pentru orice valoare a sarcinii ;
- în sistemul **GS + GA + SARCINĂ** nu apare fenomenul de pendulare specific

GS cuplat la sistemul energetic de tensiune și frecvență fixe ;

- la anumite rezistențe de sarcină sistemul poate funcționa în 3 puncte, diferența între ele fiind prin valorile diferite ale tensiunii și frecvenței care pot atinge rapoarte de 1 : 3 ;
- puterile active , la aceeași rezistență de sarcină pot, la fel, depăși raportul de 1 : 3 ;
- cuplurile electromagnetice la cele 2 generatoare, la aceeași rezistență de sarcină pot atinge același raport de 1 : 3 ;
- pentru realizarea funcționării la tensiunea și frecvența nominală se folosesc 3 regulatoare : 2 la GS(la excitație și la turbina GS) și unul la turbina GA.
- calculul celor 3 mărimi ce se reglează : curentul de excitație + cuplurile celor 2 turbine se face având în vedere 3 condiții de funcționare :
 - frecvența nominală ;
 - tensiunea nominală ;
 - încărcări proporționale cu puterile nominale la cele 2 generatoare.
- **stabilitatea dinamică** este urmărită prin modelarea și simularea numerică a sistemului GS + GA + SARCINĂ ;
 - prin simulările numerice obținute se poate observa evoluția în timp a procesului tranzitoriu și prin aceasta se poate evalua stabilitatea dinamică a sistemului ;
 - numai la curenții din înfășurările de amortizare la GS apar mici oscilații amortizate în timp ;
 - la majoritatea mărimilor evoluția în timp este aperiodică și amortizată în mai puțin de 5 [s] ;

Verificările experimentale au avut la bază cele două generatoare de la MHC –BISTRITA II și MHC –SURDUC – Bega. Între mărimile calculate și cele înregistrate experimental apar diferențe sub 2 %, ceea ce validează modelele matematice propuse.

6.2. Contribuții originale

Contribuțiile originale ale autorului , având în vedere tema abordată : **stabilitatea dinamică a sistemelor electroenergetice alimentate de la GS și GA**, se prezintă în cele ce urmează .

Capitolele 2, 3, 4 și 5 sunt în întregime originale și au stat la baza întregii lucrări.

Autorul a consultat o literatură vastă (82 titluri bibliografice + 11 reviste de specialitate) și pe baza ei a modelat , simulat și verificat experimental sistemul **GS + SARCINĂ și sistemul GS + GA + SARCINĂ**.

Principalele contribuții originale aduse de autor în prezenta teză de doctorat sunt :

1. construcția modelului matematic al sistemului GS + SARCINĂ ;
2. construcția modelului matematic al sistemului GS + GA + SARCINĂ ;
3. determinarea comportării sistemului TURBINĂ + GS + SARCINĂ la variații ale sarcinii electrice ;
4. stabilirea **punctelor de funcționare** la sistemul T + GS ;

