

Iulian BIROU

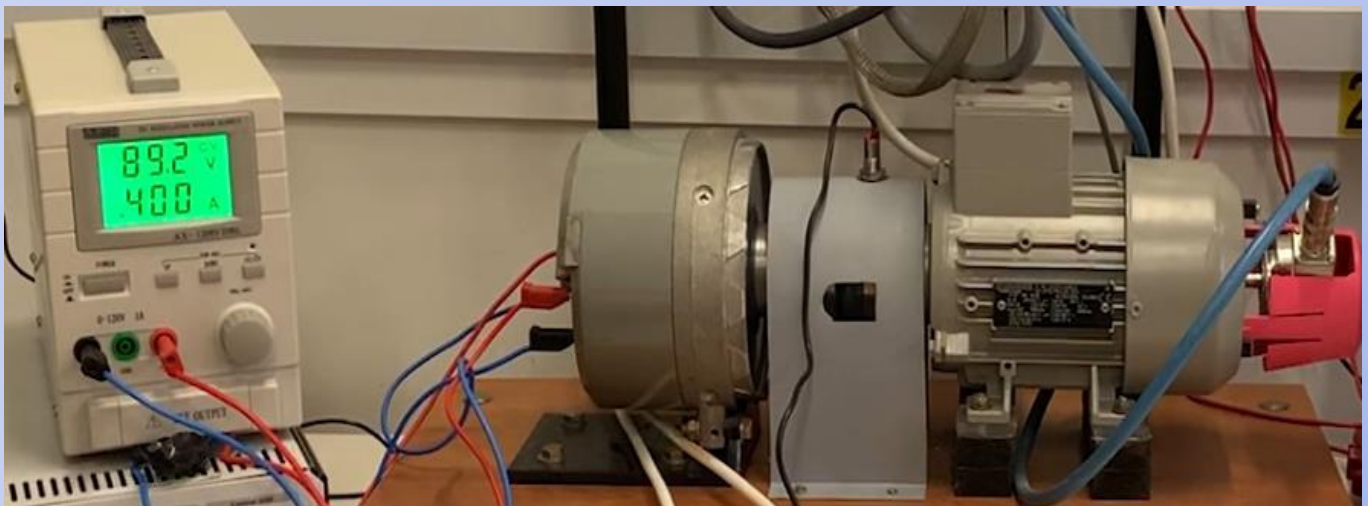
Adrian M. IUORAȘ

Csaba SZABO

Vasile M. SUCIU

Norbert C. SZEKELY

ACȚIONĂRI ELECTRICE - ELEMENTE DE TEORIE ȘI APLICAȚII PRACTICE



UTPRESS

Cluj-Napoca, 2024

ISBN 978-606-737-726-2

Iulian BIROU
Adrian M. IUORAȘ

Csaba SZABO

Vasile M. SUCIU
Norbert C. SZEKELY

ACȚIONĂRI ELECTRICE - ELEMENTE DE TEORIE ȘI APLICAȚII PRACTICE



U.T.PRESS

Cluj - Napoca, 2024

ISBN 978-606-737-726-2



Editura U.T.PRESS
Str. Observatorului nr. 34
400775 Cluj-Napoca
Tel.: 0264-401.999
e-mail: utpress@biblio.utcluj.ro
<http://biblioteca.utcluj.ro/editura>

Recenzori: Prof.dr.ing. Teodor Crișan Pană
Ș.l.dr.ing. Eniko Szoke

Pregătire format electronic on-line: Gabriela Groza

Copyright © 2024 Editura U.T.PRESS
Reproducerea integrală sau parțială a textului sau ilustrațiilor din această carte este posibilă numai cu acordul prealabil scris al editurii U.T.PRESS.

ISBN 978-606-737-726-2

“Cunoașterea este cea mai
democratică formă de putere”
Alvin Toffler

CUVÂNT ÎNAINTE

Prezenta carte își propune să prezinte câteva aspecte teoretice și mai ales practice din domeniul controlului acționărilor electrice. Domeniul este unul multidisciplinar, presupunând cunoștințe de *mașini electrice, electronică de putere, teoria sistemelor de reglare și sisteme numerice de calcul în timp real pentru controlul proceselor*.

Acționările electrice reprezintă cea mai performantă sursă de generare a mișcării, astfel că sistemele de acționare electrică se regăsesc în mai toate aplicațiile domestice, industriale sau din zona serviciilor care ne fac viața mai ușoară și contribuie la dezvoltarea civilizației umane. Din acest motiv este o componentă esențială a cunoașterii în domeniul de inginerie electrică și energetică.

Cartea se adresează în primul rând studenților de la toate specializările Facultății de Inginerie Electrică din Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, ca suport teoretic pentru orele de aplicații din cadrul disciplinei de acționari electrice, dar și studenților din domeniile roboticii, mecatronicii sau automatizărilor industriale. De asemenea, poate fi utilă studenților masteranzi sau doctoranzi în realizarea temelor de cercetare propuse, respectiv cercetătorilor, proiectanților sau inginerilor din industrie preocupați de domeniul controlului performant al acționărilor electrice. Lucrarea conține atât capitole teoretice care descriu fenomenele acționărilor electrice de curent continuu și alternativ (capitolele 1, 2 și 4), dar și capitole aplicative care conțin 12 lucrări practice de laborator cu acționări electrice de curent continuu (capitolul 3) respectiv cu acționări electrice de curent alternativ (capitolul 5).

Autorii doresc să aducă mulțumiri colegilor, titulari sau asociați, din colectivul de acționări electrice ai departamentului nostru, care au sprijinit sau au contribuit într-un fel la apariția acestei cărți.

Cluj-Napoca, septembrie 2024

Autorii

CUPRINS

1. Sisteme de acționări electrice - generalități	6
1.1. Structura unui sistem de acționare electrică	6
1.2. Ecuția fundamentală a mișcării	8
1.3. Clasificarea caracteristicilor mașinii de lucru	10
2. Acționări cu mașini de curent continuu – aspecte teoretice.....	12
2.1. Considerații teoretice.....	12
2.2. Metode de control a acționărilor de curent continuu	13
2.2.1. Reglajul turației prin variația tensiunii de alimentare a indusului.....	13
2.2.2. Reglajul turației prin variația fluxului de excitație	15
2.2.3. Reglajul turației prin variația rezistenței în circuitul indusului	16
2.3. Acționarea în 1 respectiv 2 cadrane cu mașina de curent continuu cu înfășurare de excitație în derivație.....	17
2.4. Acționarea în 4 cadrane a mașinii de curent continuu cu înfășurare de excitație în derivație prin variația tensiunii de alimentare și a fluxului de excitație	18
2.5. Acționarea în 1 respectiv 2 cadrane cu mașina de curent continuu cu magnet permanent.....	20
2.6. Acționări de curent continuu cu mașini de c.c. alimentate de la convertoare electronice de putere	21
2.6.1. Acționări cu mașina de curent continuu alimentată de la variatoare de tensiune continuă - VTC	21
2.6.2. Acționări cu mașina de curent continuu alimentată de la redresoare	24
2.7. Controlul mașinilor de curent continuu alimentate de la convertoare electronice de putere (CEP) atât în indus cât și în excitație.....	26
3. Acționări cu mașini de curent continuu – lucrări practice	28
3.1. Lucrarea 1 - Acționări cu mașina de curent continuu cu excitație cu magnet permanent alimentată în indus de la convertoare electronice de putere	29
3.1.1. Scopul lucrării.....	29
3.1.2. Montajul experimental.....	29
3.1.3. Legendă montaj experimental.....	30
3.1.4. Mersul lucrării	30
3.1.5. Concluzii.....	32
3.2. Lucrarea 2 - Acționări cu mașina de curent continuu alimentată în indus și în excitație de la convertoare electronice de putere.....	33
3.2.1. Scopul lucrării.....	33

3.2.2.	Montajul experimental.....	33
3.2.3.	Legendă montaj experimental.....	34
3.2.4.	Mersul lucrării	34
3.2.5.	Concluzii.....	36
3.3.	Lucrarea 3 - Acționări electrice de 2 cadrane. Instalația de ridicat.....	37
3.3.1.	Scopul lucrării.....	37
3.3.2.	Considerații teoretice	37
3.3.3.	Montajul experimental.....	39
3.3.4.	Legendă montaj experimental.....	39
3.3.5.	Mersul lucrării	40
3.3.6.	Concluzii.....	41
3.4.	Lucrarea 4 - Acționări în două cadrane cu mașina de curent continuu, cu recuperarea energiei în regim de frânare.....	42
3.4.1.	Scopul lucrării:	42
3.4.2.	Montajul experimental.....	42
3.4.3.	Legendă montaj experimental.....	42
3.4.4.	Mersul lucrării	43
3.4.5.	Concluzii.....	44
3.5.	Lucrarea 5 - Acționări cu mașina de curent continuu alimentată de la VTC de patru cadrane.....	45
3.5.1.	Scopul lucrării.....	45
3.5.2.	Montajul experimental.....	45
3.5.3.	Legendă montaj experimental.....	45
3.5.4.	Mersul lucrării	46
3.5.5.	Concluzii.....	48
3.6.	Lucrarea 6 - Controlul mașinii de curent continuu alimentată de la un redresor de patru cadrane.....	49
3.6.1.	Scopul lucrării:	49
3.6.2.	Montajul experimental.....	49
3.6.3.	Legendă montaj experimental.....	50
3.6.4.	Considerații teoretice	50
3.6.5.	Mersul lucrării	52
3.6.6.	Concluzii.....	54
4.	Acționări cu mașini de curent alternativ – aspecte teoretice	55
4.1.	Considerații teoretice - generalități.....	56

4.2.	Metode de reglare a turației a acționărilor de curent alternativ	57
4.2.1.	Reglajul turației prin variația tensiunii de alimentare a statorului.....	57
4.2.2.	Reglajul turației prin introducerea rezistențelor în circuitul rotoric	58
4.2.3.	Reglajul turației prin variația frecvenței tensiunii de alimentare a statorului mașinii asincrone.....	60
4.3.	Convertoare electronice de putere utilizate în acționări de curent alternativ ...	61
4.3.1.	Invertorul de tensiune.....	62
4.4.	Controlul acționărilor de curent alternativ.....	64
4.4.1.	Control scalar prin metoda $U/f = \text{constant}$	64
4.4.2.	Controlul vectorial al acționărilor electrice	68
4.4.2.1.	Controlul vectorial cu orientare indirectă după fluxul rotoric.....	71
4.4.3.	Controlul vectorial al mașinii sincrone cu magnet permanent	76
4.4.3.1.	Controlul vectorial cu orientare după fluxul rotoric bazat pe raportul cuplu maxim/curent absorbit	77
5.	Acționări cu mașini de curent alternativ – lucrări practice.....	80
5.1.	Lucrarea 7 - Reglarea turației mașinii asincrone cu rotor bobinat prin variația tensiunii de alimentare și a rezistenței rotorice	81
5.1.1.	Scopul lucrării.....	81
5.1.2.	Montajul experimental.....	81
5.1.3.	Legendă montaj experimental.....	81
5.1.4.	Mersul lucrării	82
5.1.5.	Concluzii.....	84
5.2.	Lucrarea 8 - Acționări cu mașina asincronă cu rotor în colivie prin modificare frecvenței tensiunii de alimentare.....	85
5.2.1.	Scopul lucrării.....	85
5.2.2.	Montajul experimental.....	85
5.2.3.	Legendă montaj experimental.....	86
5.2.4.	Mersul lucrării	87
5.2.5.	Concluzii.....	88
5.3.	Lucrarea 9 - Controlul scalar al mașinii asincrone cu rotor în scurtcircuit prin metoda $U/f = \text{constant}$ în buclă deschisă, dezvoltat pe sisteme cu DSP.....	90
5.3.1.	Scopul lucrării.....	90
5.3.2.	Montajul experimental.....	90
5.3.3.	Legendă montaj experimental.....	91
5.3.4.	Mersul lucrării	91
5.3.5.	Concluzii.....	94

5.4.	Lucrarea 10 - Controlul scalar al mașinii asincrone cu rotor în scurtcircuit prin metoda $U/f=\text{constant}$ cu caracteristica liniară respectiv cu tensiune inițială (Uboost)...	95
5.4.1.	Scopul lucrării.....	95
5.4.2.	Montajul experimental.....	95
5.4.3.	Legendă montaj experimental.....	96
5.4.4.	Mersul lucrării	96
5.4.5.	Concluzii.....	99
5.5.	Lucrarea 11 - Reglajul vectorial a turației mașinii asincrone cu rotor în scurtcircuit cu orientare după fluxul rotoric	100
5.5.1.	Scopul lucrării.....	100
5.5.2.	Montajul experimental.....	100
5.5.3.	Legendă montaj experimental.....	101
5.5.4.	Mersul lucrării	102
5.5.5.	Concluzii.....	104
5.6.	Lucrarea 12 - Controlul vectorial al vitezei motorului sincron cu magnet permanent alimentat de la un invertor de tensiune	105
5.6.1.	Scopul lucrării.....	105
5.6.2.	Montaj experimental.....	105
5.6.3.	Legendă montaj experimental.....	106
5.6.4.	Mersul lucrării	107
5.6.5.	Concluzii.....	108
6.	Bibliografie.....	110

1. Sisteme de acționări electrice - generalități

1.1. Structura unui sistem de acționare electrică

Într-un sistem motor-mecanism, cuplurile care intervin sunt cuplul motor (cuplul electromagnetic, M_{em}) și cuplul rezistent (M_r). În regim stabilizat ($\Omega = ct.$), din ecuația fundamentală a mișcării - relația (1), rezultă egalitatea $M_{em} = M_r$. Cuplul rezistent al mecanismului acționat este acel cuplu care apare pe arborele mecanismului respectiv și care se datorează tuturor forțelor, deci a forțelor de frecare și a forțelor utile ale mecanismului, (forțele de tăiere, de așchiere, de compresiune, de răsucire, de strivire, de greutate, etc.). Figura 1.1 prezintă structura generală a unui sistem de acționare electrică.

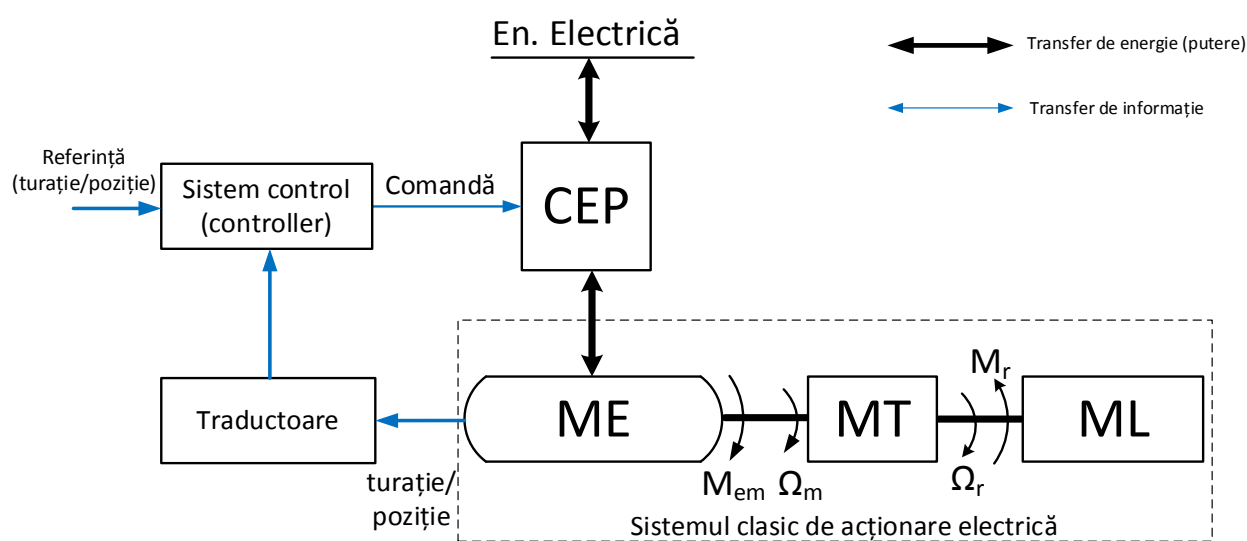


Fig. 1.1. Structura generală a unui sistem performant de acționare electrică.

Unde:

- **CEP** - Convertorul Electronic de Putere: realizează conversia parametrilor și/sau a formei energiei electrice;
- **ME** - Mașina Electrică: convertește energia electrică în energie mecanică (regimul de motor) sau energia mecanică în energie electrică (regimul de generator);
- **MT** - Mecanism de Transmisie: facilitează cuplajul dintre arborele mașinii electrice și cel al mașinii de lucru, asigurând totodată transmiterea energiei mecanice între cele două mașini;
- **ML** - Mașina de Lucru: reprezintă echipamentul antrenat de către mașina electrică aceasta realizând conversia energiei mecanice primită la arbore, în lucru util [1].

În schema bloc prezentată în figura 1.1 se regăsesc trei tipuri distincte de energie (putere), și anume: energie electrică, energie electromagnetică și energie mecanică.

Convențional, cuplul electromagnetic (M_{em}) și viteza de rotație (Ω_m) se consideră pozitive, în sens orar, iar cuplul rezistent (M_r), se consideră pozitiv în sens trigonometric, precum este ilustrat în figura 1.2 [2].

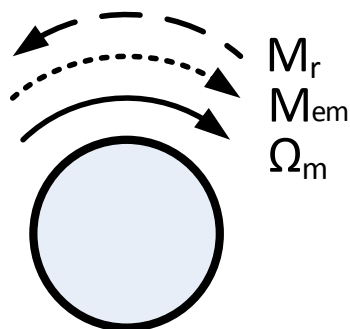


Fig. 1.2. Sensul convențional al cuplurilor și a vitezei unghiulare [2].

Cuplul motor (electromagnetic) este dezvoltat de mașinile electrice care pot fi: de curent continuu - cu excitație serie, paralel, independentă, mixtă sau de mașini de curent alternativ - mașini asincrone respectiv mașini sincrone cu excitație electrică sau cu magneți permanenți.

Funcția matematică care descrie relația dintre cuplul electromagnetic și viteza unghiulară se numește caracteristica mașinii electrice.

În figura 1.3 sunt prezentate cele trei grupe de caracteristici ale mașinilor electrice: rigide (1), moi (2) și sincrone (3) [1]. Caracteristici rigide (1) au mașinile de curent continuu cu excitație în paralel sau cu excitație independentă și mașinile asincrone. Caracteristici moi (2) au mașinile de curent continuu cu excitație serie iar caracteristici sincrone (3) prezintă mașinile sincrone.

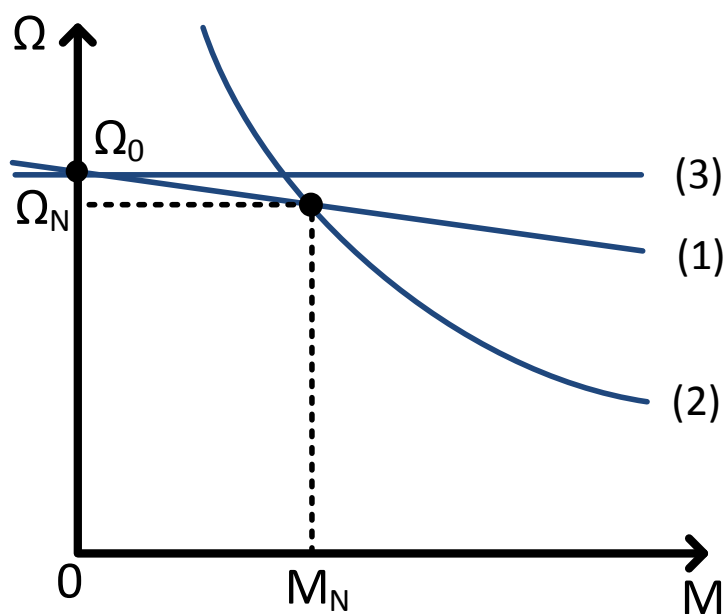


Fig. 1.3. Caracteristici mecanice tipice ale mașinilor electrice [2].

Fiecare tip de mașină electrică posedă mai multe familii de caracteristici. În cazul în care motorul funcționează la valori și parametri nominali (de catalog), relațiile de forma $\Omega = f(M)$ (sau $M = f(\Omega)$) se numesc caracteristici naturale. Caracteristicile mașinilor electrice obținute pentru cel puțin o valoare a unui parametru diferită de cea nominală se numesc caracteristici artificiale.

1.2. Ecuația fundamentală a mișcării

Figura 1.4. prezintă ansamblul format din mașina electrică și mașina de lucru, acestea fiind cuplate direct, la un arbore comun.

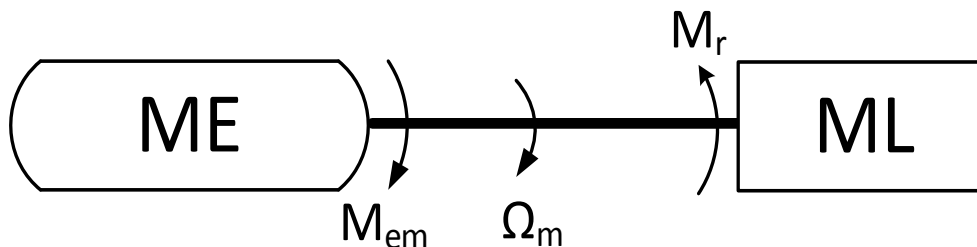


Fig. 1.4. Ansamblu mașină electrică/mașină de lucru.

Diferența dintre cuplul motor (M_{em}) și cuplul rezistent (M_r) produce cuplul de accelerare sau decelerare exprimat prin relația [3]:

$$M_{em} - M_r = M_j = J'_{tot} \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (1)$$

Unde J'_{tot} este momentul de inerție total redus la arborele motorului, M_j este cuplul dinamic iar relația se numește *ecuația fundamentală a mișcării*.

Ecuația fundamentală a mișcării descrie funcționarea ansamblului mașină electrică – mașină de lucru în orice regim de funcționare. Din relația (1), rezultă trei soluții ale ecuației fundamentale ale mișcării. Prin urmare, dacă [4]:

- $M_j = 0 \rightarrow M_{em} = M_r \rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = 0, \Omega = \text{ct.}$ - viteza este constantă, apare **regimul staționar**;
- $M_j > 0 \rightarrow M_{em} > M_r \rightarrow \frac{d\Omega}{dt} > 0, \Omega \uparrow$ - viteza crește, apare **regimul de accelerare**;
- $M_j < 0 \rightarrow M_{em} < M_r \rightarrow \frac{d\Omega}{dt} < 0, \Omega \downarrow$ - viteza scade, apare **regimul de decelerare (frânare)**.

În funcție de sistemul de acționare în care este utilizată, mașina electrică funcționează la un moment dat în unul din cele patru cadrane ale planului caracteristicilor acesteia. Astfel, conform figurii 1.5, în cadranele I și III mașina electrică funcționează în regim de motor (viteza de rotație și cuplul mașinii au același semn), puterea care apare la axul acesteia este pozitivă. În cadranele II și IV cele două mărimi au semne contrare, cuplul motor acționează invers vitezei de rotație, mașina intră în regim de generator/frână iar puterea este negativă (mașina absoarbe putere mecanică).

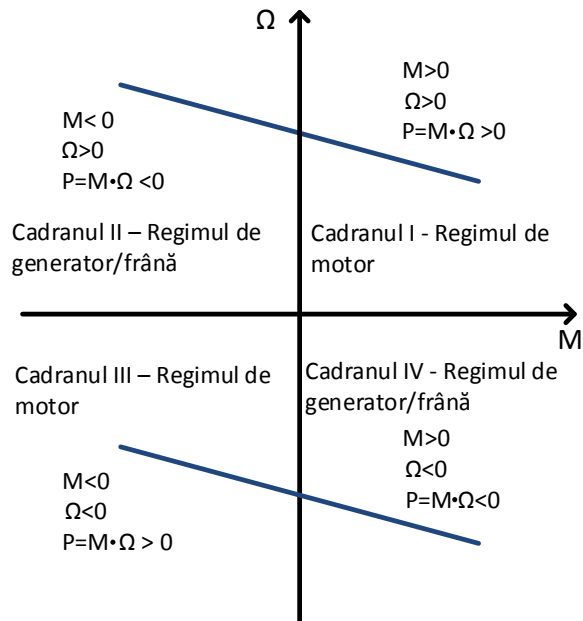


Fig. 1.5. Clasificarea cadranelor de funcționare a mașinii electrice [2].

Cuplul rezistent este dezvoltat de către mașina de lucru, (exemple de mașini de lucru: benzi transportoare, instalații de ridicat, ventilatoare, pompe de apă, freze, mașini-unelte, etc.).

În funcție de sensul de rotație, cuplurile rezistente pot fi de două feluri:

- **Active** - au caracter potențial, se pot opune sau pot ajuta mișcarea, nu își schimbă semnul la schimbarea sensului vitezei, de exemplu în cazul instalației de ridicat – sarcina utilă a acesteia.
- **Pasive** (reactive) - își schimbă semnul la schimbarea sensului vitezei, întotdeauna se opun mișcării.

Figura 1.6. prezintă caracteristicile aferente celor două categorii de mașini de lucru (ML), specifice ML care dezvoltă cuplul rezistent activ respectiv cuplul rezistent pasiv.

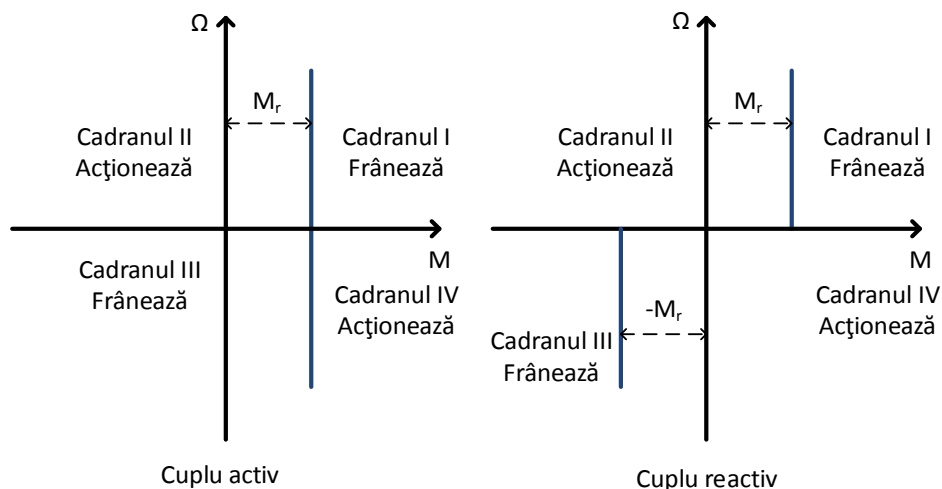


Fig. 1.6. Caracteristicile mașinii de lucru [2].

1.3. Clasificarea caracteristicilor mașinii de lucru

Caracteristica mașinii de lucru redă dependența cuplului rezistent de viteza unghiulară (Ω), de unghiul de rotire (α), de drumul parcurs (d), sau de timp. În funcție de aceste mărimi, mașinile de lucru pot fi împărțite în cinci categorii [2].

Categoria I - Mașini de lucru la care cuplul rezistent este independent de viteza unghiulară.

În această categorie se situează mașinile de lucru ale căror cuplu rezistent nu depinde de viteza unghiulară. Astfel de mașini de lucru sunt: ascensoare, benzi transportoare, poduri rulante etc. Caracteristica specifică acestor mașini de lucru este ilustrată în figura 1.7 [5], [6], [7].

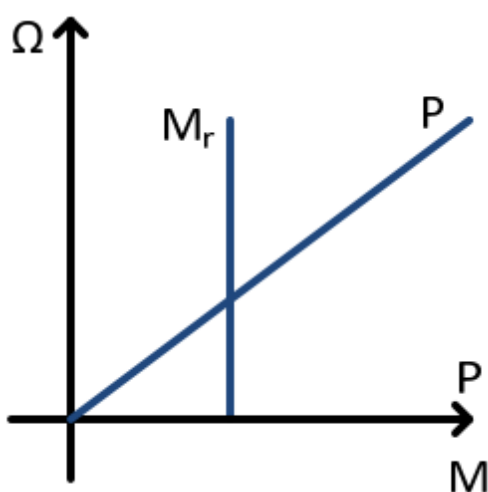


Fig. 1.7. Cuplu rezistent independent de viteza unghiulară [2].

Categoria II - Mașini de lucru la care cuplu rezistent (M_r) este dependent de viteza unghiulară.

Mașinile de lucru din această categorie sunt acelea la care cuplul rezistent depinde de viteză. Din această categorie fac parte: ventilatoare, pompe centrifuge, compresorul centrifugal etc [5], [8]. Expresia generală atât pentru caracteristicile de lucru cât și pentru caracteristicile mecanice este de forma [2]:

$$M_r = M_0 + (M_N - M_0) \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_N}\right)^\gamma \quad (2)$$

Unde:

- M_0 – cuplu de mers în gol;
- M_N – cuplu nominal al mașinii electrice;
- Ω_m - viteza unghiulară nominală.

Valoarea lui γ variază între $0 \div 4$, și depinde de vâscozitatea mediului.

Caracteristica specifică mașinilor de lucru care se încadrează în categoria II este ilustrată în figura 1.8.

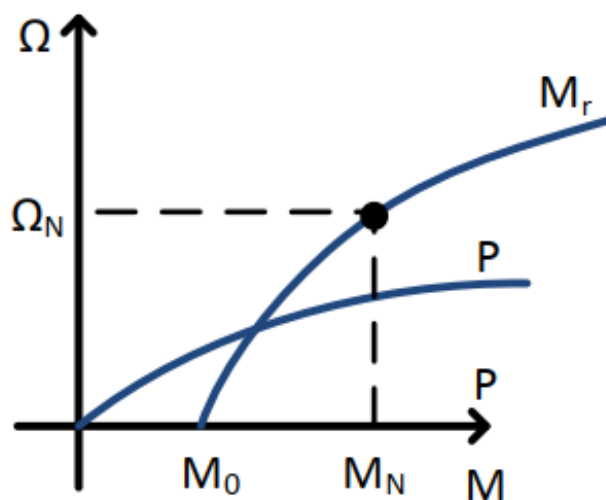


Fig. 1.8. Cuplu rezistent dependent de viteza unghiulară [2].

Categoria III - Mașinile de lucru din această categorie sunt acelea la care cuplu rezistent depinde de unghiul de rotire. În general se poate spune că aceste mașini fac parte din categoria mașinilor de lucru cu mecanism bielă-manivelă, cum sunt: fierăstraiile mecanice, foarfecile de tăiat metale, ciocanele, pompele și compresoarele cu piston etc. Cuplul rezistent variază în funcție de poziția manivelei, deci în funcție de poziția unghiulară a mașinii de acționare. Caracteristica acestor mașini de lucru este prezentată în figura 1.9.

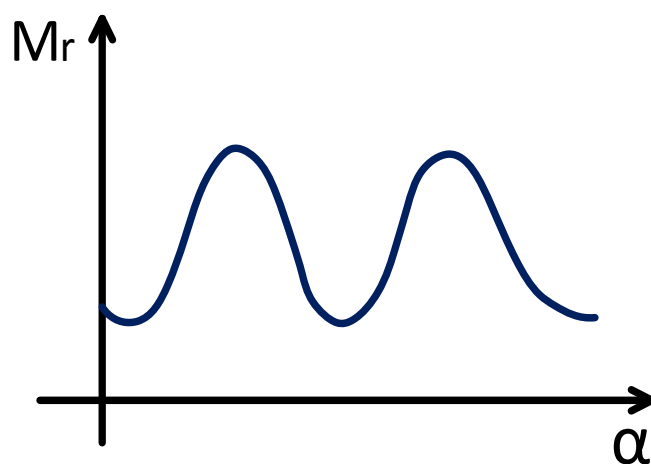


Fig. 1.9. Cuplu rezistent în funcție de unghiul de rotație α [2].

Categoria IV - Mașini de lucru la care cuplu rezistent depinde de drumul parcurs.

Mașinile din această categorie se caracterizează prin aceea că în cazul acestor mașini cuplul rezistent depinde de drumul parcurs. Exemple de mașini de lucru din această categorie sunt: locomotive, tramvaiele, autovehiculele electrice etc.

Categoria V - Mașini de lucru la care cuplu rezistent este în funcție de timp.

Exemple de mașini de lucru din această categorie pot fi considerate morile, malaxoarele, de asemenea pierderile care apar prin frecări în lagărele mașinilor electrice.

2. Acționări cu mașini de curent continuu – aspecte teoretice

2.1. Considerații teoretice

Din punct de vedere constructiv mașinile de curent continuu pot fi cu excitație separată, derivație, serie, mixtă sau cu excitație cu magnet permanent.

Reglajul turației unei mașini electrice de curent continuu se realizează prin schimbarea punctului de funcționare de pe o caracteristică de pe alta, astfel încât la cuplul cerut să corespundă altă valoare a turației (control de turație) sau la turația cerută să corespundă altă valoare a cuplului (control de cuplu).

Ecuatia de tensiune a mașinii de curent continuu [2], [9]:

$$U_a = R_a \cdot I_a + E \quad (3)$$

Tensiunea electromotoare indusă, E [9] :

$$E = K \cdot \Psi_e \cdot \Omega \quad (4)$$

Expresia fluxului de excitație:

$$\Psi_e = L_e \cdot I_e = \frac{L_e}{R_e} \cdot U_e \quad (5)$$

Expresia cuplului electromagnetic:

$$M_{em} = K \cdot \Psi_e \cdot I_a \quad (6)$$

Expresia analitică a caracteristicii mașinii de curent continuu [2]:

$$\Omega = \frac{U_a}{K \cdot \Psi_e} - \frac{R_a + R_{ext}}{(K \cdot \Psi_e)^2} \cdot M_{em} \quad (7)$$

Unde:

Ω - viteza unghiulară a motorului;

U_a - tensiunea de alimentare a indusului;

Ψ_e - fluxul de excitație;

M_{em} - cuplul electromagnetic;

$R_a + R_{ext}$ - rezistența totală a indusului = rezistența indusului + rezistența exterioară în serie cu indusul.

Relația (7) reprezintă ecuația unei drepte de tipul $y = a - b \cdot x$. Aceasta mai poate fi scrisă sub forma:

$$\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega \quad (8)$$

Unde coeficienții: $a = \Omega_0 = \frac{U_a}{K \cdot \Psi_e}$ reprezintă viteza de mers în gol ideală, iar $b = \Delta\Omega = \frac{R_a + R_{ext}}{(K \cdot \Psi_e)^2}$ reprezintă panta caracteristicii.

Constanta motorului la flux nominal se calculează utilizând valorile nominale ale mașinii de curent continuu cu relația:

$$C_N = K \cdot \Psi_{eN} = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot R_a}{\Omega_N} \quad [V \cdot s] \quad (9)$$

Pentru o valoare fluxului de excitație diferită de cea nominală constata motorului se calculează cu relația:

$$C = C_N \cdot \frac{I_e}{I_{eN}} \quad [V \cdot s] \quad (10)$$

Examinând relația (7) se pot stabili unele din metodele de reglare a vitezei mașinii de curent continuu, care presupun:

- Variația tensiunii de alimentare a indusului;
- Variația fluxului de excitație;
- Variația rezistenței exterioare introduse în circuitului indusului.

2.2. Metode de control a acționărilor de curent continuu

Controlul acționărilor de curent continuu se poate face prin modificarea tensiunii de alimentare a indusului, prin variația fluxului de excitație și prin variația rezistenței din circuitul indusului.

2.2.1. Reglajul turației prin variația tensiunii de alimentare a indusului

Reglajul turației prin variația tensiunii de alimentare a indusului reprezintă o metodă de reglare prin care se poate modifica turația motorului de la valoarea zero până la valorile de turație obținute pe caracteristica naturală.

În relația (7) singura mărime care variază este tensiunea de alimentare a indusului, ceea ce va afecta doar valoarea vitezei unghiulare de mers în gol ideală:

$$\Omega_0 = \frac{U_a}{K \cdot \Psi_e} \quad (11)$$

Panta rămâne constantă:

$$\frac{R_a + R_{ext}}{(K \cdot \Psi_e)^2} = ct. \quad (12)$$

- Cu mențiunea, că la modificarea tensiunii $R_{ext} = 0$.

Drept urmare, caracteristicile artificiale obținute vor fi paralele, deplasate în jos față de caracteristica naturală, ceea ce se poate observa în figura 2.1.

Prin această metodă se poate regla viteza mașinii de curent continuu în sens coborâtor vitezei obținute pe caracteristica naturală. Utilizarea unei tensiuni de alimentare mai mari decât cea nominală implică riscuri de străpungere a înfășurărilor rotorice, tensiunea nominală fiind limitată la valoarea de catalog plus 10% din aceasta. Se asigură că fluxul de excitație (Ψ_e) rămâne constant în timpul modificării tensiunii de alimentare a indusului.

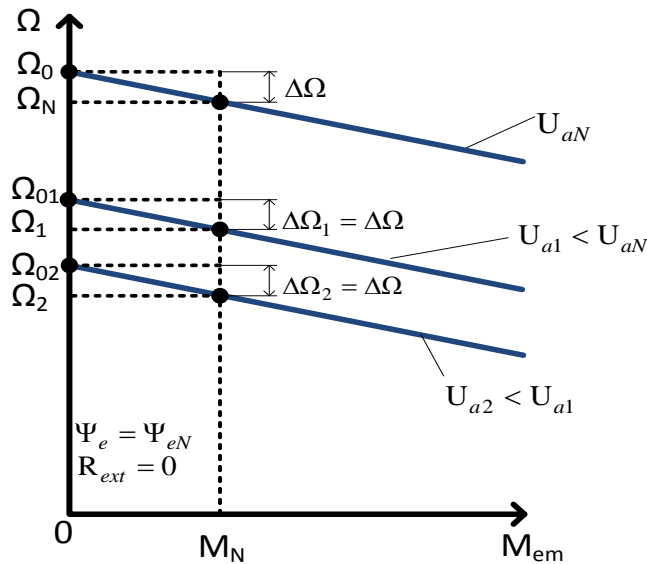


Fig. 2.1. Caracteristicile obținute la variația tensiunii de alimentare a indusului.

Totodată, figura 2.2. prezintă caracteristicile mașinii de curent continuu în cadranele I; II; III și IV, obținute în cazul modificării doar a tensiunii de alimentare a circuitului rotorice.

