

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

ETAPA IV – 2017

**Elaborare documentatie finala; Realizarea și testarea modelului
funcțional al sistemului de actionare multimotor;
Evaluare și diseminare**

1.Rezumatul etapei

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

Activitatea IV.1 Elaborare Documentatie de Executie si Realizare model funcțional pentru sistem de acționare multi-motor cu turatie variabila si cu recuperarea in retea a energiei de franare individuala;

Activitatea IV.2 Demonstrarea functionalitatii si utilitatii modelului.

1.2. *Rezultatele așteptate ale etapei* sunt **cele prevăzute prin planul de realizare**, și anume *Documentatie finala si Model funcțional al sistemului de acționare multimotor. Raport de testare.*

Articol(e) publicat(e) in reviste ISI/DBI. 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 comand și control pentru invertoarele de putere și aplicații la sistemele de acționare multimotor*, studiu realizat de către ICMET Craiova în etapa 1, *Proiect variant preliminar model funcțional pentru subansamble ale sistemului de acționare multimotor cu noua arhitectură de comand* realizat în etapa 2 de CO – ICMET Craiova și partenerul P1 – SC CESI Automation SRL Craiova, realizările din etapa 3 privind *Documentație de Execuție preliminară și Model funcțional primar pentru sistem de acționare multi-motor cu turatie variabilă și cu recuperarea in rețea a energiei de frânare individuală*, 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, și s-au realizat *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.

Structurarea abordării este *naturală* atât din prisma componentei sistemului global de acționare multimotor: blocuri de forță, blocuri de comandă, control și comunicație, dar și din punct de vedere al soluției globale aleasă (ne referim de exemplu, la faptul că circuitul intermediar de c.c. este comun).

În cadrul fiecărui obiectiv, 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 converge către o finalitate pozitivă a 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.

În această etapă principalele elemente care au fost adăugate pentru definitivarea proiectului de acționare multimotor, se referă la *finalizarea* organizării și implementării algoritmilor de control în rețea, comunicației aferente, iar din punct de vedere al simulărilor numerice au fost studiate modele pentru cuplarea multimotor rigid sau elastic, deci sisteme care vor trebui să asigure aceeași turatie 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 limitrof).

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 că dimensiunile 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.

În etapa 4, s-a realizat achiziția completă de echipamente, forma definitivă a modelului funcțional și testările corespunzătoare.

Tot în cadrul etapei 4, au fost publicate 4 articole din care 2 ISI și 2 DBI, prezentate la conferințe de profil internaționale (2) și 2 articole publicate în reviste de specialitate [1], [5-7]. De asemenea CBI-ul depus în etapa 3 a fost publicat de către OSIM [46], și a obținut 2 premii [47,48].

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 bucată; Convertizoare de frecvență 55KW – 2 bucăți; Invertor de recuperare în rețeaua industrială a energiei de frânare – 1 bucată.

Convertizorul static de frecvență cuprinde următoarele subsansamble pe circuitul de forță: punte redresoare; filtru pentru circuitul intermediar; punte invertoare; transductoare 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 ± 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 și 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 ÷ +40°C
Umiditate relativa la 25°C	max.80% fara condensare

