

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICA

ING.MIHAI MOGA

T E Z A D E D O C T O R A T

IDENTIFICAREA SI ESTIMAREA CARACTERISTICILOR
STATICE SI DINAMICE ALE MARILOR CONSUMATORI
COMPLECSI (PLATFORME INDUSTRIALE) DIN SISTEMUL
ENERGETIC

CONDUCATOR STIINTIFIC
PROF.DR.ING.IOAN NOVAC

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

T I M I S O A R A

1 9 8 9

538.527
104 G

L I S T A A B R E V I E R I L O R

1. CC - consumator complex
2. CCI - consumator complex industrial
3. CCP - consumator component
4. CD - caracteristică dinamică
5. CS - caracteristică statică
6. ER - efect de reglaj
7. IPT - Intreprinderea Textilă Timișoara
8. MCMMP - metoda celor mai mici pătrate
9. MI - motor de inducție (asincron)
10. MM - model matematic
11. MS - motor sincron
12. RE - rețea electrică
13. RRD - rețea electrică de distribuție
14. TGD - tablou general de distribuție
15. t.e.m. - tensiune electromotoare
16. SEE - sistem electroenergetic
17. u.a. - unități absolute
18. u.r. - unități relative
19. u.r.n. - unități relative nominale
20. §. - paragraf

SEMNIFICAȚIILE SIMBOLURILOR ȘI NOTAȚIILOR UTILIZATE MAI FRECVENT

1. P_u , q_u , P_f , q_f - ER ale CS de putere activă și reactivă funcție de tensiune și respectiv frecvență exprimate în u.r.;
2. F_o , Q_o , U_o , f_o , (ω_o) - mărimile electrice caracteristice regimului permanent de funcționare considerat de referință;
3. P , Q - puterea activă respectiv reactivă absorbită de CC;
4. U , f (ω) - tensiunea și frecvența (pulsatia) sa în nodul de racord al CC.
5. $[A]$ - matricea "A".

INDICI UTILIZATI

1. "o" - precizează faptul că mărimile se referă la regimul permanent de referință;
2. "u" - precizează mărimile exprimate în u.r. avînd ca mărime de bază mărimile electrice caracteristice regimului permanent de referință;
3. "rn" - precizează mărimile electrice exprimate în u.r.n.;
4. $\left[\begin{matrix} \\ \end{matrix} \right]^t$ - marchează operația de transpunere a unei matrice sau vector.

C U P R I N S

INTRODUCERE

Cap.1. ASPECTE GENERALE ALE IDENTIFICARII SI ESTIMARII CARACTERISTICILOR STATICE SI DINAMICE ALE CONSUMATORILOR COMPLECSI.	1
1.1. Introducere.	1
1.2. Identificarea și estimarea parametrilor. Particularitățile identificării CC	1
1.3. Convenții și definiții pentru unele noțiuni care intervin în identificarea CC.	6
1.3.1. Noțiunea de consumator complex	6
1.3.2. Noțiuni de caracteristici ale CC	7
1.3.3. Noțiunea de efect de reglaj al sarcinii.	9
1.4. Analiza influenței modului de considerare al CC asupra regimurilor de funcționare ale SEE	9
1.4.1. Aspecte generale	9
1.4.2. Influența modului de considerare al CC asupra stabilității SEE	10
1.4.3. Influența modului de considerare al CC asupra regimurilor de funcționare permanente ale SEE.	13
1.5. Concluzii	14
Cap.2. CARACTERISTICILE STATICE SI DINAMICE ALE MOTOARELOR DE INDUCȚIE	17
2.1. Introducere.	17
2.2. Ipotezele simplificatoare și convențiile de semn adoptate în vederea identificării CS și CD ale MI	20
2.3. Caracteristicile statice ale motoarelor de inducție.	22
2.3.1. Introducere.	22
2.3.2. Analiza stadiului actual al reprezentării MI prin CS	23
2.3.3. Determinarea expresiilor parametrilor CS ale MI.	26
2.3.4. Parametrii CS ale MI din seria ASI, gama de puteri nominale (0,75 - 55)kW	31
2.4. Caracteristicile dinamice ale motoarelor de inducție	34
2.4.1. Aspecte generale	34
2.4.2. Mașina de inducție reală, mașina echivalentă, ecuațiile de funcționare	36
2.4.3. Deducerea sistemelor de ecuații ale CD ale MI.	40
2.4.4. Validarea CD ale MI obținute	46
Cap.3. CARACTERISTICILE STATICE SI DINAMICE ALE MOTORULUI SINCRON	51
3.1. Introducere.	51
3.2. Ecuațiile de funcționare ale MS.	55

3.3. Caracteristicile statice ale MS	59
3.3.1. Aspecte generale	59
3.3.2. CS de putere activă funcție de tensiune și frecvență ale MS	60
3.3.3. CS de putere reactivă funcție de tensiune și frecvență ale MS.	62
3.4. Caracteristicile dinamice ale mașinii sincrone.	65
3.4.1. Aspecte generale.	65
3.4.2. CD ale MS sub forma ecuațiilor intrare-stare-ieșire neliniare	66
3.4.3. CD ale MS liniarizate în jurul punctului caracteristic regimului permanent de funcționare.	68
Cap.4. CARACTERISTICILE CONSUMATORILOR STATICI	71
4.1. Introducere	71
4.2. Consumatori de iluminat	72
4.2.1. Lămpi cu incandescență.	72
4.2.2. Lămpi cu descărcare în gaze	73
4.3. Consumatori termici rezistivi	75
4.4. Redresoare (consumatori de curent continuu)	77
4.4.1. Modelul de bază pentru redresoarele de putere	77
4.4.2. CS de putere activă și reactivă funcție de tensiune ale redresoarelor	78
Cap.5. CARACTERISTICILE STATICE ALE CONSUMATORILOR COMPLECSI	80
5.1. Introducere	80
5.2. Analiza stadiului actual al reprezentării CC prin CS.	81
5.2.1. Aspecte generale.	81
5.2.2. Formele de reprezentare ale CS ale CC	82
5.2.3. Influența compensării puterii reactive asupra parametre- rilor CS de putere reactivă.	97
5.2.4. Valorile parametrilor CS ale CC raportate la literatura de specialitate	89
5.3. Identificarea analitică a CS ale CC	91
5.3.1. Introducere	91
5.3.2. Stabilirea ponderilor diverselor componente în con- sumul total al CC	92
5.3.3. Analiza influenței RED asupra parametrilor CS ale CC.	93
5.3.4. Asamblarea caracteristicilor statice ale CC	96
5.3.4.1. Aspecte generale.	96
5.3.4.2. Asamblarea CS ale CC cu RED radiale	97
5.3.4.3. Asamblarea CS ale CC cu RED buclate	99
5.4. Identificarea experimentală a CS ale CC	102
5.4.1. Introducere	102

5.4.2.	Analiza metodelor utilizabile pentru identificarea CS ale CC	103
5.4.3.	Echipamentul de măsură propus pentru identificarea experimentală a CC	104
5.4.4.	Estimarea parametrilor CS determinate prin măsurători de putere și tensiune.	107
Cap.6.	CARACTERISTICILE DINAMICE ALE CONSUMATORILOR COMPLECSI	110
6.1.	Aspecte generale ale reprezentării CC prin CD.	110
6.1.1.	Introducere.	110
6.1.2.	Analiza stadiului actual privind identificarea CD ale CC în literatura de specialitate	111
6.1.3.	Caracteristicile dinamice ale CC echivalent	114
6.1.3.1.	Aspecte generale	114
6.1.3.2.	CD ale CC echivalent sub forma ecuațiilor intrare- -stare-ieșire.	115
6.1.3.3.	CD ale CC echivalent sub forma funcțiilor de transfer liniare.	117
6.2.	Identificarea analitică a CD ale CC.	118
6.2.1.	Introducere	118
6.2.2.	CD ale CC real (detaliat).	120
6.2.2.1.	Reprezentarea elementelor componente ale CC.	120
6.2.2.2.	MM neliniar al CC real	121
6.2.2.3.	MM liniarizat al CC real	124
6.2.2.4.	Răspunsul tranzitoriu al CC real la perturbații de tensiune la bornele sale.	126
6.2.3.	Determinarea parametrilor circuitului electric al CC echivalent	127
6.2.3.1.	Determinarea parametrilor consumatorului static echivalent	127
6.2.3.2.	Determinarea parametrilor electrici ai MI echivalent	127
6.3.	Identificarea experimentală a CD ale CC	132
6.3.1.	Introducere.	132
6.3.2.	Determinări experimentale pentru identificarea CD ale CC.	134
6.3.3.	Estimarea parametrilor CD ale CC în cadrul identificării experimentale.	135
6.3.3.1.	Algoritmul de estimare al parametrilor CD ale CC	135
6.3.3.2.	Implementarea algoritmului de estimare a parametrilor CD ale CC echivalent.	139
Cap.7.	IDENTIFICAREA ȘI ESTIMAREA CARACTERISTICILOR STATICE ȘI DINAMICE ALE ÎNTREPRINDERII TEXTILA TIMISOARA.	143
7.1.	Introducere	143

5.4.2.	Analiza metodelor utilizabile pentru identificarea CS ale CC	103
5.4.3.	Echipamentul de măsură propus pentru identificarea experimentală a CC	104
5.4.4.	Estimarea parametrilor CS determinate prin măsurători de putere și tensiune.	107
Cap.6.	CARACTERISTICILE DINAMICE ALE CONSUMATORILOR COMPLECSI . .	110
6.1.	Aspecte generale ale reprezentării CC prin CD.	110
6.1.1.	Introducere.	110
6.1.2.	Analiza stadiului actual privind identificarea CD ale CC în literatura de specialitate	111
6.1.3.	Caracteristicile dinamice ale CC echivalent	114
6.1.3.1.	Aspecte generale	114
6.1.3.2.	CD ale CC echivalent sub forma ecuațiilor intrare-stare-ieșire.	115
6.1.3.3.	CD ale CC echivalent sub forma funcțiilor de transfer liniare.	117
6.2.	Identificarea analitică a CD ale CC.	118
6.2.1.	Introducere	118
6.2.2.	CD ale CC real (detaliat).	120
6.2.2.1.	Reprezentarea elementelor componente ale CC.	120
6.2.2.2.	MM neliniar al CC real	121
6.2.2.3.	MM liniarizat al CC real	124
6.2.2.4.	Răspunsul tranzitoriu al CC real la perturbații de tensiune la bornele sale.	126
6.2.3.	Determinarea parametrilor circuitului electric al CC echivalent	127
6.2.3.1.	Determinarea parametrilor consumatorului static echivalent	127
6.2.3.2.	Determinarea parametrilor electrici ai MI echivalent	127
6.3.	Identificarea experimentală a CD ale CC	132
6.3.1.	Introducere.	132
6.3.2.	Determinări experimentale pentru identificarea CD ale CC.	134
6.3.3.	Estimarea parametrilor CD ale CC în cadrul identificării experimentale.	135
6.3.3.1.	Algoritmul de estimare al parametrilor CD ale CC . .	135
6.3.3.2.	Implementarea algoritmului de estimare a parametrilor CD ale CC echivalent.	139
Cap.7.	IDENTIFICAREA ȘI ESTIMAREA CARACTERISTICILOR STATICE ȘI DINAMICE ALE ÎNTRERINDERII TEXTILA TIMISOARA.	143
7.1.	Introducere	143

7.2. Alimentarea cu energie electrică și principalele caracteristici ale ITT	145
7.3. Identificarea CS ale ITT	149
7.3.1. Identificarea analitică	149
7.3.1.1. Introducere	149
7.3.1.2. Estimarea CS ale principalelor secții productive	150
7.3.1.3. Parametrii CS ai CC echivalent al ITT "văzut" de pe bara de 10 kV ai stației de transformare "Dumbrăvița"	153
7.3.2. Identificarea experimentală a CS ale ITT	155
7.3.2.1. Descrierea măsurărilor efectuate	155
7.3.2.2. Prelucrarea datelor experimentale	157
7.3.2.3. Concluzii	159
7.4. Identificarea CD ale ITT	160
7.4.1. Identificarea analitică a CD ale ITT	160
7.4.1.1. Reprezentarea elementelor componente ale CC considerat	160
7.4.1.2. Regimul permanent de funcționare considerat pentru ITT	162
7.4.1.3. CC echivalent al ITT	164
7.4.1.4. CD ale ITT identificate analitic	166
7.4.2. Identificarea experimentală a CD ale ITT	168
7.4.2.1. Măsurătorile și înregistrările efectuate pentru identificarea CD ale ITT	168
7.4.2.2. Prelucrarea datelor experimentale obținute	169
7.4.2.3. Rezultatele obținute. Concluzii.	171
Cap.8. CONCLUZII GENERALE	174
Anexe	181
BIBLIOGRAFIE	183

I N T R O D U C E R E

Tendința actuală, deplin justificată, de a se realiza SEE cât mai economice, a determinat pe de o parte, construirea de grupuri electrogene cu puteri unitare cât mai mari și cu dimensiuni geometrice pe cât posibil reduse, cu reactanțe mari și cu o automată de sistem sofisticată și pe de altă parte, concentrarea surselor de energie electrică în zonele cu resurse energetice primare, creindu-se astfel, zone teritoriale cu excedent de energie electrică, ce trebuie evacuată spre zonele deficitare. Aceste modificări în structura și configurația SEE moderne, alături de buclarea tot mai complexă a RE de transport și distribuție, a determinat funcționarea acestora în apropierea limitelor de stabilitate și apariția unor probleme deosebite privind reglajul de tensiune și frecvență în sistem. În consecință, în fața inginerilor electroenergeticieni au fost puse probleme foarte complexe privind proiectarea elementelor de sistem și acordarea corespunzătoare a parametrilor sistemelor de reglaj existente în SEE. La baza rezolvării acestor probleme stă, în general, analiza regimurilor permanente și dinamice ale SEE prin simulări numerice.

Obținerea unor reprezentări cât mai realiste a comportării SEE în regimurile permanente și dinamice este condiționată, în primul rând, de modelizarea matematică cât mai riguroasă a elementelor de sistem, motiv ce a determinat intense preocupări în literatura de specialitate privind reprezentarea cât mai fidelă a grupurilor electrogene, a elementelor RE și a consumatorilor complecși. Sînt remarcabile în acest sens, realizările privind reprezentarea în studiile de sistem a generatoarelor sincrone. Pornind de la lucrările Park și Gorev (1927-1928) care au introdus în studiul mașinii sincrone teoria celor două axe, preocupările ulterioare au condus la elaborarea unor MM detaliate cu considerarea sistemelor de reglaj ale excitației și vitezei, a curenților turbionari și histerezei miezului magnetic /61/, /68/, /82/, /86/, /112/, /113/.

Spre deosebire de generatorul sincron, celălalt element terminal din cadrul SEE, consumatorul complex, este reprezentat în studiile de sistem prin modele mult mai simplificate /21/, /26/, /72/, /84/, /48/, deoarece:

- * structura și caracteristicile CC se modifică permanent în timp;
- * există o mare varietate de consumatori cu diverse caracteristici;
- * este mai puțin cunoscută comportarea CC în regimurile permanente și dinamice ale SEE;
- * considerarea CC prin CS sau CD complică mult algoritmele de calcul, fie prin introducerea unor cicluri iteratiive suplimentare în cadrul

ciclurilor iterative de bază de la metodele de analiză uzuale pas cu pas, fie prin creșterea inadmisibilă a dimensiunilor sistemelor de ecuații algebrice și diferențiale în cazul metodelor directe.

Importanța reprezentării corecte a sarcinii în studiile de stabilitate a SFB a fost remarcată încă din 1934 prin lucrările lui Cray /23/, dar cu puține excepții, pînă în anii '60, studiile de stabilitate urmărind doar menținerea coerentă a generatoarelor din sistem, accentul a fost pus pe reprezentarea acestora, iar consumatorii au fost priviți ca elemente secundare ce afectează doar impedențele de transfer ale sistemului. Acest mod de considerare al CC prin parametru constant permite includerea acestora în matricea de admitanță nodală a sistemului /94/, ceea ce determină o convergență sigură a soluțiilor iterative ale regimurilor /21/, /55/, /84/.

Caracteristicile SFB moderne impun însă considerarea cu mai multă fidelitate a caracteristicilor sarcinii astfel încît, pe baza studiilor de stabilitate, să se poată realiza proiectarea și acordarea echipamentelor de reglaj devenite tot mai complexe și mai sofisticate /15/, /40/, /55/, /68/, /131/.

Se afirmă /52/, /62/, /87/, că modelizarea corectă a sarcinii este tot atît de importantă în problemele de stabilitate, dacă nu chiar mai importantă în unele cazuri decît reprezentarea mașinii sincrone. Calculele efectuate în SFB /26/, /27/, /64/, /67/, /84/, /149/, considerînd deverse moduri de reprezentare a CC au demonstrat rolul decisiv al reprezentării corecte al acestuia în studiile de stabilitate.

Prezenta lucrare se înscrie în contextul preocupărilor actuale privind elaborarea unor MM care să reprezinte cît mai realist sarcina în simulările analitice ale regimurilor de funcționare ale SFB complexe. În acest sens s-a avut în vedere realizarea următoarelor obiective:

- elaborarea strategiilor adecvate identificării CC pe baza teoriei generale a identificării proceselor;
- stabilirea formelor de reprezentare a consumatorilor individuali și CC prin CS și CD care, pe de o parte, se reflectă cît mai realist comportarea acestora în regimurile permanente și respectiv dinamice ale SFB și, pe de altă parte, să fie adecvate implementării în algoritmele și programele de calcul existente pentru studiul SFB;
- realizarea unei sinteze bibliografice a rezultatelor identificărilor unor consumatori individuali și complecși în vederea constituției unei baze de date pentru considerarea CC prin CS și CD.

În vederea realizării acestor deziderate, prezenta lucrare a fost concepută în patru părți interdependente. Astfel, prima parte, capitolul 1, abordează aspecte generale ale identificării CC, partea a

două (capitolele 2, 3 și 4) tratează CS și CD ale principalelor categorii de consumatori individuali, iar partea a treia abordează problemele identificării analitice și experimentale a CS (capitolul 5), și a CD (capitolul 6) ale CC. Ultima parte, capitolul 7, constituie partea aplicativă a lucrării, în cadrul căreia sînt identificate CS și CD ale unui CC tipic industrial, utilizînd metodele și algoritmele de calcul dezvoltate în capitolele anterioare.

Lucrarea structurată pe opt capitole și extinsă pe 196 pagini, conținînd 77 figuri și 31 tabele, pornește de la rezultatele cercetărilor în domeniul abordat, prezentate în cele 153 titluri bibliografice consultate, dintre care 30 titluri sînt elaborate de către autor, singur (5) sau în colaborare (25).

Primul capitol al lucrării prezintă, pe baza unei sinteze bibliografice, posibilitățile concrete de abordare a problemei identificării CC, se discută critic definițiile și noțiunile care intervin în procesul de identificare și estimare al CS și CD ale CC și se efectuează o analiză a influenței modului de reprezentare a CC asupra regimurilor SBE, rezultînd concluzii importante privind modul și forma de reprezentare practică a CC.

Capitolele 2, 3 și 4 sînt consacrate elaborării într-o formă unitară a CS și CD ale principalelor categorii de consumatori individuali: MI; MS; cuptoare termice rezistive; redresoare și consumatori de iluminat. După efectuarea unei analize bibliografice privind rezultatele reprezentărilor fiecărei categorii de consumatori individuali menționați mai sus prin CS și CD, se dezvoltă relațiile și algoritmele de calcul adecvate estimării CS și CD ale acestora, pe baza unor sisteme unitare de coordonate unități de măsură și convenții de semn. Sînt evaluați parametrii caracteristicilor acestor consumatori individuali în diverse regimuri de funcționare și sînt evidențiate influențele diverșilor factori asupra valorilor lor. O atenție deosebită este acordată reprezentării MI prin CS și CD, datorită ponderii mari a acestora în structura CC individuali și a posibilităților practice de a reprezenta în regimurile dinamice CC prin MI echivalente, pentru care se vor estima parametrii cu metode statistice.

În capitolul 5 este abordată problema identificării și estimării CS ale CC utilizînd atît calea analitică, prin asamblarea CS ale principalelor categorii de consumatori individuali, prezentate în capitolele precedente, cît și calea experimentală, prin prelucrarea statistică a rezultatelor măsurătorilor obținute în cadrul unor teste active. În acest scop, se stabilesc formele cele mai adecvate de reprezentare ale CS ale CC, sînt dezvoltate metode practice de estimare a parametrilor

acestora, considerînd prezența RFD și a bateriilor de condensatoare statice. Pentru înregistrarea rezultatelor testelor experimentale se prezintă echipamentul de măsură și înregistrare conceput și realizat în acest scop.

Capitolul 6 este consacrat identificării analitice și experimentale a CD ale CC, admis sub forma unui MI și consumator static echivalent. Sînt dezvoltate CD ale CC echivalent sub forma intrare-stare-ieșire, este elaborat un algoritm de estimare al parametrilor circuitului electric echivalent al CC în cadrul identificării analitice, iar pentru estimarea parametrilor săi pe baza rezultatelor înregistrărilor experimentale, s-a elaborat un algoritm de estimare eficient bazat pe MCMMP.

Capitolul 7 prezintă utilizarea practică a procedurilor de identificare și estimarea analitică și experimentală, dezvoltate în capitolele anterioare, în cazul unui CC concret, ITT, considerat pe bara de 10 kV a stației de transformare 110/10 kV "Dumbrăvița". Prin caracterul său aplicativ practic, acest capitol permite o validare a concluziilor, metodelor și programelor de calcul dezvoltate în capitolele anterioare ca și o confirmare a utilității și eficienței echipamentului de măsură și înregistrare conceput și realizat în vederea identificării experimentale a caracteristicilor CC.

Ultimul capitol este consacrat concluziilor și recomandărilor cu caracter general rezultate din analiza de ansamblu a abordării problemei identificării CC.

Principalele contribuții ale prezentei lucrări în domeniul identificării CC și reprezentării lor prin CS și CD rezidă, pe de o parte, în dezvoltarea unor forme riguroase pentru CS și CD ale CC, adecvate implementării în programele de calcul existente de analiză a regimurilor SFE, elaborarea unor metode, algoritme și programe de calcul eficiente pentru estimarea parametrilor acestora, și pe de altă parte, prin rezultatele estimărilor efectuate ai parametrilor CS și CD ale unor consumatori individuali și complecși identificați analitic sau experimental.

Rezultatele cercetărilor efectuate pe parcursul elaborării prezentei lucrări, au fost valorificate prin rezolvarea unor probleme din cadrul contractelor de cercetare științifică ale colectivului de cercetare-proiectare pentru Electroenergetică din Institutul Politehnic Timișoara încheiate cu CCS TEH-Reșița și cu Combinatul Siderurgic Hunedoara, prin publicarea a mai multor lucrări de specialitate /14/, /16/, /17/, /69/, /71/, /91/ și /103/ și prin realizarea a două inovații înregistrate la IPTVT, /99/ și /102/.

Teza de doctorat a fost elaborată sub îndrumarea competentă, deosebit de generoasă și plină de înțelegere a tov.prof.dr.ing.Ioan Novac, cărui autorul îi aduce și pe această cale, cele mai respectuoase mulțumiri.

Pentru condițiile de lucru create și sprijinul acordat, autorul exprimă recunoștința sa tov.conf.dr.ing.Alexandru Vasilievici, șeful catedrei de Electroenergetică. De asemenea autorul este deosebit de recunoscător și adresează mulțumiri călduroase tov.conf.dr.ing.Mircea Nemeș pentru îndemnul, sugestiile și observațiile competente și deosebit de utile făcute pe parcursul elaborării tezei.

Pentru permanenta și fructuoasa colaborare cu colegii și prietenii din cadrul colectivului de Rețele și Sisteme electrice ș.l.dr.ing.Adrian Buta, ș.l.dr.ing.Stefan Kilyeni, ș.l.dr.ing.Bucur Luștea, asist.dr.ing.Flavius Surianu și ș.l.dr.ing.Cornel Velicescu, autorul își manifestă deplina grațitudine. Autorul mulțumește de asemenea tov.ș.l.dr.ing.Cornelia Ivașcu și ing.Liviu Mlea, șef CIT la IRE Timișoara, pentru fructuoasa colaborare în cadrul realizării părții experimentale a lucrării. În același context aduc mulțumiri colegilor din cadrul serviciului energetic al IPT pentru informațiile utile și sprijinul acordat privind realizarea părții aplicative a tezei de doctorat.

Autorul este recunoscător colegului ing.Alexandru Zudor de la Centrul Teritorial de Calcul Electronic pentru ajutorul acordat în realizarea unor programe de calcul și adresează mulțumiri tuturor colegilor din catedra de Electroenergetică, tuturor celor care într-un fel sau altul au sprijinit realizarea acestei lucrări.

În final, dar nu în ultimul rând, autorul remarcă deplina înțelegere și sprijinul permanent din partea soției sale, Cornelia Moga, în definitivarea lucrării.

Capitolul 1

ASPECTE GENERALE ALE IDENTIFICĂRII ȘI ESTIMĂRII CARACTERISTICILOR STATICE ȘI DINAMICE ALE CONSUMATORILOR COMPLEXI

1.1. Introducere

Reprezentarea CC pentru analiza regimurilor de funcționare staționare și dinamice ale SEE complexe implică elaborarea unor MM care să redea cât mai realist comportarea acestora (a modificarea mărimilor oferite de sistem, denumite și mărimi de comandă, intrare, sau perturbații /37/,/117/. Obținerea MM al CC se realizează printr-un proces de identificare al CC și estimare a parametrilor acestuia, prezentându-se sub forma unor ecuații algebrice sau (și) diferențiale, ce permit determinarea în funcție de valorile mărimilor oferite de sistem și ale derivatelor acestora a mărimilor caracteristice CC cum ar fi: puterea activă și reactivă; curentul; cuplul; alunecarea; etc. Considerând ca mărimi de intrare (oferite de SEE) pentru CC, tensiunea și frecvența din nodul sau de racord, sau alte forme de exprimare ale acestora (componentele tensiunii după două axe rectangulare, modulul și faza tensiunii, etc), se poate obține un MM al CC cunoscut sub denumirea de caracteristici ale CC în literatura română /24/,/26/, /54/,/89/,/120/, rusă /10/,/38/,/49/,/142/ și germană /13/, sau de model de sarcină ("load model") în literatura anglofonă /1/,/21/,/39/, /40/,/67/,/87/,/129/,/148/.

În cadrul prezentului capitol, pe baza unei sinteze bibliografice și a experienței autorului, se prezintă modul de abordare a problemei identificării în cazul concret al CC, se analizează critic definițiile și noțiunile aferente caracteristicilor CC și se discută influența modului de reprezentare al CC în MM al SEE asupra regimurilor de funcționare ale acestuia. Concluziile rezultate permit conturarea strategiei identificării și estimării caracteristicilor CC, stabilirea formei celei mai adecvate de reprezentare a acestora, ca și a modului de utilizare practică în simularea matematică a regimurilor de funcționare ale SEE.

1.2. Identificarea și estimarea parametrilor. Particularitățile identificării CC

Scopul oricărui proces de identificare îl constituie modelul sistemului, obiectului sau procesului supus identificării, model definit de Bykof /37/ ca o reprezentare a aspectelor esențiale ale aces-

tuia sub o formă utilizabilă. În conformitate cu această definiție pentru un sistem dat se pot construi mai multe modele în funcție de aspectele considerate esențiale și de scopul în care-l construim. Dintre categoriile de modele: conceptuale, fizice sau analitice, în cazul CC modelul convenabil este cel analitic sau matematic (MM), reprezentând relația de legătură dintre mărimile u , oferite de SBE și mărimile y , caracteristice CC, /21/, /24/, /148/.

Identificarea, definită de Zadeh în /147/, acceptată și preluată de mulți alți autori /4/, /37/, /138/, reprezintă determinarea pe baza intrării și ieșirii a unui sistem dintr-o clasă determinată de sisteme față de care sistemul care se încearcă este echivalent. Folosind formularea lui Zadeh, este necesar să specificăm în cazul concret al CC, că acesta reprezintă sistemul care se încearcă, clasa de sisteme sînt caracteristicile (modelele acestuia), iar ca intrări, mărimile oferite de SBE la bornele consumatorului. Echivalența modelului CC real implică evoluții cvasiidentice pentru aceleași perturbații considerate la bornele CC real și al modelului, atît în regimuri staționare cît și dinamice sau tranzitorii.

Identificarea CC poate fi realizată (figura 1.1):

- analitic sau prin asamblare - cînd determinarea caracteristicilor se face pe baza legilor fizice care guvernează dinamica componentelor CC /37/, /123/, /125/;

- experimental - cînd determinarea caracteristicilor CC se face prin prelucrări statistice a datelor intrare-ieșire obținute prin măsurători în cadrul unor experimente active sau pasive /37/, /117/, /138/.

Analiza căilor de identificare (figura 1.1) relevă pe de o parte avantajele și dezavantajele, ca și limitările acestora, prezentate sintetic în tabelul 1.1. /21/, /89/, /148/, iar pe de altă parte o anumită interdependență, astfel încît nu se poate afirma că identificarea este net analitică sau experimentală. Această interdependență este determinată de /8/, /13/, /21/, /55/, /148/:

a) utilizarea în cadrul identificării analitice a rezultatelor identificărilor experimentale pentru componentele CC ale căror legi fizice nu sînt cunoscute, sau sînt dificil de exprimat analitic;

b) structura sau forma caracteristicilor CC este rezultatul unei estimări analitice a acestuia, utilizată și în identificarea experimentală;

- c) ambele categorii de identificare implică estimarea parametrilor caracteristicilor utilizând algoritme de calcul similare;
- d) identificarea experimentală, prin caracterul său fizic, constituie o validare a caracteristicilor obținute analitic pentru domeniul de variație al mărimilor de intrare în care s-au făcut măsurătorile.

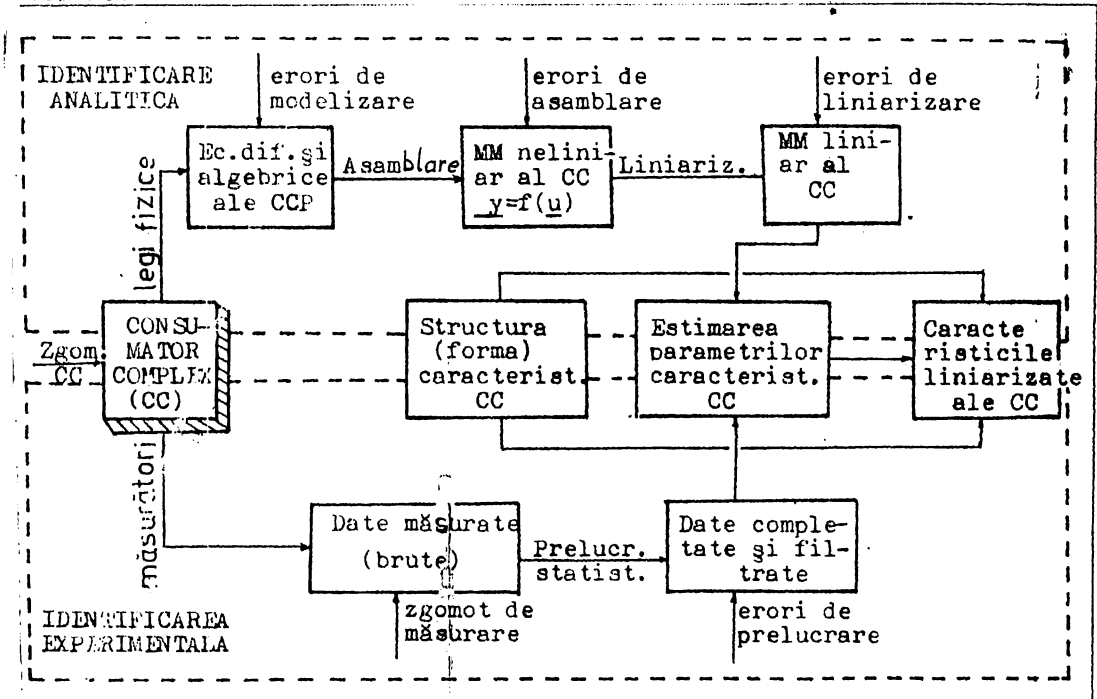


Fig.1.1. Structura de principiu a procesului de identificare analitică și experimentală a CC.

Indiferent de modul de identificare utilizat pentru construirea caracteristicilor CC, acesta conține următoarele etape /37/,/66/:

- 1) determinarea perechilor de valori (u,y) din mulțimile valorilor mărimilor de intrare (comanda), u, și de ieșire, y;
- 2) stabilirea structurii sau formei caracteristicilor CC;
- 3) verificarea și validarea rezultatelor.

Referitor la aceste etape se fac următoarele prezisări:

- a) determinarea perechilor de valori (u,y), se realizează fie prin asamblarea caracteristicilor CCP și excitarea MM astfel obținut cu un set de mărimi de intrare /8/,/50/,/55/,/87/,/125/,/131/, fie prin înregistrarea variației mărimilor u și y în cadrul unor teste experimentale și eșantionarea în timp a acestora /39/,/65/,/64/,/87/,/93/,/110/,/129/;

Tabelul 1.1.
Compararea metodelor de identificare a CC.

Nr. crt.	Identificarea analitică	Identificarea experimentală
	<u>AVANTAJE</u>	<u>DEZAVANTAJE</u>
1.	Nu perturbă funcționarea CC.	Identificarea cu metode active comportă riscuri privind siguranța în funcționare a CC.
2.	Nu necesită aparataj de măsură.	Necesită aparataj de măsură, mai sofisticat în cazul identificării pasive.
3.	Permite obținerea unor caracteristici neliniare, acceptabile pentru un domeniu larg de variație al mărimilor de intrare	Datorită domeniilor admisibile de variație a mărimilor de intrare (5-10%), valabilitatea caracteristicilor obținute se restrânge la aceste domenii
4.	Estimarea parametrilor caracteristicilor este mai riguroasă, permite aprecierea formei caracteristicii.	Estimarea parametrilor este dificilă datorită zgomotului de măsură și a fenomenelor tranziției slabe interne într-un CC.
	<u>DEZAVANTAJE</u>	<u>AVANTAJE</u>
5.	Necesită cunoașterea structurii CC, a caracteristicilor tuturor componentelor în număr extrem de mare și de diversificate.	Nu necesită informații detaliate despre CC, se poate aplica principiul "cutiei negre".
6.	Modelele obținute pot să rezulte foarte complexe, reducerea lor implicând serioase dificultăți sau aproximații grosiere.	Modelele au forme relativ simple, stabilite aprioric, estimarea parametrilor conduce la caracteristici certe în domeniul în care s-au efectuat măsurătorile.
7.	Multe componente ale CC au legi fizice extrem de complexe sau necunoscute, astfel că includerea lor în modelul CC este fie imposibilă, fie aproximativă.	Procesul de identificare este independent de dimensiunea și tipul CC, fiind în general identic pentru consumatorii individuali și CC.

b) stabilirea structurii sau formei caracteristicilor CC, deși poate fi realizată în cadrul identificării CC printr-o abordare de tipul "cutiei negre", /37/, avînd însă în vedere faptul că în general se cunosc structura aproximativă a CC, modul de interconectare și ponderile cu care intervin diversele sale componente, etc, o astfel de abordare este nerealistă, "cutia" fiind în acest caz mai mult sau mai puțin "cenușie". Practic aprecierea formei caracteristicilor CC se realizează fie pe baza informațiilor din literatură, deoarece CC au structuri sau configurații aproximativ similare, cel puțin pe categorii de CC, fie pe baza formei funcției $y = f(u)$ obținute la punctul a);

c) estimarea parametrilor caracteristicilor constituie problema de bază a procesului de identificare. Se folosește noțiunea de estimare în locul celei de determinare deoarece în toate situațiile realiste; etapele procesului de identificare (analitică sau experimentală) sînt contaminate de influențe aleatoare (figura 1.1) și în consecință, se impune utilizarea unor metode statistice pentru obținerea valorilor "cele mai bune" din măsurătorile efectuate, prin "filtrarea"

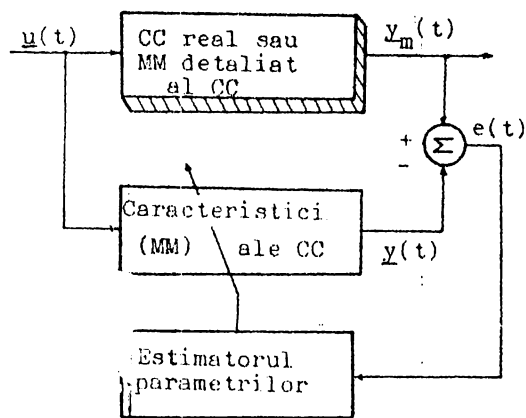


Fig.1.2. Includerea estimatorului parametrilor caracteristicilor în procesul de identificare al CC.

unde $y(t)$ și $y_m(t)$ reprezintă ieșirile CC real și respectiv al modelului său în funcție de timp obținute pentru aceeași perturbație. Minimizarea funcției E se realizează printr-un proces iterativ secvențial pe bază ^{comparării} de răspunsului CC real sau al MM detaliat cu cel al caracteristicii CC ce se urmărește a fi identificat conform figurii 1.2.

d) verificarea și validarea caracteristicilor obținute se realizează fie analitic, prin înlocuirea CC reprezentat detaliat cu mo-

destora de influențele perturbatoare /37/, /117/.

Estimarea parametrilor definită în /37/ ca determinarea valorilor parametrilor modelului care generează comportarea dinamică și cvasistatică a acestuia, presupunînd structura sa cunoscută, poate fi tratată ca o problemă de optimizare /4/, /14/, /37/, /137/. Criteriul sau funcția obiectiv fiind o funcție de eroare E care trebuie minimizată:

$$E(y, y_m) = \int_0^T [y(t) - y_m(t)]^2 dt \quad (1.1)$$

delul său în diferite regimuri de funcționare /84/, /87/, /125/, fie experimental, prin compararea răspunsului CC real la un semnal de intrare dat cu cel al modelului pentru același semnal de intrare /55/, /125/, /139/.

1.3. Convenții și definiții pentru unele noțiuni care intervin în identificarea CC

1.3.1. Noțiunea de consumator complex (CC)

Modelizarea matematică a regimurilor de funcționare ale SEE complexe implică considerarea aproape în exclusivitate a sarcinii sub forma unor consumatori echivalenți, formați din RED complexe în nodurile cărora sînt racordați un număr

mare de consumatori individuali de diferite tipodimensiuni /27/, /71/, /72/. Acești consumatori echivalenți sînt denumiți "consumatori complecși" în literatura română /25/, /26/, /89/, /120/, "sarcina (load, nagruzka)" în literatura anglofonă și rusă /8/, /13/, /31/, /39/, /49/, /56/, /142/, /148/.

Deși în literatură, /21/, /142/, /148/, definițiile pentru CC sînt vagi, în sensul menționat mai sus, noțiunea de CC este frecvent utilizată în lucrările care abordează problemele SEE.

Avînd în vedere modul de includere al CC în MM ale SEE pentru analiza regimurilor permanente și dinamice ale acestora, se impune precizarea ca în definiția noțiunii de CC să se introducă și condiția de a fi alimentat dintr-un singur nod al SEE. Astfel, consumatorul racordat în nodul A din figura 1.3 nu poate fi considerat în acest sens CC. Se impune fie includerea în SEE considerat a nodurilor A, B și X, fie eli-

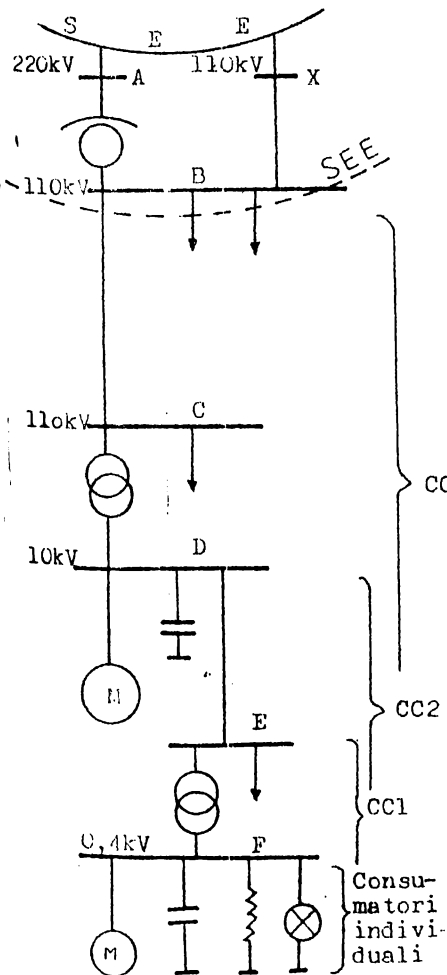


Fig.1.3. Consumatori individuali și complecși ai SEE.

minarea nodului B conform algoritmului de distribuire a sarcinilor neliniare, prezentat în /44/.

În funcție de nivelul maxim de tensiune al RE din structura CC aceștia pot fi considerați racordați în diverse noduri ale SEE, introducându-se astfel o ierarhie a CC (figura 1.3). În consecință, considerăm utilă și definirea noțiunii de consumator component (CCP), /110/, pentru grupuri de consumatori și RED aferente, care pot fi reprezentați prin caracteristici date și sînt alimentați dintr-un singur nod al RE a CC.

1.3.2. Noțiunile de caracteristici ale CC

Așa cum s-a precizat în paragraful 1.2, rezultatul procesului de identificare al CC îl constituie MM al său. Dacă acest MM realizează legătura dintre mărimile oferite de SEE la bornele CC, denumite în continuare mărimi de sistem, (în general tensiunea și frecvența sa, sau alte forme de exprimare ale acestor mărimi), și mărimile prin care răspunde CC sistemului (de obicei putere activă și reactivă, sau componentele curentului absorbit, etc), atunci MM respectiv reprezintă caracteristicile CC.

În funcție de regimul de funcționare, permanent sau dinamic, în care aceste caracteristici descriu comportarea CC sînt cunoscute sub denumirile de caracteristici statice, respectiv dinamice. Pentru aceste noțiuni în literatură /21/, /24/, /120/, /142/ se dau următoarele definiții:

- caracteristicile statice (CS) - reprezintă relațiile dintre mărimile caracteristice CC determinate la modificări atît de lente ale regimului de funcționare încît fiecare punct al său poate fi considerat corespunzător unui regim de funcționare distinct /142/ și deci mărimile caracteristice pot fi reprezentate rezonabil prin funcții algebrice în raport cu mărimile de sistem /21/, /120/.

- caracteristicile dinamice (CD) - reprezintă caracteristicile CC în care timpul asociat comportării sarcinii este în domeniul de interes /21/, iar în expresiile mărimilor caracteristice trebuie considerate și derivatele mărimilor de sistem /10/, /120/, /142/.

Referitor la aceste definiții se fac următoarele comentarii:

a) datorită inerției electromagnetice și mecanice (pentru consumatori cu piase mobile), mărimile electrice caracteristice, C , ale sarcinii urmăresc dinamic, cu diferite constante de timp, variația mărimilor de sistem, (U, f) . În consecință caracteristicile consumatorilor trebuie scrise sub forma:

$$C = \varphi\left(U, f, \frac{dU}{dt}, \frac{df}{dt}, \frac{d^2U}{dt^2}, \frac{d^2f}{dt^2}, \dots\right); \quad (1.2)$$

b) defalcarea caracteristicilor CC în CS și CD trebuie să fie făcută în funcție de modul de variație al mărimilor de sistem în raport cu constantele de timp ale mărimilor caracteristice consumatorului;

c) deși reprezintă relațiile dintre aceleași două categorii de mărimi, definițiile prezentate mai sus pentru CS și CD nu reflectă diferențele cantitative dintre cele două noțiuni.

În concluzie, pe baza noțiunilor din literatură /21/, /24/, /22/, /142/ și a observațiilor de mai sus, se definesc caracteristicile consumatorilor ca fiind relațiile dintre variațiile unor mărimi caracteristice CC (putere, cuplu, curent, etc) și variațiile mărimilor de sistem din nodul de racord al acestuia, (tensiune și frecvență) conform relației (1.2). În cazul în care variațiile mărimilor de sistem sînt atît de lente încît constantele de timp ale mărimilor caracteristice pot fi neglijate, caracteristicile se numesc statice, iar în caz contrar, dinamice.

Analiza variației în timp a tensiunii și frecvenței în nodurile SEF în cadrul regimurilor dinamice ca urmare a diverselor tipuri de perturbații prezentate în literatură /27/, /47/, /68/, /70/, /71/, /73/, /76/, /82/, /113/, evidențiază următoarele aspecte specifice:

1. tensiunea în nodurile SEF variază în general rapid, cu constante de timp de ordinul zecimilor de secundă. Evoluția valorii tensiunii în nodul de racord al CC este afectată de un număr mare de factori cum ar fi: timpul avariei, locul său în raport cu poziția nodului de interes, automatica de sistem, scenariul de eliminare a avariei, etc. Datorită variațiilor rapide ale tensiunii în aceste regimuri dinamice, consumatorii rotativi din cadrul CC ale căror constante de timp sînt de ordinul (0,1 - 0,5)s /21/, /54/, /55/, trebuie considerați prin CD;

2. frecvența tensiunii în nodurile SEF, în regimurile dinamice ale acestuia fiind determinată de fenomene electromecanice, ca o medie ponderată a frecvențelor rotoarelor generatoarelor sincrone din sistem /27/, /149/, variază relativ lent, astfel că practic în toate studiile de stabilitate, CC pot fi reprezentați prin CS de frecvență (derivatale df/dt , d^2f/dt^2 ... pot fi practic neglijate în expresiile (1.2) ale caracteristicilor CC) /54/, /55/, /67/, /148/.

1.3.3. Noțiunea de efect de reglaj al sarcinii

Pentru abateri (ΔU și Δf), relativ mici față de valorile din regimul staționar ale tensiunii și frecvenței din nodurile de racord ale CC, CS ale acestora pot fi reprezentate sub forma:

$$P_1 = P_0 + \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f ; \quad Q = Q_0 + \frac{\partial Q}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f \quad (1.3)$$

unde derivatele parțiale: $\partial P/\partial U$; $\partial P/\partial f$; $\partial Q/\partial U$; $\partial Q/\partial f$, sînt denumite în literatură, "coeficienți de reglaj", /89/,/142/, "efecte de reglaj", "24/,/60/,/91/, sau "caracteristici de reglare" /27/.

Aceste derivate parțiale caracterizează influența consumatorului asupra variațiilor lente de tensiune și frecvență din sistem. Valorile pozitive indică o comportare naturală de autoreglare din partea consumatorilor față de modificările mărimilor electrice la bornele lor /24/. Fiind o măsură a influenței de reglare a consumatorilor asupra variațiilor mărimilor de sistem, se preferă utilizarea în continuare, pentru pantele CS (relațiile 1.3)), termenii de efecte de reglaj (ER).

ER constituie parametri esențiali ai CS ale CC deoarece:

- a) caracterizează complet comportarea consumatorului în regimuri de funcționare cvasistaționare, pentru abateri mici ale mărimilor de sistem în jurul punctului de funcționare permanent;
- b) valorile lor, exprimate în u.r., (mărimi de bază fiind mărimile corespunzătoare care caracterizează regimul permanent de referință: P_0 , Q_0 , U_0 , f_0), au o dispersie relativ redusă atât pentru consumatorii individuali cît și pentru CC, ceea ce permite utilizarea unor valori medii date în literatură /24/,/120/,/142/,/148/.

1.4. Analiza influenței modului de considerare al CC asupra regimurilor de funcționare ale SBE

1.4.1. Aspecte generale

Studiile de regimuri de funcționare ale SBE, efectuate în general prin simulări numerice și foarte rar prin teste experimentale, considerînd sarcina prin CS sau CD au evidențiat influența semnificativă a modului de reprezentare al CC, atât în regimurile staționare cît și cele tranzitorii ale SBE, /21/,/27/,/67/,/69/,/71/,/74/,/76/,/84/,/89/,/90/,/92/. Referitor la influența modului de considerare al CC asupra regimurilor tranzitorii ale SBE, literatura prezentînd numeroase rezultate în acest sens, se face observația că pentru a trage concluzii cantitative despre efectul sarcinii asupra stabilității, acestea trebuie să se bazeze pe analiza modificărilor limitelor de stabilitate

cum ar fi: puterea maximă de transfer; timpul maxim de eliminare al defectului; impedanța exterioară maximă, etc., și nu pe modificarea oscilațiilor unghiulare ale rotoarelor generatoarelor /21/,/72/. Amplitudinea acestor oscilații este puternic influențată de apropierea de limita de stabilitate, astfel că efectul său acoperă complet pe cel al modificării caracteristicii de sarcină.

În cadrul prezentului paragraf, pe baza unei sinteze bibliografice și a experienței autorului, obținută prin simulări numerice în regimuri de funcționare ale SEE /27/,/69/,/70/,/71/,/73/,/90/,/92/, se vor discuta efectele diverselor moduri de considerare ale sarcinii asupra regimurilor de funcționare ale SEE, în vederea stabilirii formelor celor mai adecvate de reprezentare a CC prin CD sau CS, a criteriilor de utilizare adecvată ale acestora.

1.4.2. Influența modului de considerare al CC asupra stabilității SEE

Reprezentarea CC, în special a celor cu pondere în consumatorii rotativi, prin CD, se apreciază că determină o creștere a limitelor de stabilitate în raport cu reprezentările simplificate prin CS de tip impedanță constantă /21/,/73/,/86/.

Efectul stabilizator al sarcinii este determinat de tendința motoarelor electrice de a-și mări turația când frecvența crește și în consecință, de a absorbi o putere mai mare pentru a-și mări energia cinetică corespunzătoare inerției rotoarelor ca și pentru a compensa pierderile și sarcina la arbore mărite. Această creștere a puterii active absorbite de motoare în regim dinamic determină reducerea puterii acceleratoare a rotoarelor generatoarelor și deci tendința de reducere a oscilațiilor unghiulare ale acestora /55/,/84/,/148/.

Comportarea dinamică a consumatorilor rotativi este determinată în primul rând de constanta de timp mecanică a acestora, dar și de alți factori cum ar fi: alunecarea critică, poziția relativă a surselor și consumatorilor în sistem, caracteristicile cuplu-turație ale mecanismelor antrenate, dinamica sistemului, etc. /55/,/84/. Astfel în cazul în care oscilațiile din SEE sînt lente (frecvențe sub 0,5 Hz), cazul pendulărilor dintre subsisteme interconectate prin legături slabe, MI de putere mică și medie pot urmări variațiile de frecvență și tensiune, fiind în acest caz acceptabilă reprezentarea lor prin diferite CS /1/,/55/,/70/,/148/. Analiza influenței considerării CC prin CS asupra stabilității SEE se efectuează separat pentru fiecare tip de caracteristică.

Caracteristica $P = f(U)$, a puterii active funcție de tensiune afectează direct limitele de stabilitate ale SBE, fără însă a putea fi apreciată influența sa categoric pozitivă sau negativă. Studiile efectuate în Suedia și Norvegia /21/ prezintă cazuri în care scăderea sensibilității sarcinii cu tensiunea determină creșterea limitelor de stabilitate. Concluzii similare sînt prezentate în /31/ și /84/. În schimb, în lucrările /24/, /67/ și /148/ se afirmă că o reprezentare a CC sensibilă cu tensiunea (de tip impedanță constantă) determină limite de stabilitate superioare. Astfel în /67/ se arată că un SBE dat este stabil dacă sarcina este reprezentată prin impedanță sau curent constant la o perturbație treaptă de tensiune și devine instabil la aceeași perturbație dacă sarcina este reprezentată 50% putere constantă și restul curent constant.

Pe baza datelor prezentate în literatură și a experienței obținute prin analiza unor regimuri tranzitorii efectuate pe SBE de dimensiuni reduse (opt noduri), se poate afirma că stabilitatea SBE este afectată nu numai de modul de reprezentare al CC ci și de locul de amplasare al acestuia. Astfel, considerînd două subsisteme interconectate printr-o RE slabă, (fig.1.4), orice perturbație cauzează inițial accelerarea rotoarelor generatoarelor din zona sursă și frînarea (retardarea) celor din zona receptor. În consecință, crește decalajul unghiular

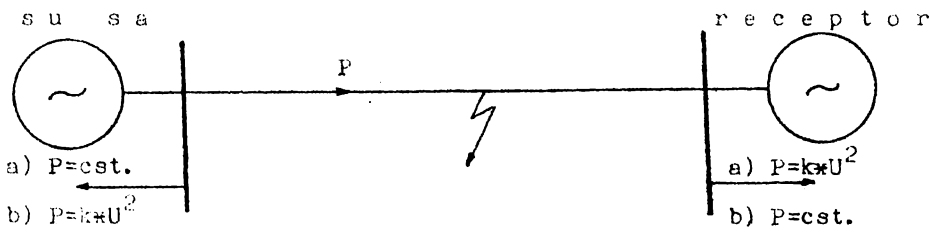


Fig.1.4. Referitoare la influența locului și caracteristicii $P=f(U)$ a CC asupra limitei de stabilitate a SBE: a) reprezentare favorabilă; b) reprezentare nefavorabilă.

dintre cele două grupuri de generatoare și scade tensiunea în toate nodurile SBE. Sarcina de tip putere constantă în zona sursă este favorabilă stabilității sistemului pentru că menține un consum ridicat în această zonă micșorînd astfel accelerarea rotoarelor generatoarelor de aici. În schimb o astfel de reprezentare a sarcinii în zona receptoare ar determina creșterea frînării rotoarelor generatoarelor și în consecință ar majora decalajul unghiular dintre rotoarele generatoarelor dintre cele două zone.

Caracteristica, $Q = f(U)$, a puterii reactive funcție de tensiune afectează stabilitatea SBE într-o manieră mai complicată, /19/, datorită acțiunii sale indirecte asupra oscilațiilor unghiulare ($\delta(t)$) ale rotoarelor generatoarelor, conform reprezentării schematice din figura 1.5.

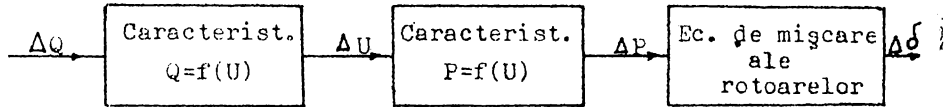


Fig.1.5. Efectul caracteristicii $Q = f(U)$ asupra stabilității SBE.

Analiza unor regimuri de perturbație stabile și instabile ale SBE, prezentate în /84/ și /148/, au evidențiat efectul creșterii sensibilității sarcinii reactive cu tensiunea asupra limitei de stabilitate.

Valoarea maximă a acestei limite obținându-se pentru reprezentarea sarcinii cu ER : $\partial Q / \partial U = 6$ și $\partial P / \partial U = 0$, ceea ce corespunde unei sarcini de tip $P = \text{const.}$ și consumatori reactivi cu elemente transversale puternic saturate.

CS de frecvență; $P(f)$; $Q(f)$, constituie alături de sistemele de reglaj automat al excitației, caracteristicile cuplu-turație a mașinilor primare și înfășurările de amortizare ale generatoarelor, un factor important în amortizarea oscilațiilor SBE, /21/, /71/, /86/, /113/. ER, $\partial P / \partial f$, al CS de frecvență al puterii active, având în general valori

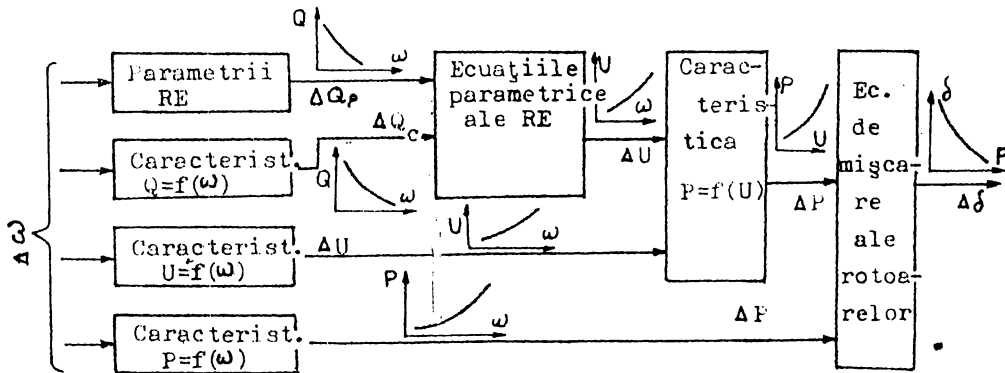


Fig.1.6. Influența modificării frecvenței ($\Delta\omega$) asupra modificării unghiului de poziție ($\Delta\delta$) al rotoarelor generatoarelor în regimuri dinamice.

pozitive (0,5 - 2,4) /21/, determină o creștere a puterii absorbite de CC în timpul regimurilor tranzitorii când frecvența tinde să crească micșorând astfel puterea acceleratoare a generatoarelor și deci decalajul unghiular dintre rotoarele acestora. Efectul caracteristicii

$P(f)$ este dificil de pus în evidență prin simulări numerice, iar determinările experimentale în SBE complexe cu modificarea frecvenței sînt extrem de rare. Modificarea frecvenței afectează într-o manieră complicată, (fig.1.6), comportarea dinamică a generatoarelor atît direct cît și prin intermediul tensiunii din noduri afectată și ea de modificarea frecvenței.

Caracteristica $Q(f)$, cu valori ale ER în general negative, $(-1,6 \div 2,5)$, /8/, /13/ cu excepția unor consumatori din industria chimică și metalurgică, unde $\partial Q / \partial f = (0,4 - 0,7)$, /21/, are un efect pozitiv asupra reglajului de tensiune din sistem, așa cum rezultă și din diagramele calitative prezentate în figura 1.6.

1.4.3. Influența modului de considerare al CC asupra regimurilor de funcționare permanente ale SBE

Analiza regimurilor permanente ale SBE complexe se bazează în general pe calculul circulației de puteri, utilizînd în acest scop metode iterative, datorită neliniarității relațiilor dintre mărimile caracteristice nodurilor SBE

Forma cea mai comodă și totodată cea mai frecvent utilizată de reprezentare a CC în calculele de circulații de puteri este impedanță (admitanța) constantă deoarece această reprezentare permite includerea sarcinii în matricele de sistem și eventual eliminarea nodurilor co-respunzătoare, /25/, /94/, /120/, devenite astfel pasive. De asemenea acest mod de reprezentare a sarcinii în calculele de circulații de puteri determină convergența sigură a procesului iterativ. Acest aspect este esențial în cazul calculului regimurilor tranzitorii ale SBE cînd tensiunea în noduri este scăzută. În aceste cazuri, indiferent de metoda iterativă adoptată (Gauss-Sidel, Newton-Raphson, Glimm-Stagg, Ward-Halle, etc) calculul regimului permanent cu reprezentarea CC prin curent și în special prin putere constantă devine excesiv de lung, sau chiar divergent, /8/, /67/, /148/. Din acest motiv, multe algoritme de calcul de stabilitate tranzitorie transformă sarcinile de putere sau curent constant în impedanță constantă cînd tensiunea coboară sub o valoare critică, (cca 40% din U_n), fiind restaurate la valorile originale cînd tensiunea revine la valori superioare, /21/.

Reglajul de tensiune din nodurile SBE este semnificativ afectat de caracteristica $Q = f(U)$, astfel în /90/ se prezintă influența diverselor moduri de reprezentare a CC asupra diagramei de încărcare limită a grupurilor generatoare, apreciindu-se că reprezentarea prin impedanță constantă permite extinderea domeniilor de încărcare reactivă a

grupurilor cu respectarea restricțiilor uzuale ale reglajului de tensiune și putere reactivă în SBE.

1.5. Concluzii

CC din cadrul SBE afectează considerabil comportarea acestora atât în regimurile staționare cât și cele dinamice sau tranzitorii, ceea ce impune reprezentarea lor cât mai realistă în studiile de sistem prin CS sau CD adecvate, obținute prin procese de identificare analitică sau experimentală.

Având în vedere importanța deosebită a simulărilor numerice de regimuri staționare și dinamice ale SBE în proiectarea și acordarea echipamentului de reglaj și control din SBE moderne, se impune ca reprezentarea CC să fie cât mai fidelă în aceste regimuri. În acest context este necesară dezvoltarea de CS și CD liniarizate în jurul punctului de funcționare permanent, în vederea includerii lor facile în MM ale SBE pentru regimurile staționare și dinamice.

Astfel pentru CS ale CC se va considera forma reprezentată de relațiile algebrice (1.3), formă adoptată de majoritatea autorilor /8/, /77/, /84/, /93/, /120/, /131/, iar pentru CD, relațiile intrare - stare - ieșire liniarizate în jurul punctului de funcționare de forma cunoscută /37/, /88/, /117/:

$$\frac{d\Delta x}{dt} = [A] \cdot \Delta x + [B] \cdot \Delta u ; \quad \Delta y = [C] \cdot \Delta x + [D] \cdot \Delta u \quad (1.4)$$

unde x , u și y reprezintă vectorii mărimilor de stare, intrare și respectiv ieșire, iar matricile $[A]$, $[B]$, $[C]$ și $[D]$, cu semnificația cunoscută, conțin parametrii CD care se impun a fi estimați în cadrul procesului de identificare a CC.

Avându-se în vedere ponderea mare a MI în structura CC, în mod deosebit în cazul marilor platforme industriale, CD ale CC se vor admite sub forma CD ale unui MI echivalent și a unui consumator static, ai căror parametrii se vor estima în cadrul identificării analitice și experimentale (figura 1.7).

Reprezentarea CC sub forma (1.4) permite prin aplicarea transformării Laplace reprezentarea sa și prin funcții de transfer liniare, adoptate de /129/, /139/ conform relației matriciale /88/:

$$[H(p)] = [C] * [p[I] - [A]]^{-1} + [D] \quad (1.5)$$

unde p este operatorul Laplace iar $[I]$ este matricea identitate. Algoritmul de transformare care implică inversarea analitică a unei

IDENTIFICAREA CARACTERISTICILOR CONSUMATORULUI COMPLEX

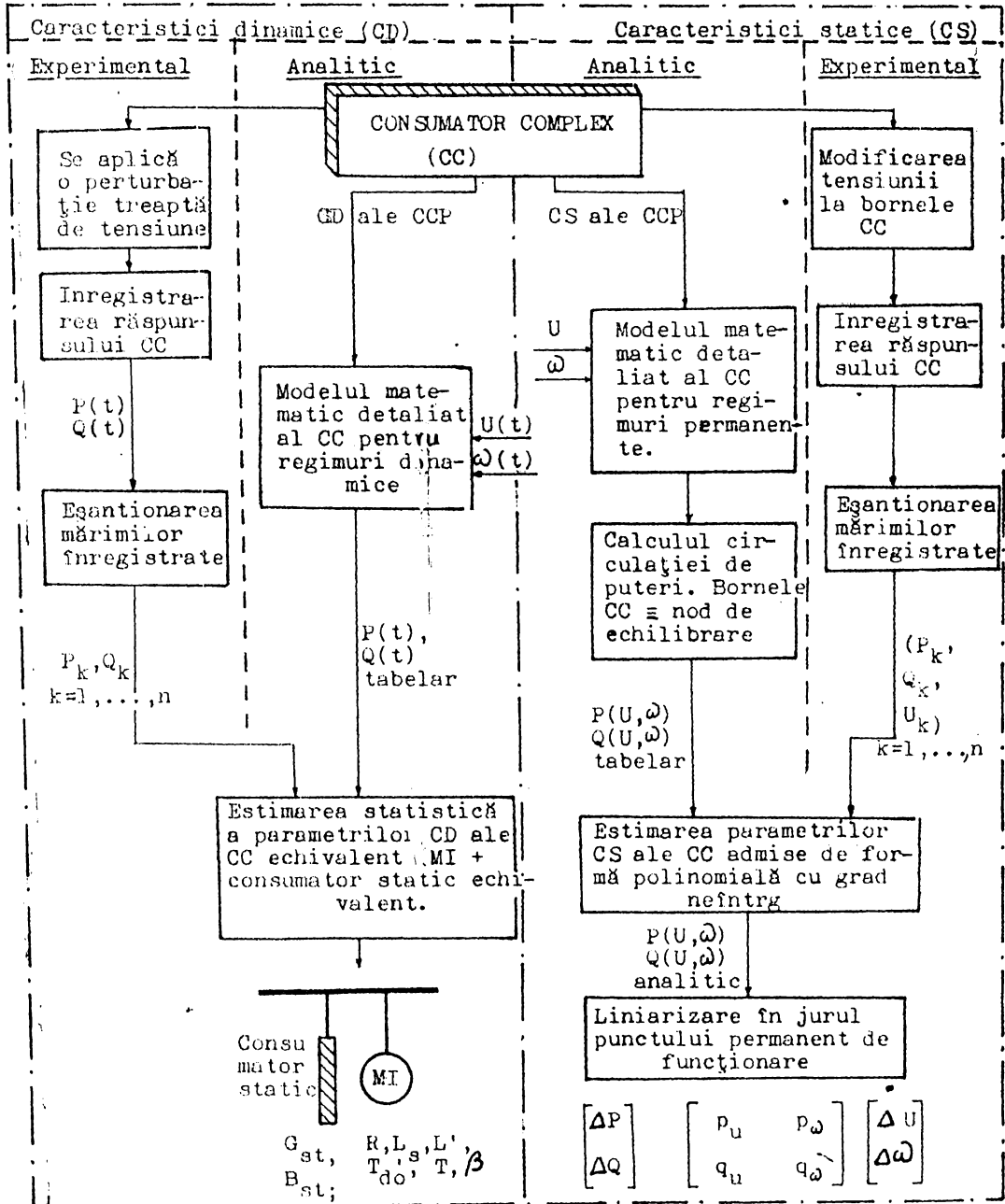


Fig.1.7. Principalele etape ale identificării analitice și experimentale ale CS și CD ale CC prezentate în lucrare.

matrici va fi prezentat într-un paragraf ulterior.

Avînd în vedere particularitățile identificării CC și formele adecvate de reprezentare ale acestora prin CS și CD obținute experimental și analitic, în fig.1.7. se prezintă structura de principiu a abordării problemei identificării CC cu evidențierea principalelor etape ce s-au parcurs în cadrul lucrării.

Datorită deosebirilor cantitative și de formă dintre CS și CD acestea se abordează separat, pentru fiecare categorie de caracteristici dezvoltîndu-se metode adecvate de identificare și estimare a parametrilor considerînd atît calea analitică cît și cea experimentală.

În vederea identificării analitice a CC se impune în prealabil identificarea și estimarea CS și CD ale consumatorilor individuali pentru construirea MM ale CC real sau detaliat (figura 1.7). În acest scop, următoarele trei capitole (2, 3 și 4) sînt consacrate dezvoltării CS și CD ale principalelor categorii de consumatori individuali din structura CC; MI, MS, cuptoare termice, instalații de iluminat și redresoare. Asamblarea analitică a acestora în vederea obținerii CS și CD ale CC, este prezentată în capitolele 5 și respectiv 6 ale lucrării.

Capitolul 2

CARACTERISTICILE STATICE SI DINAMICE ALE MOTOARELOR DE INDUCTIE

2.1. Introducere

Motoarele de inducție, (MI), constituie elementele componente ale CC cu cea mai mare pondere, (50 - 60 %), din consumul de energie electrică al acestora /6/, /52/, /62/, /56/, /58/, /115/. Din acest motiv reprezentarea cât mai realistă a comportării MI în regimurile permanente și tranzitorii ale SBE a constituit obiectivul a numeroase lucrări de specialitate /1/, /7/, /16/, /29/, /32/, /41/, /48/, /57/, /63/, /66/, /83/, /88/, /96/, /106/, /108/, /119/, /134/, /126/, /130/, /133/, /136/, /137/, /147/, rezultatele acestor eforturi fiind concretizate în MM cu diverse grade de detalieri, care permit atât analiza regimurilor permanente și tranzitorii în diferite condiții de funcționare cât și evaluarea performanțelor acestora /83/, /96/, /98/, /100/, /119/. MM ale MI elaborate pentru studiul regimurilor dinamice ale acestora sînt prezentate sub forma unor sisteme de ecuații diferențiale și algebrice neliniare, /7/, /10/, /29/, /32/, /33/, a unor funcții de transfer /88/, /108/, /137/ sau a unor sisteme de ecuații liniarizate în jurul punctului de funcționare permanent, de forma intrare-stare-ieșire, /84/, /87/, /106/, /124/, /136/.