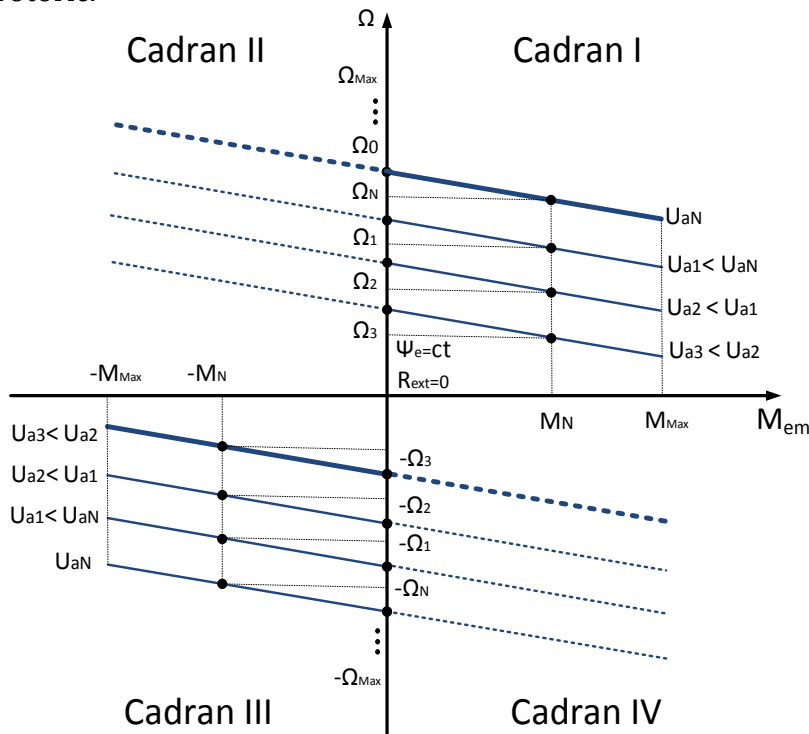


Fig. 2.2. Caracteristicile obținute la variația tensiunii de alimentare a indusului pentru cadranele I, II, III și IV.

2.2.2. Reglajul turației prin variația fluxului de excitație

Fluxul de excitație intervine în ambii termeni ai relației (7), drept urmare caracteristicile care se vor obține pentru diferite valori de flux vor avea atât viteza de mers în gol ideal, cât și panta caracteristicii diferită față de caracteristica naturală, ceea ce se poate observa în figura 2.3.

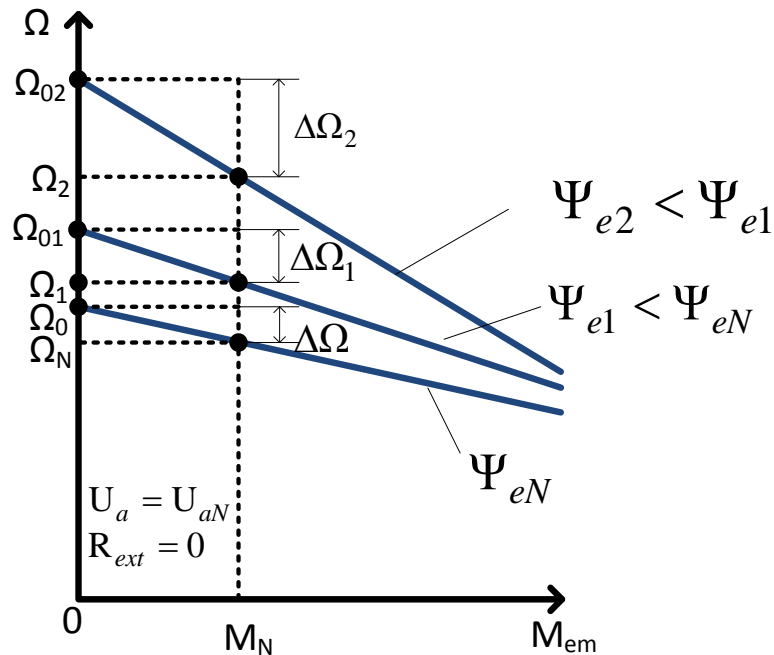


Fig. 2.3. Caracteristicile obținute la variația fluxului de excitație.

Examinând relația (7) se poate observa că viteza unghiulară variază invers proporțional cu fluxul de excitație.

Reglajul prin variația fluxului de excitație se efectuează la putere constantă. Odată cu creșterea vitezei unghiulare peste viteza nominală scade cuplul (din cauza scăderii fluxului), lucru care prezintă importanță în cazul acționărilor cu mașini unelte. Reglajul este limitat superior din cauza limitărilor mecanice, a scăderii cuplului motor sau apariției scânteierilor la colector.

Această metodă de reglare a vitezei unghiulare a mașinii electrice de curent continuu se mai numește *slăbire de câmp* sau *slăbire de flux* și se utilizează pentru a obține viteze ale motorului mai mari decât cele obținute pe caracteristica naturală.

În figura 2.4. sunt prezentate caracteristicile mașinii de curent continuu aferente funcționării mașinii în cadranele I, II, III și IV, obținute în cazul modificării doar a tensiunii de alimentare a circuitului rotorului respectiv în cazul modificării doar a fluxului de excitație (prin slăbire de câmp).

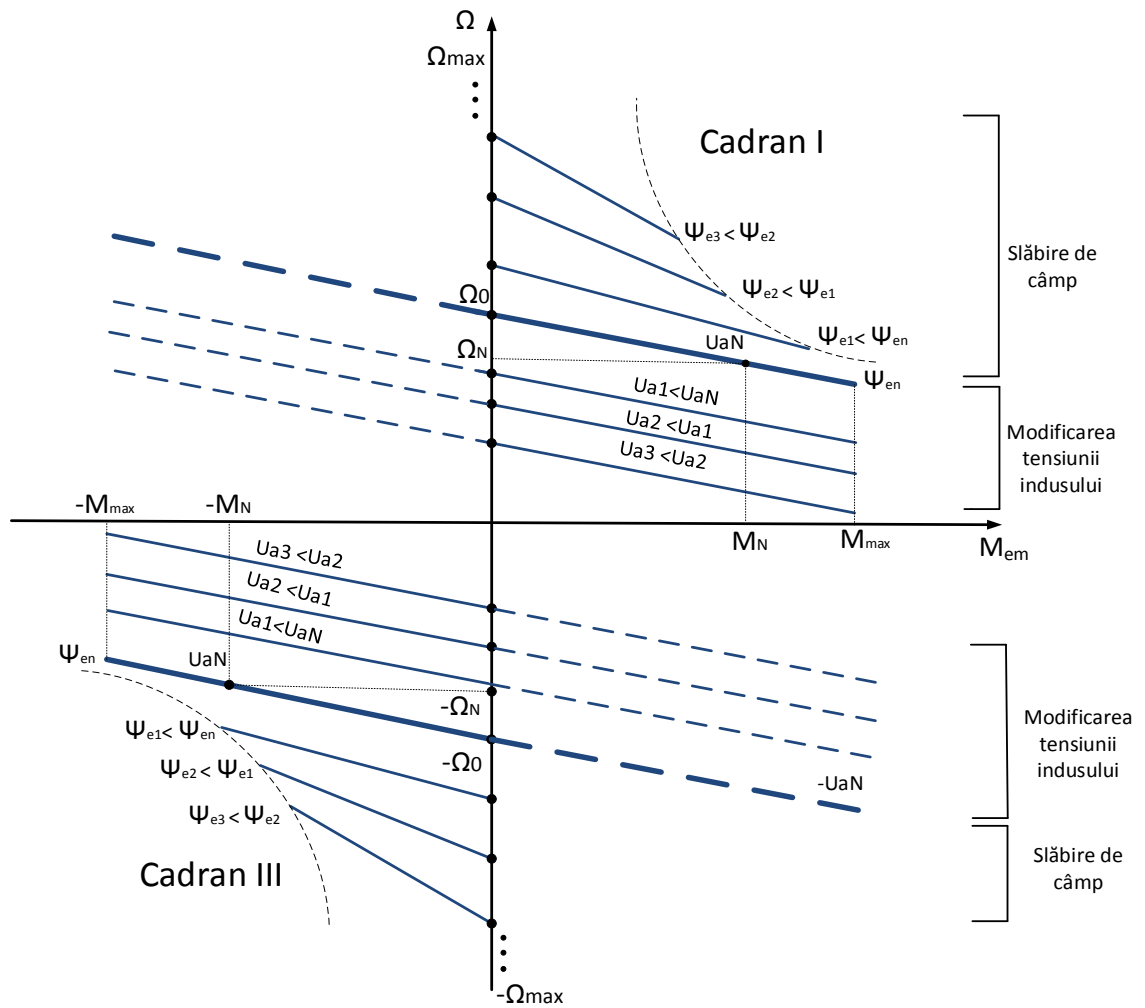


Fig. 2.4. Caracteristicile mașinii de curent continuu la modificarea tensiunii de alimentare a indusului și la slăbirea fluxului de excitație.

2.2.3. Reglajul turației prin variația rezistenței în circuitul indusului

Rezistențele suplimentare introduse în circuitul indusului aduc modificări numai în ceea ce privește panta caracteristicii mecanice:

$$\frac{R_a + R_{ext}}{(K \cdot \Psi_e)^2} \quad (13)$$

Caracteristicile mecanice vor fi „moi” în cazul rezistențelor exterioare mari din circuitul rotor, deoarece căderea de viteză crește direct proporțional cu rezistența rotorică totală, viteza de mers în gol rămânând constantă. Caracteristicile mașinii de curent continuu obținute la modificarea doar a rezistenței exterioare conectate în serie cu circuitul rotoric (R_{ext}) sunt prezentate în figura 2.5.

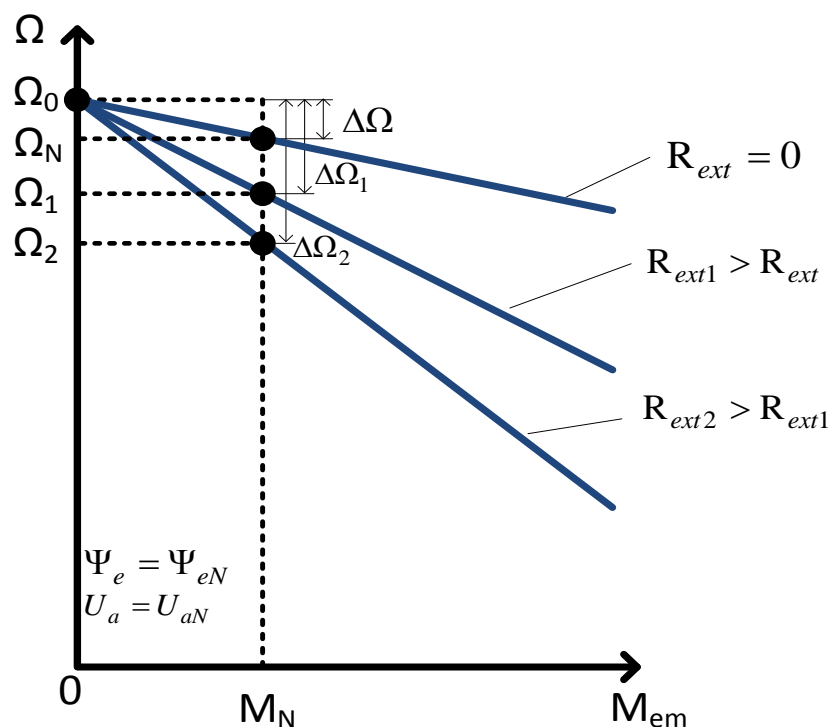


Fig. 2.5. Caracteristicile obținute la variația rezistenței în circuitul indusului.

Din cauza pierderilor mari pe care le presupune, reglajul vitezei prin variația rezistenței se aplică la acționările cu motoare de puteri mici doar pentru regimurile de pornire și frânare.

2.3. Acționarea în 1 respectiv 2 cadrane cu mașina de curent continuu cu înfășurare de excitație în derivație

Acționarea în cadrantul I a motorului de curent continuu cu înfășurare de excitație se poate face alimentând înfășurarea rotorică (indusul) și înfășurarea de excitație (statorică) de la convertoare electronice de putere de un cadran. Alimentarea acestora se poate face cu redresoare de un cadran sau cu variatoare de tensiune continuă tot de un cadran.

Pentru a obține o acționare de două cadrane (în regim de motor, cadranele I și III) se inversează fizic polaritatea fluxului de excitație, precum este ilustrat în figura 2.6, sau se inversează fizic polaritatea tensiunii de alimentare a indusului, astfel se obțin caracteristici în cadranele I și III. O acționare de două cadrane în regim de motor și generator (sau frână), cadranele I și II sau I și IV mai poate fi realizată prin alimentarea înfășurării statorice sau a indusului cu convertoare electronice de putere de două cadrane. Pot fi utilizate redresoare de două cadrane sau variatoare de tensiune de două cadrane.

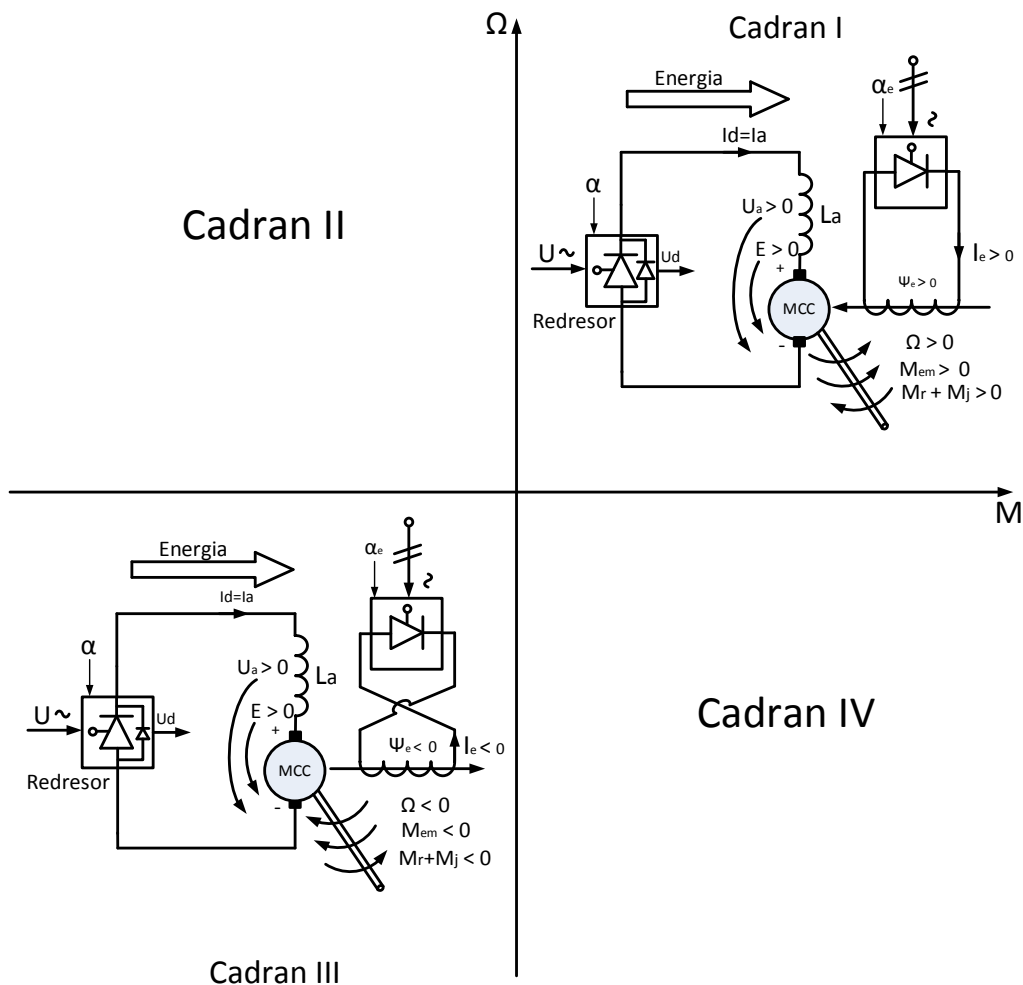


Fig. 2.6. Acțiunea mașinii de curent continuu în cadranele I și III prin schimbarea polarității excitației.

2.4. Acțiunea în 4 cadrane a mașinii de curent continuu cu înfășurare de excitație în derivație prin variația tensiunii de alimentare și a fluxului de excitație

Pentru a se putea realiza o acțiune în patru cadrane cu convertoare electronice (CEP) de 2 cadrane, se alimentează indusul sau înfășurarea de excitație a mașinii de curent continuu de la convertoare de două cadrane, precum este prezentat în figura 2.7. În acest caz este necesară inversarea fizică a polarității fluxului de excitație respectiv a tensiunii de alimentare a indusului. Astfel, se obțin caracteristici în cadranele unu și patru, respectiv doi și trei.

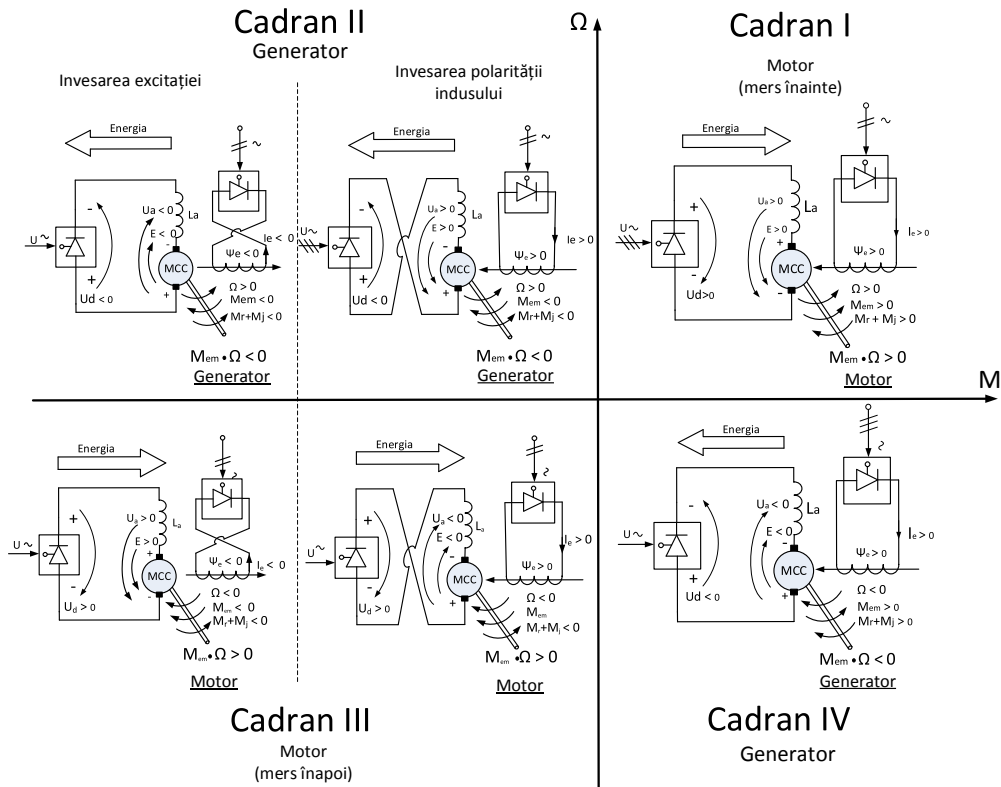


Fig. 2.7. Acțiunea mașinii de curent continuu în patru cadrane utilizând convertoare de două cadrane în indus și excitație.

Acțiunea în patru se cadrane se mai poate face și prin alimentarea indusului mașinii de curent continuu de la convertoare de patru cadrane, precum: variatoare de tensiune continuă de patru cadrane sau redresoare de patru cadrane, așa cum este prezentat în figura 2.8.

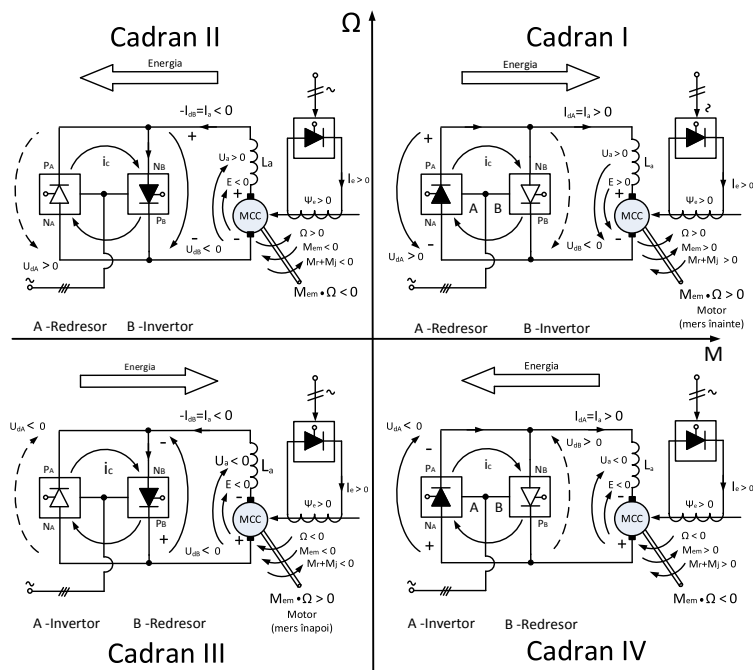


Fig. 2.8. Acțiunea mașinii de curent continuu în patru cadrane, utilizând convertoare electronice de patru cadrane.

2.5. Acționarea în 1 respectiv 2 cadrane cu mașina de curent continuu cu magnet permanent

În cazul mașinilor de curent continuu cu excitație cu magnet permanent nu se poate modifica fluxul de excitație din mașină, prin urmare în cazul acestor mașini nu se poate apela la procedura care presupune variația fluxului de excitație (slăbire de flux).

Se poate realiza acționarea în cadranul I cu motorul de curent continuu cu excitație cu magnet permanent alimentând înfășurarea rotorică de la redresoare comandate, de la variatoare de tensiune, sau de la surse stabilizate, toate de un cadran, precum în Fig. 2.8.

Pentru a obține o acționare în două cadrane se inversează fizic polaritatea tensiunii de alimentare a indusului precum în figura 2.9, astfel se obțin caracteristici în cadranul III. Funcționarea în două cadrane se mai poate realiza dacă alimentarea indusului se face cu convertoare de 2 cadrane. Indusul mașinii de curent continuu se poate alimenta de la un redresor de două cadrane sau cu variator de tensiune continuă de două cadrane.

În figurile 2.8. respectiv 2.9. sunt ilustrate posibile metode de acționare a unui motor de curent continuu cu magnet permanent în cadranele I și III. Trecerea din cadranul I în cadranul III se realizează prin inversarea fizică a polarității tensiunii de alimentare a indusului mașinii de curent continuu.

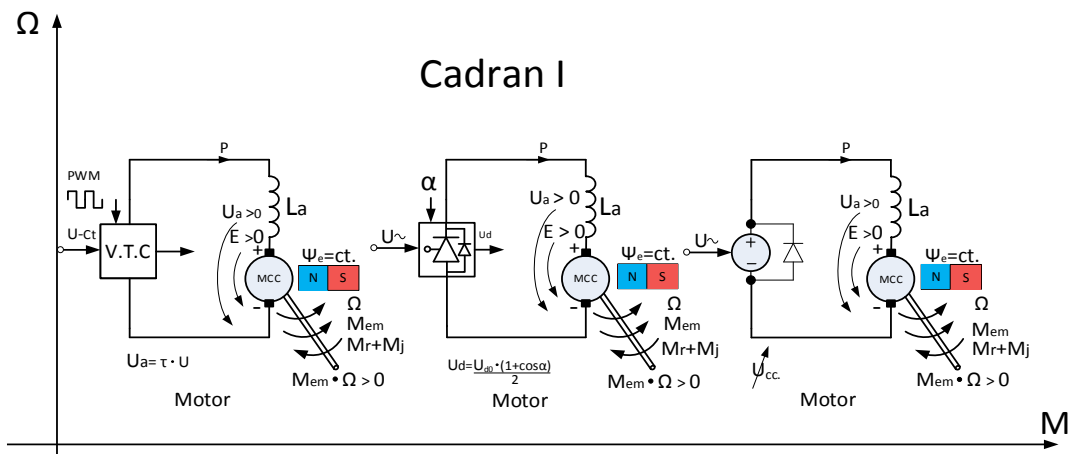


Fig. 2.8. Acționarea unei mașini de curent continuu cu magnet permanent, în cadranul I.

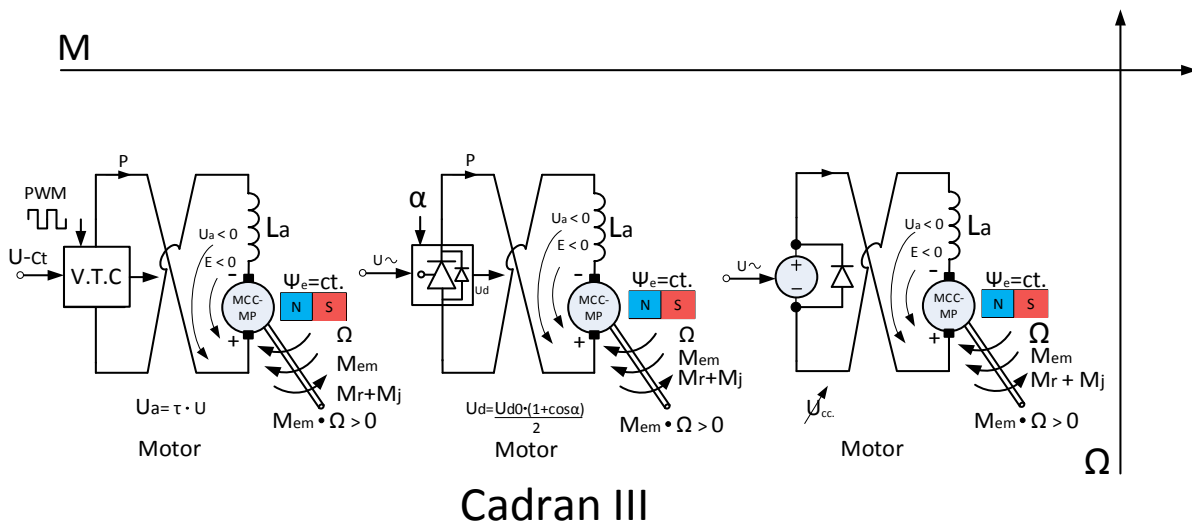


Fig. 2.9. Acționarea unei mașini de curent continuu cu magnet permanent, în cadranul III.

2.6. Acționări de curent continuu cu mașini de c.c. alimentate de la convertoare electronice de putere

Mașinile de curent continuu pot fi alimentate de la convertoare electronice de putere de tip redresor sau variator de tensiune continuă.

2.6.1. Acționări cu mașina de curent continuu alimentată de la variatoare de tensiune continuă - VTC

Variatorul de tensiune continuă (VTC) este un convertor cu intrare în curent continuu, care transformă o tensiune continuă aplicată la intrare, în impulsuri dreptunghiulare de tensiune, utilizând un comutator static (CS). Comutatorul static poate fi un tiristor cu circuit de stingere, tiristor cu blocare pe poartă (GTO), tranzistor MOSFET sau IGBT. În circuitul din figura 2.10 unde este prezentată schema de principiu a unui VTC de un cadran, este utilizat un tiristor GTO. În figura 2.11, i_A și i_B reprezintă semnalele de comandă pentru intrarea în conducție respectiv blocarea acestuia. Rolul bobinei și a diodei este acela de a evita conducția întreruptă. Modificarea parametrilor tensiunii de la ieșire se face aplicând periodic pe bornele sarcinii impulsuri de tensiune cu amplitudine egală cu U_d , dar cu durată de conducție variabilă, așa cum este ilustrat în figura 2.11.

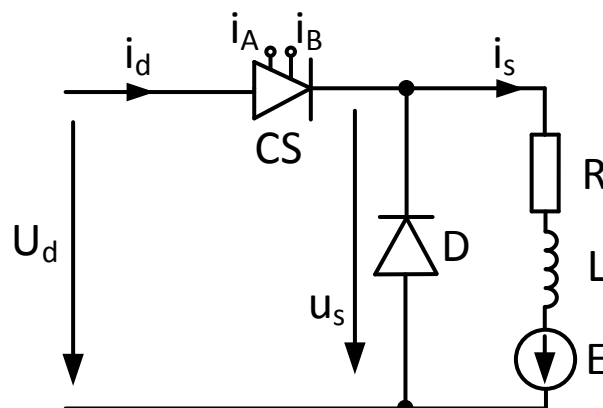


Fig. 2.10. Schema electronică de principiu a unui VTC de un cadran [10].

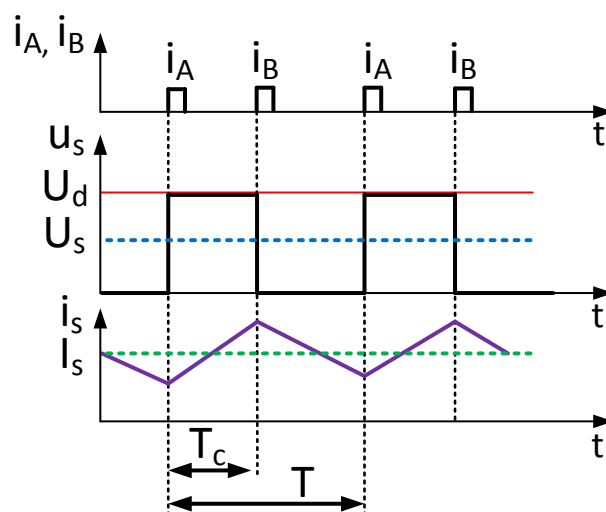


Fig. 2.11. Forme de undă ale tensiunii și curentului specifice unui VTC de un cadran [10].

Valoarea medie a tensiunii pe sarcină este:

$$U_s = \frac{1}{T} \int_0^T u_s dt = \frac{T_c}{T} \cdot U_d = \tau \cdot U_d \quad (14)$$

Unde „ τ ” reprezintă factorul de umplere;

$$\tau = \frac{T_c}{T} \quad (15)$$

- T_c - este durata de conectare a sarcinii la sursă;
- T - este perioada.

Dacă sarcina alimentată este una cu caracter inductiv, curentul de ieșire va avea valoarea maximă în momentul deconectării și valoare minimă în momentul conectării.

Metodele de comanda a variatorului de tensiune continuă sunt:

- comandă cu frecvență de comutație constantă și durată de conectare variabilă (cea mai răspândită);
- comandă cu frecvență de comutație variabilă și durată de conectare constantă;
- comandă cu frecvență de comutație variabilă și durată de conectare variabilă.

În funcție de cadranele în care pot funcționa există variatoare de tensiune continuă de un cadran, două cadrane sau patru cadrane. Figura 2.12. prezintă circuitul electronic specific unui variator de tensiune continuă de patru cadrane, realizat cu tranzistoare de tipul IGBT.

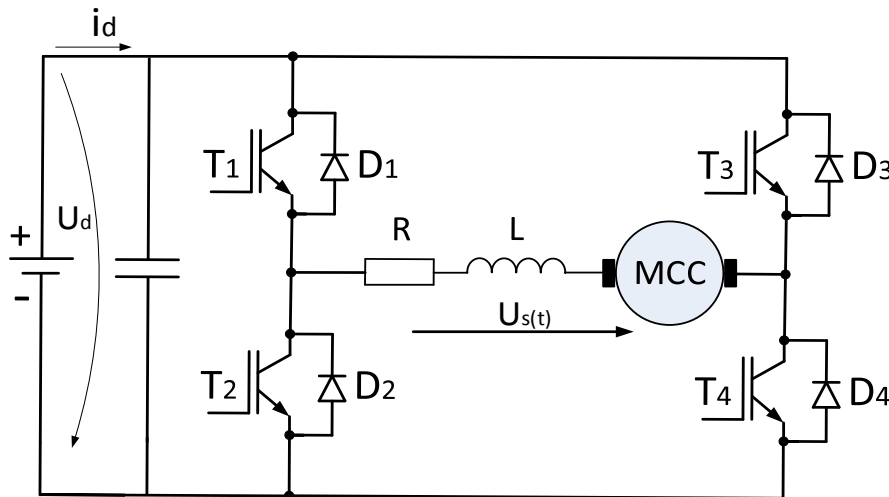


Fig. 2.12. Structură VTC de patru cadrane [11].

În cazul circuitului prezentat în Fig. 2.12. comanda comutatoarelor statice se face concomitent, două câte două, T_1 simultan cu T_4 , în antifază cu T_2 și T_3 , obținând o funcționare cu pulsuri de tensiune bidirecționale, care permite parcurgerea celor patru cadrane fără a schimba modul de comandă și fără pericolul conducerii întrerupte.

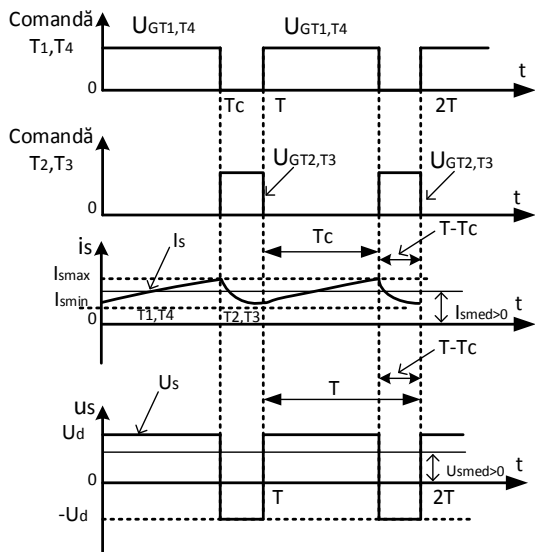
Tensiunea medie de ieșire poate fi calculată pe baza relației:

$$U_s = \left(2 \cdot \frac{T_c}{T} - 1 \right) \cdot U_d \quad (16)$$

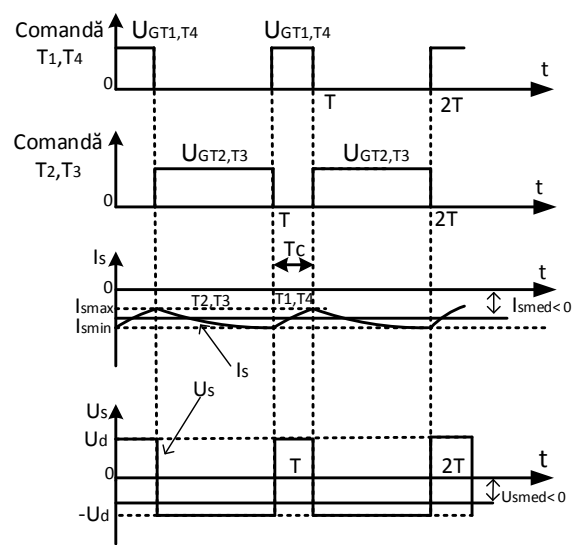
În situația funcționării la factor de umplere (τ) mai mare decât 0.5, pe sarcină se obține o tensiune medie pozitivă și astfel se pot acoperii cadranele I și II (figura 2.13a.). Dacă factorul de umplere (τ) este mai mic de 0.5, se obține o tensiune medie negativă, permițând acționarea și în cadranele III respectiv IV (figura 2.13b.). În cazul în care $\tau = 0.5$ tensiunea medie de alimentare a consumatorului este egală cu zero volți (figura 2.13c.).

Acest mod de funcționare (cu pulsuri de tensiune bidirecționale) necesită o bobină de netezire a curentului de sarcină mai mare decât în cazul funcționării cu pulsuri de tensiune unidirecționale.

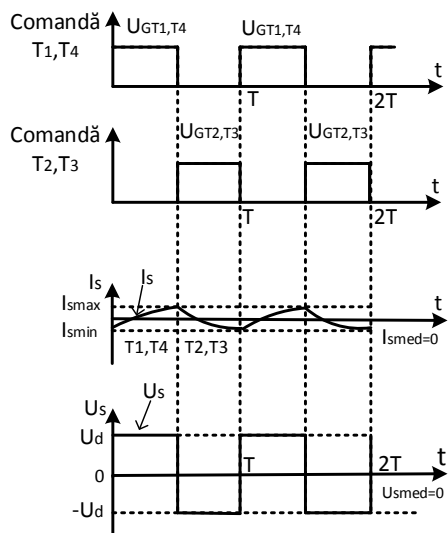
Caracteristicile mașinii de curent continuu alimentată de la un VTC de patru cadrane arată precum cele din prezentate Fig. 2.13d. Se pot observa unele zone de trecere, zone în care mașina nu funcționează, întrucât toată energia se consuma prin frecări și pierderi cauzate de efectul Joule-Lenz. Sensul de transfer al energiei se inversează în momentul în care se depășește această zonă.



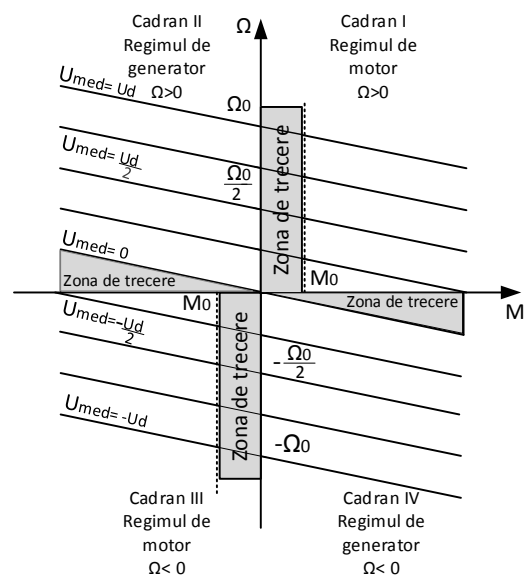
a) Formele de undă în cadrantul I (pentru $\tau > 0.5$)



b) Formele de undă în cadrantul III (pentru $\tau < 0.5$)



c) Formele de undă pentru $\tau = 0.5$



d) Caracteristicile mașinii de curent continuu alimentată de la VTC de patru cadrane

Fig. 2.13. Formele de undă ale variatorului de tensiune continuă de patru cadrane [10].

Reglarea vitezei mașinii de curent continuu se poate face prin modificarea tensiunii medii de la ieșirea variatorului de tensiune continuă (VTC), modificând valoarea factorului de umplere. Astfel, în cazul alimentării circuitului rotoric se obțin caracteristici paralele, având viteze de mers în gol ideal diferite.

În cazul alimentării circuitului statoric cu o tensiune mai mică decât cea nominală (se modifică curentul de excitație, prin reducerea acestuia), se obțin viteze mai mari, cu panta caracteristicilor mai abruptă. Această metodă de reglare a vitezei unghiulare a mașinii de curent continuu se mai numește *slăbire de câmp* sau *slăbire de flux* și se utilizează pentru a obține viteze ale mașinii mai mari decât cele de pe caracteristica naturală.

2.6.2. Acționări cu mașina de curent continuu alimentată de la redresoare

Un redresor este un echipament electronic care realizează conversia tensiunii alternative în tensiune continuă. Redresoarele pot fi:

- Comandate: unde funcția de comandă este $U_d = U_{d0} \cdot \cos \alpha$, la care $\alpha \in [0, 180^\circ)$ deci $\cos \alpha \in [-1, 1)$ și $U_d \in [-U_{d0}, U_{d0})$ - deci lucrează în două cadrane (tensiune pozitivă și negativă, **curent doar pozitiv**);
- Semicomandate: funcția de comandă este $U_d = \frac{U_{d0}}{2} \cdot (1 + \cos \alpha)$, la care $\alpha \in [0, 180^\circ)$ deci $\frac{(1 + \cos \alpha)}{2} \in [0, 1)$ și $U_d \in [0, U_{d0})$ - deci lucrează într-un cadran (tensiune doar pozitivă, **curent doar pozitiv**).

Figura 2.14. prezintă schema electronică aferentă unui redresor trifazat comandat.

