

ROLUL CONVERTOARELOR ÎN PROPULSIA ELECTRICĂ NAVALĂ

Dr. ing. **Dumitru IORGULESCU**¹, Prof. dr. ing. **Gheorghe SAMOILESCU**²,
Cdor. dr. ing. **Dinu ATODIRESEI**², Conf. univ. dr. ing. **Alecu TOMA**²,
Instructor principal drd. ing. **Alexandru COTORCEA**²

¹ Port Line Crewing Portugal - Academia Tehnică Militară – București ,
² Academia Navală „Mircea cel Bătrân” – Constanța

REZUMAT: Scopul acestei lucrări este de a prezenta avantajele folosirii de convertizoare de frecvență moderne și a tehnicilor de filtrare deoarece motoarele de curent alternativ au devenit mai fezabile pentru cerințele ridicate din domeniul naval fiind utilizate la majoritatea navelor de construcție recentă. În funcționarea oricărui sistem electric trebuie să deosebim fenomenele staționare, caracteristice regimului permanent, și fenomenele tranzitorii, rezultate ale diferitelor operații de comutare sau ale altor modificări similare ale stării sistemului. Creșterea valorii și a densității energiei în diferite părți ale sistemelor electrice moderne a dus la sporirea importanței acordate fenomenelor tranzitorii, electrice și mecanice, realizate prin intermediul unui aparat corespunzător, în sistemele electrice. Oricare operație de comutare este însoțită de variația tensiunilor și a curenților în rețea sau de variația turației mașinilor conectate

Cuvinte cheie : propulsie electrică, convertoare electrice, propulsor naval, distribuție de curent electric, sistem electroenergetic naval.

ABSTRACT: The purpose of this paper is to present the advantages of using modern frequency converters and filtering techniques because AC motors have become more feasible for high shipbuilding requirements being used in most recent shipbuilding craft. In the operation of any electrical system we have to distinguish the stationary phenomena characteristic of the permanent regime and the transient phenomena, the results of the various switching operations or other similar changes of the state of the system. Increasing the value and the density of energy in different parts of the modern electrical systems has increased the importance given to the transient, electrical and mechanical phenomena, by means of an appropriate apparatus, in the electrical systems. Any switching operation is accompanied by variations in the voltages and currents in the grid or by the variation of the speed of the connected machines.

Keywords: electric propulsion, electric converters, naval propeller, power distribution, naval power system.

1. INTRODUCERE

Propulsia electrică a navelor cunoaște o diversitate mare de forme și mijloace în care poate fi realizată. Alegerea sistemului de propulsie electrică depinde de mărimea navei, condițiile de exploatare și importanța care se acordă factorului economic. Sistemul de propulsie electrică presupune o transformare succesivă a energiei: mecanică-electrică-mecanică, care în final duce la o micșorare a randamentului instalației față de cazul propulsiei directe [1,2]. În propulsia electrică cu două feluri de curent, curent alternativ și curent continuu, se folosesc generatoare de curent alternativ de la care prin redresoare de putere, comandate sau necomandate, se alimentează motoarele de curent continuu folosite pentru acționarea elicelor.

La alegerea felului curentului trebuie avut în vedere că propulsia electrică în curent continuu și în curent alternativ-curent continuu permite obținerea

unor cupluri mai mari la elice, comparativ cu propulsia electrică în curent alternativ. De asemenea, turația motoarelor primare este independentă de turația elicei, în timp ce la propulsia electrică în curent alternativ (fără folosirea convertoarelor statice) reglarea turației se obține prin modificarea frecvenței realizată prin reglarea vitezei motorului primar. Propulsia electrică în curent alternativ elimină unele din neajunsurile propulsiei în curent continuu cum ar fi prezența colectorului care limitează turația, tensiunea și puterea generatorului de curent continuu. Utilizarea convertoarelor statice cu semiconductoare de putere în propulsia electrică de curent alternativ și curent alternativ-curent continuu permite obținerea unor caracteristici asemănătoare schemei G-M în curent continuu și realizarea unor scheme de comparație permit menținerea constantă a frecvenței generatoarelor principale ceea ce creează posibilitatea folosirii unei părți din puterea acestora pentru alimentarea consumatorilor din rețeaua generală a navei. Prin folosirea unui sistem de generare și distribuție a

