

ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII, TINERETULUI ȘI SPORTULUI



Universitatea din Craiova

Facultatea de Inginerie în
Electromecanică, Mediu și
Informatică Industrială

B-dul Decebal nr.107 200440 – Craiova

Tel, Fax 0251 435 255

<http://www.em.ucv.ro>



Ing. Mihăiță LINCĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

**CERCETĂRI PRIVIND ENERGETICA SISTEMELOR DE
ACȚIONARE
CU MOTOR ASINCRON ȘI CONVERTOARE STATICE
DE TENSIUNE ȘI FRECVENȚĂ PWM**

rezumat

Conducător științific

Prof. dr. ing. Alexandru BITOLEANU

**CRAIOVA
2010**

Cuprins teza

Introducere

1. Caracterizarea energetică în curent alternativ trifazat, nesinusoidal
 - 1.1 Puterea instantanee, activă și aparentă
 - 1.2 Tratarea armonică a puterilor
 - 1.3 Teoria fazorială a puterilor pentru sistemul trifazat
 - 1.4 Factori sintetici de analiză energetică
 - 1.5 Concluzii
2. Sisteme de acționare electrică cu motor asincron și convertor static de tensiune și frecvență, sursă de tensiune și comandă PWM
 - 2.1 Structura convertoarelor statice indirecte de tensiune și frecvență
 - 2.2 Modelarea motorului asincron
 - 2.2.1 Modelul motorului asincron cu considerarea simplificată a saturației
 - 2.2.2 Modelul motorului asincron fără considerarea saturației
 - 2.2.3 Metodă de aproximare a curbei de magnetizare
3. Metode de modulare utilizate în comanda S.A.E cu M.A și CSTFIU PWM
 - 3.1 Generalități
 - 3.2 Metode de comandă prin semnale de comandă variabile
 - 3.3 Modulația sinusoidală
 - 3.4 Modulația vectorială
 - 3.5 Modulația trapezoidală
4. Pierderile în sistemele de acționare cu CSTFIU PWM și motoare asincrone trifazate
 - 4.1 Generalități
 - 4.2 Modele de pierderi ale motoarelor și convertoarelor
 - 4.2.1 Pierderile la frecvența fundamentală în cazul motoarelor asincrone
 - 4.2.2 Pierderile armonice ale motorului asincron
 - 4.2.3 Pierderile în convertorul static
5. Analiza energetică
 - 5.2 Modelul sistemului de acționare
 - 5.3 Sistem de acționare motor asincron și CSITF cu modulație sinusoidală
 - 5.4 Sistem de acționare motor asincron și CSITF cu modulație trapezoidală
 - 5.5 Sistem de acționare motor asincron și CSITF cu modulație fazorială
 - 5.6 Analiza comparativă
6. Analiza energetică experimentală
 - 6.2 Obiectivele analizei
 - 6.3 Infrastructura experimentală
 - 6.4 Protocolul de experimentări
 - 6.5 Breviar pentru calculul indicatorilor energetici
 - 6.6 Indicatori energetici pentru frecvența de 10 Hz
 - 6.7 Indicatori energetici pentru frecvența de 20 Hz
 - 6.8 Indicatori energetici pentru frecvența de 50 Hz
 - 6.9 Analiza energetică comparativă, în funcție de frecvența tensiunii de alimentare, la cuplu constant

Concluzii

Bibliografie

REZUMAT

Introducere

Dezvoltarea tehnicilor de modulare în lățime a impulsurilor a fost favorizată de progresele tehnologice în domeniul elementelor semiconductoare cu timpi de comutație reduși și a permis, în special pentru invertoarele trifazate de tensiune destinate alimentării mașinilor de curent alternativ, un control mult mai bun al tensiunii de ieșire atât în amplitudine cât și în frecvență .

Este cunoscut că, obținerea unui sistem de acționare performant este condiționată, pe de o parte, de utilizarea unor componente performante (atât ca structură fizică, cât și ca modalitate de comandă) și, pe de alta, de realizarea unor strategii de comandă, care să utilizeze în mod optim componentele pentru a obține, în ansamblu, o funcționare optimală.

Eforturile de perfecționare sunt orientate pe două direcții principale:

1. obținerea unor performanțe dinamice cât mai ridicate;
2. obținerea unor performanțe energetice cât mai ridicate;

În mod firesc, prima direcție se referă, în special, la sistemele de mică putere, care au drept obiectiv fie o poziționare cât mai rapidă și precisă, fie obținerea unei productivități mai mari.

Mai ales la puteri semnificative, performanțele energetice ale convertoarelor statice capătă o importanță deosebită. Astfel, convertoarele statice sunt, în același timp, sarcini deformante pentru rețeaua de alimentare, și surse de energie deformantă pentru motoarele electrice, iar aspectele energetice pe care funcționarea lor le implică sunt strâns legate de problema compatibilității electromagnetice a acestora.

Este semnificativ că, obținerea unor sisteme performante din punct de vedere energetic, conduce și la obținerea unor performanțe dinamice superioare, în special prin utilizarea eficientă a echipamentelor sistemului.

Necesitățile privind calitatea energiei au determinat căutări, eforturi și fonduri importante în direcția realizării unor convertoare statice cât mai “curate”.

Dar, calitatea energiei vehiculată de un sistem de acționare electrică este influențată, pe lângă structura convertorului și tehnica de modulare aleasă, și de filtrele plasate la intrare sau în circuitul intermediar de curent continuu, precum și de strategia de reglare adoptată pentru reglarea vitezei.