5. determinarea variațiilor cu sarcina , în sistemul T + GS, a tensiunii, frecvenței, curenților, puterilor active și reactive ;
6. stabilirea influenței curentului de excitație asupra caracteristicii mecanice a GS ;
7. determinarea comportării sistemului **TURBINĂ + GS + GA + SARCINĂ** (T – GS – GS) la variații ale sarcinii ;
8. stabilirea **celor 3 puncte de funcționare** posibile la sistemul T – GS – GA ;
9. determinarea variațiilor cu sarcina, în sistemul T – GS – GA, a tensiunii, frecvenței, curenților, puterilor active și reactive ;
10. alegerea punctelor **stabile de funcționare** din cele 3 posibile la o anumită sarcină ;
11. estimarea **stabilității statice** a punctelor de funcționare la cele 2 sisteme, având în vedere caracteristicile mecanice ale GS și GA ;
12. determinarea caracteristicii mecanice la GA, funcționând în sistemul T – GS – GA;
13. determinarea caracteristicii mecanice la GS, funcționând în sistemul T – GS – GA;
14. evaluarea **stabilității dinamice** a generatoarelor reglate prin curentul de excitație și cuplurile la cele două turbine de antrenare ;
15. construcția modelelor matematice cu **ecuații diferențiale** a celor două sisteme : T – GS, și T – GS – GA pentru observarea stabilității dinamice ;
16. demonstrarea faptului că ambele sisteme sunt atât **static stabile** cât și **dinamic stabile** la orice valoare a sarcinii electrice ;
17. analiza **dinamică** a sistemului TURBINE – GS – GA – SARCINĂ, cu reglarea curentului de excitație, având în vedere valoarea sarcinii electrice ;
18. determinarea condițiilor inițiale și a celor finale la sistemul T – GS – GA , având în vedere calculul sarcinii electrice ;
19. analiza **dinamică** a sistemului T – GS – GA cu prescrierea tensiunii și a frecvenței;
20. analiza **stabilității dinamice** la sistemul T -GS -GA reglat prin măsurarea tensiunii și frecvenței din sistem ;
21. controlul tensiunii prin prescrierea curentului de excitație ;
22. controlul frecvenței prin prescrierea cuplului la turbina GS ;
23. încărcarea GA prin prescrierea cuplului la turbina GA ;
24. validarea rezultatelor teoretice prin testele experimentale obținute la cele două microhidrocentrale.

Autorul demonstrează, în prezenta teză de doctorat, că din punct de vedere al **stabilității dinamice sistemul T -GS - GA funcționând în regim insular este superior sistemului clasic (la tensiune și frecvență fixe)**.

În sistemul T –GS-GA **nu apare fenomenul de pendulare**, specific generatoarelor sincrone cuplate la o rețea de tensiune și frecvență fixe.

6.3. Perspective

Modelarea și simularea sistemelor electroenergetice cu GS și GA funcționând în regim insular vor sta la baza cercetărilor în domeniul energiilor neconvenționale : vânt, hidraulice,etc.

Modelarea și simularea generatoarelor funcționând în regim insular a permis determinarea cu exactitate a diverselor aspecte ce apar în funcționarea sistemului energetic.

Monitorizarea încărcării generatoarelor și reglarea lor la valorile nominale ale tensiunii și frecvenței este alt domeniu de interes în viitor.

Se vor face cercetări în acest domeniu prin implementarea și la alte micro sisteme energetice, ca de exemplu : n – generatoare sincrone și m – generatoare asincrone .

În acest fel se vor cunoaște **limitele statice și dinamice** până la care pot fi încărcate aceste sisteme , evitând regimurile de avarie și cele de funcționare în afara parametrilor nominali, la tensiune și frecvență.