Reprezentarea MI prin CS sau CD implică elaborarea unor MM care să permită exprimarea puterii active și reactive absorbite de MI în funcție de mărimile oferite de SBE la bornele sale (tensiune și frecvență) în regimurile permanente respectiv dinamice. Totodată, aceste MM trebuie să admită scrierea tuturor mărimilor într-un sistem de coordonate comun SBE, pentru a permite implementarea lor în algoritmele și programele de calcul pentru studiul SBE.

Prezentul capitol este consacrat acestor deziderate. În acest scop, după prezentarea și comentarea ipotezelor simplificatoare și convențiilor de sistem adoptate, §.2.2, în următoarele două, § se elaborează MM adecvate reprezentării MI prin CS respectiv CD.

În cadrul §.2.3, după efectuarea unei analize a stadiului actual al reprezentării MI prin CS în literatură, sînt deduse expresiile adecvate ale acestora atât sub formă neliniară cât și liniarizată în jurul punctului de funcționare permanent, pe baza parametrilor schemelor circuitelor echivalente ale MI. Avînd în vedere utilitatea deosebită a CS liniarizate, sînt dezvoltate relațiile de calcul

pentru parametrul acestora (ER), relații implementate într-un program de calcul adecvat. Cu ajutorul acestui program s-au determinat valorile parametrilor CS liniarizate, exprimate în u.r., pentru gama de MI de puteri mici și mijlocii (0,75 - 55)kW cu rotor în colivie.

Pentru elaborarea CD ale MI, pornind de la ecuațiile de funcționare ale mașinii de inducție în regim de motor, s-au parcurs toate etapele pentru obținerea CD ale acestuia sub forma ecuațiilor intrare-stare-ieșire neliniare și apoi liniarizate în jurul punctului de funcționare permanent. MM dezvoltate în cadrul acestui § au fost validate prin încercări experimentale în laborator, fiind prezentate comparativ răspunsurile tranzitorii la perturbații treaptă de tensiune ale trei MI determinate experimental și analitic.

Având în vedere faptul că în consumatorul complex industrial ponderea MI este reprezentată de MI mici și mijlocii în cadrul prezentului capitol s-a avut în vedere în special această categorie de MI.

Principalele contribuții originale ale autorului în cadrul prezentului capitol se referă la:

- analiza stadiului actual al reprezentării MI prin CS și CD pe baza unei sinteze bibliografice;
- deducerea expresiilor CS neliniare și liniarizate ale MI;
- elaborarea unor algoritme și programe de calcul adecvate estimării valorilor parametrilor CS ale gamei de MI mici și mijlocii cu rotor în colivie;
- elaborarea MM ale CD ale MI sub forma ecuațiilor neliniare intrare-stare-ieșire;
- dezvoltarea CD sub forma liniarizată în jurul punctului staționar de funcționare;
- elaborarea programelor de calcul pentru analiza răspunsului tranzitoriu al MI reprezentat prin CD dezvoltate anterior;
- conceperea și realizarea unui stand de experimentări pentru identificarea și validarea CD și CS ale MI.

Lista semnificațiilor principalelor notații utilizate pentru dezvoltarea CS și CD ale MI și ale GC

- d, q - sistem de axe rectangular ce se rotește cu turație constantă;
 $P_0, Q_0, U_0, \omega_0, f_0$ - mărimile electrice caracteristice regimului de funcționare permanent (de referință);
 $i_\lambda, u_\lambda, i'_\lambda, u'_\lambda$ - curenții și tensiunile (valori momentane) la bornele înfășurărilor statorice respectiv rotorice; ($\lambda=1,2,3$)

- u_d, u_q, i_d, i_q - componentele tensiunii și curentului statoric pe axele d, respectiv q;
- u'_d, u'_q, i'_d, i'_q - componentele tensiunii și curentului rotorice pe axele d, respectiv q;
- U, I - tensiunea și curentul (valori efective) la bornele MI;
- P, Q - puterea activă, respectiv reactivă absorbită de MI;
- δ - faza tensiunii \bar{U} față de axa d;
- θ - unghiul de poziție al axei de referință d față de axa fazei statorice l;
- $f, (\omega)$ - frecvența (pulsatia) tensiunii de alimentare;
- $\psi_d, \psi_q, \psi'_d, \psi'_q$ - componentele înălțărilor magnetice statorice și respectiv rotorice pe axele d și q;
- R_1, R'_2 - rezistența înfășurării statorice respectiv rotorice reduse la nivelul tensiunii statorice;
- R, R' - rezistențele înfășurărilor echivalente pe axele d, q, statorică respectiv rotorice;
- $L_\sigma, (X_\sigma)$ - inductanța (reactanța) de dispersie a înfășurărilor;
- $L_s, (X_s)$ - inductanța (reactanța) sincronă "văzută" de la bornele MI;
- $L_r, (X_r)$ - inductanța (reactanța) sincronă "văzută" din rotor;
- $L_m, (X_m)$ - inductanța (reactanța) de magnetizare; ($L_m = L_s - L_\sigma$);
- $L', (X')$ - inductanța (reactanța) tranzitorie, "văzută" de la borne, (rotor blocat): ($L' = L_s - L_m^2 / L_r$);
- \bar{U}_e - t.e.m. echivalentă înălțurii magnetice a rotorului;
- U_{ed}, U_{eq} - componentele pe axele d și q ale t.e.m. \bar{U}_e ;
- s - alunecarea rotorului față de câmpul magnetic statoric;
- s_m - alunecarea critică;
- T'_{do} - constanta de timp electromagnetică a circuitului rotorice deschis (L_r / R');
- T - constanta de timp mecanică a rotorului MI cuplat cu cel al mecanismului antrenat;
- P_m - puterea mecanică (rezistentă) a mecanismului antrenat;
- K_m, β - parametrii caracteristici cuplu-turație a mecanismului antrenat; $K_m = P_m / [\omega_0 (1 - s_0)]^{\beta+1}$;
- P_u, P_f, Q_u, Q_f - ER ale puterii active respectiv reactive în funcție de tensiunea și frecvența de alimentare exprimate în mărimi raportate la mărimile similare din regiul staționar de funcționare; P_0, Q_0, U_0, f_0
- p - operatorul Laplace
- α - gradul de încărcare activă al MI $\alpha = P_0 / P_N$;
- c - constantă $c = 1 + L_\sigma / L_m$;

2.2. Ipoteze simplificatoare și convențiile de semn
adoptate în vederea identificării CS și CD ale MI

Avînd în vedere scopul final al determinării CS și CD ale MI, de a fi asamblate prin intermediul ecuațiilor RED din cadrul CC pentru a forma CS și CD ale acestuia, asamblare în care oricum intervin multe incertitudini, în literatură se admit o serie de ipoteze simplificatoare privind reprezentarea MI în MM ale SEE. Incertitudinile care intervin în cadrul asamblării CS și CD ale CC referitoare la MI componente sînt datorate /21/:

- a) imposibilității considerării tuturor caracteristicilor CCP ai CC;
- b) MI au regimuri de funcționare în general variabile în timp, cu o anumită periodicitate, estimarea parametrilor caracteristicilor impunîndu-se să se efectueze statistic;
- c) tensiunea de alimentare a MI nu este aceeași în toate noțiunile RED și practic nu poate fi considerată cu valorile sale reale în procesul de asamblare a caracteristicilor CC.

Ipotezele simplificatoare privind reprezentările MI prin MM adoptate în literatură pot fi clasificate în următoarele categorii:

I. Ipoteze referitoare la forma constructivă a MI /29/,/81/;

- a) întrefier uniform;
- b) trei faze statorice amplasate simetric, a căror înfășurare este repartizată sinusoidal de-a lungul pasului polar;
- c) bobinele sau barele rotorice sînt astfel amplasate încît să producă în întrefier, de asemenea t.m.m. sinusoidale;
- d) circuitul magnetic este liniar și identic după cele două axe rectangulare d, q ;
- e) mașina are o singură pereche de poli.

II. Ipoteze referitoare la valorile parametrilor circuitului echivalent al MI:

- f) reactanțele de dispersie ale înfășurărilor statorice și rotorice reduse la același nivel de tensiune se consideră egale /29/, /50/, /41/, /125/, /130/, /136/.

g) se neglijează fenomenele tranzitorii statice, (termenii $d\psi_d/dt$ și $d\psi_q/dt$ din ecuațiile statorice), /26/, /29/, /55/, /64/, /79/, /113/, /130/, /133/, /142/.

III. Ipoteze referitoare la modul de considerare a pierderilor electromagnetice și mecanice:

- h) se neglijează curenții turbionari și histereza magnetică, /1/, /7/, /29/, /48/, /77/, /129/, /133/, /142/.

1) pierderile mecanice (prin frecări și pentru ventilație) se consideră incluse în puterea mecanică rezistentă (a mecanismului antrenat), /77/, /50/, /41/, /125/.

Referitor la aceste ipoteze simplificatoare se fac următoarele comentarii:

1. Ipoteza d) se acceptă numai parțial, caracteristica de magnetizare a MI prezintă în domeniul tensiunilor nominale un anumit grad de saturație care afectează destul de sensibil CS de putere reactivă, așa cum rezultă din determinările experimentale, /40/, /54/, /59/, /60/, /93/, /110/. Acest fenomen este cu atât mai accentuat cu cât funcționarea MI are loc la frecvențe mai scăzute.

2. Fenomenele tranzitorii statorice sînt practic neglijabile în toate studiile de regimuri dinamice ale SEE /64/, /69/, /73/, /86/, /112/, /113/, /132/, ca urmare a faptului că procesele oscilatorii de interes din punct de vedere al stabilității SEE se desfășoară cu frecvențe mult mai reduse (în general sub 1 Hz) decît cele corespunzătoare fenomenelor tranzitorii statorice.

3. Rezistența înfășurării statorice, deși în multe lucrări /26/, /27/, /120/, /142/ este neglijată se va considera totuși în schema circuitului echivalent al MI avînd în vedere ponderea mare a MI mici și mijlocii în componența CC.

Pe baza ipotezelor simplificatoare acceptate mai sus se vor reprezenta în continuare MI considerate prin schema electrică echivalentă în "T", /33/, /107/, (figura 2.1.a), sau prin schema electrică echivalentă cu circuitul de magnetizare scos la borne, denumită și în "L" (figura 2.1.b), unde constanta $c = 1 + L_T/L_m$ se consideră reală, cu valori cuprinse între (1,02 - 1,05), /107/.

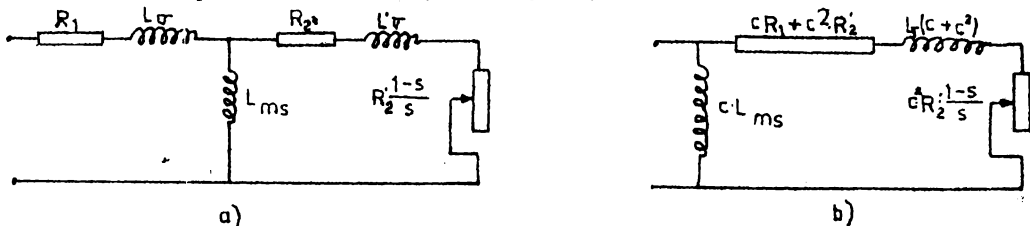


Fig.2.1. Schemele electrice echivalente considerate pentru MI; a) în T; b) în L.

Determinări experimentale efectuate în laborator asupra gamei de MI tip ASI cu rotor în colivie (0,75 - 3)kW /14/, /95/, au evidențiat oportunitatea exprimării puterii reactive de magnetizare sub forma $Q_m = U^2/L_m$ unde L_m reprezintă valoarea nesaturată a inductanței de magnetizare iar valoarea exponentului c , care a estimat cel mai bine dependența $Q_m(U)$ a fost (2,5 - 2,7). Considerînd reactanța de magnetizare saturată, L_{mB} , în schema circuitului electric echivalent al MI,

unde, $Q_m = U^2/L_{ms}$, rezultă $L_{ms} = L_m/U_0^{(0,5 - 0,7)}$.

Convențiile de semn au fost astfel adoptate încît să se obțină valori pozitive pentru principalele mărimi electrice care intervin în CS și CD ale MI, considerînd sensurile naturale de mișcare.

Aceste convenții, precizate în figura 2.8, sînt:

- a) puterea activă și reactivă inductivă se consideră pozitivă dacă este absorbită de MI;
- b) sensul de rotație pozitiv este sensul dextrogir, corespunzător sensului natural de rotație al mașinilor rotative;
- c) axa transversală q se consideră defazată cu $\pi/2$ înaintea axei longitudinale în sensul de rotație admis;
- d) ca origine a unghiurilor se consideră axa fazei statorice l ;
- e) sensul pozitiv pentru unghiuri se adoptă identic cu sensul pozitiv de rotație (dextrogir);
- f) pentru scrierea ecuațiilor tensiunilor se adoptă convenția la receptori: $u = R \cdot i + d\psi/dt$;
- g) tensiunea se consideră pozitivă dacă este îndreptată dinspre punctul cu potențial mai ridicat spre cel cu potențial mai scăzut;
- h) sensul pozitiv al t.ă.m. induse se consideră sensul care coincide cu cel al curentului /105/;
- i) sensul pozitiv al fluxului magnetic se asociază cu sensul pozitiv al curentului, care circulă într-o înfășurare, conform regulii Burghiului drept.
- j) pentru generalitatea relațiilor utilizate, toate mărimile electrice se exprimă în u.r.n.

2.3. Caracteristicile statice ale motoarelor de inducție

2.3.1. Introducere

Reprezentarea MI prin CS implică scrierea expresiilor puterilor (sau a abaterilor puterilor) sub forma (1.3), ai căror parametri sînt ale puterii active și reactive funcție de tensiune și frecvență. Acești parametri se impun a fi estimați pentru fiecare regim de funcționare al MI, regim caracterizat prin gradul său de încărcare activă: $\alpha = P_o/P_n$.

Problema construirii CS ale MI constă în estimarea parametrilor p_u, q_u, p_f, q_f , care pentru o mai mare generalitate și pentru a se reduce dispersia valorilor lor, majoritatea lucrărilor /21/, /54/, /55/, /63/, /65/, /67/, /91/, /129/, îi consideră în unități raportate la mări-

mile corespunzătoare din regimul permanent, P_0, Q_0, U_0, f_0 , deci:

$$p_u = \partial P / \partial U \cdot U_0 / P_0 ; \quad q_u = \partial Q / \partial U \cdot U_0 / Q_0 \quad (2.1)$$

$$p_f = \partial P / \partial f \cdot f_0 / P_0 ; \quad q_f = \partial Q / \partial f \cdot f_0 / Q_0$$

Estimarea parametrilor CS ale MI considerînd reprezentări mai realiste decît cele discutate în §.2.1. implică o serie de dificultăți, cum ar fi:

a) dispersia mare a valorilor parametrilor circuitelor echivalente ale MI și dificultățile privind determinarea lor cu o anumită certitudine /52/, /55/;

b) prezența alunecării ca funcție de tensiune și frecvență în expresiile puterilor absorbite de MI crează dificultăți privind obținerea expresiilor analitice ale CS ale acestora;

c) valorile parametrilor CS ale MI sînt puternic afectate de caracteristicile mecanismelor antrenate, dificil de apreciat și extrem de dispersate /21/, /142/.

Din aceste motive, literatura de specialitate abordează în general calitativ problema CS ale MI, așa cum rezultă din sinteza bibliografică efectuată în §.2.3.2., prezentîndu-se fie alura CS, fie valori ale ER în punctele staționare de funcționare, tabelul 2.1, /1/, /8/, /21/, /113/, /123/, fie relații de calcul aproximative, deduse pe baza unor analize fenomenologice /24/, /27/, /142/.

În vederea identificării CS ale MI uzuale în structura CC, în special a celor industriali, în cadrul prezentului paragraf după efectuarea unei sinteze a modului de abordare a acestora în literatura de specialitate, se prezintă în §.2.3.3. un algoritm original de estimare a parametrilor CS ale MI, pe baza schemei circuitului echivalent al acestuia, considerînd cunoscută caracteristica cuplu-turație a mecanismului antrenat, algoritm implementat în programul de calcul denumit "AMAS". Necesitatea acestui algoritm este impusă de dispersia mare a valorilor parametrilor CS publicate în literatură, ca efect a diverselor tipodimensiuni și regimuri de funcționare ale MI, în vederea determinării ER în toate situațiile concrete, pe baza informațiilor accesibile în exploatare /96/, /98/.

2.3.2. Analiza stadiului actual al reprezentării MI prin CS

Preocupările din ultimele două decenii privind estimarea CS ale MI, ca principalii componenți ai CC industriali, au condus pe de o parte, la acumularea unui volum relativ mare de date privind parame-

trii acestora, parțial sintetizate în ordine cronologică în tabelul 2.1, și pe de altă parte, la dezvoltarea a diverse forme de CS, forme care vor fi prezentate în continuare.

Tabelul 2.1.
Valori ale parametrilor (BR) ale CS ale MI publicate în literatură.

Efect de re-glaj Sur- sa bi- bliograf.	Anul	p_u	p_f	q_u	q_f	O b s e r v a ț i i
/13/ (Bubenko)	1962	0,3	0,1	1,8	-1,6	Instalații de condiționare a aerului
/1/ (Akhtar)	1968	-	1,17		0,52	Cuplu rezistent const.
			1,8		1,05	Idem; MI de loo CP
/56/ (Iliceto)	1972	0		1,6		Acționare moară 2,1 kW
		1		2,4		Acționare strung 0,36 kW
		-0,4		0,8		Compresor mic 0,75 kW
/8/ (Berg)	1973	0,2	1,5	1,6	-0,3	MI încărcate 50%
		0,1	2,8	0,6	-1,8	MI încărcate 100%
/115/ (Park)	1977	-0,06	0,51			Cuplu mec. $C_m = k/n$
		0	0,53			Cuplu mec. $C_m = \text{cst.}$
		0,11	0,62			Cuplu mec. $C_m = k \cdot n^2$
/21/ (Concordia)	1982	0,1	1,6	2,5	-1,3	Instalație de condiționare a aerului
		-0,1		1,1		MI încărcate 85%
/123/ (Ribeiro)	1982	0,77	0,53	2,5	-1,46	Frigidere și congelat.
		0,082	2,9	1,6	-1,8	Pompe și ventilatoare
		0,2	0,9	2,3	-2,7	Instalații de condiționare a aerului

CS ale puterii active funcție de tensiune sînt în general apreciate pe baza expresiei simplificate a puterii electromagnetice a MI, /24/, /25/, /120/, /142/:

$$P = \frac{U^2}{\omega L_T} s_m \cdot s / (s_m^2 + s^2); \quad (2.2)$$

Fără a se explicita alunecarea funcție de tensiune, se consideră în general că modificarea turației rotorului funcție de alunecare este neglijabilă și deci nu afectează puterea absorbită de mecanismul antrenat /27/, /29/, /142/, apreciindu-se astfel că puterea activă este constantă în raport cu modificarea tensiunii. Totuși în /120/ se prezintă graficul calitativ al CS, $P = f(U)$, ca o dreaptă cu panta ușor crescătoare, iar măsurătorile de laborator, /56/, efectuate pentru diferite acționări cu MI, evidențiază CS cu panta nulă sau chiar negativă.

CS ale puterii reactive funcție de tensiune, se determină ca suma a două componente (figura 2.2):

a) puterea reactivă de magnetizare, Q_m , a cărei lege de variație este afectată de saturația inductanței de magnetizare /40/, /142/;

b) puterea reactivă, Q_s , disipată pe reactanța de dispersie, X_σ , a cărei variație în funcție de tensiune este greu de apreciat datorită dificultăților de explicitare a funcției $s(U)$. Considerînd schema echivalentă simplificată a circuitului MI, se arată în /24/ și /142/, că funcția $Q_s(U)$ are aceeași alură cu funcția $s(U)$, pentru cuplu mecanic rezistent constant, (figura 2.2).

În consecință CS, $Q = f(U)$, prezintă un minim pentru $U_n = (0,725 - 0,785)u.r.n.$ /120/, /142/, iar în domeniul din jurul tensiunii nominale, o variație ce poate fi apreciată exponențială, valorile exponentului fiind cele prezentate în coloana 5 a tabelului 2.1.

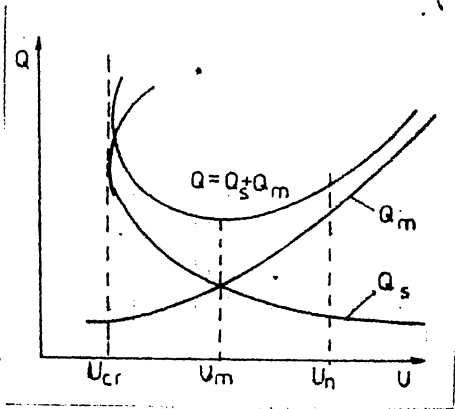


Fig.2.2. Puterea reactivă absorbită de MI funcție de tensiune

O relație aproximativă pentru CS, $Q = f(U)$, este prezentată în /27/:

$$Q = 0,7 \cdot U^2 / \omega + 0,3 \omega / U^2, \quad (2.3)$$

bazată pe considerarea valorii raportului Q_m / Q_s în punctul de funcționare ca fiind constant și egal cu 7/3. O astfel de ipoteză poate fi însă departe de realitate în cazul încărcărilor MI diferite de cele nominale.

CS de putere activă funcție de frecvență sînt practic unanim apreciate ca fiind determinate de forma caracteristicii cuplu-turație a mecanismului antrenat avînd în general forma /50/, /96/, /98/, /142/:

$$K_m = K_m [\omega(1-s)]^\beta; \quad (2.4)$$

unde exponentul β depinde de tipul mecanismului antrenat, valorile sale uzuale fiind cuprinse în domeniul: $(-1 \div 2)$ /142/, iar constanta K_m se determină din condiția de echilibru a puterilor în regimul permanent de funcționare, considerat cunoscut /100/:

$$K_m = P_{mq} / [\omega_0(1-s_0)]^{\beta+1} \quad (2.5)$$

Constanta K_m exprimată în u.r.;

$$K_{mR} = \frac{S_{mo}}{S_b} \cdot \left[\frac{\omega_b}{\omega_o} \right]^{\beta+1} = P_{moR} / \omega_{oR}^{(\beta+1)} ; \quad (2.6)$$

unde: S_b și ω_b sînt puterea aparentă de bază și respectiv pulsația de bază; reprezintă și o măsură a gradului de încărcare al MI;

Se afirmă pe baza relației (2.4), fără a se considera modificarea alunecării MI cu frecvența și în consecință și a puterii mecanice, că puterea activă absorbită de MI variază proporțional cu puterea $\beta+1$ a frecvenței (pulsației), /24/, /27/, /120/, /142/.

CS de putere reactivă funcție de frecvență prezintă o variație dificil de exprimat analitic, motiv pentru care în literatură se prezintă fie forme simplificate (relația (2.3) din /27/), fie doar valori ale parametrilor CS determinate pentru anumite regimuri de funcționare ale unor MI (tabelul 2.1)

2.3.3. Determinarea expresiilor parametrilor CS ale MI

Considerînd schema electrică echivalentă în "L" a MI, (figura 2.1.b), expresiile puterii active și reactive absorbite de MI alimentat cu tensiunea la borne U și pulsația ω , rezultă astfel:

$$P = \left[\frac{cR_1 + c^2R_2'/s}{[cR_1 + c^2R_2'/s] + [\omega L_{\sigma}(c+c^2)]^2} \right] U^2$$

$$Q = U^2 \left[\frac{1}{\omega \cdot c \cdot L_{ms}} + \frac{\omega L_{\sigma}(c+c^2)^2}{(cR_1 + c^2R_2'/s)^2 + [\omega L_{\sigma}(c+c^2)]^2} \right] \quad (2.7)$$

unde parametrii circuitului echivalent al MI se determină fie pe baza datelor de catalog, conform anexei A.2.1 din /95/, fie prin prelucrarea rezultatelor încercărilor de laborator ale MI.

Expresiile CS ale MI sub formă neliniară se obțin din relațiile (2.7) prin explicitarea alunecării s în funcție de U și ω . În acest scop, considerînd cuplul mecanic rezistent de forma (2.4), expresia alunecării în funcție de tensiunea și frecvența de alimentare a MI rezultă din condiția de echilibru a puterilor de antrenare (electromagnetică) și rezistentă (mecanică) în care se consideră incluse și pierderile mecanice ale MI:

$$U^2 \cdot R_2'/s = \left\{ (R_1 + cR_2'/s)^2 + [\omega L_{\sigma}(c+c^2)]^2 \right\} \cdot K_m \cdot [\omega(1-s)]^{\beta+1} \quad (2.8)$$

Relațiile (2.7) completate cu (2.8) reprezintă GS neliniare ale MI. Aducerea lor la forma (3.1) implică în primul rând explicitarea analitică a alunecării, $s = f(U, \omega)$, din relația (2.8). Practic aceasta nu este posibil decât fie neglijând puterile de ordin superior ale lui s , fie considerând cuplul mecanic rezistent constant ($\beta = 0$), /1/, /50/, /125/. Pentru valori întregi ale lui β , considerând constantă una dintre mărimile de sistem U sau ω , se pot determina numeric valorile lui s utilizând algoritmul Bairstow /30/ de rezolvare a ecuațiilor polinomiale. În §.6.2.2. este prezentat un algoritm de evaluare a alunecării prin rezolvarea ecuației (2.8) utilizând o metodă iterativă de tip Newton, algoritm implementat în programul de calcul "conses" pentru estimarea GD ale CC.

Considerarea ipotezelor simplificatoare menționate mai sus reduce generalitatea expresiilor GS ce s-ar obține astfel, introducând reprezentări aproximative pentru MI. Rezolvarea numerică a ecuației (2.8) la fiecare pas interactiv al circulației de puteri mărește inadmisibil timpul de calcul. Din aceste motive și având în vedere forma GS ale MI care s-a obținut în continuare, în cadrul prezentului paragraf se renunță la explicitarea expresiei alunecării și se evaluează doar derivatele sale $\partial s / \partial U$ și $\partial s / \partial \omega$ în punctul de funcționare permanent, caracterizat de mărimile: U_0 , ω_0 , s_0 și P_{m0} .

În vederea obținerii GS ale MI sub forma (1.3) pentru punctul de funcționare permanent se impune determinarea ER în acest punct ca principali parametri ai GS. Prin derivarea expresiilor (2.8) în raport cu tensiunea și pulsația sa și evaluarea acestor derivate în punctul permanent de funcționare considerat, conform anexei A.2.2. din /101/ rezultă parametrii GS ale MI de forma:

$$p_{U_0} = A_0 + B_0 \cdot \partial s / \partial U \quad ; \quad p_{f_0} = B_0 \cdot \partial s / \partial f; \quad (2.9)$$

$$q_{U_0} = C_0 + D_0 \cdot \partial s / \partial U \quad ; \quad q_{f_0} = E_0 \cdot \partial s / \partial f;$$

unde A_0 , B_0 , C_0 , D_0 și E_0 sînt constante ce depind de parametrii circuitului echivalent al MI și valorile tensiunii, U_0 , pulsației ω_0 și alunecării, s_0 din punctul permanent de funcționare /101/:

$$A_0 = \frac{2 \cdot U_0 (R_1 \cdot c + R_2 \cdot c^2 / s_0)}{Z_0} \quad ; \quad B_0 = \frac{A_0^2 R_2 \cdot c}{4 \cdot s_0^2} \cdot 1 - \frac{\omega_0 L_V (c + c^2)}{(R_1 c + R_2 \cdot c^2 / s_0)^2}$$

$$C_0 = 2 \cdot U_0 \cdot \frac{\omega_0 L_V \cdot c}{Z_0} + \frac{1,3}{\omega_0 c \cdot L_m} \quad ; \quad D_0 = \frac{2 \cdot U_0^2 \cdot c^3 L_V (R_1 + c R_2 / s_0) \cdot R_2 / s_0^2}{Z_0^2}$$

(2.10)

$$E_0 = \frac{U_0^2 c^3 L_{\nabla} (R_1 + cR_2'/s_0)^2 - (\omega_0 L_{\nabla})^2}{Z_0^2} - \frac{U_0^{2,6}}{\omega_0^2 c \cdot L_m};$$

unde pentru simplificarea scrierii s-a introdus notația:

$$Z_0 = (cR_1 + c^2 \cdot R_2'/s_0)^2 + (\omega_0 c \cdot L_{\nabla})^2.$$

Considerarea saturației miezului magnetic s-a efectuat prin introducerea expresiei $L_{ms} = L_m \cdot U_0^{-0,6}$ pentru inductanța de magnetizare, conform celor discutate în §.2.2.

Determinarea valorilor BR, conform relațiilor (2.9), implică evaluarea derivatelor parțiale ale alunecării în raport cu tensiunea și pulsația sa. Avînd în vedere că din relația (2.8) nu poate fi explicitată alunecarea, s-a aplicat o metodă de derivare numerică. În acest scop, considerînd pulsația ω drept parametru se evaluează funcția $U(s)$ prin valorile sale U_i corespunzătoare alunecărilor s_i , figura 2.3, pentru pulsațiile ω_0 , $\omega_A = \omega_0 - h\omega$ și $\omega_U = \omega_0 + h\omega$.

Din caracteristica $U(s)$ pentru $\omega = \omega_0$ se poate estima valoarea derivatei $\partial s / \partial U$ în punctul $U = U_0$ cu relația:

$$\left. \frac{\partial s}{\partial U} \right|_{U=U_0} = \frac{s_i - s_{i-1}}{U_i - U_{i-1}}; \quad (2.11)$$

unde indicele "i" se stabilește astfel încît $U_{i-1} \geq U_0$ și $U_i \leq U_0$,

iar pasul de creștere al alunecării se va lua cît mai mic posibil.

Analizînd valorile derivatei $\partial s / \partial U$ pentru diferite valori ale gradului de încărcare al MI în /lol/ se relevă că sînt aproape proporționale cu gradul de încărcare, ceea ce indică oportunitatea exprimării lor prin mărimi raportate la mărimile similare din regimul permanent de referință în vederea reducerii dispersiei valdrilor lor.

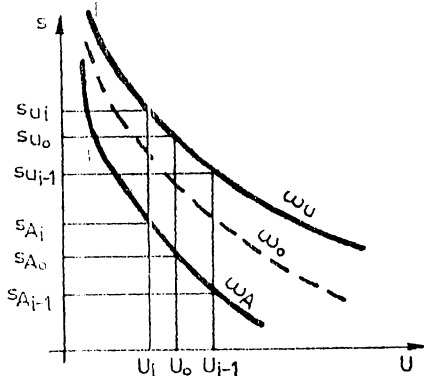


Fig. 2.3. Referitoare la determinarea valorilor derivatelor alunecării în raport cu tensiunea și pulsația.

Determinarea valorilor derivatelor parțiale $\partial s / \partial \omega$ în punctul $U = U_0$ și $\omega = \omega_0$ s-a efectuat de asemenea printr-o metodă numerică a cărei algoritm de principiu

constă din următoarele etape:

a) se calculează și se rețin perechile de valori tensiune-alunecare pentru două valori apropiate ale pulsației, ω_A și ω_U în jurul pulsației de interes, ω_0 , figura 2.3;

b) se determină valorile alunecărilor s_{A_0} și s_{U_0} corespunzătoare tensiunii U_0 pe curbele $s(U)$ de parametru ω_A și respectiv ω_U prin interpolarea liniară conform relației:

$$s_y = \frac{(s_i - s_{i-1})/U_0 - U_i}{U_{i-1} + U_i} + s_{i-1} ; \quad (2.12)$$

unde $y \equiv A_0$ sau U_0 în funcție de pulsația ω_A sau ω_U a curbei $s(U)$, iar indicele "i" se stabilește din aceleași condiții ca și pentru derivata $\partial s/\partial U$.

Rezultă în punctul $U = U_0$ și $\omega = \omega_0$ derivata:

$$\partial s/\partial \omega = (s_{A_0} - s_{U_0})/2 \cdot h_\omega \quad (2.13)$$

Introducând valorile derivatelor parțiale ale alunecării în raport cu tensiunea și frecvența în expresiile (2.9) ale ER se obțin valorile acestora pentru abateri relativ mici ale tensiunii și pulsației în jurul valorilor U_0, ω_0 din regimul permanent considerat. Aceste valori ale ER constituie parametrii CS ale MI scrise sub forma liniară (1.3).

În vederea estimării acestor parametri pe baza metodologiei prezentate, s-a elaborat un algoritm implementat în programul de calcul denumit "AMAS", figura 2.4, care permite evaluarea ER ale MI uzuale, seria unitară AȘI, pentru diverse grade de încărcare activă $\alpha = P_0/P_n$ considerând diferite caracteristici cuplu-turație pentru mecanismele antrenate, prin exponentul β al acestora.

Utilizarea programului "AMAS" a permis determinarea valorilor ER pentru o gamă largă de MI de fabricație indigenă ("Electromotor" Timișoara) și totodată evidențierea unor concluzii utile privind estimarea parametrilor CS ale MI prezentate în § următoare.

Validarea algoritmului de calcul prezentat s-a efectuat prin compararea ER astfel obținute cu cele determinate experimental prin alimentarea unor MI de mică putere (0,73 - 3) kW din seria ASI, cu tensiune și frecvență reglabilă, rezultate prezentate în /147.

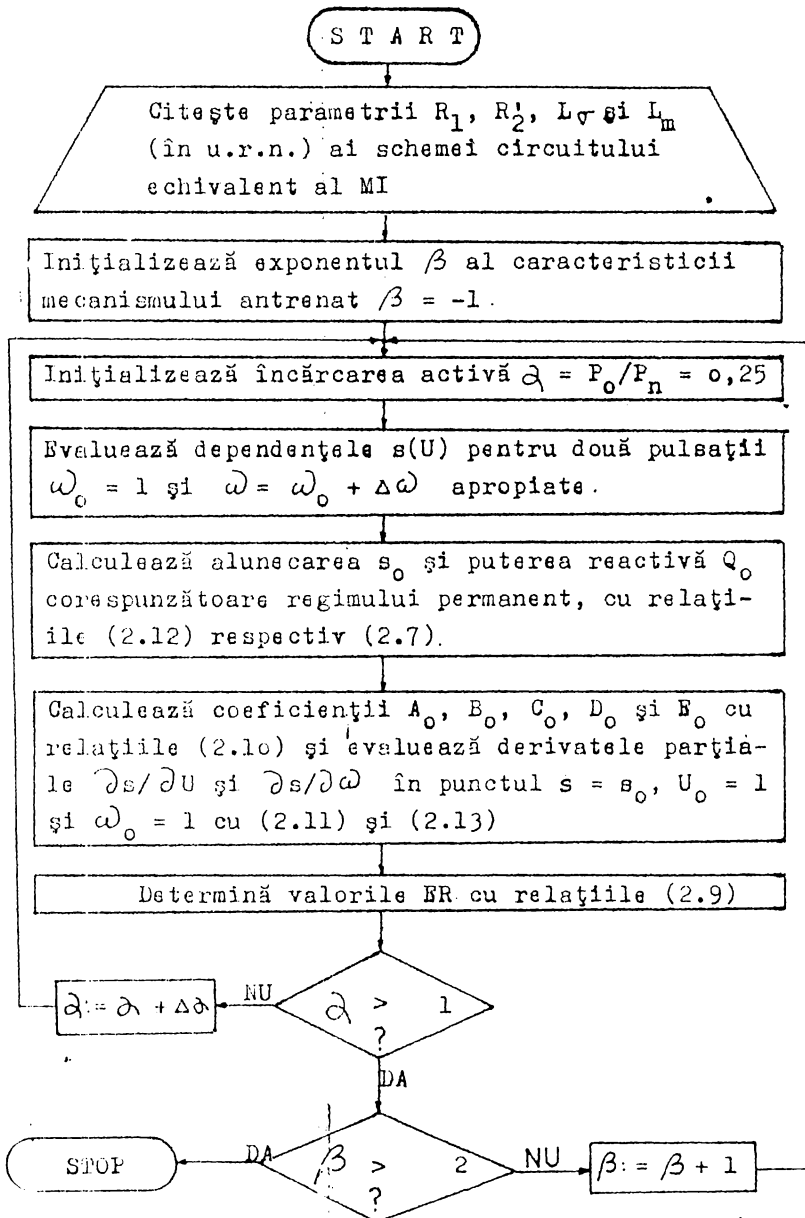


Fig.2.4. Ordinograma de principiu a programului "AMAS"

2.3.4. Parametrii CS ale MI din seria ASI /121/ gama de puteri nominale (0,75 - 55) kW

În cadrul prezentului § se prezintă valorile ER ale MI mici și mijlocii din seria ASI, considerate a fi cele mai frecvente în structura CCI.

Calculul s-a efectuat cu programul "AMAS" figura 2.4, considerând gama de încărcare activă: $\alpha = (0,25 - 1)$ și valorile: $\beta = -1,0,1$ și 2, pentru exponentul caracteristicii cuplu-turație a mecanismelor antrenate.

Parametrii circuitelor echivalente ale MI considerate au fost stabilite conform /107/, /128/, pe baza prelucrării rezultatelor încercărilor de laborator ale întreprinderii constructoare, "Electromotor" Timișoara, pentru 93 de MI din gama respectivă de puteri. Valorile parametrilor electrici ai celor 93 MI analizate, sînt prezentate în anexa A.4.1. din /95/.

În vederea utilizării practice a parametrilor CS ale MI în asamblarea CS ale CC, unde oricum nu pot fi considerate toate MI în mod individual, s-a efectuat o clasificare a gamei de MI de (0,75 - 55) kW din seria ASI în patru categorii, în funcție de puterile nominale, pentru care s-au stabilit valorile medii ale parametrilor, conform tabelului 2.2.

Tabelul 2.2.

Parametrii circuitelor echivalente ale categoriilor de MI considerate

Categori- a de MI	Puteri nominale [kW]	Parametrii circ.echiv. în u.r.n.				Const.de timp mec. T [s]
		R_1	R_2'	$L\sigma$	L_m	
I	0,75 - 3	0,072	0,051	0,1218	0,791	0,15
II	4 - 11	0,048	0,049	0,1137	2,325	0,3
III	15 - 30	0,0328	0,038	0,1089	2,49	0,35
IV	37 - 55	0,0211	0,0332	0,1070	3,168	0,5

* Notă. Constantele de timp mecanice, T, prezentate în ultima coloană a tabelului 2.2. referitoare la rotorul MI și al mecanismului antrenat, au fost estimate statistic pe baza încercărilor experimentale /96/ și a informațiilor din literatură prezentate în /55/ și /128/.

Pentru fiecare categorie de MI s-au determinat ER în funcție de gradul de încărcare activă a MI și caracteristica β a cuplului rezistent al mecanismului antrenat, utilizînd programul "AMAS", figurile 2.5.

Diagramele prezentate în figurile 2.5. permit pe de o parte, stabilirea comodă a parametrilor CS ale MI componente ale CC în vederea asamblării analitice a CS ale acestora, considerînd cunoscute gra-

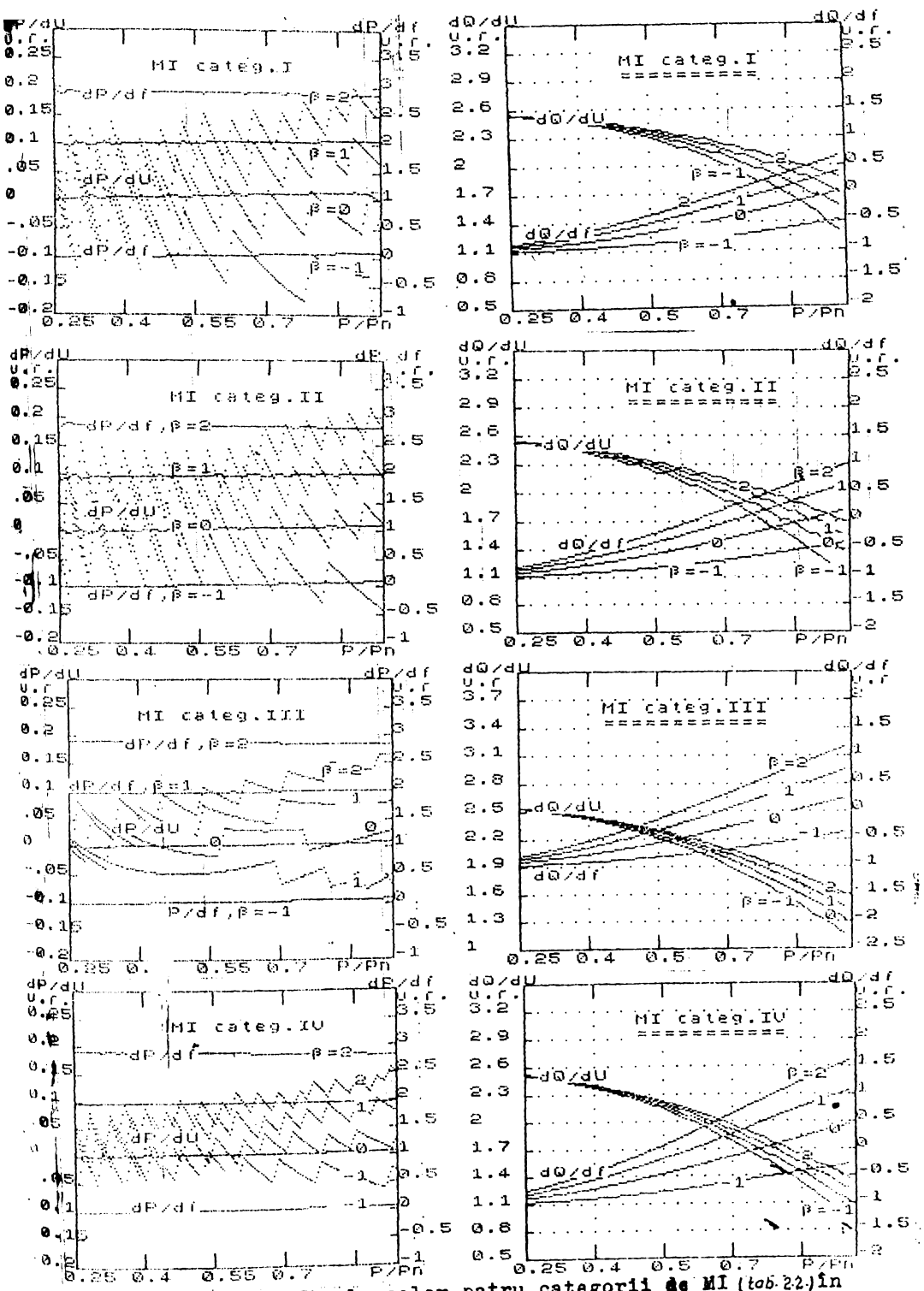


Fig.2.5. Parametrii CS ale celor patru categorii de MI (tab.22) în funcție de gradul de încărcare activă P/P_n și exponentul β al cuplului rezistent.

dul de încărcare și caracteristica mecanismului antrenat și pe de altă parte, evidențierea unor concluzii privind domeniile de variație ale ER ale MI uzuale, concluzii care vor fi prezentate în § următor.

Dispersia valorilor ER, $\partial P/\partial U$ este cauzată de erori de calcul numeric al derivatelor parțiale ale alunecării, $\partial s/\partial U$ și $\partial s/\partial f$. Reducerea acestei dispersii implică o eșantionare mai fină a pașilor de calcul și deci o creștere sensibilă a timpului de calcul.

Diagramele 2.5. s-au obținut cu o durată de calcul, pentru o categorie de MI, de circa 3 ore cu un microcalculator TIM-S. Valorile ER ce se vor considera în continuare vor fi valorile medii rezultate din diagramele 2.5, renunțându-se la o creștere în continuare a timpului de calcul.

2.3.5. Concluzii privind CS ale MI

CS ale MI sub forma neliniară, dezvoltate pe baza schemei circuitului echivalent al MI, relațiile (2.7) și (2.8), redau comportarea reală a MI în domenii largi de variație a tensiunii și frecvenței de alimentare, însă sînt dificil de utilizat în practică. În vederea reprezentării CS sub formă liniarizată, (1.3), generalizată pentru toate tipurile de consumatori individuali, reprezentînd și forma practică de considerare a MI în regimurile permanente și chiar dinamice ale SBE, s-a dezvoltat un algoritm de calcul pentru parametrii acestor CS, implementat în programul "AMAS". Pentru utilizarea practică a rezultatelor obținute în cadrul prezentului § au fost estimați parametrii circuitelor echivalente ale MI din seria ASI și valorile parametrilor CS ale acestora în funcție de gradul de încărcare și caracteristica cuplu-turație a mecanismului antrenat (figura 2.5).

Analiza valorilor ER, prezentate în figura 2.5 pentru gama de MI tip ASI de puteri mici și mijlocii, relevă următoarele aspecte generale:

a) ER al puterii active, $\partial P/\partial U$, în raport cu tensiunea are valori reduse, uneori chiar negative, ca urmare a reducerii pierderilor în bobinaje la creșterea tensiunii de alimentare;

b) valorile ER ale puterii active, $\partial P/\partial f$, în raport cu frecvența sînt puțin sensibile la gradul de încărcare al MI, însă depind substanțial de caracteristica cuplu-turație a mecanismului antrenat, fiind aproximativ egale cu $\beta + 1$;

c) datorită ponderei variabile a puterii reactive de magnetizare în consumul total de putere reactivă al MI, ER, $\partial Q/\partial U$, prezintă o variație mare în funcție de gradul de încărcare. La încărcări redus

ale MI, valoarea ER, $\partial Q/\partial U$, este ridicată datorită influenței puternice a inductanței de magnetizare saturabile;

d) ER al puterii reactive, $\partial Q/\partial f$, în raport cu frecvența prezintă în general o dispersie mare, așa cum rezultă și din raportările din literatură, tabelul 2.1., atât în funcție de gradul de încărcare cât și de caracteristica cuplului rezistent.

În consecință, avînd în vedere faptul că valorile parametrilor CS ale MI, chiar exprimați în u.r., prezintă variații destul de largi în raport cu alte tipuri de consumatori individuali, se impune estimarea acestor parametri pentru fiecare categorie de MI considerînd gradul de încărcare activă și caracteristicile mecanismelor antrenate. În acest sens ^{necesitatea} utilizării diagramelor (2.5) pentru asamblarea CS ale CC cu MI trifazate mici și mijlocii este evidentă.

2.4. Caracteristicile dinamice ale motoarelor de inducție

2.4.1. Aspecte generale

CD ale MI redau legătura reală dintre mărimile oferite de sistem (tensiune și frecvență) la bornele sale și mărimile caracteristice MI în regimuri dinamice și tranzitorii. Formele uzuale de reprezentare ale CD sînt:

- sistem de ecuații intrare-stare-ieșire neliniare;
- sistem de ecuații intrare-stare-ieșire liniarizat, în jurul punctului de funcționare permanent anteperturbație;
- funcții de transfer liniare, în domeniul transformatelor Laplace.

Tabelul 2.3.

Formele uzuale de exprimare ale CD ale MI

Forma de exprimare a CD pentru MI	Lista unor lucrări care o utilizează	Formulare matematică	Indicativ relație	Observații
Sistem de ecuații neliniare	/7/, /26/, /41/, /55/, /57/, /87/, /130/	$\frac{dx}{dt} = f_x(x, a, u)$ $y = f_y(x, a, u)$	(2.14)	Unde: x, y, u reprezintă vectorii mărimilor de stare, ieșire, respectiv, intrare;
Sistem de ecuații liniarizat	/29/, /84/, /124/, /125/, /139/	$\frac{d\Delta x}{dt} = [A]\Delta x + [B]\Delta u$ $\Delta y = [C]\Delta x + [D]\Delta u$	(2.15)	a - este vectorul parametrilor; - p - operatorul Laplace
Funcție de transfer liniară	/48/, /84/, /108/, /129/, /136/, /137/	$\Delta y = [H(p)] \Delta u$	(2.16)	

În literatură sînt dezvoltate diverse MM pentru MI avînd în general la bază ecuațiile lui Stanley, elaborate în 1938, /7/, /65/. Diversitatea MM ale MI este determinată de:

1. Modul de considerare al sistemului de axe rectangular d, q :
 a) fix față de stator (modelul Stanley), sau fix față de rotor;
 b) rotitor cu turație sincronă, cu sens de rotație levogir /10/, /57/, sau dextrogir /33/, /124/, /125/, axa q defazată cu $\pi/2$ în urmă față de axa d , /57/ sau înainte /10/, /33/, /124/, /125/, /139/.

2. Condițiile de echivalare dintre mașina reală și cea echivalentă:

a) considerarea inducțiilor în întrefier identice /33/, /107/;
 b) considerarea condiției de simetrie a matricelor de transformare în locul inducțiilor identice /27/, /120/.

3. Sistemul mărimilor de intrare-stare-ieșire. În tabelul 2.4. sînt prezentate cîteva seturi de mărimi de intrare, \underline{u} , ieșire, \underline{y} și de stare, \underline{x} , considerate în MM ale MI în literatură.

Tabelul 2.4.

Vectorii mărimilor de intrare, ieșire și de stare ale MM pentru MI utilizate în literatură

Vectorul mărimii de:	\underline{u} intrare	\underline{y} ieșire	\underline{x} stare	Ordinul MM	Observații
Sursa					
Guthey /29/	U, ω	-	$I_d; I_q; \delta; I'_d; I'_q$	5	Semnificația simbolurilor din acest tabel este cea prezentată în paragraful 2.1. C, C_m - sînt cuplurile electric, respectiv mecanic.
Meyer /108/	U_d, U_q	I_d, I_q	Mărimi fără semnificație fizică	2	
Rogers /124/	U_d, U_q	-	$I_d, I_q, I'_d, I'_q, \omega$	5	
Rogers /125/	U_d, U_q	P, Q	\bar{U}_e, s, δ	3	
Wasynczuk /143/	$U_d, U_q, U'_d, U'_q, C_m$	\bar{I}, C	$\psi_d, \psi_q, \omega, \psi'_d, \psi'_q$	5	
Sastry /130/	U_d, U_q	P, Q	$I_d, I_q, I'_d, I'_q, \omega$	5	

În vederea obținerii CD ale MI se impune elaborarea unor MM ale MI care să împlinescă următoarele condiții:

a) mărimile de intrare să fie reprezentate de modulul tensiunii la bornele MI și frecvența sa, sau mărimi derivate ale acestora (componentele pe două axe rectangulare ale tensiunii);

b) mărimile de ieșire să fie mărimi caracteristice MI cum ar fi puterea activă și reactivă absorbită sau componentele curentului statoric;

c) sistemul de axe de referință să fie comun tuturor elementelor SSE.

Prezentul § este consacrat elaborării unor MM care să satisfacă aceste deziderate, rezultând CD ale MI sub forma sistemului de ecuații de intrare-stare-ieșire neliniare (2.14) și liniarizate în jurul punctului de funcționare anteperturbație, (2.15). Ultima formă de reprezentare a CD ale MI permite trecerea la reprezentarea acestora și sub forma funcțiilor de transfer liniare (2.16), /4/, /88/ prin aplicarea algoritmului Leverrier-Fadeev /35/ sistemului de ecuații diferențiale de stare, posibilitate prezentată în mod concret în capitolul 6.

În vederea precizării semnificațiilor simbolurilor utilizate și a convențiilor de semn adoptate se prezintă în prima parte a §, ecuațiile mașinii de inducție reale și echivalente, pe baza cărora se construiesc în continuare CD ale MI sub forma neliniară. Forma liniarizată a CD s-a obținut în ultima parte prin liniarizarea MM, obținut anterior, în jurul punctului permanent de funcționare.

Validarea CD obținute în cadrul prezentului capitol s-a efectuat prin compararea răspunsurilor tranzitorii ale unor MI, înregistrate experimental în laborator, cu cele ale MM ale acestor MI, pentru aceeași perturbație (treaptă de tensiune). CD liniarizate au fost validate prin compararea răspunsurilor tranzitorii ale unui MI reprezentat prin CD neliniare și prin CD liniarizate pentru aceeași perturbație.

2.4.2. Mașina de inducție reală, mașina echivalentă, ecuațiile de funcționare /33/, /107/

Considerând ipotezele și convențiile de semn adoptate (§.2.2) pentru MI cu înfășurări trifazate amplasate simetric în stator și rotor, schema electrică a acestuia este prezentată în figura 2.6. unde fazele fazei statorice și rotorice sînt caracterizate de unghiurile:

$$\theta_s = \frac{2\pi}{3} \cdot (\lambda - 1) \quad (2.17)$$

respectiv

$$\theta_r = \theta_s + \frac{2\pi}{3} \cdot (\lambda - 1)$$

Pentru $\lambda = 1, 2, 3$.

Ecuațiile dintre tensiuni și curenți, în coordonate de fază, pentru această mașină asociind convențiile de semn precizate anterior sînt:

$$u_{\lambda} = R_{\lambda} i_{\lambda} + d\psi_{\lambda} / dt ; u'_{\lambda} = R'_{\lambda} i'_{\lambda} + d\psi'_{\lambda} / dt ;$$

$$\psi_{\lambda} = \sum_{\nu} L_{\lambda\nu} i_{\nu} + \sum_{\nu} L'_{\lambda\nu} i'_{\nu} ; \quad (2.18)$$

unde λ și $\nu = 1, 2, 3$.

Rezolvarea sistemului de ecuații (2.18), împreună cu ecuația de mișcare a rotoarelor, permite determinarea variației în timp a curenților și tensiunilor presupunînd cunoscuți parametrii mașinii reale.

Pentru analiza regimurilor dinamice aproape în exclusivitate se utilizează însă o mașină echivalentă din punct de vedere energetic cu mașina dată, figura 2.7, caracterizată prin:

- două înfășurări statorice ale căror axe coincid cu axele d,q ce se rotesc cu turație sincronă;
- două înfășurări rotorice, similare celor statorice, amplasate de asemenea în axele d,q și deci se rotesc cu turație sincronă față de stator;

același întrefier, număr de poli și moment de inerție ca și mașina reală.

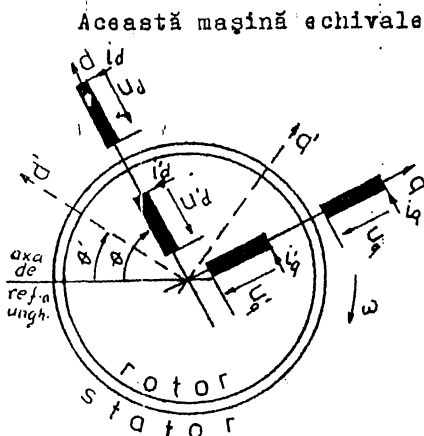


Fig.2.7. Schema electrică a MI echivalent.

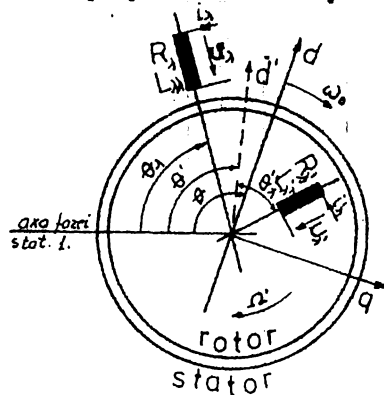


Fig.2.6. Schema electrică considerată pentru mașina reală

Această mașină echivalentă permite aplicarea teoriei celor două axe, elaborată de Park și Blondel (1928), pentru scrierea ecuațiilor tensiunilor și curenților în sistemul de coordonate d,q. Referitor la acest sistem de coordonate, se face precizarea că în vederea includerii CD ale MI în algoritmele de calcul ale stabilității SBE este convenabil ca sistemul de referință să se rotească cu turația sincronă, ω_q , determinată de SBE în regimul permanent considerat /131/, /133/. În consecință, tensiunea \bar{U} , la bornele MI

este caracterizată fie de componentele sale \bar{U}_d, \bar{U}_q , pe axele sincrone d, q , fie de modulul său și unghiul de poziție δ în acest sistem de coordonate (figura 2.8). Abaterea tensiunii \bar{U} , indiferent de forma în care este exprimată, reprezintă mărimea de intrare (perturbația) pentru MM care constituie CD ale MI. Modificarea frecvenței, f , și tensiunii la borne, determină modificarea unghiurilor δ și θ' ale poziției fazorului tensiunii la borne \bar{U} și respectiv a axelor rotorice d, q , conform relațiilor:

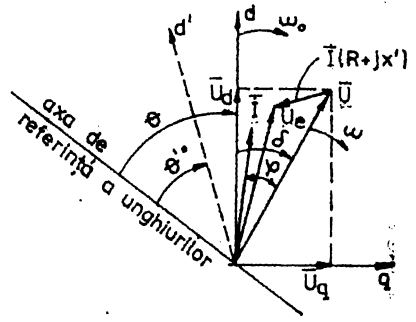


Fig. 2.8. Referitoare la pozițiile relative ale axelor de coordonate și a tensiunii la borne

$$\begin{aligned} d \delta / dt &= 2 \pi (f - f_0) \\ \theta' &= 2 \pi f (1 - s) t \\ \theta &= 2 \pi f_0 t \end{aligned} \quad (2.19)$$

Considerând condițiile de echivalență energetică între mașina reală și echivalentă conform /33/ și /107/:

- a) inducțiile în întrefier să fie identice;
- b) puterile electrice momentane totale să fie aceleași;
- c) să aibă aceleași energii electromagnetice;

și condiția ca numărul de spire al tuturor înfășurărilor să fie identice, rezultă următoarele relații de transformare:

1. de la mărimi de fază la mărimi d, q :

$$\begin{aligned} e_d &= \sum_{\lambda=1}^3 e_{\lambda} \cos(\theta - \theta_{\lambda}); & f_d &= \frac{2}{3} \cdot \sum_{\lambda=1}^3 f_{\lambda} \cos(\theta - \theta_{\lambda}); \\ e_q &= -\sum_{\lambda=1}^3 e_{\lambda} \sin(\theta - \theta_{\lambda}); & f_q &= -\frac{2}{3} \sum_{\lambda=1}^3 f_{\lambda} \sin(\theta - \theta_{\lambda}); \end{aligned} \quad (2.20)$$

unde:

$$\begin{aligned} e &\equiv i; & f &\equiv u, \psi; & \text{pentru mărimile statorice și} \\ e &\equiv i'; & f &\equiv u', \psi'; & \text{pentru mărimile rotorice;} \end{aligned}$$

2. de la mărimi d, q la mărimi de fază:

$$\begin{aligned} c_z &= \frac{2}{3} c_d \cos(\theta - \theta_z) - c_q \sin(\theta - \theta_z); \\ t_z &= t_d \cos(\theta - \theta_z) - t_q \sin(\theta - \theta_z); \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\text{unde: } c \equiv \begin{Bmatrix} i \\ i' \end{Bmatrix}; \quad z \equiv \begin{Bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{Bmatrix}; \quad t \equiv \begin{Bmatrix} u \\ u' \\ \psi \\ \psi' \end{Bmatrix}$$

Aplicînd transformările (2.20) ecuațiilor tensiunilor și fluxurilor exprimate în coordonate de fază (2.18), se obțin ecuațiile pentru tensiunile și fluxurile înfășurărilor mașinii echivalente în coordonate d, q, astfel:

$$u_d = R_d i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\theta}{dt} ; \quad u_q = R_q i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \frac{d\theta}{dt} ; \quad (2.22)$$

$$u'_d = R'_d i'_d + \frac{d\psi'_d}{dt} - s \cdot \psi'_q \frac{d\theta}{dt} ; \quad u'_q = R'_q i'_q + \frac{d\psi'_q}{dt} + s \cdot \psi'_d \frac{d\theta}{dt} ; \quad (2.23)$$

$$\psi_d = L_{dd} i_d + L'_{dd} i'_d ; \quad \psi_q = L_{qq} i_q + L'_{qq} i'_q ; \quad (2.24)$$

$$\psi_{d'} = L_{d'd} i_d + L_{d'd'} i'_d ; \quad \psi_{q'} = L_{q'd} i_d + L_{q'd'} i'_q ; \quad (2.25)$$

unde $d\theta/dt = \omega$ - reprezintă pulsația tensiunii la borne;

$s = (\omega - \omega')/\omega$ este alunecarea MI;

$R_d = R_q = 2/3R_\lambda = R$ sînt rezistențele înfășurărilor statorice d, q;

$R'_d = R'_q = 2/3R'_\lambda = R'$ sînt rezistențele înfășurărilor rotorice d, q.

Pentru mașina cu poli plini (cazul general al MI), considerînd ipotezele adoptate anterior se introduc notațiile:

$$L_{dd} = L_{qq} = X_s/\omega = L_s ; \quad L_{d'd} = L_{q'q} = X_m/\omega = L_m \quad (2.26)$$

$$L_{d'd'} = L_{q'q'} = X_r/\omega = L_r$$

unde:

$$X_s = X_r = X_v + X_m$$

Sistemul de ecuații prezentat mai sus se completează cu ecuația de mișcare a rotoarelor, în care considerînd cuplul rezistent de forma (2.4), se poate scrie astfel:

$$T \frac{d\theta}{dt} = K_m [\omega(1-s)]^{\beta+1} - (U_{ed} i_d + U_{eq} i_q) \quad (2.27)$$

Analiza ecuațiilor de funcționare ale MI echivalent

a) sistemul de ecuații (2.22) - (2.27) reprezintă MM al MI.

Adecvat studiului caracteristicilor electromecanice ale acestuia considerat inclus într-un SEB;

b) mărimile statorice și rotorice sînt reprezentate prin componentele lor într-un sistem de axe rectangulare care se rotește cu viteză sincronă, corespunzătoare regimului permanent de funcționare;

c) ecuațiile de mai sus permit considerarea MI ca fiind compus din două RF reprezentând axele d și q ale MI. Rețeaua de secvență homopolară nu a fost considerată avînd în vedere faptul că în studiile de regimuri permanente și stabilitate ale SBF se consideră doar regimurile simetrice ale CC;

d) în ecuații intervin următoarele categorii de mărimi:

I. - parametrii electromagnetici și mecanici ai MI și mecanismului antrenat: $R, R', L_m, L_s, T, K_m, \beta$, șapte mărimi, presupuse cunoscute;

II. - variabile ale căror valori se consideră cunoscute: $u_d, u_q, u'_d = u'_q = 0$, patru mărimi;

III. - variabile ale căror valori trebuie determinate prin rezolvarea sistemului de ecuații: $i_d, i_q, i'_d, i'_q, s, \psi_d, \psi_q, \psi'_d, \psi'_q$, nouă mărimi;

IV. - variabila independentă în funcție de care se exprimă celelalte mărimi: t - timpul, o mărime.

Referitor la mărimile din categoria I se face precizarea că acestea nu sînt constante, parametrii trebuie exprimați în funcție de mărimile din categoria III (datorită fenomenelor neliniare). Mărimile din categoria II reprezintă mărimi oferite de SBF la bornele MI, denumite în continuare mărimi de sistem, ele constituind intrările pentru CD ale MI care vor fi dezvoltate în continuare.

2.4.3. Deducerea sistemelor de ecuații ale CD ale MI

Considerînd ipotezele și convențiile de semn adoptate în §.2.1 se dezvoltă în continuare CD ale MI sub formă sistemelor de ecuații intrare-stare-ieșire pornind de la ecuațiile de funcționare (2.22 - 2.27) ale MI prezentate anterior.

Astfel introducînd în ecuațiile (2.22) expresiile (2.24) ale înfînțuirilor magnetice ψ_d și ψ_q rezultă:

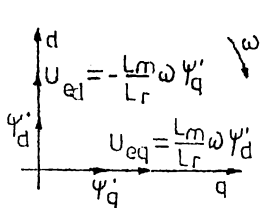
$$\begin{aligned} u_d &= R \cdot i_d - \omega L_s i_q - \omega L_m i'_q \\ u_q &= R \cdot i_q + \omega L_s i_d + \omega L_m i'_d \end{aligned} \quad (2.28)$$

Se înlocuiesc curenții rotorici i'_d și i'_q cu expresiile lor obținute din (2.23) pentru $u'_d = u'_q = 0$. Ecuațiile (2.28) devin:

$$\begin{aligned} u_d &= R \cdot i_d - \omega L_s i_q - \omega \psi'_q L_m / L_r + \omega i_q L_m^2 / L_r \\ u_q &= R \cdot i_q + \omega L_s i_d + \omega \psi'_d L_m / L_r - \omega i_d L_m^2 / L_r \end{aligned} \quad (2.29)$$

Definind inductanța tranzitorie $L' = L_s - L_m^2 / L_r$ și componentele

u_{ed} și u_{eq} ale t.e.m. proporționale cu înălțuirile rotorice ψ'_d și respectiv ψ'_q conform figurii 2.9, /10/, ecuațiile (2.29) devin:



$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \omega L' \\ \omega L' & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ed} \\ u_{eq} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Dacă se introduc variabilele complexe:

Fig.2.9. Referitoare la definițiile componentelor tensiunii \bar{U}_e .

$$\bar{U} = U_d + jU_q; \quad \bar{I} = I_d + jI_q \quad \text{și} \quad \bar{U}_e = U_{ed} + jU_{eq} \quad (2.31)$$

relația (2.30) poate fi scrisă și sub formă fazorială :

$$\bar{U} = (R + j\omega L') \cdot \bar{I} + \bar{U}_e \quad (2.32)$$

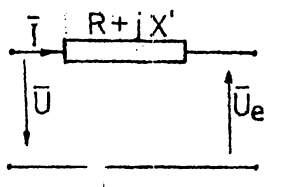


Fig.2.10. Schema circuitului echivalent al MI

corespunzătoare schemei circuitului echivalent din figura 2.10. Se obține astfel un model similar cu cel al generatoarelor sincrone utilizate în studiile de stabilitate ale SFE, /27/, /68/, /120/, ceea ce permite o tratare unitară a mașinilor rotative din sistem.

Sistemul de ecuații de stare a MI

Ecuațiile de stare ale MI permit determinarea variației în timp a mărimilor de stare u_{ed} , u_{eq} , s și δ în funcție de variația mărimilor de intrare considerând parametrii MI cunoscuți.

Pentru deducerea formei uzuale a ecuațiilor de stare ale MI, se înlocuiesc în ecuațiile (2.23), curenții rotorici i'_d și i'_q cu expresiile lor obținute din ecuațiile (2.25), obținându-se:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{R'}{L_m} \psi'_d - \frac{R' L_s}{L_m} i_d + s \frac{L_r}{L_m} u_{ed} + \frac{L_r}{\omega L_m} \cdot \frac{du_{eq}}{dt} \\ 0 &= \frac{R'}{L_m} \psi'_q - \frac{R' L_s}{L_m} i_q + s \frac{L_r}{L_m} u_{eq} - \frac{L_r}{\omega L_m} \cdot \frac{du_{ed}}{dt} \end{aligned} \quad (2.33)$$

Înlocuind în (2.33) expresiile (2.24) ale înălțuirilor statorice ψ'_d , ψ'_q , rezultă sistemul de ecuații:

$$T'_{do} \cdot \frac{du_{ed}}{dt} = -u_{ed} + T'_{do} \cdot s \cdot \omega u_{eq} - \frac{\omega L_m^2}{L_r} i_q \quad (2.34)$$

$$T'_{do} \cdot \frac{du_{eq}}{dt} = -u_{eq} - T'_{do} \cdot s \cdot \omega u_{ed} + \frac{\omega L_m^2}{L_r} i_d \quad (2.34)$$

Ecuatiile (2.34) împreună cu ecuația de mișcare a rotoarelor (2.27) reprezintă sistemul ecuațiilor diferențiale de stare ale MI, din MM neliniar al acestuia.

CD neliniare ale MI

CD ale MI, așa cum s-a precizat în capitolul 1, constau din ecuațiile diferențiale de stare în care intervin doar parametrii circuitului echivalent al MI, mărimile de stare și cele de intrare, și din sistemul ecuațiilor de ieșire în care intervin pe lângă aceste mărimi și mărimile de ieșire, puterea activă și reactivă absorbită.