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

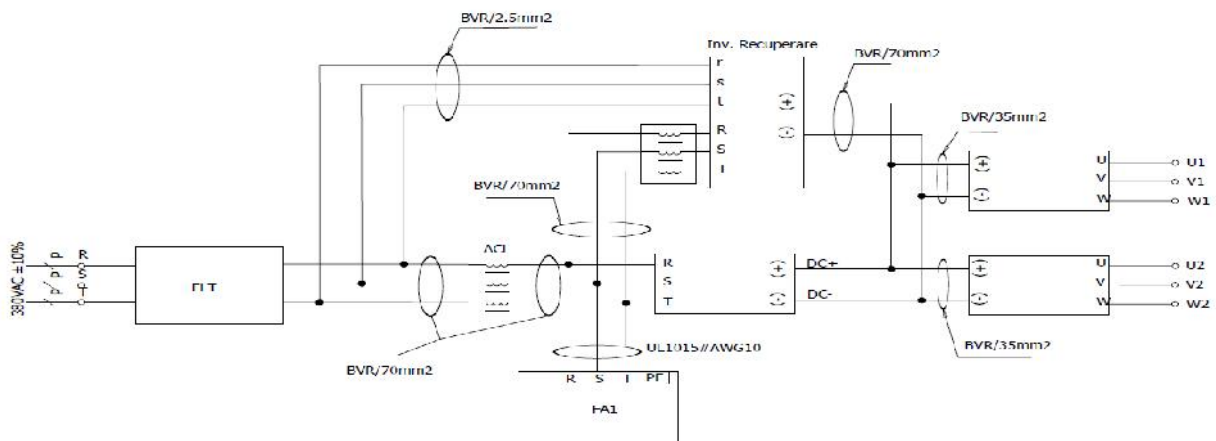


Fig. 1 Schema generală sistem de acționare multimotor: blocuri invertoare, redresor și filtre rețea

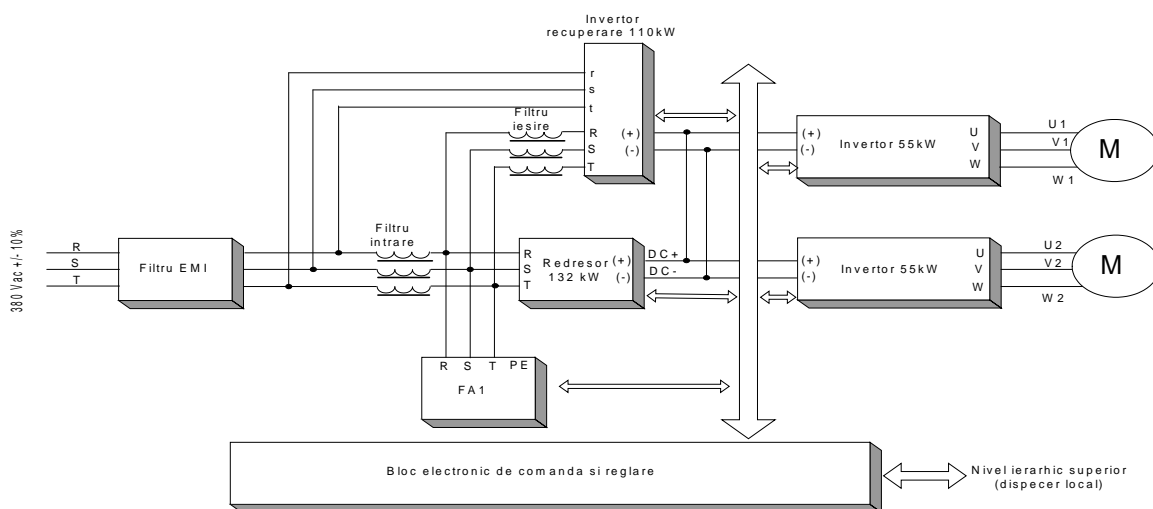


Fig. 2 Schema generală sistem de acționare multimotor: blocuri de forță, de comandă, reglare și comunicație

Sistemul de acționare multimotor va fi utilizat în special în aplicații cu dinamică ridicată și presupune alimentarea individuală 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 subansamblurilor 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 inverterul de recuperare energie, vor fi controlate de câte 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 inverter trebuie să aibă implementat un algoritm de reglare vectorială, să fie prevăzută cu un microprocesor de semnal cu capacități de memorare și viteză de calcul foarte mari, ceea ce face posibil 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 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 marilor de proces;
- memoria EEPROM să fie suficient de mare pentru a permite salvarea marilor de control pe perioada când lipsește tensiunea de alimentare;

- mediul de dezvoltare trebuie să fie un limbaj de nivel înalt care să permit 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; Iesiri 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:

- În cazul cuplării rigide a 2 sau mai multe motoare, toate motoarele trebuie să aibă aceeași viteză. În 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 în care se folosește acest tip de sistem sunt: macarale de mare capacitate, lifturi, rotirea suprastructurilor, etc.
- În cazul cuplării elastice a 2 sau mai multe motoare, toate motoarele trebuie să dezvolte același cuplu. Aplicații: benzi transportoare, deplasarea utilajelor cu roțile, 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 roată, etc. În 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: în cuplu și în 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 în timp real trebuie să asigure: Arhitectură Harvard; Execuție 8 operații în 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; Conversor 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 în 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 activ : 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, subansambele din Fig. 1 și 2 împreună cu cerințele impuse mai sus prin tema general 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 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 cel alt 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 transmisia referinței de la sistemul master la sistemul slave în 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 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. Pentru a mări viteza de răsuns a sistemului slave în vederea urmăririi sistemului master s-a menținut rampa de accelerare/decelerare la 150rpm/s pentru sistemul master și s-a mrit rampa de accelerare/decelerare la 1000rpm/s pentru sistemul slave. Această modificare a dat rezultate bune în simulări și va fi implementată în DSP-urile sistemelor de reglare ale fiecărui motor. O altă posibilitate de a mări viteza de răsuns a sistemului slave a fost aceea de a mări viteza de răsuns ale controllerelor de tip PI din sistemul de reglare salve prin mărirea parametrilor de acordare, dar îmbunătățirile nu au fost semnificative, în plus existând riscul unor supreglaje 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).

Modelurile de interes din aceste simulări (vezi Fig. 3) 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.

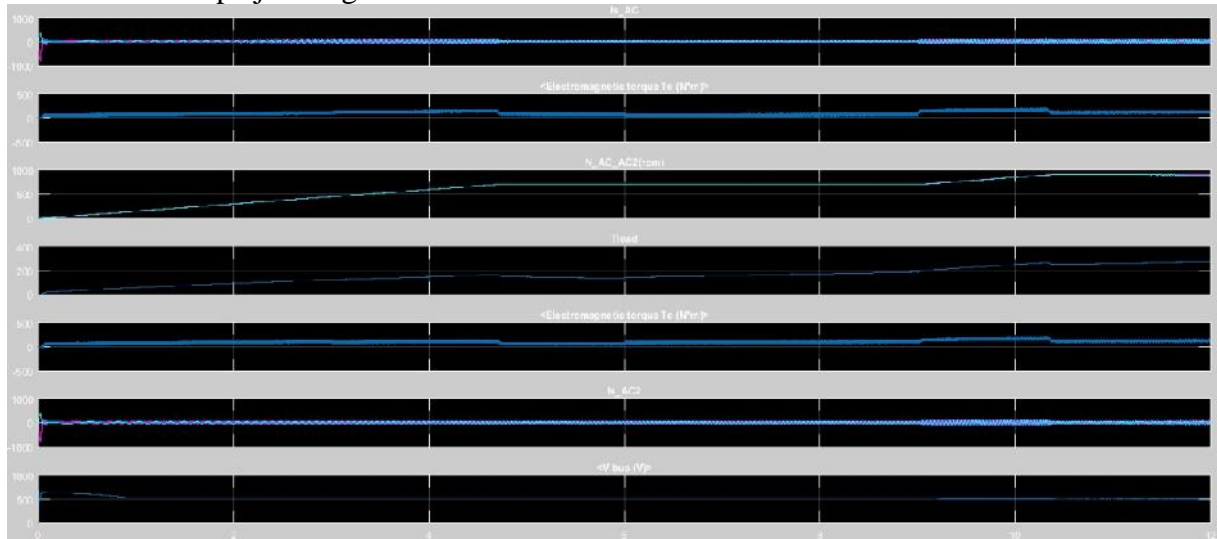


Fig. 3 Rezultate simulare model cuplare rigid, control sensorless, în care pentru regulatorul de viteză $K_p=30$, $K_i=20$, pentru regulatorul de flux $K_p=100$, $K_i=3$, Banda hysterezis regulator curent= 10A, regulator estimator de viteză cu $K_p=500$ și $K_i=5000$, acc master=150rpm, acc slave=1000rpm, 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 viteză [0 9]s→ [700 900]rpm