energiei, se folosește un convertizor pentru propulsia redundantă în tandem cu un motor redundant pentru propulsie [3,4]. Astăzi sunt conturate 2 direcții de cercetare a sistemelor de propulsie electrică: prima direcție urmărește introducerea sistemelor de curent alternativ cu convertizoare de frecvență; a doua direcție urmărește folosirea generatoarelor și a electromotoarelor cu înfășurări de excitație semiconductoare folosind motoarele sincrone. Funcționarea întregului sistem de propulsie electrică se realizează cu ajutorul calculatoarelor electronice care supraveghează și furnizează semnale de referință atât în curent cât și în tensiune pe baza unor programe specializate. Funcționarea instalațiilor electrice ale navei pe timpul diferitelor regimuri asigură recuperarea de energie, limitarea curentului, a tensiunii, a puterii, a cuplului și a frecvenței [3,4,5].

Introducerea de aparatură modernă, de noi tipuri de generatoare sincrone, de motoare sincrone și asincrone, de dispozitive de automatizare și de noi mecanisme navale va duce ca propulsia electrică să dezvolte și să capete noi valențe în construcția navelor.

2. ACȚIONĂRI DE CURENT CONTINUU ȘI ALTERNATIV FOLOSITE ÎN SISTEMUL DE PROPULSIE

Dezvoltarea intensivă a tehnicii a dus la realizarea convertoarelor statice care a permis unificarea în sistemul de propulsie electrică navală a curentului alternativ și a celui continuu.

Sistemul generator sincron-convertoare necomandat-electromotor de propulsie are următoarele avantaje:

- generatoarele sincrone pot fi conectate direct la motoarele lor primare (diesel, turbine cu abur sau gaz);

- folosirea de motoare primare cu turații și puteri mari (turbine cu abur sau gaz);

- cuplarea directă a generatoarelor de curent alternativ evitând reductorul ceea ce duce la micșorarea gabaritelor și a pulsațiilor tensiunii redresate;

- asigurarea unei mari siguranțe schemei sistemului prin folosirea generatoarelor de curent alternativ;

- valoarea automată într-o plajă largă a momentului electromotorului de propulsie la turație și putere constantă a motoarelor primare;

- independența turației elicei și a reglajului acesteia de cea a motorului primar.

Atunci când în sistem se folosesc convertoare comandate, acestea sunt rapide în acționare deoarece sunt legate de comanda excitației generatorului și permit alimentarea mai multor electromotoare de propulsie de la un singur generator sincron. Fiecare electromotor primește alimentare de la redresorul său comandat ceea ce asigură flexibilitate în deciziile

schematice de distribuție a energiei și realizarea unor regimuri raționale de funcționare a motoarelor primare – și asigură realizarea unei instalații electromagnetice unificate în care alimentarea electromotoarelor și a consumatorilor auxiliari ai navei să se facă de la o singură centrală electrică.

Cerințele impuse convertoarelor folosite în sistemul de propulsie sunt: plaja de reglare și variație a tensiunii de ieșire; existența unghiurilor de reglaj limitate; felul caracteristicilor de reglaj exterioare și dinamice ale convertoarelor; frecvența și nivelul pulsațiilor tensiunii de ieșire; siguranța navală; exploatare sigură; dimensiuni și costuri minime [3,6,7].