BIBLIOGRAFIE

- A.1. Adibi M. Et al.,- *Power Systems Restoration. Methodologies and Implementation on Strategies* -, IEEE Press on Power Engineering, New York, 2000
- A.2. Atanasiu , G. - *Mașini electrice* - Litografia U.T. Timișoara , 1994.
- A.3. Arie,A., Neguș, C., Golovanov, Carmen, Golovanov, N. - *Poluarea cu armonici a sistemelor electroenergetice funcționând în regim permanent simetric*. - Ed. Academiei Române, București, 1994.
- A.4. Arie, A., Golovanov, N., Dumitru, C., - *Propagarea armonicelor de curent produse de căile ferate electrificate în sistemul electroenergetic* -, Energetica, 39, nr.2, seria B, martie-aprilie 1991, pp. 77+90.
- B.1. Babescu, M. - *Mașina sincronă Modelare, Identificare, Simulare* - Ed. Politehnica Timișoara, 2003.
- B.2. Babescu , M. - *Mașini electrice* - Ed. Tehnică , București , 1996.
- B.3. Babescu, M. - *Determination of the parameters of the model in use in the theory of electrical machines*- Bul.șt.U.P.Timișoara , Tom 42 , F2 , 1997 , p39-47.
- B.4. Babescu, M. - *Generatoare electrice* - Ed. Politehnica Timișoara1998.,
- B.5. Babescu, M. Păunescu, D. - *Mașini Electrice- Analiza matematică a regimurilor tranzitorii* - Ed. Politehnica, Timișoara, 2001.
- B.6. Babescu, M. - *Mașina asincronă Modelare, Identificare, Simulare* - Ed. Politehnica Timișoara, 2002..
- B.7. Bercovici M., Arie A., Poată A., - *Rețele Electrice. Calculul electric* -, Ed. Tehnică, București, 1974
- B.8. Bergen R. A.,Vittal V.,- *Power System Analysis* -, Second Editions, Prentice Hall, New Jersey, 2000
- B.9. Buhuș P.,Heinrich I., Preda L., Selischi A.,- *Partea electrică a centralelor electrice* -, Ed. Didactică si Pedagogică, București, 1983
- B.10. Boldea, I. Atanasiu, G. - *Analiza unitară a mașinilor electrice* - Ed.Academiei RSR-București, 1983.
- B.11. Boldea, I.- *Parametrii mașinilor electrice* - Ed. Academiei , București , 1991.
- B.12. Boldea, I. and Nasar, S.A. - *Unitary treatment of core losses and saturation in the orthogonal-axis model of electric machines* - Proc. Inst. Elect. Eng., vol 134, pt.B, pp. 355 - 363, 1987.
- B.13. Boldea, I. - *Transformatoare și mașini electrice* - E.D.P. R.A. București , 1994.
- B.14. Boldea, I. Nasar, SA. - *Vector Control of A.C. Drives* - CRC Press Boca Raton, 1992.
- B.15. Biriescu , M. - *Mașini electrice rotative* - Ed. de Vest , Timișoara 1997.
- B.16. Blondel , A. - *Components la theorie des alternateurs a deux reactions* - , RGE , 12 , 203-205 , 1922.
- B.17. Barret, Ph. Vas, P. - *Regimes transitoires des machines electriques* -Ed.Eyrolles , Paris , 1982.

