

R A P O R T T I I N I F I C I T E H N I C

ETAPA III – 2016

**Elaborare documentatie de executie si realizare partiala a modelului
functional al sistemului de actionare multimotor;
Elaborare propunere pentru protejarea drepturilor de proprietate
industrial**

1.Rezumatul etapei

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

Activitatea III.1 Elaborare Documentație de Execuție și Realizare parțială model funcțional pentru circuitul intermediar de curent continuu și pentru invertoarele principale.

Activitatea III.2 Elaborare Documentatie de Execuție și Realizare parțială model funcțional pentru inverterul de recuperare și unitatea de comandă și control.

Activitatea III.3 Elaborare Documentație de Execuție preliminară și Realizare parțială model funcțional pentru sistem de acționare multi-motor cu turație variabilă și cu recuperarea în rețea a energiei de frânare individuală.

Activitatea III.4 Elaborare propunere pentru protejarea drepturilor de proprietate industrială.

1.2. *Rezultatele așteptate ale etapei* sunt **cele prevăzute prin planul de realizare**, și anume *Documentație de execuție și realizare parțială modele funcționale ale subansamblelor și al sistemului de acționare multimotor; Propunere de protecție a drepturilor de proprietate industrială (cerere brevet)*. Aceste rezultate au fost obținute prin colaborarea dintre CO – ICMET Craiova și partenerul P1 – SC CESI Automation SRL Craiova.

1.3. Rezultatele acestei etape au avut ca punct de plecare concluziile din *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 în etapa 1 și *Proiect variant preliminar model funcțional pentru subansamble ale sistemului de acționare multimotor cu noua arhitectură de comandă* realizat în etapa 2 de CO – ICMET Craiova și partenerul P1 – SC CESI Automation SRL Craiova, la care se adaugă și experiența acumulată de membrii echipei proiectului în aplicații cu acționări multimotor, aplicații care au fost descrise sintetic în studiul amintit mai sus.

Intr-o descriere centrată pe problemă, putem spune că s-a sintetizat din contextul tehnologic actual privind acționările electrice multimotor o arhitectură de control multimotor, de la care s-a pornit în vederea realizării parțiale - *modele funcționale ale subansamblelor și al sistemului de acționare multimotor*. La acestea putem adăuga faptul că soluția adoptată este optimală dar flexibilă cu aplicabilitate clară, identificată împreună cu partenerul industrial la momentul detalierei propunerii de proiect și structurării planului de realizare, și anume aplicații în industria mineritului de suprafață. Practic CO și P1 au structurat și îndeplinit cerințele acestei etape prin 3 obiective:

- *Documentație de Execuție și Model funcțional primar pentru circuitul intermediar de curent continuu și pentru invertoarele principale*
- *Documentație de Execuție și Model funcțional primar pentru inverterul de recuperare și unitatea de comandă și control*
- *Documentație de Execuție preliminară și Model funcțional primar pentru sistem de acționare multi-motor cu turație variabilă și cu recuperarea în rețea a energiei de frânare individuală.*

Această structurare este *naturală* atât din prisma componenței sistemului global de acționare multimotor: blocuri de forță, blocuri de comandă, control și comunicație, dar și d.p.d.v. al soluției globale alese (ne referim de exemplu, la faptul că circuitul intermediar de c.c. este comun).

În cadrul fiecărui obiectiv, din cele trei, s-a pornit de la tema de proiectare globală particularizată în cadrul proiectului, s-au prezentat dimensionarea principalelor componente și funcționalitatea lor, lista de materiale și desene de execuție, cât și simulări numerice pornind de la modelele matematice implementate în Simulink pentru principalele blocuri funcționale.

Iterații de tipul trial and error sunt necesare pentru a evita greșelile grosiere de proiectare, dar și pentru a surprinde o serie de efecte și fenomene complexe, chiar dacă în mediu simulat, care să convingă că trece o finalitate pozitivă întregului proiect.

Simulările au urmat linia de la simplu la complex pentru a pune în evidență atât elemente calitative cât și cantitative cu privire la dimensionarea blocurilor componente, dar și a întregului ansamblu de acționare.

In această etapă principalele elemente care au fost adugate pentru definitivarea proiectului de acționare multimotor, se referă la organizarea și implementarea algoritmilor de control în rețea, comunicației aferente, iar d.p.d.v. al simulărilor numerice au fost studiate modele pentru cuplarea multimotor rigid sau elastic, deci sisteme care vor trebui să asigure aceeași turație sau același cuplu pentru fiecare motor (conform aplicațiilor identificate cu partenerul industrial P1, aplicații pe care le solicită piața internă, dar chiar și cea externă limitrofă).

Schemele de simulare și rezultatele obținute în MATLAB/Simulink, prezintă un număr relativ mare de simulări cu valori ale componentelor din listele de materiale stabilite prin proiectare, și au condus la ideea dimensiunilor elementelor de forță dar și a strategiei de conducere împreună cu buclele de reglare și estimatoarele care se vor implementa în DSP (urmând aproape aceeași structură ca cele implementate în Simulink) sunt corecte, astfel că s-a realizat execuția parțială propriu-zisă a sistemului de acționare multimotor propus în tema generală de proiectare, dar și o serie de teste funcționale parțiale.

Schemele, cablajele și simularea blocurilor din unitatea de comandă și control, s-au făcut în mediul de proiectare Altium Designer, iar programarea parțială a DSP-urilor Microchip în mediul de dezvoltare MPLAB.

Datorită restructurării în 2016 a planului de realizare, realizarea modelului funcțional al Sistemului de acționare multimotor din această etapă este parțială, urmând ca în etapa 4, să realizăm forma definitivă împreună cu achiziția completă de echipamente, realizarea model funcțional și testările corespunzătoare.

Tot în cadrul etapei 3, a fost depusă o cerere de brevet de invenție [1] la OSIM CBI-A00749/24.10.2016. De asemenea, au fost publicate (sau sunt în curs de publicare) 4 articole din care 3 prezentate la conferințe de profil naționale/internaționale și un articol publicat într-o revistă de specialitate [2-5]. Un articol este citat IEEE-Xplore și 2 DBI.

2.Descrierea științifică și tehnică a cercetărilor etapei analizate

Datele tehnice ale Sistemului de acționare multimotor care conține Convertizoare statice de frecvență proiectate cu caracteristici tehnice superioare ce asigură reglarea turației unor motoare asincrone cu rotorul în scurtcircuit între zero și valoarea nominală utilizând algoritmi de control în rețea sunt: Tensiunea de alimentare: 3 x 400Vac / 50Hz; Puterea nominală: 2 x 55KW; Puterea maximă: 1,5 x PN / 2 minute; Temperatura de funcționare: -25°C – 45°C.

Structura echipamentului de acționare multimotor: Redresor trifazat unic și filtru intermediar – 1 bucat; Convertizoare de frecvență 55KW – 2 buc și; Invertor de recuperare în rețeaua industrială a energiei de frânare – 1 bucat.

Convertizorul static de frecvență cuprinde următoarele subansamble pe circuitul de forță: punte redresoare; filtru pentru circuitul intermediar; punte invertoare; traductoare marimi electrice.

Convertizorul static de frecvență este protejat la apariția accidentală a următoarelor situații: scurtcircuit; supratensiune în circuitul intermediar; supratemperatură; blocare motor.

Interfața minimală a convertizorului de frecvență conține:

a) Semnalizări pe unitatea de comandă electronică: START, STOP, INTERBLOCARE, DESATURARE, Uintermediar, AVARIE.

b) Semnalizări pe display-ul cu cristale lichide de pe panoul frontal al convertizorului
Display-ul poate fi configurat să afișeze: starea convertizorului, frecvența de ieșire/frecvența prescrisă, curentul prin motor, tipul avariei, etc.

c) Semnalizări la distanță: semnalizare funcționare invertor "Start"; semnalizare nefuncționare invertor "Stop"; semnalizare defect invertor "Avarie".

d) Comenzi de la distanță: pornire/oprire invertor; schimbarea sensului de rotație; creșterea/scaderea turației motorului de acționare.

Caracteristicile generale ale unui convertizor de frecvență sunt prezentate în tabelul de mai jos.

Marimi de intrare	
Tensiunea de alimentare	3 x 400 V c.a. (+15%; -20%)
Frecventa tensiunii de alimentare	50 Hz \pm 2%
Marimi de iesire	
Puterea nominala de iesire	55 KW
Capacitate de suprasarcina	1,5 Pn / 30 sec.
Curentul nominal de iesire	86 A c.a.
Tensiunea de iesire	reglabila 3 x (0...400 V c.a)
Domeniul de variatie a frecventei	1,5 Hz... 50 Hz (100 Hz)
Componente electronice de putere	tranzistoare IGBT
Timp de accelerare si decelerare	5...180 sec, ajustabil; rampa de accelerare/frânare=150rpm/s
Marimi de reactie	0...10 V sau 4... 20 mA
Sistem de racire	ventilatie forzata
Conditii de mediu	
Zona climatica	climat normal (N)
Altitudinea maxima	1000 m
Temperatura mediului ambiant	-10°C \div +40°C
Umiditate relativa la 25°C	max.80% fara condensare

Schema general a sistemului de acționare multimotor cu noua arhitectură de comandă este prezentat în Fig. 1. i 2.

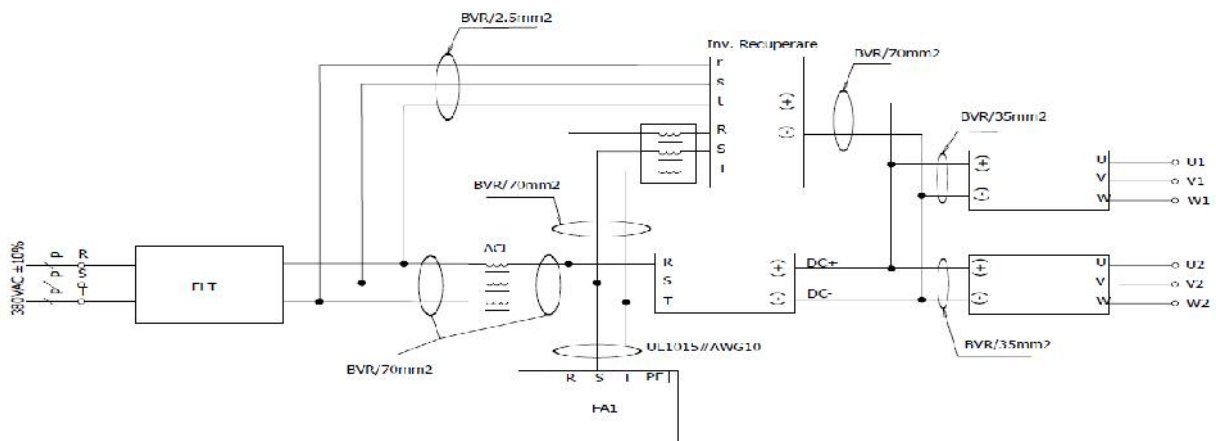


Fig. 1 Schema general sistem de acționare multimotor: blocuri invertoare, redresor și filtre rețea