Convertirea tensiunii alternative a unui generator sincron în tensiune continuă este însoțită de pulsațiile tensiunii redresate, care depind de schemele de redresare și de sarcină. Șirul armonicilor pare și impare ale tensiunii nesinusoidale redresate se scrie:

$$u_r = U_{r_0} + \sum_{k=1}^{\infty} U_{r_{mk}} \sin\left(k2\pi\omega t + \arctg \frac{a_k}{b_k}\right) \quad (1)$$

unde: U_{r_0} este componenta constantă a tensiunii redresate; $U_{r_{mk}}$ - amplitudinea armonicilor superioare corespunzătoare tensiunii redresate de ordinul k ; k - ordinul armonicii tensiunii; $2\pi\omega$ - pulsația perturbației; $\arctg \frac{a_k}{b_k} = \varphi_{u_k}$; defazajul armonice; a_k, b_k - amplitudinile componentelor cosinusoidale respectiv sinusoidale.

Curba tensiunii redresate a convertorului are două componente: o componentă continuă (U_{r_0}) și o componentă alternativă determinată de armonice.

Asupra spectrului perturbațiilor are influență și asimetria de funcționare a convertorului. Perturbația trece prin canalul energetic al sistemului de propulsie electrică convertindu-se în final în oscilația curentului, a momentului electroenergetic sau în turația electromotorului și a elicei.

Repartiția curentului din circuitul principal la acțiunea circuitului de egalizare, are forma [3,4,6,7]:

$$i_r(t) = I_{r_0} + \sum_{k=1}^{\infty} I_{r_{mk}} \sin(k2\pi\omega t + \varphi_{ik}) \quad (2)$$

unde: I_{r_0} este componenta continuă a curentului redresat; φ_{ik} - faza armonice de ordinul k a curentului.

Întregul lanț al sistemului convertoare comandat - electromotor de propulsie de curent continuu, determină procesele interne - unghiurile de comutare, unghiurile de deschidere a circuitului de comandă - și externe - dependența curentului de timp - în convertoare. La alimentarea electromotorului de propulsie, în

circuitele convertorului evidențiem două secțiuni: curentul de sarcină în perioada de funcționare a motorului trece prin circuitul unei faze iar în perioada comutației prin celelalte două faze.

La studiul regimului de curent continuu se construiesc caracteristicile externe ale convertorului comandat sub forma dreptelor 2 care au panta proporțională cu R_r - fig.1, iar caracteristica de reglaj este reprezentată la o valoare oarecare a curentului de sarcină (fig. 1) a cărei expresie are forma cosinusoidală:

$$U_r = \frac{E_{r\max}}{2} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)] \quad (3)$$

Caracteristicile de reglaj ale convertorului comandat $E_r = f(\alpha)$ și ale convertorului ce funcționează cu electromotorul de propulsie $U_{r0} = f(\alpha)$ sunt adevărate doar în gama unghiului de reglaj $\alpha \leq \pi - (\gamma - \delta)$, unde δ este unghiul corespunzător timpului de decuplare a circuitului de comandă a convertorului.

Expresiile curentului redresat pentru convertorul comandat și cel necomandat sunt:

$$I_r = \frac{E_{r\max}}{2X_g} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)] \quad (4)$$

$$I_r = \frac{E_{r\max}}{2X_g} (1 - \cos \gamma) \quad (5)$$

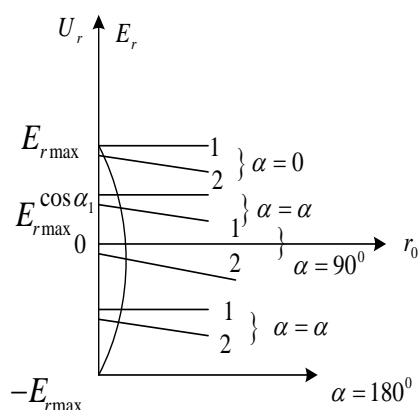


fig.1

unde: $X_g = \frac{E_{r\max}}{I_{r\max}}$ este impedanța generatorului

sincron.