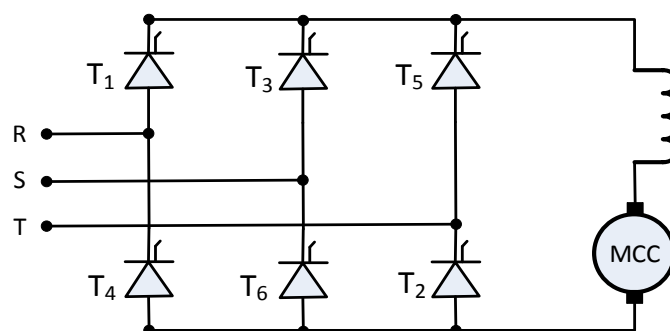


Fig. 2.14. Redresorul trifazat în punte comandat [12].

Caracteristica de reglaj specifică redresorului trifazat este prezentată în figura 2.15.

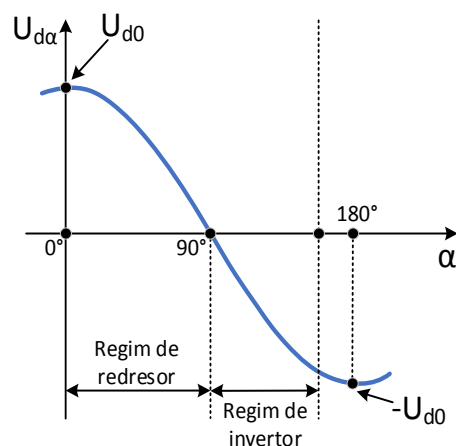


Fig. 2.15. Caracteristica de reglaj aferentă redresorului trifazat comandat.

O soluție tehnică utilizată pentru obținerea unei acționări electrice de viteză variabilă presupune alimentarea unei mașini de curent continuu cu excitație independentă prin intermediul unui convertor de patru cadrane cu tiristoare. De fapt, respectivul convertor conține două circuite separate pentru alimentarea indusului și a excitației, precum în figura 2.16.

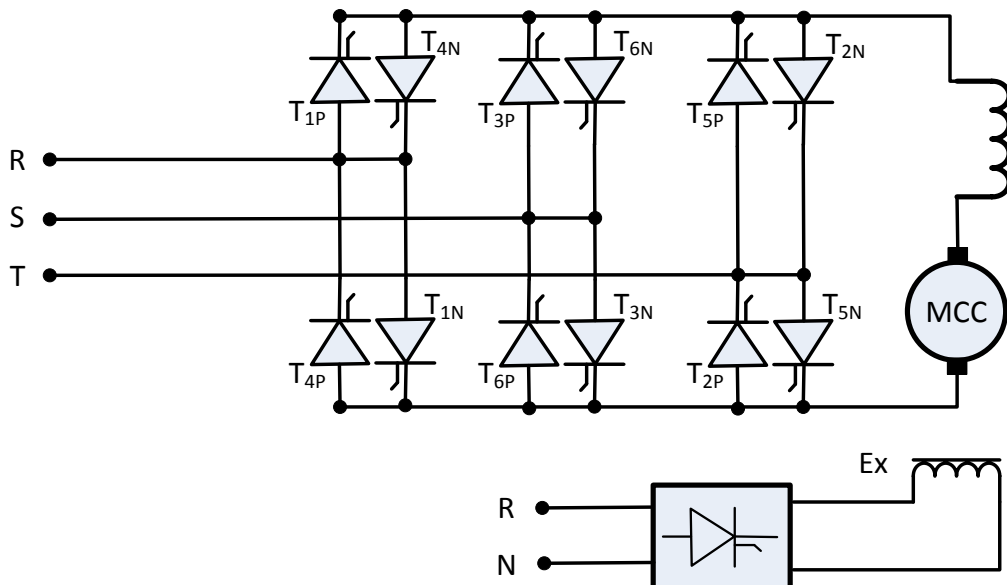


Fig. 2.16. Redresor de patru cadrane cu tiristoare.

Pentru a asigura funcționarea mașinii în toate cele patru cadrane, indusul acesteia este alimentat de la două convertoare trifazate cu tiristoare (de două cadrane) conectate în anti-paralel. Redresorul care alimentează indusul motorului la mersul înainte conține elementele notate cu indicele *P* și se numește pozitiv, în timp ce redresorul ce conduce în timpul mersului înapoi conține elementele notate cu *N* și se numește negativ. Circuitul excitației este alimentat independent de la un redresor cu tiristoare pentru a realiza funcționarea prin slăbirea câmpului a motorului de curent continuu. Acest convertor de regulă este de un cadran, dacă convertorul care alimentează indusul este de patru cadrane.

Funcționarea circuitului de alimentare a indusului fără curenți de circulație (cazul topologiei din figura 2.16 respectiv a redresorului Simoreg DC master (redresor utilizat în lucrarea șase) se bazează pe comanda precisă a celor două redresoare pozitiv și negativ astfel încât la un moment dat doar unul din cele două conduce. În regim staționar, la mersul înainte redresorul pozitiv este comandat în timp ce impulsurile de comandă pentru redresorul negativ sunt suprimate, în timp ce pentru mersul înapoi procedura se inversează. În regim dinamic, de exemplu în cazul în care aplicația necesită o schimbare rapidă a vitezei motorului de la o valoare mare la o valoare mai mică, conducția trece de la redresorul pozitiv la cel negativ datorită intrării în regim de generator a mașinii de curent continuu. În acest fel, curentul din indus își schimbă sensul transferând energie către sursă chiar dacă viteza motorului rămâne în același sens. Dacă se realizează scăderea vitezei în timpul mersului înapoi, conducția trece de la redresorul negativ la cel pozitiv și mașina intră în regim de generator.

În momentul în care conducția trece de la un redresor la celălalt este obligatoriu ca tensiunea medie de ieșire a celor două redresoare să fie aceeași. Acest lucru se realizează aplicând următoarea relație:

$$\frac{3 \cdot U}{\pi} \cdot \cos(\alpha_P) = -\frac{3 \cdot U}{\pi} \cdot \cos(\alpha_N) \quad (17)$$

unde:

U – tensiunea de vârf de linie de alimentare;
 α_P – unghiul de comandă a redresorului pozitiv;
 α_N – unghiul de comandă a redresorului negativ.

De unde rezultă:

$$\cos(\alpha_P) = \cos(\pi - \alpha_N). \quad (18)$$

Iar legea ce guvernează funcționarea unui convertor cu conexiune în anti-paralel este următoarea:

$$\alpha_P + \alpha_N = \pi. \quad (19)$$

Respectarea relației (19) este imperios necesară în dezvoltarea structurii de comandă a convertorului, însă la un moment dat doar unul din cele două redresoare conectate în antiparalel conduce.

În cazul în care aplicația cere operarea la o viteză mai mare decât viteza nominală, tensiunea de alimentare a indusului este menținută la valoarea nominală în timp ce redresorul monofazat ce alimentează înfășurarea de excitație este comandat în vederea scăderii curentului de excitație sub valoarea nominală. În mod uzual se pot obține valori ale vitezei cu 30% mai mari decât viteza nominală prin metoda slăbirii câmpului. Comanda celor două convertoare trebuie integrată într-o structură unitară de control.

2.7. Controlul mașinilor de curent continuu alimentate de la convertoare electronice de putere (CEP) atât în indus cât și în excitație

Controlul complet al unei mașini de curent continuu se face printr-o structură de control cu două bucle de reglare, care datorită caracteristicilor specifice ale mașinilor de curent continuu compensate (perpendicularitatea dintre vectorului fluxului de excitație și a fazorului curentului din indus) lucrează în mod independent, singura interconexiune dintre ele fiind dată de domeniul în care se face controlul mașinii de curent continuu, și anume:

- la viteze mai mici decât cele obținute pe caracteristica naturală, controlul mașinii de curent continuu se face la flux constant (fluxul nominal), prin reglarea tensiunii de alimentare a circuitului rotorului (a indusului);
- la viteze mai mari decât cele obținute pe caracteristica naturală, controlul mașinii de curent continuu se face prin scăderea fluxului de excitație (slăbire de câmp), prin reglarea tensiunii de alimentare a circuitului statoric (a excitației).

Figura 2.17 prezintă schema bloc de control a unei mașini de curent continuu alimentată cu convertoare electronice de putere (CEP 1 respectiv CEP 2). Convertoarele CEP 1 și CEP 2 pot fi redresoare sau variatoare de tensiune continuă. În cazul variatorului de tensiune continuă mărimea de comandă este reprezentată de factorul de umplere (τ)

iar în cazul redresorului de unghiul de comandă (α). Comanda celor două convertoare electronice de putere (CEP 1 și CEP 2) se face într-o structură unitară de control. Pe bucla de control a mărimilor mecanice (viteză, poziție, cuplu) este folosită o reglare în cascadă, o buclă interioară de reglare a curentului respectiv o buclă exterioară de reglare a mărimii mecanice (viteză în schema prezentată). Reglarea în cascadă permite o îmbunătățire a performanțelor dinamice ale acționării cu mașina de curent continuu și o protecție la supracurenți din circuitul rotoric (prin intermediul blocului de limitare a curentului din circuitul rotoric - indusului).

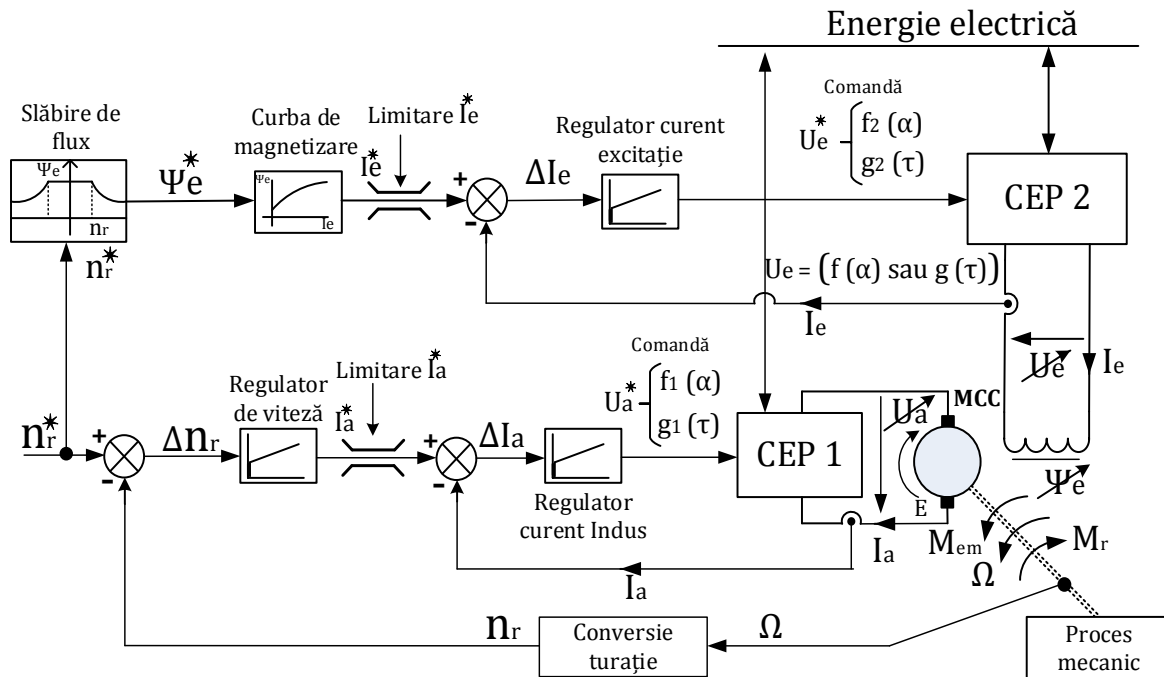


Fig. 2.17. Schema bloc de control a unei mașini de curent continuu alimentată cu convertoare electronice de putere (CEP).

În cazul acționării la viteze mai mari decât cele obținute pe caracteristica naturală, tensiunea de alimentare a indusului este menținută la valoarea nominală în timp ce curentul de excitație este scăzut sub valoarea nominală. În acest caz valoarea de referință a fluxului de excitație Ψ_e^* se calculează în funcție de turația de referință n_r^* , în blocul de calcul *Slăbire de flux* conform relației:

$$\Psi_e^* = \frac{n_{rN}}{n_r^*} \cdot \Psi_{eN} \text{ dacă } n_r^* > n_{rN} \quad (20)$$

Unde n_{rN} și Ψ_{eN} sunt valorile nominale a turației respectiv a fluxului de excitație.

3. Acționări cu mașini de curent continuu – lucrări practice

3.1. Lucrarea 1 - Acționări cu mașina de curent continuu cu excitație cu magnet permanent alimentată în indus de la convertoare electronice de putere

3.1.1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator își propune să arate cum se poate modifica viteza la o acționare cu mașina de curent continuu cu excitație cu magnet permanent (MCC-MP), modificând tensiunea de alimentare a indusului (rotorului) respectiv introducând rezistențe suplimentare în circuitul acestuia. Prin aceste proceduri se poate realiza pornirea, frânarea, reversarea respectiv reglarea vitezei unui sistem de acționare electrică.

3.1.2. Montajul experimental

Figura 3.1. prezintă montajul experimental aferent lucrării de laborator.

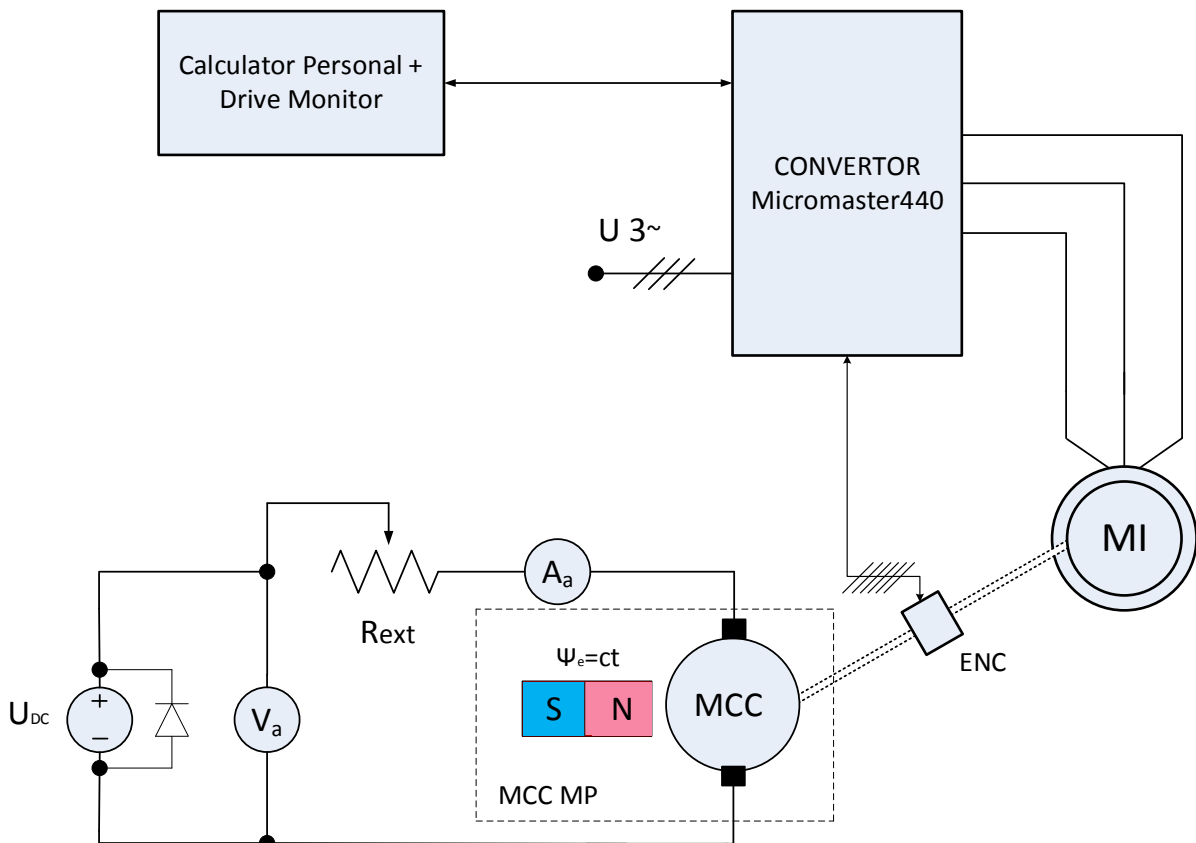


Fig. 3.1. Montajul experimental.

3.1.3. Legendă montaj experimental

U_{DC} - Sursă stabilizată pentru reglarea vitezei prin variația tensiunii de alimentare;
Convertor Micromaster 440 – Convertor static de frecvență;
ENC – Encoder;
 A_a – Ampermetru;
 V_a – Voltmetru;
Rext – Reostat, 6.2 [Ω] - utilizat pentru reglarea vitezei prin variația rezistenței exterioare.

Ansamblul alcătuit din calculator personal, convertor Micromaster 440 și mașina de inducție (MI), are rolul de a furniza cuplul rezistent (M_r), aplicat la arborele mașinii de curent continuu.

Datele mașinilor electrice:


Datele mașinii de curent continuu (MCC)

$P_N = 400 [W]$ – puterea mecanică la arbore;
 $U_{aN} = 40 [V]$;
 $I_{aN} = 14.5 [A]$
 $M_N = 1,27 [Nm]$ – cuplul la arbore;
 $N_N = 3000 [rpm]$;
 $R_a = 0,5 [\Omega]$.


Datele mașinii de inducție (MI)

$P_N = 550 [W]$;
 $U_{sN} = 230 [V] \sim$;
 $I_{sN} = 2,4 [A] \sim$;
 $n_N = 2800 [rpm]$;
 $R_s = 15,1 [\Omega]$;
 $\cos\varphi = 0,82$.

3.1.4. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 3.1.
2. Se alimentează convertorul Micromaster 440 de la panoul de comandă aferent standului experimental.
3. Se pornește calculatorul și se inițializează programul DriveMonitor. Se selectează **File → Set Up an USS Online Connection → START**. În pagina următoare se apasă butonul **Direct to Parameter List**. Trebuie să fie indicat modul de operare „online”. În acest mod se alege opțiunea de afișare a întregului set de parametri. **Se verifică dacă parametrii de funcționare sunt specifici controlului de cuplu al mașinii de inducție (MI): P0005 = 31 , P1300 = 23, P1500 = 44 , P2003 = 0.65[Nm]**.
4. În câmpul Setpoint se introduce cuplul de referință $m^{ref} = 0 \%$. Se oprește invertorul de la butonul **roșu** din programul DriveMonitor ().
5. Se fixează rezistența din circuitul rotoric la 0 [Ω] după care se pornește sursa stabilizată (U_{DC}) de un cadran și se ridică încet tensiunea U_a la 30 [V], urmărind pornirea motorului. Se completează tabelul cu valorile vitezei (n) și a curentului (I_a) din indus, cu motorul la mers în gol ($m^{ref} = 0 \%$ și butonul roșu din DriveMonitor apăsat).

Observație 1: Măsurătorile se fac după stabilizarea vitezei.

Observație 1: $m^{ref} = 0\%$ este corespunzător funcționării la mers în gol, aceasta se obține după apăsarea butonului **roșu** din programul DriveMonitor ().

6. În câmpul Setpoint se introduce cuplul de referință $m^{ref} = 5\%$. Se pornește invertorul de la butonul de START (butonul verde în DriveMonitor), se așteaptă stabilizarea sistemului după care se completează tabelul cu valorile corespunzătoare vitezei n și a curentului din indus I_a .
7. Se repetă punctul 6 cu $m^{ref} = 10$ și 15% .
8. Se repetă punctele 5, 6, 7 cu $U_a = 20$ și 10 [V] pentru $m^{ref} = 0, 5, 10, 15\%$.
9. Se fixează rezistența R_{ext} la 0.5 ohmi și se repetă punctele 4, 5, 6 și 7.
10. Se fixează rezistența R_{ext} la 1 ohm și se repetă punctele 4, 5, 6 și 7.
11. Se fixează rezistența R_{ext} la 2 ohmi și se repetă punctele 4, 5, 6 și 7.
12. Se ridică caracteristicile mașinii de curent continuu:
 - a. $\Omega = f(M)$ la variația tensiunii;
 - b. $\Omega = f(M)$ pentru diferitele rezistențe introduse în circuitul rotor.

Obs. Caracteristicile de la punctele a și b se realizează pe același grafic.

13. Pentru mașina de curent continuu cu magnet permanent din lucrare, pe baza datelor date în legendă să se calculeze următoarele:

Constanta mașinii la flux nominal: $C_N = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot R_a}{\Omega_N} = \dots\dots\dots [V \cdot s]$

Cuplul nominal al mașinii: $M_N = C_N \cdot I_{aN} = \dots\dots\dots [N \cdot m]$

Puterea electromagnetică: $P_{elmgN} = E_N \cdot I_{aN} = \dots\dots\dots [W]$

Puterea electrică absorbită: $P_{elabsN} = U_{aN} \cdot I_{aN} = \dots\dots\dots [W]$

Pierderile în cupru: $p_{cu} = R_a \cdot I_{aN}^2 = \dots\dots\dots [W]$

14. Relații de calcul aferente mărimilor din tabel:

$$C_N = K \cdot \Psi_{eN} = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot R_a}{\Omega_N} [V \cdot s], \Omega = \frac{\pi n}{30} \left[\frac{rad}{s} \right], E = C_N \cdot \Omega [V], M = C_N \cdot I_a [N \cdot m]$$

Tabel 3.1. Rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate.

Nr.	m^{ref} [%]	U_a [V]	R_{ext} [Ω]	n [rpm]	I_a [A]	Ω [rad/s]	E [V]	M [N · m]
1	0							
2	5							
3	10							
4	15							
5	0							
6	5							
7	10							
8	15							
9	0							
10	5							
11	10							
12	15							
13	0							
14	5							
15	10							
16	15							
17	0							
18	5							
19	10							
20	15							
21	0							
22	5							
23	10							
24	15							

3.1.5. Concluzii

Modificarea vitezei mașinii de curent continuu cu excitație cu magnet permanent se poate realiza prin modificarea tensiunii de alimentare a indusului (rotorului) sau prin introducerea unor rezistențe suplimentare în circuitul indusului. Prin aceste metode se poate regla viteza mașinii de curent continuu în sens coborâtor vitezei obținute pe caracteristica naturală (viteze mai mici). Excitația mașinii fiind asigurată de un magnet permanent fluxul de excitație nu poate fi modificat, prin urmare reglajul vitezei utilizând metoda bazată pe slăbire de câmp nu se poate aplica.

În cazul reglării vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare a circuitului indusului caracteristicile artificiale obținute vor fi paralele, deplasate în jos față de caracteristica naturală.

În cazul reglării vitezei prin introducerea unor rezistențe în circuitul indusului, rezistențele suplimentare introduse aduc modificări numai în ceea ce privește panta caracteristicii mecanice.

3.2. Lucrarea 2 - Acționări cu mașina de curent continuu alimentată în indus și în excitație de la convertoare electronice de putere

3.2.1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator își propune să arate cum se poate modifica viteza la o acționare cu mașina de curent continuu (MCC), modificând tensiunea de alimentare a indusului respectiv modificând fluxul de excitație (prin modificarea tensiunii de excitație). Prin aceste procedee se poate realiza pornirea, frânarea, reversarea respectiv reglarea vitezei unei acționari electrice, atât în domeniul vitezelor cuprinse între valorile negative și pozitive ale vitezei din catalogul mașinii, cât și la viteze mari (peste valorile din catalog) prin metoda slăbirii fluxului.

3.2.2. Montajul experimental

Montajul experimental specific lucrării de față este prezentat în figura. 3.2.

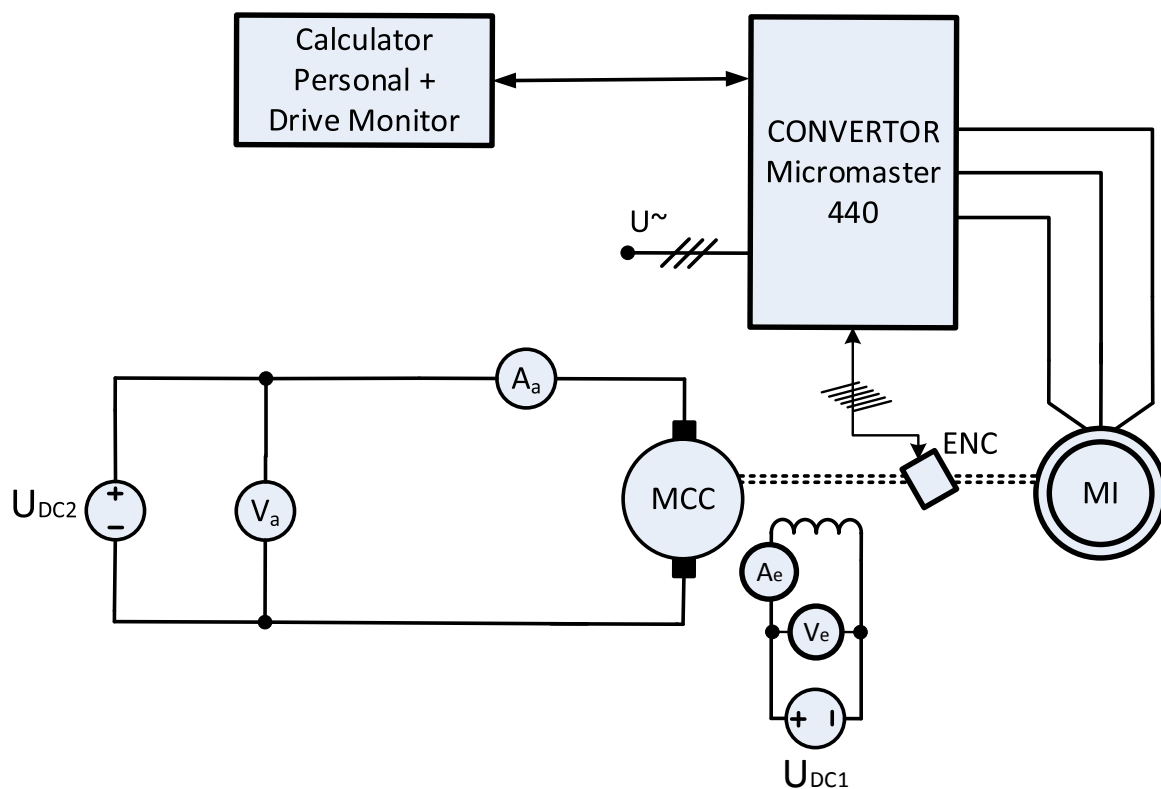


Fig. 3.2. Montajul experimental.

3.2.3. Legendă montaj experimental

U_{DC1} – Sursă de tensiune continuă pentru alimentarea excitației;
 U_{DC2} – Sursă de tensiune continuă pentru alimentarea indusului;
 A_a, A_e – Ampermetre pentru măsurarea curenților din indus și din excitație;
 V_a, V_e – Voltmetre pentru măsurarea tensiunii indusului și a excitației;
Micromaster 440 - Convertor static de frecvență;
ENC – Encoder.

Sistemul alcătuit din calculator personal, convertor Micromaster 440 și mașina de inducție (MI), are rolul de a furniza cuplul rezistent (M_r), aplicat la arborele mașinii de curent continuu.

Datele mașinilor electrice:

Date mașină de curent continuu (MCC)



$P_N = 250 [W]$ – puterea mecanică la arbore;
 $U_{aN} = 30 [V]$;
 $I_{aN} = 10 [A]$
 $M_N = 1,37 [Nm]$ – cuplul la arbore;
 $n_N = 1764 [rpm]$;
 $R_a = 0,44 [\Omega]$;
 $U_{eN} = 84 [V]$;
 $I_{eN} = 0,35 [A]$.

Date mașină de inducție (MI)

$P_N = 550 [W]$;
 $U_{sN} = 230 [V] \sim$;
 $I_{sN} = 2,4 [A] \sim$;
 $n_N = 2800 [rpm]$;
 $R_s = 15,1 [\Omega]$;
 $\cos\varphi = 0,8$;
 $n_s = 3000 [rpm]$.

3.2.4. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 3.2.
2. Se alimentează convertorul Micromaster 440 de la panoul de comandă aferent standului experimental.
3. Se pornește calculatorul și se inițializează programul DriveMonitor. Se alege **File** → **Set Up an USS Online Connection** → **START**. În pagina următoare se apasă butonul **Direct to Parameter List**. Trebuie să fie indicat modul de operare „online”. În acest mod se alege opțiunea de afișare a întregului set de parametri. **Se verifică dacă parametri de funcționare sunt specifici controlului de cuplu al mașinii de inducție: P0005 = 21 , P1300 = 23 , P1500 = 44 , P2003 = 0.65 [Nm].**
4. Se alimentează excitația mașinii de curent continuu de la sursa de tensiune continuă stabilizată (U_{DC1}) la curentul nominal $I_{eN} = 0.35 [A]$. **Valoarea curentului de excitație se va corecta în cazul în care aceasta scade.**

5. În câmpul Setpoint se introduce cuplul de referință $m^{ref} = 0\%$. Se oprește invertorul de la butonul roșu din DriveMonitor (). Se pornește sursa U_{DC2} și se ridică tensiunea U_a la 30 [V], după care se completează tabelul cu valorile corespunzătoare turației n și a curentului din indus I_a , cu mașina electrică funcționând în gol ($m^{ref} = 0\%$ și butonul roșu din DriveMonitor apăsat).
Observație 1: Măsurătorile se fac după stabilizarea vitezei.
Observație 2: $m^{ref} = 0\%$ este corespunzător funcționării la mers în gol, aceasta se obține după apăsarea butonului **roșu** din programul DriveMonitor ().
6. În câmpul Setpoint se introduce cuplul de referință $m^{ref} = 5\%$. Se pornește invertorul de la butonul de START (butonul verde în DriveMonitor), se așteaptă stabilizarea sistemului, după care se completează tabelul cu valorile corespunzătoare turației n și a curentului din indus I_a .
7. Se repetă punctul 6 cu $m^{ref} = 10\%$ și 15% .
8. Se repetă punctele 4, 5, 6 cu $U_a = 20$ și 10 [V] pentru $m^{ref} = 0, 5, 10$ și 15% .
9. Se repetă punctele 5, 6 cu $U_a = 30$ [V] și $m^{ref} = 0, 5, 10$ și 15% , pentru curenții de excitație: $I_e = 0.3, 0.25$ respectiv 0.2 [A]. **Obs.** Punctul 24 (Nr. 24) din tabel se realizează în prezența cadrului didactic.
10. Se ridică caracteristicile mașinii de curent continuu:
 - a. $\Omega = f(M)$ la variația tensiunii;
 - b. $\Omega = f(M)$ la variația fluxului.

Obs. Caracteristicile specifice punctelor a și b se realizează pe același grafic.

11. Pentru mașina ce curent continuu din lucrare, pe baza datelor din legendă să se calculeze următoarele:

$$\text{Constanta mașinii la flux nominal: } C_N = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot R_a}{\Omega_N} = \dots\dots\dots [V \cdot s]$$

$$\text{Cuplul nominal al mașinii: } M_N = C_N \cdot I_{aN} = \dots\dots\dots [N \cdot m]$$

$$\text{Puterea electromagnetice: } P_{elmgN} = E_N \cdot I_{aN} = \dots\dots\dots [W]$$

$$\text{Puterea electrică absorbită: } P_{elabsN} = U_{aN} \cdot I_{aN} + U_{eN} \cdot I_{eN} = \dots\dots\dots [W]$$

$$\text{Pierderile în cupru totale: } p_{cu} = R_a \cdot I_{aN}^2 + R_e \cdot I_{eN}^2 = \dots\dots\dots [W]$$

12. Relații de calcul ale mărimilor din tabel:

$$C_N = K \cdot \Psi_{eN} = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot R_a}{\Omega_N} [V \cdot s] \qquad \Omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \left[\frac{rad}{s} \right],$$

$$E = C_N \cdot \Omega [V] - \text{pentru } I_e = 0.35 [A] \qquad E = C \cdot \Omega [V] - \text{pentru } I_e \neq 0.35 [A]$$

$$M = C_N \cdot I_a [N \cdot m] - \text{pentru } I_e = 0.35 [A] \qquad M = C \cdot I_a [N \cdot m] - \text{pentru } I_e \neq 0.35 [A]$$

Având în vedere faptul că nu se cunoaște curba de magnetizare a motorului, se consideră o dependență liniară între curentul de excitație I_e și fluxul de excitație Ψ_e . Astfel:

$$C = C_N \cdot \frac{I_e}{I_{eN}}$$

Tabel 3.2. Rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate.

Nr.	m^{ref} [%]	U_a [V]	I_e [A]	n [rpm]	I_a [A]	Ω [rad/s]	C_N sau C [V · s]	E [V]	M [N · m]
1	0								
2	5								
3	10								
4	15								
5	0								
6	5								
7	10								
8	15								
9	0								
10	5								
11	10								
12	15								
13	0								
14	5								
15	10								
16	15								
17	0								
18	5								
19	10								
20	15								
21	0								
22	5								
23	10								
24	15								
Calcul puncte specifice caracteristicii naturale: $\Omega_0 = \frac{U_{aN}}{C_N}$ - punctul de mers în gol ideal $\Omega_N = \frac{U_{aN}}{C_N} - \frac{R_a}{C_N^2} \cdot M_N$ - punctul de funcționare nominal								Ω_0 [rad/s]	Ω_N [rad/s]

3.2.5. Concluzii

Modificarea vitezei mașinii de curent continuu se poate realiza prin modificarea tensiunii de alimentare a indusului, prin introducerea unor rezistențe suplimentare în circuitul indusului și prin variația fluxului de excitație.

În cazul reglării vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare a circuitului indusului caracteristicile artificiale obținute vor fi paralele, deplasate în jos față de caracteristica naturală.

În cazul în care se cere o viteză superioară celei obținute pe caracteristica naturală, reglajul vitezei mașinii de curent continuu se poate face utilizând metoda bazată pe modificarea fluxului de excitație, numită și slăbire de câmp.

3.3. Lucrarea 3 - Acționări electrice de 2 cadrane. Instalația de ridicat

3.3.1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator își propune să arate cum funcționează un sistem de acționare cu mașina de curent, în două cadrane (în regimul de motor și regimul de generator), respectiv cadranele I și IV, specifice aplicațiilor de tip instalații de ridicat (lifturi, macarale, poduri rulante, etc.). În acest caz mașina de curent continuu trebuie alimentată de la un convertor de tensiune continuă, Redresor-Rd sau Variator de Tensiune Continuă - VTC (DC-Chopper), capabil să asigure funcționarea mașinii în cadranele I și IV, adică să asigure curent pozitiv ($I_a > 0$) respectiv atât tensiune pozitivă ($U_a > 0$) cât și negativă și ($U_a < 0$).

3.3.2. Considerații teoretice

Instalația de ridicat reprezintă un sistem acționare electrică de două cadrane în care cuplul de rezistent este preponderent de tip activ. Schema unui astfel de ansamblu este prezentată în figura 3.3, prin aceasta fiind evidențiat și sistemul de acționare implementat în laborator.

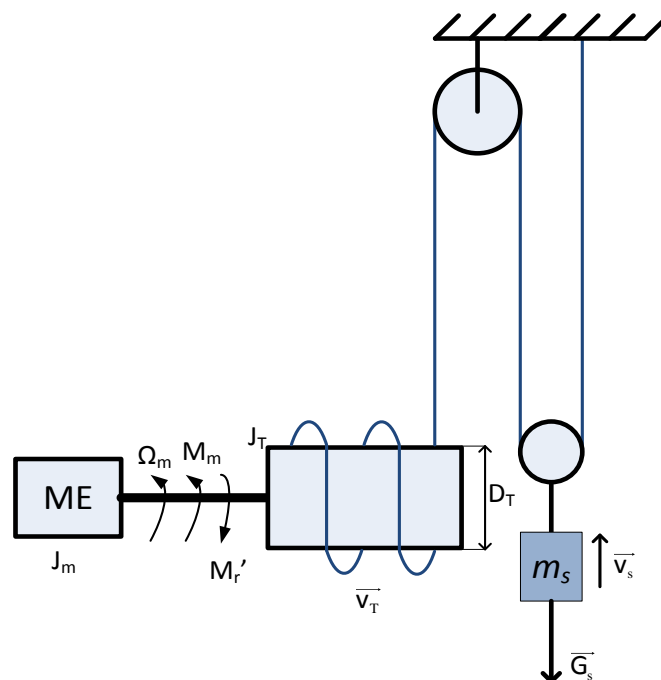


Fig. 3.3. Instalație de ridicat cu scripete mobil.

Notațiile din figura 3.3 au următoarele semnificații:

- Ω_m - viteza unghiulară a mașinii electrice;
- M_m - cuplul la arbore a mașinii electrice;
- J_m, J_T - momentele de inerție proprii ale motorului respectiv ale tamburului;

- M_r' - cuplul rezistent redus la arborele motorului;
- \vec{v}_T - viteza liniară a unui punct de pe circumferința tamburului (viteza tangențială);
- \vec{v}_s - viteza liniară a sarcinii utile;
- D_T - diametrul tamburului;
- m_s - masa sarcinii utile;
- \vec{G}_s - greutatea sarcinii utile.

În cazul acestei aplicații, la arborele mașinii apare atât un cuplu rezistent de tip activ, (datorat sarcinii utile) cât și un cuplu de tip reactiv (datorat forțelor de frecare din lagăre, a cablului pe tambur și scripeți etc.). Caracteristicile corespunzătoare cuplurilor care intervin în cadrul sistemului de acționare sunt prezentate în figura 3.4.

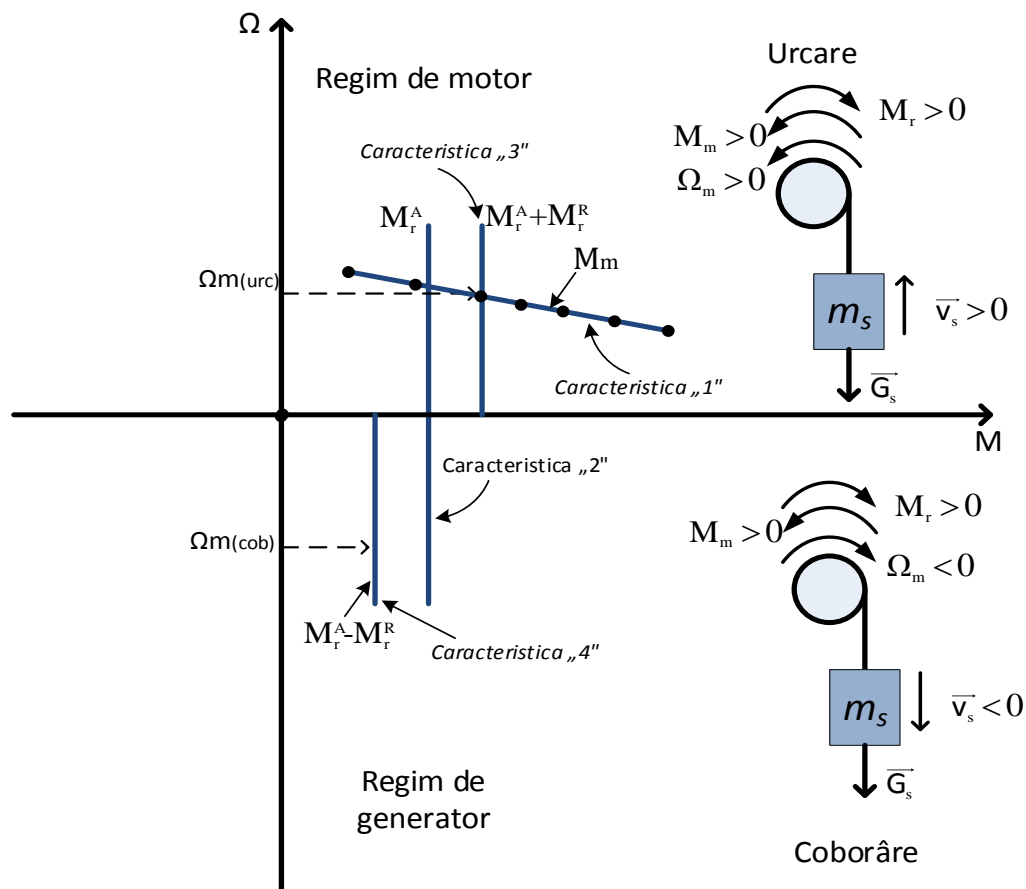


Fig. 3.4. Cadranele de funcționare pentru instalația de ridicat

Cuplurile M_r^A și M_r^R indicate în figura 3.4 au următoarele semnificații:

- M_r^A – Cuplul rezistent activ, dat de forța gravitațională (determinată de greutatea sarcinii utile);
- M_r^R – Cuplul rezistent pasiv, dat de frecările din întregul lanț cinematic și cuplul de mers în gol al motorului.