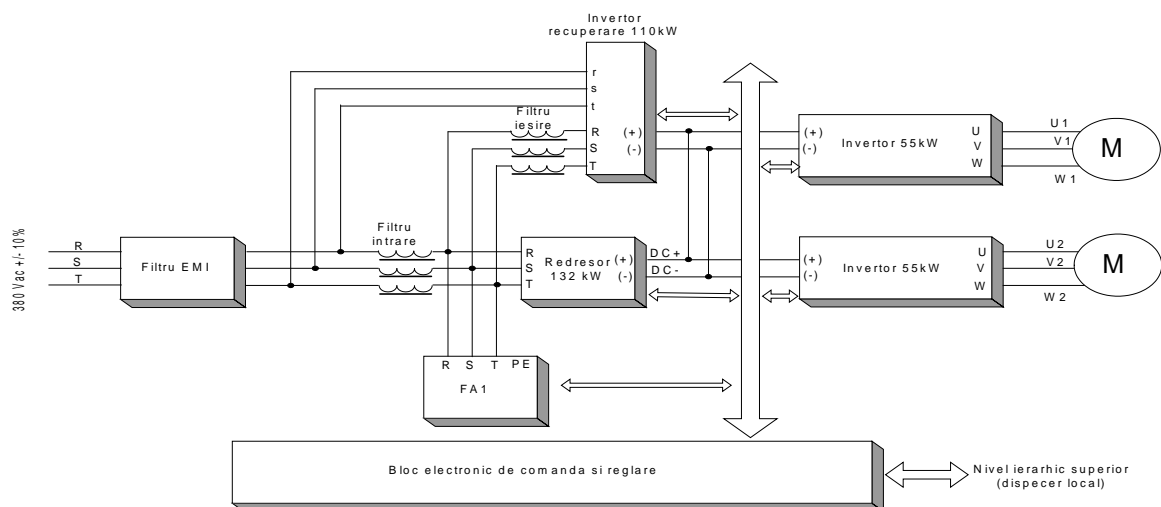


Fig. 2 Schema general sistem de acționare multimotor: blocuri de forță, de comandă, reglare și comunicație

Sistemul de acționare multimotor va fi utilizat în special în aplicații cu dinamică ridicată și presupune alimentarea individual a fiecărui motor electric, cu impunerile următoare:

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

Echipamentul va fi montat într-un dulap IP 44 care asigură protecția mecano-climatică a componentelor.

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 IEC 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. Sistemul de acționare multimotor din acest proiect va respecta aceste standarde.

Cele 2 invertoare principale de acționare și invertorul de recuperare energie, vor fi controlate de către un DSP. Fiecare dintre aceste DSP-uri va fi programat și montat pe câte o placă de comandă.

Unitatea de comandă și control a fiecărui invertor trebuie să aibă implementat un algoritm de reglare vectorială, să fie prevăzută cu un microprocesor de semnal cu capacitate de memorare și viteză de calcul foarte mari, ceea ce face posibilă rezolvarea, practic în timp real, a modelului matematic al mașinii electrice.

Unitatea de comandă și control permite stabilirea corespondenței dintre parametrii modelului matematic și parametrii modelului real al motoarelor, printr-un program automat de identificare a parametrilor motorului electric al cărui turație trebuie reglată. Programul test al unității de comandă asigură și stabilirea constantelor acționării (constantele reguletoarelor). Parametrii 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.

La alegerea componentelor necesare pentru implementarea tehnicilor numerice și hibride în conducerea convertizoarelor statice trebuie prevăzute următoarele aspecte:

- puterea de procesare necesară calculului matematic complex;
- existența unui număr suficient de convertizoare analog-digitale și digital-analogice pentru a putea prelua informațiile de la sistem;
- existența unui număr suficient de mare de ieșiri digitale;
- spațiul de memorie pentru program să poată cuprinde software-ul atât în forma inițială cât și eventualele îmbunătățiri ulterioare;
- memoria RAM să permită folosirea tuturor variabilelor și dimensiunilor de proces;
- memoria EEPROM să fie suficient de mare pentru a permite salvarea marimilor de control pe perioada când lipsește tensiunea de alimentare;
- mediul de dezvoltare trebuie să fie un limbaj de nivel înalt care să permită dezvoltarea corectă a software-ului, cât și dezvoltarea ulterioară a eventualelor upgrade-uri.

Electronica de comandă asigură interfața dintre DSP și echipamentele de forță, și descrie semnalele I/O și de comunicație: Impulsurile PWM; Intrări numerice; Ieșiri numerice; Intrări analogice; Comunicația între invertoare pe protocol CANOpen.

Comunicația între invertoare

În aplicațiile multi-motor este necesară sincronizarea invertoarelor în funcție de tipul sarcinii și a interacțiunii dintre motoare astfel:

- In cazul cuplarii rigide a 2 sau mai multe motoare, toate motoarele trebuie sa aiba aceeași viteză. In caz contrar vor apărea oscilații ale sistemului datorate faptului că nu toate motoarele dezvoltă cuplu util: unul sau mai multe motoare pot fi antrenate, ceea ce duce la transformarea acestora în generatoare. Acestea nu mai dezvoltă cuplu util ci cuplu rezistiv. Aplicațiile in care se folosește acest tip de sistem sunt: macarale de mare capacitate, lifturi, rotirea suprastructurilor, etc.
- In cazul cuplarii elastice a 2 sau mai multe motoare, toate motoarele trebuie să dezvolte același cuplu. Aplicații: benzi transportoare, deplasarea utilajelor cu benzi, etc. Având în vedere ca motoarele sunt cuplate cu elemente elastice (benzi de cauciuc, etc.) sau funcționează independent dar acționează asupra aceleiași sarcini, sistemul trebuie să echilibreze cuplul dezvoltat de fiecare motor. Dezechilibrul poate fi generat de următorii factori: uzura neuniformă a elementelor de cuplare, virajul utilajelor care presupune distanțe diferite pentru fiecare benzi, etc. In acest caz viteza motoarelor nu este importantă, ci cuplul dezvoltat de fiecare motor.
- Sisteme complexe, cu minim 3 motoare, 2 fiind cuplate rigid între ele și următoarele cuplate flexibil cu primele. Aceste sisteme impun folosirea ambelor metode de sincronizare: in cuplu și in viteză. Aplicații: benzi transportoare cu stații de acționare distribuite, etc.

Pentru a asigura viteza de comunicație necesară acestor sisteme și siguranța datelor vehiculate, se va implementa protocolul de comunicație CanOpen.

Pentru comunicația cu sistemele de comandă și control (PC, SCADA, etc.) se va implementa protocolul de comunicație Ethernet.

Procesorul de semnal pentru controlul in timp real trebuie să asigure: Arhitectură Harvard; Execuție 8 operații in fiecare ciclu; Acumulatori pe 40 de biți pentru calcule de mare precizie; Viteza de procesare de până la 70 de MIPS; Modul hardware PWM pentru controlul motoarelor; Convertoare analog – digital cu precizia de 12 biți; 9 numărătoare pe 16 biți; 4 numărătoare pe 32 de biți; Interfață USB; Interfață UART; Interfață SPI; Interfață I²C; Interfață ECAN; DMA cu 15 canale.

Software-ul de comandă și control pentru sistemul general de acționare multimotor trebuie să fie dezvoltat într-un mediu de dezvoltare integrat (IDE) care să cuprindă o suită de instrumente folosite pentru a dezvolta aplicații, plus debugger încorporat. Acesta trebuie să includă optimizare C / C++, editor pentru codul sursă, manager de proiecte, debugger, profiler, precum și multe alte caracteristici.

Software-ul dezvoltat pentru aplicația multimotor trebuie să aibă următoarele caracteristici:

- Control vectorial al motoarelor asincrone cu rotorul in scurt-circuit fără senzor de turație (sensorless);
- Identificarea automată a parametrilor electrici ai motorului (R_s , R_r , L_s , L_r , flux, curent de magnetizare) folosind doar parametrii nominali ai motorului (curent nominal, tensiune nominală, turație nominală);
- Stabilitate și răspuns rapid la schimbarea sarcinii motorului;
- Modulație PWM folosind metoda Space Vector pentru limitarea distorsiunilor armonice și folosirea optimă a energiei din circuitul intermediar de curent continuu;
- Implementarea reguletoarelor PI pentru controlul vitezei și a curentului;
- Implementarea unui modul software de comunicație serială pentru comunicarea cu software-ul PC.

Fiecare convertizor de frecvență va alimenta un motor de 45kW, cu caracteristicile: putere activă : 45KW; frecvență: 50Hz; turație nominală: 1470rpm; tensiune: 400V; curent: 84A; factor de putere: 0.88; rezistență stator: 0.041 Ω ; rezistență rotor: 0.050 Ω ; inductanță stator/rotor: 0.8 mH; inductanță mutuală: 20.7 mH. Practic, subansamblele din Fig. 1 și 2 împreună cu cerințele impuse mai sus prin tema generală de proiectare a sistemului de acționare multimotor vor fi abordate în cele 3 secțiuni următoare.

2.1. Documentație de Execuție și Model funcțional primar pentru circuitul intermediar de curent continuu și pentru invertoarele principale

Puntea redresoare transformă tensiunea alternativă trifazată in tensiune continuă pentru circuitul intermediar. Elementele componente alese pentru proiect din gama ofertelor existente pe piață, îndeplinesc următoarele condiții:

- Transfer de caldur prin placa de baza metalic izolat ;
- Lipituri sigure pentru o fiabilitate ridicat ;
- Conexiuni tip jumătate de punte (half bridge).

Filtrul pentru circuitul intermediar

Este dimensionat sa corespund frecvenței de comutație din inverter și asigură un factor de pulsație impus al tensiunii și curentului.

In Fig. 3 este prezentat schema electric a redresorului și a filtrului pentru circuitul intermediar de current continuu.

Condensatorul de filtrare C7 se incarca prin rezistenta de incarcare R7, iar cand tensiunea masurata de traductorul de tensiune T2 depaseste 80% din valoarea tensiunii nominale de iesire U2, se cupleaza contactorul de scurtcircuitare K. Contactul auxiliar al acestuia, prelucrat in circuitele de comanda, este conditie de validare "START" pentru convertizoarele de frecventa.

In regimul de franare, energia electrica rezultat , incarca filtrul C7 peste valoarea nominala, iar la depasirea pragului de $1,2 \cdot U_{2N}$, porneste automat inverterul de recuperare spre rețeaua industrială.

In oricare din regimurile de lucru, curentul este tinut sub control de unitatea de comanda care primeste informatii de la traductorul de curent T1.