- B.18. Bălă, C - *Mașini electrice* - E.D.P. ,București , 1979.
- B.19. Buta, A., Milea, L., Pană, A.,- *Impedanța armonică a rețelelor sistemelor electroenergetice* -, Ed. Tehnică, București, 2000.
- C.1. Câmpeanu, A. - *Mașini electrice - Probleme fundamentale* - Ed. Scrisul Românesc, Craiova , 1988.
- C.2. Câmpeanu, A. Iancu ,V. Rădulescu, M. - *Mașini în acționări electrice* - Editura Scrisul Românesc Craiova, 1996.
- C.3. Câmpeanu , A. - *Introducere în dinamica mașinilor electrice de curent alternativ* - Ed.Academiei Române București, 1998.
- C.4. CONEL S.A.,- *Codul Tehnic al Rețelelor Electrice de Transport* -, aprilie, 2000
- C.5. Crișan O.,- *Sisteme electroenergetice*-, Ed. Didactică si Pedagogică, București, 1979
- C.6 Chioncel, C. Stoian, O. Bobocea, M. Babescu, M. - *Estimation of the harmonics of the current by the saturate asynchronous motor* -, Power System Conference, Timișoara, 2007
- D.1. Dordea, T. - *Mașini electrice* - E.D.P., București , 1970.
- D.2. Dordea, T. - *Proiectarea și construcția mașinilor electrice*- Litografia U.P. Timișoara, 1981.
- D.3. Dordea, T. - *La theorie des deux axes pour les machines electriques a enroulement reparti par zones*-Rev. Roum. Sci. Techn. Electrotechn. et Energ., 38 , Bucarest, 1993, p. 235-255.
- D.4. Dordea, T. - *Beitrag zur Zweiachsentheorie der elektrischen Maschinen* -, Archiv fur Elektrotechnik , 50 , 6 , 362 -371 (1966).
- D.5. Drăgănescu, O. - *Încercările mașinilor electrice rotative* -Ed.Tehnică, București, 1987.
- D.6. De Dimo P.,- *Modele REI și indicatori de stare* -, Ed.Academiei, București, 1981
- D.7. Drăgan G., Miclescu T.,Cristovici A., Popa B., Golovanov N.,- *Supratensiuni interne în sistemele electroenergetice* -, Ed. Tehnică, București,1975
- D.8. Dordea T.,- *Mașini Electrice* -, Ed. ASAB, București, 2002
- D.9. Deleşega, I. Andea, P. - *Procese de comutație; calitatea energiei electrice* - Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara 2007
- E.1. Eremia M., Crișciu H., Ungureanu B., Bulac C.,- *Analiza asistată de calculator a regimurilor sistemelor electroenergetice* -, Ed. Tehnică, București, 1985
- G.1. Golovanov, C. - *Aparate electrocasnice. Probleme de compatibilitate electromagnetica* -. Editura ICPE, București, 1997.
- H.1. Hingorani N.G.,Gyugyi L., - *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System* -, IEEE Press, 2000
- H.2. Hore R.A.,- *Metode moderne de calcul și proiectare a sistemelor electrice* -, Ed. Tehnică, București.
- I.1. Ilic Marija, Galiana F., Fink L.,- *Power Systems Restructuring, Engineering and Economics* -, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London,2000
- I.2. Ilic Marija, Zaborsky J.,- *Dynamics and Control of Large Electric Power Systems* -, Wiley Interscience. Inc., 2000.
- J.1. Jerve, G.- *Încercările mașinilor electrice rotative*- Ed.Tehnică, București 1972.
- K.1. Kelemen, A. Imecs, M. - *Sisteme de reglare cu orientare după câmp ale*

- mașinilor de curent alternativ* -Ed.Academiei, București, 1989.
- K.2. Kelemen, A. - *Acționări electrice* -EDP București, 1979.
- K.3. Kilyeni St.,- *Optimizări și calculatoare în electroenergetică* -, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia", Timișoara,1987
- K.4. Knight U.G.,- *Power Systems in Emergencies. From Contingency Planning to Crisis Management* -, John Wiley & Sons Ltd, England, 2001
- L.1. Leonard, W. - *Control of electrical drives* -Springer -Verlag, Berlin, 1985.
- L.2. Liénard, A. - *Puissance réactive en courants nonsinusoidaux* - . R.G.E., X, 547, 1921.
- M.1. Meynaud, P., Bergeal Y., Heikkila, H., Kendll, P., Pilegaard, M., Robert, A., Waldmann, E., - *Harmoniques, paramètres caractéristiques, méthodes d'étude, estimation de valeurs existantes en réseau* -, ELECTRA, No 77, Juillet, pp 35 + 54.
- N.1. Nasar SA . Boldea , I. - *Electric machines - dinamic and control* - CRC Press , Inc. USA , 1993.
- N.2. Novac, I. - *Mașini electrice* - Litografia IPT , Timișoara , 1975.
- N.3. Novac, I. - *Mașini și acționări electrice* - EDP București, 1980
- N.4. Nicolaide , A.- *Mașini electrice* - Ed. Scrisul Românesc Craiova , 1975.
- N.5. Nemeș M., - *Sisteme electrice de putere*- , Ed. Orizonturi universitare, Timișoara, 2003
- N.6. Nemeș M., - *Centrale și rețele electrice* - , Litografia Institutului Politehnic Timișoara, 1976
- N.7. Nemeș M., - *Sisteme electroenergetice* -, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1990
- N.8. Nemeș M.,- *Sisteme electrice de putere* -, Ed. Politehnica, Timișoara, 1998
- O.1. Ong, C.M . - *Dynamic simulation of electric machiney* - Prentice Hall PTRNew Jersey 07458,1998.
- P.1. Păunescu, D. Babescu, M. - *Analiza matematică a dinamicii mașinilor electrice* - Editura Politehnica, Timișoara 2005.
- P.2. Park , R.H. - *Two reaction theory of synchronous machines (I +II)* Trans - A , IEE 48 , 716 - 727(1929) and 52 (1933).
- P.3. Potolea E., - *Calculul regimurilor de funcționare ale sistemelor electroenergetice* -, Ed. Tehnică, București, 1977.
- P.4. Péliissier R.,- *Les réseaux d'énergie électrique* -, Dunod, Paris, 1975.
- P.5. Potolea E., *Tudose Maria,- Sisteme electroenergetice-*, Litografia Institutului Politehnic București, 1988.
- R.1. Richter, R. - *Mașini electrice - vol I , II , III , IV* Ed.Tehnică , București , 1959.
- S.1. Seracin, E. Popovici , D. - *Tehnica acționărilor electrice* - Ed.Tehnică București,1985
- S.2. Stoian, O. - *Stabilitatea statică și dinamică la generatorul asincron-* Zilele Academice Timișene, Timișoara 2005
- S.3. Stoian, O. - *Stabilitatea statică și dinamică la generatorul sincron-* Zilele Academice Timișene, Timișoara 2005.
- S.4. Stoian, O. - *Reglarea generatoarelor asincrone și sincrone funcționând în regim insular* - International Conference on Electromechanical and Power System - October 4-6, 2007, Chișinău, Rep. Moldova, p146-150