Se apreciază că, o analiză energetică completă trebuie să se refere atât la factorul de distorsiune și la zona în care sunt plasate armonicile superioare importante, dar, mai ales, în mod direct, la puterile care se vehiculează într-un sistem de acționare electrică utilizând convertoare statice.

Aceste elemente și, nu în ultimul rând, faptul că literatura de specialitate tratează preponderent performanțele dinamice ale sistemelor de acționare electrică, au determinat alegerea temei tezei de doctorat.

Lucrarea este structurată pe șase capitole de fond, unul de concluzii și o introducere.

În *primul capitol*, este realizată sintetic caracterizarea regimului nesinusoidal din punct de vedere energetic, prezentându-se conceptele și definițiile general acceptate, precum și diferitele teorii și controverse existente în literatura de specialitate. După introducerea câtorva termeni specifici, se prezintă puterile ce caracterizează regimul nesinusoidal, în varianta propusă de profesorul C. Budeanu, dar și observațiile critice și variantele propuse de alți cercetători, în special în ultimele două decenii. Se face apoi un comentariu asupra definițiilor puterii deformante și se prezintă teoria generală a puterii utilizând fazorii reprezentativi, pentru cazul general și pentru cazul unui motor asincron. Capitolul se încheie cu definirea factorilor de analiză energetică și câteva concluzii și observații critice.

Capitolul al doilea prezintă, structura și modelarea convertorului static indirect de tensiune și frecvență precum și modelarea motorului asincron. Pentru modelarea inverterului de tensiune se deosebesc două tipuri de modele: un model realizat cu ajutorul blocurilor din “SimPowerSystems” și un model Simulink realizat pe baza ecuațiilor de funcționare ale inverterului ținând cont și de

strategia de modulare. Datorită duratei mari de simulare în cazul modelului realizat cu ajutorul blocurilor din "SimPowerSystems", studiul a fost efectuat pe modelul Simulink. Pentru motorul asincron s-au realizat, într-o manieră proprie, modele SIMULINK cu considerarea simplificată a saturației și fără considerarea saturației, pe baza modelelor matematice existente în literatură. Se propune o relație originală de aproximare a curbei de magnetizare, pe baza căreia se obține expresia analitică a inductivității mutuale statică.

În urma evoluției electronicii de putere, dar și a electronicii digitale și a microcontrolerelor, au apărut dispozitive semiconductoare de putere complet comandate de putere mare și performanțe sporite, dar și circuitele de comandă corespunzătoare acestora. Implicit au fost propuse și metode de comandă evolute ce au exploatat aceste dispozitive moderne. Dintre acestea în *capitolul 3* se au în vedere trei tipuri de modulație în durată: modulația sinusoidală, modulația vectorială și modulația trapezoidală. Utilizând mediul Matlab-Simulink au fost realizate pe baza celor 3 strategii de modulare modelele Simulink ale invertoarelor în cele trei cazuri.

O prezentare a pierderilor care apar în sistemele de acționare cu CSTF PWM și motoare asincrone trifazate este realizată în *capitolul 4*. Astfel, după o scurtă trecere în revistă a pierderilor care apar în lanțul de conversie energetică, sunt detaliate componentele pierderilor existente în motorul electric și convertorul static.

Capitolul 5 este dedicat analizei energetice a sistemului de acționare, în cele trei structuri adoptate, pentru diferite puncte statice de funcționare. S-a avut în vedere alimentarea motorului asincron de la un convertor static indirect sursă de tensiune în cele trei variante de modulație (sinusoidală, trapezoidală și vectorială), dar și de la o sursă trifazată de tensiune sinusoidală, astfel încât să fie posibilă compararea performanțelor. Astfel, modelul global al sistemului de acționare, realizat în mediul de programare MATLAB/SIMULINK, furnizează toate mărimile necesare calculului mărimilor pe baza cărora s-au analizat performanțele energetice.

Beneficiind de dotarea Laboratorului de Acționări Electrice al Facultății de Inginerie în Electromecanică, Mediu și Informatică Industrială, care dispune de un stand complet pentru studiul sistemelor de acționare cu motor asincron și convertor static indirect de tensiune și frecvență sursă de tensiune, s-a efectuat o analiză energetică detaliată, pe baza încercărilor experimentale, ce este prezentată în *capitolul 6*.

Capitolul de concluzii sintetizează rezultatele semnificative conținute în lucrare și contribuțiile originale ale autorului.

Capitolul 1

Conceptele și definițiile specifice regimului nesinusoidal, precum și factorii sintetici de analiză energetică fac obiectul primului capitol. Se evidențiază că, deși, în mare parte, lucrurile sunt stabilite și definițiile acceptate, încă mai există controverse privind, în special, definirea puterii deformante. Se remarcă contribuțiile aduse de Grupul de lucru de pe lângă "International Workshops on Power Definitions and Measurement under Non-sinusoidal Conditions" (1991-2006), și, ulterior, de manifestările științifice sub egida "School on Nonsinusoidal Currents", transformată în anul 2008 în „International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation” și desfășurate în Lagow-Polonia sub coordonarea profesorului L. S. Czarnecki. Toate acestea aduc contribuții semnificative privind proprietățile sistemelor în regim nesinusoidal, compensare, modelare, identificarea și rezolvarea problemelelor legate de calitatea energiei.

În prezent, sunt acceptate câteva aspecte referitoare la regimul deformant.