În 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 încarcarea 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 supraîncărcarea 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 celălalt 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 transmiterea referinței de la sistemul master la sistemul slave și modul în care se comportă sistemul global de reglare a acționării. 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 întârzieri 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.4 variația sensorless, pentru un viraj la stânga (motorul master în stânga), se observă că pentru un cuplu rezistent mărît 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 mărît la motorul slave față de master, se păstrează egalitatea cuplurilor electromagnetice, dar viteza motorului slave este mai mică față de cea a masterului.

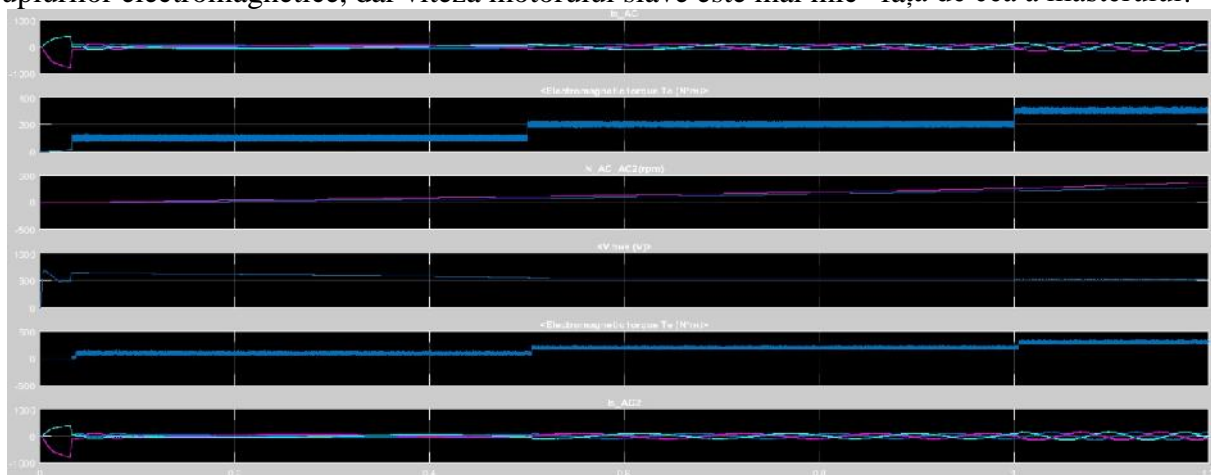


Fig. 4 Rezultate simulare cuplare elastică, control sensorless, în care pentru regulatorul de flux $K_p=100$, $K_i=3$,

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]Nm și cu impunerea referinței de cuplu [0 0.5 1 2]s → [100 200 300 400]Nm

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

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

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

Diferențele majore vor fi in software. Se vor inlocui modulele de control al motorului din UCC-urile din invertoarele principale cu module pentru sincronizarea cu rețeaua și regulatoare pentru mentinerea tensiunii din circuitul intermediar la valoarea setat (pentru UCC-ul invertoarelor de recuperare).

In 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.

2.2 Testarea modelului funcțional

In Fig. 5 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 marimi, conform rampelor de accelerare și frânare. Regulatele urmesc corect mărimea prescrisă in 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 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 cc: 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.