3.3.3. Montajul experimental

Figura 3.5. prezintă montajul experimental aferent lucrării de laborator

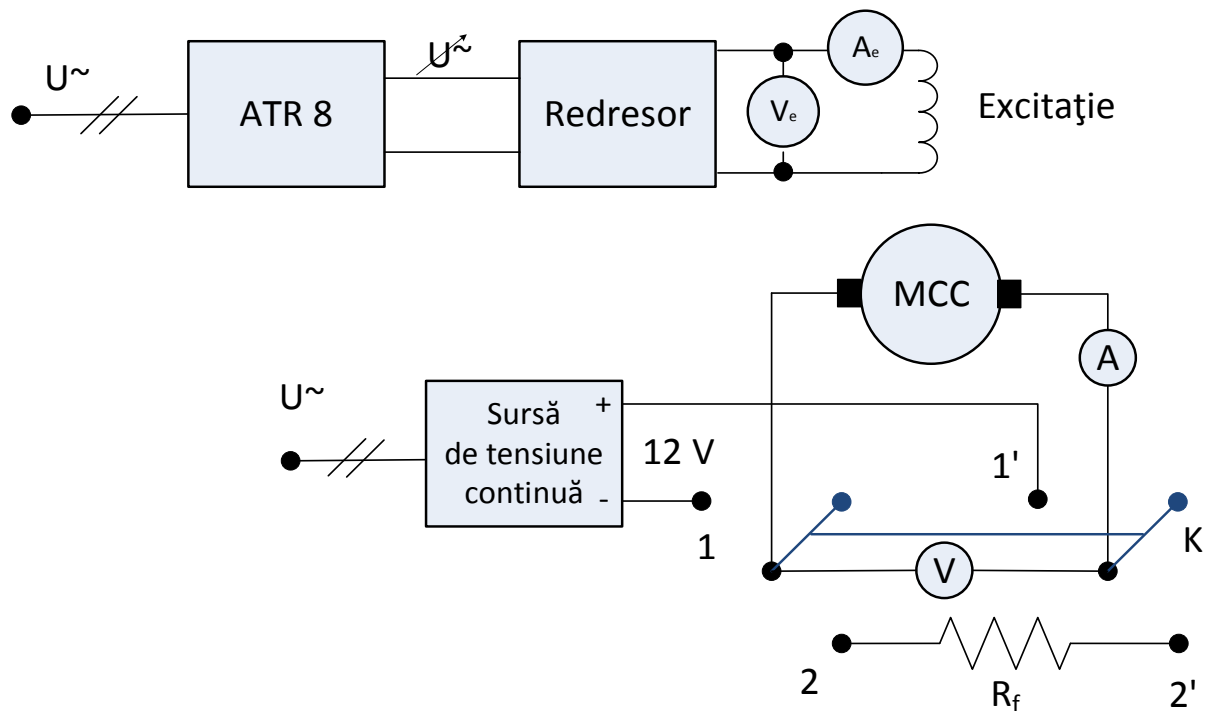


Fig. 3.5. Montajul experimental.

3.3.4. Legendă montaj experimental

ATR 8 - Autotransformator;
SURSA D.C. - Sursă de curent continuu reglabilă;
 A_a, A_e - Ampermetru digital;
 V_a, V_e - Voltmetru digital;
 R_f - Reostat, 15 [Ω];
K - Comutator basculant.

Datele mașinii electrice de curent continuu:

$P_N = 550$ [W];
 $U_{aN} = 110$ [V];
 $I_{aN} = 7,2$ [A];
 $U_{eN} = 110$ [V];
 $I_{eN} = 0,28$ [A];
 $n_N = 3000$ [rpm];
 $R_a = 1,6$ [Ω];
 $D_T = 0,08$ [m]- Diametrul tamburului.

3.3.5. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 3.5.
2. Se alimentează excitația mașinii de curent continuu utilizând redresorul alimentat de la autotransformator, la valori nominale: $U_{eN} = 110$ [V], $I_{eN} = 0.28$ [A].
3. Se pune o greutate cu masa de 1,5 [Kg] în cârligul instalației de ridicat și se verifică dacă transmisiile și firul sunt în poziția corectă.

Obs. În calcule se va lua în considerare și masa sistemului de prindere: $m_{\text{carabină}}=240$ [g].

4. Se reglează rezistența de frânare la 5 ohmi.
5. Se reglează sursa de curent continuu la tensiunea de 12 [V] cu cele două canale conectate în paralel, setând curentul maxim la valoarea de 6 [A].
6. Se alimentează indusul mașinii de curent continuu cu o tensiune de 12 [V] cu ajutorul comutatorului K1 – punând pe poziția „1-1”, urmărindu-se avansul pe verticală a sarcinii. **ATENȚIE: după o cursă de 2 [m] comutatorul K1 se trece rapid pe poziția „2-2” urmărind coborârea cu frânare a sarcinii.**
7. Se măsoară datele din tabel atât la urcare cât și la coborâre ($t; m_s; U_a; I_a$).
Observație! : la coborâre $h, \Omega_m, n_m, v_s, E_{cob}$. sunt negative.
8. Se repetă punctele 6 și 7, cu rezistența de frânare R_f la 2,5 ohmi.
9. Se repetă punctele 6, 7 și 8 folosind următoarele: $m_s = 1.5; 2; 2.5; 3; 3.5; 4; 4.5$ [Kg] (sau valori apropiate de acestea, în tabel trecându-se valorile folosite).
10. Se completează tabelul cu datele măsurate și calculate.
11. Se vor ridica pe baza tabelului completat caracteristicile sarcinii pentru fiecare greutate în parte, și anume:
 - a. $\Omega_m = f(M_r^A)$ - reprezintă caracteristica sarcinii active datorată exclusiv greutății (vezi figura 3.4.);
 - b. $\Omega_m = f(M_r^A + M_r^R)$ - reprezintă caracteristica sarcinii la urcarea greutății (vezi figura 3.4.);
 - c. $\Omega_m = f(M_r^A - M_r^R)$ - reprezintă caracteristica sarcinii la coborârea greutății (vezi figura 3.4.).
 Pentru fiecare caz în parte subpunctele a, b și c corespunzătoare acestora se reprezintă pe același grafic.
12. Se vor ridica caracteristicile mașinii în cadranele I (la urcare) și IV (la coborâre, două caracteristici câte una pentru fiecare valoare a lui R_f (5 respectiv 2.5 Ω)).

13. Relații de calcul ale mărimilor din tabel:

$$v_s = \frac{h}{t} \left[\frac{m}{s} \right] \quad \Omega_m = \frac{4 \cdot v_s}{D_T} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad n_m = 60 \cdot \frac{\Omega_m}{2 \cdot \pi} \left[\frac{rot}{min} \right] \quad G_s = m_s \cdot g \text{ [Nm]}$$

$$E_{urc.} = U_a - R_a \cdot I_a \text{ [V]} \quad E_{cob.} = U_a - (R_a + R_f) \cdot I_a \text{ [V]} \quad M_m = \frac{E \cdot I_a}{\Omega_m} \text{ [Nm]} \quad M_r^A = \frac{G_s}{2} \cdot \frac{D_T}{2} \text{ [Nm]}$$

$$M_{r_{urc.}}^R = M_m - M_r^A \text{ [Nm]} \quad M_{r_{cob.}}^R = M_r^A - M_m \text{ [Nm]} \quad D_T = 0.08 \text{ [m]}$$

Tabel 3.3. Rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate.

Caz	Nr. crt.	h [m]	t [s]	m_s [kg]	Ω_m [rad/s]	n_m [rpm]	U_a [V]	I_a [A]	R_f [Ω]	v_s [m/s]	E [V]	M_r^A [Nm]	M_m [Nm]	M_r^R [Nm]	$M_r^A \pm M_r^R$ [Nm] („+” la urcare „-” coborâre)	
1	1	+2							0							
	2	-2							5							
	3	-2							2.5							
2	4	+2							0							
	5	-2							5							
	6	-2							2.5							
3	7	+2							0							
	8	-2							5							
	9	-2							2.5							
4	10	+2							0							
	11	-2							5							
	12	-2							2.5							
5	13	+2							0							
	14	-2							5							
	15	-2							2.5							
6	16	+2							0							
	17	-2							5							
	18	-2							2.5							
7	19	+2							0							
	20	-2							5							
	21	-2							2.5							

3.3.6. Concluzii

În cadrul acestei lucrări s-a analizat modul în care funcționează un sistem de acționare cu mașina de curent continuu, în două cadrane (în regim de motor și generator), respectiv cadranele I și IV. Funcționarea în cadranele I și IV a mașinii de curent continuu poate fi obținută utilizând convertoare electronice de putere de tensiune continuă (redresoare sau variatoare de tensiune continuă - VTC (Chopper)), capabile să asigure mersul mașinii în cadranele I și IV, adică să permită curent pozitiv ($I_a > 0$) respectiv tensiune pozitivă ($U_a > 0$) și negativă ($U_a < 0$). Se pot utiliza combinații ale acestora: alimentând excitația mașinii cu un redresor de un cadran capabil să asigure curent și tensiune pozitivă ($U_e > 0$; $I_e > 0$) iar indusul cu un variator de tensiune continuă de două cadrane, capabil să asigure curent pozitiv și tensiune atât pozitivă cât și negativă ($U_a > 0$ și $U_a < 0$; $I_a > 0$). În cadrul prezentei lucrări de laborator frânarea mașinii nu este una recuperativă, energia fiind disipată pe un rezistor.

3.4. Lucrarea 4 - Acționări în două cadrane cu mașina de curent continuu, cu recuperarea energiei în regim de frânare

3.4.1. Scopul lucrării:

Lucrarea de laborator își propune să arate cum funcționează un sistem de acționare cu o mașină de curent continuu cu magnet permanent, în cadranele I (motor) și II (generator, frână) specifică aplicațiilor din domeniul tracțiunii electrice. Astfel, se analizează variația turației mașinii de curent continuu cu magnet permanent la modificarea tensiunii de alimentare dar și regimul de frânare cu recuperare a mașinii (în cadranul II), sarcina fiind asigurată de către un motor sincron cu magnet permanent a cărui cuplul dezvoltat la arbore va lua atât valori pozitive cât și valori negative.

3.4.2. Montajul experimental

Montajul experimental specific prezentei lucrări de laborator este prezentat în figura 3.6.

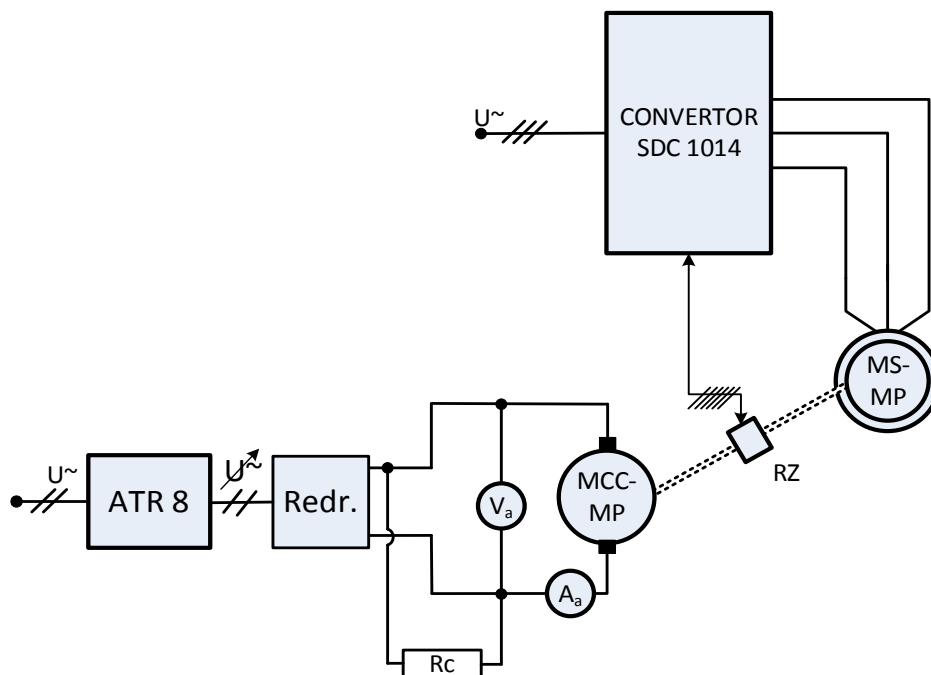


Fig. 3.6. Montajul experimental.

3.4.3. Legendă montaj experimental

CONVERTOR SDC 1014 – convertor static de frecvență trifazat de 4 cadrane;
RZ – Rezolver;
 A_a – Ampermetru;
 V_a – Voltmetru 0-100;
Rc – consumator;
ATR 8 - Autotransformator.

Datele mașinilor electrice:

MS-MP – Mașina sincronă cu magnet permanent

$$P_N = 540 [W]$$

$$U_{sN} = 220 [V] \sim$$

$$I_{sN} = 1,6 [A] \sim$$

$$n_N = 3000 [rpm]$$

$$R_s = 10 [\Omega]$$

$$M_N = 1,7 [N \cdot m]$$

$$z_p = 1$$

MCC-MP – Mașina de curent continuu cu magnet permanent

$$P_N = 1000 [W]$$

$$U_N = 82 [V]$$

$$I_N = 15 [A]$$

$$n_N = 3000 [rpm]$$

$$M_N = 3,2 [N \cdot m]$$

$$R_a = 0,8 [\Omega]$$

3.4.4. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 3.6.
2. Se alimentează convertorul *SDC 1014* de la panoul de alimentare aferent standului experimental. De la panoul de control al convertorului *SDC 1014* se setează în ordine următorii parametri: $b_6 = 1$, $b_8 = 1$, $b_{11} = 0$, $Pr_{42} = 10$, $Pr_8 = 0$ și $b_2 = 1$ (funcțiile parametrilor sunt prezentate mai jos).
 - Pr08 - Valoarea curentului prescrist (procent din valoarea parametrului Pr42);
 - Pr42 - Valoarea curentului de vârf (procent din curentul nominal al convertorului);
 - b02 - Activare pornire convertor;
 - b06 - Activare referință de turație;
 - b08 - Activarea referinței de curent;
 - b11 - Activarea curentului de vârf.
3. Se pornește ATR și se ridică încet tensiunea redresată până la $U_a = 30 [V]$, urmărind pornirea motorului și creșterea turației. Se citesc valorile la mersul în gol (turația n tensiunea U_a respectiv curentul I_a) la tensiunea de 30 V și se trec în tabel.
4. Se crește valoarea aferentă parametrului Pr 8 de la 0 spre valori mai mari precum este indicat în tabel, obținând valori mai mari ale curentului I_a . Se fac măsurătorile în sarcină și se completează tabelul.
5. Se reduce valoarea lui Pr 8 până la zero după care se vor seta valori negative ale acestuia urmărind creșterea turației și reducerea curentului I_a . Se completează tabelul cu rezultatele obținute.
6. Se aduce Pr 8 la zero, se fixează tensiunea $U_a = 20 [V]$ respectiv 10 [V] și se repetă punctele 3, 4 și 5.

Obs. Pentru Pr 0=0 sunt realizate măsurători la mers în gol iar pentru valori pozitive și negative ale lui Pr 0 sunt efectuate măsurătorile în sarcina respectiv în regim de generator.
7. Se ridică pe același grafic caracteristicile mașinii $\Omega = f(M)$, aferente cazurilor 1, 2 și 3 la funcționarea mașinii în cadranele I și II.
8. Relații de calcul ale mărimilor din tabel:

$$C_N = K \cdot \Psi_{MP} = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot R_a}{\Omega_N} [V \cdot s], \quad \Omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \left[\frac{rad}{s} \right],$$

$$E = C_N \cdot \Omega [V], \quad M = C_N \cdot I_a [N \cdot m].$$

Tabel 3.4. Rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate.

Caz:	Nr. crt.	U_a [V]	I_a [A]	Pr B [%]	n [rpm]	Ω [rad/s]	E Calculat [V]	M [N · m]
1	1	30		0				
	2			1				
	3			2				
	4			3				
	5			4				
	6			-2				
	7			-5				
	8			-7				
	9			-10				
2	10	20		0				
	11			1				
	12			2				
	13			3				
	14			4				
	15			-2				
	16			-5				
	17			-7				
	18			-10				
3	19	10		0				
	20			1				
	21			2				
	22			3				
	23			4				
	24			-2				
	25			-5				
	26			-7				
	27			-10				

3.4.5. Concluzii

În această lucrare de laborator s-a analizat funcționarea mașinii de curent continuu alimentată în indus de către un redresor de un cadran. Funcționarea în cadranul II este facilitată prin punerea unui consumator în paralel cu mașina de curent continuu, acesta având rolul de a consuma energia produsă de mașina de curent continuu în momentul funcționării în cadranul II, în regim de generator.

3.5. Lucrarea 5 - Acționări cu mașina de curent continuu alimentată de la VTC de patru cadrane

3.5.1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator își propune să arate modul în care se poate controla (regla) viteza (turația) unui sistem de acționare cu mașina de curent continuu (MCC) alimentată de la un convertor electronic de putere de tip variator de tensiune continuă (VTC sau denumit și “Chopper”), capabil să asigure funcționarea mașinii în toate cele patru cadrane, adică să asigure curent pozitiv și negativ respectiv tensiune pozitivă și negativă (specifică aplicațiilor din domeniul tracțiunii electrice).

3.5.2. Montajul experimental

Montajul experimental aferent lucrării de laborator este prezentat în figura 3.7.

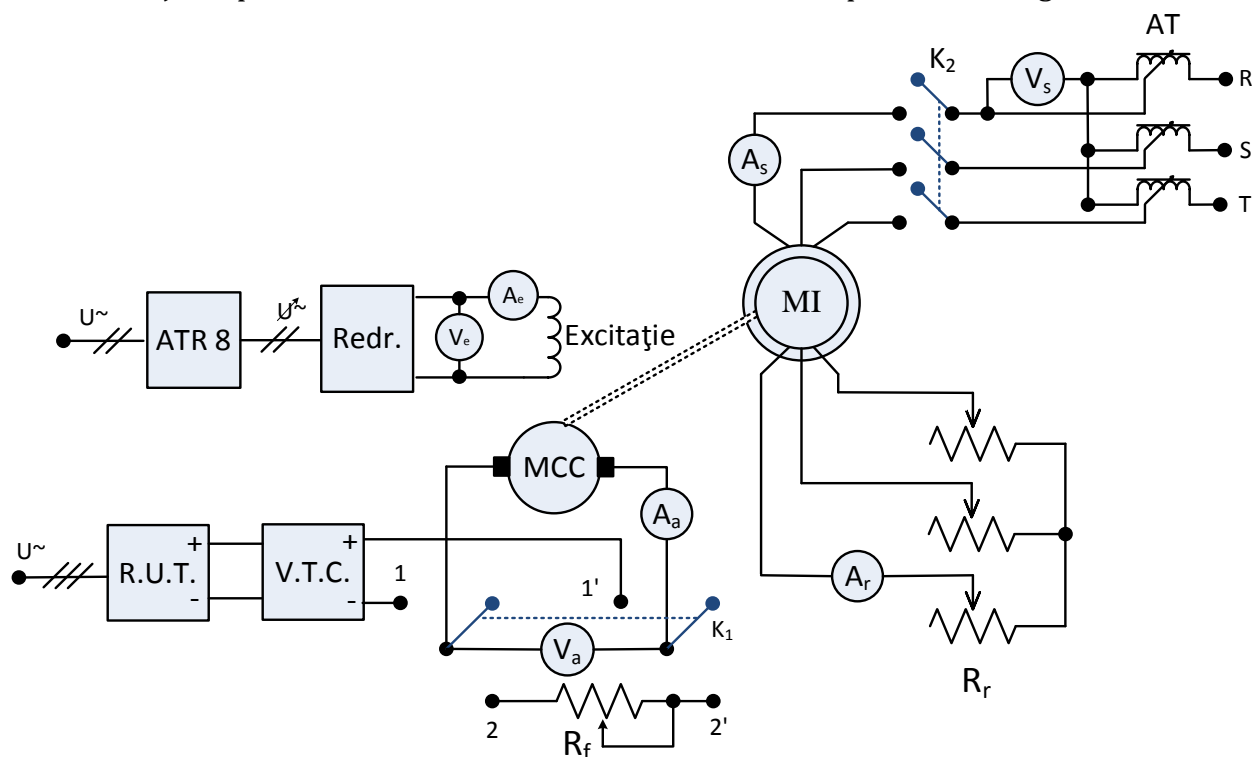


Fig. 3.7. Montajul experimental.

3.5.3. Legendă montaj experimental

- Redr – Redresor;
- ATR 8 – Autotransformator;
- R.U.T. – Sursă de curent continuu reglabilă (Redresor Universal cu Tiristoare);
- VTC – Variator de tensiune continuă de 4 cadrane;
- AT – Autotransformator trifazat;
- A_a, A_s, A_r, A_e – Ampermetre;
- V_a, V_e – Voltmetru;

V_s – Voltmetru;
 R_f – Reostat, 30 [Ω];
 R_r – Reostat 29 [Ω];
 K_1 – Comutator basculant;
 K_2 – Comutator tripolar;
MCC – Mașină de curent continuu;
MI – Mașină de inducție.

Datele mașinilor electrice:

MCC – Mașina de curent continuu

$P_N = 2,2$ [kW];

$U_{aN} = 110$ [V];

$I_{aN} = 24,5$ [A];

$U_{eN} = 110$ [V];

$I_{eN} = 0,9$ [A];

$n_N = 1910$ [rpm];

$R_a = 0,3$ [Ω].

MI – Mașina asincronă cu rotor bobinat

$P_N = 1,5$ [kW];

$U_N = 220/380$ [V]~;

$I_N = 8/4,6$ [A]~;

$n_N = 900$ [rpm].

Obs. În cadrul acestei lucrări mașina asincronă are rolul de a produce cuplul rezistent (M_r) care reprezintă sarcina mecanică pentru MCC.

3.5.4. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 3.7.
2. Se alimentează circuitul statoric al mașinii de curent continuu la valoarea nominală a curentului de excitație, $I_{eN} = 0.9$ [A].
3. Se alimentează de la rețeaua electrică convertorul VTC și se pornește sursa auxiliară a acestuia.
4. Cu K_1 pe poziția 1-1' se pune întrerupătorul VTC pe poziția ON, se pornește redresorul R.U.T. și se ridică **încet** tensiunea până la $U_d = 120$ [V]. Din potențiometrul VTC se reglează **încet** tensiunea de alimentare (U_a) la 80 [V], urmărind pornirea motorului și creșterea turației. Se citesc valorile turației și a curentului I_a la mersul în gol și se trec în tabel.
5. Se fixează rezistențele R_r la 4 ohmi, iar R_f la 15 ohmi. Se alimentează AT, se închide K_2 , și se crește încet tensiunea U_s (citită pe voltmetrul V_s), de la 0 spre valori mai mari, obținând pe ampermetrul A_a trei valori ale curentului din circuitul rotoric al MCC: 4 A, 6 [A] respectiv 8 [A], **nedepășind 10 [A] pe parcursul lucrării**. Se fac măsurătorile în sarcină de 4, 6, și 8 [A] și se trece în tabel turația (n).
6. Se repetă punctele 4 și 5 pentru tensiunea de alimentare a indusului: $U_a = 110$ [V].
7. Cu $U_a = 110$ [V], se reduce curentul de excitație la 0.7 [A] ($I_e = 0.7$ [A]) și se repetă punctele 4 și 5.

Atenție! Punctul 8 se realizează în prezența cadrului didactic.

8. Cu $U_a = 110 [V]$ și $I_e = 0.9 [A]$, având K_2 ridicat, se trece K_1 în poziția 2 (se conectează rezistența de frânare). Se măsoară curentul de vârf (care va fi negativ) și timpul de frânare, pentru două valori ale rezistenței de frânare R_f și anume, 15 respectiv 10 $[\Omega]$.
9. Se reduce U_a la 0 [V], se inversează două faze ale MI. Cu excitația $I_e = 0.9 [A]$ se modifică încet tensiunea la $U_a = -110 [V]$, urmărind pornirea în sens invers a motorului. Se citesc valorile la mersul în gol și se trec în tabel. Se fac măsurătorile în sarcină de 4, 6, și 8 [A] și se trec în tabel. Se repetă măsurătorile pentru $I_e = 0.7 [A]$.
10. Se ridică caracteristicile mecanice $\Omega = f(M)$ pe același grafic, pentru următoarele cazuri:
- La variația tensiunii ($U_a = 80, 110 [V]$) și $I_e = 0.9 [A] = const.$, pentru cadranul I, respectiv $U_a = -110 [V]$ pentru cadranul III.
 - La variația fluxului de excitație, obținut prin variația curentului de excitație $I_e = 0.9, \text{ și } 0.7 [A]$ pentru cadranul I, tensiunea în indus fiind $U_a = 110 [V]$.
 - Caracteristicile de frânare pentru cele două valori ale rezistenței de frânare R_f .
11. Relații de calcul aferente mărimilor din tabel:

$$C_N = K \cdot \Psi_{eN} = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot R_a}{\Omega_N} [V \cdot s] \quad \Omega = \frac{\pi n}{30} \left[\frac{rad}{s} \right],$$

$$E = C_N \cdot \Omega [V] - \text{pentru } I_e = 0.9 [A] \quad E = C \cdot \Omega [V] - \text{pentru } I_e \neq 0.9 [A]$$

$$M = C_N \cdot I_a [N \cdot m] - \text{pentru } I_e = 0.9 [A] \quad M = C \cdot I_a [N \cdot m] - \text{pentru } I_e \neq 0.9 [A]$$

$$\tau = \frac{T_c}{T} = \left(1 - \frac{U_a}{U_d} \right)$$

Având în vedere faptul că nu se cunoaște curba de magnetizare a motorului, se consideră o dependență liniară între curentul de excitație I_e și fluxul de excitație Ψ_e . Astfel:

$$C = C_N \cdot \frac{I_e}{I_{eN}}$$

Tabel 3.5. Rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate.

Nr. crt.	U_a [V]	I_a [A]	I_e [A]	n [rpm]	τ	t_f [s]	R_f [Ω]	I_f [A]	Ω [rad/s]	C_N sau C [V·s]	E [V]	M [N·m]
1	80											
2	80											
3	80											
4	80											
5	110											
6	110											
7	110											
8	110											
9	110											
10	110											
11	110											
12	110											
13	110						15					
14	110						10					
15	-110											
16	-110											
17	-110											
18	-110											
19	-110											
20	-110											
21	-110											
22	-110											

3.5.5. Concluzii

În lucrarea de față s-a analizat funcționarea mașinii de curent continuu, aferentă situației în care aceasta este alimentată de la un VTC de patru cadrane. Funcționarea în cele patru cadrane este realizată prin comanda variatorului de tensiune continuă, modificând parametri tensiunii de alimentare a indusului (atât valoarea cât și polaritatea acesteia) prin modificarea factorului de umplere.

3.6. Lucrarea 6 - Controlul mașinii de curent continuu alimentată de la un redresor de patru cadrane

3.6.1. Scopul lucrării:

Lucrarea de laborator își propune să arate modul în care se poate controla (regla) viteza (turația) unui sistem de acționare cu mașina de curent continuu alimentată de la un redresor comandat, de patru cadrane. Reglarea turației mașinii de curent continuu se face printr-o strategie de control cu două bucle. Pe una din bucle se reglează viteza prin intermediul curentului din indus (componenta de curent din formula cuplului) iar pe a doua buclă se asigură magnetizarea mașinii (componenta de flux din formula cuplului) prin controlul curentului de excitație, acoperind astfel atât domeniul de viteze inferioare celei obținute pe caracteristica naturală (prin scăderea tensiunii din indus) cât și domeniul de viteze mari (prin slăbirea de flux).

3.6.2. Montajul experimental

Montajul experimental corespunzător prezentei lucrării de laborator este expus în figura 3.8.

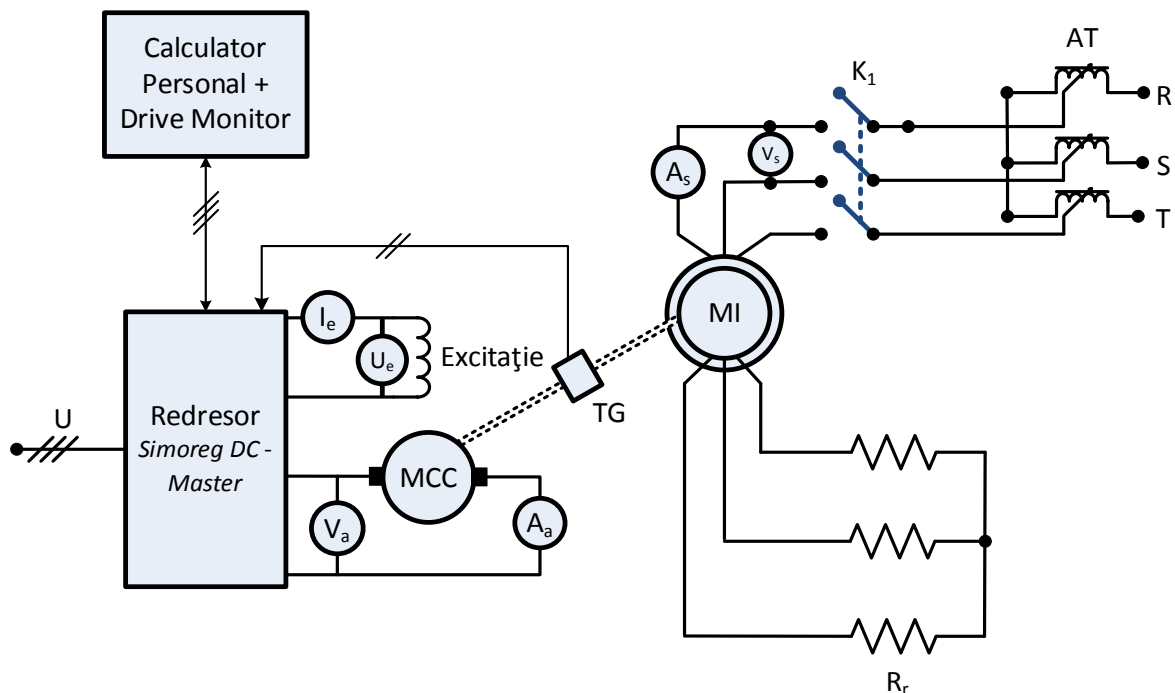


Fig. 3.8. Montajul experimental.

3.6.3. Legendă montaj experimental

AT – Autotransformator trifazat;
 A_a, A_s – Ampermetre;
 V_a – Voltmetru;
 V_s – Voltmetru;
 R_r – Reostat 3x29 [Ω];
 K_1 – Comutator tripolar;
MCC – Mașina de curent continuu;
TG- Tahogenerator;
Redresor Siemens – Redresor de patru cadrane.

Obs. MI – Mașina de inducție are rolul de a produce cuplul rezistent (M_r).

Datele redresorului:

Indus:

$$U_{inN} = 400 [V] \text{ } 3\sim;$$

$$U_{outN} = \pm 420 [V] \text{ c. c.};$$

$$I_{inN} = 25 [A]\sim;$$

$$f_{inN} = 50 [Hz];$$

$$I_{outN} = 30 [A].$$

Excitație:

$$U_{outN} = 325 [V] \text{ c. c.};$$

$$I_{inN} = 5 [A]\sim;$$

$$f_{inN} = 50 [Hz];$$

$$I_{outN} = 5 [A].$$

Datele mașinilor electrice:

MCC – Mașina de curent continuu

$$P_N = 4,6 [kW];$$

$$U_{aN} = 230 [V];$$

$$I_{aN} = 20 [A];$$

$$U_{eN} = 230 [V];$$

$$I_{eN} = 0,56 [A];$$

$$n_N = 1000 [rpm];$$

$$R_a = 1,3 [\Omega].$$

MI – Mașina asincronă cu inele

$$P_N = 7 [kW];$$

$$U_{sN} = 380 [V] \text{ } 3\sim;$$

$$I_{sN} = 16,6 [A]\sim;$$

$$n_N = 970 [rpm];$$

$$\cos\varphi = 0,76.$$

3.6.4. Considerații teoretice

Comanda celor două convertoare (redresoare) utilizate în vederea alimentării mașinii de curent continuu trebuie integrată într-o structură unitară de control. În figura 3.9. este prezentată structura simplificată de control a redresorului Simoreg DC Master [13].

Schema de reglare a convertorului Siemens DC Master se bazează pe utilizarea în cascadă a reglatoarelor P sau PI pe bucla de control a vitezei. În circuitul indusului structura este formată dintr-o buclă interioară de reglare a curentului respectiv o buclă exterioară de reglare a vitezei. În bucla de curent blocul “Precontrol indus” este folosit

pentru a îmbunătăți performanțele sistemului în timpul fenomenului de conducție întreruptă ce apare la curenți mici în circuitul indusului. Blocul “Generator de impulsuri de comandă convertor indus” este utilizat pentru a calcula unghiurile de comandă α_p și α_N pe baza tensiunii de referință primită de la regulatorul de curent. De asemenea, în acest bloc se selectează sensul curentului din indus și se activează în consecință redresorul pozitiv sau cel negativ.

Protecția la supracurenți se realizează cu ajutorul blocului de limitare a curentului din indus. Tipul regulatorului este selectat cu ajutorul unor parametri dedicați convertorului industrial utilizat. Tot pe baza unor parametri se activează și se ajustează unele filtre adiționale ce pot fi necesare în cazul unor aplicații specifice.

Curentul din indus este măsurat cu ajutorul unui traductor de curent intern în timp ce viteza este determinată de un traductor de viteză care poate fi: encoder incremental, resolver sau tahogenerator analogic. La începutul buclei de reglare se găsesc blocurile de setare și limitare a pantei de variație a referinței de viteză, respectiv de setare și limitare a valorii maxime a vitezei motorului. Doi parametri foarte importanți sunt cei care impun timpul de accelerare respectiv decelerare a motorului.

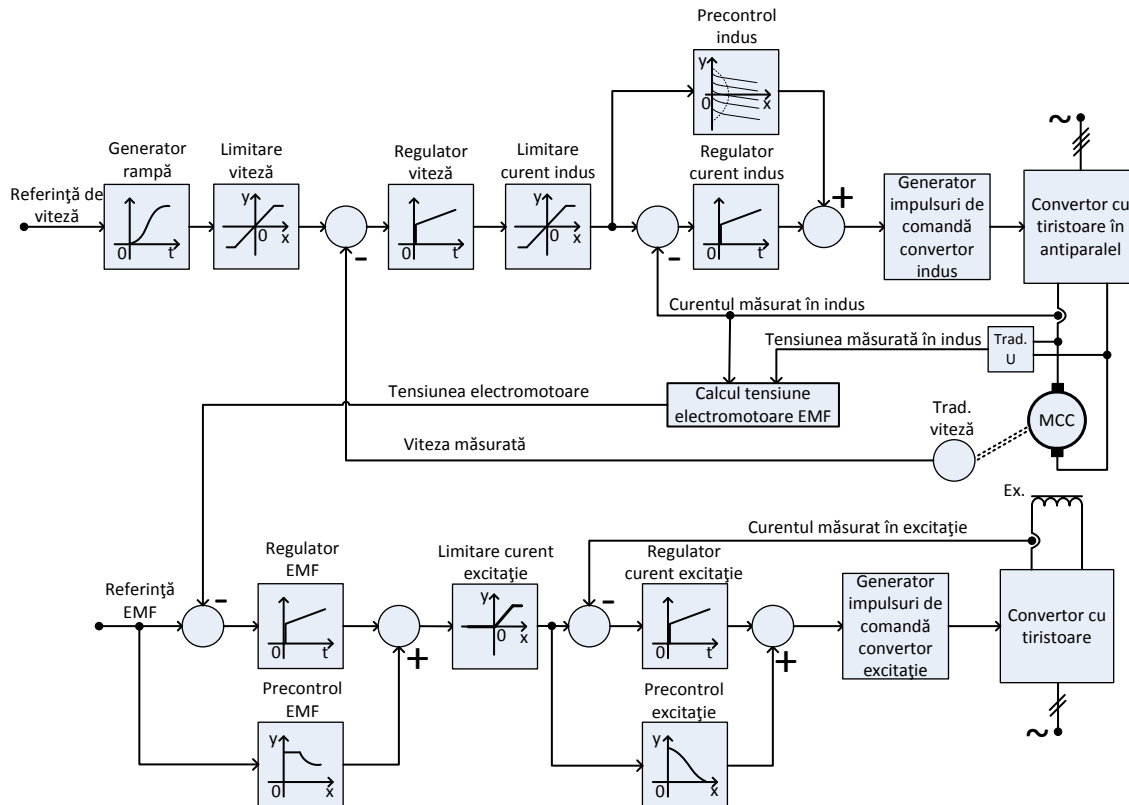



Fig. 3.9. Schema bloc tehnologică de control a convertorului Simoreg DC Master [13].

Structura de control a excitației este formată dintr-o buclă internă de control a curentului de excitație și o buclă exterioară pentru controlul tensiunii electromotoare. Ambele bucle sunt prevăzute cu blocuri de pre control a curentului respectiv a tensiunii electromotoare pentru optimizarea performanțelor sistemului de acționare.

Blocul de limitare a curentului de excitație protejează la supracurenți înfășurarea de excitație, respectiv impune un curent pozitiv în această înfășurare. Valoarea reală a tensiunii electromotoare este calculată pe baza curentului și a tensiunii măsurate în indus.

Blocul de generare impulsuri de comandă realizează calculul unghiului de comandă pentru redresorul monofazat cu tiristoare.

