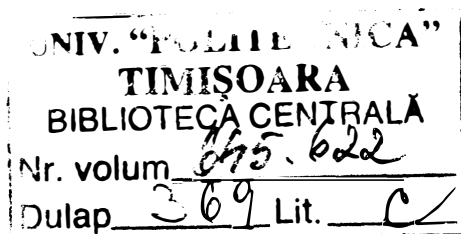


MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ ȘI ELECTROENERGETICĂ  
CATEDRA M.A.U.E.

Ing. Aurelian Traian Tudor

# TEZĂ DE DOCTORAT

STUDIUL INFLUENȚEI REGULATOARELOR AUTOMATE DE  
TENSIUNE ASUPRA CARACTERISTICII EXTERIOARE A  
GENERATOARELOR SINCRONE FOLOSITE PE NAVELE MARITIME,  
LA FUNCȚIONAREA ÎN REGIMURI DINAMICE



CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC  
PROF. DR. ING. IOAN NOVAC

2005

## CUPRINS

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| 1.         | Introducere.....   | 1   |
| 1.1        | Aspecte particulare ale funcționării generatoarelor sincrone navale .....  | 2   |
| 1.2        | Tipuri constructive de grupuri Diesel-Generator utilizate pe navele maritime .....   | 6   |
| 1.3        | Probleme abordate în studiul GS de pe navele maritime .....  | 7   |
| 2.         | Caracteristicile exterioare ale GS de pe navele maritime și caracteristicile mecanice ale motoarelor Diesel .....                              | 10  |
| 2.1        | Caracteristica exterioară la un generator sincron .....  | 10  |
| 2.1.1      | Caracteristica exterioară la un generator sincron cu o singură înfășurare..  | 10  |
| 2.1.2      | Caracteristica exterioară la un generator sincron cu poli aparenti și cu două înfășurări de excitație .....                                    | 13  |
| 2.2        | Caracteristica mecanică a motorului Diesel de 480 [kW] .....   | 16  |
| 2.3        | Modificarea tensiunii și frecvenței cu sarcina la generatorul sincron naval de 455 [kVA] .....   | 19  |
| 2.4        | Ecuatiile reguletoarelor pe excitație și pe turație .....  | 30  |
| 3.         | Determinarea parametrilor GS cu două înfășurări de excitație .....   | 33  |
| 3.1        | Determinarea inductanțelor înfășurărilor GS cu două înfășurări de excitație propus de autor a fi folosit în sistemele electroenergetice navale | 35  |
| 3.2        | Determinarea inductanțelor proprii ale înfășurărilor de excitație .....  | 36  |
| 3.3        | Determinarea inductanțelor mutuale .....   | 38  |
| 3.3.1      | Probele din axa d .....  | 38  |
| 3.3.2      | Probele din axa q .....  | 43  |
| 3.4        | Rezultate experimentale la GS naval de 455 [kVA] .....   | 47  |
| 3.5        | Parametrii sarcinii rezistiv-inductive conectate la bornele GS .....   | 52  |
| 4.         | Comportarea sistemului electroenergetic naval în regimuri tranzitorii . Simulări numerice.....   | 54  |
| 4.1.       | Regimuri tranzitorii la GS cu o înfășurare de excitație, reglat .....  | 55  |
| 4.1.1.     | Funcționarea rezistiv-inductivă prin conectarea la bornele generatorului a unui motor asincron de 75 [kW] .....                                | 55  |
| 4.1.1.1.   | Funcționare rezistiv-inductivă pentru $T_i=0.1[s]$ , $K=10$ , $J=1[kgm^2]$ .....   | 56  |
| 4.1.1.2.   | Funcționare rezistiv-inductivă pentru $T_i=0.01[s]$ , $K=10$ , $J=1[kgm^2]$ .....  | 57  |
| 4.1.2.     | Încărcare rezistivă .....  | 66  |
| 4.1.2.1.   | Încărcare rezistivă 0 – 25% .....  | 67  |
| 4.1.2.2.   | Încărcare rezistivă 0 – 75% .....  | 72  |
| 4.1.2.3.   | Încărcare rezistivă 0 – 100% .....   | 77  |
| 4.1.2.3.1. | Verificări experimentale .....   | 82  |
| 4.1.2.4.   | Încărcare rezistivă 25% – 50% .....  | 83  |
| 4.1.2.5.   | Încărcare rezistivă 25% – 75% .....  | 88  |
| 4.1.2.6.   | Încărcare rezistivă 25% – 100% .....   | 93  |
| 4.2.       | Regimuri tranzitorii la GS cu o înfășurare de excitație, nereglat .....  | 98  |
| 4.2.3.     | Descărcare rezistivă .....   | 99  |
| 4.2.3.1.   | Descărcare rezistivă 100% - 25% .....  | 99  |
| 4.2.3.2.   | Descărcare rezistivă 100% - 50% .....  | 105 |
| 4.2.3.3.   | Descărcare rezistivă 100% - 75% .....  | 111 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 4.2.4. | Influența constantei de timp a regulatorului PI asupra proceselor tranzitorii ..... | 116 |
| 5.     | Generatorul sincron cu două înfășurări de excitație .....                           | 124 |
| 5.1.   | Justificarea înfășurării de excitație conectate în serie cu sarcina .....           | 124 |
| 5.2.   | Determinarea curentului din înfășurarea de excitație adițională .....               | 127 |
| 5.3.   | Simulări numerice .....   | 133 |
| 5.3.1. | Încărcare rezistivă 0 – 25% .....   | 135 |
| 5.3.2. | Încărcare rezistivă 0 – 75% .....   | 140 |
| 5.3.3. | Încărcare rezistiv-inductivă 0 – 25% .....  | 145 |
| 5.3.4. | Încărcare rezistiv-inductivă 0 – 50% .....  | 153 |
| 5.3.5. | Încărcare rezistiv-inductivă 0 – 75% .....  | 158 |
| 6.     | Concluzii .....   | 163 |
| 7.     | Bibliografie .....  | 165 |

## CAP. 1 INTRODUCERE

Sistemul electroenergetic naval (SEEN) este un sistem electroenergetic de putere limitată (SEL), având toate caracteristicile unui sistem electroenergetic de putere (teoretic) infinită (SEI) dar având în plus și o serie de caracteristici proprii date de puterea limitată:

- putere instalată relativ mică comparativ cu un sistem electroenergetic național (SEN);
- autonomie completă în funcționare;
- puterea agregatelor acționate electric mult mai apropiată de aceea a generatoarelor din SEEN, impunând condiții severe generatoarelor și motoarelor de acționare a acestora în vederea menținerii stabilității în funcționare;
- robustețe și o siguranță mărită în funcționare din cauza condițiilor climatice și tehnice mai grele de la bordul navelor cât și din cauza faptului că, în timpul cursei, nava devine un sistem izolat care nu poate fi ajutat, în caz de avarie, decât foarte greu.

În plus, sunt foarte dese cazurile în care GS funcționează în regimuri dinamice:

- încărcări și descărcări de sarcină (smulgerea ancorei, pornirea pompelor de incendiu, ieșirea unui GS din paralel, etc.);
- electroalimentarea unor consumatori cu sarcină pulsatorie (radare, sonde ultrason de mare adâncime, vinciuri de marfă, compresoare cu piston, etc.);
- scurtcircuite.

În asemenea cazuri, dată fiind puterea limitată a centralei electrice navale (CEN), au loc variații ale tensiunii și ale frecvenței în rețeaua electrică a navei. Durata și amplitudinea variațiilor de tensiune și frecvență sunt reglementate (în sensul limitării lor) de normativele Registrului Naval Român (RNR) sau normativele NATO (STANAG). Cum cerințele STANAG sunt mai restrictive decât cele ale RNR, s-a pus problema îmbunătățirii performanțelor echipamentelor electrice montate pe navele românești, în special micșorarea duratei și a amplitudinii variațiilor de tensiune și de frecvență. Valorile limitelor de variație ale tensiunii și ale frecvenței depind de datele constructive ale generatoarelor sincrone și ale sistemelor de reglare a tensiunii și turației.

Se dau, în continuare, principalele cerințe ale RNR și STANAG:

| Nr. Crt. | Cerința a normativelor                       | RNR                                | STANAG |
|----------|--|------------------------------------|--------|
| 1        | Toleranța medie a tensiunii de lucru         | ±10%                               | ±10%   |
| 2        | Toleranța tensiunii de linie dezechilibrată  | -                                  | ±7%    |
| 3        | Toleranța tensiunii tranzitorii              | +20%; - 30%                        | ±16%   |
| 4        | Timpul de revenire al tensiunii tranzitorii  | 2 s                                | 1,5 s  |
| 5        | Toleranța frecvenței                         | ±5%                                | ±3%    |
| 6        | Toleranța frecvenței tranzitorii             | ±10%                               | ±4%    |
| 7        | Modulația de frecvență                       | -                                  | 0,5%   |
| 8        | Timpul de revenire al frecvenței tranzitorii | 5 s                                | 2 s    |
| 9        | Distorsiunea armonică totală                 | 5% zona I nav.<br>10% zona II nav. | 5%     |

Normele STANAG mai impun:

- limitarea valorii sarcinii pulsatorii a echipamentelor (sarcină pulsatorie este considerată acea sarcină repetabilă, aleatoriu sau ciclic, pentru un interval mai mare de o perioadă, care impune cereri de putere variabilă din rețea) pentru că ar putea cauza modulații de tensiune și frecvență;



- limitarea amplitudinii curentului reguletoarelor electronice de putere astfel încât nici o armonică individuală de curent de linie, de la armonica a doua până la a 33-a, să nu depășească 3% din valoarea nominală a curentului fundamentalei sau  $100/n$  pentru armonicile de la a doua la 20 kHz ( $n$ - multiplul armonicii);
- prevederea de volanți de energie cinetică și electrică la prezența sarcinilor pulsatorii;
- prevederea de filtre la echipamentele consumatoare nesinusoidale;
- prevederea unui număr mai mare de faze de intrare la transformatoarele echipamentelor redresoare;
- consumatorii care încorporează convertoare electronice de putere sau reguletoare de putere nu trebuie să dea armonici individuale de curenți de linie mai mari de 3% din valoarea nominală a curentului fundamentalei;
- limitarea diferenței dintre cel mai mare și cel mai mic curent de linie sub 5% din suma aritmetică a celor trei curenți de linie nominali pentru un echipament.

În literatura de specialitate, referirea la sistemele electroenergetice de putere limitată (SEL), în care se încadrează și sistemele electroenergetice navale, este, de obicei, expeditivă și adesea concluziile de la sistemele electroenergetice de putere teoretic infinită (SEI) sunt extrapolate și la SEEN. Practica inginerescă a dovedit, însă, că sunt necesare ajustări importante care să țină seama de puterea limitată a SEEN și de condițiile speciale de funcționare ale instalațiilor electrice navale.

### **1.1 ASPECTE PARTICULARE ALE FUNCȚIONĂRII GENERATOARELOR SINCRONE NAVALE**

Generatoarele sincrone în execuție „navalizată” provin din cele staționare de la uscat dar la care se iau unele măsuri constructive care să țină seama de condițiile speciale în care funcționează ele la bordul navelor; aceste condiții sunt specifice, mai ales, navelor cu zonă de navigație nelimitată (navale maritime). Aceste condiții se referă la :

- **Temperatura mediului ambiant**- o navă cu zonă de navigație nelimitată poate străbate regiuni cuprinse între ghețurile Arcticii și zonele toride ale tropicelor ( $-20^{\circ}\text{C}$  la  $+50^{\circ}\text{C}$  și chiar  $+70^{\circ}\text{C}$ ); în plus, în compartimentul mașini (CM) unde sunt instalate și grupurile Diesel-generator (DG), schimbul de căldură se face la temperaturi ridicate deoarece CM nu are legătură directă cu exteriorul. Temperatura în CM poate atinge valori de până la  $60^{\circ}\text{C}$  spre deosebire de instalațiile terestre, unde temperatura mediului ambiant se consideră  $35^{\circ}\text{C}$ . Temperatura ridicată a mediului ambiant are efecte negative asupra caracteristicilor tehnice ale mașinilor și aparatelor electrice. Astfel, creșterea temperaturii mediului ambiant de la  $+35^{\circ}\text{C}$  la  $+40^{\circ}\text{C}$  la o mașină electrică duce la micșorarea puterii acesteia cu 10%. Practic, creșterea temperaturii mediului ambiant duce la creșterea dimensiunilor de gabarit și a greutateii echipamentelor electrice. Pentru micșorarea gabariturii și a greutateii echipamentului electric, parametri foarte importanți în construcția navelor, se recurge la utilizarea de materiale electroizolante cu calități termotehnice superioare (cauciucuri, materiale plastice termorezistente, fibre de sticlă, etc).

- **Umiditatea relativă a aerului** în largul mării și la suprafața apei este cuprinsă între 70% și 95%, atingând în zonele tropicale (zona Mării Roșii, coastele Camerunului pe timp ploios) valori până la limita saturației iar în zonele uscate poate scădea chiar până la 20% (zona Suezului). Umiditatea relativă a aerului pe mare nu depinde numai de anotimp ci și de condițiile atmosferice locale, de direcția și tăria vântului și de diferența de temperatură dintre aer și apă. În condițiile existenței unui curent de aer rece deasupra apei, umiditatea relativă scade simțitor, în timp ce existența unui curent de aer cald deasupra apei reci conduce la creșteri importante a

umidității relative, putându-se produce chiar ceață. Pe mare agitată sunt aruncate în aer cantități enorme de picături de apă, ceea ce duce la creșterea umidității. Spre deosebire de umiditatea relativă, umiditatea absolută este diferențiată: în condiții de saturație la  $-20^{\circ}\text{C}$  într-un metru cub de aer se află 1 gram de apă. La tropice, pe timp de ploaie, se ajunge la 26-30 g de apă la un metru cub de aer; aceste valori se întâlnesc și în compartimentele navei fără aer condiționat sau în compartimentele mașinilor. Când aerul are un grad înalt de saturație, este suficientă o răcire de numai câteva grade pentru a se produce condensarea conținutului de apă în exces pe elementele structurale și pe instalațiile navei. Apa de condensare, pe lângă efectul de corodare, duce la scăderea rezistenței de izolație, la producerea curenților de conturare sau la apariția electrolizei. Din cauza posibilității pătrunderii apei în interiorul echipamentelor electrice, introducerea cablurilor în mașini și aparate trebuie să fie făcută numai pe la partea inferioară și prin treceri etanșe (cu presetupă).

- **Conținutul de sare în aer** - efectul agresiv al apei de condensare asupra instalațiilor electrice navale este mărit de sarea pe care apa de condensare o ia din aer.

- **Conținutul de ulei în aer** - în CM și, mai ales, în jurul motoarelor Diesel există un conținut de ulei în aer relativ ridicat (poate atinge între 3-20 mg / dm<sup>3</sup>). Pătrunderea uleiului și motorinei în interiorul mașinilor și aparatelor electrice, în combinație cu cărbunele sau alte particule conductoare produce amestecuri care micșorează rezistența de izolație. Pentru diminuarea acestui efect se prevăd site și grătare pentru depunerea uleiului.

- **Funcționarea în poziții înclinate** - în timpul marșului, o navă poate fi supusă la înclinări în plan longitudinal și transversal care pot fi de scurtă sau de lungă durată (în caz de avarie). Toate elementele componente ale instalațiilor electrice trebuie să funcționeze sigur și să poată fi manevrate în oricare din situațiile de înclinare ale navei (canarisiri de până la  $15^{\circ}$ , asiete de până la  $5^{\circ}$ , ruliu de până la  $22,5^{\circ}$  cu o perioadă de 9 secunde și un tangaj de până la  $10^{\circ}$ ). Efectul înclinărilor și oscilațiilor navei este apariția unor forțe de forfecare suplimentare ca urmare a forțelor giroscopice și componente ale forței gravitaționale. Pentru diminuarea acestor efecte, toate mașinile cu arbore orizontal se montează cu arborele paralel cu planul diametral al navei (deoarece înclinările în plan longitudinal sunt mai mici decât în plan transversal). Din cauza oscilațiilor navei, tablourile electrice și pupitrele de comandă și semnalizări, plitele electrice de gătit ș.a. se amplasează, pe cât posibil, transversal pe navă.

La oscilații, elementele mobile ale aparatelor electrice pot căpăta solicitări suplimentare ce pot duce la închiderea sau deschiderea nedorită a contactelor electrice iar aparatele ce conțin lichide (acumulatoare, transformatoare, întreruptoare) nu trebuie să permită curgerea lichidului sau împrăștierea cu stropi; de asemenea, trebuie ca lichidul să acopere toate părțile care funcționează cufundate (utilizarea mercurului ca element de contact nu este permisă).

- **Vibrații și scuturături** - acestea găsesc un mediu propice de propagare și amplificare în structura de oțel a navei. Echipamentul electric naval trebuie astfel construit încât să reziste la aceste solicitări. Vibrațiile care apar la navă pot fi generale (cauzate de acțiunea valurilor și a elicei asupra corpului navei) și locale (cauzate de forțele de inerție necompensate a unor mecanisme sau mașini cu piston - motoare Diesel, compresoare, pompe). Frecvența și amplitudinea vibrațiilor sunt foarte diferite și destul de greu de predeterminat și localizat. De aceea trebuie luate o serie de măsuri care să asigure funcționarea fără defecte a aparaturii electrice supus la vibrații și scuturături. Eliminarea și atenuarea vibrațiilor se poate face printr-o atentă compensare a maselor, prin evitarea turațiilor critice, utilizarea de cuplaje elastice, montarea agregatelor ce oscilează pe amortizoare, etc. Cu toate aceste măsuri, vibrații mecanice la bordul navelor există și trebuie avut în vedere că echipamentul electric este sensibil la vibrații, care pot provoca autodeșurubarea părților asamblate prin șuruburi. Tot din această cauză se

preferă lămpile cu soclu baionetă în locul celor cu filet și siguranțele tip furcă, cu prindere prin cleme, în locul celor cu filet (sau filet cu cric).

**Condiții de spațiu și dimensiuni** - în afară de faptul că echipamentul electric naval trebuie să prezinte o garanție completă în funcționare, trebuie să:

- aibă gabarit și greutate reduse;
- necesite o întreținere ușoară;
- aibă un randament ridicat;
- nu producă paraziti radiofonici;
- coste cât mai puțin.

Rezolvarea acestor condiții, uneori contradictorii, se obține prin adoptarea unor soluții constructive corespunzătoare și prin utilizarea unor materiale cu proprietăți mecanice, electrice și magnetice superioare, utilizarea unor frecvențe mai ridicate (60 sau 400 Hz) sau a unor tensiuni mai ridicate (6 kV sau 12 kV). În unele situații nu este posibil să fie satisfăcute toate condițiile. În asemenea situații se acordă prioritate acelor cerințe care sunt de mai mare importanță pentru nava respectivă. Astfel, la navele militare volumul și dimensiunile joacă un rol mult mai mare față de navele comerciale, în timp ce la acestea din urmă, din considerente economice, calitatea are mult mai mare importanță.

- **Funcționarea în regimuri dinamice** - majoritatea echipamentului electric de la bordul navelor funcționează intermitent, cu perioade de repaus mai mari decât cele de funcționare. Funcționarea intermitentă este mult mai dezavantajoasă decât cea continuă, pe de o parte din cauza îmbătrânirii materialelor, iar pe de altă parte în perioada de pauză sunt condiții prielnice pentru condensarea apei, menținerea stării de umezeală și deci favorizarea coroziunii și scăderii rezistenței de izolație. Pentru evitarea efectelor menționate se recurge la montarea de rezistențe electrice în interiorul mașinilor și aparatelor care, dacă sunt alimentate cu energie electrică, mențin o temperatură mai ridicată decât a mediului ambiant.

- **Condiții pentru securitatea muncii** - securitatea personalului care deservește instalațiile electrice navale este mult mai periclitată decât pe uscat, din cauza condițiilor specifice. În primul rând rezistența electrică a corpului omului scade odată cu creșterea umidității. În al doilea rând, punțile, platformele și pereții cabinelor care sunt metalice, măresc pericolul electrocutării. De aceea trebuie luate măsuri suplimentare iar ele sunt precis stipulate în normele societăților de clasificare a navelor.

Pe de altă parte, ansamblul surselor de energie electrică împreună cu tabloul principal de distribuție (TPD) care formează centrala electrică a navei, este o centrală de putere limitată; sursele principale de energie electrică sunt 2, 3 sau 4 generatoare sincrone. În funcție de regimul de funcționare al navei (marș, manevră, staționare, staționare cu manevre, avarie), energia electrică este dată de unul sau două generatoare în paralel. Normele RNR cer ca sursa principală de energie electrică să fie compusă, pe cât posibil, din două generatoare cu acționare independentă. Numărul și puterile generatoarelor sincrone cu acționare independentă trebuie să fie astfel calculate încât, la ieșirea din funcțiune a oricărui generator, cele rămase în funcțiune să asigure:

- alimentarea cu energie electrică a instalațiilor esențiale, asigurându-se în același timp condiții minime sociale pentru echipaj;
- pornirea celui mai puternic motor electric, cu cel mai mare curent de pornire și cu pornirea cea mai grea; în acest caz, nu trebuie să se producă o scădere a tensiunii și frecvenței care ar putea duce la ieșirea din sincronism, oprirea motorului de acționare a generatorului și la deconectarea mașinilor și aparatelor în funcțiune;
- alimentarea instalațiilor necesare pornirii motorului principal de propulsie a navei, pomindu-se de la situația de navă oprită complet; în acest caz poate fi utilizat și

generatorul de avarie dacă puterea sa, fie singur, fie combinat cu aceea a oricărei surse de energie electrică, asigură alimentarea simultană a consumatorilor necesari.

Cum, din considerente de eficiență a utilizării energiei electrice, generatoarele sincrone sunt încărcate la peste 80% din puterea nominală, pornirea sau oprirea unui consumator de putere mare provoacă variații importante ale tensiunii și ale frecvenței. Deci, regimurile dinamice sunt frecvent întâlnite în funcționarea generatoarelor sincrone astfel încât, problema bunei funcționări sau a îmbunătățirii funcționării reguletoarelor automate de tensiune a generatoarelor și a reguletoarelor de turație a motoarelor de acționare a generatoarelor are o importanță deosebită.

Caracteristicile reguletoarelor de turație ale motoarelor de acționare a generatoarelor destinate să funcționeze în paralel trebuie să fie astfel încât, în limitele de la 20% până la 100% din sarcina (puterea) totală, sarcinile active ale diferitelor generatoare să nu difere de valoarea puterii care le revine (proporțional) cu mai mult de 15% din puterea activă nominală a celui mai mare generator care funcționează în paralel sau de 25% din puterea activă nominală a generatorului mai mic (în funcție de care dintre aceste mărimi este mai mică).

În plus, generatoarele sincrone destinate să funcționeze în paralel trebuie să fie prevăzute cu un astfel de sistem de compensare a căderii de tensiune reactive încât, repartizarea sarcinii reactive între generatoare să nu difere de mărimea puterii proporționale cu mai mult de 10% din sarcina reactivă nominală a celui mai mare generator sau cu mai mult de 25% din puterea nominală a celui mai mic generator (în funcție de care dintre aceste mărimi este mai mică).

Datorită condițiilor specifice de funcționare a sistemelor electroenergetice navale, calculul puterii instalate, alegerea numărului de generatoare și a sistemelor de reglare automată a tensiunii și a frecvenței, conectarea în paralel a generatoarelor, etc. ridică probleme care trebuie rezolvate într-un mod particular, specific acestor sisteme electrenergetice.

La proiectarea centralei electrice a unei nave se pleacă de la puterea cerută de consumatorii de energie electrică în diferitele regimuri de exploatare ale navei ( marș, staționare, staționare cu operații de încărcare – descărcare, manevră, avarie, etc.).

Puterea consumată în centrala electrică navală depinde de o serie de factori ca:

- puterile nominale ale consumatorilor;
- numărul de consumatori în funcțiune;
- încărcarea consumatorilor și regimul lor de funcționare.

Calculul puterii necesare se face prin diferite metode:

- metoda tabelelor de sarcină (bilanțul energetic);
- metoda statistică;
- metoda formulelor determinate experimental.

Sarcina totală, calculată cu una dintre metode, constituie o mărime de bază pentru alegerea numărului optim și a puterii generatoarelor instalate în centrala electrică a navei. Apoi se analizează și se compară între ele câteva variante de centrale, pe baza anumitor indicatori tehnico – economici legați de funcționarea optimă și de fiabilitatea instalației electroenergetice a navei.

Se recomandă ca numărul de tipodimensiuni de generatoare să fie minim (dacă este posibil, o singură tipodimensiune). Aceasta simplifică întreținerea, reparațiile, distribuția sarcinii între generatoare la funcționarea în paralel, etc.

Se mai recomandă ca:

- încărcarea generatoarelor, în diverse regimuri, să fie de 70 – 80% din puterea nominală;
- în regimurile cu durata cea mai mare (marș) sarcina să fie în jur de 80%;
- în regimurile de scurtă durată (ridicarea ancorei, manevră, avarie) sarcina să fie de 70% sau chiar mai mică;



- în staționare (care poate fi de lungă durată) generatoarele care funcționează să fie încărcate tot cu 80% (uneori se instalează un generator care funcționează numai la staționarea navei).

Pentru asigurarea unei cât mai bune încărcări a generatoarelor se aplică, combinat, două metode:

- funcționarea în paralel a unui număr corespunzător de generatoare;
- deconectarea temporară a consumatorilor neesențiali.

Numărul minim de generatoare dintr-o centrală electrică navală este de doi, fiecare generator putând să satisfacă orice regim de funcționare. Totuși este indicat ca centrala să fie compusă din trei sau patru generatoare, unul putând fi în revizie sau în reparație iar altul în rezervă. Dacă sunt necesare și alte generatoare, devine rațională montarea pe navă a încă unei centrale electrice.

Trebuie să se țină cont și de faptul că puterea totală cerută de consumatorii navei poate crește după ce nava intră în exploatare, prin instalarea ulterioară de alți consumatori de energie electrică. Practic, centralele electrice ale navelor trebuie să aibă o putere mai mare cu 15 – 20% decât cea reieșită din calcul.

Criteriul principal de comparație a variantelor de centrale electrice este costul anual al energiei produse la bordul navei, care trebuie să fie minim. Cheltuielile de exploatare pentru producerea energiei electrice timp de o oră sunt:

$$C_{ex} = C_i + C_d, \text{ unde:}$$

- $C_i$  = cheltuieli independente de sarcina generatoarelor (cheltuieli de amortizare a motoarelor Diesel, a generatoarelor, etc.);
- $C_d$  = cheltuieli dependente de sarcina generatoarelor (cheltuieli pentru combustibili, lubrefianți, etc.).  $C_d = k \cdot P$ , în care  $k$  este un coeficient care se determină din diagrama de sarcină a grupului Diesel – generator.

Deci  $C_{ex} = C_i + k \cdot P$ , iar costul unei kilovatore devine:

$$c = \frac{C_{ex}}{P} = \frac{C_i}{P} + k.$$

Din această relație rezultă că  $c$  este cu atât mai mic cu cât puterea  $P$  este mai mare, deci cu cât generatoarele sunt mai bine încărcate.

## **1.2 TIPURI CONSTRUCTIVE DE GRUPURI DIESEL-GENERATOR UTILIZATE PE NAVELE MARITIME**

Generatoarele sincrone în execuție navală sunt proiectate pentru a funcționa în sala mașinilor pe nave, în medii cu umiditatea relativă de  $75 \pm 3\%$  la temperatura de  $+45 \pm 2^\circ\text{C}$  și de  $95 \pm 3\%$  la temperatura de  $+25 \pm 2^\circ\text{C}$ . Temperatura nominală de regim a mediului ambiant se încadrează între limitele  $-10^\circ\text{C}$  și  $+45^\circ\text{C}$ . Generatoarele nu sunt destinate funcționării în încăperi deosebit de umede, cum ar fi: compartimente pentru prelucrarea peștelui, magazii frigorifice și nici pe punți deschise.

Grupurile se execută numai în variantă staționară, fiind prevăzute cu o instalație de navalizare care are în vedere, în principal, faptul că răcirea motorului Diesel nu poate fi făcută cu apă de mare. Radiatoarele de apă și ulei de la grupurile normale (din care provin) sunt înlocuite cu schimbătoare de căldură cu țevi (răcitoare) care au un circuit interior, comunicând cu motorul, prin care circulă apă dulce și un circuit exterior (de răcire) prin care circulă apă de mare. Instalația este completată cu un vas de expansiune pentru circuitul interior, o pompă de apă pentru circuitul interior și o pompă de apă de tip amorsabil pentru circuitul exterior.

Tabloul de bord al motorului Diesel este prevăzut cu următoarele aparate și instalații:

- manometru presiune ulei;

- termometru temperatură apă;
- termometru temperatură ulei;
- instalație de pornire motor;
- instalație de comandă servomotor pentru reglajul turației;
- semnalizare temperatură ridicată apă;
- semnalizare presiune scăzută ulei;
- tablou pentru asigurarea funcționării în paralel a grupurilor.

Atât grupurile de fabricație românească ( UMEB, Electroputere, Faur) cât și cele de fabricație străină ( Caterpillar, DEMP, SKL, etc.) sunt proiectate să funcționeze la turații de 1500 rot/min sau 1000 rot/min și, mai rar, la 750 rot/min ( SKL).

Majoritatea generatoarelor instalate pe navele militare și comerciale sunt de tipul cu poli aparenti.

Se dau, în continuare, principalele caracteristici tehnice ale grupurilor DG întâlnite în practică și la care datele de catalog sunt:

| Nr.<br>Cămin | Tip<br>grup | Generator sincron |              |              | Motor Diesel |     |              | $\Delta n$<br>% | $\Delta U$<br>% | Masa<br>[kg] | Furni-<br>zor |
|--------------|-------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|-----|--------------|-----------------|-----------------|--------------|---------------|
|              |             | $S_n$<br>[kVA]    | $U_n$<br>[V] | $I_n$<br>[A] | Tip          | CP  | n<br>rot/min |                 |                 |              |               |
| 1            | GEN-35      | 35                | 400/231      | 51/87,5      | D-107AN      | 46  | 1.500        | 5               | 3               | 1.075        | UMEB          |
| 2            | GEN-70      | 70                | 400/231      | 101/175      | D-120N       | 86  | 1.500        | 5               | 2,5             | 1.640        | UMEB          |
| 3            | GEN-120     | 120               | 400/231      | 174/301      | MB-836B      | 160 | 1.000        | 4               | 2               | 5.100        | Faur          |
| 4            | GEN-175     | 175               | 400/231      | 253/438      | MB-836Bb     | 216 | 1.000        | 4               | 2               | 5.100        |               |
| 5            | GEN-180E    | 180               | 400/231      | 260-450      | MB-836Bb     | 216 | 1.000        | 4               | 2               | 5.100        |               |
| 6            | GEN-245     | 245               | 400/231      | 354/612      | MB 820B      | 296 | 1.000        | 4               | 2               | 6.500        |               |
| 7            | GEN-250E    | 250               | 400/231      | 361/625      | MB 820B      | 296 | 1.000        | 4               | 2               | 6.500        |               |
| 8            | GEN-265     | 265               | 400/231      | 383/662      | MB 836Bb     | 325 | 1.500        | 4               | 2               | 5.100        |               |
| 9            | GEN-280E    | 280               | 400/231      | 405/700      | MB 836Bb     | 330 | 1.500        | 4               | 2               | 5.100        |               |
| 10           | GEN-390     | 390               | 400/231      | 564/975      | MB 820Bb     | 420 | 1.000        | 4               | 2               | 7.300        |               |
| 11           | GEN-400E    | 400               | 400/231      | 578/1000     | MB 820Bb     | 470 | 1.000        | 4               | 2               | 7.800        |               |
| 12           | GEN-585     | 585               | 400/231      | 845/1460     | MB 820Bb     | 705 | 1.500        | 4               | 2               | 7.300        |               |
| 13           | GEN-600E    | 600               | 400/231      | 867/1500     | MB 820Bb     | 705 | 1.500        | 4               | 2               | 7.300        |               |

Toate generatoarele prezentate funcționează la  $\cos\varphi_N = 0,8$ .

Generatoarele navale sunt prevăzute cu reglatoare automate de tensiune cu compoundare după curent și fază. Ele sunt antrenate de motoare Diesel prevăzute cu reglatoare de turație. Motoarele Diesel și generatoarele sincrone formează grupul Diesel – generator, fiind furnizate împreună.

### **1.3 PROBLEME ABORDATE ÎN STUDIUL GENERATOARELOR SINCRONE DE PE NAVELE MARITIME**

Problemele specifice sistemelor electroenergetice navale sunt legate de puterea limitată a generatoarelor sincrone, de condițiile speciale în care funcționează și de necesitatea alimentării tuturor consumatorilor cu tensiuni electrice sinusoidale al căror nivel trebuie să se situeze într-o plajă bine determinată atât pe termen lung și mediu cât și pe termen scurt (regimuri tranzitorii de scurtă durată).



Buna funcționare a consumatorilor este influențată de o mare varietate de fenomene, cele mai importante fiind:

- variațiile tensiunii electrice de alimentare;
- supratensiuni;
- subtensiuni;
- impuls sau "notch" în tensiunea de alimentare;
- distorsiunea formei de undă a tensiunii de alimentare;
- perturbații geomagnetice de frecvență scăzută (sub 5 Hz).

Pentru a avea o siguranță în funcționarea corectă a consumatorilor de la bordul navelor, practica inginerescă a impus anumite restricții specificate în normele societăților de clasificare a navelor. Încadrarea în limitele prescrise de normele RNR sau STANAG nu este o problemă simplă de realizat în multe cazuri practice.

Dar problema cea mai importantă este cea a variațiilor de tensiune la cuplarea și decuplarea consumatorilor mai importanți de la bordul unei nave maritime, problemă pe care o abordează prezenta teză de doctorat.

În vederea îmbunătățirii performanțelor grupurilor motor Diesel- Generator sincron (DG) la cuplarea și decuplarea consumatorilor importanți, rezultă că trebuie căutate soluții de rezolvare a problemei în zonele:

- înlocuirea reguletoarelor de tensiune cu altele mai performante;
- micșorarea constantelor de timp;
- montarea de dispozitive care să mențină constantă turația grupurilor DG de la mers în gol până la sarcina nominală; din anul 2000 au intrat în exploatare grupuri DG cu motorul Diesel de tipul Perkins care au montați 3 senzori magnetici pe volant, conectați la un sistem de menținere constantă a turației și generatoare sincrone de tipul Stanford.

În ideea micșorării constantelor de timp, autorul tezei a considerat utilă împărțirea înfășurării de excitație în două înfășurări. Contribuția originală a autorului constă în analiza generatorului sincron cu două înfășurări de excitație comparativ cu generatorul sincron cu o singură înfășurare de excitație, în regimuri tranzitorii de încărcare și descărcare de sarcină.

Prin adoptarea generatorului sincron cu două înfășurări se micșorează constantele de timp pe cele două înfășurări de excitație, ca urmare a reducerii numărului de spire și, din acest punct de vedere, generatorul sincron cu două înfășurări de excitație se comportă, în regim tranzitoriu, net superior generatorului sincron cu o singură înfășurare de excitație. Tensiunea la borne prezintă scăderi mai reduse datorită compensării fluxului de reacție prin solenația creată de cea de-a doua înfășurare de excitație (alimentată cu un curent proporțional cu curentul de sarcină). În acest sens, generatorul sincron cu două înfășurări de excitație se poate autoregla, așa cum se va arăta în capitolele următoare.

Problematica abordată în cadrul tezei de doctorat este direcționată pe următoarele probleme:

- analiza caracteristicilor exterioare la generatoarele sincrone cu o înfășurare pe excitație și la cele cu două înfășurări de excitație;
- analiza caracteristicilor mecanice a motoarelor Diesel în corelație cu forma caracteristicii cuplului electromagnetic a generatoarelor sincrone;
- analiza reguletoarelor de tensiune și de turație;
- determinarea inductanțelor proprii și mutuale ale generatoarelor sincrone cu una și cu două înfășurări de excitație;
- comportarea sistemului electroenergetic naval în regim tranzitoriu, la diverse încărcări rezistive și rezistiv – inductive;

- determinări experimentale în regim tranzitoriu de încărcări și descărcări;
- analiza comportării generatoarelor sincrone fără regulator de tensiune și de turație;
- analiza influenței constantelor de timp ale reguletoarelor de tensiune și de turație asupra proceselor tranzitorii;
- simulări numerice;
- stabilirea șocurilor în cuplu, tensiune la borne și curenți.

Tema tezei de doctorat prezintă unele contribuții în cadrul modernizării sistemelor electroenergetice navale prin:

- soluții constructive noi (generator sincron cu două înfășurări de excitație);
- simulări numerice care scot în evidență limitele soluțiilor clasice (a reguletoarelor de tip PI sau PID);
- soluții date pentru încadrarea în normele impuse de STANAG privind variațiile tensiunii și frecvenței la salturi bruște ale sarcinii.

## CAP.2. CARACTERISTICILE EXTERIOARE ALE GENERATOARELOR SINCRONE DE PE NAVELE MARITIME ȘI CARACTERISTICILE MECANICE ALE MOTOARELOR DIESEL

În sistemele electroenergetice izolate, cum este cazul sistemelor electroenergetice navale, tensiunea și frecvența nu mai sunt mărimi impuse de rețea. Ele se modifică la orice conectare sau deconectare a unui consumator la barele centralei electrice navale iar, la sarcini mari, pot conduce la pierderea stabilității. În acest capitol se analizează problema stabilității grupurilor motor Diesel – generator sincron în cazul generatoarelor sincrone cu o singură înfășurare și cu două înfășurări, iar în paragraful 2.1.2 se arată cum, prin alegerea potrivită a ponderii înfășurării adiționale, se poate ajunge la un generator sincron autoreglat.

### 2.1. Caracteristica exterioară la un generator sincron

Caracteristica exterioară la un generator sincron este funcția  $U=f(I)$ . Cunoașterea alior curbei respective este foarte importantă pentru a se determina variația tensiunii la bornele generatorului sincron la diverse sarcini.

#### 2.1.1 Caracteristica exterioară la un generator cu o singură înfășurare $U=f(I)$ la $I_E=ct.$ și $\varphi=ct.$

Caracteristica exterioară la un generator cu o singură înfășurare  $U=f(I)$  la  $I_E=ct.$  și  $\varphi=ct.$  este puternic influențată de natura sarcinii: rezistivă, inductivă, capacitivă, mixtă.

În general pe navă consumatorii sunt rezistivi sau rezistiv- inductivi.

Expresia analitică a caracteristicii exterioare dată în [D1][N2] este de forma:

$$I^2 = \frac{[U_{eE} \cos(\gamma_d - \beta) - U \cos(\vartheta_0 - \gamma_d)]^2}{Z_d^2 \cos^2(\gamma_d - \gamma_q)} + \frac{[U_{eE} \sin(\gamma_d - \beta) - U \sin(\vartheta_0 - \gamma_d)]^2}{Z_q^2 \cos^2(\gamma_d - \gamma_q)} \quad (2.1)$$

unde:

$U_{eE}$  – t.e.m. indusă de câmpul inductor (t.e.m. polară) ;

$\gamma_d - (tg \gamma_d = R_d / X_d; R_d = R + R_{dm})$

$\gamma_q - (tg \gamma_q = R_q / X_q; R_q = R + R_{qm})$  (2.2)

$\beta$  – unghiul de defazaj dintre vectorii  $\underline{U}_{eE}$  și  $\underline{I}_q$  ( $tg \beta = R_{dm} / X_{dm}$ )

$R_{dm}$  – rezistența de reacție longitudinală;

(la neglijarea pierderilor în fier  $\beta \rightarrow 0$ )

$R_{qm}$  – rezistența de reacție transversală [D1] ;

$X_{dm}$  – reactanța corespunzătoare pierderilor în fier ;

$\vartheta_0$  – unghiul de sarcină.

La un generator sincron de putere la care se pot neglija rezistențele statorice se poate scrie :

$$\underline{U} = \underline{U}_{eE} - jX_d \underline{I}_d - jX_q \underline{I}_q \quad (2.3)$$

unde

$X_d$  – reactanța sincronă longitudinală;

$X_q$  – reactanța sincronă transversală;

sau

$$\begin{cases} U_{eE} = X_d I \sin(\theta + \varphi) + U \cos \theta \\ X_q I \cos(\theta + \varphi) = U \sin \theta \end{cases} \quad (2.4)$$

Prin eliminarea lui  $\theta$  din ecuația a doua se obține:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{IX_q \cos \varphi}{U + X_q I \sin \varphi}; \quad \sin \theta = \frac{X_q I \cos \varphi}{\sqrt{U^2 + (X_q I)^2 + 2UIX_q \sin \varphi}} \quad (2.5)$$

și înlocuind în prima ecuație rezultă:

$$\cos \theta = \frac{U + X_q I \sin \varphi}{\sqrt{U^2 + (X_q I)^2 + 2UIX_q \sin \varphi}} \quad (2.6)$$

$$U_{eE} = X_d I \frac{X_q I \cos^2 \varphi}{\sqrt{U^2 + (X_q I)^2 + 2UIX_q \sin \varphi}} + X_d I \frac{(U + X_q I \sin \varphi) \sin \varphi}{\sqrt{U^2 + (X_q I)^2 + 2UIX_q \sin \varphi}} \quad (2.7)$$

sau prin ridicare la pătrat rezultă:

$$\begin{aligned} (U_{eE} - U \cos \theta)^2 [U^2 + (X_q I)^2 + 2UIX_q \sin \varphi] = \\ = (X_d I)^2 \{ (X_q I \cos^2 \varphi)^2 + ((U + X_q I \sin \varphi) \sin \varphi)^2 + \\ + 2X_q I \cos^2 \varphi (U + X_q I \sin \varphi) \sin \varphi \} \end{aligned} \quad (2.8)$$

sau

$$\left[ U_{eE} \sqrt{U^2 + (X_q I)^2 + 2UIX_q \sin \varphi} - U(U + X_q I \sin \varphi) \right]^2 = (X_d I)^2 (X_q I + U \sin \varphi)^2 \quad (2.9)$$

sau

$$U_{eE}^2 [U^2 + (X_q I)^2 + 2UIX_q \sin \varphi] = [X_d X_q I^2 + X_d UI \sin \varphi + U^2 + UX_q I \sin \varphi]^2 \quad (2.10)$$

La o sarcină pur rezistivă ( $\varphi = 0$ ), ecuația caracteristicii exterioare devine :

$$U_{eE}^2 [U^2 + (X_q I)^2] = [X_d X_q I^2 + U^2]^2 \quad (2.11)$$

iar la o sarcină pur inductivă ( $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ), ecuația caracteristicii exterioare devine :

$$U_{eE}^2 [U + X_q I] = [U^2 + UI(X_q + X_d) + X_d X_q I^2] \quad (2.12)$$

Ecuațiile de mai sus se interpretează foarte ușor la generatorul sincron cu poli plini la care reactanțele după cele două axe sunt egale

$$X_d = X_q = X_s \quad (2.13)$$

și deci pentru o sarcină pur rezistivă ( $\varphi = 0$ ) se obține :

$$U_{eE}^2 [U^2 + (X_s I)^2] = [(X_s I)^2 + U^2]^2 \quad (2.14)$$

sau

$$\boxed{U_{eE}^2 = (X_s I)^2 + U^2} \quad (2.15)$$

ceea ce reprezintă ecuația unei elipse cu axele după axele de coordonate.

La o sarcină pur inductivă ( $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ) și la  $X_d = X_q = X_s$ , rezultă ecuația caracteristicii exterioare sub forma :

$$U_{eE} [U + X_s I] = [U^2 + UI \cdot 2X_s + X_s^2 I^2] \quad (2.16)$$

sau

$$U_{eE} [U + X_s I] = [U + X_s I]^2 \quad (2.17)$$

de unde rezultă :

$$\boxed{U_{eE} = U + X_s I} \quad (2.18)$$

care reprezintă ecuația unei drepte.

La generatoarele sincrone de pe navele maritime sarcina conectată la borne este de regulă rezistiv – inductivă :

- motoare asincrone de uz general ;
- motoarele de la pompele de balast ;
- motoarele de la mecanismele de ridicare ;
- cuptoare electrice pentru uz gospodăresc, etc.

În concluzie, caracteristica exterioară este în zona A (figura 2.1) pentru un consumator rezistiv-inductiv. La modificarea curentului de sarcină I (de la  $I_1$  la  $I_2$ ) tensiunea la borne se modifică sensibil de la  $U_1$  la  $U_2$  :

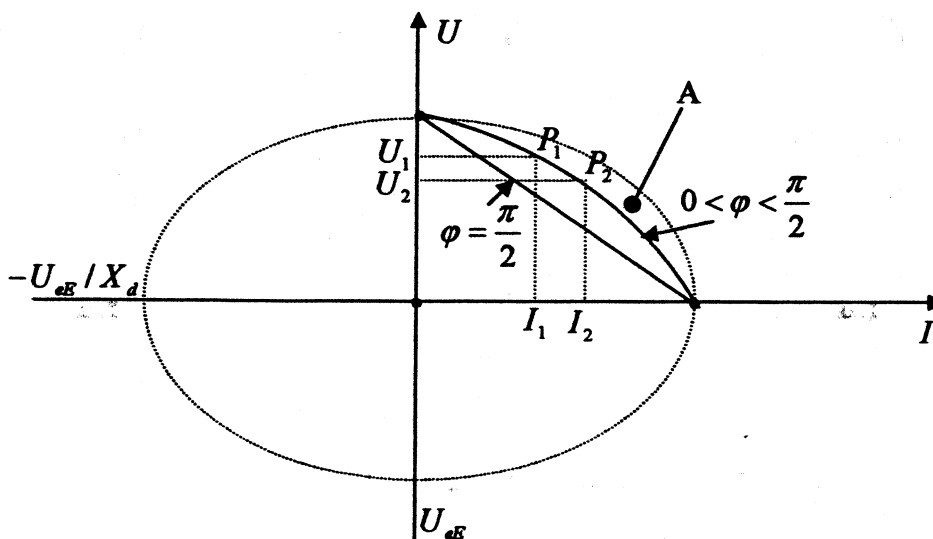


Fig.2.1. Caracteristica exterioară la un generator sincron cu o înfașurare de excitație.

### 2.1.2. Caracteristica exterioară la generatorul sincron cu poli aparenti și cu două înfășurări de excitație

Folosind relația (2.10) ecuația caracteristicii exterioare este :

$$U_{eE}^2 [U^2 + (X_q I)^2 + 2IUX_q \sin \varphi] = [X_d X_q I^2 + X_d UI \sin \varphi + U^2 + UX_q I \sin \varphi]^2$$

și la

$$U_{eE} = a + bI \quad (2.19)$$

unde :  $a =$  t.e.m. polară dată de câmpul magnetic de excitație creat de curentul ce trece prin înfășurarea de excitație alimentată de la o tensiune continuă, fixă ca valoare ;

$bI =$  t.e.m. polară determinată de câmpul magnetic de excitație creat de curentul ce trece prin înfășurarea de excitație conectată în serie cu sarcina.

Pentru un consumator pur rezistiv ( $\varphi=0$ ) caracteristica exterioară devine :

$$(a+bI)^2 [U^2 + (X_q I)^2] = [X_d X_q I^2 + U^2]^2 \quad (2.20)$$

sau

$$U^4 + cU^2 I^2 + dU^2 I - a^2 U^2 + eI^4 - fI^3 - gI^2 = 0 \quad (2.21)$$

unde :  $c = 2X_d X_q - b^2$

$$d = -2ab$$

$$e = (X_d X_q)^2 - (b X_q)^2$$

$$f = 2ab X_q^2$$

$$g = a^2 X_q^2$$

În cadranul I la  $I=0$  se obține :

$$U^4 - a^2 U^2 = 0 \quad (2.22)$$

sau

$$U_0 = a \quad (2.23)$$

Și la  $U=0$  rezultă

$$eI^4 - fI^3 - gI^2 = 0 \quad (2.24)$$

sau

$$eI^2 - fI - g = 0 \quad (2.25)$$

și deci :

$$I_{scI} = \frac{f + \sqrt{f^2 + 4eg}}{2e} = \frac{a}{X_d - b} \quad (2.26)$$



La modificarea ponderii înfășurării de excitație adiționale conectate în serie cu sarcina, valoarea lui  $I_{ec1}$  se poate modifica.

La valoarea lui  $b$  egală :

$$b=X_d \quad (2.27)$$

rezultă  $I_{ec1} \rightarrow \infty$  adică o caracteristică cu pantă redusă.

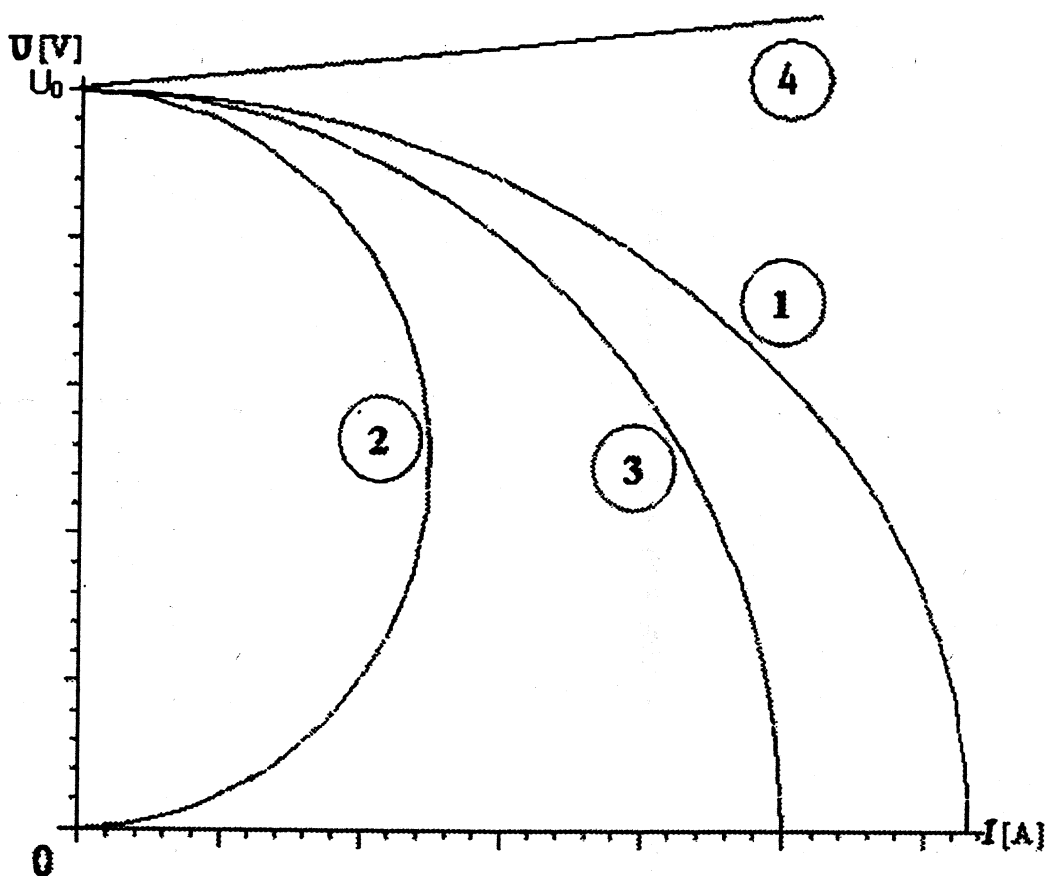


Fig. 2.1.1. Caracteristicile externe ale generatorului sincron cu două înfășurări de excitație.

-(1),(2),(3) - înfășurarea de excitație auxiliară conectată diferențial ;

-(4) - înfășurarea de excitație auxiliară conectată adițional.

Este posibil ca pentru alte valori date lui  $b$  să se obțină curbele (1), (2), (3) sau (4). La  $X_d=X_q=X$  (generatorul sincron cu poli plini) ecuația caracteristicii exterioare se scrie sub forma  $(a+bI)^2=(XI)^2+U^2$  și reprezintă o conică ce devine elipsă la  $b=0$ .

Pentru un consumator pur inductiv ( $\varphi=\frac{\pi}{2}$ ) ecuația caracteristicii exterioare devine:

$$(a+bI)[U+X_q I]=[U^2+UI(X_q+X_d)+X_d X_q I^2] \quad (2.28)$$

sau:

$$U^2 + hUI + lI^2 - mI - aU = 0 \quad (2.29)$$

unde:

$$\begin{aligned} h &= X_d + X_q - b \\ l &= X_d X_q - b X_q \\ m &= a X_q \end{aligned}$$

La  $X_d = X_q = X$  (generator sincron cu poli plini) ecuația caracteristicii exterioare se scrie sub forma:

$$a + bI = U + XI \quad (2.30)$$

sau

$$U = a - I(X - b) \text{ și reprezintă o dreaptă cu pantă dependentă de mărimea factorului } (X - b)$$

În cadranul I la  $I = 0$  rezultă:

$$U^2 - aU = 0 \quad (2.31)$$

sau

$$U_0 = a \quad (2.32)$$

și la

$$U = 0 \quad (2.33)$$

se obține

$$lI^2 - mI = 0 \quad (2.34)$$

și deci

$$I_{sc2} = \frac{m}{l} \quad (2.35)$$

La  $b = 0$  se obține cazul generatorului cu o singură înfășurare de excitație (GS1) la care

$$I_{sc1} = I_{sc2} = I_{sc3} \quad (2.36)$$

Pentru  $b = X_d$  rezultă  $l = 0$ ,  $h = X_q$  și deci  $I_{sc2} \rightarrow \infty$

În concluzie valoarea lui  $b$  este importantă în stabilirea aliniei caracteristicii externe la generatorul sincron cu două înfășurări de excitație.

Reglajul tensiunii la borne presupune atât controlul curentului prin înfășurarea de excitație principală, cât și controlul curentului prin înfășurarea de excitație adițională.

În anumite cazuri, la alegerea potrivită a lui  $b$ , reglajul din exterior a tensiunii la borne poate să lipsească, generatorul sincron cu două înfășurări de excitație fiind autoreglat.

Dacă se consideră că și motorul Diesel de antrenare nu are o turație constantă cu sarcina (regulatorul de turație nu funcționează) atunci modificarea tensiunii la borne cu sarcina este și mai pronunțată.

În concluzie, la generatorul sincron cu două înfășurări de excitație, față de generatorul sincron cu o singură înfășurare de excitație, se obțin următoarele avantaje:

- generatorul sincron cu două înfășurări de excitație are o caracteristică exterioară care se poate modifica într-o plajă foarte largă;
- caracteristicile exterioare crescătoare se obțin la conectarea înfășurării de excitație exterioare în același sens cu câmpul magnetic creat de înfășurarea de excitație principală;
- caracteristicile exterioare descrescătoare se obțin la conectarea înfășurării de excitație auxiliare în sens opus cu câmpul magnetic creat de înfășurarea de excitație principală;
- caracteristicile exterioare crescătoare sau cele rigide cu sarcina sunt indicate pentru navele maritime mari, cu personal calificat, unde scurtcircuiturile electrice sunt rare, deoarece la aceste caracteristici valorile curenților de scurtcircuit sunt mari;
- caracteristicile exterioare descrescătoare sunt indicate pentru navele mici, cu personal redus și necalificat, unde pot apărea scurtcircuituri frecvente și la care valorile curenților de scurtcircuit trebuie să fie reduse.

Generatorul sincron cu două înfășurări de excitație, propus în prezenta lucrare este net superior generatorului sincron cu o singură înfășurare de excitație în sensul că:

- reglajul tensiunii generatorului sincron cu două înfășurări de excitație are o pondere redusă sau poate să lipsească, la o dimensionare potrivită a înfășurării de excitație auxiliare;
- se poate realiza orice formă a caracteristicii exterioare prin alegerea potrivită a numărului de spire și a modului de conectare (adițional sau diferențial) a înfășurării de excitație auxiliare.

## 2. 2. Caracteristica mecanică a motorului Diesel de 480 [kW]

Caracteristica mecanică a motorului Diesel este o parabolă de forma celei din figura 2.2.[B4]

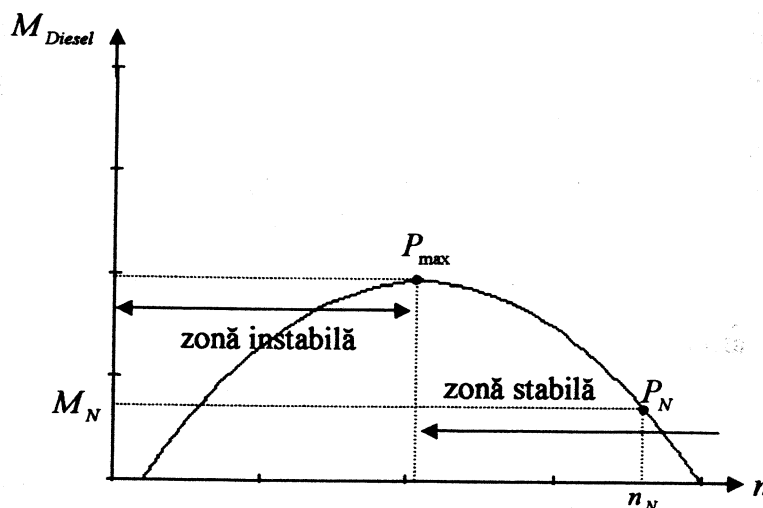


Fig.2.2. Caracteristica cuplului la motorul Diesel.