Convertorul comandat este caracterizat de două regiuni de funcționare: redresare și invertor. În ambele regimuri (redresare și invertor), curentul din convertor are același sens. Trecerea convertorului din regim de redresare în regim de invertor se realizează prin schimbarea polarității tensiunii electromotoare a sarcinii și mărirea unghiului de reglaj la o sarcină inductivă mai mare de $\frac{\pi}{2}$

Existența în schemele sistemelor de propulsie electrică a convertoarelor comandate, necomandate sau de frecvență duc la apariția armonicilor înalte în circuitul de curent alternativ și influențează funcționarea generatoarelor sincrone și a consumatorilor cuplați la bare. Convertoarele, ca orice instalație neliniară, consumă din rețea curentul nesinusoidal, fiind generatoare de armonice[8,9].

Perturbațiile în sistemul de propulsie electrică a convertoarelor sunt legate deasemenea de faptul că acestea consumă putere reactivă la care coeficientul de deformare a primei armonice a curentului, în raport cu tensiunea generatorului sincron, variază proporțional cu variația tensiunii de ieșire a convertorului. Curenții statorici ai armonicilor creează câmpuri ce se rotesc asincron cu rotorul și care induc în rotor curenți de armonici superioare care sunt sursă de pierderi suplimentare.

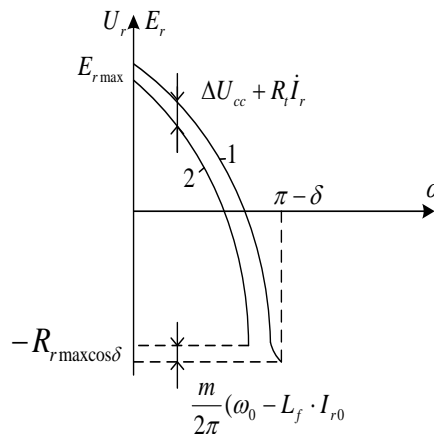


fig.2

Fig. 1. Caracteristica externă și de reglaj a convertorului.

Pierderile suplimentare determină necesitatea micșorării sarcinii active admise a generatorului sincron în scopul asigurării condițiilor normale de funcționare. Aceste pierderi în generatorul sincron apar în înfășurările statorului (determinate de creșterea valorii active a curentului în comparație cu armonica principală), în fierul statorului (pierderi prin histerezis și curenți

turbionari), în conturul rotorului din înfășurarea de amortizare și din înfășurarea de excitație. Pierderile sunt determinate de curenții din conturul rotorului ca urmare a formelor nesinusoidale ale curbilor curenților statorici. Pentru asigurarea funcționării normale a generatorului sincron este necesar ca încălzirea statorului să fie aceeași ca și la sarcina simetric sinusoidală

de curent alternativ. Deci convertoarele semiconductoare sunt surse de perturbații de tensiune a rețelei de alimentare, ele însele fiind sub acțiunea acestor perturbații care apar mai ales la mărirea pulsațiilor curenților și tensiunilor redresate. Aceste pulsații determină următoarele fenomene în funcționarea electromotoarelor de propulsie: înrăutățirea comutației electromotorului, mărirea pierderilor și ca urmare mărirea gradului de încălzire; înrăutățirea condițiilor potențiale la colector; apariția zgomotelor și vibrațiilor suplimentare; posibilitatea apariției momentelor suplimentare de caracter pulsatoriu; înrăutățirea calității izolației înfășurărilor electromotorului și cablurilor de forță; înrăutățirea proceselor tranzitorii, micșorarea caracteristicilor energetice [6,7,10].

3. CONCLUZII

Calitatea comutației electromotorului de propulsie este cea mai importantă caracteristică de funcționare având influență asupra nivelului cheltuielilor de exploatare, asupra eficacității funcționării navei cu propulsie electrică, asupra siguranței elementelor de propulsie și navigație ale navei. În funcționarea unei nave având propulsie electrică sunt caracteristice regimurile de exploatare: reversări dese; calarea elicelor; lovirea palelor elicelor; remorcarea cu variații mari la cârligul de remorcă - cu suprasarcini bruște de curent. Înrautățirea comutației electromotorului de propulsie este legată de apariția unor tensiuni electromotoare suplimentare și variabile. Tensiunile electromotoare adiționale de bază în secțiunile înfășurărilor ce comută sunt: componenta reactivă; componenta variabilă ce comută; componenta transformatorului de la pulsațiile câmpului magnetic principal.