În vederea obținerii CD ale MI se impune eliminarea curenților i_d și i_q din ecuațiile de stare (2.27) și (2.34), în acest scop considerînd schema circuitului echivalent al MI, figura 2.10, din relația (2.30) rezultă:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_m & B_m \\ -B_m & G_m \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_d - u_{ed} \\ u_q - u_{eq} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

unde: $G_m = R/[R^2+(\omega L')^2]$ și $B_m = \omega L'/[R^2+(\omega L')^2]$, reprezintă componentele admitanței circuitului echivalent al MI.

Totodată, forma practică de reprezentare a CD ale MI implică considerarea ca mărimi de intrare pentru MM, modulul tensiunii la borne și frecvența (pulsatia) sa. În vederea obținerii acestui MM se introduce o nouă variabilă de stare, unghiul δ de poziție al tensiunii în sistemul de coordonate d, q (figura 2.8) și se exprimă componentele tensiunii la borne astfel:

$$u_d = U \cdot \cos \delta ; \quad u_q = U \cdot \sin \delta \quad (2.36)$$

Cu aceste precizări sistemul de ecuații de stare al MI, adecvat CD ale acestui tip de consumator rezultă din ecuațiile (2.27) și (2.34) în care s-au introdus expresiile (2.30) ale componentelor curentului statoric și s-au exprimat tensiunile u_d și u_q sub forma (2.36). Pentru simplificarea scrierii s-a introdus notația $L = L_m^2/L_r = L_r - L'$, iar constanta K_m , se determină din regimul permanent cu relațiile (2.5) sau (2.6) dacă se lucrează cu mărimi exprimate în u.a. respectiv u.r.

$$\left\{ \begin{aligned}
 T_{do}^i \frac{du_{ed}}{dt} &= -u_{ed} [\omega L B_m + 1] + u_{eq} [T_{do}^i \cdot s \cdot \omega + \omega L \cdot G_m] - \\
 &\quad - \omega L \cdot U \cdot (G_m \sin \delta - B_m \cos \delta) \\
 T_{do}^i \frac{du_{eq}}{dt} &= -u_{ed} [T_{do}^i s \cdot \omega + \omega L \cdot G_m] - u_{eq} [\omega L \cdot B_m + 1] + \\
 &\quad + \omega L \cdot U \cdot (G_m \cos \delta + B_m \sin \delta) \\
 T \frac{ds}{dt} &= K_m [\omega (1-s)]^{\beta+1} - u_{ed} (U \cdot \sin \delta - u_{eq}) B_m + (U \cos \delta - u_{ed}) G_m - \\
 &\quad - u_{eq} (U \sin \delta - u_{eq}) G_m - (U \cos \delta - u_{ed}) B_m \\
 \frac{d\delta}{dt} &= \omega - \omega_0
 \end{aligned} \right. \quad (2.37)$$

Sistemul ecuațiilor de ieșire ale CD ale MI se obține exprimând puterile absorbite de acesta în funcție de tensiunea și frecvența la borne prin intermediul mărimilor de stare. În acest scop se consideră expresiile puterii active și reactive absorbite de MI /42/ de forma:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Exprimând componentele i_d, i_q ale curentului statoric conform relației (2.35) se obține sistemul de ecuații de ieșire pentru puterile activă și reactivă absorbite de MI de forma:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} G_m & B_m \\ -B_m & G_m \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} U \cdot \cos \delta - u_{ed} \\ U \cdot \sin \delta - u_{eq} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Sistemele de ecuații intrare-stare-ieșire (2.37), (2.39), avînd ca mărimi de intrare mărimile oferite de SEE la bornele MI, tensiunea și frecvența (pulsăția sa), reprezintă forma generală neliniară a CD ale MI.

În practică, în funcție de condițiile concrete în care se utilizează aceste CD, se pot considera forme particulare ale acestora. Astfel, în cazul regimurilor dinamice și tranzitorii cu oscilații interzonale în care frecvența SEE se modifică lent, se poate neglija pe durata analizei regimului dinamic abaterea frecvenței, unghiul δ rămînînd în acest caz constant. Sistemul de ecuații de stare (2.37) devine astfel de ordinul trei (fără ultima ecuație). În cazul studiilor

regimurilor dinamice ale unui MI individual în care se consideră doar modificarea dinamică a tensiunii la bornele sale, unghiul de poziție δ poate fi admis arbitrar, ($\delta = 0$), ceea ce simplifică substanțial CD (2.37), (2.39) ale MI.

CD liniarizate ale MI

Prin liniarizarea ecuațiilor (2.37) și (2.39) în jurul punctului de funcționare permanent, caracterizat prin mărimile $U_0, \omega_0, u_{edo}, u_{eq0}, s_0, \delta_0, P_0$ și Q_0 rezultă CD ale MI de forma generală (2.15):

$$\begin{bmatrix} T'_{do} \frac{d \Delta u_{ed}}{dt} \\ T'_{do} \frac{d \Delta u_{eq}}{dt} \\ T \frac{d \Delta s}{dt} \\ \frac{d \Delta \delta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 & A14 \\ A21 & A22 & A23 & A24 \\ A31 & A32 & A33 & A34 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{ed} \\ \Delta u_{eq} \\ \Delta s \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B11 & B12 \\ B21 & B22 \\ B31 & B32 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C11 & C12 & 0 & C14 \\ C21 & C22 & 0 & C24 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{ed} \\ \Delta u_{eq} \\ \Delta s \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D11 & D12 \\ D21 & D22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Unde expresiile coeficienților A, B, C, D în funcție de parametrii MI: R, L', T'_{dq}, L_m, L_r , mărimile de stare $\delta_0, u_{edo}, u_{eq0}, s_0$ și mărimile de intrare U_0, ω_0 din regimul permanent, s-au obținut prin derivarea abaterilor mărimilor de stare și ieșire în raport cu mărimile de stare și intrare și evaluarea acestor derivate în punctul permanent de funcționare.

Expresiile coeficienților CD liniarizate (2.40) și (2.41) ale MI sînt prezentate în continuare. Pentru simplificarea scrierii s-a renunțat la indicele "0" pentru marcarea valorilor mărimilor de stare sau de intrare în regim permanent anteperturbate, acestea subînțelegîndu-se. Totodată s-au mai introdus notațiile:

$$u_d = U_o \cos \delta_o ; u_q = U_o \sin \delta_o ; L = L_m^2 / L_r ;$$

$$G_m = R / [R^2 + (\omega_o L')^2] ; B_m = \omega_o L' / [R^2 + (\omega_o L')^2] \quad (2.42)$$

Coefficientii matricei [A]:

$$A_{11} = -(\omega L \cdot B_m + 1) ; A_{12} = \omega (T'_{do} \cdot s + L \cdot G_m) ; A_{13} = T'_{do} \cdot u_{eq} \cdot \omega ;$$

$$A_{21} = -\omega (T'_{do} \cdot s + L \cdot G_m) ; A_{22} = -(\omega L \cdot B_m + 1) ; A_{23} = -T'_{do} \cdot u_{ed} \cdot \omega ;$$

$$A_{14} = -\omega L \cdot U (G_m \cos \delta + B_m \sin \delta) ; A_{24} = \omega L \cdot U (-G_m \sin \delta + B_m \cos \delta) ;$$

$$A_{31} = (2 \cdot u_{ed} - U \cdot \cos \delta) G_m - U \cdot \sin \delta \cdot B_m ; A_{32} = (2 \cdot u_{eq} - U \cdot \sin \delta) G_m -$$

$$- U \cdot \cos \delta \cdot B_m ; A_{33} = -K_m (\beta + 1) \cdot [\omega (1-s)]^3 \omega ;$$

$$A_{34} = U [u_{ed} (G_m \sin \delta - B_m \cos \delta) - u_{eq} (G_m \cos \delta + B_m \sin \delta)] \quad (2.43)$$

Coefficientii matricei [B]:

$$B_{11} = \omega L (B_m \cos \delta - G_m \sin \delta) ; B_{21} = \omega L (G_m \cos \delta + B_m \sin \delta) ;$$

$$B_{12} = 2u_{ed} \cdot L \cdot B_m (L' \cdot B_m - 1) + u_{eq} (T'_{do} \cdot s + L \cdot G_m) + L \cdot U (G_m \sin \delta - B_m \cos \delta) -$$

$$- 2 \cdot L'^2 \cdot G_m^2 / R \cdot L \cdot \omega \cdot (u_{eq} - u_q + u_d) ;$$

$$B_{22} = -u_{ed} (T'_{do} \cdot s + L \cdot G_m) - u_{eq} \cdot L \cdot B_m + L \cdot U (G_m \cdot \cos \delta + B_m \cdot \sin \delta) +$$

$$+ 2 \cdot L'^2 \cdot G_m / R \cdot \omega \cdot L (u_{ed} - u_d) + L \cdot B_m (1 - 2 \cdot L' \cdot B_m) (u_q - u_{eq}) ;$$

$$B_{31} = -u_{ed} (\sin \delta \cdot B_m + G_m \cos \delta) - u_{eq} (G_m \sin \delta - B_m \cos \delta) ;$$

$$B_{32} = (\beta + 1) K_m \cdot \omega^3 (1-s)^{\beta+1} + 2L'^2 \cdot G_m / R \cdot u_{ed} (u_d - u_{ed}) + u_{eq} (u_q - u_{eq}) -$$

$$- B_m (1/\omega - 2L' \cdot B_m) - u_{ed} (u_q - u_{eq}) - u_{eq} (u_d - u_{ed}) \quad (2.44)$$

Coefficientii matricei [C]:

$$C_{11} = (B_m u_q - G_m u_d) ; C_{12} = -(B_m u_d + G_m u_q) ;$$

$$C_{14} = U u_{ed} (G_m \sin \delta + B_m \cos \delta) - u_{eq} (B_m \sin \delta - G_m \cos \delta) ;$$

$$C_{24} = U u_{ed} (B_m \sin \delta - G_m \cos \delta) - u_{eq} (B_m \cos \delta + G_m \sin \delta) ; \quad (2.45)$$

Coefficientii matricei [D]:

$$D_{11} = 2 \cdot U \cdot G_m + u_{ed} (B_m \sin \delta - G_m \cos \delta) - u_{eq} (G_m \sin \delta + B_m \cos \delta) ;$$

$$D_{12} = U \left\{ [\cos \delta (u_d - u_{ed}) + \sin \delta (u_q - u_{eq})] (-2L'^2 G_m^2 / R) + [\sin \delta (u_d - u_{ed}) + \right.$$

$$\left. + \cos \delta (u_q - u_{eq}) \right] \cdot B_m (1/\omega - 2L' B_m) \left. \right\}$$

$$D_{21} = (G_m \sin \delta + B_m \cos \delta) (2U \cos \delta - u_{ed}) + (B_m \sin \delta - G_m \cos \delta) (2U \sin \delta - u_{eq})$$

$$D_{22} = U \left\{ [(u_d - u_{ed}) \sin \delta - (u_q - u_{eq}) \cos \delta] (-2L' G_m^2 / R) + [(u_d - u_{ed}) \cos \delta + (u_q - u_{eq}) \sin \delta] B_m (1/\omega - 2L' B_m) \right\} \quad (2.46)$$

Pentru determinarea mărimilor de stare, corespunzătoare regimului permanent considerat, u_{edo} , u_{eqo} , s_o și δ_o , notate în relațiile (2.43 - 2.46) fără indicele "o", considerînd cunoscuți parametrii circuitului echivalent al MI (figura 2.1), puterea activă P_o , absorbită, tensiunea U_o la borne, faza δ_o și pulsația sa ω_o , se calculează alunecarea s_o printr-o rezolvare iterativă de tip Newton a primei ecuații (2.7). Componentele t.e.m. u_{edo} și u_{eqo} se determină prin rezolvarea sistemului format din primele două ecuații din (2.37) în care se anulează derivatele.

CD liniarizate (2.40) și (2.41), prezentate, au forma cea mai generală. Ca și în cazul CD neliniare dezvoltate anterior în funcție de cazurile concrete se pot obține forme mai reduse (cazul păstrării constante a pulsației sau al considerării tensiunii la borne doar pe axa d, $\delta=0$).

2.4.4. Validarea CD ale MI obținute

CD neliniare ale MI, ecuațiile (2.37) și (2.39) dezvoltate în cadrul prezentului capitol au fost validate prin compararea răspunsurilor tranzitorii a trei MI tip LMB3-100Lxo, 75x75o, notate M4, M5 și M6, determinate experimental în laborator, cu cele obținute prin soluționarea CD ale acestora la o perturbație treaptă de tensiune.

În vederea efectuării determinărilor experimentale a fost conceput și realizat un stand adecvat identificării CS și CD ale consumatorilor, prezentat în figura 2.11.

Saltul de tensiune pe bara ②, de alimentare a MI, s-a realizat prin conectarea modelului de linii electrice lungi, LEA, în regim de mers în gol pe bara ② prin contactorul C_L . Pentru reglajul valorii sale s-a intercalat între sursă, autotransformatorul AT, și bara ② o bobină trifazată, BR, cu întrefier reglabil.

Valorile mărimilor electrice U_o , P_o , Q_o , caracteristica regimului permanent anteperturbație măsurate cu trusa QN-10, au constituit mărimile de referință (consemn) pentru abaterile tensiunii și respectiv ale puterii în regimul tranzitoriu produs de conectarea LEA. Aceste abateri, convertite în tensiuni continue și amplificate cu ajutorul trusei TAIMB-o2 /1o2/ au fost înregistrate pe bandă magnetică cu

viteză mare (38 cm/s) și apoi redată cu viteză redusă (9,5 cm/s) pentru a fi oscilografiate pe hîrtie fotografică cu oscilograful mecano-optic tip N117, figura 2.11.

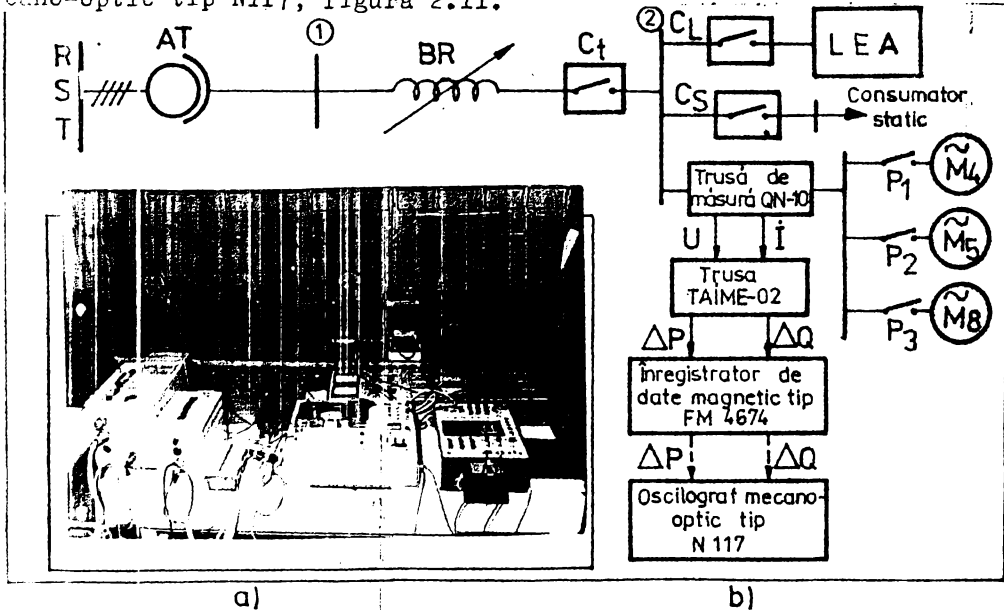


Fig.2.11. Standul utilizat pentru validarea CD ale MI: a) vedere de ansamblu; b) schema electrică monofilară.

Scările de reprezentare ale mărimilor electrice s-au stabilit pe baza citirilor valorilor mărimilor electrice în regimurile permanente anteperturbație și postperturbație cu trusa QN-10.

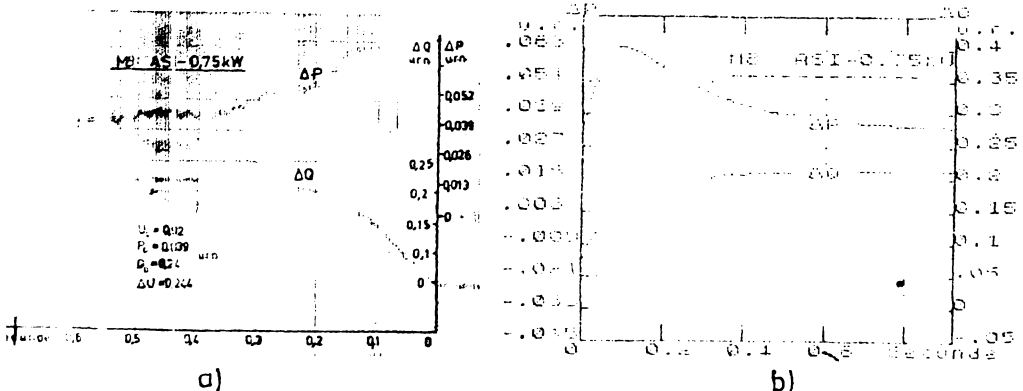


Fig.2.12. Răspunsul tranzitoriu al MI, M8 la perturbație treaptă de tensiune: a) măsurat; b) calculat.

Testele au fost efectuate separat pentru fiecare MI, selectarea efectuându-se cu întrerupătoarele P_1, P_2, P_3 , figura 2.11.

Răspunsurile tranzitorii ale MI, M8, M4, M5, la perturbațiile treaptă de tensiune ΔU , înregistrate, sînt prezentate în oscilografele 2.12.a), 2.13.a) și respectiv 2.14.a), în care sînt precizate și valorile mărimilor efective caracteristice regimurilor permanente anteperturbație exprimate în u.r.n.

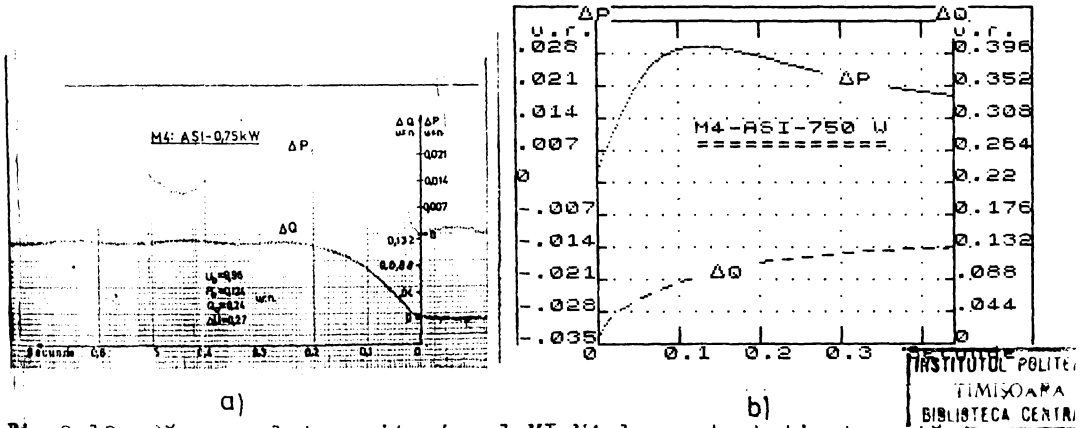


Fig.2.13. Răspunsul tranzitoriu al MI, M4, la perturbația treaptă de tensiune: a) măsurat; b) calculat.

Răspunsurile tranzitorii ale MI obținute experimental, figurile 2.12.a), 2.13.a), și 2.14.a), sînt comparate cu răspunsurile tranzitorii ale aceluiași MI reprezentate prin CD neliniare, ecuațiile (2.37) și (2.39) pentru aceleași perturbații (trepte pozitive de tensiune) și același regim permanent anteperturbație, figurile 2.12.b), 2.13.b) și 2.14.b).

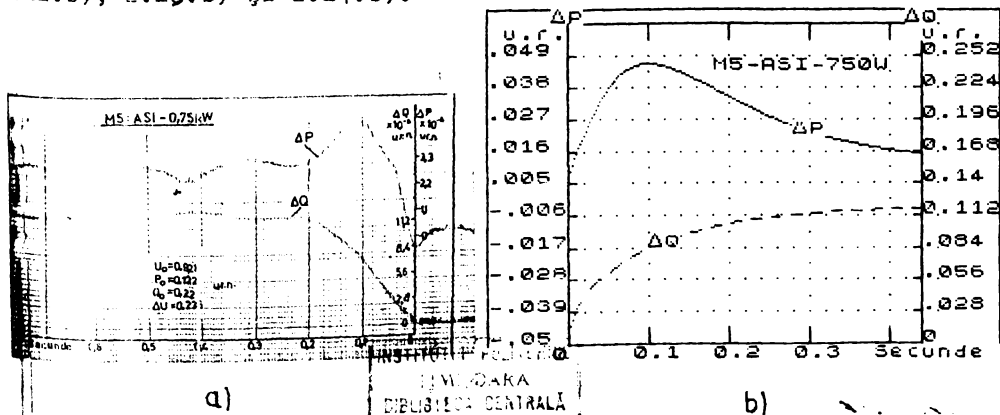


Fig.2.14. Răspunsul tranzitoriu al MI, M5, la perturbația treaptă de tensiune: a) măsurat; b) calculat.

Avînd în vedere faptul că măsurătorile de putere activă și reactivă s-au efectuat prin intermediul traductoarelor de putere tip TPT-79 și TQT-79 de fabricație IAEI Timișoara, incluse în trasa

TAIME-o2 /103/, care au constante de timp considerabile, $T_{dp} = T_{dq} = 0,114998$ s, /102/, sistemul de ecuații diferențiale (2.37) a fost completat cu ecuațiile diferențiale (2.47) ale acestora obținându-se MM al MI și elementelor de conversie conform schemei bloc din figura 2.15.

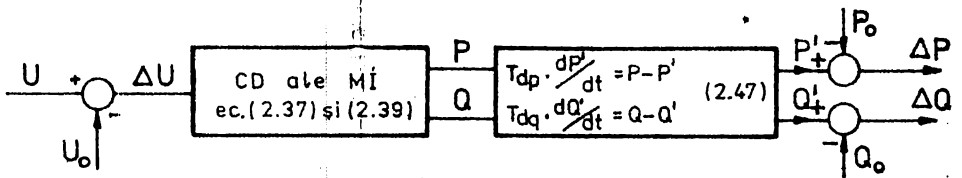


Fig.2.15.Schema bloc a MM utilizat pentru validarea CD ale MI

Rezolvarea sistemelor de ecuații diferențiale ale acestui MM s-a efectuat cu o subrutină de tip Runge-Kutta Gill de ordinul IV /30/, inclusă în programul de calcul "TRACTAS", cu care s-au obținut variațiile în timp ΔP și ΔQ ale puterii absorbite de MI în urma perturbației treaptă de tensiune în aceleași condiții ca și în cazul determinărilor experimentale. Soluționarea MM al echipamentului testat, figura 2.11, implică, în prealabil, determinarea pe baza probelelor de mers în gol și de scurtcircuit a parametrilor circuitelor echivalente ale fisicării MI. Valorile acestor parametri, determinate conform /128/, sînt prezentate în tabelul 2.5, exprimate în u.r.n. ($Z_b = 39,365 \Omega$).

Tabelul 2.5.

Valorile în u.r.n. ale parametrilor circuitelor echivalente ale MI testate

MI \ Param.	R_1	R_2	L_T	L_m	R_{Fe}	T [s]	β
M8	0,22	0,35	0,25	3,13	64	0,5	2
M4	0,215	0,34	0,3	3,1	58	2,4	0
M5	0,22	0,3	0,2	2,8	63	1,6	0

Cu programul "TRACTAS" s-au obținut răspunsurile tranzitorii ale MI reprezentate prin CD, incluzîndu-se și efectele traductoarelor de putere, figurile 2.12.b), 2.13.b), 2.14.b)) ce permit a fi comparate cu cele obținute experimental. Similitudinea comparării dinamice a MI fizice cu cea a MI reprezentate prin CD ale acestora, confirmă corectitudinea CD neliniare dezvoltate în cadrul prezentului capitol.

În vederea validării CD liniarizate ale MI, ecuațiile (2.40) și (2.41), acestea au fost implementate într-un program de calcul similar denumit "TRACS" care permite obținerea răspunsului tranzitoriu al MI reprezentate prin CD liniarizate la perturbații relativ mici (sub 10% u.r.n.).

Similitudinea răspunsurilor tranzitorii ale MI, MS, obținute cu programul "TRACS" (MI liniarizat) și celor obținute cu programul "TRACTAS 1" (MI al MI neliniar, fără ecuațiile diferențiale ale traductoarelor) pentru o perturbație

$\Delta U = -0,1$ u.r.n., figura 2.16, confirmă corectitudinea CD

liniarizate ale MI dezvoltate în cadrul prezentului capitol.

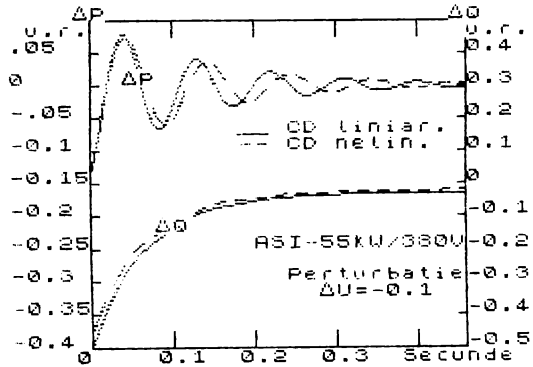


Fig.2.16. Răspunsurile tranzitorii ale MI, (perturbație treaptă ΔU), reprezentat prin CD liniarizate și CD neliniare.

Capitolul 3

CARACTERISTICILE STATICE SI DINAMICE ALE MOTORULUI SINCRON

3.1. Introducere

Mașinile electrice sincrone din cadrul CC de mari dimensiuni pot fi întâlnite atât în regim de funcționare de motor cât și de generator sau compensator sincron, avînd o pondere în consumul industrial de energie electrică apreciată la (10-12)%, /25/, /120/, /142/ sau chiar 18% /56/.

Datorită rolului activ în cadrul SEE, mașina sincronă, în regim de generator, folosită pentru producerea energiei electrice, reglajul tensiunii și frecvenței în sistem, modificarea circulației de putere activă și reactivă, se bucură de o atenție deosebită din partea proiectanților și cercetătorilor din domeniul mașinilor electrice și al sistemelor electroenergetice /53/, /61/, /69/, /73/, /80/, /82/, /85/, /86/, /90., /109/, /112/, /113/. În schimb regimul de motor al mașinii sincrone ca și componentă a CC în cadrul căreia are o pondere relativ mică, așa cum s-a precizat mai sus, este rar abordat în literatură, fiind în unele cazuri, /27/, /31/, asimilat cu motorul de inducție în vederea construirii caracteristicilor statice și dinamice ale CC.

În prezent ecuațiile de funcționare ale mașinii sincrone, indiferent de regimul de funcționare considerat, sînt dezvoltate practic în exclusivitate pe baza teoriei celor două axe, elaborată de Park și Blondel. Datorită faptului însă că această teorie a fost preluată aproape simultan de școli diferite de cercetare există în prezent un număr mare de forme de exprimare pentru aceste ecuații deși ele descriu același conținut /82/. Deosebirile esențiale care se remarcă între diferitele forme de exprimare ale ecuațiilor mașinii sincrone se referă la:

- asocierea sensurilor pozitive ale curenților și tensiunilor la bornele înfășurărilor;
- alegerea poziției relative a celor două axe de simetrie rotorice;
- asocierea sensului curentului și fluxului din înfășurări;
- alegerea mărimilor de bază;

Din aceste motive, construirea CS și CD ale mașinii sincrone în regim de motor sincron (MS) implică parcurgerea atentă a tuturor etapelor care conduc la elaborarea MM corespunzătoare, pe baza convențiilor și ipotezelor adoptate în prealabil.

În vederea obținerii unor caracteristici ale MS care să poată fi asamblate, în cadrul CC, cu caracteristicile MI și a celorlalte categorii de consumatori individuali se adoptă pentru MS aceleași convenții de semn și de reprezentare a sistemelor de coordonate ca și pentru MI precizate în §.2.2.

Ipotezele simplificatoare adoptate pentru reprezentarea MS prin CS și CD, astfel încât acestea să descrie cât mai direct și mai accesibil comportarea sa din punct de vedere energetic la modificarea mărimilor oferite de sistem la bornele sale sînt în primul rînd ipotezele general acceptate în literatură pentru mașina sincronă considerată ca și componentă a SFB /33/,/61/,/69/,/73/,/80/,/82/,/85/,/86/,/109/,/112/,/113/,/120/. Aceste ipoteze simplificatoare se referă la:

1. Aspectul constructiv al MS:

- înfășurările se presupun repartizate simetric față de axa lor de simetrie și așezate simetric una față de alta în concordanță cu cerințele impuse de construcția trifazată;

- mașina se consideră perfect simetrică față de axa centrală de rotație rotorică;

- se consideră cunoscute toate dimensiunile componentelor mecanice și izolante ale MS;

- se consideră cunoscute toate calitățile mecanice, electrice și magnetice ale materialelor componente ale mașinii.

2. Fenomenele ce afectează fluxul rezultat din întrefier:

- se neglijează efectul creștăturilor asupra fluxului din întrefier;

- tensiunile magneto-motoare ale înfășurărilor se consideră repartizate cosinusoidal în lungul pasului polar în raport cu axele de simetrie ale înfășurărilor respective.

3. Fenomenele neliniare introduse de miezul magnetic:

- se neglijează curenții turbionari determinați de t.e.m. indusă în miezul magnetic de variația fluxului;

- se neglijează fenomenul de histereză magnetică din miezul magnetic.

Totodată se mai adoptă următoarele două ipoteze simplificatoare pentru mașina sincronă în regim de motor, considerată ca și componentă la CC:

4. Pierderile mecanice prin frecare și ventilație se consideră incluse în sarcina MS.

5. Se neglijează fenomenele tranzitorii statorice (termeni Ψ_d/dt și $d\Psi_q/dt$ din ecuațiile de stare). Din punct de vedere fizic aceasta implică neglijaarea componentei continue din curenții statorici

care tind să se opună modificărilor înlănțuirilor statorice /79/, /86/, /112/. Includerea în ecuațiile de stare a acestor termeni ar impune considerarea unui interval de integrare foarte mic, de ordinul $0,001$ s, față de $(0,02 - 0,05)$ s cît se poate considera la regimurile tranziției electromecanice /27/, /31/, /52/.

c) MS se consideră fără înfășurări de amortizare. Efectul amortizant al înfășurării de excitație și al fierului masiv al rotorului se consideră în ecuația de mișcare printr-un termen corespunzător cuplului asincron /33/, /142/.

În vederea precizării convențiilor de semn adoptate și a semnificațiilor notațiilor utilizate și totodată pentru a creea baza de plecare comună elaborării în § următoare a CS și CD ale MS se prezintă în §.3.2. ecuațiile de funcționare ale mașinii sincrone deduse pentru regimul de funcționare de motor în sistemul de coordonate rotoric d, q , pentru regim permanent sinusoidal și regim tranzitoriu.

Pe baza acestor ecuații, în §.3.3. s-au dedus expresiile neliniare ale CS de putere activă și reactivă în funcție de tensiune și frecvență. Prin liniarizarea acestor CS în jurul punctului de funcționare caracteristic regimului permanent considerat, s-au obținut CS liniarizate (forma (1.3)) ale MS. Pentru aceste caracteristici s-au dedus relațiile de calcul ale parametrilor, reprezentați de ER ale puterii active și reactive în raport cu tensiunea și frecvența de la borne, în funcție de parametrii și mărimile electrice ale MS în regimul permanent considerat.

Paragraful următor, (3.4), este consacrat dezvoltării CD ale MS sub forma sistemelor de ecuații de intrare-stare-ieșire neliniare, liniarizate în jurul punctului de funcționare permanent și al funcțiilor de transfer liniare.

În vederea validării algoritmilor și programelor de calcul, elaborate pe baza MM dezvoltate în cadrul prezentului capitol, s-a considerat în toate aplicațiile același MS, tip MS-5-10, cu următoarele date din catalog /121/: $P_n = 5$ MW; $U_n = 10$ kV; $I_n = 354$ A; $\eta = 96,7\%$; $I_{gn} = 455$ A; $U_{gn} = 105,5$ V; $R_s = 0,1006 \Omega$; $X'_d = 33,57\%$; $X_d = 92,59\%$; $X_q = 58,52\%$.

Principalele contribuții originale ale autorului în cadrul prezentului capitol se referă la următoarele aspecte:

a) sistematizarea ecuațiilor de funcționare ale mașinii sincrone considerate în regim de motor adoptînd convențiile de semn și de reprezentare a sistemului de coordonate în mod unitar pentru MS și MI;

b) deducerea relațiilor de calcul pentru parametrii CS ale MS și elaborarea programului de calcul "CSMS" pentru estimarea CS ale MS;

- c) analiza influenței gradului de încărcare activă și reactivă a MS asupra valorilor parametrilor CS ale acestuia și evidențierea unor concluzii importante privind aprecierea valorilor lor;
- d) elaborarea MM al MS adecvat reprezentării acestuia prin CD neliniare pentru analiza regimurilor tranzitorii;
- e) deducerea formei liniarizate a CD ale MS și a expresiilor analitice ale elementelor matricelor coeficienți;
- f) elaborarea algoritmilor și programelor de calcul denumite "CDMS" și "CDMSL" pentru analiza regimurilor dinamice ale MS considerat prin CD neliniare respectiv liniarizate, elaborate în cadrul §.3.4.

Lista semnificațiilor principalelor notații utilizate în capitolul 3

- R - rezistența electrică a circuitului echivalent al MS;
- L_d, L_q - inductanțele sincrone de secvență directă, corespunzătoare axei d respectiv q;
- L_d^i - inductanța tranzitorie corespunzătoare axei d;
- T - constanta de timp mecanică a rotorului MS împreună cu mecanismul antrenat;
- T_{d0}^i - constanta de timp electromagnetică a circuitului rotoric deschis;
- K_m, β - parametrii caracteristicii cuplu-turație a mecanismului antrenat;
- I_d, I_q - fazorul curentului absorbit de MS și respectiv componentele sale pe axele rotorice d respectiv q;
- I_E - fazorul curentului din înfășurarea de excitație redus la nivelul mărimilor statorice;
- U_d, U_q - fazorul tensiunii la bornele MS și respectiv componentele sale pe axele rotorice d, respectiv q;
- $U_{e\beta}$ - t.e.m. complexă proporțională cu tensiunea u_E de la bornele înfășurării de excitație;
- U_{eq} - t.e.m. sincronă, proporțională cu curentul din înfășurarea de excitație;
- U_{eq}^i - t.e.m. tranzitorie, proporțională cu înălțuirea magnetică a înfășurării de excitație;
- ω - pulsația tensiunii U la bornele MS;
- ω_r - viteza unghiulară a rotorului;
- P, Q - puterile electrice, activă și reactivă, absorbite de MS;
- C_e - cuplul electromagnetic;
- C_m - cuplul mecanic rezistent;
- S - unghiul de sarcină;

- φ - unghiul de defazaj dintre tensiunea la borne și curentul statoric;
- β - unghiul de poziție al tensiunii \underline{U} față de axa de referință a unghiurilor;
- δ - unghiul de poziție al rotorului (între axa rotorică q și axa de referință a unghiurilor).

3.2. Ecuatiile de funcționare ale MS

Considerând convențiile de semn și de reprezentare a axelor d, q precizate în §.2.2. pentru MI și ipotezele simplificatoare prezentate în § precedent, în cadrul prezentului § se dezvoltă ecuațiile de funcționare ale MS în regim permanent și regim tranzitoriu. Pe baza acestor ecuații se vor elabora în § următoare GS și CD ale MS de forme similare cu cele pentru MI. Pentru generalitatea rezultatelor, se consideră MS cu poli aparenti, MS cu poli plini fiind un caz particular al acestuia.

Pornind de la ecuațiile înfășurărilor statorice și rotorice cu mărimi de fază:

$$u_d = R_d i_d + d\psi_d / dt ; \quad u_B = R_B i_B + d\psi_B / dt \quad (3.1)$$

$$\psi_d = \sum_{j=1,2,3} L_{jd} \cdot i_j + L_{dB} \cdot i_B ; \quad \psi_B = \sum_{j=1,2,3} L_{Bj} \cdot i_j + L_{BB} \cdot i_B \quad (3.2)$$

unde $j = 1, 2, 3$, celelalte notații avînd semnificațiile precizate în /33/, și aplicînd transformările Park /33/, se obțin ecuațiile de funcționare ale MS echivalent în sistemul de coordonate d, q, C :

$$u_d = R \cdot i_d - \omega \psi_q ; \quad u_q = R \cdot i_q + \omega \psi_d ; \quad u_B = R_B \cdot i_B + d\psi_B / dt \quad (3.3)$$

$$\psi_d = L_{dd} \cdot i_d + L_{dm} \cdot i_B ; \quad \psi_q = L_{qq} \cdot i_q ; \quad \psi_B = L_{dm} \cdot i_d + L_{BB} \cdot i_B \quad (3.4)$$

Pentru regimul permanent sinusoidal considerînd curentul, \underline{I} , absorbit de MS prin componentele sale fazoriale:

$$\underline{I}_d = \frac{I \sin \varphi}{I_B} \underline{I}_B \quad \text{și} \quad \underline{I}_q = j \frac{I \cos \varphi}{I_B} \underline{I}_B \quad (3.5)$$

și convențiile de semn adoptate, ecuațiile (3.3) și (3.4) pot fi scrise cu mărimi complexe astfel:

$$\underline{U} = (R + j\omega L_\sigma) \underline{I} - \underline{U}_{eB} + j\omega L_{dm} \underline{I}_d + j\omega L_{qm} \underline{I}_q \quad (3.6)$$

unde: $\underline{Z} = R + j\omega L_\sigma$ reprezintă impedanța longitudinală a înfășurării statorice.

Diagrama fazorială a MS în regim permanent, figura 3.1, construită pe baza ecuației (3.6) evidențiază posibilitatea reprezentării sale

prin două circuite electrice independente corespunzătoare axelor rotorice d și q, figura 3.2., în care s-au notat:

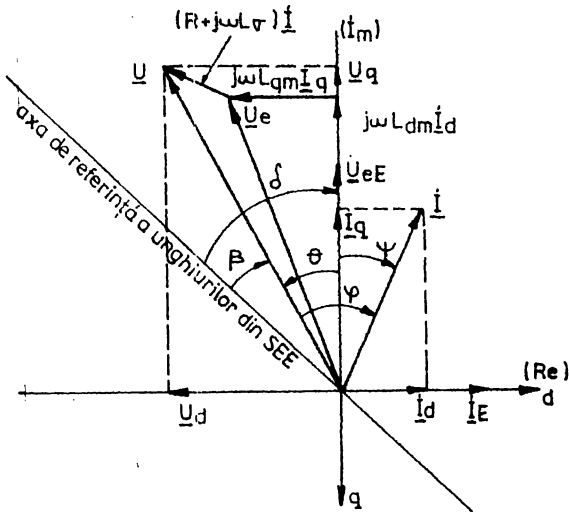


Fig.3.1. Diagrama fazorială a MS în regim permanent (subexcitat)

găinară identică cu axa "-q" rotorică, mărimile electrice complexe caracteristice regimului permanent, conform diagramei fazoriale (figura 3.1.) pot fi scrise astfel:

$$\underline{U}_d = U_d ; \underline{U}_q = jU_q ; \underline{I}_d = I_d ; \underline{I}_q = jI_q ; \underline{U}_{eE} = -jU_{eE} \quad (3.9)$$

unde:

$$U_q = U \sin \theta ; U_d = U \cos \theta ; \quad (3.10)$$

$$I_d = I \cdot \sin(\varphi + \theta) ; I_q = I \cdot \cos(\varphi + \theta)$$

Cu " θ " s-a notat unghiul de sarcină al MS. Valorile sale în cazul regimului de motor al mașinii sincrone sînt negative, așa cum rezultă și din figura 3.1.

Introducînd notațiile (3.9) în ecuațiile fazoriale (3.8), acestea devin de forma:

$$U_q - RI_q = \omega L_d \cdot I_d + U_{eE} ; U_d - RI_d = -\omega L_q I_q \quad (3.11)$$

în care toate mărimile sînt scalare.

$$L_d = L_{dm} + L_{\sigma} \quad (3.7)$$

$$L_q = L_{qm} + L_{\sigma}$$

inductanțele sincrone longitudinale respectiv transversală.

Aplicînd legile circuitului electric acestor scheme echivalente se obțin ecuațiile MS sub forma:

$$\underline{U}_q - RI_q = j\omega L_d \underline{I}_d - \underline{U}_{eE} \quad (3.8)$$

$$\underline{U}_d - RI_d = j\omega L_q \underline{I}_q$$

Considerînd axa reală a planului complex identică cu axa "d" rotorică și axa ima-

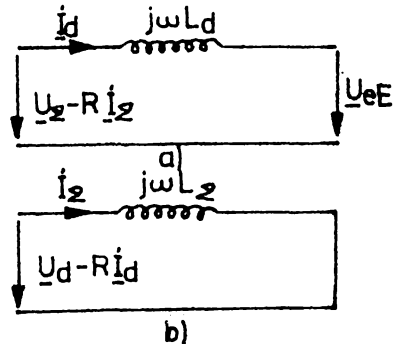


Fig.3.2. Schemele circuitelor echivalente ale MS în regim permanent: a) axa q; b) axa d.

Expresiile componentelor I_d și I_q ale curentului statoric rezultă prin rezolvarea sistemului de ecuații (3.11) astfel:

$$I_d = \frac{(U_q - U_{eB})\omega L_q + U_d \cdot R}{R^2 + \omega^2 L_d L_q} \quad ; \quad I_q = \frac{(U_q - U_{eB})R - U_d \cdot \omega L_d}{R^2 + \omega^2 L_d L_q} \quad (3.12)$$

Pornind de la relațiile $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ și $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ pentru puterea activă și respectiv reactivă, exprimate în u.r.n. și considerând componentele tensiunii la borne și ale curentului absorbit conform (3.10) rezultă expresiile puterii active și reactive absorbite de MS:

$$P = U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q \quad + \quad Q = U_q \cdot I_d - U_d \cdot I_q \quad (3.13)$$

Pentru exprimarea unghiului de sarcină θ , în funcție de parametrul electric al MS și mărimile electrice de la bornele sale U , P, Q , se explicitază componentele I_d și I_q ale curentului statoric din ecuațiile (3.13):

$$I_d = (P \cdot U_d + Q \cdot U_q) / U^2 \quad ; \quad I_q = (P \cdot U_q - Q \cdot U_d) / U^2 \quad (3.14)$$

Cu aceste expresii și cu relațiile (3.10) a doua ecuație (3.11) devine:

$$U \sin \theta = R \cdot (P \cdot \sin \theta + Q \cdot \cos \theta) / U - \omega L_q \cdot (P \cdot \cos \theta - Q \cdot \sin \theta) / U \quad (3.15)$$

din care rezultă expresia unghiului de sarcină astfel:

$$\theta = \arctg \frac{-P \cdot \omega \cdot L_q + Q \cdot R}{U^2 - P \cdot R - Q \cdot \omega L_q} \quad (3.16)$$

Pentru analiza regimurilor tranzitorii ale MS se introduce t.e.m. \underline{U}_{eq} , proporțională cu curentul de excitație (în ipoteza neglijării saturației), definită conform relației:

$$\underline{U}_{eq} = -j\omega L_{dm} \underline{I}_B \quad (3.17)$$

Această tensiune electromotoare, ca și curentul rotoric \underline{I}_B se modifică instantaneu atunci când se modifică regimul de funcționare al MS. În regim permanent t.e.m. \underline{U}_{eq} este identică cu t.e.m. \underline{U}_{eB} , a cărei valoare se consideră însă constantă pe durata regimului tranzitoriu.

Datorită prezenței circuitului electric închis reprezentat de înfășurarea de excitație pe axa rotorică "d", valoarea înălțurii magnetice ψ_B imediat după producerea perturbației se presupune identică cu cea din regimul permanent anteperturbație. Aceasta permite stabilirea legăturii între aceste două regimuri ale MS prin intermediul unei t.e.m., \underline{U}'_{eq} , proporțională cu înălțuirea magnetică a înfășurării de excitație.

Pentru stabilirea ecuațiilor de funcționare ale MS în regim tranzitoriu se explicităză curentul de excitație, i_E , din ultima ecuație (3.4) și se introduce în expresia (prima ecuație (3.4)) fluxului rezultat din axa d care devine:

$$\Psi_d = L_{dd} \cdot i_d + \frac{L_{dm}}{L_{BB}} \Psi_E - \frac{L_{dm}^2}{L_{BB}} i_d \quad (3.18)$$

Înlocuind fluxul, Ψ_d din a doua expresie (3.3) cu expresia sa (3.18) se obține pentru circuitul echivalent din axa "q", ecuația cu mărimi momentane:

$$u_q = R \cdot i_q + \omega \left(L_{dd} - \frac{L_{dm}^2}{L_{BB}} \right) i_d + \frac{\omega L_{dm}}{L_{BB}} \Psi_E \quad (3.19)$$

Folosind notațiile uzuale /33/, /86/, /113/, /142/:

$$L'_d = L_{dd} - \frac{L_{dm}^2}{L_{BB}} \text{ și } u'_{eq} = \Psi_E \cdot \omega \cdot \frac{L_{dm}}{L_{BB}} \quad (3.20)$$

Ecuația (3.19) poate fi scrisă cu mărimi complexe:

$$\underline{U}_q - R \cdot \underline{I}_q = j \omega L'_d \cdot \underline{I}_d - \underline{U}'_{eq} \quad (3.21)$$

conform diagramei fazoriale a MS în regim tranzitoriu la un anumit moment, prezentată în figura 3.3.

Deoarece în axa rotorică q a MS echivalent se consideră că nu există circuite electrice închise, ecuația tensiunii \underline{U}_d își păstrează forma (a doua ecuație (3.8)) de la regimul permanent.

Legătura dintre t.e.m. \underline{U}_{eq} și \underline{U}'_{eq} la un moment dat al regimului tranzitoriu rezultă conform diagramei fazoriale din figura 3.3.:

$$\underline{U}'_{eq} = \underline{U}_{eq} + j \omega (L_d - L'_d) \cdot \underline{I}_d \quad (3.22)$$

sau cu mărimi scalare dacă se introduc notațiile :

$$U'_{eq} = -j \cdot U_{eq} \text{ și } U'_{eq} = -j U'_{eq} \quad (3.23)$$

$$U'_{eq} = U_{eq} + \omega (L_d - L'_d) \cdot I_d \quad (3.24)$$

Variația t.e.m. U'_{eq} în timpul regimului tranzitoriu se determină prin integrarea ecuației diferențiale:

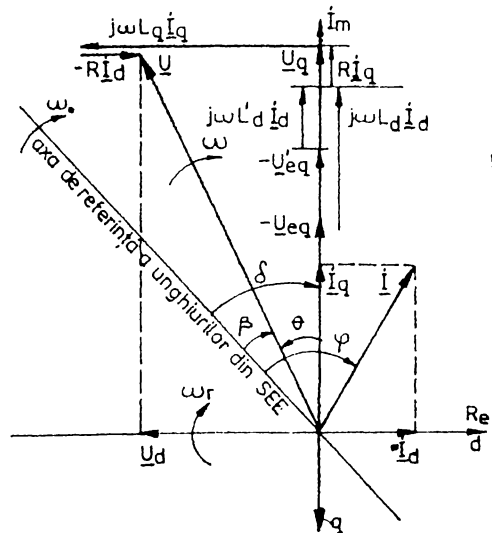


Fig.3.3. Diagrama fazorială a MS în regim tranzitoriu la un moment dat.

$$T'_{do} \frac{dU'_{eq}}{dt} = U_{eq} - U_{eR} \quad (3.25)$$

obținută pe baza celei de a doua ecuație (3.3) considerată în regim tranzitoriu /113/,/120/,/142/.

Ecuațiile MS în regim tranzitoriu se completează cu ecuațiile diferențiale de mișcare ale rotorului cuplat cu mecanismul antrenat /86/,/142/:

$$T \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = C_e - C_m - C_{as}; \quad \frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega \quad (3.26)$$

unde:

$C_{as} = k_a \cdot U^2 (\omega_r - \omega)$, reprezintă cuplul asincron, coeficientul k_a avînd expresia simplificată:/42/:

$$k_a = T'_{do} (L_d - L'_d) / (\omega L_d^2) \quad (3.27)$$

iar cuplul electromagnetic al MS, C_e , se consideră de forma /86/:

$$C_e = U_{eq} \cdot I_q \quad (3.28)$$

Pentru determinarea valorilor mărimilor electrice de stare ale MS în regimul permanent anteperturbație, considerînd cunoscute mărimile P_o, Q_o, U_o și ω_o de la bornele sale, utilizînd relațiile prezentate mai sus, se parcurg următoarele etape:

- a) cu relația (3.16) se determină unghiul de sarcină θ_o ;
- b) se determină componentele U_{do}, U_{qo}, I_{do} , și I_{qo} ale tensiunii la borne și ale curentului absorbit, cu relațiile (3.10);
- c) din ecuațiile (3.4) se evaluează t.e.m. U_{eRo} identică cu t.e.m. U_{eqo} iar cu relația (3.24) se determină t.e.m. U'_{eqo} ;
- d) din condiția de echilibru al cuplului electromagnetic și mecanic (rezistent) $C_{e0} = C_{m0}$ în care cuplul mecanic se consideră de forma: $C_m = K_m \omega_r^{\beta}$ iar C_e conform (3.28), rezultă valoarea coeficientului K_m :

$$K_m = U_{eqo} \cdot I_{qo} / \omega_r^{\beta} \quad (3.29)$$

Ecuațiile de funcționare ale mașinii sincrone, considerate în regim de motor, prezentate sau deduse în cadrul prezentului §, permit determinarea mărimilor de stare caracteristice regimului permanent de funcționare conform etapelor precizate mai sus și constituie totodată baza de plecare pentru elaborarea în § următoare a CS și CD ale MS.

3.3. Caracteristicile statice ale MS

3.3.1. Aspecte generale

MS avînd turația riguros determinată de frecvența tensiunii la bornele sale se consideră că absoarbe o putere electrică activă de la rețea ce depinde strict de caracteristica cuplu-turație a mecanismului

antrenat /25/, /142/. Considerarea rezistenței statorice a MS deter-
mină însă o anumită abatere a CS de putere activă de la dependența
strictă de frecvență.

Interesa reactivă absorbită de MS depinde de un număr mare de
factori, cum ar fi: încărcarea activă; curentul de excitație; unghiul
de sarcină; etc. și variază într-o manieră complicată dificil de ex-
primit analitic în funcție de mărimile de sistem.

În literatură, /24/, /27/, /42/, CS ale MS sînt în general pre-
zentate sub forma unor expresii analitice obținute prin introducerea
unor ipoteze simplificatoare, cum ar fi: neglijarea rezistenței stato-
rice, neglijarea nesimetriei rotorului, considerarea unghiului de sar-
cină independent de puterea reactivă, neglijarea dependenței cuplului
rezistent de frecvență, etc. Dacă abaterile CS de putere activă ast-
fel obținute față de cele reale sînt mici, așa cum se arată în § ur-
mător, în cazul CS de putere reactivă acest mod de considerare per-
mite doar o apreciere calitativă a CS, iar o reprezentare a MS sub
această formă este realistă doar pentru anumite regimuri particulare
de funcționare.

Avînd în vedere aceste aspecte în cadrul prezentului §, por-
nind de la ecuațiile de funcționare ale MS, se dezvoltă algoritme de
calcul adecvate estimării parametrilor CS ale MS, (valorile ER) ex-
primați în mărimi raportate la mărimile similare din regimul perma-
nent de referință.

3.3.2. CS de putere activă funcție de tensiune și frecvență ale MS

Considerînd cuplul mecanic (rezistent) al mecanismului antre-
nat de forma: $C_m = K_m \cdot \omega_r^\beta$, ca și în cazul acționărilor cu MI, unde
constanta K_m se determină din condiția de echilibru a puterilor elec-
tromagnetice și mecanice în regim permanent:

$$K_m = P_o / \omega_o^{\beta+1} \quad (3.30)$$

rezultă expresia CS de putere activă exprimată în u.r., în cazul ne-
glijării rezistenței statorice:

$$P = P_o \cdot \omega^{\beta+1} \quad (3.31)$$

formă usuală de reprezentare a CS în literatură /24/, /27/, /142/.

Ipoteza neglijării pierderilor statorice poate fi acceptată în
cazul MS cu puteri mari și medii, însă în cazul MS mici, neglijarea
lor conduce la abateri considerabile a parametrilor CS obținuți față
de cei reali.

Considerarea pierderilor de putere activă în înfășurarea statorică implică scrierea puterii absorbite de MS sub forma:

$$P = P_0 \cdot \omega^{\beta+1} + R \frac{P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \varphi} \quad (3.32)$$

Valorile ER, $\partial P / \partial U$, ale puterii active în raport cu tensiunea pentru $U = U_0$ și $\omega = \omega_0$, (figura 3.4) se obțin prin explicitarea puterii, P, din relația (3.32) și derivarea sa în raport cu tensiunea.

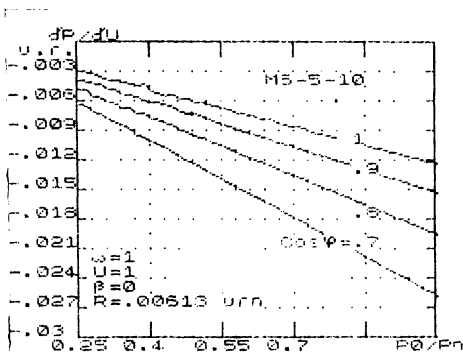


Fig. 3.4. Valorile ER ale puterii active în raport cu tensiunea în funcție de încărcarea (P/P_0) și factorul de putere $\cos \varphi$ al MS.

Considerarea rezistenței statorice R determină valori negative pentru ER, apropiate însă de valoarea zero ca urmare a valorii relative mici a rezistenței statorice față de ceilalți parametri ai MS.

Funcționarea MS cu factori de putere apropiați de unitate determină o reducere a sensibilității puterii absorbite față de tensiunea la borne, așa cum rezultă și din figura 3.4.

Regimurile uzuale de funcționare ale MS cu factori de putere ($\cos \varphi$) apropiați de unitate justifică utilizarea unor expresii de forma (3.31) în cazul MS mari și medii în special în regimurile de slabă încărcare.

Pentru regimurile de încărcare apropiate de încărcarea nominală în special pentru MS mici și medii se impune însă considerarea CS de forma (3.32).

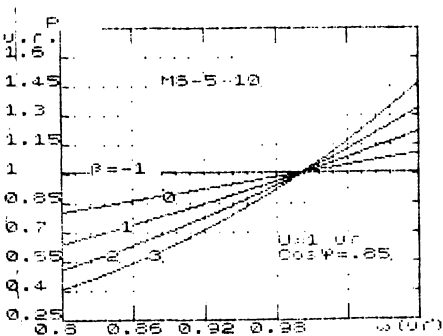


Fig. 3.5. CS de putere activă în funcție de frecvență ale MS.

ER al puterii active în raport cu frecvența (pulsăția) tensiunii la borne rezultă din relația (3.31) identice cu $\beta+1$. În cazul considerării și a

pierderilor în înfășurarea statorică, variația puterii active absorbite de MS în funcție de pulsăția tensiunii, ω , figura 3.5, se obține prin explicitarea expresiei puterii active din relația (3.32).

Valorile acestor parametri ai CS în raport cu frecvența, obținute similar cu cele în raport cu tensiunea, sînt practic neinfluențate de valoarea rezistenței statorice ceea ce permite reprezentarea

corectă a MS prin CS de frecvență de forma (3.32), figura 3.5., în care valoarea exponentului β al caracteristicii cuplu-turației a mecanismului antrenat este determinantă.

3.3.3. CS de putere reactivă funcție de tensiune și frecvență ale MS

În vederea elaborării CS de putere reactivă ale MS se exprimă puterea reactivă absorbită în funcție de mărimile de stare caracteristice regimului de funcționare considerat, U_{eB} și θ .

Astfel pornind de la expresiile (3.13) ale puterii active și reactive absorbite de MS, în care se introduc componentele tensiunii prin expresiile lor (3.10), iar componentele curentului prin expresiile (3.12) rezultă puterile absorbite de MS de forma:

$$P = U \left\{ \frac{U[(L_d + L_q)\omega/2 \cdot \sin(2\theta) - R] - U_{eB}(\omega L_q \sin \theta - R \cos \theta)}{\omega^2 L_d L_q - R^2} \right\} \quad (3.33)$$

și

$$Q = \frac{U}{\omega} \left\{ U(\cos^2 \theta / L_d - \sin^2 \theta / L_q) - U_{eB} \left[\cos \theta / L_d + \frac{R \cdot \sin \theta}{\omega L_d L_q} \right] \right\} \quad (3.34)$$

Expresia (3.34) reprezintă practic CS de putere reactivă funcție de tensiune a MS sub formă implicită datorită prezenței în expresia sa a unghiului de sarcină, θ , care este de asemenea funcție de mărimile de sistem. T.e.m. U_{eB} se consideră constantă și egală cu valoarea sa din regimul permanent de referință:

$$U_{eB0} = \frac{\cos^2 \theta_0 / L_d - \sin^2 \theta_0 / L_q - Q_0}{\cos \theta_0 / L_d + R \cdot \sin \theta_0 / (L_d L_q)} \quad (3.35)$$

Explicitarea puterii reactive, Q , absorbită de MS, din relația (3.34) implică explicitarea în prealabil a unghiului de sarcină θ , din condiția de echilibru a cuplurilor electromagnetice și mecanice ($C_e = C_m$). Aceasta conduce la expresii ale unghiului θ și deci și ale puterii reactive, Q , extrem de laborioase, practic inutilizabile.

În consecință, CS^{de} putere reactivă, (3.34), poate fi inclusă în calculele de sistem numai prin secvențe iterative. Astfel în cadrul fiecărui pas de calcul al circulației de puteri sau a stabilității SRF se impune includerea unui proces iterativ de calcul pentru ajustarea valorii unghiului de sarcină, θ , conform secvenței din figura 3.6.

O astfel de tratare a MS este recomandabilă doar în cazul uni-
tăților de putere comparabilă cu a generatoarelor sincrone considerate în SRF, deoarece mărește excesiv durata procesului iterativ de calcul.

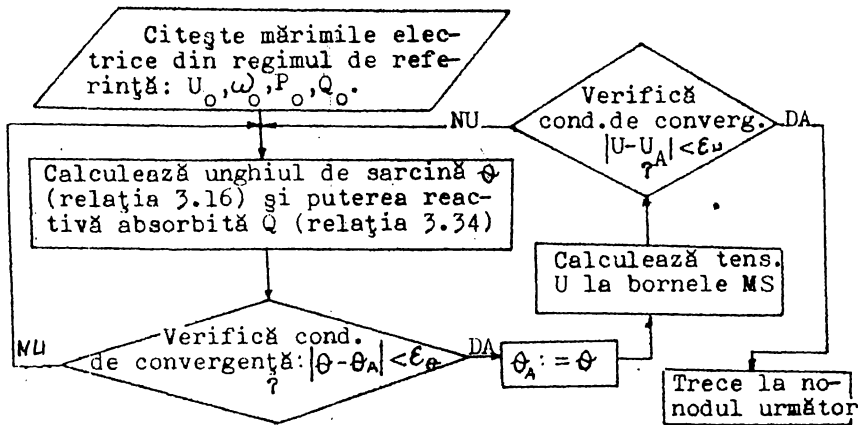


Fig.3.6: Algoritm de implementare al CS $Q=f(U)$ a MS într-un pas de iterație al calculului circulației de puteri în SBF

Metoda practică este ca și în cazul MI, reprezentarea MS prin CS liniarizate în jurul punctului de funcționare de referință ai căror parametri sînt ER, $\partial Q/\partial U$ și $\partial Q/\partial \omega$, exprimați în unități raportate la mărimile corespunzătoare din regimul de referință: P_0, Q_0, U_0 și ω_0 .

În vederea estimării acestor parametri ai CS se determină valorile inițiale ale tensiunii U_{eE0} și ale unghiului de sarcină θ_0 cu relațiile (3.35) și respectiv (3.16) considerînd cunoscut regimul de referință prin $P_0, Q_0, U_0 = \omega_0 = 1$ (în u.r.) și caracteristica puterii mecanice a mecanismului antrenat de forma (3.31).

Valorile ER ale puterii se obțin prin derivarea expresiei (3.34) a puterii reactive în raport cu tensiunea și frecvența și evaluarea acestor derivate în punctul de funcționare considerat. În urma derivării și a rearanjării expresiilor obținute, ER ale puterii reactive în raport cu tensiunea și frecvența au rezultat de forma:

$$\begin{aligned} \partial Q/\partial U = & 2(\cos^2 \theta_0/L_d - \sin^2 \theta_0/L_q) - \frac{L_d+L_q}{L_d L_q} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial U} \sin 2\theta_0 - \\ & - \frac{U_{eE0}}{L_d} \left[\frac{\cos \theta_0}{L_d} + \frac{R \cdot \sin \theta_0}{L_q} \right] \cdot \left[1 - \frac{\partial \theta}{\partial U} \right] \quad (3.36) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial Q/\partial \omega = & \left[\frac{U_{eE0} \sin \theta_0}{L_d} - \frac{R \cdot \cos \theta_0}{L_q} - \frac{L_d+L_q}{L_d L_q} \sin 2\theta_0 \right] \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \omega} - \\ & - \left[\frac{\cos^2 \theta_0}{L_d} - \frac{\sin^2 \theta_0}{L_q} - \frac{U_{eE0}}{L_d} \left(\cos \theta_0 + \frac{2R \cdot \sin \theta_0}{L_q} \right) \right] \quad (3.37) \end{aligned}$$

unde derivatele parțiale $\partial\theta/\partial U$ și $\partial\theta/\partial\omega$ exprimate în u.r. se evaluează în punctul de funcționare considerat prin $U_0 = \omega_0 = 1$ cu relațiile:

$$\partial\theta/\partial U = \frac{-2(P_0 L_q + Q_0 R)}{(1 - P_0 R + Q_0 L_q)^2 + (P_0 L_q + Q_0 R)^2} \quad (3.38)$$

și

$$\partial\theta/\partial\omega = \frac{(\beta + 1) \cdot P_0 L_q + Q_0 (L_q^2 + R^2)}{(1 - P_0 R + Q_0 L_q)^2 + (P_0 L_q + Q_0 R)^2} \quad (3.39)$$

Observație: În relațiile (3.36) - (3.39), pentru simplificarea scrierii, tensiunea U_0 și pulsația sa, ω_0 , s-au înlocuit cu valorile lor exprimate în u.r. ($U_0 = \omega_0 = 1$).

Implementate în programul de calcul denumit convențional "CSMS", relațiile (3.35) - (3.39), deduse mai sus, permit determinarea parametrilor CS ale MS considerând cunoscute datele de catalog și regimul de încărcare activă și reactivă a mașinii.

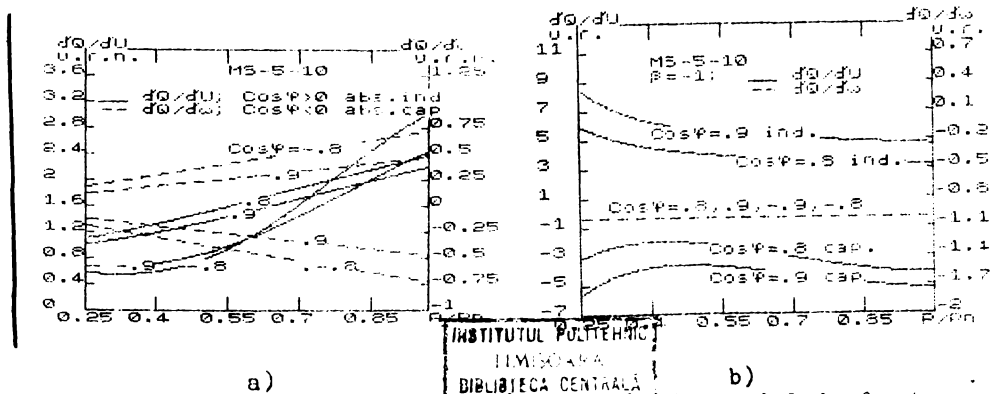


Fig. 3.7. Valorile ER ale MS-5-10 în funcție de gradul de încărcare activă și de factorul de putere: a) exprimate în u.r.n. b) exprimate în unități raportate la mărimea corespunzătoare din regimul de referință.

Analiza parametrilor CS de putere reactivă în funcție de tensiune și frecvență, figura 3.7, evidențiază câteva aspecte specifice acestui tip de consumator:

Referitor la parametrii CS de putere reactivă funcție de tensiune se constată următoarele aspecte:

a) valorile ER exprimate atât în u.r.n., figura 3.7.a), cât și în unități raportate la mărimea corespunzătoare din regimul permanent, figura 3.7.b), prezintă o dispersie destul de mare în funcție de regimul de încărcare activă și reactivă al mașinii;

b) pentru valori ale tensiunii la borne în jurul valorii ten-

siunii nominale, valorile ER sînt pozitive, MS avînd un efect reglat cu atît mai puternic cu cît gradul de încîrcare reactivă este mai mare;

c) dispersia valorilor ER ale caracteristicii $Q(U)$ nu permite stabilirea unor valori medii, general utilizabile pentru MS. Aceste valori trebuie determinate în funcție de regimul de încîrcare activă și reactivă al mașinii.

Analiza valorilor ER ale puterii reactive în funcție de frecvență, figura 3.7, evidențiază un aspect deosebit de util în practica reprezentării MS prin CS și anume faptul că valorile acestor parametri exprimați în u.r., figura 3.7,b), sînt practic independenți de regimul de încîrcare al MS. În schimb forma caracteristicii cuplu-turație a mecanismului antrenat afectează sensibil valorile lor. Astfel, valorile ER, $\partial Q/\partial \omega$, exprimate în u.r., determinate cu același program "CSMS", pentru mai multe tipuri de caracteristici cuplu-turație au evidențiat o dependență practic liniară de valorile exponentului β al acestora.

3.4. Caracteristicile dinamice ale mașinii sincrone

3.4.1. Aspecte generale

În vederea obținerii unor CD ale MS similare cu cele obținute în capitolul precedent pentru MI, pentru a permite asamblarea CD ale unor CC ce conțin ambele categorii de mașini electrice, în cadrul prezentului § se deduc MM intrare-stare-ieșire pentru MS considerînd convențiile de semn adoptate în cazul MI. În acest scop pornind de la ecuațiile de funcționare ale MS prezentate în §.3.2. se prezintă principalele etape care au condus la elaborarea CD ale MS în care s-au considerat ca mărimi de intrare tensiunea U la bornele MS și pulsația sa, ω . Toate relațiile care vor fi prezentate în continuare conțin mărimi exprimate în u.r. Pentru tensiunea de la borne și pulsația sa s-au admis ca mărimi de bază valorile respective din regimul permanent de referință.

Avînd în vedere faptul că principalele mașini sincrone care intervin în structura CC sînt MS cu puteri nominale de ordinul sutelor de kilowatt, pentru antrenarea compresoarelor /100/, MS lipsite de înfășurări de amortizare /121/ a căror rezistență statorică, R , are valori apreciabile în raport cu reactanțele înfășurărilor, în cadrul prezentului § se elaborează CD pentru această categorie de MS. Celelalte MS de puteri mari, comparabile cu ale generatoarelor considerate în SEB, se vor reprezenta distinct prin aceleași MM ca și generatoarele

În cadrul prezentului § se dezvoltă CD ale MS sub forma MM neliniare și liniarizate în jurul punctului de funcționare staționar în care se consideră ca mărimi de intrare, mărimile oferite de sistem la bornele MS, tensiunea U și pulsația sa ω (respectiv ΔU și $\Delta \omega$), ca mărimi de ieșire, puterile activă P și reactivă Q , absorbite de MS (respectiv ΔP și ΔQ), iar ca mărimi de stare, t.e.m. U'_{eq} , viteza unghiulară rotorică, ω_r și unghiul de sarcină θ .

