

R A P O R T Ș T I I N Ţ I F I C Ş I T E H N I C

ETAPA I – 2014

Analiza contextului tehnologic actual privind acționările electrice multimotor, inventarierea metodologiilor și bazelor teoretice existente

1.Rezumatul etapei

1.1. *Planul de realizare a etapei a prevăzut:*

Activitatea I.1 Elaborare studiu privind tehnicile moderne de comandă și control pentru invertoarele de putere și aplicații la sistemele de acționare multimotor.

1.2. *Rezultatele așteptate ale etapei sunt cele prevăzute prin planul de realizare,* și anume un studiu privind tehnicile moderne de comandă și control pentru invertoarele de putere și aplicații la sistemele de acționare multimotor, studiu realizat de către ICMET Craiova, care este coordonatorul consorțiului pentru acest proiect.

Intr-o descriere centrată pe problemă, putem spune că elementele care au stat la baza acestui studiu sunt reprezentate de nevoia de a sintetiza din contextul tehnologic actual privind acționările electrice multimotor, acele metodologii, structuri și arhitecturi de control multimotor, care pot genera în mod real soluții optime dar flexibile pentru proiectarea unor acționări multimotor cu aplicabilitate clară, identificată împreună cu partenerul industrial la momentul detalierii propunerii de proiect și structurării planului de realizare, și anume aplicații în industria mineritului de suprafață.

Experiența acumulată de membrii echipei proiectului în aplicații cu acționări multimotor au constituit un punct de plecare în abordarea acestui studiu. Astfel în studiu este prezentă pe scurt arhitectura de acționare folosită la rama electrică (proiect dezvoltat în urmă cu două decenii, care deși folosește motoare de c.c. își păstrează valoarea metodologică și la acționările de c.a. cu motoare asincrone, dată fiind analogia sistemelor de comandă), dar și arhitectura de conducere după consemn a unui baraj hidro. Experiența acumulată în acest proiect implementat în urmă cu câțiva ani, a contribuit în direcționarea eficientă a clasificării și identificării soluției de arhitectură de sistem de acționare multimotor cu turație variabilă și cu recuperarea în rețea a energiei de frânare individuale, utilizat în aplicații cu dinamică ridicată.

Soluția fundamentată teoretic prezentată în studiul în extenso, vizează un pas spre realizarea practică, și va fi continuată în etapa a II-a prin *Realizare documentație de execuție pentru modelul funcțional al sistemului de acționare multimotor.*

În finalul acestui raport este prezentată bibliografia selectivă (care conține și titluri de articole publicate în ultimul an) care a stat la realizarea studiului, iar în anexă este prezentat cuprinsul studiului în extenso.

2.Descrierea științifică și tehnică a cercetărilor etapei analizate

2.1. Convertizoare statice de frecvență

Soluția actuală standard de alimentare a mașinii de inducție pentru acționări reglabile este prin convertoare statice de frecvență (CSF). Marea majoritate a aplicațiilor industriale utilizează convertoare statice de frecvență indirecte (CSFI). Convertoarele statice de frecvență indirecte se caracterizează printr-o dublă conversie a energiei electrice care constă dintr-o transformare a tensiunii alternative a rețelei, de frecvență și amplitudine constante, într-o tensiune continuă (prin intermediul unui redresor în două sau de patru cadrane), urmată apoi de transformarea tensiunii continue din circuitul intermediar într-o tensiune alternativă, mono sau trifazată, de frecvență și amplitudine reglabile, folosind un invertor. Ele se compun în principiu din trei blocuri: un redresor (convertor cu comutație de la rețea), un filtru și un invertor cu comutație (forțată sau de la sarcină). După natura filtrului din circuitul intermediar de c.c. se deosebesc două categorii de convertoare indirecte: cu circuit intermediar de tensiune continuă și cu circuit intermediar de curent continuu. Cea mai utilizată structură este cea de CFSI cu circuit intermediar c.c. în varianta cu tiristoare convenționale.

Din punct de vedere al formei tensiunii ce rezultă la bornele unui consumator alimentat prin invertor, deosebim următoarele tipuri de invertoare:

- invertoare PWM;
- invertoare cu tensiune de ieșire dreptunghiulară;
- invertoare rezonante.

La invertoarele PWM tensiunea de alimentare provine de la un redresor necomandat. Frecvența și amplitudinea tensiunii de ieșire se asigură prin modulație. Există numeroase metode prin care se realizează modulația în durată a tensiunii de ieșire. O atenție deosebită va fi acordată modulării de către un semnal sinusoidal. La invertoarele din a doua categorie, tensiunea de alimentare care provine fie de la o baterie, fie de la un sistem de redresare este menținută constantă, iar tensiunea alternativă de formă dreptunghiulară are posibilitatea modificării și a frecvenței. Dacă se dorește să se modifice și amplitudinea tensiunii de ieșire, atunci este nevoie să se modifice și valoarea tensiunii de alimentare a invertoarelor.

Invertoarele rezonante sunt acele instalații care au drept circuit de sarcină un circuit oscilant serie sau paralel. În funcție de modul în care se comandă elementele active din structura invertoarelor, la bornele consumatorului se obține o tensiune sau un curent de formă sinusoidală.

Dintre tipurile de invertoare, cele mai răspândite sunt invertoarele de tensiune și curent bazate pe contactoare statice. Până la puteri de ordinul sutelor de KW se utilizează IGBT-uri, BJT-uri și MOSFET-uri, însoțite după caz de diode antiparalele rapide. Pentru puteri mai mari se utilizează tiristoare GTO.

Schemele de convertoare frecvent utilizate sunt cu:

- invertoare monofazate în semipunte;
- invertoare monofazate în punte;
- invertoare trifazate.

Schemele sunt completate cu circuite de protecție adecvate la supratensiuni și supracurenți, precum și cu circuite de comandă, individualizate pentru fiecare tip de comutator static utilizat.

Invertoarele diferă ca schemă și alimentare în funcție de parametrul de ieșire dorit: tensiune sau curent. Comanda tranzistoarelor de putere din structura invertoarelor este realizată cu ajutorul driverelor – module specializate care primesc semnale logice de putere mică de la modulele de comandă cu ieșire PWM, și realizează izolarea galvanică precum și adaptarea în putere a acestor comenzi necesare comutației tranzistoarelor de putere.

Semnalele logice pentru comanda tranzistoarelor IGBT din topologia inverterului sunt furnizate de un modulator PWM dedicat comenzii inverteoarelor. Modulatorul generează trei perechi de semnalele PWM complementare cu timp mort corespunzătoare celor trei brațe din puntea trifazată.

Inverterul poate fi utilizat și în sisteme de acționare electrică controlate numeric cu ajutorul unor micro sisteme dedicate (microcontrolere, procesoare numerice de tip DSP). Acestea sunt prevăzute cu propriile lor modulatatoare PWM.

Un rol aparte în structura convertizoarelor statice de frecvență îl au filtrele EMC, care au rolul de a realiza compatibilitatea electromagnetică cu rețeaua de alimentare și cu alte echipamente din vecinătate, conform standardelor în vigoare. În acest sens, datorită importanței și multiplelor aplicații posibile ale acționărilor cu turație variabilă IEEE a elaborat standardul IEC 61800 – Acționări electrice de putere cu viteză variabilă, adoptat la nivel european de CENELEC (Comitetul European de Standardizare în Electrotehnică) sub indicativul EN 61800.

În cadrul multiplelor secțiuni ale acestuia se realizează o prezentare completă a cerințelor pe care trebuie să le îndeplinească sistemele de acționare cu motoare electrice alimentate prin convertizoare de frecvență și probelor la care trebuie supuse acestea.

Corespunzător acestui normativ, sistemele de acționare cu viteză variabilă pot fi instalate:

- a) în locuri cu acces deschis (locuințe, birouri, spații comerciale) în care alimentarea cu energie electrică se realizează direct la joasă tensiune, fără transformator, direct din instalațiile electrice care alimentează clădirile respective;
- b) în alte locuri decât cele prevăzute la punctul a, fiind alimentate din alte rețele decât cele la care sunt conectate spațiile publice.

Din acest punct de vedere, sistemele de acționare cu turație variabilă sunt împărțite în 4 categorii:

C1 sisteme de joasă tensiune (<1000 V) prevăzute pentru a fi utilizate în spații cu acces liber;

C2 sisteme de joasă tensiune (<1000 V) care nu sunt nici echipamente mobile, nici echipamente cu alimentare de la priză prin cordon, și care dacă sunt instalate în spații publice trebuie puse în funcțiune de personal specializat;

C3 sisteme de joasă tensiune (<1000V) ce nu pot fi utilizate în spații cu acces liber;

C4 sisteme cu tensiunea peste 1000 V și curent peste 400 A sau care nu pot fi utilizate decât în sisteme complexe din categoria b.