Din datele de catalog ale motorului Diesel se cunosc:

-punctul de funcționare la putere maximă  $P_{max}$ , caracterizat prin:

- $M_M$  și  $n_M$ ;

-punctul de funcționare la putere nominală  $P_N$ , caracterizat prin:

-cuplul nominal  $M_N$ ;

-turația nominală  $n_N$ ;

Caracteristica cuplului  $M=f(n)$  este o parabolă de ecuație:

$$M=A \cdot n^2+B \cdot n+C \quad (2.37)$$

Din  $\frac{dM}{dn}=0$  se obține turația corespunzătoare cuplului maxim:

$$n_M=-\frac{B}{2A} \quad (2.38)$$

Valoarea cuplului maxim este:

$$M_M=\frac{(4AC-B^2)}{4A} \quad (2.39)$$

Valoarea cuplului nominal este:

$$M_N=A \cdot n_N^2+B \cdot n_N+C \quad (2.40)$$

Cu aceste precizări, sistemul de ecuații:

$$\left\{ \begin{array}{l} B=-2An_M \\ B^2=4AC-4AM_M \end{array} \right. \quad (2.41)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B^2=4AC-4AM_M \\ A \cdot n_N^2+B \cdot n_N+C=M_N \end{array} \right. \quad (2.42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A \cdot n_N^2+B \cdot n_N+C=M_N \\ B^2=4AC-4AM_M \end{array} \right. \quad (2.43)$$

Cu necunoscutele A,B,C se rezolvă și se obțin valorile:

$$A=\frac{(M_N-M_M)}{(n_M-n_N)^2} \quad (2.44)$$

$$B=\frac{2(M_M-M_N)n_M}{(n_N-n_M)^2} \quad (2.45)$$

$$C=\frac{(M_M n_N^2 + M_N n_M^2 - 2M_M n_N n_M)}{(n_N - n_M)^2} \quad (2.46)$$

Cunoscând caracteristica cuplului a motorului Diesel, punctul de funcționare impus de generatorul sincron la debitul de motorină  $Q_1$  este perfect determinat ( $P_N$ ). La mărirea sarcinii la bornele generatorului sincron cuplul la arbore se mărește și deci turația va scădea.

Scăderea turației grupului motor-generator determină:

- scăderea t.e.m. polare :  $U_{eE} = \omega M_E I_E = 2\pi n M_E I_E$ ;
- scăderea reactanțelor  $X_d$  și  $X_q$  ( $X = \omega L = 2\pi n L$ )

Termenii  $X_q I$ ;  $X_d I$  din relațiile (2.10) nu au o pondere mare așa cum o are termenul ce conține pe  $U_{eE}$  și deci scăderea lui  $U_{eE}$  duce la o scădere și mai pronunțată a tensiunii la bornele generatorului sincron așa cum se va exemplifica pe Generatorul de 455[kVA] analizat în continuare.

Scăderea tensiunii la generatorul sincron se poate elimina prin folosirea generatorului sincron cu două înfășurări de excitație așa cum s-a menționat anterior.

În acest mod se poate elimina acest dezavantaj al motorului Diesel prin folosirea generatorului sincron cu două înfășurări de excitație autoreglat, în sensul că la creșterea sarcinii crește și câmpul creat de curentul ce trece prin înfășurarea auxiliară.

### Generatorul sincron naval de 455[kVA]

Generatorul sincron naval de 455[kVA] este antrenat de un motor Diesel care are datele :

$$P_N = 480[kW]$$

$$n_N = 1500[rot/min] \quad \omega = 314[rad/s] \text{ la generatorul sincron}$$

$$M_N = 3057[Nm]$$

și funcționează în punctul  $P_N$  (figura 2.3)

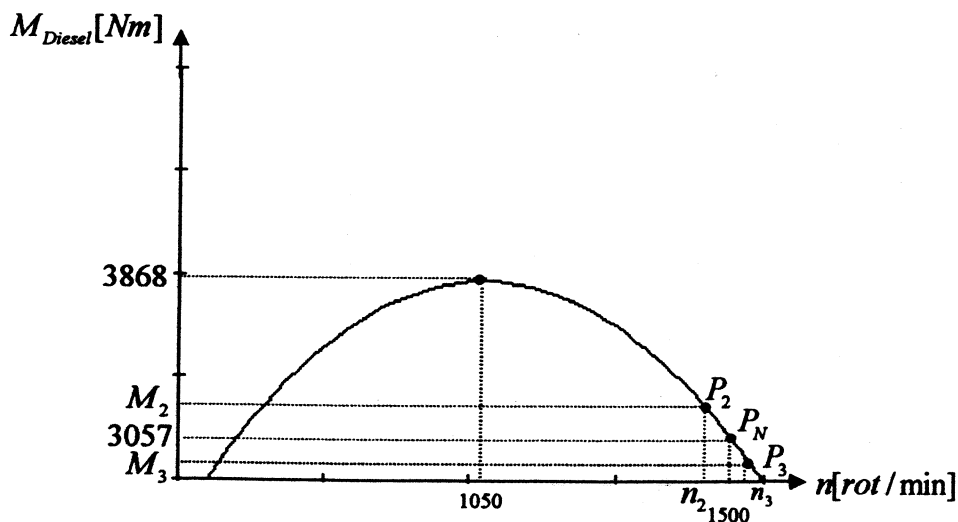


Fig.2.3.Modificarea turației la motorul Diesel de antrenare.

La creșterea sarcinii la bornele generatorului sincron, de exemplu, cu 2% punctul de funcționare se va deplasa din  $P_N \rightarrow P_2$  la turația  $n_2$  și cuplul  $M_2$  :

$$n_2 = 1400[rot/min](\omega = 293[rot/s] - \text{la generatorul sincron})$$

$$M_2 = 3342,85[Nm]$$

soluții obținute din sistemul:

$$\begin{cases} 480000 \cdot 1,02 = M_2 \frac{2\pi n_2}{60} (\text{marirea sarcinii cu } 2\%) \\ M_2 = -\frac{3}{700} (n_2 - 100)(n_2 - 2000) (\text{caracteristica mecanică a motorului Diesel}) \end{cases} \quad (2.47)$$

### 2.3. Modificarea tensiunii și frecvenței cu sarcina la generatorul sincron naval de 455[kVA]

Generatorul sincron naval de 455[kVA] considerat cu inductanțele sincrone deduse experimental la cap. 3:

$$\begin{aligned} L_d &= 0,001[H] \\ L_q &= 0,0009[H] \end{aligned} \quad (2.48)$$

funcționează în punctul nominal:

$$\begin{aligned} n_N &= 1500[\text{rot}/\text{min}] \\ P_N &= 455[kW] \end{aligned} \quad (2.49)$$

Randamentul grupului motor Diesel – generator sincron din datele de catalog este:

$$\begin{aligned} \eta &= 0,948 \\ \text{și deci } P_{gen} &= \eta \cdot P_{Diesel} \end{aligned} \quad (2.50)$$

sau:

$$\begin{aligned} P_{gen} &= 0,948 \cdot 480 = 455[kW] \\ M_{el\text{mag}} &= 0,948 \cdot 3057 = 2898[Nm] \end{aligned} \quad (2.51)$$

Ecuatiile ce definesc funcționarea generatorului sincron sunt:

$$\begin{cases} U_{aE} = X_d I \sin(\theta + \varphi) + U \cos \theta \\ X_q I \cos(\theta + \varphi) = U \sin \theta \\ M_{el\text{mag}} = \frac{6}{\omega} \frac{U U_{aE}}{X_d} \sin \theta + \frac{6}{\omega} \frac{U^2 (X_d - X_q)}{2 X_d X_q} \sin 2\theta \end{cases} \quad (2.52)$$

sau numeric, la o sarcină pur rezistivă și la

$$f = 50[Hz]; U_N = 220[V] \quad (2.53)$$



$$\begin{cases} U_{eE} = 314 \cdot 0,001 I \sin \theta + 220 \cos \theta \\ 0,0009 \cdot 314 I \cos \theta = 220 \sin \theta \\ 2898 = \frac{6}{314} \frac{220 U_{eE}}{0,001 \cdot 314} \sin \theta + \frac{6 \cdot 220^2 \cdot 314 (0,001 - 0,0009)}{314 \cdot 2 \cdot 314^2 \cdot 0,001 \cdot 0,0009} \sin 2\theta \end{cases} \quad (2.54)$$

sau

$$\begin{cases} U_{eE} = 0,314 \cdot I \sin \theta + 220 \cos \theta \\ 0,2826 I \cos \theta = 220 \sin \theta \\ 257 = 1,188 U_{eE} \sin \theta + 14,52 \sin 2\theta \end{cases} \quad (2.55)$$

cu soluțiile:

$$\begin{aligned} I &= 689[A] \\ U_{eE} &= 308[V] \\ \theta &= 41^\circ \end{aligned} \quad (2.56)$$

Deoarece

$$U_{eE} = \omega M_E I_E = 308[V] \quad (2.57)$$

se obține

$$M_E I_E = \frac{308}{314} = 0,98 = ct \text{ și la } \varphi = 0 \quad (2.58)$$

Și din sistemul [2.55] rezultă:

$$\begin{cases} 0,98\omega = 0,001\omega I \sin \theta + U \cos \theta \\ 0,0009\omega I \cos \theta = U \sin \theta \\ M_{\text{elmag}} = \frac{5880 U \sin \theta}{\omega} + \frac{333 U^2 \sin 2\theta}{\omega^2} \end{cases} \quad (2.59)$$

sau prin transformări:

$$\begin{cases} 980 \sin \theta = 0,9 I + 0,1 I \sin^2 \theta \\ M_{\text{elmag}} = 5,292 I \cos \theta + 0,00054 I^2 \frac{\cos^3 \theta}{\sin \theta} \end{cases} \quad (2.60)$$

La generatorul sincron cu poli plini la care  $L_d = L_q$  sistemul de mai sus se simplifică și devine:

$$\begin{cases} 980 \sin \theta = I \\ M_{\text{elmag}} = 5,292 I \cos \theta \end{cases} \quad (2.61)$$

sau

$$\boxed{M_{\text{elmag}} = 2881,2 \sin 2\theta} \quad (2.62)$$

Observații:

1. Relațiile sunt valabile numai la încărcări pur rezistive de valoare  $R$ :  
( $R = 0,0009\omega \cdot ctg\theta$ ).

2. Cuplul electromagnetic nu depinde de turație. De turație depinde însă cuplul motor ( $M_{\text{Diesel}}$ ).

3. La  $\omega$  variabil și la sarcini pur rezistive, cuplul electromagnetic al generatorului sincron, la excitație constantă, are o variație dată de  $\sin 2\theta$ .

4. Cuplul maxim se obține pentru

$$\theta = \frac{\pi}{4}$$

La creșterea sarcinii cu 2% la arborele motorului Diesel, la bornele generatorului sincron, sarcina a crescut cu:

$$2\eta = 2 \cdot 0,948 = 1,896\% \quad (2.63)$$

și cuplul electromagnetic are valoarea:

$$M_{\text{elmag}} = M_{\text{Diesel}} \cdot \eta = 3342,85 \cdot 0,948 = 3289,36 [Nm] \quad (2.64)$$

adică peste valoarea maxim admisă

$$M_{\text{elmag.max}} = 2593 [Nm] \quad (2.65)$$

și deci funcționarea în aceste condiții nu este posibilă.

La scăderea sarcinii la bornele generatorului sincron cu 10%, la arborele motorului Diesel puterea scade cu valoarea:

$$\frac{10}{\eta} = \frac{10}{0,948} = 10,5485\% \quad (2.66)$$

obținându-se sistemul:

$$\begin{cases} 480000(1 - 0,10548) = M_3 \frac{2\pi n}{60} \text{ (scăderea sarcinii cu 10\%)} \\ M_3 = -\frac{3}{700}(n_3 - 100)(n_3 - 2000) \text{ (caracteristica mecanică a motorului Diesel)} \end{cases} \quad (2.67)$$

sau

$$\begin{cases} 4100298,6 = M_3 n_3 \\ M_3 = -\frac{3}{700}n^2 + 9n - 857 \end{cases} \quad (2.68)$$

cu soluțiile

$$\begin{aligned} M_3 &= 3867 [Nm] \\ n_3 &= 1060 [\text{rot} / \text{min}] \end{aligned} \quad (2.69)$$

Unghiul de sarcină  $\theta$  din relația:

$$3867 \cdot 0,948 = 2593 \sin 2\theta \quad (2.70)$$

nu are soluții deoarece rezultă  $\sin 2\theta > 1$ .

Așadar, este posibilă o scădere a sarcinii, și deci a cuplului, numai până la

$$M_{\text{elmag}} = 2593 [Nm] \quad (2.71)$$

când

$$\theta = 45^\circ \left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (2.72)$$

La motorul Diesel cuplul la arbore, în aceste condiții, are valoarea:

$$M_{Diesel} = \frac{M_{almag}}{\eta} = \frac{2593}{0,948} = 2735[Nm] \quad (2.73)$$

Turația la care funcționează motorul Diesel rezultă din rezolvarea ecuației:

$$2735 = -\frac{3}{700}n^2 + 9n - 857 \text{ (caracteristica la motorul Diesel)} \quad (2.74)$$

cu soluția:

$$n = 1564[rot / min] (\omega = 327[rad / s]) \quad (2.75)$$

Puterea debitată de motorul Diesel este:

$$P_{Diesel} = M_{Diesel} \cdot \frac{2\pi n}{60} = \frac{2735 \cdot 2\pi \cdot 1564}{60} = 447,942[kW] \quad (2.76)$$

și puterea cedată la bornele generatorului sincron are valoarea:

$$P_{GS} = P_{Diesel} \cdot \eta = 424,649[kW] \quad (2.77)$$

Observatii:

1. Sistemul Diesel-generator fără reglatoare pe turație și excitație poate funcționa stabil între limitele:

$$n = 1500 \div 1564[rot / min] \quad (2.78)$$

2. Puterea se poate modifica între limitele:

$$\left. \begin{array}{l} P_N = 480[kW] \\ \text{și } P_{\min} = 447,942[kW] \end{array} \right\} \text{ la motorul Diesel} \quad (2.79)$$

adică 6,675%.

și

$$\left. \begin{array}{l} P_{NGS} = 455[kW] \\ P_{GS\min} = 424,6[kW] \end{array} \right\} \text{ la generatorul sin cron} \quad (2.80)$$

sau 6,675%.

Tensiunea U și curentul I se calculează din sistemul (2.59):

$$\begin{cases} 327 \cdot 0,98 = 0,327I \frac{\sqrt{2}}{2} + U \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0,2943I = U \end{cases} \quad (2.81)$$

sau

$$\begin{cases} 320,5 = 0,23I + 0,7U \\ 0,2943I = U \end{cases} \quad (2.82)$$

cu soluțiile:

$$\begin{cases} I = 735[A] \\ U = 216[V] \end{cases} \quad (2.83)$$

În concluzie, generatorul sincron naval de 455[kVA] funcționează stabil, fără regulatoare pe turație și excitație la modificări mici ale sarcinii (6,675%),(relația 2.79)

Problema variației puterii, în limitele stabilității grupului motor Diesel-generator sincron, la excitație constantă și debit constant de combustibil la motorul Diesel (deci fără reglaje pe excitație și turație), pusă anterior ținea seama de valoarea puterii active și nu de valoarea rezistenței conectate la bornele generatorului sincron.

La o sarcină pur rezistivă de valoare „ R “ sistemul de ecuații (2.52) devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} 980 \sin \theta = I \\ \omega I \cos \theta = 1000U \sin \theta \\ M_{\text{elmag}} = 2881,2 \sin 2\theta \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ecuațiile tensiunii}(U = RI) \\ \\ \text{ecuația cuplului} \end{array} \quad (2.84)$$

sau

$$\left\{ \begin{array}{l} 980 \sin \theta = I \\ \omega \cos \theta = 1000R \sin \theta \\ M_{\text{elmag}} = 2881,2 \sin 2\theta \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ecuațiile tensiunii}(U = RI) \\ \\ \text{ecuația cuplului} \end{array} \quad (2.85)$$

La o valoare dată pentru rezistența de sarcină R, de exemplu

$$R = 0,58[\Omega] \quad (2.86)$$

rezultă sistemul de ecuații ce definește punctul de funcționare:

$$\left\{ \begin{array}{l} 980 \sin \theta = I \\ \omega = 580 \operatorname{tg} \theta \\ -\frac{3}{700} n^2 + 9n - 857 = 2881,2 \sin 2\theta \\ \omega = 2 \frac{2\pi n}{60} \end{array} \right\} \quad (2.87)$$

cu soluțiile:

$$\begin{aligned} \theta &= 30^\circ \left( \frac{\pi}{6} \operatorname{rad} \right) \\ \omega &= 338,4[\operatorname{rad} / s] \\ n &= 1616[\operatorname{rot} / \operatorname{min}] \\ I &= 490[A] \\ U &= RI = 287,24[V] \end{aligned} \quad (2.88)$$

La excitație constantă și fără regulator pe turație, tensiunea se modifică între limitele:

$$U_{\max} = U_{\text{eR}} = 412[V] \text{ din } 308 \cdot \frac{2000}{1500} = 412[V] \text{-la funcționarea în gol } (R \rightarrow \infty)$$

$$U_{\min} = 210[V] \text{-la funcționarea cu } R = 0,322[\Omega] \text{- limita de stabilitate pentru}$$

$$\theta = 45^\circ \left( \frac{\pi}{4} \right).$$

Frecvența se modifică între limitele:

$$f_{\max} = 66,6[\text{Hz}] \text{ la } n = 2000[\text{rot} / \text{min}] \text{ [în gol]} \quad (2.89)$$

$$f_{\min} = 50[\text{Hz}] \text{ la } n = 1500[\text{rot} / \text{min}] \text{ [la sarcină nominală]} \quad (2.90)$$

Din sistemul de ecuații al generatorului sincron la o sarcină pur rezistivă :

$$\begin{cases} U_{eE} = U \cos \theta + X_s I \sin \theta \\ U \sin \theta = X_s I \cos \theta \\ M_{\text{cimag}} = \frac{3UU_{eE}}{\Omega_1 X_s} \sin \theta \end{cases} \quad (2.91)$$

la

$$\begin{cases} X_s = \omega L \\ U_{eE} = \omega M_E I_E \end{cases} \quad (2.92)$$

rezultă

$$\begin{cases} \omega M_E I_E = U \cos \theta + \omega L I \sin \theta \\ U \sin \theta = \omega L I \cos \theta \\ M_{\text{cimag}} = p_1 \frac{3U \omega M_E I_E}{\omega L \Omega_1} \sin \theta \end{cases} \quad (2.93)$$

sau

$$\begin{cases} \omega M_E I_E = I(R \cos \theta + \omega L \sin \theta) \\ R I \sin \theta = \omega L I \cos \theta \text{ sau } \text{tg} \theta = \frac{\omega L}{R} \\ M_{\text{cimag}} = \frac{3 p_1 \omega L M_E I_E I \cos \theta}{\omega L} \end{cases} \quad (2.94)$$

sau

$$\begin{cases} I = \frac{\omega M_E I_E}{R \cos \theta + \omega L \sin \theta} \\ \text{tg} \theta = \frac{\omega L}{R} \\ M_{\text{cimag}} = 3 p_1 M_E I_E I \cos \theta \end{cases} \quad (2.95)$$

sau

$$M_{\text{cimag}} = \frac{3 p_1 \omega (M_E I_E)^2 \cos \theta}{R \cos \theta + \omega L \sin \theta} \quad (2.96)$$

sau

$$M_{\text{cimag}} = \frac{3 p_1 \omega (M_E I_E)^2}{R + \omega L \cdot \text{tg} \theta} = \frac{3 p_1 \omega (M_E I_E)^2 R}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (2.97)$$

În regim staționar există egalitatea cuplurilor:

$$M_{\text{elmag}} = M_{\text{Diesel}} \quad (2.98)$$

Din (2.93), prin eliminarea lui  $\theta$  și la rezistența  $R$ , cuplul electromagnetic rezultă sub forma:

$$M_{\text{elmag}} = \frac{3p_1 R (M_E I_E)^2 \omega}{R^2 + (\omega L)^2} = \frac{a\omega}{b + c\omega^2} \quad (2.99)$$

Cuplul motor având o alătură parabolică se scrie sub forma:

$$M_{\text{Diesel}} = -d\omega^2 + e\omega + f \quad (2.100)$$

Punctele de funcționare rezultă din sistemul:

$$\begin{cases} M_{\text{elmag}} = \frac{a\omega}{b + c\omega^2} \\ M_{\text{Diesel}} = -d\omega^2 + e\omega + f \end{cases} \quad (2.101)$$

și se dau grafic în figura 2.4.

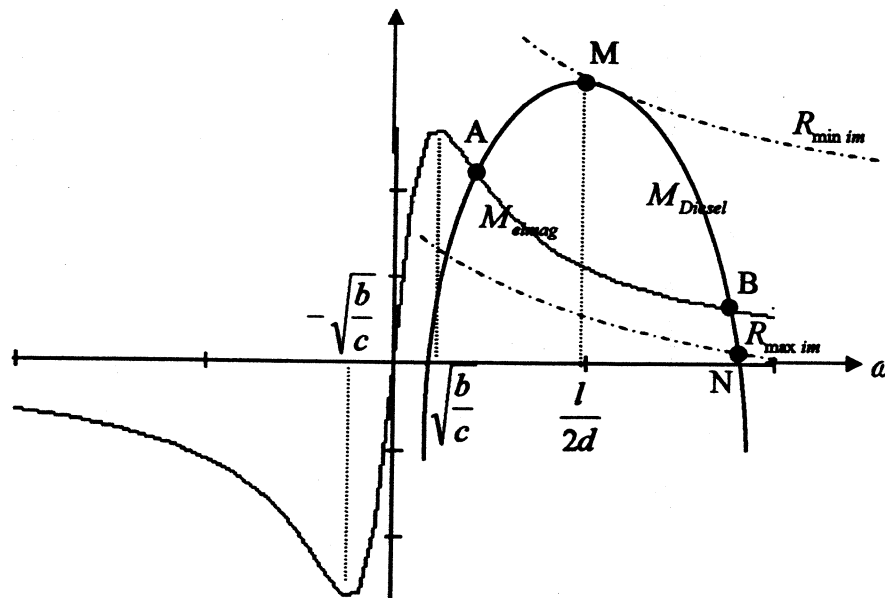


Fig.2.4.Zona de funcționare la R variabil.

Punctul B este punctul stabil de funcționare și corespunde unei rezistențe de valoare  $R$ .

Rezistența minimă  $R_{\text{min}}$  și rezistența maximă  $R_{\text{max}}$  la debit constant de motorină la motorul Diesel (parabola  $M_{\text{Diesel}}(\omega)$  este fixă) definesc zona MN.

La un curent de excitație constant și fără a regla turația la motorul Diesel, grupul motor – generator funcționează nesatisfăcător din următoarele motive:

1.tensiunea la borne se modifică sensibil cu sarcina, putând atinge și valori duble (la funcționarea în gol când excitația a fost reglată pentru a se obține o tensiune nominală – 220V- la sarcină nominală);



2. frecvența se modifică și ea în limite largi (50-60%) când sarcina variază între 0 și  $P_N$ .

Zona de funcționare stabilă a grupului se poate modifica sensibil prin:

- regulator pe excitație (influențează valorile cuplului electromagnetic)
- regulator pe turație (influențează cuplul motor).

Rolul reguletoarelor poate fi luat de un calculator de proces care poate menține tensiunea și frecvența între anumite limite impuse.

Prin reglarea turației și excitației se mărește plaja de stabilitate a sistemului în sensul că punctele de funcționare stabilă ocupă o suprafață mai mare.

### 1. Influența regulatorului de tensiune

În cazul în care  $I_E \neq ct.$  și debitul de motorină la motorul Diesel rămâne constant, zona de stabilitate se reduce la o curbă (curba AB figura 2.5)

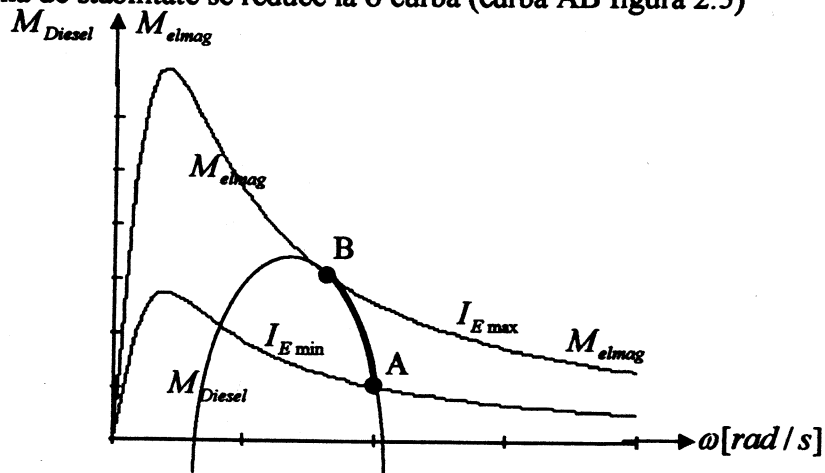


Fig.2.5.Zona de stabilitate la  $I_E$  variabil.

### 2. Influența regulatorului de turație

În cazul în care  $I_E = ct$  și se modifică debitul de motorină la motorul Diesel, zona de stabilitate este curba CD (figura 2.6).

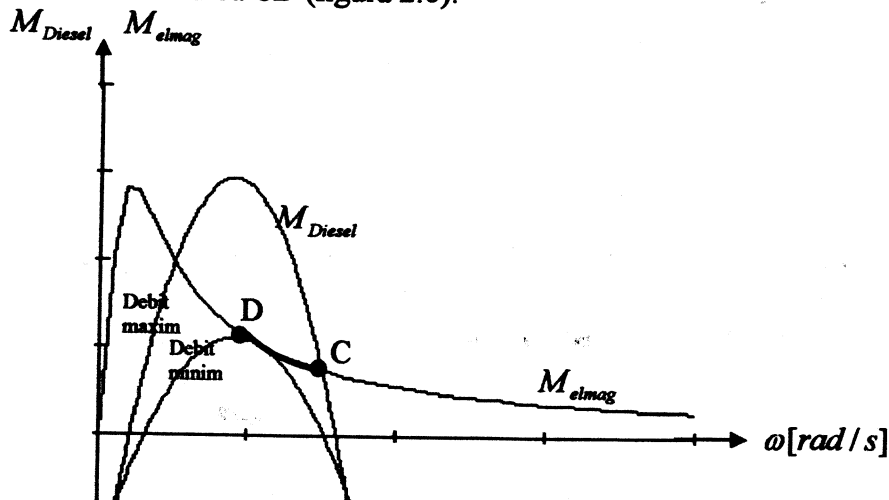


Fig.2.6.Zona de stabilitate la debit variabil de combustibil.

### 3. Zona de stabilitate la curent de excitație și debit de motorină variabile

Pentru a menține frecvența constantă se modifică cu sarcina debitul de motorină la motorul Diesel, iar pentru a menține tensiunea la borne constantă se modifică curentul de excitație  $I_E$  și astfel se realizează și o zonă de stabilitate mult mai extinsă, așa cum se poate observa din figura 2.7.

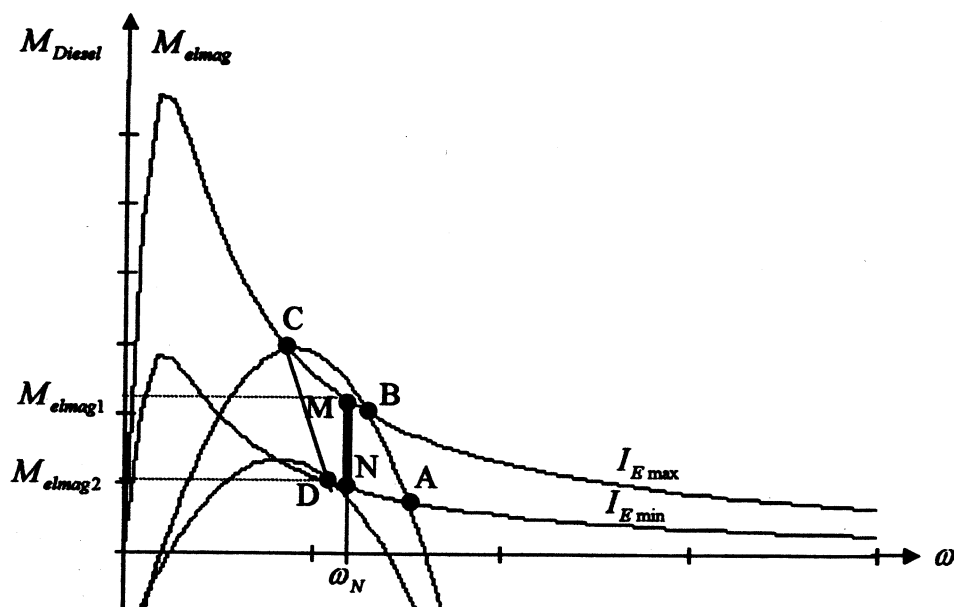


Fig.2.7.Zona de stabilitate la U și f constante.

Pentru o frecvență dată (figura 2.7) se obțin punctele extreme M și N care definesc limitele de putere ale grupului:

$$\begin{aligned} P_{\max} &= M_{\text{elmag}1} \omega_N \text{ (punctul M)} \\ P_{\min} &= M_{\text{elmag}2} \omega_N \text{ (punctul N)} \end{aligned} \quad (2.102)$$

Aceste limite depind de:

$I_{E \max}$  - curentul maxim prin înfășurarea de excitație

$I_{E \min}$  - curentul minim prin înfășurarea de excitație

$Q_{\text{motorin. max im}}$  - debitul maxim de motorină la motorul Diesel

$Q_{\text{motorin. min im}}$  - debitul minim de motorină la motorul Diesel

În concluzie, reglarea curentului prin excitația generatorului sincron și a turației grupului Diesel-generator sincron mărește zona de funcționare stabilă a sistemului.

Comportarea grupului cu reglatoare de tensiune și turație este prezentată în capitolul al IV-lea.

**Precizarea 1:** dependența frecvenței de rezistența de sarcină.

Cuplul electromagnetic al generatorului sincron fiind dat de relația (2.97) se poate scrie:

$$M_{\text{omag}} = \frac{3p_1 \omega (M_E I_E)^2 R}{R^2 + (\omega L)^2} = \frac{AR\omega}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (2.103)$$

la

$$A = 3p_1 (M_E I_E)^2 = \text{ct} \quad (2.104)$$

și cuplul motor dat de motorul Diesel (relația 2.100) fiind:

$$M_{\text{Diesel}} = -d\omega^2 + e\omega + f \quad (2.105)$$

la funcționarea în regim permanent, cuplurile fiind egale, rezultă:

$$\frac{AR\omega}{R^2 + (\omega L)^2} = -d\omega^2 + e\omega + f \quad (2.106)$$

sau

$$\frac{6,8273R\omega}{R^2 + (0,001\omega)^2} = -0,1\omega^2 + 45\omega + 857 \quad (2.107)$$

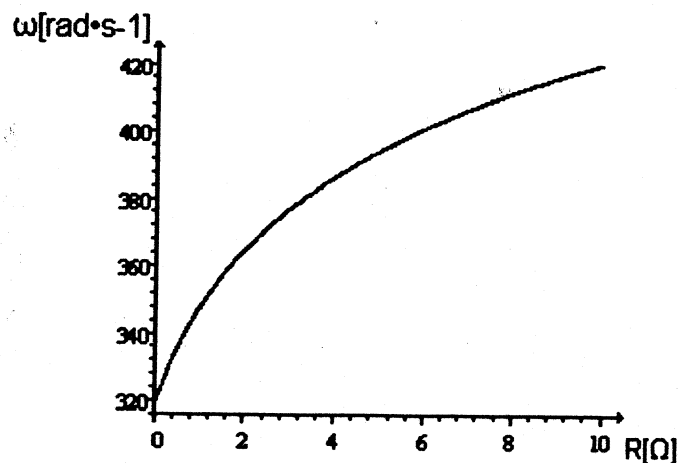


Fig.2.8. Dependența lui  $\omega$  de R.

Relațiile (2.106 ;2.107) definesc legătura dintre rezistența R conectată la bornele generatorului sincron și pulsația unghiulară  $\omega$  la:

- $I_E = \text{ct}$  ;
- debit de motorină constant.

La modificarea lui R de la valoarea  $R_N=0,318[\Omega]$  la valoarea  $R=10[\Omega]$ ,  $\omega$  se modifică de la 314 [rad/s] la 423[rad/s] adică frecvența se modifică de la 50[Hz] la 67[Hz].

Precizarea 2: dependența tensiunii de rezistența de sarcină.

La modificarea lui R și la  $I_E=ct$  și debit de motorină constant, tensiunea U la bornele generatorului sincron se modifică sensibil.

Pe baza celor precizate anterior  $\omega$  se modifică cu R așa ca în figura 2.8

Din relația (2.11)

$$U_{eE}^2 [U^2 + (X_q I)^2] = [X_d X_q I^2 + U^2]^2 \quad (2.108)$$

la  $U=RI$  (2.109)

rezultă:

$$U_{eE}^2 \left[ U^2 + \left( X \frac{U}{R} \right)^2 \right] = \left[ U^2 + \left( X \frac{U}{R} \right)^2 \right]^2 \quad (2.110)$$

sau

$$U_{eE}^2 [R^2 + X^2] R^2 = [R^2 + X^2]^2 U^2 \quad (2.111)$$

de unde:

$$U = \frac{U_{eE} R \sqrt{R^2 + X^2}}{R^2 + X^2} = \frac{U_{eE} R \sqrt{R^2 + (0,001\omega)^2}}{R^2 + (0,001\omega)^2} \quad (2.112)$$

sau numeric:

$$U = \frac{0,98\omega R \sqrt{R^2 + (0,001\omega)^2}}{R^2 + (0,001\omega)^2} \quad (2.113)$$

Folosind și relația (2.107) rezultă:

$$U = 0,249(-0,1\omega^2 + 45\omega - 857) \sqrt{R^2 + (0,001\omega)^2} \quad (2.114)$$

de unde se obține dependența:

$$U = f(\omega(R)) = F(R)$$

așa ca în figura 2.9:

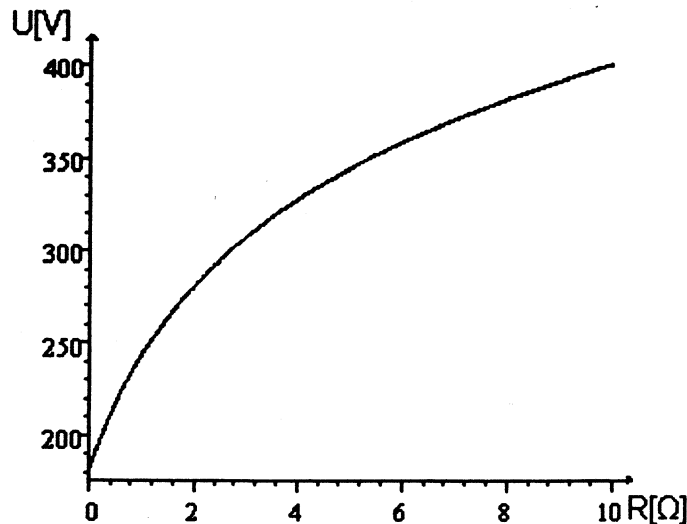


Fig.2.9. Dependența lui U de R.

Tensiunea crește de la 220[V] la 421[V] când generatorul se descarcă de la  $R=0.318[\Omega]$  la  $R=10[\Omega]$ , adică tensiunea s-a modificat cu 191[%].

#### **2.4. Ecuațiile reglatoarelor pe excitație și pe turatie**

Prin reglarea tensiunii și a frecvenței se realizează două probleme fundamentale în funcționarea grupului motor-generator:

1. menținerea tensiunii și a frecvenței între niște limite bine stabilite și deci funcționarea consumatorilor la tensiune și frecvență nominală;
2. mărirea zonei de stabilitate a sistemului la variații bruște ale sarcinii.

Menținerea frecvenței și deci a turatiei grupului între limitele stabilite se realizează prin reglarea debitului de motorină la motorul Diesel și deci cu o constantă de timp mecanică mult mai mare decât constantele electrice ale generatorului.

Desigur și constanta de timp a circuitului de excitație este mult mai mare decât constantele de timp ale înfășurărilor statorice sau a celor de amortizare.

Din acest motiv reglarea tensiunii la bornele generatorului sincron trebuie realizată mult mai rapid, deoarece la salturi ale sarcinii tensiunea se modifică sensibil și deranjează buna funcționare a celorlalți consumatori.

Reglatoarele folosite în practică sunt de tipul PI.

Regulatorul de excitație modifică tensiunea la bornele excitației până când tensiunea la bornele generatorului sincron revine în limitele stabilite.

Mărimea reglată este U (tensiunea la borne) și mărimea ce se modifică este  $U_E$  (tensiunea pe excitație).

Ecuția regulatorului este [B1]:

$$KT_i \frac{dE_r}{dt} + KE_r = T_i \frac{dU_E}{dt} \text{ și la } E_r = U^* - U = 380 - U \quad (2.115)$$

și relația devine:

$$T_i \frac{dU_E}{dt} = -KT_i \frac{dU}{dt} + K(380 - U) \quad (2.116)$$

sau

$$T_i \frac{dU_E}{dt} = - \left[ KT_i \frac{dU}{dt} + K(U - 380) \right] \quad (2.117)$$

tensiunea nominală la borne fiind de 380[V] ( $K=1+1000$ ;  $T_i=0.01+100s$ )

Regulatorul pe turaj modifică debitul de motorină la motorul Diesel, în așa fel încât frecvența tensiunii de alimentare să se mențină în limitele impuse în jurul valorii de 50[Hz].

Notând cu  $C$  – cuplul dat de motorul Diesel, ecuația regulatorului PI pe turaj este:

$$T_i \frac{dC}{dt} = - \left[ KT_i \frac{d\omega}{dt} + K(\omega - \omega_N) \right] \quad (2.118)$$

unde

$$\omega_N = 314[\text{rad/s}] \text{ la } f = 50[\text{Hz}]. \quad (2.119)$$

La un regulator PI cu  $T_i=3[s]$ ;  $K=10$  și  $f=50[\text{Hz}]$  ecuația de mai sus devine:

$$3 \frac{dC}{dt} = - \left[ 30 \frac{d\omega}{dt} + 10(\omega - 314) \right] \quad (2.120)$$

sau

$$\frac{dC}{dt} = 1036.6 - 10 \frac{d\omega}{dt} - 3.3\omega \quad (2.121)$$

asa cum se regăsește în sistemele (4,11), (4,12), (4,16).

La încărcările rezistive tensiunea la bornele generatorului sincron se scrie simplu:  
 $U=RI$  și deci :

$$U^2 = R^2 I^2 = R^2 [I_d^2 + I_q^2] - \text{în modelul ortogonal} \quad (2.122)$$

Tensiunea  $U_E$  pe excitație se reglează cu un regulator PI de ecuație:

$$T_i \frac{dU_E}{dt} = - \left[ KT_i \frac{dU^2}{dt} + K(U^2 - U_N^2) \right] \quad (2.123)$$

sau

$$T_i \frac{dU_E}{dt} = - \left[ KT_i \frac{d}{dt} (R^2 (I_d^2 + I_q^2)) + K(R^2 (I_d^2 + I_q^2) - U_N^2) \right] \quad (2.124)$$

La o încărcare rezistivă cu 25% din  $I_N$ , ecuația regulatorului pe excitație este:

$$\frac{dU_E}{dt} = 10 - 32 \left( I_d \frac{dI_d}{dt} + I_q \frac{dI_q}{dt} \right) - 160 (I_d^2 + I_q^2) \quad (2.125)$$

așa ca în relația (4.16).

**În concluzie**, reglatoarele pe excitație și pe turație largesc zona de stabilitate și mențin tensiunea și frecvența în limitele stabilite.

Soluția generatoarelor sincrone cu două înfășurări de excitație, originală din punct de vedere a autorului, completează gama generatoarelor sincrone navale. În regimuri tranzitorii acestea se comportă net superior în ceea ce privește amplitudinea și durata oscilațiilor la cuplarea și decuplarea consumatorilor de diverse puteri, așa cum se va arăta în capitolele următoare.

Ponderea înfășurării de excitație auxiliare modifică, așa cum se arată în paragraful 2.1.2, caracteristica exterioară în limite largi, fiecare variantă având avantaje și dezavantaje:

- caracteristica (2) din figura 2.1.1 fiind puternic căzătoare dar cu o comportare bună la scurtcircuit, înfășurarea de excitație auxiliară fiind conectată diferențial;
- caracteristicile (1,3) din figura 2.1.1 sunt mai puțin căzătoare dar periculoase la scurtcircuit;
- caracteristica (4) din figura 2.1.1 este crescătoare, înfășurarea de excitație auxiliară fiind conectată adițional;

### CAP. 3. DETERMINAREA PARAMETRILOR GENERATORULUI SINCRON CU DOUĂ ÎNFĂȘURĂRI DE EXCITAȚIE

Acest capitol este dedicat determinării parametrilor generatorului sincron cu două înfășurări de excitație; cunoașterea lor este absolut necesară pentru analiza și tratarea regimurilor tranzitorii. Parametrii generatorului sincron trebuie cunoscuți cât mai exact; de acuratețea determinării lor depinde corectitudinea rezultatelor simulărilor numerice.

Problematica abordării regimurilor tranzitorii impune folosirea modelului ortogonal sau modelul "d-q" pentru studiul generatorului sincron în regimuri tranzitorii [B1], [B5], [N2].

Spre deosebire de mașina asincronă la care datele de catalog furnizate de firmele constructoare sunt suficiente pentru determinarea parametrilor ce intervin în modelul d-q, la mașina sincronă datele de catalog sunt insuficiente pentru a deduce din ele parametrii modelului d-q. Este necesar ca mașinile sincrone să fie supuse unor teste suplimentare pentru determinarea tuturor parametrilor necesari în modelul ortogonal.

La modelul ortogonal cu axele d-q fixe față de câmpul magnetic învârtitor, înfășurările se rotesc în sensul câmpului învârtitor cu turația acestuia, iar față de stator se rotesc cu viteza unghiulară  $\omega_1$ . Prin înfășurări circulă curenți continui în regim staționar, iar în regim tranzitoriu acești curenți prezintă oscilații amortizate. Rotorul se rotește față de stator cu viteza unghiulară  $\omega_m$ .

În înfășurările statorice se vor induce tensiuni electromotoare prin:

a) **pulsație**, de formele

-  $L \frac{di}{dt}$  induse de curenții proprii și

-  $M \frac{di}{dt}$  induse de curenții din celelalte înfășurări coaxiale cuplate cu înfășurarea în cauză;

b) **rotație**, de forma  $\omega_1 MI$ , induse de fluxurile MI create de curenții din înfășurările perpendiculare pe înfășurarea în cauză.

Ecuatiile modelului ortogonal "d-q" pentru generaorul sincron cu o singură înfășurare de excitație se obțin scriind legea inducției electromagnetice pentru toate circuitele [B1], [B5]:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d + L_d \cdot p & -\omega \cdot L_q & M_{Ed} \cdot p & M_{Dd} \cdot p & -\omega \cdot M_{Qd} \\ \omega \cdot L_d & R_q + L_q \cdot p & \omega \cdot M_{Eq} & \omega \cdot M_{Dq} & M_{Qq} \cdot p \\ M_{Ed} \cdot p & 0 & R_E + L_E \cdot p & M_{ED} \cdot p & 0 \\ M_{Dd} \cdot p & 0 & M_{ED} \cdot p & R_D + L_D \cdot p & 0 \\ 0 & M_{Qq} \cdot p & 0 & 0 & R_Q + L_Q \cdot p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -I_d \\ -I_q \\ I_E \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

La generatorul sincron cu două înfășurări de excitație, ecuațiile corespunzătoare sunt:

- pentru înfășurarea de excitație principală:

$$U_{EP} = -M_{EPd} \frac{dI_d}{dt} + R_{EP} \cdot I_{EP} + L_{EP} \frac{dI_{EP}}{dt} + M_{EPA} \frac{dI_{EA}}{dt} + M_{EPD} \frac{dI_D}{dt} \quad (3.2)$$

- pentru înfășurarea de excitație auxiliară:

$$U_{EA} = -M_{EA d} \frac{dI_d}{dt} + R_{EA} \cdot I_{EA} + L_{EA} \frac{dI_{EA}}{dt} + M_{EPA} \frac{dI_{EP}}{dt} + M_{EAD} \frac{dI_D}{dt} \quad (3.3)$$



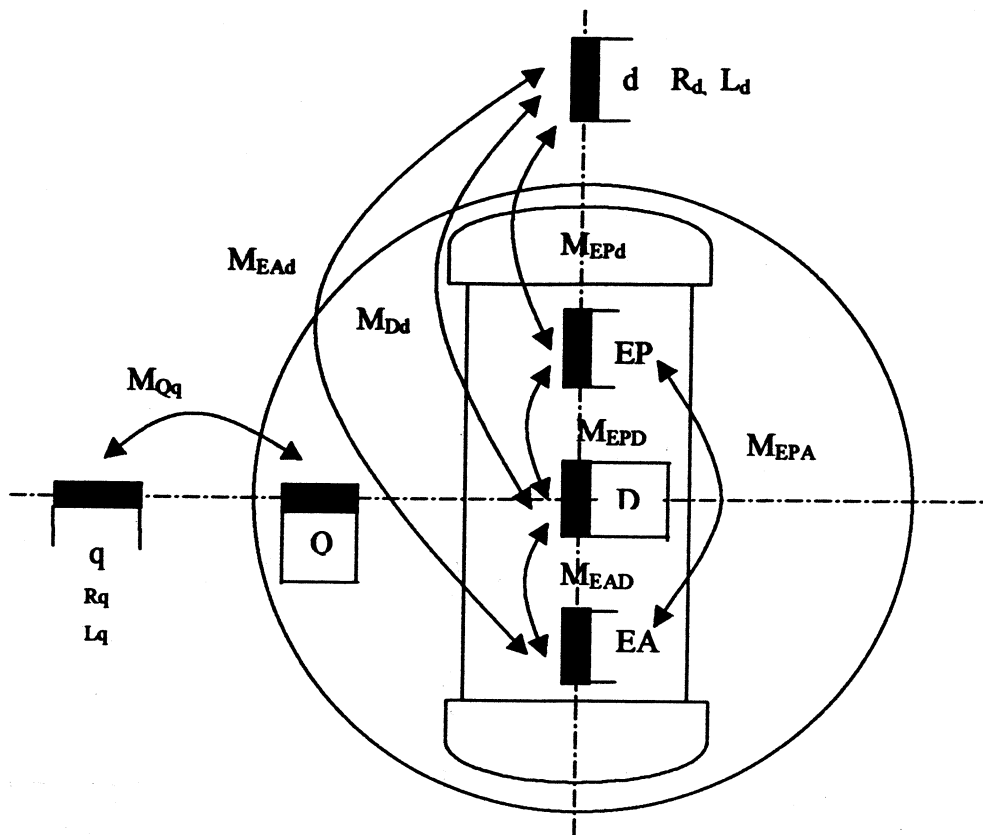


Fig. 3.1. Modelul ortogonal al generatorului sincron cu două înfășurări de excitație:

Pentru un generator sincron cu două înfășurări de excitație, ecuațiile modelului ortogonal se pot scrie sub următoarea formă matricială:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_{EP} \\ U_{EA} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d + L_d p & -\alpha L_q & M_{EP}^p & M_{EA}^p & M_D^p & -\alpha M_Q \\ \alpha L_d & R_q + L_q p & \alpha M_{EP} & \alpha M_{EA} & \alpha M_D & M_Q^p \\ M_{EPd}^p & 0 & R_{EP} + L_{EP} p & M_{EPA}^p & M_{EPD}^p & 0 \\ M_{EAd}^p & 0 & M_{EPA}^p & R_{EA} + L_{EA} p & M_{EAD}^p & 0 \\ M_D^p & 0 & M_{EPD}^p & M_{EAD}^p & R_D + L_D p & 0 \\ 0 & M_{Qq}^p & 0 & 0 & 0 & R_Q + L_Q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_{EP} \\ I_{EA} \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Dacă în regim staționar înfășurările de amortizare nu intervin în calculele performanțelor generatorului sincron, în regim tranzitoriu au o influență puternică asupra performanțelor grupului: tensiune (frecvență), curenți.

Determinarea parametrilor inductanțe, rezistențe, este absolut necesară în rezolvarea problemelor de simulare din capitolele următoare. Din acest motiv, în capitolul acesta se dezvoltă, pe larg, metoda de determinare a parametrilor generatorului sincron.

Inductanțele de cuplaj  $M_{ED}$ ,  $M_{Ed}$ ,  $M_{Qq}$ ,  $M_{Dd}$  și cele proprii  $L_d$ ,  $L_q$ ,  $L_E$  influențează puternic durata regimurilor tranzitorii. Valoarea cea mai mare o are inductanța proprie a înfășurării de excitație,  $L_E$ , și din acest motiv modificarea rapidă a curentului  $I_E$  prin excitația generatorului sincron este o problemă, uneori, dificilă.

Regulatorul de tensiune ce modifică tensiunea de excitație are un rol esențial, însă numai prin regulator nu se poate stabili rapid tensiunea la valoarea nominală în timpii scurți impuși de normele de registru naval.

De aceea, în cadrul lucrării, s-a propus un generator sincron cu două înfășurări de excitație, din care una este alimentată cu un curent direct proporțional cu valoarea curentului de sarcină.

În acest fel la creșterea bruscă a sarcinii la bornele generatorului sincron (I crește), prin excitația adițională serie se crează un flux de excitație ce readuce, împreună cu regulatorul de pe înfășurarea de excitație principală tensiunea la bornele generatorului sincron între limitele impuse.

Determinarea inductanțelor înfășurărilor este prezentată în continuare pentru un generator cu două înfășurări de excitație.

Generatorul sincron autonom antrenat de motorul Diesel analizat în prezenta lucrare, are două înfășurări de excitație: înfășurarea principală plus înfășurarea auxiliară :

- înfășurarea de excitație principală este conectată la o sursă de tensiune constantă  $U_E$  exterioară (de la acumulatori sau redresoare ) care poate fi reglată ;
- înfășurarea de excitație auxiliară este parcursă de un curent proporțional cu sarcina și face ca reglarea tensiunii  $U_E$  să fie în limite mai reduse față de cazul când aceasta ar lipsi.

Dacă în regim staționar cele două înfășurări se comportă ca o singură înfășurare (înfășurarea de excitație de la generatorul clasic), în regim tranzitoriu cele două înfășurări se comportă diferit.

Parametrii generatorului sunt cei corespunzători modelului ortogonal [B1,B5] și în acest capitol se au în vedere doar valorile nesaturate pentru parametrii (adică inductanțele L și M sunt constante și nu depind de sarcină).

### **3.1. Determinarea inductanțelor înfășurărilor generatorului sincron cu două excitatii propus de autor a fi folosit în sistemele electroenergetice navale**

Având în vedere rezultatele din [B<sub>1</sub>, B<sub>5</sub>] pentru calculul inductanțelor statorice proprii, din axa d ( $L_d$ ), respectiv din axa q ( $L_q$ ) se pot folosi relațiile:

-inductanța sincronă longitudinală:

$$L_d = \frac{U_N \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\theta_N) - \omega \cdot M_E \cdot I_E - R \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\theta_N + \varphi)}{-\omega \cdot I_N \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\theta_N + \varphi)} \quad (3.5)$$

-inductanța sincronă transversală:

$$L_q = \frac{U_N \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\theta_N) - R \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\theta_N + \varphi)}{\omega \cdot I_N \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\theta_N + \varphi)} \quad (3.6)$$

La funcționarea în gol (cu  $I=0$  și deci  $I_d = I_q = 0$ ) fluxul statoric este:

$$\Psi_{so\ model} = \frac{U_s}{\omega} \quad (3.7)$$

și având în vedere că:

$$\Psi_{so\ model} = I_d \cdot L_d + M_E \cdot I_{E0} = M_E \cdot I_{E0} \quad (3.8)$$

rezultă valoarea inductanței de cuplaj  $M_E$  dintre înfășurarea statorică din axa d și înfășurarea de excitație E, corespunzătoare tensiunii electromotoare induse (t.e.m) prin rotație:

$$M_{EP} = \frac{\psi_{s\text{ model}}}{I_{EP}} \quad (3.9)$$

Calculul unghiului de sarcină nominal are la bază valoarea cuplului nominal (mărime de catalog):

$$M_{elmgN} = \frac{P_N}{\Omega_N} \quad (3.10)$$

Cu relația cuplului electromagnetic nominal:

$$M_{elmgN} = \underbrace{\frac{3 \cdot p \cdot (L_d - L_q) \cdot U^2 \cdot \sin(2 \cdot \theta_N)}{2 \cdot \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q}}_{\text{cuplu sin cronreactiv}} + \underbrace{\frac{\sqrt{3} \cdot p \cdot M_E \cdot I_E \cdot U \cdot \sin(\theta_N)}{\omega \cdot L_d}}_{\text{cuplu sin cron datorat excitației}} \quad (3.11)$$

înlocuind pe  $L_d$  și  $L_q$  cu expresiile lor din (3.5) și (3.6) se obține:

$$L_d = \frac{U_N \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\theta_N) - \omega \cdot M_{EP} \cdot I_{EXECH} - R \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\theta_N + \varphi)}{-\omega \cdot I_N \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\theta_N + \varphi)} \quad (3.12)$$

sau 
$$X_d = \omega \cdot L_d \quad (3.13)$$

și 
$$L_q = \frac{U_N \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\theta_N) - R \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\theta_N + \varphi)}{\omega \cdot I_N \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\theta_N + \varphi)} \quad (3.14)$$

sau 
$$X_q = \omega \cdot L_q = 314 \cdot L_q \quad (3.15)$$

și înlocuind în relația cuplului electromagnetic pe  $L_d$  și  $L_q$ , cu  $X_d$  și  $X_q$ , se obține o relație de forma:

$$M_{elmgN} = \underbrace{\frac{3 \cdot p \cdot (X_d - X_q) \cdot U^2 \cdot \sin(2 \cdot \theta_N)}{2 \cdot \omega \cdot X_d \cdot X_q}}_{\text{cuplu sin cronreactiv}} + \underbrace{\frac{\sqrt{3} \cdot p \cdot M_E \cdot I_E \cdot U \cdot \sin(\theta_N)}{X_d}}_{\text{cuplu sin cron datorat excitației}} \quad (3.16)$$

Se obține, astfel, un sistem de trei ecuații în necunoscutele  $X_d, X_q, \theta$ .

Prin urmare, din funcționarea în regim nominal se cunosc:

- $L_d$ -inductanța proprie înfășurării statorice din axa d;
- $L_q$ -inductanța proprie înfășurării statorice din axa q;

### 3.2 Determinarea inductanțelor proprii ale înfășurărilor de excitație

Se va considera un generator sincron cu două înfășurări de excitație, una principală și una auxiliară. Pentru generatorul sincron cu o singură înfășurare se va neglija cea de-a doua înfășurare.

Înfășurările de excitație având bornele accesibile, determinarea inductanțelor proprii se face printr-o probă de stingere sau conectare a curentului din circuitul respectivei înfășurări. În cazul conectării înfășurării la o sursă de tensiune continuă, legea inducției electromagnetice se scrie sub forma:

$$U = R \cdot i_1 + L \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (3.17)$$

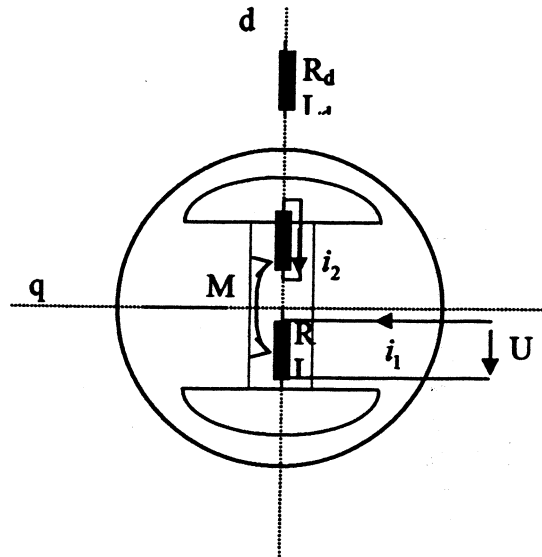


Fig.3.2. Determinarea inductanțelor proprii.