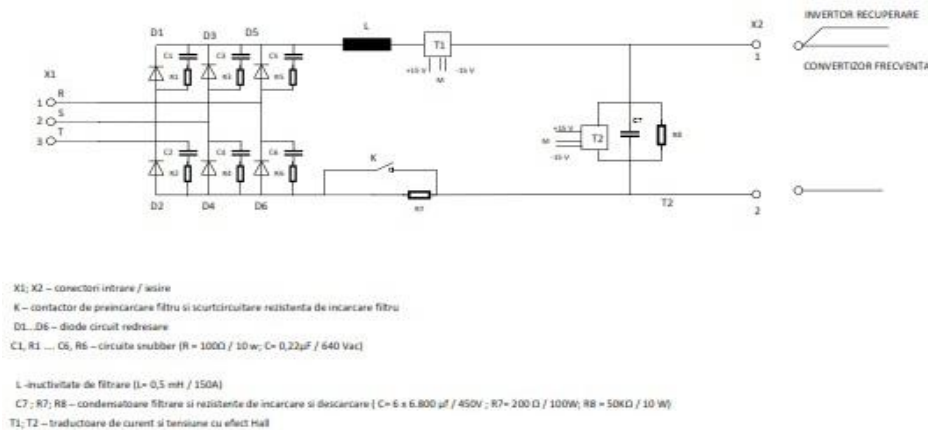


Fig.3 Schema electric a redresorului și a filtrului pentru circuitul intermediar

Ventilația: ventilație forțată cu aer asigurată de 3 ventilatoare de 250m³/h. Toate componentele electronice de putere se montează pe radiator de aluminiu și se construiește un canal special de ventilație pentru optimizarea fluxului de aer.

Proiectul conține **Desene de execuție, Lista de materiale** pentru realizarea redresorului și filtrului din circuitul intermediar, dar și poze ale acestui subansamblu.

Puntea inverter

Transform tensiunea continuă din circuitul intermediar în tensiune alternativă trifazată de amplitudine și frecvență reglabile. Modulele cu tranzistoare IGBT din componența inverterului sunt comandate de amplificatoare de impuls separate de partea de comandă prin optocuplare. Fiecare amplificator de impuls are sursă proprie de alimentare.

Modulele cu tranzistoare IGBT, alese pentru proiect din gama ofertelor existente pe piață, îndeplinesc următoarele condiții:

- Produse de ultimă generație robuste și sigure în funcționare;
- Placa de bază din cupru izolat utilizând tehnologia DBC (Direct Bonded Copper) ;
- Capacitate crescută de cicluri de putere;
- Cu rezistor de poartă integrat.

Circuitele driver pentru modulele cu tranzistoare IGBT, alese pentru proiect din gama ofertelor existente pe piață, îndeplinesc următoarele condiții:

- Pentru module IGBT având tensiunea CE (cu poarta emitor scurtcircuitată) de până la 1200 V;
- Funcționează ca un circuit dublu de drivere pentru IGBT și de asemenea ca două drivere independente;
- Buffere de intrare compatibile CMOS/TTL (HCMOS);
- Protecție la scurtcircuit prin monitorizarea tensiunii CE;
- Oprire ușoară în caz de scurtcircuit;

- Izolare datorata transformatoarelor;
- Monitorizarea subtensiunii de alimentare ($< 13\text{ V}$);
- Semnal de ieire logic pentru eroare de memorie.

Schema de forță invertoare principale (de acționare motoare)

Comanda tranzistoarelor de putere din structura invertoarelor (Fig. 4), este realizat cu ajutorul unor module specializate numite drivere. Acestea primesc semnale logice de putere mic de la modulele de comand cu ieire PWM, și realizează izolarea galvanic precum și adaptarea în putere a acestor comenzi necesare comutării tranzistoarelor de putere.

Deoarece tranzistoarele IGBT sunt de putere mare, între ieirea integratului driver-ului și grila MOS a semiconductorului se folosește un etaj de amplificare care poate susține impulsuri de curent importante pentru încărcarea și descărcarea rapidă a capacității grilei. Etajul este realizat cu o pereche de tranzistoare bipolare complementare care pot prelua curenti de colector de până la 15 A. Tranzistorul bipolar se deschide atunci când la ieirea integratului specializat apare un potențial ridicat. În acest fel va lua naștere un puls de curent a cărui amplitudine este limitată de o rezistență. Sarcinile electrice transportate de acest curent vor încălzi rapid capacitatea de grilă a IGBT-ului cu o tensiune pozitivă și îl va deschide. Cu cât amplitudinea pulsului de curent va fi mai mare cu atât timpul de intrare în conducție a IGBT-ului va fi mai scurt. Blocarea IGBT-ului este inițiată atunci când semnalul de ieire coboară spre valori negative. Astfel, este adus în conducție tranzistorul bipolar complementar care va descărca rapid sarcinile acumulate în capacitatea de grilă, blocând IGBT-ul.

Pentru siguranța funcționării invertoarelor se folosește un bloc specializat de protecție și de tratare a defectului. Acest bloc are rolul de a monitoriza curentul din circuitul intermediar de c.c., de a activa pe cale optică protecția dacă valoarea curentului depășește un anumit prag (protecția la supracurent), de a prelua și memora situațiile de defect, precum și de a bloca semnalele de comandă a IGBT-urilor atât timp cât circuitul de memorare reține defectul.

Când este detectat un supracurent prin IGBT se declanșează o secvență de avarie prin care tranzistorul de putere este blocat mai lent pentru a se evita supratensiuni mari de comutație. Simultan va fi transmis un semnal de defect către un integrat specializat și în același timp va fi alertat structura ierarhic superioară de existența unui defect printr-un semnal logic FAULT. De asemenea există un circuit de supraveghere watch dog privind scăderea tensiunii de alimentare.

Pe durata blocării voite a IGBT-ului, circuitul de detecție al defectului este dezactivat pentru a preveni detecția unor false situații de avarie.

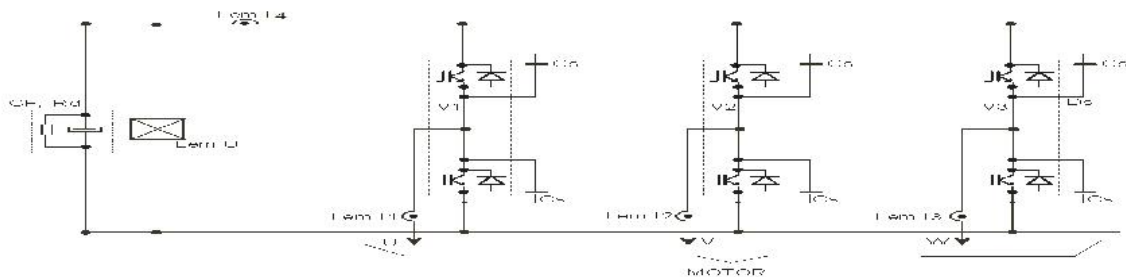


Fig.4 Schem de forță invertoare principal

Ventilația: ventilație forțată cu aer asigurat de 2 ventilatoare de 250m³/h pentru fiecare din invertoarele principale. Toate componentele electronice de putere se montează pe radiator de aluminiu și se construiește un canal special de ventilație pentru optimizarea fluxului de aer.

Proiectul conține **Desene de execuție** ale dulapurilor în care vor fi amplasate invertoarele principale, **Lista de materiale** pentru realizarea invertoarelor principale, dar și poze ale acestui subsansamblu.

Pentru a studia comportamentul unui redresor și al filtrului intermediar, și a invertoarelor principale înainte de construirea lor propriu-zis s-au efectuat o serie de **simulări numerice** folosind mediul MATLAB/Simulink.

Construcția unor astfel de echipamente de forță este costisitoare și se impune un studiu în mediu simulat pentru cazul componentelor dimensionate anterior. Simulările au urmat linia de la simplu la complex pentru a pune în evidență atât elemente calitative cât și cantitative cu privire la dimensionarea redresorului, filtrului intermediar și a invertoarelor principale.

Simulările conțin scheme care pornesc de la faptul că înglobează sau nu condensator de filtrare și se evidențiază undulațiile inacceptabile ale tensiunii redresate în cazul lipsei condensatorului. Sarcinile sunt de diverse tipuri și valori, iar snubberele au valori uzuale pentru gama de puteri studiat în acest proiect. Deoarece redresorul proiectat face parte dintr-un ansamblu mai complex, s-au efectuat și simulări în care au fost înglobate un inverter, un motor de 45kW și unitate de conducere de tip FOC.

Este prezentat o schemă de bază implementată în Simulink pentru studiul IGBT-urilor, precum și parametrizarea caracteristicilor de funcționare pentru un IGBT folosind mediul MATLAB. Caracteristicile de funcționare la 25°C și 125°C pentru diverse valori ale tensiunii de gril -emitor pentru IGBT-urile din invertoarele de acționare sunt prezentate, folosind Simulink-ul, împreună cu rezultatele simulării pentru IGBT-urile din inverterul de recuperare. Se poate constata o bună concordanță între caracteristicile obținute prin simulare și cele date în catalogul firmei producătoare Infineon, fapt ce validează într-o primă aproximație simulările ulterioare care se bazează pe modelul IGBT din Simulink.

Se prezintă un model Simulink care urmărește evoluția pe 200ms a tensiunii redresate, a tensiunii între fazele inverterului și a tensiunii filtrate (Fig. 5) dar și a curenților prin diode (Fig. 7), în cazul în care în schemă este prezent redresorul și un inverter care alimentează o sarcină de 45kW. În fig. 6 este prezentată o analiză FFT a tensiunii pe sarcină, din care se remarcă o filtrare bună, în care THD = 2,29%.

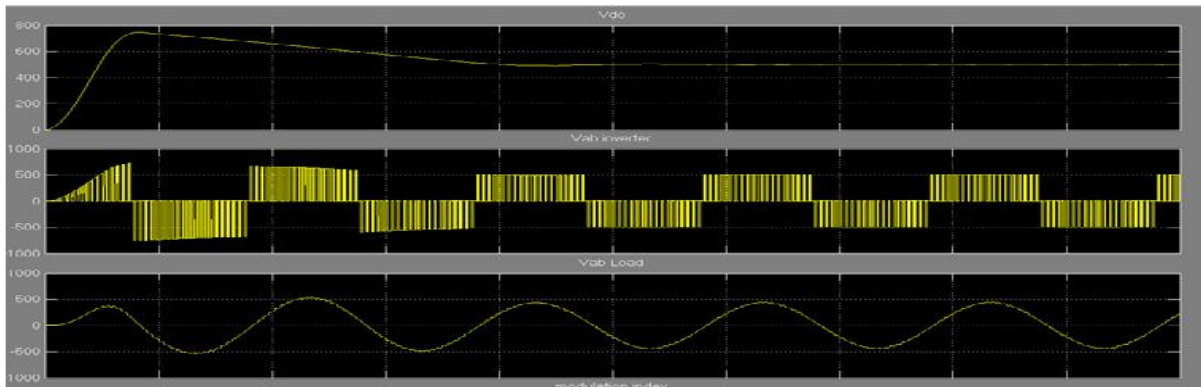


Fig. 5 Tensiunea din circuitul intermediar de cc, tensiunea între 2 faze ale inverterului și tensiunea pe sarcină - pentru C=8400 uF