3.6.5. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 3.8. Se verifică existența comunicației Redresor-calculator prin interfața serială RS232.
2. Cu K_1 este deschis, se alimentează Redresorul Siemens de la panoul de comandă și autotransformatorul AT de la pupitrul de alimentare.
3. Se pornește calculatorul și se inițializează programul **DriveMonitor** „L6” din directorul „L6” de pe **Desktop**. Se alege **File** → **Set Up an USS Online Connection** → **START**. În pagina următoare se apasă butonul **Direct to Parameter List**. În acest mod se alege opțiunea de afișare a întregului set de parametri. Se identifică parametri ce reprezintă turația de referință, turația instantanee a motorului respectiv tensiunea din indus. **Atenție!!! Valorile pentru turație, atât cea de referință cât și cea instantanee sunt procente din turația maximă admisă $n_{max} = 1300$ [rpm]. Pentru referința de turație de 80% se obține viteza nominală. Pentru referințe de viteză mai mari decât 80% se obțin viteze superioare celei nominale, prin slăbire de flux (utilizând metoda slăbiri de câmp). Viteza maximă admisă (n_{max}) se obține pentru referința de turație de 100% .**
4. Se fixează referința de turație la 20 % și se pornește redresorul de la butonul de START (butonul verde în DriveMonitor ()). Se completează tabelul cu valorile citite (U_a , I_a , n^{ref} , n^{mas} , U_e , I_e) la mers în gol (K_1 pe poziția deschis).
5. Se închide K_1 și se fixează din AT diferite valori pentru curentul I_a și anume, 5 [A], 8 [A] și 10 [A], astfel se vor realiza măsurători la diferite cupluri de sarcină. Se completează tabelul cu valorile citite.
6. Se repetă punctele 4 și 5 pentru următoarele valori ale referinței de turație: 40 %; 60 %; 80 %; 100 %.
7. Se deschide K_1 și se înscrie o turație de referință de 60 %. După stabilizarea vitezei se oprește redresorul de la butonul de stop (Butonul roșu în DriveMonitor) și se citește curentul maxim de frânare.
8. Se oprește redresorul de la butonul de stop (Butonul roșu în DriveMonitor).
9. Se ridică caracteristicile $\Omega = f(M)$ pentru fiecare referință de viteză conform tabelului, inclusiv în cadranul II punctul de frânare măsurat la punctul 8.

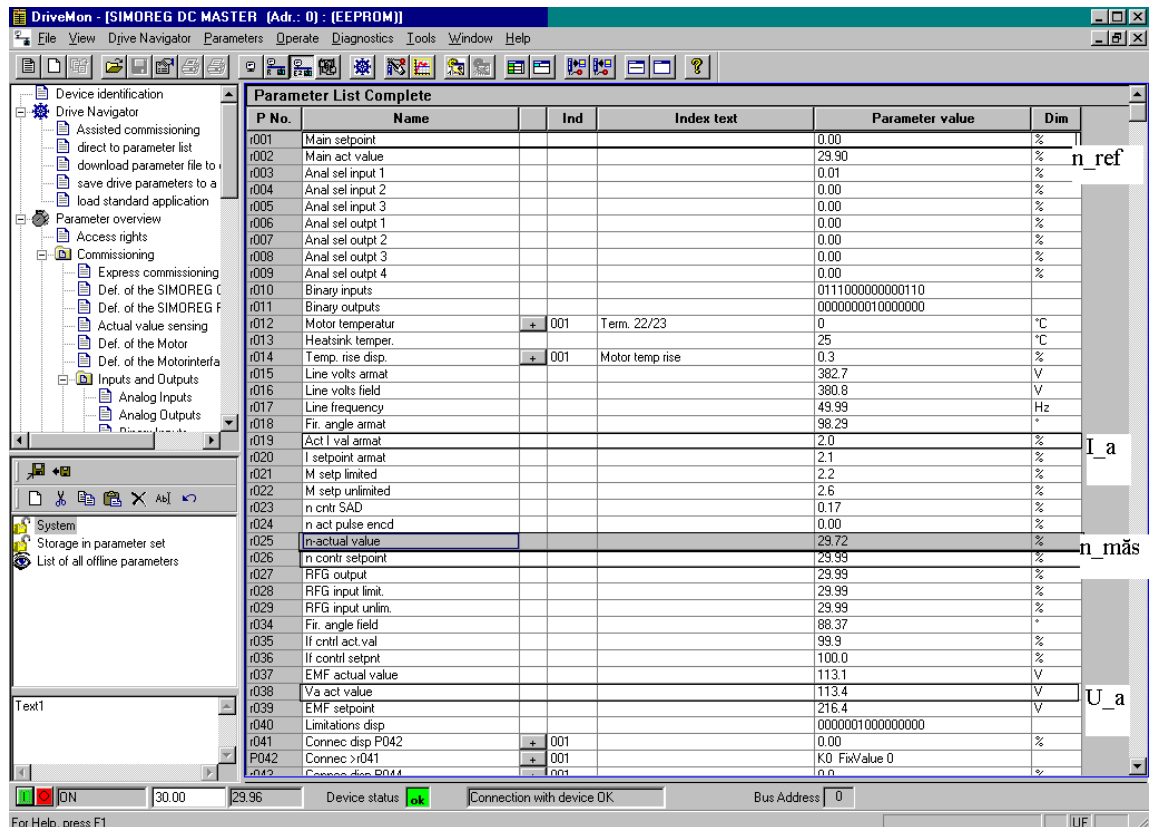


Fig. 3.8. Panoul de lucru DriveMonitor.

10. Calculul mărimilor din tabel:

$$C_N = K \cdot \Psi_{eN} = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot R_a}{\Omega_N} [V \cdot s]; \quad \Omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \left[\frac{rad}{s} \right];$$

$$M = C_N \cdot I_a [N \cdot m] - \text{pentru } n^{ref} \text{ între } 20 \div 80 \%;$$

$$M = C \cdot I_a [N \cdot m] - \text{pentru } n^{ref} > 80 \%; \quad P_{util} = M \cdot \Omega - M_0 \cdot \Omega;$$

$$M_0 = C_N \cdot I_{a0} - \text{pentru } n^{ref} \text{ între } 20 \div 80 \%; \quad M_0 = C \cdot I_{a0} [N \cdot m] - \text{pentru } n^{ref} > 80 \%;$$

I_{a0} - curentul la mers în gol al MCC (K1 deschis, punctul 4 de la mersul lucrării).

$$P_{abs} = U_a \cdot I_a + U_e \cdot I_e [W]; - \text{puterea electrica absorbita de MCC.}$$

$$\eta = \frac{P_{util}}{P_{abs}}$$

Având în vedere faptul că nu se cunoaște curba de magnetizare a motorului, se consideră o dependență liniară între curentul de excitație I_e și fluxul de excitație Ψ_e . Astfel:

$$C = C_N \cdot \frac{I_e}{I_{eN}}$$

Tabel 3.6. Rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate.

Nr. crt.	n^{ref} [%]	$n^{m\grave{a}s}$ [%]	U_a [V]	I_a [A]	U_e [V]	I_e [A]	C_N sau C	$\Omega^{m\grave{a}s}$ [rad/s]	M [N · m]	P_{abs} [W]	P_{util} [W]	η [%]
1	20											
2	20											
3	20											
4	20											
5	40											
6	40											
7	40											
8	40											
9	60											
10	60											
11	60											
12	60											
13	80											
14	80											
15	80											
16	80											
17	100											
18	100											
19	100											
20	100											
21	60											

3.6.6. Concluzii

În cadrul prezentei lucrări de laborator se realizează controlul în buclă închisă a mașinii de curent continuu asigurând funcționarea la viteză constantă impusă, în prezența unor perturbații externe, reprezentate de variația cuplului rezistent la arborele mașinii. Structura de reglare automată a mașinii va determina tensiunea de alimentare a indusului respectiv fluxul de excitație corespunzătoare funcționării la viteza impusă indiferent de condițiile de sarcină.

4. Acționări cu mașini de curent alternativ – aspecte teoretice

4.1. Considerații teoretice - generalități

Funcționarea mașinilor electrice de curent alternativ (MCA) se bazează pe fenomenul câmpului (fluxului) învârtitor produs de curenții din înfășurările (trifazate) statorice. Din punct de vedere al modului în care rotorul mașinilor interacționează cu acest câmp învârtitor, mașinile de curent alternativ se împart în mașini de inducție (sau asincrone) respectiv mașini sincrone. Din punct de vedere constructiv, mașinile de inducție pot fi cu rotorul în scurtcircuit (rotor în colivie de „veveriță”) sau cu rotorul bobinat (dublu alimentate sau cu inele), iar mașinile sincrone pot fi cu înfășurare de excitație sau cu magnet permanent.

Mașinile asincrone sunt utilizate în majoritatea aplicațiilor industriale. Acest fapt este datorat unor avantaje precum: construcție relativ simplă, întreținere și exploatare ușoară, robustețe dar și fiabilitate în funcționare. Pornirea lor prin alimentare directă de la rețea prezintă dificultăți privind mărimea cuplului și a șocului de curent absorbit. Controlul cuplului electromagnetic, a vitezei și a fluxului mașinii de inducție este dificil din cauza modelului matematic complex (neliniar) și a variației parametrilor datorită dependenței de temperatură a rezistențelor și a neliniarității curbei de magnetizare.

Din punct de vedere al construcției rotorului mașinile asincrone se împart în două categorii principale:

I - Mașini asincrone cu rotor în scurtcircuit sau cu rotor în colivie: la aceste mașini rotorul cilindric este prevăzut cu bare, care sunt scurtcircuitate la cele două capete prin intermediul a două inele. Această construcție se mai numește și colivie de „veveriță”.

II - Mașini asincrone cu rotor bobinat: rotorul este prevăzut cu înfășurări trifazate și cu inele.

La ambele tipuri de mașini construcția statorului este identică, în creștăturile statorice fiind amplasate înfășurările trifazate, care se alimentează cu tensiune alternativă sinusoidală.

Funcționarea mașinii asincrone trifazate se bazează pe existența unui câmp magnetic învârtitor în întrefierul mașinii, creat de curenții de pe cele trei faze ale statorului alimentate cu un sistem de tensiuni trifazate, echilibrate și simetrice, caz în care vârful vectorului de flux descrie o traiectorie circulară. Câmpul învârtitor induce în înfășurările rotorului tensiuni electromotoare care dau naștere unui sistem trifazat de curenți, care interacționând cu câmpul învârtitor produc un cuplu în sensul câmpului, care pune în mișcare rotorul.

Câmpul învârtitor se rotește cu turația de sincronism, iar ca în rotor să se inducă tensiuni este necesar conform legii inducției electromagnetice ca turația rotorului să fie diferită de cea a câmpului învârtitor (deci turație asincronă).

Diferența dintre viteza câmpului magnetic învârtitor și viteza rotorului, raportată la viteza câmpului învârtitor, poartă numele de alunecare. Dacă alunecarea are valori pozitive dar nu mai mari decât 1 (câmpul magnetic învârtitor trage după sine rotorul), atunci mașina asincronă va lucra în regim de motor. Dacă alunecarea are valori negative – Cadranul IV - (rotorul trage după sine câmpul magnetic învârtitor), sau valori pozitive mai mari decât 1 – Cadranul II - atunci mașina asincronă va intra în regim de generator.

Metodele de acționare a mașinii asincrone cu rotor în scurtcircuit se realizează prin reglarea amplitudinii și/sau a frecvenței tensiunii de alimentare având ca efect modificarea mărimii și a frecvenței de rotație a câmpului învârtitor.

Aționarea mașinii de inducție cu rotorul bobinat poate fi realizată și prin modificarea/reglarea curentului din rotor. Metodele cele mai cunoscute fiind:

- a) Variația rezistenței circuitului rotorice;
- b) Variația reactanței de scăpări a circuitului rotorice;
- c) Variația alunecării prin conectare în cascadă;
- d) Variația tensiunii rotorice la mașina dublu alimentată.

4.2. Metode de reglare a turației a acționărilor de curent alternativ

Se prezintă metodele de reglare a turației mașinii de curent alternativ care presupun modificarea următorilor parametri:

- Modificarea tensiunii de alimentare a statorului;
- Modificarea rezistenței înseriate în circuitul rotorice;
- Modificarea frecvenței tensiunii de alimentare a statorului

4.2.1. Reglajul turației prin variația tensiunii de alimentare a statorului

Reducerea tensiunii de alimentare a statorului influențează caracteristica mașinii prin scăderea cuplului motor, cuplul maxim sau cuplul la aceeași alunecare dată fiind proporțional cu pătratul tensiunii de alimentare [14], păstrându-se alunecarea critică s_k constantă, deci:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{M_{k1}}{M_{k2}} = \left(\frac{U_{s1}}{U_{s2}}\right)^2 \quad (21)$$

Dacă se face raportarea la caracteristica naturală, cuplul critic M_k pe o caracteristică artificială obținută la modificarea tensiunii de alimentare se calculează prin:

$$M_k = M_{kN} \cdot \left(\frac{U_s}{U_{sN}}\right)^2 \quad (22)$$

Alunecarea critică își păstrează valoarea de pe caracteristica naturală:

$$s_{k1} = s_{k2} = s_{kN}, \quad (23)$$

Caracteristicile mașinii asincrone obținute pentru diferite trepte ale tensiunii de alimentare a circuitului statoric arată precum cele prezentate în figura 4.1.

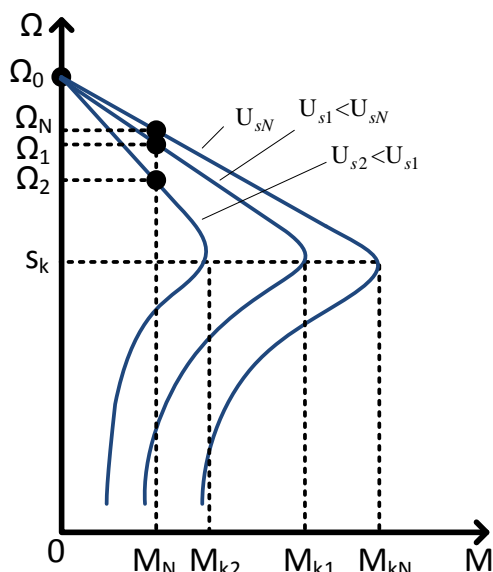


Fig. 4.1. Caracteristicile mașinii de inducție obținute la variația tensiunii de alimentare.

4.2.2. Reglajul turației prin introducerea rezistențelor în circuitul rotoric

Prin modificarea rezistenței circuitului rotoric caracteristica motorului este influențată prin modificarea alunecării pe caracteristică, în condițiile în care cuplul critic își păstrează valoarea de pe caracteristica naturală:

$$M_k = M_{kN} \quad (24)$$

Alunecarea critică depinde de rezistența rotorului:

$$s_{kN} = \pm \frac{C_1 \cdot r_r'}{\sqrt{r_s^2 + (x_{\sigma s} + C_1 \cdot x'_{\sigma r})^2}} \quad (25)$$

Pornind de la raportul alunecărilor critice, în cazul în care există o rezistență exterioară în circuitul rotoric se obține:

$$\frac{s_{kN}}{s_{k1}} = \frac{r_r}{r_r + R_r} \quad (26)$$

- de unde rezultă alunecarea critică pe caracteristica motorului cu rezistența suplimentară în circuitul rotoric:

$$s_{k1} = s_{kN} \frac{r_r + R_r}{r_r} \quad (27)$$

Unde:

- r_r - rezistența proprie a rotorului;
- R_r - rezistența introdusă în circuitul rotorului;
- $r_s, x_{\sigma s}$ - rezistența și reactanța de scăpări a statorului;
- $r_r', x'_{\sigma r}$ - rezistența și reactanța de scăpări a rotorului raportate la stator.

$$C_1 = 1 + \frac{x_{\sigma s}}{x_m} \cong 1 \quad (28)$$

Unde:

x_m - reactanța de magnetizare;

s_{kN} - alunecarea critică nominală, pentru situația în care nu sunt rezistențe suplimentare în circuitul rotoric;

s_{k1} - alunecarea critică pentru situația în care în circuitul rotoric este introdusă rezistența suplimentară R_r .

Formula simplificată a lui Kloss obținută prin neglijarea rezistenței statorice r_s în raport cu impedanțele (la frecvențe mici această neglijare nu mai este corectă și introduce erori) este dată de următoarea relație:

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (29)$$

Unde, M_k este cuplul critic (maxim), care nu depinde de rezistența circuitului rotoric. Se observă că raportul alunecărilor la care se obține același cuplu motor M pentru două caracteristici corespunzătoare a două rezistențe rotorice diferite, va fi egal cu raportul alunecărilor critice sau:

$$\frac{s}{s_1} = \frac{s_k}{s_{k1}} = \frac{r_r}{r_r + R_r} \quad (30)$$

Unde:

s - alunecarea corespunzătoare cuplului M pentru rezistența proprie a circuitului rotoric;

s_1 - alunecarea corespunzătoare aceluiași cuplu pentru rezistența $r_r + R_r$ a circuitului rotoric.

Caracteristicile mașinii obținute prin variația rezistenței rotorice arată precum în figura 4.2. Se păstrează cuplul critic și se modifică alunecarea critică în funcție de rezistențele introduse. Rezistențele $R_{r1}, R_{r2},$ etc. care se introduc în circuitul rotoric se dimensionează pentru regim de lungă durată.

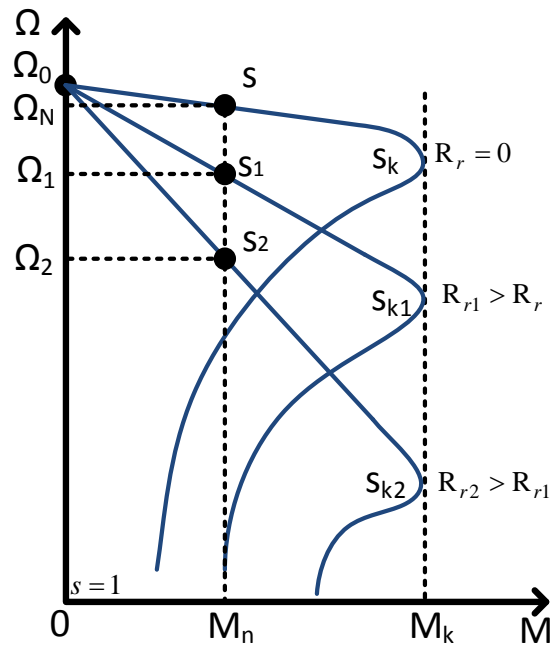


Fig. 4.2. Caracteristicile mașinii de inducție obținute la variația rezistenței rotorice.

Prin creșterea valorii rezistenței rotorice se obține un reglaj de viteză în sens descrescător (viteze mai mici decât pe caracteristica naturală). La rezistențele rotorice mari stabilitatea funcționării motorului scade. Acest reglaj este ineficient, pierderile de energie fiind ridicate, sistemul de acționare electrică având un randament scăzut.

4.2.3. Reglajul turației prin variația frecvenței tensiunii de alimentare a statorului mașinii asincrone

Conform formulei lui Kloss simplificată și a relației de dependență dintre frecvența de alimentare a statorului și turația de sincronism, variația cuplului critic și a alunecării critice în raport cu frecvența este dată de:

$$\frac{M_{k2}}{M_{k1}} = \left(\frac{U_{s2}}{U_{s1}}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_{s1}}{f_{s2}}\right)^2 \quad (31)$$

Cuplul critic se modifică invers proporțional cu pătratul frecvenței:

$$M_k = M_{kN} \cdot \left(\frac{U_2}{U_{sN}}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_{sN}}{f_s}\right)^2 \quad (32)$$

Conform relației (32), păstrând tensiunea constantă egală cu cea nominală, termenul $\left(\frac{U_2}{U_{sN}}\right)^2$ devine egal cu 1 astfel rezultă:

$$M_k = M_{kN} \cdot \left(\frac{f_{sN}}{f_s}\right)^2 \quad (33)$$

La variația frecvenței de alimentare fără a se ține seama de valoarea fluxului, cuplul critic variază invers proporțional cu pătratul frecvenței. Astfel, caracteristicile mașinii asincrone rezultate în situația modificării doar a frecvenței tensiunii de alimentare sunt prezentate în figura 4.3.

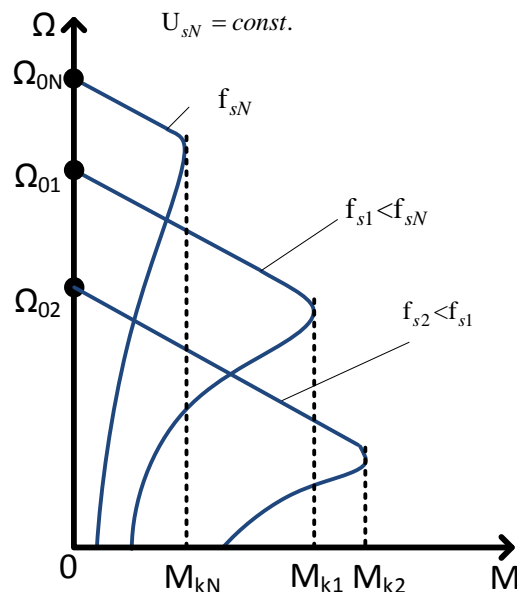


Fig. 4.3. Caracteristicile mașinii de inducție la variația frecvenței.

Rata de variație în timp a referinței de frecvență trebuie limitată. Astfel, creșterea frecvenței trebuie să fie suficient de lentă ca motorul să poată urmări frecvența, în caz contrar motorul „se rupe” de frecvență și „cade”, adică se oprește.

4.3. Convertoare electronice de putere utilizate în acționări de curent alternativ

Pentru a face posibilă modifica frecvenței și a amplitudinii tensiunii de alimentare a motoarelor de inducție, este necesară utilizarea de convertoare electronice de putere.

Convertoarele electronice de putere (CEP), numite și convertoare statice, sunt echipamente a căror parte de forță este alcătuită din circuite electronice care conțin componente semiconductoare de putere ca și comutatoare statice. Acestea transformă energia electrică de anumiți parametri în energie electrică de alți parametri.

Din punct de vedere al conversiei energiei electrice există patru categorii de convertoare:

- Convertoare cu intrare în curent continuu și ieșire în curent continuu (variatoare de tensiune continuă sau Choppere);
- Convertoare cu intrare în curent alternativ și ieșire în curent continuu (redresoare);
- Convertoare cu intrare în curent continuu și ieșire în curent alternativ (invertoare);
- Convertoare cu intrare în curent alternativ și ieșire în curent alternativ (convertoare statice de frecvență – CSF și variatoare de curent alternativ, convertoare matriceale sau cicloconvertoare).

Invertoarele sunt convertoare electronice de putere care realizează conversia energiei electrice de curent continuu (c.c.) în energie de curent alternativ (c.a.) cu parametri corespunzători aplicației.

Dispozitivele electronice de putere folosite ca și comutatoare statice în convertoare electronice de putere (CEP) pot fi tranzistoare bipolare (BT), tranzistoare cu efect de câmp (MOSFET), tranzistoare cu poartă izolată (IGBT), tiristoare cu electrod de stingere (GTO) sau tiristoare rapide prevăzute cu circuit de stingere.

4.3.1. Invertorul de tensiune

Dacă la ieșirea invertorului este controlată tensiunea și curentul se formează liber vorbim de inverter de tensiune (Voltage Source Inverter - VSI). În practică acest lucru este asigurat de prezența unui condensator de capacitate mare conectat între inverter și sursa de tensiune continuă (în circuitul intermediar de curent continuu). În figura 4.4 este prezentată o schemă practică a unui convertor static de frecvență care alimentează o sarcină inductivă (de exemplu. motor de c. a.) [15]. Se observă că inverterul are trei brațe corespunzătoare celor trei faze ale tensiunii de ieșire. Fiecare braț conține două comutatoare, unul conectat la bara pozitivă a circuitului intermediar de c.c., și celălalt conectat la bara negativă (deci $6=2 \times 3$ comutatoare, 2= intrări, 3= ieșiri). Se observă în schemă prezența diodelor de curent invers legate în paralel cu fiecare dispozitiv de comutație, care în anumite etape de funcționare a inverterului asigură cale de circulație spre sursă a curenților din fazele sarcinii. Dioda de multe ori nu apare ca și o componentă distinctă ci este integrată în dispozitivul de comutație. Când se schimbă sensul de circulație a energiei (în regim de frână/generator a mașinii asincrone), redresorul cu diode nu permite circulația curenților înspre sursă. În cazul acesta energia generată de mașina asincronă este disipată pe rezistența de frânare R_f . Cuplarea rezistenței este realizată prin intermediul tranzistorului T_f .

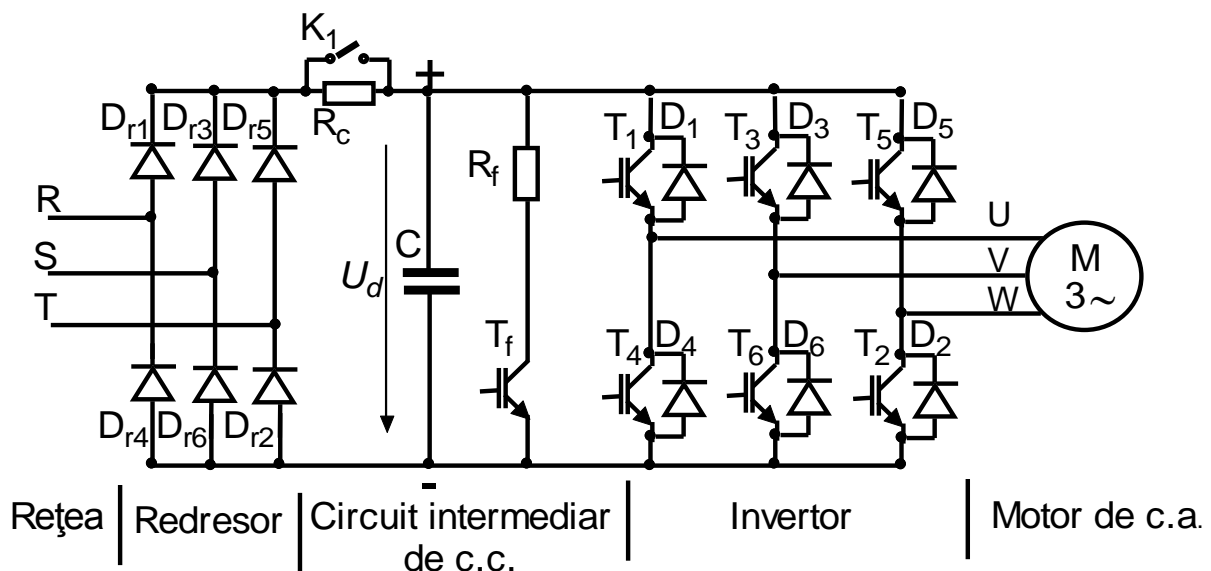


Fig. 4.4. Convertor static de frecvență cu circuit intermediar de c.c. (schema practică).

În figura 4.5. este ilustrată o schemă bloc care conține un inverter cu caracter sursă de tensiune utilizat în vederea alimentării a unei mașini asincrone trifazate (de inducție – MI). Acesta funcționează în regim de modulație în lățime a impulsurilor. Procedura de

modulație cu comandă în tensiune este cea bazată pe undă purtătoare, denumită și modulație sinusoidală [15].

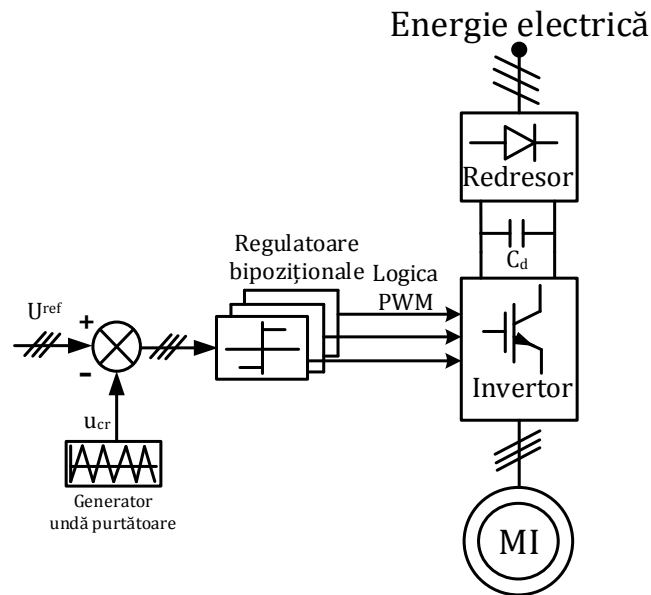


Figura 4.5. Schema bloc a ansamblului mașină asincronă – convertor static de frecvență, cu invertor de tensiune comandat în regim de modulație bazată pe undă purtătoare.

Conform figurii 4.6, tensiunile de referință care reprezintă semnalul de modulare (u^*), sunt comparate cu unda purtătoare (u_c) triunghiulară [16], iar reglatoarele simple bipoziționale (din figura 4.5) generează semnalele de modulație, care determină formele de undă ale tensiunii comutate pe fazele mașinii asincrone.

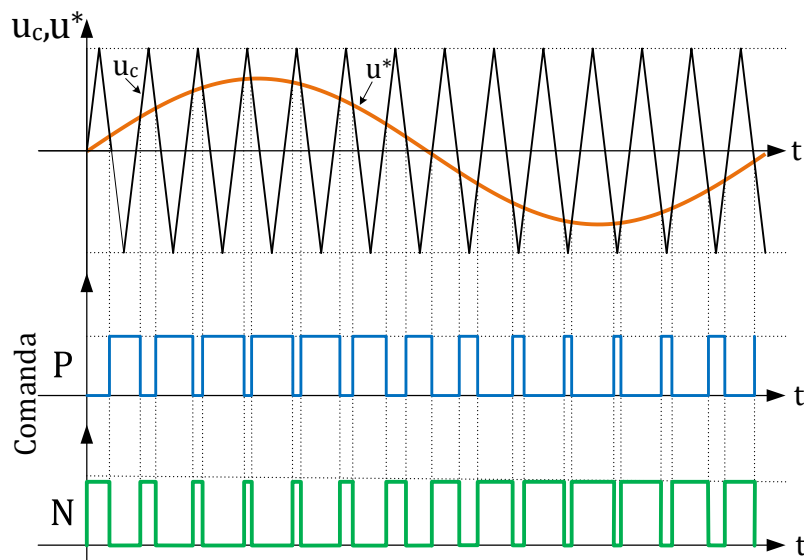


Fig. 4.6. Modulația sinusoidală - unda de referință (u^*), unda purtătoare (u_c) și semnalele de comandă.

Semnalele de comandă sunt generate pe baza următoarei logici de comandă:

$$\begin{aligned} m_{\log} &= 0 \quad \text{dacă } u_c > u^*; \\ m_{\log} &= 1 \quad \text{dacă } u_c < u^*. \end{aligned} \quad (34)$$

4.4. Controlul acționărilor de curent alternativ

Controlul mașinilor electrice de curent alternativ (MCA) este mai dificil de realizat decât a celor de curent continuu, din cauza faptului că cele două mărimi care intră în expresia cuplului dezvoltat de orice mașină electrică, și anume fluxul și curentul (oricare sunt alese) nu pot fi controlate independent în cazul MCA (așa cum sunt la mașina de curent continuu). În cazul MCA nu avem separat curent care magnetizează mașina (cum este curentul de excitație la MCC) respectiv curent care determină cuplul (cazul curentului din indusul MCC), ci avem la dispoziție doar curentul statoric, care contribuie la producerea atât a cuplului cât și a fluxului. Pentru controlul independent al fluxului și al cuplului mașinii de curent alternativ mărimile trebuie tratate vectorial, ceea ce face posibilă separarea efectelor curentului statoric (componenta reactivă care magnetizează mașina respectiv cea activă care determină cuplul). Separarea efectelor se poate face prin orientare după câmp, care stă la baza procedurilor de control vectorial. Dezvoltarea performanțelor și scăderea costurilor din ultimele decenii, atât a convertoarelor electronice de putere (CEP) cât și a sistemelor digitale de calcul, a făcut ca acționările electrice cu mașini de curent alternativ să devină competitive și să înlocuiască în mai multe domenii acționările electrice cu mașini de curent continuu.

De-a lungul timpului s-au dezvoltat metode din ce în ce mai performante (atât din punct de vedere a performanțelor dinamice cât și a eficienței energetice) de control pentru acționările electrice cu MCA. Din acest punct de vedere, metodele de control a acționărilor de curent alternativ se pot clasifica în trei mari categorii, și anume:

- controlul scalar al mașinilor electrice de curent alternativ;
- controlul vectorial al mașinilor electrice de curent alternativ;
- controlul direct de cuplu al mașinilor electrice de curent alternativ.

4.4.1. Control scalar prin metoda $U/f = \text{constant}$

Controlul prin metoda $U/f = \text{constant}$ reprezintă o metodă de control devenită clasică. Este o procedură de control scalar prin care se încearcă să se mențină constant în mod indirect, fluxul statoric rezultat. Este necesară prescrierea unei singure mărimi de referință, și anume frecvența tensiunii de alimentare [17]. Amplitudinea tensiunii va fi calculată cu ajutorul unei relații corespunzătoare regimului stabilizat al mașinii. Această metodă poate fi aplicată atât pentru controlul mașinilor de inducție, cât și pentru cele sincrone, deoarece construcția statorului acestor mașini este identică. Controlul prin metoda $U/f = \text{constant}$ are unele avantaje precum: cuplu mare la pornire, eliminarea șocului de curent la pornire, acționare la cuplu critic constant.

Figura 4.7 prezintă schema echivalentă în T a unei mașinii asincrone (de inducție).

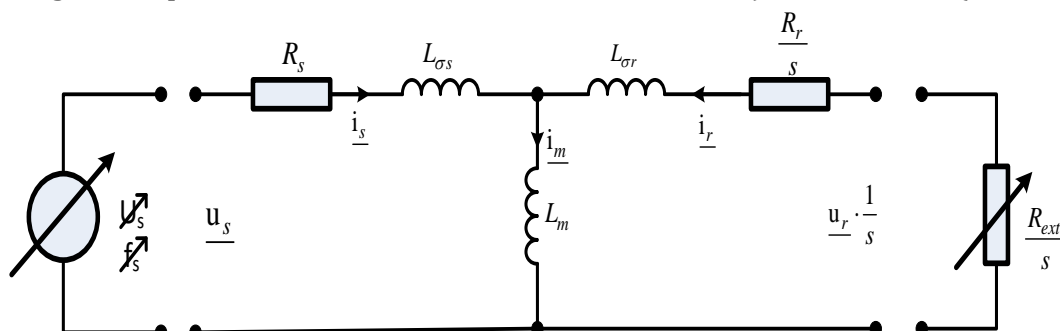


Fig. 4.7. Schema echivalentă în T a mașinii de inducție.

Alunecarea, viteza de sincronism respectiv frecvența curenților din rotor sunt date de relațiile:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (35)$$

$$\Omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_s}{z_p}; \quad n_s = \frac{60 \cdot f_s}{z_p} \quad (36)$$

$$f_r = s \cdot f_s, \quad (37)$$

unde :

f_s – frecvența statorică;

n_s – turația de sincronism;

n – turația mașinii de inducție;

Ω_s – viteza unghiulară de sincronism;

Ω – viteza unghiulară a mașinii de inducție;

s – alunecarea;

z_p – numărul de perechi de poli;

f_r – frecvența rotorică.

Ecuatia de tensiune statorică a mașinii de inducție, scrisă vectorial, este dată de următoarea relație:

$$\underline{u}_s = R_s \cdot \underline{i}_s + j \cdot \omega \cdot \underline{\Psi}_s + \frac{d\underline{\Psi}_s}{dt} \cdot \frac{\underline{\Psi}_s}{\underline{\Psi}_s} \quad (38)$$

În regim stabilizat:

$$\underline{\Psi}_s = ct. \xrightarrow{\text{rezultă}} \frac{d\underline{\Psi}_s}{dt} \cdot \frac{\underline{\Psi}_s}{\underline{\Psi}_s} = 0 \quad (39)$$

Considerând rezistența statorică neglijabilă la viteză nominală (în raport cu $\omega = 2 \cdot \pi f_s$), $R_s \approx 0$, obținem succesiv:

$$\underline{u}_s = j \cdot \omega \cdot \underline{\Psi}_s \quad (40)$$

Sau în mărimi scalare:

$$U_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot \Psi_s \quad (41)$$

De unde rezultă faptul că prin metoda $\frac{U}{f} = \frac{U_N}{f_N} = ct.$ se menține indirect fluxul statoric constant, egal cu fluxul nominal al mașinii.

$$\Psi_s = \frac{U_s}{2 \cdot \pi \cdot f_s} = ct. = \frac{U_{sN}}{2 \cdot \pi \cdot f_{sN}} \quad (42)$$

Relația de calcul a amplitudinii tensiunii de alimentare pentru reglarea scalară $\frac{U}{f} = \text{ct.}$ devine:

$$U_s = K_N \cdot f_s \quad (43)$$

Care reprezintă funcționa de comandă a procedurii $\frac{U}{f} = \text{ct.}$, unde:

$$K_N = \frac{U_{sN}}{f_{sN}} \quad (44)$$

Îmbunătățirea performanțelor metodei se poate face prin compensarea căderii de tensiune pe rezistența statorică. Astfel, relația de calcul a amplitudinii tensiunii de alimentare (funcția de comandă) devine:

$$U_s = U_{s0} + \frac{U_{sN}}{f_{sN}} \cdot f_s = U_{s0} + K_N \cdot f_s \quad (45)$$

Unde termenul $U_{s0} = R_s \cdot I_{sN}$ compensează căderea de tensiune pe rezistența statorică [18]. Această compensare este necesară din cauză că la determinarea funcției de comandă (relația (43)) se neglijează rezistența statorică (relația (40)). Compensarea căderilor de tensiune este necesară pentru magnetizarea mașinii la frecvențe mici (la pornire), respectiv pentru a compensa pierderile la pornire, care sunt cauzate de forțele statice de frecare.

În cazul în care se realizează compensarea variabilă dependentă de frecvență, relația de calcul a amplitudinii tensiunii de alimentare este:

$$U_s = U_{s0} + \frac{U_{sN} - U_{s0}}{f_{sN}} \cdot f_s \quad (46)$$

Reprezentarea grafică a acestei strategii de comandă este prezentată în figura 4.8, unde: 1 - Caracteristica de comandă liniară necompensată (relația (44)), 2 - Caracteristica de comandă de tip „cu compensare constantă” cu $U_{s0} = \text{ct.}$ (relația (45)), și 3 - caracteristica cu compensare variabilă dependentă de frecvență (relația (46)).

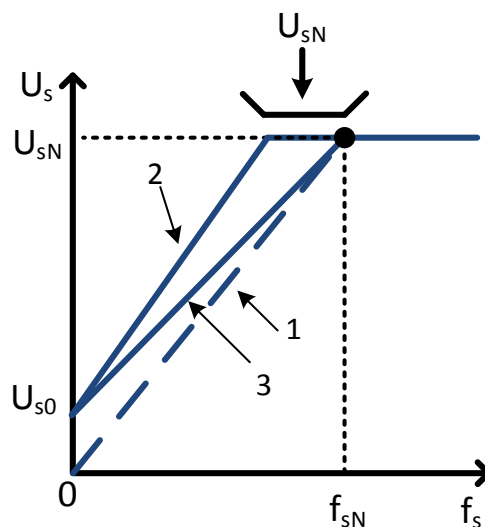


Fig. 4.8. Diagrama de comandă la $\frac{U}{f} = \text{ct.}$ în buclă deschisă a mașinii de inducție [17].