Prin integrarea ecuației 3.17 se obține:

$$R \int_0^{\infty} i_1(t) dt + L \cdot i_1 \Big|_0^{\infty} + M \cdot i_2 \Big|_0^{\infty} = U \cdot t \quad (3.18)$$

sau

$$R \int_0^{\infty} i_1(t) dt + L \cdot [i_1(\infty) - i_1(0)] + M \cdot [i_2(\infty) - i_2(0)] = U \cdot t \quad (3.19)$$

și deoarece  $i_1(0) = 0; i_2(0) = i_2(\infty) = 0$ , rezultă: 
$$L = \frac{U \cdot t - R \int_0^{\infty} i_1(t) dt}{i_1(\infty)} \quad (3.20)$$

Cum integrala  $\int_0^{\infty} i_1(t) dt$  este cunoscută din oscilografierea curentului  $i_1(t)$  - figura 3.2.1- inductanța  $L$  este perfect determinată.

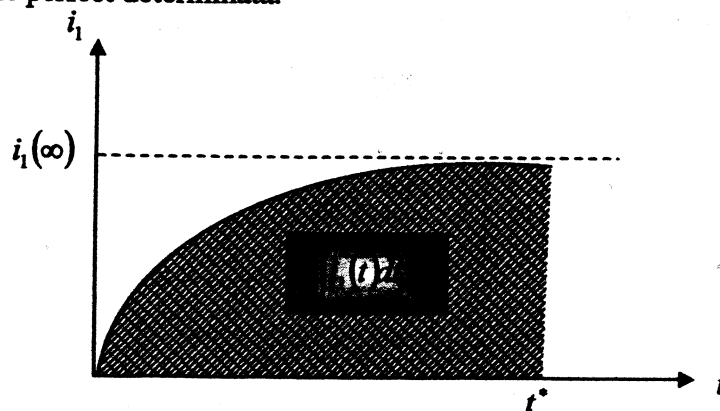


Fig.3.2.1. Variația curentului  $i_1(t)$ .

### 3.3 Determinarea inductanțelor mutuale

Inductanțele mutuale se determină din probe în axele d și q.

#### 3.3.1. Probele din axa d

Metodele propuse de autor pentru determinarea parametrilor generatorului sincron cu două înfășurări de excitație sunt originale și au stat la baza determinărilor experimentale ale parametrilor.

Se execută montajul din figura 3.3, și se alimentează faza "A" cu tensiune sinusoidală la frecvența rețelei.

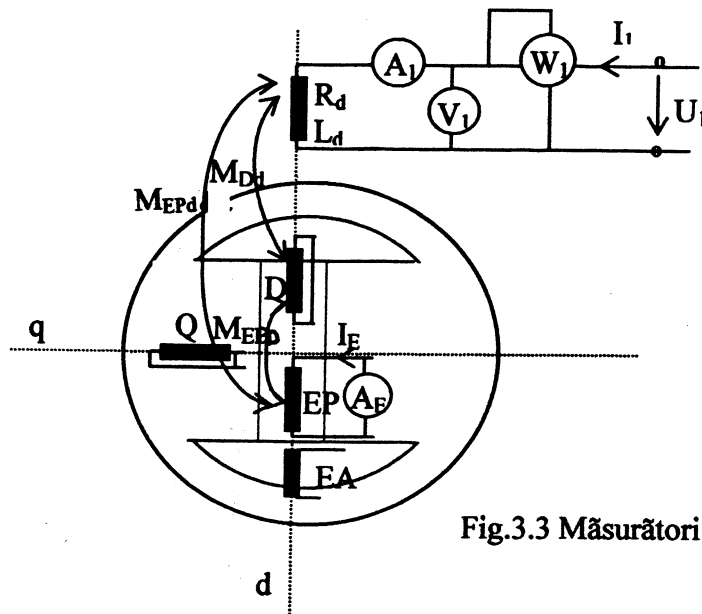


Fig.3.3 Măsurători în axa longitudinală.

În axa d probele se execută în variantele:

- cu circuitele de excitație în scurtcircuit și înfășurarea statorică alimentată;
- cu circuitele de excitație unul în gol și celălalt alimentat la tensiunea U;
- cu circuitele de excitație în gol;
- cu unul din circuitele de excitație în scurtcircuit și înfășurarea statorică alimentată.

#### a) Circuitele de excitație în scurtcircuit

Schema electrică este dată în figura 3.4:

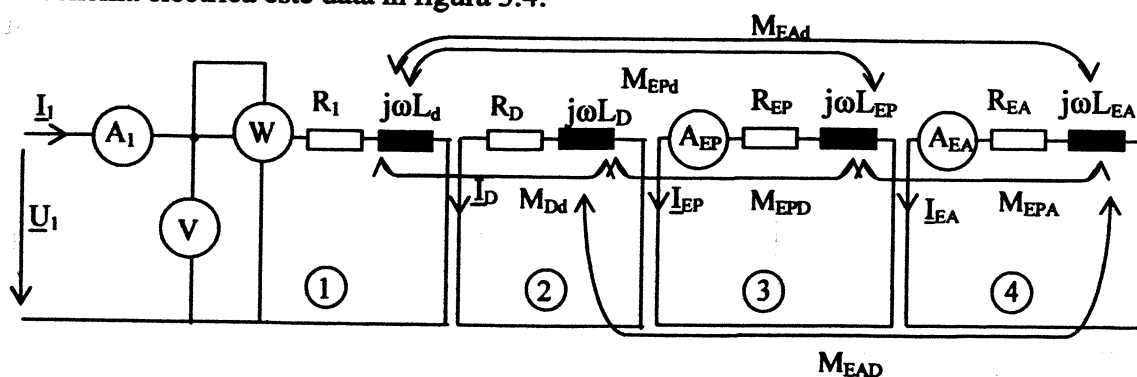


Fig.3.4. Schema electrică la înfășurările de excitație în scurtcircuit.

Legea inducției electromagnetice aplicată la cele 4 circuite din figură conduce la:

$$\begin{cases} [1] \underline{U}_1 = \underline{I}_1(R_1 + j\omega L_d) - j\omega M_{Dd} \cdot \underline{I}_D - j\omega M_{EPd} \cdot \underline{I}_{EP} - j\omega M_{EAd} \cdot \underline{I}_{EA} \\ [2] 0 = (R_D + j\omega L_D) \underline{I}_D + j\omega M_{EPD} \cdot \underline{I}_{EP} + j\omega M_{EAD} \cdot \underline{I}_{EA} - j\omega M_{Dd} \cdot \underline{I}_1 \\ [3] 0 = (R_{EP} + j\omega L_{EP}) \underline{I}_{EP} + j\omega M_{EPD} \cdot \underline{I}_D + j\omega M_{EPA} \cdot \underline{I}_{EA} - j\omega M_{EPd} \cdot \underline{I}_1 \\ [4] 0 = (R_{EA} + j\omega L_{EA}) \underline{I}_{EA} + j\omega M_{EPA} \cdot \underline{I}_{EP} + j\omega M_{EAD} \cdot \underline{I}_D - j\omega M_{EAd} \cdot \underline{I}_1 \end{cases} \quad (3.21)$$

Se elimină din cele 4 ecuații ale sistemului, necunoscuta  $I_D$  – curentul prin înfășurarea de amortizare din axa q - și se obține:

$$\begin{cases} [1] \underline{U}_1(R_D + j\omega L_D) = \underline{I}_1[R_1 R_D + \omega^2(M_{Dd}^2 - L_D L_d) + j\omega(R_D L_d + R_1 L_D)] + \\ + \underline{I}_{EP}[\omega^2(L_D \cdot M_{EPd} - M_{EPD} \cdot M_{Dd}) - j\omega M_{EPd} \cdot R_D] + \\ + \underline{I}_{EA}[\omega^2(L_D \cdot M_{EAd} - M_{EAD} \cdot M_{Dd}) - j\omega \cdot M_{EAd} \cdot R_D] \\ [3] 0 = \underline{I}_1[\omega^2(-M_{EPD} \cdot M_{Dd} + M_{EPd} \cdot L_D) - j\omega M_{EPd} \cdot R_D] + \\ + \underline{I}_{EP}[R_{EP} \cdot R_D + \omega^2(M_{EPD}^2 - L_{EP} \cdot L_D) + j\omega(R_D \cdot L_{EP} + R_{EP} \cdot L_D)] + \\ + \underline{I}_{EA}[\omega^2(M_{EAD} \cdot M_{EPD} - M_{EPA} \cdot L_D) + j\omega R_D \cdot M_{EPA}] \\ [4] 0 = \underline{I}_1[\omega^2(M_{EAd} \cdot L_D - M_{EAD} \cdot M_{Dd}) - j\omega M_{EAd} \cdot R_D] + \\ + \underline{I}_{EP}[\omega^2(M_{EAD} \cdot M_{EPD} - M_{EPA} \cdot L_D) + j\omega R_D \cdot M_{EPA}] + \\ + \underline{I}_{EA}[\omega^2(M_{EAD}^2 - L_{EA} \cdot L_D) + R_{EA} \cdot R_D + j\omega(R_D \cdot L_{EA} + R_{EA} \cdot L_D)] \end{cases} \quad (3.22)$$

Aceste trei ecuații în scriere complexă pot genera șase ecuații în real, însă pentru a fi aplicabile trebuie obligatoriu a se cunoaște faza curenților din înfășurarea principală  $\underline{I}_{EA}$  și  $\underline{I}_{EP}$ , din faza auxiliară, față de fazorul  $\underline{I}_1$ . Această condiție se poate realiza cu o aparatură adecvată ce măsoară și defazajul pentru a cunoaște defazajul între  $\underline{I}_{EA}$  și  $\underline{I}_1$ , respectiv între  $\underline{I}_{EP}$  și  $\underline{I}_1$ .

Se poate determina o dependență între curenții  $\underline{I}_{EP}$  și  $\underline{I}_1$  și astfel se elimină necesitatea măsurării defazajului. În acest sens din ecuațiile 3.21 s-a eliminat curentul  $\underline{I}_{EA}$  și prin ridicare la pătrat, s-a obținut o dependență între curentul  $\underline{I}_{EP}$  și  $\underline{I}_1$ . S-au folosit notațiile:

$$\begin{aligned} X_D &= \omega L_D; \\ X_d &= \omega L_d; \\ X_{Dd} &= \omega M_{Dd}; \\ X_{EPd} &= \omega L_{EPd}; \\ X_{EPD} &= \omega L_{EPD}; \\ X_{EAd} &= \omega L_{EAd}; \\ X_{EAD} &= \omega M_{EAD}; \\ X_{EPA} &= \omega M_{EPA}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Inductanțele mutuale corespunzătoare t.e.m. induse prin pulsație sunt:

- $M_{Dd}$  -între înfășurarea de amortizare D și înfășurarea statorică d;
- $M_{EPd}$  -între înfășurarea de excitație principală și înfășurarea statorică d;
- $M_{EAd}$  -între înfășurarea de excitație auxiliară și înfășurarea statorică d;
- $M_{EPD}$  -între înfășurarea de excitație principală și înfășurarea de amortizare D;
- $M_{EAD}$  -între înfășurarea de excitație auxiliară și înfășurarea de amortizare D;
- $M_{EPA}$  -între înfășurarea de excitație principală și înfășurarea de excitație auxiliară.

Se obține astfel o dependență între curenții  $I_1$  și  $I_{EP}$  de forma:

$$\begin{aligned}
 I_1^2 & \left\{ [X_{EPd} \cdot X_D (X_{EA} X_D - X_{EAd}^2) + X_{EAd} X_{EAD} X_{EPD} X_D - \right. \\
 & - X_{EAD} \cdot X_{EPA} \cdot X_D^2 - X_{EPD} X_{Dd} X_{EA} X_D + X_{EAD} X_{Dd} X_{EPA} X_D + X_{EAd} \cdot X_{EPA} \cdot R_D^2 - \\
 & X_{EPd} X_D \cdot R_{EA} \cdot R_D + X_{EPD} \cdot X_{Dd} \cdot R_{EA} R_D - X_{EPd} X_{EA} \cdot R_D^2 \\
 & - X - X_{EPd} X_{EA} \cdot R_{DEPD} \cdot X_D R_D \cdot R_{EA}]^2 + [X_{EPd} \cdot R_D^2 R_{EA} + X_{EPd} (X_{EAD}^2 - X_{EA} \cdot X_D) R_D - \\
 & - X_{EPd} \cdot X_{EA} \cdot X_D \cdot R_D - X_{EPd} R_{EA} \cdot X_D^2 + X_{EPD} \cdot X_{Dd} \cdot X_{EA} R_D + X_{EPD} \cdot X_{Dd} \cdot X_D R_{EA} + \\
 & + X_{EPA} \cdot X_{EAd} \cdot X_D R_D - X_{EAD} \cdot X_{EPD} \cdot X_{EAd} R_D + X_{EAd} \cdot X_{EPA} \cdot X_D R_D - X_{EAD} \cdot X_{Dd} \cdot X_{EPA} R_D]^2 \} = \\
 & = I_{EP}^2 \left\{ [2X_{EAd} \cdot X_{EPD} \cdot X_{EPA} \cdot X_D + R_{EA} \cdot R_D (X_{EPD}^2 - X_{EP} \cdot X_D) - X_{EPD}^2 \cdot X_{EA} \cdot X_D - \right. \\
 & - X_{EAd}^2 \cdot X_{EP} \cdot X_D + X_D^2 (X_{EP} X_{EA} - X_{EPA}^2) + R_D^2 (X_{EPA}^2 - X_{EP} \cdot X_{EA}) - X_{EP} \cdot X_D \cdot R_{EA} \cdot R_D - \\
 & - X_{EA} X_D \cdot R_{EP} \cdot R_D - X_D^2 \cdot R_{EP} \cdot R_{EA}]^2 + [X_{EP} (X_{EAD}^2 - X_D \cdot X_{EA}) \cdot R_D + X_D \cdot R_{EA} \cdot \\
 & (X_{EPD}^2 - X_{EP} \cdot X_D) + X_{EA} \cdot R_D (X_{EPD}^2 - X_{EP} \cdot X_D) + X_{EP} \cdot R_D \cdot R_{EA} \cdot R_D + X_D \cdot R_{EP} \\
 & (X_{EAD}^2 - X_{EA} \cdot X_D) + X_D \cdot R_{EP} \cdot R_{EA} \cdot R_D - 2 \cdot X_{EAd} \cdot X_{EPD} \cdot X_{EPA} \cdot R_D + 2X_{EPA}^2 \cdot X_D \cdot R_D]^2 \} \\
 & \qquad \qquad \qquad (3.24)
 \end{aligned}$$

Relația de mai sus este greu accesibilă chiar și pentru calculatoarele performante și din acest motiv se va folosi doar în faza finală la validarea valorilor inductanțelor deduse din probe mai simple.

b) Un circuit de excitație este alimentat și celălalt în scurtcircuit.

Schema electrică de calcul este dată în figura 3.5:

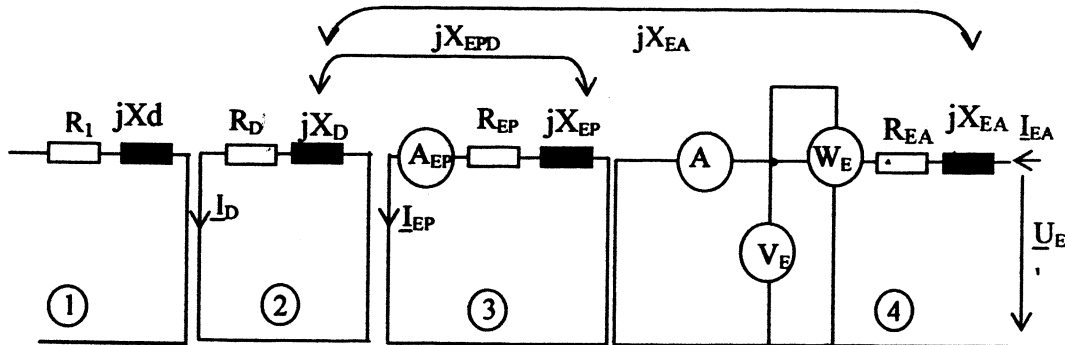


Fig.3.5.Schema electrică cu înfășurarea de excitație auxiliară alimentată.



Relațiile de calcul pentru circuitele [2], [3] și [4] sunt :

$$\begin{cases} [2] 0 = (R_D + jX_D)\underline{I}_D + jX_{EPD} \cdot \underline{I}_{EP} - jX_{EAD} \cdot \underline{I}_{EA} \\ [3] 0 = (R_{EP} + jX_{EP})\underline{I}_{EP} + jX_{EPD} \cdot \underline{I}_D - jX_{EPA} \cdot \underline{I}_{EA} \\ [4] \underline{U}_{E1} = \underline{I}_{EA}(R_{EA} + jX_{EA}) - jX_{EAD} \cdot \underline{I}_D - jX_{EPA} \cdot \underline{I}_{EP} \end{cases} \quad (3.25)$$

de unde se obțin condițiile :

- din măsurarea curenților :

$$\left( \frac{\underline{I}_{EA}}{\underline{I}_{EP}} \right)^2 = \frac{[R_D \cdot R_{EP} + X_{EPD}^2 - X_{EP} \cdot X_D]^2 + [X_{EP} \cdot R_D + X_D \cdot R_{EP}]^2}{[X_{EPD} \cdot X_{EAD} - X_{EPA} \cdot X_D]^2 + X_{EPA}^2 \cdot R_D^2} \quad (3.26)$$

- din măsurarea puterii active :

$$R_{ei} = \frac{R_{EA} \cdot R_{EP}^2 \cdot R_D^2 + X_{EPD}^2 \cdot R_{EA}^2 \cdot R_D + X_D^2 \cdot R_{EP}^2 \cdot R_{EA} + 2X_{EPD}^2 \cdot R_{EA} \cdot R_{EP} \cdot R_D + X_{EAD}^2 \cdot R_{EP}^2 \cdot R_D + [R_{EP} \cdot R_D + X_{EPA}^2 \cdot R_D^2 \cdot R_{EP} + X_{EPD}^2 \cdot R_{EA}^2 \cdot R_{EP} + X_{EPA}^2 \cdot X_{EPD}^2 \cdot R_D - 2X_{EPD}^2 \cdot X_{EP} \cdot X_D \cdot R_{EA} + X_{EPD}^2 - X_{EP} \cdot X_D]^2 + X_{EP}^2 \cdot X_D^2 \cdot R_{EA} + X_{EAD}^2 \cdot X_{EP}^2 \cdot R_D + X_{EPA}^2 \cdot X_D^2 \cdot R_{EP} - 2X_{EPD} \cdot X_{EPA} \cdot X_{EAD} \cdot X_{EP} \cdot R_D - 2X_{EPD} \cdot X_{EPA} \cdot X_{EAD} \cdot X_D \cdot R_{EP} + (X_{EP} \cdot R_D + X_D \cdot R_{EP})^2}{(3.27)}$$

din raportul  $\underline{U}_{E1} / \underline{I}_{EA} = Z_1$

$$Z_1^2 = \frac{[R_{EA} \cdot R_D \cdot R_{EP} + X_{EPD}^2 \cdot R_{EA} + X_{EPA}^2 \cdot R_D + X_{EAD}^2 \cdot R_{EP} - X_{EP} \cdot X_D \cdot R_{EA} - X_{EP} \cdot X_{EA} \cdot R_D - X_D \cdot X_{EA} \cdot R_{EP}]^2 + [X_{EP} \cdot R_D \cdot R_{EA} + X_D \cdot R_{EP} \cdot R_{EA} + X_{EA} \cdot R_{EP} \cdot R_D + X_{EPD}^2 \cdot X_{EA} + X_{EAD}^2 \cdot X_{EP} + X_{EPD}^2 - X_{EP} \cdot X_D]^2 + X_{EPA}^2 \cdot X_D - X_{EP} \cdot X_D \cdot X_{EA} - 2X_{EPD} \cdot X_{EPA} \cdot X_{EAD}]^2}{+(X_{EP} \cdot R_D + X_D \cdot R_{EP})^2} \quad (3.28)$$



c) Un circuit de excitație este alimentat și celălalt în gol

Prin deschiderea circuitului de excitație principal se obține schema electrică din figura 3.6:

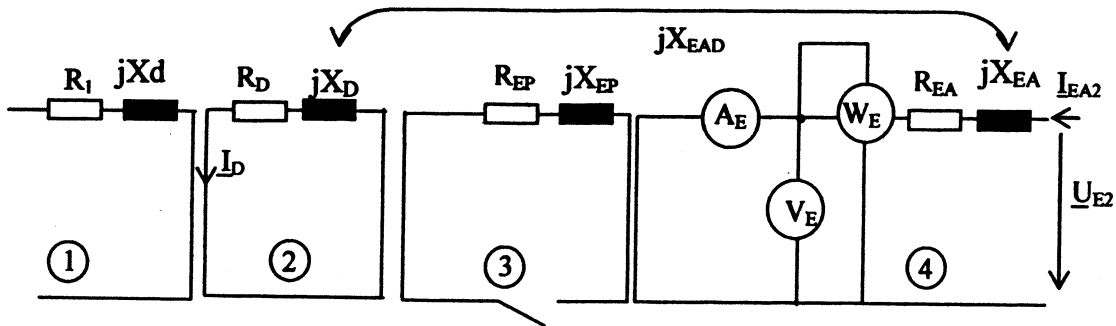


Fig.3.6.Schema electrică cu înfășurarea de excitație principală în gol.

Pentru circuitele [2] și [4] se pot scrie ecuațiile :

$$\begin{cases} [2] 0 = (R_D + jX_D)I_D - jX_{EAD} \cdot I_{EA2} \\ [4] U_{E2} = I_{EA2}(R_{EA} + jX_{EA}) - jX_{EAD} \cdot I_D \end{cases} \quad (3.29)$$

de unde se obțin relațiile :

din impedanța  $Z_2 = U_{E2} / I_{EA2}$  sau  $(Z_2)^2 = (U_{E2} / I_{EA2})^2$  :

$$(Z_2)^2 = \left( R_{EA} + \frac{X_{EAD}^2 \cdot R_D}{R_D^2 + X_D^2} \right)^2 + \left( X_{EA} - \frac{X_{EAD} \cdot X_D}{R_D^2 + X_D^2} \right)^2 \quad (3.30)$$

din măsurarea puterii active  $R_{e2} = P_{WE} / (I_{EA2})^2$  :

$$R_{e2} = R_{EA} + \frac{X_{EAD}^2 \cdot R_D}{R_D^2 + X_D^2} \quad (3.31)$$

Au rezultat astfel 5 ecuații (3.26,3.27,3.28,3.30,3.31) de unde se pot calcula necunoscutele:  $R_D, X_D, X_{EPD}, X_{EAD}, X_{EPA}$ .

d) Înfășurarea statorică este alimentată și înfășurările de excitație sunt în gol.

Înfășurările de excitație sunt în gol, voltmetrele  $V_{E1}$  și  $V_{E2}$  indicând tensiunile induse în aceste înfășurări când se alimentează faza statorică ( figura 3.7).

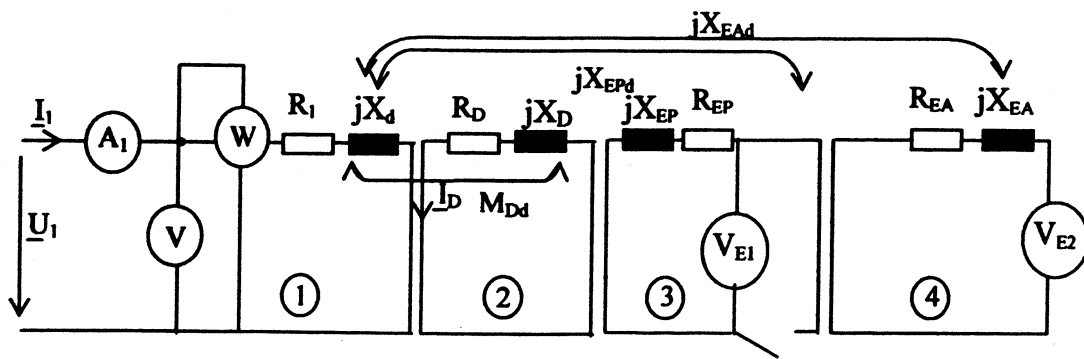


Fig.3.7.Schema electrică cu înfășurările de excitație în gol.

Pentru circuitele [1] , [2], [3] și [4] se pot scrie relațiile:

$$\begin{cases} [1] \underline{U}_1 = \underline{I}_1 (R_1 + jX_d) - jX_{Dd} \cdot \underline{I}_D \\ [2] 0 = \underline{I}_D (R_D + jX_D) - jX_{Dd} \cdot \underline{I}_1 \\ [3] U_{E1} = X_{EPd} \cdot I_1 \\ [4] U_{E2} = X_{EAd} \cdot I_1 \end{cases} \quad (3.32)$$

de unde rezultă reactanțele  $X_{EPd}$  și  $X_{EAd}$  :

$$\boxed{X_{EPd} = U_{E1} / I_1} \quad (3.33)$$

$$\boxed{X_{EAd} = U_{E2} / I_1} \quad (3.34)$$

Din măsurarea puterii active :  $P_{w1}$  se obține  $R_{e3} = P_{w1} / (I_1)^2$  :

$$\boxed{R_{e3} = R_1 + \frac{X_{Dd}^2 \cdot R_D}{R_D^2 + X_D^2}} \quad (3.35)$$

și astfel se poate determina și reactanța  $X_{Dd}$ .

În acest mod se pot determina toți parametrii specifici axei d.

### 3.3.2 Probele din axa q

În axa q probele se execută în variantele:

- o fază statorică este alimentată, celelalte faze statorice sunt în gol ;
- o fază statorică este alimentată, celelalte faze statorice sunt scurtcircuitate.

Se folosește montajul din figura 3.8 și se alimentează faza "A" de la rețea prin intermediul unui autotransformator.

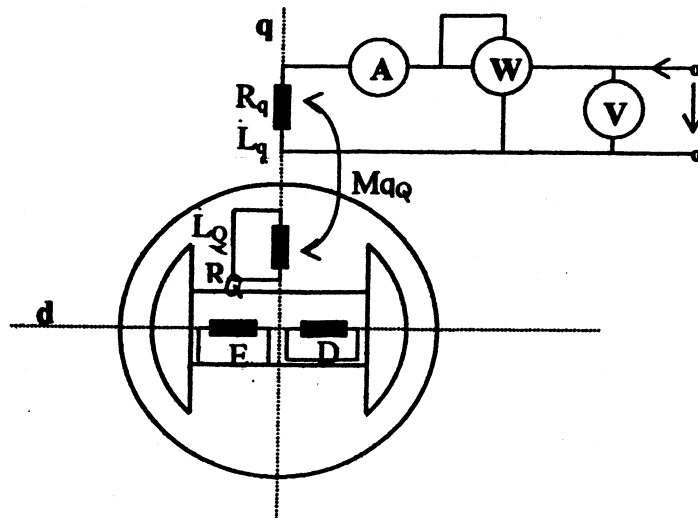


Fig.3.8 Măsurători în axa transversală.

a) alimentarea unei faze statorice, celelalte faze fiind în gol

În această variantă schema electrică este dată în figura 3.9.

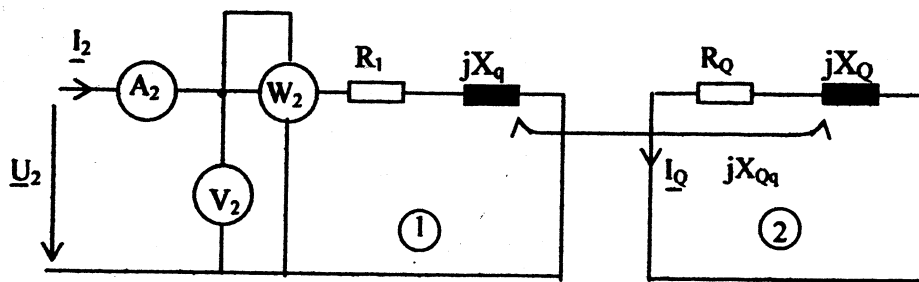


Fig.3.9.Schema electrică la încercări în axa q.

Pentru cele două circuite se pot scrie relațiile:

$$\begin{cases} [1] \underline{U}_2 = \underline{I}_2 (R_1 + jX_q) - jX_{Qq} \cdot \underline{I}_Q \\ [2] 0 = \underline{I}_Q (R_Q + jX_Q) - jX_{Qq} \cdot \underline{I}_2 \end{cases} \quad (3.36)$$

Din puterea activă se determină rezistența echivalentă  $R_2 = P_{w2} / I_2^2$ :

$$R_2 = R_1 + \frac{R_Q \cdot X_{Qq}^2}{R_Q^2 + X_Q^2} \quad (3.37)$$

și reactanța echivalentă:

$$X_2 = X_q - \frac{X_Q \cdot X_{Qq}^2}{R_Q^2 + X_Q^2} \quad (3.38)$$

b) alimentarea unei faze statorice, celelalte faze fiind în scurtcircuit

Fazele B și C cu parametrii  $R_B = R_C = R_A = R_q$  și  $L_B = L_C = L_A = L_q$  sunt scurtcircuitate, așa ca în figura 3.10.

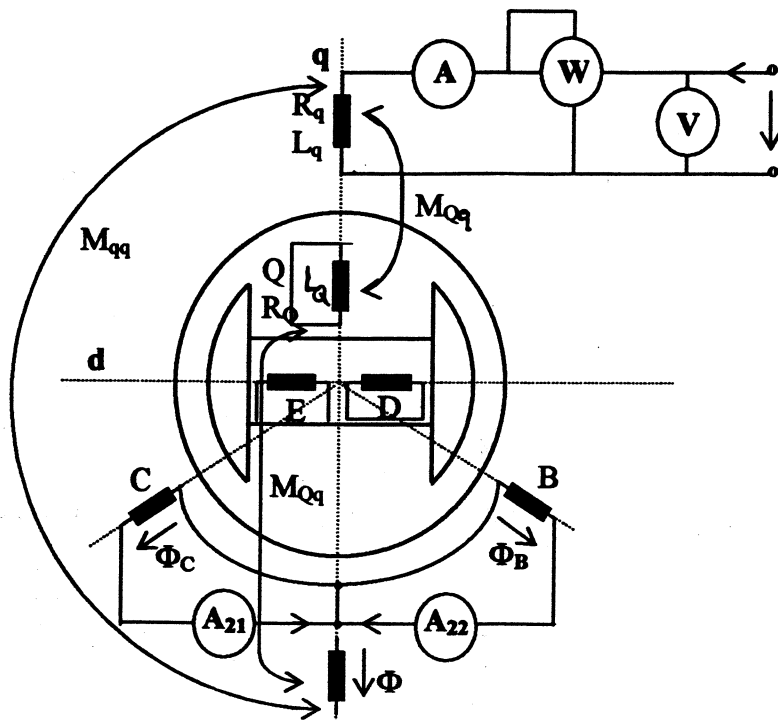


Fig.3.10.Schema electrică de stabilire a parametrilor după axa transversală.

Ele se pot echivala cu înfășurarea echivalentă trei (notată în figură cu ÎNF.ECH trei), aceasta din punct de vedere al fluxului rezultat care-l creează cele două înfășurări B și C.

Deoarece proiecția sumei  $\Phi_B + \Phi_C$  pe axa q (axa fazei A) este:

$$\Phi = L_q I_2 \quad (3.39)$$

(unde  $I_2 = I_{21} = I_{22}$ ), fiindcă:

$$\Phi = \Phi_B \cos 60^\circ + \Phi_C \cos 60^\circ = \Phi \frac{1}{2} + \Phi \frac{1}{2} = \Phi \quad (3.40)$$

( $\Phi_B = \Phi_C = \Phi$ ) și echivalând puterile active:

$$R_q I_{21}^2 + R_q I_{22}^2 = (R_q + R_q) I_2^2 = 2R_q I_2^2, \quad (3.41)$$

parametrii înfășurării echivalente trei sunt :  $L_q$  și  $2R_q$ , așa cum intervin în figura 3.11.

Inductanța mutuală între faza „ A” și înfășurarea echivalentă trei, după axa q, notată  $M_{qq}$  în figură nu este parametru al modelului d-q și deci se elimină din sistem.

La scurtcircuitarea fazelor nealimentate (figura 3.10 ) schema electrică echivalentă este dată în figura 3.11.

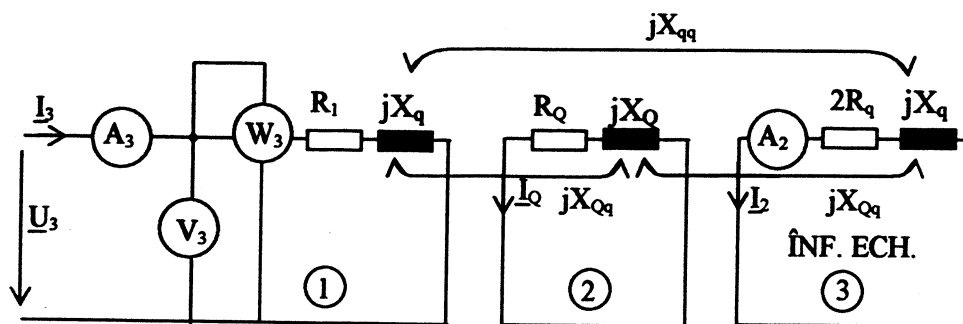


Fig.3.11. Schema electrică în cazul a două faze statorice scurtcircuitate.

Pentru cele trei circuite se pot scrie ecuațiile :

$$\begin{cases} [1] \underline{U}_3 = I_3 (R_1 + jX_q) - jX_{q\sigma} \cdot I_2 - jX_{qq} \cdot I_2 \\ [2] 0 = (R_q + jX_q) \cdot I_2 + jX_{q\sigma} \cdot I_2 - jX_{q\sigma} \cdot I_3 \\ [3] 0 = (2R_q + jX_q) I_2 + jX_{q\sigma} I_2 - jX_{qq} I_3 \end{cases} \quad (3.42)$$

de unde rezultă :

$$\left( \frac{I_3}{I_2} \right)^2 = \frac{[2R_q \cdot R_q + X_{q\sigma}^2 - X_q \cdot X_q]^2 + [X_q \cdot R_q + X_q \cdot 2R_q]^2}{[X_{q\sigma}^2 - X_{qq} \cdot X_q]^2 + X_{qq}^2 \cdot R_q^2} \quad (3.43)$$

și

$$\left( \frac{U_3}{I_3} \right)^2 = \frac{[2 \cdot R_1^2 \cdot R_q + 3R_1 \cdot X_{q\sigma}^2 + X_{qq}^2 \cdot R_q - 3X_q X_{q\sigma} \cdot R_q - X_q^2 \cdot R_q]^2 + [3X_q \cdot R_q \cdot R_q + 2X_{q\sigma} \cdot R_q^2 + 2X_{q\sigma}^2 \cdot X_q + X_{qq}^2 \cdot X_{q\sigma} - X_q^2 \cdot X_{q\sigma} - 2X_{q\sigma}^2 \cdot X_{qq}]^2}{[2R_q \cdot R_q + X_{q\sigma}^2 - X_q \cdot X_q]^2 + [X_q \cdot R_q + 2X_{q\sigma} \cdot R_q]^2} \quad (3.44)$$

Relațiile 3.41,3.42,3.43,3.44 permit determinarea reactanțelor:  $R_q, X_q, X_{q\sigma}$  și  $X_{qq}$ .

### 3.4. Rezultate experimentale la generatorul sincron naval de 455[kVA]

Datele nominale ale generatorului sincron sunt:

$$S_N = 455[\text{KVA}]$$

$$P_N = 364[\text{KW}]$$

$$\cos \varphi_N = 0.8; (\varphi_N = 36.85^\circ; \varphi_N = 0.6435[\text{rad}])$$

$$n_N = 1500[\text{rot/min}] \quad (p = 2)$$

$$U_N = 400[\text{V}]; (U_{N\text{max}} = 400/\sqrt{3}[\text{V}])$$

$$I_N = 658[\text{A}]$$

$$f_N = 50[\text{Hz}]$$

$$I_{\text{ex}} = 2.98/6[\text{A}]$$

$$U_{\text{ex}} = 40.0/17.2[\text{V}]$$

$$J = 58[\text{Kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$R = 0.015[\Omega]$$

$$R_E = 10.6/27.7[\Omega]; (R_{EP} = 10.6[\Omega]; R_{EA} = 27.7[\Omega])$$

Generatorul sincron este prevăzut cu două înfășurări de excitație:

-înfășurarea de excitație principală cu  $R_{E1} = 10.6[\Omega]$ ;  $I_{EP} = 2,98 [\text{A}]$ ;

-înfășurarea de excitație auxiliară cu  $R_{E2} = 27.7[\Omega]$ ;  $I_{EA} = 6 [\text{A}]$ .

#### PROBE ÎN AXA d

Înfășurarea de excitație auxiliară este alimentată ( $I_{EA}$ ) și cea principală este în scurtcircuit ( $I_{EP}$ ) (figura 3.2) și se obține:

$$\frac{I_{EA}}{I_{EP}} = 0,057 \quad (3.45)$$

rezultând ecuația:

$$0,00325 = \frac{[R_D \cdot R_{EP} + X_{EPD}^2 - X_{EP} \cdot X_D]^2 + [X_{EP} \cdot R_D + X_D \cdot R_{EP}]^2}{[X_{EPD} \cdot X_{EAD} - X_{EPA} \cdot X_D]^2 + X_{EPA}^2 \cdot R_D^2} \quad (3.46)$$

$$P = 1633.2[\text{W}] \quad (3.47)$$

Din măsurarea puterii active rezultă rezistența echivalentă:

$$R_{e1} = \frac{P}{I^2} = \frac{1633.2}{0.1^2} = 163320[\Omega] \quad (3.48)$$

și se obține relația:

$$163320 \frac{R_{EA} \cdot R_{EP}^2 \cdot R_D^2 + X_{EP}^2 R_D^2 \cdot R_{EA} + X_D^2 R_{EP}^2 R_{EA} + 2X_{EPD}^2 \cdot R_{EA} R_{EP} R_D + X_{EAD}^2 R_{EP}^2 R_D + [R_{EP} \cdot R_D + X_{EPA}^2 R_D^2 R_{EP} + X_{EPD}^4 \cdot R_{EA} + X_{EAD}^2 \cdot X_{EPD}^2 R_{EP} + X_{EPA}^2 \cdot X_{EPD}^2 \cdot R_D - 2X_{EPD}^2 \cdot X_{EP} \cdot X_D \cdot R_{EA} + X_{EPD}^2 - X_{EP} \cdot X_D]^2 + X_{EP}^2 X_D^2 \cdot R_{EA} + X_{EAD}^2 X_{EP}^2 \cdot R_D + X_{EPA}^2 X_D^2 R_{EP} - 2X_{EPD} \cdot X_{EPA} X_{EAD} X_{EP} R_D - 2X_{EPD} \cdot X_{EPA} X_{EAD} X_D R_{EP}}{(X_{EP} \cdot R_D + X_D \cdot R_{EP})^2} \quad (3.49)$$

Din raportul  $\frac{U_{E1}}{I_{EA}}$  rezultă impedența  $Z_1$ :

$$Z_1 = 181830[\Omega] \quad (3.50)$$

și deci a treia ecuație a sistemului este:

$$3306 \cdot 10^7 = \frac{[R_{EA} \cdot R_D \cdot R_{EP} + X_{EPD}^2 \cdot R_{EA} + X_{EPA}^2 \cdot R_D + X_{EAD}^2 \cdot R_{EP} - X_{EP} X_D \cdot R_{EA} - X_{EP} X_{EA} R_D - X_D \cdot X_{EA} R_{EP}]^2 + [X_{EP} \cdot R_D \cdot R_{EA} + X_D \cdot R_{EP} \cdot R_{EA} + X_{EA} R_{EP} R_D + X_{EPD}^2 \cdot X_{EA} + X_{EAD}^2 X_{EP} + X_{EPD}^2 - X_{EP} \cdot X_D]^2 + X_{EPA}^2 \cdot X_D - X_{EP} \cdot X_D \cdot X_{EA} - 2X_{EPD} \cdot X_{EPA} \cdot X_{EAD}]^2}{(X_{EP} \cdot R_D + X_D \cdot R_{EP})^2} \quad (3.51)$$

Înfășurarea de excitație auxiliară este alimentată ( $I_{EA}$ ) și cea principală este în gol (figura 3.2) și se obțin relațiile:

- din impedența  $Z_2 = U_{E2} / I_{EA2}$ ,

$$Z_2 = 112[\Omega] \quad (3.52)$$

rezultă a patra ecuație a sistemului:

$$12547 = \left( R_{EA} + \frac{X_{EAD}^2 \cdot R_D}{R_D^2 + X_D^2} \right)^2 + \left( X_{EA} - \frac{X_{EAD}^2 \cdot X_D}{R_D^2 + X_D^2} \right)^2 \quad (3.53)$$

din rezistența echivalentă  $R_{e2} = P_{WE} / I_{EA2}^2$ ,

$$R_{e2} = 99,14[\Omega] \quad (3.54)$$

rezultă a cincea ecuație a sistemului:

$$99.14 = R_{EA} + \frac{X_{EAd}^2 \cdot R_D}{R_D^2 + X_D^2} \quad (3.55)$$

Cele cinci ecuații (3.46, 3.49, 3.51, 3.53, 3.55) definesc sistemul în necunoscutele  $R_D$ ,  $X_D$ ,  $X_{EPd}$ ,  $X_{EAd}$ ,  $X_{EPA}$  care, rezolvat (cu Matematica 4), are soluțiile:

$$\begin{aligned} R_D &= 0,03 \text{ } [\Omega]; \\ L_D &= 0,0005 \text{ } [H]; \\ M_{EPd} &= M_{E1d} = 0,0066 \text{ } [H]; \\ M_{EAd} &= M_{E2d} = 0,00198 \text{ } [H]; \\ M_{EPA} &= M_{E12} = 0,00814 \text{ } [H]. \end{aligned} \quad (3.56)$$

Înfășurarea statică din axa d este alimentată ( $I_1$ ), iar înfășurările de excitație sunt în gol (figura 3.3) și se obține:

$$X_{EPd} = \frac{U_{E1}}{I_1} \quad (3.57)$$

sau

$$X_{EPd} = 150 \text{ } [\Omega]; M_{EPd} = M_{E1d} = M_{E1q} = M_{EP} = M_{E1} = 0,478 \text{ } [H] \quad (3.58)$$

și

$$X_{EAd} = \frac{U_{E2}}{I_2} \quad (3.59)$$

$$X_{EAd} = 47,1 \text{ } [\Omega]; M_{EAd} = M_{E2d} = M_{E2q} = M_{EA} = M_{E2} = 0,15 \text{ } [H] \quad (3.60)$$

Din măsurarea puterii active rezultă:

$$R_{e3} = \frac{P_{W1}}{I_1^2} = 0,036 \text{ } [\Omega] \quad (3.61)$$

sau

$$0,036 = 0,015 + \frac{X_{Dd}^2 \cdot R_D}{R_D^2 + X_D^2} \quad (3.62)$$

de unde:

$$M_{Dd} = 0,000274 \text{ } [H]. \quad (3.63)$$



## PROBE ÎN AXA q

Plasarea rotorului în axa q se face prin măsurarea tensiunii la bornele înfășurării de excitație, care trebuie să fie zero (figura 3.12).

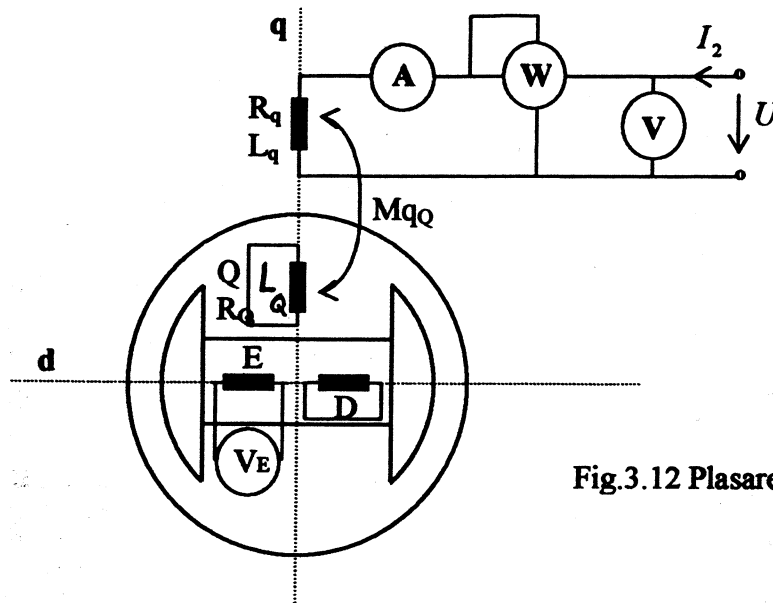


Fig.3.12 Plasarea rotorului în axa q.

Înfășurarea statorică din axa q este alimentată ( $I_2$ ) și celelalte faze fiind în gol (figura 3.12) se obține:

- rezistența echivalentă  $R_2 = P_{W2} / I_2^2$

$$R_2 = 0,0151[\Omega] \quad (3.64)$$

- reactanța echivalentă  $X_2 = Q_{W2} / I_2^2$

$$X_2 = 0,4329[\Omega] \quad (3.65)$$

Înfășurarea statorică din axa q este alimentată ( $I_3$ ) (figura 3.10) și celelalte două faze fiind scurtcircuitate se obține:

- raportul curenților:

$$\left(\frac{I_3}{I_2}\right)^2 = 1,57 \quad (3.66)$$

- și impedanța

$$Z_3 = \frac{U_3}{I_3} = 0,016[\Omega] \quad (3.67)$$

rezultă:

$$Z_3^2 = 0,026[\Omega^2] \quad (3.68)$$

Se obține astfel sistemul:

$$\begin{cases}
 0,0151 = R_1 + \frac{R_Q \cdot X_{Qq}^2}{R_Q^2 + X_Q^2} \\
 0,4329 = X_q - \frac{X_Q \cdot X_{Qq}^2}{R_Q^2 + X_Q^2} \\
 1,57 = \frac{[2R_q \cdot R_Q + X_{Qq}^2 - X_Q \cdot X_q]^2 + [X_q \cdot R_Q + X_Q \cdot 2R_q]^2}{[X_{Qq}^2 - X_{qq} \cdot X_Q]^2 + X_{qq}^2 \cdot R_Q^2} \\
 0,026 = \frac{[2 \cdot R_1^2 \cdot R_Q + 3R_1 \cdot X_{Qq}^2 + X_{qq}^2 \cdot R_Q - 3X_q X_Q \cdot R_q - X_q^2 \cdot R_Q]^2 + [2R_Q \cdot R_q + X_{Qq}^2 - X_Q \cdot X_q]^2 + [3X_q \cdot R_Q \cdot R_q + 2X_Q \cdot R_q^2 + 2X_{Qq}^2 \cdot X_q + X_{qq}^2 \cdot X_Q - X_q^2 \cdot X_Q - 2X_{Qq}^2 \cdot X_{qq}]^2}{[X_q \cdot R_Q + 2X_Q \cdot R_q]^2}
 \end{cases} \quad (3.69)$$

care, rezolvat în necunoscutele  $R_Q, X_Q, X_{Qq}$  și  $X_{qq}$ , are soluția:

$$\begin{cases}
 R_Q = 0,03[\Omega]; \\
 L_Q = 0,00057[H]; \\
 M_Q = 0,000274[H];
 \end{cases} \quad (3.70)$$

Ecuatiile mașinii sincrone cu două înfășurări de excitație sunt:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_{EP} \\ U_{EA} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d + L_d \cdot p & -\alpha L_q & M_{EP} \cdot p & M_{EA} \cdot p & M_D \cdot p & -\alpha M_Q \\ \alpha L_d & R_q + L_q \cdot p & \alpha M_{EP} & \alpha M_{EA} & \alpha M_D & M_Q \cdot p \\ M_{EP} \cdot p & 0 & R_{EP} + L_{EP} \cdot p & M_{EP} \cdot p & M_{EPD} \cdot p & 0 \\ M_{EA} \cdot p & 0 & M_{EP} \cdot p & R_{EA} + L_{EA} \cdot p & M_{EAD} \cdot p & 0 \\ M_D \cdot p & 0 & M_{EPD} \cdot p & M_{EAD} \cdot p & R_D + L_D \cdot p & 0 \\ 0 & M_Q \cdot p & 0 & 0 & 0 & R_Q + L_Q \cdot p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_{EP} \\ I_{EA} \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

$$M_{\text{imagMS}} = p_1 [(L_d - L_q) I_d I_q + M_{EP} I_q I_{EP} + M_{EA} I_q I_{EA} - M_Q I_d I_Q + M_D I_q I_D] \quad (3.72)$$

### 3.5. Parametrii sarcinii rezistiv-inductive conectate la bornele GS

Cel mai mare consumator de pe navă este un motor asincron de 75[kW] ce acționează pompa de balast.

Un motor de aceeași putere acționează și pompa de incendiu.

Având în vedere această situație de pe navă s-a impus ca necesară analiza comportării sistemului electroenergetic naval la conectarea motorului asincron de 75[kW].

În continuare se dau relațiile de calcul a parametrilor pentru acest tip de motor.

În modelul ortogonal, o sarcină R,L se introduce matriceal astfel:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + Lp & -\omega L \\ \omega L & R + Lp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

La motorul asincron de 75[kW], cu datele nominale :

$$\begin{aligned} P_N &= 75[\text{kW}] \\ I_N &= 140[\text{A}] \\ U_N &= 220[\text{V}] \\ \cos\varphi_N &= 0,9 \end{aligned} \quad (3.74)$$

rezultă:

$$Z_{ech} = \frac{U_N}{I_N} = \frac{220}{140} = 1,55[\Omega] \quad (3.75)$$

Rezistența echivalentă se calculează din:

$$R = \frac{U_N}{I_N} \cos\varphi_N = \frac{220}{140} \cdot 0,9 = 1,4[\Omega] \quad (3.76)$$

Reactanța echivalentă se calculează din:

$$X = \frac{U_N}{I_N} \sin\varphi_N = 0,67[\Omega] \quad (3.77)$$

de unde inductanța L are valoarea:

$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{0,67}{314} = 0,00213[\text{H}] \quad (3.78)$$

Pentru valorile numerice R și L înlocuite în matricea de mai sus, se obține:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,4 + 0,00213p & -\omega 0,00213 \\ \omega 0,00213 & 1,4 + 0,00213p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

sau

$$\begin{cases} U_d = 1,4I_d + 0,00213 \frac{dI_d}{dt} - 0,00213\omega I_q \\ U_q = 1,4I_q + 0,00213 \frac{dI_q}{dt} + 0,00213\omega I_d \end{cases} \quad (3.80)$$

În capitolul patru se lucrează cu mărimi raportate și deci valorile respective pentru R și L se vor înmulți cu:

$$I_N \sqrt{3} = 690 \sqrt{3} = 1195 \quad (3.81)$$

obținându-se :

$$\begin{cases} U_d = 1673I_d + 2,55 \frac{dI_d}{dt} - 2,55\omega I_q \\ U_q = 1673I_q + 2,55 \frac{dI_q}{dt} + 2,55\omega I_d \end{cases} \quad (3.82)$$

#### Cap. 4. COMPORTAREA SISTEMULUI ELECTROENERGETIC NAVAL ÎN REGIMURI TRANZITORII. SIMULĂRI NUMERICE

Sistemul electroenergetic, format din grupurile motor Diesel – generatoare sincrone și consumatorii conectați la barele tabloului principal de distribuție (TPD), este proiectat, construit și reglat pentru a funcționa la tensiunea nominală (380/220[V]) și frecvența nominală  $f=50$ [Hz].

Pentru a menține tensiunea și frecvența între limitele impuse de RNR, în practica navală curentă, sunt prevăzute atât regulatoare de tensiune la generatoarele sincrone cât și regulatoare de turație la motoarele Diesel de antrenare a generatoarelor sincrone. În rețeaua de distribuție, menținerea constantă a frecvenței micșorează circulația de puteri active și reactive (în mod deosebit a celor reactive) datorită caracteristicilor statice ale sarcinilor rotative [N5]. Menținerea valorilor tensiunii între limitele admise de normele RNR se realizează prin reglarea acestora, acționându-se asupra circulației puterii reactive. Deși cele două reglaje, de frecvență și de tensiune, sunt aparent independente, unul efectuându-se la nivelul sistemului electroenergetic naval și celălalt la nivelul rețelei și al generatoarelor de producere a energiei electrice, în realitate ele sunt interdependente, nivelul de frecvență intercondiționând nivelul tensiunii de alimentare a diversilor consumatori prin intermediul circulației de putere. Această interdependență este asigurată atât de caracteristicile statice ale sarcinilor (lucru valabil și la sistemele electroenergetice de putere infinită) cât și de caracteristicile dinamice ale sarcinilor, în cazul SEEN (regimuri tranzitorii la pornirea și oprirea diverselor agregate, regimuri de avarie, regimuri deformante – în urma extinderii acționărilor bazate pe electronica de putere, etc.).

În cazul în care regulatoarele nu funcționează, punctul de funcționare ( $M_{\text{Diesel}} = M_{\text{elmg}}$ ) se află la intersecția caracteristicii mecanice a motorului de antrenare (Diesel) cu caracteristica cuplului electromagnetic:

$$M_{\text{Diesel}} = f_1(\omega) \quad (4.1)$$

$$M_{\text{elmg}} = f_2(\omega) \quad (4.2)$$

așa ca în figura 4.1, în care punctul A este un punct de funcționare stabil, iar punctul B este un punct de funcționare instabil.

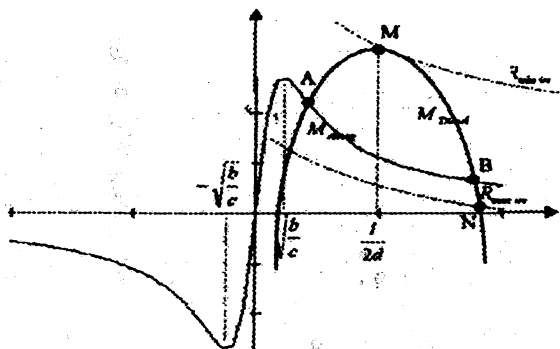


Fig 4.1. Stabilirea punctului de funcționare

Există situații pe navele maritime când regulatoarele sunt scoase din uz și, de aceea, regimul autonom al generatorului sincron cu  $U$  și  $f$  variabile este analizat pentru a cunoaște limitele de variație ale tensiunii, frecvenței și curentului și, mai ales, șocurile ce pot apărea în diversele regimuri tranzitorii. În capitolele următoare se vor analiza și cazurile când frecvența este constantă deoarece, începând cu anii 2000, s-au montat pe nave grupuri electrogene

Perkins-Stanford prevăzute cu sisteme de menținere constantă a frecvenței (motoarele Diesel au montați 3 senzori magnetici pe volant care sunt conectați electric cu regulatoarele de turație; în acest fel, frecvența este menținută constantă de la mersul în gol până la plină sarcină).

În cele ce urmează se prezintă simulările numerice obținute pe calculator cu nucleul Maple al programului Scientific Work Place 4.0 și cu Mathematica 4.0. Ambele programme, în segmentul dedicat rezolvării sistemelor de ecuații diferențiale, se bazează pe algoritmi deosebit de eficienți, variante actualizate ale metodei Runge-Kutta de ordinul 4.

#### 4.1. Regimuri tranzitorii la generatorul sincron cu o înfășurare de excitație, reglat

Cuplul motor dat de motorul Diesel al grupului D-G are forma generală:

$$M_{\text{Diesel}} = -d\omega^2 + e\omega + f \quad (4.3)$$

Pentru un anumit debit de motorină, caracteristica mecanică a motorului Diesel este:

$$M_{\text{Diesel}} = 0.076(\omega - 21)(418 - \omega) \quad (4.4)$$

La  $\omega = 314$  [rad/s] ( $f = 50$  [Hz]), cracteristica devine:

$$M_{\text{Diesel } 314} = 0.076(314 - 21)(418 - 314) = 534.04 \text{ [Nm]} \quad (4.5)$$

##### 4.1.1. Funcționarea rezistiv-inductivă prin conectarea la bornele generatorului a unui motor asincron de 75[kW]

Cel mai important consumator rezistiv-inductiv de pe tipul de navă considerat este motorul asincron de 75 [kW] și, din acest motiv, se analizează acest caz în continuare.

La o încărcare rezistiv-inductivă, rezistența conectată la bornele generatorului are valoarea:  $R = 1.4[\Omega]$  – în calcule se lucrează cu  $1.4 \times 1195.1 = 1673.14$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ , iar parametrii R, L și M sunt mărimi raportate.