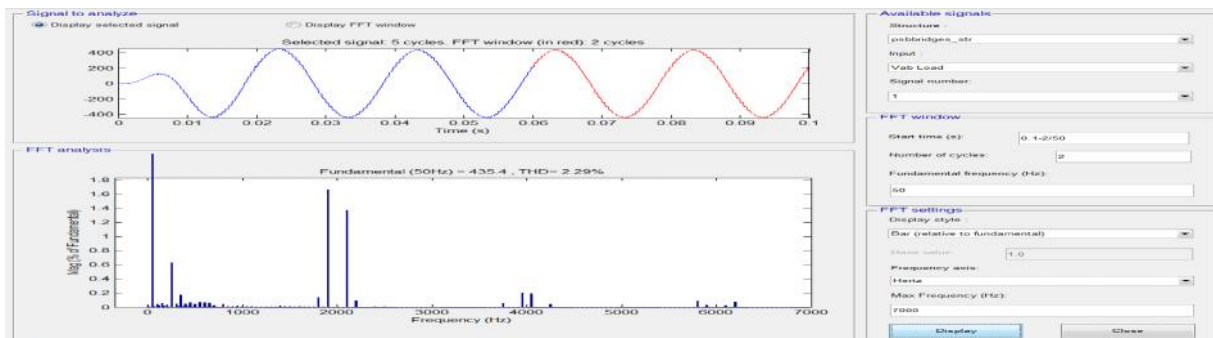


Fig. 6 Tensiunea pe sarcină și analiza FFT

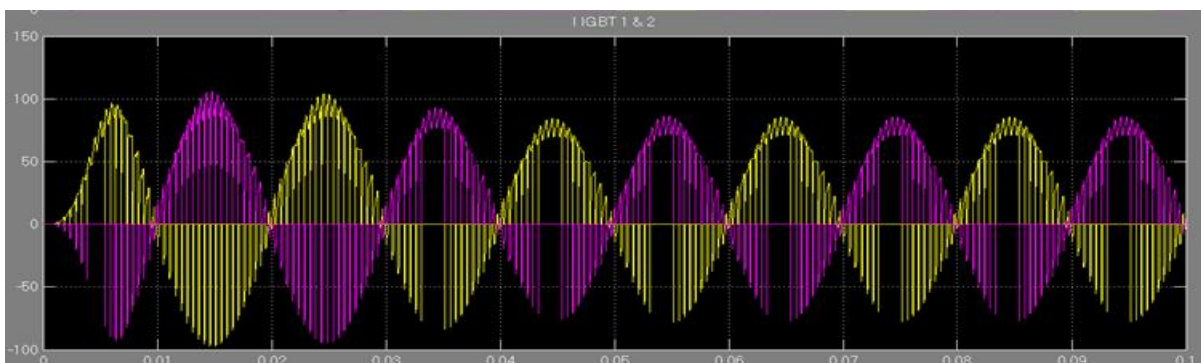


Fig. 7 Curenții prin IGBT-uri

Simul rile numerice efectuate au pornit de la scheme implementate în Simulink, adaptate obiectivelor acestui proiect, iar parametrizarea elementelor din schemele simulate au ca baz de referință Listele de materiale. Un num r relativ mare simul ri au condus la ideea c dimensionarea redresorului, filtrului din circuitul intermediar i a invertoarelor principale este corect , astfel c s-a realizat execuția propriu-zis a acestor subansamble din sistemul de acționare multimotor propus în tema generală de proiectare.

2.2. Documentație de Execuție și Model funcțional primar pentru inverterul de recuperare și unitatea de comand și control

Schema de forță inverter de recuperare

Inverterul de frânare regenerativ (Fig. 8) asigur preluarea surplusului de energie din circuitul intermediar al convertizoarelor, pe perioada in care motoarele sunt frânate, i injectarea acesteia in rețeaua de alimentare de joasă tensiune în fază cu aceasta.

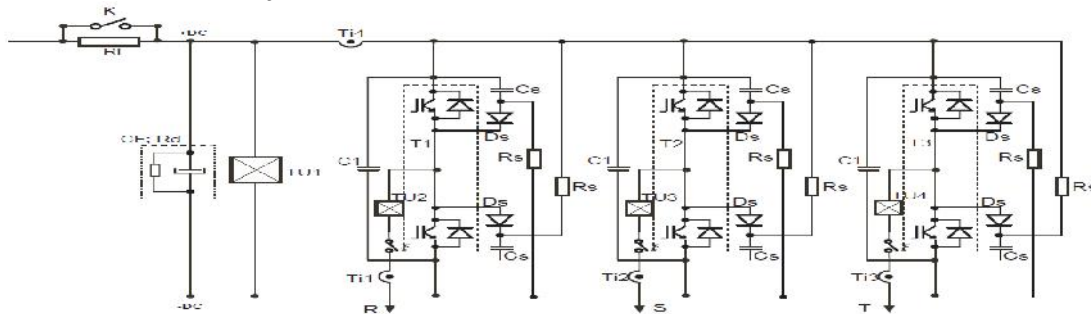


Fig. 8 Schem de forță inverter de recuperare

Energia injectata este disponibila pentru alimentarea altor consumatori cuplați la aceeași rețea. Prin utilizarea acestei metode se elimin chopperle de frânare și rezistențele adiacente utilizate in acționările clasice cu convertizor de frecvență. Se elimină astfel un element care produce pierderi de energie prin disiparea acesteia pe rezistențele de frânare și inconvenientele legate de aceasta (incălziri excesive ale rezistențelor, posibilitatea distrugerii chopperului de frânare in cazul intreruperii unei rezistențe sau a cablului de legătură, etc.).

Ventilația: ventilație forțată cu aer asigurat de 3 ventilatoare de 250m³/h pentru inverterul recuperare. Toate componentele electronice de putere se monteaz pe radiator de aluminiu i se construiește un canal special de ventilație pentru optimizarea fluxului de aer.

Proiectul conține **Desene de execuție** al dulapului in care va fi amplasat inverterul de recuperare, **Lista de materiale**, dar i poze ale acestui subansamblu.

UCC- Proiectare hardware

In proiect sunt descrise interfețele de semnale I/O și de comunicație: Impulsurile PWM; Intrari numerice; Iesiri numerice; Intrari analogice; Comunicatia între invertoare pe protocol CANOpen.

De exemplu pentru Impulsurile PWM, pentru a obtine o modulație optima, SpaceVector, comanda tranzistoarelor IGBT se face in pereche. Impulsurile PWM se aliniaza la centru. Frecvența de comutație este 4kHz, iar indicele de modulație m=0,9.

Pentru a adapta semnalul PWM de la DSP c tre driverele IGBT-urilor, se va folosi o schem similar cu cea din Fig. 9.

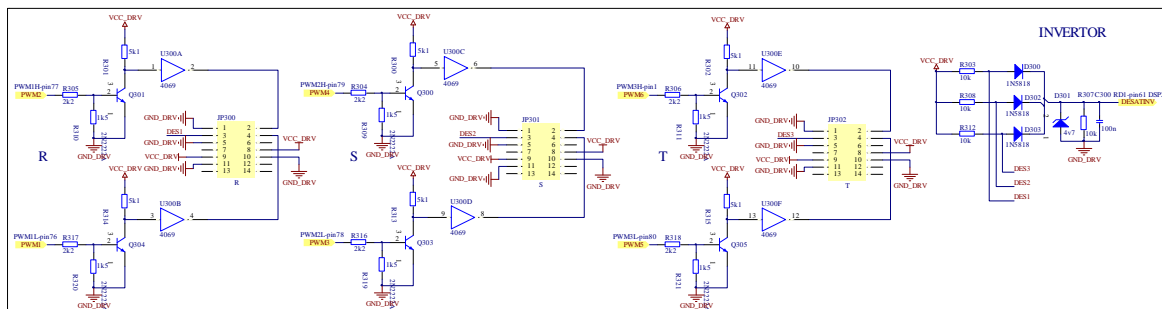


Fig.9 Adaptare semnale PWM generate de DSP

A fost ales Procesorul de semnal (DSP) dsPIC33EP810MU810, produs de firma Microchip pentru a echipa UCC a fiecărui inverter din sistemul de acționare multimotor SAMREC.

Acest DSP îndeplinește toate specificațiile impuse în tema de proiectare privind arhitectura, capacitățile de calcul paralel, interfațările cu alte periferice, inclusiv comunicația în rețea.

Modelul 3D al plăcii electronice de comandă a fost realizat folosind mediul de proiectare electronic Altium Designer. Analizarea modelului de mai sus a permis verificări funcționale și de proiectare fără a fi necesară lansarea în producție a PCB-ului în această etapă.

Cablajul imprimat : s-a realizat conform standardelor internaționale :

- SR CEI 60050(541):1995 Vocabular electrotehnic internațional. Capitolul 541: Circuite imprimate

- SR EN 60097:1996 Sisteme gril pentru circuite imprimate

- SR EN 60194:2007 ver.eng. Proiectarea, fabricarea și asamblarea plăcilor imprimate.

Termeni și definiții:

- SR EN 61182-2-2:2013 ver.eng. Produse pentru plăci imprimate echipate.

Date descriptive de fabricație și metodologia de transfer. Partea 2-2: Cerințe intermediare pentru implementarea fabricației plăcilor imprimate

- SR EN 61188-1-1:2003. Plăci imprimate și plăci imprimate echipate. Proiectare și utilizare. Partea 1-1: Cerințe generale. Considerații privind planeitatea ansamblurilor electronice

- SR EN 61188-5-8:2008 ver.eng. Plăci imprimate și plăci imprimate echipate. Proiectare și utilizare. Partea 5-8: Considerații privind fixarea (pastilă/îmbinare). Componente matriceale (BGA, FBGA, CGA, LGA)-utilizare. Partea 1-2: Cerințe generale. Impedanță controlată.

- SR EN 61188-5-5:2008 ver.eng. Plăci imprimate și plăci imprimate echipate. Proiectare și utilizare. Partea 5-5: Considerații privind fixarea (pastilă/îmbinare).

Se va folosi câte o placă de comandă cu DSP la inverterul de recuperare și la fiecare din invertoarele principale pentru acționarea motorului.

Diferențele majore vor fi în software. Se vor înlocui modulele de control al motorului din UCC-urile din invertoarele principale cu module pentru sincronizarea cu rețeaua și reglatoare pentru menținerea tensiunii din circuitul intermediar la valoarea setată (pentru UCC-ul invertoarelor de recuperare).

În proiect se prezintă **Schemele electronice de comandă**, **Cablaje imprimate** pentru placa de comandă care conține DSP-ul, și **Lista de materiale** pentru realizarea plăcilor de comandă.

Proiectare software

Software-ul de comandă și control pentru sistemul general de acționare multimotor este dezvoltat în MPLAB, și îndeplinește toate specificațiile impuse în tema de proiectare privind organizarea și funcționalitatea modulelor software care asigură controlul vectorial FOC sensorless și algoritmi de conducere în rețea pentru sincronizare în frecvență și cuplu (în funcție de specificul aplicației globale de acționare multimotor).

Pentru următoarele dezvoltări și depanări/modificări ulterioare, software-ul de comandă și control a fost împărțit în următoarele module/funcții:

- **init**: configurează regiunile și limitele pentru convertoarele analog-numerice;
- **Clarke**: calculează transformata Clarke;
- **Control**: configurează microprocesorul;
- **eCAN**: configurează și activează comunicația cu DSP-urile altor invertoare;
- **Ether**: configurează comunicația Ethernet;
- **iPark**: calculează transformata Park inversă;
- **Measure**: efectuează operațiile de citire a porturilor (analog sau digital) și de conversie a măsurimilor;
- **Park**: calculează transformata Park;
- **PI**: definește, configurează și lansează reglatoarele PI;
- **Estim**: acest modul estimează viteza motorului și calculează frecvența și unghiul curentului de magnetizare;
- **Open**: modul folosit pentru calcule împreună cu modulul Estim;
- **SVgen**: generează impulsurile PWM conform metodei SVPWM;
- **Timer**: configurează registrele interne și pornește număratoarele;

- Sync: calculează frecvența teșunii din rețea și valoarea acesteia;
- MAIN: bucla principală de program.