Deoarece sistemele de acționare cu turație variabilă sunt prevăzute a se instala în sisteme care includ și alte echipamente, normativul precizează condițiile pe care trebuie să le îndeplinească atât în ceea ce privește nivelul de toleranță la diferite perturbații pe care sistemul extern de alimentare cu energie electrică le poate genera la bornele sistemului de acționare cât și nivelul admisibil al perturbațiilor pe care acesta le poate produce pentru celelalte echipamente alimentate din aceeași rețea sau care funcționează în vecinătatea sa.

2.2. Tehnici de comandă ale convertizoarelor statice de frecvență

Comanda mașinii de inducție trifazate presupune comanda vitezei și/sau a poziției, sau comanda cuplului. Ea poate fi de tip scalar sau vectorial. Implementarea controlului scalar, deși este simplă, este limitată de acuratețea răspunsului în viteză și cuplu al mașinii.

Comanda vectorială este fundamentată pe modelul dinamic al mașinii de inducție, bazându-se pe caracterul vectorial al mărimilor funcționale ale mașinii. A fost dezvoltată ca o metodă de comandă în buclă închisă a vitezei/cuplului și se utilizează atunci când răspunsul dinamic al sistemului și precizia comenzii acționării sunt importante.

Comanda vectorială restabilește unul din avantajele sistemelor de acționare electrică de curent continuu, separarea buclilor de viteză și cuplu. Există strategii de comandă vectorială (control vectorial) directe, indirecte și directe în cuplu.

Din punctul de vedere al realizării practice, sistemele de control vectorial se pot grupa în:

- sisteme analogice, realizate cu circuite integrate și tranzistoare;
- sisteme digitale, realizate cu procesoare de semnal DSP, microprocesoare și interfețe de calculator;
- sisteme hibride, la care circuitele de comandă sunt analogice și digitale.

O altă clasificare a metodelor de control se poate face după modul în care sunt măsurate mărimile cinematice. Astfel se disting:

- controlul acționării cu traductoare de mărimi cinematice;
- controlul fără traductoare de mișcare.

Metodele de control care utilizează traductoare de mărimi cinematice (poziție și viteză) se folosesc pentru aplicații într-o gamă extinsă de turații (1:1000; 1:10000). Trebuie subliniat faptul că traductoarele sunt în general scumpe, sensibile la perturbații și variații de temperatură, mărind totodată greutatea și gabaritul sistemului.

Conducerea fără traductoare de mișcare, cunoscută în literatura de specialitate sub denumirea de „sensorless control”, se impune ca o alternativă la prima strategie, fiind necesară pentru reducerea părții hardware a sistemelor (a sistemelor de acționare în general) precum și pentru creșterea siguranței în exploatare. Se aplică în sistemele de acționare electrică caracterizate de o gamă moderată de turații (1:100). În această situație, mărimile cinematice sunt estimate, observatoarele de stare din sistem utilizând informații de curent și tensiune măsurabile la borne.

Controlul scalar al mașinilor de inducție a fost implementat pe modelul de regim permanent al acestora. Marele avantaj al acestei strategii este dat de simplitatea circuitelor de reglare, prezentând însă inconvenientul obținerii unor performanțe dinamice modeste.

Sub aspectul pierderilor, procedeul de modificare a vitezei mașinii de inducție prin schimbarea frecvenței este cel mai economic, în sensul că pierderile în plus care apar în mașină față de funcționare la frecvența și tensiunea nominală sunt relativ mici și se datorează sistemului de modificare a frecvenței.

Pe baza relațiilor care definesc modelul matematic în regim staționar al mașinii de inducție rezultă că turația sincronă se modifică proporțional cu frecvența și, în același timp, cuplul electromagnetic prin intermediul reactanțelor.

Analiza structurilor de reglaj scalar permite o concluzie principială, care poate fundamenta o opțiune tehnică. Reglajul scalar presupune scheme simple de realizat, dar performanțele dinamice ce se obțin sunt modeste. Utilizarea controlului scalar este recomandată în sistemele de acționare electrică nepretențioase. Dacă se dorește obținerea unor performanțe dinamice și precizii de reglare crescute este indicată utilizarea reglajului vectorial cu care se pot obține sisteme de acționare electrică cu performanțe chiar mai bune decât cele realizate cu motoare de c.c.

Controlul vectorial direct

Controlul vectorial necesită determinarea amplitudinii și pulsației reale a fazorului flux rotoric față de sistemul statoric fix $\alpha - \beta$, fie prin măsurarea directă, fie prin estimarea acestuia.

Măsurarea directă a fluxului, presupune utilizarea sondelor Hall plasate ortogonal pe armătura statorică sau folosirea bobinelor sondă așezate în creștăturile statorice. Dezavantajul utilizării sondelor Hall este dat de sensibilitatea acestor senzori la variații de temperaturi și la șocuri mecanice (vibrații). Dacă pentru măsurarea fluxului se folosesc bobinele sondă atunci se poate adapta soluția cu două bobine, una așezată în axa fazei statorice A (considerată ca axă de referință) iar cealaltă defazată cu 90° electrice sau varianta cu trei bobine, situație în care acestea se plasează la 120° electrice una de cealaltă. A doua soluție, utilizată frecvent în prezent, se bazează pe stabilirea unui model de flux, derivat direct din ecuațiile mașinii de inducție care pe baza unor mărimi măsurate și calculate generează fluxul spațial al fluxului rotoric.

Pe de altă parte, în comanda vectorială, în funcție de strategia de control aplicată se disting: controlul în curent, controlul în tensiune respectiv controlul combinat în tensiune și curent.

a) Controlul vectorial direct cu comandă în curent

Se poate realiza fie utilizând invertoare de curent fie adoptând soluția cu invertoare de tensiune PWM comandate în curent. În ambele situații controlul curentului se face în coordonate statorice. La comanda în curent, ecuațiile de tensiune statorice nu intervin în modelul matematic și prin urmare nu influențează răspunsul dinamic al sistemului.

Invertoarele sursă de curent reprezintă o soluție mai ieftină pentru comanda mașinii asincrone fiind utilizate în acționări la care reglarea vitezei se face în domeniul 100:1 sau mai mare.

Fără a menționa în mod special pierderile suplimentare datorate armonicilor conținute în curentul dreptunghiular, inverterul sursă de curent mai prezintă următoarele dezavantaje:

- pulsații pronunțate ale cuplului datorate formei dreptunghiulare a curentului, în special la turații mici;
- frecvență de comutație mai joasă decât la inverterul de tensiune, datorată în special comutației lente la mers în gol.

b) Controlul vectorial direct cu comandă în tensiune

La sistemele de acționare electrică de puteri mari se renunță la strategia de comandă în curent cu invertoare de tensiune PWM deoarece este necesară reducerea frecvenței de comutație pentru a diminua pierderile. În astfel de situații se apelează la comanda în tensiune a invertoarelor PWM.

Modelul matematic trebuie să primească o astfel de formă încât pe de-o parte să se realizeze decuplarea ecuațiilor de tensiuni, iar pe de altă parte să se asigure controlul separat al curenților i_{sd} și i_{sq} , așa cum cere principiul orientării după câmp.

Controlul vectorial indirect

Controlul vectorial indirect se bazează pe o strategie de reglare prin anticipare (feedforward control) și presupune calcularea poziției fazorului fluxului rotoric θ_r față de sistemul statoric fix $\alpha - \beta$ în funcție de alunecare (frecvența rotorică relativă). Această metodă de control se bazează pe măsurarea curenților statorici și calculul amplitudinii și poziției fluxului pe baza acestor curenți.

Prin urmare, controlul vectorial indirect elimină traductoarele sau estimatoarele de flux, dar necesită o măsurare foarte precisă a poziției rotorului în vederea determinării cât mai exacte a poziției fazorului flux rotoric. Cum măsurarea unghiului θ este fundamentală, nu se recomandă determinarea acestuia prin integrarea vitezei obținută de la un tahogenerator. Se recomandă folosirea în sistem a unui encoder (sau similar) ceea ce duce la obținerea unui răspuns bun în cuplu.

O altă cerință a metodei este cunoașterea valorii corecte a constantei de timp rotorice T_r în calculul alunecării. Acest lucru constituie un dezavantaj al controlului indirect întrucât parametrii rotorici se modifică, rezistența cu temperatura și efectul pelicular, iar inductanța cu nivelul fluxului.

Controlul vectorial indirect poate fi realizat fie aplicându-se comanda în curent fie comanda în tensiune sau cea combinată.

Controlul cu comandă în curent poate fi obținut ca și în cazul controlului direct, utilizând invertoare de curent sau invertoare de tensiune PWM comandate în curent.

Controlul vectorial direct în cuplu și flux

Controlul vectorial direct în cuplu și flux CVDCF clasic (Direct Torque Control – DTC) asigură controlul direct al fluxului statoric și al cuplului electromagnetic prin selectarea modului optim de comutare al tranzistoarelor inverterului PWM. Comutația este astfel realizată încât eroarea de flux și cuplu să se încadreze într-o bandă de histerzis cu scopul bine determinat de a obține un răspuns rapid în cuplu și totodată de a reduce frecvența de comutare a inverterului.