1. Gradul de deformare a unei unde nesinusoidale este, cantitativ, exprimat prin factorul total de distorsiune armonică (THD).

2. În regim deformant, pe lângă puterile existente în regim sinusoidal, în sistem se vehiculează și alte puteri.

3. Expresiile puterilor aparentă și activă

În ceea ce privesc elementele asupra cărora discuțiile continuă, se menționează:

- denumirea celorlalte puteri;

- expresiile matematice ale acestora;
- interpretarea fizică a acestora.

Din categoria metodelor de analiză frecvent utilizate în ultima perioadă, se remarcă tratarea fazorială, care este generală, atât pentru dipoli pasivi cât și activi, în regim staționar și tranzitoriu. Se operează cu puterile instantanee și cu valorile lor medii, iar timpul de calcul este mult redus, aspect foarte important în sistemele de comandă cu DSP.

După investigarea, sistematizarea și analiza comparativă și critică a principalelor teorii dedicate puterilor în regim nesinusoidal, lucrarea și-a propus obiective specifice sistemelor de acționare cu motoare asincrone și convertoare statice indirecte de tensiune și frecvență.

1. Elaborarea unui algoritm de analiză energetică pentru sistemul de acționare cu motor asincron și convertor static indirect sursă de tensiune și trei metode de modulare: sinusoidală, vectorială și trapezoidală. Se impune, implicit, elaborarea modelelor matematice și numerice ale celor trei sisteme.
2. Determinarea, prin simulare, a performanțelor energetice pentru cele trei sisteme de acționare cu considerarea pierderilor în mașina asincronă și a fenomenului de saturație.
3. Analiza comparativă a celor trei sisteme de acționare din considerente energetice.
4. Analiza energetică experimentală, comparativă, a influenței metodei de modulare adoptate, comparație extinsă și în raport cu alimentarea motorului de la un sistem trifazat de tensiuni sinusoidale. S-au avut în vedere diferite puncte statice de funcționare corespunzătoare a trei frecvențe de comandă, încărcarea la aceeași putere mecanică și alimentarea motorului cu aceeași tensiune efectivă.
5. Analiza energetică experimentală comparativă, în funcție de frecvența tensiunii de alimentare, la cuplu constant.

Capitolul 2

În capitolul al doilea se prezintă structura și modelarea convertorului static indirect de tensiune și frecvență în diferitele variante de modulare, precum și modelarea motorului asincron pe baza ecuațiilor de stare.

Pe baza schemei structurale bloc (fig.2.1) având în componență un bloc al strategiei de comandă precum și unul al funcțiilor de comutație, un invertor de tensiune trifazat cu tranzistoare IGBT și un bloc de calcul al tensiunilor reale ce sunt aplicate la bornele motorului, s-a realizat modelarea convertorului static.

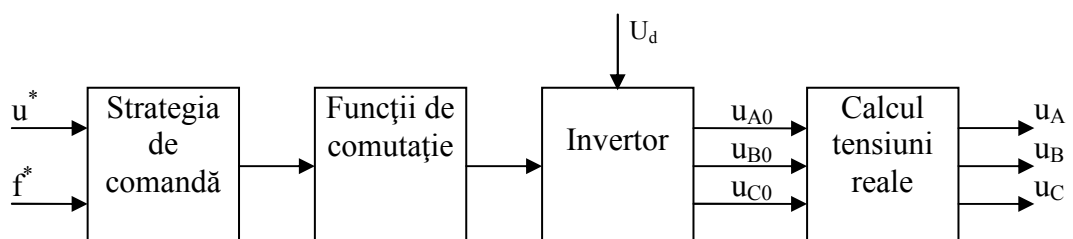


Fig. 2.1 Schema bloc structurală a convertorului static

Deși pentru modelarea invertorului de tensiune pot fi folosite blocuri specifice electronicii de putere, puse la dispoziție de ultimele versiuni ale bibliotecii “SimPowerSystems” din Matlab-SIMULINK, datorită duratei mari de simulare pe care această abordare o implică, s-a adoptat modelarea pe baza ecuațiilor de funcționare ale invertorului, ținând cont și de strategia de modulare.

Pentru motorul asincron, modelul matematic cu considerarea simplificată a saturației (considerarea dependenței inductivității statice de magnetizare în funcție de curentul de magnetizare) permite realizarea unui model SIMULINK fără utilizarea unui bloc S-function. Aceasta determină reducerea de circa trei ori a timpului de simulare. Similar, este realizat modelul fără considerarea saturației (fig.2.2).