Pentru fiecare dintre aceste module sunt prezentate în proiect caracteristici funcționale și sunt prezentate implementări parțiale din codul sursă. Sunt prezentate în proiect și vizualizări pe osciloscop a impulsurilor PWM generate de DSP, cât și implementarea unui dead-time de $2\mu\text{s}$ pentru evitarea intrării simultane în conducție a tranzistoarelor de pe aceeași fază.

În anexele proiectului sunt prezentate elemente de implementare a controlului sensorless, estimatele de flux și viteză conform documentației DSP-ului firmei Microchip, elemente care au fost respectate în implementarea modulelor soft în cadrul proiectului de acționare multimotor SAMREC. Pentru a studia comportamentul sistemului convertizor de frecvență plus motor înainte de construirea propriu-zisă a convertizorului s-au efectuat o serie de **simulări numerice** folosind mediul MATLAB/Simulink. S-au efectuat simulări în care au fost înglobate un convertizor cu strategia de conducere de tip FOC și un motor de 45kW. Simulările au urmat linia de la simplu la complex pentru a pune în evidență atât elemente calitative cât și cantitative cu privire la comportarea dinamică globală.

S-au efectuat atât simulări pentru cazul în care structura globală conține un encoder pentru informația de viteză, cât și pentru cazul în care abordarea este sensorless iar implementarea unor estimate de stare este strict necesară. Practic s-au evidențiat două direcții de cercetare privind estimatele: prima este direcția dată de estimatele indicate de firma producătoare a DSP-ului Microchip (o implementare parțială de cod pentru un astfel de estimator de viteză, este prezentată în Anexa 5), iar cea de-a doua direcție este dată de estimatele implementate în Simulink, și prezentate pe larg în [8], cartea lui Bose B. K.: *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA, 2002.

Parametrizările din simulările prezentate în proiect folosesc valorile stabilite în proiectele anterioare pentru redresor, filtru intermediar și invertor. Obiectul condus este un motor de 45kW din gama aplicațiilor uzuale asupra cărora se concentrează acest proiect pe ansamblu. Simulările numerice efectuate au pornit de la scheme implementate în Simulink, adaptate obiectivelor acestui proiect. Un număr relativ mare de simulări cu valori ale componentelor din listele de materiale, au condus la ideea că dimensiunile elementelor de forță dar și a strategiei de conducere împreună cu buclele de reglare și estimate implementate în DSP sunt corecte, astfel că s-a realizat execuția propriu-zisă a acestor subansamble din cadrul sistemului de acționare multimotor propus în tema generală de proiectare.

Modul de comandă vectorial ales este de tip FOC (vezi Fig. 10) și sunt prezentate parametrizarea reguletoarelor de viteză, de flux, de curent, rampa de accelerare/frânare, filtre și limitări, cât și parametrizarea motorului, redresorului, invertorului, filtrului intermediar și a chopperului de frânare. În aplicația multimotor propusă în tema generală de proiectare în locul chopperului de frânare folosit în simulări va fi folosit un invertor de recuperare a energiei.

Deasemenea sunt prezentate schemele generale de control, ale controlerelor de viteză și FOC implementate în Simulink, ale controlerelor de flux și curent, transformările de coordonate și de calcul ale poziției rotorului, modelele discrete electrice și mecanice pentru un motor electric, modelul discret pentru un chopper și f.d.t. ale blocurilor din Simulink cu parametrii concreți ai motorului din aplicația prezentată.

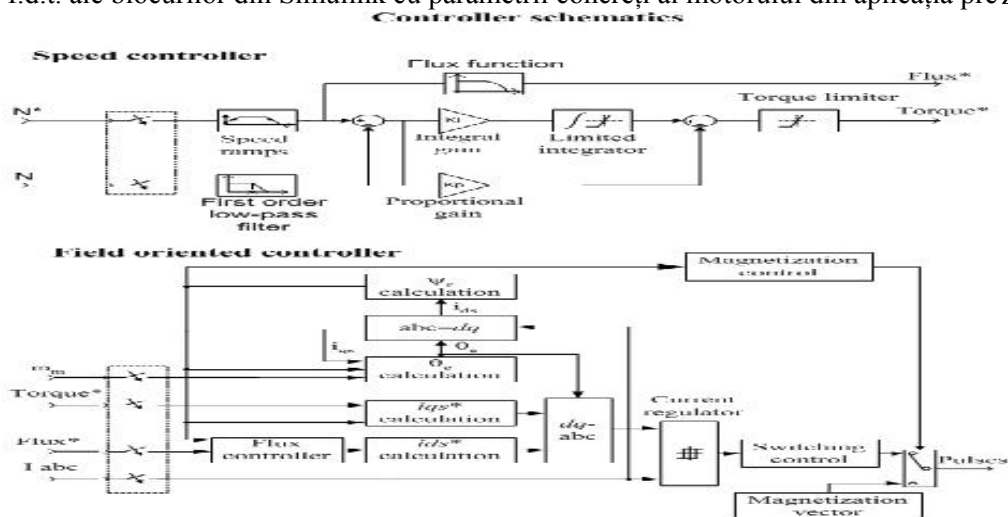


Fig. 10 Schema general de control implementat în Simulink

În simulările prezentate, în varianta cu encoder, se va urmări comportamentul ansamblului convertizor plus motor prin măsurimile: curent stator, viteza rotorului, cuplul și tensiunea din circuitul intermediar.

Parametrii care au fost variați au fost: pentru regulatorul de viteză K_p și K_i , pentru regulatorul de flux K_p și K_i , rampa de accelerare/frânare și banda de hysterezis pentru regulatorul de curent.

Acordările reguletoarelor de tip PI s-au făcut pornind de la parametrii și modelele discrete prezentate mai sus. Este evident că acordarea reguletoarelor din DSP va fi puțin diferită de cea obținută prin simulare, datorită faptului că simulările nu pot surprinde absolut toate modurile și dinamicile din realitate, dar tabloul calitativ se prezintă cu siguranță, iar rezultatele bune obținute în simulări și implementarea unor algoritmi în DSP care urmează linia celor din Simulink constituie garanția că și modelul real care se va construi va funcționa cu rezultate bune.

Parametrii reali ai motorului pot varia în timp față de cei nominali (în special datorită temperaturii), astfel că prin simulare, se constată că reguletoarele au o acordare bună chiar pentru o variație substanțială a acestora în jurul valorilor nominale.

Se obține acordarea optimă a reguletoarelor și se prezintă simulările pentru referințe variabile de cuplu și viteză (vezi Fig. 11-12).

În Fig. 11 referința variabilă de viteză este dată de secvența:

$[0\ 0.5\ 2\ 4\ 7\ 8\ 9]s \rightarrow [0\ 150\ 300\ 500\ 350\ 450\ 700]rpm$.

Pe lângă performanțele dinamice bune obținute datorită acordării corecte a reguletoarelor (eroare staționară, timp de răspuns, timp de creștere, suprareglaj și indice de oscilație), se constată că la secunda 7 când referința de viteză scade de la 500rpm la 350rpm, apare fenomenul de frânare recuperativ și tensiunea în circuitul intermediar crește. În Simulink pentru a surprinde acest fenomen am setat chopperul de frânare între limitele 750V (Activation Voltage) și 650V (Shutdown Voltage). În implementarea reală în locul chopperului de frânare se va utiliza un invertor de recuperare a energiei.

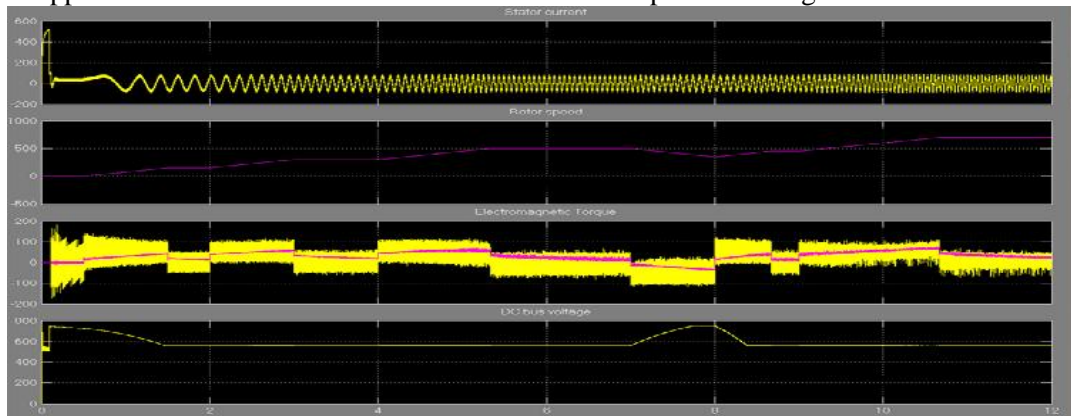


Fig. 11 Rezultate simulare model în care pentru regulatorul de viteză $K_p=300$, $K_i=2000$, pentru regulatorul de flux $K_p=100$, $K_i=30$, Banda hysterezis reguletor curent= 10A, $acc=150rpm$ și cu impunerea referinței de viteză $[0\ 0.5\ 2\ 4\ 7\ 8\ 9]s \rightarrow [0\ 150\ 300\ 500\ 350\ 450\ 700]rpm$

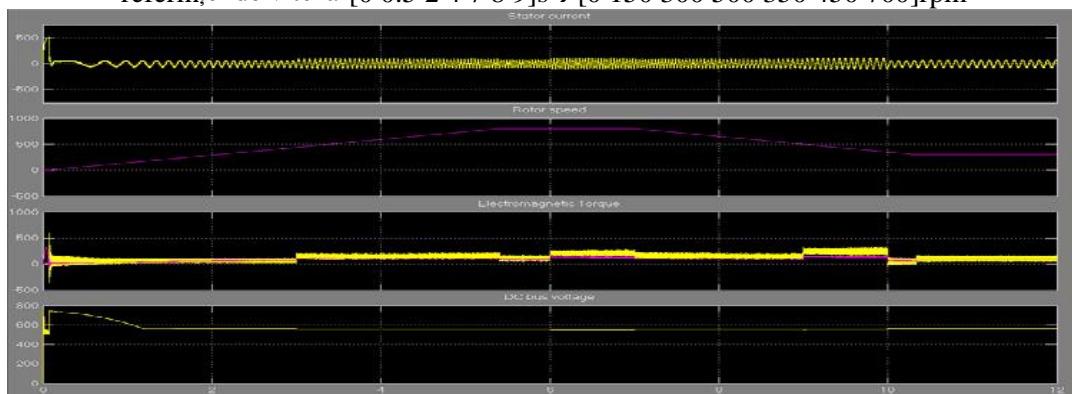


Fig. 12 Rezultate simulare model în care pentru regulatorul de viteză $K_p=300$, $K_i=2000$, pentru regulatorul de flux $K_p=100$, $K_i=30$, Banda hysterezis reguletor curent= 10A, $acc=150rpm$ și cu impunerea referinței de viteză $[0\ 7]s \rightarrow [800\ 300]rpm$ și cuplu $[0\ 3\ 6\ 9\ 10]s \rightarrow [10\ 100\ 200\ 300\ 100]Nm$

In varianta **sensorless** a modelului convertizor plus motor se constat prezența suplimentară, față de modelul anterior, a unui bloc estimator. Tipul de estimator al vitezei unghiulare este MRAS – Model Referencing Adaptive System. Se renunță astfel la encoder, iar viteza unghiulară este estimată din măsurile de curenți și tensiuni. Se prezintă Estimatorul de viteză MRAS implementat în Simulink și descris pe larg în [8].