CVDCF clasic combină teoria conducerii vectoriale cu teoria conducerii directe. Această metodă prezintă următoarele avantaje:

- asigură un răspuns rapid în cuplu și o funcționare într-o plajă largă de viteze;
- este robustă și relativ simplu de implementat;

- nu necesită regulatoare de curent și transformări de coordonate;
- nu necesită circuit de decuplare a ecuațiilor de tensiune statorică și nici modulator vectorial separat pentru comanda inverterului PWM;
- asigură o rejectare eficientă a perturbațiilor;
- poate fi aplicată cu succes și în cazul invertoarelor rezonante;
- se pliază foarte bine pe controlul numeric.

Această strategie de conducere vectorială este potrivită pentru controlul poziției sau a vitezei, ajungându-se la o reglare stabilă până la aproximativ 0,1rot/oră.

CVDCF clasic presupune conducerea directă a motorului după cele două mărimi esențiale: cuplul electromagnetic și fluxul. Se obțin astfel două bucle de reglare independente, una pentru cuplu cealaltă pentru flux, bucle care lucrează în paralel. Pentru comanda inverterului de tensiune PWM se utilizează un tabel de comutații optime, vectorii de tensiune statorică fiind comandați direct de către cele două regulatoare cu histerezis.

După fluxul la care se orientează mărimile de reglaj, sistemele de control vectorial pot fi:

- cu orientare după fluxul rotoric;
- cu orientare după fluxul din întrefier;
- cu orientare după fluxul statoric.

Orientarea după fluxul rotoric este metoda cea mai des utilizată întrucât mărimile de reglare se obțin foarte simplu. Cu toate că prezintă o structură de reglare mai complicată, orientarea după fluxul din întrefier poate oferi uneori avantaje legate în special de măsurarea directă a fluxului din întrefier, eliminându-se astfel compensările pe calea sa de măsură. O schemă simplificată pentru orientarea după fluxul din întrefier se obține în situația măsurării curentului rotoric. Orientarea după fluxul statoric implică calcule mai complexe ale mărimilor de comandă și o reglare cu repercursiuni negative asupra performanțelor dinamice.

2.3.Comanda cu DSP a convertizoarelor statice de frecvență

Partea de comandă a invertoarelor, prin specificul ei, se bazează pe DSP–procesoare numerice de semnal. În faza de studiu, elucidarea unor considerente pentru alegerea procesorului de semnal este esențială. În primul rând, performanțele nu pot fi măsurate numai prin viteza de multiplicare/acumulare (MIPS).

Deoarece o instrucțiune pentru un procesor de semnal (DSP) nu este echivalentă cu o instrucțiune pentru un alt procesor de semnal, rata MIPS poate să nu fie concludentă și poate conduce la erori de apreciere.

Arhitectura unui DSP și performanțele pentru fiecare bloc funcțional din aceasta arhitectură (cum ar fi unitatea aritmetică, unitatea de adresare și secvențiatorul de program) pot fi mult mai importante în stabilirea caracteristicilor unui procesor de semnal. Ceea ce distinge un procesor de semnal de un procesor de uz general este reprezentat de următoarele:

- aritmetica rapidă și flexibilă;
- dinamica extinsă pentru multiplicări/acumulări;
- încărcarea a 2 operanzi într-un singur ciclu (din memoria internă sau externă);
- buffere circulare hardware (în memoria internă sau externă);
- bucle hardware și salturi condiționate fără cicluri suplimentare - zero overhead.

Trebuie de asemenea menționat că alegerea unui procesor de semnal ia în considerare tipul algoritmilor DSP ce urmează a fi implementați.

Procesorul de semnal nu trebuie să aibă un bloc de control centralizat deoarece majoritatea grafurilor DFG pot fi gândite cu prelucrări paralele (astfel încât fiecare unitate de prelucrare să fie utilizată în paralel cu alte unități - acest lucru este posibil dacă graful aplicației este realizat cu un anumit grad de paralelism). Ideea principală este aceea ca fiecare unitate de prelucrare să

posede un bloc de control propriu (pentru operația specifică), iar blocul de control centralizat se distribuie către fiecare unitate de prelucrare.

În funcție de complexitatea aplicației se poate opta pentru una din formele de procesor de semnal prezentate (pipe-line, vectoriale, matriciale, paralele). Apar însă probleme în ceea ce privește interconectarea elementelor funcționale în cadrul acestor procesoare (sincronizare, comunicație). Un alt considerent de implementare este cel legat de tehnica de modulația PWM folosită în convertoarele de putere. Odată cu dezvoltarea microprocesoarelor, modulația vectorului spațial a devenit una din multele metode de modulație PWM pentru convertoarele trifazate. Teoria vectorului spațial se folosește pentru determinarea ciclului de comutare a tranzistoarelor. Aceasta se implementează digital relativ simplu pentru modulatorii PWM.

Posibilitatea implementării digitale ușoare și banda de modulație liniară largă pentru tensiunea de ieșire sunt trăsăturile principale a modulației vectorului spațial. Există, în plus, o serie de alte avantaje ale PWM care vor fi evidențiate în continuare.

Cu invertoarele comandate pe principiul PWM se obțin forme de undă calitativ mai bune, care nu mai trebuie filtrate, sau sunt mult mai ușor de filtrat. Realizarea lor a fost posibilă odată cu dezvoltarea dispozitivelor semiconductoare de putere care permit comutația cu frecvență ridicată a unor tensiuni și curenți de valoare mare.

Modulația impulsurilor în durată permite variația fundamentalei tensiunii de ieșire ca valoare efectivă și frecvență și translatează spre domeniul frecvențelor înalte armonicile tensiunii de ieșire, ceea ce explică filtrarea mai ușoară. La acest tip de invertoare, semnalele de comandă sunt generate prin comparația între o undă purtătoare $U_p(t)$ (de regulă triunghiulară), de frecvență f_p și amplitudine \hat{U}_p și o undă de referință, asemănătoare ca forma cu cea pe care dorim să o obținem la ieșirea invertoarelor, notată cu $U_r(t)$, de frecvență f_r și amplitudine \hat{U}_r . Comparația celor două unde se face în cadrul unui comparator. Forma undei de referință poate fi oarecare, dar este preferată forma sinusoidală, atunci când dorim să obținem o undă sinusoidală la ieșirea invertoarelor. La modulația impulsurilor în durată sinusoidală, sunt generate multiple impulsuri, de diferite durate. Lățimea fiecărui impuls variază proporțional cu integrala valorii instantanee a componentei fundamentale în momentul respectiv. Cu alte cuvinte, lățimea impulsului devine funcție sinusoidală de poziția unghiulară. La aplicațiile sinusoidale, nivelul armonicilor tensiunii de ieșire este puternic redus comparativ cu cazul modulației uniforme a impulsurilor în durată. Frecvența undei de referință trebuie să fie egală cu cea dorită pentru fundamentala undei de ieșire. Tensiunea de ieșire a comparatorului, prelucrată ulterior, este tensiunea de comandă a dispozitivelor semiconductoare ale invertoarelor.

O bună calitate a undei de ieșire a invertoarelor este obținută aplicând modulația multiplă, cu undă de referință sinusoidală, numită și modulație sinusoidală. Această modulație poate fi sincronă sau asincronă. Când modulația este sincronă, frecvența purtătoare f_p trebuie să fie un multiplu întreg m al frecvenței modulare f_r . În aceste condiții, fundamentala tensiunii de ieșire este periodică, de perioadă $T=1/f_r$, conținutul în armonici superioare din seria Fourier depinzând de valoarea lui m . Modulația asincronă intervine când se utilizează $f_p = \text{const.}$ și o frecvență f_r variabilă.

Pentru generarea strategiei de comutare PWM există trei abordări distincte. Prima abordare, se utilizează pe larg din cauza implementării ușoare folosind metodele analogice, și este bazată pe tehnica "naturală" de eșantionare. A doua strategie de comutare, se referă la tehnica "uniformă", și este considerată că are multe avantaje când sînt utilizate tehnicile digitale sau microprocesoarele. A treia abordare, tehnica PWM "optimizată" (SVPWM – Space Vector Pulse Width Modulation), utilizează strategia de comutare optimizată bazată pe criterii performante precise. Principalul criteriu de optimizare constă în reducerea distorsiunilor armonice ale curenților de fază. Acest criteriu echivalează cu obținerea unei traiectorii a vectorului spațial al curenților de fază, i_f , cât mai apropiată de forma circulară. Mai departe, generarea traiectoriei vectorului spațial al ecuațiilor de fază este supusă unui set de reguli privind:

- a) aproximarea cu eroare controlabilă și abateri minime a traiectoriei circulare (echivalentă cu minimizarea unui indice de performanță J);
- b) minimizarea numărului de comutații ale dispozitivelor de putere;
- c) realizarea tranziției între oricare două stări care se succed prin comutarea unui singur braț al inverterului.