În calculele care urmează se folosesc următoarele notații:

$$\begin{array}{ll} X & I_d \\ Y & I_q \\ U & I_E \\ W & I_D \\ Q & I_Q \\ \omega & \omega \\ \theta & \theta \\ M(t) & M_{elmag} \\ C(t) & M_{rez} \\ I(t) & I_{real} \end{array} \quad (4.6)$$

În regim permanent, sistemul matricial:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d + L_d \cdot p & -\omega \cdot L_q & M_{Ed} \cdot p & M_{Dd} \cdot p & -\omega \cdot M_{Qd} \\ \omega \cdot L_d & R_q + L_q \cdot p & \omega \cdot M_{Eq} & \omega \cdot M_{Dq} & M_{Qq} \cdot p \\ M_{Ed} \cdot p & 0 & R_E + L_E \cdot p & M_{ED} \cdot p & 0 \\ M_{Dd} \cdot p & 0 & M_{ED} \cdot p & R_D + L_D \cdot p & 0 \\ 0 & M_{Qq} \cdot p & 0 & 0 & R_Q + L_Q \cdot p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -I_d \\ -I_q \\ I_E \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

devine:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_E \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_d & -\omega \cdot L_q & 0 & 0 & -\omega \cdot M_{Qd} \\ \omega \cdot L_d & R_q & \omega \cdot M_{Eq} & \omega \cdot M_{Dq} & 0 \\ 0 & 0 & R_E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -I_d \\ -I_q \\ I_E \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

și cu notațiile de mai sus rezultă la  $\omega = 314[\text{rad/s}]$ , în regim staționar, sistemul

$$\begin{aligned} 1673X - 2.55\omega Y &= 0.7\omega Y \\ 1673Y + 2.55\omega X &= -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ V &= 0.6U \\ C - 1142YU &= 0 \\ 0 &= 1036.6 - 3.3\omega \\ (1673X - 2.55\omega Y)^2 + (1673Y + 2.55\omega X)^2 &= 380^2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

cu soluțiile:

$$\{\omega = 314.12, C = 534.04, X = 0.10671, Y = 0.17488, U = 2.6741, V = 1.6045\} \quad (4.10)$$

S-au analizat mai multe cazuri, pentru diferite valori ale constantelor de timp și ale factorului de amplificare (valori în jurul celor date de documentația tehnică însoțitoare a regulatorului automat de tensiune), din care se prezintă, în continuare, două cazuri:  $T_i=0.1[\text{s}]$  și  $T_i=0.01[\text{s}]$ . Pentru aceste două cazuri se dau variațiile în timp obținute prin simulare numerică pentru principalele mărimi care intervin în model: curenți, tensiuni, cupluri, viteza unghiulară rotorică.

#### 4.1.1.1. Funcționare rezistiv-inductivă pentru $T_i = 0.1[\text{s}]$ , $K=10$ , $J=1[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$

Sistemul de ecuații diferențiale care definește regimul tranzitoriu este:

$$1673X + 2.55 \frac{dX}{dt} - 2.55\omega Y = -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q$$

$$1673Y + 2.55 \frac{dY}{dt} + 2.55\omega X = -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt}$$

$$V = -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt}$$

$$C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW = \frac{dC}{dt}$$

$$\frac{dC}{dt} = 1036.6 - 10 \frac{d\omega}{dt} - 3.3\omega$$

$$0.01 \frac{dV}{dt} = -(0.1 \frac{dV}{dt} + 10(V - 1.6)) \quad (4.11)$$

$$C(0) = 0$$

$$V(0) = 1.5191$$

$$X(0) = 0$$

$$Y(0) = 0$$

$$U(0) = 2.5318$$

$$W(0) = 0$$

$$Q(0) = 0$$

$$\omega(0) = 314$$



**4.1.1.2. Funcționare rezistiv-inductivă pentru  $T_i = 0.01[s]$ ,  $K=10$ ,  $J=1[kg \cdot m^2]$**

Sistemul de ecuații diferențiale ce definește regimul tranzitoriu este:

$$1673X + 2.55 \frac{dX}{dt} - 2.55\omega Y = -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q$$

$$1673Y + 2.55 \frac{dY}{dt} + 2.55\omega X = -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt}$$

$$V = -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt}$$

$$C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW = \frac{dC}{dt}$$

$$\frac{dC}{dt} = 1036.6 - 10 \frac{d\omega}{dt} - 3.3\omega$$

$$0.1 \frac{dV}{dt} = -\left(\frac{dV}{dt} + 10(V - 1.6)\right) \quad (4.12)$$

$$C(0) = 0$$

$$V(0) = 1.5191$$

$$X(0) = 0$$

$$Y(0) = 0$$

$$U(0) = 2.5318$$

$$W(0) = 0$$

$$Q(0) = 0$$

$$\omega(0) = 314$$

Se obțin astfel variațiile în timp pentru curenții  $I_d$ ,  $I_q$ ,  $I_E$ ,  $I_D$  și  $I_Q$  (figurile 4.2 la 4.11).

Variația vitezei unghiulare  $\omega$  a rotorului este dată în figurile 4.12 și 4.13, iar variația cuplului motor este dată în figurile 4.14 și 4.15.

Regulatorul pe excitație modifică tensiunea  $U_E$  așa ca în figurile 4.16 și 4.17, iar tensiunea la bornele generatorului are o variație așa ca în figurile 4.18 și 4.19.

Curentul prin mașina reală are o variație redată în figurile 4.20 și 4.21.

Cuplul electromagnetic se modifică în timp așa cum se observă în figurile 4.22 și 4.23.

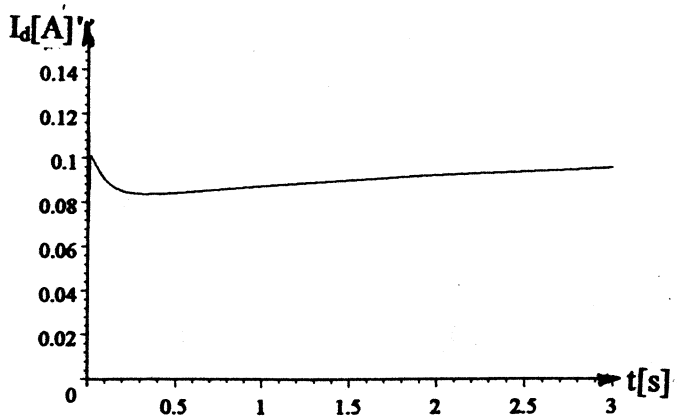


Fig.4.2. Variația în timp a lui  $I_d$ ;  $T_i = 0.01s$

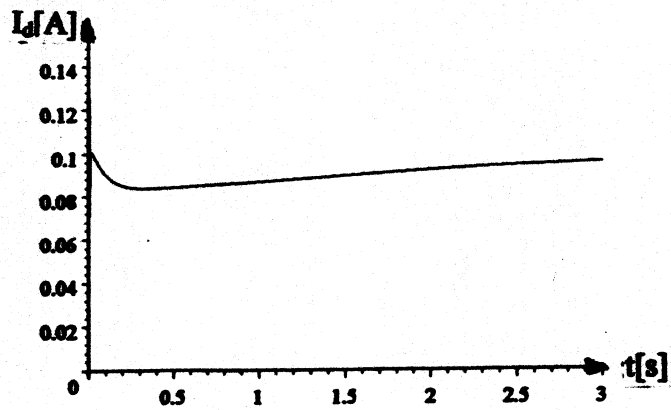


Fig.4.3. Variația în timp a lui  $I_d; T_i = 0.1s$

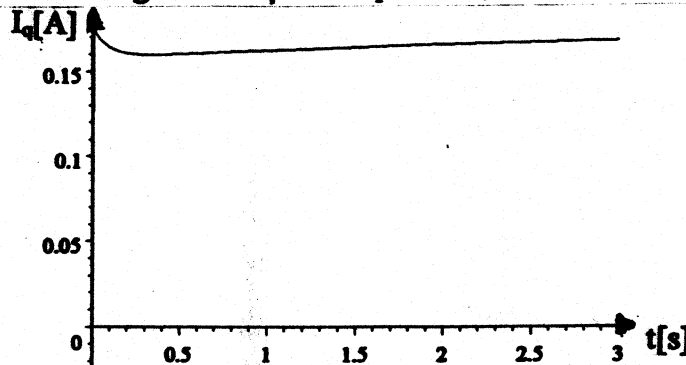


Fig.4.4. Variația în timp a lui  $I_q; T_i = 0.01s$

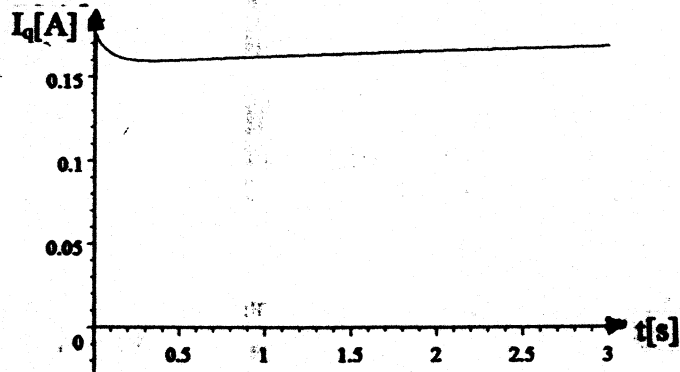


Fig.4.5. Variația în timp a lui  $I_q; T_i = 0.1s$

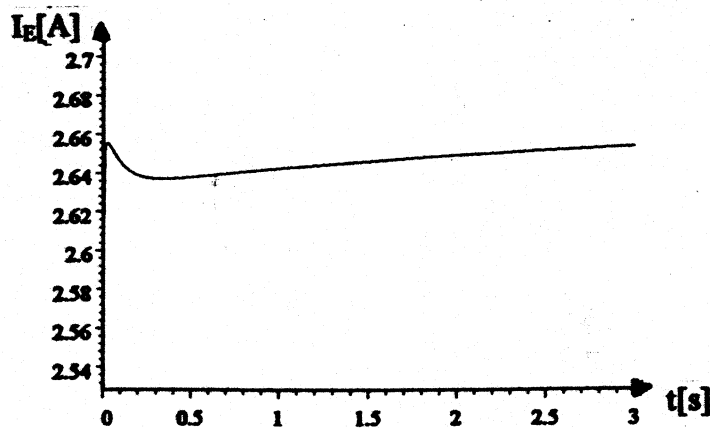


Fig.4.6. Variația în timp a lui  $I_E; T_i = 0.01s$

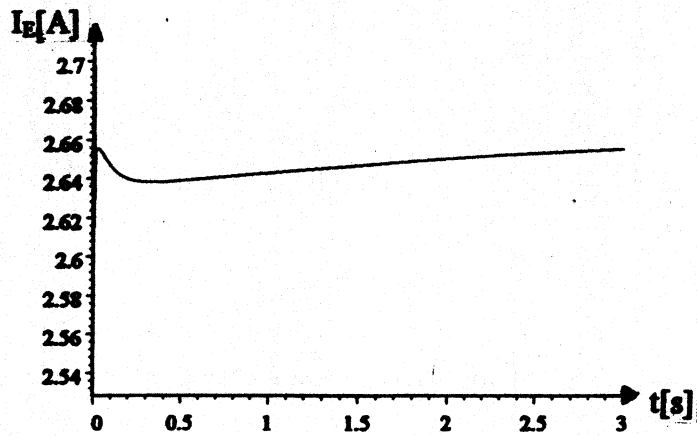


Fig.4.7. Variația în timp a lui  $I_E; T_i = 0.1s$

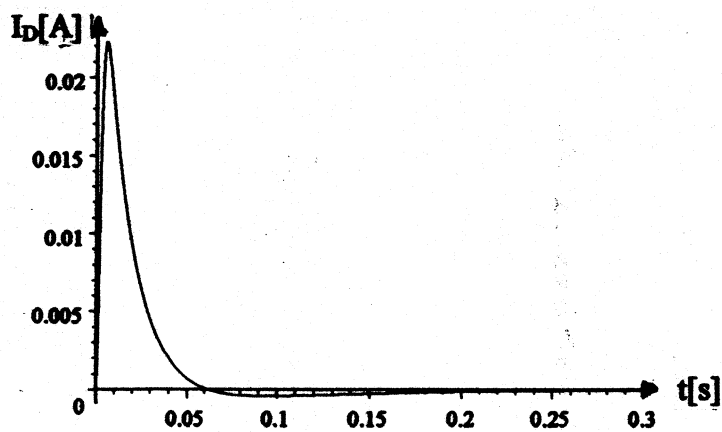


Fig.4.8. Variația în timp a lui  $I_D; T_i = 0.01s$

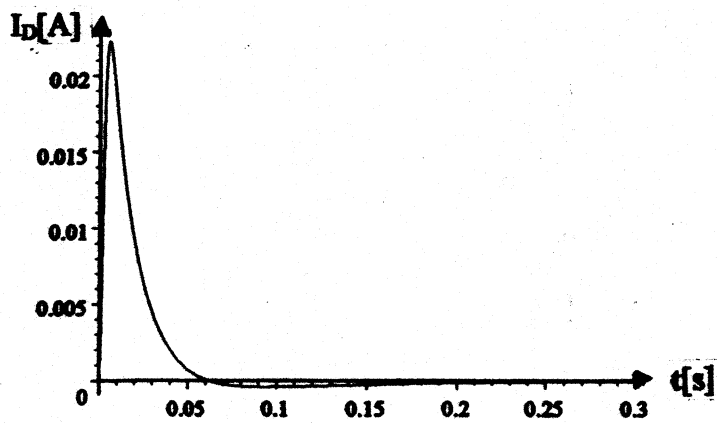


Fig.4.9. Variația în timp a lui  $I_D; T_i = 0.1s$

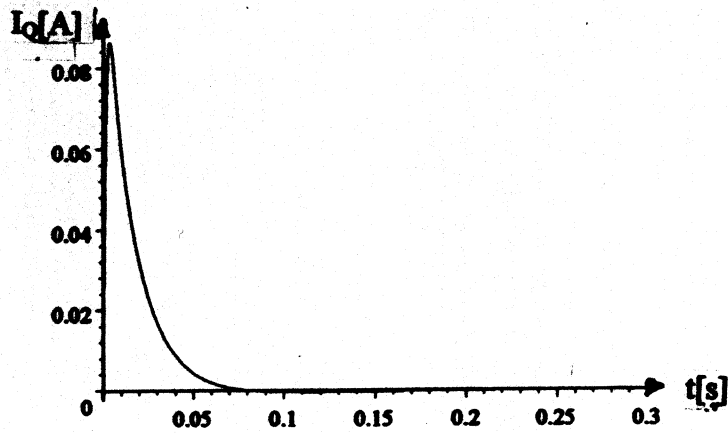


Fig.4.10. Variația în timp a lui  $I_Q; T_i = 0.01s$

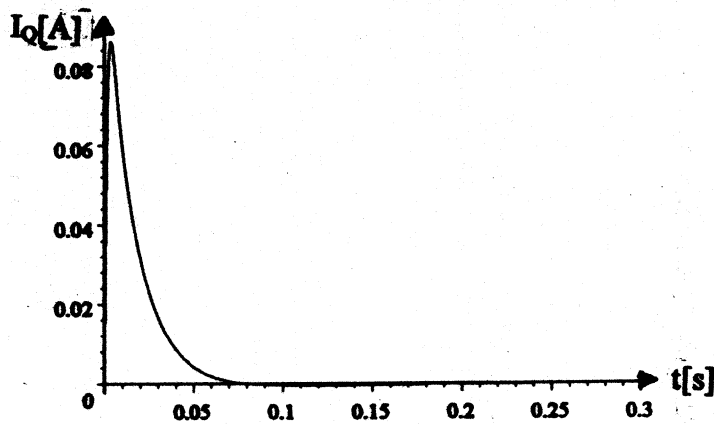


Fig.4.11. Variația în timp a lui  $I_Q; T_i = 0.1s$

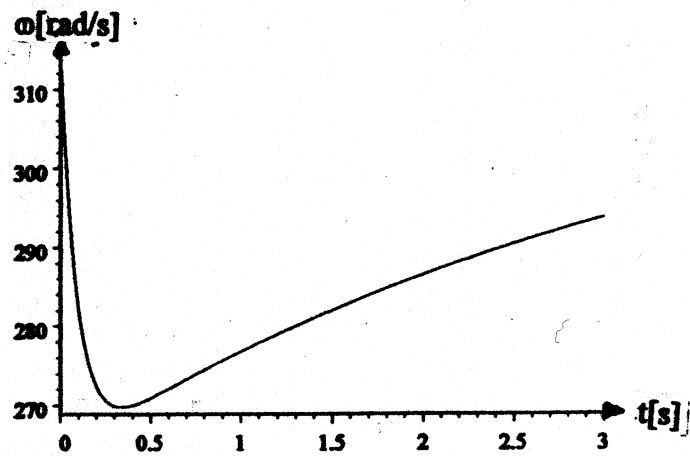


Fig.4.12. Variația în timp a lui  $\omega; T_i = 0.01s$

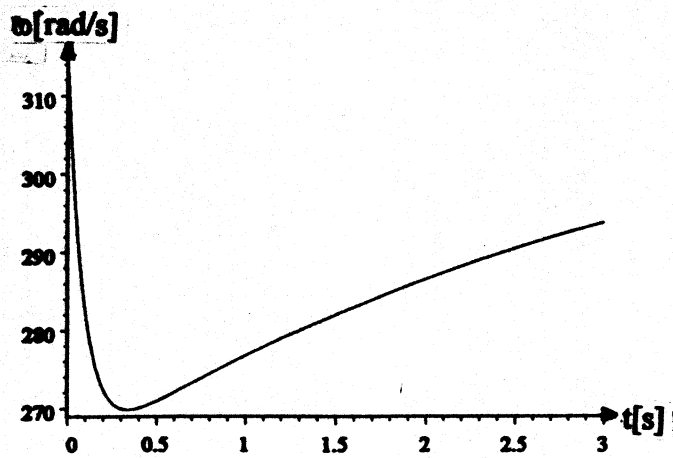


Fig.4.13. Variația în timp a lui  $\omega$ ;  $T_i = 0.1s$

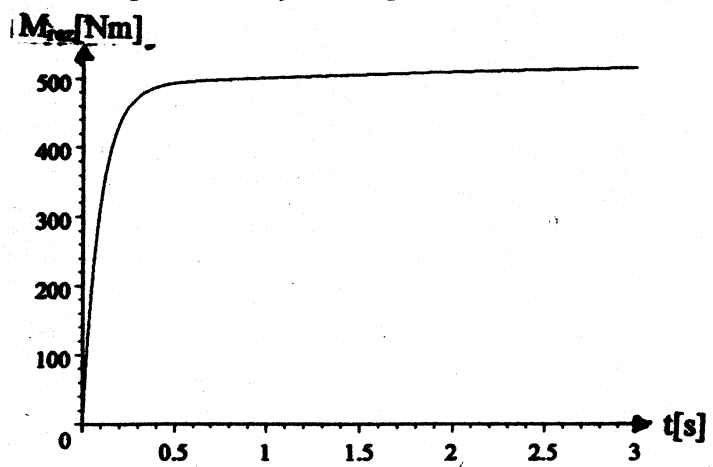


Fig.4.14. Variația în timp a lui  $M_{res}$ ;  $T_i = 0.01s$

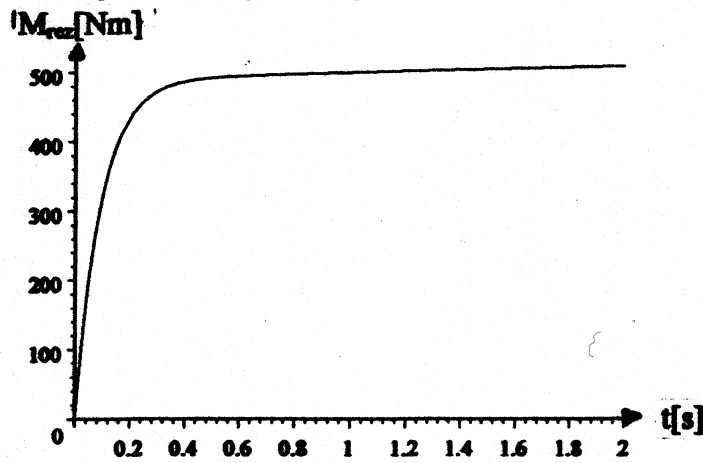


Fig.4.15. Variația în timp a lui  $M_{res}$ ;  $T_i = 0.1s$

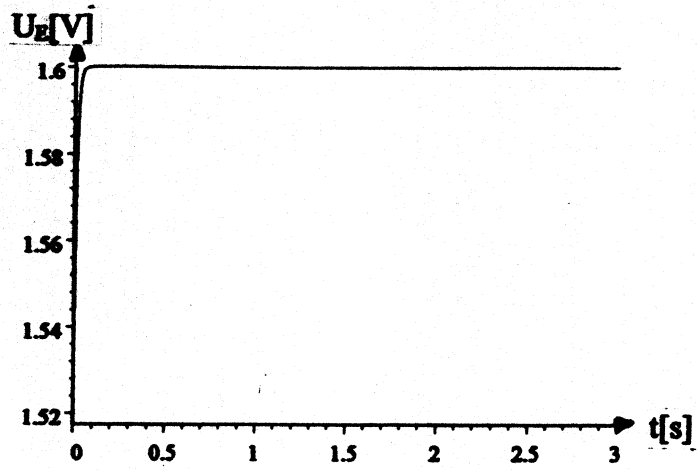


Fig.4.16. Variația în timp a lui  $U_E; T_i = 0.01s$

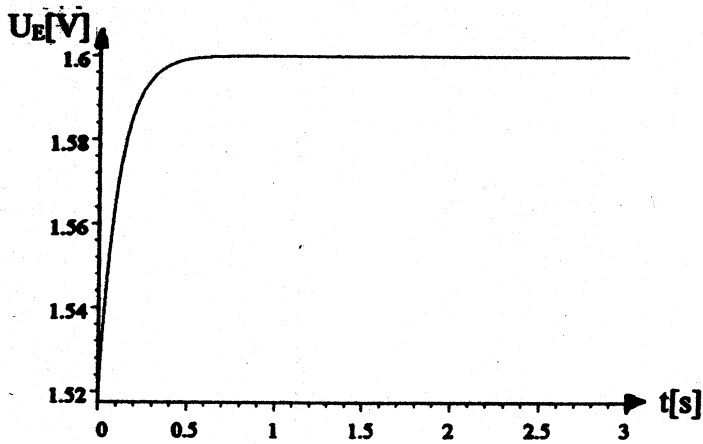


Fig.4.17. Variația în timp a lui  $U_E; T_i = 0.1s$

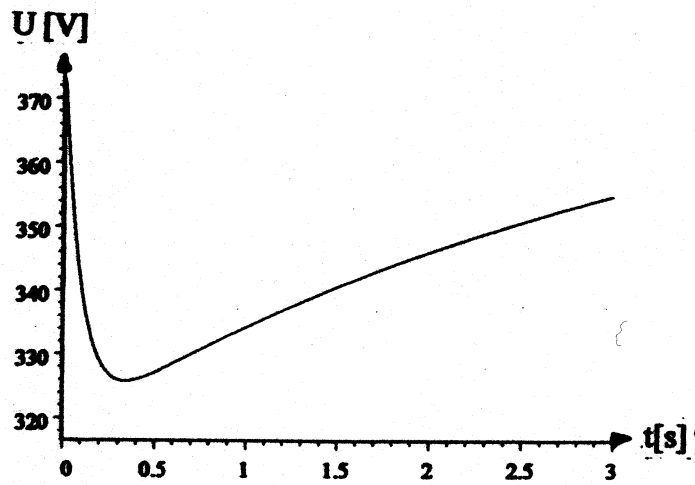


Fig.4.18. Variația în timp a lui  $U; T_i = 0.01s$

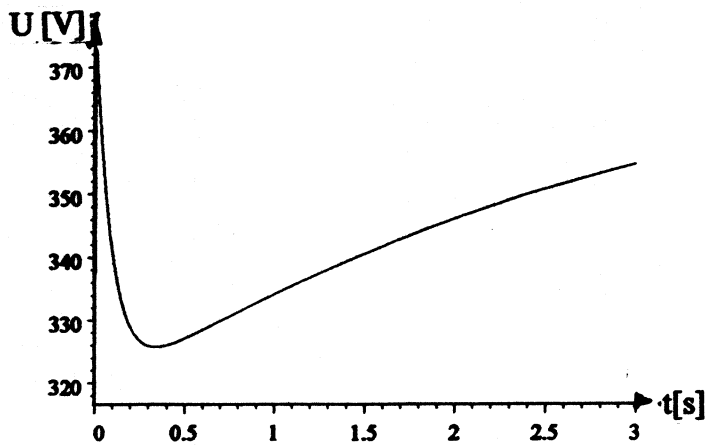


Fig.4.19. Variația în timp a lui  $U; T_i = 0.1s$

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t)$$

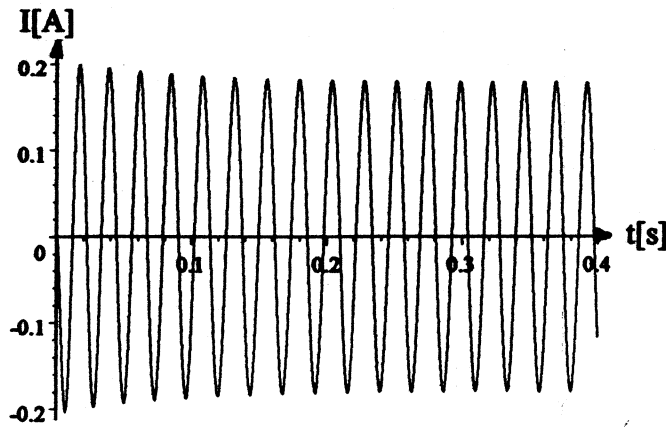


Fig.4.20. Variația în timp a lui  $I; T_i = 0.01s$

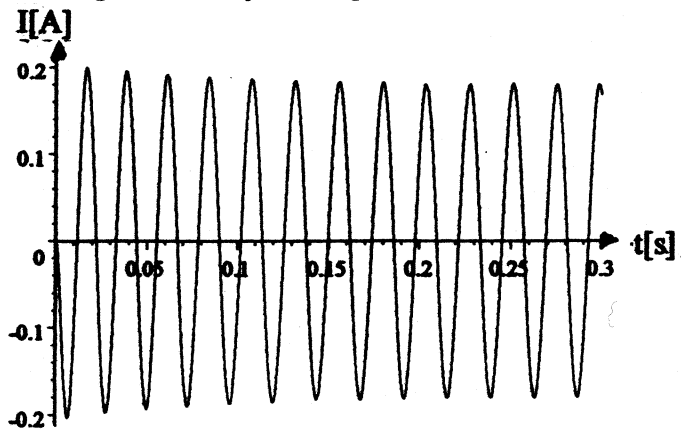


Fig.4.21. Variația în timp a lui  $I; T_i = 0.1s$

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t)$$

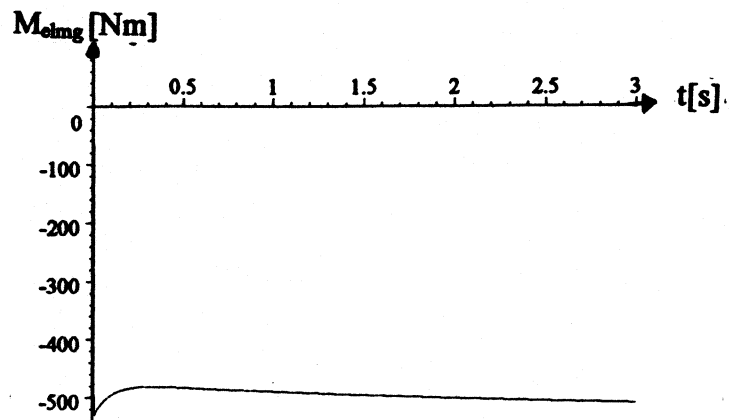


Fig.4.22. Variația în timp a lui  $M_{elmg}; T_i = 0.01s$

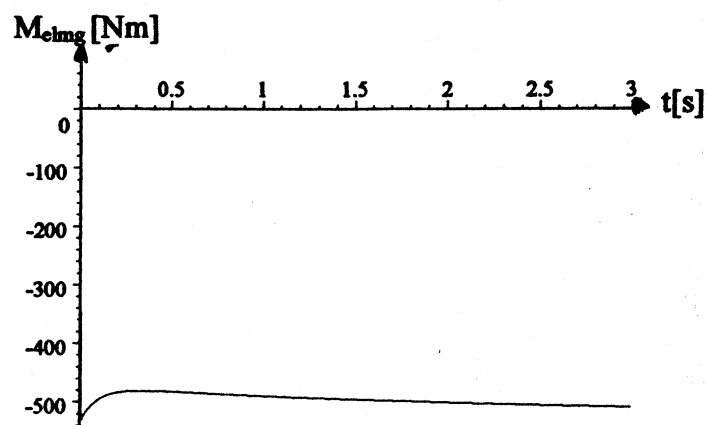


Fig.4.23. Variația în timp a lui  $M_{elmg}; T_i = 0.1s$

**Concluzii la conectarea motorului asincron de 75 kW:**

1. Curentul  $I_E$  prin înfășurarea de excitație se modifică de la

$$I_{E(0)} = 2.53[A] \text{ la } I_{E(0.1)} = 2.66[A]$$

deci nesemnificativ.

Ca urmare a intrării în funcție a regulatorului PI pe înfășurarea de excitație a GS curentul  $I_E$  crește la valoarea staționară:

$$I_{E(\infty)} = 2.674[A]$$

calculată și din sistemul condițiilor finale (4.10).

Influența constantei de timp a regulatorului PI

$$T_i = 0.01[s] \text{ sau } T_i = 0.1[s]$$



asupra variației curentului  $I_E$  este nesemnificativă, aceasta și deoarece constanta de timp a înfășurării de excitație este mult mai mare decât valorile lui  $T_i$  :

$$T_E = \frac{L_E}{R_E} = \frac{19.87}{0.6} > T_i$$

2. Curenții  $I_D$  și  $I_Q$  prin înfășurările de amortizare au o variație bruscă în intervalul corespunzător primelor 2 perioade:

$$0 \div 0.05[s]$$

Curentul  $I_Q$  prin înfășurarea de amortizare din axa q este de 4 ori mai mare decât curentul  $I_D$  prin înfășurarea de amortizare din axa d, aceasta și din cauza încărcării rezistive a generatorului, curenții din axa q fiind specifici încărcărilor active iar curenții din axa d fiind specifici încărcărilor inductive.

Influența valorilor constantelor de timp  $T_i$  a reguletoarelor asupra duratei proceselor tranzitorii caracteristice curenților  $I_D$  și  $I_Q$  este nesemnificativă, aceasta motivându-se prin faptul că regulatorul pe excitație încă nu a intrat în funcțiune când procesele tranzitorii din înfășurările de amortizare s-au stins.

3. Frecvența tensiunii de alimentare a GS scade în primele 0.3[s] la 43[Hz], deci cu 14%, după care intră în funcțiune regulatorul pe partea de admisie a motorinei la motorul Diesel și după aproximativ 5[s] revine la valoarea inițială de 50[Hz]. Între cele două valori ale lui  $T_i$  nu sunt deosebiri esențiale privind variația frecvenței.

4. Cuplul electromagnetic crește de la valoarea inițială 0 la valoarea finală :

$$M_{elmag} = 534[Nm]$$

în aproximativ 5[s] în ambele cazuri ( $T_i = 0.01[s]$  sau  $T_i = 0.1[s]$ ).

Creșterea semnificativă a cuplului are loc în primele 0,4[s] de la 0 la 530[Nm]

5. Tensiunea pe excitație ( $U_E$ ) crește de la valoarea inițială

$$U_{E(0)} = 1.519[V] \text{ la } U_{E(\infty)} = 1.6[V]$$

într-un interval de timp de aproximativ 0.4[s]. Creșterea rapidă o are în cazul  $T_i = 0.01[s]$ .

6. Tensiunea la bornele GS în primele 0.2[s] variază de la 0 la 380[V] după care scade la 330[V] la  $t = 0.4[s]$ , urcând spre valoarea de 380[V] în aproximativ 5[s].

Având în vedere valoarea de minim de 330[V], tensiunea la borne a scăzut cu 12% în ambele situații ale reguletoarelor.

7. Curentul real al GS crește la valoarea de regim în primele perioade de timp, neavând șocuri semnificative în timpul procesului tranzitoriu.

#### 4.1.2. Încărcare rezistivă

La bornele generatorului sincron se conectează consumatori rezistivi, curentul ajungând la 25%, 50%, 75% și 100% din  $I_N$ . Se au în vedere conectări de la funcționarea în gol la valorile mai sus amintite și încărcări de la 25% la 50%, 75% și 100% din  $I_N$ , așa cum prevăd normele din registrul naval.

La o sarcină dată (de exemplu 25%, 50%, sau 100%) curentul va avea o valoare bine precizată (la 25% →  $I_N/4$ ; la 50% →  $I_N/2$ ; la 100% →  $I_N$ )

În ecuația de bază a regulatorului de tip PI, de pe înfășurarea de excitație scrisă sub forma:

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

unde:  $E_r$  eroare;  
 $R$ -mărime de reglat;

eroarea  $E_r$  se scrie astfel :

$$E_r = [-I^2 + (I_N/4)^2] = [-X^2 - Y^2 + 0,0625] \text{ pentru o sarcină de 25\% ;}$$

$$E_r = [-I^2 + (I_N/2)^2] = [-X^2 - Y^2 + 0,25] \text{ pentru o sarcină de 50\% ;}$$

$$E_r = [-I^2 + (I_N)^2] = [-X^2 - Y^2 + 1] \text{ pentru o sarcină de 100\% ;}$$

Observații :

1. Curentul  $I_N$  este raportat la valoarea nominală a generatorului și din acest motiv la o sarcină de 25% curentul  $I$  are valoarea  $1/4=0,25$ , la o sarcină de 50% curentul  $I$  are valoarea  $1/2=0,5$ , iar la o încărcare de 100% este egal cu unitatea ;

2. Pentru a se evita folosirea radicalilor ( $I = \sqrt{X^2 + Y^2}$ ) care pun probleme de calcul dificile, se lucrează cu valoarea la pătrat :  $I^2 = X^2 + Y^2$  ;

3. Derivata erorii se scrie sub forma :

$$\frac{dE_r}{dt} = -2X \frac{dX}{dt} - 2Y \frac{dY}{dt}$$

Mărimea de reglat este tensiunea pe înfășurarea de excitație adițională (în simulări numerice notată cu  $V$ ).

Cu aceste precizări ecuația regulatorului pe înfășurarea de excitație se scrie sub forma :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{K}{T_i} (0,0625 - X^2 - Y^2) + K \left( -2X \frac{dX}{dt} - 2Y \frac{dY}{dt} \right) \text{ pentru o sarcină de 25\% ;}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{K}{T_i} (0,25 - X^2 - Y^2) + K \left( -2X \frac{dX}{dt} - 2Y \frac{dY}{dt} \right) \text{ pentru o sarcină de 50\% ;}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{K}{T_i} (1 - X^2 - Y^2) + K \left( -2X \frac{dX}{dt} - 2Y \frac{dY}{dt} \right) \text{ pentru o sarcină de 100\% ;}$$

**Regulatorul pe turație** modifică debitul de motorină la motorul Diesel și readuce frecvența la valoarea nominală. Cuplul motor notat cu  $C$  constituie mărimea de reglat și mărimea reglată este pulsația  $\omega$ .

Eroarea  $E_r$  se scrie astfel :

$$E_r = \omega_N - \omega = 314 - \omega$$

Ecuatia regulatorului pe turație, în aceste condiții, se scrie sub forma :

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K}{T_i} (314 - \omega) - K \frac{d\omega}{dt}$$

#### 4.1.2.1. Încărcare rezistivă 0-25%

La o încărcare rezistivă de 25%, rezistența conectată la borne are valoarea  $R = 1.275[\Omega]$  -(în calcule se lucrează cu  $1.275 * 1195.1 = 1523.8$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ ) deoarece sunt mărimi raportate.

Inițial grupul funcționează cu turația și excitația peste valorile nominale și prin încărcare se ajunge la frecvența nominală și tensiunea nominala la bornele generatorului sincron.

La funcționarea în gol, condițiile inițiale sunt următoarele:

$$\begin{aligned} C(0) &= 0 - \text{cuplul electromagnetic;} \\ V(0) &= 1.5191 - \text{tensiunea pe înfășurarea de excitație;} \\ X(0) &= 0 - \text{curentul statoric din axa d;} \\ Y(0) &= 0 - \text{curentul statoric din axa a q;} \\ U(0) &= 2.5318 - \text{curentul de excitație;} \\ W(0) &= 0 - \text{curentul rotoroc din axa d;} \\ Q(0) &= 0 - \text{curentul rotoroc din axa q;} \\ \omega(0) &= 314 - \text{pulsatia unghiulară.} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Condițiile finale rezultă din sistemul:

$$\begin{aligned} 1523.8X &= 0.7\omega Y \\ 1523.8Y &= -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ V &= 0.6U \\ C - 1142YU &= 0 \\ 0 &= 1036.6 - 3.3\omega \\ 0 &= 10 - 160(X^2 + Y^2) \\ T &= 1523.8\sqrt{X^2 + Y^2} \end{aligned} \quad (4.14)$$

cu soluția:

$$\left\{ \begin{aligned} \omega &= 314.12, C = 724.35, V = 1.538, U = 2.5634 \\ Y &= 0.24744, X = 3.5705 \times 10^{-2}, T = 380.95 \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Sistemul de ecuații diferențiale ce definește regimul tranzitoriu generează graficele de variație a principalelor mărimi: curenți, tensiuni, cupluri. Acest sistem se dă în continuare.

$$1523.8X = -0.7\frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478\frac{dU}{dt} + 0.346\frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q$$

$$1523.8Y = -0.7\omega X - 0.7\frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346\frac{dQ}{dt}$$

$$V = -25.18\frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87\frac{dU}{dt} + 7.9\frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346\frac{dX}{dt} + 0.15\frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6\frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346\frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6\frac{dQ}{dt}$$

$$C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW = \frac{dC}{dt}$$

$$\frac{dC}{dt} = 1036.6 - 10\frac{dC}{dt} - 3.3\omega$$

$$\frac{dV}{dt} = 10 - 32\left(X\frac{dX}{dt} + Y\frac{dY}{dt}\right) - 160(X^2 + Y^2) \quad (4.16)$$

$$C(0) = 0$$

$$V(0) = 1.5191$$

$$X(0) = 0$$

$$Y(0) = 0$$

$$U(0) = 2.5318$$

$$W(0) = 0$$

$$Q(0) = 0$$

$$\omega(0) = 314$$

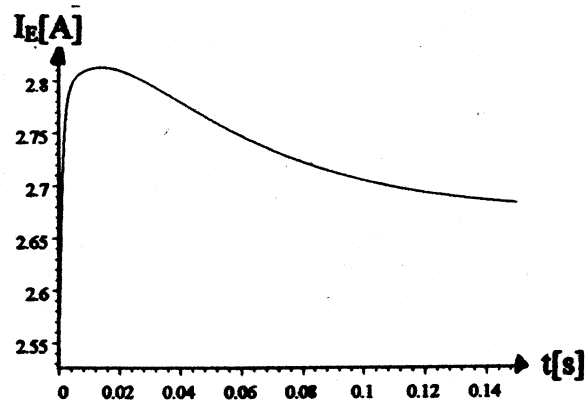


Fig.4.24. Variația în timp a lui  $I_E$ .

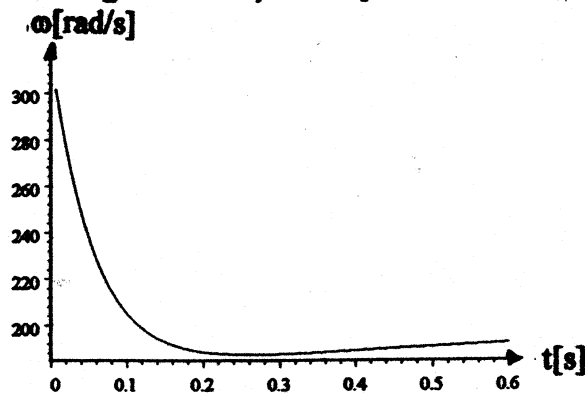


Fig.4.25. Variația în timp a lui  $\omega$ .

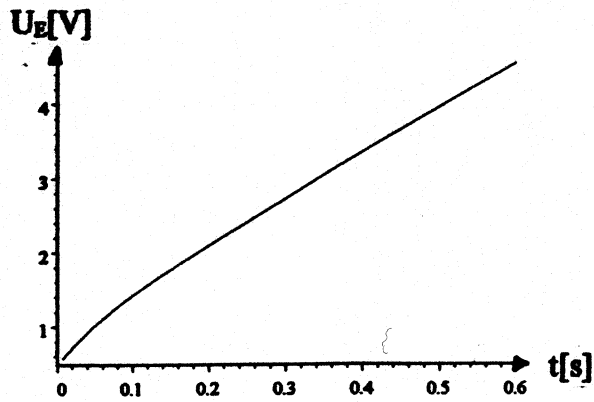


Fig.4.26. Variația în timp a lui  $U_E$ .

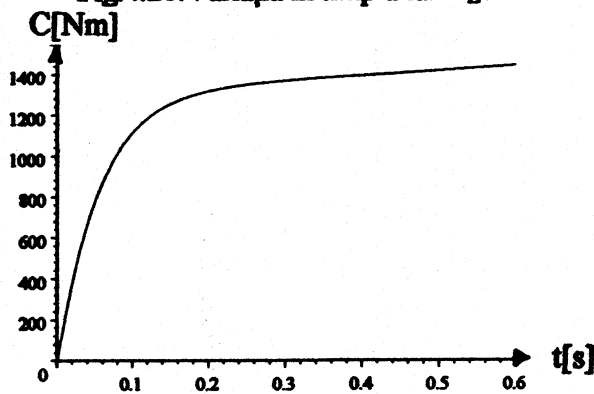


Fig.4.27. Variația în timp a cuplului motor.

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 1523.8 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4.17)$$

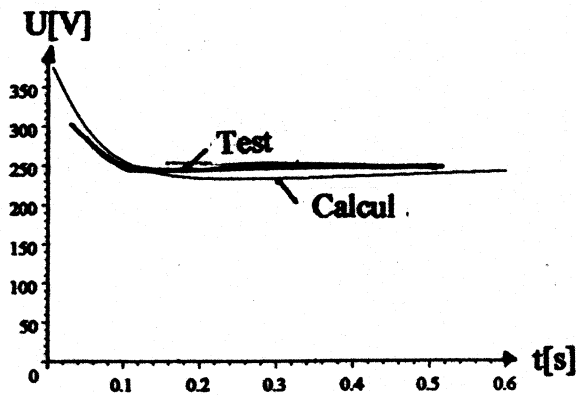


Fig.4.28. Variația în timp a lui  $U$ .

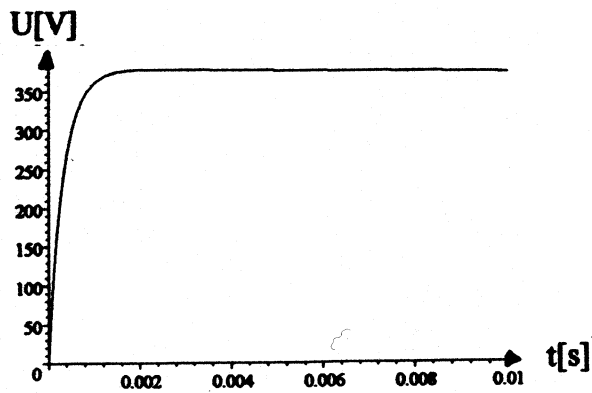


Fig.4.28'. Variația în timp a lui  $U$  (detaliu).

Curentul real se calculează cu relația:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (4.18)$$

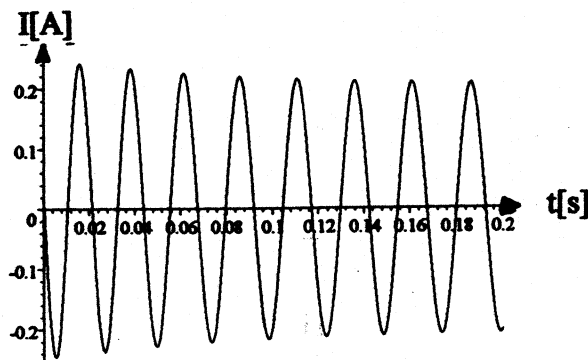


Fig.4.29. Variația în timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (4.19)$$

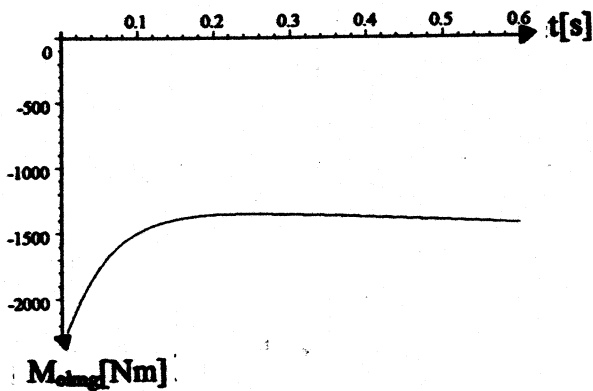


Fig.4.30. Variația în timp a lui  $M_{elec}$ .

Concluzii la încărcarea rezistivă cu 25%  $I_N$ :

1. Curentul  $I_E$  prin înfășurarea de excitație se modifică de la

$$I_{E(0)}=2.53[A] \text{ la } I_{E(0.01)}=2.82[A]$$

și în regim stabilizat ajunge la 2.56[A] având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I_E = [(2.82 - 2.56) / 2.56] \cdot 100 = 10\%, \text{ deci redusă.}$$

Ca urmare a intrării în funcție a regulatorului PI pe înfășurarea de excitație a GS curentul  $I_E$  crește la valoarea staționară:

$$I_E(\infty) = 2.56[A]$$

calculată și din sistemul condițiilor finale (4.15).

2. Frecvența tensiunii de alimentare a GS scade în primele 0.2[s] la 30.5 [Hz], având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta f = [(50 - 30.5) / 50] \cdot 100 = 38.8\%, \text{ deci semnificativă,}$$

după care intră în funcțiune regulatorul de admisie a motorinei la motorul Diesel.

3. Cuplul electromagnetic crește de la valoarea inițială 0 la valoarea finală :

$$M_{elmag} = 2300[Nm]$$

în mai puțin de 0.1 [s].

Pe durata procesului tranzitoriu cuplul electromagnetic are o variație de:

$$\Delta M_{elmag} = [(2300 - 734) / 734] \cdot 100 = 217\%, \text{ deci importantă.}$$

Creșterea semnificativă a cuplului are loc în primele 0.1 [s] de la 0 la 2300[Nm].

4. Cuplul motor C crește de la 0 la 1500[Nm] în aproximativ 0.3[s] având în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta C = [(1500 - 734) / 734] \cdot 100 = 107\%, \text{ deci semnificativă.}$$

5. Tensiunea pe excitație ( $U_E$ ) crește de la valoarea inițială:

$$U_{E(0)}=1.519[V] \text{ la } U_{E(0.06)}=5[V]$$

având în regim tranzitoriu un salt de :

$$\Delta U_E = [(5 - 1.538) / 1.538] \cdot 100 = 284\%, \text{ foarte mare.}$$

6. Tensiunea  $U$  la bornele GS în primele 0.002[s] variază de la 0 la 370[V] după care scade la 250[V] la  $t = 0.2[s]$ , având deci o variație de:

$$\Delta U = [(380 - 250) / 380] \cdot 100 = 34\%, \text{ deci semnificativă.}$$

„Golul” de tensiune are o durată redusă: 0.002[s]- o zecime de perioadă. Scăderea tensiunii cu 34% durează însă mult mai mult.

7. Curentul real  $I$  al GS crește la valoarea de regim în primele perioade de timp, neavând șocuri semnificative în timpul procesului tranzitoriu (fig.4.29), aceasta din cauza „golului” de tensiune ce apare în prima perioadă.

#### 4.1.2.2 Încărcare rezistivă 0-75%

La o încărcare rezistivă de 75%, rezistența conectată la borne are valoarea  $R = 0.425$  –(in calcule se lucreaza cu  $0.425 * 1195.1 = 507.92$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ ) deoarece sunt mărimi raportate.

Inițial grupul funcționează cu turația și excitația peste valorile nominale și prin încărcare se ajunge la frecvența nominală și tensiunea nominală la bornele generatorului sincron.

La funcționarea în gol, condițiile inițiale sunt următoarele:

$$\begin{aligned} C(0) &= 0 - \text{cuplul electromagnetic} \\ V(0) &= 1.5191 - \text{tensiunea pe înfășurarea de excitație} \\ X(0) &= 0 - \text{curentul statoric din axa d} \\ Y(0) &= 0 - \text{curentul statoric din axa q} \\ U(0) &= 2.5318 - \text{curentul de excitație} \\ W(0) &= 0 - \text{curentul rotoric din axa d} \\ Q(0) &= 0 - \text{curentul rotoric din axa q} \\ \omega(0) &= 314 - \text{pulsăția unghiulară} \end{aligned} \tag{4.20}$$

Condițiile finale rezultă din sistemul:

$$\begin{aligned} 507.92X &= +0.7\omega Y \\ 507.92Y &= -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ V &= 0.6U \\ C - 1142YU &= 0 \\ 0 &= 1036.6 - 3.3\omega \\ 0 &= 10 - \frac{160}{9}(X^2 + Y^2) \\ T^2 &= 0.425^2 * 1195^2(X^2 + Y^2) \end{aligned} \tag{4.21}$$

cu soluția:

$$\left\{ \begin{aligned} T &= 380.91, \omega = 314.12, C = 2173.0, V = 1.6588, \\ Y &= 0.68827, U = 2.7646, X = 0.29796 \end{aligned} \right\} \tag{4.22}$$



$$507.92X = -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q$$

$$507.92Y = -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt}$$

$$V = -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt}$$

$$C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW = \frac{dC}{dt}$$

$$\frac{dC}{dt} = 1036.6 - 10 \frac{dC}{dt} - 3.3\omega$$

$$\frac{dV}{dt} = 10 - \frac{32}{9} (X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt}) - \frac{160}{9} (X^2 + Y^2) \quad (4.23)$$

$$C(0) = 0$$

$$V(0) = 1.5191$$

$$X(0) = 0$$

$$Y(0) = 0$$

$$U(0) = 2.5318$$

$$W(0) = 0$$

$$Q(0) = 0$$

$$\omega(0) = 314$$

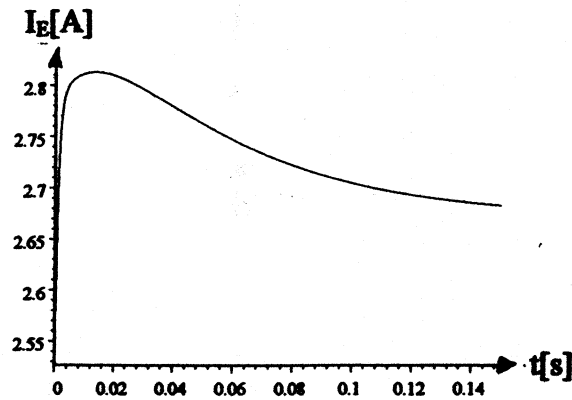


Fig.4.31. Variația în timp a lui  $I_E$ .

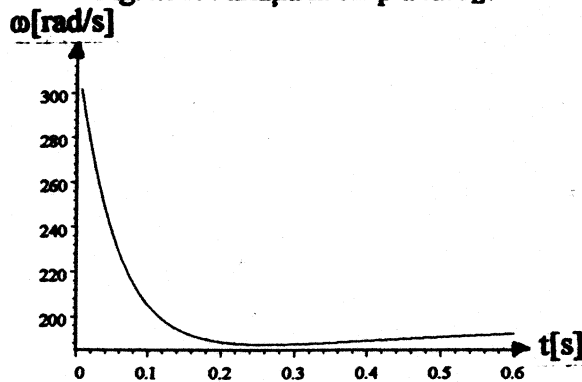


Fig.4.32. Variația în timp a lui  $\omega$ .

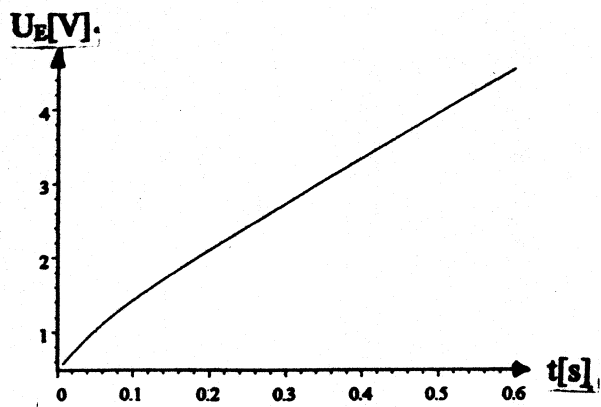


Fig.4.33. Variația în timp a lui  $U_E$ .

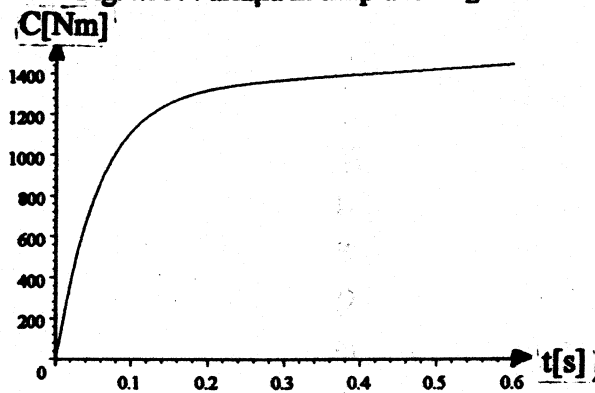


Fig.4.34. Variația în timp a cuplului motor.

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 507.92 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4.24)$$

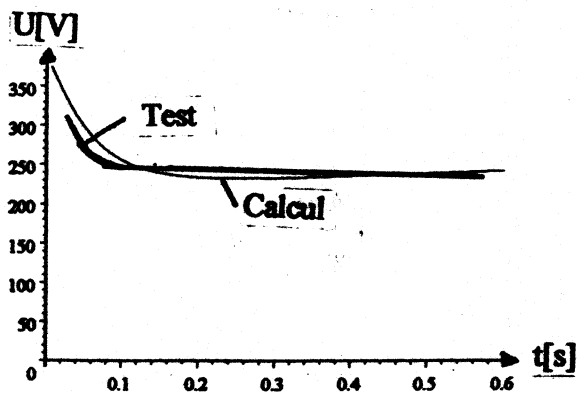


Fig.4.35. Variația în timp a lui  $U$ .

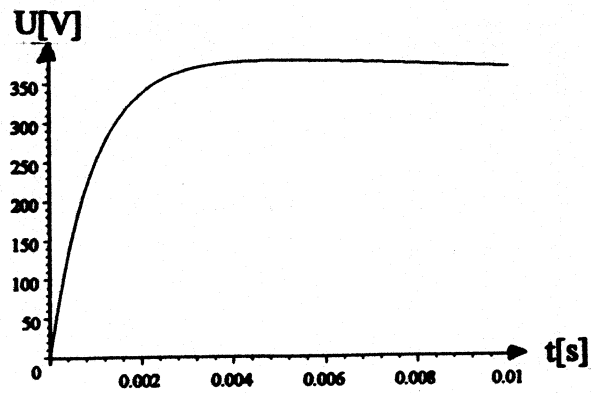


Fig.4.35'. Variația în timp a lui  $U$  (detaliu).

Curentul real se calculează cu relația:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (4.25)$$

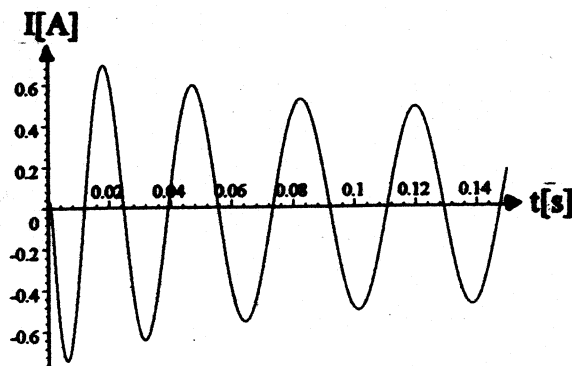


Fig.4.36. Variația în timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (4.26)$$

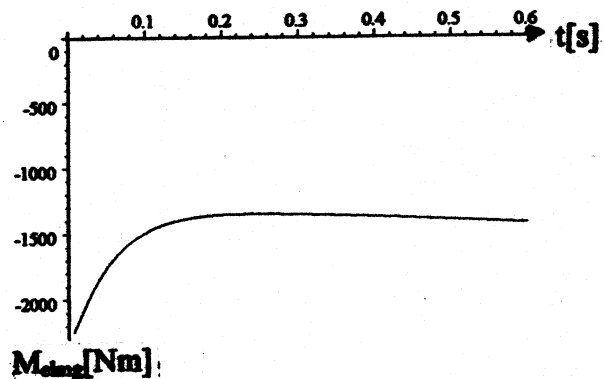


Fig.4.37. Variația în timp a lui  $M_{elec}$ .