Folosind criteriul de hiperstabilitate Popov, pentru a se obține stabilitatea asimptotică globală se obține un estimator de forma[8]:

$$\hat{S}_r = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right), \text{ unde } < = \hat{\Psi}_{dr}^s \Psi_{qr}^s - \Psi_{dr}^s \hat{\Psi}_{qr}^s.$$

Schema bloc a estimatorului MRAS – Model Referencing Adaptive System este prezentat în figura 13.

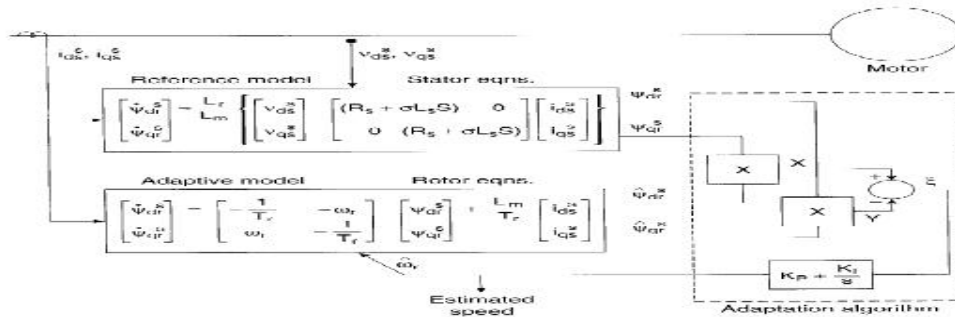


Fig. 13 Schema bloc a estimatorului MRAS

În simulările prezentate în varianta sensorless, se va urmări comportamentul ansamblului convertizor plus motor prin măsuririle: curent stator, viteza rotorului, cuplul și tensiunea din circuitul intermediar.

Parametrii care au fost variați au fost: pentru regulatorul de viteză K_p și K_i , pentru regulatorul de flux K_p și K_i , rampa de accelerare/frânăre și banda de histerzis pentru regulatorul de curent. În plus față de cazul cu encoder, pentru estimatorul care este implementat în jurul unui regulator PI, apar parametrii de acordare K_p și K_i ai regulatorului din MRAS.

Acordările reguletoarelor de tip PI s-au făcut pornind de la parametrii și modelele discrete prezentate mai sus. Datorită faptului că estimatorul trebuie să lucreze mai rapid decât buclele exterioare de reglare (de viteză și flux), dacă se păstrează parametrii de acordare pentru regulatorul de viteză ca în cazul cu encoder se obține un răspuns nesatisfăcător. Astfel micșorând substanțial valorile de acordare pentru regulatorul de viteză (s fie mult mai mici decât cele ale regulatorului din estimator), este obținută acordarea optimă. În Fig. 14 și 15 se prezintă simulările pentru referințe variabile de cuplu și viteză. Datorită acordării corecte a reguletoarelor se obțin performanțe dinamice bune (eroare staționară, timp de răspuns, timp de creștere, suprareglaj și indice de oscilație).

Atât în simulări cât și în implementarea reală din DSP-uri, o atenție specială se acordă fenomenului de saturație al blocurilor componente. Pentru buclele de reglare se implementează componente de limitare și anti wind-up în reguletoarele PI.

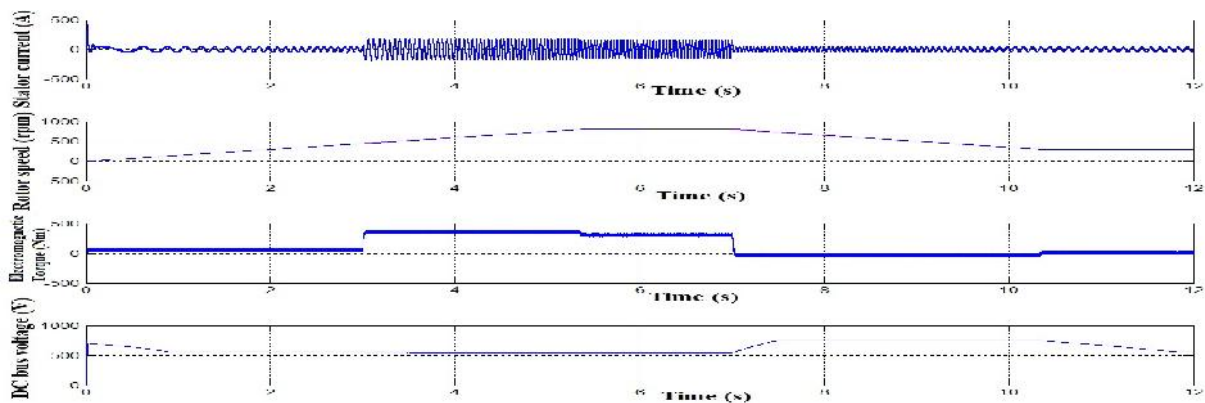


Fig. 14 Rezultate simulare model sensorless cu parametrizarea în care pentru regulatorul de viteză $K_p=30$, $K_i=20$, pentru regulatorul de flux $K_p=100$, $K_i=3$, Banda hysterezis reglator curent= 10A, acc=150rpm, reglator estimator de viteză cu $K_p=500$ și $K_i=5000$ și impunerea referinței de viteză $[0\ 7]s \rightarrow [800\ 300]rpm$, și cuplu $[0\ 3\ 7]s \rightarrow [10\ 300\ 10]Nm$

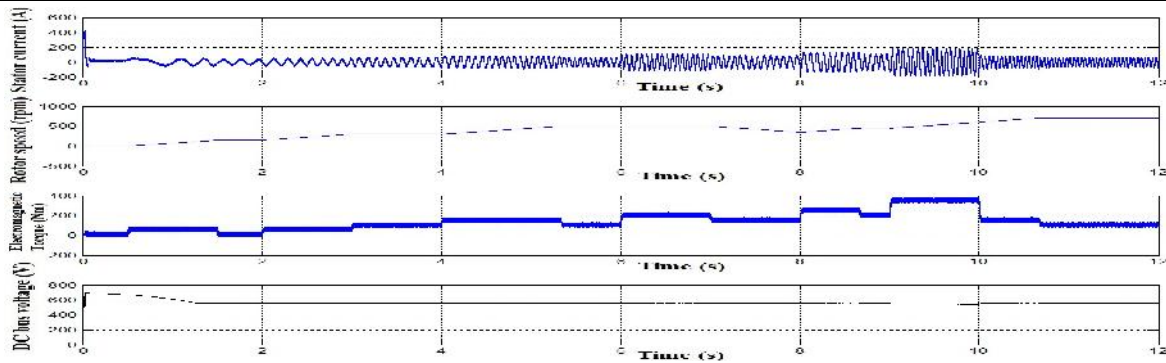


Fig. 15 Rezultate simulare model sensorless cu parametrizarea in care pentru regulatorul de viteză $K_p=30$, $K_i=20$, pentru regulatorul de flux $K_p=100$, $K_i=3$, Banda hysterezis regulator curent= 10A, acc=150rpm, regulator estimator de viteză cu $K_p=500$ și $K_i=5000$ și impunerea referinței de viteză $[0.5 \ 2 \ 4 \ 7 \ 8 \ 9]s \rightarrow [0 \ 150 \ 300 \ 500 \ 350 \ 450 \ 700]rpm$ și cuplu $[[0 \ 3 \ 6 \ 9 \ 10]s \rightarrow [10 \ 100 \ 200 \ 300 \ 100]Nm$.

2.3. Documentație de Execuție preliminară și Model funcțional primar pentru sistem de acționare multi-motor cu turație variabilă și cu recuperarea în rețea a energiei de frânare individual

În aplicațiile multi-motor este necesar sincronizarea invertoarelor în funcție de tipul sarcinii și a interacțiunii dintre motoare. Pentru a asigura viteza de comunicație necesară acestor sisteme și siguranța datelor vehiculate, se va implementa protocolul de comunicație CanOpen. Pentru comunicația cu sistemele de comandă și control (PC, SCADA, etc.) se va implementa protocolul de comunicație Ethernet.

În cazul cuplării rigide a 2 motoare, acestea trebuie să aibă aceeași viteză în condițiile în care cuplul rezistent la fiecare ax poate fi diferit. Sistemul de reglare al acționării multi-motor conține câte un sistem de reglare cu strategie de conducere tip FOC pentru fiecare motor. Unul dintre sistemele de reglare va fi considerat master, iar celălalt slave. Referința de viteză a acționării va fi impusă sistemului master, iar mărimea de ieșire reglată de acesta (viteza motorului master), va fi transmisă ca referință de viteză pentru sistemul slave. În implementarea reală această comunicație se realizează pe protocol CAN. În simulări am introdus un bloc delay pentru a surprinde efectul întârzierilor în transmiterea referinței de la sistemul master la sistemul slave și modul în care se comportă sistemul global de reglare a acționării. Cuplurile rezistente la axele motoarelor pot fi diferite și sunt privite ca elemente de perturbație pentru sistemul de acționare care trebuie să asigure viteze egale pentru cele două motoare.

Sistemele de reglare ale fiecărui motor au fost prezentate anterior. Se vor face simulări atât în cazul cu encoder cât și sensorless. Din simulările monomotor se rețin parametrizările optime pentru sistemele de reglare. Pentru a mări viteza de răspuns a sistemului slave în vederea urmării sistemului master s-a menținut rampa de accelerare/decelerare la 150rpm/s pentru sistemul master și s-a mărșit rampa de accelerare/decelerare la 1000rpm/s pentru sistemul slave. Această modificare a dat rezultate bune în simulări și va fi implementată și în DSP-urile sistemelor de reglare ale fiecărui motor. O altă posibilitate de a mări viteza de răspuns a sistemului slave a fost aceea de a mări viteza de răspuns ale controllerelor de tip PI din sistemul de reglare salvate prin mărirea parametrilor de acordare, dar îmbunătățirile nu au fost semnificative, în plus existând riscul unor suprareglaje în buclele locale și intrarea în oscilații a buclei de reglare globală. Acesta variantă nu a fost reținută pentru implementare în DSP-uri.