O altă problemă legată de PWM este cea legată de procedurile PWM utilizate, care sunt de o mare diversitate. Totuși, în practică se utilizează doar câteva, care se împart în două categorii mari:

- a) PWM de tensiune: modulația în lățime a pulsului de tensiune este realizată în buclă deschisă;
- b) PWM de curent: modulația pulsului de tensiune se realizează în buclă închisă cu reacție de curent.

2.4. Sisteme de control moderne pentru acționări electrice cu convertizoare statice de frecvență

Aspecte generale, cerințe și provocări ale comenzii

Pe plan mondial o serie de metode de control au fost propuse pentru comanda invertoarelor și acționărilor electrice, cele mai utilizate fiind comanda cu histerezis, comanda liniară PI, sliding control, metode predictive și metode neuro-fuzzy. Unele dintre acestea sunt foarte bine stabilite și simple, cum ar fi comanda cu histerezis neliniar, în vreme ce metodele mai noi de comandă, care permit o comportare îmbunătățită a sistemului, sunt în general mai complexe și necesită mult mai multă putere de calcul de la platforma de comandă.

Comanda cu histerezis beneficiază de natura neliniară a convertoarelor de putere, și stările de comutație ale semiconductoarelor de putere sunt determinate de compararea variabilei măsurate cu referința sa, ținând cont de o lățime dată a histerezisului pentru eroare.

Această schemă de comandă se poate folosi în aplicații simple, cum ar fi comanda curentului, dar și în scheme mai complexe, cum ar fi Comanda Directă a Cuplului (DTC) și Comanda Directă a Puterii (DPC). Această schemă de comandă își are originea în electronica analogică, și pentru a implementa această schemă de comandă într-o platformă digitală, este nevoie de o frecvență de eșantionare foarte ridicată. Lățimea histerezisului și nelinearitatea sistemului introduc în mod inerent frecvențe variabile de comutație, care pot duce la probleme de rezonanță în unele aplicații și pot genera un conținut spectral împrăștiat. Acest fapt duce la necesitatea unor filtre voluminoase și costisitoare.

Considerând un etaj de modulație pentru convertor, se poate folosi orice controler liniar, cea mai uzuală alegere fiind folosirea controlerelor proporțional-integrale (PI). O metodă de comandă bine cunoscută pentru acționări, bazată pe controlere liniare, este comanda orientată pe câmp (FOC). Concepte similare pot fi aplicate de asemenea pentru convertoarele conectate la rețea, cu comanda orientată pe tensiune (VOC). Schema de comandă liniară cu un etaj de modulație necesită adesea transformări de coordonate suplimentare. În plus, faptul că o comandă liniară se aplică unui sistem neliniar poate duce la performanță neuniformă pe întreg domeniul dinamic. Mai mult, implementarea digitală din prezent necesită scheme de comandă a datelor eșantionate, care sunt o aproximație a controlerului linear în timp continuu. Toate acestea, împreună cu etajul suplimentar de modulație, introduc câteva etape de proiectare și considerații pentru realizarea unei scheme adecvate de comandă, care poate fi foarte provocatoare pentru unele convertoare de putere, cum ar fi convertoare matriciale cu mai multe niveluri. Mai mult, sistemele cu convertoare de putere sunt supuse la câteva constrângeri ale sistemului și la cerințe tehnice (distorsiunea armonică totală (THD), curentul maxim, frecvența maximă de comutație etc.), care nu pot fi încorporate direct în construcția controlerelor liniare. Pe scurt, teoria clasică de comandă a fost adaptată din nou pentru a o utiliza în convertoarele moderne comandate digital.

Odată cu dezvoltarea microprocesoarelor de semnal mai puternice, s-au propus noi scheme de comandă. Unele dintre cele mai importante sunt comanda cu logică fuzzy, rețelele neurale, sliding control și comanda predictivă.

Printre aceste noi scheme de comandă, comanda predictivă pare a fi o alternativă foarte interesantă pentru comanda convertoarelor de putere și a acțiunilor. Comanda predictivă cuprinde o familie foarte mare de controlere cu abordări foarte diferite. Ideea comună din spatele comenzii predictive este utilizarea unui model de sistem pentru calcularea predicțiilor comportării viitoare a variabilelor comandate și utilizarea unui criteriu de optimizare pentru selectarea acțiunii adecvate.

Una dintre cele mai bine cunoscute scheme de comandă predictivă este comanda aperiodică, care folosește un model de sistem pentru a calcula tensiunea care face eroarea zero într-un eșantion. Apoi tensiunea este aplicată folosind un modulator. O strategie de comandă predictivă diferită și foarte puternică, ce a fost aplicată recent la electronica de putere, este comanda predictivă a modelului (MPC).

În mod tradițional, cerințele comenzii au fost asociate în principal cu performanța dinamică și cu stabilitatea sistemului. În prezent, industria necesită specificații tehnice și restricții mai solicitante, și în multe cazuri este supusă reglementărilor și codurilor. Multe din aceste cerințe impun limite și condiții de funcționare care nu pot fi tratate numai de către hardware, dar au nevoie să fie abordate și de sistemele de comandă. Această schimbare în tendință a condus la dezvoltarea unor metode mai avansate de comandă.

Concepția unui sistem industrial cu electronică de putere poate fi văzută ca o problemă de optimizare, unde câteva obiective trebuie îndeplinite în același timp. Dintre aceste cerințe, restricții și provocări ale comenzii, următoarele sunt deosebit de importante în electronica de putere:

- Furnizează cea mai mică eroare posibilă în variabilele comandate, cu dinamică rapidă pentru urmărirea referinței și rejectarea perturbației;
- Acționează comutatorul de alimentare astfel încât pierderile prin comutație sunt minimizate. Această cerință duce la un randament superior și la o mai bună utilizare a dispozitivelor cu semiconductoare;
- Convertoarele de putere sunt sisteme comutate care generează în mod inerent un conținut de armonici. De obicei, acest conținut de armonici se măsoară ca THD (Coeficient total de distorsiune). Multe sisteme cu convertoare de putere au limitări și restricții cu privire la conținutul de armonici introdus de etajul de modulare. Aceste limite sunt specificate de obicei în standardele care se pot modifica de o țară la alta;
- Compatibilitatea electromagnetică (CEM) a sistemului trebuie luată în considerare, conform standardelor și regulamentelor stabilite;
- În multe sisteme, tensiunile de mod comun trebuie minimizate din cauza efectelor dăunătoare pe care le pot produce. Aceste tensiuni induc curenți de pierderi care reduc siguranța și durata de viață a unor sisteme;
- Performanță bună pentru un domeniu larg de condiții de funcționare. Datorită naturii neliniare a convertoarelor de putere, aceasta este dificil de realizat atunci când controlerul a fost reglat pentru un singur punct de funcționare al modelului de sistem linearizat;
- Unele topologii ale convertoarelor au propriile lor restricții și constrângeri inerente, cum ar fi stările de comutare interzise, problemele de echilibru al tensiunii, dezechilibrele puterii, limitarea rezonanțelor, și multe alte cerințe specifice.

Comanda predictivă acoperă o clasă foarte largă de controlere care și-au găsit recent aplicații în convertoarele de putere. Principala caracteristică a comenzii predictive este utilizarea unui model de sistem pentru predicția comportării viitoare a variabilelor comandate. Informațiile se folosesc de către controler pentru a obține acțiunea optimă, conform unui criteriu de optimizare predefinit.

Criteriul de optimizare în comanda predictivă bazată pe histerezis este menținerea variabilei comandate în limitele zonei de histerezis, în vreme ce în comanda bazată pe traiectorie, variabilele sunt forțate să urmeze o traiectorie predefinită. În comanda aperiodică, acțiunea optimă este aceea care face ca eroarea să fie egală cu zero în următorul moment de eșantionare. Un criteriu mai flexibil se folosește în comanda predictivă pe bază de model (MPC), exprimată ca o funcție de cost care trebuie minimizată.

Diferența dintre aceste grupuri de controlere este aceea că o comanda aperiodică și MPC cu un set de comenzi continue necesită un modulator pentru a genera tensiunea dorită. Acest lucru va duce la o frecvență fixă de comutație. Celelalte controlere generează direct semnalele de comutație pentru convertor, nu necesită un modulator, și vor prezenta o frecvență de comutație variabilă.

Un avantaj al comenzii predictive este acela că, conceptele sunt foarte simple și intuitive. În funcție de tipul comenzii predictive, implementarea poate și ea să fie simplă, asemănător cu comanda aperiodică și cu MPC cu set finit de comenzi (mai ales pentru un convertor cu două niveluri cu orizontul $N = 1$). Totuși, unele implementări ale MPC pot fi mai complexe, dacă se ia în considerare setul continuu de comenzi. Variații ale comenzii aperiodice fundamentale, pentru a o face mai robustă, pot de asemenea deveni foarte complexe și dificil de abordat.