Caracteristicile mașinii de inducție la variația frecvenței conform principiului $\frac{U}{f} = \text{constant}$ sunt reprezentate în figura 4.9.

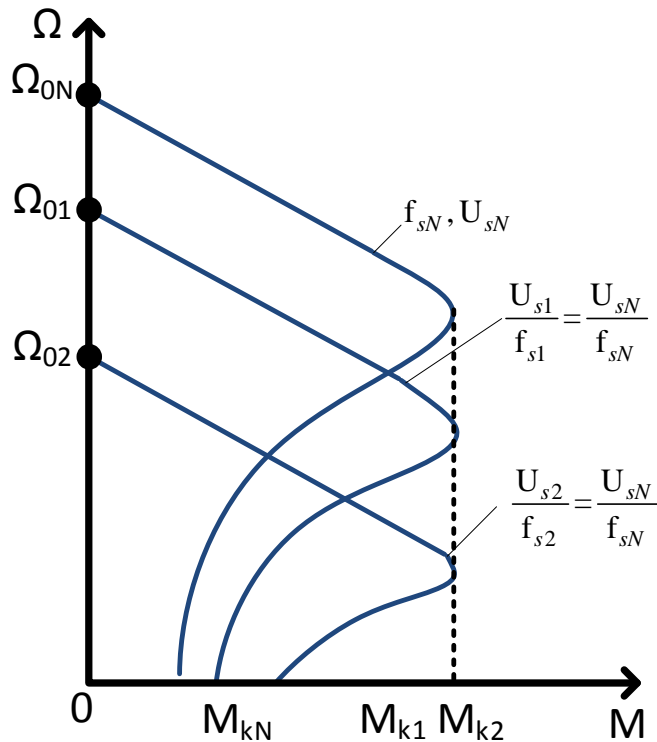


Fig. 4.9. Caracteristicile mașinii de inducție conform principiului $U/f = \text{constant}$.

În figura 4.10. este ilustrată structura de control scalar bazată pe principiul $\frac{U}{f} = \text{constant}$. Structura permite două moduri de funcționare:

1. *Comandă în frecvență în buclă deschisă*, caz în care mărimea de referință impusă este frecvența f_s . Pentru o frecvență de funcționare impusă, în cazul modificării sarcinii viteza de funcționare se va modifica.
2. *Controlul vitezei în buclă închisă* cu compensarea alunecării. În vederea menținerii vitezei impuse bucla de control va genera frecvența de referință f_s . Astfel, la o viteză de funcționare impusă, la modificarea sarcinii se va modifica frecvența f_s .

Indiferent de modul de obținere a frecvenței de referință, calculul amplitudinii tensiunii de alimentare este realizată pe baza principiului $U/f = \text{constant}$.

În cazul comenzii în buclă deschisă apare necesitatea compensării căderilor de tensiune la frecvențe mici în vederea menținerii vitezei de funcționare cerută de procesul tehnologic.

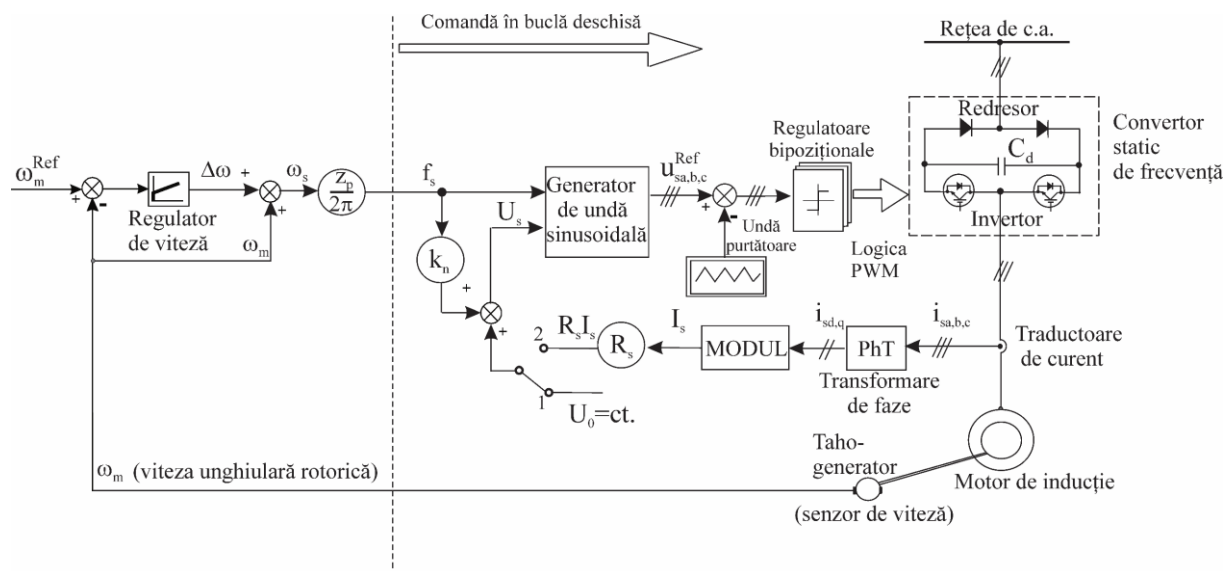


Fig. 4.10. Structura de control scalar la $\frac{U}{f} = \text{constant}$ a mașinii de inducție.

Dacă se ia în considerare determinarea în timp real a căderii de tensiune pe rezistența statorului pe baza măsurării curentului statoric, structura poate fi completată cu următoarea relație de calcul pentru calculul amplitudinii tensiunii de alimentare, unde U_{sN} și I_s reprezintă amplitudinile tensiunilor și a curenților.

$$U_s = \left(R_s \cdot I_s + \frac{U_{sN} - R_s \cdot I_s}{f_{sN}} \cdot f_s \right) \quad (47)$$

Metoda scalară de control a vitezei mașinii de inducție bazată pe principiul $\frac{U}{f} = \text{constant}$ este una relativ simplu de implementat și cu rezultate satisfăcătoare în multe aplicații practice, care nu necesită precizie foarte mare și impactul eficienței energetice mai scăzute nu este critic la puteri mici.

Convertorul care alimentează mașina de inducție este un convertor static de frecvență (format din redresor, circuit intermediar de curent continuu și invertor) de tip sursă de tensiune (VSI – Voltage Source Inverter, datorită circuitului intermediar cu condensatoare), controlat direct în tensiune prin intermediul reguletoarelor bipoziționale (trei la număr, câte unul pentru fiecare braț al punții trifazate a invertorului), comandate cu unda purtătoare de tensiune (de tip triunghiular), așa cum este evidențiat pe schema de control din figura 4.10.

4.4.2. Controlul vectorial al acțiunilor electrice

Sistemele de acționare la turație variabilă ale mașinilor de curent alternativ care se bazează pe controlul scalar nu pot atinge performanțele acțiunilor cu mașini de curent continuu. Dezvoltarea sistemelor de calcul a făcut posibilă implementarea unor tehnici de control vectorial performante ale mașinilor de curent alternativ bazate pe teoria orientării după câmp (Field Oriented Control – FOC).

Principiul controlului vectorial al mașinilor de curent alternativ este același pentru toate tipurile de mașini electrice de curent alternativ, fiind tratat în mod unitar. Controlul vectorial reprezintă cea mai complexă și performantă metodă de control a unui sistem de acționari electrice, obținându-se eficiență energetică mărită și performanțe dinamice

ridicate pentru mărimile de comandă impuse (viteză, poziție sau cuplu), adică un control cu o precizie superioară celorlalte tipuri de control. Dezavantajul metodei derivă din complexitatea acesteia, ceea ce se regăsește în prețul sistemelor de acționare. Domeniul de aplicații este cel al sistemelor de acționare de precizie, precum mașini unelte, roboți industriali, casnici sau medicali, tracțiuni electrice sau acționari de mare precizie.

Teoria controlului vectorial se bazează pe analogia cu mașina de curent continuu compensată cu excitație separată. La mașinile de curent continuu, fluxul de excitație necesar magnetizării mașinii este produs de curentul de excitație, iar curentul din rotor (indus) determină cuplul mașinii [2]. La mașina compensată fluxul de excitație și curentul din indus sunt perpendiculare, în consecință cuplul electromagnetic rezultat din produsul vectorial al celor două mărimi este maxim, ceea ce înseamnă eficiență energetică (cuplu maxim la curent absorbit) [19]. Decuplarea controlului fluxului și a cuplului duce la o dinamică excelentă în controlul mașinii de curent continuu.

Aplicând acest principiu, împreună cu principiul orientării după câmp (prin alegerea unui flux de orientare) la mașina de curent alternativ pot fi separate cele două componente (activă și reactivă) ale curentului, realizându-se separarea buclei de control active (componentele electro-mecanice) de bucla de control reactivă (cele electro-magnetice) [20]. Prin analogia cu mașina de curent continuu, componenta reactivă corespunde curentului de excitație iar cea activă curentului din indusul mașinii de c.c. În ceea ce privește controlul vectorial al mașinilor de curent alternativ, se poate realiza controlul independent al fluxului și al cuplului bazat pe analogia cu mașina de c.c., prin intermediul a două bucle de reglare, peste care se suprapun buclele de reglare intermediare ale celor două componente ale curentului.

Funcționarea mașinilor de curent alternativ se bazează pe producerea câmpului învârtitor în mașină. Descrierea câmpului învârtitor și principiile controlului vectorial pot fi exprimate matematic utilizând fazorii spațiali respectiv descompunerea acestora în sisteme de axe de coordonate d-q ortogonale, fie fixe (legate de o fază statorică), fie rotitoare (oarecare sau legate de poziția fluxului ales sau a rotorului). Ecuatiile generale ale mașinii de inducție bazate matematic pe teoria fazorilor spațiali sunt capabile să descrie comportarea mașinii în toate regimurile de funcționare, atât în regim stabilizat cât și în regim tranzitoriu. Este evident că performanțele de control ale sistemului de acționare depind de corectitudinea cu care modelul ales descrie obiectul real modelat.

Modelarea motorului asincron pornește de la ecuațiile generale ale acestuia. Ecuatiile generale ale mașinii de inducție sunt obținute în urma transformării mașinii de curent alternativ trifazate într-o mașină echivalentă bifazată într-un plan complex comun pentru stator și rotor.

Pentru aceasta trebuie efectuate următoarele transformări:

- Rotorul în colivie (sistem polifazat) se înlocuiește cu un rotor trifazat echivalent, deci se face reducerea la un număr de trei faze, identic cu statorul;
- Se raportează toți parametrii mașinii la același număr de spire, de obicei la numărul de spire statorice;
- Reducerea numărului de perechi de poli z_p la 1, adică trecerea de la unghiuri mecanice la unghiuri electrice;
- Prin aplicarea teoriei fazorilor spațiali, are loc o transformare de faze, prin care de fapt se trece de la sistemul trifazat la cel bifazat natural. Aplicând o transformare de sistem (a,b,c → d,q), rezultă componentele fazorului spațial reprezentate în planurile complexe naturale, care pentru mărimile statorice este fix, notat cu d-q, iar pentru mărimile

rotorice este legat de rotor, care face un unghi θ (dacă $z_p=1$) cu axa de referință, notat cu $d\theta=q\theta$. Viteza unghiulară a rotorului este $\omega = \frac{d\theta}{dt}$.

Se face transformarea de axe de coordonate în urma căreia se obține modelul bifazat general din cel natural prin raportarea tuturor fazorilor spațiali (a componentelor ortogonale) la același sistem de axe $d\lambda-q\lambda$ oarecare, care face un unghi λ cu axa fixă de referință d . Viteza unghiulară electrică a acestui sistem general de coordonate este $\omega_\lambda = \frac{d\lambda}{dt}$.

Astfel, sistemul de ecuații generale ale mașinii de inducție cu rotor în colivie de „verită”, scrise cu fazori spațiali, și raportat la un sistem de axe de coordonate rotitor oarecare $d\lambda-q\lambda$ rezultă după cum urmează:

Ecuatiile de tensiune:

$$\underline{u}_{s\lambda} = R_s \cdot \underline{i}_{s\lambda} + \frac{d\Psi_{s\lambda}}{dt} = R_s \cdot \underline{i}_{s\lambda} + j \cdot \omega_\lambda \cdot \underline{\Psi}_{s\lambda} + \frac{d\Psi_{s\lambda}}{dt} \cdot \frac{\Psi_{s\lambda}}{\Psi_{s\lambda}} \quad (48)$$

$$0 = R_r \cdot \underline{i}_{r\lambda} + \frac{d\Psi_{r\lambda}}{dt} \cdot \frac{\Psi_{r\lambda}}{\Psi_{r\lambda}} + j \cdot (\omega_\lambda - \omega) \cdot \underline{\Psi}_{r\lambda} \quad (49)$$

Ecuatiile de flux, în funcție de curenți:

$$\underline{\Psi}_{s\lambda} = L_s \cdot \underline{i}_{s\lambda} + L_m \cdot \underline{i}_{r\lambda} = L_{\sigma s} \cdot \underline{i}_{s\lambda} + L_m \cdot \underline{i}_{m\lambda}, \quad (50)$$

$$\underline{\Psi}_{r\lambda} = L_r \cdot \underline{i}_{r\lambda} + L_m \cdot \underline{i}_{s\lambda} = L_{\sigma r} \cdot \underline{i}_{r\lambda} + L_m \cdot \underline{i}_{m\lambda} \quad (51)$$

Ecuatia generală de cuplu electromagnetic este:

$$\underline{M}_{em} = k(\underline{\Psi} \times \underline{i}) \quad (52)$$

Unde „ k ” este constanta mașinii și depinde de fluxul după care se face orientarea și de curentul ales pentru orientare. Relația (52) este valabilă pentru orice mașina de curent alternativ, pentru oricare dintre fluxurile din mașina alese să se facă orientarea și pentru oricare curent din mașina, real sau fictiv (de exemplu curentul de magnetizare). În sistemul de coordonate ales, ecuația (52) devine:

$$M_{em} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{sd\lambda} \cdot i_{sq\lambda} - \Psi_{sq\lambda} \cdot i_{sd\lambda}) \quad (53)$$

Sistemul de ecuații este completat de către ecuația fundamentală a mișcării, care realizează legătura între mărimile electromagnetice și cele mecanice.

Ecuatia de mișcare:

$$M_{em} - M_r = M_j = J'_{tot} \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (54)$$

Unde:

- M_r - cuplu rezistent;
- M_j - cuplu dinamic;
- J'_{tot} - momentul de inerție total redus la arborele mașinii;
- Ω_m - viteza unghiulară.

4.4.2.1. Controlul vectorial cu orientare indirectă după fluxul rotoric

În funcție de fluxul de referință ales, controlul vectorial al mașinii de inducție poate fi realizat cu orientare după fluxul rotoric, după fluxul statoric sau după fluxul din întrefier (magnetic), în funcție de aplicație, tipul mașinii (mașina de inducție cu rotorul în colivie sau bobinat, mașina sincronă cu excitație sau cu magnet permanent), modalitatea de calcul, estimare, identificare sau măsurare a fluxului, tipul convertorului de frecvență și procedura de modulație a pulsului. Pentru fiecare dintre tipurile de orientare alese (fluxul de referință) există avantaje și dezavantaje specifice.

În funcție de modul de determinare a fluxului există metode:

- Directe, determinarea amplitudinii și a fazei fluxului se face prin măsurarea directă utilizând sonde Hall sau bobine încorporate în motor;
- Indirecte, fluxul este determinat prin calcul folosind un model de calcul al fluxului pe baza ecuațiilor mașinii de curent alternativ, sau estimat utilizând tehnici de identificare a fluxului (estimatoare, filtre, etc.).

În funcție de modul de identificare a poziției fazorului spațial al fluxului procedurile de control vectorial pot fi cu:

- Orientare directă după câmp;
- Orientare indirectă după câmp.

Dacă fluxul este identificat în coordonate naturale bifazate fixe (mărimi de c.a.), poziția fazorului poate fi calculată direct din cele două componente. Această metodă conduce la orientare directă după câmp.

Dacă se calculează fluxul în coordonate orientate după câmp, unghiul de orientare poate fi determinat doar după compensarea alunecării prin integrarea vitezei unghiulare de sincronism, ceea ce conduce la orientare indirectă după câmp.

În figura 4.11 este prezentată diagrama fazorială a unei mașini de inducție cu rotorul în scurtcircuit, controlată vectorial cu orientare după fluxul rotoric (sistemul de axe de coordonate ales este unul rotitor, în care axa „d” este fixată și se învâрте odată cu fazorul de flux rotoric din mașină).

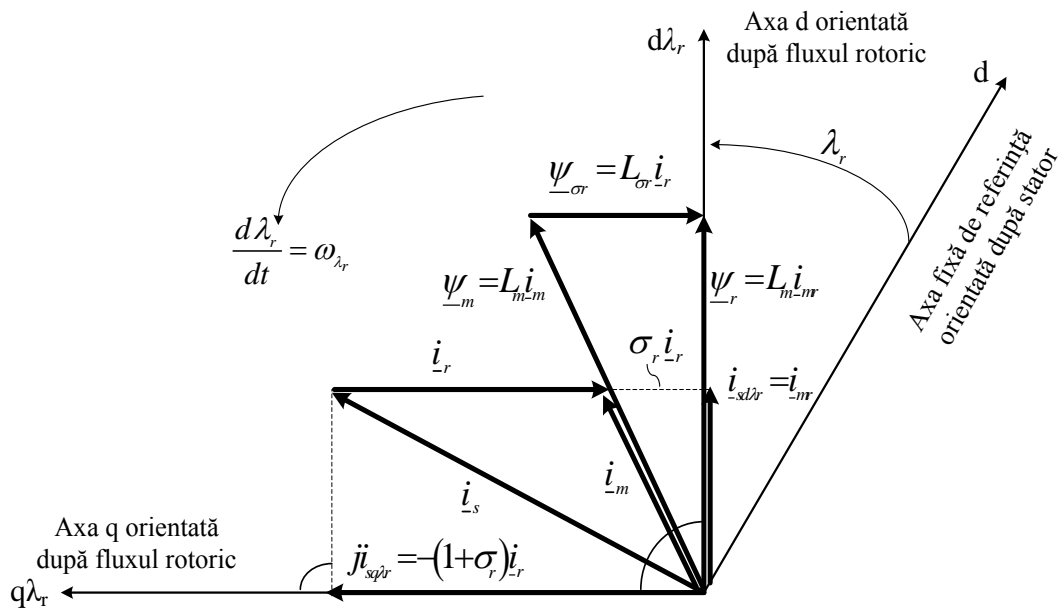


Fig. 4.11. Diagrama fazorială de curenți și fluxuri a motorului de inducție cu rotorul în scurtcircuit și cu orientare după fluxul rotoric [3].

În figura 4.12 este prezentată schema de control vectorial a sistemului de acționare cu mașina de inducție, orientată după fluxul rotoric, schemă în care sunt puse în evidență cele două bucle de reglare, una activă în care este controlată componenta de curent producătoare de mișcare din ecuația cuplului ($i_{sq}\lambda_r$ – componenta activă), respectiv bucla reactivă unde este controlată componenta de curent producătoare de flux din formula cuplului electromagnetic ($i_{sd}\lambda_r$ – componenta reactivă).

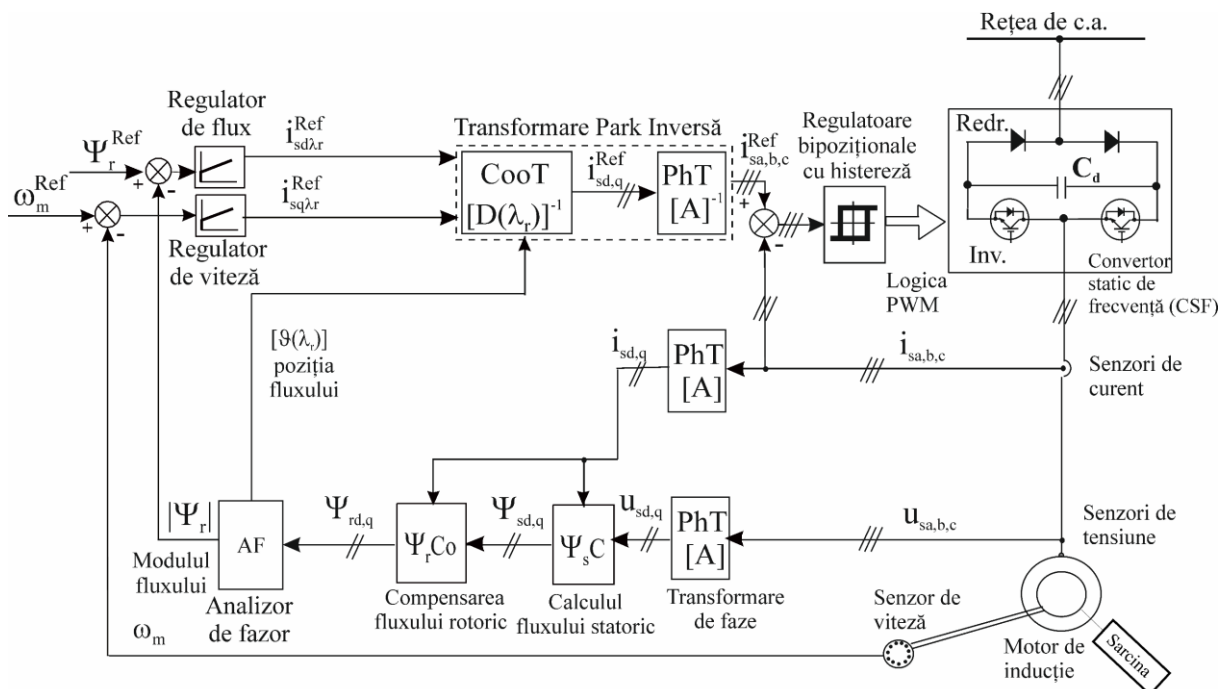


Fig. 4.12. Schema de control vectorial cu orientare după fluxul rotoric a mașinii de inducție alimentată de la un inverter de tensiune (VSI) comandat cu modulație PWM și controlat (cu reacție) în curent.

În cazul mașinii de inducție cu colivie (cu rotorul scurtcircuitat) această metodă se bazează pe faptul că modulul fluxului rotoric este ținut constant de către bucla de control reactivă, componenta de curent statoric în direcția fluxului este proporțională cu acest flux, deci este componenta producătoare de câmp ($i_{sd\lambda_r}$), iar cea producătoare de cuplu este perpendiculară pe aceasta (ca întotdeauna, indiferent de fluxul de orientare).

Orientarea după fluxul rotoric înseamnă matematic:

$$\Psi_{rd\lambda_r} = |\underline{\Psi}_r| = \Psi_r \text{ și } \Psi_{rq\lambda_r} = 0 \quad (55)$$

Iar curentul statoric orientat după câmpul rotoric se poate scrie:

$$\underline{i}_{s\lambda_r} = i_{sd\lambda_r} + j \cdot i_{sq\lambda_r} \quad (56)$$

Dacă rotorul este scurtcircuitat, $u_r = 0$, și dacă modulul fluxului rotoric este constant, $\Psi_r = const.$, avem:

$$0 = R_r \cdot \underline{i}_r + j \cdot (\omega_{\lambda_r} - \omega) \cdot \underline{\Psi}_r \quad (57)$$

Curentul rotoric $\underline{i}_{r\lambda_r}$ este perpendicular pe direcția fluxului $\underline{\Psi}_r$. În aceste condiții, conform diagramei fazoriale din figura 4.11 proiecția curentului statoric $i_{sd\lambda_r}$ pe direcția fluxului $\underline{\Psi}_r$ este:

$$i_{sd\lambda_r} = i_{mr} = \frac{\Psi_r}{L_m} \quad (58)$$

Iar componenta activă a curentului statoric este:

$$i_{sq\lambda_r} = -(1 + \sigma_r) \cdot i_r \quad (59)$$

Unde:

$$\sigma_r = \frac{L_{\sigma r}}{L_m} \quad (60)$$

Deci, $i_{sd\lambda_r}$ poate fi considerată componenta reactivă a curentului i_s , orientat după fluxul rotoric.

Cuplul electromagnetic dezvoltat de mașină, calculat cu ajutorul mărimilor orientate după fluxul rotoric este dat de relația:

$$M_{em} = \frac{3}{2} z_p \cdot \Psi_r \cdot i_r = \frac{3}{2} \cdot \frac{z_p}{1 + \sigma_r} \cdot \Psi_r \cdot i_{sq\lambda_r} \quad (61)$$

Pe baza celor două componente de curent ($i_{sq\lambda_r}$ și $i_{sd\lambda_r}$) se disting cele două bucle de reglare, activă și reactivă, pentru reglarea mărimilor mecanice (buclo de reglare activă), respectiv magnetice (buclo de reglare reactivă).

În continuare este prezentată procedura de reglare vectorială cu orientare indirectă după câmp (Indirect Field-oriented Control). La principiul controlului vectorial

indirect poziția fluxului rotoric se obține prin integrarea vitezei câmpului învârtitor obținut din viteza unghiulară a rotorului la care se adună alunecarea absolută $\Delta\omega$:

$$\omega_{\lambda_r} = \omega + \Delta\omega \quad (62)$$

Această alunecare poate fi determinată conform relației (63):

$$\Delta\omega = R_r \frac{i_r}{\Psi_r^{ref}} = \frac{2 \cdot m^{ref} \cdot R_r}{3 \cdot z_p \cdot (\Psi_r^{ref})^2} \quad (63)$$

Prin integrarea acestei pulsații rezultă poziția λ_r a fluxului rotoric.

$$\lambda_r = \int (\omega_{\lambda_r}) dt \quad (64)$$

Dezavantajul acestui procedeu provine din faptul că identificarea exactă a poziției necesită cunoașterea poziției inițiale a fluxului și că operatorul de integrare poate introduce erori de calcul.

Schema de control prezentată în figura 4.13 reprezintă o schemă clasică folosită în acționările electrice de viteză variabilă cu motoare de inducție, fiind întâlnită într-o formă sau alta la majoritatea producătorilor de echipamente industriale pentru acționări electrice.

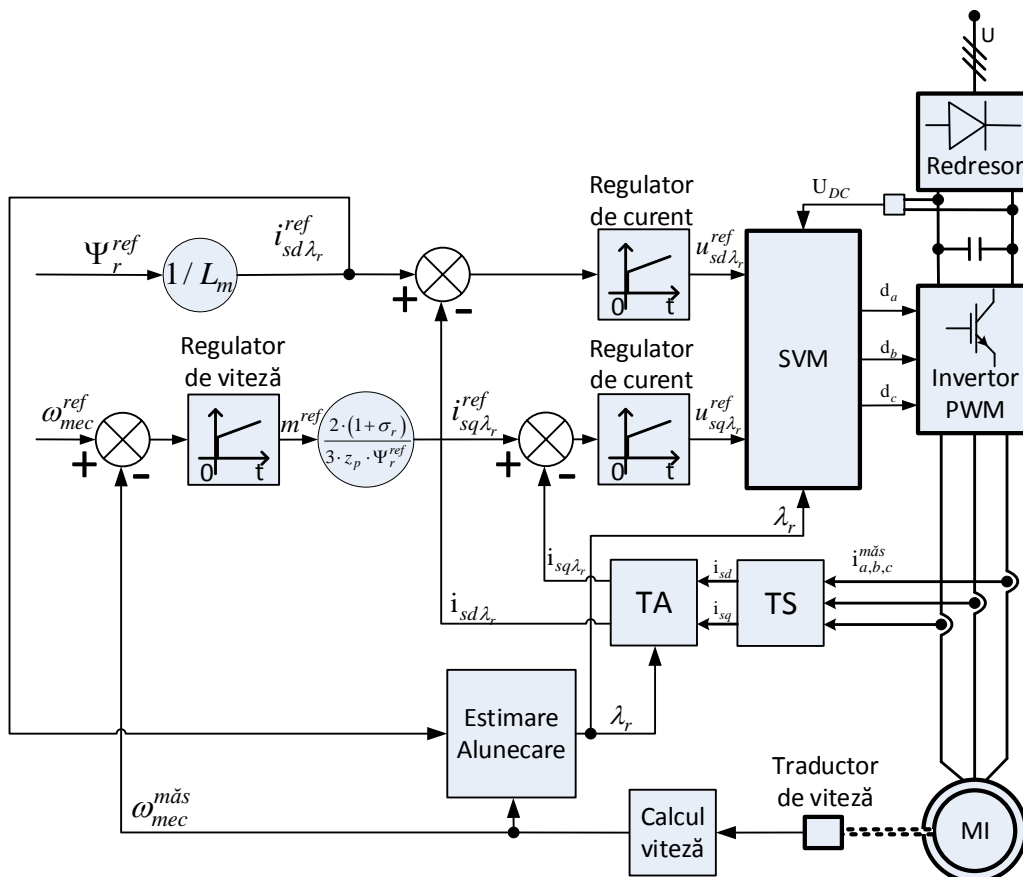


Fig. 4.13. Schema de principiu a controlului vectorial cu orientare indirectă după câmp a motorului asincron cu colivie de „veveriță”.

Odată cu răspândirea aplicațiilor bazate pe teoria fazorului spațial, a fost concepută și o procedură de modulație vectorială propriu zisă, bazată pe teoria fazorului spațial, definit la mașinile trifazate de curent alternativ. Această procedură a fost denumită PWM cu vector spațial (SVM - „*Space Vector Modulation*”) sau simplu PWM vectorial .

Această tehnică diferă de cele bazate pe o undă purtătoare prin faptul că în acesta nu există modulatori separați pentru fiecare fază. În locul acestora, tensiunile de referință sunt date de vectorii spațiali ai tensiunii și tensiunile de ieșire a invertorului sunt considerate ca vectori spațiali. Există opt vectori de tensiune posibili dintre care șase sunt vectori activi $U_1 - U_6$ și doi sunt vectori zero $U_0 - U_7$. Vectorul tensiune de referință este realizat prin schimbarea secvențială a vectorilor activi și a vectorilor zero.

În figura 4.14 este reprezentat vectorul tensiune de referință și cei opt vectori de tensiune care corespund cu stările posibile ale invertorului. Cei șase vectori activi împart un plan în șase sectoare. În fiecare sector vectorul tensiune de referință U_c este obținut prin activarea pentru un timp adecvat a doi vectori adiacenți. Vectorul de referință U_c prezentat în figura de mai jos poate fi implementat prin vectori de comutare U_1, U_2 și vectori zero U_0, U_7 .

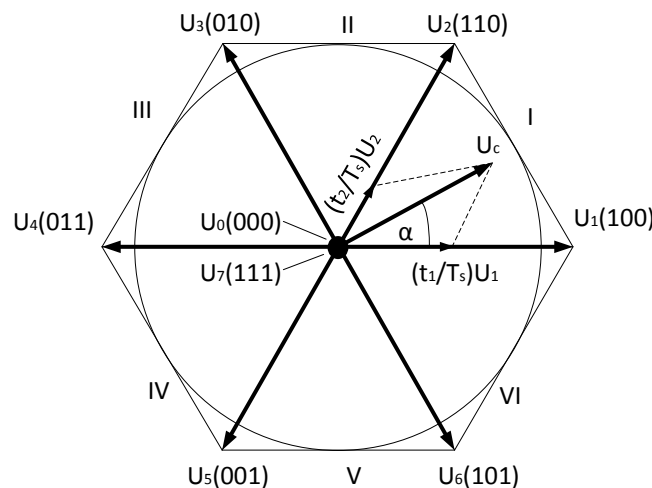


Fig. 4.14. Principiul modulării bazată pe fazorul spațial [21].

Totodată, în figura 4.15 se prezintă un exemplu de selecție a vectorilor de comutație aferenți cazului în care fazorul de tensiune este în sectorul I.

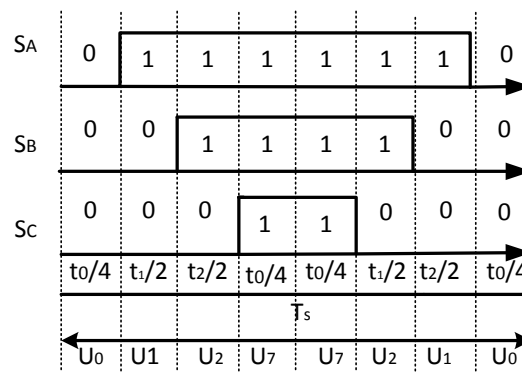


Fig. 4.15. Exemplu de selecție a vectorilor de comutație pentru realizarea fazorului de tensiune U_c în sectorul I [22].

4.4.3. Controlul vectorial al mașinii sincrone cu magnet permanent

În aplicațiile cu mașini de curent alternativ, mașinile sincrone cu magnet permanent și-au câștigat un loc binemeritat datorită performanțelor dinamice ridicate. Făcându-se o analiză a acestor tipuri de motoare, s-au constatat următoarele avantaje care justifică utilizarea lor în diverse aplicații care necesită performanțe de control ridicate:

- densitate ridicată a fluxului din întrefier;
- raport putere/greutate ridicat;
- raport cuplu/inertie ridicat (asigură accelerații ridicate) la motoarele cu raportul lungime/diametrul rotorului mare;
- funcționare la cuplu neted, fără ripluri chiar și la viteze mici (posibilitate de poziționare precisă);
- cuplu controlat la viteză zero;
- funcționare la viteză ridicată;
- suportă accelerații și decelerații rapide de scurtă durată;
- eficiență și factor de putere ridicat;
- design compact.

Pentru controlul vectorial al mașinii sincrone cu magnet permanent (PM-SM) s-a construit un model matematic mai simplu al PM-SM, care ne conduce la o analogie cu mașina de curent continuu cu excitație separată necompensată. Această analogie stă la baza principiului orientării după câmp al mașinilor de curent alternativ. Separând controlul componentei active (mecanice) de cele reactive (magnetice) ale variabilelor, se pot obține două bucle de reglare, ca și la mașina de curent continuu cu excitație derivație și anume:

- bucla reactivă – controlează mărimile magnetice ale mașinii sincrone (fluxul statoric – Ψ_s , sau componenta reactivă a curentului statoric – $i_{sd\theta}$).
- bucla activă – realizează controlul mărimilor mecanice ale mașinii (poziția și/sau viteza și/sau cuplul electromagnetic, respectiv componenta activă a curentului statoric – $i_{sq\theta}$).

Modelul matematic a mașinii sincrone cu magnet permanent se deduce într-un sistem de axe de coordonate rotitor, al cărei axe sunt orientate după direcțiile preferențiale ale rotorului (al fluxului magnetului permanent) $d\theta - q\theta$. Utilizând fazorii spațiali, ecuația de tensiune este:

$$\underline{u}_{s\theta} = R_s \cdot \underline{i}_{s\theta} + \frac{d\Psi_{s\theta}}{dt} = R_s \cdot \underline{i}_{s\theta} + j \cdot \omega \cdot \underline{\Psi}_{s\theta} + \frac{d\Psi_{s\theta}}{dt} \cdot \frac{\Psi_{s\theta}}{\Psi_{s\theta}} \quad (65)$$

Unde viteza rotorului este: $\omega = \frac{d\theta}{dt}$.

Fluxul rezultat statoric se poate scrie:

$$\underline{\Psi}_{s\theta} = \underline{\Psi}_{MP} + \underline{\Psi}_{ss\theta} \quad (66)$$

Unde $\underline{\Psi}_{MP}$ este fluxul de excitație al motorului (al magnetului permanent), iar $\underline{\Psi}_{ss\theta}$ reprezintă reacția indusului datorită sarcinii. Fluxul rezultat din mașină se compune deci dintr-un flux obținut pe cale mecanică prin rotirea rotorului, respectiv unul obținut pe

cale electrică alimentând fazele statorului, acesta numindu-se și reacția indusului care îl deformează pe cel obținut pe cale mecanică.

Componentele fluxului statoric în sistem bifazat orientat sunt:

$$\Psi_{sd\theta} = L_{sd} \cdot i_{sd\theta} + \Psi_{MP} \quad (67)$$

$$\Psi_{sq\theta} = L_{sq} \cdot i_{sq\theta} \quad (68)$$

Câmpul magnetului permanent se consideră constant iar din ecuațiile de mai sus rezultă componentele tensiunii statorice:

$$u_{sd\theta} = R_s \cdot i_{sd\theta} + L_{sd} \cdot \frac{di_{sd\theta}}{dt} - \omega \cdot L_{sq} \cdot i_{sq\theta} \quad (69)$$

$$u_{sq\theta} = R_s \cdot i_{sq\theta} + L_{sq} \cdot \frac{di_{sq\theta}}{dt} + \omega \cdot (L_{sd} \cdot i_{sd\theta} + \Psi_{MP}) \quad (70)$$

Cuplul electromagnetic poate fi exprimat ca:

$$\begin{aligned} m_{em} &= \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{sd\theta} \cdot i_{sq\theta} - \Psi_{sq\theta} \cdot i_{sd\theta}) \\ &= \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot (\Psi_{MP} \cdot i_{sq\theta} + (L_{sd} - L_{sq}) \cdot i_{sd\theta} \cdot i_{sq\theta}) \end{aligned} \quad (71)$$

Ecuția de mișcare:

$$M_{em} - M_r = M_j = J'_{tot} \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (72)$$

4.4.3.1. Controlul vectorial cu orientare după fluxul rotoric bazat pe raportul cuplu maxim/curent absorbit

Strategia de control implementată asigură o funcționare la parametri energetici optimi și are la bază menținerea perpendicularității dintre fazorul fluxului și cel al curentului statoric. Astfel, la un cuplu dat curentul absorbit este minim. Acest lucru poate fi realizat prin anularea componentei longitudinale a curentului statoric ($i_{sd\theta} = 0$).

În acest caz particular ecuațiile generale ale mașinii se modifică în felul următor:

Ecuțiile de tensiune:

$$u_{sd\theta} = -\omega \cdot L_{sq} \cdot i_{sq\theta} \quad (73)$$

$$u_{sq\theta} = R_s \cdot i_{sq\theta} + L_{sq} \cdot \frac{di_{sq\theta}}{dt} + \omega \cdot \Psi_{MP} \quad (74)$$

Componentele fluxului statoric:

$$\Psi_{sd\theta} = \Psi_{MP} \quad (75)$$

$$\Psi_{sq\theta} = L_{sq} \cdot i_{sq\theta} \quad (76)$$

Cuplul electromagnetic:

$$m_{em} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \Psi_{MP} \cdot i_{sq\theta} \quad (77)$$

Componenta activă a curentului este:

$$i_{sq\theta} = i_s \cdot \sin(\varepsilon_s - \theta) \quad (78)$$

Unde: θ este poziția rotorului (și implicit a fluxului magnetului permanent), iar ε_s este poziția fazorului spațial al curentului statoric.

Pentru a obține cuplul maxim pentru un curent i_s dat, unghiul de sarcină optim trebuie să fie: $\varepsilon_s - \theta = \pm \frac{\pi}{2}$, pentru care reacția longitudinală să fie anulată.

În figura 4.16 este prezentată diagrama fazorială a unei mașini sincrone cu magnet permanent, controlată vectorial cu orientare după fluxul magnetului permanent (sistemul de axe de coordonate ales este unul rotitor, în care axa d este fixată și se învâрте odată cu magnetul permanent din rotorul mașinii.