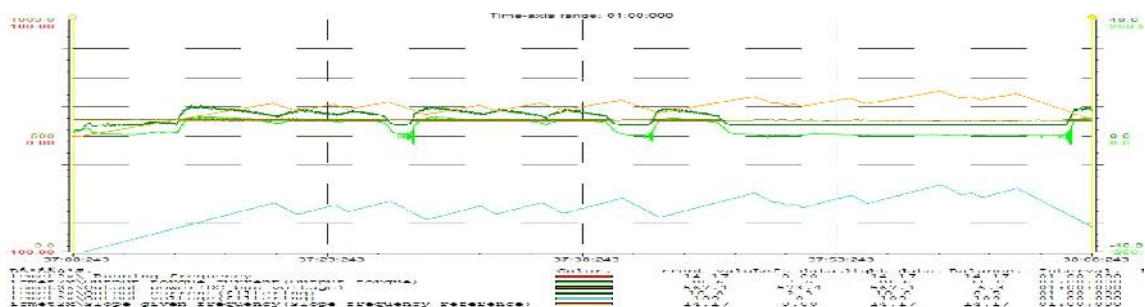


Fig. 5 Inregistrări de semnale dintr-o acționare monomotor

In cadrul testelor s-au făcut înregistrări in următoarele moduri de lucru:

1. Prescriere frecvență la ieșirea invertoarelor in plaja ($0 - f_N$) și funcționare pe diverse paliere de frecvență. S-a urmărit evoluția 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 invertoarelor. Prescrierea s-a făcut in ambele sensuri de rotație ale motorului. S-a urmărit valoarea tensiunii din circuitul intermediar și evoluția curentului de sarcină in regimul de frânare.

3. Funcționare în sens direct pe un nivel de frecvență și schimbarea sensului de rotație cu menținerea nivelului de frecvență. S-au urmărit parametrii electrici atât în regim de accelerare în sens direct cât și în regim de frânare și accelerare în sens invers. S-a verificat funcționarea buclei de “Schimbare sens”, responsabil cu oprirea complet și sigur a motorului înainte de a se schimba sensul. În cazul schimbării sensului de rotație al motorului înainte ca acesta să se oprească (indiferent de sensul în care se rotește) rezultatul poate provoca defectarea inverterului precum și grave probleme mecanice (distrugere reductor, distrugere cuplaje mecanice, etc.)
4. Funcționarea în regim dinamic de turație, prin modificarea aleatoare a frecvenței și sensului de rotație, menținând încărcarea constantă a motorului electric. S-au înregistrat măsurimile electrice (frecvență, tensiune, curent), urmărind corelarea dintre acestea în 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 prescris diverse paliere de frecvență la ieșire și am modificat încărcarea motorului în sens crescător, până la depășirea valorii limită a curentului. S-a urmărit funcționarea buclei “Limitare curent”, responsabilă cu scăderea frecvenței în cazul în 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 decuplări din cauza suprasarcinii.

Concluzii:

- În oricare din regimurile de lucru, valorile marimilor electrice s-au menținut în limite normale;
- Între valorile înregistrate ale măsurimilor electrice există corelare corectă, funcție de regimul de lucru impus;
- Ansamblul convertizor de frecvență – convertizor de recuperare – motor electric a funcționat corect.

În figura 6 sunt inserate câteva poze ale subansamblelor sistemului de acționare.



Fig. 6 Poze ale subansamblelor sistemului de acționare

Pentru obținerea unui raport de ștand s-a apelat la un laborator acreditat în acest sens. Se prezintă în continuare acest raport.

RAPORT DE ÎNCERCĂRI / VERIFICĂRI
Nr. 218 din 10/08/2017

Comanda nr. 041 / 03.08.2017

Tip Produs: **Convertizor de frecvență tip DCMA-2x55K-VA04**

Client : **SC CESI AUTOMATION SRL**

**Executant : Laboratorul Mecanoelectric SPIACT Craiova Autorizat AFER cu
Autorizație AL nr. 492/2014**

Prezentul raport este întocmit în 3 exemplare

Ex. 1 / 3

1. Denumire încercare / verificare: Verificarea împământării.

1.1. Instrumente / aparate de măsură : Verificarea s-a făcut prin inspecție vizuală și măsurare cu miliohmetrul a legăturii bornei de împământare la carcasa și principalele subansamble.

1.2. Descriere încercare / verificare:

- Verificare existență bornă de împământare.
- Verificare legare la împământare miez inductivității.
- Verificare legare la împământare carcasa convertizorului.