Folosind comanda predictivă, este posibil să se evite structura în cascadă, care se folosește de obicei în schema de comandă liniară, obținându-se răspunsuri tranzitorii foarte rapide. Un exemplu îl constituie comanda turației folosind comanda predictivă bazată pe traiectorie.

Neliniaritățile sistemului pot fi incluse în model, evitându-se nevoia de a liniariza modelul pentru un punct de funcționare dat, și îmbunătățindu-se astfel funcționarea sistemului pentru toate regimurile. Este de asemenea posibil să se includă restricțiile asupra unor variabile atunci când se proiectează controlerul. Aceste avantaje pot fi foarte ușor implementate în unele scheme de comandă, cum ar fi MPC, dar sunt foarte dificil de obținut în alte scheme, cum ar fi comanda aperiodică.

MPC descrie o familie mare de controlere, și nu o strategie specifică de comandă. Elementele comune ale acestui tip de controler sunt faptul că utilizează un model al sistemului pentru a prezice comportarea viitoare a variabilelor până la un orizont de timp predefinit, și selecția acțiunilor optime prin minimizarea unei funcții de cost. Această structură prezintă câteva avantaje:

- conceptele sunt foarte intuitive și ușor de înțeles;
- se poate aplica unei largi varietăți de sisteme;
- se poate lua ușor în considerare cazul cu mai multe variabile;
- timpii morți pot fi compensați;
- includerea ușoară a neliniarităților în model;
- tratarea simplă a constrângerilor;
- controlerul rezultat este ușor de implementat;
- această metodologie este adecvată pentru includerea modificărilor și extensiilor în funcție de aplicațiile specifice.

Pentru a face posibilă implementarea MPC într-un sistem real, luând în considerare timpul scurt disponibil pentru calcul datorită eșantionării rapide, s-a propus să se mute off-line cea mai mare parte a problemei de optimizare, folosind o strategie denumită MPC explicită. Problema de optimizare a MPC se rezolvă off-line, luând în considerare modelul sistemului, constrângerile și obiectivele, având ca rezultat un tabel de căutare care conține soluția optimă ca o funcție a stării sistemului. MPC explicită a fost aplicată pentru comanda convertoarelor de putere, cum ar fi convertoarele c.c. – c.c. și invertoarele trifazate, precum și în comanda motoarelor sincrone cu magneți permanenți.

În etapa de proiectare a MPC cu set finit de comenzi pentru comanda unui convertor de putere, se identifică următoarele etape:

- modelarea convertorului de putere identificând toate stările de comutație posibile și relația acestora cu tensiunile sau curenții de intrare sau ieșire;
- definirea unei funcții de cost care să reprezinte comportarea dorită a sistemului;
- obținerea de modele în timp discret care permit să se prezică comportarea viitoare a variabilelor de comandat.

Când este implementat, controlerul trebuie să ia în considerare următoarele sarcini:

- să prezică comportarea variabilelor comandate pentru toate stările de comutație posibile;
- să evalueze funcția de cost pentru fiecare predicție;
- să selecteze starea de comutație care minimizează funcția de cost.

Modele hibride ale convertizoarelor statice de frecvență

Convertoarele statice de putere, prin modul lor de funcționare pot fi privite din punct de vedere al modelării matematice ca fiind sisteme hibride, adică sisteme în timp continuu-discret.

Cele mai importante blocuri funcționale din structura unui convertor static de putere sunt inverterul și redresorul. Pentru acestea sunt prezentate modele hibride într-o aproximare acceptabilă în vederea studiului sistemelor de comandă aferente sistemelor de reglare cu viteză variabilă care folosesc convertoare statice de putere; este vorba de modele pe 3 axe și pe două axe. În raportul complet sunt prezentate schemele operaționale din care se deduc ușor ecuațiile discret continue ce descriu sistemele hibride.

Sisteme de reglare cu orientare după câmp fără traductoare de turație

În cadrul sistemelor moderne de reglare a acționărilor cu motoare asincrone, traductoarele de turație, cum ar fi tahogeneratoarele, traductoarele digitale de poziție, se utilizează pentru a obține informații asupra turației motorului de acționare. Acestea influențează fiabilitatea sistemului de reglare, în special în cazul utilizării în medii necorespunzătoare și reduc avantajele sistemului de acționare. Pentru a elimina aceste traductoare se pot folosi metode de estimare a turației mașinii asincrone. Una dintre aceste metode utilizează estimarea vitezei unghiulare de alunecare din tensiunile și curenții statorici, dar ea introduce erori mari în estimarea turației. O altă metodă utilizează modelul matematic bifazat al mașinii asincrone, care introduce erori în cazul turațiilor mici și obținerea unor valori incorecte în regim staționar.

În ultimul timp, s-a încercat aplicarea algoritmului filtrului Kalman pentru estimarea vitezei unghiulare a rotorului. Această metodă dă rezultatele dorite, fără a introduce erori în estimarea turației, însă poate fi implementată numai în cazul sistemelor de reglare realizate cu microprocesor sau procesor de semnal.

În studiul în extenso sunt prezentate estimarea pe baza filtrului Kalman extins a turației unui sistem de acționare electric cu motoare asincrone, dar și estimatoare pentru rezistența rotorică.

2.5. Aplicații la sisteme de acționare multimotor

În studiul în extenso este prezentat un exemplu de acționare multimotor în realizarea căruia a fost implicată echipa proiectului, experiența acumulată în proiectarea, modelarea și implementarea acestor acționări fiind punctul de plecare pentru abordarea acestei noi tematici. Exemplul prezentat se referă la o *acționare multimotor pentru rama electrică suburbană destinată traficului feroviar*.

Metoda utilizării unui circuit comun de curent continuu la alimentarea înfășurărilor rotorice și utilizarea circuitelor de excitație separate, prin analogie se folosește și la acționările cu motoare asincrone prin utilizarea unui circuit intermediar comun de curent continuu și a mai multor convertizoare de frecvență, câte unul pentru fiecare motor.

Sisteme în care fiecare motor este condus de câte un convertizor de frecvență (multiple motors - multiple converters). Când sarcina care trebuie acționată este prea mare sau arhitectura aplicației o impune, se folosesc mai multe motoare, fiecare fiind condus de un

convertizor de frecvență. Termenul care definește strategia de structurare a aplicației de acționare este *load sharing*.

Topologiile de control pentru load sharing iau în considerare prezența interconexiunilor și informații despre sarcină (curentul motorului și cuplu). Cele mai simple tehnici de load sharing sunt prezentate în studiul în extenso și se referă la tehnici în care viteza de referință este comună cu urmărirea cuplului, și respectiv ajustarea vitezei și cuplului.

Pornind de la aceste topologii de bază, în funcție de complexitatea sistemului, dar și a cerințelor și performanțelor globale impuse sistemului de conducere, s-au dezvoltat și implementat structuri de conducere în care algoritmi de conducere implementați pot fi aleși de la algoritmi clasici de tip PID, până la algoritmi de tip neuro-fuzzy.

În *structura master-slave* viteza de ieșire a convertizorului master este referință de viteză pentru convertizorul slave. Dezavantajul sistemic al unei astfel de abordări constă în faptul că o perturbație apărută în subsistemul master este preluată și urmărită de sistemul slave, dar reciproca nu este adevărată. O astfel de structură este utilizată în aplicații cu cerințe modeste privind performanțele de reglare.

În *structura de cuplare în cross* un semnal de feedback suplimentar produs de diferența relativă de viteză dintre cele două subsisteme, asigură performanțe superioare de reglare.

Pentru astfel de structuri de conducere, pentru a verifica realizarea dezideratului de sincronism, se calculează un indice de performanță de tipul *Integrala absolută a erorii* IAE.

Pentru a obține performanțe superioare în sincronizarea mai multor motoare, se folosește o strategie de control care implică considerarea referințelor în cross ale fiecărui motor cu motoarele adiacente. Se definește eroarea de urmărire a vitezei unui motor față de viteza de referință și eroarea de sincronizare a fiecărui motor în raport cu motoarele adiacente.

Pentru dezvoltarea algoritmului de control se va folosi o tehnică de tip sliding-mode (control alunecător), iar schema bloc a controllerului de viteză al motorului i și dezvoltarea algoritmului sunt prezentate în studiul în extenso.

Fiecare astfel de controller este integrat printr-o rețea locală de comunicație cu un calculator supervisor, care asigură interfața pentru exploatare și integrarea cu un eventual nivel ierarhic superior de conducere. Protocoalele de comunicație folosite în astfel de rețele locale de comunicație sunt protocoale *proprietary* ale firmelor producătoare de convertizoare de frecvență, sau protocoale de comunicație standardizate în mediul industrial: Profibus, CAN, ModBUS, ModBUS-TCPIP, Siemens-TCPIP, Fanuc-TCPIP, Genius, SNP-x, etc.

În studiul în extenso este prezentat un exemplu de aplicație multimotor realizată de colectivul de implementare a acestui proiect, în cadrul unor contracte cu beneficiari industriali.