În urma simulărilor s-a concluzionat faptul că sistemul de reglare global are rezultate bune pentru întârzieri în transmiterea referinței de la master la slave pentru valori de până la 5ms în condițiile unor dezechilibre în cupluri de maxim 20%, adică o repartizare 60%-40% pentru cele două motoare. În implementarea practică, din motive de siguranță, se va limita întârzierea la 4ms prin impunerea referinței prin rețeaua locală de comunicație CAN între DSP-urile master și slave, utilizând o procedură de comunicație care se încadrează în acest interval de timp. Dezechilibrul maxim admis în implementarea practică va fi de 18% între cuplurile rezistente, peste această valoare va fi emis un semnal de avertizare, protecția de avarie fiind reglată la o valoare mai mare (în funcție de beneficiar și aplicație).

Mărimile de interes din aceste simulări (vezi Fig. 16) sunt pentru fiecare subansamblu master și slave: curenții statorici, vitezele și cuplurile electromagnetice. Au fost prezentate prin simulări valoarea tensiunii din circuitul intermediar comun de c.c. și cuplul total rezistent al sarcinii la axul cuplajului rigid.

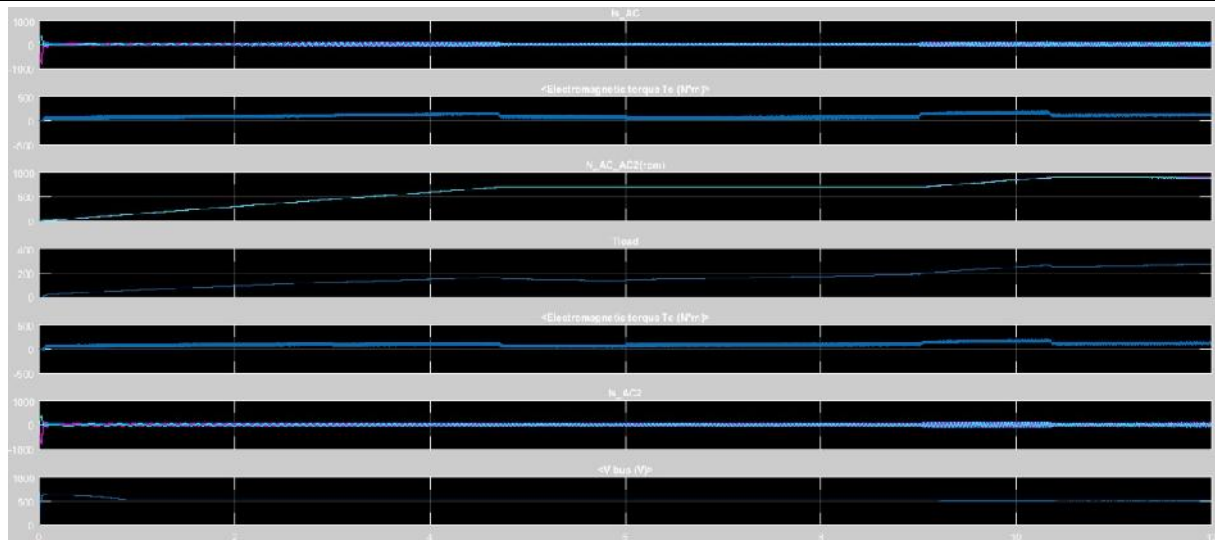


Fig. 16 Rezultate simulare model cuplare rigid , control sensorless, in care pentru regulatorul de vitez $K_p=30$, $K_i=20$, pentru regulatorul de flux $K_p=100$, $K_i=3$, Banda hysterezis regulator curent= 10A, regulator estimator de vitez cu $K_p=500$ și $K_i=5000$, acc master=150rpm, acc slave=1000rpm, delay=4ms, distribuție cuplu motoare: [0 3 6 9]s→[50-50 60-40 40-60 50-50]% din cuplu total al sarcinii și cu impunerea referinței de vitez [0 9]s→ [700 900]rpm

In cazul cuplării elastice a 2 sau mai multe motoare, toate motoarele trebuie să dezvolte același cuplu. Aplicații: benzi transportoare, deplasarea utilajelor cu șenile, etc. Având în vedere că motoarele sunt cuplate cu elemente elastice (benzi de cauciuc, etc.) sau funcționează independent dar acționează asupra aceleiași sarcini, sistemul trebuie să echilibreze cuplul dezvoltat de fiecare motor. Dezechilibrul poate fi generat de următorii factori: uzura neuniformă a elementelor de cuplare, virajul utilajelor care presupune distanțe diferite pentru fiecare șenilă, etc. În acest caz viteza motoarelor nu este importantă, ci cuplul dezvoltat de fiecare motor.

În cazul cuplării elastice a 2 motoare, pentru o acționare corectă a unui utilaj cu șenile, sistemele de reglare ale fiecărui motor trebuie să dezvolte cupluri electromagnetice cât mai apropiate, în condițiile în care cuplul rezistent la fiecare ax poate fi diferit în deplasarea liniară sau în virajul utilajelor care presupune distanțe diferite pentru fiecare șenilă.

Sunt cunoscute echipamente de acționare a instalațiilor de deplasare a utilajelor de extracție de suprafață, având ca mijloc de deplasare un sistem de șenile acționate fiecare cu câte un motor electric, comanda motoarelor electrice fiind realizată prin controlul unitar al turației de către convertizoare de frecvență distincte. Dezavantajul acestei metode de comandă a acționării și al echipamentelor existente în carierele de extracție constă în încărcarea diferită a motoarelor de tracțiune datorită diferențelor mecanice între șenile, precum și datorită executării manevrelor de viraj. Astfel, în viraj șenilele vor parcurge distanțe diferite iar motoarele de tracțiune, având aceeași turație, se vor încărca neuniform, unele fiind frânate sau accelerate în funcție de poziționarea lor în timpul manevrei de virare. Aceste încărcări neuniforme duc la supraincercarea convertizoarelor de frecvență și forțarea acestora să limiteze curentul de ieșire prin scăderea frecvenței, fenomen ce duce la producerea unor situații de funcționare instabilă a instalației de deplasare și la opriri repetate. În cazul unor deplasări prelungite în pantă, fenomen frecvent întâlnit în carierele de extracție, există pericolul de distrugere a rezistențelor de frânare și implicit a chopperelor.

De aceea vom aborda o strategie de conducere în care sistemele de reglare ale fiecărui motor trebuie să dezvolte cupluri electromagnetice cât mai apropiate. Cuplurile rezistente la axele motoarelor pot fi diferite și sunt privite ca elemente de perturbație pentru sistemul de acționare care trebuie să asigure cupluri electromagnetice egale pentru cele două subsisteme. Sistemul de reglare al acționării multi-motor conține câte un sistem de reglare cu strategie de conducere tip FOC pentru fiecare motor, dar în care buclele de reglare ale vitezelor sunt dezactivate. Unul dintre sistemele de reglare va fi considerat master, iar cel alt slave. Referința de cuplu motor a acționării va fi impusă sistemului master, iar mărimea de ieșire reglată de acesta (cuplul electromagnetic), va fi transmisă ca referință de cuplu pentru sistemul slave. În implementarea reală această comunicație se realizează pe protocol CAN. În simulări am introdus un bloc delay pentru a surprinde efectul întârzierilor în transmisia referinței de la sistemul master la

sistemul slave și modul în care se comportă sistemul global de reglare a acțiunii. Sistemele de reglare ale fiecărui motor au fost prezentat anterior. Se vor face simulări atât în cazul cu encoder cât și sensorless.

Din simulările monomotor se rețin parametrizările optime pentru sistemele de reglare, cu excepția parametrilor buclei de reglare a vitezei care în acest caz este dezactivată.

În urma simulărilor s-a concluzionat faptul că sistemul de reglare global are rezultate bune pentru întâzieri în transmiterea referinței de la master la slave pentru valori de până la 10ms, dar în implementarea practică, din motive de siguranță, se va limita întârzierea la 4ms prin impunerea referinței prin rețeaua locală de comunicație CAN între DSP-urile master și slave, utilizând o procedură de comunicație care se încadrează în acest interval de timp.

Dezechilibrul maxim admis în implementarea practică între cuplurile electromagnetice ale sistemului master și slave este de 10%, peste această valoare va fi emis un semnal de avertizare, protecția de avarie fiind reglată la o valoare mai mare (în funcție de beneficiar și aplicație).

Marimile de interes din aceste simulări sunt pentru fiecare subansamblu master și slave: curenții statorici, vitezele și cuplurile electromagnetice. Au fost prezentate prin simulări valoarea tensiunii din circuitul intermediar comun de c.c. și cuplul total rezistent al sarcinii.

În Fig.17 variația sensorless, pentru un viraj la stânga (motorul master în stânga), se observă că pentru un cuplu rezistent mic la motorul master față de slave, se păstrează egalitatea cuplurilor electromagnetice, dar viteza motorului slave este mai mare față de cea a masterului. În mod similar se simulează comportamentul sistemului de acționare pentru un viraj la dreapta, astfel că pentru un cuplu rezistent mic la motorul slave față de master, se păstrează egalitatea cuplurilor electromagnetice, dar viteza motorului slave este mai mică față de cea a masterului.

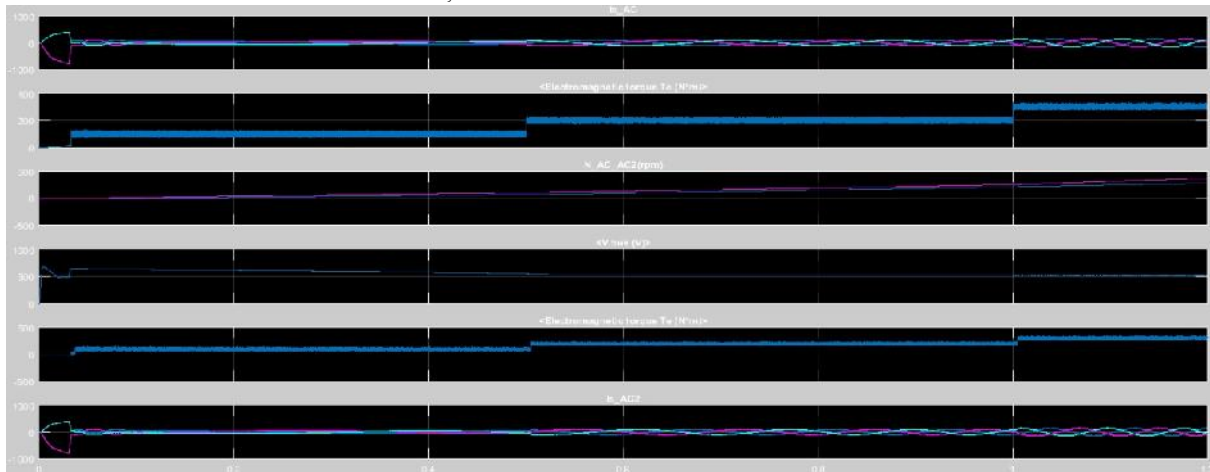


Fig. 17 Rezultate simulare cuplare elastică, control sensorless, în care pentru regulatorul de flux $K_p=100$, $K_i=3$, Banda hysterezis regulator curent= 10A, regulator estimator de viteză cu $K_p=500$ și $K_i=5000$, delay=4ms, distribuție cuplu motor master [0 0.5 1 2]s→ [50 100 200 200]Nm, distribuție cuplu motor slave [0 0.5 1 2]s→ [200 100 100 100]Nm și cu impunerea referinței de cuplu [0 0.5 1 2]s→ [100 200 300 400]Nm

Testare parțială a modelului funcțional

În Fig. 18 sunt prezentate înregistrări ale unor semnale de interes dintr-o acționare monomotor. Din analiza acestor semnale înregistrate se pot concluziona câteva aspecte.