Valoare măsurată	Valoare impusă
0,01	0,018

1.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

2. Denumire încercare / verificare: Verificarea funcționării la sarcină nominală.

2.1. Instrumente / aparate de măsură : S-au utilizat aparate pentru măsurări electrice

- Multimetru digital Metrix: SN 214779YIH / DJ-002-2161397 / 2014
- Voltmetru: SN 2302 / DJ-002-2141395 / 2014

2.2. Descriere încercare / verificare: S-a cuplat DCMA-2x55K-VA04 la tensiunea $U_i = 3 \times 394V / 50Hz$ și s-au alimentat 2 motoare asincrone cu $P_N = 55KW$; $U_N = 0.4kV$; $I_N = 108A$.

S-a încercat motorul la $f = 50Hz$ și s-au măsurat:

	Valoare măsurată	Valoare impusă
$U_N / 50 Hz$	387V	380V
$I_N / 50Hz$	103A	98A

2.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

3. Denumire încercare / verificare: Verificarea funcționării la suprasarcină.

3.1. Instrumente / aparate de măsur : S-au utilizat aparate pentru măsurări electrice

- Multimetru digital Metrix: SN 214779YIH / DJ-002-2161397 / 2014
- Voltmetru: SN 2302 / DJ-002-2141395 / 2014

3.2. Descriere încercare / verificare: S-a cuplat DCMA-2x55K-VA04 la tensiunea $U_i = 3 \times 394V / 50Hz$ și s-a alimentat un motor asincron cu $P_N = 55KW$; $U_N = 0.4kV$; $I_N = 108A$.

S-a încercat motorul electric și s-au măsurat:

	Valoare măsurată	Valoare impusă
$U_N / 50 Hz$	378V (60 secunde)	380V (60 secunde)
$I_N / 50Hz$	144A (60 secunde)	130A (60 secunde)

3.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

4. Denumire încercare / verificare: Verificarea protecției la scurtcircuit.

4.1. Instrumente / aparate de măsur : S-au utilizat aparate pentru măsurări electrice

- Multimetru digital Metrix: SN 214779YIH / DJ-002-2161397 / 2014
- Voltmetru: SN 2302 / DJ-002-2141395 / 2014
- Osciloscop Hameg cu 2 canale
- curent 500A

4.2. Descriere încercare / verificare: Cu instalația funcționând în punctul nominal, s-a procedat la cuplarea unei sarcini suplimentare, trifazată, de $0.5 P_N / faz$.

DCMA-2x55K-VA04 a intrat în starea STOP la $I_{sarcin} = 223A$ și a semnalizat starea de **AVARIE**.

4.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

5. Denumire încercare / verificare: Verificarea funcționării la subțensiune a rețelei de alimentare.

5.1. Instrumente / aparate de măsur : S-au utilizat aparate pentru măsurări electrice

- Multimetru digital Metrix: SN 214779YIH / DJ-002-2161397 / 2014
- Voltmetru: SN 2302 / DJ-002-2141395 / 2014

5.2. Descriere încercare / verificare: Cu instalația funcționând la $0,5P_N$ și $U_{IN} = 387V$, s-a procedat la scăderea tensiunii de intrare, progresiv, cu 5%, 10%, 15% 20%.

La scăderea cu 20% (310V) s-a instalat starea de AVARIE cu semnalizarea corespunzătoare.

5.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

6. Denumire încercare / verificare: Verificarea funcționării la supratensiune în rețeaua de alimentare.

6.1. Instrumente / aparate de măsur : S-au utilizat aparate pentru măsurări electrice

- Multimetru digital Metrix: SN 214779YIH / DJ-002-2161397 / 2014
- Voltmetru: SN 2302 / DJ-002-2141395 / 2014

6.2. Descriere încercare / verificare: Cu instalația funcționând la $0,5P_N$ și $U_{IN} = 387V$, s-a procedat la creșterea tensiunii de intrare, progresiv, cu 5%, 10%, 15%.

La $U_{IN} = 460V$, convertizorul DCMA-2x55K-VA04 a intrat în starea de AVARIE, cu semnalizarea corespunzătoare.