**Concluzii la încărcarea rezistivă cu 75%  $I_N$ :**

1. Curentul  $I_E$  prin înfășurarea de excitație se modifică de la  $I_{E(0)}=2.53[A]$  la  $I_{E(0.01)}=2.83[A]$

și în regim stabilizat ajunge la  $2.76[A]$  având deci în regim tranzitoriu o variație de:  
 $\Delta I_E = [(2.83-2.76)/2.76] \cdot 100 = 2.5\%$ , deci redusă.

Ca urmare a intrării în funcție a regulatorului PI pe înfășurarea de excitație a GS curentul  $I_E$  crește la valoarea staționară:

$$I_E(\infty) = 2.76[A]$$

calculată și din sistemul condițiilor finale (4. 22) .

2. Frecvența tensiunii de alimentare a GS scade în primele 0.2[s] la 30.5 [Hz], având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta f = [(50-30.25)/50] \cdot 100 = 39.5\%$$
, deci semnificativă,

după care intră în funcțiune regulatorul de admisie a motorinei la motorul Diesel.

- 3 .Cuplul electromagnetic crește de la valoarea inițială 0 la valoarea finală :

$$M_{el\text{mag}} = 2173[Nm]$$

în mai puțin de 0. 1 [s].

Pe durata procesului tranzitoriu cuplul electromagnetic are o variație de:

$$\Delta M_{el\text{mag}} = [(2173-2350)/2173] \cdot 100 = 8\%$$
,

Creșterea semnificativă a cuplului are loc în primele 0,1 [s] de la 0 la 2350[Nm].

4. Cuplul motor C crește de la 0 la 1200[Nm] în aproximativ 0.1[s].

5. Tensiunea pe excitație ( $U_E$ ) crește de la valoarea inițială:

$$U_{E(0)}=1.519[V] \text{ la } U_{E(0.7)}=6[V]$$

având în regim tranzitoriu un salt de :

$$\Delta U_E = [(6-1.65)/1.65] \cdot 100 = 263\%$$
, foarte mare.

6. Tensiunea  $U$  la bornele GS în primele 0.002[s] variază de la 0 la 360[V] după care scade la 248[V] la  $t= 0.2[s]$ , având deci o variație de:

$$\Delta U = [(380-248)/380] \cdot 100 = 34\%$$
, deci semnificativă.

„ Golul” de tensiune are o durata redusă: 0.002[s]- o zecime de perioadă. Scăderea tensiunii cu 34% durează însă mult mai mult.

7. Curentul real  $I$  al GS crește la valoarea de regim în primele perioade de timp, neavând șocuri semnificative în timpul procesului tranzitoriu (fig.4.36), aceasta din cauza „golului” de tensiune ce apare în prima perioadă.

#### 4.1.2.3. Încărcare rezistivă 0-100%

La o încărcare rezistivă de 100%, rezistența conectată la borne are valoarea  $R = 0.318$  —(in calcule se lucrează cu  $0.318 * 1195.1 = 380.04$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ ) deoarece sunt mărimi raportate.

Inițial grupul funcționează cu turația și excitația peste valorile nominale și prin încărcare se ajunge la frecvența nominală și tensiunea nominală la bornele generatorului sincron.

La funcționarea în gol, condițiile inițiale sunt următoarele:

$$\begin{aligned} C(0) &= 0 - \text{cuplul electromagnetic} \\ V(0) &= 1.5191 - \text{tensiunea pe înfășurarea de excitație} \\ X(0) &= 0 - \text{curentul statoric din axa d} \\ Y(0) &= 0 - \text{curentul statoric din axa q} \\ U(0) &= 2.5318 - \text{curentul de excitație} \\ W(0) &= 0 - \text{curentul rotoric din axa d} \\ Q(0) &= 0 - \text{curentul rotoric din axa q} \\ \omega(0) &= 314 - \text{pulsăția unghiulară} \end{aligned} \tag{4.27}$$

Condițiile finale rezultă din sistemul:

$$\begin{aligned} 380X &= +0.7\omega Y \\ 380Y &= -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ V &= 0.6U \\ C - 1142YU &= 0 \\ 0 &= 1036.6 - 3.3\omega \\ 0 &= 10 - 10(X^2 + Y^2) \\ T^2 &= 0.318^2 * 1195^2(X^2 + Y^2) \end{aligned} \tag{4.28}$$

$$\left\{ \begin{aligned} T &= 380.01, C = 2890.2, \omega = 314.12, Y = 0.86554, \\ V &= 1.7544, U = 2.9240, X = 0.50084 \end{aligned} \right\} \tag{4.29}$$

$$380X = -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q$$

$$380Y = -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt}$$

$$V = -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt}$$

$$C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW = \frac{dC}{dt}$$

$$0.1 \frac{dC}{dt} = 1036.6 - 10 \frac{dC}{dt} - 3.3\omega$$

$$\frac{dV}{dt} = 10 - 2 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) - 10(X^2 + Y^2)$$

(4.30)

$$C(0) = 0$$

$$V(0) = 1.5191$$

$$X(0) = 0$$

$$Y(0) = 0$$

$$U(0) = 2.5318$$

$$W(0) = 0$$

$$Q(0) = 0$$

$$\omega(0) = 314$$

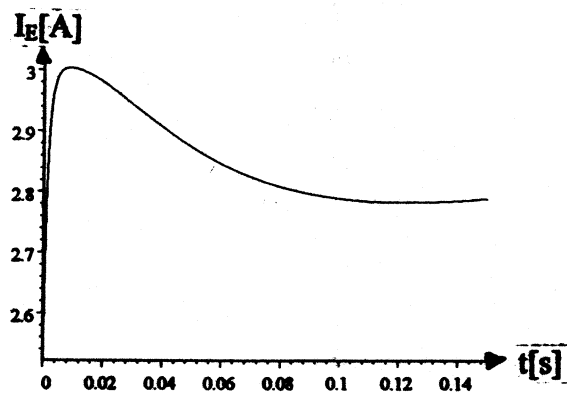


Fig.4.38. Variația în timp a lui  $I_E$ .

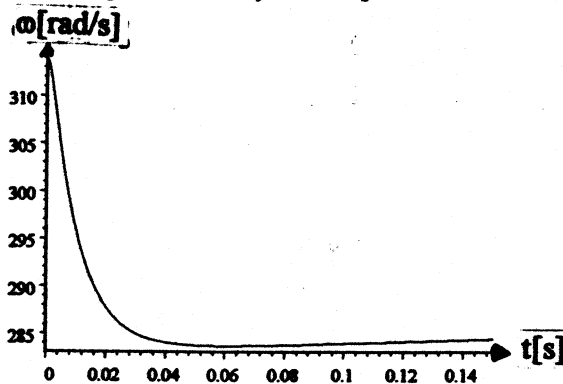


Fig.4.39. Variația în timp a lui  $\omega$ .

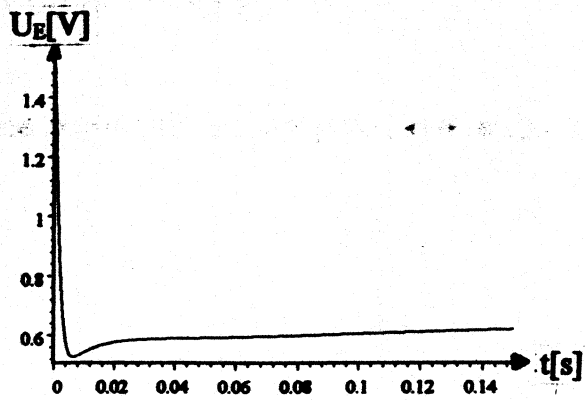


Fig.4.40. Variația în timp a lui  $U_E$ .

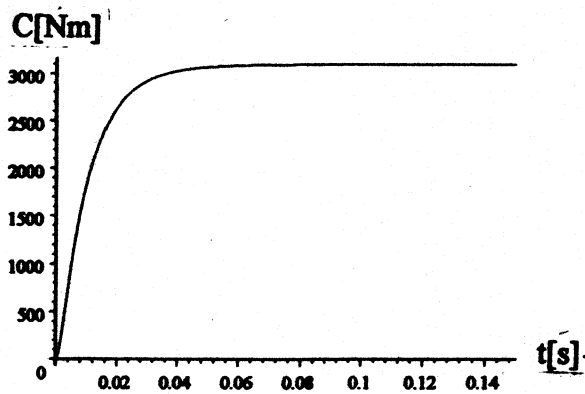


Fig.4.41. Variația în timp a cuplului motor.

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 380 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4.31)$$

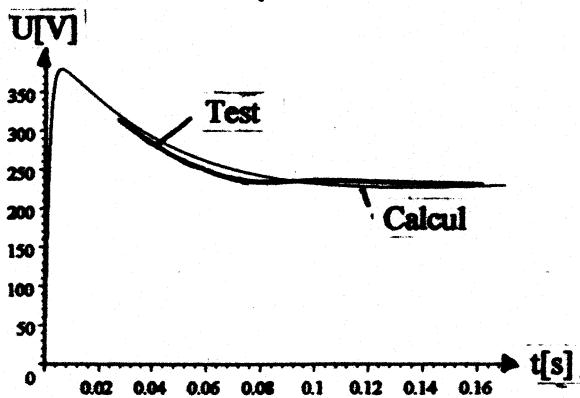


Fig.4.42. Variația în timp a lui  $U$ .

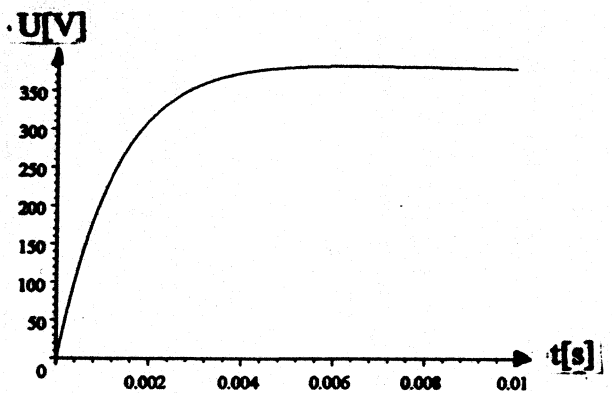


Fig.4.42'. Variația în timp a lui  $U$  (detaliu).

Curentul real se calculează cu relația:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (4.32)$$

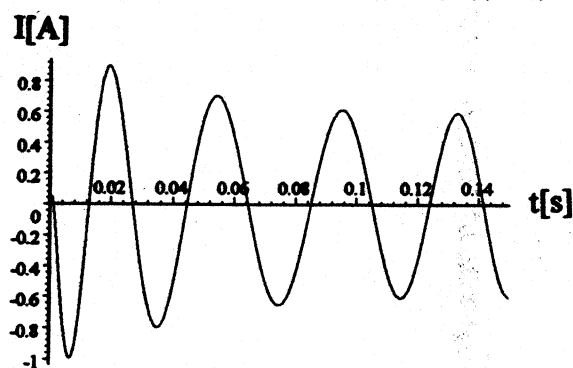


Fig.4.43. Variația în timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (4.33)$$

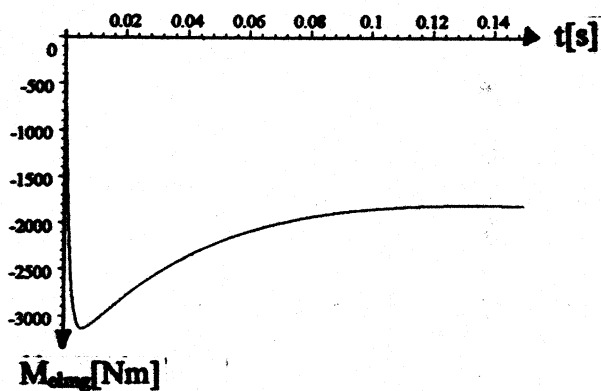


Fig.4.44. Variația în timp a lui  $M_{elec}$ .



**Concluzii la încărcarea rezistivă cu 100%  $I_N$ :**

1. Curentul  $I_E$  prin înfășurarea de excitație se modifică de la  $I_{E(0)}=2.53[A]$  la  $I_{E(0.01)}=3[A]$

și în regim stabilizat ajunge la  $2.92[A]$  având deci în regim tranzitoriu o variație de:  
 $\Delta I_E = [(3-2.92)/2.92] \cdot 100 = 2.7\%$ , deci redusă.

Ca urmare a intrării în funcție a regulatorului PI pe înfășurarea de excitație a GS curentul  $I_E$  crește la valoarea staționară:

$$I_E(\infty) = 2.92[A]$$

calculată și din sistemul condițiilor finale (4. 29) .

2. Frecvența tensiunii de alimentare a GS scade în primele  $0.02[s]$  la  $45 [Hz]$ , având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta f = [(50-45)/50] \cdot 100 = 9\%$$
, deci ne semnificativă,

după care intră în funcțiune regulatorul de admisie a motorinei la motorul Diesel.

- 3 .Cuplul electromagnetic crește de la valoarea inițială 0 la valoarea finală :

$$M_{el\text{mag}} = 3000[Nm]$$

în mai puțin de  $0.01 [s]$ .

Pe durata procesului tranzitoriu cuplul electromagnetic are o variație de:

$$\Delta M_{el\text{mag}} = [(3100-2890)/2890] \cdot 100 = 7\%$$
, deci redusă.

Creșterea semnificativă a cuplului are loc în primele  $0,01 [s]$  de la 0 la  $3000[Nm]$ .

4. Cuplul motor C crește de la 0 la  $3100[Nm]$  în aproximativ  $0.04[s]$ .

5. Tensiunea pe excitație ( $U_E$ ) scade de la valoarea inițială:

$$U_{E(0)}=1.519[V] \text{ la } U_{E(0.005)}=0.5[V]$$

având în regim tranzitoriu un salt de :

$$\Delta U_E = [(1.75-0.5)/1.75] \cdot 100 = 71\%$$
, foarte mare.

6. Tensiunea  $U$  la bornele GS în primele  $0.002[s]$  variază de la 0 la  $370[V]$  după care scade la  $240[V]$  la  $t=0.1[s]$ , având deci o variație de:

$$\Delta U = [(380-240)/380] \cdot 100 = 36\%$$
, deci semnificativă.

„ Golul” de tensiune are o durata redusă:  $0.002[s]$ - o zecime de perioadă. Scăderea tensiunii cu  $34\%$  durează însă mult mai mult.

7. Curentul real  $I$  al GS crește la valoarea de regim în primele perioade de timp, având în timpul procesului tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I = [(658-362)/658] \cdot 100 = 36\%$$
,

așa cum rezultă din figura 4.43

#### **4.1.2.3.1. Verificări experimentale**

Verificările experimentale au constat în înregistrarea tensiunii la borne în timpul procesului tranzitoriu, folosindu-se în acest scop un sistem de achiziție de date numeric.

Tesiunea la borne era înregistrată la un interval de eșantionare de 0,002s folosindu-se în acest scop aparate TEXAS INSTRUMENTS specializate. Înregistrările s-au făcut pentru conectări bruște de 25%, 75% și 100%.

În figurile 4.18 și 4.19 se dau rezultatele simulărilor numerice și cele experimentale la conectarea motorului de 75 Kw, referitoare la tensiunea la borne  $U$ , pentru două valori ale constantei de timp  $T_i$  a regulatorului de pe înfășurarea de excitație.

În figura 4.28 se dau rezultatele teoretice și verificările experimentale ale tensiunii la o încărcare bruscă de 25%, pe intervalul de timp 0-0,6[s].

În figura 4.35 s-a verificat experimental variația tensiunii la o încărcare bruscă de 75%, tot pe un interval de timp de 0-0,6[s].

În figura 4.42 se dau rezultatele teoretice și experimentale pentru o încărcare de 100%, înregistrându-se tensiunea la bornele generatorului pe intervalul de timp 0-0,6[s].

Aceleași verificări experimentale s-au făcut și la încărcările 25%-50%(figura 4.49), 25%-75%(figura 4.56), 25%-100%(figura 4.63).

La descărcări la generatorul sincron nereglat, cu o singură înfășurare de excitație, de 100%-25%, verificările experimentale se dau în figura 4.68, iar la descărcările de 100%-50% și 100%-75% în figurile 4.73 și 4.78.

Rezultatele experimentale au confirmat rezultatele obținute prin modelare.

Erorile între experiment și calcul nu depășesc 5%.

Normele de registru naval au în vedere precizări privind tensiunea de alimentare de la bornele generatorului sincron și din acest motiv s-au verificat experimental aceste valori.

În paralel cu instrumentele digitale (puse la dispoziție de o firmă specializată în înregistrări numerice) s-a montat la bornele generatorului sincron și un osciloscop cu remanență, care a confirmat măsurătorile numerice.

Concordanța bună între rezultatele obținute pe model și cele obținute experimental validează atât:

-modelul ortogonal cât și

-calculul parametrilor din modelul ortogonal.

Influența temperaturii asupra rezultatelor teoretice și experimentale nu este semnificativă, aceasta deoarece procesul tranzitoriu fiind foarte scurt rezistențele înfășurărilor nu se modifică sensibil în acest interval de timp.

În funcționarea staționară, temperatura este constantă și, în acest caz, parametrii nu suferă modificări.

#### 4.1.2.4. Încărcare rezistivă 25%-50%

La o încărcare rezistivă de la 25% la 50%, rezistența conectată la borne are valoarea  $R = 0.637$  – (în calcule se lucrează cu  $0.637 * 1195.1 = 761.22$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ ) mărimile fiind raportate.

Inițial grupul funcționează la o încărcare de 25% și prin încărcare la 50% se ajunge la frecvența nominală și tensiunea nominală la bornele generatorului sincron.

Condițiile inițiale se obțin din rezolvarea sistemului:

$$\begin{aligned}1523.8X &= +0.7\omega Y \\1523.8Y &= -0.7\omega X + 0.478\omega U \\V &= 0.6U \\C - 1142YU &= 0 \\0 &= 1036.6 - 3.3\omega \\0 &= 10 - 160(X^2 + Y^2) \\T &= 1523.8\sqrt{X^2 + Y^2}\end{aligned}\tag{4.34}$$

cu soluția

$$\left\{ \begin{array}{l} T = 380.95, \omega = 314.12, X = 3.5705 \times 10^{-2} \\ V = 1.538, C = 724.35, U = 2.5634, Y = 0.24744 \end{array} \right\}\tag{4.35}$$

Condițiile finale rezultă din sistemul:

$$\begin{aligned}761.22X &= +0.7\omega Y \\761.22Y &= -0.7\omega X + 0.478\omega U \\V &= 0.6U \\C - 1142YU &= 0 \\0 &= 1036.6 - 3.3\omega \\T &= 380 \\T &= 761.22\sqrt{X^2 + Y^2}\end{aligned}\tag{4.36}$$

cu soluția:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega = 314.12, X = 0.13853, C = 1442.8, V = 1.5806, \\ U = 2.6343, Y = 0.47959, T = 380.0 \end{array} \right\}\tag{4.37}$$

$$761.22X = -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dV}{dt} - 0.346\omega Q$$

$$761.22Y = -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt}$$

$$V = -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dV}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dV}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt}$$

$$C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW = \frac{dC}{dt}$$

$$\frac{dC}{dt} = 1036.6 - 10 \frac{dC}{dt} - 3.3\omega$$

$$0.1 \frac{dV}{dt} = -\left(\frac{dV}{dt} + 10(V - 1.58)\right)$$

(4.38)

$$C(0) = 724.35$$

$$V(0) = 1.538$$

$$X(0) = 0.035705$$

$$Y(0) = 0.24744$$

$$U(0) = 2.5634$$

$$W(0) = 0$$

$$Q(0) = 0$$

$$\omega(0) = 314$$

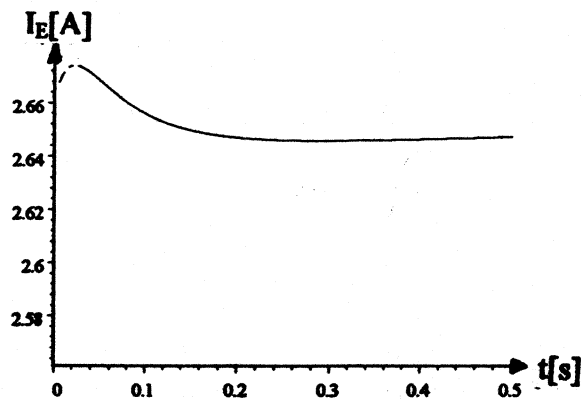


Fig.4.45. Variația în timp a lui  $I_E$ .

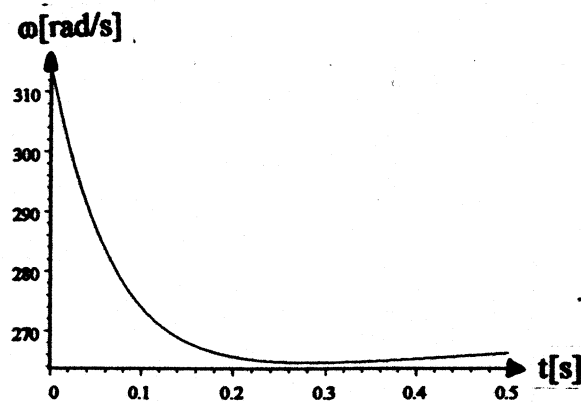


Fig.4.46. Variația în timp a lui  $\omega$ .

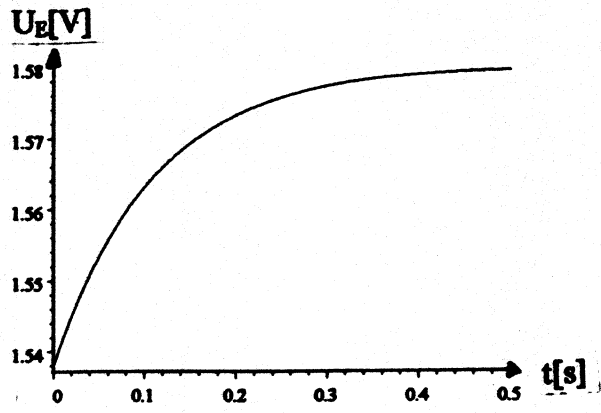


Fig.4.47. Variația în timp a lui  $U_E$ .

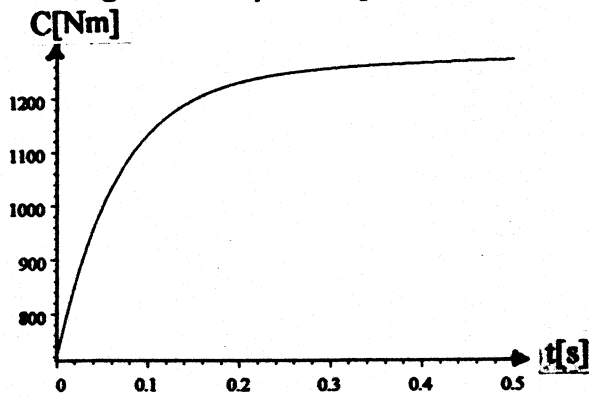


Fig.4.48. Variația în timp a cuplului motor.

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 761.22 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4.39)$$

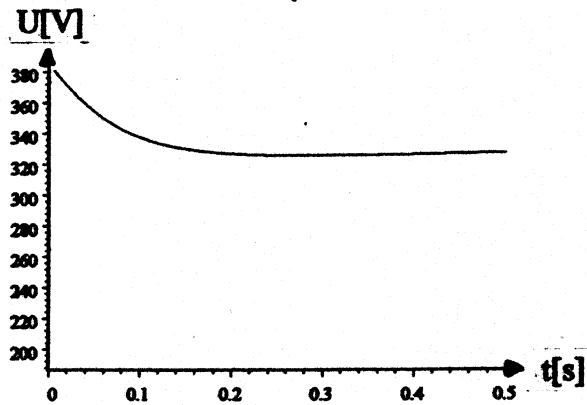


Fig.4.49. Variația în timp a lui  $U$ .

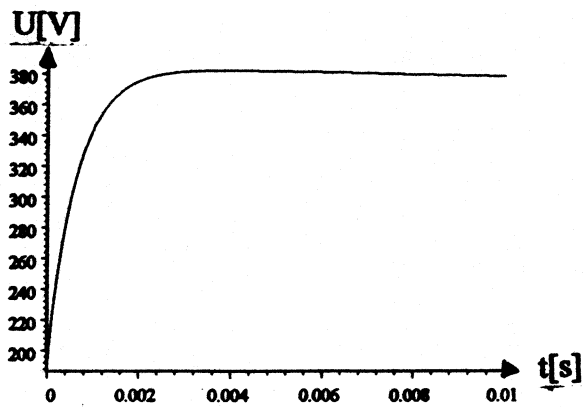


Fig.4.49'. Variația în timp a lui  $U$  (detaliu).

Curentul real se calculează cu relația:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (4.40)$$

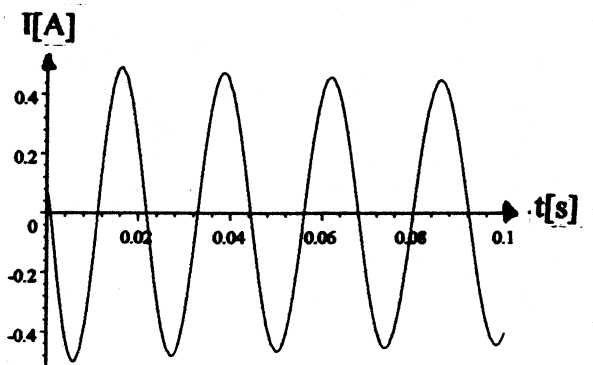


Fig.4.50. Variația în timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (4.41)$$

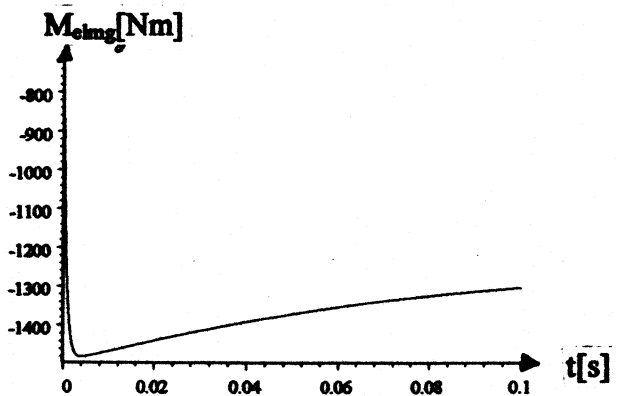


Fig.4.51. Variația în timp a lui  $M_{elec}$ .

Concluzii la încărcarea rezistivă de la 25% la 50%  $I_N$ :

1. Curentul  $I_E$  prin înfășurarea de excitație se modifică de la

$$I_{E(0)}=2.56[\text{A}] \text{ la } I_{E(0.004)}= 2.68[\text{A}]$$

și în regim stabilizat ajunge la 2.63[A] având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I_E = [(2.68-2.63)/2.63] \cdot 100 = 1.9\%, \text{ deci redusă.}$$

Ca urmare a intrării în funcție a regulatorului PI pe înfășurarea de excitație a GS curentul  $I_E$  crește la valoarea staționară:

$$I_E(\infty) = 2.63[\text{A}]$$

calculată și din sistemul condițiilor finale (4.36).

2. Frecvența tensiunii de alimentare a GS scade în primele 0.2[s] la 41.4 [Hz], având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta f = [(50-41.47)/50] \cdot 100 = 17\%, \text{ deci semnificativă,}$$

după care intră în funcțiune regulatorul de admisie a motorinei la motorul Diesel.

3. Cuplul electromagnetic crește de la valoarea inițială 724 la valoarea finală :

$$M_{\text{elmag}} = 1442[\text{Nm}]$$

în mai puțin de 0.01 [s].

Pe durata procesului tranzitoriu cuplul electromagnetic are o variație de:

$$\Delta M_{\text{elmag}} = [(1442-724)/1442] \cdot 100 = 49.8\%, \text{ deci importantă}$$

Creșterea semnificativă a cuplului are loc în primele 0,01 [s] de la 724 la 1442[Nm].

4. Cuplul motor C crește de la 724 la 1300[Nm] în aproximativ 0.2[s].

5. Tensiunea pe excitație ( $U_E$ ) crește de la valoarea inițială:

$$U_{E(0)}=1.538[\text{V}] \text{ la } U_{E(0.7)}=1.6[\text{V}]$$

având în regim tranzitoriu un salt de :

$$\Delta U_E = [(1.6 - 1.538) / 1.538] \cdot 100 = 4 \%, \text{ deci mică.}$$

6. Tensiunea  $U$  la bornele GS în primele 0.002[s] variază de la 200[V] la 380[V] după care scade la 330[V] la  $t=0.1$ [s], având deci o variație de:

$$\Delta U = [(380-330)/380] \cdot 100 = 13\%, \text{ deci semnificativă.}$$

Scăderea de tensiune are o durată redusă: 0.002[s]- o zecime de perioadă. Scăderea tensiunii cu 13% durează însă mult mai mult.

7. Curentul real  $I$  al GS crește la valoarea de regim în primele perioade de timp, având în timpul procesului tranzitoriu o variație așa cum rezultă din figura 4.50:

#### 4.1.2.5. Încărcare rezistivă 25%-75%

La o încărcare rezistivă de la 25% la 75%, rezistența conectată la borne are valoarea  $R = 0.425$  – (în calcule se lucrează cu  $0.425 \cdot 1195.1 = 507.92$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ ) mărimile fiind raportate.

Inițial grupul funcționează la o încărcare de 25% și prin încărcare la 75% se ajunge la frecvența nominală și tensiunea nominală la bornele generatorului sincron.

Condițiile inițiale se obțin din rezolvarea sistemului:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1523.8X = +0.7\omega Y \\ 1523.8Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ V = 0.6U \\ C - 1142YU = 0 \\ 0 = 1036.6 - 3.3\omega \\ 0 = 10 - 160(X^2 + Y^2) \\ T = 1523.8\sqrt{X^2 + Y^2} \end{array} \right. \quad (4.42)$$

cu soluția

$$\left\{ \begin{array}{l} T = 380.95, \omega = 314.12, X = 3.5705 \times 10^{-2} \\ V = 1.538, C = 724.35, U = 2.5634, Y = 0.24744 \end{array} \right. \quad (4.43)$$

Condițiile finale rezultă din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 507.92X = +0.7\omega Y \\ 507.92Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ V = 0.6U \\ C - 1142YU = 0 \\ 0 = 1036.6 - 3.3\omega \\ T = 380 \\ T = 507.92\sqrt{X^2 + Y^2} \end{array} \right. \quad (4.44)$$

cu soluția:

$$\left\{ \begin{array}{l} U = 2.7578, X = 0.29723, V = 1.6547, C = 2162.3, \\ Y = 0.68657, \omega = 314.12, T = 380.0 \end{array} \right. \quad (4.45)$$

Sistemul de ecuații diferențiale care definește regimul tranzitoriu se scrie sub forma:



$$\begin{aligned}
 507.92X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\
 507.92Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\
 V &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\
 C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= \frac{dC}{dt} \\
 \frac{dC}{dt} &= 1036.6 - 10 \frac{dC}{dt} - 3.3\omega \\
 0.1 \frac{dV}{dt} &= -\left(\frac{dV}{dt} + 10(V - 1.58)\right) \\
 C(0) &= 724.35 \\
 V(0) &= 1.538 \\
 X(0) &= 0.035705 \\
 Y(0) &= 0.24744 \\
 U(0) &= 2.5634 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned}
 \tag{4.46}$$

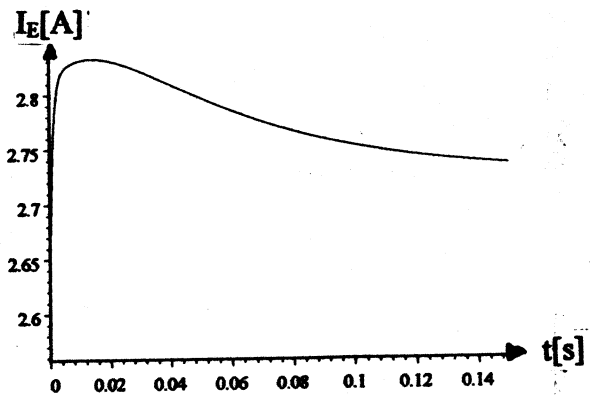


Fig.4.52. Variația în timp a lui  $I_E$ .

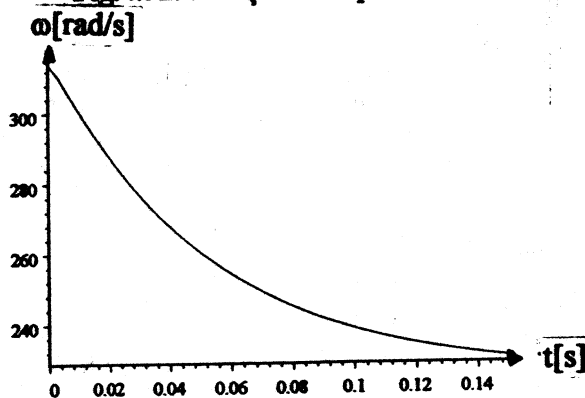


Fig.4.53. Variația în timp a lui  $\omega$ .

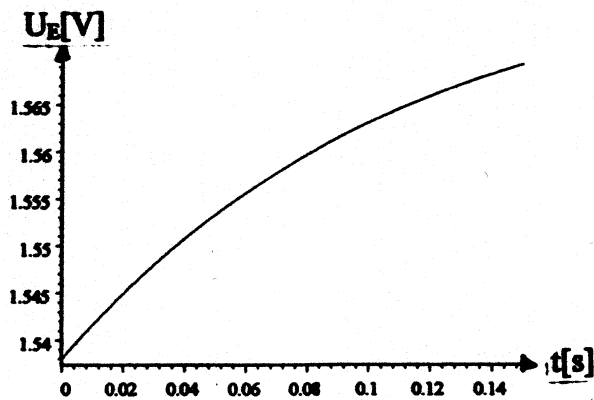


Fig.4.54. Variația în timp a lui  $U_E$ .

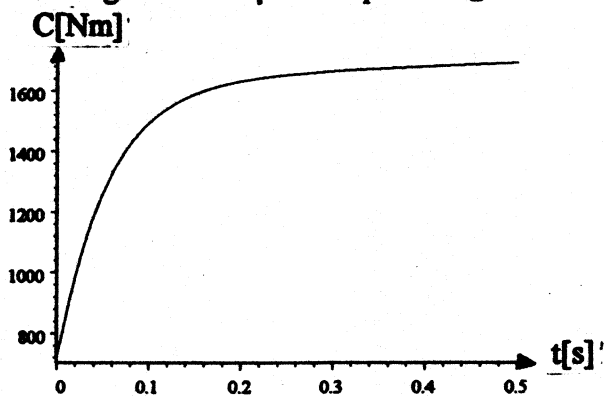


Fig.4.55. Variația în timp a cuplului motor.

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 507.92 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4.47)$$

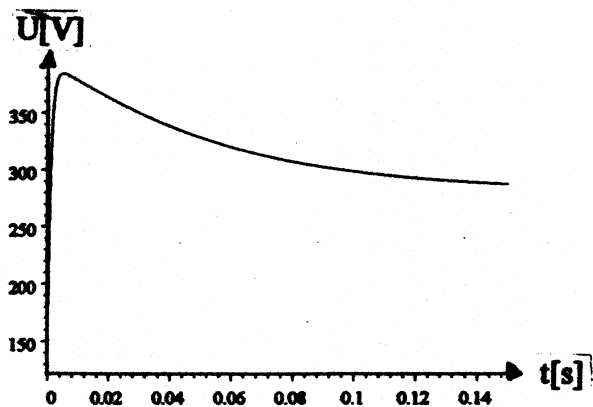


Fig.4.56. Variația în timp lui  $U$ .

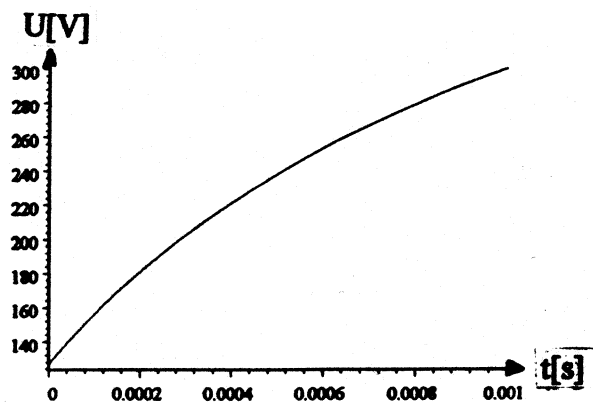


Fig.4.56'. Variația în timp lui  $U$  (detaliu).

Curentul real se calculează cu relația:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (4.48)$$

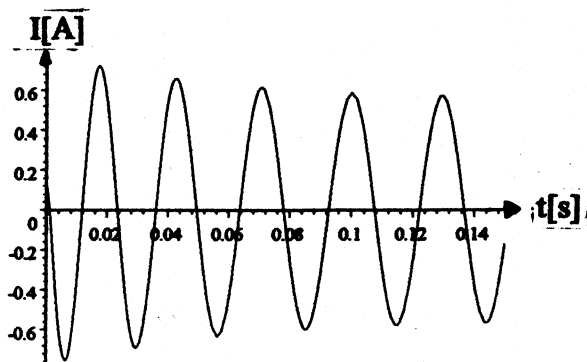


Fig.4.57. Variația în timp lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (4.49)$$

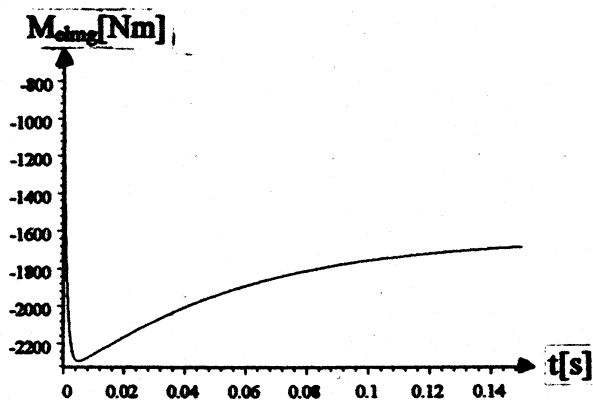


Fig.4.58. Variația în timp lui  $M_{sing}$ .

Concluzii la încărcarea rezistivă da la 25% la 75%  $I_N$ :

1. Curentul  $I_E$  prin înfășurarea de excitație se modifică de la

$$I_{E(0)}=2.56[A] \text{ la } I_{E(0.02)}=2.85[A]$$

și în regim stabilizat ajunge la 2.75[A] având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I_E = [(2.85 - 2.75) / 2.75] \cdot 100 = 3.6\%, \text{ deci redusă.}$$

Ca urmare a intrării în funcție a regulatorului PI pe înfășurarea de excitație a GS curentul  $I_E$  crește la valoarea staționară:

$$I_E(\infty) = 2.75[A]$$

calculată și din sistemul condițiilor finale (4. 45) .

2. Frecvența tensiunii de alimentare a GS scade în primele 0.1[s] la 36.6 [Hz], având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta f = [(50 - 36.6) / 50] \cdot 100 = 26.6\%, \text{ deci semnificativă,}$$

după care intră în funcțiune regulatorul de admisie a motorinei la motorul Diesel.

3. Cuplul electromagnetic crește de la valoarea inițială 724[Nm] la valoarea finală :

$$M_{\text{elmag}} = 2162[\text{Nm}]$$

în mai puțin de 0. 01 [s].

Pe durata procesului tranzitoriu cuplul electromagnetic are o variație de:

$$\Delta M_{\text{elmag}} = [(2300 - 724) / 2162] \cdot 100 = 72\%, \text{ deci importantă.}$$

Creșterea semnificativă a cuplului are loc în primele 0,01 [s] de la 724 la 2300[Nm].

4. Cuplul motor C crește de la 724[Nm] la 1700[Nm] în aproximativ 0.2[s].

5. Tensiunea pe excitație ( $U_E$ ) crește de la valoarea inițială:

$$U_{E(0)}=1.538[V] \text{ la } U_{E(0.2)}=1.6[V]$$

având în regim tranzitoriu un salt de :

$$\Delta U_E = [(1.6 - 1.538) / 1.538] \cdot 100 = 1.3\%, \text{ foarte mic.}$$

6. Tensiunea  $U$  la bornele GS în primele 0.002[s] variază de la 130[V] la 380[V] după care scade la 290[V] la  $t = 0.15[s]$ , având deci o variație de:

$$\Delta U = [(380 - 290) / 380] \cdot 100 = 23\%, \text{ destul de mare.}$$

Scăderea de tensiune are o durată redusă: 0.002[s]- o zecime de perioadă. Scăderea tensiunii cu 23% durează însă mult mai mult.

7. Curentul real  $I$  al GS crește la valoarea de regim în primele perioade de timp, având în timpul procesului tranzitoriu o variație așa cum rezultă din figura 4.57.

#### 4.1.2.6. Încărcare rezistivă 25%-100%

La o încărcare rezistivă de la 25% la 100%, rezistența conectată la borne are valoarea  $R = 0.318$  – (în calcule se lucrează cu  $0.318 * 1195.1 = 380.04$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ ) mărimile fiind raportate.

Inițial grupul funcționează la o încărcare de 25% și prin încărcare la 100% se ajunge la frecvența nominală și tensiunea nominală la bornele generatorului sincron.

Condițiile inițiale se obțin din rezolvarea sistemului:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1523.8X = +0.7\omega Y \\ 1523.8Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ V = 0.6U \\ C - 1142YU = 0 \\ 0 = 1036.6 - 3.3\omega \\ 0 = 10 - 160(X^2 + Y^2) \\ T = 1523.8\sqrt{X^2 + Y^2} \end{array} \right. \quad (4.50)$$

cu soluția

$$\left\{ \begin{array}{l} T = 380.95, \omega = 314.12, X = 3.5705 \times 10^{-2} \\ V = 1.538, C = 724.35, U = 2.5634, Y = 0.24744 \end{array} \right. \quad (4.51)$$

Condițiile finale rezultă din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 380.04X = +0.7\omega Y \\ 380.04Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ V = 0.6U \\ C - 1142YU = 0 \\ 0 = 1036.6 - 3.3\omega \\ T = 380 \\ T = 380.04\sqrt{X^2 + Y^2} \end{array} \right. \quad (4.52)$$

cu soluția:

$$\left\{ \begin{array}{l} V = 1.7543, C = 2889.9, U = 2.9239, X = 0.50075, \\ Y = 0.86547, \omega = 314.12, T = 380.0 \end{array} \right. \quad (4.53)$$

Sistemul de ecuații diferențiale, care definește regimul tranzitoriu se scrie sub forma:

$$\begin{aligned}
 380.04X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dV}{dt} - 0.346\omega Q \\
 380.04Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\
 V &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dV}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dV}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\
 C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= \frac{dC}{dt} \\
 \frac{dC}{dt} &= 1036.6 - 10 \frac{dC}{dt} - 3.3\omega \\
 0.1 \frac{dV}{dt} &= -\left(\frac{dV}{dt} + 10(V - 1.58)\right) \\
 C(0) &= 724.35 \\
 V(0) &= 1.538 \\
 X(0) &= 0.035705 \\
 Y(0) &= 0.24744 \\
 U(0) &= 2.5634 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned}
 \tag{4.54}$$

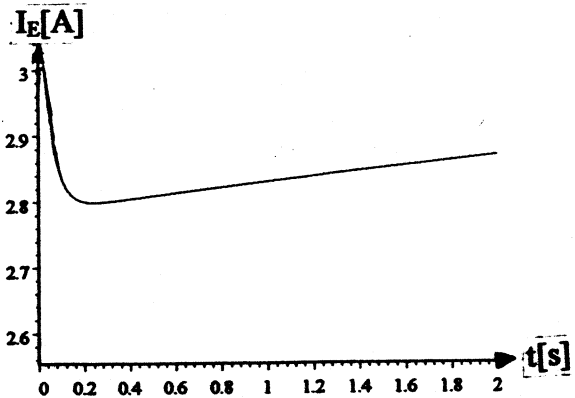


Fig.4.59. Variația în timp a lui  $I_E$ .

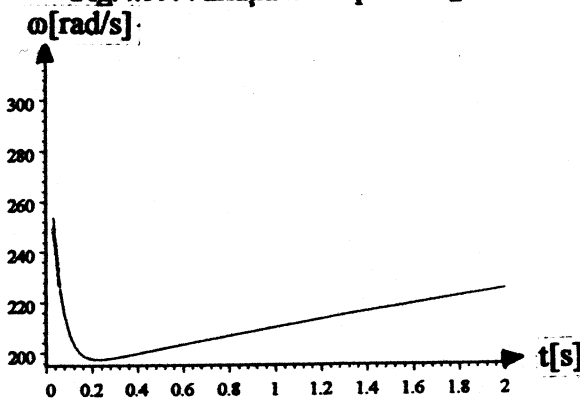


Fig.4.60. Variația în timp a lui  $\omega$ .

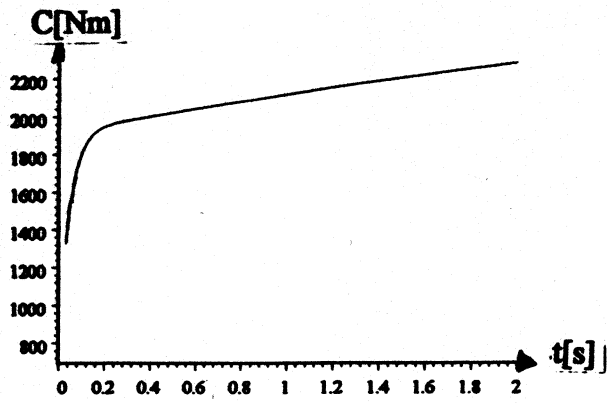


Fig.4.61. Variația în timp a cuplului motor.

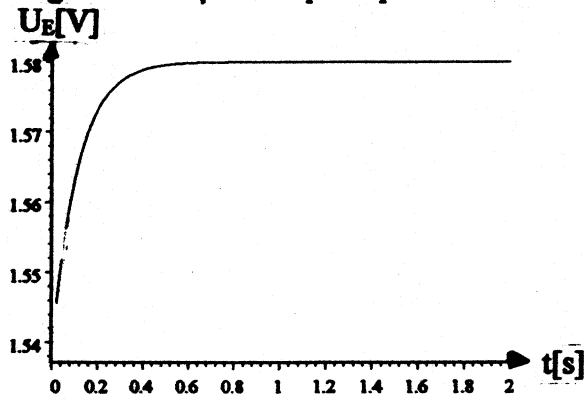


Fig.4.62. Variația în timp a lui  $U_E$ .

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 380.04 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4.55)$$

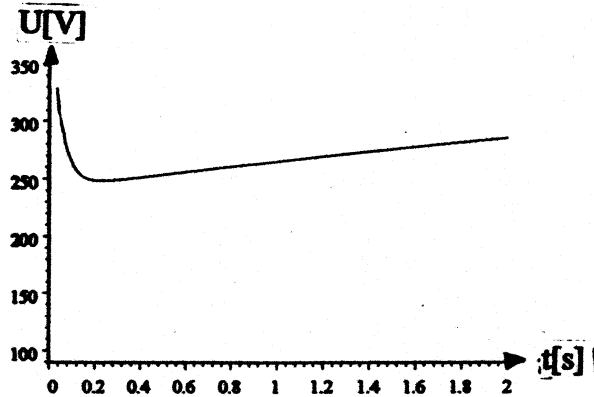


Fig.4.63. Variația în timp a lui  $U$ .

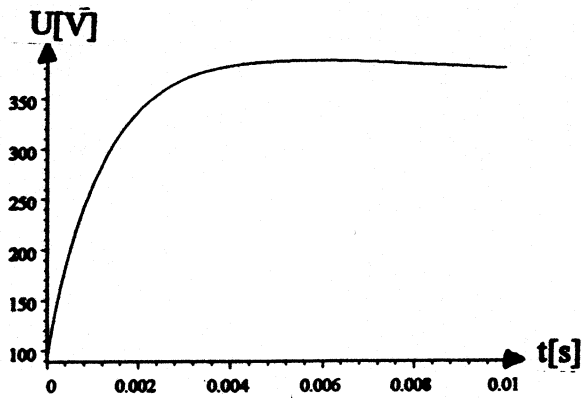


Fig.4.63'. Variația în timp a lui  $U$  (detaliu).

Curentul real se calculează cu relația:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (4.56)$$

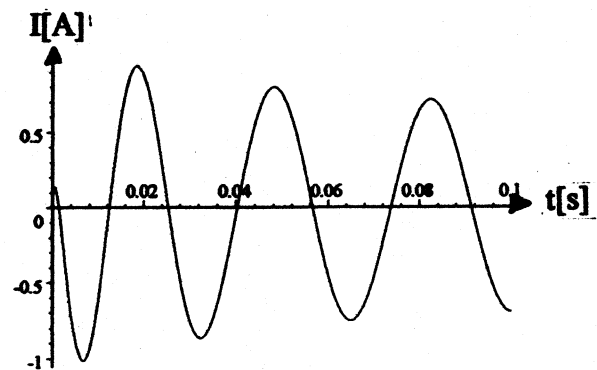


Fig.4.64. Variația în timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (4.57)$$

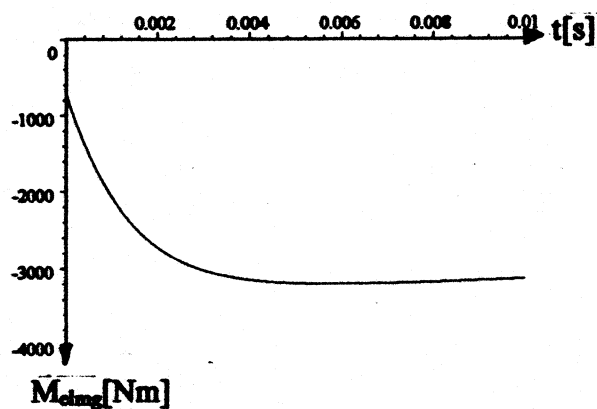


Fig.4.65. Variația în timp a lui  $M_{omag}$ .



Concluzii la încărcarea rezistivă da la 25% la 100%  $I_N$ :

1. Curentul  $I_E$  prin înfășurarea de excitație se modifică de la

$$I_{E(0)}=2.56[A] \text{ la } I_{E(0.1)}=3[A]$$

și în regim stabilizat ajunge la 2.9[A] având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I_E = [(3-2.9)/2.9] \cdot 100 = 3.4\%, \text{ deci redusă.}$$

Ca urmare a intrării în funcție a regulatorului PI pe înfășurarea de excitație a GS curentul  $I_E$  crește la valoarea staționară:

$$I_E(\infty) = 2.9[A]$$

calculată și din sistemul condițiilor finale (4. 52) .

2. Frecvența tensiunii de alimentare a GS scade în primele 0.1[s] la 31.8 [Hz], având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta f = [(50-31.8)/50] \cdot 100 = 36\%, \text{ deci semnificativă,}$$

după care intră în funcțiune regulatorul de admisie a motorinei la motorul Diesel.

3 .Cuplul electromagnetic crește de la valoarea inițială 724[Nm] la valoarea finală :

$$M_{\text{elmag}} = 2889[\text{Nm}]$$

în mai puțin de 0. 01 [s].

Pe durata procesului tranzitoriu cuplul electromagnetic are o variație de:

$$\Delta M_{\text{elmag}} = [(3200-724)/2889] \cdot 100 = 85\%, \text{ deci importantă.}$$

Creșterea semnificativă a cuplului are loc în primele 0,01 [s] de la 724[Nm] la 3200[Nm].

4. Cuplul motor C crește de la 724[Nm] la 2200[Nm] în aproximativ 0.8[s].

5. Tensiunea pe excitație ( $U_E$ ) crește de la valoarea inițială:

$$U_{E(0)}=1.538[V] \text{ la } U_{E(0.4)}=1.58[V]$$

având în regim tranzitoriu un salt de :

$$\Delta U_E = [(1.75-1.538)/1.75] \cdot 100 = 12\%, \text{ deci semnificativ.}$$

6. Tensiunea  $U$  la bornele GS în primele 0.002[s] variază de la 100[V] la 370[V] după care scade la 250[V] la  $t= 0.15[s]$ , având deci o variație de:

$$\Delta U = [(380-250)/380] \cdot 100 = 34\%, \text{ destul de mare.}$$

Variația tensiunii la borne  $U$  în timpul procesului tranzitoriu are două faze importante :

1. în prima fază apare o : “cădere” a tensiunii de la 380[V] la 100[V] adică 73%, după care crește din nou la 380[V]

2. între 0.04[s] ÷ 0.02[s] tensiunea scade la 250[V], adică 34%.

Prin urmare în timpul procesului tranzitoriu apar două minime ale tensiunii la borne.

7. Curentul real  $I$  al GS crește la valoarea de regim în primele perioade de timp, având în timpul procesului tranzitoriu o variație așa cum rezultă din figura 4.64.

## **4.2.Regimuri tranzitorii la generatorul sincron cu o înfășurare de excitație , nereglat**

La grupul Diesel- GS nereglat, funcționarea se va stabiliza pe caracteristica naturală a motorului Diesel. În cazul în care reguletoarele nu funcționează , GS se va stabiliza pe caracteristica naturală a motorului Diesel și aceste regimuri sunt prevăzute în normele registrului naval.

### **4.2.1.Zona de stabilitate**

La caracteristica naturală a motorului Diesel , zona de stabilitate se găsește pe ramura parabolei corespunzătoare turației de regim nominal așa ca-n figurile 4.1 și 2.2.

La mărirea sarcinii la bornele GS cuplul la arbore se mărește și deci turația va scădea.

Scăderea turației grupului motor- generator determină :

- scăderea t.e.m. polare:  $U_{eE} = \omega M_{EI} = 2\pi n M_{EI}$ ;
- scăderea reactanțelor  $X_d$  și  $X_q$  ( $X = \omega L = 2\pi n L$ ).

Termenii  $X_q I$ ;  $X_d I$  din relațiile (2.10) nu au o pondere mare așa cum o are termenul ce conține pe  $U_{eE}$  și deci scăderea lui  $U_{eE}$  duce la o scădere și mai pronunțată a tensiunii la bornele generatorului sincron așa cum se va exemplifica pe generatorul de 455kVA.

Generatorul sincron naval de 455kVA funcționează stabil , fără reguletoare pe turație și excitație numai la modificări mici ale sarcinii (sub 10%).

Problema variației puterii, în limitele stabilității grupului motor Diesel- generator sincron , la excitație constantă și debit constant de combustibil la motorul Diesel (deci fără reglaje pe excitație și turație), ține seama de:

- valoarea puterii active sau de
- valoarea rezistenței conectate la bornele generatorului sincron.

### **4.2.2.Mărirea zonei de stabilitate**

Mărirea zonei de stabilitate se poate realiza în absența reguletoarelor prin:

- valoarea debitului de motorină și prin
- valoarea curentului prin înfășurarea de excitație.

În cazul în care curentul de excitație este variabil și debitul de motorină la motorul Diesel rămâne constant , zona de stabilitate se reduce la o curbă (curba AB figura 2.5).

În cazul în care curentul de excitație este constant și se modifică debitul de motorină la motorul Diesel zona de stabilitate este curba CD (figura 2.6).

În continuare se dau descărcările de sarcină la generatorul sincron nereglat.

### 4.2.3. Descărcare rezistivă

La bornele generatorului sincron se conectează consumatori rezistivi , corespunzătorilor valorilor de: (25%, 50%, 75% și 100%)  $\frac{U_N}{I_N}$ . Se au în vedere descărcări de la funcționarea în sarcină nominală la valorile de mai sus, pentru valori diferite ale momentului de inerție axial  $J$ , așa cum prevăd normele din registrul naval.

Generatorul funcționează nereglat cu tensiunea la bornele excitației  $U_E = ct$ , pe caracteristica naturală a motorului Diesel, tensiunea și turația stabilindu-se la valorile impuse de rezistența de sarcină. Inițial frecvența era de 50[Hz], adică turația nominală la motorul Diesel 1500[rpm]. Prin descărcarea generatorului și menținerea constantă a excitației, rezultă tensiuni și frecvențe diferite de cele nominale.

#### 4.2.3.1. Descărcare rezistivă 100% - 25%

$$R = 1.275[\Omega]$$

La o descărcare rezistivă de la 100% la 25%, rezistența conectată la borne are valoarea  $R = 1.275$  –(în calcule se lucrează cu  $1.275 * 1195.1 = 1520$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ ) mărimile fiind raportate.

Generatorul funcționează la tensiune de excitație constantă.