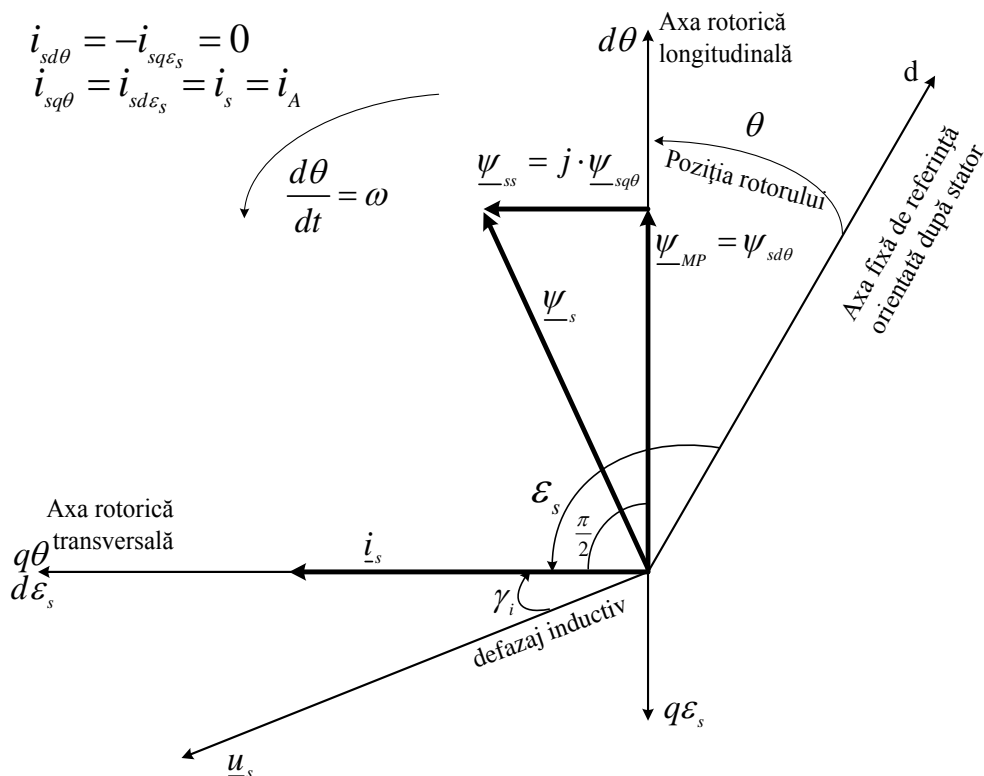


Fig. 4.16. Diagrama fazorială a mașinii sincrone cu magnet permanent funcționând cu reacția longitudinală anulată.

În figura 4.17 este prezentată schema de control vectorial a sistemului de acționare cu mașina sincronă, orientată după fluxul magnetului permanent. Schema conține doar o buclă de reglare, cea activă în care este controlată componenta de curent producătoare de mișcare din ecuația cuplului. Bucla de control reactivă nu mai este necesară deoarece fluxul de orientare este ținut constant prin impunerea la valoare zero a componentei reactive de curent (anularea reacției longitudinale).

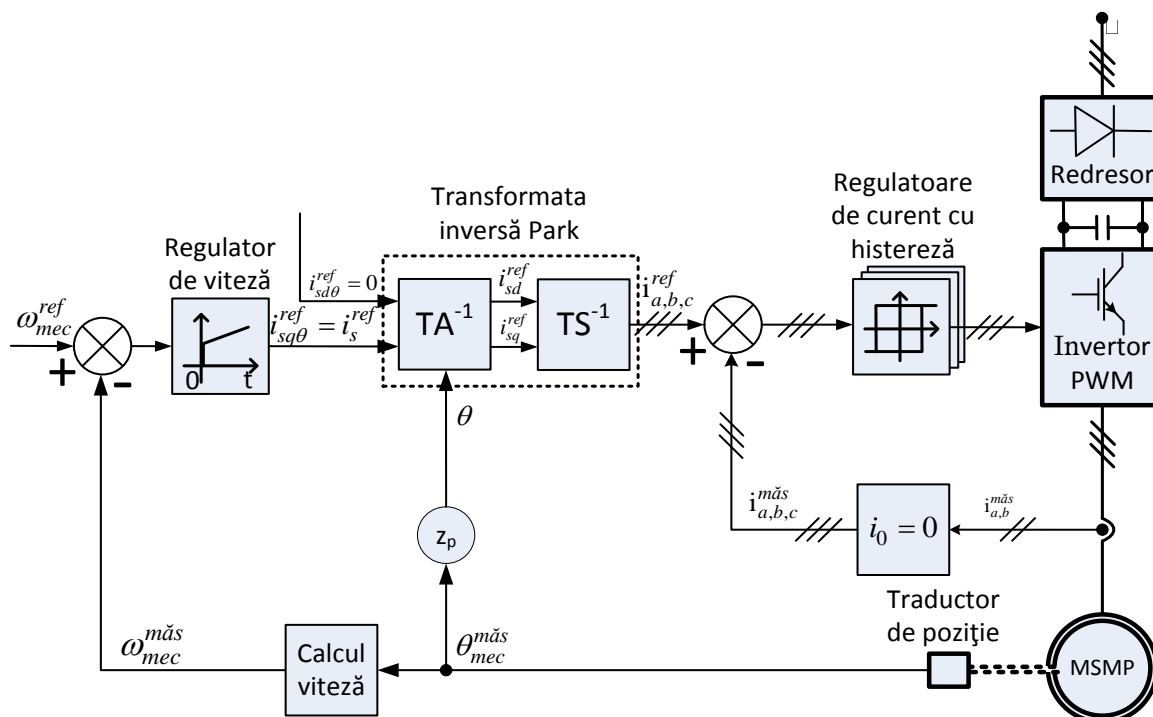


Fig. 4.17. Schema de control vectorial cu orientare după fluxul magnetului permanent a mașinii sincrone, cu anularea reacției longitudinale ($i_{sd\theta} = 0$) alimentată de la un inverter de tensiune (VSI) și controlat (cu reacție) în curent.

Traductorul incremental furnizează informația de poziție, care va fi convertită în viteză prin derivare. Această viteză se compară cu referința impusă, diferența lor fiind introdusă într-un regulator de viteză la ieșirea căruia se obține mărimea de comandă, și anume componenta activă a curentului statoric. Cealaltă mărime de referință, adică componenta reactivă a curentului este anulată. Acești doi curenți sunt mărimi de curent continuu. Este necesară obținerea a trei curenți statorici de referință, adică trebuie făcută trecerea la mărimi trifazate naturale. Acest lucru se realizează prin intermediul unei duble transformări, din sistem de coordonate bifazate orientate se trece în sistem bifazat fix, după care va urma o transformare de sistem din bifazat în trifazat. Această transformare mai este denumită și Transformata Park Inversă. Logica de comandă a dispozitivelor semiconductoare ale inverterului se va obține utilizând regulate bipoziționale de curent cu histereză.

5. Acționări cu mașini de curent alternativ – lucrări practice

5.1. Lucrarea 7 - Reglarea turației mașinii asincrone cu rotor bobinat prin variația tensiunii de alimentare și a rezistenței rotorice

5.1.1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator își propune să arate cum se poate modifica punctul de funcționare (viteza respectiv cuplul) la o acționare cu mașina de inducție (asincronă) cu rotorul bobinat, modificând tensiunea de alimentare a înfășurărilor statorice, respectiv introducând rezistențe suplimentare în circuitul rotorului. Prin aceasta modificare a punctului de funcționare se poate realiza pornirea, frânarea, reversarea respectiv reglarea vitezei unei acționari electrice cu mașina de inducție cu rotorul bobinat.

5.1.2. Montajul experimental

Figura 5.1. prezintă montajul experimental corespunzător prezentei lucrării de laborator.

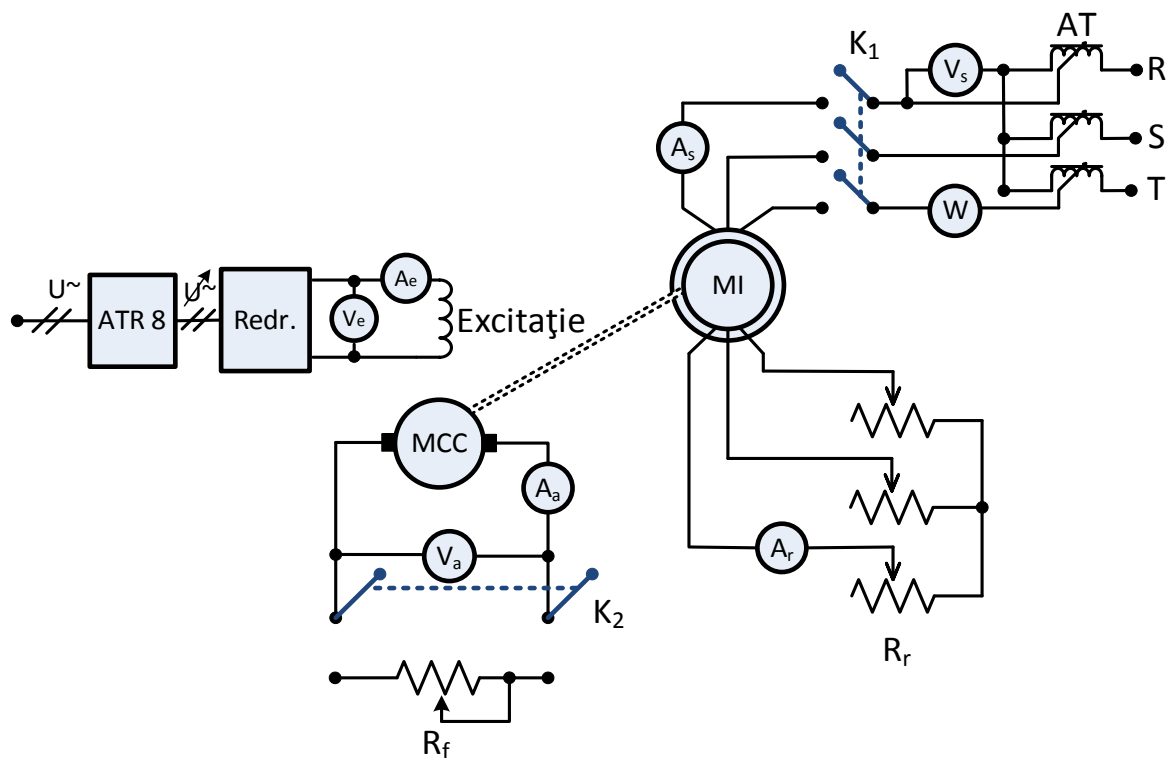


Fig. 5.1. Montajul experimental.

5.1.3. Legendă montaj experimental

ATR8 – Autotransformator;
AT – Autotransformator trifazat;
 A_a, A_s, A_r, A_e – Ampermetre;
 V_a, V_e – Voltmetre;

V_s – Voltmetru;
 R_f – Reostat 30 [Ω].
 R_r – Reostat 3x29 [Ω] (conectate în stea);
 K_1 – Comutator tripolar;
 K_2 – Comutator basculant;
 W – Wattmetru.

Datele mașinilor electrice:

MI – Mașina asincronă cu rotor bobinat

$P_N = 1,5 [kW]$;
 $U_{sN} = 220/380 [V] \sim$;
 $I_{sN} = 8/4,6 [A] \sim$;
 $n_N = 900 [rpm]$;
 $R_r = 0.6 [\Omega]$;
 $I_{rN} = 18,5 [A] \sim$;
 $n_s = 1000 [rpm]$ - turația de sincronism;
 $M_N = 16 [Nm]$;
 $M_{kN} = 32 [Nm]$;
 $s_{kN} = 0,375$;
 $p_{mec} = 75 [W]$ - pierderi mecanice.

MCC – Mașina de curent continuu

$P_N = 2,2 [kW]$;
 $U_{aN} = 110 [V]$;
 $I_{aN} = 24,5 [A]$;
 $U_{eN} = 110 [V]$;
 $I_{eN} = 0,9 [A]$;
 $n_N = 1950 [rpm]$;
 $R_a = 0,3 [\Omega]$.

Obs. În cadrul acestei lucrări mașina de curent continuu (MCC) are rolul de a produce cuplul rezistent (M_r).

5.1.4. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 5.1.
2. Se alimentează excitația mașinii de curent continuu setând curentul de excitație la valoarea nominală $I_e = 0.9 [A]$. Se alimentează autotransformatorul AT.
3. Cu comutatorul K_2 deschis, se pun rezistențele **R_r la 4 ohmi**, se închide comutatorul K_1 și se alimentează mașina asincronă crescând treptat tensiunea U_s până la 220 [V], după care se reduc rezistențele externe la (**R_r) 0 ohmi**.
4. Se citesc valorile indicate de instrumentele de măsură (I_e ; n ; U_a ; I_s ; I_r ; $\cos\varphi$) la mers în gol pentru $U_{sNfază} = 220 [V]$ și se trec în tabel. Se închide comutatorul K_2 și se realizează măsurători în sarcină, pentru curenții $I_a = 0, 3, 5$, și 7 [A], reglând rezistența R_f . **Obs! A nu se depășii valoarea maximă de 10 [A] a curentului I_a** . Rezultatele se trec în tabel.

Obs! Toate măsurătorile se fac în regim stabilizat ($M_{em} = M_r$)

5. Pentru $R_r = 0$ se repetă punctul 4 reducând tensiunea la: $U_{s1} = 175 [V]$ și $U_{s2} = 145 [V]$. Se fac măsurători la mers în gol și în sarcină iar rezultatele se trec în tabel.

6. Se repetă punctul 4 pentru alte trei valori ale rezistenței exterioare: $R_r = 1; 2; 4 [\Omega]$. Pentru aceste măsurători se revine la tensiunea de alimentare $U_{sNfază} = 220 [V]$. Rezultatele măsurătorilor se trec în tabel.

7. Se ridică caracteristicile mașinii $\Omega = f(M)$ pentru toate cazurile (la modificarea tensiunii statorice și la modificarea rezistenței), pe același grafic.

8. Se ridică caracteristicile $\eta=f(M)$ pentru fiecare caz, pe același grafic.

9. Relațiile de calcul a mărimilor din tabel:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \left[\frac{rad}{s} \right];$$

Cuplul de sarcină produs de generatorul de curent continuu: $M_r = C_N \cdot I_a [N \cdot m]$.

$$C_N = K \cdot \Psi_{eN} = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot R_a}{\Omega_N} [V \cdot s]$$

Calculul puterii trifazate: $P_{cons3f} = 3 \cdot P_{consf} [W]$.

Puterea mecanică dezvoltată de generatorul de curent continuu: $P_{mec} = M_r \cdot \Omega [W]$.

Randamentul sistemului de acționare: $\eta = \frac{P_{mec}}{P_{cons3f}} \cdot 100 [\%]$

Tabel 5.1. Rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate.

Caz.	Mărimi măsurate										Mărimi calculate				
	I_e [A]	n [rpm]	I_a [A]	U_a [V]	U_s [V]	I_s [A]	I_r [A]	R_r [Ω]	$\cos\varphi$	P_{consf} (pe o fază) [W]	P_{cons3f} [W]	Ω [rad/s]	M_r [N·m]	P_{mec} [W]	η [%]
1			0		220			0							
					220			0							
					220			0							
					220			0							
2			0		175			0							
					175			0							
					175			0							
					175			0							
3			0		145			0							
					145			0							
					145			0							
					145			0							
4			0		220			1							
					220			1							
					220			1							
					220			1							
5			0		220			2							
					220			2							
					220			2							
					220			2							
6			0		220			4							
					220			4							
					220			4							
					220			4							

5.1.5. Concluzii

Reducerea tensiunii de alimentare a statorului influențează caracteristica mașinii asincrone prin scăderea cuplului motor, cuplul maxim sau cuplul la aceeași alunecare dată fiind proporțional cu pătratul tensiunii de alimentare, păstrându-se alunecarea critică s_k constantă. Prin variația rezistenței rotorice se modifică alunecarea critică păstrând-se cuplul critic. Modificând valoarea rezistenței rotorice se poate obține un reglaj de viteză în sens descrescător a vitezei obținute pe caracteristica naturală. La rezistențele rotorice mari stabilitatea funcționării motorului scade. Acest reglaj este inefficient, pierderile de energie fiind ridicate, având un randament scăzut.

5.2. Lucrarea 8 - Acționări cu mașina asincronă cu rotor în colivie prin modificare frecvenței tensiunii de alimentare

5.2.1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator își propune să arate modul în care se poate controla (regla) viteza (turația) unui sistem de acționare cu mașina asincronă (de inducție) cu rotorul în scurtcircuit (în colivie), alimentată de la un convertor static de frecvență cu caracter de sursă de tensiune. Reglajul turației se va face prin modificarea frecvenței tensiunii de ieșire a inverterului. Comanda tranzistoarelor din cadrul inverterului este realizată pe baza unei tehnici de modulație bazată pe undă purtătoare, denumită și modulație sinusoidală.

5.2.2. Montajul experimental

În figura 5.2. este prezentat montajul experimental aferent lucrării de laborator.

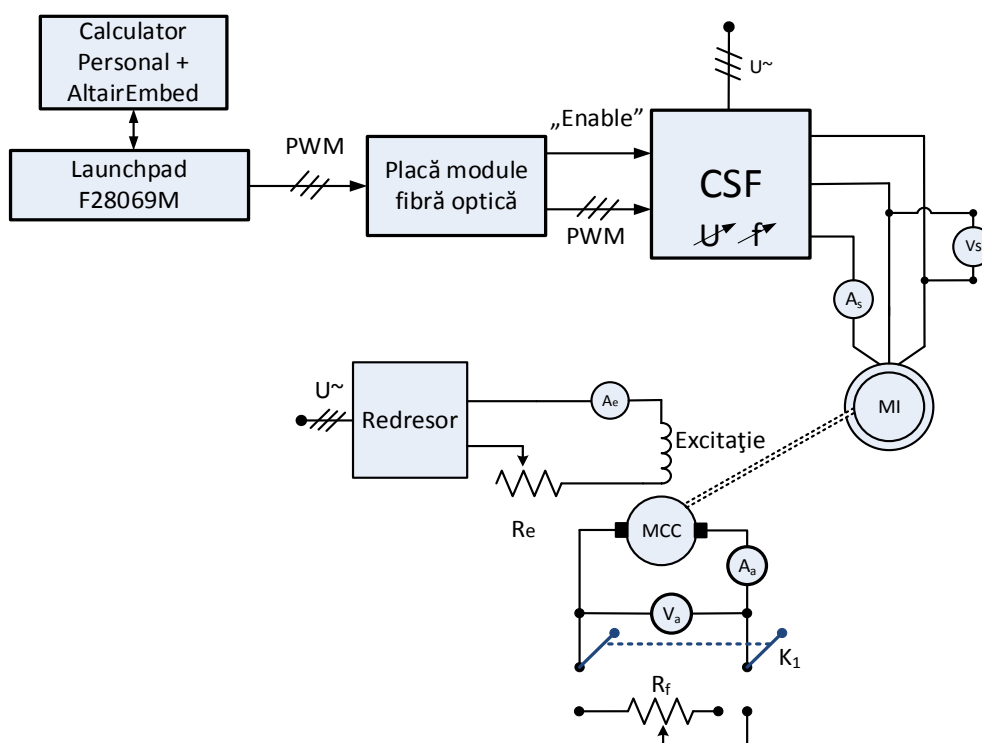


Fig. 5.2. Montajul experimental.

În vederea alimentării mașinii asincrone se utilizează un convertor static de frecvență (CSF) industrial. Comanda tranzistoarelor din cadrul inverterului aflat în componența CSF este realizată pe baza unei tehnici de modulație bazată pe undă purtătoare, denumită în literatura tehnică modulație sinusoidală. Semnalele de comandă aferente tranzistoarelor sunt generate utilizând sistemul de dezvoltare *LAUNCHXL-F28069M*, care face parte din familia de procesoare digitale de semnal C2000 de la Texas Instruments. Implementarea tehnicii de modulație utilizată în prezenta lucrare este

realizată prin utilizarea unui limbaj de programare grafică în mediul de simulare/programare Altair Embed. Acesta reprezintă o unealtă de programare grafică cu ajutorul căreia se generează cod C/C++ pe baza unor diagrame bloc, codul fiind încărcat pe platforme de dezvoltare precum cea utilizată în lucrarea de față (*LAUNCHXL-F28069M*).

Semnalele modulate în lăţime (PWM – Pulse Width Modulation) generate de platforma *LAUNCHXL-F28069M* sunt transmise tranzistoarelor din cadrul inverterului prin intermediul unor conductori cu fibră optică, accesul la tranzistoare fiind posibil prin utilizarea unei plăci cu module optice receptoare/emiţătoare dedicate convertoarelor industriale, precum cel folosit în lucrarea de laborator.

5.2.3. Legendă montaj experimental

Redresor – Redresor de tensiune cu autotransformator ATR8;
Convertor Tehnosoft APCM750W– Convertor static de frecvenţă;

A_s – Ampermetru;

A_a, A_e – Ampermetru;

V_a, V_e – Voltmetru;

V_s – Voltmetru;

W_s – Wattmetru;

F_s – Frecvenţmetru, wattmetru, cosfimetru;

R_f – Reostat 29 [Ω];

K_1 – Comutator basculant.

Datele maşinilor electrice:

MI – Maşina de inducţie

$P_N = 250 [W]$;

$U_{sN} = 230/400 [V] \sim$;

$I_{sN} = 1,1/0,65 [A] \sim$;

$n_N = 1410 [rpm]$;

$R_s = 29 [\Omega]$;

$\cos\varphi = 0,77$;

$n_s = 1500 [rpm]$ - turaţia de
sincronism;

$M_N = 0,8 [Nm]$;

$M_{kN} = 1,65 [Nm]$;

$s_{kN} = 0,26$;

$p_{mec} = 15 [W]$ - pierderi mecanice.

MCC – Maşina de curent continuu

$P_N = 500 [W]$;

$U_{aN} = 110 [V]$;

$I_{aN} = 7,2 [A]$;


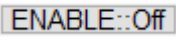
$U_{eN} = 110 [V]$;

$I_{eN} = 0,28 [A]$;

$n_N = 3000 [rpm]$.

Obs. Rolul maşinii de curent continuu este de a produce cuplul rezistent (M_r).

5.2.4. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 5.2.
2. Se alimentează excitația mașinii de curent continuu de la REDRESOR, setând curentul de excitație la $I_e = 0.28 [A]$.
3. Se alimentează convertorul static de frecvență de la panoul de comandă aferent standului experimental.
4. Se alimentează circuitul de comandă al convertorului static de frecvență de la rețeaua monofazată.
5. Se verifică existența conexiunii seriale (USB) între platforma **F28069M** și calculatorul personal.
6. Se pornește calculatorul personal și se deschide de pe desktop fișierul *L8*, corespunzător sistemului de generare a impulsurilor de comandă aferente convertorului static de frecvență (CSF).
7. **Se va seta în mediul AltairEmbed frecvența de 25 [Hz]**, după care se va încărca programul prin apăsarea butonului *GO* (). După încărcarea programului se va activa pornirea convertorului de la butonul „ENABLE” (). Valoarea tensiunii de alimentare a mașinii a fost setată în prealabil la valoarea nominală de 400 [V].
8. Cu frecvența $f = 25 [Hz]$ și cu comutatorul K_1 deschis, se măsoară: I_s și n (la mers în gol – mașina de curent continuu operând în regim de generator nu produce cuplu rezistent) iar datele se trec în tabel.
9. Se închide K_1 , se modifică curentul de sarcină al generatorului de curent continuu (I_a) din reostatul R_f la valori diferite ($I_a = 1, 2, 3, 4$ și $5 [A]$) fără să se depășească cuplul critic al motorului de inducție. Se fac măsurători și se trec în tabel.
10. Se repetă punctele 8 și 9 pentru următoarele valori ale frecvenței: $f = 30, 40, 50, 60$ și $70 [Hz]$.
11. **Punctul 36 (Nr. 36) din tabel se realizează în prezența cadrului didactic!!!**
12. Se ridică următoarele caracteristici:
 - d. caracteristicile de comandă $\Omega = f(f)$ pentru diferitele frecvențe ($f = 25, 30, 40, 50, 60$ și $70 [Hz]$) la curenții: $I_a = 0$ respectiv $4 [A]$, pe același grafic.
 - e. caracteristicile $\Omega = f(M_r)$ pentru fiecare frecvență, pe același grafic.
13. Relații de calcul ale mărimilor din tabel:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \left[\frac{rad}{s} \right]; C_N = K \cdot \Psi_{eN} = \frac{U_{aN} - I_{aN} \cdot R_a}{\Omega_N} = 0.36 [V \cdot s], M_k = M_{kN} \cdot \left(\frac{f_{sN}}{f_s} \right)^2$$

Cuplul de sarcină (rezistent) produs de mașina de curent continuu operând în regim de generator: $M_r = C_N \cdot I_a [N \cdot m]$

Tabel 5.2. Rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate.

Nr.	U_s [V]	I_s [A]	n [rot/min]	f [Hz]	U_a [V]	I_a [A]	Ω [rad/s]	M_r [Nm]	M_k [Nm]	
1	400			25						
2				25		1				
3				25		2				
4				25		3				
5				25		4				
6				25		5				
7					30					
8					30		1			
9					30		2			
10					30		3			
11					30		4			
12					30		5			
13					40					
14					40		1			
15					40		2			
16					40		3			
17					40		4			
18					40		5			
19					50					
20					50		1			
21					50		2			
22					50		3			
23					50		4			
24					50		5			
25					60					
26					60		1			
27					60		2			
28					60		3			
29					60		4			
30					60		5			
31					70					
32					70		1			
33					70		2			
34					70		3			
35					70		4			
36					70		5			

5.2.5. Concluzii

Reducerea frecvenței tensiunii de alimentare a statorului influențează caracteristica mașinii asincrone prin creșterea cuplului motor, cuplul maxim sau cuplul la aceeași alunecare dată fiind invers proporțional cu pătratul frecvenței tensiunii de alimentare. Datorită acestui efect (opus celui obținut la reducerea amplitudinii tensiunii de alimentare), reducerea frecvenței tensiunii de alimentare a statorului este folosită de

multe ori împreună cu reducerea tensiunii de alimentare a statorului, pentru a păstra cuplul dezvoltat de motor la aceeași valoare, indiferent de viteza la care se reglează mașina de inducție.

Prin creșterea frecvenței tensiunii de alimentare a statorului se pot obține viteze de funcționare mai mari decât cele de pe caracteristica naturală (din catalogul mașinii), metodă care se numește și control cu slăbire de flux (câmp), însă cuplul dezvoltat de motor va scădea pe măsură ce frecvența crește (cu cât vitezele la care se merge sunt mai mari).

5.3. Lucrarea 9 - Controlul scalar al mașinii asincrone cu rotor în scurtcircuit prin metoda $U/f = \text{constant}$ în buclă deschisă, dezvoltat pe sisteme cu DSP

5.3.1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator își propune să arate modul în care se poate controla (regla) viteza (turația) unui sistem de acționare cu mașina asincronă (de inducție) cu rotorul în scurtcircuit (în colivie) alimentată de la un convertor static de frecvență (format din redresor, circuit intermediar de curent continuu și inverter). Controlul mașinii asincrone va fi realizat printr-o comandă scalară (în bucla deschisă) bazată pe legea de comandă V/Hz (metoda $U/f = \text{constant}$).

5.3.2. Montajul experimental

Figura. 5.3. prezintă montajul experimental specific lucrării de laborator.

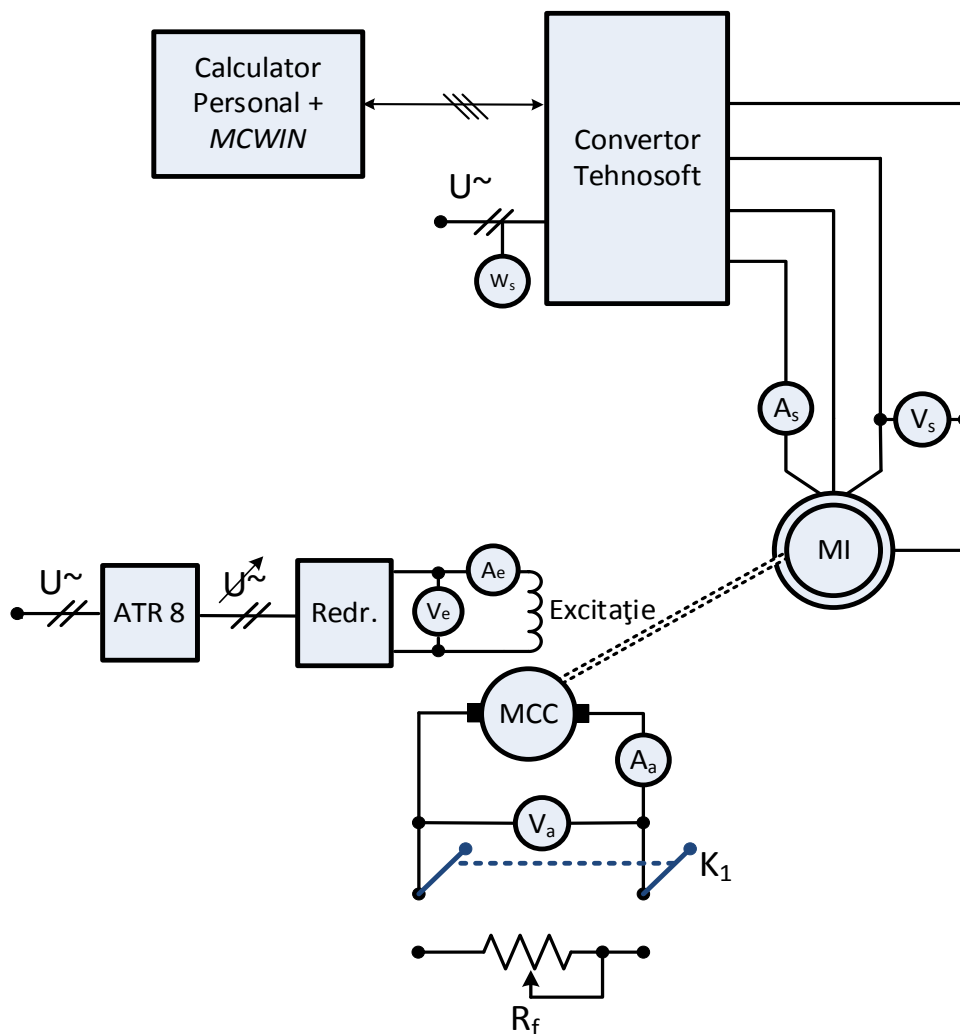


Fig. 5.3. Montajul experimental.

5.3.3. Legendă montaj experimental

Redresor – Redresor de tensiune cu autotransformator ATR8;
Convertor Tehnosoft APCM750W– Convertor static de frecvență;

A_s – Ampermetru;

A_a, A_e – Ampermetru;

V_a, V_e – Voltmetru;

V_s – Voltmetru;

W_s – Wattmetru;

R_f – Reostat 190 $[\Omega]$;

K_1 – Comutator basculant.

Datele mașinilor electrice:

MI – Mașina de inducție

$P_N = 250 [W]$;

$U_{sN} = 230/380 [V] \sim$;

$I_{sN} = 1,1/0,65 [A] \sim$;

$n_N = 1410 [rpm]$;

$R_s = 29 [\Omega]$;

$\cos\varphi = 0,77$;

$n_s = 1500 [rpm]$ - turația de sincronism;

$M_N = 1,7 [Nm]$;

$M_{kN} = 2,65 [Nm]$;

$s_{kN} = 0,26$;

$p_{mec} = 15 [W]$ - pierderi mecanice.

MCC – Mașina de curent continuu

$P_N = 500 [W]$;

$U_{aN} = 110 [V]$;

$I_{aN} = 7,2 [A]$;

$U_{eN} = 110 [V]$;





$I_{eN} = 0,28 [A]$;

$n_N = 3000 [rpm]$.

Obs. Mașina de curent continuu (MCC) are rolul de a produce cuplul rezistent (M_r).

5.3.4. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 5.3.
2. Se pornește calculatorul.
3. Se pornește sursa de $\pm 5 [V]$ (comutatorul mic) și se inițializează programul MCWIN.
4. Se selectează în fereastră programului MCWIN butonul **Monitor** (pentru a verifica dacă există conexiune serială cu procesorul digital de semnal). **În caz de eroare se resetează atât sursa de $\pm 5 [V]$ cât și programul MCWIN.**
5. Se închide fereastra Monitor și se selectează meniul **Motion Tools**. Se alege **File** → **SAE_LAB\AE_L9.mot** → **OK**.
6. Se alimentează partea de forță a convertorului (comutatorul mare). Se alimentează excitația mașinii de curent continuu reglând curentul de excitație la valoarea nominală $I_{eN} = 0,28 [A]$ (comutatorul K_1 este pe poziția deschis (1-1')).

7. În continuare se selectează meniul **Motion** → **Setup Reference**, prin care este setat profilul frecvenței de referință, care va fi definit în **două puncte**. Pentru fiecare punct în parte după selectarea acestuia în câmpul Speed Reference se introduce valoarea frecvenței de referință $f_s = 10 [Hz]$, și se validează cu butonul “update”. Se bifează opțiunea funcționare continuă (continuous movement). (Obs: pentru funcționare la frecvență constantă cele două valori trebuie să fie egale; după fiecare valoare introdusă se apasă tasta ENTER, după care se validează cu OK (vezi figura 5.4).
8. Se compilează și se încarcă noua configurație în procesorul digital de semnal cu ajutorul butonului . De la butonul  se pornește convertorul.
9. Se măsoară: n , I_a , U_a , U_s , I_s , și se trec în tabel atât la mersul în gol cât și la diferiți curenți de sarcină, **inclusiv 0.4 [A]** (prin închiderea comutatorului K_1) reglând R_f astfel încât I_s să nu depășească 1 [A]. După citirea instrumentelor convertorul se oprește de la butonul .
10. Se vizualizează fazorul curentului statoric, curenții trifazați, componentele bifazate i_{sd} i_{sq} respectiv componentele bifazate orientate $i_{sd\lambda}$, $i_{sq\lambda}$ prin descărcarea din DSP a oscilografiilor acestora cu ajutorul butonului .
11. Se repetă punctele 7 – 10 pentru $f_s = 20, 30, 40, 50, 60 [Hz]$. Se oprește programul MCWIN apoi succesiv partea de forță a convertorului (comutatorul mare) și sursa de $\pm 5 [V]$ (comutatorul mic). Se oprește sursa de curent pentru alimentarea excitației.
12. Se ridică următoarele caracteristici:
 - a) caracteristicile $\Omega = f(M)$ pentru $f_s = 10, 20, 30, 40, 50, 60 [Hz]$.
 - b) caracteristicile $\eta = f(M)$ pentru $f_s = 10, 20, 30, 40, 50, 60 [Hz]$.
 - c) caracteristica $U_s = f(f_s)$ pentru curent de sarcină $I_s = 0.4 [A]$
13. Relații de calcul specifice mărimilor din tabel:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \left[\frac{rad}{s} \right]; s = \frac{n_s - n}{n_s}; M_{em} = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} [N \cdot m]; \text{ - formula lui Kloss simplificată,}$$

$$\text{unde } M_k = M_{kN} \cdot \left(\frac{U_s}{U_{sN}} \right)^2 \cdot \left(\frac{f_{sN}}{f_s} \right)^2 [N \cdot m]; \text{ iar } s_k = s_{kN} \cdot \frac{f_{sN}}{f_s}$$

$$P_{util} = M_{em} \cdot \Omega - p_{mec} [W] \text{ - puterea utilă ; } \eta = \frac{P_{util}}{P_{cons}} \cdot 100 [\%]$$

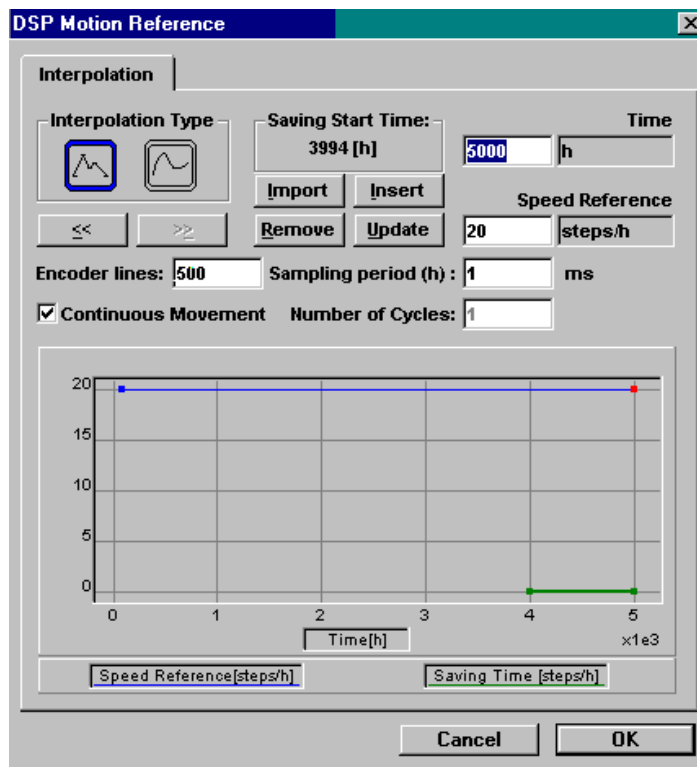


Fig. 5.4. Fereastră de setare a frecvenței de referință [23].

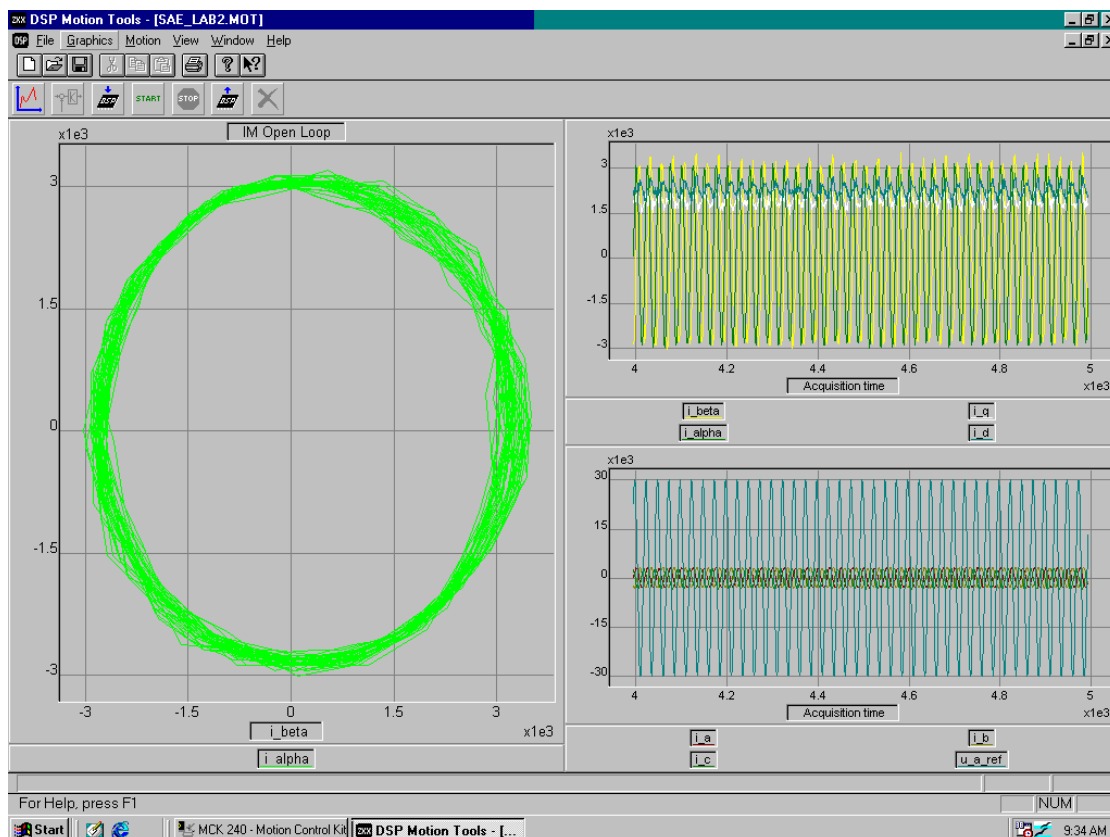


Fig. 5.5. Fereastră de vizualizare a curenților statorici [23].