Scopul aplicației prezentate îl reprezintă aducerea la parametri tehnico-funcționali a echipamentului ce deservește un baraj hidroelectric cu 5 stăvile, precum și modernizarea instalațiilor de acționare a acestuia.

Etapele executate în cadrul lucrării sunt reprezentate de: proiectarea instalației electrice de alimentare, comandă, automatizare, protecție, integrare în sistemul SCADA pentru funcționarea în ansamblu a întregului baraj deversor, achiziția, fabricarea dulapurilor și panourilor, cât și montarea echipamentului, întregirea circuitelor de forță, secundare și de comunicație.

Instalația electrică de alimentare, comandă, automatizare și protecție este compusă din: dulapul de comandă, alimentare, automatizare și protecție, cofretele pentru montarea convertizoarelor de frecvență, circuitele de forță, circuitele secundare, motoarele electrice de acționare, traductoare de poziție, limitatori de cursă și / sau sarcină.

Dulapul de comandă, alimentare, protecție și automatizare, cuprinde echipamentul electric de alimentare, comandă, protecție și automatizare a motoarelor electrice de acționare, precum și automatul programabil care realizează logica funcționării și supravegherii echipamentului hidromecanic aferent, precum și legătura cu automatizarea generală a barajului și centralei, prin integrarea în sistemul SCADA.

Câteva date privind implementarea aplicației (pentru două baraje) ar putea oferi o imagine mai bună despre complexitatea ei: 2 stații de lucru, 13 PLC-uri, 13 Panouri Operator, 24 de rețele de comunicație, 23 bucle de automatizare, 16 convertizoare statice de frecvență, 23 de analizoare de rețea, 100 interfețe programabile și traductoare, aproximativ 5000 de variabile în 28 de programe software.

Echipamentul de automatizare a barajului, prin sistemul de comandă a acționării stavilelor utilizând câte două motoare cu două convertizoare independente dar cu funcționare sincronă, unitățile de control cu implementarea a trei regimuri de funcționare (manual-local, automat-local și automat-distanță), softul și arhitectura sistemului de comunicație, vor constitui repere importante în definitivarea soluțiilor tehnice pentru noul sistem de acționare multimotor cu turație variabilă și cu recuperarea în rețea a energiei de frânare individuale.

Sisteme în care mai multe motoare sunt conduse de un singur convertizor de frecvență (multiple motors - single converters)

În situația în care toate motoarele din cadrul acționării sunt de valori nominale similare, și funcționează la aproximativ aceleași cupluri de sarcină, se utilizează un singur invertor. Avantajele unei astfel de arhitecturi de control includ dimensiuni mai mici ale dulapurilor de comandă în comparație cu sistemul multi-invertor, greutate mai mică și costul total sensibil redus. Cu toate acestea, provocarea acestei arhitecturi de control, o constituie faptul că nu există două motoare care vor avea exact aceleași condiții de funcționare în orice moment.

După cum se știe în cazul general există două bucle de reglare în cascadă una interioară după cuplu și una exterioară după viteză. Dat fiind faptul că bucla de viteză este mai lentă, vom considera în cazul motoarelor identice, că este relevant pentru analiza acestei arhitecturi de control, comportamentul buclelor de reglare după cuplu. Se prezintă două tipuri de sisteme de comandă: *Master-Slave* și *Mean Strategy*.

În strategia Master-Slave doar un motor este controlat după strategia FOC, și anume motorul *primar*, în timp ce motorul *secundar* este cuplat în paralel cu cel primar.

Alegerea motorului primar se face dinamic în funcție de sarcină. Astfel motorul care are o sarcină mai mică va fi considerat motor primar.

În Mean control, strategia utilizată este de tip FOC, dar în buclele de reglare se consideră mediile curenților și vitezelor celor două motoare. Se poate spune în acest caz că se comandă un motor *virtual*. Diferența esențială privind dinamica celor două metode de control este că în metoda MS, starea motorului primar afectează motorul secundar, dar nu și reciproc. În metoda de medie Mean Control, ambele mașini se influențează reciproc. În literatura de specialitate se prezintă studii în care se concluzionează că metoda Mean control are în general rezultate mai bune față de strategia MS.

Arhitectură nouă de sistem de acționare multimotor cu turație variabilă și cu recuperarea în rețea a energiei de frânare individuale

Soluția nouă, propusă prin tema de cercetare, este utilizabilă în special în aplicații cu dinamică ridicată și presupune alimentarea individuală a fiecărui motor electric, cu avantajele următoare:

- se utilizează convertizoare de frecvență identice, de putere corespunzătoare puterii unui singur motor, rezultând de aici posibilitatea interschimbabilității acestora;
- se economisește energie electrică prin recuperarea în rețeaua de alimentare;
- motoarele electrice se încarcă uniform, indiferent de imperfecțiunile lanțului cinematic;
- instalația poate funcționa la parametrii corespunzător reduși, în cazul unui defect al unui convertizor de frecvență;
- motoarele electrice sunt protejate de protecțiile propriului convertizor;
- costuri reduse pentru convertizoarele de putere mică sau medie;
- protejarea subansamblurilor lanțului cinematic (reductoare, ambreiaje, etc.).

Modelul funcțional care va fi realizat conform propunerii de proiect prezintă avantajul utilizării unei scheme de acționare în care acționările independente (două motoare), vor avea un singur circuit intermediar de curent continuu dimensionat corespunzător. De asemenea, un progres

semnificativ în domeniul acționărilor electrice independente îl reprezintă utilizarea unui singur invertor de recuperare în rețea a energiei de frânare, în condițiile în care elementele de execuție (motoarele) acționează după caracteristici diferite.

Între motorul electric și mașina de lucru-utilaj, există doar reductoarele mecanice, cu raport de multiplicare fix. Ca urmare, echipamentul complex de acționare, trebuie să asigure pentru motoarele electrice: același cuplu de arbore, frecvențe de alimentare egale sau apropiate așa încât să mențină cuplul maxim la fiecare motor, variația frecvenței în toată plaja de la f_{\min} la f_{\max} , protecția motoarelor electrice la apariția unor defecte mecanice sau electrice.

Dintre aplicațiile specifice din domeniul industrial, pentru care noua soluție tehnică implementată de acest proiect va garanta buna funcționare în condițiile unui raport performanță/cost cât mai ridicat, în studiul în extenso sunt prezentate *Acționarea instalațiilor de deplasare ale utilajelor de carieră și Acționarea instalației de rotire pentru utilaje miniere de mare capacitate tip excavator și mașină de haldat.*

Echipamentul alimentează cu tensiune și frecvență variabilă cele 2 motoare asincrone cu rotorul în scurtcircuit utilizate în acționarea instalației de rotire pentru utilaje miniere de mare capacitate tip excavator și mașină de haldat, asigurându-se astfel modificarea turației acestora între zero și turația nominală. Deasemenea echipamentul este capabil să asigure recuperarea energiei rezultate în momentele în care unul sau mai multe motoare sunt în regim de generator (frânare), și să o injecteze în rețea. Prin utilizarea acestui mod modern de operare (funcționare în 4 cadrane) se asigură, pe de-o parte, eficientizarea procedurii de frânare a motoarelor de acționare, iar pe de altă parte economisirea de energie activă rezultată în urma frânării motorului/motoarelor, energie care este injectată în rețeaua de joasă tensiune respectând fazajele de pe instalația utilajului, energie care este utilizată de celelalte echipamente alimentate din rețeaua de joasă tensiune.

Structura echipamentului este conformă cu cea prezentată în fig.1 subcapitolul 7.4. din studiul în extenso. Echipamentul este alimentat din rețeaua de joasă tensiune de 3x380 Vac a utilajului prin intermediul unui filtru inductiv. De la ieșirea filtrului tensiunea se aplică unui bloc redresor comun care asigură tensiunea intermediară necesară funcționării a 2 convertizoare statice de frecvență independente care alimentează motoarele instalației de deplasare a utilajului. Metoda de comandă a acestora, bazată pe controlul vectorial al curentului, face posibilă obținerea unor performanțe deosebite, asigurând funcționarea motoarelor la cuplu maxim în tot domeniul de turație al motoarelor.

Prin utilizarea unor algoritmi performanți de conducere și principiul master-slave (în care unul din convertizoare este Master iar celălalt este Slave) se pot comanda cele două motoare astfel încât turațiile celor 2 motoare să fie identice în condițiile obținerii la ieșire a cuplului motor necesar.

Echipamentul este prevăzut cu un bloc de frânare recuperativă care asigură preluarea surplusului de energie din circuitul intermediar al convertizoarelor, pe perioada în care motoarele sunt frânate, și injectarea acesteia în rețeaua de alimentare de joasă tensiune în fază cu aceasta. Energia injectată este disponibilă pentru alimentarea altor consumatori cuplați la aceeași rețea. Prin utilizarea acestei metode se elimină chopperele de frânare și rezistențele adiacente utilizate în acționările clasice cu convertizor de frecvență. Se elimină astfel un element care produce pierderi de energie prin disiparea acesteia pe rezistențele de frânare și inconveniențele legate de acestea (încălziri excesive ale rezistențelor, posibilitatea distrugerii chopperului de frânare în cazul întreruperii unei rezistențe sau a cablului de legătură).