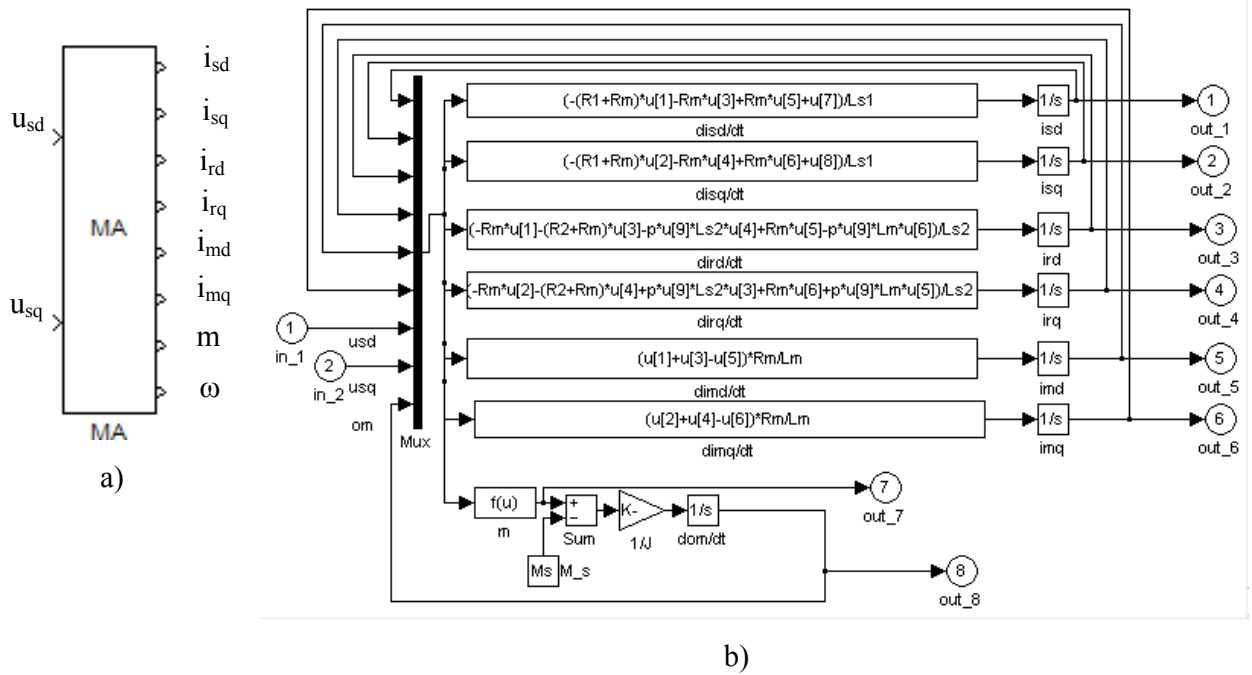


Fig. 2.2 Modelul SIMULINK al motorului asincron comandat în tensiune, fără considerarea saturației: a) - blocul; b) - structura

Pentru a obține dependența inductivității de magnetizare statice de curentul de magnetizare, necesară considerării saturației, se elaborează o metodă de aproximare analitică a curbei de magnetizare determinată experimental, prin polinoame de gradul 1 și gradul 3. Expresia analitică este utilizată în capitolul 5.

Capitolul 3

În capitolul 3 sunt elaborate modelele SIMULINK pentru trei tipuri de invertoare de tensiune cu modulație în durată ce urmează a fi analizate din considerente energetice, respectiv sinusoidală, vectorială și trapezoidală. Maska fiecărui bloc permite modificarea tuturor parametrilor de comandă. Așa, spre exemplu, în cazul modulației trapezoidale, se poate modifica frecvența de comandă a invertoarelor, factorul de modulație în frecvență și factorul de modulație în amplitudine. Structura modelului Simulink al principiului modulației trapezoidale este prezentat în figura 3.1.b. în a cărei componentă intră generatorul trifazat trapezoidal (G_TT) fig.3.1.a. și generatorul semnalului triunghiular (G_Tr).

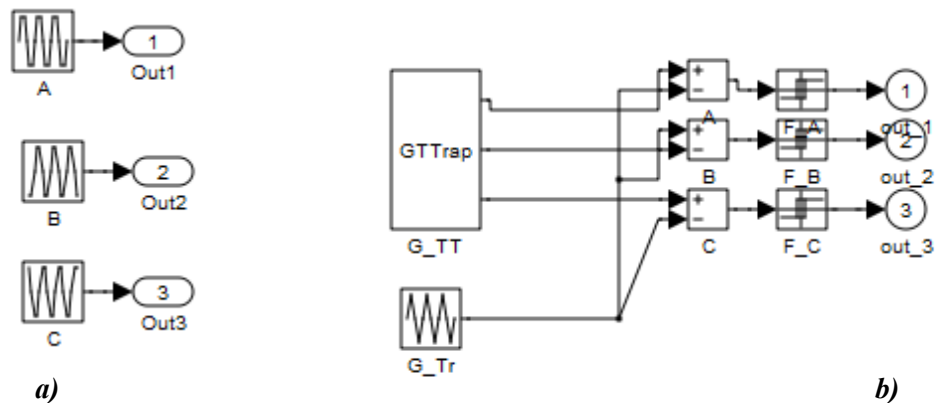


Fig. 3.1. Modelul Simulink pentru modulația trapezoidală

Capitolul 4

O prezentare a pierderilor care apar în sistemele de acționare cu CSTF PWM și motoare asincrone trifazate este realizată în capitolul 4. Astfel, după o scurtă trecere în revistă a pierderilor care apar în lanțul de conversie energetică, sunt detaliate componentele pierderilor existente în motorul electric și convertorul static.

Capitolul 5

Capitolul următor este dedicat analizei energetice a sistemului de acționare, în cele trei structuri adoptate, pentru diferite puncte statice de funcționare. S-a avut în vedere alimentarea motorului asincron de la un convertor static indirect sursă de tensiune în cele trei variante de modulație (sinusoidală, trapezoidală și vectorială), dar și de la o sursă trifazată de tensiune sinusoidală, astfel încât să fie posibilă compararea performanțelor. Astfel, modelul global al sistemului de acționare, realizat în mediul de programare MATLAB/SIMULINK, furnizează toate mărimile necesare calculului mărimilor pe baza cărora s-au analizat performanțele energetice.