3.4.2. CD ale MS sub forma ecuațiilor intrare-stare-ieșire neliniare

În vederea elaborării CD ale MS pornind de la ecuațiile de funcționare ale acestuia, prezentate în §.3.2., se impune exprimarea tuturor mărimilor care intervin în ecuațiile de stare (3.25), (3.26) și ecuațiile de ieșire (3.13) în funcție de mărimile de intrare U , ω și de mărimile de stare, U'_{eq} , ω_r și θ . În acest scop se parcurg următoarele etape:

a) se exprimă componentele I_d și I_q ale curentului statoric în regim tranzitoriu în funcție de mărimile de intrare și de stare prin rezolvarea sistemului format din ecuațiile (3.21) și a doua ecuație (3.8) scrise cu mărimi scalare pe baza relațiilor (3.9) și (3.23):

$$I_d = \frac{U \cdot \cos \theta - U'_{eq}}{\omega L'_d} - \frac{U \cdot \sin \theta \cdot R}{\omega^2 L'_d L_q} ; \quad (3.40)$$

$$I_q = \frac{U \cdot \sin \theta}{\omega L_q} - \frac{(U \cdot \cos \theta - U'_{eq})R}{\omega^2 L'_d L_q}$$

unde s-a neglijat termenul R^2 în raport cu $\omega^2 L'_d L_q$

b) înlocuind în relația (3.24) curentul I_d cu expresia sa (3.40) rezultă expresia t.e.m. U'_{eq} astfel:

$$U'_{eq} = U'_{eq} \frac{L_q}{L'_d} - U \left[\cos \theta - \frac{R \cdot \sin \theta}{\omega L_q} \right] \cdot \frac{L_q - L'_d}{L'_d} \quad (3.41)$$

c) se exprimă cuplul electromagnetic din relația (3.28), prin înlocuirea t.e.m. U'_{eq} și a curentului I_q cu expresiile (3.41) respectiv (3.40).

Înlocuind expresiile mărimilor obținute mai sus în ecuațiile (3.25) și (3.26), rezultă sistemul de ecuații diferențiale de stare ale CD ale MS de forma:

$$\left\{ \begin{aligned}
 T_{do} \frac{dU'_{eq}}{dt} &= U_{eR} - U'_{eq} \frac{L'_d}{L_d} + U \left[\cos \theta - \frac{R \sin \theta}{\omega L_q} \right] \cdot \frac{L_q - L'_d}{L'_d} \\
 T \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{U'_{eq} U}{\omega L'_d} \cdot \left(1 + \frac{b L'_d}{L_q} \right) \cdot \left(\sin \theta - \frac{R \cdot \cos \theta}{\omega L'_d} \right) - \frac{b U^2}{\omega L_q} \cdot \\
 &\cdot \left[\frac{\sin 2\theta}{2} \left[1 + \frac{R}{\omega L'_d} \right] - \frac{R}{\omega} \left[\frac{\sin^2 \theta}{L_q} + \frac{\cos^2 \theta}{L'_d} \right] \right] + \quad (3.42) \\
 &+ \frac{U'_{eq}{}^2 \cdot R}{\omega^2 L'_d{}^2} - K_m \omega_r^\beta - K_a \cdot U^2 (\omega_r - \omega) \\
 \frac{d\delta}{dt} &= \omega_r - \omega
 \end{aligned} \right.$$

unde s-a introdus notația: $b = \frac{L_d - L'_d}{L'_d}$

Sistemul de ecuații de ieșire al CD ale MS rezultă prin înlocuirea componentelor tensiunii conform primelor două relații (3.10) și curentului statoric dat de relațiile (3.40) în expresiile de forma (3.13) ale puterilor activă și reactivă absorbite în regim tranzitoriu:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{U^2}{\omega} \left[\left(1/L_q + 1/L'_d \right) \frac{\sin 2\theta}{2} - \frac{R}{\omega L'_d L_q} \right] - \frac{U \cdot U'_{eq}}{L'_d} \left[\sin \theta - \frac{R \cdot \cos \theta}{\omega L_q} \right] \\
 Q &= \frac{U^2}{\omega} \left[\frac{\cos^2 \theta}{L'_d} - \frac{\sin^2 \theta}{L_q} \right] - \frac{U \cdot U'_{eq}}{\omega L'_d} \left[\cos \theta + \frac{R \cdot \sin \theta}{\omega L_q} \right]
 \end{aligned} \quad (3.43)$$

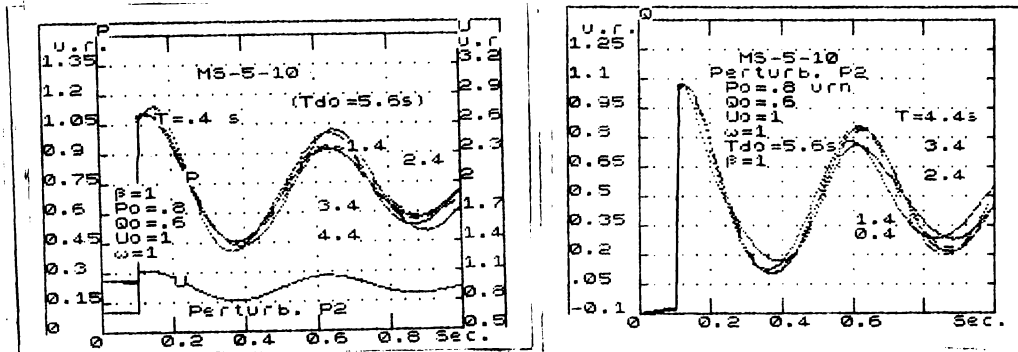
Sistemele de ecuații diferențiale și algebrice (3.42) și (3.43) reprezintă CD ale MS ce permit determinarea puterii active și reactive absorbite de MS la modificarea dinamică a mărimilor (U, ω) oferite de SEB la bornele mașinii.

Pentru rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale (3.42), s-a utilizat o metodă de integrare tip Runge-Kutta de ordinul IV /30/ implementată într-o subrutină de calcul denumită "SRKG" scrisă în limbaj BASIC.

CD prezentate mai sus permit analiza regimurilor dinamice și tranzitorii ale MS, datele inițiale care sînt necesare pentru analiza acestor regimuri fiind parametrii $L_d, L_q, L'_d, R, T_{do}$ ai MS, caracteristica cuplu-turație a mecanismului antrenat prin exponentul său β , constantă de timp mecanică T , a rotorului MS împreună cu mecanismul antrenat.

În vederea validării acestor CD ale MS, în cadrul prezentului s-a fost elaborat un program de calcul denumit convențional "CDMS"

unde prin rezolvarea sistemelor de ecuații (3.42), (cu subrutina "SRKG") și (3.43) se obține răspunsul tranzitoriu în timp al MS la modificarea dinamică a mărimilor de sistem. Astfel în figura 3.8. sînt prezentate aceste răspunsuri, prin variația puterii active, (figura 3.8.a)), și a puterii reactive (figura 3.8.b)) la o perturbație de tensiune tip P2, reprezentată în figura 3.8.a), pentru diverse valori ale constantei de timp mecanice T.



a)

b)

Fig.3.8. Regimul tranzitoriu al MS-5-10 la perturbație de tensiune tip P2. pentru diverse valori ale constantei de timp mecanice: a) variația puterii active absorbite și a tensiunii la borne; b) variația puterii reactive absorbite.

CD neliniare elaborate în cadrul prezentului § constituie totodată baza de plecare pentru dezvoltarea celorlalte două forme de CD pentru MS și anume: sisteme de ecuații intrare-stare-ieșire liniarizate în jurul punctului de funcționare din regim permanent; și funcții de transfer liniare în domeniul operațional, forme care vor fi abordate în paragraful următor.

3.4.3. CD ale MS liniarizate în jurul punctului caracteristic regimului permanent de funcționare

Punctul de funcționare corespunzător regimului permanent, este caracterizat de mărimile de sistem U_0 , ω_0 cunoscute (în general egale cu unitatea dacă sînt exprimate în u.r.), mărimile de ieșire, P_0 , Q_0 , considerate de asemenea cunoscute și mărimile de stare U'_{e0} , ω_{r0} și θ_0 . Această ultimă categorie de mărimi se determină în funcția de mărimile de intrare și de ieșire și parametrii MS parcurgînd etapele precizate în §.3.2.

În vederea elaborării CD liniarizate ale MS, forma (1.4) se liniarizează ecuațiile (3.42) și (3.43) în jurul punctului de funcționare

permanent, rezultând următoarea formă pentru ecuațiile diferențiale de stare:

$$\begin{bmatrix} T'_{do} \frac{d \Delta U'_{eq}}{dt} \\ T \frac{d \Delta \omega_r}{dt} \\ \frac{d \Delta \theta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U'_{eq} \\ \Delta \omega_r \\ \Delta \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

unde elementele matricelor [A] și [B] au expresiile analitice prezentate în anexa A.3.1., în funcție de parametrii electrici ai MS și mărimile electrice caracteristice regimului permanent de referință.

Ecuațiile de ieșire ale CD liniarizate obținute prin linia izarea ecuațiilor (3.43) sînt de forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & C_{13} \\ C_{21} & 0 & C_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U'_{eq} \\ \Delta \omega_r \\ \Delta \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

unde elementele matricelor [C] și [D] au expresiile analitice prezentate de asemenea în anexa A.3.1.

CD liniarizate ale MS elaborate în cadrul prezentului § au fost implementate în programul de calcul denumit convențional "CDMSL" care permite analiza regimurilor dinamice ale MS reprezentate prin astfel de caracteristici la diverse perturbații ale mărimilor de sistem, ΔU și $\Delta \omega$.

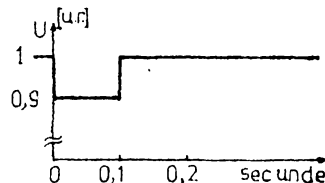


Fig.3.9. Perturbația de tensiune considerată

În vederea validării acestor CD liniarizate (3.44) și (3.45) se compară răspunsurile tranzitorii ale MS-5-10 la o perturbație

de tensiune, figura 3.9, de valoare $\Delta U = 0,1$ u.r., considerînd MS reprezentat prin CD neliniare, MM (3.42), (3.43) și prin CD liniarizate MM (3.44), (3.45), figura 3.10.

Pe baza testelor similare efectuate cu diverse valori ale amplitudinii perturbației se poate afirma că pentru abateri ale mărimilor de sistem în valoare absolută mai mică decît 10% reprezentarea MS prin CD liniarizate este acceptabilă.

Reprezentarea MS prin CD sub forma funcțiilor de transfer liniare, formă utilă în asamblarea funcțiilor de transfer operaționale ale SBE conform abordărilor, din /87/, /109/, /112/, se realizează pe baza CD liniarizate (3.44), (3.45) prin aplicarea transformării (1.5).

În acest scop se evaluează elementele matricelor coeficienți, [A], [B], [C], și [D], în punctul de funcționare corespunzător regimului permanent considerat, conform relațiilor (A.3.1.1) - (A.3.1.4)* din anexa A.3.1.

Funcțiile de transfer liniare care se obțin pentru MS pe baza MM (3.44) și (3.45) după evaluarea elementelor matricelor coeficienți sînt de forma:

$$\Delta C = \frac{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0} \Delta m \quad (3.46)$$

unde:

$$\Delta C \equiv \begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{Bmatrix}; \quad \Delta m \equiv \begin{Bmatrix} \Delta U \\ \Delta \omega \end{Bmatrix};$$

iar p este operatorul Laplace.

Valorile coeficienților a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 și b_2 se estimează iterativ prin aplicarea algoritmului Leverier-Fadeev /35/, algoritmul implementat în subrutina "LF". O descriere mai detaliată a structurii acestei subrutine s-a efectuat în subparagraful 6.2.3.3. unde a fost utilizată practic pentru estimarea funcțiilor de transfer ale CC.

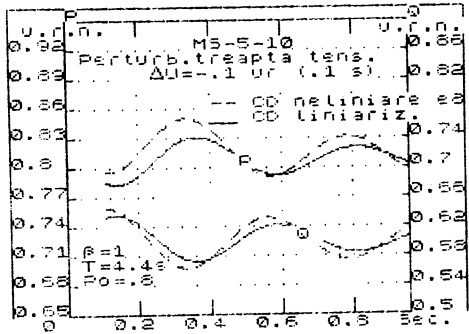


Fig.3.10. Răspunsurile tranzitorii ale MS reprezentat prin CD neliniare și CD liniarizate la o perturbație treaptă de tensiune.

Capitolul 4

CARACTERISTICILE CONSUMATORILOR STATICI

4.1. Introducere

În categoria de consumatori statici se consideră acei consumatori de energie electrică care nu au piese în mișcare și prezintă următoarele caracteristici comune din punct de vedere al comportării față de variația mărimilor electrice oferite de sistem la bornele lor:

- a) puterea absorbită este practic independentă de variația frecvenței tensiunii la borne;
- b) în regimurile dinamice intervin doar constantele de timp electromagnetice, de valori foarte reduse, astfel încât variațiile tensiunii la borne sînt urmărite practic instantaneu de mărimile caracteristice consumatorului, ceea ce permite reprezentarea acestora prin CS și în regimurile dinamice.

În consecință, caracteristicile care prezintă interes pentru acest tip de consumatori sînt CS funcție de tensiune exprimate fie sub formă neliniară fie liniarizate în jurul punctului de funcționare caracteristic regimului permanent.

Principalele categorii de consumatori statici din componența CC considerați în literatură /13/, /24/, /25/, /40/, /52/, /65/, /67/, /84/, /120/, /123/, /131/, /142/ sînt: consumatorii de iluminat, cuptoarele termice rezistive și consumatorii de curent continuu denumiți și redresoare.

Forma uzuală de reprezentare a consumatorilor statici este de impedanță (rezistență) constantă /8/, /26/, /142/. Analize mai detaliate și determinări experimentale /3/, /56/, /67/, /84/ au evidențiat însă în multe situații abateri considerabile de la acest mod de reprezentare. În consecință, în cadrul prezentului capitol s-a urmărit dezvoltarea unor relații de calcul adecvate pentru determinarea formei și parametrilor CS ale acestor consumatori pe baza caracteristicilor lor funcționale și o sinteză a valorilor parametrilor CS prezentate în literatură. Relațiile deduse și sinteza valorilor parametrilor CS, permit reprezentarea acestui tip de consumatori prin modelul unitar (1.3) de CS, facilitînd astfel asamblarea CS ale CC. Valorile ER, ca principali parametri ai CS liniarizate, s-au exprimat în mărimi raportate la mărimile corespunzătoare din regimul permanent de referință.

Principalele contribuții ale autorului în cadrul prezentului capitol se referă la următoarele aspecte:

- a) analiza formelor de reprezentare ale consumatorilor de tip static prin caracteristici de putere și crearea unei baze de date

privind parametrii acestora pe baza unei sinteze bibliografice;

b) deducerea analitică a relațiilor de calcul pentru parametrii CS (BR), ale consumatorilor de tip rezistiv (cuptoare termice) și evaluarea lor pentru câteva aliaje uzuale în construcția acestor consumatori;

c) explicitarea expresiilor CS ale redresoarelor de putere și sinteza valorilor parametrilor acestora pe baza informațiilor accesibile din literatură.

4.2. Consumatorii de iluminat

Consumul de energie electrică pentru iluminat, apreciat la cea 25% din consumul total urban /142/, se realizează în principal cu două categorii de consumatori de iluminat: a) lămpi cu incandescență și b) lămpi cu descărcare în gaze. Datorită caracteristicilor constructive și funcționale diferite, CS ale acestor consumatori se vor determina separat pentru fiecare categorie.

4.2.1. Lămpi cu incandescență

Acest tip de consumator absoarbe exclusiv putere activă, dependentă numai de tensiunea la bornele sale /56/, /123/, /142/, /148/ și deci singurele CS de interes sînt puterea activă funcție de tensiune.

Inregistrările oscilografice efectuate în cadrul unor teste experimentale /56/ au evidențiat o îndepărtare apreciabilă a puterii active absorbite de lampa cu incandescență față de legea de variație pătratică, corespunzătoare reprezentării prin rezistență constantă (figura 4.1). Puterea absorbită după conectare este variabilă în timp ca urmare a creșterii cu temperatura a rezistenței filamentului lămpii, conform expresiei:

$$P(t) = P_n \cdot \left[\frac{U}{U_n} \right]^{\gamma(t)} \quad (4.1)$$

unde exponentul $\gamma(t)$ este funcție de timp modificîndu-și valoarea în câteva zecimi de secundă de la 2 la (1,55 - 1,6).

După atingerea temperaturii staționare, valoarea exponentului rămîne constantă, ceea ce permite exprimarea CS de putere activă a lămpii în u.r. sub forma unei funcții putere:

$$P = U(1,55 - 1,6) \quad (4.2)$$

sau sub formă liniarizată în jurul punctului de funcționare permanent, caracterizat de tensiunea U_0 și puterea absorbită P_0 :

$$\Delta P = (1,55 - 1,6) \Delta U \quad (4.3)$$

La modificarea tensiunii de alimentare în regim cvasistaționar, se modifică temperatura de regim a filamentului, în consecință și rezistența sa, determinând o variație a puterii absorbite de forma (4.2), figura 4.1./142/.

Expresia (4.2) pentru CS a lămpii cu incandescență este adoptată în exclusivitate în literatură, admitând pentru exponentul γ valoarea 1,6 /8/, /13/, /21/, /24/, /56/, /120/, /142/, /148/, sau valoarea 1,55 /123/.

În regimurile tranzitorii, datorită constantei de timp termice a filamentului lămpii mult mai mare decât durata regimului tranzitoriu, rezistența filamentului poate fi considerată constantă și deci se poate accepta pentru iluminatul incandescent și în regimurile dinamice ale SBB CS, exprimate în u.r., de forma $P = U^2$ (rezistența constantă).

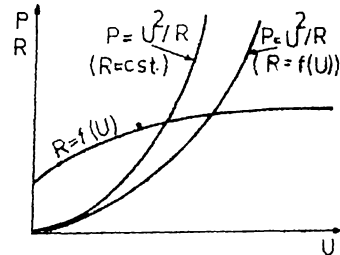


Fig.4.1. CS de putere activă a lămpii cu incandescență

4.2.2. Lămpi cu descărcare în gaze

Lămpile cu descărcare în gaze utilizate practic pentru iluminat sînt tuburile fluorescente și lămpile cu vapori de mercur.

CS de putere funcție de tensiune și frecvență pentru această categorie de consumatori sînt determinate în exclusivitate prin teste de laborator, datorită accesibilității acestor teste și, pe de altă parte, datorită dificultăților de modelizare matematică a acestui tip de consumatori.

Determinările experimentale pentru CS de putere activă în funcție de tensiune, raportate în /56/ și /65/ au evidențiat CS liniare, figurile 4.2. și 4.3., ce permit scrierea acestora sub forma:

$$P = P_0 \frac{U - U_1}{U_0 - U_1} ; \quad (4.4)$$

unde U_1 este valoarea tensiunii corespunzătoare intersecției CS cu axa absciselor (tensiunilor), /56/.

Pentru tensiuni de alimentare mai mici decât o valoare critică, apreciată în /20/ și /56/ la $(0,6 - 0,7)U_n$, pentru tuburi fluorescente și $(0,75 - 0,85)U_n$, pentru lămpi cu vapori de Hg, arcul electric se stinge, (în cea o,1 s), iar curentul prin lampă se reduce la zero /56/.

CS de putere reactivă funcție de tensiune, determinate experimental în /56/ indică de asemenea o variație liniară, propunându-se și

pentru aceasta o expresie de forma (4.3). Determinările experimentale raportate însă în /65/ evidențiază o variație exponențială pentru CS de putere reactivă funcție de tensiune, figura 4.3, care dacă se liniarizează în jurul punctului nominal de funcționare se apropie sensibil de forma prezentată în /56/ și /20/. Expresia propusă în acest caz pentru CS, $Q(U)$, este:

$$Q = K_1 \cdot e^{K_2 U} \quad (4.5)$$

unde coeficienții K_1 și K_2 , determinați pentru câteva dimensiuni de tuburi fluorescente, au valori foarte dispersate:

CS de putere activă și reactivă funcție de frecvență, mai rar tratate în literatură, datorită dificultăților

de testare, prezintă ER negative cu valori extrem de dispersate, așa

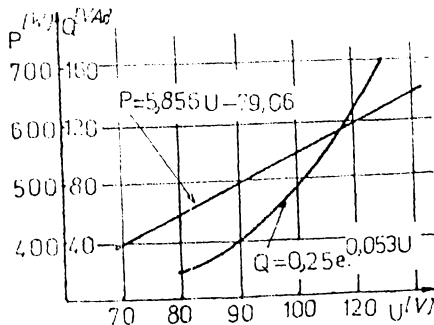


Fig. 4.3. CS funcție de tensiune ale unor tuburi fluorescente determinate experimental.

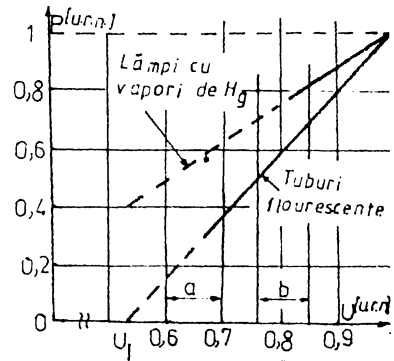


Fig. 4.2. CS de putere a lămpilor cu descărcare în gaze (a și b domenii în care s-au înregistrat stingerea arcului).

cum rezultă și din tabelul 4.1, unde sînt indicate valorile ER ale puterii active și reactive raportate la mărimile respective din punctul de funcționare permanent considerat.

Dispersia relativ mare a valorilor ER este datorată pe de o parte diferențelor constructive ale lămpilor și pe de altă parte sensibilității CS față de temperatura de funcționare, gradul de îmbătrînire al tubului, tipul balastului, etc., /21/. De asemenea compensarea puterii reactive cu condensatoare statice proprii corpurilor de iluminat fluorescent, determină o dis-

persie apreciabilă a valorilor ER ale puterii reactive exprimate în u.r. conform analizei prezentate în capitolul următor. Acest aspect impune fie reprezentarea separată a lămpilor și a condensatoarelor de compensare, fie admiterea ca mărime de bază pentru raportarea puterii reactive absorbite de lămpi împreună cu condensatoarele proprii a puterii active sau a celei aparente conform propunerilor din /65/.

Tabelul 4.1.

Valorile efectelor de reglaj ale CS ale lămpilor cu descărcare în gaze raportate în literatură

Sursa bibliografică	Țeet de reglaj Anul	$\partial P/\partial U$	$\partial Q/\partial U$	$\partial P/\partial \omega$	$\partial Q/\partial \omega$
/13/	1968	0,7	2	-	-
/56/	1972	0,88	1	-	-
/148/	1973	-	-	-	-
/8/	1973	1,2	3	-1	-2,8
/142/	1977	-	-	-0,5	-0,8
/65/	1981	1	2,775	-	-
/123/	1982	0,96	7,38	-1	-26,6
/21/	1982	0,7	2,0	-	-

4.3. Consumatorii termici rezistivi

În categoria consumatorilor termici rezistivi sînt incluse cuptoarele și reșourile cu rezistoare executate în general din aliaje pe bază de nichel (kanthal, nichelină) sau de siliciu (carbura de siliciu, bisiliciura de molibden)/20/.

Deoarece constantele de timp termice ale acestor consumatori sînt mult mai mari decît cele ale fenomenelor tranzitorii din sistem, reprezentarea lor prin CS de putere funcție de tensiune, atît în regimurile permanente cît și în cele tranzitorii ale SBE, este unanim acceptată /8/, /21/, /24/, /84/, /120/, /142/, /148/. Din acest motiv consumatorii termici rezistivi sînt reprezentați prin rezistență constantă în mai multe lucrări: /24/, /142/, /148/.

Avîndu-se însă în vedere variația rezistenței cu modificarea temperaturii, considerarea acestor consumatori prin rezistență constantă este aproximativă, fiind corectă numai pentru cuptoarele ale căror rezistori sînt confecționați din materiale cu coeficienți de variație a rezistivității cu temperatura, foarte mici. În caz contrar modificarea puterii în raport cu tensiunea prezintă abateri apreciable de la legea de variație pătratică (cazul grafitului și $MoSi_2$) /84/.

O reprezentare riguroasă a CS ale consumatorilor termici rezistivi trebuie să considere variația rezistenței electrice a materialului conductor datorită modificării temperaturii de regim ca urmare a variației tensiunii de alimentare. În acest scop, se vor deduce în continuare relații de calcul pentru ER al puterii active în funcție de tensiune considerînd variația rezistivității materialului conductor cu temperatura.

Se consideră ecuația diferențială a supratemperaturii $\zeta = \theta - \theta_0$ a materialului conductor care formează rezistorul cuptorului de forma /20/:

$$T_t \cdot \frac{d\zeta}{dt} + \zeta = P/A ; \quad (4.6)$$

unde T_t - este constanta de timp termică a cuptorului, iar A este o constantă de legătură între supratemperatura din regim staționar ζ_s și puterea activă absorbită în acest regim: $A = P/\zeta_s$.

Pentru abateri mici ale puterii absorbite în jurul valorii P_0 din regim staționar, ecuația (4.6) se poate scrie sub forma:

$$T_t \cdot \frac{d}{dt} \Delta\theta + \Delta\theta = \frac{\zeta_s}{P_0} \cdot \Delta P. \quad (4.7)$$

Pe de altă parte, admitînd coeficientul α de variație al rezistivității rezistorului cu temperatura constant, puterea consumată la temperatura θ a materialului conductor este:

$$P = U^2/R_0(1 + \alpha \cdot \theta) \quad (4.8)$$

care linearizată în jurul punctului de funcționare staționar P_0, U_0, θ_s devine:

$$\Delta P = \frac{2P_0}{U_0} \Delta U - \frac{\alpha \cdot P_0}{1 + \alpha \theta_0} \Delta \theta \quad (4.9)$$

În regim termic staționar, din (4.7) rezultă creșterea de temperatură: $\Delta\theta = \zeta_s/P_0 \cdot \Delta P$ (4.10) care introdusă în relația (4.9) se obține relația dintre creșterea puterii absorbite și cea a tensiunii la borne:

$$\Delta P = \frac{2P_0}{U_0} \Delta U - \frac{\alpha \cdot \zeta_s}{1 + \alpha \theta_s} \Delta P \quad (4.11)$$

de unde rezultă expresia ER al consumatorului termic rezistiv exprimat în u.r.:

$$\Delta P/\Delta U = \frac{2P_0}{U_0} \cdot \frac{1 + \alpha \theta_s}{1 + 2\alpha \theta_s - \alpha \theta_0} \quad (4.12)$$

Neglijînd θ_0 în raport cu $2\theta_s$, expresia ER exprimat în u.r. (prin raportare la P_0/U_0) este:

$$\partial P/\partial U = 2 \frac{1 + \alpha \theta_s}{1 + 2\alpha \theta_s} \quad (4.13)$$

Valorile ER exprimate în u.r. pentru cîteva materiale uzuale în construcția consumatorilor termici rezistivi în țara noastră /20/ determinate cu relația (4.13) sînt prezentate în tabelul 4.2.

Așa cum rezultă din tabelul 4.2., valorile ER ale puterii active în funcție de tensiune, raportate la mărimile corespunzătoare regimului nominal de funcționare, au valori apropiate de doi, pentru

Tabelul 4.2.
Valorile ER ale unor materiale folosite pentru construcția cuptoarelor termice rezistive

Materialul rezistorului	Temperatura de lucru /°C/	$\rho \cdot 10^{-6}$ / $\Omega \cdot m$ /	α [$^{\circ}C^{-1}$]	Efect de reglaj
Cr20Ni80	1050	1,15	0	2
Cr15Ni60Fe25	900	1,23	$1,25 \cdot 10^{-10}$	2
Carborund (SiC)	1350		$1,67 \cdot 10^{-6}$	1,995
Disiliciură de molibden (MoSi ₂)	1000	1,85	$2,63 \cdot 10^{-3}$	0,879
Grafit	300		(-0,3 - -0,9) 10^{-3}	2,2 - 3,1

aliaje pe bază de nichel și pentru carborund. Reprezentarea rezistoarelor confecționate din aceste aliaje prin CS de tipul rezistență constantă este corectă. În schimb CS ale rezistoarelor confecționate din disiliciură de molibden sau din grafit prezintă abateri substanțiale de la legea pătratică, caracteristică consumatorilor de tip rezistență constantă. Se impune considerarea acestor tipuri de consumatori termici prin CS de forma generală (1.3) ai căror parametrii sînt precizați în tabelul 4.2.

4.4. Redresoare* (Consumatori de curent continuu)

Redresoarele de puteri nominale mari și reglaj electronic sofisticat au devenit în ultimul timp consumatori frecvenți în SBE /17/. Ponderea lor în medie de (5 - 7)% din consumul total de energie electrică /115/, /120/, /142/, devine mult mai mare în golurile de sarcină datorită regimului de funcționare practic constant al acestora.

Dintre principalii consumatori alimentați prin intermediul redresoarelor au fost considerate cuptoarele pentru topirea aluminiului, uzinele pentru producerea clorului, instalațiile de galvanizare și cromare, instalațiile de încărcare a bateriilor de acumulatori.

4.4.1. Modelul de bază pentru redresoarele de putere /3/

Redresoarele de mare putere constau în general dintr-un număr de punți conectate în serie și/sau paralel, fiecare punte furnizînd ten uni defazate una față de cealaltă. Cu o astfel de configurație

* Termenul de redresoare pentru consumatorii de curent continuu de putere a fost acceptat în conformitate cu referirile din literatură /3/, /25/, /56/, /142/.

se poate obține un mare număr de pulsuri, rezultând distorsiuni minime în tensiunea continuă de la borne, chiar și în absența filtrajului. Redresoarele pot fi deci modelizate printr-o singură punte echivalentă alimentată cu o tensiune sinusoidală la borne, fără reprezentarea filtrelor pasive (figura 4.4.).

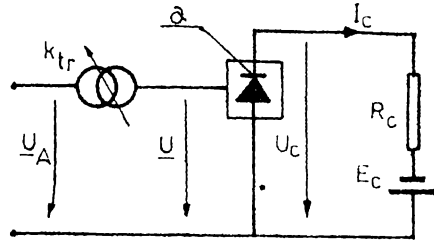


Fig.4.4. Schema echivalentă considerată pentru redresoarele de putere.

Ca posibilități de reglaj se consideră, fie schimbarea plotului prizei transformatorului de alimentare (deci a raportului de transformare, K_{tr}), sau a reactanței bobinei de reglaj saturabile, pentru redresoare cu diode, fie modificarea unghiului de întârziere, α , pentru cele cu tiristoare. Poate aceste metode de reglaj, deși diferite, pot fi modelizate printr-un singur redresor comandat, impunând limite adecvate pentru unghiul de întârziere, α , (figura 4.4.).

4.4.2. CS de putere activă și reactivă funcție de tensiune ale redresoarelor

Presupunând tensiunea U_0 la bornele redresorului și puterile P_0 și Q_0 absorbite în regimul permanent de referință ca mărimi cunoscute, se urmărește determinarea expresiilor puterilor P, Q raportate la P_0 și Q_0 în funcție de tensiunea U de la borne raportată la U_0 . CS ale redresorului se vor considera față de bornele sale, după transformatorul de alimentare, acesta incluzându-se în RB.

Considerând tensiunea continuă U_c de la bornele consumatorului de curent continuu (figura 4.4) de forma $U_c = KU$, unde K este o constantă ce depinde de tipul redresorului unghiul de întârziere α , /17/ /56/, CS pentru redresorul fără reglaj de curent rezultă:

$$P/P_0 = \frac{KU}{KU_0} \cdot \frac{KU - E_C}{KU_0 - E_C} \quad (4.14)$$

sau introducând mărimile raportate (u.r.):

$$P_r = U_r \cdot \frac{U_r - E_r}{1 - E_r} \quad (4.14')$$

unde: $E_r = E_C / (K \cdot U_0) \in (0,25 - 0,75)$, /56/ iar semnificația celorlalte mărimi este precizată în figura 4.4.

CS de putere reactivă funcție de tensiune exprimată în u.r. prezintă aceleași ER ca și CS de putere activă, deoarece neglijând puterea deformantă și reactanța de comutație, puterea reactivă absorbită de redresor: $Q = P \cdot \text{tg } \alpha$, /17/, pentru α constant, prezintă aceeași CS funcție

de tensiune ca și puterea activă exprimată în u.r. ($Q_0 = P_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha$).

În cazul prezenței reglajului de curent, puterea activă absorbită este constantă, deci efectul său de reglaj este nul, ($\partial P / \partial U = 0$), iar puterea reactivă absorbită rezultă în acest caz de forma: /3/:

$$Q_r = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot \frac{U_r^2}{\cos^2 \alpha} - 1 ; \quad (4.15)$$

unde unghiul de comandă α este definit conform relației:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{KU_0}{U_{co}} \sqrt{1 - \left(\frac{U_{co}}{KU_0}\right)^2} \quad (4.16)$$

ER al puterii reactive în raport cu tensiunea, exprimat în u.r., rezultă:

$$\partial Q_r / \partial U_r = U_r / (\sin \alpha \sqrt{U_r^2 - \cos^2 \alpha}) \quad (4.17)$$

În consecință, determinarea valorilor parametrilor CS ale redresoarelor implică cunoașterea mărimilor sale electrice caracteristice în regimul de funcționare permanent considerat ($E_{co}, U_{co}, \alpha, K$). În cazurile în care nu se dispune de suficiente date pentru determinarea exactă a parametrilor CS ale redresoarelor cu relațiile prezentate mai sus, se vor considera valorile lor raportate în literatură. În acest sens, în tabelul 4.3. sînt prezentate valorile ER pentru redresoare fără reglaj de curent publicate în literatură:

Tabelul 4.3.

Valori date în literatură pentru efectele de reglaj ale redresoarelor

Sursa bibliografică	/8/	/21/	/21/	/56/	/67/	/113/
Efect de reglaj $\partial P / \partial U$	1,8	2 - 4	2,4	2,2	2,5	1,2
$\partial Q / \partial U$	2,2	5 - 8	1,6	2	2,7	0
Observații		Electrochimie	Uzine de aluminiu			

Comportarea dinamică a redresoarelor în cazul variațiilor rapide ale tensiunii la borne este influențată în mod deosebit de constantele de timp mecanice ale consumatorilor de curent continuu pe care îl alimentează. În cazul redresoarelor din industria electrochimică, principalii consumatori din această categorie din țara noastră, constantele de timp ale sarcinii avînd valori reduse, cîteva zecimi de secundă /56/, se consideră adecvată reprezentarea acestora și în regimurile tranzitorii prin CS liniare /3/, /56/ sau prin impedanță constantă /26/.

Capitolul 5

CARACTERISTICILE STATICE ALE CONSUMATORILOR COMPLEXI

5.1. Introducere

CS ale CC se obțin practic fie prin identificare analitică pe baza asamblării CS ale CCP, considerate cunoscute, /8/, /21/, /40/, /104/, /121/, fie prin identificare experimentală și estimarea parametrilor pe baza datelor obținute prin experimente active, /39/, /59/, /64/, /89/, sau pasive /110/, /129/ efectuate asupra CC considerați.

În cadrul prezentului capitol se abordează problemele specifice identificării și estimării CS ale CC atât pe cale analitică, (§.5.3), cât și experimentală, (§.5.4), analizându-se stadiul și metodele actuale privind identificarea CC și propunându-se metode și algoritme adecvate determinării CS ale CC în special celor de tip industrial. În vederea efectuării determinărilor experimentale a fost conceput și realizat un echipament de măsură și înregistrare adecvat identificării CS și CD ale CC, echipament utilizat în cadrul testelor experimentale efectuate în stația de transformare 110/10 kV "Dumbrăvița", 103/, a căror rezultate sînt prezentate în capitolul 7.

Deoarece atât identificarea analitică cât și cea experimentală a CC, datorită particularităților acestora, implică estimarea apriorică a formei de reprezentare a CS, în § următor se prezintă o analiză critică a formelor de exprimare a CS în literatură și o sinteză a valorilor parametrilor acestora, în vederea creării unei baze de date corespunzătoare și a validării rezultatelor obținute în părțile aplicative ale lucrării.

Avîndu-se în vedere influența semnificativă a compensării puterii reactive cu baterii de condensatoare statice și a prezenței RBD asupra valorilor parametrilor CS ale CC exprimate sub forma (1.3), în cadrul prezentului capitol s-au dezvoltat relațiile de calcul și s-au construit diagrame corespunzătoare ce permit o analiză cantitativă și calitativă a acestor influențe asupra valorilor parametrilor CS. Concluziile astfel rezultate împreună cu cele obținute în capitolul 2, privind CS ale MI au permis elaborarea unei proceduri de asamblare a CS ale CC denumite "decuplate" avînd la bază decuplarea CS de putere activă de cele de putere reactivă ale MI componente.

Concluziile, metodele, programele de calcul și echipamentul de măsură și înregistrare pentru determinarea CS ale CC dezvoltate în cadrul prezentului capitol urmează a fi validate în cadrul părții aplicative prezentate în capitolul 7.

Principalele contribuții ale autorului în cadrul acestui capitol se referă la:

1. analiza critică pe baza sintezei bibliografice a formulelor de reprezentare a CC prin CS și a parametrilor acestora;

2. stabilirea relațiilor de calcul și analiza influenței compensării puterii reactive cu baterii de condensatoare statice asupra valorilor parametrilor CS ale CC;

3. elaborarea algoritmilor și programelor de calcul denumite "CSR" și "CSB" pentru asamblarea CS ale CC cu RED radiale și respectiv cu RED complex buclate;

4. elaborarea unei metode de asamblare a CS ale CC bazată pe "decuplarea" CS de putere activă de cele de putere reactivă cu considerarea influenței RED;

5. analiza influenței parametrilor electrici ai RED asupra valorilor ER și elaborarea unor diagrame ce permit aprecierea influenței lor asupra parametrilor CS;

6. conceperea și realizarea unui echipament adecvat înregistrării mărimilor electrice în cadrul testelor experimentale active pentru determinarea CS ale CC;

7. elaborarea algoritmului și programului de calcul denumit "FREDEX" pentru prelucrarea rezultatelor măsurătorilor experimentale în vederea obținerii parametrilor CS ale CC bazat pe MCMMP ponderate.

5.2. Analiza stadiului actual al reprezentării CC prin CS

5.2.1. Aspecte generale

Formele de exprimare ale CS ale CC prezentate în literatură sînt extrem de diversificate ca urmare a diferitelor moduri de obținere a acestora, a diversității parametrilor prin care se definesc și a sistemelor de unități de măsură utilizate. Astfel, în funcție de modul de obținere, se disting CS obținute prin asamblarea CS ale CCP /8/, /23/, /131/ sau prin estimare pe baza prelucrărilor statistice a determinărilor experimentale /65/, /77/, /89/. Ca unități de măsură pentru putere, tensiune și frecvență se utilizează fie unitățile absolute /31/, /39/, /65/, /93/, /148/, fie unitățile relative în care mărimile de bază sînt mărimile nominale sau cele din regimul de funcționare de referință P_0, Q_0, U_0, f_0 , /8/, /21/, /87/, /91/, /110/, /123/, /131/. În funcție de natura parametrilor prin care se definesc CS ale CC se disting expresii în care parametrii sînt:

- ponderile consumului de tip impedanță, curent și putere con-

stantă în consumul total al CC /67/,/87/,/123/,/131/;

- ER în punctul de funcționare de referință /8/,/39/,/67/,/91/,/109/,/111/,/120/;

- coeficienți fără semnificație fizică estimați cu MCMMP din CS determinate experimental /31/,/65/,/77/,/89/,/93/.

Avînd în vedere aceste aspecte, în cadrul prezentului §, pe baza unei sinteze bibliografice se efectuează o analiză a principalelor forme de reprezentare a CS în literatură și se sintetizează valorile parametrilor acestora. Referitor la valorile parametrilor, s-a dezvoltat relații de calcul adecvate analizei influenței asupra acestora a compensării puterii reactive cu baterii de condensatoare statice.

5.2.2. Formele de reprezentare ale CS ale CC

Principalele forme de exprimare ale CS ale CC prezentate în literatură sînt sintetizate în tabelul 5.1. Referitor la expresiile CS redade în acest tabel se fac următoarele precizări:

a) parametrii p_u, q_u, p_f, q_f ai CS sînt reprezentați de ER ale puterii active și reactive în raport cu tensiunea și frecvența exprimate în u.r. Semnificațiile celorlalte notații care au intervenit în relații sînt precizate în ultima coloană a tabelului;

b) ca mărimi de bază pentru sistemul "per unit" s-au considerat mărimile caracteristice din regimul de referință F_0, Q_0, U_0, f_0 ;

c) valorile parametrilor CS considerate sînt prezentate fie sub forma plajei de valori ale acestora, fie prin exprimarea CS cu coeficienți numerici.

Analizînd ansamblul de forme de exprimare ale CS ale CC considerate în literatură, pe lîngă comentariile efectuate în coloana patra a tabelului 5.1, se pot remarca următoarele aspecte generale:

1. toate formele de exprimare ale CS redau corect comportarea, CC la variații reduse (10%) ale mărimilor de sistem (tensiune și frecvență) în jurul valorilor U_0, f_0 din regimul de referință;

2. expresiile neliniare ale CS prezintă valori ale parametrilor extrem de dispersate. Acest aspect se constată chiar și în cazul aceluiași tip de consumator considerat însă în regimuri de funcționare diferite /65/,/89/,/93/,/148/.

În concluzie, se poate afirma că reprezentarea CC prin caracteristici linearizate în jurul punctului de funcționare de referință nu este inferioară reprezentării prin expresii neliniare. Din acest motiv un mare număr de lucrări /8/,/39/,/91/,/120/,/142/ acceptă această formă de reprezentare.

Formule de calculare ale CS ale CC în literatură

Surse bibliografice	Expresiile caracteristicilor statice	Comentarii
/8/	de putere activă $\Delta P = P_u \cdot \Delta U + P_r \cdot \Delta f$	de putere reactivă $\Delta Q = q_u \cdot \Delta U + q_r \cdot \Delta f$
/8/	$P_r = U_r \cdot P_f$	$Q_r = U_r \cdot q_f$
/31/	$P = K_p \cdot U_a$ $a = 0,5; 1; 2$	$Q = K_q \cdot U_b$ $b = 1 - 6$
/39/	$P = P_0(1 + p_u \cdot \Delta U)$ $P_u = (1,1 - 1,5)$	$Q = 0,5P_0 [1 + q_u \cdot \Delta U + q_{uu} \cdot \Delta U^2 + (q_{0-0}, 5P_0) \cdot (1 + 2\Delta U + \Delta U^2)]$ $q_u = 3,3 - 5,2; q_{uu} = 17 - 50$
/65/	$P = K_1 + K_2 U$ $P / \text{MVA} = 11,25 + 8,5 \cdot U / \text{kV}$	$Q = K_3 + K_4 U$ $Q / \text{Mvar} = -200,64 + 12,2 \cdot U / \text{kV}$
/66/	$P_r = U_r \cdot P_u$; $P_u = (0 - 2)$ $P_r = A + (1-A)U_r^2$	$Q_r = U_r \cdot q_u$; $q_u = (0 - 2)$ $Q_r = B + (1-B)U_r^2$
/77/	$P_r = K_1 + K_2 U_r + K_3 U_r^2$	$Q_r = K_4 + K_5 U_r + K_6 U_r^2$

Tabele (continuare)

I			Z
/84/	$P = G(U, \omega) U^2$ $\frac{\partial P}{\partial U} = (2 + \frac{\partial G}{\partial U}) U$	$Q = B(U, \omega) U^2$ $\frac{\partial Q}{\partial U} = (2 + \frac{\partial B}{\partial U}) U$	<p>Permite considerarea saturației prin scrierea adecvată a funcției $B(U, \omega)$. Consumatorul poate fi inclus în matri- cea de admitanță nodală a sistemului.</p>
/87/	$P_r = (aU^2 + bU + c)$ $(1 + g \cdot \Delta \omega)$	$Q_r = (dU^2 + eU + q)$ $(1 + h \cdot \Delta \omega)$	<p>Modelează sarcina ca o sumă de compo- nente de tip impedanță, curent și pu- tere constantă cu ponderile a, b și respectiv c pentru puterea activă.</p>
/91/	$P_r = 1 - P_u + P_u U_r$	$Q_r = 1 - q_u + q_u U_r$	<p>S, n - derivatele puterii active res- pectiv reactive în raport cu frecvența.</p>
/93/	$P = K_1 U^{\delta_1} + K_2 U + K_3 P$ $P_r = U_r^{p_u}$	$Q = K_1 U^{\delta_1} + K_2 U + K_3 Q$ $Q_r = U_r^{q_u}$	<p>Expresii corecte în jurul punctului de funcționare de referință. Nu consi- deră caracteristicile de frecvență.</p>
/110/	$P_u = 0,2 - \text{cons. indus- trial}$ $P_u = 1,9 - \text{cons. casnic}$ $P_u = 1,6 - \text{construcții}$ $P_r = (1 + p_{\omega} \cdot \Delta \omega) \cdot$ $(p_p + p_c \cdot U_r^1 + p_z \cdot U_r^2)$ $P_r = (1 + o, 04 \Delta \omega)$ $(0,2 + o, 3 U_r + o, 5 U_r^2)$	$Q = K_0 + U^{n_q}$ $n_q = (0,2 - 2)$ $Q_r = (1 + q_{\omega} \cdot \Delta \omega) \cdot$ $(q_p + q_c \cdot U_r^2 + q_z \cdot U_r^2)$ $Q_r = (0,2 + o, 3 U_r + o, 5 U_r^2)$	<p>Coefficientii δ_1 și K se estimează statistic cu M și K.</p> <p>Valorile lui q_u sînt extrem de disper- sate datorită compensării puterii re- active (Qo-variazabil). A doua expresie introduce constanta K_0-egală cu pute- rea aparentă, iar semnificația lui n_q este vag definită însă cu valori mai restrînse.</p>
/111/	$P_r = (1 + p_{\omega} \cdot \Delta \omega) \cdot$ $(p_p + p_c \cdot U_r^1 + p_z \cdot U_r^2)$ $P_r = (1 + o, 04 \Delta \omega)$ $(0,2 + o, 3 U_r + o, 5 U_r^2)$	$Q_r = (1 + q_{\omega} \cdot \Delta \omega) \cdot$ $(q_p + q_c \cdot U_r^2 + q_z \cdot U_r^2)$ $Q_r = (0,2 + o, 3 U_r + o, 5 U_r^2)$	<p>P_p, q_p - ponderile consumului de tip putere constantă; P_c, q_c - ponderile consumului în care puterea variază cu puterile N_1 și N_2 ale tensiunii; P_z, q_z - ponderile consumului de tip im- pedanță constantă. Valorile numerice indicate sînt înde- părțate de valorile măsurate în /39/ /54/, /56/, /89/.</p>

Tabelul 3.1.1. (continuare)

/120/	/121/	/122/	/123/
$P_r = K_1 U_r^2$; $P_r = \text{const.}$ $F_r = n + m U_r$ $F_r = 0,5 + 0,5 U_r$	$Q_r = K_2 U_r^2$; $Q_r = \text{const.}$ $Q_r = K_1 + K_2 U_r^2 + (K_3 / U_r^2)$ $Q_r = 0,51 + 1,29 U_r^2 = 0,32 / U_r^2$ $Q_r \geq Q_{\text{min}r} = 0,7 - 0,8$	$Q_r = U_r^2, 29 (1 - 8,89 \Delta \omega)_r$ $Q_r = (\sum_{i=1}^k a_i \cdot U_r^{n_i}) (1 + p_0 \Delta \omega)$ $Q_r = U_r^2, 29 (1 - 8,89 \Delta \omega)_r$	Reprezentări simplificare ale consumatorilor. Consideră separat termenii de putere reactivă aferenți reactanțelor longitudinale (de dispersie) și reactanțelor de magnetizare, fără considerarea însă a saturației. k-este teoretic numărul de CCP din CC. Valorile parametrilor sînt estimați prin asamblarea CS ale CC. Efectele de reglaj rezultă de forma: $P_u = \sum a_i n_i$ și $q_u = \sum b_i m_i$. Număr mare de parametri . P_{sr}, Q_{sr} - puterea activă respectiv reactivă de tip impedanță constantă, inclusiv pierderile; P_{mr} - puterea activă constantă; Q_{satr} - puterea reactivă consumată în reactanțele saturabile; Q_{mr} - puterea pierdută pe reactanțele de dispersie ale ML.
/123/	$P_r = P_{sr} U_r^2 + P_{mr}$	$Q_r = Q_{sr} U_r^2 + Q_{satr} U_r^2 + Q_{mr} U_r^{-2}$	Forma polinomială nu poate fi acceptată pentru tensiuni mici (cînd $P, Q \rightarrow 0$).
/131/	$P_r = K_p U_r + K_p 2 U_r^2$ $P_r' = U_r^{p_u}$ $P_u = 0 - 3$	$Q_r = K_q + K_{q1} U_r + K_{q2} U_r^2$ $Q_r = U_r^{q_u}$ $q_u = 0 - 6$	Forma polinomială nu poate fi acceptată pentru tensiuni mici (cînd $P, Q \rightarrow 0$).

Dispersia mare a valorilor parametrilor CS neliniare este justificată de faptul că nu au o semnificație fizică, valorile lor depind de forma analitică a caracteristicii considerate, fiind determinate de condiții de minimizare a abaterii CS măsurate față de cele estimate.

În consecință, se adoptă pentru CS ale CC forma (1.3) liniarizată în jurul punctului staționar de funcționare de referință în care parametrii principali sînt reprezentați de ER exprimate în u.r., formă adoptată și pentru consumatorii individuali prezentați în capitolele anterioare.

Expresiile (1.3) adoptate pentru CS ale CC prezintă următoarele avantaje:

1. includ atât variația tensiunii cît și a frecvenței în expresiile puterilor absorbite;
2. numărul de parametri este minim, valorile lor au în general o dispersie redusă (o analiză a acestor valori se va efectua în §. (5.2.3. și 5.2.4);
3. exprimînd mărimile electrice în unități raportate (cî mărimile în regimul de referință, parametrii CS au un grad de generalitate mai mare, ceea ce permite utilizarea sau compararea cu valori date în literatură (tabelul 5.2) pentru consumatori similari;
4. permit aplicarea principiului superpoziției pentru estimarea parametrilor CS ale CC constituiți dintr-un număr finit de CCP pentru care se cunosc CS și ponderile în consumul total;
5. oferă posibilități de implementare facilă în programele de calcul pentru circulațiile de puteri bazate pe metode iterative (Gauss - Seidel, Newton - Raphson, etc).

Dintre dezavantajele utilizării acestor forme de reprezentare a CS se menționează:

1. reprezintă corect comportarea CC numai pentru domenii reduse de variație ale mărimilor de sistem (cca 10%);
2. utilizarea ca mărime de raportare a puterii reactive absorbite, din regimul de referință, conduce la valori extrem de mari și dispersate ale parametrilor q_u și q_f în cazul consumatorilor puternic compensați.

Pentru evitarea acestui din urmă dezavantaj, unii autori, [21], [10], recomandă utilizarea altor mărimi de raportare (puterea activă sau cea aparentă) pentru puterea reactivă. Avîndu-se în vedere însă avantajele raportării puterii reactive la puterea din regimul de referință, se consideră utilă păstrarea sa, iar în §. 5.2.3. se analizează detaliat pe baza unor relații dezvoltate de către autor, influența gradului

de compensare asupra valorilor ER , q_u și q_f ale puterii reactive în funcție de tensiune și frecvență, ceea ce permite estimarea acestor parametri pe baza gradului de compensare și al parametrilor CC necompensați.

5.2.3. Influența compensării puterii reactive asupra parametrilor CC de putere reactivă

Determinările experimentale ale valorilor ER ale puterii reactive în raport cu tensiunea ale CC, /59/, /60/, au evidențiat o sensibilitate extrem de mare a acestora la compensarea puterii reactive cu baterii de condensatoare statice.

În vederea analizei influenței compensării puterii reactive asupra valorilor ER ale puterii reactive în raport cu tensiunea și frecvența se dezvoltă în continuare expresiile acestora pentru CC în prezența compensării puterii reactive. În acest scop s-a definit gradul de compensare, g , ca raportul dintre puterea reactivă debitată de bateria de condensatoare și puterea absorbită de consumator fără compensare în regim de funcționare de referință conform relației:

$$g = U_0^2 \cdot \omega_0 \cdot C / (K \cdot U_0^n \cdot \omega_0^m) ; \quad (5.1)$$

unde C și K sînt constante determinate din regimul de referință, iar n și m sînt ER ale puterii reactive raportate la puterea din regimul de referință în funcție de tensiune și respectiv de frecvență ale consumatorului necompensat.

Expresiile puterilor reactive absorbite de CC în absența compensării, Q_{fc} , și în prezența compensării, Q_c , cu notațiile de mai sus rezultă:

$$Q_{fc} = K \cdot U^n \cdot \omega^m ; \quad Q_c = K \cdot U^n \cdot \omega^m - U^2 \cdot \omega \cdot C \quad (5.2)$$

Expresia ER a puterii reactive în raport cu tensiunea

Considerînd pulsația tensiunii constantă ($\omega = \omega_0 = 1$ u.r.), ultima expresie (5.2) se scrie astfel:

$$Q_c = K_f \cdot U^n - U^2 / X_c \quad (5.3) \quad \text{unde: } K_f = K / \omega_0^m, \quad X_c = \frac{1}{\omega_0 C}$$

Introducînd gradul de compensare definit prin (5.1), relația (5.3) devine pentru regimul permanent de referință:

$$Q_{cr} = U_r^n (1 - U^{2-n} / K_f \cdot X_c) / (1-g) \quad (5.5)$$

Înlocuind în (5.5) raportul X_c / K_f cu expresia sa obținută din relația (5.1) de definiție a gradului de compensare, puterea reactivă absorbită devine:

$$Q_{cr} = U_r^n (1 - g U_r^{2-n}) / (1 - g) ; \quad (5.6)$$

iar expresia ER prin derivarea relației (5.6) în raport cu tensiunea și rearanjarea termenilor rezultă:

$$\partial Q_{cr} / \partial U_r = (n \cdot U_r^{n-1} - 2 \cdot g \cdot U_r) / (1 - g) \quad (5.7)$$

Expresia ER a puterii reactive în raport cu frecvența

Pentru determinarea ER în raport cu frecvența se procedează în mod similar pornind de la expresia (5.3) scrisă sub forma:

$$Q_c = K_u \cdot \omega^m - Y_c \cdot \omega ; \quad (5.8)$$

unde:

$$K_u = K \cdot U_0^n ; \text{ iar } Y_c = U_0^2 \cdot C ;$$

Puterea reactivă absorbită în regim de referință, considerînd gradul de compensare, g , definit mai sus rezultă:

$$Q_{co} = K_u \cdot \omega_0^m (1 - g) ; \quad (5.9)$$

iar puterea reactivă absorbită la pulsația ω_r , exprimată în u.r. este:

$$Q_{cr} = \omega_r^m \cdot \frac{1 - Y_c / K_u}{1 - g} \omega_r^{1-m} \quad (5.10)$$

Introducînd raportul Y_c / K_u în funcție de gradul de compensare, relația (5.10) devine:

$$Q_{cr} = \omega_r^{-m} \frac{1 - g \cdot \omega_r^{1-m}}{1 - g} \quad (5.11)$$

iar ER al puterii reactive în raport cu frecvența:

$$\partial Q_r / \partial \omega_r = (m \cdot \omega_r^{1-m} - g) / (1 - g) \quad (5.12)$$

Expresiile (5.7) și (5.12) permit estimarea valorilor ER ale CC dacă se cunosc gradul de compensare și valorile ER ale acestora în absența compensării.

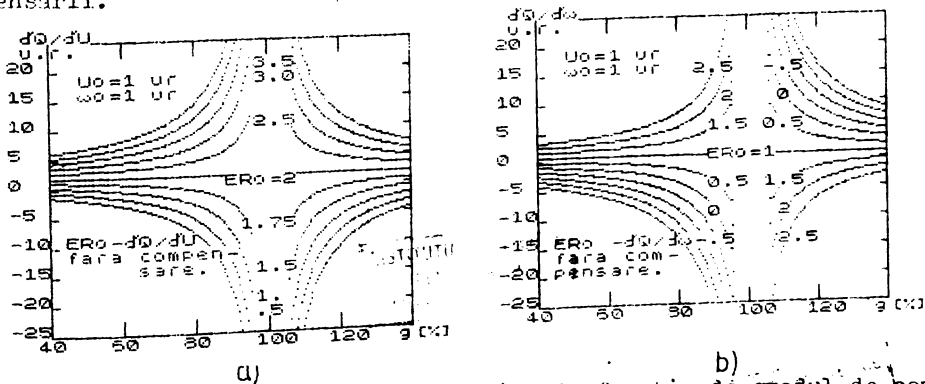


Fig. 5.1. Variația ER ale puterii reactive în funcție de gradul de compensare și valorile ER ale consumatorului necompensat: a) în raport cu tensiunea; b) în raport cu frecvența.

Analiza curbelor de variație a ER de putere reactivă în funcție de tensiune ($q_u = \partial Q_r / \partial U_r$), figura 5.1. , pune în evidență următoarele aspecte:

a) influența gradului de compensare asupra valorilor ER ale puterii reactive în raport cu tensiunea și frecvența este cu atât mai accentuată cu cât caracteristicile puterii reactive absorbite se abat mai mult de la caracteristica unui element de tip impedanță constantă;

b) pentru valori ale ER în raport cu tensiunea și frecvența ale consumatorului necompensat mai mari decât doi ($n > 2$) și respectiv mai mari decât unu ($m > 1$), compensarea puterii reactive produce o majorare a valorilor ER și o diminuare, în caz contrar (pentru $n < 2$ și $m < 1$).

Rezultă că în cazul consumatorilor reprezentați prin impedanța constantă, compensarea puterii reactive absorbite nu afectează valorile ER. În celelalte situații sensibilitatea CS ale CC compensați este determinată de caracteristicile $Q(U)$ și $Q(\omega)$ ale CC necompensat. Totodată rezultă necesitatea reprezentării separate a surselor de compensare (baterii de condensatoare statice) prin CS proprii și separat a celorlalți consumatori componenți atunci când se urmărește asamblarea CS ale CC real.

5.2.4. Valorile parametrilor CS ale CC raportate în literatura de specialitate

În cadrul prezentului sînt sintetizate valorile ER ale CS ale CC indicate în literatura accesibilă autorului, sînt analizate domeniile de valori ale acestora și influența diverșilor factori asupra lor. Valorile parametrilor prezentați în tabelele 5.1 și 5.2 pot să constituie o bază de date pentru compararea rezultatelor ulterioare sau pentru reprezentarea sarcinii în studiile de sistem prin CS atunci cînd nu se dispune de alte date.

Tabelul 5.2.

Valori^{o/e} ER exprimate în u.r. prezentate în literatură

Sursa bibliografică (anul)	$p_u = \frac{\partial P}{\partial U}$	$q_u = \frac{\partial Q}{\partial U}$	$p_f = \frac{\partial P}{\partial f}$	$q_f = \frac{\partial Q}{\partial f}$	Observații
1	2	3	4	5	6
/13/ (1962)	1,5-1,7 0,8-1,0	2,4-3 1,5-2,3			Orașe mari Consum în nodurile de 10 kV
/38/ (1964)	0,5-0,75	1,7-6			
/39/ (1965)	1-1,5 0,524	1,7	1,8-2,6 1,5		Cons. casnic și comercial Cons. industrial

Tabelul 5.2. (continuare)

1	2	3	4	5	6
/115/ (1972)	$\frac{0,42}{0,63}$	$\frac{3,63}{4,59}$			Consum casnic și comercial iarna zi/noapte
/8/ (1973)	1,24-1,36	1,85-2,31	0,73-0,58	-0,86--1,4	Prin asamblarea CS cu considerarea RED
/148/ (1973)	1,15-1,52	2,8-5,85			Determ. experimental în noduri de f. t. din S.U.A.
/21/ (1977)	1-0	1,8-1,9			Consumul oragului New York
/10/ (1982)	$\frac{0,6-0,7}{0,3-0,75}$	$\frac{2,3-3,1}{1,5-3,5}$	$\frac{1,1}{1,5-3}$	$\frac{-2,2-3,1}{-1-5}$	CC industriali Consum în nodurile de 110 kV
/39/ (1984)	0,9-1,5	1,7 - 6			Determ. experimental în nodurile de înaltă tensiune, vara
/60/ (1985)	1,42	3,97			Determ. experimentale pentru consumatorii casnici
	1,38	6,49			Stația de distribuție Timișoara Nord
	1,67	4,13			Consumatori industriali
/110/ (1985)	2/1,3	1,6			Consumatori casnici, iarna/vara
	0,5/0,2	0,6			Consumatori industriali, iarna/vara

Tabelul 5.2. a fost completat cu valorile ER ale sarcinii exprimate în u.r. pentru punctul de funcționare de referință ($P_{or} = Q_{or} = U_{or} = f_{or} = 1$), valori indicate în literatură, fie direct /10/, /13/, /21/, /67/, /123/, fie indirect, prin estimare pe baza curbelor sau expresiilor neliniare ale CS /39/, /89/, /148/.

Analiza valorilor ER prezentate în tabelul 5.2 evidențiază o anumită grupare a acestora pentru următoarele categorii de consumatori: industriali, casnici și comerciali și generalizați la nivelul de înaltă tensiune. Referitor la aceste valori se pot remarca următoarele:

a) Puterea activă prezintă valori ale ER în raport cu tensiunea cu dispersii relativ mici. Consumatorii de tip casnic, cu o structură puțin variabilă, dominată de consumatori de iluminat și consumatori rezistivi, prezintă valori concentrate în domeniul (0,5 - 2). Consumatorii de tip industrial, datorită ponderii mari a MI în acest tip de CC, prezintă ER de valori mai reduse și cu o dispersie de asemenea redusă (0,2 - 0,9).

Sezonul din timpul anului afectează valorile ER, p_u , în special pentru consumatorii casnici, în sensul majorării valorii acestora în timpul iernii ca urmare a creșterii ponderii consumului rezistiv.

b) Valorile ER , q_u , ale puterii reactive în raport cu tensiunea, sînt mai mari decît cele ale puterii active și mult mai dispersate (între 0,6 și 6) datorită saturației reactanțelor de magnetizare și compensării puterii reactive conform celor discutate în § anterior.

c) Gama de valori pentru ER al puterii active în raport cu frecvența, p_f , (0,37 - 3) este determinată în primul rînd de caracteristicile cuplur-turație ale mecanismelor antrenate ale căror exponent, β , este cuprins în gama (-1 ÷ 3) /23/, /142/.

5.3. Identificarea analitică a CS ale CC

5.3.1. Introducere

Avînd în vedere forma liniarizată, (1.3), adoptată pentru CS ale CCI, se pune problema estimării parametrilor acestor expresii, adică a ER ale puterii active și reactive funcție de tensiunea și frecvența în punctul de funcționare permanent considerat. Abordarea analitică a estimării acestor parametri presupune aplicarea principiului superpoziției și deci admiterea liniarității CS ale componentelor de sistem. Liniaritatea există într-o anumită măsură pentru variații relativ mici ale tensiunii și frecvenței (cca $\pm 10\%$) față de valorile din regimul de referință /8/, /21/, /123/.

Estimarea parametrilor CS ale CC implică pe lîngă determinarea sau evaluarea parametrilor CS ale consumatorilor individuali, aspect abordat în capitolele 2, 3 și 4 și cunoașterea structurii CC și a regimurilor de funcționare ale componentelor, elemente care se modifică continuu, reflectînd fazele ciclurilor de producție, programele de utilizare ale diverșilor consumatori, etc. /21/, /37/, /84/, /148/. Se consideră însă importantă estimarea structurii CC în momentele critice ale SEE cum ar fi regimurile de funcționare în suprasarcină și goluri de sarcină /21/ sau regimuri postavarie /22/, /59/.

Estimarea analitică a parametrilor CS ale CC ridică însă și alte probleme, astfel chiar dacă s-ar cunoaște exact compoziția sa, la un moment dat, ar fi nepractic să se reprezinte fiecare consumator individual, acțiunea fiind în număr extrem de mare. Reducerea efortului de asamblare a CS ale CC implică reprezentarea consumatorilor sau a grupelor de consumatori individuali prin MM de aceeași formă și cît mai simple; /8/, /65/, /77/, /123/, /142/ pentru a obține CS sub forme adecvate utilizării lor în reprezentările SEE.

Se impune în consecință, elaborarea unei strategii de construire a CS ale CC pe baza CS ale consumatorilor individuali și a informații-

lor accesibile privind structura și regimul de funcționare ale CC, care pe de o parte să reflecte comportarea reală cea mai probabilă a CC, și pe de altă parte să aibă o formă cât mai simplă și mai facil de obținut.

Avându-se în vedere aceste aspecte, în cadrul prezentului § se stabilesc relațiile de calcul pentru ponderile componentelor de consum ale CC, se analizează pe baza unor diagrame influența parametrilor electrice ai RED asupra valorilor ER rezultante. Pe baza concluziilor rezultate din capitolele anterioare privind CS ale consumatorilor individuali, influența compensării puterii reactive și a RED asupra parametrilor CS ale CC, în subparagraful 5.3.4. se propune o metodă de asamblare a CS adecvată CC cu RED radiale, denumită în continuare "de-duplată". Totodată este elaborat un algoritm și program de calcul pentru asamblarea CS ale CC cu RED buclate în care CS ale CCP se estimează cu procedura propusă.

5.3.2. Stabilirea ponderilor diverselor componente în consumul total al CC

Funcționarea consumatorilor individuali, în special a celor industriali, este de obicei ciclică, în cadrul fiecărui ciclu (cu durata T_c), existînd unul sau mai multe (N_r) regimuri de funcționare caracterizate prin gradul de încărcare

$\alpha_k = P_k / P_{inst}$ și timpul relativ de funcționare $t_{rk} = T_k / T_c$, conform curbei clasate a puterii /2/, figura 5.2. Măsurătorile de bilanț au arătat că numărul de trepte ale curbei clasate a majorității consumatorilor industriali este de două sau maximum trei trepte ($N_r=2,3$), /2/, /152/, /153/.

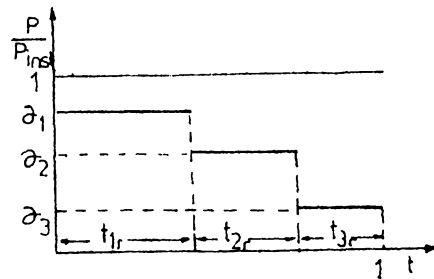


Fig.5.2. Curba clasată a puterii active cu notațiile utilizate.

Pentru un CCP, i , considerînd cunoscuți parametrii CS ai săi în fiecare regim de funcționare (treaptă a curbei clasate a puterii), ponderea cu care se consideră acești parametri în CS ale CC, conform notațiilor din figura 5.2. rezultă:

a) pentru puterea activă:

$$P_{i,k} = P_{inst} \cdot \alpha_{i,k} \cdot t_{ri,k} / \left[\sum_{i=1}^n P_{inst} \cdot \sum_{k=1}^{N_r} \alpha_{i,k} \cdot t_{ri,k} \right] \quad (5.13)$$

b) pentru puterea reactivă:

$$W_{Qi,k} = P_{inst_i} \cdot \alpha_{i,k} \cdot t_{ri,k} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{i,k} \left/ \sum_{i=1}^n P_{inst_i} \sum_{k=1}^{Nr} \alpha_{i,k} \cdot t_{ri,k} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{i,k} \right. ; \quad (5.14)$$

unde:

n - este numărul de consumatori componentei racordați în nodul de interes; $\cos \varphi_{i,k}$ - este factorul de putere al consumatorului i , în regimul de funcționare k , determinat în cazul MI ca o funcție de factorul de putere nominal și gradul de încărcare, conform /42/, /119/.

Rezultă că pentru stabilirea ponderilor parametrilor CS ale CCF în CS ale CC se impune cunoașterea următoarelor două categorii de date:

I) puterile instalate și datele de catalog ale principalelor tipuri de consumatori pe baza cărților tehnice și a cataloagelor consumatorilor individuali sau a raportărilor statistice;

II) date privind regimurile de funcționare pe baza măsurătorilor de bilanț electroenergetic sau a datelor prezentate în literatură /2/, /21/.