Echipamentele de acest fel, prin dimensionarea corespunzătoare a puterilor pentru blocurile convertizoare și ale echipamentelor de frânare regenerative, pot fi utilizate și în acționarea mecanismelor de rotire suprastructură.

Filtrul de intrare este dimensionat să diminueze perturbatiile electromagnetice induse de echipament în rețeaua de alimentare.

Puntea redresoare transformă tensiunea alternativă trifazată în tensiune continuă pentru circuitul intermediar.

Invertoarele de ieșire preiau tensiunea continuă din circuitul intermediar (ieșirea blocului redresor) și prin comanda corespunzătoare a tranzistoarelor IGBT din componența convertoarelor asigură alimentarea motoarelor de antrenare ale mecanismului de rotire cu tensiune și frecvență variabilă pentru a asigura cuplul impus la arborele motor.

Unitatea de frânare recuperativă din punct de vedere constructiv este asemanătoare invertoarelor de frecvență și are rolul de a prelua supratensiunile care apar în circuitul intermediar al echipamentului atunci când unul sau mai multe motoare frânează, de a transforma această tensiune în tensiune alternativă 3x380 Vca, în fază cu tensiune de alimentare a echipamentului, și de a o injecta în rețea.

Blocul de comandă electronică are următoarele funcții importante:

- comandă tranzistoarele IGBT din convertizoare și unitatea de frânare recuperativă;
- asigură protecția convertizorului în cazul apariției unor situații accidentale nedorite (scurtcircuit, supratensiune, supratemperatură, blocare motor, suprasarcină I2t);
- semnalizează (prin led-uri sau display LCD) mărimi caracteristice funcționării.

Blocul de comandă al invertorului are implementat algoritmul de reglare vectorială, și este prevăzut cu un microprocesor de semnal cu capacitatea de memorare și viteză de calcul foarte mari, ceea ce face posibilă rezolvarea, practic în timp real, a modelului matematic al mașinii electrice.

Blocul de comandă permite stabilirea corespondenței dintre parametrii modelului matematic și parametrii modelului real al motoarelor, printr-un program automat de identificare a parametrilor motorului electric a cărui turație trebuie reglată. Programul test al unității de comandă asigură și stabilirea constantelor acționării (constantele reguletoarelor). Parametri motorului electric folosiți în algoritmul de reglare vectorială (rezistența statorică, inductivitatea statorică, inductivitatea mutuală, fluxul de magnetizare) și constantele reguletoarelor sunt vizualizați pe monitorul unui PC sau Laptop, pentru o identificare corectă, cât mai apropiată de valoarea lor din modelul matematic.

Echipamentul va fi montat într-un dulap IP 44 care asigură protecția mecano-climatică a componentelor. Față de soluția clasică utilizată până în prezent (2 convertizoare distincte, fiecare din ele echipate cu chopper de frânare și rezistențele de frânare aferente) soluția prezintă următoarele avantaje:

- eliminarea rezistențelor de frânare și implicit recuperarea spațiului ocupat de acestea;
- recuperarea energiei înmagazinate în circuitul intermediar deci, implicit, economii de energie;
- echilibrarea mult mai rapidă a cuplului dezvoltat de fiecare motor prin folosirea unei singure tensiuni în circuitul intermediar pentru toate convertizoarele;
- dispariția posibilității de distrugere a rezistențelor de frânare (și implicit a chopperelor) în cazul unei frânări prelungite;
- simplificarea schemei de cablare și reducerea substanțială a numărului de cabluri de forță;

- construcție modulară pentru o depanare facilă și rapidă;
- funcționare stabilă a întregului echipament indiferent de fluctuațiile tensiunii de alimentare;

Caracteristici tehnice impuse unei astfel de acționări:

- tensiunea de alimentare : 3x380Vc.a. (+15%; -20%)
- frecvența tensiunii de alimentare : 50Hz + 2%
- puterea nominală de ieșire a convertizorului: 2 x 55kW
- capacitate de suprasarcină : 1,5 Pn / 1 min
- curentul maxim : 2 In
- tensiunea de ieșire : reglabilă 3 x (0... 380Vc.a)
- domeniul de variație a frecvenței de ieșire : 0,5Hz... 100Hz
- componente electronice de putere : IGBT
- timp de accelerare și decelerare : 1...3200 sec, reglabil
- echipamentul asigură sincronizarea frecvenței pe cele 2 acționări pentru întreg domeniul de variație al frecvenței de ieșire
- puterea de frânare recuperativă : 220kW
- tensiunea la ieșirea unității de frânare : 3x380Vca (reglabila in funcție de valoarea tensiunii de linie).

Arhitectura nouă a sistemului de acționare multimotor prezentată va fi detaliată în realizarea etapei de proiectare. Din multitudinea de soluții tehnice de comandă și control pentru acționările electrice, prezentate în studiu, ne vom orienta către implementarea metodelor mai eficiente funcțional, dar cu un raport preț/performanță cât mai accesibil potențialilor beneficiari.

Astfel, în proiectarea sistemului de acționare ne vom concentra pe satisfacerea cerințelor tehnice ale instalației de rotire pentru utilaje miniere de mare capacitate tip excavator și mașină de haldat a cărei acționare este asigurată de două motoare de 55kW fiecare.

Concluzii

Rezultatele așteptate ale etapei sunt cele prevăzute prin planul de realizare, și anume un studiu privind tehnicile moderne de comandă și control pentru invertoarele de putere și aplicații la sistemele de acționare multimotor. Considerăm ca gradul de realizare al obiectivelor acestei etape este de 100%. Astfel prin stabilirea unei *arhitecturi noi de sistem de acționare multimotor cu turație variabilă și cu recuperarea în rețea a energiei de frânare individuale*, se poate spune ca sunt îndeplinite toate elementele necesare continuării proiectului cu etapa a-II-a *Realizare documentație de execuție pentru modelul funcțional al sistemului de acționare multimotor*, în care se va realiza *Proiect model funcțional al circuitului intermediar de curent continuu*, *Proiect model funcțional pentru bloc module invertoare de ieșire și inverter recuperare*, *Proiect model funcțional pentru unitatea de comanda și control* și *Proiect model funcțional pentru sistemul de acționare multi-motor cu noua arhitectură de comandă*.

Pentru diseminarea rezultatelor obținute, s-a realizat un site al proiectului la adresa: <http://www.icmet.ro/SAMREC/index.html>, la care se adaugă permanenta preocupare atât a coordonatorului ICMET Craiova cât și a partenerului industrial CESI Automation Craiova, de a populariza rezultatele proiectului în rândul potențialilor beneficiari. In etapele următoare sunt prevăzute publicarea de articole și a unei cereri de brevet de invenție în legătură cu rezultatele proiectului.