Frecvențele luate în considerație pentru analiza energetică sunt 10Hz, 20Hz și 50Hz, iar încărcarea se face până la sarcina nominală.

Modelul din fig. 5.1 corespunde utilizării unui CSTF cu una din cele trei tipuri de modulație adoptate, structurile corespunzătoare ale blocului convertorului fiind cele prezentate în capitolul 3. Blocul motorului asincron corespunde modelului cu considerarea rezistenței de magnetizare și a saturației pe calea câmpului principal prin variația inductivității statice de magnetizare în funcție de curentul de magnetizare (capitolul 2).

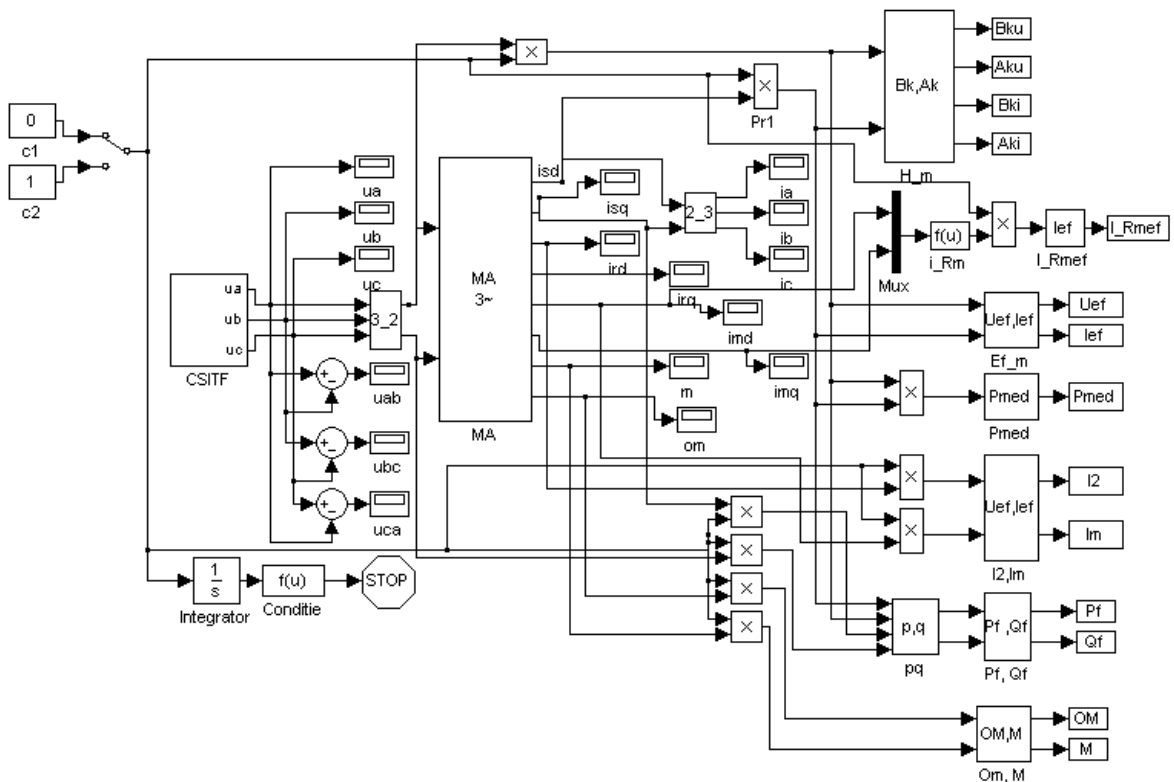


Fig. 5.1 Modelul SIMULINK al sistemului de acționare cu motor asincron și CSITF sursă de tensiune

Pentru a obține mărimile pe baza cărora se realizează analiza energetică, modelul a fost completat cu următoarele blocuri:

- un comutator manual, a cărui poziție “jos” semnifică momentul de început al calculului valorilor medii și efective a mărimilor ce vor fi reținute pentru analiza energetică; corelat cu această poziție, blocul "Conditie", asociat cu blocul STOP, determină sfârșitul simulării, la o perioadă corespunzătoare frecvenței de comandă din momentul trecerii pe poziția “jos” a comutatorului.

- "H_m" pentru calculul amplitudinilor armonicilor în sinus și în cosinus ale tensiunii și curentului de fază la bornele motorului;
- "Ef_m" pentru calculul valorilor efective ale tensiunii și curentului de fază statoric;
- "I_{Rmef}" pentru calculul valorii efective a curentului de magnetizare activ;
- "I_{2,Im}" pentru calculul valorilor efective ale curentului rotoric și de magnetizare;
- "P_{med}" pentru calculul puterii medii pe fază pe o perioadă a regimului staționar la bornele motorului;
- "pq" pentru calculul puterilor activă instantanee și reactivă instantanee la bornele motorului, conform teoriei fazoriale a puterilor;
- "Pf, Qf" pentru calculul puterilor activă și reactivă la bornele motorului, conform teoriei fazoriale;
- "OM, M" pentru calculul vitezei unghiulare medii și a cuplului electromagnetic mediu.

Reprezentarea grafică a dependenței indicilor de calitate energetică în funcție de puterea mecanică la frecvență de comandă constantă a permis evidențierea câtorva aspecte importante pentru toate cazurile analizate. Astfel, de exemplu, pentru sistemul de acționare cu motor asincron și CSTF cu modulație sinusoidală:

- La frecvența de 50Hz (fig.5.2), randamentul corespunzător modulației sinusoidale este practic egal cu cel alimentării în sinusoidal, la toate valorile puterii mecanice.