Stabilirea gradului de încărcare pentru MI, care constituie ponderea consumatorilor individuali în CC, în special platforme industriale, este esențială, datorită dependenței puternice a ER de gradul lor de încărcare așa cum s-a arătat în capitolul 2. Determinarea sa se poate realiza fie pe baza măsurătorilor de bilanț ale puterii sau energiei active absorbite, fie pe baza măsurătorilor de curent pentru consumatori de mică importanță. În acest ultim caz se evaluează gradul de încărcare α conform relației:

$$\alpha = (\sqrt{3} U \cdot I - P_n / \eta_n) / (P_n / \eta_n \cdot d); \quad (5.15)$$

dezvoltată în /95/, unde c și d sînt constante ce depind de factorul de putere nominal al MI. Valorile lor sînt date în /119/.

5.3.3. Analiza influenței RED asupra parametrilor CS ale CC

Considerarea RED în estimarea parametrilor CS ale CC este aproape unanim apreciată ca importantă /8/, /21/, /24/, /148/, deși în unele lucrări, din cauza dificultăților de implementare, efectele sale sînt neglijate /40/, /123/ sau apreciate grosier prin intermediul unei componente de consum (pierderi în RED) pentru care s-au estimat în prealabil CS /24/, /25/, /120/.

În vederea analizei influenței parametrilor electrici ai RED asupra valorilor ER ai consumatorilor componentei s-a utilizat o variantă adecvată a programului "CSR" descris în §.5.3.4. Astfel s-a

considerat o RED uzuală pentru alimentarea consumatorilor individuali care din motive de selectivitate a reglajului protecțiilor și reducerii curenților de scurtcircuit funcționează radial /2/, /8/, reprezentată prin parametrii longitudinali (R, X) și cei transversali (G, B) în schema echivalentă în Γ , (figura 5.3). RED alimentează un consumator ai cărui parametri ai CS sînt valorile ER, $p_{u2}, q_{u2}, p_{f2}, q_{f2}$.

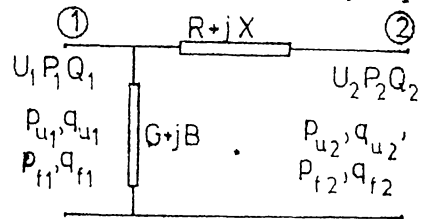


Fig.5.3. Schema electrică echivalentă a RED considerate.

Admițînd diverse valori pentru acești parametri, s-au determinat valorile parametrilor $p_{u1}, q_{u1}, p_{f1}, q_{f1}$ ai consumatorului echivalent în nodul (1) pentru diverse valori ale parametrilor electrici ai RED. Calculul concret s-a efectuat pentru un consumator alimentat printr-o stație de transformare m.t./j.t. cu parametrii precizați în figura 5.4.

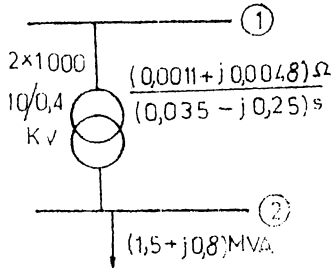


Fig.5.4. RED considerată pentru analiza influenței asupra ER

În vederea evidențierii influenței parametrilor electrici ai RED asupra valorilor ER ale consumatorilor s-au reprezentat în figurile 5.5 și 5.6 ER corespunzătoare nodului (1) în funcție de ER corespunzătoare nodului (2).

Analiza influenței parametrilor RED asupra ER ale puterii active și reactive în funcție de tensiune, figura 5.5, permite evidențierea următoarelor concluzii:

a) ER, p_{u1} , al puterii active în raport cu tensiunea pentru valori ale parametrului $q_{u2} = (2 - 4)$, domeniul uzual, este practic neafectat de prezența RED. Pentru $q_u = 2$ valorile ER, p_u , sînt identice în ambele noduri ale rețelei considerate, iar pentru valori mai mari ale lui q_u se constată o reducere mică ER spre începutul rețelei, (cca 10%, pentru $q_{u2} = 10$), așa cum rezultă din figura 5.5, linie întreruptă;

b) ER, q_{u2} , al puterii reactive în funcție de tensiune, este sensibil afectat de RED în domeniul valorilor mari ale ER ale consumatorilor individuali (zona hașurată din figura 5.5). Astfel, pentru $q_{u2} = 12$, la începutul RED considerate, se obține o reducere a ER cu cca 30%. Pentru valorile ER ale consumatorilor apropiate de 2, cazul consumatorilor de tip impedanță constantă, RED practic nu modifică ER al consumatorilor echivalenți.

Considerarea RBD afectează caracteristicile de frecvență ale puterii active și reactive în mod diferit. Astfel, ER al puterii active în raport cu frecvența, P_{f1} , este practic independent de prezența RBD indiferent de valorile celorlalte ER (q_f , q_u) ceea ce se justifică prin ponderea mică a pierderii de putere activă în rețeaua electrică și slaba dependență a acestora de frecvența tensiunii din sistem. ER al puterii reactive în raport cu frecvența, q_f , prezintă o sensibilitate mult mai mare față de prezența RBD, înregistrându-se abateri ale acestuia (zona hașurată din figura 5.6) de cca 50% față de P_{f2} .

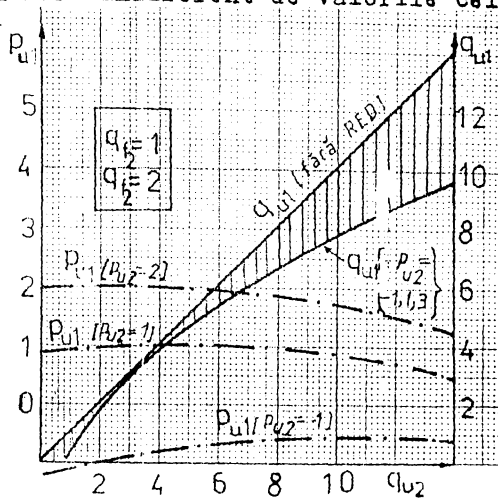


Fig. 5.5. Influența RBD asupra ER ale puterii active și reactive în funcție de tensiune

În cazul considerării în locul RE din figura 5.4 a unui pachet de cabluri AGYYAbY(3x240) mm², capabil să transporte aceeași putere, de lungime 60 m, abaterile maxime ale ER la început față de sfârșit au rezultat în condițiile prevăzute mai sus astfel: 2,1% pentru P_u , 2,6% pentru q_u , și 4,7% pentru q_f .

Avînd în vedere că în general funcționarea RBD radiale cu cabluri sînt încărcate mult sub capacitatea lor nominală, valorile abaterilor ER sînt încă mai reduse. În consecință, considerînd și celelalte aproximații care se introduc privind estimarea valorilor ER, se poate admite neglijarea influenței acestei categorii de RBD asupra valorilor ER, impunîndu-se însă considerarea RBD constituite din transformatoare sau linii electrice aeriene.

Valorile parametrilor electrice ai elementelor de rețea influențează, de asemenea abaterile ER de la începutul rețelei față de cele de la sfîrșit. Astfel, în cazul considerării în locul RE din figura 5.4 a unui pachet de cabluri AGYYAbY(3x240) mm², capabil să transporte aceeași putere, de lungime 60 m, abaterile maxime ale ER la început față de sfârșit au rezultat în condițiile prevăzute mai sus astfel: 2,1% pentru P_u , 2,6% pentru q_u , și 4,7% pentru q_f .

Valorile parametrilor electrice ai elementelor de rețea influențează, de asemenea abaterile ER de la începutul rețelei față de cele de la sfîrșit. Astfel, în cazul considerării în locul RE din figura 5.4 a unui pachet de cabluri AGYYAbY(3x240) mm², capabil să transporte aceeași putere, de lungime 60 m, abaterile maxime ale ER la început față de sfârșit au rezultat în condițiile prevăzute mai sus astfel: 2,1% pentru P_u , 2,6% pentru q_u , și 4,7% pentru q_f .

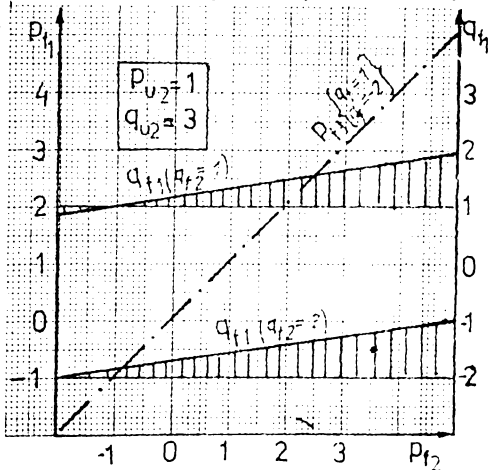


Fig. 5.6. Influența RBD asupra ER ale puterii active și reactive în funcție de frecvență

5.3.4. Asamblarea caracteristicilor statice ale CC

5.3.4.1. A s p e c t e g e n e r a l e

Admițînd forma liniarizată (1.3) pentru reprezentarea CS ale CC, metoda uzuală de asamblare a acestora se bazează pe principiul superpoziției conform relației:

$$C = C_0 \sum_{j=1}^n W_j CS_j(U, f); \quad (5.16)$$

unde: $C \equiv \{P, Q\}$; $W_j = C_j / C_0$ reprezintă ponderea componentului j în consumul total C_0 , cu condițiile:

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1 \quad \text{și} \quad \sum_{j=1}^n C_{j0} = C_0$$

$CS_j(U, f)$ reprezintă CS a componentei de consum j .

Avînd în vedere însă imposibilitatea practică de a considera în expresiile (5.16) a tuturor componentelor individuale de consum, abordarea problemei asamblării CS ale CC implică atît o grupare a acestora în consumatori omogeni din punct de vedere al parametrilor CS cît și o ierarhizare a procedurii de elaborare a CS

Astfel, în /59/, /86/ și /123/, CC sînt considerați ca fiind constituiți din trei consumatori componenți tipici: (industriali, casnici-comerciali și agricoli), parametrii CS ale CC obținîndu-se cu relații de forma (5.16) neglijînd influența RED, saturația reactanțelor de magnetizare și compensarea puterii reactive cu condensatoare statice. O abordare de asemenea ierarhizată a estimării parametrilor CS ale CC cu considerarea însă și a elementelor RED sub o formă simplificată (doar prin reactanța longitudinală) este prezentată în /8/.

În afară de neglijarea sau considerarea simplificată a RED, lucrările menționate mai sus nu fac precizări privind modul de estimare al ER ale CCP care sînt constituiți dintr-un număr și diversitate extrem de mare și în general cu CS ce depind de regimul de funcționare.

Avîndu-se în vedere importanța considerării elementelor de rețea în asamblarea CS ale CC conform celor prezentate în § anterior, în cadrul prezentului § se prezintă o metodă adecvată și algoritmele de calcul corespunzătoare pentru estimarea parametrilor CS ale CC cu RED radiale și cu RBL complex buclate. Totodată se prezintă pe baza concluziilor obținute în § anterior și o metodă practică de estimare a ER ale CCP denumită "decuplată", avînd la bază decuplarea CS de putere activă de cele de putere reactivă pentru consumatori rotativi.

5.3.4.2. A s a m b l a r e a C S a l e C C c u R E D r a d i a l e

Se consideră CC constituiți din mai mulți CCP racordați în nodurile unei RED radiale avînd structura uzuală pentru majoritatea consumatorilor industriali /2/, /152/, /153/, figura 5.7, în care elementele de rețea sînt reprezentate prin scheme echivalente în Γ , figura 5.3.

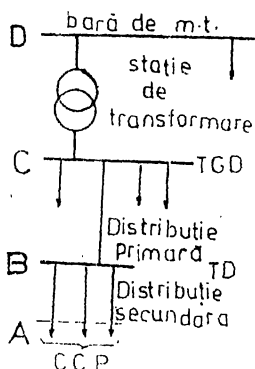


Fig.5.7. Schema electrică monofazată a CC considerat.

Avîndu-se în vedere concluziile rezultate din analiza parametrilor CS ale consumatorilor individuali prezentate în capitolele 2 - 4, influența compensării puterii reactive și a parametrilor RED asupra parametrilor CS ale CC se propune o metodă, denumită "decuplată", de estimare a parametrilor CS ale CC sub forma liniarizată (1.3). Pe baza observațiilor privind sensibilitatea diferită a CS față de gradul de încărcare, puterea nominală și caracteristica cuplu-turație a mecanismului antrenat de MI, evidențiate în capitolul 2, se efectuează o decuplare a CS de putere activă, determinate numai de exponentul β al caracteristicii mecanice, de CS de putere reactivă determinate de gradul de încărcare

și puterea nominală a MI.

Considerînd un CC cu structura prezentată în figura 5.7, etapele metodei propuse de estimare a parametrilor CS ale CC considerat racordat în nodul D sînt:

1. Estimarea parametrilor CS ai CCP racordați pe bara B considerînd cunoscuți parametrii CS ai consumatorilor individuali.
2. Neglijînd influența RED secundare, se determină cu relațiile (5.16) valorile ER ale consumatorului echivalent racordat în nodul B.
3. Consumatorii care pot fi reprezentați prin impedanță constantă se consideră racordați direct la bară D, avînd în vedere influența nesemnificativă a RED asupra parametrilor acestora.
4. Calculul ER ale consumatorului echivalent B în punctul de racord pe barele C, considerînd elementul de rețea corespunzător printr-o schemă electrică echivalentă Γ .
5. Se repetă punctele 1, 2 și 4 pentru toate nodurile de nivel identic cu B din structura CC și se estimează parametrii CS ai consumatorului echivalent pe bara C cu relațiile (5.16).
6. Se determină valorile ER ale consumatorului echivalent racordat pe bara C, în punctul de racord de pe bara D.
7. Considerînd toți consumatorii echivalenți racordați pe bara

C prin ER și ponderile corespunzătoare, se determină ER al CC echivalent nodului D ca medii ponderate ale ER ale acestora.

În vederea realizării etapei 1 de estimare a parametrilor CS ai CC se utilizează metoda "decuplată" ale cărei principale etape sînt următoarele:

a) consumatorii rotativi MI și MS, care în general prezintă ER cu dispersii mari, se grupează, pe de o parte, în funcție de gradul de încărcare și puterea nominală și pe de altă parte, în funcție de tipul caracteristicilor cuplu-turație ale mecanismelor antrenate;

b) se stabilesc ponderile cu care intervin fiecare grupă de motoare electrice în consumul total de energie activă și reactivă, conform relațiilor (5.13) și respectiv (5.14);

c) se estimează valorile parametrilor CS ale grupelor de motoare astfel: parametrii CS de putere activă se stabilesc numai în funcție de caracteristicile cuplu-turație ale mecanismelor antrenate, iar parametrii CS de putere reactivă în funcție de puterea nominală și gradul de încărcare al motorului;

d) valorile medii ale parametrilor CS pentru fiecare grupă de motoare se pot determina fie utilizînd diagramele prezentate în capitolul 2, figura 2.5. pentru gama de MI (0,75 - 55)k# cu rotor în cîlvîș, de fabricație "Electromotor" Timișoara, fie cu programul de calcul specializat, denumit "AMASU", descris de asemenea în capitolul 2.

Pentru estimarea ER al consumatorului echivalent la începutul rețelei electrice reprezentată prin schema echivalentă Γ , figura 5.3, s-au calculat tensiunea și puterea U_1 , P_1 , Q_1 la începutul rețelei pentru două tensiuni și frecvențe apropiate U_2 și $U_2 + \Delta U$ și respectiv f și $f + \Delta f$ conform relațiilor:

$$U_1 = U_2 + (P_2 \cdot R + Q_2 \cdot 2\pi f \cdot L) / U_2 ; \quad (5.17)$$

$$P_1 = P_2 + (P_2^2 + Q_2^2) \cdot R / U_2^2 + G \cdot U_1^2 ; \quad (5.18)$$

$$Q_1 = Q_2 + (P_2^2 + Q_2^2) \cdot 2\pi f \cdot L + B \cdot U_1^2 ; \quad (5.19)$$

unde cu L s-a notat inductanța elementului longitudinal al rețelei iar puterile P_2 și Q_2 de la sfîrșitul elementului de rețea se exprimă prin CS ale consumatorilor individuali față de regimul de referință U_{20} , P_{20} , Q_{20} astfel:

$$P_2 = P_{20} \cdot [1 + p_{2u} \cdot \Delta U / U_0 + p_{2f} \cdot \Delta f / f_0] \quad (5.20)$$

$$Q_2 = Q_{20} \cdot [1 + q_{2u} \cdot \Delta U / U_0 + q_{2f} \cdot \Delta f / f_0] \quad (5.21)$$

Parametrii CS ai consumatorului echivalent împreună cu RBD radială aferentă se obțin apoi prin raportarea abaterilor puterilor ΔP_1

și ΔQ_1 la abaterile ΔU și Δf ale mărimilor de sistem care le-au determinat.

Algoritmul de estimare al parametrilor CS ale CC alimentați prin RED radiale, conform metodologiei prezentate mai sus, a fost implementat în programul de calcul denumit "CSR" /95/ pentru RED radiale cu patru nivele (figura 5.7.). Acest algoritm împreună cu diagramele 2.5, privind valorile ER ale MI uzuale și informațiile sintetizate în capitolele 2 - 4, referitoare la valorile ER ale celorlalți consumatori individuali, permit asamblarea facilă a CS ale CC cu acest tip de RED, așa cum s-a efectuat în partea aplicativă a prezentei lucrări (capitolul 7).

5.3.4.3. A s a m b l a r e a C S a l e C C c u R E D b u c l a t e

În cazul RED buclate determinarea ER ale CC implică calculul puterilor și tensiunilor în nodurile rețelei utilizând metode iterative.

Considerând cunoscut regimul de funcționare de referință și parametrii CS ai consumatorilor individuali, s-a elaborat programul de calcul "CSB", care permite considerarea oricărui tip de RED cu maximum 50 de noduri. Ordinograma de principiu a algoritmului este prezentată în figura 5.8, iar principalele etape ce se parcurg pentru estimarea parametrilor CS ai CC în acest caz sînt:

1. Se construiește matricea de admitanță nodală de scurtcircuit $[Y_t]$ pentru cele n_t noduri ale RED sub forma:

$$[Y_t] = [G_t] + j [BN_t] + j [BS_t] ; \quad (5.22)$$

unde:

- $[G_t]$ este matricea părților reale ($n_t \times n_t$) din $[Y_t]$,
- $[BN_t]$ și $[BS_t]$ sînt matricele părților imaginare ale matricei $[Y_t]$ în care $[BN_t]$ conține elementele susceptanțelor de transfer și a componentelor proprii nesaturabile, iar $[BS_t]$ este o matrice diagonală cu componentele saturabile ale susceptanțelor proprii.

2. Consumatorii care pot fi reprezentați prin impedanță constantă se vor introduce în matricea $[Y_t]$. În funcție de caracterul saturabil sau nesaturabil al susceptanțelor, acestea vor afecta elementele diagonale din matricea $[BS_t]$ sau respectiv $[BN_t]$.

3. Utilizînd o procedură de eliminare gaussiană /31/ se reduce matricea $[Y_t]$, prin eliminarea nodurilor pasive, obținîndu-se o nouă matrice de admitanță nodală cu dimensiunea redusă $n \times n$:

$$[\underline{Y}] = [G] + j\{[BN] + [BS]\}. \quad (5.23)$$

4. Menținând frecvența f_0 constantă în sistem, se impune tensiunea U_j la bornele de racord a CC la SFF.

5. Se corectează elementele matricii în funcție de frecvența f_0 impusă.

6. Se efectuează calculul tensiunilor în nodurile RED în cadrul unui pas de iterație cu metoda Gauss-Seidel.

7. Cu tensiunile obținute în fiecare nod se corectează elementele matricii [BS] pentru considerarea saturației și se calculează noile puteri consumate în noduri cu relații de forma (5.20) și (5.21).

8. Se reia calculul tensiunilor într-un nou pas iterativ (punctul 6) pînă la stabilirea soluției tensiunilor.

9. Se modifică tensiunea U_j la bornele CC și se reia punctul 4 pînă la epuizarea gamei de tensiuni pentru care se ridică CS.

10. Se restabilește tensiunea de referință, U_{j0} , la bornele SFF și se dă o nouă valoare frecvenței f , din sistem.

11. Se reiau punctele (4 - 10) pentru gama de frecvențe de interes.

12. Se identifică parametrii CS ale CC din funcțiile tabelare $P = f(U_j, f)$ și $Q = f(U_j, f)$ cu MCMMP.

Acest algoritm de estimare a parametrilor CS implică un volum de calcul mult mai mare decît cel implementat în programul "CSR" însă acest avantaj este compensat de următoarele aspecte:

a) dezvoltarea tehnicii de calcul electronic și accesibilitatea sa permit utilizarea facilă a algoritmului prezentat, datorită structurii sale bazate pe algoritme clasice de circulații de puteri;

b) CS ale marilor consumatori din SFF național, datorită quasiconstanței structurii lor, se modifică relativ puțin, iar parametrii acestora odată determinați se pot constitui în bănci de date utile în multe studii de sistem.

START - 101 -

Citește parametrii RED și datele generale: $\epsilon, \Delta U, \Delta f, U_{max}, f_{max}$.

Construiește matricea de admitanță nodală de scurtcircuit $[Y]_t$

Citește datele inițiale ale nodurilor consumatoare: $P_o, Q_o, U_o, t, p_u, q_u, p_f, q_f, k_s$.

Include consumatorii de tip $Z=cst.$ în matricea $[Y]_t$ și elimină nodurile pasive rezultând matricea $[Y]$ de forma (5.23)

$m = 0$

$f = f_o + m \cdot \Delta f$

Corectează elementele matricei $[Y]$ în funcție de frecvența f

$k = 0$

$U_j = U_{j0} + k \cdot \Delta U$

Modifică elementele matricei $[BS]$ conform curbei de saturație

$I = I + 1$

Calculează tensiunile U_c în nodurile RED cu relația de la metoda Gauss-Seidel

Calculează noile puteri consumate considerând CS ale CCP

max $\{U_c^i - U_c^{i-1}\} < \epsilon?$

$U_j > U_{max}?$

Estimează parametrii CS funcție de tensiune și frecvență cu MCMMP

Tipărește mărimile U, P, Q , în nodul de record al CC pentru frecvența f .

$f > f_{max}?$

STOP

Fig. 5.8. Ordinograma de principiu a programului "CSB"

5.4. Identificarea experimentală a CS ale CC

5.4.1. Introducere

Identificarea experimentală a CS ale CC reprezintă procesul de estimare a formei și parametrilor expresiilor CS pe baza analizei și interpretării variației puterii măsurate la bornele CC în urma modificării lente a tensiunii sau/și frecvenței din nodul său de racord /87/, /117/. Aceste modificări pot fi rezultatul unor teste active, cu semnale de probă în general tip treaptă /39/, /59/, /89/, sau a unor teste pasive (utilizând perturbațiile aleatoare din SBB) /110/, /117/, /148/.

Identificarea experimentală a CS ale CC implică parcurgerea următoarelor etape /87/, /103/:

1. determinarea experimentală a abaterii puterii active și reactive absorbite de CC ca urmare a aplicării la bornele sale a unei variații de tensiune sau/și de frecvență;

2. filtrarea erorilor de măsură și a perturbațiilor introduse de procesele tranzitorii de mică intensitate, inevitabile ca urmare a deconectării și conectării unor consumatori individuali sau a schimbării regimului de funcționare al acestora;

3. stabilirea formei și structurii CS, estimarea statistică a parametrilor săi și liniarizarea în jurul punctului de funcționare de referință.

Prima etapă oferă CS ale CC sub forma unor perechi (tripleți) de mărimi $P, U, (f)$ și $Q, U, (f)$, cu erori introduse de aparatul de măsură și conversie, de fenomenele tranzitorii de mică intensitate și de modificările inerente în structura consumatorilor. Etapa următoare are drept scop filtrarea acestor erori printr-o estimare a valorilor reale ale mărimilor măsurate utilizându-se în general metoda mediei alunecătoare /117/ în acest scop. Ultima etapă urmărește construirea expresiei CS și estimarea parametrilor acestora pentru obținerea MM utilizabil al CC. Metoda uzuală adoptată aproape în exclusivitate în acest scop este MCMMP /59/, /60/, /65/, /77/, /93/, /110/.

Având în vedere informațiile din literatură, ca și alura CS măsurate, forma expresiilor acestora poate fi apreciată a priori. Pentru o mai mare flexibilitate, CS au fost considerate sub forma unor polinoame cu trei termeni de grad neîntreg /93/, /103/:

$$P = K_{0P} + K_{1P}U + K_{2P}U^{\alpha_P} ; \quad Q = K_{0Q} + K_{1Q} + K_{2Q}U^{\alpha_Q} \quad (5.24)$$

Estimarea parametrilor K și α ai CS de forma (5.24) s-a efectuat cu un algoritm de estimare adecvat, bazat pe MCMMP ponderate, al-

goritm care va fi descris în §.3.4.4. și implementat în programul de calcul denumit "PREDEX" /95/. Totodată în cadrul prezentului §, în vederea parcurgerii etapelor identificării experimentale a CC, după o analiză comparativă a metodelor de obținere a datelor experimentale, optîndu-se în cazul CC pentru metode active, se deduc relațiile de calcul ale abaterii tensiunii la borne ce pot fi obținute cu aceste metode, se prezintă echipamentul conceput și realizat pentru măsurarea și înregistrarea datelor experimentale în vederea obținerii CS ale CC.

5.4.2. Analiza metodelor utilizabile pentru identificarea CS ale CC

Determinările experimentale pentru identificarea CS ale CC, deși nu pot înlocui complet pe cele analitice, datorită limitărilor lor, sînt totuși esențiale pentru validarea MM adoptate /21/,/89/, /110/,/148/. Realizarea lor ridică o serie de dificultăți care le reduc gradul de aplicabilitate. Astfel dintre problemele pe care le implică metodele pasive se remarcă /103/:

a) necesitatea unui timp îndelungat de urmărire (de ordinul lunilor) /54/,/65/,/110/;

b) dificultățile de prelucrare a rezultatelor măsurărilor datorită, pe de o parte, imposibilității separării modificării tensiunii cauzată de SBF de cea cauzată de schimbările în structura CC și pe de altă parte, fenomenelor tranzitorii neesențiale inerente consumatorilor, în mod deosebit celor industriali /21/,/148/;

c) necesitatea unui echipament costisitor și sofisticat pentru înregistrarea, conversia și memorarea datelor, /55/,/110/;

d) stabilirea pragului de sensibilitate necesită un volum mare de încercări separat pentru fiecare tip de consumator, /21/,/65/.

Dintre problemele pe care le ridică determinările experimentale cu metodele active se evidențiază /103/:

a) limitele restrînse, cca (5 - 10)%, în care pot fi modificate mărimile de sistem /21/,/89/,/148/;

b) în cazul modificărilor lente ale mărimilor de sistem pot să apară modificări nedetectabile în structura CC ce alterează sensibil rezultatele /59/,/148/;

c) obținerea experimentală a CS de frecvență este posibilă doar în cazul unor insularizări ale CC sau pentru consumatori individuali, în laborator /67/. Determinările prin insularizarea CC cu sursele sale de energie nu pot fi considerate metode generale datorită posibilităților extrem de limitate pentru efectuarea acestor teste;

d) datorită abaterilor relativ mici ale mărimilor electrice măsurate în cadrul acestor determinări (în jurul clasei de precizie al aparatelor de măsură), erorile care intervin în măsură și înregistrarea datelor pot să le facă utilizabile /59/, /148/.

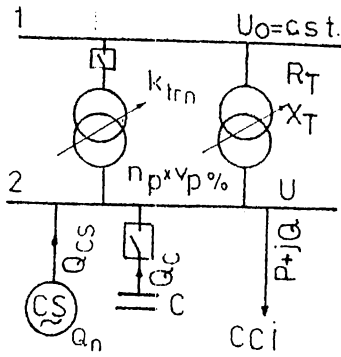


Fig.5.9. Elementele utilizate pentru modificarea tensiunii la bornele CC

Posibilitățile practice de modificare a tensiunii la bornele CC considerate în literatură /21/, /39/, /54/, /59/, /60/, /65/, /89/, se referă fie la modificarea pierderii de tensiune pe stația de transformatoare de alimentare, fie la schimbarea sub sarcină a ploturilor prizei acestora, figura 5.9.

Considerând tensiunea $U_0 = \text{cst.}$, pe bara ① de alimentare a stației de transformare, în tabelul 5.3. sînt prezentate relațiile care permit estimarea domeniului de variație al tensiunii U de la bornele CC, figura 5.9, pentru fiecare metodă considerată de modificare a tensiunii.

Tabelul 5.3.
Posibilitățile practice de modificare a tensiunii la bornele CC

Metoda de modificare a tensiunii la bornele CC	Domeniul estimat de variație al tensiunii	Observații
Schimbarea ploturilor prizei transformatoarelor de putere	$\frac{n \cdot V_p}{100}$	Necesită prize reglabile sub sarcină.
Conectarea sau deconectarea unuia din cele n transformatoare din stația de distribuție	$\frac{P \cdot R_T + Q \cdot X_T}{n(n-1)}$	Utilizabilă în regimuri de slabă încărcare a stației
Încărcarea sau descărcarea de putere reactivă Q_{cs} a compensatoarelor sincrone din stația de record a CC	$\frac{1,6 \cdot Q_n \cdot X_T}{n}$	Realizează o modificare lentă a tensiunii U
Conectarea și deconectarea unor baterii de condensatoare staționale de record te în paralel cu CC	$\frac{Q_c \cdot X_T}{n}$	Foarte fi utilizată și pentru identificarea CD.

Semnificațiile notațiilor utilizate în tabelul 5.3 sînt cele uzuale prezentate în figura 5.9.

5.4.3. Echipamentul de măsură propus pentru identificarea experimentală a CC

Experiența acumulată în cadrul unor determinări experimentale de S în câteva stații de transformare din municipiul Timișoara /59/, /60/,

/91/ a evidențiat dificultățile privind identificarea CC, în special a celor de tip industrial, care prezintă fluctuații rapide ale puterii absorbite ca urmare a schimbărilor permanente ale regimurilor de funcționare ale numeroșilor consumatori individuali. Modificările puterii absorbite de CC industriali datorate modificării tensiunii la bornele sale în cadrul testului sînt acoperite în mai puțin de o secundă de aceste fluctuații, ale căror amplitudini sînt aproximativ de același ordin cu cele determinate de modificarea tensiunii /103/.

Pentru evidențierea abaterii puterii la modificarea voită a tensiunii de alimentare cu una din metodele prezentate în tabelul 5.3., avînd în vedere că aceste abateri sînt de ordinul zecimilor sau a unităților de procent în cazul puterii active respectiv reactive, /59/, /103/, s-a impus amplificarea și înregistrarea lor automată. În acest scop a fost conceput și realizat un echipament de măsură și înregistrare adecvat, constituit din următoarele unități componente, figura 5.10:

1. unitate de măsură care permite stabilirea punctului permanent de referință, U_0 , P_0 , Q_0 , f_0 și determinarea scărilor mărimilor electrice înregistrate;

2. unitate de conversie a mărimilor electrice măsurate, tensiuni și curenți, valorii momentane în tensiuni continue, proporționale cu tensiunea, frecvența, puterea activă și reactivă;

3. amplificatoare de curent continuu pentru abaterile tensiunii frecvenței și puterii absorbite față de mărimile caracteristice punctului de funcționare de referință;

4. echipament de înregistrare a abaterilor de tensiune, frecvență și putere.

Echipamentul de determinare a CS ale CC s-a realizat concret cu elementele fizice prezentate în figura 5.11 în care elementul intermediar, trusa TAIME-o2 realizează funcțiile unităților 2 și 3 din schema de principiu (figura 5.10). Această trusă, înregistrată ca inovație la I.P. "T.V".T, /102/, este constituită din șase blocuri funcționale, figura 5.12, asamblate într-o cutie portabilă, a cărui panou frontal, figura 5.13, conține elementele de conectare, reglaj și semnalizare.

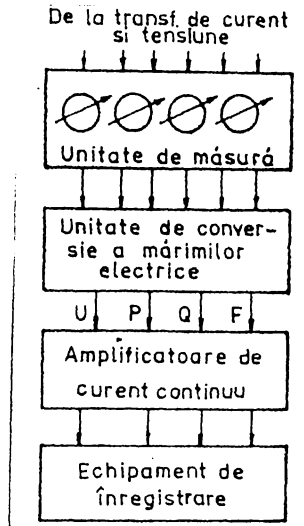


Fig.5.10. Structura echipamentului de determinare a CS ale CC

Blocurile funcționale ale trusei asigură adaptarea mărimilor de intrare, blocul (1), conversia lor în tensiuni continue, blocul (2) și amplificarea abaterilor mărimilor măsurate, ΔP , ΔU , și Δf ,

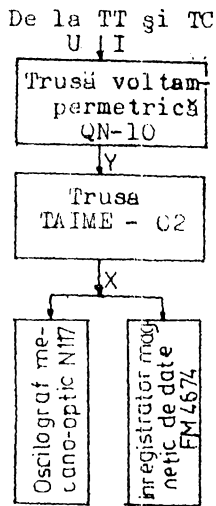


Fig.5.11. Echipamentul de determinare a CS ale CC

față de mărimile de consemn, stabilite prin intermediul blocului (4), caracteristice regimului

permanent de referință. Blocul (5), de ieșire, conferă facilitățile necesare măsurării și reglajului valorilor mărimilor de ieșire printr-un sistem de borne de conectare, jacuri telefonice, și potențiometre de adaptare, figura 5.13, astfel încât aceste mărimi să aibe valori adecvate înregistrării cu oscilograful mecano-optic sau magnetic.

Amplificatoarele operaționale, realizate cu circuite integrate $\beta A 741$, permit obținerea unor coeficienți de amplificare pentru abaterile mărimilor măsurate reglabili în domeniul 1 - 110, separat pentru fiecare canal. Datele tehnice și instrucțiunile de exploatare ale trusei ca și schemele electrice de execuție ale blocurilor funcționale sînt

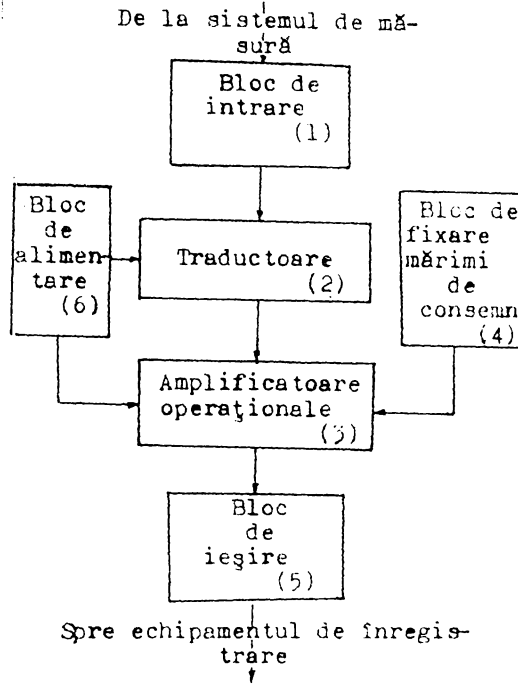


Fig.5.12. Structura de principiu a trusei TAIME-02.

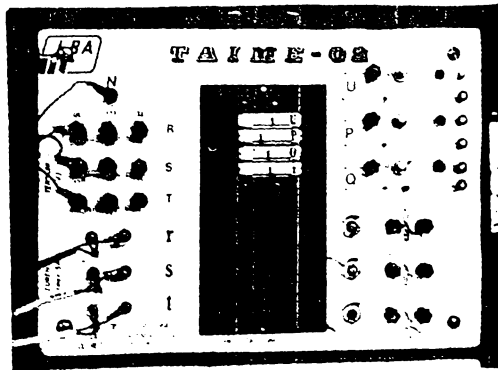


Fig.5.13. Panoul frontal al trusei TAIME-02

prezentate detaliat în /102/.

5.4.4. Estimarea parametrilor CS determinate prin măsurători de putere și tensiune

Metoda cvasiunanım acceptată pentru estimarea parametrilor CS ale CC pe baza măsurătorilor din teren este MOMP /39/, /65/, /77/, /84/, /89/, /93/, /110/, /120/, /148/.

În funcție de condițiile concrete și de structura datelor obținute prin măsurători se impune elabozarea unor algoritme de estimare adecvate. Avînd în vedere că în general CC formați din mari platforme industriale sînt alimentați prin RED constituite din mai multe plecări (m), (figura 5.14), de pe barele de medie tensiune ale stațiilor de transformare, determinarea experimentală a CS ale CC implică efectuarea de măsurători simultane pe toate cele m plecări, pentru fiecare valoare U_j ($j=1, n$) ale tensiunii la borne.

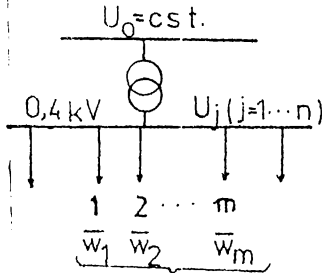


Fig. 5.14. Schema electrică monofilară considerată pentru alimentarea CC.

Estimarea parametrilor CS ale CC impune considerarea caracteristicilor măsurate pe

cele m plecări ponderat cu ponderile \bar{W}_j ($j = 1, m$), proporționale cu ponderea consumului pe fiecare plecare. Componentele vectorului \bar{W}_j (W_{ij} , $i=1, n$) corespunzătoare unei plecări sau caracteristici măsurate, j , se obțin prin corectarea ponderii consumului pe această plecare, cu gradul de precizie sau de încredere acordat fiecărei măsurători i , realizate pe plecarea respectivă. În general însă, utilizînd echipamente de măsură identice pentru fiecare plecare, se pot considera componentele fiecărui vector \bar{W}_j ca fiind egale ($W_{ij} = W_{kj} = W_j$) pentru orice k și $i \in (1-n)$, ceea ce simplifică algoritmul de calcul și volumul de date necesar.

Deoarece dezvoltările ulterioare sînt identice pentru CS de putere activă și putere reactivă, pentru simplificarea scrierii se introduc următoarele notații:

$$C_{ij} \equiv \{P_{ij}, Q_{ij}\} - \text{puterea activă sau reactivă estimată la bornele CC corespunzătoare plecării } i \text{ și măsurătorii } j;$$

$$Z_{ij} \equiv \{Z_{P_{ij}}, Z_{Q_{ij}}\} - \text{puterea activă sau reactivă măsurată pe plecarea } i \text{ pentru tensiunea } U_j.$$

Considerînd expresia analitică a CS funcție de tensiune de forma implicită:

$$C = C(K, U) \quad (5.25)$$

unde K este vectorul parametrilor caracteristicii, mărimile măsurate

pot fi exprimate prin /91/,/92/:

$$z_{ij} = G_{ij}(\bar{K}, U_j) + \bar{D}_{ij} \quad (i=1, m \text{ și } j=1, n) \quad (5.26)$$

unde \bar{D}_{ij} este eroarea de măsurare a puterii pentru punctul j de pe caracteristica măsurată i .

Pentru estimarea componentelor vectorului \bar{K} , parametrii CS estimate se definește o funcție obiectiv, J , conform teoriei estimăției cu MCMMP ponderate /37/,/92/,/138/:

$$J = \{ \bar{D} \}^t \cdot \{ W \} \cdot \{ \bar{D} \} \quad (5.27)$$

unde $\{ \bar{D} \}$ și $\{ W \}$ sînt matricile erorilor și respectiv a elementelor de ponderare.

Considerînd caracteristica estimată de forma:

$$G = K_0 + K_1 U + K_2 U^\alpha \quad (5.28)$$

unde $\bar{K} = [K_0, K_1, K_2]^t$ și α reprezintă setul de parametri căutați și derivînd expresia (5.27) în raport cu acești parametri, se obține un sistem de patru ecuații neliniare. Dificultățile de rezolvare a acestui sistem de ecuații, foarte slab condiționat, a impus estimarea separată a parametrului α , utilizîndu-se în acest scop o procedură de căutare unidirecțională a valorii sale care minimizează funcția obiectiv (5.27), conform ordinogramei din figura 5.15.

Pentru o valoare dată a exponentului α , anulînd derivatele funcției obiectiv (5.27) în raport cu componentele K_0 , K_1 și K_2 ale vectorului \bar{K} se obține un sistem de ecuații liniar avînd acești parametri ca necunoscute /95/. Pentru cazul considerării tuturor măsurătorilor pentru o plecare cu același grad de încredere (cazul cel mai frecvent) a rezultat sistemul de ecuații:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \left[w_i \left(n K_0 + K_1 \sum_j^n U_j + K_2 \sum_j^n U_j^\alpha \right) \right] = \sum_i^m \left[w_i \sum_j^n z_{ij} \right] \\ \sum_{i=1}^m \left[w_i \left(K_0 \sum_j^n U_j + K_1 \sum_j^n U_j^2 + K_2 \sum_j^n U_j^{\alpha+1} \right) \right] = \sum_i^m \left[w_i \sum_j^n z_{ij} \cdot U_j \right] \\ \sum_{i=1}^m \left[w_i \left(K_0 \sum_j^n U_j^\alpha + K_1 \sum_j^n U_j^{\alpha+1} + K_2 \sum_j^n U_j^{2\alpha} \right) \right] = \sum_i^m \left[w_i \sum_j^n z_{ij} U_j^\alpha \right] \end{cases} \quad (5.29)$$

implementat în programele de calcul "CSPU" (limbaj FORTRAN) /93/, și "PREDEX" (limbaj BASIC) pentru estimarea parametrilor CS ale puterii active și reactive funcție de tensiune.

Ca măsură a fidelității caracteristicii estimate față de cele măsurate se utilizează abaterea medie pătratică /117/ definită conform relației:

$$\sigma = \frac{1}{nm} \sum_j \sqrt{\sum_i^n [z_{ij} - c(K, U_j)]^2} \quad (5.30)$$

Rezolvarea sistemului de ecuații (5.29) este în general dificilă, ca urmare a slabei sale condiționări, motiv pentru care se impune

utilizarea dublei precizii pentru reprezentarea mărimilor și a anumitor precauții privind aranjarea datelor pentru prelucrare /30/, /92/.

Experiența acumulată în prelucrarea datelor experimentale cu algoritmul prezentat mai sus /59/, /60/ a arătat, pe lângă o dependență sensibilă a coeficienților K_0, K_1, K_2 de exponentul α , și o dispersie extrem de mare a tuturor valorilor parametrilor, chiar pentru același consumator, considerat însă la ore diferite. În schimb valorile ER în punctul de funcționare considerat, care se obțin atunci când abaterile σ au valori minime, au dispersii mult mai mici /95/, ceea ce justifică utilizarea ER cu principalii parametri ai CS.

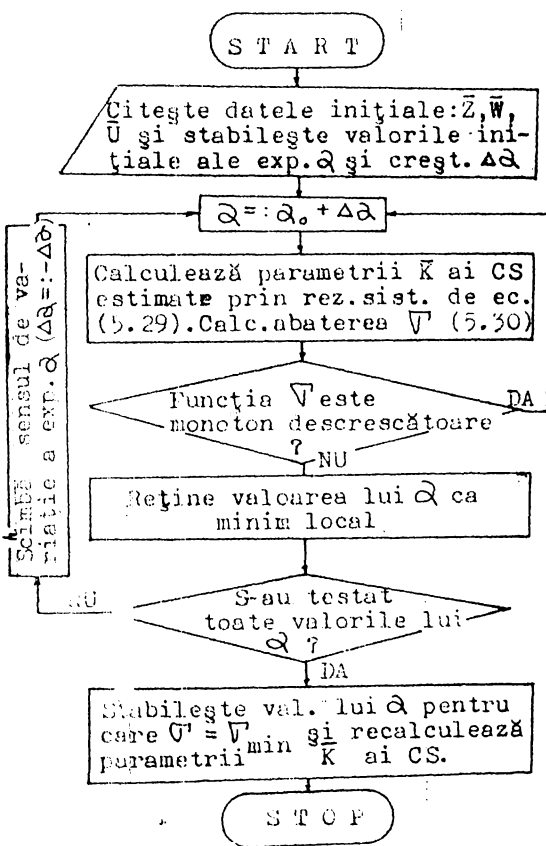


Fig.5.15. Ordinograma de principiu a programului "PRÉDEX"

ΔU, de variație a tensiunii la bornele CC, asupra procesului de estimare al parametrilor \bar{K} și a evidențiat necesitatea realizării unor domenii de minimum (2,5 - 3)% U_n pentru obținerea unor rezultate concludente.

Capitolul 6

CARACTERISTICILE DINAMICE ALE CONSUMATORILOR COMPLECSI

6.1. Aspecte generale ale reprezentării CC prin CD

6.1.1. Introducere

Conform definițiilor generale ale CD prezentate în subparagraful 1.3.2., ca fiind MM care redau cât mai fidel comportarea CC în regimuri dinamice, acestea pot fi prezentate sub diverse forme. Utilizarea lor în practică în studiile de stabilitate ale SEE complexe impune însă satisfacerea de către CD adoptate a următoarelor cerințe /87/:

- a) să fie cât mai simple;
- b) să conțină parametrii ce pot fi identificați pe cale analitică sau experimentală;
- c) să reprezinte cât mai fidel comportarea dinamică a CC;
- d) să fie adaptabile programelor de calcul existente pentru stabilitatea SEE.

Reprezentarea CC prin CD care să satisfacă cerințele precizate mai sus, implică ca și în cazul CS stabilirea în primul rând, a formei acestora și apoi estimarea parametrilor în cadrul identificării analitice sau experimentale.

În vederea alegerii celei mai adecvate forme de reprezentare a CC prin CD și a stabilirii modului de abordare a problemei identificării acestora, în prima parte a prezentului capitol se efectuează o analiză a stadiului actual privind identificarea CD pe baza unei sinteze bibliografice. Stabilindu-se pe baza acestei analize structura CC echivalent, se deduc în subparagraful următor formele CD corespunzătoare acestui CC echivalent, ecuații intrare-stare-ieșire și funcții de transfer liniare.

În paragrafele următoare, 6.2 și 6.3, se prezintă algoritme originale de estimare a parametrilor CD de forma adoptată, considerând distinct identificarea analitică și respectiv experimentală a CC, algoritme bazate pe teoria estimației cu MCMMMP. Astfel, în cadrul identificării bazate pe teoria estimației cu MCMMMP. Astfel, în cadrul identificării analitice a CD ale CC, s-a elaborat un MM pentru CC format din mai multe MI și consumatori statici interconectați printr-o RED complexă, denumit și detaliat și s-au dedus relațiile de calcul pentru parametrii circuitului electric al CC echivalent. Pe baza MM al CC detaliat s-au construit programele de calcul "CONSTA" și "CONTRA" pentru analiza regimu-

lui permanent și respectiv tranzitoriu al acestuia.

Aceste programe au permis simularea diverselor regimuri tranzitorii ale CC reprezentat detaliat și compararea lor cu cele ale CC echivalent avînd parametri estimați anterior, în vederea validării acestor parametri .

6.1.2. Analiza stadiului actual privind identificarea CD ale CC în literatura de specialitate

Preocupările intense, remarcate în ultimele două decenii, pentru elaborarea unor CD ale CC cît mai realiste, sînt reflectate în literatură prin diverse forme de CD obținute, fie prin asamblarea CD ale elementelor componente /50/, /55/, /125/, fie prin estimarea parametrilor pe baza datelor experimentale /39/, /56/, /87/, /131/. Totodată rezultatele testelor experimentale raportate în literatură /9/, /39/, /56/, /89/, /110/, constituie atît informații utile pentru reprezentarea diverselor tipuri de CC prin CD cît și referințe pentru validarea CD nou identificate.

Formele de bază pentru reprezentarea CC prin CD sînt fie ecuații intrare-stare-ieșire neliniare sau liniarizate în jurul punctului permanent de funcționare /55/, /87/, /125/, fie funcții de transfer liniare /129/, /139/.

Din analiza formelor de reprezentare a CC prin CD, precizate în ordine cronologică în tabelul 6.1, se poate remarca o tendință de construire a unor MM riguroase avînd la bază circuitul echivalent al MI ca element dinamic în structura CC, iar estimarea parametrilor CD să se efectueze cu metode statistice cum ar fi MCMMP, /87/, /125/, /129/ sau a verosimilității maxime /37/.

Avînd în vedere faptul că în structura CC, MS au o pondere redusă, cca (10-12)% /25/, /120/, /142/; că au o comportare dinamică asemănătoare cu cea a MI, /26/; și că, oricum, există multe incertitudini referitor la componența și caracteristicile consumatorilor, această categorie de consumatori individuali se consideră că poate fi asimilată MI în vederea obținerii unor forme de CS de o complexitate rezonabilă. În consecință, reprezentarea CC real printr-un MI și un consumator static echivalent , figura 6.1, poate să satisfacă cerințele impuse CD ale CC pentru a fi incluse în programele de calcul a stabilității SEE, cerințe precizate în subparagraful anterior. Acest model de CC echivalent, considerat însă cu diverse grade de detaliere, stă la baza majorității formelor de CD ale CC elaborate în ultimii 15 ani (tabelul 6.1).

Forme de reprezentare a CC prin CD în literatura de specialitate

Sursa bibliografică anul	Structura CD considerate pentru CC	Numărul și lista parametrilor CD	Modul de estimare al parametrilor CD	Comentarii
1	2	3	4	5
/55/ 1974	$\frac{d\underline{U}_e}{dt} = -\frac{1}{T_{do}} [\underline{U}_e - j(X-X') \underline{I}_s] + j\underline{U}_e \frac{d\theta}{dt}$ $\underline{I}_s = (\underline{U} - \underline{U}_e) / (R + jX')$ $T \frac{ds}{dt} = C_m - C_e$	5 T'_{do}, T, X, X', R	Medii ponderate ale param. corespunzătorii componentelor stabilite statistic	Nu consideră caracteristicile cuplurate ale mecatrenelor și elementele de RE din cadrul CC. Parametrii CD astfel obținuți sînt foarte aproximativi. MM este adecvat pentru CC constituiți numai din MI
/50/ 1976	$T \frac{ds}{dt} = K_m \omega^{\beta} - C_e$ $P = \frac{U^2}{X_V} \frac{s/s_m}{1+(s/s_m)^2}$ $Q = \frac{U^2}{X_V} \frac{X_V/X_m + (s/s_m)^2(1+X_V/X_m)}{1+(s/s_m)^2}$	7 $X_m, s, T, T, K_m, \beta, X_V, s, s_m = R_2/X_V$	Parametrii: R_1, X_m, X_V, s prin reducerea circuitelor MI componente, T, K_m, β , ca medii ponderate	Consideră doar MI din componența CC. Nu reprezintă fenomenele tranzitorii rotorice. Estimarea parametrilor CD aproximativă.
/139/ 1981	$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \omega \end{bmatrix}$ <p>unde G_{ij} sînt funcții de transfer polinomiale de ordinul trei.</p>	5 X_s, X', T'_{do}, T, s	Valori medii ponderate ale param. MI componente.	Consideră puterea mecanică rezistentă constantă. Sînt neglijate elementele RE și rezistențele înfășurărilor. Formă utilă în modelizarea SSE pentru stabilitate dinamică
/87/ 1982	$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta U_d \\ \Delta U_q \end{bmatrix}$ $\begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 & d_2 \\ d_3 & d_4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta U_d \\ \Delta U_q \end{bmatrix}$	8 (fără semnificație fizică)	Cu MCMMP pe baza unor teste experimentale (SCC 3F)	Model util programelor de stabilitate statică. MM al MI echivalent este mai redus cu o unitate decît cel uzual pentru MI reale.

INSTITUTUL POLITEHNIC
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

Tabelul 6.1. (continuare)

1	2	3	4	5
/129/ 1982	$P = K_5 \frac{(p+b)(p+a)}{(p+b)^2 + \frac{1}{2}} \Delta U +$ $+ K_2 (1 + p T_F) \Delta \omega$ $Q = K_4 \cdot \Delta U$	6 $K_2, K_4,$ $K_5, a,$ b, T_F	MCMMP ponderate pe baza rezultatelor înregistrate experimental	Număr redus de parametri Expresia pentru Q foarte simplă nu concordă cu aprecierile din literatură /50/,/87/,/139/.
/125/ 1984	$\frac{d \Delta \bar{x}}{dt} = A \Delta \bar{x} + B \Delta \bar{u}$ $\Delta \bar{y} = C \Delta \bar{x} + D \Delta \bar{u}$ (model de ordinul trei)	8 $R, X_G,$ $X_m, R',$ $G_{st},$ $B_{st}, T,$ s_0	Primii șase, prin identificarea CC echivalent lent cu cel detaliat și s prin MCMMP	Reprezintă CC printr-un consumator static (parametrii G_{st} și B_{st}) și un MI echivalent. Nu consideră caracteristicile mecanismelor antrenate.

Notă: Semnificația principalelor simboluri utilizate este cea prezentată în §.2.1. pentru MI.

Numărul maxim al parametrilor care caracterizează acest CC echivalent, așa cum rezultă din schema circuitului său echivalent, (figura 6.1.b) este de nouă (s-a admis $L \nabla_1 = L \nabla_2 = L \nabla$) dintre care,

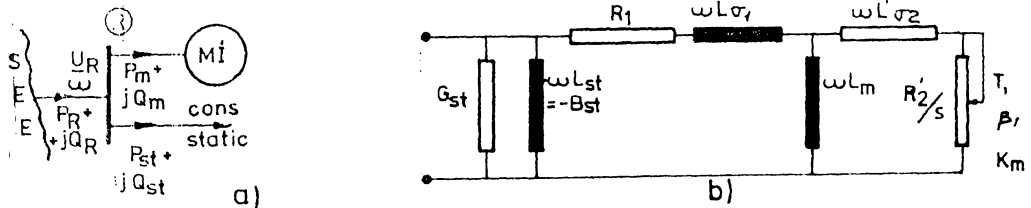


Fig.6.1. CC echivalent: a) schema monofilară; b) schema circuitului echivalent.

doi, G_{st} și B_{st} , caracterizează consumatorul static echivalent, parametri, R_1 , L_G , L_m , R_2 , caracterizează MI echivalent, doi, K_m și β , mecanismul antrenat de acesta, iar unul, T , este comun MI și mecanismul antrenat. Considerarea unor ipoteze simplificatoare reduce numărul parametrilor acestui CC echivalent la (5-8) așa cum rezultă din tabelul 6.1, parametri estimați pînă în anii '80, în general, prin medierea statistică a parametrilor MI componente /50/,/55/,/139/, iar după dezvoltarea teoriei estimației cu MCMMP, în ultimul deceniu, această a devenit metoda de bază pentru estimarea parametrilor CD ale CC /34/,/39/,/87/,/123/,/129/.

Referitor la forma matematică a CD dezvoltate pentru acest

consumator echivalent se remarcă în lucrările mai recente, (după 1980), /87/, /125/, /129/, /139/, tendința utilizării MM liniarizate (ecuații de stare sau funcții de transfer). Acest fapt este justificat de preocupările actuale privind reprezentarea cât mai realistă a comportării SEE la mici perturbații (stabilitate dinamică /150/), reprezentare pe baza căreia se efectuează astăzi practic, în exclusivitate, proiectarea și acordarea echipamentelor de reglaj automat al excitației și vitezei grupurilor electrogene din SEE /53/, /73/, /76/, /82/, /86/.

Problemele care se ridică în continuare sînt pe de o parte, ^{de} a construi pentru acest CC echivalent CD care să reprezinte cât mai fidel comportarea CC real în regimurile dinamice ale SEE, să fie cât mai simplu și să fie adaptabil programelor existente de analiză a stabilității SEE și pe de altă parte, de a elabora algoritme eficiente de estimare a parametrilor acestor CD. Acestor probleme le sînt consacrate următoarele paragrafe ale actualului capitol.

6.1.3. Caracteristicile dinamice ale CC echivalent

6.1.3.1. Aspecte generale

În cadrul prezentului subparagraf, considerînd CC real prin CC echivalent prezentat în figura 6.1, se urmărește deducerea formelor CD ale acestuia, forme care să fie adecvate implementării în algoritmele existente de analiză a stabilității SEE /27/, /68/, /82/. Se are în vedere în acest sens, sistemele de ecuații intrare-stare-ieșire neliniare și liniarizate în jurul punctului permanent de funcționare și funcțiile de transfer liniare în domeniul operațional. Aceste forme ale CD se obțin pornind de la CD rezultate prin asamblarea caracteristicilor consumatorului echivalent static (practic CS) cu CD neliniare ale MI echivalent considerate de forma (2.37) și (2.39). Avînd în vedere observația 2. din §.1.3.2. privind modificarea frecvenței în nodurile consumatoare în regimurile dinamice ale SEE, aceasta poate fi considerată pe durata unui pas de integrare al MM al CC, ca fiind constantă și egală cu valoarea sa de la începutul intervalului respectiv, determinată ca medie ponderată a frecvențelor rotoarelor generatoarelor sincrone din SEE /26/, /27/, /149/. În consecință, modificarea frecvenței în cadrul CD ale CC echivalent care se vor dezvolta în continuare, va fi considerată doar prin modificarea unghiului δ , figura 2.8, de poziție al fazorului tensiunii \underline{U}_R de la bornele sale, față de sistemul de axe de coordonate al SEE.

Rezultă astfel că MM neliniar de stare al MI echivalent (sistemul de ecuații diferențiale (2.37)), se reduce cu o unitate, eliminîndu-se ultima ecuație (2.37).

6.1.3.2. CD ale CC echivalent sub forma ecuațiilor
intrare-stare-ieșire

Componentele, statică și rotativă a CC echivalent, fiind conectate în paralel în nodul de racord, al acestuia cu SEE, fig.6.1, pot fi tratate separat, puterea absorbită de CC echivalent fiind suma componentelor statică (afectată de indicele "st") și rotativă (afectată de indicele "m").

Considerând ipotezele simplificatoare și convențiile de semn prezentate în §.2.2. privind reprezentarea CD ale MI, ecuațiile de stare ale CC echivalent pot fi scrise pe baza sistemului (2.37) astfel:

$$\left\{ \begin{array}{l} d \frac{U_{ed}}{dt} = -U_{ed} [\omega F \cdot B_m + 1/T'_{do}] + U_{eq} [s \omega + \omega F \cdot G_m] - \\ \quad - \omega F \cdot U_R (G_m \sin \delta - B_m \cos \delta) \\ d \frac{U_{eq}}{dt} = -U_{ed} [s \omega + \omega F \cdot G_m] - U_{eq} [\omega F \cdot B_m + 1/T'_{do}] + \\ \quad + \omega F \cdot U_R (G_m \cos \delta + B_m \sin \delta) \\ \frac{d\delta}{dt} = K_m [\omega(1-s)]^{\beta+1} - U_{ed} [U_R \sin \delta - U_{eq}] \cdot B_m + (U_R \cos \delta - U_{ed}) G_m - \\ \quad - U_{eq} [U_R \sin \delta - U_{eq}] G_m - (U_R \cos \delta - U_{ed}) B_m \end{array} \right. \quad (6.1)$$

unde pentru simplificarea scrierii s-a introdus notația:

$$F = \omega_o (L_R - L') / T'_{do} = \omega_o L_m^2 / (L_R \cdot T'_{do}) \quad (6.2)$$

iar toate celelalte simboluri au semnificațiile precizate în §.2.1.

Ecuațiile algebrice de ieșire ale CC echivalent se obțin considerând expresiile (2.39) pentru puterile P_m și Q_m la care se însușează puterile $P_{st} = U_R^2 G_{st}$ și $Q_{st} = -U_R^2 B_{st}$ absorbite de consumatorul static echivalent, obținându-se astfel:

$$\begin{bmatrix} P_R \\ Q_R \end{bmatrix} = U_R \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} G_m & B_m \\ -B_m & G_m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_R \cos \delta - U_{ed} \\ U_R \sin \delta - U_{eq} \end{bmatrix} + U_R^2 \begin{bmatrix} G_{st} \\ -B_{st} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Ecuațiile (6.2) și (6.3) constituie forma neliniară a CD ale CC echivalent. Aceste caracteristici determină răspunsul CC echivalent prin puterea absorbită P_R și Q_R la modificarea modului U_R și a fazei δ , a tensiunii de la bornele sale în regimurile dinamice și tranzitorii ale SEE. Modificarea frecvenței tensiunii la borne,

conform celor discutate în subparagraful precedent, intervine în CD prezentate mai sus, prin modificarea unghiului δ dat de relația : $\delta = \delta_0 + (\omega - \omega_0) \Delta t$; (6.3'); unde δ_0 și ω_0 sînt unghiul de poziție și respectiv pulsația tensiunii la începutul intervalului Δt , considerat pentru integrarea sistemului de ecuații (6.1).

Prin liniarizarea sistemelor de ecuații (6.1) și (6.3) în jurul punctului permanent de funcționare, caracterizat prin mărimile la borne U_{Ro} , ω_0 și mărimilor de stare U_{edo} , U_{eqo} , s_0 rezultă forma liniarizată a CD ale MI echivalent scrisă sub formă matriceală:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta U_{ed} \\ \Delta U_{eq} \\ \Delta s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T'_{do} - F \cdot B_m & \omega_0 s_0 + F \cdot G_m & \omega_0 U_{eqo} \\ -\omega_0 s_0 - F \cdot G_m & -1/T'_{do} - F \cdot B_m & -\omega_0 U_{edo} \\ \frac{(2U_{edo} - U_{Ro}) G_m}{T} & \frac{2U_{eqo} G_m + U_{Ro} B_m}{T} & \frac{-K_m (\beta + 1) \omega_0^{\beta + 1}}{T \cdot (1 - s_0)^{-\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{ed} \\ \Delta U_{eq} \\ \Delta s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F \cdot B_m & -F \cdot G_m \\ F \cdot G_m & F \cdot B_m \\ \frac{U_{eqo} B_m - U_{edo} G_m}{T} & \frac{-U_{edo} B_m - U_{eqo} G_m}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_R \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{Rqo} B_m - U_{Rdo} G_m & -U_{Rdo} B_m - U_{Rqo} G_m \\ U_{Rqo} G_m - U_{Rdo} B_m & U_{Rdo} G_m - U_{Rqo} B_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{ed} \\ \Delta U_{eq} \end{bmatrix} + \Delta U_R^*$$

$$\begin{bmatrix} G_m (2U_{Rdo} - U_{edo}) - U_{eqo} \cdot B_m & B_m U_{edo} + G_m (2U_{Rqo} - U_{eqo}) \\ U_{eqo} G_m - B_m (2U_{Rdo} - U_{edo}) & B_m (2U_{Rqo} - U_{eqo}) - G_m \cdot U_{edo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} + 2U_{Ro} \begin{bmatrix} G_{st} \\ -B_{st} \end{bmatrix}$$

unde: $U_{Rdo} = U_{Ro} \cdot \cos \delta_0$ și $U_{Rqo} = U_{Ro} \sin \delta_0$, reprezintă componentele fazorului tensiunii \underline{U}_{Ro} pe axele d, respectiv q, de coordonate ale SFB.

CD ale CC echivalent, obținute în cadrul prezentului subparagraf, permit obținerea răspunsului tranzitoriu în timp al acestuia prin rezolvarea sistemelor de ecuații (6.1) și (6.3) în cazul perturbațiilor mari de tensiune și prin rezolvarea MM liniarizat (6.4) în cazul perturbațiilor mici. În acest scop, aceste CD au fost implementate în programele de calcul denumite "TRACTAS" (pentru CD neliniare (6.1) și (6.3)) și TRACS (pentru CD liniarizate (6.4)). Aceste programe de calcul au fost utilizate și în capitolul 2 pentru validarea CD neliniare și liniarizate ale MI, prin compararea răspunsurilor tranzitorii ale unor MI, determinate experimental, cu cele determinate de CD ale aceluiași MI pentru aceleași perturbații.

6.1.3.3. CD ale CC echivalent sub forma funcțiilor de transfer liniare

CD ale CC echivalent liniarizate în jurul punctului permanent de funcționare (6.4), de forma generală (1.4), pot fi reprezentate conform schemei bloc din figura 6.2.a). Prin aplicarea transformării Laplace ecuațiilor (6.4) și eliminarea mărimilor de stare, conform relației (1.5), se obțin CD ale CC echivalent sub forma funcțiilor de transfer liniare, figura 6.2.b).

Problema dificilă a trecerii de la CD liniarizate (6.4) la funcțiile de transfer conform relației (1.5) o constituie inversarea analitică a matricei operaționale $[p[I] - [A]]$. Utilizând în acest scop algoritmul Leverier-Madeev /35/, s-a obținut pentru sistemul de ecuații (6.4) matricea:

$$[p[I] - [A]]^{-1} = \frac{[Y_1]p^2 + [Y_2]p + [Y_3]}{p^3 + x_1p^2 + x_2p + x_3} \quad (6.5)$$

unde: $[I]$ este matricea identitate; p este operatorul Laplace, iar matricele $[Y_1]$ $[Y_2]$ $[Y_3]$ având dimensiunea (3×3) și coeficienții x_1, x_2 și x_3 , se determină cu următoarele relații de recurență /35/:

$$\begin{aligned} [Y_1] &= [I]; \quad x_1 = -t_r([A]) \\ [Y_2] &= [Y_1] \cdot [A] + x_1 [I]; \quad x_2 = -\frac{1}{2} t_r([Y_2] \cdot [A]) \\ [Y_3] &= [Y_2] \cdot [A] + x_2 [I]; \quad x_3 = -\frac{1}{3} t_r([Y_3] \cdot [A]) \end{aligned} \quad (6.6)$$

Notă: " t_r " - semnifică urma matricei (suma elementelor de pe diagonala principală).

Introducând expresia matriceală (6.5) în relația (1.5), se obține funcția de transfer $[H(p)]$, având expresia (6.7) prezentată în figura 6.2.b), care poate fi adusă prin efectuarea operațiilor matriciale la forma:

$$[H(p)] = \begin{bmatrix} H_P(p) \\ H_Q(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}p^2 + a_{12}p + a_{13} + d_{11}}{p^3 + x_1p^2 + x_2p + x_3} \\ \frac{a_{21}p^2 + a_{22}p + a_{23} + d_{21}}{p^3 + x_1p^2 + x_2p + x_3} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

unde coeficienții $a_{11} \dots a_{23}$ depind de parametrii MI echivalent și valorile mărimilor de stare inițiale iar termenii d_{11} și d_{21} sînt

identici cu elementele corespunzătoare ale matricei [D] ale modelului liniarizat, (6.4), al CD al CC echivalent. S-au obținut astfel CD ale

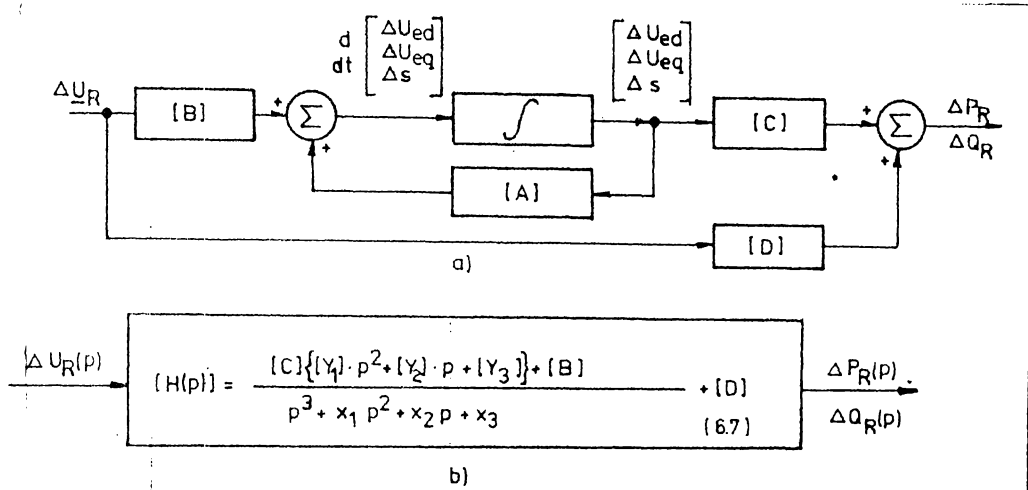


Fig.6.2. Structura CD liniarizate ale CC echivalent: a) ecuații intrare-stare-ieșire; b) funcții de transfer liniare.