Frecvența prescrisă și frecvența reală la ieșire (running și slope frequency): se observă suprapunerea celor 2 mărimi, conform rampelor de accelerare și frânare. Regulatorul urmărește corect mărimea prescrisă în ambele situații: creștere / scădere de frecvență.

Tensiunea la ieșire: este direct proporțională cu turația motorului, principiul de funcționare al invertoarelor fiind $U / f = \text{constant}$. Se observă variația corectă a tensiunii la ieșire în funcție de turația motorului.

Curentul prin motor: este influențat de regimul de mers al motorului (accelerare / frânare) și de variația de sarcină la ax (mers constant). Variația curentului este corectă și corelată cu regimul de funcționare al motorului.

Tensiunea din circuitul intermediar de c.c.: reprezintă valoarea redresată și filtrată a tensiunii trifazate de linie. Este influențată de regimul de mers al motorului (motor / generator) și de valoarea curentului prin motor.

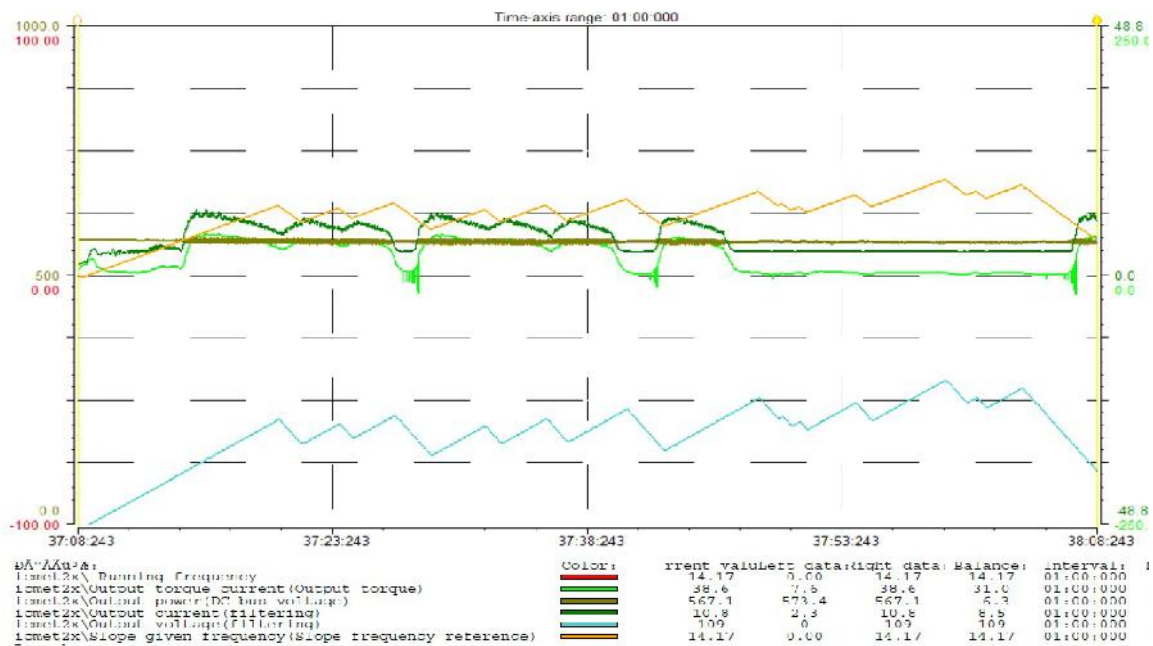


Fig. 18 Inregistrari de semnale dintr-o actionare monomotor

In cadrul testelor s-au facut inregistrari in urmatoarele moduri de lucru:

1. Prescriere frecvență la ieșirea inverterului in plaja (0 – f_N) și funcționare pe diverse paliere de frecvență. S-a urmarit evolutia frecvenței, curentului și tensiunii in punctele de funcționare respective cât și in regimurile tranzitorii de accelerare și frânare.
2. Prescriere nivel de frecvență la ieșire, funcționare 60 de secunde pe palier și prescriere frecvență 0 la ieșirea inverterului. Prescrierea s-a facut in ambele sensuri de rotație ale motorului. S-a urmarit valoarea tensiunii din circuitul intermediar și evoluția curentului de sarcină in regimul de frânare.
3. Funcționare in sens direct pe un nivel de frecvență și schimbarea sensului de rotație cu menținerea nivelului de frecvență. S-au urmarit parametrii electrici atât in regim de accelerare in sens direct cât și in regim de frânare și accelerare in sens invers. S-a verificat funcționarea buclei de “Schimbare sens”, responsabil cu oprirea complet și sigur a motorului inainte de a se schimba sensul. In cazul schimbării sensului de rotație al motorului inainte ca acesta să se oprească (indiferent de sensul in care se rotește) rezultatul poate provoca defectarea inverterului precum și grave probleme mecanice (distrugere reductor, distrugere cuplaje mecanice, etc.)
4. Funcționarea in regim dinamic de turație, prin modificarea aleatoare a frecvenței și sensului de rotație, menținând încărcarea constantă a motorului electric. S-au inregistrat măsurimile electrice (frecvență, tensiune, curent), urmarind corelarea dintre acestea in cursul regimului dinamic. Se poate observa relația directă dintre curentul prin motor și tensiunea din circuitul intermediar. La frânare, energia generată de motor, este direct proporțională cu puterea de frânare.
5. Regimul de suprasarcin : am prescriș diverse paliere de frecvență la ieșire și am modificat încărcarea motorului in sens crescător, până la depășirea valorii limită a curentului. S-a urmarit funcționarea buclei “Limitare curent”, responsabilă cu scăderea frecvenței in cazul in care curentul prin motor depășește un prag setabil. Rolul acestei funcții este de a limita curentul prin motor la valori sigure pentru echipamente și, de asemenea, să asigure funcționarea continuă a sistemului, limitând numărul de decuplari din cauza suprasarcinii.

Concluzii:

- In oricare din regimurile de lucru, valorile marimilor electrice s-au menținut in limite normale;
- Intre valorile inregistrate ale măsurimilor electrice există corelare corectă, funcție de regimul de lucru impus;

- Ansamblul convertizor de frecvență – convertizor de recuperare – motor electric a funcționat corect. In figura de mai jos sunt inserate câteva poze ale subansamblelor sistemului de acționare.



Fig. 19 Poze ale subansamblelor sistemului de acționare

Concluzii

Rezultatele așteptate ale etapei sunt cele prevăzute prin planul de realizare, și anume: *Documentație de execuție și realizare parțială modele funcționale ale subansamblelor și al sistemului de acționare multimotor; Propunere de protecție a drepturilor de proprietate industrială (cerere brevet)*. Considerăm că 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, în etapa I, prin realizarea proiectării în etapa a II-a, realizarea principalelor subansamble (redresor, invertoare principale și de recuperare), publicarea de articole și depunerea unei cereri de brevet de invenție în legătură cu rezultatele proiectului în etapa a III-a se poate spune că sunt îndeplinite toate elementele necesare continuării proiectului cu etapa a IV-a care prevede: *Definitivare documentație de execuție, realizare și testare a modelului funcțional al sistemului de acționare multimotor*. Pentru diseminarea rezultatelor obținute, s-a realizat un site al proiectului, care este actualizat cu rezultatele obținute în fiecare etapă, iar acesta este disponibil la adresa: <http://www.icmet.ro/SAMREC/index.html>. La acestea se adaugă permanentă preocupare atât a coordonatorului ICMET Craiova cât și a partenerului industrial CESI Automation Craiova, de a populariza rezultatele proiectului în rândul potențialilor beneficiari.

Bibliografie

1. Hurezeanu Adrian, Nicola Marcel, Velea Florin, *Metodă și echipament pentru comanda numerică și controlul acționărilor electrice multimotor cu recuperarea energiei de frânare, utilizate la instalațiile de extracție de mare capacitate*, OSIM CBI-A00749/24.10.2016.
2. Marcel Nicola, Dumitru Sacerdotianu and Adrian Hurezeanu, *Simulation and Implementation of Sensorless Control Using Estimators in Electric Drives with High Dynamic*, Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series, 2016
3. Marcel Nicola, Dumitru Sacerdotianu and Adrian Hurezeanu, *Sensorless Control Using the Model Reference Adaptive Control Estimator in Electric Drives with High Dynamic*, International Conference on Applied and Theoretical Electricity ICATE 2016, Craiova, Romania, 6-8 October 2016.
4. Marcel Nicola, Dumitru Sacerdotianu, Marian Duță, Claudiu-Ionel Nicola, *SIMULAREA CONVERTOARELOR AC-AC UTILIZÂND MEDIUL SIMULINK-MATLAB*, Simpozionul Național de Informatică, Automatizări și Telecomunicații în Energetică SIE 2016, pp. 262-265, Sinaia, 26-28 Octombrie 2016.
5. Marcel Nicola, Dumitru Sacerdotianu, *Simularea Sistemelor de Acționare Electrică Destinate Vehiculelor Inteligente de Transport Urban*, SINGRO 2016 Simpozionul Științific al Inginerilor Români de Pretutindeni, Craiova, 8-9 septembrie 2016.
6. Mușoi Sorin, *Controlul acțiunilor 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., Floric u D., Delarue Ph., Ni u Smaranda, Bogu C.: *Electronic de putere – convertoare statice*, Editura tehnic , Bucure ti, 1998, ISBN 973-31-1262-3.
10. Kelemen, Árpád, Imecs, Maria: *Electronic de putere*, Editura didactic i pedagogic , Bucure ti, 1983.
11. Chiver Olivian, *Tructoare*, documenta ie disponibil pe internet
12. Albu Mihai, *Invertorul PWM trifazat de tensiune*, documenta ie disponibil pe internet
13. LEM, documenta ie de firm
14. Richard Okrasa, *Adjustable Speed Drive*, Ontario Hydro
15. Texas Instruments, documenta ie de firmă
16. Microchip, documenta ie de firm
17. Convertoare cc-ca. Invertoare – curs disponibil pe internet
18. Kelemen Árpád, Imecs Maria: *Sisteme de reglare cu orientare dup cîmp ale ma inilor de curent alternativ*. Editura Academiei Române, Bucure ti, 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*. Ecriture-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 vectorial a ma inilor 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 ac ion rilor electrice*, curs, documenta ie 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 maşinii asincrone folosind filtrul Kalman extins, documenta ie disponibilă pe Internet
29. Compatibilitate electromagnetic (CEM). Partea 3: Limite. Sec iunea 2: Limite pentru emisiile de curent armonic (curent absorbit de aparat 16A pe faz). 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 INSTALA IILOR DE AC IONARE ELECTRIC , HIDRAULIC I DE ÎNC LZIRE A STAVILELOR CU CLAPET DE PE BARAJELE DIN HIDROCENTRALE, Buletinul Tehnic- tiin ific al ICEMENERG, Editura ICEMENERG Bucure ti, 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.