- Factorul de putere este influențat atât de frecvența de comandă a inverterului, cât și de valoarea puterii mecanice. Dacă la frecvențele de 20Hz și 50Hz creșterea este strict monotonă, la frecvența de 10Hz există un maxim și un minim local foarte apropiate de valoarea 0,9.

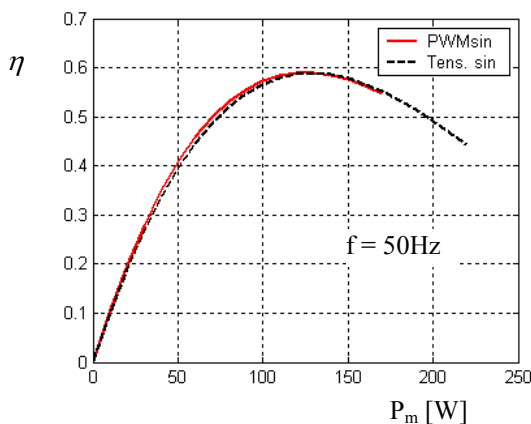


Fig. 5.2 Randamentul în funcție de puterea mecanică în cazul CSITF cu modulație sinusoidală și al alimentării în sinusoidal, pentru trei frecvențe de comandă

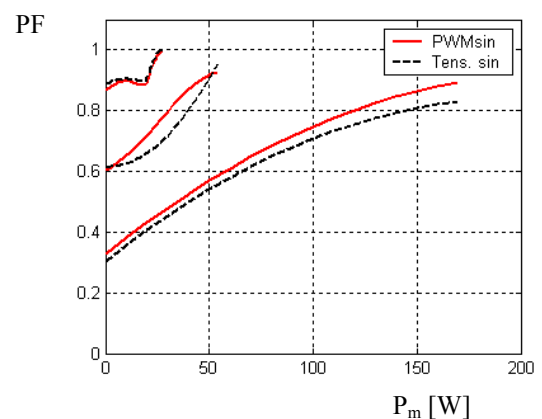


Fig. 5.3 Factorul de putere corespunzător alimentării în sinusoidal și modulației sinusoidale, în funcție de puterea mecanică pentru trei frecvențe de comandă

În finalul capitolului, se face o analiză comparativă a rezultatelor obținute prin simulare la cele trei sisteme de acționare. Concluziile sunt semnificative și, uneori, oarecum surprinzătoare.

Capitolul 6

Capitolul șase prezintă analiza energetică experimentală ce a avut două obiective majore:

- analiza energetică comparativă a fiecărei metode de modulare prezentată în cap. 3, cu situația în care motorul asincron este alimentat cu tensiune sinusoidală;
- analiza energetică comparativă a celor trei metode de modulare.

Pentru obținerea datelor experimentale necesare determinării performanțelor energetice ale fiecărei metode de modulare, respectiv, modulația sinusoidală, modulația trapezoidală și modulația fazorială în tensiune s-a utilizat un stand de tip Leybold. Acesta conține (fig. 6.1 și fig. 6.3):

- redresorul monofazat în punte, complet comandat;
- circuitul intermediar de curent continuu specific invertoarelor de tensiune;
- inverterul trifazat de tensiune cu tranzistoare IGBT și modulul de comandă aferent;
- motorul asincron trifazat;
- mașina de lucru (mașină asincronă de construcție specială) și modulul de control aferent acesteia;
- aparatură de măsură și înregistrare (Analizor Fluke 41b și osciloscop Metrix OX 7042 - M).

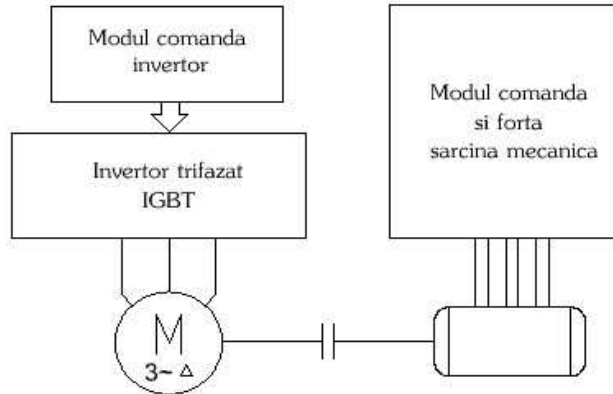


Fig. 6.1 Schema bloc a sistemului de acționare

Componentele de forță ale sistemului de acționare au datele nominale de mai jos:

Motor: $P_N=250\text{W}$; $U_N = 230\text{ V}$; $I_N = 1.32\text{ A}$; $\cos \varphi = 0.79$; $n_N = 1350\text{ rot/min}$.

Inverter: $U_N = 230\text{ V}$; $I_N = 10\text{ A}$.

Sarcina: motor asincron în construcție specială; $U_N = 230\text{ V}$; $P_N=250\text{W}$; $M_N=2\text{ Nm}$.