Condițiile inițiale rezultă din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 380X = 0.7\omega Y \\ 380Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ E = +0.6U \\ -0.076(\omega^2 - 439\omega + D) - 1142YU = 0 \\ \omega = 314 \\ T = 380\sqrt{X^2 + Y^2} \\ X^2 + Y^2 = 1 \end{array} \right. \quad (4.58)$$

unde  $D$  este o măsură a debitului de motorină la motorul Diesel.

Soluția sistemului este:

$$\{\omega = 314.0, D = 1206.7, X = 0.50070, T = 380.0, Y = 0.86562, U = 2.9248, E = 1.7549\} \quad (4.59)$$

Condițiile finale rezultă din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1520X = 0.7\omega Y \\ 1520Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ 1.7549 = 0.6U \\ -0.076(\omega^2 - 439\omega + 1206.7) - 1142YU = 0 \\ T = 1520\sqrt{X^2 + Y^2} \end{array} \right. \quad (4.60)$$

cu soluția:

$$\{U = 2.9248, \omega = 396.84, Y = 0.35321, X = 6.4551 \times 10^{-2}, T = 545.77\} \quad (4.61)$$

Sistemele de ecuații diferențiale care definesc regimurile tranzitorii, la trei valori ale lui J, se scriu sub forma:

$$a) J = 1[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 1520X = -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\ 1520Y = -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\ 1.7549 = -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\ 0 = -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\ 0 = -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\ 0.076(\omega - 21)(418 - \omega) - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW = \frac{d\omega}{dt} \\ X(0) = 0 \\ Y(0) = 0 \\ U(0) = 2.9248 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ \omega(0) = 314 \end{array} \right. \quad (4.62)$$

$$b) J = 10[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$\left. \begin{aligned} 1520X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\ 1520Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\ 1.7549 &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\ 0.076(\omega - 21)(418 - \omega) - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= 10 \frac{d\omega}{dt} \\ X(0) &= 0 \\ Y(0) &= 0 \\ U(0) &= 2.9248 \\ W(0) &= 0 \\ Q(0) &= 0 \\ \omega(0) &= 314 \end{aligned} \right\} (4.63)$$

$$c) J = 100[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$\left. \begin{aligned} 1520X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\ 1520Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\ 1.7549 &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\ 0.076(\omega - 21)(418 - \omega) - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= 100 \frac{d\omega}{dt} \\ X(0) &= 0 \\ Y(0) &= 0 \\ U(0) &= 2.9248 \\ W(0) &= 0 \\ Q(0) &= 0 \\ \omega(0) &= 314 \end{aligned} \right\} (4.64)$$

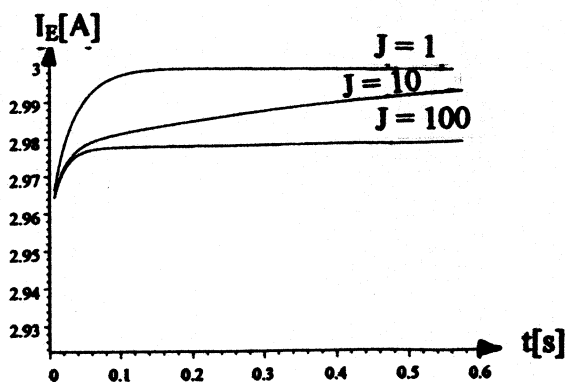


Fig.4.66. Variația în timp a lui  $I_E$ .

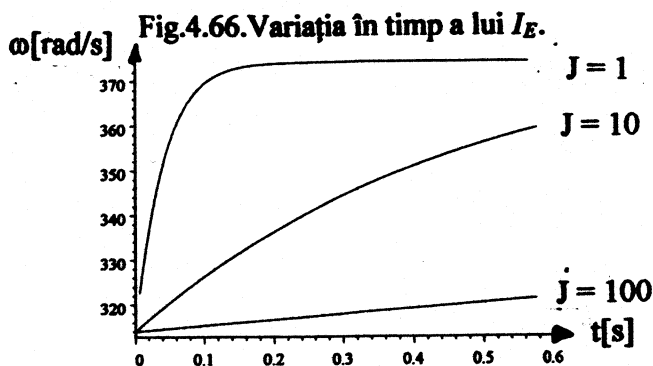


Fig.4.67. Variația în timp a lui  $\omega$ .

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$U[V] \quad T(t) = 1520 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4.65)$$

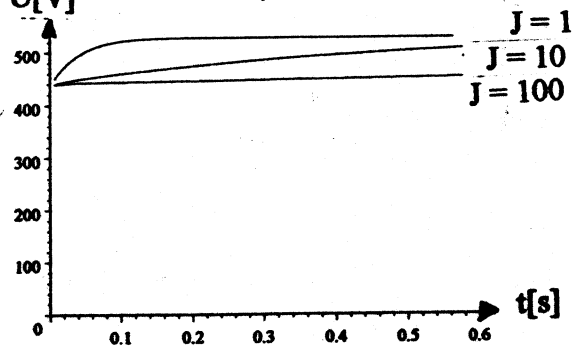


Fig.4.68. Variația în timp a lui  $U$ .

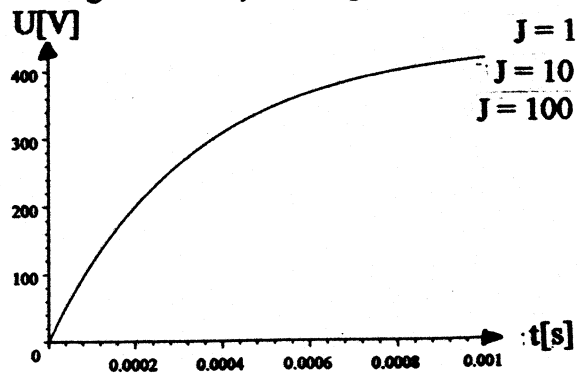


Fig.4.68'. Variația în timp a lui  $U$  (detaliu).

Curentul real se calculează cu relația:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (4.66)$$

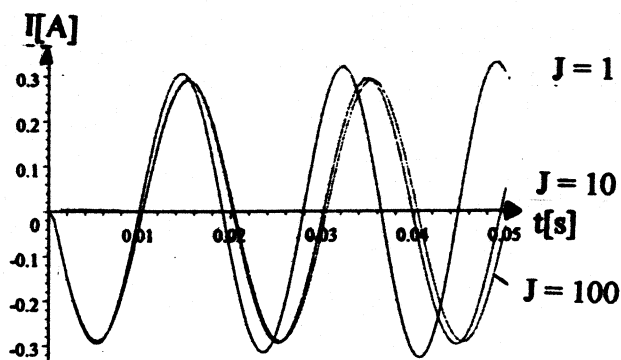


Fig.4.69. Variația în timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (4.67)$$

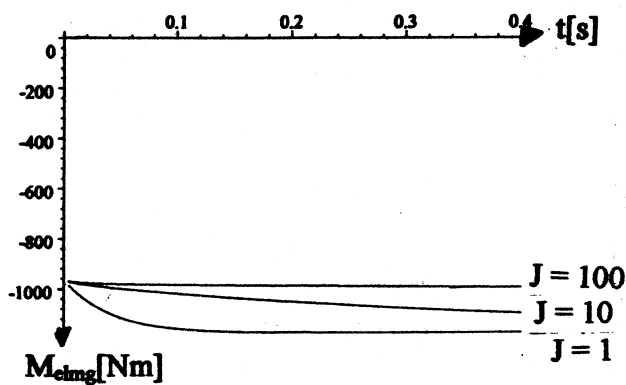


Fig.4.70. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

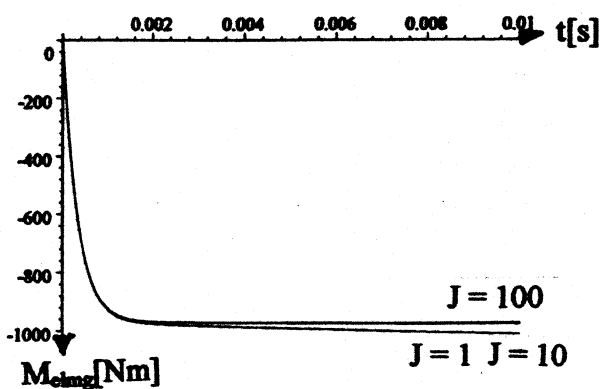


Fig.4.70'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu)

Concluzii la descărcarea rezistivă de la 100% la 25%  $I_N$ :

Generatorul funcționând nereglat, pe caracteristica naturală a motorului Diesel, tensiunea și frecvența nu vor mai avea valori nominale.

1. Curentul  $I_E$  prin înfășurarea de excitație se modifică de la

$$I_{E(0)}=2.9[A] \text{ la } I_{E(0.1)}=3[A]$$

și în regim stabilizat ajunge la 2.9[A] având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I_E = [(3-2.9)/2.9] \cdot 100 = 3.4\%, \text{ deci redusă.}$$

2. Frecvența tensiunii de alimentare a GS inițial era 50[Hz] și se stabilește la 63[Hz], având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta f = [(63-50)/50] \cdot 100 = 27\%, \text{ deci semnificativă,}$$

Variația cea mai rapidă este pentru  $J=1[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ , durata procesului tranzitoriu fiind de aproximativ 5[s] și cea mai lentă este pentru  $J=100[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ , durata procesului tranzitoriu fiind de aproximativ 15[s] așa ca în figura 4.67.

3. Cuplul electromagnetic crește la 1000[Nm] într-un interval de 0.001[s].

4. Curentul real al GS scade de la valoarea de regim nominal  $I_N$  la  $0.25I_N$  având în timpul procesului tranzitoriu o variație așa cum rezultă din figura 4.69.

5. Tensiunea  $U$  la bornele GS în primele 0.001[s] are aceeași variație în cele trei cazuri. Tensiunea crește de la  $U_N=380[V]$  la  $U_{(\infty)}=545.77[V]$  având deci o variație de :

$$\Delta U = [(545.77-380)/380] \cdot 100 = 43\%, \text{ semnificativă;}$$

așa ca în figura 4.68.



#### 4.2.3.2. Descărcare rezistivă 100%-50%

$$R = 0.637[\Omega]$$

La o descărcare rezistivă de la 100% la 25%, rezistența conectată la borne are valoarea  $R = 0.637$  – (în calcule se lucrează cu  $0.637 * 1195.1 = 761.22$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ ) mărimile fiind raportate.

Generatorul funcționează la tensiune de excitație constantă.

Condițiile inițiale rezultă din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 380X = 0.7\omega Y \\ 380Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ E = +0.6U \\ -0.076(\omega^2 - 439\omega + D) - 1142YU = 0 \\ \omega = 314 \\ T = 380\sqrt{X^2 + Y^2} \\ X^2 + Y^2 = 1 \end{array} \right. \quad (4.68)$$

unde  $D$  este o măsură a debitului de motorină la motorul Diesel.

Soluția sistemului este:

$$\{ \omega = 314.0, D = 1206.7, X = 0.50070, T = 380.0, Y = 0.86562, U = 2.9248, E = 1.7549 \} \quad (4.69)$$

Condițiile finale rezultă din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 761.22X = 0.7\omega Y \\ 761.22Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ 1.7549 = 0.6U \\ -0.076(\omega^2 - 439\omega + 1206.7) - 1142YU = 0 \\ T = 761.22\sqrt{X^2 + Y^2} \end{array} \right. \quad (4.70)$$

cu soluția:

$$\{ T = 481.45, Y = 0.59992, \omega = 363.05, X = 0.20029, U = 2.9248 \} \quad (4.71)$$

Sistemele de ecuații diferențiale care definesc regimurile tranzitorii, la trei valori ale lui  $J$ , se scriu sub forma:

$$a) J = 1[\text{kg} * \text{m}^2]$$

$$\left. \begin{aligned}
 761.22X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\
 761.22Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\
 1.7549 &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\
 0.076(\omega - 21)(418 - \omega) - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= \frac{d\omega}{dt} \\
 X(0) &= 0 \\
 Y(0) &= 0 \\
 U(0) &= 2.9248 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned} \right\} \quad (4.72)$$

$$b) J = 10[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$\left. \begin{aligned}
 761.22X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\
 761.22Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\
 1.7549 &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\
 0.076(\omega - 21)(418 - \omega) - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= 10 \frac{d\omega}{dt} \\
 X(0) &= 0 \\
 Y(0) &= 0 \\
 U(0) &= 2.9248 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned} \right\} \quad (4.73)$$

$$c) J = 100[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$\left. \begin{aligned}
 761.22X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\
 761.22Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\
 1.7549 &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\
 0.076(\omega - 21)(418 - \omega) - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= 100 \frac{d\omega}{dt} \\
 X(0) &= 0 \\
 Y(0) &= 0 \\
 U(0) &= 2.9248 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned} \right\} (4.74)$$

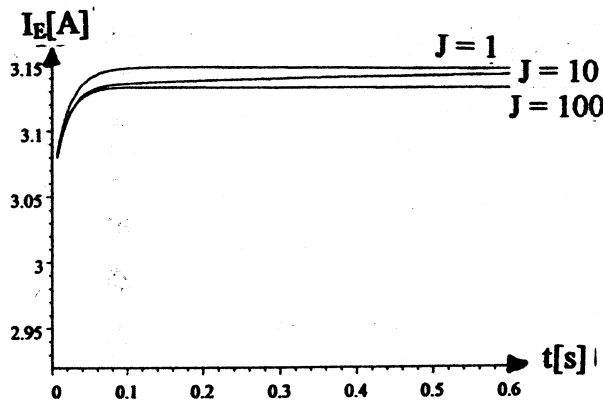


Fig.4.71. Variația în timp a lui  $I_E$ .

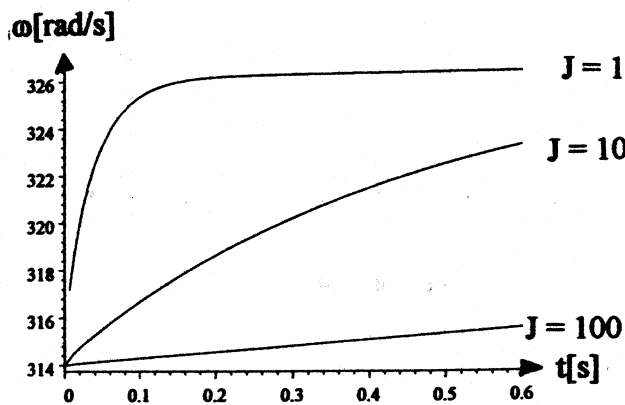


Fig.4.72. Variația în timp a lui  $\omega$ .

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 761.22 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4.75)$$

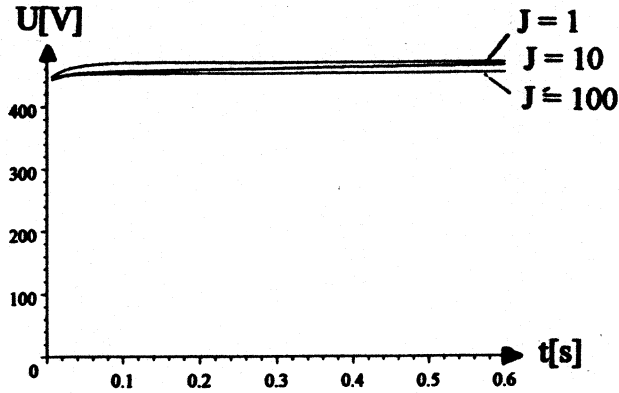


Fig.4.73. Variația în timp a lui U.

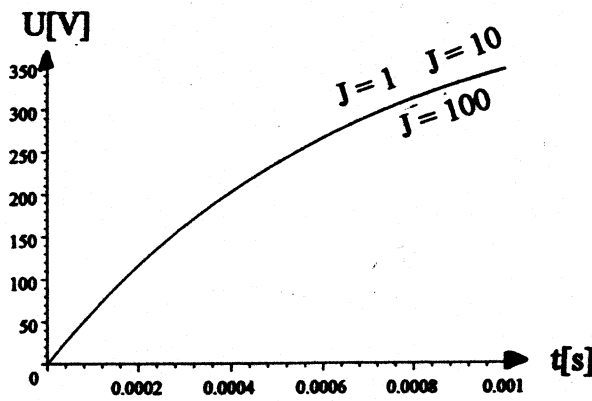


Fig.4.73'. Variația în timp a lui U (detaliu).

Curentul real se calculează cu relația:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (4.76)$$

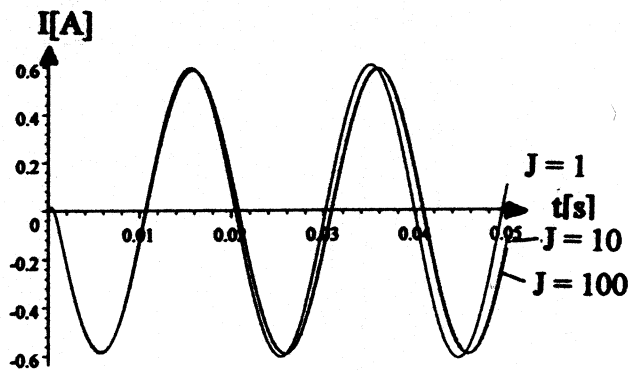


Fig.4.74. Variația în timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (4.77)$$

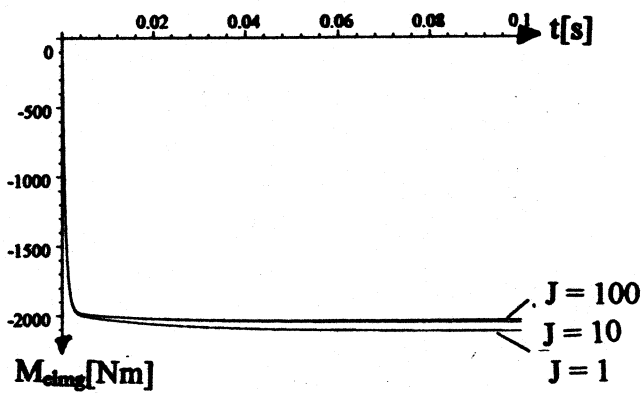


Fig.4.75. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

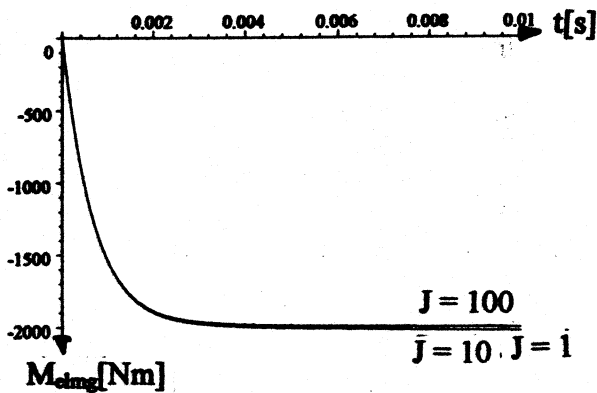


Fig.4.75'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu)

Concluzii la descărcarea rezistivă de la 100% la 50%  $I_N$ :

Generatorul funcționând nereglat, pe caracteristica naturală a motorului Diesel, tensiunea și frecvența nu vor mai avea valori nominale.

1. Curentul  $I_E$  prin înfășurarea de excitație se modifică de la

$$I_{E(0)}=2.9[A] \text{ la } I_{E(0.1)}=3.15[A]$$

și în regim stabilizat ajunge la 2.9[A] având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I_E = [(3.15-2.9)/2.9] \cdot 100 = 8.6\%, \text{ deci redusă.}$$

2. Frecvența tensiunii de alimentare a GS inițial era 50[Hz] și se stabilește la 57.8[Hz], având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta f = [(57.8-50)/50] \cdot 100 = 15\%, \text{ (medie),}$$

Variația cea mai rapidă este pentru  $J=1[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ , durata procesului tranzitoriu fiind de aproximativ 4[s] și cea mai lentă este pentru  $J=100[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$ , durata procesului tranzitoriu fiind de aproximativ 14[s] așa ca în figura 4.72.

3. Cuplul electromagnetic crește la 2000[Nm] într-un interval de 0.0015[s].

4. Curentul real al GS scade de la valoarea de regim nominal  $I_N$  la  $0.63I_N$  având în timpul procesului tranzitoriu o variație așa cum rezultă din figura 4.74.

5. Tensiunea  $U$  la bornele GS în primele 0.001[s] are aceeași variație în cele trei cazuri. Tensiunea crește de la  $U_N=380[V]$  la  $U_{(\infty)}=481[V]$  având deci o variație de :

$$\Delta U = [(481-380)/380] \cdot 100 = 26\%, \text{ semnificativă;}$$

așa ca în figura 4.73'.

### 4.2.3.3. Descărcare rezistivă 100%-75%

$$R = 0.425[\Omega]$$

La o descărcare rezistivă de la 100% la 25%, rezistența conectată la borne are valoarea  $R = 0.425$  – (în calcule se lucrează cu  $0.425 \cdot 1195.1 = 507.92$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ ) mărimile fiind raportate.

Generatorul funcționează la tensiune de excitație constantă.

Condițiile inițiale rezultă din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 380X = 0.7\omega Y \\ 380Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ E = +0.6U \\ -0.076(\omega^2 - 439\omega + D) - 1142YU = 0 \\ \omega = 314 \\ T = 380\sqrt{X^2 + Y^2} \\ X^2 + Y^2 = 1 \end{array} \right. \quad (4.78)$$

unde  $D$  este o măsură a debitului de motorină la motorul Diesel.

Soluția sistemului este:

$$\{\omega = 314.0, D = 1206.7, X = 0.50070, T = 380.0, Y = 0.86562, U = 2.9248, E = 1.7549\} \quad (4.79)$$

Condițiile finale rezultă din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l} 507.92X = 0.7\omega Y \\ 507.92Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\ 1.7549 = 0.6U \\ -0.076(\omega^2 - 439\omega + 1206.7) - 1142YU = 0 \\ T = 507.92\sqrt{X^2 + Y^2} \end{array} \right. \quad (4.80)$$

cu soluția:

$$\{Y = 0.76122, T = 426.03, \omega = 335.77, X = 0.35225, U = 2.9248\} \quad (4.81)$$

Sistemele de ecuații diferențiale care definesc regimurile tranzitorii, la trei valori ale lui  $J$ , se scriu sub forma:

$$a) J = 1[\text{kg} * \text{m}^2]$$

$$\left. \begin{aligned} 507.92X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\ 507.92Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\ 1.7549 &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\ 0.076(\omega - 21)(418 - \omega) - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= \frac{d\omega}{dt} \\ X(0) &= 0 \\ Y(0) &= 0 \\ U(0) &= 2.9248 \\ W(0) &= 0 \\ Q(0) &= 0 \\ \omega(0) &= 314 \end{aligned} \right\} \quad (4.82)$$

$$b) J = 10[\text{kg} * \text{m}^2]$$

$$\left. \begin{aligned} 507.92X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\ 507.92Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\ 1.7549 &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\ 0.076(\omega - 21)(418 - \omega) - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= 10 \frac{d\omega}{dt} \\ X(0) &= 0 \\ Y(0) &= 0 \\ U(0) &= 2.9248 \\ W(0) &= 0 \\ Q(0) &= 0 \\ \omega(0) &= 314 \end{aligned} \right\} \quad (4.83)$$



$$c) J = 100[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

$$507.92X = -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q$$

$$507.92Y = -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt}$$

$$1.7549 = -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt}$$

$$0 = -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt}$$

$$0.076(\omega - 21)(418 - \omega) - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW = 100 \frac{d\omega}{dt}$$

(4.84)

$$X(0) = 0$$

$$Y(0) = 0$$

$$U(0) = 2.9248$$

$$W(0) = 0$$

$$Q(0) = 0$$

$$\omega(0) = 314$$

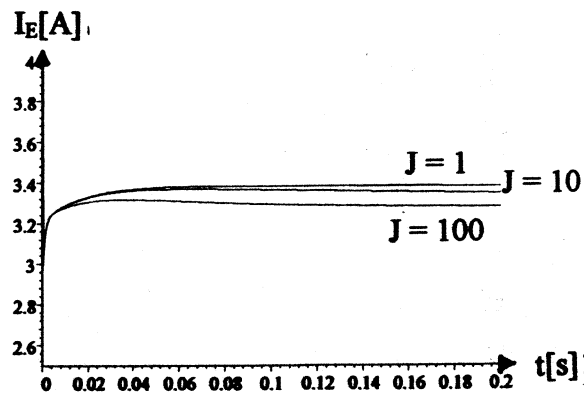


Fig.4.76. Variația în timp a lui  $I_E$ .

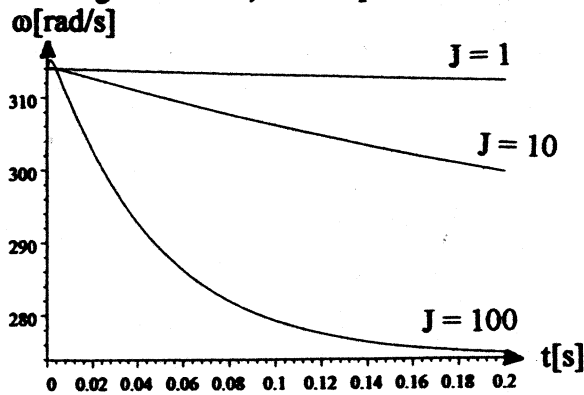


Fig.4.77. Variația în timp a lui  $\omega$ .

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$U(t) = 507.92 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4.85)$$

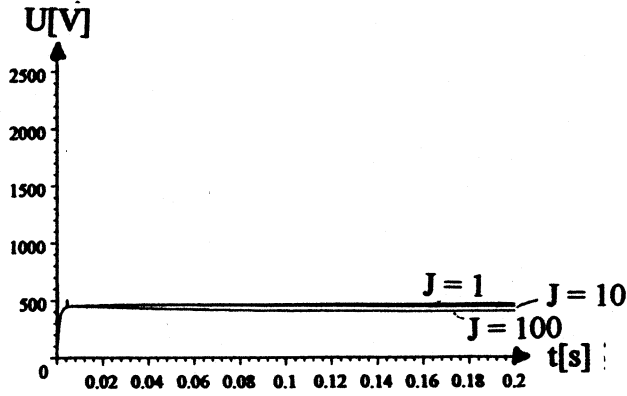


Fig.4.78. Variația în timp a lui  $U$ .

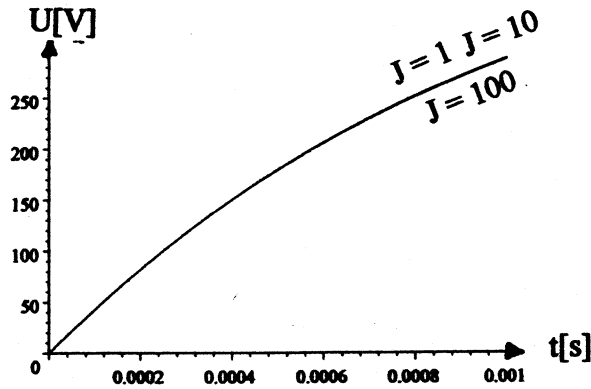


Fig.4.78'. Variația în timp a lui  $U$  (detaliu).

Curentul real se calculează cu relația:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (4.86)$$

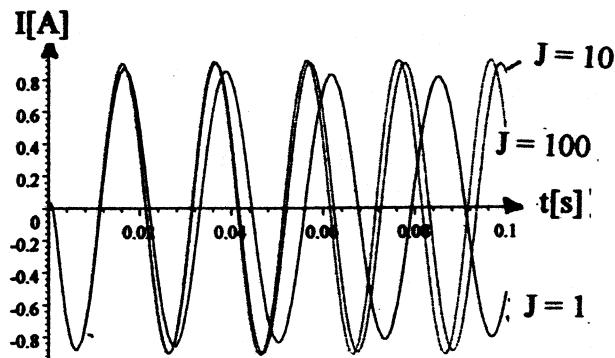


Fig.4.79. Variația în timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (4.87)$$

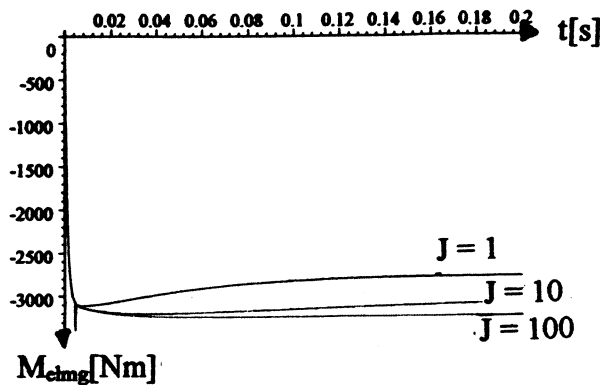


Fig.4.80. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

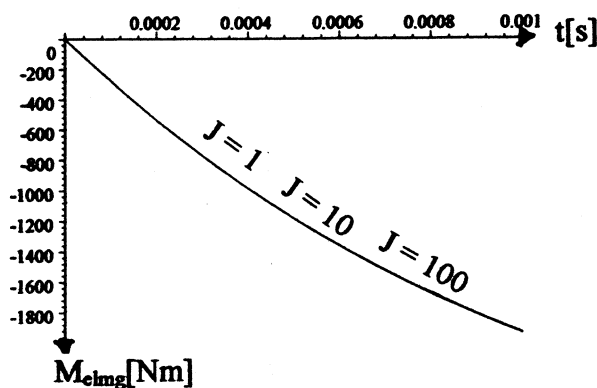


Fig.4.80'. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$  (detaliu)

Concluzii la descărcarea rezistivă de la 100% la 75% :

Generatorul funcționând nereglat, pe caracteristica naturală a motorului Diesel, tensiunea și frecvența nu vor mai avea valori nominale.

1. Frecvența tensiunii de alimentare a GS inițial era 50[Hz] și se stabilește la 53.5[Hz] având deci în decursul procesului tranzitoriu o variație de:

$$\frac{|50 - 53.5|}{50} * 100 = 7\%$$

Variația cea mai rapidă este pentru  $J = 1[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ , durata procesului tranzitoriu fiind de aproximativ 3[s] și cea mai lentă este pentru  $J = 100[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ , durata procesului tranzitoriu fiind de aproximativ 12[s], așa ca în figura 4.77.

2. Tensiunea  $U$  la bornele GS în primele 0.001[s] are aceeași variație în cele trei cazuri. Tensiunea crește de la  $U_N = 380[V]$  la  $U_{(\infty)} = 426[V]$  având deci o variație de:

$$\frac{|380 - 426|}{380} * 100 = 12\%$$

așa ca în figura 4.78'.

3. Curentul  $I_E$  prin înfășurarea de excitație se modifică de la

$$I_{E(0)} = 2.9[A] \text{ la } I_{E(0.1)} = 3.4[A]$$

și în regim stabilizat ajunge la 2.9[A] având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\frac{|2.9 - 3.4|}{2.9} * 100 = 17\%$$

4. Cuplul electromagnetic crește la 3000[Nm] într-un interval de 0.0015[s].

5. Curentul real  $I$  al GS scade de la valoarea de regim nominal  $I_N$  la  $0.83I_N$  având în timpul procesului tranzitoriu o variație așa cum rezultă din figura.4.79.

#### 4.2.4. Influența constantei de timp a regulatorului PI asupra proceselor tranzitorii

La bornele generatorului sincron se conectează consumatori rezistivi, curentul ajungând la 25% din  $I_N$ . Se au în vedere încărcări de la funcționarea în gol la valoarea mai sus amintită, așa cum prevăd normele din registrul naval.

La o încărcare rezistivă de 25%, rezistența conectată la borne are valoarea  $R = 1.275[\Omega]$  - (în calcule se lucrează cu  $1.275 * 1195.1 = 1520$  deoarece  $1195.1 = \sqrt{3} I_N$ ) mărimile fiind raportate.

Inițial grupul funcționează în gol la turația și tensiunea nominală și prin încărcare, frecvența și tensiunea scad până la momentul în care intervin reglatoarele de pe excitație și de pe turație, care readuc tensiunea și frecvența la valorile nominale.

Se studiază comportarea grupului GS - motor Diesel în regimul tranzitoriu datorat încărcării bruște la 25% din  $I_N$ , în condițiile modificării constantei de timp a reglatoarelor PI.

La funcționarea în gol, condițiile inițiale sunt următoarele:

$$\begin{aligned}
 C(0) &= 0 - \text{cuplul electromagnetic} \\
 V(0) &= 1.5191 - \text{tensiunea pe înfășurarea de excitație} \\
 X(0) &= 0 - \text{curentul statoric din axa d} \\
 Y(0) &= 0 - \text{curentul statoric din axa q} \\
 U(0) &= 2.5318 - \text{curentul de excitație} \\
 W(0) &= 0 - \text{curentul rotorice din axa d} \\
 Q(0) &= 0 - \text{curentul rotorice din axa q} \\
 \omega(0) &= 314 - \text{pulsajia unghiulară}
 \end{aligned} \tag{4.88}$$

Condițiile finale rezultă din sistemul:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 1520X = +0.7\omega Y \\
 1520Y = -0.7\omega X + 0.478\omega U \\
 V = 0.6U \\
 C - 1142YU = 0 \\
 0 = 1036.6 - 3.3\omega \\
 0 = 10 - 160(X^2 + Y^2) \\
 T = 1520\sqrt{X^2 + Y^2}
 \end{array} \right. \tag{4.89}$$

cu soluția:

$$\{\omega = 314.12, C = 722.54, V = 1.5343, X = 3.5793 \times 10^{-2}, U = 2.5571, Y = 0.24742, T = 380.0\} \tag{4.90}$$

Ecuția regulatorului pe turație este: [§ 2.4] :

$$T_i \frac{dC}{dt} = - \left[ k T_i \frac{d\omega}{dt} + k(\omega - 314) \right] , \tag{4.91}$$

unde

$\omega = 314[\text{rad/s}]$  - valoarea impusă

$C$  - cuplul motorului Diesel

Ecuția regulatorului pe tensiunea de excitație  $U_E$  este:

$$T_i \frac{dU_E}{dt} = - \left[ kT_i \frac{dI^2}{dt} + k \left( I^2 - \left( \frac{I_N}{4} \right)^2 \right) \right], \quad (4.92)$$

unde

$I^2 = X^2 + Y^2$  - curentul real

$U_E$  - tensiunea pe înfășurarea de excitație.

Sistemele de ecuații diferențiale care definesc regimurile tranzitorii la trei valori ale lui  $T_i$  se

scriu sub forma:

$$a) T_i = 1[s], k = 10$$

Ecuatia regulatorului pe turație în această situație este:

$$\frac{dC}{dt} = - \left( 10 \frac{d\omega}{dt} + 10(\omega - 314) \right) \quad (4.93)$$

Ecuatia regulatorului pe tensiunea de excitație  $U_E$  în această situație este:

$$\frac{dU_E}{dt} = - \left[ 20 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) + 10((X^2 + Y^2) - 0.0625) \right] \quad (4.94)$$

$$\left. \begin{aligned} 1520X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\ 1520Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\ V &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\ C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= 10 \frac{d\omega}{dt} \\ \frac{dC}{dt} &= -10 \frac{d\omega}{dt} - 10(\omega - 314) \\ \frac{dV}{dt} &= -20 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) - 10(X^2 + Y^2) + 0.625 \\ C(0) &= 0 \\ V(0) &= 1.5191 \\ X(0) &= 0 \\ Y(0) &= 0 \\ U(0) &= 2.5318 \\ W(0) &= 0 \\ Q(0) &= 0 \\ \omega(0) &= 314 \end{aligned} \right\} \quad (4.95)$$

$$b) T_i = 0.1[s], k = 10$$

Ecuatia regulatorului pe turație în această situație este:

$$0.1 \frac{dC}{dt} = - \left( \frac{d\omega}{dt} + 10(\omega - 314) \right) \quad (4.96)$$

Ecuția regulatorului pe tensiunea de excitație  $U_E$  în această situație este:

$$0.1 \frac{dU_E}{dt} = - \left[ 2 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) + 10((X^2 + Y^2) - 0.0625) \right] \quad (4.97)$$

$$\left. \begin{aligned} 1520X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\ 1520Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\ V &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\ 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\ C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= 10 \frac{d\omega}{dt} \\ 0.1 \frac{dC}{dt} &= - \left( 0.1 * 10 \frac{d\omega}{dt} + 10(\omega - 314) \right) \\ 0.1 \frac{dV}{dt} &= -2 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) - 10(X^2 + Y^2) + 0.625 \\ C(0) &= 0 \\ V(0) &= 1.5191 \\ X(0) &= 0 \\ Y(0) &= 0 \\ U(0) &= 2.5318 \\ W(0) &= 0 \\ Q(0) &= 0 \\ \omega(0) &= 314 \end{aligned} \right\} \quad (4.98)$$

$$c) T_i = 0.01[s], k = 10$$

Ecuția regulatorului pe turație în această situație este:

$$0.01 \frac{dC}{dt} = - \left( 0.1 \frac{d\omega}{dt} + 10(\omega - 314) \right) \quad (4.99)$$

Ecuția regulatorului pe tensiunea de excitație  $U_E$  în această situație este:

$$0.01 \frac{dU_E}{dt} = - \left[ 0.2 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) + 10((X^2 + Y^2) - 0.0625) \right] \quad (4.100)$$

$$\begin{aligned}
 1520X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\
 1520Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\
 V &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\
 C - 1142YU + 1.134XQ - 1.134YW &= 10 \frac{dC}{dt} \\
 0.01 \frac{dC}{dt} &= -(0.1 \frac{dC}{dt} + 10(\omega - 314)) \\
 0.01 \frac{dV}{dt} &= -0.2 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) - 10(X^2 + Y^2) + 0.625 \\
 C(0) &= 0 \\
 V(0) &= 1.5191 \\
 X(0) &= 0 \\
 Y(0) &= 0 \\
 U(0) &= 2.5318 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned}
 \tag{4.101}$$

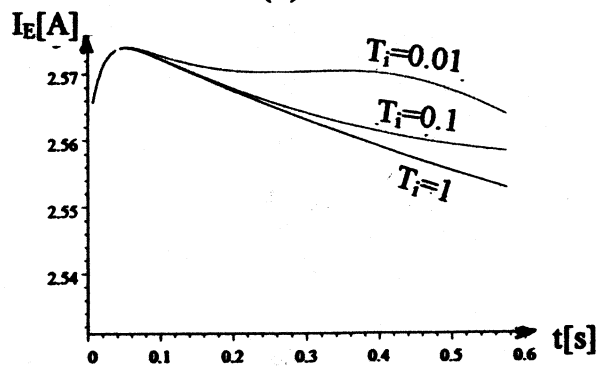


Fig.4.81. Variația în timp a lui  $I_E$ .

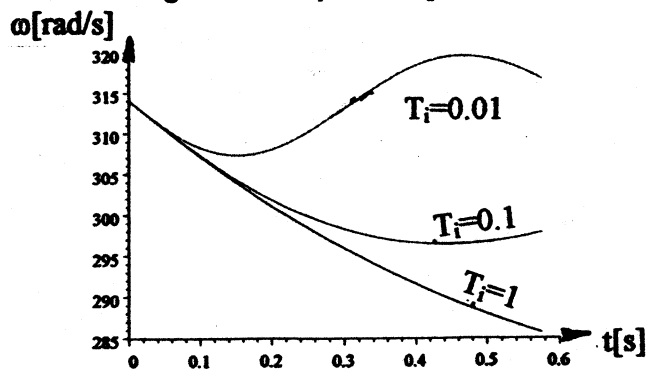


Fig.4.82. Variația în timp a lui  $\omega$ .

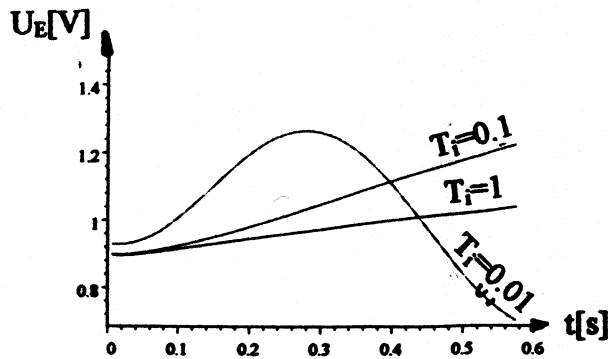


Fig.4.83. Variația în timp a lui  $U_E$ .

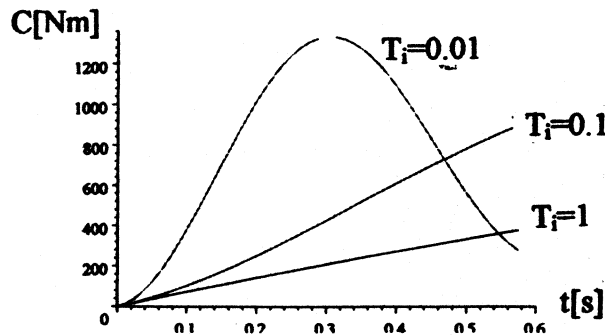


Fig.4.84. Variația în timp a cuplului motor.

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 1520 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (4.102)$$

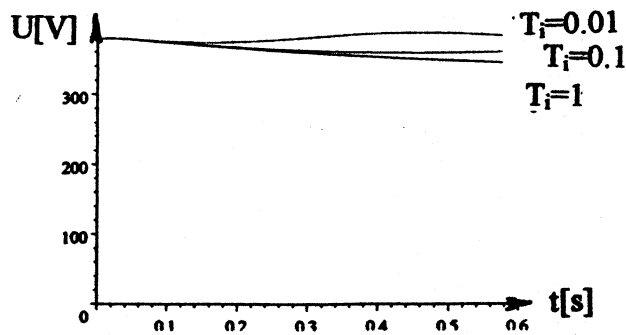


Fig.4.85. Variația în timp a lui  $U$ .

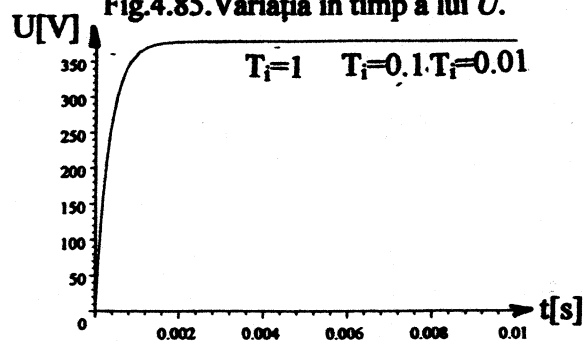


Fig.4.85'. Variația în timp a lui  $U$  (detaliu).

Curentul real se calculează cu relația:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (4.103)$$



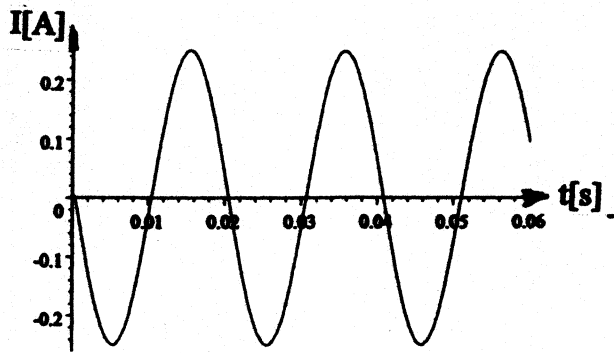


Fig.4.86. Variația în timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculează cu relația:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (4.104)$$

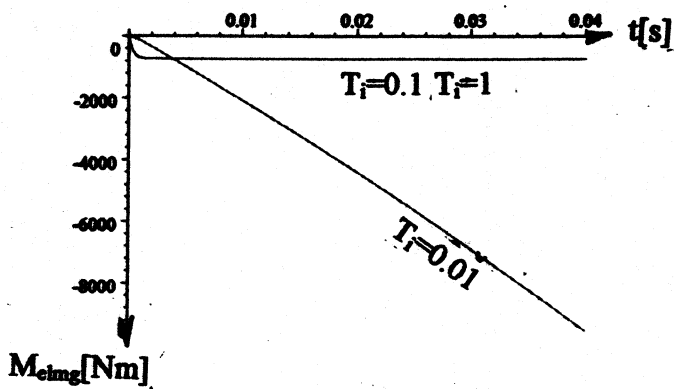


Fig.4.87. Variația în timp a lui  $M_{c\text{mg}}$ .

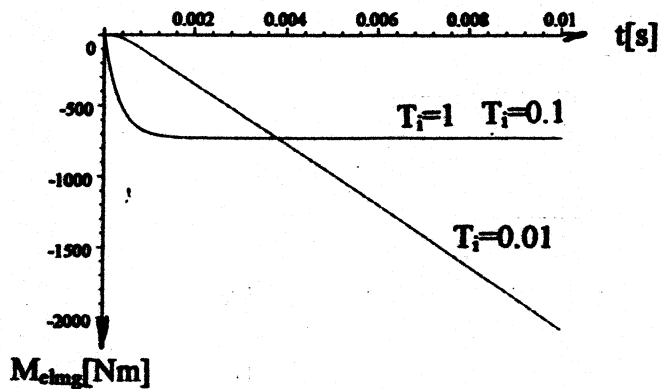


Fig.4.87'. Variația în timp a lui  $M_{c\text{mg}}$  (detaliu)

### Concluzii la influența regulatorului PI asupra proceselor tranzitori:

1. La conectarea sarcinii de 25%, tensiunea la borne crește de la 0 la 378[V] într-un timp foarte scurt: 0.002[s].

Regulatorul de tensiune în acest interval de timp nu intervine în toate cele trei cazuri. După 0.1[s] influența cea mai semnificativă asupra variației tensiunii la borne o are regulatorul cu constanta cea mai mică :  $T_i = 0.01[s]$ .

- pentru  $T_i = 0.01[s]$ , tensiunea la borne oscilează între 378[V] și 382[V] , deci cu o abatere de

$$\Delta U = \pm \frac{2}{380} 100 = \pm 0.52\% (\text{mica})$$

- pentru  $T_i = 0.1[s]$ , tensiunea la borne scade în etapa a 2-a la 360[V], deci față de tensiune nominală are o abatere de :

$$\Delta U = \pm \frac{20}{380} 100 = \pm 5\% (\text{mica})$$

- pentru  $T_i = 1[s]$  , tensiunea la borne scade în etapa a 2-a la 350[V] , deci față de tensiunea nominală are o abatere de :

$$\Delta U = \pm \frac{30}{380} 100 = \pm 7.89\% (\text{medie})$$

Prin urmare, în prima etapă tensiunea crește de la 0 la  $0.99U_N$  într-un interval foarte scurt de timp: 0.002[s] , valoarea constantei de timp  $T_i$  a regulatorului nu influențează procesul tranzitoriu.

În etapa a 2-a, după cum era de așteptat intervine cel mai rapid regulatorul cu constanta de timp cea mai mică.

Verificarile experimentale se dau în figura 4.85 unde se prezintă simulările numerice și tensiunea de la borne înregistrată experimental.

2. Asupra frecvenței intervine cel mai rapid regulatorul cu  $T_i = 0.01[s]$ .

- în acest caz frecvența se modifică între 48.8 [Hz] și 50.8[Hz] adică cu:

$$\Delta f = \frac{2}{50} 100 = 4\% (\text{mica})$$

- în cazul regulatorului cu  $T_i = 0.1[s]$  frecvența scade la 47.3[Hz] adică cu:

$$\Delta f = \frac{2.7}{50} 100 = 5.4\% (\text{mica})$$

- în cazul regulatorului cu  $T_i = 1[s]$  frecvența scade la 45.38[Hz] adică cu:

$$\Delta f = \frac{4.6}{50} 100 = 9.2\% (\text{medie})$$

3. Tensiunea  $U_E$  la bornele excitației oscilează astfel:

- La regulatorul cu  $T_i = 0.01[s]$ , între 1.28[V] și 0.7[V] având deci o abatere de:

$$\Delta U_E = \frac{0.58}{1.53} 100 = 38\% (\text{mare})$$

- La regulatorul cu  $T_i = 0.1[s]$ , între 1.519[V] și 1.2[V], având deci o abatere de:

$$\Delta U_E = \frac{1.519 - 1.2}{1.53} 100 = 20.85\% (\text{medie})$$

- La regulatorul cu  $T_i = 1[s]$ , între 1.519[V] și 0.95[V] , având deci o abatere de:

$$\Delta U_E = \frac{1.519 - 0.95}{1.53} 100 = 37.19\% (\text{mare})$$

4. Curentul real I al GS nu este influențat de modificarea constantei de timp a regulatorului așa cum rezultă din figura.4.86.

5. Cuplul electromagnetic crește de la 0 la 722[Nm] astfel:

- pentru  $T_i = 0.1$  [s] și  $T_i = 1$  [s] creșterea se face fără oscilații într-un timp de 0.002[s];

- pentru  $T_i = 0.01$  [s] creșterea prezintă oscilații datorate intervenției rapide a regulatorului, intervenție care are un impact negativ asupra procesului tranzitoriu în sensul prelungirii duratei solicitărilor. În acest caz abaterea în cuplu este:

$$\Delta M_{\text{elmag}} = \frac{2000 - 722}{722} 100 = 177\% (\text{foarte mare})$$

Având în vedere considerentele prezentate anterior, regulatoarele de tensiune chiar cu constante de timp de valori diferite au dezavantaje majore în sensul că:

- regulatoarele cu constante de timp mici ( $T_i \sim 0,01$ [s]) sunt rapide dar introduc un proces oscilant cu mari dezavantaje asupra solicitărilor mecanice și electrice.

- oscilațiile introduse de regulatoarele rapide pot să fie deosebit de importante și pot influența uneori stabilitatea generatorului sincron mai ales la șocuri mari ale sarcinii.

- regulatoarele cu constante de timp mari ( $T_i \sim 1$ [s]) sunt lente dar au avantajul că nu introduc oscilații în procesul tranzitoriu.

Din aceste motive în subcapitolul următor s-a conceput, modelat și studiat generatorul sincron cu două înfășurări de excitație.

Ideea fundamentală este că înfășurarea suplimentară de excitație să preia o parte din rolul regulatorului de tensiune, eventual chiar elimina regulatorul de tensiune.

Prin înfășurarea adițională, curentul este direct proporțional cu curentul de sarcină și deci rolul regulatorului este mult diminuat.

Factorul de proporționalitate al curentului prin înfășurarea adițională se poate determina având în vedere două puncte de funcționare extreme: funcționarea în gol și funcționarea în sarcină.

În aceste două puncte se reglează curentul prin excitația principală și se deduce factorul de proporționalitate al curentului prin înfășurarea adițională.

## Cap 5.GENERATORUL SINCRON CU DOUĂ ÎNFĂȘURĂRI DE EXCITAȚIE

Mașina sincronă, în general, are o singură înfășurare de excitație atât pentru cazul când funcționează ca motor cât și în cazul când funcționează ca generator în regim autonom.

Deoarece cu creșterea sarcinii active și reactive este necesară și creșterea curentului de excitație, generatorul din lucrarea de față se propune să aibă două înfășurări de excitație, una din înfășurări fiind alimentată la o tensiune ce crește cu sarcina, sau prin ea trece un curent proporțional cu valoarea curentului de sarcină.

În cadrul acestui capitol se dau simulările numerice la un generator sincron cu două înfășurări de excitație, la diverse încărcări.

Avantajul cel mai important al generatorului sincron cu doua înfășurări de excitație este faptul ca el poate funcționa la  $U=ct$  și fără regulator automat de tensiune. Acest generator se autoreglează.

### 5.1. Justificarea înfășurării de excitație conectate în serie cu sarcina

Funcționarea generatorului sincron autonom (la  $U$  și  $f$  variabile cu sarcina) este dependentă de reglatoarele de turație și tensiune.

Așa cum s-a demonstrat în cele de până acum, reglatoarele care au constantele de timp mici intervin rapid dar creează oscilații puternice în perioada regimului tranzitoriu, oscilațiile electrice și mecanice ce se pot amplifica și pot scoate generatorul din sincronism.

Oscilațiile în puterea mecanică și electrică creează și solicitări care dacă depășesc limitele admisibile pot provoca avarii.

Cele mai importante solicitări mecanice le suportă arborele și cuplajele iar solicitările electrice cele mai importante le suportă înfășurările și elementele de comandă (contactoare, relee, etc.)

Prin folosirea înfășurării a doua pe partea de excitație aceste solicitări se diminuează mult, generatorul devenind autoreglat.

Esențial este ca înfășurarea a doua să fie parcursă de un curent de excitație proporțional cu cel de sarcină. Înfășurarea primară se conectează la o sursă de tensiune continuă, reglată cu ajutorul unui regulator automat de tensiune de tip PI sau PID. În acest caz rolul regulatorului de tensiune este însă mult redus deoarece preia doar o parte din creșterea curentului de excitație cu sarcina.

La funcționarea în regim staționar ecuația GS este:

$$\underline{U} + R\underline{I} = j\omega\underline{\Psi}_s \quad (5.1)$$

$$\underline{\Psi}_s = \Psi_d + j\Psi_q = L_d I_d + M_{E1d} I_{E1} + M_{E2d} I_{E2} + jL_q I_q \quad (5.2)$$

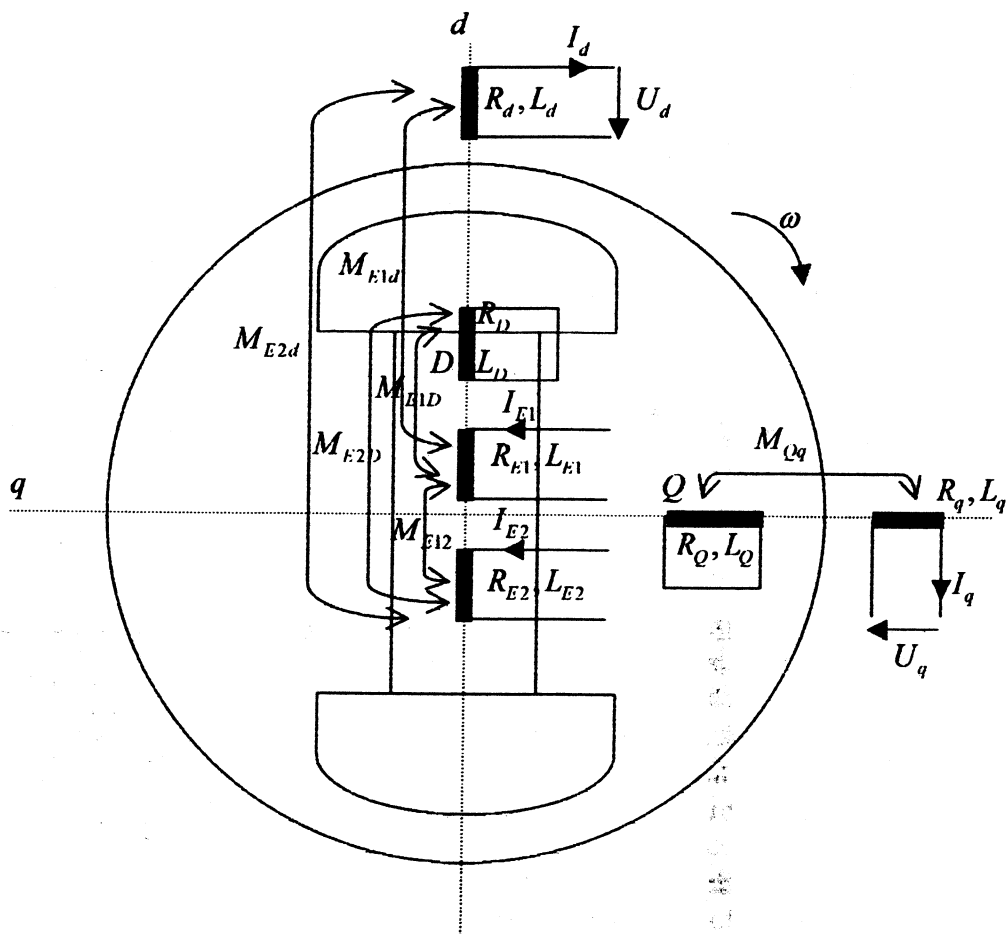


Fig. 5.1.G.S. cu două înfășurări de excitație.