6.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

7. Denumire încercare / verificare: Verificarea plajei de frecvență la ieșirea DCMA-2x55K-VA04.

7.1. Instrumente / aparate de măsur : S-au utilizat aparate pentru măsurări electrice

- Osciloscop HAMEG 210 cu sonda cu atenuare 1 / 100.

7.2. Descriere încercare / verificare: S-a conectat la ieșirea DCMA-2x55K-VA04 un motor de 55KW / 1000rpm și s-a modificat frecvența la ieșire în plaja 1 ÷ 100Hz.

S-a măsurat frecvența la ieșire cu osciloscopul în plaja 1 ÷ 100Hz și turația motorului electric în plaja 0 ÷ 2000rpm.

7.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

8. Denumire încercare / verificare: Verificarea timpului de accelerare / decelerare.

8.1. Instrumente / aparate de măsur : S-au utilizat aparate pentru măsurări electrice

- Osciloscop HAMEG 210 cu sonda cu atenuare 1 / 100.
- Cronometru electronic.

8.2. Descriere încercare / verificare: s-a încercat motorul electric la $0,3P_N$, s-au prescris $f_m = 50Hz$, $t_a = 20$ sec., $t_d = 30$ sec.

S-au măsurat timpii de accelerare $t_{acc} = 20$ sec. și $t_{dec} = 30$ sec.

8.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

9. Denumire încercare / verificare: Verificarea rezistenței de izolație.

9.1. Instrumente / aparate de măsur : S-au utilizat aparate pentru măsurări electrice

- Megohmetru de 500V, verificat metrologic.

9.2. Descriere încercare / verificare: Cu instalația nealimentată, s-au scurtcircuitat bornele de forță de pe intrare și de pe ieșire.

S-au efectuat măsurătorile în stare uscată.

	Valoare măsurată	Valoare impusă
R intrare/carcasă	> 500 M	> 20 M
R ieșire/carcasă	> 550 M	> 20 M

9.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

10. Denumire încercare / verificare: Verificarea rigidității dielectrice.

10.1. Instrumente / aparate de măsură : S-au utilizat aparate pentru măsurări electrice

- Voltmetru Extech, verificat metrologic.
- Ampermetru Extech, verificat metrologic.
- Stație de 2500V / 50Hz.

10.2. Descriere încercare / verificare: Cu instalația nealimentată, s-au scurtcircuitat bornele de forță de pe intrare și de pe ieșire.

S-a cuplat stația de 2500V / 50Hz între intrare / ieșire și carcasă și s-a ținut 1 minut.

10.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

11. Denumire încercare / verificare: Verificarea sincronizării în frecvență.

11.1. Instrumente / aparate de măsură : S-au utilizat aparate pentru măsurări electrice

- Voltmetru Extech, verificat metrologic.
- Ampermetru Extech, verificat metrologic.
- Osciloscop HAMEG 210 cu sonda cu atenuare 1 / 100.
- Analizor de rețea Extech PQ3470

11.2. Descriere încercare / verificare: S-a cuplat DCMA-2x55K-VA04 la tensiunea $U_i = 3 \times 394V / 50Hz$ și s-au alimentat 2 motoare asincrone cu $P_N = 55KW$; $U_N = 0.4kV$; $I_N = 108A$. S-a activat modulul de comunicație CAN și funcția de sincronizare în frecvență. S-au transmis comenzi doar la invertorul MASTER pentru funcționarea în diverse puncte de funcționare. S-a măsurat frecvența invertorului MASTER și a invertorului SLAVE.