Pentru obținerea datelor experimentale necesare determinării performanțelor energetice ale motorului asincron alimentat cu tensiune sinusoidală și frecvențe în domeniul 10Hz-50Hz, acesta a fost alimentat de la un generator sincron de putere mult mai mare (6.2 kVA), în cadrul unui stand a cărui structură conține (fig. 6.2):

- un convertor static de tensiune și frecvență cu modulație în frecvență utilizat pentru reglarea vitezei de antrenare a generatorului sincron, respectiv a frecvenței tensiunii dată de acesta;

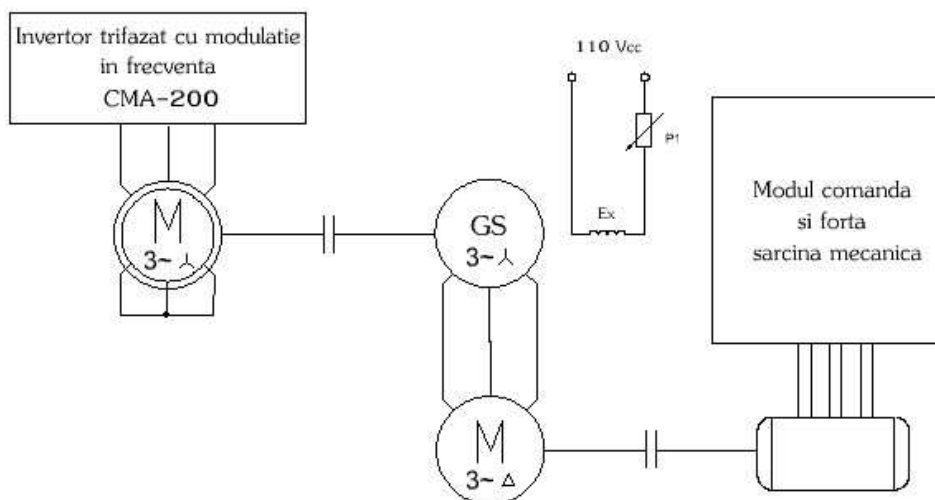


Fig. 6.2 Structura standului pentru determinarea performanțelor energetice ale motorului asincron alimentat cu tensiune sinusoidală și frecvențe în domeniul 10Hz - 50Hz

- un motor asincron pentru antrenarea generatorului sincron;
- generatorul sincron a cărui tensiune de excitație poate fi reglată reostatic pentru stabilirea valorii efective a tensiunii la valoarea dorită;

- motorul și sarcina de la standul precedent;
- aparatură de măsură și înregistrare (Analizor Fluke 41b și osciloscop Metrix OX 7042-M).

Prin protocolul de experimentări s-a stabilit măsurarea mărimilor necesare determinării performanțelor energetice ale motorului asincron, respectiv: tensiunea de fază; curentul de linie (motorul având statorul în conexiune triunghi); puterea activă la bornele sale și factorul de putere total (toate furnizate de analizorul Fluke 41b), în cazul alimentării cu tensiune de frecvență constantă (10, 15, 20, 30 și 50) Hz și diferite valori ale cuplului de sarcină (0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1)M_N.

Tensiunea de alimentare corespunzătoare fiecărui punct de funcționare s-a stabilit ca mai jos:

1. În cazul celor trei metode de modulare, alimentarea cu o tensiune de valoare efectivă care să asigure încărcarea la valoarea nominală a cuplului la arbore. Valoarea efectivă a tensiunii, pentru o valoare a frecvenței, nu s-a modificat prin comandă. Ea s-a modificat numai datorită caracteristicilor convertorului static.

2. În cazul alimentării cu tensiune sinusoidală, pentru fiecare punct de funcționare, s-au avut în vedere două situații echivalente:

- alimentarea cu o tensiune de aceeași valoare efectivă ca și la modulația PWM;
- alimentarea cu o tensiune de valoare efectivă care să asigure încărcarea la aceeași valoare a puterii mecanice la arborele motorului ca și metoda de modulație respectivă.