CC echivalent sub forma funcțiilor de transfer liniare monovariabile:

$$\Delta P_R(p) = H_P(p) \cdot \Delta U_R(p) \quad ; \quad \Delta Q_R(p) = H_Q(p) \cdot \Delta U_R(p); \quad (6.9)$$

care permit evaluarea răspunsului tranzitoriu al CC echivalent $\Delta P_R(p)$ și $\Delta Q_R(p)$ la orice perturbație $\Delta U_R(p)$ a tensiunii la bornele sale, toate mărimile fiind exprimate în domeniul operațional.

În vederea obținerii coeficienților funcțiilor de transfer $H_P(p)$ și $H_Q(p)$ pe baza CD liniarizate (6.4) ale CC echivalent, a fost elaborat programul de calcul denumit "LF", avînd la bază relațiile (1.5), (6.6) și (6.7). Validarea algoritmului și programului "LF" s-a efectuat prin compararea frecvenței de oscilație și a amortizării răspunsului tranzitoriu al CC echivalent, reprezentat prin CD liniarizate (6.4), cu cele obținute pe baza valorilor proprii dominante ale funcțiilor de transfer corespunzătoare, considerînd aceleași perturbații ($\Delta U_R = -0,1$ u.r.n.).

6.2. Identificarea analitică a CD ale CC

6.2.1. Introducere

Așa cum s-a prezentat în primul capitol, identificarea analitică a CD ale CC constă din asamblarea CD ale consumatorilor componente ținînd seama de modul lor de interconectare și de ponderile cu care in-

tervin în structura CC, denumit în continuare, detaliat sau real pentru a-l distinge de CC echivalent definit în §.6.1, (figura 6.1). Aceasta presupune cunoașterea parametrilor circuitelor echivalente ale MI și consumatorilor statici componenți, regimurile lor de funcționare, structura și parametrii electrici ai RED. Referitor la obținerea acestor date se fac următoarele precizări:

1. Parametrii electrici ai circuitelor echivalente R_1 , R_2^1 și L_m ale MI, pot fi determinate în cazurile în care nu se dispune de rezultatele probelor de laborator corespunzătoare, utilizând relațiile aproximative de calcul ale acestor parametri pe baza datelor de catalog prezentate în /101/. În cazul MI din seria unitară ASI valorile parametrilor circuitelor echivalente exprimate în u.r.n. determinate pe baza încercărilor de laborator, sînt prezentate în /95/.

2. Considerînd cunoscute din calculul circulației de puteri pentru fiecare MI puterea activă P_{mo} și tensiunea U_{bo} la bornele sale în regimul permanent considerat, determinarea alunecării efective s_0 în acest regim se poate efectua cu o metodă iterativă de tip Newton /30/. Relația de recurență pentru alunecarea s_0^i la iterația, i , este:

$$s_0^i = s_0^{i-1} + \frac{P_{mo} - P(s_0^{i-1})}{\left. \frac{\partial P}{\partial s} \right|_{s=s_0^{i-1}}} \quad (6.10)$$

unde: $P(s_0^{i-1})$ este expresia puterii active absorbite de MI în funcție de alunecarea s_0^{i-1} , conform primei relații (2.7); iar $\left. \frac{\partial P}{\partial s} \right|_{s=s_0^{i-1}}$ reprezintă derivata sa în raport cu alunecarea evaluată pentru $s=s_0^{i-1}$. Expresia sa obținută din (2.7) este:

$$\frac{\partial P}{\partial s} = \frac{U_{bo}^2 \cdot R_2^1 / s^2 [(R_1 + cR_2^1 / s)^2 - (\omega L_{\sigma}(1+c))^2]}{[(R_1 + cR_2^1 / s)^2 + (\omega L_{\sigma}(1+c))^2]^2} \quad (6.11)$$

Că valoare inițială pentru alunecarea s_0 , în vederea emersării calculului iterativ, se consideră $s_0 = R_2^1$.

3. Celelalte date, parametrii electrici ai RED și ai consumatorilor statici ai CC, se determină pe baza datelor de catalog ale acestora cu relațiile cunoscute /6/, /24/.

Considerînd cunoscute aceste date ale CC real, se demonstrează în paragraful următor că se pot obține pentru acesta CD de formă similară cu cele obținute pentru CC echivalent, CD prezentate în subparagraful 6.1.

Pornind de la aceste CD ale CC real, obținute prin asamblarea CD ale consumatorilor componenți, în continuare se abordează problema estimării parametrilor circuitului electric echivalent, fig.6.1.b, al CC considerat. Astfel în subparagraful 6.2.3, pe baza condiției de identitate a regimurilor permanente ale CC real și echivalent, se deduc relațiile de calcul pentru următorii șase parametri ai circuitului echivalent: R_1 , R_2/s_0 , L_T , L_m , G_{st} și B_{st} , iar în subparagraful următor, 6.2.4, se prezintă un algoritm de estimare a celorlalți trei parametri T , T'_{do} și β ai CC echivalent pe baza condiției de comportare tranzitorie identică a CC real și echivalent, la diverse tipuri de perturbații.

6.2.2. CD ale CC real (detaliat)

În cadrul prezentului subparagraf se dezvoltă MM nelinier și cel liniarizat în jurul punctului permanent de funcționare al CC real, considerat a fi racordat la SEE într-un singur nod notat "R", cu o RED avînd r noduri dintre care în n fiind conectate MI individuale sau MI echivalente unor grupuri de MI. Pentru CD ale MI care se vor considera în continuare, se vor adopta ipotezele simplificatoare și convențiile de semn precizate în §.2.2. De asemenea semnificațiile notațiilor utilizate pentru MM ale MI vor fi, în general, cele prezentate în §.2.1.

6.2.2.1. Reprezentarea elementelor componente ale CC

MM al CC real, constă din ansamblul MM ale RED, consumatorilor statici și ale MI din structura sa.

Reprezentarea RED a CC se va efectua prin matricea de admitanță nodală de scurtcircuit $[Y']$ /24/, /94/, /120/ avînd dimensiunea $(r+1) \times (r+1)$. Afec-tînd cu indicele "R" mărimile corespunzătoare nodului (R), matricea $[Y']$ se partici-ponează conform fi-gurii 6.3, unde: $[Y'_R]$ este admitanța pro-prie a nodului (R);

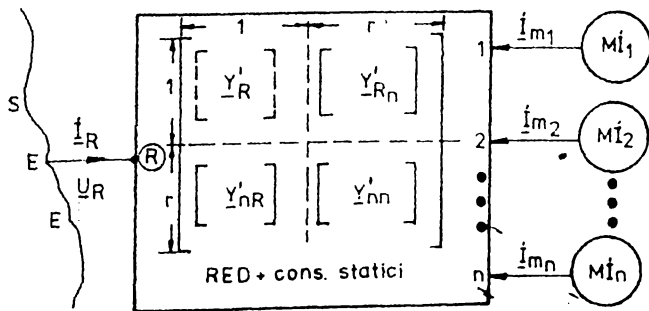


Fig.6.3. Reprezentarea detaliată a CC cu precizarea semnificațiilor notațiilor utilizate

$[Y'_{Rn}]$, $[Y'_{nR}]$ și $[Y'_{nn}]$ sînt submatrice ale matricei $[Y']$, corespunzătoare celorlalte r noduri ale RED.

Notă: Pentru simplificarea scrierii, în continuare se va renunța la parantezele închise ($[]$) pentru marcarea submatricelor, semnificația lor subînțelegîndu-se.

Consumatorii statici ai CC vor fi reprezentați prin admitanțe constante conform relației

$$Y_{st} = G_{st} + jB_{st} = P_{st}/U_1^2 - jQ_{st}/U_1^2 \quad (6.12)$$

care pot fi incluse în matricea nodală de scurtcircuit $[Y']$ prin aditionare la admitanțele proprii ale nodurilor la care sînt racordați.

Prin reprezentarea consumatorilor statici sub formă de admitanțe constante, nodurile în care nu sînt racordate MI au devenit pasive ceea ce permite reducerea matricei de admitanță nodală la dimensiunea $(n+1) \times (n+1)$. În acest scop se aplică o procedură de eliminare gaussiană a nodurilor pasive, conform relației de recurență /61/, /120/:

$$Y_{ij}^n = Y_{ij}^v - \frac{Y_{ik}^v \cdot Y_{kj}^v}{Y_{kk}^v} \quad (6.13)$$

unde: k este nodul eliminat; Y_{ij}^v , Y_{ik}^v , Y_{kj}^v sînt elemente ale matricei $[Y]$ obținute la sfîrșitul pasului anterior (corespunzător eliminării nodului $k-1$), iar Y_{ij}^n este elementul rămas în matrice după eliminarea nodului pasiv k .

Relația (6.13) se aplică pentru toate cele $(r-n)$ noduri pasive ale RED a CC, obținîndu-se o nouă matrice de admitanță nodală $[Y^n]$ cu dimensiunea $(n+1) \times (n+1)$.

MI de structura CC se vor reprezenta printr-o t.e.m. \underline{U}_g în spatele unei impedanțe $R+j\omega L$; conform schemei electrice echivalente prezentată în figura 2.10.

6.2.2.2. MM nelinier al CC real

Sistemul ecuațiilor diferențiale de stare

Pentru obținerea sistemului ecuațiilor diferențiale de stare ale CC real, se reprezintă fiecare MI prin sistemul de ecuații diferențiale (2.34), completate cu ecuația de mișcare a rotoarelor (2.27). Rezultă astfel pentru fiecare MI cîte un sistem de trei ecuații diferențiale care pot fi scrise pentru un MI oarecare, i , sub forma

implicită:

$$\frac{d\bar{x}_i}{dt} = f(\bar{x}_i, \bar{I}_i) \quad (6.14)$$

unde \bar{x}_1 este vectorul mărimilor de stare, $\bar{x}_1 = [U_{edi}, U_{eqi}, s_1]^t$, iar \bar{I}_1 - vectorul componentelor pe axele d și q ale curentului absorbit, $\bar{I}_1 = [I_{di}, I_{qi}]^t$.

Pentru eliminarea din ecuațiile de stare (2.27) a curentilor absorbiți de MI, se consideră relația nodală a RED:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_R \\ \underline{I}_{m1} \\ \vdots \\ \underline{I}_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{RR} & \underline{Y}_{Rm1} & \dots & \underline{Y}_{Rmn} \\ \underline{Y}_{m1,R} & \underline{Y}_{m1m1} & \dots & \underline{Y}_{m1mn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{mnR} & \underline{Y}_{mnm1} & \dots & \underline{Y}_{mnmn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{U}_{e1} \\ \vdots \\ \underline{U}_{en} \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

unde $\underline{I}_R, \underline{I}_{m1}, \dots, \underline{I}_{mn}$ reprezintă curenții injectați în RED de către nodul (R) și de cele n MI considerate în CC, iar matricea $[\underline{Y}]$ este o nouă matrice de admitanță nodală obținută astfel:

a) se augmentează matricea de admitanță nodală $[\underline{Y}']$ obținută mai sus cu încă n noduri și impedanțele $R_i + j\omega L_i'$ ($i=1, n$) corespunzătoare schemelor echivalente (figura 2.10) ale fiecărui MI, obținându-se o nouă matrice de admitanță nodală $[\underline{Y}''']$ cu dimensiunea $(2n+1) \times (2n+1)$;

b) nodurile corespunzătoare bornelor celor n MI ale CC, devin astfel pasive, se reduc utilizând procedura de eliminare gaussiană prezentată anterior.

Noua matrice de admitanță nodală $[\underline{Y}]$ astfel obținută, având dimensiunea $(n+1) \times (n+1)$ se partitionează și se separă pe componente reale și imaginare devenind de forma:

$$[\underline{Y}] = \begin{bmatrix} | & \text{---} 1 \text{---} & | & \text{---} n \text{---} \\ | & G_R & | & G_{Rn} \\ | & \text{---} & | & \text{---} \\ | & G_{nR} & | & G_{nn} \\ | & \text{---} & | & \text{---} \\ | & n & | & \text{---} \\ | & \text{---} & | & \text{---} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} | & \text{---} 1 \text{---} & | & \text{---} n \text{---} \\ | & B_R & | & B_{Rn} \\ | & \text{---} & | & \text{---} \\ | & B_{nR} & | & B_{nn} \\ | & \text{---} & | & \text{---} \\ | & n & | & \text{---} \\ | & \text{---} & | & \text{---} \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

Pe baza proprietății de simetrie față de diagonala principală a matricei de admitanță nodală avem: $G_{Rn} = G_{nR}^t$ și $B_{Rn} = B_{nR}^t$ (6.16')

Având în vedere relațiile de trecere de la mărimi complexe la componente d, q conform convențiilor stabilite în §.2.2. și diagrama fazorială din figura 2.8, se pot scrie relațiile:

$$\underline{I}_{mi} = -(I_{di} + jI_{qi}) ; \underline{U}_{e1} = U_{edi} + jU_{eqi} ; \underline{U}_R = U_{Rd} + jU_{Rq} ; \quad (6.17)$$

unde mărimile notate cu indicii d și q reprezintă componentele mărimii respective pe axele de coordonate d, q.

Pentru simplificarea scrierii relațiilor, în continuare se introduc următorii vectori:

$$\begin{aligned} \bar{I}_d &= [I_{d1}, I_{d2} \dots I_{dn}]^t ; \quad \bar{I}_q = [I_{q1}, I_{q2} \dots I_{qn}]^t ; \\ \bar{U}_{ed} &= [U_{ed1}, U_{ed2} \dots U_{edn}]^t ; \quad \bar{U}_{eq} = [U_{eq1}, U_{eq2} \dots U_{eqn}]^t \end{aligned} \quad (6.18)$$

Pe baza relației nodale (6.15) se pot exprima, utilizând notațiile (6.18), componentele curenților absorbiți de cele n MI astfel:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_d \\ \bar{I}_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \overset{n}{\downarrow} & \overset{n}{\downarrow} \\ G_{nR} & -B_{nR} \\ \hline \hline B_{nR} & G_{nR} \\ \overset{n}{\uparrow} & \overset{n}{\uparrow} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_{Rd} \\ U_{Rq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overset{n}{\downarrow} & \overset{n}{\downarrow} \\ G & -B \\ \hline \hline B & G \\ \overset{n}{\uparrow} & \overset{n}{\uparrow} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{U}_{ed} \\ \bar{U}_{eq} \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Înlocuind în ecuațiile de stare (6.14) curenții \bar{I}_i absorbiți de MI cu expresia lor (6.19), rezultă sistemul ecuațiilor de stare ale CC real. Pentru a exprima aceste ecuații în funcție de mărimile de sistem, modulul tensiunii la bornele CC, U_R , și pulsația sa ω , se exprimă fazorii tensiunii \underline{U}_R astfel: $\underline{U}_R = U_R(\cos \delta + j \sin \delta)$ unde unghiul de poziție δ al tensiunii \underline{U}_R se exprimă conform relației (6.3'), obținându-se astfel sistemul ecuațiilor de stare adecvat reprezentării CC prin CD de tensiune și frecvență de forma implicită:

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = f(\bar{X}, U_R, \omega) \quad (6.20)$$

unde \bar{X} este vectorul mărimilor de stare, $\bar{X} = [\bar{U}_{ed}^t, \bar{U}_{eq}^t, \bar{s}^t]^t$, avînd dimensiunea (3nx1).

Forma explicită a sistemului de ecuații de stare (6.20) (3n ecuații diferențiale) este extrem de laborioasă. Avînd în vedere faptul că în programul de calcul care s-a elaborat în continuare pentru analiza regimului tranzitoriu al CC real reprezentat prin MI neliniare, "CONTRAȘ", se rezolvă practic numai sistemul de ecuații (6.14) în care se introduc curenții determinați conform ecuațiilor (6.19), forma explicită a ecuațiilor (6.20) nu este utilă.

Sistemul de ecuații algebrice de ieșire al CC real

În vederea definitivării CD ale CC real se urmărește exprimarea puterii active, P_R și reactive, Q_R , absorbite de acesta în funcție de modulul tensiunii U_R din nodul de racord și de pulsația sa ω .

În acest scop, din prima linie a relației nodale (6.15), se exprimă curențul \underline{I}_R injectat în nodul (R) al CC sub formă matriceală prin componentele sale pe axele d, q astfel:

$$\begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Rq} \end{bmatrix} = U_R \begin{bmatrix} G_R & -B_R \\ B_R & G_R \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \overbrace{1 \dots n} & \overbrace{1 \dots n} \\ \hline 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{Rn} & -B_{Rn} \\ B_{nR} & G_{nR} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \overline{U}_{ed} \\ \overline{U}_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n \\ n \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

Introducînd expresiile (6.21) ale curenților absorbiți de CC într-o expresie de forma (2.38), rezultă expresiile puterilor P_R și Q_R la borna \textcircled{R} a CC real de forma:

$$\begin{bmatrix} P_R \\ Q_R \end{bmatrix} = U_R^2 \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} G_R & -B_R \\ B_R & G_R \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix} + U_R \begin{bmatrix} G_{Rn} & -B_{Rn} \\ B_{nR} & G_{nR} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \overline{U}_{ed} \\ \overline{U}_{eq} \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Considerînd și dependența fazei δ a tensiunii U_R de pulsația sa ω conform relației (6.3'), relația matriceală (6.22) reprezintă tocmai sistemul de ecuații algebrice de ieșire ale CC ale CC real.

6.2.2.3. MM liniarizat al CC real

Prin liniarizarea sistemului de ecuații de stare (6.20) în jurul punctului de funcționare permanent al componentelor CC real, caracterizat prin mărimile de intrare U_{R0} , ω_0 , δ_0 , și mărimile de stare U_{edoi} , U_{eqoi} , s_{oi} ($i=1, n$), se obține un sistem de ecuații diferențiale de stare de forma generală (1.4) care poate fi scris mai explicit astfel:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta \overline{U}_{ed} \\ \Delta \overline{U}_{eq} \\ \Delta \overline{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \overline{U}_{ed} \\ \Delta \overline{U}_{eq} \\ \Delta \overline{s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \\ B_{31} & B_{32} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \delta_0 \\ \sin \delta_0 \end{bmatrix} \Delta U_R \quad (6.23)$$

unde vectorul mărimilor de stare $\Delta \overline{x} = [\Delta \overline{U}_{ed}, \Delta \overline{U}_{eq}, \Delta \overline{s}]^t$ are dimensiunea $3n$, fiind constituit din mărimile de stare ale MM ale fiecărui MI.

Submatricele componente ale matricelor $[A]$ și $[B]$ avînd dimensiunile (nxn) și respectiv $(nx1)$, s-au obținut prin înmulțirea unor matrice diagonale formate din parametrii sau mărimile de stare inițiale ale MI, cu matricele G , B , G_{nn} sau B_{nn} avînd structura matricei de admitanță nodală de scurtcircuit (simetrică față de diagonala principală) cu dimensiunea (nxn) . Elementele acestor submatrice sînt prezentate sintetic în tabelul 6.2.

Notă: Pentru simplificarea scrierii expresiilor termenilor din tabelul 6.2 s-a introdus notația: $F_i = \omega_0 (Ls_i - L_i') / T_{doi}$ (6.24)

Expresiile elementelor submatricelor [A] și [B]
din relația (6.23)

Tabelul 6.2.

Elementele submatricelor [A]			Elementele submatricelor [B]	
Submatricea	Diagonale (i,i) i=1,n	Nediagonale (i,j) i=1,n j=1,n i≠j	Submatricea	Elementul (i,l) i=1,n
A 11	$-1/T_{oi}' + B_{ii} F_i$	$B_{ij} \cdot F_i$	B 11	$B_{nRi,1} \cdot F_i$
A 12	$\omega_o S_{oi} + G_{ii} F_i$	$G_{ij} \cdot F_i$	B 12	$G_{nRi,1} \cdot F_i$
A 13	$\omega_o U_{eqoi}$	-	B 21	$-G_{nRi,1} \cdot F_i$
A 21	$-\omega_o S_{oi} - G_{ii} F_i$	$-G_{ij} \cdot F_i$	B 22	$B_{nRi,1} \cdot F_i$
A 22	$-1/T_{oi}' + B_{ii} F_i$	$B_{ij} \cdot F_i$	B 31	$(U_{edoi} \cdot G_{nRi,1} + U_{eqoi} \cdot B_{nRi,1}) / T_i$
A 23	$-\omega_o U_{edoi}$	-	B 32	$(U_{eqoi} \cdot G_{nRi,1} - U_{edoi} \cdot B_{nRi,1}) / T_i$
A 31	$(U_{edoi} G_{ii} - I_{doi} + U_{eqoi} B_{ii}) / T_i$	$(U_{edoi} G_{ij} + U_{eqoi} B_{ij}) / T_i$		
A 32	$(U_{eqoi} G_{ii} - I_{qoi} - U_{edoi} B_{ii}) / T_i$	$(U_{eqoi} G_{ij} - U_{edoi} B_{ij}) / T_i$		
A 33	$\frac{-K_{mi} (\beta_i + 1) \omega_o^{\beta_i + 1}}{T_i (1 - S_{oi})^{-\beta_i}}$	-		

În tabelul 6.2 elementele submatricelor G, B, G_{Rn} și B_{Rn} au fost notate cu aceleași litere afectate însă de indicii i, j, ai liniei și respectiv, coloanei pe care se găsesc.

Pentru construirea sistemului de ecuații algebrice de ieșire se liniarizează în jurul punctului permanent de funcționare caracterizat de U_{Ro} , I_{Ro} , P_{Ro} , Q_{Ro} , expresiile puterilor activă și reactivă absorbite de CC de la SEE scrise de forma (2.38) rezultă

$$\begin{bmatrix} \Delta P_R \\ \Delta Q_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{Rdo} & I_{Rqo} \\ -I_{qRo} & I_{dRo} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_{Rd} \\ \Delta U_{Rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{Rdo} & U_{Rqo} \\ U_{Rqo} & -U_{Rdo} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta I_{Rd} \\ \Delta I_{Rq} \end{bmatrix} \quad (6.25)$$

$$\text{unde } I_{Rdo} = I_{Ro} \cos(\delta_o - \varphi); \quad I_{Rqo} = I_{Ro} \sin(\delta_o - \varphi) \quad (6.26)$$

în conformitate cu diagrama fazorială din figura (2.3) în care s-a admis defazajul φ al curentului față de tensiune ca fiind pozitiv dacă CC absoarbe putere reactivă inductivă.

Exprimând componentele ΔI_{Rd} și ΔI_{Rq} ale abaterii curentului absorbit de CC real în funcție de abaterea tensiunii ΔU_R la bornele sale și mărimile de stare ale MI cuprinse în vectorii ΔU_{ed} și ΔU_{eq} prin liniarizarea ecuațiilor (6.21), acestea se introduc în relația

matricială (6.25), obținându-se astfel sistemul de ecuații algebrice de ieșire al CD ale CC real:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_R \\ \Delta Q_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{Rn} & -B_{Rn} \\ -B_{Rn} & -G_{Rn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \bar{U}_{ed} \\ \Delta \bar{U}_{eq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta U_{Rd} \\ \Delta U_{Rq} \end{bmatrix}; \quad (6.26)$$

unde elementele matricei [D] au expresiile:

$$\begin{aligned} D_{11} &= G_R U_{Rdo} + B_R U_{Rqo} + I_{Rdo}; & D_{12} &= U_{Rqo} G_R - U_{Rdo} B_R + I_{Rqo}; \\ D_{21} &= G_R U_{Rqo} - B_R U_{Rdo} - I_{Rqo}; & D_{22} &= I_{Rdo} - U_{Rqo} B_R - U_{Rdo} G_R. \end{aligned} \quad (6.27)$$

Asamblînd sistemele de ecuații (6.23) și (6.26), se obține MM ce reprezintă CD liniarizate ale CC real (detaliat) cu considerarea MI individuale sau echivalente, a RED și a consumatorilor statici echivalenți din structura sa.

6.1.2.4. Răspunsul tranzitoriu al CC real la perturbații de tensiune la bornele sale

CE ale CC real elaborate în cadrul prezentului § atît sub formă neliniară cît și liniarizată, permit analiza comportării acestuia în regim tranzitoriu atît în vederea validării acestor MM cît și a estimării parametrilor modelului echivalent al CC.

Perturbația considerată fiind o modificare conform unui anumit scenariu a tensiunii din nodul de racord al CC, analiza regimului tranzitoriu al acestuia implică parcurgerea următoarelor etape:

a) considerînd cunoscuți parametrii electrici și configurația RED, parametrii electrici ai circuitelor echivalente ale MI și consumatorilor statici, se efectuează calculul regimului permanent anteperturbație al MI (se determină U_{edoi} , U_{eqoi} , s_{oi} , Q_{oi} pentru $i=1, n$) și se construiește matricea de admitanță nodală de scurtcircuit [\underline{Y}] sub forma redusă (6.16);

b) se calculează componentele I_{di} , I_{qi} ale curenților absorbiți de fiecare MI cu relația (6.19) în urma perturbației considerate prin modificarea tensiunii la borne U_R ;

c) se determină t.e.m. U_{edi} , U_{eqi} și alunecările s_i ale fiecărui MI prin integrarea sistemului de ecuații diferențiale de stare ale MI (2.34) și (2.27);

d) se determină puterile P_R și Q_R absorbite de CC real la pasul de timp dat utilizînd relațiile (6.22) și abaterile acestora față de regimul permanent anteperturbație : $\Delta P = P_R - P_{Ro}$; $\Delta Q = Q_R - Q_{Ro}$;

e) se majorează timpul cu un interval de integrare, Δt , și se reia algoritmul de calcul de la punctul b) pînă la atingerea timpului final de analiză a regimului tranzitoriu.

Deoarece programul de calcul elaborat pe baza acestui algoritm depășește capacitatea unui microcalculator de 48 k (tip TIM-S), algoritmul a fost implementat în două programe distincte denumite convențional "CONSTA", pentru calculul circulației de putere, construcția matricii de admitanță nodală redusă și calculul mărimilor caracteristice regimului permanent al MI componente și programul "CONTRA", pentru determinarea regimului tranzitoriu al CC real dat, prin rezolvarea MM nelinier (sistemele de ecuații (6.20) și (6.22)) ale CC real.

Programele de calcul "CONSTA" și "CONTRA" au fost utilizate practic, pentru determinarea regimurilor tranzitorii și estimarea parametrilor CC echivalent ai unui CC industrial, rezultatele fiind prezentate în ultimul capitol al lucrării.

6.2.3. Determinarea parametrilor circuitului electric al CC echivalent

6.2.3.1. Determinarea parametrilor consumatorului static echivalent

Considerînd consumatorul static echivalent din modelul CC format din suma consumatorilor individuali de acest tip, parametrii săi se determină cu relațiile:

$$G_{st} = P_{st}/U_R^2 ; \quad \text{și} \quad L_{st} = Q_{st}/(\omega_0 \cdot U_R^2) ; \quad (6.28)$$

unde P_{st} și Q_{st} reprezintă suma puterilor activă, respectiv reactivă absorbite de consumatorii statici din structura CC real.

6.2.3.2. Determinarea parametrilor electrici ai MI echivalent

6.2.3.2.1. Determinarea rezistenței statorice R și inductanței tranzitorii L' .

Considerînd MI echivalent prin schema electrică din figura 6.4, se impune condiția ca admitanța proprie de scurtcircuit a MI echivalent $Y_{Re} = 1/(R + j\omega L')$, figura 6.4, să fie

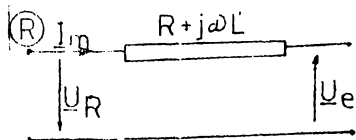


Fig.6.4. Schema electrică a MI echivalent.

identică cu admitanța proprie de scurtcircuit, Y_{Rc} , a CC real față de nodul de record \textcircled{R} . Admitanța proprie, Y_{Rc} , se obține considerînd matricea $[Y]$ de admitanță nodală de scurtcircuit a CC real, însă fără

consumatorii statici reprezentați distinct în CC echivalent, care se reduce la un singur element Y_{RC} , prin eliminarea cu relațiile (6.13) a tuturor nodurilor, cu excepția nodului de racord \textcircled{R} .

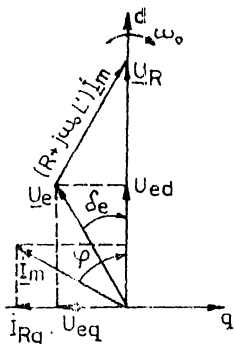
Din condiția:

$$\frac{1}{R + j\omega L'} = Y_{RC} \quad (6.29)$$

prin egalarea părților reale și imaginare rezultă rezistența R și inductanța L' ale MI echivalent.

6.2.3.2.2. Determinarea inductanțelor L_B , L_V și L_m și a rezistenței rotorice raportate la alunecare, R'_2/s_0

Admițînd ipotezele și convențiile de semn stabilite în §.2.2., tensiunea U_{Ro} după axa d a sistemului de coordonate, iar curentul I_{mo} absorbit de MI echivalent, defazat în urma sa cu unghiul $\varphi = \arctg Q_{mo}/P_{mo}$, conform diagramei fazoriale din figura 6.5., rezultă:



$$U_{Rd} = U_R; U_{Rq} = 0; I_{Rd} = I_m \cos \varphi; I_{Rq} = I_m \sin \varphi \quad (6.30)$$

Introducînd notațiile (6.30) în sistemul de ecuații (2.34) pentru regimul permanent

($\frac{dU}{dt} = 0$) rezultă componentele t.e.m. U_{eo} :

$$U_{edo} = T'_{do} \cdot s_0 \omega_0 U_{eqo} + \frac{\omega_0 L_m^2}{L_r} I_{mo} \sin \varphi \quad (6.31)$$

$$U_{eqo} = -T'_{do} \cdot s_0 \omega_0 U_{edo} + \frac{\omega_0 L_m^2}{L_r} I_{mo} \cos \varphi$$

Fig.6.5. Diagrama fazorială a tensiunilor și curenților MI echivalent

Pe de altă parte, valorile componentelor t.e.m. U_{eo} se obțin prin explicitare din sistemul de ecuații (2.35), în care s-au introdus notațiile (6.30) astfel:

$$U_{edo} = U_{Ro} - (R \cdot \cos \varphi + \omega_0 L' \cdot \sin \varphi) I_{mo} \quad (6.32)$$

$$U_{eqo} = (R \cdot \sin \varphi - \omega_0 L' \cdot \cos \varphi) I_{mo}$$

În consecință, relațiile (6.31) formează un sistem de două ecuații cu necunoscutele $\omega_0 L_m^2/L_r$ și $T'_{do} \cdot s_0$.

Considerînd cunoscute tensiunile U_{edo} și U_{eqo} , calculate cu relațiile (6.32), prin rezolvarea sistemului (6.31) rezultă:

$$\frac{\omega_0 L_m^2}{L_r} = \frac{U_{edo}^2 + U_{eqo}^2}{I_{mo} (U_{edo} \sin \varphi + U_{eqo} \cos \varphi)} \quad (6.33)$$

și

$$T'_{do} \cdot s_0 = (U_{edo} - \frac{\omega_0 I_m^2}{I_r} I_{m_0} \sin \varphi) / U_{eq0} \quad (6.34)$$

Pe baza relațiilor de definiție ale inductanței tranzitorii L' și a constantei de timp rotorice T'_{do} rezultă:

$$L_S = \left[\frac{\omega_0 L_m^2}{I_r} + \omega_0 L' \right] / \omega_0 ; \quad R'_2 / s_0 = \frac{\omega_0 L_S}{T'_{do} s_0} \quad (6.35)$$

Deoarece s-au admis inductanțele de dispersie statorică și rotorică (reduse la același nivel de tensiune) egale, rezultă $L_S = L_r$.

Inductanța de magnetizare rezultă din relația de definiție a inductanței tranzitorii L' astfel:

$$L_m = [L_S(L_S - L')]^{1/2} \quad (6.36)$$

dar inductanța de dispersie a înfășurărilor, redusă la nivelul de tensiune al statorului:

$$L_V = L_S - L_m \quad (6.37)$$

6.2.3.2.3. Determinarea constantelor de timp T'_{do} , T și a exponentului β a caracteristicii cuplu-turație.

Deoarece parametrii T'_{do} , T și β ai MI echivalent caracterizează regimurile dinamice ale acestuia, determinarea lor se poate efectua numai prin compararea răspunsului tranzitoriu al CC real (detaliat)

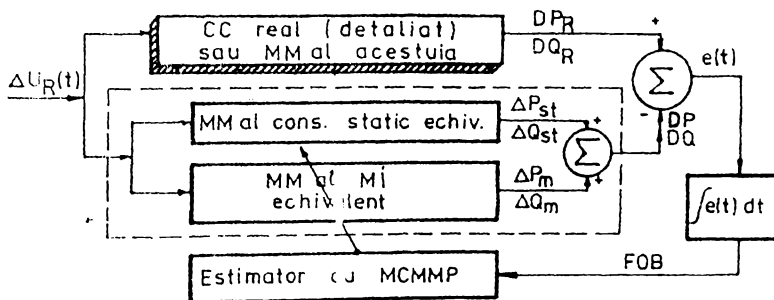


Fig.6.6. Structura de principiu a procesului de estimare și parametrilor T'_{do} , T și β ai modelului CC

că cel al modelului său, aplicînd teoria estimăției cu MCMMP. În acest scop, considerînd structura de principiu a procesului de estimare conform figurii 6.6., se reprezintă CC real și CC echivalent prin CD neliniare sau liniarizate dezvoltate în §.6.2. și respectiv §.5.1., se determină răspunsurile tranzitorii ale acestora la aceeași perturbare

Parametrii T'_{d0} , T și β se estimează aplicînd o procedură de minimizare a abaterii $e(t)$, figura 6.2, a răspunsului MM al CC echivalent față de cel al CC real cu un algoritm bazat pe MOMP, conform schemei de principiu din figura 6.6.

Dacă se reprezintă CC echivalent, încadrat cu linie întreruptă în figura 6.6., prin CD linearizate (6.4), conform schemei din figura 6.2.a), estimatorul parametrilor T'_{d0} , T și β , afectează doar elemen-

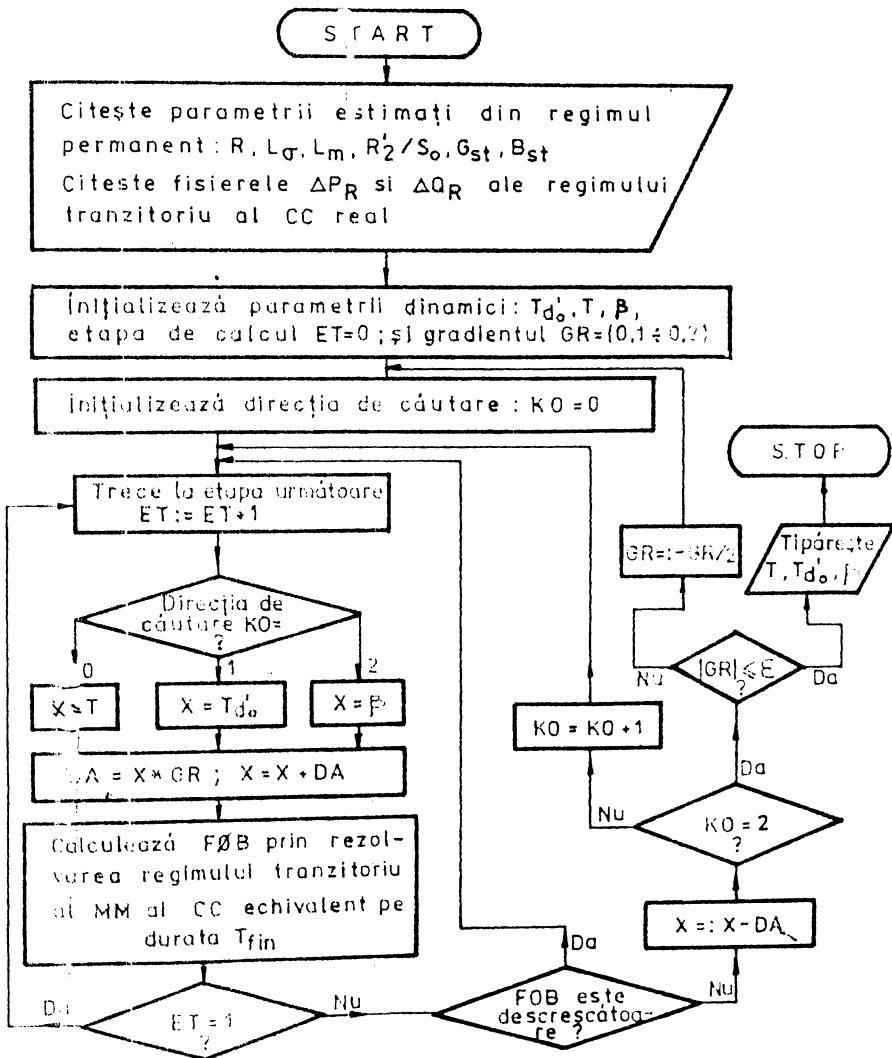


Fig.6.7. Ordinograma de principiu a programului "BSPD"

tele matricelor [A] și [B] în care intervin acești parametri .

Estimarea parametrilor dinamici ai MI echivalent s-a efectuat printr-o procedură de căutare aleatoare unidimensională /15/, conform ordinogramei de principiu, (figura 6.7) a programului "BSPD" elaborat pe baza sa.

Funcția obiectiv, (FOB), care s-a urmărit a fi minimizată, a fost definită conform MCMMP :

$$FOB = \sum_{i=1}^{n_p} [(\Delta P_{Ri} - \Delta P_i)^2 + (\Delta Q_{Ri} - \Delta Q_i)^2] \quad (6.38)$$

unde: $n_p = T_{fin} / \Delta t$, reprezintă numărul de pași cu durata Δt efectuați în regimul tranzitoriu analizat al CC real și echivalent; ΔP_{Ri} , ΔQ_{Ri} , ΔP_i și ΔQ_i sînt abaterile puterii active și reactive față de valorile corespunzătoare din regimul permanent de referință ale CC real și respectiv, echivalent la pasul de timp i .

Experiența estimării parametrilor T , T'_{do} și β cu programul de calcul "BSPD" a evidențiat faptul că, atât convergența soluției cît și viteza sa sînt condiționate de valoarea gradientului, GR, (fig.6.7) și de ordinea de căutare a parametrilor. În cazul CC cu pondere mare în MI, cazul ITT, convergența cea mai bună, $\epsilon = 10^{-3}$, s-a obținut în 10-13 iterații pentru fiecare parametru, admitînd valori pentru GR în domeniul (0,1 - 0,2), iar ordinea de căutare fiind T , T'_{do} , și β , conform figurii 6.7. Durata regimului tranzitoriu considerat pentru CC real și echivalent a fost de 0 secundă.

Totodată, se remarcă faptul că valorile estimate pentru parametri depind de tipul perturbației $\Delta U_R(t)$ aplicate MM ale CC real și echivalent.

În scopul limitării volumului de calcule pentru estimarea acestor parametri, se propune considerarea unui număr limitat de tipuri de perturbații de tensiune și anume: P_0 - perturbație treaptă de tensiune cu amplitudinea de -0,1 u.r.n. și P_1 și P_2 - perturbații sinusoidale amortizate conform relațiilor:

$$\Delta U_R(t) = \begin{cases} U_F - A \cdot e^{-\zeta t} \sin(2\pi f_s \cdot t) - U_0 & \text{pt } t > 0,1 \text{ s} \\ U_{min} - U_0 & \text{pt } t \leq 0,1 \text{ s} \end{cases} \quad (6.39)$$

unde : U_F este valoarea efectivă a tensiunii în regimul permanent postavarie; A , ζ , f_s reprezintă amplitudinea, coeficientul de amortizare și respectiv frecvența oscilației sinusoidale a tensiunii în re-

gim postavarie; U_{\min} este valoarea tensiunii în regim de avarie.

Primul timp de perturbație, P_0 , corespunde perturbațiilor utilizate în cazul testelor de laborator sau de pe teren, perturbații obținute prin conectarea sau deconectarea unor elemente de sistem (conform tabelului 5.1).

Perturbațiile P_1 și P_2 sînt perturbații tipice ale tensiunii în nodurile SBE cauzate de scurtcircuite urmate de deconectarea definitivă după 0,1 s a elementului avariat.

Valorile parametrilor acestor perturbații, prezentate în figura 6.8, au fost stabilite pe baza experienței autorului în analiza regimurilor tranzitorii ale SBE /27/, /69/, /70/, /71/, /73/, /74/, /75/, /76/ ca și a recomandărilor din literatură /55/, /61/, /64/, /142/.

Frecvențele de oscilație, f_g , considerate în cazul perturbațiilor P_1 și P_2 , reprezintă valorile cele mai frecvente întîlnite în simulările analitice și experimentale de regimuri tranzitorii ale SBE. Valorile minime, U_{\min} , ale tensiunii în timpul avariei variază în limite largi depinzînd de tipul și locul avariei, de parametrii și configurația RE, etc. Valorile admise de 0,5 și 0,7 u.r.n. corespund situațiilor în care distanța electrică dintre CC și locul de scurtcircuit este mică, respectiv medie.

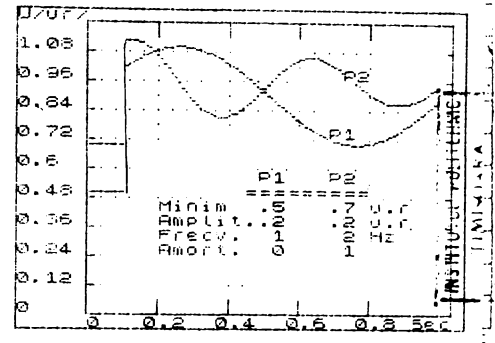


Fig.6.8. Perturbațiile de tensiune considerate tipice pentru estimarea parametrilor CD ale CC echivalenți.

6.3. Identificarea experimentală a CD ale CC

6.3.1. Introducere

Considerînd CC real reprezentat prin CC echivalent definit în §.6.1. pentru care s-au construit CD, prezentate de asemenea în §.6.1, identificarea experimentală a acestora presupune estimarea parametrilor independenți, pe baza prelucrării statistice a datelor intrare-ieșire, obținute prin măsurători în cadrul unor experimente active sau pasive.

Identificarea experimentală cu rezultate apreciaabile a CC constituie o preocupare relativ recentă în literatura de specialitate (sfîrșitul deceniului opt), deși necesitatea și importanța acestui mod de abordare a identificării CC este de mult recunoscută /21/, /87/.

/148/. Intârzierea în obținerea unor rezultate consistente privind identificarea experimentală a CD ale CC este motivată, pe de o parte, de dificultățile obținerii datelor experimentale privind răspunsul tranzitoriu al CC la perturbații rapide ale tensiunii de la bornele sale sau frecvenței din SFB /21/, /148/ și, pe de altă parte, a aparatului matematic deosebit de sofisticat pe care-l implică prelucrarea datelor experimentale în vederea estimării parametrilor CD /10/, /22/, /127/, /129/.

Determinările experimentale, descrise mai în detaliu în subparagraful următor, urmăresc obținerea răspunsului tranzitoriu al CC, răspuns reprezentat de variațiile în timp ale abaterilor puterii active ΔP_m și ΔQ_m în urma producerii unei perturbații ale mărimilor oferite de SFB la bornele sale. Prin eșantionarea acestui răspuns în timp se obțin componentele măsurate ale vectorului de ieșire, $\overline{\Delta Y}_m(k)$, al CD ale CC la fiecare moment, k , al evoluției acestuia.

Deoarece în cadrul testelor experimentale efectuate pentru identificarea CC, perturbațiile care pot fi realizate sînt relativ mici, (sub 0,1 u.r.n) /87/, /148/, se poate accepta fără rețineri forma (6.4) a CD liniarizate în jurul punctului permanent de funcționare. În plus, în cazul testelor active efectuate asupra CC, frecvența în SFB nu se modifică, ceea ce determină ca unghiul de poziție al fazorului tensiunii la borne (figura 2.8) să rămînă constant. Avînd în vedere că valoarea sa poate fi admisă arbitrar, acesta se va lua egală cu zero pentru simplificarea MM.

Parametrii independenți care se impun a fi estimați în cadrul procesului de identificare a CD, (6.4), ale CC echivalent sînt: T'_{d0} , B_m , G_m , β , T , B_{st} , G_{st} , K_m , F , în total nouă parametri, pe baza cărora se definește vectorul \bar{a} al parametrilor avînd următoarele componente:

$$a_1 = 1/T'_{d0} ; a_2 = G_m ; a_3 = B_m ; a_4 = \beta ; a_5 = 1/T ; \quad (6.40)$$

$$a_6 = G_{st} ; a_7 = B_{st} ; a_8 = K_m ; a_9 = L_s$$

Introducerea acestor notații permite o simplificare a modului de scriere a relațiilor ulterioare și facilitează implementarea în programele de calcul a algoritmilor de estimare ce se vor dezvolta în continuare.

Considerînd observațiile prezentate mai sus, cu notațiile (6.40), CD adoptate pentru CC echivalent în vederea identificării sale experimentale, pot fi scrise ca în relațiile (6.41), unde F definit conform relației (6.2) este funcție de componentele vectorului \bar{a} , definit de relația (6.42).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta U_{ed} \\ \Delta U_{eq} \\ \Delta s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 - F \cdot a_3 & \omega_0 s_0 + F \cdot a_2 & \omega_0 U_{eq0} \\ -s_0 \omega_0 - F \cdot a_2 & -a_1 - F \cdot a_3 & -\omega_0 U_{edo} \\ (2U_{edo} - U_0) a_2 a_5 & (2U_{eq0} + U_0 a_3) a_5 & \frac{-a_8(a_4 + 1)a_5}{(1-s_0)^{-a_4}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{ed} \\ \Delta U_{eq} \\ \Delta s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_3 F \\ a_2 F \\ (U_{eq0} a_3 - U_{edo} a_2) a_5 \end{bmatrix} \approx \Delta U; \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = U_0 \begin{bmatrix} -a_1 & -a_3 \\ -a_3 & a_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_{ed} \\ \Delta U_{eq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_3(2U_0 - U_{edo}) - a_3 U_{eq0} + 2a_6 \\ U_{eq0} a_2 - a_3(2U_0 - U_{edo}) - 2a_7 \end{bmatrix} \Delta U; \quad (6.41)$$

$$\text{unde } F = a_1 [a_9 - a_3 / (a_2^2 + a_3^2)] \quad (6.42)$$

Elaborarea unui algoritm de estimare a componentelor vectorului \bar{a} , considerînd cunoscut răspunsul tranzitoriu al CC real prin vectorul $\Delta Y_m(k)$ al abaterilor mărimilor de ieşire şi implementarea acestui algoritm într-un program de calcul eficient, constituie obiectul ultimelor două subparagrafe. Astfel în subparagraful 6.3.3, considerînd pentru CC echivalent CD de forma (6.41), s-a elaborat un algoritm de estimare a parametrilor \bar{a} bazat pe MCMF, a cărui implementare în programul de calcul denumit "ESCD" este prezentat în subparagraful 6.3.4. Algoritmul şi programul de calcul elaborate în cadrul prezentului § permit estimarea parametrilor electrice ai circuitului echivalent, figura 6.1.b, al CC, considerînd cunoscut răspunsul tranzitoriu al acestuia la o perturbaţie oarecare a tensiunii la bornele sale:

6.3.2. Determinări experimentale pentru identificarea CD

Determinările experimentale în vederea identificării CD se realizează, fie prin efectuarea unor perturbaţii în sistem care să produce o variaţie rapidă a tensiunii şi (sau) frecvenţei de alimentare CC, cum ar fi scurtcircuit într-un nod al SBE /56/, conectarea sau deconectarea unor baterii de condensatoare sau transformatoare de alimentare /39/, /87/, /139/, fie prin urmărirea continuă şi reţinerea datelor pe durata unor regimuri tranzitorii ale SBE /54/, /110/, /129/.

Prima posibilitate menţionată mai sus de obţinere a datelor,

deși este cea mai eficientă și mai rapidă, conține totuși două impedimente majore:

a) abaterile mărimilor de sistem (tensiune și (sau) frecvență) care se pot realiza astfel sînt relativ mici (5 - 10)%, deci, MM care se pot obține pe baza acestor date sînt valabile pentru aceste domenii de variație a mărimilor de sistem, extrapolarea acestor MM fiind discutabilă;

b) efectuarea acestor teste active implică anumite riscuri privind siguranța în funcționare a consumatorilor, fiind admise pentru un număr limitat de CC.

Dezvoltarea în ultimii ani a electronicii și tehnicii de calcul a permis construirea de echipamente de urmărire continuă a mărimilor caracteristice ale CC /110/, /148/. Această posibilitate evită dezavantajele menționate mai sus, însă pe lângă costul, deocamdată, ridicat al echipamentelor (în continuă scădere însă), necesită timp de urmărire îndelungat, nu întotdeauna rezultatele înregistrate sînt concludente iar regimurile tranzitorii pentru care se rețin date sînt selectate pe baza unor praguri de abateri de tensiune și (sau) frecvență greu de stabilit a priori. Un prag prea ridicat determină un număr redus de înregistrări pierzîndu-se astfel informații utile, iar unul prea scăzut conduce la multe înregistrări dintre care este dificil de selectat cele utile /110/.

Avînd în vedere aceste aspecte, în cadrul prezentei lucrări s-a optat pentru testele active în cadrul cărora abaterea ΔU a tensiunii la borna de racord a CC s-a realizat prin conectarea și deconectarea unor baterii de condensatoare într-o schemă electrică ca aceea din figura 5.9. Pentru înregistrarea răspunsului tranzitoriu al CC real la perturbația de tensiune astfel obținută, s-a utilizat același echipament, care a fost folosit și pentru identificarea CS ale CC, descris în §.5.4.3. În cazul identificării CD ale CC, răspunsurile tranzitorii ale acestuia au fost înregistrate pe bandă magnetică cu viteza de rulare de 98 cm/s și redată apoi cu viteza redusă, 9,5 cm/s, pentru a fi oscilografiate pe hîrtie fotografică utilizînd echipamentul prezentat în figura 5.11.

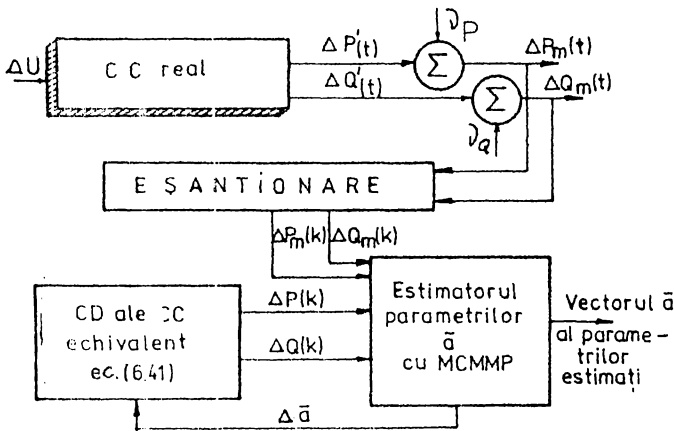
6.3.3. Estimarea parametrilor CD ale CC în cadrul identificării experimentale

6.3.3.1. Algoritmul de estimare al parametrilor CD ale CC

Deși în literatură sînt dezvoltate mai multe tehnici de estimare a parametrilor MM ale sistemelor identificate experimental /15/, /37/.

/117/,/138/, avînd în vedere caracteristicile CC, structura rezultatelor determinate experimental și forma CD care se urmărește a fi obținută, în cazul identificării CC se utilizează practic, în exclusivitate MCMMP /21/,/34/,/59/,/87/,/93/,/103/,/129/.

Procesul de estimare bazat pe MCMMP pentru obținerea parametrilor CD ale CC utilizat în cadrul prezentului paragraf, este prezentat principal în figura 6.9.



zentat principal în figura 6.9.

Pentru prezentarea mai concisă a algoritmului de estimare a parametrilor CD admise de forma (6.41), acestea se scriu sub forma concentrată:

$$\frac{d}{dt} \Delta \bar{x} = [A] \Delta \bar{x} + [B] \Delta \bar{u}; \quad (6.43)$$

$$\Delta \bar{y} = [C] \Delta \bar{x} + [D] \Delta \bar{u};$$

unde matricile [A], (a coeficienților) [B] (de comandă), [C] (de ieșire)

Fig.6.9. Structura procesului de estimare a parametrilor CD ale CC utilizat în cadrul identificării experimentale.

și [D] (de transfer) /17/, au elementele invariabile în timp însă funcții de parametrii \bar{a} în conformitate cu relațiile (6.41).

Pentru regimul permanent de funcționare al CC echivalent se consideră ecuațiile neliniare de stare ale acestuia (6.1) și (6.3) în care se admite, așa cum s-a precizat anterior, $\delta = 0$, și $\omega = \omega_0$. Prin anularea derivatelor și introducerea notațiilor (6.40) se obțin următoarele cinci relații între mărimile de stare și ieșire, inițiale și parametrii \bar{a} ai CD:

$$(-a_1 - \omega_0 a_3 F) U_{edo} + (F a_2 + s_0 \omega_0) U_{eq0} + \omega_0 a_3 F \cdot U_0 = 0$$

$$-(F \cdot a_2 + s_0 \omega_0) U_{edo} - (a_1 + a_3 \omega_0 F) U_{eq0} + \omega_0 F \cdot a_2 U_0 = 0$$

$$a_8 \left\{ (\omega_0 (1 - s_0))^{n_4 + 1} + U_{eq0} (a_2 U_{eq0} + a_3 U_{edo}) + (U_0 - U_{edo}) (U_{eq0} a_3 - U_{edo} a_2) \right\} = 0 \quad (6.44)$$

$$P_0 = U_0 [(U_0 - U_{edo}) a_2 - U_{eq0} a_3 + U_0 a_6]$$

$$Q_0 = U_0 [(U_0 - U_{edo}) a_3 + U_{eq0} a_2 - U_0 a_7]$$

Prin soluționarea sistemului de ecuații (6.44) în care se consideră cunoscute mărimile caracteristice regimului permanent anteper-

turbație, U_0 , ω_0 , P_0 , Q_0 și șapte componente ale vectorului \bar{a} , se evaluează mărimile de stare inițiale U_{edo} , U_{eqo} și s_0 și se determină celelalte două componente a_8 și a_9 ale vectorului parametrilor \bar{a} .

În consecință, numai șapte parametri, $a_1 \dots a_7$ ai CD ale CC echivalent sînt independenți, ceilalți doi, a_8 și a_9 , se determină așa cum s-a precizat mai sus pe baza condiției de echivalență a regimurilor permanente ale CC real și echivalent.

Conform teoriei estimației cu MCMP ponderate /37/, /87/, /117/ funcția obiectiv se alege astfel:

$$J = \int_0^{T_f} [\Delta \bar{Y}_m(t) - \Delta \bar{Y}(t)]^t \cdot [W] \cdot [\Delta \bar{Y}_m(t) - \Delta \bar{Y}(t)] dt \quad (6.45)$$

unde $\Delta \bar{Y}_m(t)$ și $\Delta \bar{Y}(t)$ reprezintă vectorii abaterilor mărimilor de ieșire măsurate, respectiv calculate, pentru aceeași perturbație, $\Delta u(t)$, iar $[W]$ este matricea de ponderare, în general, diagonală ale cărei elemente se aleg din considerente ingineresti /129/.

Scrisă sub formă discretă, ecuația (6.45) devine adecvată identificării parametrilor \bar{a} pe baza a N măsurători efectuate în timpul T_f al regimului dinamic CC cu o frecvență de eșantionare:

$$1/\Delta t = N/T_f \quad (6.46)$$

Dezvoltînd mărimile de ieșire $\Delta \bar{Y}$ în serie Taylor în jurul punctului permanent de funcționare rezultă:

$$\Delta \bar{Y} = \Delta \bar{Y}_0 + \left. \frac{\partial \Delta \bar{Y}}{\partial \bar{a}} \right|_{\bar{a}_0} \Delta \bar{a} + \text{termeni de ordin superior} \quad (6.47)$$

unde derivata $\left. \frac{\partial \Delta \bar{Y}}{\partial \bar{a}} \right|_{\bar{a}_0}$ evaluată pentru $\bar{a} = \bar{a}_0$ se obține din

a doua ecuație (6.43):

$$\left. \frac{\partial \Delta \bar{Y}}{\partial \bar{a}} \right|_{\bar{a}_0} = [C] \left|_{\bar{a}_0} \cdot \left. \frac{\partial \Delta \bar{x}}{\partial \bar{a}} \right|_{\bar{a}_0} + \left. \frac{\partial [C]}{\partial \bar{a}} \right|_{\bar{a}_0} + \left. \frac{\partial [D]}{\partial \bar{a}} \right|_{\bar{a}_0} \cdot \Delta u \quad (6.48)$$

în care \bar{a}_0 reprezintă vectorul inițial al parametrilor.

Pentru evaluarea derivatelor $\left. \frac{\partial \Delta \bar{x}}{\partial \bar{a}} \right|_{\bar{a}_0}$ pentru $\bar{a} = \bar{a}_0$, se de-

rivează în raport cu vectorul \bar{a} prima ecuație (6.43) obținîndu-se sistemul de ecuații diferențiale de ordinul I avînd $3 \times 7 = 21$ necunoscute (derivate fiecărei mărimi de stare în raport cu fiecare componentă independentă a vectorului \bar{a} , evaluate pentru $\bar{a} = \bar{a}_0$):

$$\frac{d}{dt} \left. \frac{\partial \Delta \bar{x}}{\partial \bar{a}} \right|_{\bar{a}_0} = [A] \Big|_{\bar{a}_0} \cdot \frac{\partial \Delta \bar{x}}{\partial \bar{a}} \Big|_{\bar{a}_0} + \frac{\partial [A]}{\partial \bar{a}} \Big|_{\bar{a}_0} \cdot \Delta \bar{x} + \frac{\partial [B]}{\partial \bar{a}} \Big|_{\bar{a}_0} \cdot \Delta \bar{u} \quad (6.49)$$

Introducînd expresia (6.47) a creşterilor $\Delta \bar{y}$ a mărimilor de ieşire în ecuaţia (6.46) a funcţiei obiectiv scrisă sub formă discretă rezultă:

$$J = \sum_{k=1}^N [\Delta \bar{y}_{mk} - \Delta \bar{y}_k(\bar{a}_0) - \left. \frac{\partial \Delta \bar{y}}{\partial \bar{a}} \right|_{\bar{a}_0} \cdot (\bar{a} - \bar{a}_0)] w_k ; \quad (6.50)$$

unde w_k este elementul diagonal $w_{k,k}$ al matricii de ponderare considerată diagonală, avînd în vedere independenţa relativă a măsurătorilor /34/, /87/, /129/, /146/.

Din condiţia de minim a funcţiei obiectiv, $\frac{\partial J}{\partial \bar{a}} = 0$, rezultă setul de ecuaţii algebrice pentru creşterile componentelor vectorului estimat \bar{a} :

$$\hat{a}_i - a_{oi} = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta \bar{y}_{mk} - \Delta \bar{y}_k(\bar{a}_0) \cdot \left. \frac{\partial \Delta \bar{y}}{\partial a_1} \right|_{\bar{a}_0} \cdot w_k}{\sum_{k=1}^N \left(\left. \frac{\partial \Delta \bar{y}}{\partial a_1} \right|_{\bar{a}_0} \right)^2 \cdot w_k} ; \quad (6.51)$$

unde \hat{a}_i ($i = 1, \dots, 7$) reprezintă noile valori (estimate) ale parametrilor care tind să minimizeze funcţia obiectiv. Derivatele

$\left. \frac{\partial \Delta \bar{y}}{\partial a_1} \right|_{\bar{a}_0}$ se exprimă conform relaţiei (6.48), unde derivatele

$\left. \frac{\partial \Delta \bar{x}}{\partial \bar{a}} \right|_{\bar{a}_0}$ ale mărimilor de stare în raport cu vectorul parametrilor s-au calculat prin rezolvarea sistemului de ecuaţii (6.49).

Relaţiile (6.43), (6.48), (6.49) şi (6.51) permit obţinerea vectorului parametrilor estimaţi $\hat{\bar{a}}_1$ printr-un calcul iterativ conform relaţiei recursive:

$$\hat{\bar{a}}^p = \hat{\bar{a}}^{p-1} + \Delta \hat{\bar{a}}^p ; \quad (6.52)$$

unde p este contorul de iteraţii iar $\Delta \hat{\bar{a}}$ este creşterea valorilor parametrilor la pasul p de iteraţie conform relaţiei (6.51).

Datorită trunchierilor de la dezvoltarea serie Taylor, creşterile $\Delta \hat{\bar{a}}$ obţinute cu relaţiile (6.51) sînt mai mici decît cele reale, ceea ce determină o slabă convergenţă a soluţiei. În practică se utilizează o accelerare a convergenţei prin înlocuirea relaţiei (6.52)

$$\hat{\bar{a}}^p = \hat{\bar{a}}^{p-1} + [A_c] \Delta \hat{\bar{a}}^p ; \quad (6.53)$$

unde: $[A_c]$ este o matrice de accelerare (sau amplificare), în general

diagonală, ale cărei elemente se stabilesc pe baza unor considerații de calcul numeric /87/, /129/, /146/. Valorile elementelor acestei matrice utilizate în cadrul lucrării au fost stabilite prin încercări, după implementarea acestui algoritm în programul de calcul "ESCD".

6.3.3.2. Implementarea algoritmului de estimare a parametrilor CD ale CC echivalent

Considerând CD ale CC echivalent de forma (6.41), pe baza algoritmului de estimare a parametrilor \bar{a} ai acestor CD, prezentat în subparagraful anterior, a fost întocmit un program de calcul denumit "ESCD" ale cărui principale etape sînt prezentate în diagrama din figura 6.10.

C	Matricea [U] = [A] / $\partial \bar{a}$			Matricea [V] = $\partial [B] / \partial \bar{a}$	In vederea rezolvării sistemelor de ecuații (6.48) și (6.49) se impune evaluarea elementelor matricelor:
	1	2	3		
1	$1 - a_3 F_1$	$a_2 F_1$		$F_1 a_3$	$[U] = \frac{\partial [A]}{\partial \bar{a}}$ $[V] = \frac{\partial [B]}{\partial \bar{a}}$ $[X] = \frac{\partial [C]}{\partial \bar{a}}$ $[Z] = \frac{\partial [D]}{\partial \bar{a}}$ (6.54)
2	$-F_2$	$F + a_2 F_2$		$F_2 a_3$	
3	$-F - F_3 a_3$	$F_3 a_2$		$F + a_3 F_3$	
4					
5					
6	$-a_2 F_1$	$-1 - a_3 F_1$		$F_1 a_2$	
7	$-F - a_2 F_2$	$-F_2 a_3$		$F + F_2 a_2$	
8	$-a_2 F_3$	$-a_3 F_3 - F$		$F_3 a_2$	
9					
10					
11					
12	$a_5 (2U_{edo} - U_o)$	$2U_{eqo} a_5$		$-U_{edo} a_5$	
13		$U_o a_5$		$U_{eqo} a_5$	
14			$U(14,3)$		
15	$2(U_{edo} - U_a) a_2$	$2U_{eqo} a_2 + U_o a_3$	$U(15,3)$	$U_{eqo} a_3 - U_{edo} a_2$	

obținute conform relațiilor (6.54).

Notă: Pentru reducerea spațiului afectat scrierii matricelor

[U] și [V], nu au fost incluse în aceste matrice elementele corespunzătoare parametrilor a_6 și a_7 care sînt nule și nu intervin în ecuațiile (6.48).

Totodată au fost introduse următoarele notații:

$$\begin{aligned} F_1 &= \partial F / \partial a_1 = a_4 - a_3 / (a_2^2 + a_3^2) \\ F_2 &= \partial F / \partial a_2 = 2a_1 a_2 a_3 / (a_2^2 + a_3^2) \\ F_3 &= \partial F / \partial a_3 = -a_1 (a_2^2 - a_3^2) / (a_2^2 + a_3^2) \\ U(14,3) &= -a_8 a_5 \left\{ (1-s_0)^{a_4} \cdot [1 + (a_4+1) \ln(1-s_0)] \right\} \\ U(15,3) &= -a_8 (a_4+1) (1-s_0)^{a_4} \end{aligned} \quad (6.55)$$

Din aceleași motive de economie de spațiu matricele :

[X] = $\partial[C] / \partial \bar{a}$, cu dimensiunea (14x2) și [Z] = $\partial[D] / \partial \bar{a}$, cu dimensiunea (14x1) avînd multe elemente nule se prezintă doar elementele lor nenule:

$$\begin{aligned} X_{2,1} = X_{3,2} = X_{10,1} = -U_0; \quad X_{9,2} = U_0; \\ Z_2 = U_0; \quad Z_6 = 2; \quad Z_{10} = U_0; \quad Z_{14} = -2 \end{aligned} \quad (6.56)$$

Algoritmul prezentat în figura 6.10, conține trei bucle de calcul. În prima buclă sînt rezolvate sistemele de ecuații diferențiale (6.43) și (6.45) și sînt calculați numărătorii și numitorii creșterilor parametrilor $\Delta \bar{a}$ conform relației (6.51). Pasul de timp a fost ales de 0.01 sau 0.05 secunde, iar matricea de ponderare, [W] a fost considerată unitară.

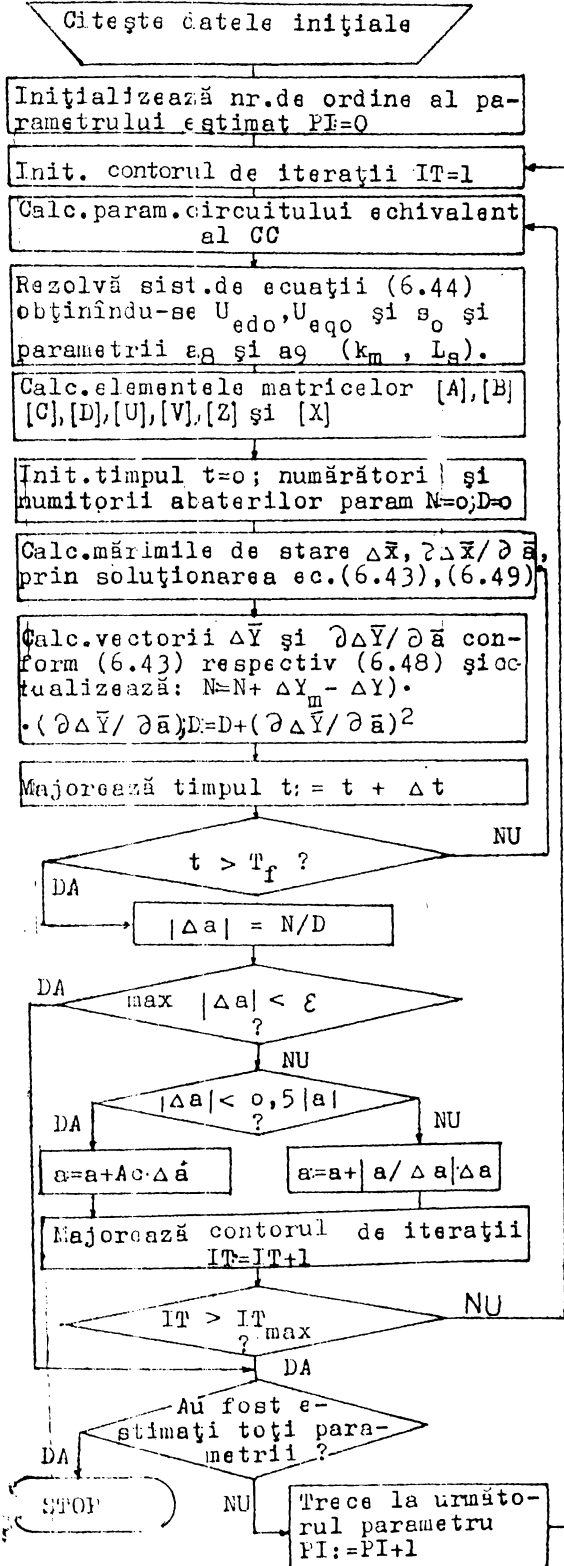
În cea de-a doua buclă sînt actualizați parametrii estimați. Alegerea coeficientului de accelerare, A_c , necesită o atenție deosebită, deoarece, valori prea mari conduc la divergența soluției, iar valori mici pot să cauzeze o foarte slabă convergență. În programul de calcul valoarea sa a fost stabilită astfel:

$A_c = 1,2$ dacă $\Delta a < 0,5 |a|$ și $A_c = k_a \left| \frac{a}{\Delta a} \right|$ dacă $a \geq 0,5 |a|$ unde coeficientul k_a ia valori în domeniul (0,2 - 0,4).