S.5. Stagg G.W., El-Abiad A.H., - *Computer methods in power systems analysis* - Mc Graw-Hill, New-York, 1968.

S.6. Sharon, D., - *Reactive Power Definition and Power Factor Improvement in Non -Linear Systems*. Proc. IEE, 120,6, June, 1973, p. 704-706.

Ș.1. Șora, C., - *Bazele Electrotehnicii* - Editura Didactică și Pedagogică, București, 1976.

T.1. Taked, Y. Adkins , B. - *Determination of synchronous machine parameters allowing for unequal mutual inductances* - Proc. IEE , 121 , 1974 , p1501 - 1504

T.2. Thaler, G. - *Electric machines dynamics and steady state* - John Wiley , New York , 1966.

T.3. Toulomi, O. - *Synchronous machine parameter identification Multitude scale tehniue* - vol 30/06/1994.

J.1. Țugulea, A., - *Considerații privind efectele energetice în regimurile armonice nesimetrice ale sistemelor trifazate* - Energetica, 34, 1986,p 121-129

J.2. Țugulea, A., - *Considerații privind efectele energetice ale regimului deformant* -Energetica, 34, 1986, p 164-167.

V.1. Viorel, I.A. Ciorba , R. - *Mașini electrice în sisteme de acționare* -Editura U.T.Pres 2002 , Cluj - Napoca .

V.2. Viorel, I.A., - *On the parameter identification of induction motor*-Electromotion 1997, Cluj-Napoca, p.138-142.

Reviste de specialitate

1. Energetica (România)
2. Studii și cercetări de energetică și electrotehnică (România)
3. Revue roumaine des sciences techniques. Série électrotechnique et énergétique (România)
4. IEEE Transactions on Energy Conversion (SUA)
5. IEEE Transactions on Power Delivery (SUA)
6. IEEE Transactions on Power Systems (SUA)
7. CIGRE 2000 și 2002 (Franța)
8. Proceedings of IEE (Anglia)
9. Revue générale de l'électricité (Franța)
10. Revue de l'électricité et de l'électronique (Franța)
11. Elektrotechnische Zeitschrift (Germania)