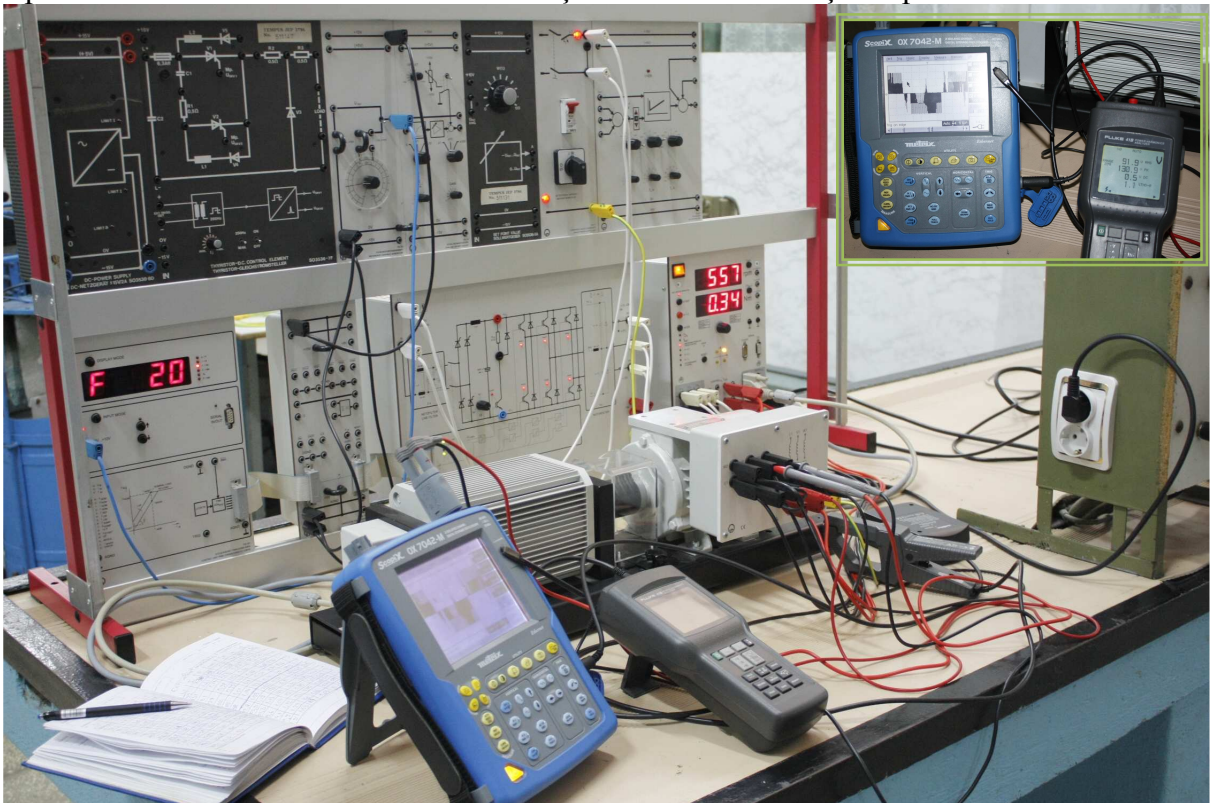


Fig. 6.3 Structura standului pentru determinarea performanțelor energetice ale motorului asincron alimentat cu tensiune PWM de la un inverter trifazat

Ținând cont de protocolul de experimentări și pornind de la datele măsurate pentru un punct static de funcționare, s-au calculat celelalte mărimi necesare determinării performanțelor energetice și analizei comparative. Performanțele energetice au fost analizate pentru aceleași trei frecvențe de funcționare (10Hz, 20Hz și 50Hz) pe baza reprezentărilor grafice, sub forma dependențelor de puterea mecanică, a celor mai semnificativi indicatori energetici.

O altă imagine sugestivă a performanțelor energetice ale celor trei metode de modulare, este oferită de dependențele indicatorilor energetici în funcție de frecvența tensiunii de alimentare, pentru valori constante ale cuplului la arborele motorului. În acest sens, se desprind trei concluzii:

1. Pentru frecvențe de până la maxim 15 Hz, cea mai avantajoasă metodă este modulația fazorială.
2. Pentru frecvențe în intervalul (15-50)Hz, cea mai avantajoasă metodă este modulația sinusoidală.
3. Modulația trapezoidală este cea mai dezavantajoasă, în tot domeniul frecvențelor de lucru.

Lucrarea este, în mare măsură, rezultatul preocupărilor autorului, pe durata celor opt ani de pregătire și elaborare a tezei. Dacă capitolele 5 și 6 sunt în întregime originale, există elemente de originalitate și în celelalte capitole. Astfel, în capitolul al doilea, modelul motorului asincron cu considerarea pierderilor în fier, dar și modalitatea de aproximare analitică a caracteristicii de magnetizare a motorului asincron sunt originale. În aceeași categorie intră și modelele SIMULINK ale convertorului static aferente modulației fazoriale și trapezoidale din capitolul trei.

În ansamblul tezei, contribuțiile personale pot fi sintetizate în cele ce urmează.

1. Realizarea unei sinteze critice a principalelor puncte de vedere existente în literatura de specialitate, referitoare la caracterizarea energetică a regimului nesinusoidal.
2. Elaborarea modelului matematic și Matlab-SIMULINK pentru motorul asincron cu considerarea pierderilor în fier, cu și fără considerarea saturației.
3. Dezvoltarea unei metode de aproximare analitică a curbei de magnetizare a motorului asincron.
4. Elaborarea modelelor SIMULINK pentru CSTF PWM în trei variante de modulație (sinusoidală, vectorială și trapezoidală).
5. Elaborarea modelului SIMULINK al întregului sistem, model dedicat analizei energetice, în cele trei variante determinate de metoda de modulație.
6. Determinarea prin simulare a indicatorilor energetici, pentru cele trei sisteme de acționare.
7. Realizarea unei analize comparative între performanțele energetice ale celor trei sisteme prin simulare și pe baza datelor experimentale, care relevă unele aspecte surprinzătoare.
8. Realizarea unei analize comparative între performanțele energetice ale fiecărei metode de modulare și cele corespunzătoare alimentării de la un sistem trifazat de tensiuni sinusoidale având aceeași valoare efectivă a tensiunii / aceeași putere mecanică, prin simulare și pe baza datelor experimentale.
9. Realizarea unei analize energetice comparative, în funcție de frecvența tensiunii de alimentare, la cuplu constant, prin simulare și pe baza datelor experimentale.
10. Efectuarea determinărilor experimentale pentru calculul indicatorilor de calitate energetică la sistemul de acționare cu motor asincron și CSTF PWM, utilizând un stand de tip Leybold și analizoare Fluke 41b, dotate cu interfață izolată optic pentru transmiterea serială a datelor spre calculator.
11. Efectuarea determinărilor experimentale pentru analiza energetică în cazul alimentării motorului asincron cu tensiune sinusoidală la frecvențe în domeniul 10Hz-50Hz, prin utilizarea unui generator sincron de putere mult mai mare (6.2 kVA), cu tensiune de excitație reglabilă, într-un montaj ce mai conține un motor asincron de antrenare alimentat de la un CSTF cu modulație în frecvență.