A treia buclă iterează toți parametrii pînă cînd abaterea fiecărui parametru este mai mică decît eroarea admisă conform relației:

$$\varepsilon_i = a_i / N_{\varepsilon} \quad \text{unde } N_{\varepsilon} \text{ este cuprins în domeniul (500-1000).}$$

În afară de valoarea coeficientului, A_c , de accelerare, convergența soluției este determinată și de alegerea valorilor inițiale ale



parametrilor și de ordinea în care sînt iterați. În vederea asigurării convergenței în cît mai multe cazuri, programul de calcul "ESCD" este prevăzut cu posibilitatea de apropiere a valorii parametrilor de soluțiile reale printr-o tratare secvențială a fiecărui parametru în orice ordine. Astfel, pentru un set de parametri ini-

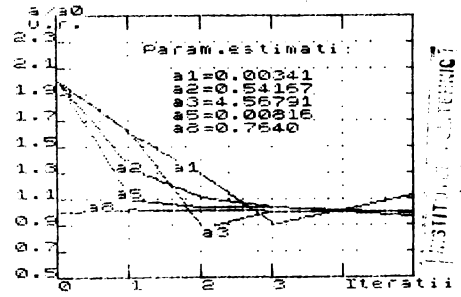


Fig.6.11. Convergența parametrilor a_1, a_2, a_3 și a_5 în cadrul procesului de estimare cu programul "ESCD".

țiali stabiliți în mod arbitrar, se efectuează o ajustare a valorilor acestora printr-o iterare secvențială. În cazul în care funcția obiectiv devine crescătoare, se reia calculul cu o nouă ordine de tratare a parametrilor pînă cînd aceasta devine monoton crescătoare. Dacă nu se obține acest lucru este necesar schimbarea valorilor inițiale ale parametrilor și reluarea calculului.

Eficacitatea programului a fost testată prin estimarea setului de parametri ai CD ai

Fig.6.10. Ordinograma de principiu a programului "ESCD"

unui CC pentru care s-a determinat, în prealabil, răspunsul tranzitoriu la o perturbație treaptă de tensiune, $\Delta U = -0,1$ u.r.n. cu parametri reali. Impunând pentru parametri a_1, a_2, a_3 și a_5 valori inițiale duble față de cele reale și considerând criteriile de convergență $\varepsilon_i = a_i/500$, s-a obținut convergența parametrilor în 3-6 iterații, figura 6.11.

Capitolul 7

IDENTIFICAREA SI ESTIMAREA CARACTERISTICILOR STATICE SI DINAMICE ALE INTREPRINDERII TEX- TILA TIMISOARA

7.1. Introducere

În vederea validării metodelor și algoritmilor dezvoltate în capitolele anterioare, în cadrul prezentului capitol se prezintă utilizarea lor efectivă pentru identificarea CS și CD ale unui CC tipic industrial. Identificarea acestor caracteristici s-a efectuat atât pe cale analitică, prin asamblarea caracteristicilor consumatorilor componenți, cât și pe cale experimentală, prin prelucrarea statistică a rezultatelor unor teste experimentale active efectuate în stația de racord a CC considerat.

Considerentele avute în vedere la alegerea CC pentru care să se efectueze partea aplicativă de identificare a CS și CD au fost următoarele:

- a) să fie un consumator tipic industrial, cu ponderea consumului realizată de MI mici și mijlocii;
- b) să existe posibilitatea modificării tensiunii la bornele sale în limite suficient de mari, pentru a obține rezultate experimentale concludente;
- c) să fie constituit dintr-un număr redus de tipodimensiuni de utilaje de bază și să fie accesibile pentru fiecare tipodimensiune măsurătorile necesare sau să existe informații de tip bilanț energetic.

Aceste condiții au fost îndeplinite de Întreprinderea Textila Timișoara (ITT), alimentată cu energie electrică prin linii electrice subterane din stația de transformare 110/10 kV "Dumbrăvița", figura 7.1.

Pentru acest consumator complex industrial au fost identificate CS și CD atât pe cale analitică cât și experimentală, utilizând metodele, algoritmele și echipamentele de măsură descrise în capitolele 5 și respectiv 6.

În vederea identificării analitice a CS și CD a CC considerat în §.7.2. se prezintă structura sa, parametrii electrici ai RBD și caracteristicile consumatorilor individuali de energie electrică din componența sa. În acest scop s-au utilizat informațiile oferite de

bilanțul electroenergetic al ITT /152/, datele furnizate de serviciul energetic și rezultatele măsurătorilor și identificărilor efectuate în întreprindere în luna aprilie 1987.

Identificarea analitică a CS și CD s-a efectuat pentru regimuri de funcționare ale CC similare celor pentru care s-au efectuat testele necesare identificării experimentale (schimbul I, zile lucrătoare normale din luna aprilie 1987), pentru a permite o comparație a rezultatelor obținute pe cele două căi distincte de identificare.

Identificarea și estimarea caracteristicilor CC considerat s-a abordat și în cadrul prezentului capitol, separat pentru CS, tratate în §.7.3., și separat pentru CD, tratate în §.7.4., în conformitate cu modul de abordare a aspectelor teoretice ale identificării CS și CD în capitolele anterioare.

Astfel în cadrul identificărilor analitice ale CS și CD, după inventarierea principalelor categorii de consumatori individuali, s-au estimat CS și CD ale acestora pe baza informațiilor și a algoritmilor prezentate în capitolele 2, 3 și 4. În continuare s-au aplicat proceduri de asamblare ierarhizate a acestor caracteristici, considerând ponderile cu care intervin caracteristicile consumatorilor individuali și parametrii RED în structura CC. S-au obținut astfel pentru CC considerat CS de forma (1.3) liniarizate în jurul punctului permanent de funcționare, având ca parametri ER și CD sub forma ecuațiilor intrare-stare-ieșire liniarizate (6.4) și a funcțiilor de transfer liniare (6.8) în domeniul operațional. Parametrii CD astfel obținuți sunt dependențe relativ simple de parametrii circuitului electric al CC echivalent considerat constituit dintr-un MI și un consumator static echivalent (figura 6.1); conform dezvoltărilor din capitolul precedent.

În vederea identificării experimentale a CS și CD s-au efectuat măsurători în stația de 110/10 kV de alimentare a CC considerat, utilizând echipamentul de măsură și înregistrare descris în capitolul 5 și în lucrările /102/ și /103/. Prelucrarea rezultatelor înregistrate experimental s-a efectuat conform algoritmilor dezvoltate în capitolele 5 și 6 și implementate în programele de calcul "PREDEX", "BSPDT" și "BSCD". S-au obținut astfel CS și CD de putere activă și reactivă funcție de tensiune, liniarizate în jurul punctului permanent de funcționare ce caracterizează regimul de funcționare pentru care s-au efectuat determinările experimentale.

Prin caracterul său aplicativ, acest capitol este în întregime original.

7.2. Alimentarea cu energie electrică și principalele caracteristici ale I.T.T.

I.T.T. constituită din șase secții productive principale, amplasate pe o platformă industrială relativ întinsă, este alimentată cu energie electrică din stația de transformare de 110/10 kV "Dumbrăvița", conform schemei monofilare, figura 7.1

Această schemă de alimentare a ITT permite determinarea experimentală a CS și CD funcției de tensiune a CC corespunzător, "văzut" de pe bara de 10 kV a stației de racord. În acest scop, s-a efectuat modificarea tensiunii pe această bară prin schimbarea sub sarcină a ploturilor prizei transformatorului de 40 MVA și prin conectarea și deconectarea bateriilor de condensatoare statice existente pentru compensarea puterii reactive din stație, figura 7.1.

În vederea asamblării CS și CD ale acestui CC, se impune cunoașterea și a structurii RED a ITT și a caracteristicilor și regimurilor de funcționare ale consumatorilor săi individuali. În consecință, în continuare se prezintă datele necesare privind RED a ITT și caracteristicile principalelor consumatori individuali de energie electrică.

Schema electrică de alimentare a ITT este de tip radial, constituită din patru stații de transformare, 10/0,4 kV, identice, ale căror date de catalog sînt prezentate în figura 7.2. De pe barele de 0,4 kV ale acestor stații sînt alimentate principalele secții productive ale întreprinderii prin rețele de cabluri electrice de joasă tensiune, în general slab încărcate /152/. Stațiile de transformare, notate P1203, P1013 și P1299, sînt prevăzute cu transformatoare tip TPU-PS de 10/0,4 kV, 1000 kVA conectate conform schemei din figura 7.2. Sînt prezentate totodată în această figură și valorile puterilor medii active și reactive absorbite de fiecare secție productivă într-o zi lucrătoare normală din luna aprilie 1987 (cînd s-au efectuat și identificările experimentale), valori stabilite pe baza măsurătorilor de bilanț /152/ și a raportărilor trimestriale ale serviciului energetic al întreprinderii.

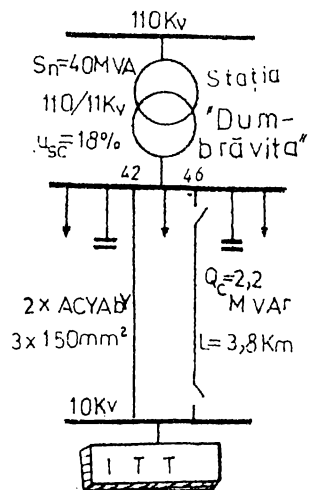


Fig.7.1. Schema electrică monofilară de alimentare cu energie electrică a ITT

Pentru stabilirea structurii consumului de energie electrică al ITT au fost inventariați toți consumatorii individuali din principalele secții, stabilindu-se: numărul n de utilaje productive identice,

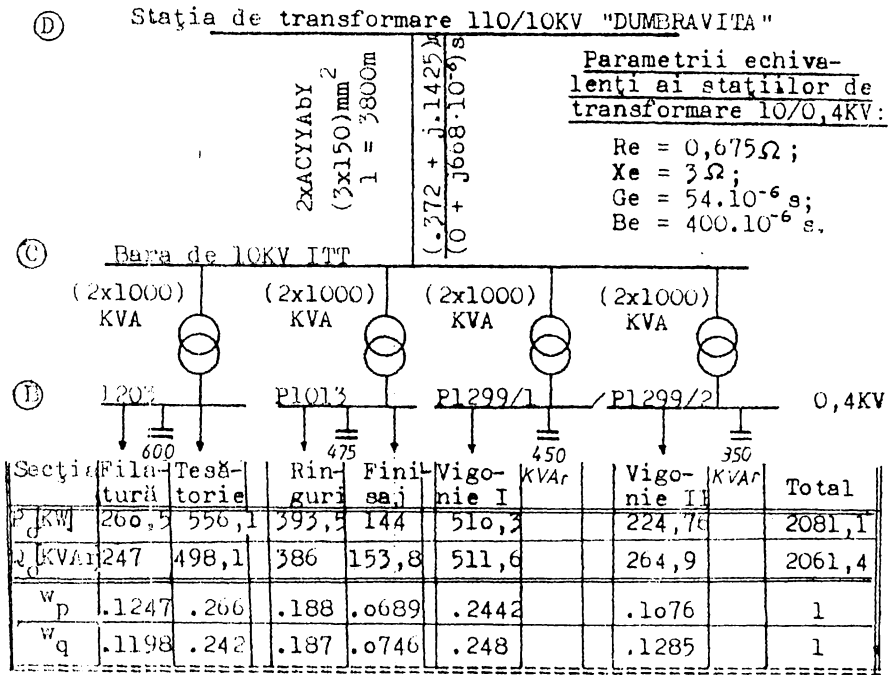


Fig.7.2. Schema electrică monofilară de alimentare a principalelor secții productive ale ITT și puterile electrice medii absorbite.

puterea nominală instalată P_{inst} a acestora, ca sumă a puterilor nominale ale consumatorilor componenți, puterea activă P_o și reactivă Q_o medie absorbită, timpul relativ t_r de funcționare și ponderile w_p și w_q cu care intervine fiecare utilaj în consumul total de energie electrică activă, respectiv reactivă al secției. Aceste date prezentate sintetic în tabelul 7.1., au fost stabilite pe baza datelor de catalog ale tuturor acționărilor electrice și a rezultatelor măsurătorilor de bilanț /152/ privind regimul permanent de funcționare al acestora. Astfel, au fost determinate pentru principalele utilaje tehnologice următoarele mărimi caracteristice prezentate în tabelul 7.2:

- a) numărul și puterea nominală (instalată) a MI identice;
- b) gradul de încărcare al fiecărui MI, $\alpha = P_o/P_{inst}$, corespunzător regimului de funcționare de interes, pe baza măsurătorilor, fie de putere și energie /152/, fie de curent conform relației 5.15;

Labelul 7.1.

Datale care intervin in asamblarea CS ale sectiilor

Sectia	Nr. crt.	Denumirea consumat.	n*inst /KW/	Po t /KW/	t r	Co /KVAR/	Ponderi	
							wp	wq
V i g o n	1.	Ring	14*54,2	250,4	0,92	670,0	0,490	0,474
	2.	Carda	7*50,5	31,0	0,304	116,93	0,153	0,033
	3.	Condition.	4*55	121	1,0	106,71	0,237	0,076
	4.	Condensat.			1,0	-450,0		0,319
	5.	Iluminat	1330*0,04	31,9	0,6	37,32	0,0625	0,0263
	6.	Alti cons.	36,7	26,0	0,3	31,0	0,051	0,0219
	TOTAL		1573,2	510,3		311,61	1	1
V i g	1.	Destramit.	2*139	93,32	0,92	132,33	0,415	0,504
	2.	Condition.	2*41,0	39,36	1	34,37	0,175	0,131
	3.	Gosp.apa	1*96	76,3	1	72,5	0,302	0,274
	4.	Iluminat	70*0,065	2,8	0,4	3,26	0,0124	0,0123
	5.	Alti cons.	25,0	12,5	0,5	21	0,0556	0,079
	TOTAL		525,3	224,76		264,86	1	1
F i l a t u r	1.	Bataj	3*48,24	123,5	1	115,1	0,466	0,466
	2.	Ventilator	1*75	30,93	0,75	31,2	0,126	0,126
	3.	Exhaustor	2*45	55,3	1	44,76	0,131	0,131
	4.	Iluminat	520*0,065	18,72	0,6	21,89	0,088	0,089
	5.	Alti cons.	63,0	31,5	0,5	34,0	0,133	0,133
	TOTAL		406,92	260,43		246,93	1	1
T e s e t o r i e	1.	MT "SIB"	163*2,2	290,4	1	243,32	0,553	0,493
	2.	MT "A100"	120*0,75	71,1	1	60,84	0,136	0,122
	3.	MT "Textl."	150*1,1	102,54	1	111,3	0,191	0,223
	4.	Masa repos.	16*3	13,44	0,4	16,2	0,026	0,032
	5.	Iluminat	540*0,065	19,44	0,6	22,72	0,036	0,046
	6.	Condition.	1*55	30,25	1	26,678	0,058	0,053
	7.	Alti cons.	39,0	9,5	0,3	12,1	0,013	0,024
	TOTAL		795,4	336,67		493,133	1	1
R i n g u r	1.	Ring bumb.	48*13,2	303,33	0,94	306,32	0,733	0,795
	2.	Condition.	2*100	56,8	0,7	47,17	0,149	0,122
	3.	Iluminat	320*0,04	15,36	0,3	17,92	0,039	0,04
	4.	Alti cons.	46,0	11,0	0,5	14,1	0,028	0,036
	TOTAL		900,4	393,49		386,02	1	1
F i n i s e j	1.	L.de apret	3*73,5	75,09	0,75	101,304	0,588	0,667
	2.	Vent.acop.	15*2,2	16,5	1	19,35	0,129	0,127
	3.	Vent.oriz.	18*1,5	13,5	1	15,786	0,117	0,104
	4.	Compresor	3*11	9,702	0,42	7,277	0,076	0,043
	5.	Iluminat	280*0,04	6,72	0,6	0,3144	0,053	0,002
	6.	Alti cons.	26,0	6,0	0,3	7,3	0,047	0,051
	TOTAL		350,7	127,5		151,33	1	1

Valorile ER pentru principalele acționari ale utilajelor și liniilor tehnologice din IT tabelul 7.2

Denumirea utilajului	n _{inst} /KW/	cos φ _n	β	Gradul de încărcare		Valorile ER în ur.			
				α	n [*] Q ₀ /KVar/	P _u	q _u	P _f	q _f
Ring	2*24	0,50	-1	0,33	2*24,3	0,10	2,72	0,1	-0,60
vigo	1*5,5	0,83	2	0,54	1*2,94	0,13	2,47	2,74	-0,24
nie	1*0,75	0,75	1,7	0,71	1*0,47	0,18	2,71	1,83	-0,25
Carda	1*13	0,83	0	0,16	1*12,14	0,10	2,92	1,10	-1,05
	5*1,1	0,75	0	0,3	5*0,8	0,08	3,6	1,05	-1,3
Destramator "Reis"	1*55	0,86	-1	0,42	1*17,55	0,02	1,96	0	-0,85
	2*30	0,85	1	0,56	2*17,14	0,09	2,19	1,87	-0,37
	1*22	0,85	2	0,24	1*8,44	0,18	3,30	2,80	-1,06
	2*11	0,84	2	0,74	2*6,105	0,18	1,92	2,52	0,35
MT "TB"	1*2,2	0,8	0	0,30	1*1,505	0,01	2,36	1,1	-0,56
MT "A 60"	1*0,75	0,76	0	0,79	1*0,507	0,01	2,55	1,08	-0,58
MT "Te t."	1*1,1	0,78	0	0,7	1*0,742	0,01	2,40	1,10	-0,57
Liniile de apretat	1*11	0,84	1	0,65	1*3,92	0,11	1,92	1,85	-0,31
	1*7,5	0,84	0	0,2	1*2,59	0,13	2,65	0,94	-0,92
	10*5,5	0,83	2	0,45	10*2,52	0,12	2,47	2,74	-0,28
Inst. de condiționare	1*100	0,89	2	0,42	1*33,69	0,18	2,20	2,75	-0,30
	1*55	0,86	2	0,55	1*26,68	0,15	2,30	2,72	-0,16
	1*75	0,83	2	0,35	1*30,93	0,17	2,37	2,76	-0,20
Ring bumbac	1*11	0,84	1	0,30	1*5,30	0,10	2,34	1,87	-0,39
	1*2,2	0,8	2	0,6	1*1,502	0,12	2,48	2,72	-0,16
Ventilatoare	1*45	0,86	2	0,62	1*22,38	0,14	2,20	2,71	-0,20
	1*2,2	0,80	2	0,50	1*1,29	0,10	0,63	2,73	-0,66
Compres.	1*11	0,84	0	0,70	1*3,775	0,06	1,74	1,04	-0,05
Iluminat fluoresc.	1*0,04	0,65		1,0	1*0,047	1,0	2,7	-0,8	-2,30
	1*0,65	0,65		1,0	1*0,07	1,05	2,7	-0,8	-2,80

* Notatiile: MT masina de tesut

c) puterea reactivă Q_0 absorbită de fiecare MI determinată conform relației :

$$Q_0 = \alpha P_{inst} \cdot \text{tg}(\text{arc}(\cos \varphi)); \quad (7.1)$$

unde $\cos \varphi$, se evaluează în funcție de gradul de încărcare activă α și $\cos \varphi_n$ conform /42/, /119/;

d) exponentul β al caracteristicii cuplu-turație al mecanismului antrenat estimat în funcție de tipul acestuia conform /142/.

Pe baza acestor date, tabelul 7.2, au fost estimate mărimile caracteristice utilajelor și liniilor tehnologice prevăzute cu mai multe acționări electrice, mărimi prezentate în tabelul 7.1.

Analiza structurii consumului de energie electrică a ITT, evidențiază ponderea deosebit de mare (cca 85 %) a acționărilor cu MI de puteri nominale mici și mijlocii. Dintre consumatorii statici se remarcă consumatorii de iluminat cu tuburi fluorescențe (cca 8,7 %) și bateriile de condensatoare statice pentru compensarea puterii reactive.

7.3. Identificarea CS ale ITT

7.3.1. Identificarea analitică

7.3.1.1. Introducere

Urmărind obținerea CS ale ITT sub forma (1.3), liniarizată în jurul punctului permanent de funcționare, se impune estimarea parametrilor acestora, BR ale puterii active și reactive, în raport cu tensiunea și frecvența, considerând cunoscute configurația și parametrii RED, parametri CS ale consumatorilor individuali împreună cu ponderile cu care intervin în consumul total de energie electrică. În acest scop au fost evaluate valorile BR ale principalelor tipodimensiuni de consumatori individuali (MI și consumatori de iluminat), valori prezentate în tabelul 7.2.

BR ale MI din seria ASI au fost determinate cu ajutorul diagramelor 2.5. în funcție de puterea lor nominală, gradul de încărcare activă și exponentul caracteristicii cuplu-turație a mecanismului antrenat. Pentru celelalte tipuri de MI, parametri CS s-au determinat utilizând programul de calcul "AMASU" descris în capitolul 2.

Estimarea parametrilor CS ale CC "văzut" de pe bara (D), figura 7.2, a stației Dumbrăvița, s-a efectuat în mod ierarhic, conform algoritmului și programului de calcul "CSR" prezentat în capitolul 5, cu considerarea elementelor RED prin scheme echivalente în Γ . Ca și consumatori componenți de bază au fost considerați consumatorii echivalenți ai celor șase secții productive racordați pe barele (E) ale TGD din ITT, figura 7.2.

Estimarea parametrilor CS ale acestor consumatori componenți (secțiile productive), datorită numărului și diversității deosebit de mare ai consumatorilor individuali pe care-i conțin, reprezintă

o sarcină extrem de dificilă și laborioasă.

În subparagraful următor se abordează problema estimării parametrilor (S ale secțiilor, atât cu metoda "clasică" cât și cu metoda "decuplată" propusă în capitolul 5, pentru a permite evidențierea avantajelor acestora din urmă. Se obțin astfel CS ale CCP echivalenți racordați pe barele (B) ale TGD ale ITT (figura 7.2), care sînt apoi asamblați (subparagraful 7.3.1.3.), conform procedurii prezentate în capitolul 5, rezultînd parametrii CS ale CC echivalent ITT "văzut" de pe barele de 10 kV ale stației de transformare "Dumbrăvița".

7.3.1.2. Estimarea CS ale principalelor secții productive

Abordarea "clasică" /8/, /87/, /94/, /123/ a problemei estimării parametrilor CS ale secțiilor presupune, în afara inventarierii principalelor categorii de consumatori individuali și estimarea parametrilor caracteristicilor acestora, parcurgerea următoarelor etape:

a) asamblarea CS ale liniilor tehnologice și utilajelor complexe constituite din mai mulți consumatori individuali;

b) asamblarea CS ale secțiilor pe baza caracteristicilor utilajelor componente și a ponderilor cu care intervine fiecare în consumul de energie electrică a secției.

În vederea asamblării CS ale liniilor tehnologice și utilajelor complexe (etapa a)), se aplică relațiile (5.16) în care intervin ponderile și caracteristicile consumatorilor individuali, valori prezentate în tabelul 7.2. S-au obținut astfel valorile ER și mărimile caracteristice regimului permanent de funcționare al principalelor utilaje tehnologice din întreprindere, tabelul 7.3.

Tabelul 7.3
Valorile ER ale principalelor utilaje tehnologice ale ITT

Nr. crt.	Denumirea utilajului	Pinst /kW/	Q ₀ /kVAr/	Incar. medie	Valorile ER în ur.			
					P ₀	Q ₀	P ₂	Q ₂
1.	Ring vigoană	54,25	52,014	0,4113	0,060	2,705	0,430	0,577
2.	Carda	50,50	16,160	0,2217	0,094	2,008	1,090	1,112
3.	Destramator	159,0	72,49	0,633	0,094	2,213	1,515	0,301
4.	Linie spret	73,50	33,768	0,454	0,118	2,307	2,463	0,230
5.	Ring Bumbac	13,20	6,80	0,517	0,103	2,370	2,034	0,230

În mod similar se assemblează CS ale secțiilor (etapa b)), pornind de la caracteristicile principalelor utilaje productive din secții (tabelele 7.2 și 7.3), numărul n de utilaje identice din fiecare

secție și regimul permanent de funcționare al acestora, caracterizat de puterea P_0 , Q_0 absorbită (tabelul 7.1).

Considerînd cunoscută, pe baza graficelor de sarcină /152/, puterea medie P_0 absorbită zilnic de fiecare categorie de utilaje, se determină timpul relativ de funcționare t_r conform subparagrafului 5.3.2, și ponderile w_p și w_q cu care intervin acestea în CS asamblată a secției, utilizînd relațiile (5.13) și respectiv (5.14).

Aplicînd în continuare, principiul superpoziției caracteristicilor componentelor, s-au obținut CS ale fiecărei secții de forma generală (1.3) ale căror parametri ER, sînt prezentați în tabelul 7.4.

Tabelul 7.4.
Parametrii CS ale consumatorilor echivalenți secțiilor productive ale ITT.

BR \ Secția	Fila- tură	Pesă- torie	Rin- guri	Fini- saj	Vigo- nie I	Vigo- nie II
p_u	0,246	0,048	0,149	0,137	0,17	0,143
q_u	2,516	2,418	2,36	1,944	1,888	2,225
p_f	1,792	1,121	2,014	1,98	1,053	2,158
q_f	-0,497	-0,638	-0,454	-0,4122	-0,792	-0,394

Se prezintă, în continuare, estimarea parametrilor CS ale secțiilor cu metoda denumită "decuplată" descrisă în capitolul 5. Această metodă presupune, așa cum s-a precizat în capitolul 5, o decuplare a CS de putere activă față de cele de putere reactivă. În vederea aplicării acestei decuplări, se clasifică MI din secții conform următoarelor trei criterii:

- în funcție de puterea nominală (mici și medii);
- în funcție de gradul de încărcare (slab și puternic încărcate);
- în funcție de tipul caracteristicii cuplu-turație a mecanismului antrenat (după valorile exponentului β).

Caracteristicile grupurilor de MI clasificate conform criteriilor a) și b) ce permit stabilirea unor valori medii pentru ER ale puterii reactive în raport cu tensiunea și frecvența, sînt prezentate în tabelul 7.5.

Puterile reactive, Q_0 , din regimul de referință se determină pe baza datelor din tabelul 7.5. conform relației (7.1), unde P_{inst} se consideră identic cu P_n .

Valorile ER ale puterii active, în raport cu tensiunea și frecvența pentru MI existente, se stabilesc în funcție de tipul ca-

caracteristicii cuplu turație a mecanismului antrenat precizată prin exponentul β (tabelul 7.6). Aceste valori, obținute cu programul "AMASU", sînt prezentate în tabelul 7.6.

Valorile ER ale puterii reactive pentru grupurile tipice de MI Tabelul 7.5.

Denumirea grupului de MI	Cod	$\frac{P_n}{kW}$	In-cărcare α	$\cos \varphi_n$	$\cos \varphi$	tg φ_{med}	$q_u = \partial Q / \partial U$	$q_f = \partial Q / \partial f$
							$\frac{\min - \max}{med}$	$\frac{\min - \max}{med}$
MI mici slab încărcate	MmS	0,75	0,15	0,7	0,33	2,1	$\frac{4 - 2,7}{3,3}$	$\frac{-1,5 - -0,5}{-1}$
		11	0,4	0,85	0,53			
MI medii slab încărcate	MMS	15	0,15	0,8	0,43	2,62	$\frac{2,5 - 2}{2,25}$	$\frac{-1 - 0}{-0,5}$
		55	0,4	0,9	0,62			
MI mici puternic încărcate	MmP	0,75	0,5	0,7	0,63	0,95	$\frac{3 - 1,8}{2,4}$	$\frac{-1 - 0,5}{0,25}$
		11	1	0,85	0,82			
MI medii puternic încărcate	MMP	15	0,5	0,8	0,75	0,724	$\frac{2 - 0,8}{1,9}$	$\frac{-0,5 - 1}{0,25}$
		55	1	0,9	0,87			

ER ale MI în funcție de tipul mecanismului antrenat Tabelul 7.6.

β	$p_u = \partial P / \partial U$	$p_f = \partial P / \partial f$
	$\frac{\min - \max}{med}$	$\frac{\min - \max}{med}$
-1	$\frac{0,05 - -1}{-0,05}$	$\frac{0 - 0,15}{0,07}$
0	$\frac{0,07 - 0,04}{0,05}$	$\frac{1,01 - 1,03}{1,02}$
1	$\frac{0,15 - 0,12}{0,135}$	$\frac{1,9 - 1,8}{1,85}$
2	$\frac{0,2 - 0,24}{0,22}$	$\frac{3,6 - 3,1}{3,4}$

Stabilirea ponderilor w_q cu care intervin CS de putere reactivă ale grupurilor de MI în CS ale secțiilor, s-a efectuat conform relației:

$$w_q = w_p \cdot C_w \cdot \text{tg } \varphi ; \quad (7.2)$$

unde $w_p = \lambda \cdot t_p$, reprezintă ponderea puterii active;

$\varphi = \text{arc}(\cos \varphi)$, ($\cos \varphi$ - este factorul de putere mediu la încărcarea dată);

C_w - este un coeficient de corecție definit conform relației:

$C_w = P_{ot} / Q_{ot}$ care a fost introdus pentru a închide bilanțul de putere reactivă pe secție (P_{ot} și Q_{ot} sînt puterile activă și reactivă a secției obținute din curbele de sarcină zilnice).

Pe baza datelor prezentate în tabelele 7.1 și 7.2, s-a efectuat gruparea pe cele opt categorii de MI (conform tabelelor 7.5 și 7.6) pentru fiecare secție. Ponderile rezultante cu care intervine fiecare grup în consumul de energie electrică activă și reactivă al secțiilor, sînt prezentate în tabelul 7.7 și respectiv 7.8.

Considerînd valorile medii ale ER pentru fiecare categorie de MI prezentate în tabelele 7.5 și 7.6 și ponderile corespunzătoare

Tabelul 7.7.
Ponderile w_q ale MI pe secții (relația 7.2)

Cod MI	MmS	MMS	MmP	MMP
Filatură	0	0	0,7081	0,298
Tesătorie	0,125	0	0,839	0,035
Ringuri	0,056	0,231	0,712	0
Finisaj	0,819	0	0,181	0
Vigonia I	0,2245	0,6117	0,0358	0,128
Vigonia II	0	0,5633	0,0497	0,386

(tabelele 7.7 și 7.8), s-au obținut ER ale MI echivalent din fiecare secție productivă, valori prezentate în tabelul 7.9.

Asamblarea CS ale consumatorilor echivalenți racordați pe barele \textcircled{B} , figura 7.2, ale TGD ale ITT se efectuează în acest caz considerând următoarele tipuri de consumatori reprezentați prin CS liniarizate: a) MI echivalente cu ER precizate în tabelul 7.9. corespunzătoare fiecărei secții; b) consumatori de iluminat fluorescent (ER indicate în tabelul 7.2, conform /lol/); c) baterii de condensatoare pentru compensarea puterii reactive (valorile aproximative ale puterilor absorbite la data efectuării măsurărilor sînt cele indicate în fig.7.2).

Tabelul 7.8.
Ponderile w_p ale MI pe secții

Secția	-1	0	1	2
Filatură	0	0,231	0,452	0,317
Tesătorie	0	0,895	0,044	0,05
Ringuri	0	0,815	0,029	0,155
Finisaj	0	0,085	0,49	0,427
Vigonia I	0,41	0,169	0	0,421
Vigonia II	0,301	0,056	0	0,642

Tabelul 7.9.
ER ale MI echivalente ale principalelor secții productive

Secția	P_u	Q_u	P_f	Q_f
Filatură	0,1432	0,25	2,145	-0,094
Tesătorie	0,062	2,49	1,64	-0,291
Ringuri	0,08	2,416	1,412	-0,39
Finisaj	0,166	3,127	2,45	-1,19
Vigonia I	0,085	2,44	1,624	-0,4
Vigonia II	0,1354	2,122	2,255	-0,179

7.3.1.3. Parametrii CS ai CC echivalent ai ITT "văzut" de pe bara de 10 kV a stației de transformare "Dumbrăvița"

În vederea estimării parametrilor CS ai CC echivalent al ITT racordat pe bara de 10 kV a stației de transformare "Dumbrăvița", se consideră schema electrică a CC reprezentată în figura 7.2 în care, pe barele \textcircled{B} de 0,4 kV ale posturilor de transformare P1203, P1013, și P1299, sînt racordați CCP reprezentați prin CS ai căror parametri au fost estimați în subparagraful precedent. Elementele de rețea, transformatoarele și liniile electrice subterane, au fost considerate

prin scheme echivalente în Γ , ai căror parametri electrici sînt precizați în figura 7.2. Estimarea parametrilor CS ale CC echivalent al ITT "văzut" de pe bara de 10 kV a stației "Dumbrăvița", s-a efectuat conform algoritmului descris în subparagraful 5.3.4.2. cu programul de calcul "CSR" pentru următoarele patru situații:

a) cu considerarea bateriilor de condensatoare (conform figurii 7.2);

b) fără compensarea puterii reactive (bateriile de condensatoare deconectate);

A) parametrii CS ale CCP pe barele (B) de 0,4 kV, determinați cu metoda "decuplată";

B) parametrii CS ale CCP pe barele (B) de 0,4 kV, determinați prin asamblare cu metoda "clasică".

Parametrii CS ai CC echivalent obținuți pentru combinațiile posibile ale situațiilor considerate mai sus sînt prezentate în tabelul 7.10.

Tabelul 7.10.

Parametrii CS ai CC echivalent ITT pe bara de 10 kV "Dumbrăvița"

Situația de calcul	Cod	P ₀ /kW/	Q ₀ /kVar/	Valorile ER în u.r.			
				P _u	q _u	P _f	q _f
Cu baterii de condensatoare, și metoda "decuplată"	aA	2136,6	57,19	0,136	8,25	1,638	-51,36
Fără baterii de condensatoare, cu metoda "decuplată"	bA	2212,4	2694,8	0,177	2,15	1,48	-0,044
Cu baterii de condensatoare, cu metoda "clasică"	aB	2142,5	112,3	0,164	10,2	1,88	-32,04
Fără baterii de condensatoare, cu metoda "clasică"	bB	2221,3	2706,4	0,116	2,27	1,92	-0,052

Analiza rezultatelor prezentate în acest tabel permite felicitarea următoarelor concluzii:

a) valorile ER ale puterii active în raport cu frecvența și tensiunea înt, practic, neafectate de compensarea puterii reactive cu baterii de condensatoare;

b) utilizarea metodei "decuplate" permite estimarea parametrilor CS ale CC considerat, conduce la abateri ale valorilor acestora față de cele obținute cu metoda clasică, mai mici decît domeniile de

variație (circa 20%) ale ER ai CCP formați din MI (tabelele 7.7,7.8)

c) compensarea puternică (peste 95%) a puterii reactive afectează sensibil valorile ER ale puterii reactive, q_u și q_p , determinând valori mari și dispersate ale acestor parametri, conform diagramelor din figura 5.1. Diferențele dintre valorile ER calculate cu cele două metode, clasică și decuplată, sînt în aceste cazuri cele mai mari.

Rezultă în final utilitatea metodei "decuplate" de asamblare a CS ale CC cu pondere mare în MI datorită volumului de informații și de calcul pentru prelucrare, mult mai reduse, rezultatele fiind în ambele cazuri apropiate. Totodată se evidențiază necesitatea prelucrării din literatură doar a valorilor ER ale puterii reactive pentru CC necompensați, valori care prezintă o dispersie mică, iar compensarea puterii reactive să fie considerată separat în procesul de asamblare a CC cu bateriile de condensatoare, fie prin modificarea ER conform diagramelor 5.1.

7.3.2. Identificarea experimentală a CS ale ITT

7.3.2.1. Descrierea măsurărilor efectuate

Măsurătorile și înregistrările necesare identificării experimentale a CS ale ITT s-au efectuat pe placarea nr.42 din stația de transformare 110/10 kV "Dumbrăvița" care alimentează întreprinderea, pe baza aprobării nr.2662/28.02.1987 a IRE Timișoara. În

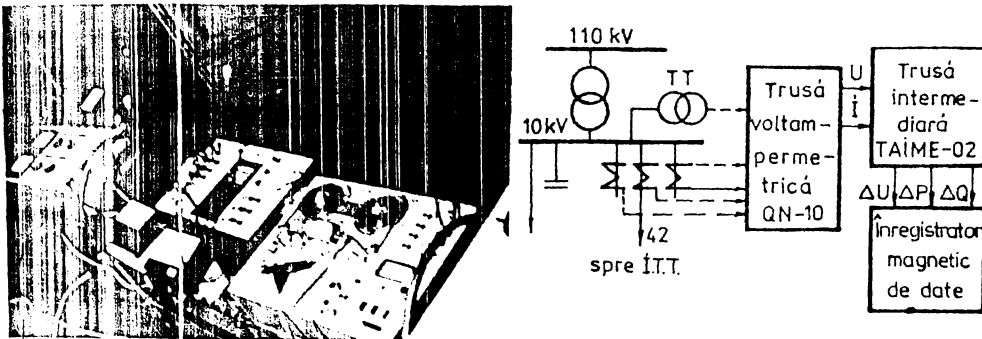


Fig.7.3. Echipamentul de măsurare și înregistrare utilizat:
a) vedere de ansamblu; b) structura și modul de conectare.

pe acest scop a fost utilizat echipamentul de măsură și înregistrare (figura 7.3) descris în capitolul 5 și în /103/.

Modificarea tensiunii pe bara de 10 kV a stației "Dumbrăvița" s-a efectuat prin schimbarea sub sarcină a ploturilor prizei trans-

formatorului de 40 MVA care alimentează bara de 10 kV din stația.

Domeniul de variație al tensiunii realizat astfel a fost (9,8 - 10,4)kV iar durata în care s-a acoperit această gamă, de cca 50 secunde.

Mărimile de referință, U_0 , P_0 , Q_0 , corespund funcționării prizei transformatorului pe plotul 1, plot pe care funcționează în regim permanent normal. Stabilirea mărimilor de consemn pentru trusa TALMB-o2, citirea valorilor mărimilor de referință și determinarea scărilor de amplificare a mărimilor de ieșire ΔP , ΔQ , și ΔU , s-au efectuat pe baza citirilor mărimilor electrice, P , Q și U , cu trusa voltampermetrică QN-10. Pentru stabilirea constantelor de proporționalitate între abaterile mărimilor de interes ΔU , ΔP , ΔQ și tensiunile continue corespunzătoare, obținute la ieșirea trusei TALMB-o2, s-au efectuat pentru fiecare test, măsurători de calibrare constând din determinarea, pentru fiecare mărime de interes, cu trusa QN-10 (figura 5.11), a două valori Y_M și Y_m , preferabil cât mai îndepărtate, și măsurarea tensiunilor continue X_M și respectiv X_m de la ieșirea trusei TALMB-o2. Coeficienții de proporționalitate rezultă astfel:

$$S_C = (Y_M - Y_m)/(X_M - X_m) \quad [UM/V] \quad (7.3)$$

unde: UM reprezintă W , VAR , sau V în funcție de natura mărimii Y pentru care s-a efectuat reglajul.

Astfel la ieșirea trusei TALMB-o2 s-au obținut tensiuni continue, proporționale cu abaterile ΔU , ΔP , ΔQ față de mărimile de consemn, măsurate pe plecarea 42 care alimentează ITT, figura 7.3., (coeficienții de proporționalitate fiind determinați conform (7.3)). Aceste abateri au fost înregistrate simultan pe bandă magnetică utilizând în acest scop înregistratorul magnetic de date, DATA RECORDER FM 4674, figura 7.3.

Înregistrările magnetice efectuate în stația de transformare "Dumbrăvița" în trei zile lucrătoare normale (tabelul 7.11), au fost redată apoi în laborator pe hîrtie fotografică, figura 7.4, utilizînd în acest scop oscilografu mecano-optic N117.

Scările de redare ale abaterilor mărimilor măsurate, S_M , ($M \equiv P, Q, U$), tabelul 7.11, s-au determinat cu relații de forma: $S_M = S_C \cdot S_h$, unde: S_h [V/div], reprezintă coeficienții de proporționalitate între tensiunile continue citite de pe banda magnetică și numărul de diviziuni corespunzătoare de pe hîrtia fotografică determinate în același mod ca și coeficienții S_C , descris mai sus.

Tabelul 7.11.

Programul de măsurători și mărimile de referință corespunzătoare

Codul măsurătorilor	Data ora	CS înregistrate	Mărimi de referință			Scări de redare		
			P_o /kW/	Q_o /kVar/	U_o /kV/	S_p /kW/div/	S_Q /kVar/div/	S_U /V/div/
M_o	$\frac{7.04}{15,30}$	P(U),Q(U)	1608	260,7	10	10,896	10,38	19,89
M_1	$\frac{17.04}{10,30}$	P(U)	2100	-	10	6	-	10,45
M_2	$\frac{18.04}{11,00}$	P(U),Q(U)	1920	431	10,1	8,58	10,52	20,45

7.3.2.2. Prelucrarea datelor experimentale

Prelucrarea înregistrărilor experimentale, figura 7.4, în vederea obținerii CS ale CC considerat sub forma analitică (1.3), s-a efectuat în două etape distincte:

- obținerea CS, P(U), Q(U) sub formă tabelară sau grafică;
- estimarea parametrilor CS considerate de formă neliniară (modelul (5.28)) și liniarizarea sa în jurul punctului de funcționare de referință caracterizat de mărimile electrice precizate în tabelul 7.11.

În cadrul primei etape, a), de prelucrare a datelor experimentale, s-au determinat pentru fiecare test efectuat dependențele $P=f(U)$ și $Q=\varphi(U)$, figurile 7.5, exprimate în u.r. (mărimi de bază fiind mărimile caracteristice regimului de referință).

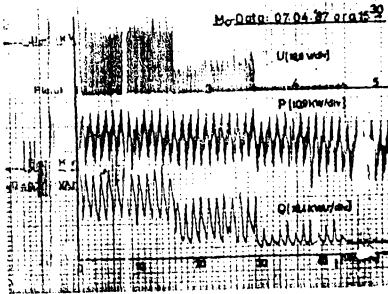


Fig.7.4. Înregistrările de tensiune, putere activă și putere reactivă, testul M_o .

Considerînd scările de reprezentare a abaterilor mărimilor de interes, S_p , S_Q și S_U , conform tabelului 7.11, calculul punctelor acestor CS s-a efectuat pe baza următoarelor relații:

1) tensiunea, exprimată în u.r. corespunzătoare plotului 1 al prizei transformatorului:

$$U_{r1} = 1 + Y_1 \cdot S_u / U_o ; \quad (7.4)$$

unde Y_1 reprezintă numărul de diviziuni citite pe hîrtia fotografică între poziția tensiunii de referință (plotul 1) și cea a tensiunii corespunzătoare plotului 1 ($Y_1=0$).

2) puterea activă, P_{r1} și puterea reactivă, Q_{r1} , corespunzătoare plotului 1 al prizei:

$$P_{ri} = P_{ri-1} + \frac{\Delta X_{Pi}}{P_o} \cdot S_P ; \quad Q_{ri} = Q_{ri-1} + \frac{\Delta X_{Qi}}{Q_o} \cdot S_Q ; \quad (7.5)$$

unde: ΔX_{Pi} și ΔX_{Qi} reprezintă numărul de diviziuni corespunzătoare modificării puterii active, respectiv reactive, la trecerea plotului prizei de pe poziția i-1 pe poziția i; P_{ri-1} și Q_{ri-1} reprezintă puterile activă, respectiv reactivă, absorbite de CC în momentul imediat anterior trecerii plotului prizei pe poziția i.

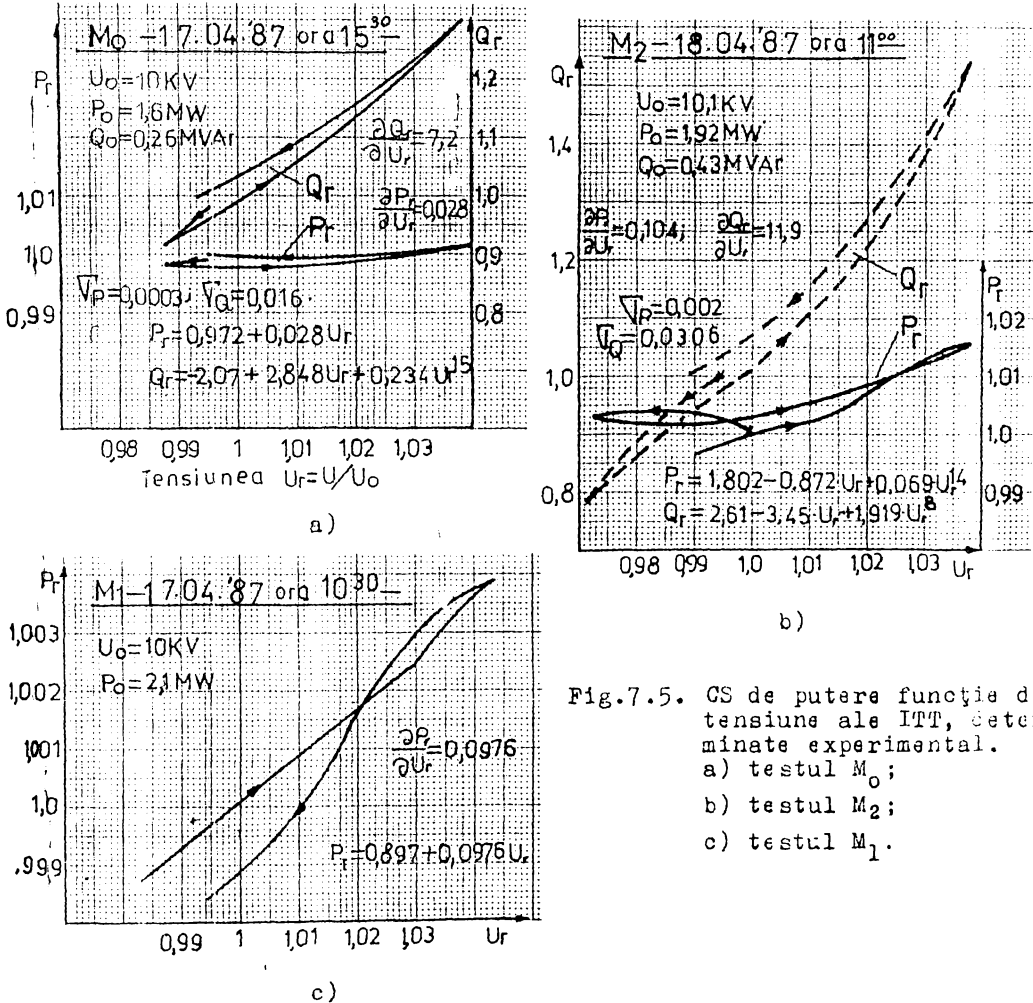


Fig.7.5. GS de putere funcție de tensiune ale ITT, determinate experimental.
 a) testul M_0 ;
 b) testul M_2 ;
 c) testul M_1 .

Utilizarea acestei proceduri de calcul pentru stabilirea punctelor CS experimentale a fost impusă de fluctuațiile destul de rapide (figura 7.4) ale puterii consumate, în special a celei active, ca urmare a odificării permanente a regimurilor de funcționare ale motoarelor electrice de antrenare, aspect specific CC industriali.

CS ale ITT astfel obținute sînt prezentate sub formă grafică în figura 7.5, separat pentru fiecare test experimental efectuat.

Etapa b) de prelucrare a datelor experimentale obținute sub formă grafică, figura 7.5, în vederea estimării parametrilor expresiilor analitice ale CS, s-a efectuat conform algoritmului de estimare cu MCMMP descris în §.5.4.4. În acest scop, CS reprezentate grafic, figura 7.5, au fost discretizate, obținîndu-se tablouri de tripleți cu valorile U, P, Q pentru cca 25 de puncte de pe fiecare caracteristică grafică.

Admițîndu-se forma (5.28) pentru CS neliniare determinate experimental, s-au estimat valorile parametrilor acestor caracteristici utilizînd în acest scop, programul de calcul "FREDEX" descris în §.5.4.4. și figura 5.15. Valorile parametrilor CS neliniare obținute pentru cele trei teste efectuate sînt prezentate în fig.7.5.

7.3.2.3. Concluzii

Concluziile care se desprind din analiza rezultatelor testelor experimentale efectuate pentru identificarea CS ale unui CC tipic industrial, pot fi sintetizate astfel:

1. Obținerea unor rezultate concludente implică utilizarea unui echipament adecvat care să permită amplificarea corespunzătoare și înregistrarea continuă a abaterilor mărimilor de interes. Această se impune în mod deosebit în cazul CC industriali care prezintă valori mici ale abaterilor puterilor absorbite la modificarea, în limite reduse, de 5 - 7 %, a tensiunii de alimentare și totodată prezintă fluctuații ale acestor mărimi comparabile cu abaterile cauzate de modificarea tensiunii la borne.

2. Forma analitică (5.28) de reprezentare a CS neliniare ale CC este adecvată atît pentru CS de putere activă cît și de putere reactivă. Abaterile medii patratice, $\overline{\sigma}$, definite conform relației (5.30) și prezentate în figurile 7.5, au valori foarte reduse în raport cu domeniile de variație a mărimilor măsurate. Această formă de reprezentare a CS neliniare pentru CC industriali, a fost validată și prin prelucrarea altor date experimentale determinate anterior și prezentate în /59/, /60/, /91/, /93/, /103/.

3. Valorile BR obținute în cadrul testelor experimentale efectuate sînt în concordanță cu valorile BR ale puterii active și reactive funcție de tensiune, determinate prin identificare analitică (tabelul 7.10) pentru ITT considerată cu bateriile de condensatoare statice conectate.

4. Algoritmul de estimare al parametrilor CS descris în §.5.4.4. și implementat în programul de calcul "PREDEX" (ordinograma din figura 5.11), s-a dovedit eficient atât în cazul CS de putere activă cât și a celor de putere reactivă pentru CC de tip industrial.

7.4. Identificarea CD ale I.T.T.

7.4.1. Identificarea analitică a CD ale I.T.T.

7.4.1.1. Reprezentarea elementelor componente ale CC considerat

În vederea identificării analitice a CD ale CC reprezentat de ITT "văzut" de pe bara de 10 kV a stației de transformare de 110/10 kV "Dumbrăvița", avînd structura prezentată în §.7.2, în conformitate cu cele prezentate în capitolul 6, se impune separarea consumatorilor rotativi de cei statici datorită modului diferit de tratare a celor două categorii. Astfel, consumatorii statici avînd CD identice cu cele statice, aceștia vor fi reprezentați direct pe barele de 0,4 kV ale TGD ale ITT, figura 7.6. Consumatorii rotativi, constituiți din MI, în general mici și medii, sînt alimentați de pe aceleași bare de 0,4 kV ale TGD prin RBD radiale formate aproape în exclusivitate din cabluri tip ACYABY cu diverse secțiuni /152/.

Pentru a permite o abordare ierarhizată și pentru a limita dimensiunile problemei identificării CD ale consumatorilor rotativi, s-au definit pentru fiecare secție productivă a ITT cîte un MI echivalent și o RBD echivalentă. Parametrii electrici, p_e , ai acestor MI echivalente au fost determinați ca medii ponderate, conform /55/, ale parametrilor, p_i , precizați în tabelul 7.12, ai celor, m , tipodimensiuni de MI existente în secția respectivă.

$$p_e^{u.r.n/} = \sum_{i=1}^m p_i \frac{n_i \cdot P_{ni}}{\sum_{i=1}^m n_i P_{ni}} ; \quad (7.6)$$

unde: m - este numărul de tipodimensiuni de MI din secție, conform tabelelor 7.1 și 7.2.; n_i - reprezintă numărul de MI de același tip, i , avînd puterea nominală P_{ni} .

Valorile parametrilor electrici p_i (R_1 , R_2 , L_G , L_m) ai MI din seria ASI prezentate în tabelul 7.12, au fost stabilite pe baza buletinelor de încercări de laborator emise de Întreprinderea "Electromotor" Timișoara conform subparagrafului 2.3.4. Constantele de timp mecanice, T , ale rotoarelor MI împreună cu mecanismele antrenate, au fost estimate pe baza datelor prezentate în /55/, /128/ și a unor de-

Tabelul 7.12.

Parametrii principalelor MI din secțiile productive

Secția	nr. crt.	/kW/ nxP _n	cos φ	β	/u.r.n/ R ₁	/u.r.n/ R ₂	/u.r.n/ L _φ	/u.r.n/ L _m
Teșă- torie	1	165x2,2	0,8	0	0,065	0,058	0,177	1,27
	2	120x0,75	0,76	0	0,11	0,056	0,18	1,3
	3	150x1,1	0,78	0	0,12	0,065	0,205	1,57
	4	12x4	0,82	0	0,052	0,053	0,11	2,05
	5	1x55	0,86	2	0,025	0,042	0,154	4,66
Vigo- nie I	1	28x24	0,5	-1	0,044	0,065	0,18	2,4
	2	14x5,5	0,83	2	0,037	0,038	0,124	2,22
	3	14x0,75	0,75	17	0,12	0,054	0,19	1,26
	4	9x45	0,88	0	0,023	0,033	0,11	3,15
	5	45x1,1	0,75	0	0,085	0,07	0,065	1,8
	6	4x55	0,86	2	0,025	0,042	0,15	4,66
Fini- saj	1	3x11	0,84	1	0,033	0,041	0,122	3,44
	2	3x7,5	0,84	0	0,04	0,047	0,121	1,72
	3	30x5,5	0,83	2	0,037	0,042	0,127	2,42
	4	15x2,2	0,8	2	0,064	0,06	0,090	2,37
	5	18x1,5	0,8	2	0,052	0,054	0,110	2,29
	6	3x11	0,83	0	0,035	0,054	0,144	2,41
Ring	1	48x11	0,84	1	0,039	0,045	0,11	1,97
	2	0x2,2	0,8	2	0,082	0,047	0,134	1,89
	3	2x100	0,89	2	0,021	0,025	0,13	5,2
Vigo- nie II	1	2x55	0,86	-1	0,024	0,04	0,154	4,5
	2	4x30	0,85	1	0,0237	0,038	0,128	3,28
	3	4x22	0,85	2	0,0336	0,0394	0,1313	2,027
	4	5x11	0,84	2	0,0335	0,0447	0,127	3,43
Fini- saj	1	2x45	0,86	2	0,0176	0,0382	0,107	3,119
	2	1x75	0,87	2	0,021	0,034	0,128	2,87
	3	6x5,5	0,83	0	0,0382	0,051	0,1247	1,647
	4	3x30	0,92	1	0,0285	0,032	0,1347	3,2026

terminări experimentale efectuate conform /97/.

Valorile parametrilor MI echivalente determinate conform relației (7.6) pentru fiecare secție sînt prezentate în tabelul 7.13.

Calculul parametrilor electrici ai KED echivalente între TOD și tablourile de distribuție din secții, s-a efectuat considerînd o lungime medie, l_{med} , pentru toate cele c cabluri care alimentează secția respectivă conform relațiilor:

$$R = l_{med} \frac{R_u}{c} \sum_{i=1}^c \frac{S_0}{S_1} ; \quad X = \frac{l_{med}}{c} X_u \quad (7.7)$$

unde: R_u , X_u sînt parametrii electrici unitari ai cablului de referință АСГДБД (3x185+90)mm² avînd secțiunea conductoare S_0 , ($R_u=0,357 \Omega/km$; $X_u=0,072 \Omega/km$); S_1 - reprezintă secțiunea conductoare a cablului 1.

Valorile obținute pentru parametrii elementelor KED exprimate sub formă de admitanțe sînt prezentate în figura 7.6.

7.4.1.2. Regimul permanent de funcționare considerat pentru I.T.T.

Determinarea mărimilor caracteristice regimului permanent al CC considerat, s-a efectuat prin calculul circulației de puteri adaptată la CC. Ca mărimi impuse (cunoscute) s-au admis puterile active, P_{010} , absorbite de fiecare MI echivalent, obținute ca sumă a consumurilor medii orare ale MI reale din secția respectivă, puterile active și reactive P_{sto} , Q_{sto} , absorbite de consumatorii statici și tensiunea U_{Ro} a nodului de racord (R) al CC. Valorile acestor mărimi, prezentate în figura 7.6, au fost determinate cu programul de calcul "CONSTA" descris în §.6.2.

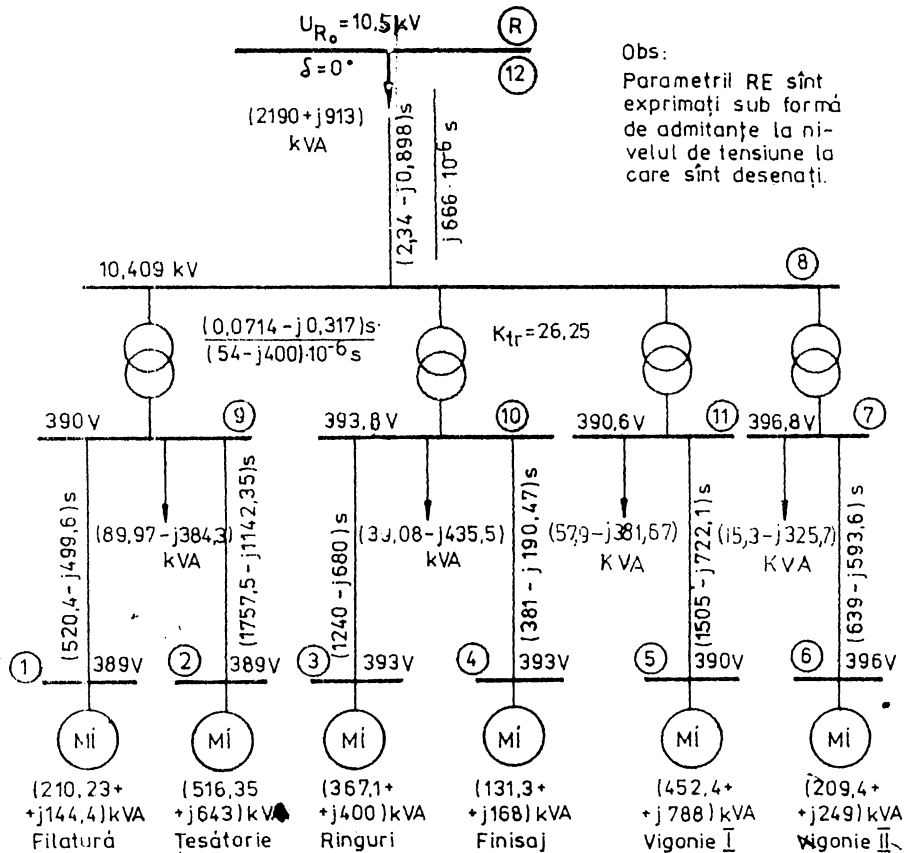


Fig.7.6. Schema electrică monofilară cu regimul permanent de referință al CC.

Tabelul 7.13.

Parametrii MI echivalente exprimate în u.r.n. ($U_n = 10,5$ kV)

Secția Parametrul	Fila- tură	Tesă- torie	Ringuri	Finisaj	Vigonie I	Vigonie II
R_1	0,025	0,07928	0,04012	0,04129	0,03675	0,0257
R_2	0,037	0,0578	0,04045	0,0464	0,051076	0,0366
L_V	0,125	0,1776	0,1178	0,122	0,1487	0,121
L_m	3,242	1,653	2,7348	2,4596	2,9198	3,129
T	502,4	345,4	565,2	942	816,4	565,2
β	0,72	0,2078	1,2	1,4	0,23	0,6
S_n	0,3618	0,9062	0,985	0,3796	2,2328	0,70348

Calculul celorlalte mărimi caracteristice regimului permanent s-a efectuat cu mărimi relative, admitînd ca mărimi de bază, mărimile electrice caracteristice nodului de racord în regim permanent:

$$\begin{aligned}
 U_b = U_{RO} = 10,5 \text{ kV}; \quad S_b = S_{RO} = 3,14798 \text{ MVA}; \quad Z_b = 35,0224 \Omega \\
 I_b = 0,173099 \text{ kA}; \quad \omega_b = 314 \text{ rad/s}; \quad T_b = 1/314 \text{ s.}
 \end{aligned}
 \tag{7.8}$$

Principalele etape parcurse în cadrul programului "CONSTA" pentru determinarea mărimilor caracteristice regimului permanent al MI echivalente, tabelul 7.14, au fost conform §.6.2. următoarele:

1. S-a constituit matricea de admitanță nodală $[Y]$ pentru CC reprezentat în figura 7.6 și s-a reținut într-un tablou unidimensional conform /94/;
2. S-au determinat parametrii consumatorilor statici conform relațiilor (6.12) și s-au introdus în matricea $[Y]$;
3. Au fost eliminate nodurile pasive reducîndu-se dimensiunea matricei de admitanță nodală la (7×7) (6 noduri cu MI și un nod de racord), conform relațiilor (6.13);
4. S-au determinat tensiunile la bornele MI cu o subrutină bazată pe metoda iterativă Gauss-Seidel de rezolvare a sistemelor de ecuații neliniare. Rezultatele sînt prezentate în figura 7.6.
5. S-au determinat alunecările MI echivalente conform procedurii prezentate în §.6.2.1. (relațiile (6.10) și (6.11)) și puterile reactive absorbite conform relației (2.7);
6. S-a augmentat matricea de admitanță nodală $[N']$ cu cele șase admitanțe $1/(R + j\omega L')$ corespunzătoare fiecărui MI echivalent;
7. S-au calculat t.e.m. U_{edoi} , U_{eqoi} pentru fiecare MI echivalent și s-au eliminat nodurile corespunzătoare bornelor MI devenite pasive, conform relațiilor (6.13).

Rezultatele calculului regimului permanent de funcționare a celor șase MI echivalente, mărimi electrice caracteristice și parametrii electrice exprimați în u.r, sînt prezentate sintetic în tabelul 7.14.

Tabelul 7.14.
Parametrii și mărimile caracteristice ale MI echivalente în regimul permanent de referință, exprimate în u.r.

Secția nr. MI	Pila- tură	Teșă- torie	Ringuri	Finisaj	Vigonie I	Vigonie II
	1	2	3	4	5	6
U_b	0,9725	0,9725	0,9825	0,9825	0,975	0,99
δ_b	-1,2294	-1,221	-0,7915	-0,7609	-0,59	-0,3834
P_m	0,9668	0,164	0,1166	0,04171	0,1437	0,06652
Q_m	0,0459	0,2042	0,1271	0,05337	0,2503	0,0791
s_o	0,02305	0,043106	0,01579	0,01704	0,011045	0,11
R	,1315	0,16595	0,0773	0,2071	0,03132	0,0695
L'	,9364	1,0649	0,6688	1,79196	0,3723	0,9639
L_S	20,5722	5,76797	8,2697	19,414	3,9296	13,1912
T'_{do}	136,5	47,507	105,66	83,25	90,26	133,197
U_{sdo}	0,8701	0,71924	0,88566	0,8749	0,8732	0,9081
U_{eqo}	-0,1453	-0,1595	-0,08119	-0,0761	-0,5543	-0,6476

7.4.1.3. CC echivalent al ITT

În conformitate cu modelul adoptat pentru CC industriali prezentat în capitolul 6, se reprezintă CC real sub forma unui MI și al unui consumator static echivalent. Acesta din urmă include și bateriile de condensatoare statice ale ITT (figura 7.7.).

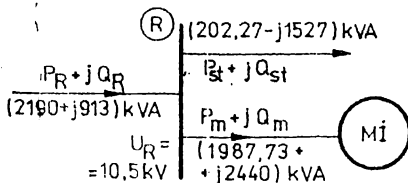


Fig. 7.7. Schema monofilară a modelului CC echivalent al ITT.

Absorbită în nodul (R) și puterea consumatorului static echivalent, ca sumă a puterilor consumatorilor statici distribuiți în RED. Puterea absorbită de MI echivalent s-a determinat din condiția de

închidere a bilanțului puterilor în nodul (R).

Admițînd reprezentarea MI echivalent prin schema electrică în T (figura 7.8) și consumatorul static echivalent printr-o admitanță constantă, parametrii circuitelor echivalente ale CC astfel reprezentat, s-au determinat cu relațiile de calcul dezvoltate în §.6.2.3. și implementate în programul "CONSTA". Parametrii calculați și valorile lor exprimate în u.r. (mărimile de bază, definite cu relațiile (7.8)), sînt prezentate în figura 7.8.

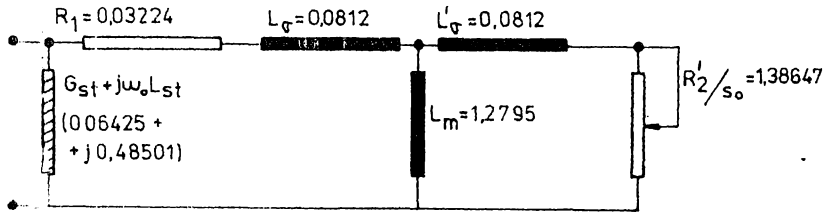


Fig. 7.8. Schema circuitului echivalent al modelului CC în regimul permanent considerat.

Pentru analiza regimurilor tranzitorii ale CC și în vederea identificării celorlalți parametri ai modelului CC (constanta de timp mecanică, T, constanta de timp electromagnetică a circuitului rotoric deschis, T'_{d0} și exponentul β al caracteristicii cuplu-turație a mecanismului antrenat echivalent), acesta se reprezintă prin

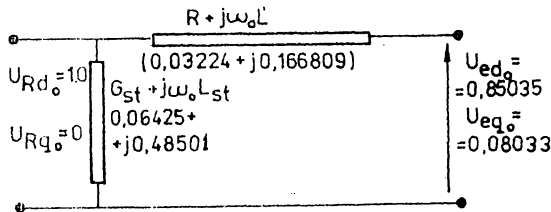


Fig. 7.9. Schema echivalentă a modelului CC pentru analiza regimurilor tranzitorii (toate mărimile sînt exprimate în u.r. cu mărimile de bază indicate cu relațiile (7.8)).

schema echivalentă din figura 7.9, corespunzătoare regimului permanent de referință.

În vederea estimării parametrilor T'_{d0} , T și β care caracterizează regimurile dinamice ale CC echivalent, s-au parcurs următoarele etape:

a) considerînd perturbațiile P_0 (treaptă de tensiune de valoare -0,1 u.r.), P_1 și P_2 , conform figurii 6.8., pentru tensiunea nodului (R) de racord, s-au determinat regimurile tranzitorii ale CC detaliat pe o durată de cca. 1 ms de la producerea perturbației de tensiune cu ajutorul programelor de calcul "tracods" și "CONTRAS";

b) s-au estimat valorile parametrilor T, T'_{d0} și β prin MCMP conform ordinogramei de principiu a programului "ESPD" pentru cele trei tipuri de perturbații de tensiune admise. Pentru perturbația P_0

considerată perturbație mică, s-a utilizat varianta programului "ESPD" cu MM al CC echivalent liniarizat în jurul punctului permanent de funcționare.

Valorile medii ale acestor parametrii obținute cu programul de estimare "ESPD" sînt:

$$T_1 = 9,84 \text{ s} , \quad T'_{do} = 0,25792 \text{ s} \quad \text{și} \quad \beta = 0,9711 \quad (7.9)$$

Considerînd relația de definiție a constantei de timp rotorice, T'_{do} și avînd în vedere valoarea cunoscută a raportului R'_2/s_0 din regimul permanent al CC echivalent, rezultă următoarele valori pentru alunecarea inițială s_0 a MI echivalent și pentru rezistența sa rotorică R'_2 :

$$s_0 = 1,2156 \% \quad \text{și} \quad R'_2 = 0,016853 \text{ u.r.} \quad (7.10)$$

7.4.1.4. CD ale JTT identificate analitic

Parametrii circuitului echivalent, figurile 7.8. și 7.9, ale CC echivalent, estimați pe baza condițiilor de identitate între regimurile de funcționare permanent și tranzitoriu al CC detaliat și al CC echivalent (figura 7.7.), caracterizează complet CC dat, permițînd construirea CD ale acestuia, fie sub forma sistemelor de ecuații intrare-stare-deșire, fie sub forma funcțiilor de transfer liniare.