Tabel 5.3. Rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate.

Nr. crt.	f_s [Hz]	n [rpm]	I_a [A]	U_a [V]	U_s [V]	I_s [A]	P_{cons} [W]	Ω [rad/s]	s	M_{em} [N · m]	P_{util} [W]	η [%]
1	10											
2	10											
3	10											
4	10											
5	20											
6	20											
7	20											
8	20											
9	30											
10	30											
11	30											
12	30											
13	40											
14	40											
15	40											
16	40											
17	50											
18	50											
19	50											
20	50											
21	60											
22	60											
23	60											
24	60											

5.3.5. Concluzii

Controlul scalar al mașinii asincrone cu rotor în scurtcircuit prin metoda $\frac{U}{f} = \text{constant}$ din această lucrare este unul în buclă deschisă, prin urmare la aceeași frecvență viteza nu rămâne constantă dacă este modificată încărcarea mașinii. Îmbunătățirea performanțelor se poate realiza prin compensarea căderii de tensiune pe rezistența statorică.

Metoda scalară de control a vitezei mașinii de inducție bazată pe principiul $\frac{U}{f} = \text{constant}$ este una relativ simplă de implementat și cu rezultate satisfăcătoare în multe aplicații practice care nu necesită precizie foarte mare, și impactul eficienței energetice mai scăzute nu este critic la puteri mici.

5.4. Lucrarea 10 - Controlul scalar al mașinii asincrone cu rotor în scurtcircuit prin metoda $U/f=\text{constant}$ cu caracteristica liniară respectiv cu tensiune inițială (Uboost)

5.4.1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator prezintă principiul de funcționare a controlului scalar al mașinii asincrone (de inducție) cu rotorul în scurtcircuit (în colivie), bazat pe legea de comandă V/Hz (metoda $U/f = \text{constant}$). Se analizează cazurile în care este utilizat controlul scalar cu caracteristică liniară fără tensiune inițială (de compensare) respectiv cazul în care se utilizează caracteristica liniară cu tensiune inițială de compensare. Alimentarea mașinii de curent alternativ se va face de la un convertor static de frecvență - CSF cu caracter de sursă de tensiune (format din redresor, circuit intermediar de tensiune continuă și inverter de tensiune - VSI).

5.4.2. Montajul experimental

În figura 5.6. este evidențiat montajul experimental aferent lucrării de laborator.

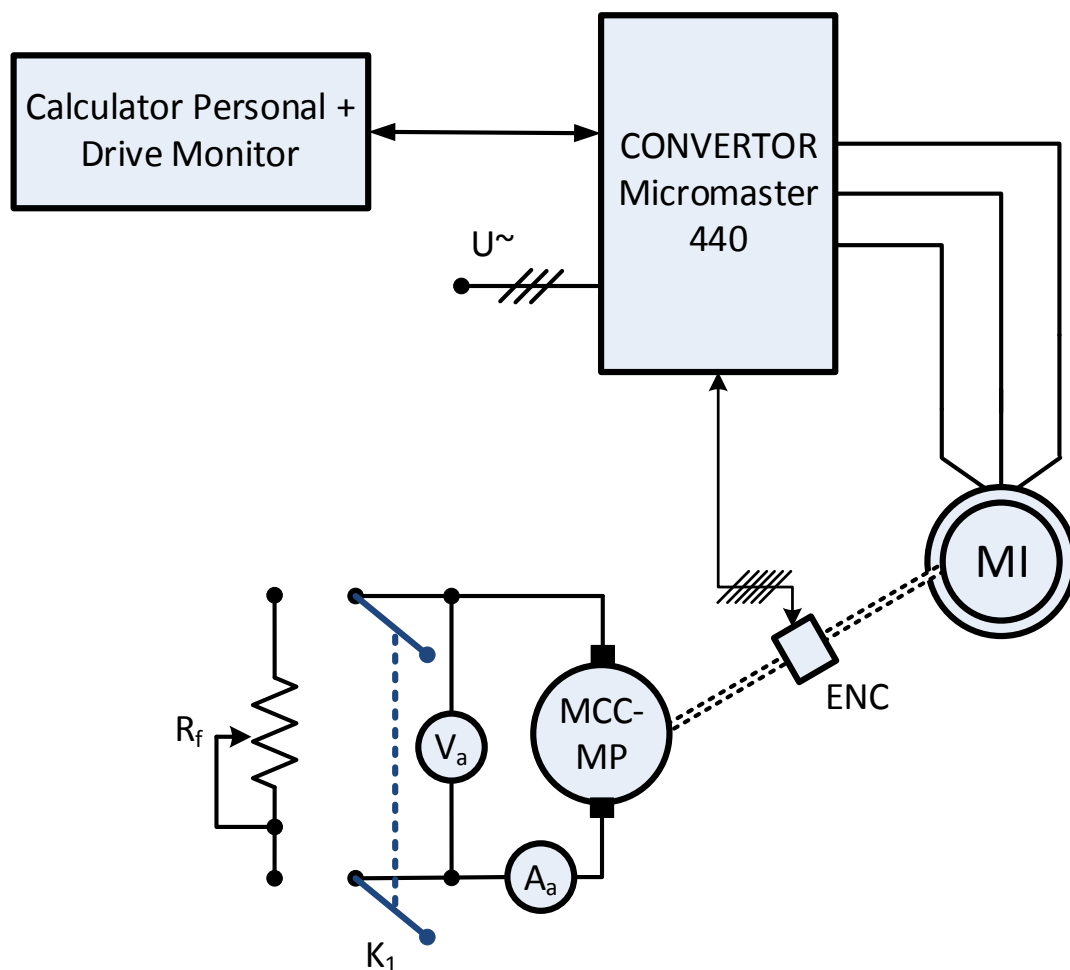


Fig. 5.6. Montajul experimental.

5.4.3. Legendă montaj experimental

Convertor Micromaster 440 – Convertor static de frecvență SIEMENS.

ENC – Encoder.

A_a – Ampermetru;

V_a – Voltmetru;

R – Reostat 29 [Ω];

MCC-MP – mașina de curent continuu cu magnet permanent;

R_f – rezistență de frânare;

K1 – comutator bipolar;

Datele mașinilor electrice:

MI – Mașina de inducție

$P_N = 550 [W]$;

$U_{sN} = 230 [V] \sim$;

$I_{sN} = 2,4 [A] \sim$;

$n_N = 2800 [rpm]$;

$R_s = 15,1 [\Omega]$;

$\cos\varphi = 0,82$;

$n_s = 3000 [rpm]$ turația de sincronism.

MCC – Mașina de curent continuu

$P_N = 400 [W]$;

$U_{aN} = 40 [V]$;

$I_{aN} = 14,5 [A]$;

$M_N = 1,27 [Nm]$;

$n_N = 3000 [rpm]$.

Obs. Mașina de current continuu (MCC) are rolul de a produce cuplul rezistent (M_r).

5.4.4. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 5.6.
2. Se alimentează Convertorul Micromaster 440 de la panou de comandă (K_1 este deschis).
3. Se pornește calculatorul și se inițializează programul **DriveMonitor**. Se alege **File** → **Set Up an USS Online Connection** → **START**. În pagina următoare se apasă butonul **Direct to Parameter List**. În acest mod se alege opțiunea de afișare a întregului set de parametri in modul „on line”. **Se programează parametri de funcționare pentru controlul U/f = ct: P1300 = 0** (Control mod -V/f with linear characteristic), **P1310 = 0%** (fără tensiune U_{boost}), **P1335 = 0 %** (fără compensarea alunecării).
4. Se identifică parametri ce reprezintă frecvența de ieșire (r0024), curentul statoric de ieșire (r0027), tensiunea statorică de ieșire (r0025), cuplul actual (r0031).
5. În câmpul Setpoint se introduce frecvența de referință $f^{ref} = 0 \%$, acesta reprezentând procent din valoarea nominală de 50 [Hz]. Se pornește inverterul de la butonul de **START (butonul verde în DriveMonitor)**. Se completează Tabelul 5.4 cu valorile pentru: f_s, U_s, I_s, n și M .

6. Se închide K_1 și se fixează din R_f diferite valori pentru curentul I_a (0,3, 0,5 [A]) și datele se trec în Tabelul 1. **La frecvențe de referință mai mari decât 0 % se setează curenți I_a mai mari. Se deschide $K1$ și se pune R_f la valoarea maximă.**
7. Se repetă punctele 5 și 6 pentru următoarele valori ale frecvenței: 10; 20; 40; 60; 80; 100 %.
Obs 1: La frecvența $f^{ref} = 10$ [Hz] se setează valori mai mari ale curentului I_a (1, 2, 4 [A]). **Obs 2:** La frecvențe de referință mai mari ($f^{ref} > 10$ [Hz]) se setează următoarele valori ale curentului: $I_a = 1, 2, 4, 6$ [A].
8. Sistemul se oprește de la **butonul roșu de STOP din DriveMonitor.**
9. Se programează **P1310 = 50%** (cu tensiune U_{boost}).
10. Se repetă punctele 5, 6 și 7. Datele se trec în Tabelul 5.5.
11. Sistemul se oprește de la **butonul roșu de STOP din DriveMonitor.**
12. Se ridică următoarele caracteristici:
 - a. caracteristica de comandă $U_s = f(f_s)$ cu și fără U_{boost} , pentru cazurile în care curentul $I_a = 0$ [A] (pe același grafic pentru toate frecvențele).
 - b. caracteristicile $n = f(M)$ pentru $f^{ref} = constant$ cu și fără U_{boost} pentru fiecare frecvență (pe același grafic).
 - c. caracteristica $I_s = f(f_s)$ cu și fără U_{boost} pentru curentul de sarcină $I_a = 0$ [A] (pe același grafic pentru toate frecvențele).

Figura 5.7. prezintă caracteristicile de comandă la $\frac{U}{f} = ct.$, rezultate în urma parametrizării convertorului static de frecvență conform celor indicate în mersul lucrării.

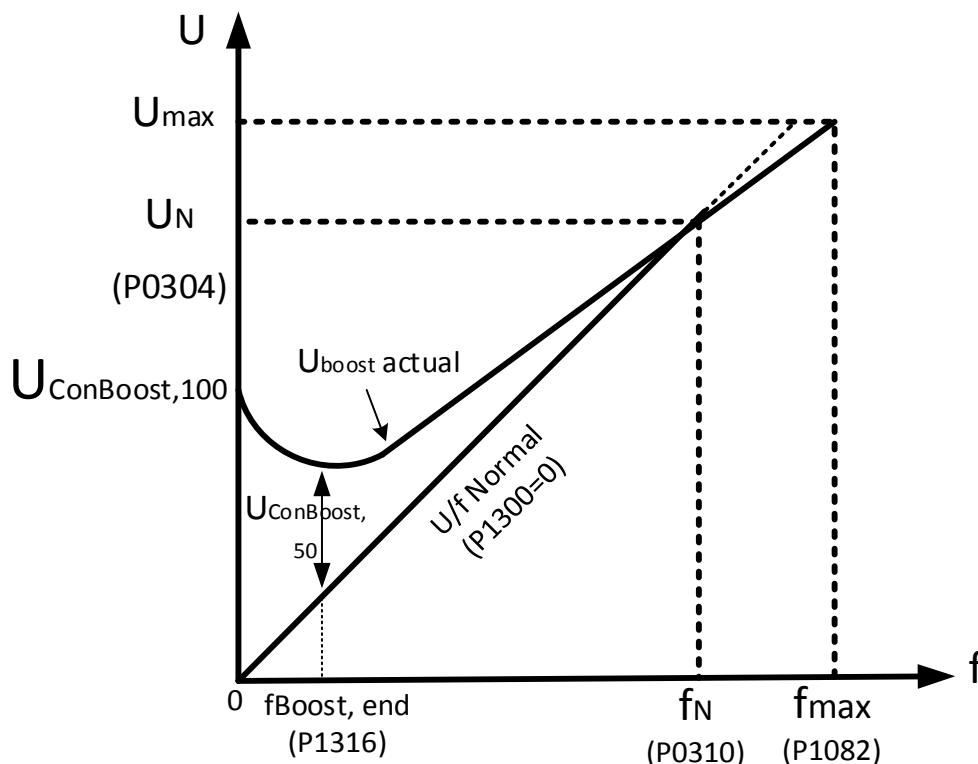


Fig. 5.7. Diagrama de comandă la $\frac{U}{f} = ct.$, cu caracteristica liniară respectiv cu compensare cu tensiune inițială (U_{boost}) utilizată în practică [24].

Tabel 5.4. Caracteristică liniară fără U_{boost} (**P1300 = 0, P1310 = 0%, P1335 = 0 %**)

Nr. crt.	f^{ref} [%]	f_s [Hz]	U_s [V] În gol	I_s [A] În gol	n_s [rpm]	$I_a = 0$ [A]		$I_a = 1$ [A]		$I_a = 2$ [A]		$I_a = 4$ [A]		$I_a = 6$ [A]	
						n_0	M_0 r0031	n_1	M_1 r0031	n_2	M_2 r0031	n_3	M_3 r0031	n_4	M_4 r0031
		r0024	r0025	r0027											
1	0				0										
2	10				300										
3	20				600										
4	40				1200										
5	60				1800										
6	80				2400										
7	100				3000										

Tabel 5.5. Caracteristică liniară cu U_{boost} (**P1300 = 0, P1310 = 50%, P1335 = 0 %**)

Nr. crt.	f^{ref} [%]	f_s [Hz]	U_s [V] În gol	I_s [A] În gol	n_s [rpm]	$I_a = 0$ [A]		$I_a = 1$ [A]		$I_a = 2$ [A]		$I_a = 4$ [A]		$I_a = 6$ [A]	
						n_0	M_0 r0031	n_1	M_1 r0031	n_2	M_2 r0031	n_3	M_3 r0031	n_4	M_4 r0031
		r0024	r0025	r0027											
1	0				0										
2	10				300										
3	20				600										
4	40				1200										
5	60				1800										
6	80				2400										
7	100				3000										

5.4.5. Concluzii

În cazul controlului scalar ($U/f = \text{constant}$) modificând atât tensiunea de alimentare statorică cât și frecvența acesteia după legea de comandă $U/f = \text{constant}$, cuplul dezvoltat de mașina asincronă (inclusiv cuplul critic) rămâne constant.

Îmbunătățirea performanțelor se realizează prin compensarea căderii de tensiune pe rezistența statorică (termenul U_{s0}). Necesitatea acestei componente de tensiune (U_{s0}) apare din cauza neglijării rezistenței statorice, care la frecvențe mici nu mai este neglijabilă și este necesară pentru magnetizarea mașinii la funcționarea acesteia la frecvențe mici (la pornire), respectiv pentru a compensa pierderile la pornire datorate forțelor statice de frecare.

5.5. Lucrarea 11 - Reglajul vectorial a turației mașinii asincrone cu rotor în scurtcircuit cu orientare după fluxul rotoric

5.5.1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator prezintă principiul de funcționare a controlului vectorial al unui sistem de acționare cu mașina asincronă. Sistemul de acționare este format din mașina asincronă (de inducție) cu rotorul în scurtcircuit (în colivie), alimentată de un convertor static de frecvență - CSF sursă de tensiune (format din redresor, circuit intermediar de tensiune continuă și inverter de tensiune - VSI, comandat PWM), traductoare de viteză respectiv de curent și tensiune statorică (din care se determină fluxul după care se face orientarea după câmp) și un sistem de calcul în care s-a implementat strategia de control vectorial.

5.5.2. Montajul experimental

În figura 5.8 se prezintă montajul experimental corespunzător prezentei lucrări de laborator.

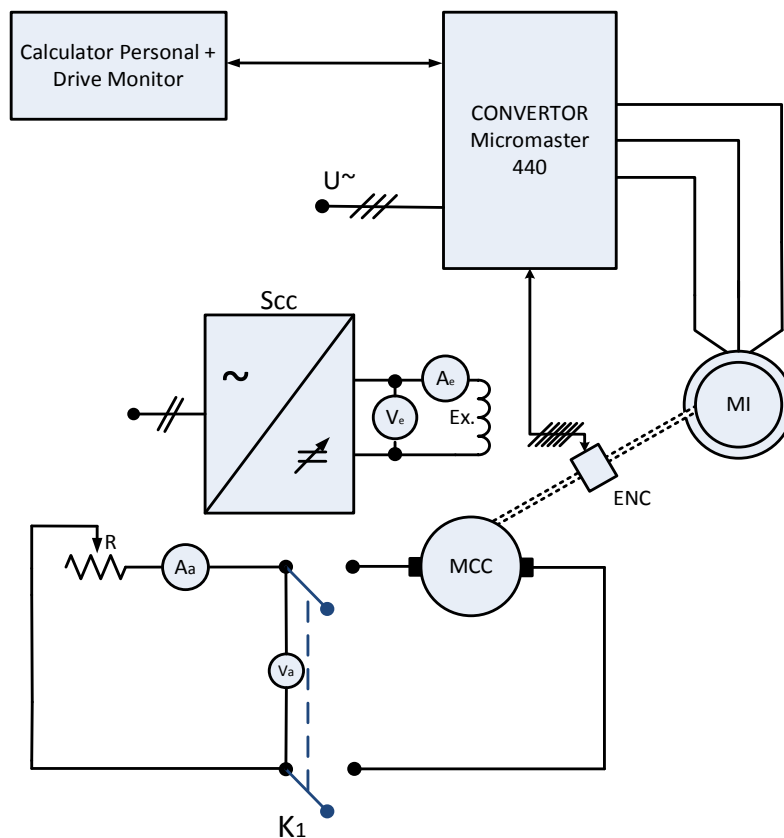


Fig. 5.8. Montajul experimental.

În această lucrare, invertorul MICROMASTER 440 este configurat pentru controlul în buclă închisă de viteză utilizând principiul controlului vectorial. Tensiunea continuă de intrare este obținută de la un redresor trifazat cu diode, ieșirea acestuia fiind prevăzută cu condensator de capacitate mare pentru asigurarea caracterului sursă de tensiune a convertorului static de frecvență obținut prin alăturarea celor două convertoare. Pentru a asigura regimul de redresor a invertorului MICROMASTER 440 (în timpul regimului de frânare a mașinii de inducție acționată) circuitul intermediar de curent continuu este prevăzut cu un sistem de disipare a energiei de frânare compus dintr-un tranzistor și o rezistență de frânare. Tranzistorul este comandat și introduce în circuitul intermediar de curent continuu rezistența de frânare dacă tensiunea din circuit depășește o valoare prestabilită. În acest mod sistemul de acționare poate funcționa în toate cele patru cadrane.

5.5.3. Legendă montaj experimental

Convertor Micromaster 440 – Convertor static de frecvență;

ENC – Encoder;

A_a – Ampermetru;

V_a – Voltmetru;

f_s – frecvențmetru, watmetru;

R – Reostat 29 [Ω].

Scc – sursa de curent continuu.

Datele mașinilor electrice:

MCC – Mașina de curent continuu

$P_N = 400 [W]$;

$U_N = 40 [V]$;

$I_N = 14,5 [A]$;

$M_N = 1,27 [Nm]$;

$U_e = 100 [V]$;

$n_N = 3000 [rpm]$.

MI – Mașina de inducție

$P_N = 550 [W]$;

$U_{sN} = 230 [V] \sim$;

$I_{sN} = 2,4 [A] \sim$;

$n_N = 2800 [rpm]$;

$R_s = 15,1 [\Omega]$;

$\cos\varphi = 0,82$;

$n_s = 3000 [rpm]$ turația de sincronism.

Obs. În cadrul acestei lucrări rolul mașinii de curent continuu (MCC) este acela de a produce cuplul de sarcină (M_r).

5.5.4. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 5.8.
2. Se alimentează Convertorul Micromaster 440 de la panoul de comandă (K_1 este deschis).
3. Se pornește calculatorul și se inițializează programul **DriveMonitor**. Se alege **File** → **Set Up an USS Online Connection** → **START**. În pagina următoare se apasă butonul **Direct to Parameter List**. În acest mod se alege opțiunea de afișare a întregului set de parametri. **Se verifică dacă parametri de funcționare sunt pentru controlul vectorial al turației: P005 = 21** (Display selection), **P1300 = 21** (Control mod - Vector control with sensor), **P1500 = 5** (Selection of torque setpoint-USS on COM link), **P2003 = 1.5 [Nm]** (Reference torque).
Se identifică parametri ce reprezintă, cuplul actual ($r0080$), curentul statoric de ieșire ($r0027$), tensiunea statorică de ieșire ($r0072$), curentul statoric activ ($r0030$), curentul statoric reactiv ($r0029$).
4. Se alimentează excitația mașinii de curent continuu la curent nominal $I_{eN} = 0.35$ [A]
5. În câmpul Setpoint se introduce turația de referință $n^{ref} = 20$ %. Se pornește invertorul de la butonul de **START (butonul verde în DriveMonitor)**. Se completează tabelul pentru funcționarea mașinii de inducție la mers în gol.
6. Se închide K_1 și se fixează din reostatul R diferite valori pentru curentul I_a (0.5; 1; 1.5; 2 [A]). La turații de referință de peste 40 % se vor seta valori mai mari pentru curentul I_a (1; 3; 6 [A]). Se trec în tabel următoarele date: n , U_a , U_s , I_s , $i_{sd\lambda_r}$, $i_{sq\lambda_r}$, M_{ca} .
7. Se repetă măsurătorile la mers în gol și în sarcină, pentru următoarele valori ale turației: 40; 60; 80; 100 %.
8. Sistemul se oprește de la **butonul roșu de STOP din DriveMonitor**.
9. Cu comutatorul K_1 deschis și invertorul oprit se aplică o referință de turație de 20 % apoi se realizează o reversare prin setarea unei referințe de -20 % și se observă comportamentul acționării la reversare de viteză.
10. Se repetă măsurătorile în gol și în sarcină pentru următoarele valori ale turației: -20 ; -40 ; -60 ; -80 %.
11. Sistemul se oprește de la butonul roșu din programul DriveMonitor.
12. Se ridică următoarele caracteristici:
 - f. caracteristicile mecanice $n = f(M_{ca})$ pentru $n^{ref} = const.$ (pe același grafic, pentru fiecare n^{ref}).
 - g. caracteristicile $U_s = f(n^{ref})$ pentru curenții de sarcină $I_a = 0$ respectiv 1 A.
 - h. caracteristicile $i_{sd\lambda_r} = f(M_{ca})$ și $i_{sq\lambda_r} = f(M_{ca})$ corespunzătoare turației de referință $n^{ref} = 100$ [%].

Tabel 5.6. Rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate.

Nr. crt.	n^{ref} [%]	n [rpm]	I_a [A]	U_a [V]	U_s [V] r0072	I_s [A] r0027	$i_{sd\lambda_r}$ [A] r0029	$i_{sq\lambda_r}$ [A] r0030	M_{ca} [N·m] r0080
1	20		0						
2	20		0,5						
3	20		1						
4	20		1,5						
5	20		2						
6	40		0						
7	40		0,5						
8	40		1						
9	40		1,5						
10	40		2						
11	60		0						
12	60		1						
13	60		3						
14	60		6						
15	80		0						
16	80		1						
17	80		3						
18	80		6						
19	100		0						
20	100		1						
21	100		3						
22	100		6						
23	-20		0						
24	-20		-0,5						
25	-20		-1						
26	-20		-1,5						
27	-20		-2						
28	-40		-0						
29	-40		-0,5						
30	-40		-1						
31	-40		-1,5						
32	-40		-2						
33	-60		0						
34	-60		-1						
35	-60		-3						
36	-60		-6						

5.5.5. Concluzii

Controlul vectorial al mașinii asincrone (de inducție) reprezintă cea mai performantă metodă de control a acestei mașini electrice, atât din punct de vedere al performanțelor de control al dinamicii (vitezei) mașinii (reglare foarte precisă, timp de răspuns scurt, suprareglaj mic) cât și al eficienței energetice a acționării (pierderi scăzute, mai ales în regimurile dinamice – porniri, opriri, reversări de sens). Controlul vectorial cu orientare după fluxul rotorului este cea mai precisă dintre metodele de control vectorial, însă presupune cea mai ridicată cantitate de calcule pentru controlul mașinii, deci un sistem de calcul puternic și convertoare electronice de putere performante.

5.6. Lucrarea 12 - Controlul vectorial al vitezei motorului sincron cu magnet permanent alimentat de la un inverter de tensiune

5.6.1. Scopul lucrării

Lucrarea de laborator prezintă principiul de funcționare a controlului vectorial al unui sistem de acționare cu mașina sincronă. Sistemul de acționare este format din mașina sincronă cu magnet permanent, un convertor static de frecvență - CSF sursă de tensiune (format din redresor necomandat, circuit intermediar de tensiune continuă și inverter de tensiune - VSI, comandat în curent în buclă închisă - PWM) care alimentează mașina de curent alternativ, traductoare de viteză respectiv de curent statoric și un sistem de calcul în care s-a implementat strategia de control vectorial.

5.6.2. Montaj experimental

Montajul experimental corespunzător prezentei lucrări de laborator este expus în figura 5.9.

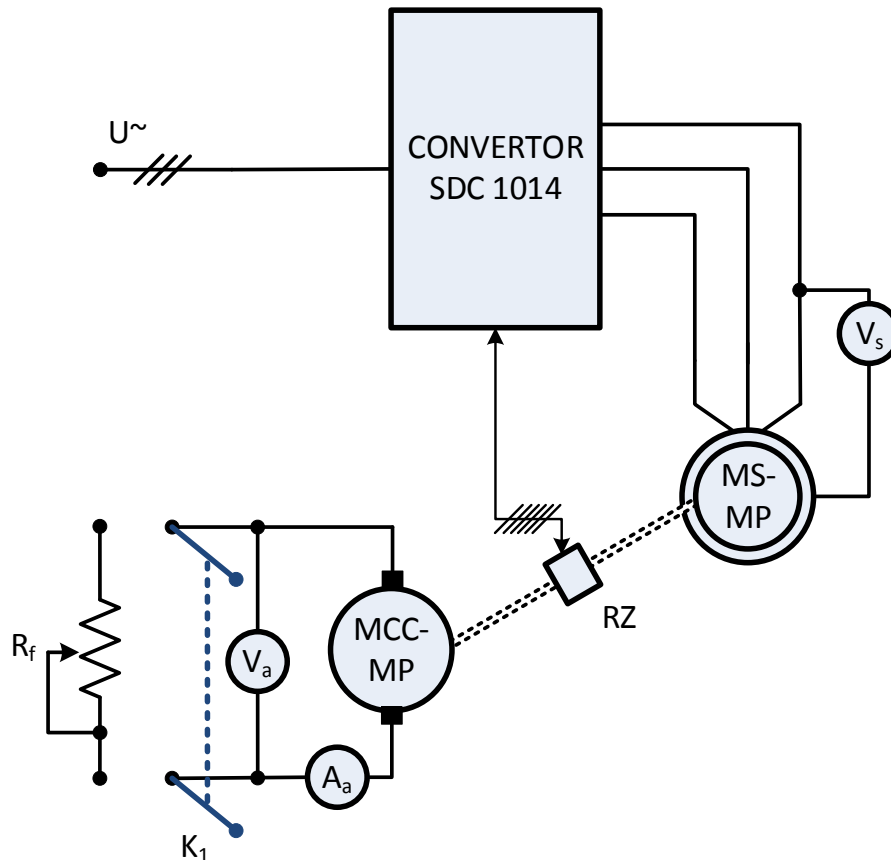


Fig. 5.9. Montajul experimental.

Ansamblul mașină - convertor din prezenta lucrare poate asigura o funcționare în 4 cadrane. În regim de generator energia recuperată se disipă pe o rezistență, a cărei cuplare/decuplare este comandată prin intermediu unui tranzistor legat în serie cu aceasta. Convertorul este cuplat direct la rețeaua trifazată. Acesta poate fi parametrizat prin intermediul unui panou de comandă care este cuplat printr-o interfață serială RS 485.

Convertorul conține două unități de calcul:

- 1) μC - master - asigură controlul general al invertorului;
- 2) **FPGA**- are implementat sistemul de control vectorial.

Sistemul de calcul controlează sistemul de acționare și în aceleași timp realizează conexiunile între părțile componente ale convertorului.

FPGA-ul (Field Programmable Gate Array) este un circuit logic programabil în care este implementat sistemul de control vectorial.

Prin intermediul interfeței de programare - citire, sistemul poate fi configurat cu ajutorul unui set de parametri. Acești parametri sunt împărțiți în două categorii:

- Parametri de program - **Prxx** - pot lua valori numerice într-un domeniu stabilit de către producător.

- Parametri binari - **bx** - pot lua doar valori de 0 sau 1, și de cele mai multe ori sunt comutatoare prin intermediul cărora se activează anumite părți din sistem. Astfel pot fi construite diferite configurații de sistem, în limitele permise.

5.6.3. Legendă montaj experimental

CONVERTOR SDC 1014 - convertor static de frecvență trifazat de 4 cadrane;

RZ - Rezolver;

A_a - Ampermetru;

V_a - Voltmetru;

V_s - Voltmetru;

W_{in} - Wattmetru, cosfimetru;

R - Reostat 29 [Ω];

K_1 - Comutator basculant;

Datele mașinilor electrice:

MS-MP - Mașina sincronă cu magnet

$P_N = 540 [W]$;

$U_{sN} = 220 [V] \sim$;

$I_{sN} = 1,6 [A] \sim$;

$n_N = 1000 [rpm]$;

$R_s = 10 [\Omega]$;

$M_N = 1,7 [N \cdot m]$;

$z_p = 3$;

$J = 1,7 \cdot 10^{-4} [kg \cdot m^2]$.

MCC - Mașina de curent continuu

$P_N = 1000 [W]$;

$U_{aN} = 82 [V]$;

$I_{aN} = 15 [A]$;

$n_N = 3000 [rpm]$;

$M_N = 3,2 [Nm]$.

Obs. Rolul mașinii de curent continuu (MCC) este de a produce cuplul de sarcină (M_r)

5.6.4. Mersul lucrării

1. Se realizează montajul din figura 5.9.
2. Cu comutatorul K_1 este deschis se alimentează convertorul static de frecvență și se parametrizează sistemul pentru reglajul vitezei.
3. Pentru ca sistemul să funcționeze cu controlul vitezei, se vor parcurge următorii pași:
 - Se verifică parametrul b02 și se asigură că valoarea acestuia să fie 0, pentru ca alimentarea motorului să fie oprită în timpul parametrizării sistemului.
 - Prin intermediul parametrului Pr20 se alege care din cele patru valori de turație programate va fi luată în considerare. Se va seta la valoarea 0, pentru a se lua în considerare o singură turație, adică aceea de la referința Pr00.
 - Se va programa referința de turație, adică parametrul Pr00, la valoarea dorită.
 - Se verifică dacă parametrul Pr21 este la valoarea 0, ceea ce înseamnă că sistemul va recunoaște turația de referință aleasă.
 - Se verifică valoarea parametrului Pr42 care reprezintă protecția motorului la curentul de vârf. Această valoare este dată în procente față de curentul nominal al convertorului (5,6 [A]), iar în cazul motorului de față trebuie să fie de 50% (ceea ce înseamnă 2,8 [A] pentru motorul nostru având curentul nominal de 1,6 [A]).
 - Se verifică valoarea parametrului Pr45 care reprezintă protecția motorului la curent maxim de funcționare, fiind o protecție termică. Această valoare este dată în procente față de curentul nominal al convertorului ($I_N = 5.6$ [A]), iar în cazul motorului de față trebuie să fie de 30% (ceea ce înseamnă 1.68 [A] pentru motorul din laborator acesta având curentul nominal de 1,6 [A]).-Se va porni motorul prin schimbarea valorii parametrului b02 de la 0 la 1.
4. Se setează $n^{ref} = 500$ [rpm] și se completează valorile în tabel pentru mersul în gol. Se trec în tabel următoarele date: $n^{m\ddot{a}s}$, U_a , U_s , I_s [%]. Se închide K_1 și se fixează din R_f , diferite valori pentru curentul I_a , ($I_a = 2.5; 3.5; 5$ [A]).
5. Se repetă punctul 4 pentru următoarele valori ale turației: 1000; 2000; 3000 [rpm].
6. Se repetă punctul 4 pentru următoarele valori ale turației $n^{ref} = -500, -1000$ și -1000 [rpm].
7. Se ridică următoarele caracteristici:
caracteristicile mecanice $n = f(M)$ pentru $n^{ref} = const.$
8. Relații de calcul ale mărimilor din tabel:

$$\Omega = \frac{\pi n}{30} \left[\frac{rad}{s} \right], M_{em} = \frac{3}{2} \cdot Z_p \cdot \Psi_{PM} \cdot I_s = 1.05 \cdot I_s [N \cdot m]$$

Pr40 – procent din valoarea nominală a curentului convertorului ($I_N = 5.6$ [A])

Tabel 5.7. Rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate.

Nr. crt.	n^{ref} [rpm] (Pr00)	$n^{m\ddot{a}s}$ [rpm] (Pr59)	I_a [A]	U_a [V]	U_s [V]	I_s [%] (Pr40)	I_s [A]	Ω [rad/s]	M_{em} [N · m]
1	500		0						
2	500		2,5						
3	500		3,5						
4	500		5						
5	1000		0						
6	1000		2,5						
7	1000		3,5						
8	1000		5						
9	2000		0						
10	2000		2,5						
11	2000		3,5						
12	2000		5						
13	3000		0						
14	3000		2,5						
15	3000		3,5						
16	3000		5						
17	-500		0						
18	-500		2,5						
19	-500		3,5						
20	-500		5						
21	-1000		0						
22	-1000		2,5						
23	-1000		3,5						
24	-1000		5						
25	-3000		0						
26	-3000		2,5						
27	-3000		3,5						
28	-3000		5						

5.6.5. Concluzii

Schema de control vectorial a sistemului de acționare cu mașina sincronă, orientată după fluxul magnetului permanent conține doar o buclă de reglare, cea activă în care este controlată componenta de curent producătoare de mișcare din ecuația cuplului. Pe bucla de control reactivă, fluxul de orientare fiind constant (fluxul magnetului permanent) se renunță la controlul acestuia. Ca urmare mărimea de referință pe această buclă de reglare este componenta reactivă a curentului care se impune la valoare zero (anularea reacției longitudinale). Prin anularea reacției longitudinale cu orientare după fluxul rotoric se realizează perpendicularitatea dintre fazorul curentului statoric și cel al fluxului magnetului

permanent, caz în care cuplul dezvoltat este maxim (raportat la curentul absorbit), la fel cum se întâmplă în cazul mașinii de curent continuu compensate. În lucrarea de față orientarea după câmp s-a făcută după fluxul magnetului permanent (orientare după rotor) al mașinii sincrone cu magnet permanent. Alimentarea motorului sincron cu magnet se face cu un invertor cu caracter de sursă de tensiune controlat în buclă închisă de curent (control cu histereză).

6. Bibliografie

- [1] A. Fransua și R. Măgureanu, *Mașini și Acționări Electrice Elemente de Execuție*. Editura Tehnica, 1986.
- [2] A. Kelemen, *Acționări Electrice*, Ediția a doua. Editura Didactică și Pedagogică - București, 1979.
- [3] A. Kelemen și M. Imecs, *Sisteme de reglare cu orientare după câmp ale mașinilor de curent alternativ*. București: Editura Academiei Republicii socialiste România, 1989.
- [4] G. Tunsoiu, E. Seracin, și C. Saal, *Acționări Electrice*. 1982.
- [5] A. E.-S. Mohamed, *Fundamentals of Electric Drives*. Brooks/Cole Publishing Company, 2000.
- [6] N. Mohan, *Electric drives: an integrative approach*, Year 2003 ed. Minneapolis: MNPERE, 2003.
- [7] J. Pyrhonen, „Electrical Machine Drives Control”.
- [8] „ABB drives - Technical guide No. 7 - Dimensioning of a drive system”.
- [9] S.-K. Sul, *Control of electric machine drive system*. în IEEE Press series on power engineering, no. 55. Hoboken, N.J: Wiley-IEEE, 2011.
- [10] A. Kelemen și M. Imecs, *Electronică de putere*. Editura Didactică și Pedagogică - București, 1983.
- [11] R. Marschalko, F. Denes, și P. Teodosescu, *Electronica pentru ingineri electrotehnicieni*, vol. IV, Elemente moderne de electronica de putere. Cluj Napoca: Mediamira, 2014.
- [12] V. Subrahmanyam, *Electric drives: concepts and applications*, 2nd ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education, 2011.
- [13] „SIMOREG DC-MASTER, Operating Instructions”, *Application Center Winder*, vol. Edition 06.
- [14] A. Hughes, *Electric Motor and Drives*, Third edition. Elsevier, 2006.
- [15] B. K. Bose, *Power Electronics and Motor Drives*. Elsevier, 2006.
- [16] M. H. Rashid, Ed., *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook*, 3rd ed. Burlington, MA: Elsevier, 2011.
- [17] I. I. Incze, M. Imecs, și C. Szabó, „SIMPLE VOLTAGE – HERTZ CONTROL”, 2004.
- [18] B. M. Wilamowski și J. D. Irwin, *Power electronics and motor drives*, Second edition. CRC Press, 2011.
- [19] N. P. Quang, J.-A. Dittrich, și N. P. Quang, *Vector control of three-phase AC machines: system development in the practice*. în Power systems. Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [20] I. Birou, *Metode performante de control in actionari electrice de curent alternativ*. Casa cărții de știință, 1999.
- [21] Z. Yu, „Space-Vector PWM With TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns”.
- [22] D. W. J. Pulle, P. Darnell, și A. Veltman, *Applied Control of Electrical Drives: Real Time Embedded and Sensorless Control using VisSim™ and PLECS™*. în Power Systems. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-20043-9.
- [23] „T E C H N O S O F T DSC Motion Solutions, User Manual”. 2009.

[24] „MICROMASTER 440 Parameter List Issue 12/01”. [Online]. Disponibil la:
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/860/9294860/att_79695/v1/MM440_PLI_1201_en.pdf