Valoare măsurată MASTER	Valoare măsurată SLAVE	Valoare impusă
9.98 Hz	9.99 Hz	10 Hz
20.01 Hz	20.02 Hz	20 Hz
30.02 Hz	29.99 Hz	30 Hz
40.00 Hz	40.02 Hz	40 Hz
49.99 Hz	50.00 Hz	50 Hz

11.3. Rezultate / concluzii: Produsul corespunde.

Laborator Mecano-Electric SPIACT CRAIOVA SA

Diseminarea rezultatelor

În cadrul etapelor 3 și 4, dar și ca preocupare permanent de-a lungul proiectului, o atenție deosebită s-a acordat diseminării rezultatelor. Astfel s-au publicat 7 articole din care 4 în reviste (1 ISI și 2 BDI) și 3 prezentate la conferințe (1 ISI și 2 IEEEExplore). [1-7].

Cererea de brevet de invenție depusă în etapa precedentă a fost publicată de către OSIM.

De asemenea, prin prezentarea acestora au fost obținute medalia de aur și diploma de excelență la PRO INVENT 2017, și medalia de argint la EUOROINVENT 2017, acestea fiind saloane Internaționale dedicate Cercetării și Invenției. [46-48].



Concluzii

Rezultatele atestate ale etapei sunt cele prevăzute prin planul de realizare, și anume: *Definitivare documentație de execuție, realizare și testare a modelului funcțional al sistemului de acționare multimotor*. 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 împreună cu rezultatele din etapa a IV-a au fost îndeplinite toate obiectivele proiectului SAMREC pe ansamblu. 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. Marcel Nicola, Dumitru Sacerdoțianu, Adrian Hurezeanu, **Sensorless Control in Multi-Motors Electric Drives with High Dynamic and Flexible Coupling**, Proceedings of The 7th International Conference on Modern Power Systems (MPS 2017), Cluj-Napoca, Romania, 6-9 Iunie, 2017.
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 Sacerdoțianu, Marian Duță, Claudiu-Ionel Nicola, **SIMULAREA CONVERTOARELOR AC-AC UTILIZÂND MEDIUL SIMULINK-MATLAB**, Simpozionul Național de Informatică, Automatizări și Telecomunicații în Energetic SIE 2016, pp. 262-265, Sinaia, 26-28 Octombrie 2016.
5. Marcel Nicola, Dumitru Sacerdoțianu, *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, publicat în Buletinul AGIR nr. 1/2017 ianuarie-martie, pp. 11-15, ISSN-L 1224-7928, ISSN (online) 2247-3548.
6. Marcel Nicola, Dumitru Sacerdotianu, Claudiu-Ionel Nicola, Adrian Hurezeanu, **Simulation and Implementation of Sensorless Control in Multi-Motors Electric Drives with High Dynamics**, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal ASTEJ, Vol. 2, No. 4, 59-67 (2017), USA, ISSN: 2415-6698, DOI: 10.25046/aj020409.
7. Marcel Nicola, Dumitru Sacerdoțianu, Adrian Hurezeanu, **Sensorless Control in Multi-Motors Electric Drives with High Dynamic and Rigid Coupling**, Proceedings of Joint International Conference Optimization of Electrical & Electronic Equipment and Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (OPTIM-ACEMP), pp. 495-500, Brașov, Romania, 25-27 Mai, 2017.

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 și 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 firmă
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 disponibil 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, documenta ie disponibil 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, Internet
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 JEU 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 ELECTRIC , HIDRAULIC ȘI DE ÎNCĂLZIRE A STAVILELOR CU CLAPET DE PE BARAJELE DIN HIDROCENTRALE, Buletinul Tehnicotehnic 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.
- 46. 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, RO 131719 A0, RO 131719 A8.**
- 47. diplomă și medalia de argint, (colective) pentru lucrarea „Method and equipment for digital control of multi-motor electrical drives with braking energy recovery, used for high capacity extraction plants”, European Exhibition of Creativity and Innovation, EUOROINVENT, mai 2017, Iași, Romania.**
- 48. diplomă de excelență și medalia de aur, (colective), pentru lucrarea „Metoda și echipament pentru comanda numerică și controlul acționărilor electrice multi-motor cu recuperarea energiei de frânare utilizate la instalațiile de extracție de mare capacitate”, Salonul Internațional de Invenție, PRO INVENT, martie 2017, Cluj-Napoca, Romania.**