Scăderea nivelului pulsațiilor în curenții și tensiunile redresate poate fi obținută prin două metode: introducerea unor inductivități suplimentare pe partea de curent continuu; mărirea înfășurărilor fazelor de redresare. În cazul reglajului electromotorului de propulsie folosind convertoare necomandate se folosesc caracteristicile de reglaj și caracteristicile externe pentru diferite valori ale curentului de excitație a generatorului sincron, unde trebuie să avem în vedere limitarea tensiunii și turației electromotorului de

propulsie, menținerea puterii constante de către electromotorul de propulsie și limitarea curentului în circuitul de legătură. Pentru circuitul de comandă se ia o valoare a acestuia care asigură reglajul după legea menținerii constante a turației electromotorului de propulsie iar două valori asigură reglajul după legea menținerii constante a puterii (prin reglajul excitației generatorului sincron și electromotorului de propulsie). Unipolaritatea curentului și tensiunii în circuitul principal sunt date de convertoarele necomandate. Existența unipolarității exclude posibilitatea frânării electromotorului de propulsie cu recuperare și de aceea modul principal de frânare este cea dinamică. În procesul frânării dinamice, tensiunea convertorului este egală cu zero deoarece acesta lucrează în regim de scurtcircuit, iar reglarea curentului din circuitul de legatură se realizează pe calea variației excitației electromotorului. Urmare a dependenței tensiunii convertorului de curentul sarcinii este necesar reglajul excitației generatorului sincron la scăderea sarcinii. Generatoarele sincrone sunt realizate de obicei mai puțin saturate în comparație cu cele de curent continuu.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Chang, S.C., s.a.- „*The Effect of Cycloconverter 55rive son Noise and Vibration in Electrical Machines*”, Proc. Of EPE'95. 6th European Conference on Power Electronics and Applications, 1995.
- [2] Alf Kare Adnanes -, „*Maritime Electrical Installations and Diesel Electrical Propulsion*”, Oslo ABB AS, Marine, 2003
- [3] Marikin, .A.B.- „*Avtomatigirovannie Grenie Electriceskie Usmanovku*”, Moscova, Editura Transport, 1986.
- [4] Cekunov, K.A.- „*Sudovae Electroprivoda i Electrodvijenie Sudov*”, Lumbungrad, Editura Sudostroenie, 1976.
- [5] Marintek, „*Neste Generasjon Innenriksferjer – Optimal Fremdriftssystem*”, Marintek re-port MT23 A01-008, 790455.70.01, 2001.
- [6] Haidukov, O.P., s.a.- „*Electroobardovanie Sudov*” Moscova, Editura Transport, 1974
- [7] Kitoenko, G.I.- „*Spravocinik Sudovovo Electrotehnica*”, Leningrad, Editura Sudostroenie, 1980
- [8] Petereteig, A. „*Development and Control of a Resonant DC-Link Converter for Multiple Motor Drives*”, Norvegia, 1992.
- [9] Ldnanes, A.K., s.a.- „*Essential Characteristics of Electric Propulsion and Thruster Drives in DP Vessels*”, Proc. of Dynamic Positioning Conferece, Houston, USA, 1997.
- [10] Petereteig, A.- „*Development and Control of a Resonant DC-Link Converter for Multiple Motor Drives*”, Norvegia, 1992.

Despre autori

Drd. ing. **Dumitru IORGULESCU**

Port Line Crewing Portugal - Academia Tehnică Militară – București

Este doctorand la Academia Tehnică Militară – București din 2013 și ofițer șef macanic din 2017 la Compania Maritimă Port Line Crewing Portugal. Are experiență la bordul navelor comerciale, fiind inginer de exploatare.