În plus față de generatorul sincron clasic, mai apar inductanțele mutuale:

- $M_{E1d}$  - inductanța mutuală dintre înfășurarea de excitație 2 și înfășurarea statorică d;
- $M_{E12}$  - inductanța mutuală dintre înfășurarea de excitație 2 și înfășurarea de excitație 1;
- $M_{E2D}$  - inductanța mutuală dintre înfășurarea de excitație 2 și înfășurarea de amortizare D;

Se cunoaște din [B1] că

$$\begin{aligned}
 M_{qQ} &= M_{dQ} = M_Q \\
 M_{qd} &= M_{dq} = M_D \\
 M_{qE} &= M_{dE} = M_E
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

și în plus vom avea:

$$\begin{aligned}
 M_{E1q} &= M_{E1d} = M_{E1} \\
 M_{E2q} &= M_{E2d} = M_{E2}
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

La o sarcină pur rezistivă, diagrama fazorială a GS (la  $\cos \varphi = 1$ ) este de forma:

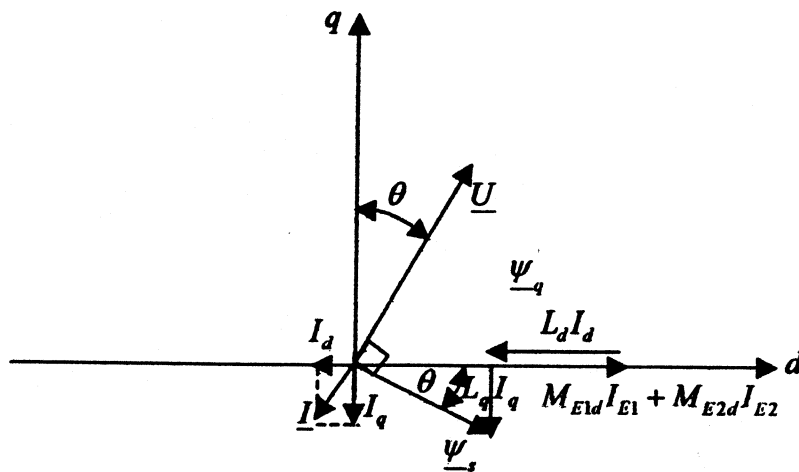


Fig.5.2. Diagrama fazorială a GS cu două înfășurări de excitație

Din diagrama fazorială de mai sus se poate scrie :

$$1. \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{|I_d|}{|I_q|} = \frac{L_q I_q}{M_{E1d} I_{E1} + M_{E2d} I_{E2} + L_d I_d} \quad (5.5)$$

Fluxul statoric este cunoscut (fiind cel nominal) se poate scrie condiția a 2-a:

$$2. \quad \psi_N^2 = (M_{E1d} I_{E1} + M_{E2d} I_{E2} + L_d I_d)^2 + L_q^2 I_q^2 \quad (5.6)$$

Condiția a 3-a rezultă din cuplu:

$$3. \quad M_{\text{elmag}} = p_1 \psi_N I \quad (5.7)$$

Cele 3 condiții determină valorile curenților  $I_d, I_q, I_E$ :

Din

$$\begin{cases} \psi_s \cos \theta = M_{E1d} I_{E1} + M_{E2d} I_{E2} + L_d I_d \\ I_d = -I \sin \theta \end{cases} \quad (5.8)$$

se calculează

$$M_{E1d} I_{E1} + M_{E2d} I_{E2} = \psi_s \cos \theta - L_d I_d = \psi_s \cos \theta + L_d I \sin \theta \quad (5.9)$$

și deoarece

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= \frac{L_q |I_q|}{\psi_s} \\ |I_q| &= I \cos \theta \\ M_{\text{elmag}} &= p_1 \psi_s I \end{aligned} \right\} \Rightarrow \operatorname{tg} \theta = \frac{L_q M_{\text{elmag}}}{p_1 \psi_s^2} \quad (5.10)$$

se obține:

$$M_{E1d}I_{E1} + M_{E2d}I_{E2} = \frac{p_1^2 \psi_s^4 + L_d L_q M_{elmag}^2}{p_1 \psi_s \sqrt{(p_1 \psi_s^2)^2 + (L_q M_{elmag})^2}} \quad (5.11)$$

Prin urmare, pentru curentul  $I_{E2}$  rezultă o dependență de cuplul electromagnetic așa ca în figură:

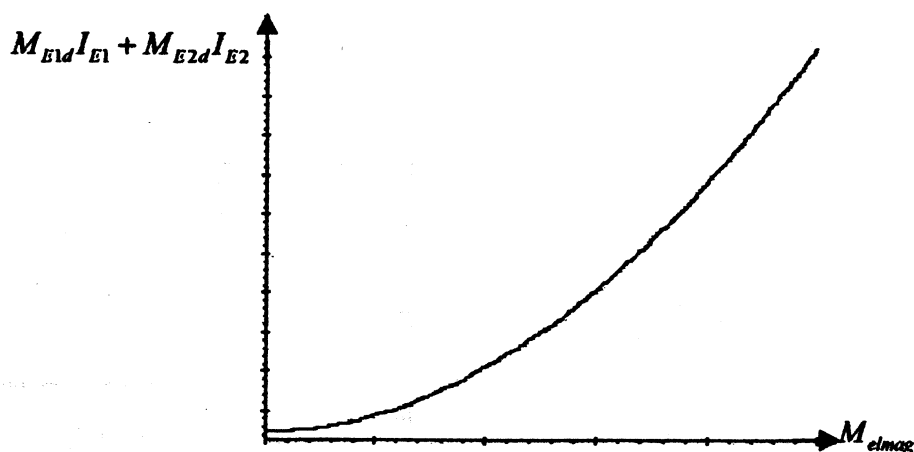


Fig.5.3.Dependența curentului de excitație  $I_{E2}$  de cuplul electromagnetic

Deoarece la neglijarea pierderilor în înfășurări se poate scrie :

$$M_{elmag} \Omega_1 = 3R_{sarc} I^2 \quad (5.12)$$

și deci cuplul electromagnetic depinde de sarcină ( $R_{sarc}$ ) și de pătratul curentului  $I$ :

$$M_{elmag} = \frac{3R_{sarc} I^2}{\Omega_1} \quad (5.13)$$

În concluzie, pentru fluxul de excitație util:  $M_{E1d}I_{E1} + M_{E2d}I_{E2}$ , se obține o dependență de  $I$  (curentul prin sarcină) de forma:

$$M_{E1d}I_{E1} + M_{E2d}I_{E2} = \frac{(p_1 \Omega_1)^2 \psi_s^4 + 9R_{sarc}^2 I^4 L_d L_q}{p_1 \psi_s \Omega_1 \sqrt{(p_1 \psi_s^2)^2 + (L_q M_{elmag})^2}} \quad (5.14)$$

## 5.2 Determinarea curentului din înfășurarea de excitație aditională

Deoarece

$$I = \frac{U}{R_{sarc}} \quad (5.15)$$

rezultă :

$$M_{E1d}I_{E1} + M_{E2d}I_{E2} = \frac{(\rho_1 \Omega_1 R_{sarc})^2 \psi_s^4 + 9U^4 L_d L_q}{\rho_1 \psi_s (\Omega_1 R_{sarc})^2 \sqrt{(\rho_1 \psi_s^2)^2 + \left(\frac{\rho_1 L_q \psi_s U \sqrt{3}}{R}\right)^2}} \quad (5.16)$$

și deci rezultă o dependență a fluxului util  $M_{E1d}I_{E1} + M_{E2d}I_{E2}$  de rezistența  $R_{sarc}$  de forma (fig. 5.4):

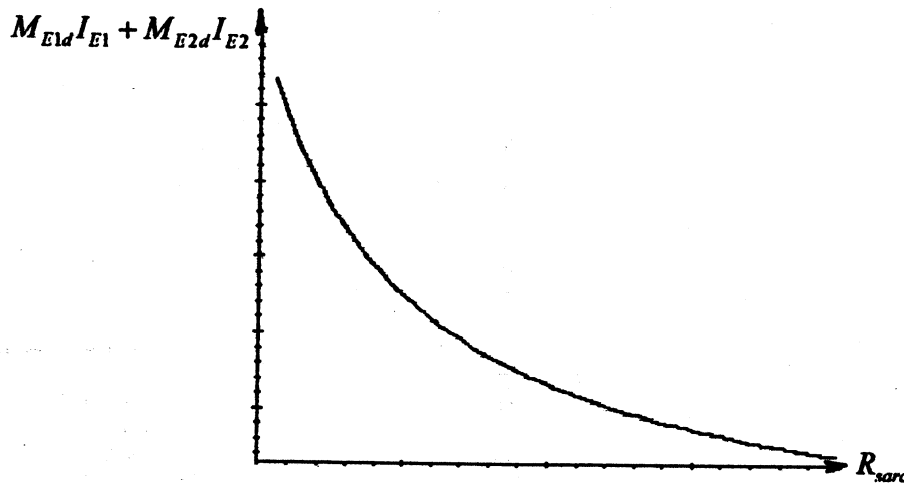


Fig.5.4. Dependența curentului de excitație  $I_{E2}$  de rezistența de sarcină

La neglijarea rezistențelor statorice ale G.S. se poate scrie :

$$\begin{aligned} U_d &= \omega L_q I_q \\ U_q &= \omega (I_d I_d + M_{E1d} I_{E1} + M_{E2d} I_{E2}) \end{aligned} \quad (5.17)$$

și deci

$$U^2 = \omega^2 \left[ (L_q I_q)^2 + (M_{E1d} I_{E1} + M_{E2d} I_{E2} - L_d I_d)^2 \right] \quad (5.18)$$

La o tensiune dată ( $U = 220V; 220\sqrt{3}$  – în model) cu  $M_{E1d} = M_{E1q} = 0,47882[H]$ ,  $M_{E2d} = M_{E2q} = 0,151416[H]$  se obține:

$$\textcircled{1} \quad 3 \cdot 220^2 = 314^2 \left[ (0,000968 I_q)^2 + (0,47882 I_{E1} + 0,151416 I_{E2} - 0,000968 I_d)^2 \right] \quad (5.19)$$

Fluxul statoric fiind cunoscut ( $U_N \cong \omega \psi_N$ )

$$\psi_N = \frac{220}{314} = 0,7[Wb] \quad (0,7\sqrt{3} \text{ – în model}) \quad (5.20)$$

sau

$$\psi_N^2 = 0,49[Wb^2] \quad (5.21)$$

rezultă:



$$(2) \quad 1,47 = (0,000968I_q)^2 + (0,47882I_{E1} + 0,151416I_{E2} + 0,000968I_d)^2 \quad (5.22)$$

Din relația fluxului de excitație util [5.14]:

$$F = 0,47882I_{E1} + 0,151416I_{E2} \quad (5.23)$$

$$F = \frac{(p_1 \Omega_1 R_{sarc})^2 \psi_s^4 + 9U^4 L_d L_q}{p_1 \psi_s (\Omega_1 R_{sarc})^2 \sqrt{(p_1 \psi_s^2)^2 + \left( \frac{p_1 L_q \psi_s U \sqrt{3}}{R} \right)^2}} \quad (5.24)$$

pentru un G.S. cu  $p_1 = 2(1500rpm)$ ;  $\Omega_1 = 157[rot/s]$  la o sarcină  $R = 0,5[\Omega]$  se obține:

$$F = \frac{(2 \cdot 157 \cdot 0,5 \cdot 1,47)^2 + 9 \cdot 220^4 (0,000968)^2}{2 \cdot 0,7 \sqrt{3} (157 \cdot 0,5)^2 \sqrt{(2 \cdot 1,47)^2 + \left( 0,000968 \frac{2 \cdot 0,7 \sqrt{3} \cdot 220}{0,5} \right)^2}} = 1,574178[Wb] \quad (5.25)$$

Prin impunerea curentului  $I_{E1}$  la o valoare dată (de exemplu  $I_{E1} = 2[A]$ ) rezultă valoarea curentului din înfășurarea de excitație adițională:

$$F = 1,57 = 0,47882 \cdot 2 + 0,151416I_{E2} \quad (5.26)$$

sau

$$I_{E2} = 4[A] \quad (5.27)$$

Curenții  $I_d$  și  $I_q$  se calculează din sistemul :

$$\begin{cases} 3 \cdot 220^2 = 314^2 [(0,000968I_q)^2 + (1,57 - 0,000968I_d)^2] \\ 1,47 = (0,000968I_q)^2 + (1,57 + 0,000968I_d)^2 \end{cases} \quad (5.28)$$

de unde

$$I_d = -226,4[A] \quad (226,4\sqrt{3} - \text{în model}) \quad (5.29)$$

$$I_q = -377,3[A] \quad (377,3\sqrt{3} - \text{în model}) \quad (5.30)$$

Sistemul de mai sus prezintă probleme în rezolvarea lui din cauza valorilor scăzute ale inductanțelor proprii  $L_d$  și  $L_q$  (de valoare  $0,000968[H]$ ).

În alt mod curenții  $I_d$  și  $I_q$  se pot determina din :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{0,5} = 440[A] \quad (440\sqrt{3} - \text{în model}) \quad (5.31)$$

Cuplul electromagnetic are valoarea (relația 3.20[B1]):

$$M_{\text{elmag}} = p_1 \psi_s I = 2 \cdot 0,7\sqrt{3} \cdot 440\sqrt{3} = 1848[\text{Nm}] \quad (5.32)$$

și astfel se poate calcula unghiul de sarcină „  $\theta$  ” (relația 3.23[B1]):

$$\text{tg} \theta = \frac{L_q M_{\text{elmag}}}{p_1 \psi_s^2} = \frac{0,000968 \cdot 1848}{2 \cdot 1,47} = 0,6 \quad (\theta = 31,3^\circ; \theta = 0,546[\text{rad}]); \quad (5.33)$$

și cum (relația 3.16[B1]):

$$\text{tg} \theta = |I_d| / |I_q| \quad (5.34)$$

se obține

$$\frac{I_d}{I_q} = 0,6 \quad (5.35)$$

și deci din  $I^2 = I_d^2 + I_q^2$  rezultă:

$$I_d = -226,4[A] \quad (226,4\sqrt{3} - \text{în model})$$

$$I_q = -377,3[A] \quad (377,3\sqrt{3} - \text{în model})$$

Dependența curentului  $I_{E2}$  de sarcină (rezistența  $R_{\text{sarc}}$ ) pentru un G.S. la care se cunosc parametrii nesaturați se poate determina din :

$$M_{E1d} I_{E1} + M_{E2d} I_{E2} = \frac{(p_1 \Omega_1 R_{\text{sarc}})^2 \psi_s^4 + 9U^4 L_d L_q}{p_1 \psi_s (\Omega_1 R_{\text{sarc}})^2 \sqrt{(p_1 \psi_s^2)^2 + \left( \frac{p_1 L_q \psi_s U \sqrt{3}}{R} \right)^2}} \quad (5.36)$$

respectiv

$$0,47882 I_{E1} + 0,151416 I_{E2} = \frac{1,47^2 (314 \cdot R_{\text{sarc}})^2 + 9 \cdot 220^4 (0,000968)^2}{2 \cdot 0,7\sqrt{3} (157 \cdot R_{\text{sarc}})^2 \sqrt{(2 \cdot 1,47)^2 + \left( 0,000968 \frac{2 \cdot 0,73 \cdot 220}{R_{\text{sarc}}} \right)^2}} \quad (5.37)$$

sau

$$0,47882 I_{E1} + 0,151416 I_{E2} = \frac{4,32 R_{\text{sarc}}^2 + 0,4}{1,2 R_{\text{sarc}}^2 \sqrt{8,6 + \left( \frac{0,9}{R_{\text{sarc}}} \right)^2}} \quad (5.38)$$

Pentru o valoare a curentului  $I_{E1}$  (de exemplu  $I_{E1} = 2[A]$ ) se obține:

$$0,151416 I_{E2} = \frac{4,32 R_{sarc}^2 + 0,4}{1,2 R_{sarc} \sqrt{8,6 + \left(\frac{0,9}{R_{sarc}}\right)^2}} - 0,96 \quad (5.39)$$

sau

$$I_{E2} = \frac{23,77 R_{sarc}^2 + 2,2}{R_{sarc}^2 \sqrt{8,6 + \left(\frac{0,9}{R_{sarc}}\right)^2}} - 6,3 \quad (5.40)$$

Dependența lui  $I_{E2}$  de  $R_{sarc}$  este dată în figura 5.5 :

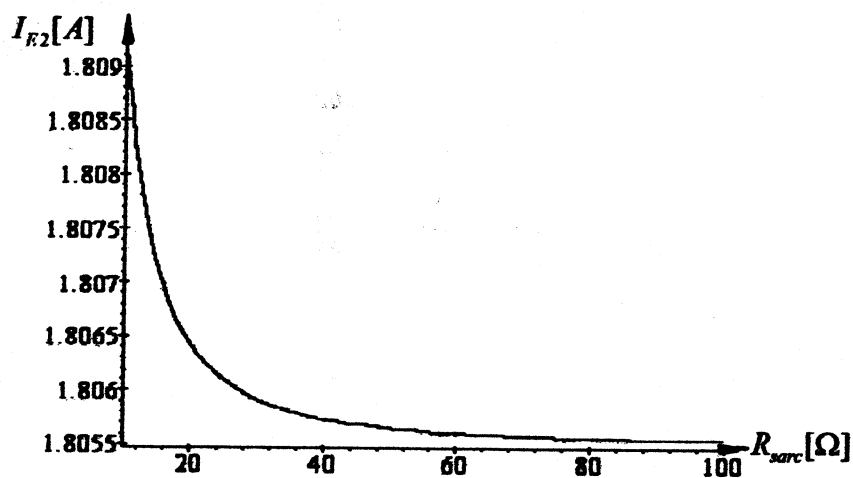


Fig.5.5. Dependența curentului de excitație  $I_{E2}$  de rezistența de sarcină

Dacă se exprimă „  $R_{sarc}$  ” în funcție de curentul de sarcină „  $I$  ” ( $R_{sarc} = U/I = 220/I$ ) se obține:

$$I_{E2} = \frac{23,77 \left(\frac{220}{I}\right)^2 + 2,2}{\left(\frac{220}{I}\right)^2 \sqrt{8,6 + \left(I \frac{0,9}{220}\right)^2}} = \frac{23,77 + (0,00674I)^2}{\sqrt{8,6 + (0,0041I)^2}} \quad (5.41)$$

Dependența lui  $I_{E2}$  de  $I$  este dată în figura 5.6 :

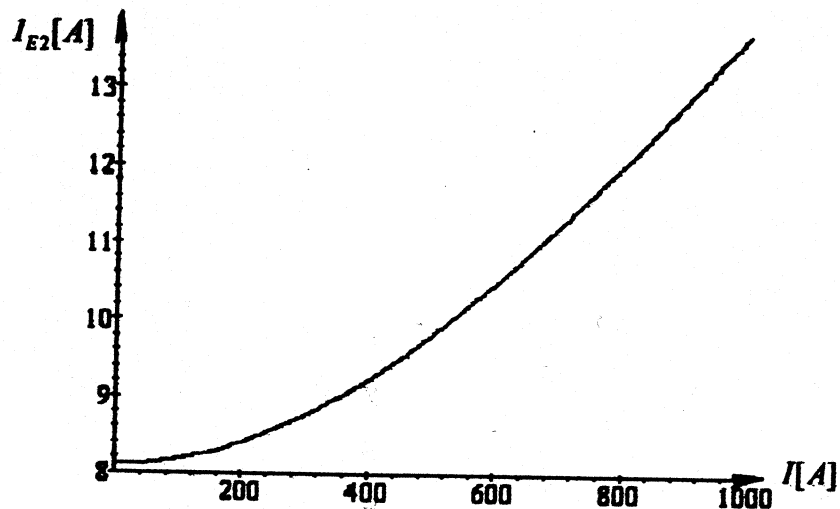


Fig.5.6. Dependența curentului de excitație  $I_{E2}$  de curentul de sarcină

În exploatarea curentă se poate lua și o dependență liniară a lui  $I_{E2}$  de  $I$  ca-n figura 5.7 :

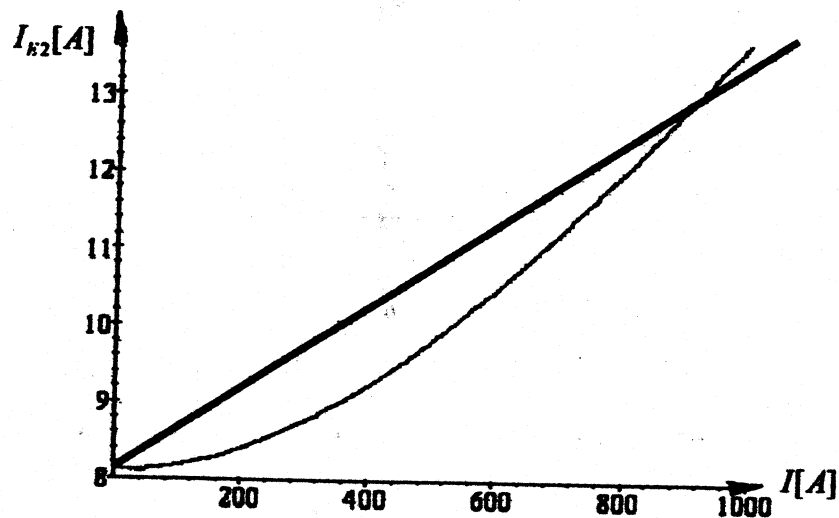


Fig.5.7. Dependența liniarizată a curentului de excitație  $I_{E2}$  de curentul de sarcină

### 5.3. Simulări numerice

In regim stationar sistemul de ecuatii ce defineste functionarea GS cu 2 infasurari de excitatie este:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = \omega L_q I_q \\ U_q = -\omega L_d I_d + \omega M_{E1q} I_{E1} + \omega M_{E2q} I_{E2} \\ U_{E1} = R_{E1} I_{E1} \\ U_{E2} = R_{E2} I_{E2} \\ M_{elmag} = p_1 [(L_d - L_q) I_d I_q + (M_{E1} I_{E1} + M_{E2} I_{E2}) I_q] \end{array} \right. \quad (5.42)$$

Considerand tensiunea  $U_{E2}$  pe infasurarea de excitatie 2 proportionala cu valoarea curentului de sarcina I, se poate scrie:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = \omega L_q I_q \\ U_q = -\omega L_d I_d + \omega M_{E1q} I_{E1} + \omega M_{E2q} I_{E2} \\ U_{E1} = R_{E1} I_{E1} \\ K \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = R_{E2} I_{E2} \\ M_{elmag} = p_1 [(L_d - L_q) I_d I_q + (M_{E1} I_{E1} + M_{E2} I_{E2}) I_q] \end{array} \right. \quad (5.43)$$

La functionarea in gol, la putere reactiva debitata nula, la borne fiind tensiunea si frecventa nominale, se poate scrie:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d = 0 \\ I_q = 0 \\ M_{elmag} = 0 \end{array} \right. \quad (5.44)$$

In aceste conditii sistemul (5.43) devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} 380 = 314(M_{E1q} I_{E1} + M_{E2q} I_{E2}) \\ U_{E1} = R_{E1} I_{E1} \\ 0 = R_{E2} I_{E2} \end{array} \right. \quad (5.45)$$

sau

$$\left\{ \begin{array}{l} 380 = 314 M_{E1q} I_{E1} \\ U_{E1} = R_{E1} I_{E1} \end{array} \right. \quad (5.46)$$

si valoric

$$\left\{ \begin{array}{l} 380 = 314 \cdot 0.478 I_{E1} \\ U_{E1} = 0.6 I_{E1} \end{array} \right\} \quad (5.47)$$

cu solutiile

$$I_{E1} = 2.53[A]; U_{E1} = 1.52[V] \quad (5.48)$$

La functionarea in sarcina nominala pe un consumator rezistiv de valoare R:

$$R = \frac{U_N}{I_N} = \frac{380}{690\sqrt{3}} = \frac{220}{690} = 0.318[\Omega] \quad (5.49)$$

sistemul (5.43) se scrie sub forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} -380 \sin \theta = 314 L_q I_q \\ 380 \cos \theta = -314 L_d I_d + 314 (M_{E1q} I_{E1} + M_{E2q} I_{E2}) \\ 1.52 = R_{E1} I_{E1} \\ K \cdot 690 \sqrt{3} = R_{E2} I_{E2} \end{array} \right\} \quad (5.50)$$

sau

$$\left\{ \begin{array}{l} -380 \sin \theta = 314 \cdot 0.0006 I_q \\ 380 \cos \theta = -314 \cdot 0.0006 I_d + 314 (0.478 \cdot 2.53 + 0.15 I_{E2}) \\ 690 \sqrt{3} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \\ K \cdot 690 \sqrt{3} = 0.2 I_{E2} \end{array} \right\} \quad (5.51)$$

sau cu notatiile:

|          |             |
|----------|-------------|
| $X$      | $I_d$       |
| $Y$      | $I_q$       |
| $U$      | $I_{E1}$    |
| $E$      | $I_{E2}$    |
| $W$      | $I_D$       |
| $Q$      | $I_Q$       |
| $V$      | $U_{E1}$    |
| $\omega$ | $\omega$    |
| $\theta$ | $\theta$    |
| $M$      | $M_{elmag}$ |
| $C$      | $M_{motor}$ |
| $I$      | $I_{real}$  |

sistemul devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.318X = 0.1884Y \\ 0.318Y = -0.1884X + 380 + 0.15E \\ K * 690 * \sqrt{3} = 0.2E \\ 690 * \sqrt{3} = \sqrt{X^2 + Y^2} \end{array} \right\} \quad (5.52)$$

cu solutiile

$$\{X = 609.17, K = 6.8878 \times 10^{-2}, Y = 1028.2, E = 411.59\} \quad (5.53)$$

### 5.3.1. Încărcare rezistivă 0-25%

$R = 1.275[\Omega]$  (in sistem  $R = 1523.8[\Omega]$  deoarece se raporteaza la  $\sqrt{3} I_N$ ).

$$1.275 * 1195.1 = 1523.8[\Omega]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 1523.8X = -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.15 \frac{dE}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\ 1523.8Y = -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.15\omega E + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\ V = -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 9.73 \frac{dE}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\ 0.068878 \sqrt{X^2 + Y^2} = -7.9 \frac{dX}{dt} + 0.2U + 5.96 \frac{dU}{dt} + 2.92 \frac{dE}{dt} + 2.37 \frac{dW}{dt} \\ 0 = -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 0.045 \frac{dE}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\ 0 = -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\ C - 1142YU - 342.6YE + 1.134XQ - 1.134YW = \frac{dC}{dt} \\ \frac{dC}{dt} = 1036.6 - 10 \frac{dC}{dt} - 3.3\omega \\ \frac{dV}{dt} = 10 - 32 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) - 160(X^2 + Y^2) \\ C(0) = 0 \\ V(0) = 1.5191 \\ X(0) = 0 \\ Y(0) = 0 \\ U(0) = 2.5318 \\ E(0) = 0 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ \omega(0) = 314 \end{array} \right\} \quad (5.54)$$

În continuare se dau simulările numerice pentru mărimile importante.

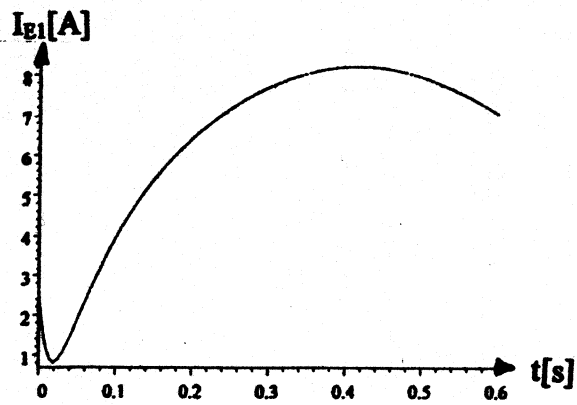


Fig.5.8.Variatia in timp a lui  $I_{E1}$ .

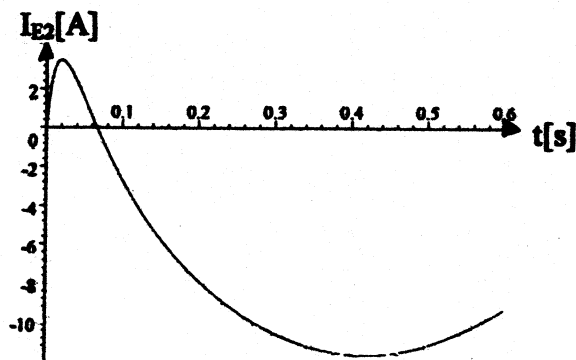


Fig.5.9.Variatia in timp a lui  $I_{E2}$ .

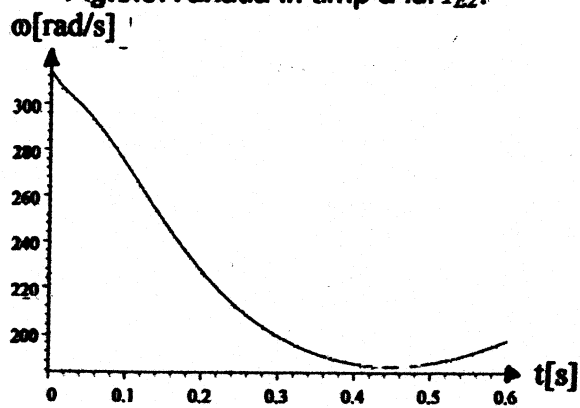


Fig.5.10.Variatia in timp a lui  $\omega$ .



13c

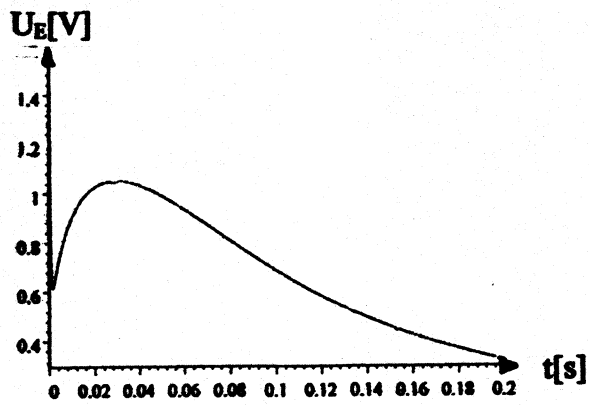


Fig.5.11.Variatia in timp a lui  $U_E$ .

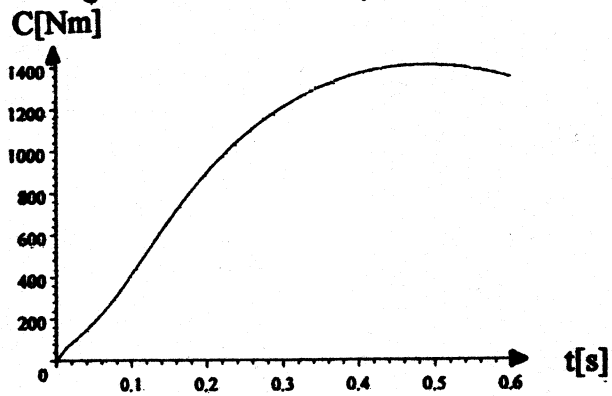


Fig.5.12.Variatia in timp a cuplului motor.

Tensiunea la borne se calculeaza cu relatia:

$$T(t) = 1523.8 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (5.55)$$

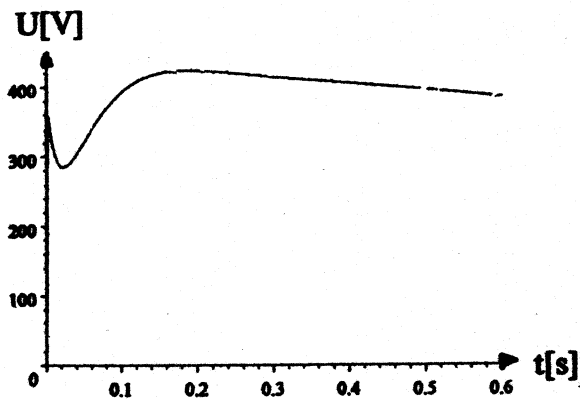


Fig.5.13.Variatia in timp a lui  $U$ .

B7

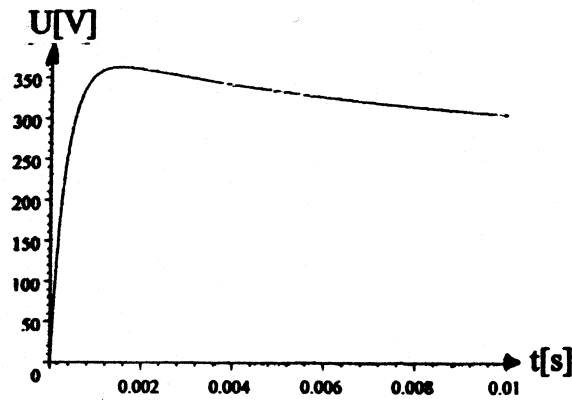


Fig.5.13'. Variatia in timp a lui  $U$  (detaliu).

Curentul real se calculeaza cu relatia:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (5.56)$$

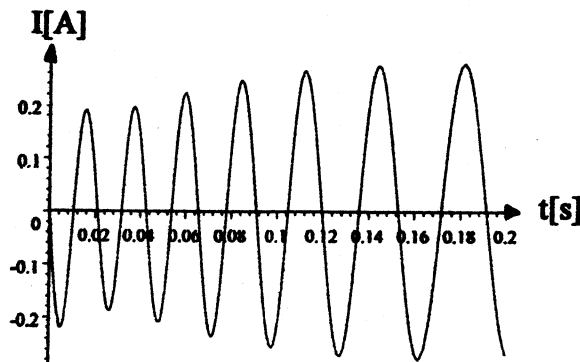


Fig.5.14. Variatia in timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculeaza cu relatia:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) - 342.6Y(t)E(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (5.57)$$

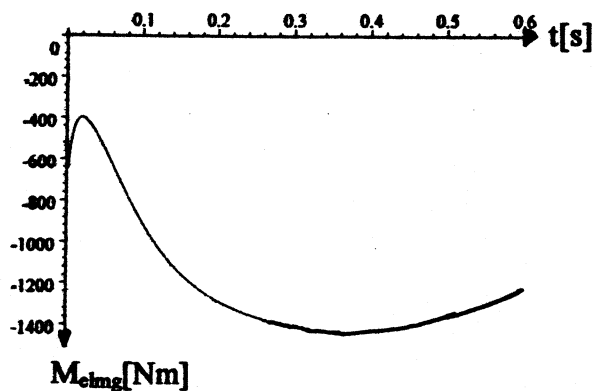


Fig.5.15. Variatia in timp a lui  $M_{elmag}$ .

### Concluzii la încărcarea rezistivă cu 25% $I_N$

1. Curentul  $I_{E1}$  din înfășurarea de excitație principală scade la 1[A] după care are un vârf de 8[A], având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I_{E1} = \frac{8-1}{2.56} 100 = 273.44\%(\text{mare})$$

Curentul  $I_{E2}$  prin înfășurarea de excitație adițională depinde de curentul  $I$  (de sarcină) și oscilează între 3[A] și 10[A], adică are o variație de 13[A].

2. Frecvența tensiunii de alimentare scade în primele 0.2s mai pronunțat comparativ cu GS cu o înfășurare de excitație, aceasta deoarece cuplul electromagnetic al GS cu două înfășurări de excitație este mai mare față de cel al GS cu o înfășurare de excitație, datorită componentei cuplului dată de curentul de excitație din înfășurarea a 2-a.

Acest cuplu determinat de curentul  $I_{E2}$  este mare la începutul procesului tranzitoriu datorită curentului de sarcină care se mărește de la 0 la  $I_N / 4$ .

Frecvența are o variație în timpul procesului tranzitoriu de:

$$\Delta f = \frac{50-30}{50} 100 = 40\%(\text{medie})$$

3. Tensiunea la borne  $U$  se stabilizează mult mai repede în acest caz, comparativ cu cazul GS cu o înfășurare, în sensul că după 0.1[s] este în zona tensiunii nominale. Are însă oscilații pronunțate în perioada 0-0.2[s], aceasta din cauza înfășurării de excitație adiționale. Atinge un maxim de 420[V] și un minim de 280[V] având deci o variație de:

$$\Delta U = \frac{420-280}{420} 100 = 33.3\%(\text{medie})$$

Și în acest caz apare un gol de tensiune însă de durată mult mai mică (0.001[s]), aceasta deoarece curentul prin înfășurarea auxiliară are o creștere rapidă și acest lucru crește valoarea tensiunii la borne într-un timp scurt.

4. Cuplul electromagnetic oscilează la început între 600[Nm] și 400[Nm] și ajunge la 1400[Nm] după 0.3[s].
5. Curentul  $I$  are o creștere lentă la  $I_N/4$  așa cum se observă în figura 5.14.
6. Cuplul motor crește fără oscilații la valoarea de 1400[Nm] în 0.5[s].

### 5.3.2. Încărcare rezistivă 0-75%

$R = 0.425[\Omega]$  (în sistem  $R = 507.92[\Omega]$  deoarece se raportează la  $\sqrt{3} I_N$ .  
 $0.425 * 1195.1 = 507.92[\Omega]$ )

$$\begin{aligned}
 507.92X &= -0.7 \frac{dX}{dt} + 0.7\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.15 \frac{dE}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\
 507.92Y &= -0.7\omega X - 0.7 \frac{dY}{dt} + 0.478\omega U + 0.15\omega E + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\
 V &= -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 9.73 \frac{dE}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\
 0.068878 \sqrt{X^2 + Y^2} &= -7.9 \frac{dX}{dt} + 0.2U + 5.96 \frac{dU}{dt} + 2.92 \frac{dE}{dt} + 2.37 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 0.045 \frac{dE}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\
 0 &= -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\
 C - 1142YU - 342.6YE + 1.134XQ - 1.134YW &= \frac{d\omega}{dt} \\
 \frac{dC}{dt} &= 1036.6 - 10 \frac{d\omega}{dt} - 3.3\omega \\
 \frac{dY}{dt} &= 10 - 32 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) - 160(X^2 + Y^2) \\
 C(0) &= 0 \\
 V(0) &= 1.5191 \\
 X(0) &= 0 \\
 Y(0) &= 0 \\
 U(0) &= 2.5318 \\
 E(0) &= 0 \\
 W(0) &= 0 \\
 Q(0) &= 0 \\
 \omega(0) &= 314
 \end{aligned} \tag{5.58}$$

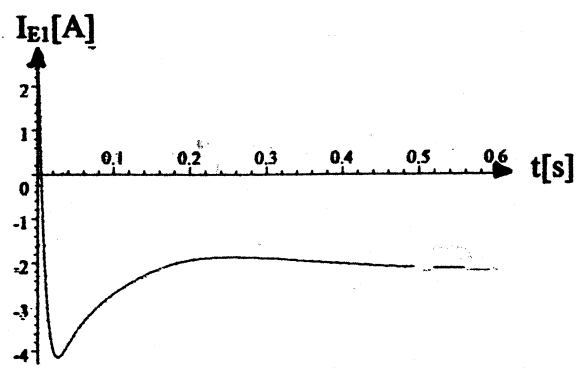


Fig.5.16. Variatia in timp a lui  $I_{E1}$ .

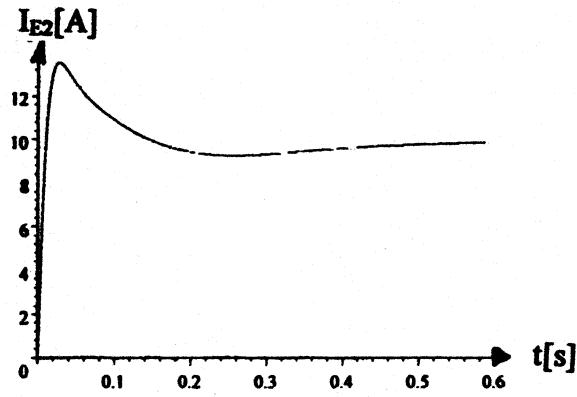


Fig.5.17.Variatia in timp a lui  $I_{E2}$ .

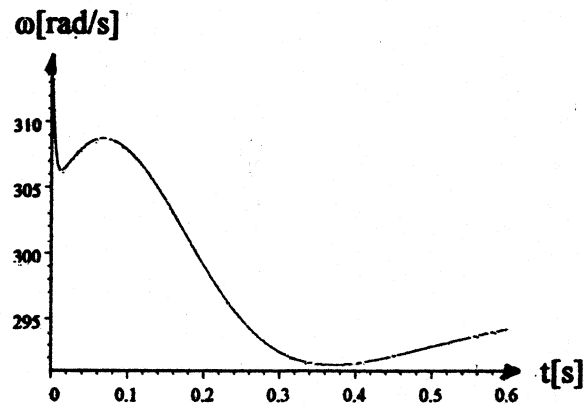


Fig.5.18.Variatia in timp a lui  $\omega$ .

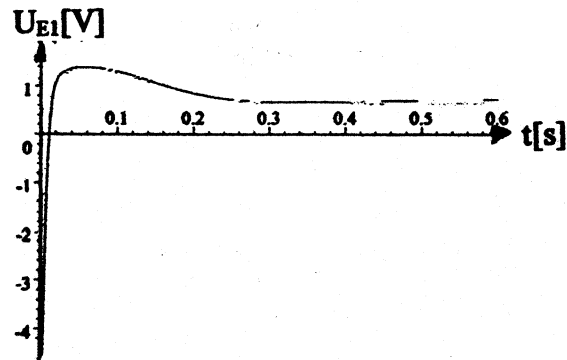


Fig.5.19.Variatia in timp a lui  $U_{E1}$ .

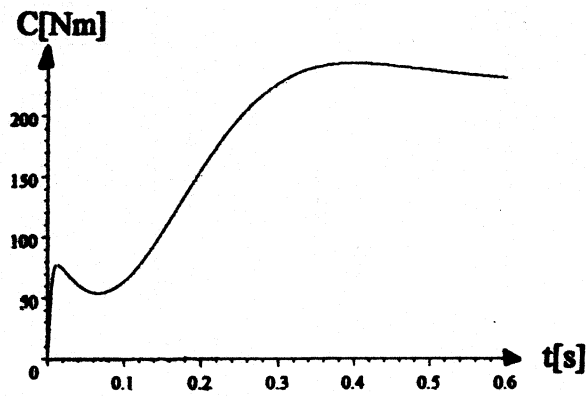


Fig.5.20. Variatia in timp a cuplului motor.

Tensiunea la borne se calculeaza cu relatia:

$$T(t) = 507.92 \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (5.59)$$

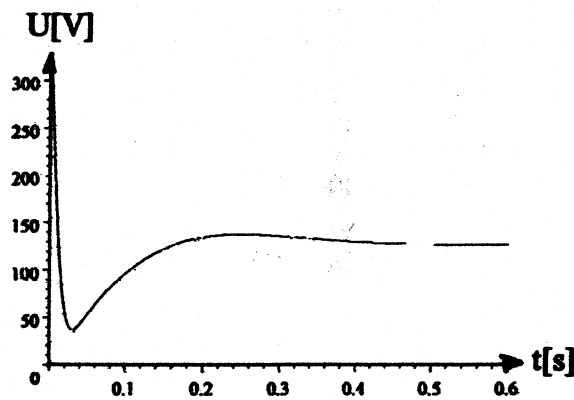


Fig.5.21. Variatia in timp a lui U.

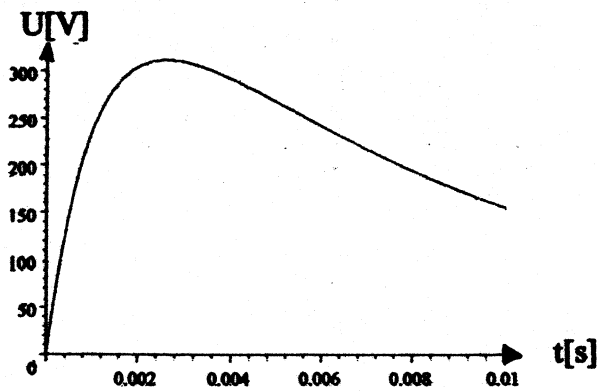


Fig.5.21'. Variatia in timp a lui U(detailiu).

Curentul real se calculeaza cu relatia:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) * t) - Y(t) \sin(\omega(t) * t) \quad (5.60)$$

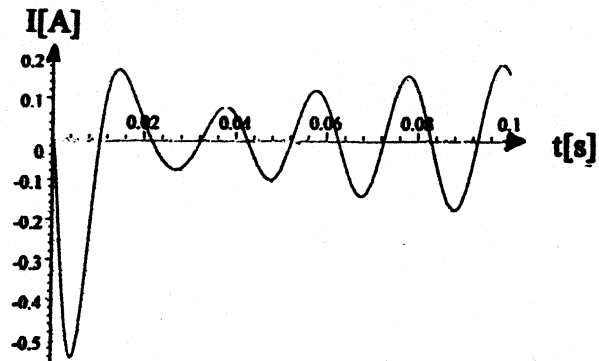


Fig.5.22. Variatia in timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic se calculeaza cu relatia:

$$M(t) = -1142Y(t)U(t) - 342.6Y(t)E(t) + 1.134X(t)Q(t) - 1.134Y(t)W(t) \quad (5.61)$$

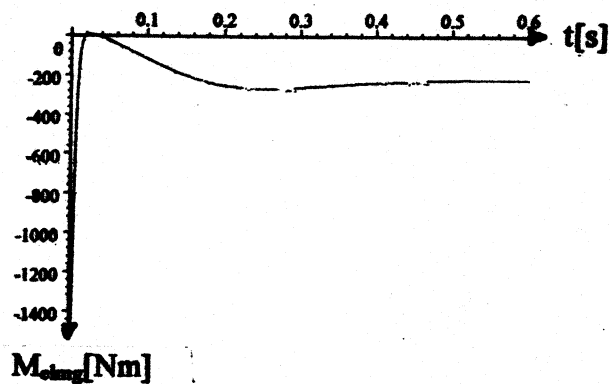


Fig.5.23. Variatia in timp a lui  $M_{elmag}$ .

### Concluzii la încărcarea rezistivă cu 75% $I_N$

1. Curentul  $I_{E1}$  din înfășurarea de excitație principală scade la  $-4[A]$  (figura 5.16) având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I_{E1} = \frac{2.5 + 4}{2.56} 100 = 253.91[\%](mare)$$

Curentul  $I_{E2}$  prin înfășurarea de excitație adițională depinde de curentul  $I$  (de sarcină) și are un vârf de  $13[A]$  după  $0.05[s]$ .

2. Frecvența tensiunii de alimentare scade în primele  $0.2[s]$  (fig.5.18) mai pronunțat comparativ cu GS cu o înfășurare de excitație, aceasta deoarece cuplul electromagnetic al GS cu două înfășurări de excitație este mai mare față de cel al GS cu o înfășurare de excitație, datorită componentei cuplului dată de curentul de excitație din înfășurarea a doua.

Acest cuplu determinat de curentul  $I_{E2}$  este mare la începutul procesului tranzitoriu datorită curentului de sarcină care se mărește de la 0 la  $3 I_N / 4$ .

Frecvența are o variație în timpul procesului tranzitoriu de:

$$\Delta f = \frac{50 - 46.178}{50} 100 = 7.644[\%](mica)$$

3. Tensiunea la borne  $U$  are oscilații pronunțate în perioada  $0-0.2[s]$ , aceasta din cauza înfășurării de excitație adiționale. Atinge un maxim de  $300[V]$  și un minim de  $50[V]$  având deci o variație de:

$$\Delta U = \frac{300 - 50}{380} 100 = 65.789[\%](medie)$$

așa ca în figurile 5.21 și 5.21'.

Și în acest caz apare un gol de tensiune însă de durată mult mai mică ( $0.001[s]$ ), aceasta deoarece curentul prin înfășurarea auxiliară are o creștere rapidă și acest lucru crește valoarea tensiunii la borne într-un timp scurt.

4. Cuplul electromagnetic crește rapid la  $1400[Nm]$  (fig 5.23).

5. Curentul  $I$  are o creștere la  $0.5 I_N$  în prima perioadă așa cum se observă în figura 5.22.

6. Cuplul motor prezintă oscilații la începutul procesului tranzitoriu (figura 5.20).



### 5.3.3. Încărcare rezistiv-inductivă 0-25%

Puterea motorului asincron corespunzătoare valorii de 25 % din puterea generatorului sincron are valoarea :

$$P_N = 113 \text{ [kW]}$$

Datele nominale ale motorului asincron cel mai apropiat acestei puteri sunt:

$$P_N = 110 \text{ [kW]}$$

$$U_N = 380 \text{ [V]}$$

$$\cos \varphi_N = 0,91; \eta_N = 0,9$$

$$n_N = 2940 \text{ [rpm]} (s_N = 0,02)$$

$$I_N = 117,8 \text{ [A]}$$

$$I_{10} = 22 \text{ [A]}$$

Folosind rezultatele teoretice din [B2] se calculează parametrii motorului .

Rezistența statorică  $R_1$  care include și pierderile în fier se calculează din bilanțul energetic :

$$3U_{I_N} \cdot \cos \varphi = M_{\text{elmag}} \cdot \Omega_1 + 3R_1 \cdot I_N^2$$

de unde

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{3U_{I_N} \cdot \cos \varphi - M_{\text{elmag}} \cdot \Omega_1}{3I_N^2} = \frac{3 \cdot 380 \cdot 117,8 \cdot 0,91 - 357,5 \cdot 314}{3 \cdot 117,8^2} = \\ &= \frac{122205,72 - 112255}{41630,52} = 0,23 \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

Inductanța statorică  $L_1$  se calculează din :

$$L_1 = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\left(\frac{U}{I_{10}}\right)^2 - R_1^2} = \frac{1}{314} \sqrt{\left(\frac{380}{22}\right)^2 - 0,23^2} = 0,05 \text{ [H]}$$

Rezistența rotorică raportată la stator,  $R_2$ , se calculează cu relația (B2-relația 2.10)

$$R_2 = \frac{M_{\text{elmag}} \cdot s_N \cdot \Omega_1}{3I_N^2}$$

unde :

$$I_{rN} = \frac{1,32P_N}{3U_{e1}(1-s_N)} = \frac{1,32 \cdot 110000}{3 \cdot 322 \cdot 0,98} = 153,26[\text{A}]$$

$$U_{e1} = \left(0,85 - \frac{0,08 \cdot P_1}{\sqrt[3]{P_N}}\right) U_N = \left(0,85 - \frac{0,08}{\sqrt[3]{110000}}\right) 380 = 322[\text{V}]$$

$$M_{\text{clmag}} = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{110000 \cdot 60}{2\pi \cdot 2940} = 357,5[\text{Nm}]$$

Pentru  $R_2$  se obține valoarea :

$$R_2 = \frac{357,5 \cdot 0,02 \cdot 2\pi \cdot 3000}{3 \cdot 153,26^2 \cdot 60} = 0,03 [\Omega]$$

Din relațiile (2.7) și (2.9) [B2] se poate scrie :

$$\begin{aligned} \text{tg}\varphi_N &= \frac{\omega_1 L_1 [R_2^2 + (s_N \omega_1 L_2)^2] - s_N^2 \omega_1^3 L_2 M^2}{R_1 [R_2^2 + (s_N \omega_1 L_2)^2] + R_2 s_N \omega_1^2 M^2} \\ M_{\text{clmagN}} &= \frac{3p_1 M^2 R_2 \cdot s_N \cdot \omega_1 \cdot I_N^2}{R_2^2 + (s_N \cdot \omega_1 L_2)^2} \end{aligned}$$

de unde rezultă :

$$R_2^2 + (s_N \cdot \omega_1 L_2)^2 = \frac{3p_1 M^2 \cdot R_2 s_N \omega_1 I_N^2}{M_{\text{clmagN}}}$$

și înlocuind în expresia :  $\text{tg}\varphi_N$ , se obține :

$$\text{tg}\varphi_N = \frac{3p_1 \omega_1 L_1 R_2 I_N^2 - s_N \omega_1^2 L_2 M_{\text{clmag}}}{3p_1 R_1 R_2 I_N^2 + R_2 \omega_1 \cdot M_{\text{clmag}}}$$

de unde se calculează inductanța proprie  $L_2$  :

$$L_2 = \frac{3p_1 R_2 I_N^2 (\omega_1 L_1 - R_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi_N) - R_2 \cdot \omega_1 \cdot M_{\text{elmag}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_N}{s_N \cdot \omega_1^2 \cdot M_{\text{elmag}}} =$$

$$= \frac{3 \cdot 0,03 (117,8^2) (15,7 - 0,23 \cdot 0,45) - 0,03 \cdot 314 \cdot 357,5 \cdot 0,45}{0,02 \cdot 314^2 \cdot 357,5} =$$

$$= \frac{19477 - 1515,44}{704961} = 0,026 [\text{H}]$$

Inductanța mutuală  $M$  se calculează din relația cuplului :

$$M^2 = \frac{M_{\text{elmagN}} [R_2^2 + (s_N \cdot \omega_1 L_2)^2]}{3p_1 \cdot R_2 \cdot s_N \cdot \omega_1 \cdot I_N^2} = \frac{357,5 [0,0009 + 0,02666]}{3 \cdot 0,03 \cdot 0,02 \cdot 314 \cdot 117,8^2} = 0,00125$$

sau

$$M = 0,03 [\text{H}]$$

Sistemul de ecuații corespunzător modelului ortogonal pentru motorul asincron cu parametrii  $R_1, R_2, L_1, L_2, M$ , se scrie sub forma :

$$\begin{cases} U_d = R_1 I_d + L_1 \frac{dI_d}{dt} - \omega_1 L_1 I_q + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_1 \cdot M \cdot I_{qr} \\ U_q = R_1 I_q + L_1 \frac{dI_q}{dt} + \omega_1 L_1 I_d + M \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_1 \cdot M \cdot I_{dr} \\ 0 = M \frac{dI_d}{dt} - M(\omega_1 - \omega) I_q + R_2 \cdot I_{dr} + L_2 \frac{dI_{dr}}{dt} - L_2 (\omega_1 - \omega) I_{qr} \\ 0 = M \frac{dI_q}{dt} + M(\omega_1 - \omega) I_d + R_2 I_{qr} + L_2 \frac{dI_{qr}}{dt} + L_2 (\omega_1 - \omega) I_{dr} \\ M_{\text{elmag}} = p_1 M (I_q I_{dr} - I_d \cdot I_{qr}) \end{cases}$$

sau numeric :

$$\begin{cases} U_d = 0,23 I_d + 0,05 \frac{dI_d}{dt} - \omega_1 \cdot 0,05 \cdot I_q + 0,03 \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_1 \cdot 0,03 \cdot I_{qr} \\ U_q = 0,23 I_q + 0,05 \frac{dI_q}{dt} + \omega_1 \cdot 0,05 \cdot I_d + 0,03 \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_1 \cdot 0,03 \cdot I_{dr} \\ 0 = 0,03 \frac{dI_d}{dt} - 0,03 (\omega_1 - \omega) I_q + 0,03 \cdot I_{dr} + 0,026 \frac{dI_{dr}}{dt} - 0,026 (\omega_1 - \omega) I_{qr} \\ 0 = 0,03 \frac{dI_q}{dt} + 0,03 (\omega_1 - \omega) I_d + 0,03 I_{qr} + 0,026 \frac{dI_{qr}}{dt} + 0,026 (\omega_1 - \omega) I_{dr} \\ M_{\text{elmag}} = 0,03 (I_q I_{dr} - I_d \cdot I_{qr}) \end{cases}$$

Penultimele 2 ecuații se pot simplifica și astfel sistemul de ecuații devine:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = 0,23I_d + 0,05 \frac{dI_d}{dt} - 0,05\omega_1 I_q + 0,03 \frac{dI_q}{dt} - 0,03\omega_1 I_{qr} \\ U_q = 0,23I_q + 0,05 \frac{dI_q}{dt} + 0,05\omega_1 I_d + 0,03 \frac{dI_d}{dt} + 0,03\omega_1 I_{dr} \\ 0 = \frac{dI_d}{dt} - (\omega_1 - \omega)I_q + I_{dr} + 0,866 \frac{dI_q}{dt} - 0,866(\omega_1 - \omega)I_{qr} \\ 0 = \frac{dI_q}{dt} + (\omega_1 - \omega)I_d + I_{qr} + 0,866 \frac{dI_d}{dt} + 0,866(\omega_1 - \omega)I_{dr} \end{array} \right.$$

Sistemul de ecuații corespunzător modelului ortogonal pentru generatorul sincron este:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1216X = -3,6 \frac{dX}{dt} + 3,6\omega Y + 0,478 \frac{dU}{dt} + 0,15 \frac{dE}{dt} + 0,346 \frac{dW}{dt} - 0,346\omega Q \\ 1216Y = -3,6 \frac{dY}{dt} - 3,6\omega X + 0,478\omega U + 0,15\omega E + 0,346\omega W + 0,346 \frac{dQ}{dt} \\ V = -25,18 \frac{dX}{dt} + 0,6U + 19,87 \frac{dU}{dt} + 9,73 \frac{dE}{dt} + 7,9 \frac{dW}{dt} \\ 0,068878 \sqrt{X^2 + Y^2} = -7,9 \frac{dX}{dt} + 0,2E + 5,96 \frac{dE}{dt} + 2,92 \frac{dU}{dt} + 2,37 \frac{dW}{dt} \\ 0 = -0,346 \frac{dX}{dt} + 0,15 \frac{dU}{dt} + 0,045 \frac{dE}{dt} + 35,8W + 0,6 \frac{dW}{dt} \\ 0 = -0,346 \frac{dY}{dt} + 35,8Q + 0,6 \frac{dQ}{dt} \\ C - 1142YU - 342,6YE + 1,134XQ - 1,134YW = \frac{dC}{dt} \\ \frac{dC}{dt} = 1036,6 - 10 \frac{dC}{dt} - 3,3\omega \\ \frac{dV}{dt} = 0,625 - 20 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) - 10(X^2 + Y^2) \\ C(0) = 0 \\ V(0) = 1,5191 \\ X(0) = 0 \\ Y(0) = 0 \\ U(0) = 2,5318 \\ E(0) = 0 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ \omega(0) = 314 \end{array} \right.$$

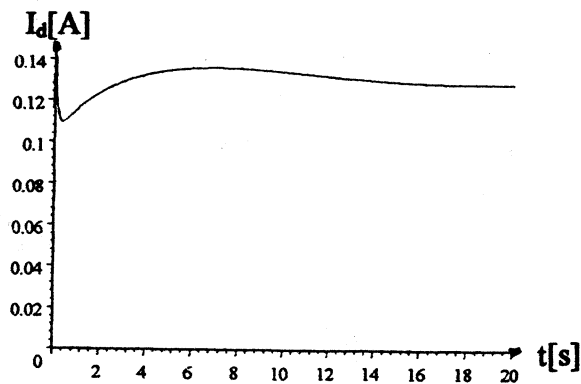


Fig.5.24. Variația în timp a lui  $I_d$ .