Bibliografie

1. Câmpeanu A., *Introducere în dinamica mașinilor electrice de curent alternativ*, Editura Academiei Române, 1998
2. Simion, *Mașini electrice. Mașina sincronă*, Editura "Gh. Asachi", Iași, 2003
3. SAAL, C., SZABO, W. *Sisteme de acționare electrică. Determinarea parametrilor de funcționare*, București, Editura Tehnică 1981.
4. Fransua, Alexandru; Măgureanu, Răzvan: *Electrical Machines and Drive Systems*. Editura Tehnică, București in collaboration with Technical Press, Oxford, 1984.
5. Austin Hughes Senior Fellow: : *Electric Motors and Drives Fundamentals*, Types and Applications, Third edition , School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds
6. Mușuroi Sorin, *Controlul acționărilor electrice*, documentație disponibilă pe internet
7. Akagi H: *New trends in active filters for power conditioning*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 6, Nov/Dec 1996, pp. 1312-1322.
8. Bose B. K.: *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA, 2002.
9. Ionescu, F., Six, J. P., Floricău D., Delarue Ph., Nițu Smaranda, Boguș C.: *Electronică de putere – convertoare statice*, Editura tehnică, București, 1998, ISBN 973-31-1262-3.
10. Kelemen, Árpád, Imecs, Maria: *Electronică de putere*, Editura didactică și pedagogică, București, 1983.
11. Chiver Olivian, *Tructoare*, documentație disponibilă pe internet
12. Albu Mihai, *Invertorul PWM trifazat de tensiune*, documentație disponibilă pe internet
13. LEM, documentație de firmă
14. Richard Okrasa, *Adjustable Speed Drive*, Ontario Hydro
15. Texas Instruments, documentație de firmă
16. Microchip, documentație de firmă
17. Convertoare cc-ca. Invertoare – curs disponibil pe internet
18. Kelemen Árpád, Imecs Maria: *Sisteme de reglare cu orientare după cîmp ale mașinilor de curent alternativ*. Editura Academiei Române, București, 1989
19. Kelemen Árpád, Imecs Maria: *Vector Control of AC Drives. Volume 1: Vector Control of Induction Machine Drives*. OMIKK Publisher, Budapest, 1991, ISBN 9635931409
20. Kelemen Árpád, Imecs Maria: *Vector Control of AC Drives. Volume 2: Vector Control of Synchronous Machine Drives*. Ecrire-Publisher, Budapest, Hungary, 1993, ISBN 9635931409
21. Archana S. Nanoty, and A. R. Chudasama : *Vector Control of Multimotor Drive*; World Academy of Science, Engineering and Technology , International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering Vol:2 No:9, 2008
22. D.O. Kisch, *Reglarea vectorială a mașinilor de curent alternativ*, Editura ICPE, 1997
23. BHAKTI M JOSHI and MUKUL C CHANDORKAR: *Two-motor single-inverter field-oriented induction machine drive dynamic performance*, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, International Journal of Electronics Communications and Electrical Engineering ISSN : 2277-7040 Volume 3 Issue 7 (July 2013)
24. Amit Biswall, Sai Ram Reddy Bhavanam1, Dr. Umashankar S1, *Analysis of Common DC Link in VSI fed Multi-motor Drives*, School of Electrical Engineering, VIT University, Vellore-632014, Tamil Nadu, India
25. WHITAKER, JERRY C, *The Electronics Handbook*, IEEE Press, 1996.
26. *Controlul vectorial al acționărilor electrice*, curs, documentație disponibilă pe Internet
27. IVANOV S., GRENIER D., LABRIQUE F., RESENDE M., ROBYNS B. , Online Interactive Lessons on the Principle of the Direct Torque Control of the Induction Machine, WSEAS TRANSACTIONS on ADVANCES in ENGINEERING EDUCATION Issue 5, Volume 5, May 2008.
28. Estimarea parametrilor mașinii asincrone folosind filtrul Kalman extins, documentație disponibilă pe Internet
29. Compatibilitate electromagnetică (CEM). Partea 3: Limite. Secțiunea 2: Limite pentru emisiile de curent armonic (curent absorbit de aparat 16A pe fază). SR EN 61000-3-2+A12.
30. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2: Environment. Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. IEC 61000-2-2.
31. General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto. IEC 1000-4-7.
32. BABU C., „Control of Voltage Source Inverters using PWM/SVPWM for Adjustable Speed Drive Applications”; http://ethesis.nitrkl.ac.in/1133/1/Control_of_Voltage_Source_Inverters_using_PWM.pdf
33. Chiasson, J., Tolbert, L. M., McKenzie, K. and Du, Z., “Control of a multilevel converter using resultant theory,” in IEEE Transactions on Control System Technology, vol. 11, pp. 345–354, May 2003.

34. Malinowski, M. And Kazmierkowski, M. P., "Simple Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier Using Space Vector Modulation – A Comparative Study", in EPE Journal, Vol. 35. No. 2 pp. 28-34, 2003.
35. GYUGYI L., „Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensator”;
36. Geyer, T., Becutti, A., et. al, "Model Predictive Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motors", in ECCE Conference, 2010
37. FRONTIERS OF MODEL PREDICTIVE CONTROL, Edited by Tao Zheng, 2012, Interenet
38. Predictive Control of Inverter Supplied Electrical Drives, Ralph Kennel, Arne Linder
39. S. Seo et al, Hybrid Control System for Managing Voltage and Reactive Power in the JEJU Power System, Journal of Electrical Eng. and Technol. Vol. 4, no.4 pp. 429-437, 2009.
40. T. Geyer, G. Papafotiou, M. Morari, Model Predictive Direct Torque Control-Part I: Concept, Algorithm, and Analysis, IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 56, no.6, pp. 1894-1905, 2009.
41. Jose Rodriguez and Patricio Cortes, *PREDICTIVE CONTROL OF POWER CONVERTERS AND ELECTRICAL DRIVES*, John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2012
42. Jun Ren, Chun-Wen Li, De-Zong Zhao, *CAN-based Synchronized Motion Control for Induction Motors*, International Journal of Automation and Computing 06(1), February 2009
43. Vismay Chauhan, Prof. V.P. Patel, *Multi-motor Synchronization Techniques*, International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), Volume 3, Issue 2, February 2014
44. Nicola M., et al., SISTEM INTEGRAT DE AUTOMATIZARE A INSTALAȚIILOR DE ACȚIONARE ELECTRICĂ, HIDRAULICĂ ȘI DE ÎNCĂLZIRE A STAVILELOR CU CLAPETĂ DE PE BARAJELE DIN HIDROCENTRALE, Buletinul Tehnico-Științific al ICEMENERG, Editura ICEMENERG București, pp. 52-59, ISSN 1584-0484, 2007
45. Nicola M., Velea F., AUTOMATIC CONTROL OF A HIDROPOWER DAM SPILLWAY, International Conference on Applied and Theoretical Electricity ICATE 2010 Craiova, 8-9 October, Annals of the University of Craiova no.34, pp. 279-282, ISSN : 1842-4805, 2010.

ANEXĂ - CUPRINS al studiului în extenso

Capitolul 1. Acționări electrice	4
1.1. Generalități	4
1.2. Acționări cu turație variabilă	7
1.3. Cerințe și impuneri ale directivelor europene în domeniul acționărilor electrice cu viteză variabilă	9
Capitolul 2. Mașina electrică	14
2.1. Generalități	14
2.2. Transformarea unei armături statorice trifazate într-o armătură statorică bifazată, echivalentă energetic	16
Capitolul 3. Electronică de putere în convertizoarele statice de frecvență	23
3.1. Invertoare	23
3.1.1. Generalități și principii de funcționare	23
3.1.2. Invertoare de tensiune și curent realizate cu comutatoare statice	28
3.1.3. Comanda PWM pentru invertoare trifazate	36
3.1.4. Modulația fazorială	38
3.1.5. Timpul mort în invertoare	42
3.1.6. Regimul de redresor al invertoarelor	42
3.1.7. Invertoare realizate cu tiristoare obișnuite	45
3.1.8. Circuite driver pentru invertoare	49
3.2. Filtre	51
3.2.1. Generalități	51
3.2.2. Convertoare de frecvență indirecte	52
3.2.3. Filtre EMC	54

3.3. Traductoare	55
3.3.1. Generalități, performanțe, clasificare	55
3.3.2. Traductoare de curent	57
3.4. Alegerea convertizoarelor de frecvență pentru aplicațiile monomotor	60
Capitolul 4. Sisteme de prelucrare digitală a semnalelor	62
4.1. Caracteristicile sistemelor de prelucrare digitală a semnalelor	62
4.2. Unități aritmetice și de control pentru procesoare DSP	65
4.3. Considerente pentru alegerea procesorului de semnal	68
Capitolul 5. Controlul sistemelor de acționare electrică	
5.1. Controlul scalar	69
5.1.1. Convertoare statice utilizate pentru alimentarea mașinilor asincrone	69
5.1.2. Controlul acționării mașinilor de inducție trifazate alimentate cu frecvență variabilă	69
5.1.3. Controlul scalar al mașinilor de inducție	72
5.2. Controlul vectorial	73
5.2.1. Controlul vectorial direct	81
5.2.2. Controlul vectorial indirect	81
5.2.3. Controlul vectorial direct în cuplu și flux	83
5.3. Controlul vectorial al mașinilor de inducție trifazate	85
5.3.1. Principiul orientării după câmp	91
5.3.2. Metode de conducere vectorială. Scheme echivalente în sisteme dq particulare	91
	95
Capitolul 6. Sisteme de control moderne pentru acționări electrice cu convertizoare statice de frecvență	
6.1. Aspecte generale, cerințe și provocări ale comenzii	98
6.2. Metode de comandă predictivă pentru convertoare de putere și acționări electrice	98
6.3. Modele hibride ale convertizoarelor statice de frecvență	101
6.4. Estimarea parametrilor mașinii asincrone	108
6.4.1. Modelul mașinii asincrone folosind filtrul Kalman	113
6.4.2. Filtrul Kalman extins pentru estimarea rezistenței rotorice	113
6.5. Sisteme de reglare cu orientare după câmp fără traductoare de turație	117
6.5.1. Estimarea turației pe baza modelului bifazat al mașinii asincrone	119
6.5.2. Estimarea turației pe baza filtrului Kalman extins	119
	122
Capitolul 7. Aplicații la sisteme de acționare multimotor	125
7.1. Generalități	125
7.2. Sisteme în care fiecare motor este condus de câte un convertizor de frecvență (multiple motors - multiple converters)	127
7.3. Sisteme în care mai multe motoare sunt conduse de un singur convertizor de frecvență (multiple motors - single converters)	139
7.4. Arhitectură nouă de sistem de acționare multimotor cu turație variabilă și cu recuperarea în rețea a energiei de frânare individuale	146
Concluzii	154
Bibliografie	157