Validarea parametrilor CC echivalent astfel estimați, s-a efectuat prin compararea răspunsurilor tranzitorii ale acestuia, cu cele ale CC reprezentat detaliat la aceeași perturbație de tensiune (figura 7.10).

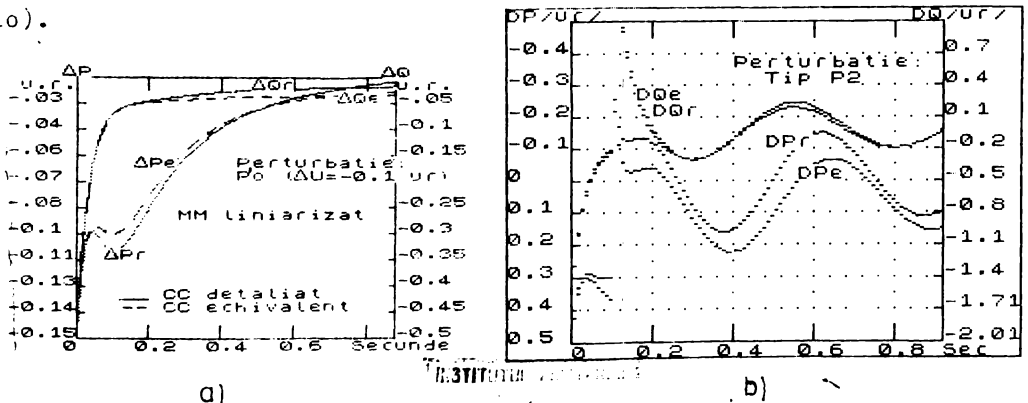


Fig. 7.10. Răspunsurile tranzitorii ale CC detaliat (mărimi afectate cu indicele "r") și al CC echivalent (mărimi afectate cu indicele "e"): a) la perturbația de tensiune P_0 ; b) la perturbația de tensiune P_2 .

În acest scop au fost considerate perturbațiile de tensiune P_0 , impuls dreptunghiular cu durata 0,1 s, și P_2 , descrisă în subparagra-

ful 6.2.3.2.3. Răspunsurile tranzitorii ale CC echivalent la aceste perturbații s-au obținut cu programele de calcul "TRACS" (cu MM liniarizat) pentru perturbația P'_0 și "TRACTAS" (cu MM neliniar) pentru perturbația P_2 , programe descrise în §.6.1.3.2, iar răspunsurile tranzitorii ale CC detaliat real cu programul "CONTRA" descris în §.6.2.2.4. Utilizarea MM liniarizate pentru perturbația impuls

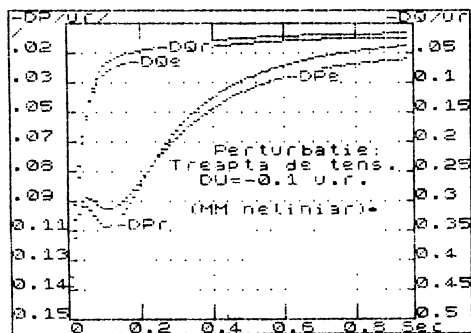


Fig.7.11. Răspunsurile tranzitorii ale CC detaliat și echivalent reprezentati prin MM neliniare la perturbația P'_0 .

dreptunghiular de $-0,1$ u.r./0,1s în tensiune (P'_0) este justificată de rezultatele foarte apropiate care se obțin considerînd aceste MM de cele obținute cu programele cu MM neliniare ("TRACTAS" și "CONTRA"). În figura 7.11. sînt prezentate răspunsurile tranzitorii ale CC echivalent și detaliat, reprezentați prin MM neliniare pentru aceeași perturbație P'_0 , ca și în cazul figurii 7.10.a), în care CC au fost reprezentați

prin MM liniarizate. Această concluzie privind posibilitatea utilizării MM liniarizate pentru perturbații pînă la 10% din valoarea de regim permanent, este confirmată și în /34/.

CD de forma (6.4) ale CC reprezentat de ITT, "văzut" de pe bara de 10 kV a stației de transformare "Dumbrăvița", care se obțin pentru modelul său echivalent, figura 7.7, considerînd parametrii schemelor electrice estimați conform procedurilor descrise anterior sînt:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta U_{ed} \\ \Delta U_{eq} \\ \Delta s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,965 & 0,283 & -0,792 \\ -0,2828 & -0,965 & -8,384 \\ 0,0024 & 0,0178 & -0,0039 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_{ed} \\ \Delta U_{eq} \\ \Delta s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,843 \\ 0,163 \\ -0,0046 \end{bmatrix} \Delta U_R \quad (7.11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_R \\ \Delta Q_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,117 & -5,779 \\ -5,779 & 1,117 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_{ed} \\ \Delta U_{eq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,877 \\ 5,584 \end{bmatrix} \Delta U_R$$

Prin aplicarea transformării Laplace sistemului de ecuații (7.11) conform procedurii de calcul descrise în §.6.1.3.3. și implementate în programul de calcul "LF" s-au obținut CD ale aceluiași CC sub forma funcțiilor de transfer liniare prezentate în relațiile (7.12), unde p este operatorul Laplace:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_R(p) \\ \Delta Q_R(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1,884p^2 + 0,726p + 0,4613}{p^3 + 1,933p^2 + 1,166p + 0,136} + 1,877 \\ -\frac{4,69p^2 + 5,054p + 0,758}{p^3 + 1,933p^2 + 1,166p + 0,136} + 5,584 \end{bmatrix} \Delta U_R(p) \quad (7.12)$$

În concluzie, modelul CC considerat în cadrul prezentei aplicații reprezentînd cu suficientă fidelitate comportarea dinamică a CC metalizat (figura 7.10), demonstrează posibilitatea reprezentării CC prin modale constituite dintr-un MI și un consumator static echivalent.

MM liniarizat al CC, ecuațiile (7.11), poate fi utilizat cu bune rezultate în cazul unor perturbații de amplitudini pînă la 10% ale tensiunii de alimentare. Aceasta permite, pe de o parte, identificarea CC prin teste active cu perturbații ale căror amplitudine în general nu depășește 0,1 u.r. considerînd pentru modelul CC, MM liniarizate și de altă parte, permite reprezentarea CC echivalent prin funcții de transfer liniare, modelul 7.12, prin aplicarea transformării (1.5) conform algoritmului descris în §.6.1.3.3.

7.4.2. Identificarea experimentală a CD ale ITT

7.4.2.1. Măsurătorile și înregistrările efectuate pentru identificarea CD ale ITT

Testele experimentale necesare identificării CD ale CC reprezentat de ITT, s-au efectuat în perioada (21 - 24) aprilie 1987 în stația de transformare 110/10 kV "Dumbrăvița" care alimentează acest consumator prin plecarea numărul 42, figura 7.1. Echipamentul de măsură și înregistrare utilizat în acest scop și modul de exploatare și calibrare al acestuia sînt descrise în capitolul 5, iar conectarea elementelor sale componente s-a efectuat conform figurii 7.3.

Perturbația treaptă de tensiune pe bara de 10 kV a stației "Dumbrăvița" s-a realizat prin conectarea și deconectarea bateriilor de condensatoare statice racordate pe bara de 10 kV a stației, figura 7.1.

Obținerea unor înregistrări adecvate identificării experimentale a CC considerat, a necesitat un mare număr de probe impuse de necesitatea calibrării corespunzătoare a echipamentului. S-au obținut astfel două înregistrări concludente, figura 7.12, la deconectarea bateriilor de condensatoare în cadrul testelor notate M3 și M4. Probele cu conectarea bateriilor nu au condus la rezultate experimentale utile datorită imposibilității realizării practice a conectării simultane a celor două baterii.

Inregistrările au fost efectuate, așa cum s-a precizat în §.6.3.2., pe bandă magnetică rulată cu viteză mare (38 cm/s) și re-dată apoi în laborator (viteza 9,5 cm/s) pe hîrtie fotografică cu ajutorul oscilografului mecano-optic N117. Modul de stabilire al scărilor de reprezentare ale mărimilor înregistrate a fost cel descris în §.7.3.2.1.

Pentru a permite o comparare a rezultatelor identificării experimentale și analitic, regimurile permanente de funcționare ale CC pentru care s-au efectuat testele au fost cele corespunzătoare zilelor lucrătoare normale, schimbul I. Valorile mărimilor caracteristice ale regimurilor permanente anteperturbație pentru cele două teste M3 și M4 realizate, sînt precizate în figurile 7.12.

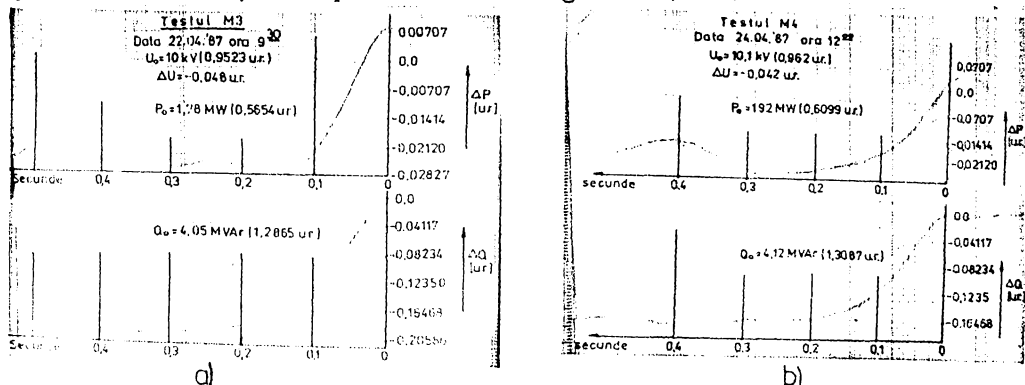


Fig.7.12. Oscilogramele variației puterii active ΔP și reactive ΔQ la perturbația treaptă de tensiune înregistrate în stația de 110/10 kV "Dumbrăvița" pe plecarea nr.42 a ITT: a) testul M3; b) testul M4.

Proarece bateriile de condensatoare pentru compensarea puterii reactive ale ITT (racordate pe barele de 0,4 kV ale TGD) pot fi reprezentate fără nici o rezervă prin admitanțe constante, în vederea facilitării prelucrării rezultatelor experimentale, aceste baterii au fost deconectate pe durata testelor.

Durata regimurilor tranzitorii pentru care s-au efectuat înregistrările a fost de 0,5 secunde, suficientă pentru stabilizarea regimului de funcționare al CC considerat în cazul tuturor testelor efectuate.

7.4.2.2. Prelucrarea datelor experimentale obținute

Estimarea parametrilor electrici ai circuitului echivalent, figura 6.1.b) al CC considerat, s-a efectuat conform algoritmului de estimare dezvoltat în §.6.3.3. și implementat în programul de calcul "BSCD". În acest scop, răspunsurile tranzitorii ale CC real la pertur-

bațiile treaptă de tensiune înregistrate, figurile 7.12, au fost eșantionate în 25 de intervale de câte 0,02 secunde (s-a considerat durata regimului tranzitoriu de 0,5 secunde), obținându-se astfel vectorii $\Delta \bar{Y}_m$ a mărimilor de ieșire măsurate a căror componente sînt prezentate în tabelul 7.15.

Tabelul 7.15.

Răspunsurile tranzitorii eșantionate ale CC considerat la perturbația dată.

Nr. crt.	Timp /s/	Testul M3		Testul M4	
		/u.r/	/u.r/	/u.r/	/u.r/
		ΔP	ΔQ	ΔP	ΔQ
1.	0,0	0,00835	0	0,00442	-0
2.	0,02	0,00353	-0,03602	0,00035	-0,0103
3.	0,04	-0,0352	0,06175	-0,00707	-0,0412
4.	0,06	-0,01148	-0,0926	-0,0106	-0,07204
5.	0,08	-0,01855	-0,11322	-0,01414	-0,1029
6.	0,10	-0,02297	-0,1441	-0,0159	-0,1235
7.	0,12	-0,0256	-0,15747	-0,0177	-0,1286
8.	0,14	-0,02739	-0,17497	-0,01802	-0,139
9.	0,16	-0,02827	-0,1852	-0,01855	-0,1513
10.	0,18	-0,02739	-0,18835	-0,0203	-0,159
11.	0,20	-0,0265	-0,1955	-0,02085	-0,1647
12.	0,22	-0,0256	-0,2007	-0,0212	-0,1668
13.	0,24	-0,02579	-0,20585	-0,02138	-0,1678
14.	0,26	-0,02474	-0,21099	-0,0215	-0,1688
15.	0,28	-0,0256	-0,2109	-0,0212	-0,1698
16.	0,30	-0,0265	-0,2089	-0,0194	-0,1708
17.	0,32	-0,0265	-0,2089	-0,01767	-0,1729
18.	0,34	-0,0247	-0,212	-0,0159	-0,1739
19.	0,36	-0,0229	-0,212	-0,01502	-0,1749
20.	0,38	-0,02032	-0,213	-0,01414	-0,1750
21.	0,40	-0,0177	-0,2141	-0,01467	-0,176
22.	0,42	-0,0159	-0,2151	-0,01537	-0,177
23.	0,44	-0,0159	-0,2151	-0,0159	-0,174
24.	0,46	-0,01714	-0,214	-0,0159	-0,175
25.	0,48	-0,0194	-0,213	-0,0159	-0,173

În vederea estimării parametrilor electrici ai circuitului echivalent cu programul "FSCD", s-a efectuat o interpolare liniară dublindu-se numărul de valori măsurate și obținându-se astfel intervale de eșantionare de 0,01 secunde.

Deoarece mărimile electrice caracteristice regimurilor permanente anteperturbație ale CC real prezentate în figura 7.12, în cazul celor două teste înregistrate nu sînt identice, s-a convenit să se adopte ca mărimi de bază pentru sistemul de unități relative, mărimile adoptate în cazul identificării analitice definite cu relațiile (7.8). Aceasta permite și o comparație facilă a parametrilor obținuți în cadrul celor două categorii de identificare efectuate.

Estimarea parametrilor electrici ai circuitului echivalent al CC considerat, precizați în figura 6.1.b), s-a efectuat conform schemei de principiu prezentată în figura 6.9, în care s-a inclus și influența constantelor de timp T_{dp} și T_{dq} ale traductoarelor de putere (activă, respectiv reactivă, ale trusei TAIME-2 /102/, conform schemei din figura 7.13. În consecință, la CD (6.41) ale CC echivalent,

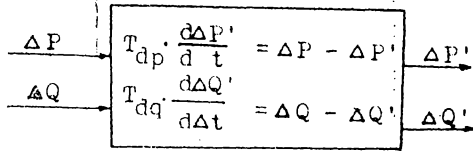


Fig.7.13. Schema bloc a grupului de traductoare de putere ale trusei TAIME-02.

au fost adăugate ecuațiile diferențiale corespunzătoare traductoarelor de putere, fig.7.13, în vederea obținerii MM al CC real împreună cu echipamentul de măsură și înregistrare utilizat.

Estimarea parametrilor circuitului electric echivalent al CC considerat s-a efectuat în programul de calcul "ESCL", descris în §.6.3.3.2, pentru ambele înregistrări, M3 și M4, separat. Pornind de la valorile inițiale pentru componentele vectorului \bar{a} (definit în §.6.3.3) apropiate celor rezultate din identificarea analitică, soluțiile finale ale vectorului \bar{a} corespunzătoare testelor M3 și M4 s-au obținut în 16 și respectiv 19 iterații considerând criteriile de convergență $\epsilon_1 = a_1/500$. Deoarece bateriile de condensatoare ale ITT pentru compensarea puterii reactive au fost deconectate pe timpul testelor, parametrul L_{st} , figura 6.1.b), corespunzător consumatorului static de putere reactivă, a fost admis ca fiind egal cu zero.

7.4.2.3. Rezultatele obținute. Concluzii.

Componentele vectorului \bar{a} al parametrilor CD ale CC estimate cu programul de calcul "ESCL", neavînd o semnificație fizică evidentă, rezultatele procesului de estimare se prezintă sub forma parametrilor electrici ai circuitului echivalent, figura 6.1.b.). Valorile acestor parametri, exprimate în u.r. (mărimile de bază definite conform relațiilor (7.8)), obținute prin prelucrarea rezultatelor testelor M3 și M4 sînt prezentat în tabelul 7.16.

Tabelul 7.16.

Valorile estimate ale parametrilor circuitului echivalent al CC (u.r)

Parametru Test	R_L	L_V	R_2'	L_m	G_{st}	L_{st}	T /s/	β	K_m
M3	0,052	0,095	0,029	0,951	0,083	0	18,1	1,32	0,523
M4	0,0682	0,083	0,025	0,369	0,099	0	17,7	1,08	0,562
Media	0,0601	0,089	0,027	0,66	0,091	0	17,9	1,2	0,5425

Avînd în vedere diferențele relativ mici între valorile parametrilor obținute din cele două teste efectuate și condițiile practic identice în care s-au realizat aceste teste, se adoptă pentru circuitul electric echivalent al CC considerat valorile medii ale acestor parametri, prezentate în ultima linie a tabelului 7.16. Răspunsul tran-

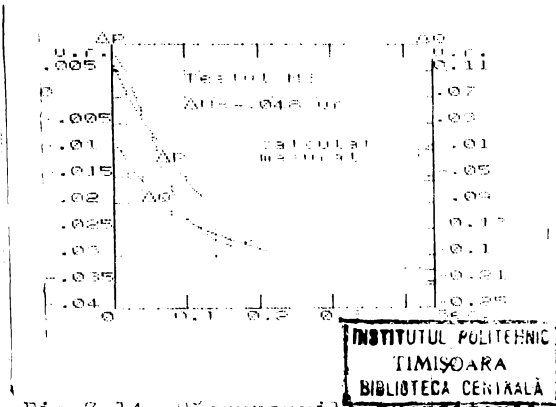


Fig.7.14. Răspunsurile tranzitorii ale CC real (măsurat) și CC echivalent (calculat) la o perturbație treaptă de tensiune.

zitoriu al CC echivalent reprezentat prin CD dezvoltate în §.6.1.3, considerînd valorile medii estimate pentru parametrii circuitului echivalent, este prezentat în figura 7.14 comparativ cu răspunsul tranzitoriu al CC real, testul M3, la aceeași perturbație treaptă de tensiune.

Comportările dinamice similare în cele două situații, figura 7.14, prezentate mai sus, confirmă atât validitatea MM al CC considerat, cât și eficiența algoritmului și

programelor de estimare a parametrilor acestui model.

Referitor la valorile parametrilor circuitului electric al CC echivalent estimate în cadrul identificării experimentale efectuate, se pot evidenția următoarele concluzii:

a) Parametrii exprimați în u.r. au în general valori de același ordin de mărime ca și cei ai unui MI uzual, ceea ce justifică reprezentarea CC real printr-un CC echivalent constituit dintr-un consumator static și un MI echivalent.

b) Valorile parametrului G_{st} , corespunzător consumului de putere activă al consumatorului static echivalent, sînt mult mai mari decît cele așteptate, avînd în vedere ponderea deosebit de mică, cca (10-15)% a acestui tip de consumator în CC considerat. Deoarece consumatorii statici din IPT constituiți în principal din consumatori de iluminat și pierderile în RFD, determină o conductanță $G'_{st} = 0,0645$ (determinată în cadrul identificării analitice), rezultă că diferența pînă la valoarea de 0,091, obținută în cadrul identificării experimentale, corespunde pierderilor de putere activă în miezul feromagnetic al MI. Se impune în consecință ca în MM al MI, în special în cazul cînd acestea au puteri nominale mici, să fie considerată și rezistența R_{Fe} , corespunzătoare pierderilor de putere activă în miezul feromagnetic al acestora.

c) Inductanța de magnetizare, L_m , a MI echivalent obținută în cadrul identificării experimentale prezintă valori destul de diferite în cazul celor două teste efectuate, M3 și M4, tabelul 7.16. Experiența a arătat că valoarea acestui parametru este sensibil afectată de prezența consumatorilor statici de putere reactivă reprezentați printr-un parametru, L_{st} , practic în paralel cu inductanța de magnetizare. Pentru a obține valori cât mai corecte pentru parametrul L_m , s-a impus deconectarea pe timpul măsurărilor a bateriilor de condensatoare statice ale ITT. Considerând aceste baterii de condensatoare ca fiind singurii consumatori statici de putere reactivă ai CC, s-a admis pentru parametrul L_{st} valoarea zero. Considerarea însă și a bateriilor de condensatoare statice în structura CC afectează doar valoarea parametrului L_{st} din schema electrică a circuitului echivalent al CC considerat egală cu 0,485 u.r. (determinată în cadrul identificării analitice §.7.4.1.3.).

Capitolul 8

CONCLUZII GENERALE

Pe baza concluziilor rezultate din analizele efectuate pe parcursul lucrării și prezentate împreună cu justificările corespunzătoare în capitolele anterioare, în prezentul capitol, se efectuează o sinteză a concluziilor și recomandărilor cu caracter general rezultate din analiza de ansamblu a abordării problemei identificării CC. Totodată sînt prezentate direcțiile de cercetare în continuare în acest domeniu și contribuțiile originale ale autorului.

Concluziile și recomandările generale rezultate din lucrare se referă la următoarele aspecte ale identificării CC:

A. Modurile de identificare ale CS și CD ale CC

A.1. Deși atît identificarea analitică cît și cea experimentală prezintă avantaje și dezavantaje discutate detaliat în capitolul 1, totuși identificarea analitică, prin asamblarea ierarhizată a caracteristicilor CCP, constituie modul general de construire a CS și CD ale CC. Identificarea experimentală, deși esențială pentru validarea MM obținute, datorită limitărilor severe de aplicare nu poate fi considerată o metodă generală de identificare.

A.2. Datorită deosebirilor calitative și cantitative dintre cele două categorii de caracteristici, abordarea problemei identificării lor se recomandă să se efectueze separat pentru fiecare categorie prin identificarea analitică și în limita posibilităților prin identificare experimentală.

B. Formele de reprezentare ale caracteristicilor CC

B.1. CS și CD reprezentate prin MM liniarizate în jurul punctului permanent normal de funcționare, se consideră a fi formele adecvate de reprezentare a CC prin CS sau CD.

B.2. Pentru CS forma de reprezentare cea mai convenabilă este prin expresii liniare (1.3) în care puterea activă și reactivă absorbită de CC sînt funcții liniarizate de tensiunea și frecvența de la bornele sale, iar parametrii acestora, ER, avînd o semnificație fizică concretă (panta caracteristicii în punctul de funcționare considerat) au dispersie relativ mică.

B.3. Pentru reprezentarea CC prin CD se consideră adecvate sistemele de ecuații intrare-stare-ieșire liniarizate în jurul punctului permanent normal de funcționare (forma (1.4)) ce caracterizează comportarea dinamică a unui MI echivalent conectat în paralel cu un consumator static, de asemenea echivalent în nodul de racord al CC

real. Parametrii necesari construirii CC ale CC în acest caz sînt parametrii electricei ai circuitului echivalent al unui MI și consumator static echivalent.

C. Parametrii CS și CD ale consumatorilor individuali

C.1. În vederea asamblării facile a CS și CD ale CC este necesară o grupare a consumatorilor individuali pe categorii ce pot fi reprezentate prin caracteristici cu parametrii similari. Forma de reprezentare a acestor caracteristici trebuie să fie identică cu forma adoptată pentru caracteristicile CC ce se identifică.

C.2. MI și MS, avînd comportări apropiate în regimurile permanente și dinamice, face posibilă în cazul existenței unui număr redus de MS cu pondere mică în consumul total al CC, asimilarea acestora cu MI existente în general, în pondere mult mai mare.

C.3. Parametrii CS ai MI și MS, spre deosebire de cei ai consumatorilor statici, prezintă în general, o dispersie mare, determinată de tipodimensiunea motorului, gradul său de încărcare și parametrii caracteristicii cuplu-turație a mecanismului antrenat. Se impune în consecință, stabilirea valorilor parametrilor CS în funcție de aceste mărimi, adoptarea unor valori medii nefiind în general, acceptabilă.

C.4. În cazul MI s-a evidențiat o sensibilitate deosebit de mare a CS de putere activă în funcție de caracteristicile cuplu-turație ale mecanismului antrenat iar a CS de putere reactivă în funcție de gradul de încărcare și puterea nominală a motorului. Această constatare permite o "decuplare" a celor două categorii de CS în procesul de asamblare a CS ale CC cu pondere mare în MI.

D. Considerarea RED și a bateriilor de condensatoare

D.1. Parametrii electricei ai RED ale CC afectează diferit valorile parametrilor CS ale CC în funcție de parametrii CS ale consumatorilor individuali componenți alimentați prin RED respectivă, conform diagramelor 5.5. și 5.6. În concluzie, considerarea RED în asamblarea CS ale CC este esențială în cazul existenței unui mare număr de consumatori individuali rotativi în componența CC considerat (cazul consumatorilor industriali).

D.2. Bateriile de condensatoare pentru compensarea puterii reactive din structura CC prezintă o comportare diferită de a celorlalte tipuri de consumatori individuali determinînd, în cazul compensării puternice a puterii reactive, o dispersie mare a valorilor parametrilor caracteristicilor de putere reactivă exprimate în u.r. Se impune în consecință, estimarea parametrilor caracteristicilor CC fără considerarea bateriilor de condensatoare, pentru a obține valori ale

acestora cît mai puțin dispersate, care să permită compararea cu alte valori similare din literatură. Prezența bateriilor de condensatoare se va considera ulterior prin asamblarea caracteristicilor acestora cu caracteristicile obținute ale CC fără bateriile de condensatoare.

B. Modul de estimare al parametrilor CS și CD ale CC

B.1. Estimarea parametrilor CS și CD ale CC cu RBD constituite din stații de transformare, linii electrice aeriene sau subterane de lungime mare, implică considerarea acestora prin parametrii electrici ai circuitelor echivalente ale elementelor componente.

B.2. Parametrii CS ale CC constituiți dintr-un număr mare de MI conectate prin linii electrice în cabluri de mică lungime (cazul întreprinderilor industriale) pot fi estimați separat pentru CS de putere activă în funcție de caracteristicile cuplu-turație ale mecanismelor antrenate și separat pentru CS de putere reactivă în funcție de puterile nominale și gradele de încărcare ale acestora conform metodei denumite "decuplate" prezentate în capitolul 5.

B.3. Estimarea parametrilor CD ale CC în cadrul identificării analitice, implică utilizarea unor metode care să permită și considerarea RBD. Estimarea parametrilor prin medii ponderate ale parametrilor consumatorilor individuali conduc la rezultate îndepărtate de realitate.

B.4. În cadrul identificării experimentale a CC, algoritmele dezvoltate pe baza MCMMP s-au dovedit eficiente atît în cazul estimării parametrilor CS cît și ai CD.

F. Realizarea testelor necesare identificării experimentale

F.1. Datorită valorilor relativ mici, ($5 \pm 10\%$), a abaterilor de tensiune care se pot realiza practic la bornele CC în cadrul testelor active, abaterile mărimilor caracteristice în special ale puterii active au valori foarte mici, fiind în general, acoperite de oscilațiile inerente modificărilor de regimuri de funcționare ale elementelor componente ale CC.

F.2. Obținerea unor rezultate experimentale concludente implică înregistrarea abaterilor de putere activă și reactivă realizate în cadrul testelor pe un suport magnetic sau direct pe hîrtie fotografică. În acest scop, se impune utilizarea unui echipament adecvat pentru măsura și înregistrarea caracteristicilor consumatorilor care să permită conversia mărimilor măsurate, amplificarea abaterilor lor față de mărimile electrice de consemn, caracteristice regimului permanent anteperturbație și înregistrarea simultană a abaterilor mărimilor măsurate.

Principalele direcții de continuare a cercetărilor privind identificarea CS și CD ale CC conturate în cadrul prezentei lucrări pot fi sintetizate astfel:

1. Considerarea prin funcții probabilistice incluse în MM ale caracteristicilor CC a acțiunilor desoărcătoarelor automate de sarcină, a deconectărilor unor contactoare sau a opririi unor MI în cazul scăderii tensiunii sau frecvenței sub un anumit prag.

2. Conceperea și realizarea unor echipamente de urmărire continuă a comportării CC și reținerea datelor corespunzătoare regimurilor cu abateri sensibile ale mărimilor de sistem (tensiune și frecvență) de la borne sub formă numerică.

3. Elaborarea unor algoritme de prelucrare on-line a rezultatelor determinărilor experimentale, în vederea determinării distribuției valorilor parametrilor CS și CD ale CC identificați.

4. Identificarea CS și CD a unor CC tipici (industriali, comerciali, casnici, rurali, etc), care să permită pe baza ponderilor cu care intervin în consumul de energie electrică, asamblarea caracteristicilor consumatorilor din care fac parte.

5. Efectuarea de simulări analitice ale regimurilor permanente și dinamice ale SEE de interes în vederea evidențierii nodurilor din sistem critice din punct de vedere al modului de reprezentare al sarcinii.

6. Constituirea unei baze de date privind reprezentarea dimensiunilor CC din nodurile SEE național, în mod special, a celor racordate în nodurile detectate a fi critice din punct de vedere al modului de considerare al sarcinii.

Contribuțiile originale în domeniul identificării CC și reprezentării lor prin CS și CD aduse de autor în cadrul prezentei lucrări sînt, pe de o parte, de natură teoretică prin deducerea unor relații de calcul necesare abordării problemei identificării CC și pe de altă parte, de natură experimentală și practică prin testele de laborator și din stațiile de transformare efectuate pentru identificarea unor consumatori, prin conceperea și realizarea practică a unor standuri și echipamente electrice necesare identificărilor experimentale și prin aplicația practică de identificare analitică și experimentală a unui CC tipic industrial (ITT). Legi aceste contribuții au fost prezentate detaliat în cadrul capitolelor anterioare, se prezintă totuși, în continuare, o sinteză a lor pentru a reflecta imaginea de ansamblu a contribuției prezentei lucrări în domeniul identificării CC. Aceste contribuții sînt:

a) analiza critică pe baza unei vaste consultări bibliografice a stadiului actual al identificării CC și sinteza rezultatelor și informațiilor referitoare la acest domeniu prezentate în literatură;

b) sistematizarea abordării problemei identificării proceselor în cazul concret al CC și definirea unor noțiuni care intervin în acest proces ;

c) analiza pe baza unei sinteze bibliografice și a experienței autorului, a influenței modului de reprezentare a sarcinii asupra regimurilor permanente și dinamice ale SBE complexe și evidențierea unor concluzii importante privind formele de reprezentare ale CC prin CS și CD;

d) elaborarea unei strategii originale de abordare a problemei identificării CC prin tratarea unitară a CC și a principalelor categorii de consumatori individuali (MI, MS, consumatori de iluminat, cuptoare, redresoare);

e) stabilirea unitară a sistemului de coordonate, a convențiilor de semn și sistemului de unități de măsură pentru mărimile electrice care intervin în CS și CD ale consumatorilor individuali și CC în vederea asamblării facile a caracteristicilor CC și utilizării comode a acestora în algoritmele și programele de calcul existente pentru analiza regimurilor SBE;

f) deducerea expresiilor CS neliniare și liniarizate în jurul punctului permanent de funcționare ale MI pe baza schemei circuitului electric echivalent al acestuia;

g) elaborarea unui algoritm și program de calcul (denumit "AMASU") pentru determinarea parametrilor, BR, ai CS ale MI;

h) determinarea cu acest program de calcul a valorilor parametrilor CS ale gamei de MI cu rotor în colivie din seria unitară ASI, de fabricație "Electromotor" Timișoara, considerând parametrii circuitelor echivalente estimate pe baza prelucrării a 93 buletine de încercări ale MI din această serie emise de întreprinderea constructoare;

i) construirea MM al CD ale MI sub forma sistemelor de ecuații intrare-stare-ieșire neliniare și dezvoltarea, pe baza acestui MM, a CD liniarizate în jurul punctului permanent de funcționare și a funcțiilor de transfer liniare ale MI;

j) elaborarea programelor de calcul "TRACTAS" și "TRACS" pentru analiza regimurilor dinamice ale MI reprezentate prin CD neliniare și respectiv liniarizate, de forma intrare-stare-ieșire, construite anterior;

k) conceperea și realizarea unui stand de experimentări în la-

borator, adecvat identificării și validării CS și CD ale MI;

l) sistematizarea ecuațiilor de funcționare ale mașinii sincrone considerate în regim de motor adoptînd convențiile de semn și de reprezentare a sistemului de coordonate în mod unitar cu cele pentru MI;

m) deducerea relațiilor de calcul pentru parametrii CS ale MS și elaborarea programului de calcul "CSMS" pentru estimarea acestora;

n) analiza influenței gradului de încărcare activă și reactivă a MS asupra valorilor parametrilor CS ale acestuia și evidențierea unor concluzii importante privind aprecierea valorilor lor;

o) elaborarea MM al MS adecvat reprezentării acestuia prin CD neliniare pentru analiza regimurilor tranzitorii și deducerea formei liniarizate a CD ale MS și expresiilor analitice ale elementelor matricelor coeficienți ale acestora;

p) elaborarea algoritmilor și programelor de calcul "CDMS" și "CDMSL" pentru analiza regimurilor dinamice ale MS reprezentat prin CD neliniare și respectiv, liniarizate, dezvoltate anterior;

q) deducerea analitică a relațiilor de calcul pentru parametrii CS ale consumatorilor de tip rezistiv (cuptoare termice) și evaluarea lor pentru cîteva aliaje uzuale în construcția acestor consumatori;

r) stabilirea relațiilor de calcul și analiza influenței compensării puterii reactive cu baterii de condensatoare statice asupra valorilor parametrilor CS ale CC;

s) elaborarea algoritmilor și programelor de calcul "CSR" și "CSB" pentru asamblarea CS ale CC cu RED radiale și respectiv cu RED complex buclate;

t) analiza influenței parametrilor electrici ai RED asupra valorilor BR și elaborarea unor diagrame ce permit aprecierea direcției a influenței lor asupra parametrilor CS;

u) conceperea și realizarea efectivă a unui echipament adecvat pentru efectuarea măsurătorilor și înregistrărilor în cadrul testelor experimentale active pentru determinarea CS și CD ale CC;

v) elaborarea algoritmului și programului de calcul "PRBLEX" pentru prelucrarea rezultatelor determinărilor experimentale pe baza MCAMP ponderate în vederea estimării parametrilor CS ale CC;

w) elaborarea CD de forma intrare-stare-ieșire și a funcțiilor de transfer liniare ale CC echivalent, considerat constituit dintr-un MI și consumator static echivalent;

z) deducerea relațiilor și a algoritmului de estimare a parametrilor circuitului electric al CC echivalent în cadrul identificării analitice a CC pentru care se consideră cunoscute regimurile de funcționare și parametrii circuitelor echivalente ale consumatorilor componenți și ale elementelor RED;

x) dezvoltarea unui algoritm eficient bazat pe MQMMP de estimare a parametrilor CD ale CC echivalent pentru prelucrarea statistică a rezultatelor determinărilor experimentale în cadrul identificării CC cu teste active și implementarea acestui algoritm într-un program de calcul performant, denumit "ESCD";

y) identificarea analitică și experimentală a GS și CD ale unui CC (ITT), tipic industrial, considerat racordat pe barele de 10 kV ale stației de 110/10 kV "Dumbrăvița" din municipiul Timișoara și evidențierea unor concluzii utile referitoare la particularitățile problemei identificării și a valorilor parametrilor GS și CD ai acestui tip de CC.

Anexa A.3.1.

Expresiile analitice ale coeficienților CD liniarizate ale MS

Notă: Pentru simplificarea scrierii s-au introdus notațiile:

$$b = \frac{L_d - L'_d}{L'_d}; \quad c = \frac{L_q - L'_q}{L'_q}$$

A. Coeficienții ecuațiilor de stare

$$A_{11} = -L_d/L'_d; \quad A_{13} = -U_o \cdot c [\sin \theta_o + R \cdot \cos \theta_o / (\omega_o L_q)];$$

$$A_{21} = \frac{U_o}{\omega_o L'_d} (1 + b/\omega_o L_q) \times [\sin \theta_o - R \cdot \cos \theta_o / (\omega_o L'_d)] + \frac{2 \cdot U'_e R}{\omega_o L'_d{}^2} \quad (A.3.1.1)$$

$$A_{22} = -K_m / \beta \omega_{ro}^{\beta-1} - k_a U_o^2; \quad A_{23} = \frac{U'_e U_o}{\omega_o L'_d} (1 + \frac{b \cdot R}{\omega_o L_q}) (\cos \theta_o + \frac{R \cdot \sin \theta_o}{\omega_o L'_d}) -$$

$$- \frac{b \cdot U_o^2}{\omega_o L_q} \left[\cos(2\theta_o) \left(1 + \frac{R}{\omega_o L'_d}\right) + \sin(2\theta_o) \cdot \frac{R}{\omega_o L_q} \cdot c \right]$$

$$B_{11} = c \left[\cos \theta_o - \frac{R \cdot \sin \theta_o}{\omega_o L_q} \right]; \quad B_{12} = c \cdot U_o \frac{R \cdot \sin \theta_o}{\omega_o^2 L_q}$$

$$B_{22} = \frac{-U_{eqo} U_o}{L'_d \omega_o^2} \left[\sin \theta_o + 2R \left(\frac{b \sin \theta_o}{L_q} - \frac{\cos \theta_o}{L'_d} \right) / \omega_o + \frac{b \cdot R \cdot \cos \theta_o}{\omega_o L_q} \right] +$$

$$+ \frac{b U_o^2}{\omega_o L_q} \left[\frac{\sin(2\theta_o)}{2} \frac{R}{L'_d} - R \left(\frac{\sin^2 \theta_o}{L_q} + \frac{\cos^2 \theta_o}{L'_d} \right) \right] - 2 \frac{U'_e{}^2 \cdot R}{\omega_o^3 \cdot L'_d{}^2} + k_a U_o^2$$

$$B_{23} = \frac{U'_e}{\omega_o} \frac{U_o}{L'_d} \left(1 + \frac{b \cdot R}{\omega_o L_q}\right) \left(\sin \theta_o - \frac{R \cdot \cos \theta_o}{\omega_o L'_d}\right) - \frac{b \cdot U_o}{L_q} \left[\sin 2\theta_o \left(1 + \frac{R}{\omega_o L'_d}\right) -$$

$$- \frac{R}{\omega_o} \left(\frac{\sin^2 \theta_o}{L_q} - \frac{\cos^2 \theta_o}{L'_d}\right)\right] - 2 \cdot U_o K_a (\omega_{ro} - \omega_o) \quad (A.3.1.2)$$

B. Coeficienții ecuațiilor de ieșire

$$C_{11} = -\frac{U_o}{\omega_o L'_d} \left[\sin \theta_o - \frac{R \cos \theta_o}{\omega_o L_q}\right]; \quad C_{21} = -\frac{U_o}{\omega_o L'_d} \left[\cos \theta_o + \frac{R \sin \theta_o}{\omega_o L_q}\right]$$

$$C_{13} = \frac{U_o^2}{\omega_o} \left[\frac{1}{L_q} + \frac{1}{L'_d}\right] \cos(2\theta_o) - \frac{U_o U'_e}{\omega_o L'_d} \left[\cos \theta_o + \frac{R \sin \theta_o}{\omega_o L_q}\right]$$

$$G_{21} = - \frac{U_0}{\omega_0 L'_d} \left[\cos \theta_0 + \frac{R \cdot \sin \theta_0}{\omega_0 L_q} \right] ; \quad (A.3.1.3)$$

$$G_{23} = - \frac{U_0^2}{\omega_0} \sin(2\theta_0) \left[\frac{1}{L'_d} + \frac{1}{L_q} \right] - \frac{U_0 U'_e q_0}{\omega_0 L'_d} \cdot \left[\frac{R \cdot \cos \theta_0}{\omega_0 L'_d} - \sin \theta_0 \right] ;$$

$$D_{11} = \frac{2U_0}{\omega_0 L'_d L_q} \left[(L'_d + L_q) \frac{\sin(2\theta_0)}{2} - \frac{R}{\omega_0} \right] - \frac{U'_e q_0}{\omega_0 L'_d} \left(\sin \theta_0 - \frac{R \cos \theta_0}{\omega_0 L_q} \right) ;$$

$$D_{12} = - \frac{U_0^2}{2 L'_d L_q} \left[(L'_d + L_q) \frac{\sin(2\theta_0)}{2} - \frac{2R}{\omega_0} \right] + \frac{U_0 U'_e q_0}{L'_d \omega_0^2} \left[\sin \theta_0 - \frac{2R \cos \theta_0}{\omega_0 L_q} \right] ;$$

$$D_{21} = \frac{2U_0}{\omega_0} \left[\frac{\cos^2 \theta_0}{L'_d} - \frac{\sin^2 \theta_0}{L_q} \right] - \frac{U'_e q_0}{\omega_0 L'_d} \left[\cos \theta_0 + \frac{R \cdot \sin \theta_0}{\omega_0 L_q} \right] ; \quad (A.3.1.4)$$

$$D_{22} = - \frac{U_0^2}{\omega_0^2} \left[\frac{\cos^2 \theta_0}{L'_d} - \frac{\sin^2 \theta_0}{L_q} \right] + \frac{U_0 \cdot U'_e q_0}{\omega_0 L'_d} \left[\cos \theta_0 + \frac{2 \cdot R \cdot \sin \theta_0}{\omega_0 L_q} \right]$$

B I B L I O G R A F I E

1. AKHTAR, M.Y., Frequency dependent dynamic representation of induction motor loads, Proc.IEE, 115, 1968, p.802-812.
2. ALBERT, H., FLOREA, I., IORDANESCU, I. Alimentarea cu energie electrică a întreprinderilor industriale. Ed.Tehnică, București, 1978.
3. ARMITAGE, D.C.P., TURNER, K.S., ARRILLAGA, I., Modeling rectifier loads for a multi-machine transient stability programme. PAS-99, nr.1, 1980, p.78-85.
4. BABUȚIA, I., DRAGOMIR, T., MURESAN, I., PROȘTEAN, O. Conducerea automată a proceselor. Ed.Facla Timișoara, 1985.
5. BANIUC, I.J., BOGDANOV, V.A., DOROHIN, A.P., Otenka krutizni karakteristic energosistem. Elektricesstvo nr.9/1982, p.60-62.
6. BERCOVICI, M., ARIB, A., POBATA, A., Rețele electrice. Calculul electric. Ed.Tehnică București, 1974.
7. BREBETON, D.S., LEWIS, D.G., YOUNG, C.G., Representation of induction motor loads during power system stability studies. AIEE PAS-76 nr.8 1957, p.451-456.
8. BERG, G.J., Power-system load representation. Proc.IEE, 120, nr.3 1973, p.344-348.
9. BERG, G.J. System and load behaviour following loss of generation experimental results and evolution. Proc.IEE vol.119, nr.10, 1972, p.1483-1486.
10. BERNAS, S., TIOC, Z., Matematicheskie modeli elementov elektroenergeticheskikh sistem. Energoizdat Moskva, 1982.
11. BOLDEA, I., ATANASIU, Gh. Analiza unitară a mașinilor electrice. Ed.Academiei RSR, București, 1983.
12. BROWN, H.E., SHIPLEY, R.B., COLEMAN, D.W. A study of stability equivalents. PAS-88 nr.3, 1969, p.200-206.
13. BUBENKO, J.A., JOHANSEN, T.A., Steady-state voltage load characteristics. Electrotehnika nr.5 1962, p.77-85.
14. BUTA, A., MOGA, M., MAXIMAN, M., Criteriu pentru optimizarea funcționării motoarelor electrice asincrone în condiții de alimentare cu frecvența redusă. Sesiunea de comunicări științifice Electromotor Timișoara, iunie 1988, p.99-109
15. CALIN, S., POPESCU, T., JORA, B., SIMA, V., Conducerea adaptivă și flexibilă a proceselor industriale. Ed.Tehnică, București, 1988.
16. CARLTON, W. Transfer function for variable-frequency induction motors with high inertia loads. Proc.IEE, nr.2, 1975, p.242-249.
17. CEANGA, E., SAJMAC, A., BANU, E. Electronică industrială. Ed.Didactică și Pedagogică București, 1981.
18. CHEN, H.Y.K., PASTEL, Ch.B., On-line parameter identification of input-output curves for thermal units. IEEE-PWRS-1, nr.2, may 1986, p.221-224.

19. CHEN, M.S., SCULTZ, R., FITZER, J., SONGSTERN, H., The effects of reduced voltages on the efficiency of electric loads. PAS-101, nr.7, 1982, p.2158-2166.
20. COMSA, D., PANTELIMON, I., Electrotermie. Ed. Didactică și Pedagogică București, 1979.
21. CONCORDIA, C., IHARA, S. Load representation in power system stability studies. PAS-101 nr.4, 1982, p.969-977.
22. CONSTANTINESCU, I., GOLUMBOVICI, D., MILITARU, C., Prelucrarea datelor experimentale cu calculatoare numerice. Ed. Tehnică, București, 1982.
23. GRARY, S.B. Steady-state stability of composite systems. AIEB-PAS-53, nr.8, 1934, p.1809-1814.
24. CRISAN, O., Sisteme electroenergetice. Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1979.
25. CRISAN, O., LUSTREA, B., KILYENI, ST., MOGA, M., SURIANU, F., Considerații privind determinarea caracteristicilor statice ale consumatorilor complecși din cadrul sistemelor electroenergetice. Buletinul St. și Tehn. IP"TV" Timișoara, Tom 24(38) fasc.2, 1979, p.138-150.
26. CRISAN, O., LUSTREA, B., KILYENI, St., MOGA, M., SURIANU, F., Considerații privind reprezentarea consumatorului complex în regimurile dinamice ale sistemelor electroenergetice. Buletinul St. și Tehn. IP"TV" Timișoara, Tom 24(38) fasc.2, 1979, p.132-137.
27. CRISAN, O., KILYENI, St., MOGA, M., LUSTREA, B., SURIANU, F., Criterii îmbunătățite privind reglajul tensiunii și puterii reactive în nodurile SEN, cu aplicații concrete în nodul Porțile de Fier. Contract de cercetare științifică 1978-1981, Beneficiar CHE Porțile de Fier.
28. CRISAN, O., KILYENI, St., Model matematic și pachet de programe pentru analiza stabilității SEB complexe și optimizarea valorii parametrilor sistemelor de reglare automată a excitației. Conferința națională de Electrotehnică și Electroenergetică, Timișoara, 1982, vol.12, p.51-57.
30. DARCEA, I., Metode numerice și programarea calculatoarelor. Ed. Dacia, Cluj, 1971.
31. DANDERO, P.L., KUNDUR, P. A non-iterative transient stability program including the effects of variable load voltage characteristics. PAS-92, nr.5, 1973, p.1478-1482.
32. DeSARKAR, A.S., BERG, G.J., Digital simulation of three phase induction motors. PAS-89 nr.4, 1970, p.1031-1037.
33. DORDEA, T., Mașini electrice. Editura Didactică și Pedagogică București, 1977.
34. DOVAN, T., BERGER, C.S., FORWARD, K.E., A microcomputer based on-line identification approach to power system dynamic load modeling IEEE PAS-PWRS-2, nr.3, August, 1987, p.529-536.
35. DRANSFELD, D., P., HABER, L.F. Instruire programată în metoda locului rădăcinilor. Ed. Tehnică București, 1980.
36. DSEWENZKI, A.J., Über den Einfluss der Spannungsänderung auf die Wirk und Blindleistung der Verbraucher. Energietechnik nr.12, 1953, p.551-559.
37. EYKOP, P., Identificarea sistemelor. Ed. Tehnică București, 1977.

38. FREDEROV, I.A., Ovljanii nekatorih himiceskih proizvodstva stati-
ceskie karakteristiki uzlov nagruzki elektriceskih sistemi.
Izvestia VUZ Energhetika nr.7, 1964, p.813-816.
39. FRAITZ, T., GENTILE, T., IHARA, S., SIMONS, N., WALDROM, M., Load
behaviour observed in LILCO and RG&E system. PAS-103, nr.4,
1984 p.819-831.
40. FROUD, R.J., PODMORE, R., WALDROM, M., Synthesis dynamic models for
stability studies. PAS-101 nr.1, 1982, p.127-135.
41. GABBARD, J.R., ROWE, J.E. Digital computation of induction motor
transient stability. AIEE-PAS-76, nr.12, 1957, p.970-972.
42. GALAN, N., GHITA, C., CISTELECAN, M., Maşini electrice. Ed.Didactică
şi Pedagogică Bucureşti, 1981.
43. GALEANA, F.D., Identification of stochastic electrical loads models
from physical data. IEEB Trans. on AC-19, nr.12, 1974, p.887-
-893.
44. GELOPULOS, O., LIGHTFOOT, S., Realistic reduction of nonlinear
networks. PAS-98 nr.2, 1978, p.495-503.
45. GERMOND, A.J., PODMORE, P., Dynamic aggregation unit models. PAS-97,
nr.3, 1978, p.1060-1069.
46. GOLB, A.M., MENZIS, R.W., Modeling of capacitive loads for the study
of the transients in synchronous machines. PAS-104, nr.8, 1985,
p.2093-2098.
47. GOTO, M., OKUDA, K., Analytical method of power system transient
stability including the effects of dynamic characteristics of
load. PAS-97 nr.11, 1977, p.685-692.
48. GUNARATNAM, N., NOVOTNY, D.W., The effects of neglecting stator
transients in induction machine modeling. PAS-99, nr.6, 1980,
p.2050-2059.
49. GURBVICI, N.E., LIEOVA, L.E., Ob opredelenie karakteristik nagruzki
po mapriajeniu metodom pasivnovo experimenta. Elektricesstvo
nr.1, 1972, p.21-24.
50. HAKIM, A.M.M., BERG, G.J., Dynamic single-unit representation of
induction motor groups. PAS-95 nr.1, 1976, p.155-164.
51. HANO, I., TAMURA, Y., NARITA, S., MATSUMOTO, K., Real time control of
system voltage and reative power. PAS-88, nr.10, 1969,
p.1544-1559.
52. HORN, R.A., Metode moderne de calcul şi proiectare a sistemelor
electrice. Ed.Tehnică Bucureşti, 1970.
53. HUGHES, F.M., HATMAN, A.M.A., Design of turboalternator excitation
controllers using multivariable frequency-response methods.
Proc.IEE nr.9, 1976, p.1192-1198.
54. IHARA, S., PAULSEN, G.L., Bismarck load behaviour during field tests.
PAS-100 nr.11, 1981, p.4540-4549.
55. ILLICETO, F., CAPASSO, A., Dynamic equivalents of asynchronous motor
loads in system stability studies. PAS-93 nr.5, 1974,
p.1650-1660.
56. ILLICETO, F., CEYHAN, A., RUCKSTHUL, G., behaviour of loads during
voltage dips encountered in stability studies. Field and
laboratory tests. PAS-91 nr.6, 1972, p.2470-2479.

57. IONESCU, S., UNGURBANU, B., Studiul regimurilor dinamice ale motoarelor asincrone. Energetica, nr.10, 1969, p.473-478.
58. IONESCU, T., PAVEL, E., Normalizarea tensiunii joase în distribuția energiei electrice. Energetica, nr.10, 1985, p.455-463.
59. IVASCU, C., MOGA, M., MILEA, L., Identificarea caracteristicilor statice de putere funcție de tensiune ale unor consumatori complecși din sistemul electroenergetic. Sesiunea St.Jubiliară a I.P. Iași, 1986, vol.13, p.249-255.
60. IVASCU, C., MOGA, M., L'éffet de réglage de la puissance du consommateur complexe en fonction de la tension dé déterminé a base des caracteristiques statiques experimentales. Bulletin St.și Tehn.al IP"TV" Timișoara, Tom 30(44), 1985, p.61-64.
61. JARISCHESKY, W., KUNDUR, P., Simulation of nonlinear dynamic response of interconnected synchronous machines. Part I: Machine modeling and machine network interconnections equations. PAS-91 nr.5, 1972, p.2064-2070.
62. JDANOV, P.S., Stabilitatea sistemelor electrice. Ed.Energetica, București, 1951.
63. JORDAN, B.M., Analysis of induction machines in dynamic systems. PAS-84, nr.11, p.1080-1088.
64. KALSI, S.S., ADKINS, B., Transient stability of power systems containing both synchronous and induction machines. Proc.IEB, vol.118, nr.10, 1971, p.1467-1474.
65. KALINOWSKI, J., FORTE, M., Steady-state load voltage characteristics field tests at area substation and fluorescent lighting components. PAS-100, nr.6, 1981, p.3087-3094.
66. KAPUSTINSKAS, A., NEMURA, A., Identificatia liniilor sluceaemih pro tesov. Ed.Vilnius, Moklas, 1983.
67. KERT, M., SCHUMS, W.R., McCRACKIN, F.A., WELER, L.M., Dynamic modeling of loads in stability studies. PAS-88, nr.5, 1969, p.756-763.
68. KILYBENI, St., Îmbunătățirea stabilității generatoarelor sincrone din sistemele electroenergetice complexe prin semnale suplimentare aplicate la sistemele de reglare. Teză de doctorat, IP"TV" Timișoara, 1985.
69. KILYBENI, St., MOGA, M., LUSTREA, B., BUTA, A., SURIANU, F., Analiza influenței sistemelor intensive de reglare automată a excitației asupra comportării în regim dinamic a generatoarelor sincrone în cadrul sistemelor electroenergetice complexe. Energetica, nr.7, 1986, p.296-304.
70. KILYBENI, St., LUSTREA, B., BUTA, A., MOGA, M., SURIANU, F., CRISTEA, H., Experimentări în sistemul electroenergetic național pentru validarea modelelor și programelor de calcul utilizate în analiza stabilității. Sesiunea de comunicări științifice IP Iași, 1986, vol.13, p.47-57.
1. KILYBENI St., MOGA, M., LUSTREA, B., Optimizarea parametrilor sistemelor intensive de reglare automată a excitației pentru generatoarele de la Porțile de Fier 1 la o perturbare de intensitate medie. Sesiunea de comunicări șt. IP Iași, 1986, vol.13 p.279-289.
2. KILYBENI St., LUSTREA, B., CRISAN, O., MOGA, M., SURIANU, F., Analiza pe calculator a comportării naturale a SBE complexe cu aplicații la SFEN. Bulletin șt.și tehn.al IP"TV" Timișoara, Tom 24(38) fasc.2, 1979, p.151-158.

73. KILYENI, St., MOGA, M., LUSTREA, B., Optimizarea acordării sistemelor intensive de reglare automată a excitației pentru generatoarele sincrone din centrala Porțile de Fier 1 la perturbații de mare intensitate. SNRE-1986, Pitești, vol.2, p.179-188.
74. KILYENI, St., MOGA, M., LUSTREA, B., BUTA, A., SURIANU, F., Optimizarea sistemelor intensive de reglare automată a excitației la grupurile din centrala Porțile de Fier I în condiții de perturbații tipice. Conferința Națională de Energetică București, nov. 1986, vol.7, p.222-234.
75. KILYENI, St., LUSTREA, B., BUTA, A., MOGA, M., SURIANU, F., CRISTEA, H., Validarea experimentală a metodelor și programelor de calcul utilizate în analiza stabilității sistemelor electroenergetice complexe. Conferința Națională de Energetică București, nov. 1986, vol.7, p.130-141.
76. KILYENI, St., MOGA, M., LUSTREA, B., Optimizing intensive automatic voltage regulator parameters. Buletin st. și tehn. a IP"IV" Timișoara, seria Electrotehnica, Tom 32(46), 1987, p.59-64.
77. KONOVALOV, J.S., KUGHELEVCIES, J.B., O vozmojnosti opredelenia statičeskih karakteristiki nagruzki metodami matematičeskih statistiki. Electricestvo nr.2, 1968, p.11-13.
78. KRAUSE, P.C., THOMAS, C.H., Simulation of symmetrical induction machinery, PAS-84, nr.5, 1965, p.1038-1053.
79. KRAUSE, P.C., NAZARI, F., SKVARENINA, S. The theory of neglecting stator transients. PAS-98, nr.1, 1979, p.141-148.
80. LEE, C.C., OWEN, T.T., A weighted least squares parameter estimator of synchronous machines. PAS-96, nr.1, 1977, p.97-101.
81. LITCO, T.A., PLUNKETT, J.B., A novel approach to induction motor transfer functions. PAS-93 nr.5, 1974, p.1410-1418.
82. LUSTREA, B., Analiza stabilității statice a generatoarelor sincrone complex interconectate cu aplicația la funcționarea insularizată a unei zone din SEEN. Teză de doctorat, Timișoara, 1985.
83. LUSTREA, B., MOGA, M., Estimarea economiei de energie electrică obținută prin micșorarea tensiunii de alimentare a motoarelor electrice asincrone slab încărcate. SNRE Timișoara, 1984, pl.III, p.182-188.
84. MAURICIO, W., SBMLYEN, A., Effect of load characteristics on the dynamic stability of power systems. PAS-91, nr.8, p.2295-2303.
85. DEMELLO, F.P., RIBEIRO, J.R., Derivation of synchronous machine parameters from tests. PAS-96 nr.5, 1977 p.1211-1218.
86. DEMELLO, F.P., CONCORDIA, C., Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. PAS-88, nr.4, 1969, p.316-329.
87. RBYER, F.J., LEE, K.Y., Improved dynamic load model for power system stability studies. PAS-101, nr.9, 1982, p.3303-3309.
88. MIHO, D., Automatizări în energetică. Ed.Tehnică, București, 1977.
89. MILITRESCU, I., IFTROIANU, A., Determinarea experimentală a unor parametri din sistemul energetic național. Energetica, nr.12, 1965, p.599-601.
90. MOGA, M., JENES, A., Reglajul tensiunii și puterii reactive pe baza diagramelor de funcționare limită a unei centrale electrice interconectate într-un sistem electroenergetic. Energetica, nr.6, 1984, p.226-270.

91. MOGA, M., IVASCU, G., Reprezentarea caracteristicilor statice funcție de tensiune ale consumatorilor complecși prin expresii liniare. Sesiunea șt. I.P. Iași, 1986, vol.13.
92. MOGA, M., Algoritm de estimare a stării statice a sistemelor electroenergetice pe baza măsurătorilor de putere pe laturi. CNBB-84, Craiova, vol.13 p.91-98.
93. MOGA, M., IVASCU, G., Estimarea expresiei caracteristicilor statice de putere funcție de tensiune ale consumatorilor complecși pe baza caracteristicilor determinate experimental. SNRE Timișoara, 1984, vol.I, p.90-96.
94. MOGA, M., Algoritm de ordonare a elementelor matricei de admitanță nodală într-un tablou unidimensional. Buletin șt. și tehn. al I.P."T.V". Timișoara, Tom 29(43), 1984, p.69-72.
95. MOGA, M., Estimarea și identificarea caracteristicilor statice ale consumatorilor complecși industriali. Referat nr.2, Catedra de Electroenergetică, 1987.
96. MOGA, M., BUTA, A., DAVID, G., Incadrarea în randamente optime a acționărilor instalațiilor de ventilație și exhaustare slab încărcate. Energetica nr.10, 1984, p.452-457.
97. MOGA, M., BUTA, A., DAVID, G., Le réglage de la puissance réactif dans le réseaux électriques des consommateurs industriels. Buletin șt. și tehn. al IP"TV" Timișoara Tom 28(42) 1983, p.73-76.
98. MOGA, M., BUTA, A., Calculul eficienței înlocuirii motoarelor electrice asincrone slab încărcate cu motoare similare de putere nominală mai mică. SNRE-Timișoara, 1984, vol.II, p.189-196.
99. MOGA, M., BUTA, A., Metodă și trusă pentru testarea analitică a soluțiilor de îmbunătățire a randamentului de exploatare a motoarelor electrice asincrone slab încărcate. Inovație în reg. IP"TV" Timișoara nr.129/10 dec.1984.
100. MOGA, M., Relații practice de calcul pentru stabilirea regimului economic de funcționare al instalațiilor de producere a aerului comprimat din întreprinderile industriale. Energetica nr.10, 1981, p.426-429.
101. MOGA, M., Analiza critică a stadiului actual privind estimarea și dinamica ale consumatorilor. Referat nr.1., Catedra de Electroenergetică, IP"TV" T, 1987.
102. MOGA, M., ZIFL, I., CIMPONBRU, D., Trusă intermediară pentru înregistrarea unor mărimi electrice. Inovație în reg. la IP"TV" T cu nr.588/1987.
103. MOGA, M., BUTA, A., IVASCU, G., MILEA, L. Determinarea experimentală a caracteristicilor statice de putere funcție de tensiune ale consumatorilor complecși. Energetica, nr.2, 1988, p.56-62.
104. RAMBA, M., HISHIWAKI, T., YOKOKAWA, S., OHTSUKA, K., Identification of parameters for power system stability analysis using Kalman filter PAS-100 nr.7, 1981 p.3304-3311.
105. BELBACU, V., Teoria conversiei electromecanice. Ed. Tehnică, București, 1978.
106. NELSON, R.H., LIPO, T.A., KRAUS, P.C., Stability analysis of a symmetrical induction machine. PAS-88 nr.11 p.1710-1717.

107. NOVAC, I., g.a. Maşini și acționări electrice. Ed. Didactică și Pedagogică București 1982.
108. NOVOTNY, D.W., WOUTERSE, J.N., Induction machine transfer function and dynamic response by means of complex time variables PAS-95 nr.4, 1976, p.1325-1335.
109. OBATA, Y., TAKEDA, S., SUZUKI, H., An efficient eigenvalue estimation technique for multimachine power system dynamic stability analysis. PAS-100 nr.5, 1981, p.259-267.
110. OHYAMA, T., WATANABE, H., NISHIMURA, K., Voltage dependence of composite loads in power systems. PAS-104, nr.11, 1985, p.3064-3073.
111. OKAMURA, K., HOYOSHI, S., UEMURA, K., A new power flow model and solution method including load and generator characteristics and effect of control devices. PAS-94 nr.3, 1975, p.1042-1050.
112. OKI, O.R., SUZUKI, H., UEMURA, K. Modal analysis for power system dynamic stability. PAS-97 nr.4, 1978, p.1313-1320.
113. OLF, D.W. New techniques for calculations of dynamic stability. PAS-85, nr.7, 1966, p.767-776.
114. PANWA, A., BRICE, C.W. Modeling and system identification of residential air conditioning load. PAS-104, nr.6, 1985, p.1418-1425.
115. PARK, R.H., COLONY, G.L., Voltage reduction as a mean of reducing distribution load. PAS-91 nr.2, 1972, p.628-633.
116. PELLISSIER, R., Le reseau d'energie electrique. Les aspects technique du service. Vol.I, Ed. Dunod Paris, 1971.
117. PERBESCU, C., IONESCU, G., Identificarea experimentală a proceselor automatizate, Ed. Tehnică, 1971.
118. PODMORE, R., Identification of coherent generators for dynamic equivalents. PAS-97, nr.4, 1978, p.1344-1355.
119. POPLOG, D., Bilanțul electric al acționărilor cu motoare asincrone. Energetica nr.8, 1982, p.403-409.
120. POPOLBA, E., Calculul regimului permanent al sistemelor electrice. Ed. Tehnică, București, 1977.
121. RADUȚI, C., NICOLESCU, E., Mașini electrice rotative fabricate în România. Ed. Tehnică București, 1981.
122. RAMSDEN, V.S., ZORBAS, N., BOOTH, N.R., Prediction of Induction Motor-Dynamic Performance in Power Systems. Proc. IEE vol.115, 1968; p.511-518.
123. REBEIRO, R.H., LANGE, W., A new aggregation method for determining composite load characteristics. PAS-101, nr.8, 1982, p.2869-2875.
124. ROBERS, G.J., Linearised analysis of induction-motor transients. Proc. IEE vol.112, nr.10, 1965, p.1917-1926.
125. ROBERS, G.W., KANO, J.D., ALDEN, R.T., An aggregate induction motor model for industrial plants. PAS-103, nr.4, 1984, p.683-690.
126. ROGERS, G.J., BENARAGHA, D.S., An induction motor model with dip bar effect and leakage induction saturation. Archiv fur Elektrotechnik vol.60, 1978, p.193-201.

127. RUNSISKI, I.Z., Prelucrarea matematică a datelor experimentale. Ed. Tehnică, București, 1974.
128. SAAL, C., SZABO, W., Sisteme de acționare electrică, Determinarea parametrilor de funcționare. Ed. Tehnică, București, 1981.
129. SABER, S.A.Y., LEE, D.C., Dynamic load models derived from data acquired during system transients. PAS-101, nr.9, 1982, p.3365-3374.
130. SASTRY, K.P.R., BURRIDGE, R.B., Investigation of a reduced order model for induction motor dynamic studies. PAS-95, nr.3, 1976, p.962-969.
131. SHACHSHTAT, G., SYMONS, O.C., General propose for power system loads. Proc. IEE, vol.124, nr.8, 1977, p.715-723.
132. SHANKLE, D.F., MURPHY, C., LANG, R.H., Transient stability studies synchronous and induction machines, AIEE-73, nr.4, 1954, p.1563-1580.
133. SKAVERENINA, T.I., KRAUSE, P.C., Accuracy of a reduced order model of induction machines in dynamic stability studies. PAS-98, nr.4, 1979, p.1192-1197.
134. SMITH, I.R., SHRIHARAN, S. Transient performance of induction motor. Proc. IEE vol.113, nr.7, 1966, p.1173-1181.
135. SORENSON, H.W., Parameter estimation. Principles and Problems. New York, 1980.
136. STERN, R., NOVOTNY, D.W., A simplified approach to the determination of induction machine dynamic response. PAS-97, nr.4, 1978, p.143-1439.
137. SZABLYA, J.F., BRESSANE, J., Transfer function of AC machines. PAS-92, nr.1, 1973, p.177-186.
138. TERPISCO, M., STOICA, P., Identificarea și estimarea parametrilor sistemelor. Ed. Academiei RSR București, 1983.
139. UEDA, R., TAKATA, S., Effects of induction machine load on power system. PAS-100, nr.5, 1981, p.2555-2562.
140. UNDERHILL, J.M., LASKOVSKI, T.R., Model selection data for power system simulation. PAS-101, nr.9, 1982, p.3333-3341.
141. USAKOV, E.I., Uchet asinhronoi nagruzki rasciotah aperiodi ceskoi ustoiçivosti slojnih elektroenerghiceskih sistem. Elektricestvo nr.8, 1982, p.14-22.
142. VBNTEKOV, V.A., Transient processes in electrical power systems. Mir publishers, 1977.
143. WASYNCZUK, O., DIAO, Y.M., KRAUSE, P.C., Theory and comparison of reduced order models of induction machines. PAS-104, nr.3, 1985, p.598-606.
144. WILSON, W.J., ALEVTICH, J.D., Dynamic equivalent power system models. PAS-102, nr.12, 1983, p.3753-3760.
145. YAO-NAN, Y., EL-SHARKAWI, M.A., Estimation of external dynamic equivalents of a thirteen machine system. PAS-100, nr.3, 1981, p.1324-1333.
146. YAO-NAN, Y., EL-SHARKAWI, M.A., WVONG, M.D., Estimation of unknown large power system dynamics. PAS-98, nr.1, 1979, p.279-289.

147. ZADEH, L.A., POLAK, B. Teoria sistemelor. Ed. Tehnică București, 1976.
148. * * * System load dynamics-simulations, effects and determination of load constants. PAS-92, nr.2, 1973, p.600-609.
149. * * * Long term system dynamics hybrid simulation. Research project 908-1, 1975, Univ. of Missouri Columbia.
150. * * * Proposed terms and definitions for power system stability. PAS-101, nr.7, 1982, p.1894-1896.
151. * * * Conventions for block diagram representations. PAS vol.PWRS-1, nr.3, 1986, p.95-101.
152. * * * Bilanțul electroenergetic al Intreprinderii Textilă Timișoara. Faza I, II, III. Contract de asistență tehnică, 1978, 1979, 1980. IPT, Catedra de Electroenergetică, colectiv de Rețele și sisteme electrice.
153. * * * Bilanțul electrotermic al principalilor consumatori din Intreprinderea "ARADBANCA" Arad. Contract de asistență tehnică, 1984, IPT, Catedra de Electroenergetică, colectiv de Rețele și sisteme electrice.

NOTAȚIE : PAS - IEEE POWER APPARATUS SYSTEMS