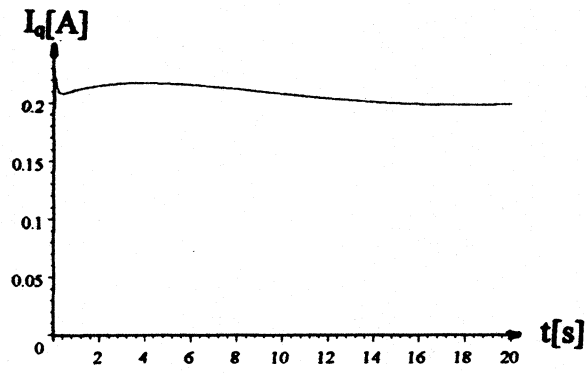


Fig.5.25 Variatia in timp a lui  $I_q$ .

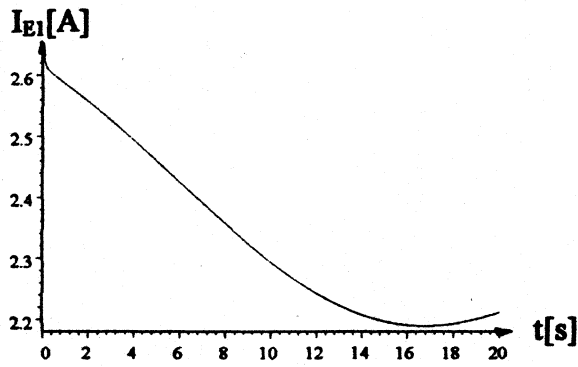


Fig.5.26 Variatia in timp a lui  $I_{E1}$ .

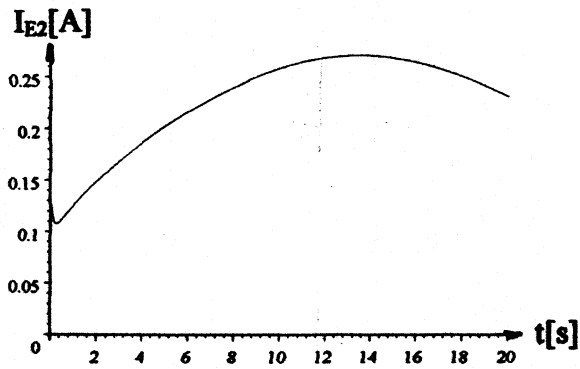


Fig.5.27 Variatia in timp a lui  $I_{E2}$ .

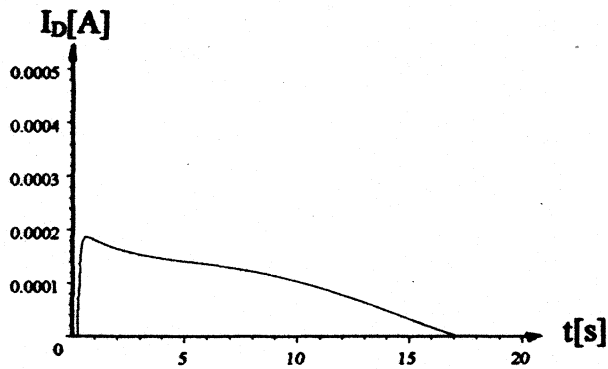


Fig.5.28 Variatia in timp a lui  $I_D$ .

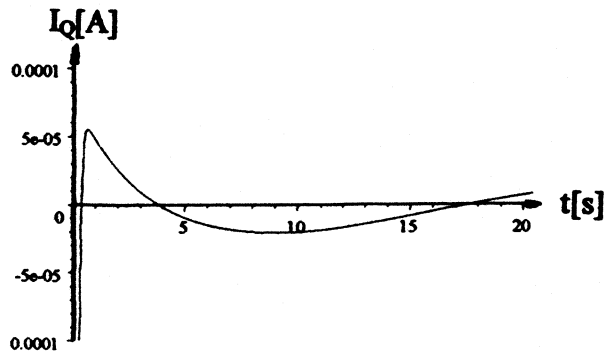


Fig.5.29 Variatia in timp a lui  $I_Q$ .

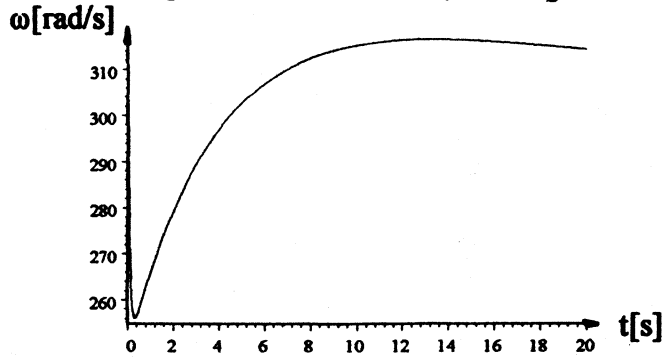


Fig.5.30 Variatia in timp a lui  $\omega$ .

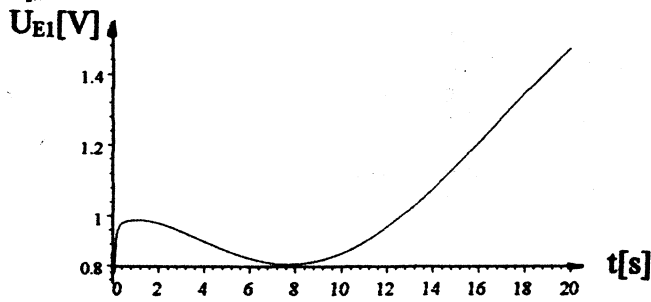


Fig.5.31 Variatia in timp a lui  $U_{E1}$ .

Curentul în mașina reală este:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Y(t) \sin(\omega(t) \cdot t)$$

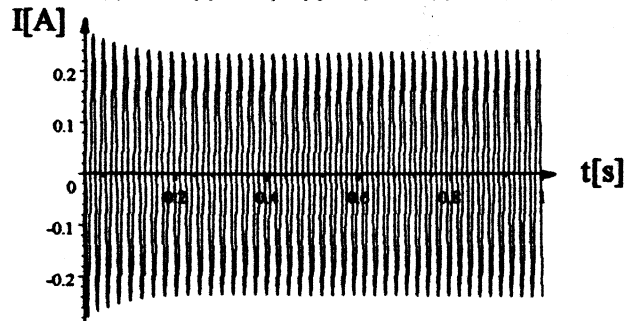


Fig.5.32 Variatia in timp a lui  $I$ .

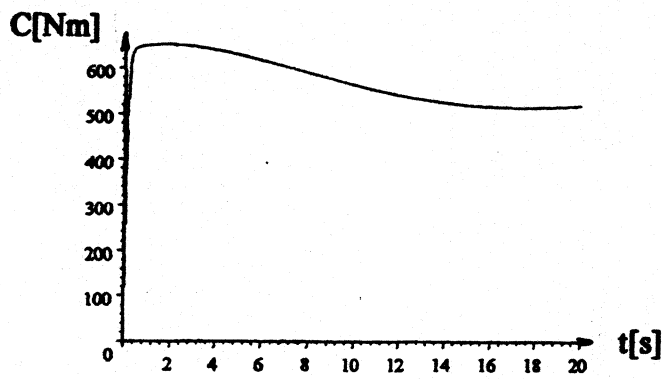


Fig.5.33. Variatia in timp a lui  $M_{motor}$ .

Cuplul electromagnetic în mașina reală este:

$$M_{cimg}(t) = M(t) = 1142Y(t)U(t) + 342.6Y(t)E(t) - 1.134X(t)Q(t) + 1.134Y(t)W(t)$$

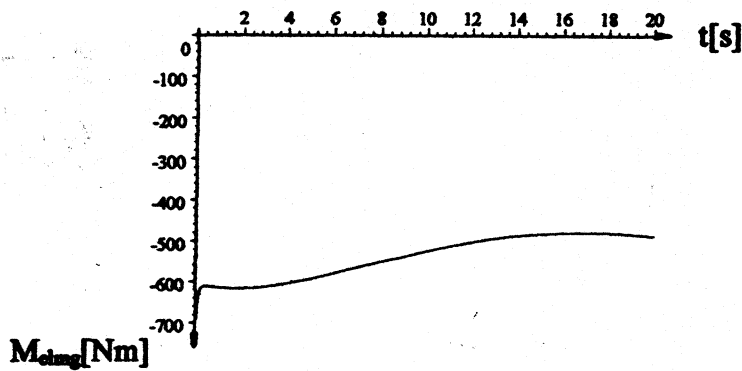


Fig.5.34. Variatia in timp a lui  $M_{cimg}$ .

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 15.7 \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2}$$

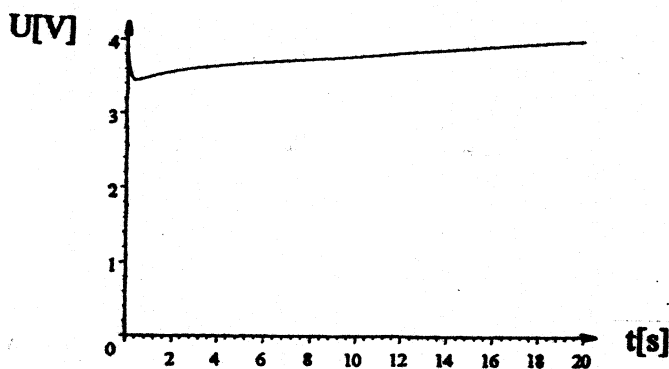


Fig.5.35. Variatia in timp a lui  $U$ .

### Concluzii la încărcarea ohmic-inductivă cu 25% $I_N$

1. Curentul  $I_{E1}$  din înfășurarea de excitație principală scade la 2,2[A](figura 5.26) având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I_{E1} = \frac{2.66 - 2.2}{2.2} 100 = 20.9\%(\text{medie})$$

Curentul  $I_{E2}$  prin înfășurarea de excitație adițională depinde de curentul  $I$ (de sarcină) și are un vârf de 0,26[A] după 14[s] (figura 5.27).

2. Frecvența tensiunii de alimentare scade în primele 0.2[s] (figura 5.30) mai pronunțat comparativ cu GS cu o înfășurare de excitație, aceasta deoarece cuplul electromagnetic al GS cu două înfășurări de excitație este mai mare față de cel al GS cu o înfășurare de excitație, datorită componentei cuplului dată de curentul de excitație din înfășurarea a doua.

Acest cuplu determinat de curentul  $I_{E2}$  este mare la începutul procesului tranzitoriu, datorită curentului de sarcină care se mărește de la 0 la 25%  $I_N$ .

3. Tensiunea la borne  $U$  scade de la 380 [V] la 355 [V], având deci o variație de:

$$\Delta U = \frac{380 - 355}{380} 100 = 6.5\%(\text{mica})$$

asa ca în figura 5.35.

4. Cuplul electromagnetic crește rapid la 700[Nm] așa ca-n figura 5.34.

5. Curentul  $I$  are o creștere la  $0.28I_N$  în prima perioadă așa cum se observă în figura 5.32.

6. Cuplul motor crește de la 0 la 660[Nm] în primele 0,3[s] (figura 5.33).



### 5.3.4. Încărcare rezistiv-inductivă 0-50%

La încărcarea de 50% din  $P_N$  a generatorului sincron se conectează simultan 2 motoare asincrone de 110[kW] și deci curentul debitat de generatorul sincron  $I^2 = I_d^2 + I_q^2$  se va distribui cu valorile  $I_d/2$  și  $I_q/2$  prin înfășurările motoarelor asincrone. Astfel, sistemul de ecuații corespunzător modelului ortogonal se scrie:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = 0,115I_d + 0,025 \frac{dI_d}{dt} - 0,025\omega_1 I_q + 0,015 \frac{dI_{dr}}{dt} - 0,015\omega_1 I_{qr} \\ U_q = 0,115I_q + 0,025 \frac{dI_q}{dt} + 0,025\omega_1 I_d + 0,015 \frac{dI_{qr}}{dt} + 0,015\omega_1 I_{dr} \\ 0 = 0,015 \frac{dI_d}{dt} - 0,015(\omega_1 - \omega) I_q + 0,015 I_{dr} + 0,013 \frac{dI_{dr}}{dt} - 0,013(\omega_1 - \omega) I_{qr} \\ 0 = 0,015 \frac{dI_q}{dt} + 0,015(\omega_1 - \omega) I_d + 0,015 I_{qr} + 0,013 \frac{dI_{qr}}{dt} + 0,013(\omega_1 - \omega) I_{dr} \\ M_{el\text{mag}} = 0,0075(I_q I_{dr} - I_d I_{qr}) \end{array} \right.$$

sau sub forma simplificată:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = 0,115I_d + 0,025 \frac{dI_d}{dt} - 0,025\omega_1 I_q + 0,015 \frac{dI_{dr}}{dt} - 0,015\omega_1 I_{qr} \\ U_q = 0,115I_q + 0,025 \frac{dI_q}{dt} + 0,025\omega_1 I_d + 0,015 \frac{dI_{qr}}{dt} + 0,015\omega_1 I_{dr} \\ 0 = \frac{dI_d}{dt} - (\omega_1 - \omega) I_q + I_{dr} + 0,866 \frac{dI_{dr}}{dt} - 0,866(\omega_1 - \omega) I_{qr} \\ 0 = \frac{dI_q}{dt} + (\omega_1 - \omega) I_d + I_{qr} + 0,866 \frac{dI_{qr}}{dt} + 0,866(\omega_1 - \omega) I_{dr} \end{array} \right.$$

Sistemul de ecuații corespunzător modelului ortogonal pentru generatorul sincron este:

$$\left\{ \begin{array}{l} 608X = -1,8 \frac{dX}{dt} + 1,8\omega Y + 0,478 \frac{dU}{dt} + 0,15 \frac{dE}{dt} + 0,346 \frac{dW}{dt} - 0,346\omega Q \\ 608Y = -1,8 \frac{dY}{dt} - 1,8\omega X + 0,478\omega U + 0,15\omega E + 0,346\omega W + 0,346 \frac{dQ}{dt} \\ V = -25,18 \frac{dX}{dt} + 0,6U + 19,87 \frac{dU}{dt} + 9,73 \frac{dE}{dt} + 7,9 \frac{dW}{dt} \\ 0,068878\sqrt{X^2 + Y^2} = -7,9 \frac{dX}{dt} + 0,2E + 5,96 \frac{dE}{dt} + 2,92 \frac{dU}{dt} + 2,37 \frac{dW}{dt} \\ 0 = -0,346 \frac{dX}{dt} + 0,15 \frac{dU}{dt} + 0,045 \frac{dE}{dt} + 35,8W + 0,6 \frac{dW}{dt} \\ 0 = -0,346 \frac{dY}{dt} + 35,8Q + 0,6 \frac{dQ}{dt} \\ C - 1142YU - 342,6YE + 1,134XQ - 1,134YW = \frac{d\omega}{dt} \\ \frac{dC}{dt} = 1036,6 - 10 \frac{d\omega}{dt} - 3,3\omega \\ \frac{dV}{dt} = 2,5 - 20 \left( X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt} \right) - 10(X^2 + Y^2) \\ C(0) = 0 \\ V(0) = 1,5191 \\ X(0) = 0 \\ Y(0) = 0 \\ U(0) = 2,5318 \\ E(0) = 0 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ \omega(0) = 314 \end{array} \right.$$

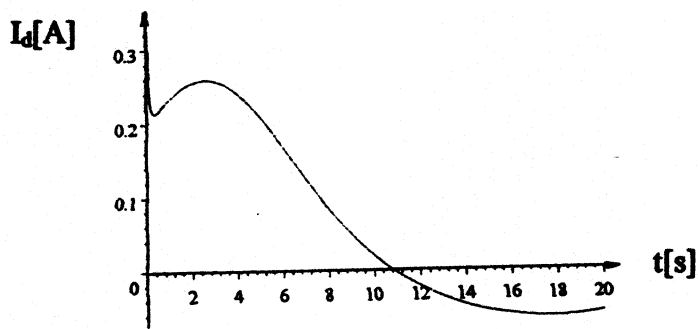


Fig.5.36.Variatia in timp a lui  $I_d$ .

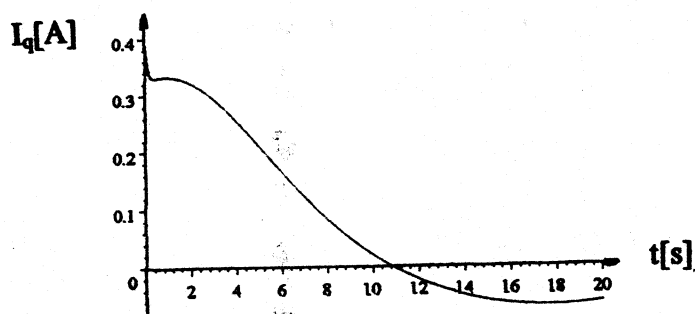


Fig.5.37.Variatia in timp a lui  $I_q$ .

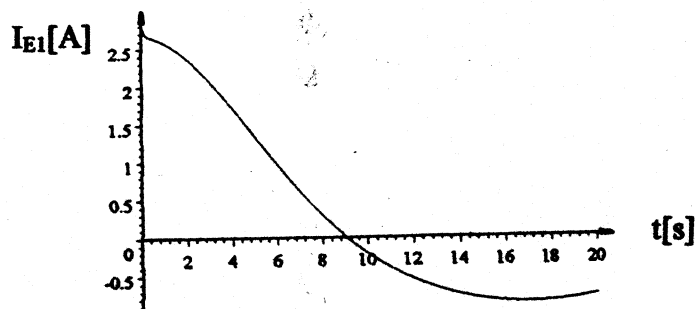


Fig.5.38.Variatia in timp a lui  $I_{E1}$ .

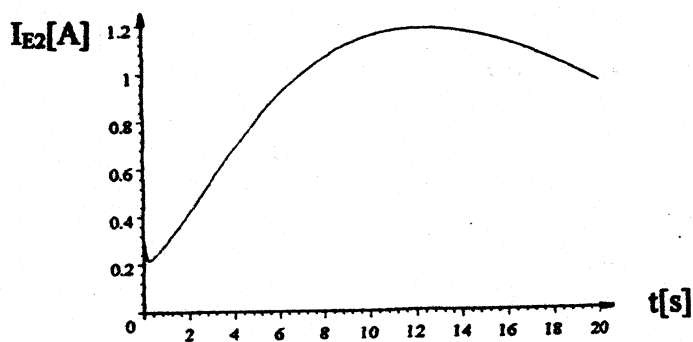


Fig.5.39.Variatia in timp a lui  $I_{E2}$ .

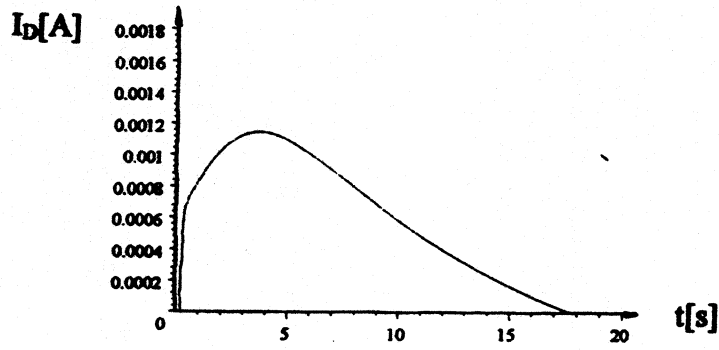


Fig.5.40. Variatia in timp a lui  $I_D$ .

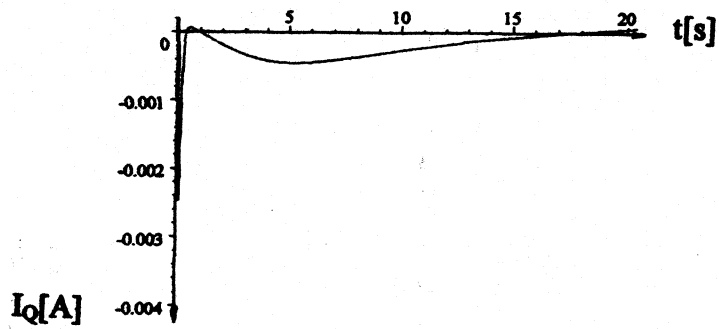


Fig.5.41. Variatia in timp a lui  $I_Q$ .

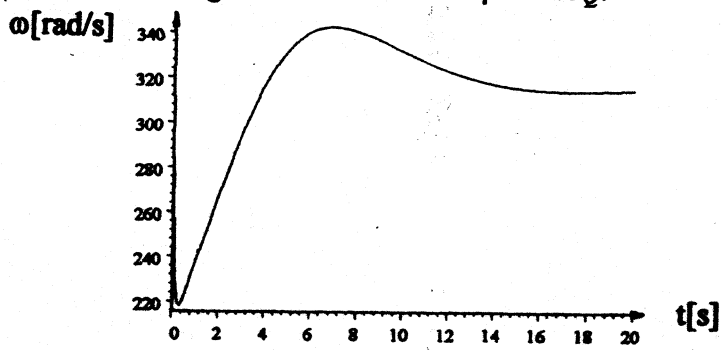


Fig.5.42. Variatia in timp a lui  $\omega$ .

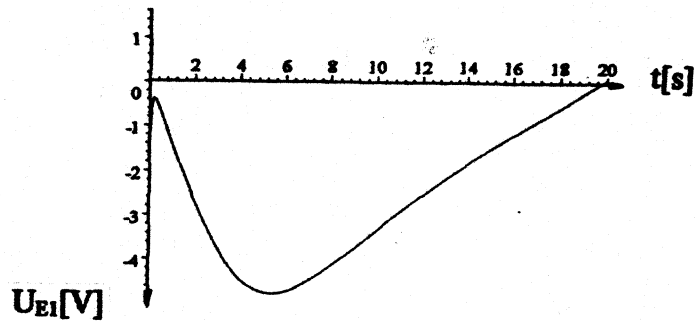


Fig.5.43. Variatia in timp a lui  $U_{E1}$ .

Curentul în mașina reală este:

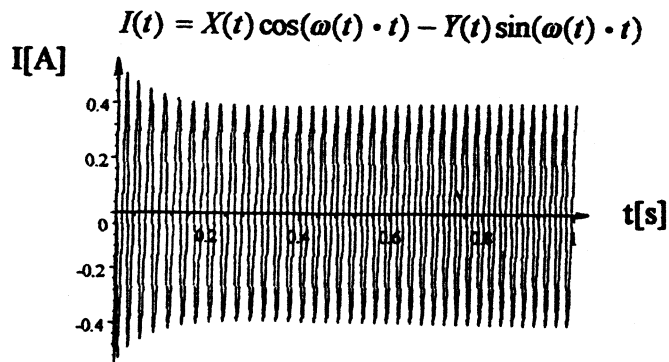


Fig.5.44. Variatia in timp a lui  $I$ .

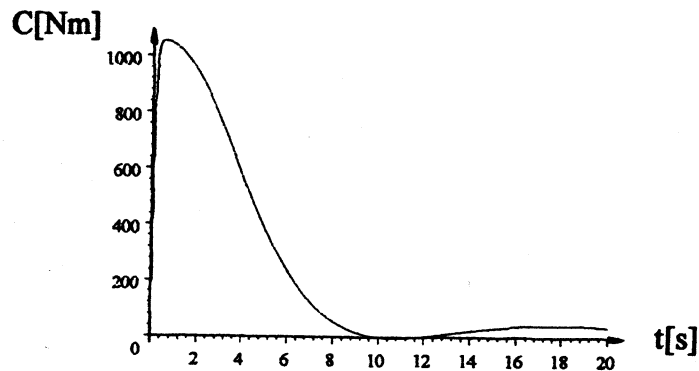


Fig.5.45. Variatia in timp a lui  $M_{motor}$ .

Cuplul electromagnetic în mașina reală este:

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 1142Y(t)U(t) + 342.6Y(t)E(t) - 1.134X(t)Q(t) + 1.134Y(t)W(t)$$

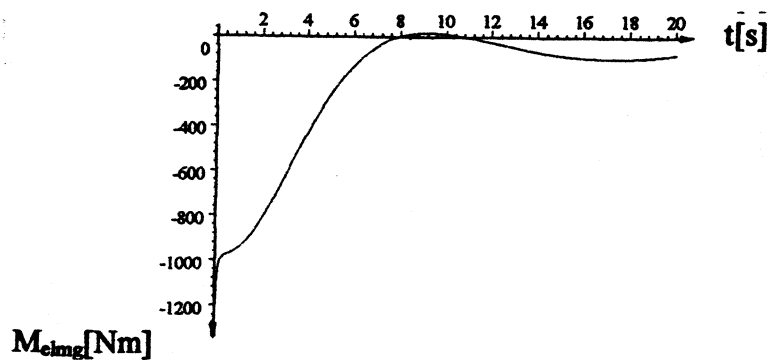


Fig.5.46. Variatia in timp a lui  $M_{elmag}$ .

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 7.85 \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2}$$

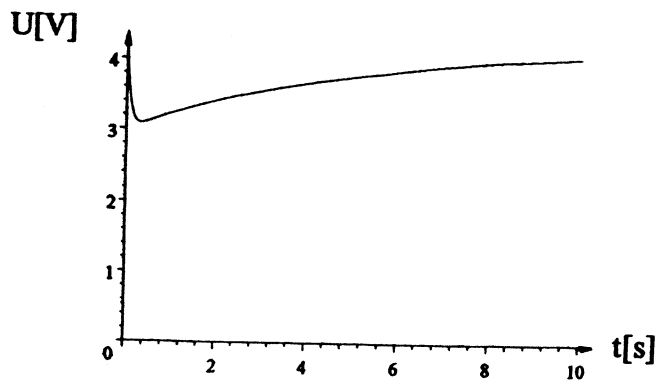


Fig.5.47.Variatia in timp a lui U.

#### Concluzii la încărcarea ohmic-inductivă cu 50%I<sub>N</sub>

1. Curentul I<sub>E1</sub> (din înfășurarea de excitație principală) scade de la 2,53[A] (figura 5.38) la zero în 9 secunde, având tendința de a-și inversa sensul deoarece înfășurarea adițională are o pondere prea mare.

Curentul I<sub>E2</sub> prin înfășurarea de excitație adițională depinde de curentul I (de sarcină) și are un vârf de 1,2 [A] după 14[s] (figura 5.39).

2. Frecvența tensiunii de alimentare scade în primele 0.2[s] (figura 5.42) mai pronunțat comparativ cu GS cu o înfășurare de excitație, aceasta deoarece cuplul electromagnetic al GS cu două înfășurări de excitație este mai mare decât cel al GS cu o înfășurare de excitație, datorită componentei cuplului dată de curentul de excitație din înfășurarea a doua.

Acest cuplu determinat de curentul I<sub>E2</sub> este mare la începutul procesului tranzitoriu, datorită curentului de sarcină care se mărește de la 0 la 50%I<sub>N</sub>.

3. Tensiunea la borne U scade în perioada 0-0.4[s] de la 380[V] la 310[V], aceasta din cauza înfășurării de excitație adiționale. Atinge un minim de 310[V] având, deci, o variație de

$$\Delta U = \frac{380 - 310}{380} * 100 = 18.42\% \text{ (medie)}$$

asa ca în figura 5.47.

4. Cuplul electromagnetic crește rapid la 1200[Nm] așa ca în figura 5.46.
5. Curentul I are o creștere la 0.46I<sub>N</sub> în prima perioadă, așa cum se poate observa în figura 5.44.
6. Cuplul motor crește de la 0 la 1050[Nm] în primele 0.8[s] (figura 5.45).

### 5.3.5. Încărcare rezistiv-inductivă 0-75%

La încărcarea de 75% din  $P_N$  a generatorului sincron se conectează simultan 3 motoare asincrone de 110[kW] și deci curentul debitat de generatorul sincron  $I^2 = I_d^2 + I_q^2$  se va distribui cu valorile  $I_d/3$  și  $I_q/3$  prin înfășurările motoarelor asincrone. Astfel, sistemul de ecuații corespunzător modelului ortogonal se scrie:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = 0,077I_d + 0,0167 \frac{dI_d}{dt} - 0,0167\omega_1 I_q + 0,01 \frac{dI_q}{dt} - 0,01\omega_1 I_{qr} \\ U_q = 0,077I_q + 0,0167 \frac{dI_q}{dt} + 0,0167\omega_1 I_d + 0,01 \frac{dI_d}{dt} + 0,01\omega_1 I_{dr} \\ 0 = 0,01 \frac{dI_d}{dt} - 0,01(\omega_1 - \omega)I_q + 0,01I_{dr} + 0,0087 \frac{dI_q}{dt} - 0,0087(\omega_1 - \omega)I_{qr} \\ 0 = 0,01 \frac{dI_q}{dt} + 0,01(\omega_1 - \omega)I_d + 0,01I_{qr} + 0,0087 \frac{dI_d}{dt} + 0,0087(\omega_1 - \omega)I_{dr} \\ M_{elmog} = 0,0033(I_q I_{dr} - I_d I_{qr}) \end{array} \right.$$

sau sub forma simplificată:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_d = 0,077I_d + 0,0167 \frac{dI_d}{dt} - 0,0167\omega_1 I_q + 0,01 \frac{dI_q}{dt} - 0,01\omega_1 I_{qr} \\ U_q = 0,077I_q + 0,0167 \frac{dI_q}{dt} + 0,0167\omega_1 I_d + 0,01 \frac{dI_d}{dt} + 0,01\omega_1 I_{dr} \\ 0 = \frac{dI_d}{dt} - (\omega_1 - \omega)I_q + I_{dr} + 0,87 \frac{dI_q}{dt} - 0,87(\omega_1 - \omega)I_{qr} \\ 0 = \frac{dI_q}{dt} + (\omega_1 - \omega)I_d + I_{qr} + 0,87 \frac{dI_d}{dt} + 0,87(\omega_1 - \omega)I_{dr} \end{array} \right.$$

Sistemul de ecuații corespunzător modelului ortogonal pentru generatorul sincron este:

$$\left\{ \begin{array}{l} 405X = -1.2 \frac{dX}{dt} + 1.2\omega Y + 0.478 \frac{dU}{dt} + 0.15 \frac{dE}{dt} + 0.346 \frac{dW}{dt} - 0.346\omega Q \\ 405Y = -1.2 \frac{dY}{dt} - 1.2\omega X + 0.478\omega U + 0.15\omega E + 0.346\omega W + 0.346 \frac{dQ}{dt} \\ V = -25.18 \frac{dX}{dt} + 0.6U + 19.87 \frac{dU}{dt} + 9.73 \frac{dE}{dt} + 7.9 \frac{dW}{dt} \\ 0.068878\sqrt{X^2 + Y^2} = -7.9 \frac{dX}{dt} + 0.2E + 5.96 \frac{dE}{dt} + 2.92 \frac{dU}{dt} + 2.37 \frac{dW}{dt} \\ 0 = -0.346 \frac{dX}{dt} + 0.15 \frac{dU}{dt} + 0.045 \frac{dE}{dt} + 35.8W + 0.6 \frac{dW}{dt} \\ 0 = -0.346 \frac{dY}{dt} + 35.8Q + 0.6 \frac{dQ}{dt} \\ C - 1142YU - 342.6YE + 1.134XQ - 1.134YW = \frac{dC}{dt} \\ \frac{dC}{dt} = 1036.6 - 10 \frac{dC}{dt} - 3.3\omega \\ \frac{dV}{dt} = 2.5 - 20(X \frac{dX}{dt} + Y \frac{dY}{dt}) - 10(X^2 + Y^2) \\ C(0) = 0 \\ V(0) = 1.5191 \\ X(0) = 0 \\ Y(0) = 0 \\ U(0) = 2.5318 \\ E(0) = 0 \\ W(0) = 0 \\ Q(0) = 0 \\ \omega(0) = 314 \end{array} \right.$$

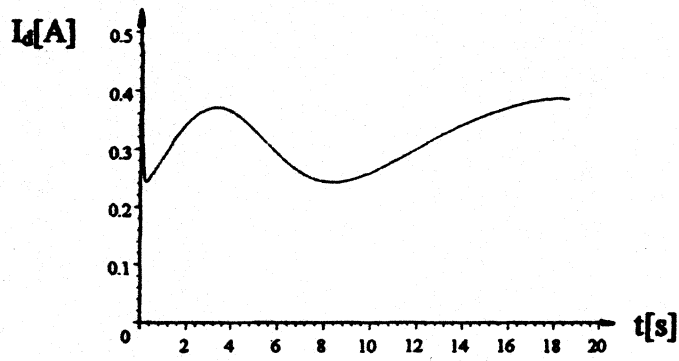


Fig.5.48. Variatia in timp a lui  $I_d$ .

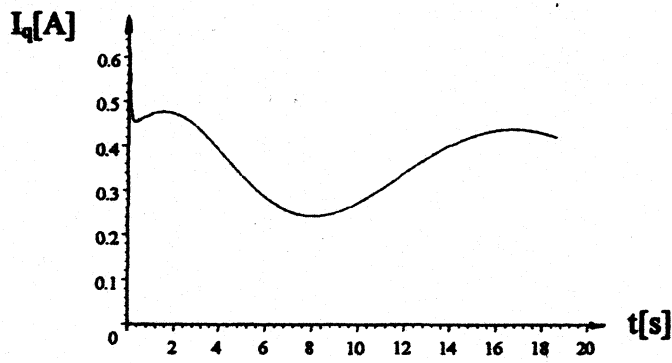


Fig.5.49. Variatia in timp a lui  $I_q$ .

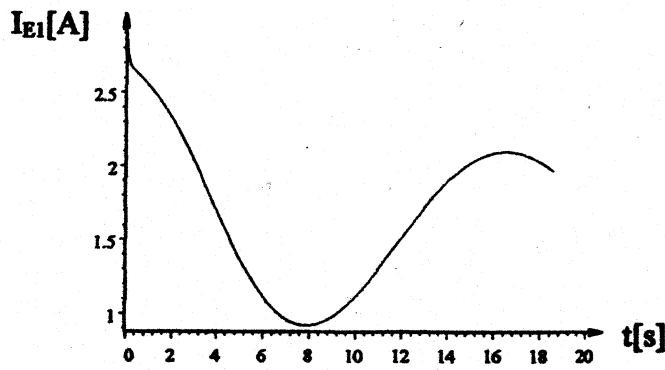


Fig.5.50. Variatia in timp a lui  $I_{E1}$ .

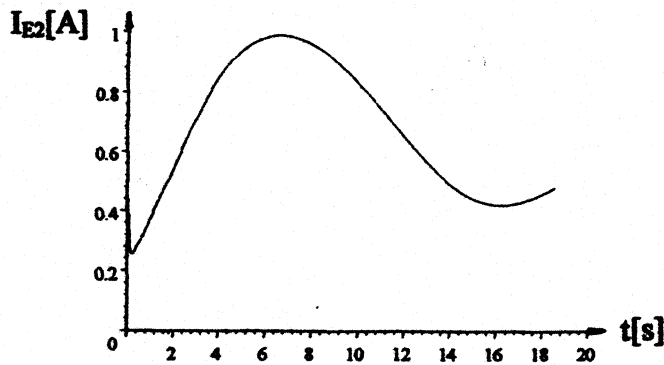


Fig.5.51. Variatia in timp a lui  $I_{E2}$ .

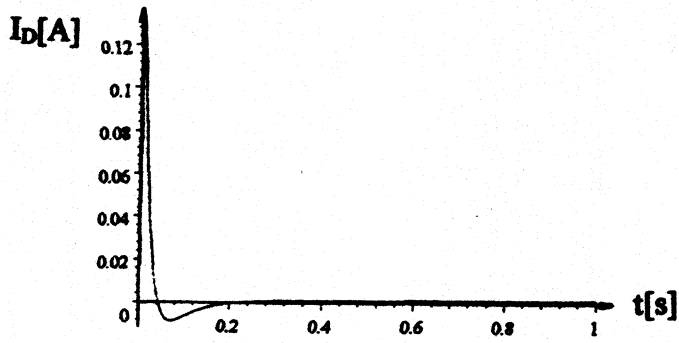


Fig.5.52. Variatia in timp a lui  $I_D$ .

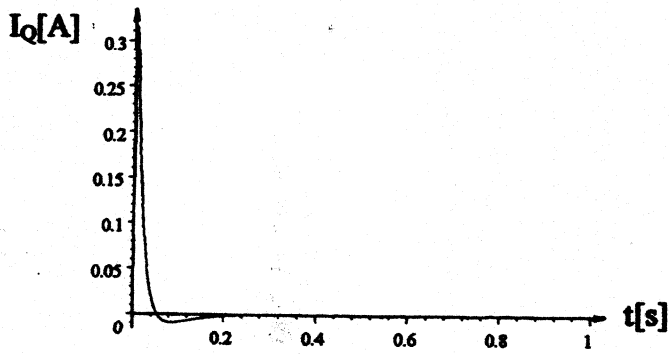


Fig.5.53. Variatia in timp a lui  $I_Q$ .

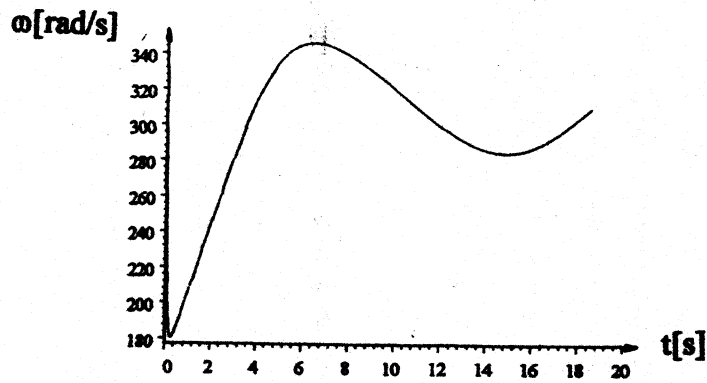


Fig.5.54. Variatia in timp a lui  $\omega$ .

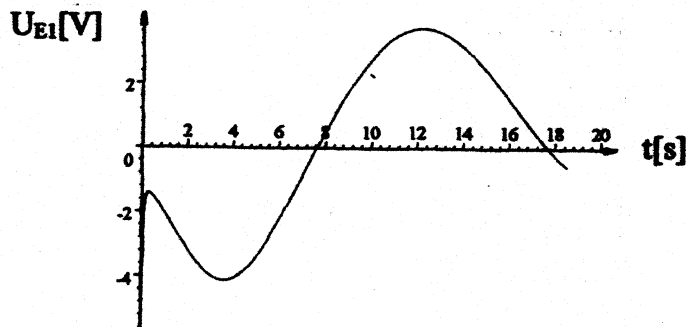


Fig.5.55. Variatia in timp a lui  $U_{E1}$ .



Curentul în mașina reală este:

$$I(t) = X(t) \cos(\omega(t) \cdot t) - Y(t) \sin(\omega(t) \cdot t)$$

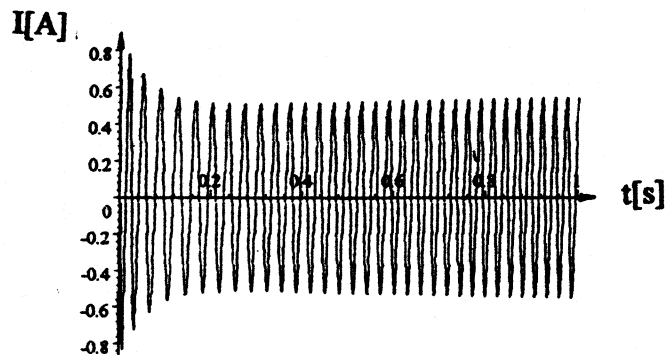


Fig.5.56. Variația în timp a lui  $I$ .

Cuplul electromagnetic în mașina reală este:

$$M_{elmag}(t) = M(t) = 1142Y(t)U(t) + 342.6Y(t)E(t) - 1.134X(t)Q(t) + 1.134Y(t)W(t)$$

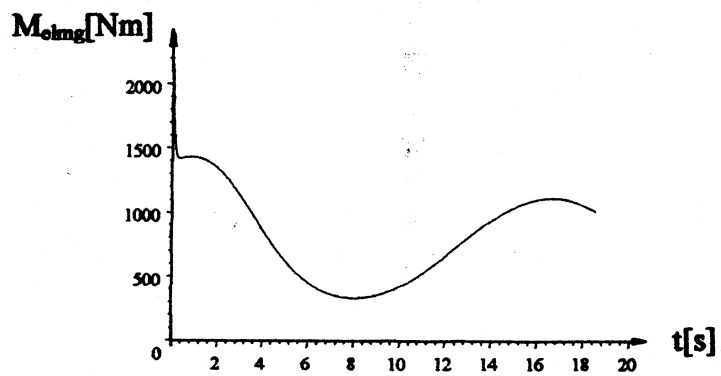


Fig.5.57. Variația în timp a lui  $M_{elmag}$ .

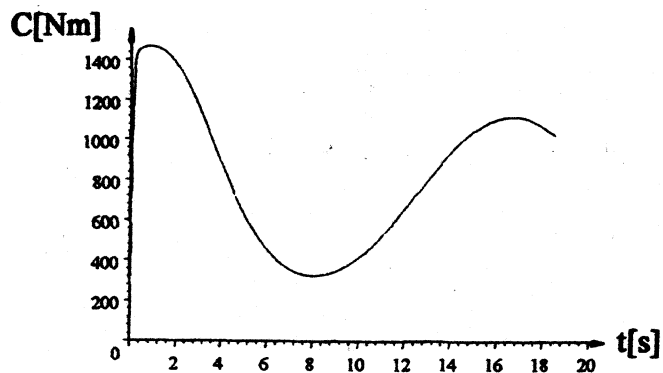


Fig.5.58. Variația în timp a lui  $M_{motor}$ .

Tensiunea la borne se calculează cu relația:

$$T(t) = 5.23 \sqrt{X(t)^2 + Y(t)^2}$$

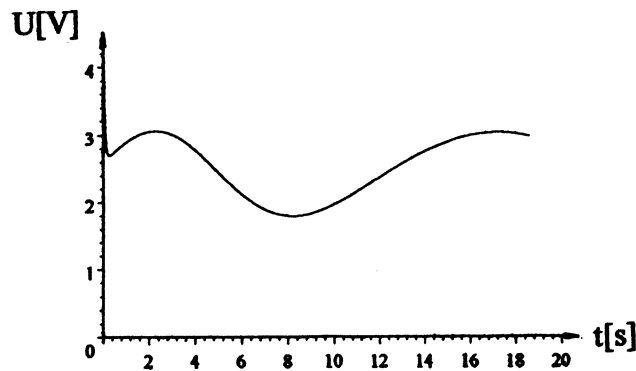


Fig.5.59. Variația în timp a lui  $U$ .

### Concluzii la încărcarea ohmic-inductivă cu $75\%I_N$

1. Curentul  $I_{E1}$  din înfășurarea de excitație principală scade de la  $2,53[A]$  (figura 5.50) la  $1[A]$  în  $7.5$  secunde, având deci în regim tranzitoriu o variație de:

$$\Delta I_{E1} = \frac{2.53 - 1}{2} * 100 = 76.5\%(\text{mare})$$

Curentul  $I_{E2}$  prin înfășurarea de excitație adițională depinde de curentul  $I$  (de sarcină) și are un vârf de  $1 [A]$  după  $7[s]$  (figura 5.51).

2. Frecvența tensiunii de alimentare scade în primele  $0.4[s]$  (figura 5.54) mai pronunțat comparativ cu GS cu o înfășurare de excitație, aceasta deoarece cuplul electromagnetic al GS cu două înfășurări de excitație este mai mare decât cel al GS cu o înfășurare de excitație, datorită componentei cuplului dată de curentul de excitație din înfășurarea a doua.

Acest cuplu determinat de curentul  $I_{E2}$  este mare la începutul procesului tranzitoriu, datorită curentului de sarcină care se mărește de la  $0$  la  $75\%I_N$ .

3. Tensiunea la borne  $U$  scade în perioada  $0.5[s]$  de la  $380[V]$  la  $280[V]$ , apoi crește la  $310[V]$  și se stabilizează după aproximativ  $18$  secunde, așa cum se poate vedea în figura 5.59.
4. Cuplul electromagnetic crește rapid la  $2000[Nm]$  și revine la  $1000[Nm]$  după  $19$  secunde, așa cum se vede în figura 5.57.
5. Curentul  $I$  are o creștere la  $0.8I_N$  în prima perioadă, așa cum se poate observa în figura 5.56.
6. Cuplul motor crește de la  $0$  la  $1400[Nm]$  în primele  $0.5[s]$  (figura 5.58).

## Cap. 6. CONCLUZII

În lucrare s-a analizat regimul tranzitoriu la un sistem electroenergetic izolat, așa cum este cel de pe navele maritime. Grupurile navale motor Diesel - generator sincron sunt prevăzute în mod obligatoriu cu regulatoare de tensiune și regulatoare de turație. Caracteristicile exterioare ale generatoarelor sincrone și caracteristicile mecanice ale motoarelor Diesel sunt analizate în detaliu, putându-se stabili punctul de funcționare atât cu regulatoare pe excitație și turație cât și fără regulatoare.

În teză se dau limitele grupurilor în situația GS nereglat, pentru un generator cu o singură înfășurare de excitație și se trage concluzia că, în situația dată, se impune folosirea unui generator sincron cu două înfășurări de excitație, cea de-a doua înfășurare fiind parcursă de un curent proporțional cu cel de sarcină.

Pentru un generator sincron cu două înfășurări de excitație se determină parametrii: rezistențe, inductanțe proprii și mutuale în axa „d” și axa „q”.

Comportarea sistemului electroenergetic naval în regimuri tranzitorii se face așa cum prevăd normele de Registru naval.

Se dau rezultatele simulărilor numerice la conectarea celor mai mari consumatori: motoarele asincrone de 75 [kW] și de 110 [kW].

Simulările numerice la generatorul sincron cu o singură înfășurare de excitație scot în evidență influența regulatorului de tensiune pus pe înfășurarea de excitație, singurul în măsură să readucă tensiunea în zona valorii nominale. La generatorul sincron cu două înfășurări de excitație, tensiunea la borne este stabilizată și prin aportul fluxului creat de curentul de sarcină ce trece prin înfășurarea de excitație adițională. La acest tip de generator se poate obține o autoreglare.

Încercările rezistive de 25%, 50%, 75% și 100% (care, la predarea unei nave noi sau după reparații, se fac în mod uzual cu ajutorul căzilor cu apă) sunt analizate pentru diferite constante de timp ale regulatoarelor.

Verificările experimentale confirmă modelul matematic prin obținerea unor rezultate apropiate de cele teoretice (sub 5% sunt erorile între calcul și experiment).

Stabilitatea sistemului electroenergetic naval este puternic influențată de reglarea tensiunii și a turației (frecvenței).

La generatorul sincron cu două înfășurări de excitație se demonstrează oportunitatea celei de-a doua înfășurări de excitație și se dau simulările numerice pentru încărcările rezistive de 25%, 75% și 100% și rezistiv-inductive de 25%, 50% și 75%.

Principalele contribuții originale ale lucrării constau în:

- 1) determinarea zonei de funcționare stabilă la grupul motor Diesel-generator sincron (DG), având în vedere formele caracteristicilor mecanice ale motorului Diesel și ale cuplului electromagnetic la generatorul sincron. Se demonstrează că un grup DG nereglat are o zonă stabilă de funcționare redusă și se poate încărca doar până la 7%.

- 2) determinarea influenței reguletoarelor de tensiune și de turație în mărimea zonei de stabilitate care poate atinge 125% din puterea nominală;
- 3) determinarea parametrilor la generatorul sincron cu două înfășurări de excitație (determinarea inductanțelor proprii, mutuale și a rezistențelor din înfășurările de amortizare), având în vedere probe în axele  $d$  și  $q$ . În acest sens, se poate vedea influența înfășurărilor de amortizare și a înfășurărilor de excitație asupra stabilității dinamice, la diverse încărcări. Cea de-a doua înfășurare de excitație a generatorului sincron determină un proces de autoreglare cu o pondere care se poate modifica prin raportul numărului de spire dintre înfășurarea principală și cea auxiliară.
- 4) analiza în regim tranzitoriu, pentru diverse încărcări și pentru diferite constante de timp ale reguletoarelor, a generatorului sincron cu o singură înfășurare de excitație-pentru diferite constante de timp ale reguletoarelor care sunt cu câteva ordine de mărime mai mari decât constantele de timp ale înfășurărilor de amortizare. Se demonstrează influența reguletoarelor pe durata regimurilor tranzitorii, în sensul că în prima perioadă a procesului tranzitoriu reguletoarele nu intervin și, deci, parametrii generatorului sincron dictează evoluția proceselor.
- 5) analiza simulărilor numerice pentru încărcări rezistive la generatorul sincron cu o înfășurare și la cel cu două înfășurări de excitație, cu reguletoare de turație și de tensiune;
- 6) analiza simulărilor numerice pentru descărcări rezistive în absența reguletoarelor;
- 7) tratarea tehnică completă a generatorului sincron cu două înfășurări de excitație;
- 8) analiza simulării generatorului sincron cu două înfășurări de excitație la diverse încărcări rezistive și rezistiv-inductive;
- 9) determinarea ponderii înfășurării de excitație auxiliare, având în vedere o compensarea câmpului de reacție la sarcină nominală;
- 10) determinarea influenței celei de-a doua înfășurări de excitație asupra cuplului electromagnetic, în sensul că în prima perioadă de timp a procesului tranzitoriu cuplul electromagnetic este mărit datorită componentei dată de câmpul creat de înfășurarea auxiliară.

Lucrarea, în esența ei, după un studiu amănunțit al generatorului sincron cu o înfășurare de excitație, propune generatorul sincron cu două înfășurări de excitație care, prin dimensionarea corectă a celei de-a doua înfășurări de excitație, poate funcționa fără reglator de tensiune, fiind un generator autoreglabil pe toată zona de încărcare. Alegând potrivit raportul dintre numărul de spire din înfășurarea principală și cea auxiliară, se pot obține diverse caracteristici exterioare, cu pante diferite, de la GS autoprotejat la scurtcircuit până la GS care are o pantă rigidă sau chiar crescătoare.

## 7. BIBLIOGRAFIE

- A.1. Atanasiu, G. - Mașini electrice – Litografia U.T. Timișoara, 1994.
- B.1. Babescu, M. - Mașini electrice. Modelul ortogonal – Editura Politehnica, Timișoara, 2000.
- B.2. Babescu, M. - Mașini electrice – Ed. Tehnică, București, 1996.  
- Determination of parameters of the orthogonal model in use in the theory of electrical machines – Bul. Șt. U.P. Timișoara, Tom 42, F2, 1997, p 39-47.
- B.3. Babescu, M. - Generatoare electrice – Ed. Politehnica, Timișoara, 1998.
- B.4. Babescu, M. - Mașini electrice – analiza matematică a regimurilor tranzitorii- Ed. Politehnica, Timișoara, 2001.
- B.5. Babescu, M. - Analiza unitară a mașinilor electrice – Ed. Academiei RSR – București, 1983.
- B.6. Boldea, I. - Parametrii mașinilor electrice – Ed. Academiei, București, 1991.
- B.7. Boldea, I. - Unified treatment of core losses and saturation in the orthogonal axis – model of electric machines – IEE Proceedings, vol. 134, Pt. B, No. 6, November 1987.
- B.8. Boldea, I.  
Nasar, S.A. - Transformatoare și mașini electrice – E.D.P. R.A. București, 1994.
- B.9. Boldea, I. - Mașini electrice rotative – Ed. De Vest, Timișoara, 1997.
- B.10. Biriescu, M. - Components la theorie des alternateurs a deux reactions, RGE, 12, 203 – 205, 1922.
- B.11. Blondel, A. - Regimes transitoires des machines tournantes electriques – Ed. Eyrolles, Paris, 1982.
- B.12. Barret, Ph. - A method of including the effects of main path saturation in the generalized equations of a.c. machines, IEE, 1983, PAS-102, (1) pp. 96 – 103.
- B.13. Brown, J.E.  
Kovacs, K.P.  
Vas, P. - Mașini electrice – E.D.P. București, 1979.
- B.14. Bălă, C. - Mașini electrice – Probleme fundamentale, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1988.
- C.1. Câmpeanu, A. - Mașini în acționări electrice – Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1996.
- C.2. Câmpeanu, A.  
Iancu, V.  
Rădulescu, M. - Introducere în dinamica mașinilor electrice de curent alternativ – Ed. Academiei Române, București, 1998.
- C.3. Câmpeanu, A. - Instalații electrice la bordul navelor – proiectare și construcție, Ed. Tehnică, București, 1981.
- C.4. Călușeanu, D.  
Stan, Șt. Banu, E.  
Drăgan, F. - Mașini electrice – E.D.P. București, 1970.
- D.1. Dordea, T. - Proiectarea și construcția mașinilor electrice – Litografia U.P. Timișoara, 1981.
- D.2. Dordea, T. - La theorie des deux axes pour les machines electriques a enroulement repartis par zones- Rev. Roum. Sci. Techn. Electrotechn. et Energ., 38, Bucarest, 1993, p. 235 – 255.
- D.3. Dordea, T. - Beitrag zur Zweiachsentheorie der elektrischen Maschinen, Archiv fur Elektrotechnik, 50, 6, 362 – 371 (1966).
- D.4. Dordea, T.

## 7. BIBLIOGRAFIE

- D.5. Drăgănescu, O. - Încercările mașinilor electrice rotative – Ed. Tehnică, București, 1987.
- D.6. De Sabata, I. - Bazele electrotehnicii (vol 1 și 2) – Litografia IPT, Timișoara, 1980.
- J.1. Jerve, G. - Încercările mașinilor electrice rotative – Ed. Tehnică, București, 1972.
- K.1. Kelemen, A.  
Imecs, M. - Sisteme de reglare cu orientare după câmp ale mașinilor de curent alternativ – Ed. Academiei, București, 1989.
- K.2. Kelemen, A. - Acționări electrice – EDP București, 1979.
- L.1. Leonard, W. - Control of electrical drives – Springer-Verlag, Berlin, 1985.
- N.1. Nasar, SA.  
Boldea, I. - Electric machines – dynamic and control – CRC Press, Inc. USA, 1993.
- N.2. Novac, I. - Mașini electrice – Litografia IPT, Timișoara, 1975.
- N.3. Nicolaide, A. - Mașini electrice – Ed. Scrisul Românesc, Craiova, 1975.
- N.4. Novac, I.  
Babescu, M. - Mașini și acționări electrice – EDP București, 1980.
- N.5. Nicolae, P.M. - Calitatea energiei electrice în sisteme electroenergetice de putere limitată, Ed. Tehnică, București, 1998.
- O.1. Ong, C.M. - Dynamic simulation of electric machines, Prentice Hall PTR New Jersey 07458, 1998.
- P.1. Park, R.H. - Two reaction theory of synchronous machines (I+II) Trans – A, IEE 48, 716 – 727 (1929) and 52 (1933).
- R.1. Richter, R. - Mașini electrice – vol. I, II, III, IV, Ed. Tehnică, București, 1959.
- S.1. Seracin, E.  
Popovici, D. - Tehnica acționărilor electrice – Ed. Tehnică, București, 1985.
- S.2. Stepina, I. - Raunzeiger als grundlage der theorie der elektrischen maschinen – ETZ, A, Bd. 88, 1967, H3.
- Ș.1. Șora, C. - Bazele electrotehnicii – EDP București, 1982.
- T.1. Thaler, G. - Electric Machines, dynamics and steady state - John Wiley, New York, 1966.
- T.2. Takeda, Y.  
Adkins, B. - Determination of synchronous machine parameters allowing for unequal mutual inductances – Proc. IEE, 121, 1974, p.1501 – 1504.
- T.3. Toulomi, O. - Synchronous machine parameter identification Multitude scale tehnique, vol 30/06/1994.
- T.4. Tudor, A.T. - Generator sincron cu două înfășurări de excitație, Referat nr.2, Timișoara, 2003.
- T.5. Tudor, A.T. - Studiul generatorului sincron cu două înfășurări de excitație, Sesiune de comunicări – Academia Navală Constanța, 2003.
- V.1. Viorel, I.A.  
Ciorba, R. - Mașini electrice în sisteme de acționare – Editura U.T.Press 2002, Cluj – Napoca.