A scris 3 articole la conferințe și simpozioane internaționale și două articole în buletine științifice. Este în faza de redactare a tezei de doctorat

CERCETARE ȘI EXPERTIZĂ INGINEREASCĂ LA CONSTANȚA

Prof. dr. ing. **Gheorghe SAMOILESCU**

Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța, România

Absolvent al Institutului (Academiei Navale) „Mircea cel Bătrân” în anul 1984. Este doctor în Electrotehnică, titlu obținut la Universitatea Politehnică București în anul 2009. Din anul 2007 este profesor universitar în cadrul Academiei Navale „Mircea cel Bătrân”, ocupând de-a lungul anilor diverse funcții de conducere în managementul învățământului universitar și a cercetării în cadrul instituției. Este conducător de doctorat din 2009. Deține o invenție, 4 premii pentru cărți în domeniul știință și Tehnică, a scris 4 tratate și 24 cărți și peste 200 articole publicate în reviste științifice sau comunicate la conferințe și simpozioane naționale și internaționale. A primit mai multe premii naționale și internaționale. Membru AGIR și vicepreședinte al Filialei AGIR Constanța, precum și membru al următoarelor asociații: SRPRNI, Asociația Internațională a Inginerilor din Construcția de Mașini, IEEE, Asociația de Compatibilitate Electromagnetică din România etc.

Cdor. dr. ing. **Dinu ATODIRESEI**

Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța, România

Absolvent al Academiei Navale „Mircea cel Bătrân” în anul 1995 și al Universității Ovidius Constanța, specializarea Ecologie și Protecția Mediului în anul 2000. A absolvit masteratul în Biotehnii și Ecotehnii Marine și Costiere în anul 2002. Din anul 2000 a început activitatea în domeniul învățământului și cercetării în cadrul Academiei Navale „Mircea cel Bătrân”, iar din anul 2010 este cadru didactic universitar la Departamentul de Navigație și Transport Naval, actualmente fiind decan al Facultății de Navigație și Management Naval. Este doctor în Ecologie și Protecția Mediului, titlu obținut la Universitatea Ovidius, Constanța în anul 2012. Este autorul a numeroase articole, cărți și studii în domeniile de expertiză: meteorologie, oceanografie, hidrografie marină, prevenirea poluării mediului, operarea mărfurilor periculoase și educația și instruirea adulților.

Sef lucrări dr.ing. **Alecu TOMA**

Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța, România

Absolvent al Academiei Navale „Mircea cel Bătrân” în anul 1995, și-a desfășurat activitatea timp de 10 ani pe diverse funcții pe nave din Forțele Navale Române și 4 ani în Comandamentul Flotei Maritime. A absolvit cursul de Șef operații maritime în Statele Unite ale Americii în anul 2005. Din anul 2007 a început activitatea în domeniul învățământului în calitate de șef birou învățământ, instructor și șef de catedră la Școala de Aplicație a Forțelor Navale iar din anul 2011 este cadru didactic universitar la Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, actualmente fiind Prorector pentru Învățământ. Este doctor în inginerie mecanică, din anul 2010 la Academia Tehnică Militară, București. Este autorul a numeroase articole, cărți și studii în domeniile de expertiză: construcția și întreținerea armanentului de luptă sub apă, manevra navei, cautarea și salvarea vieții pe mare, siguranța și securitatea maritimă, vitalitatea navei, și educația și instruirea adulților.

Instructor principal drd. ing. **Alexandru COTORCEA**

Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța

Absolvent al Academiei Navale „Mircea cel Bătrân”, specializarea Electromecanică Navală în anul 2005. A absolvit masteratul în Inginerie și Management Naval și Portuar în anul 2013. Din anul 2012 a început activitatea în domeniul învățământului ca și cadru didactic la Departamentul de Inginerie și Management Naval și Portuar. Este doctorand în Inginerie Mecanică al Universității Transilvania din Brașov. Este autorul a numeroase articole și studii în domeniile de expertiză: prevenirea poluării mediului și sisteme regenerabile de energie.