

# CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE LA BORDUL NAVELOR

Ș.l. dr. ing. Eduard DRAGOMIR, Ș.l. dr. ing. Leon PANĂ

Academia Navală „Mircea cel Bătrân” – Constanța

**REZUMAT.** Lucrarea abordează calitatea energiei electrice produse la bordul navelor. Datorită multitudinii de mașini de inducție (ventilatoare, pompe, mecanisme de acționare) dar și convertizoare, redresoare comandate acestea introduc armonici de tensiune și curent cu implicații asupra funcționării mecanismelor de automatizare, aparatelor de navigație și a celorlalți consumatori de la bord. Stabilirea unor indici de calitate care să caracterizeze sistemul energetic de la bordul navelor duce la o exploatare sigură a agregatelor și la sporirea siguranței de navigație și reducerea costurilor de exploatare.

**Cuvinte cheie:** indici de calitate, armonici, distorsiune, putere deformantă.

**ABSTRACT.** The paper analyzes the quality of electricity produced on board ships. Due to the multitude of induction machines (fans, pumps, actuators) but also converters, controlled rectifiers they introduce voltage and current harmonics with implications on the operation of automation mechanisms, navigation devices and other consumers on board. The establishment of quality indices to characterize the energy system on board ships leads to the safe operation of the aggregates and increase the safety navigation and reduce the costs of operating.

**Keywords:** quality indices, harmonics, distortion, deforming power.

## 1. INTRODUCERE

Cunoașterea și determinarea factorilor de calitate ai sistemelor electroenergetice navale are o însemnătate deosebită în ceea ce privește funcționarea în condiții de siguranță a tehnicii de la bord precum și în ceea ce privește reducerea consumului de combustibil necesar producerii energiei.

Calitatea energiei electrice este un termen care se referă la o mare varietate de perturbări din rețele electrice (fie navale, terestre sau domestice). Astfel, problemele de calitate a energiei electrice se referă la abateri ale tensiunii de la valori nominale și abateri de la forma de undă, care pot provoca defecțiuni, întreruperea sau chiar deteriorarea echipamentelor și sistemelor. Având în vedere apariția propulsiei electrice, a electronicii de putere precum și a tehnicii de calcul din cadrul echipamentelor și sistemelor, problema calității energiei electrice din sistemul electroenergetic a devenit de primă importanță pentru exploatarea în siguranță a navei.

Dintr-un anumit punct de vedere, fenomenele care caracterizează calitatea energiei electrice pot fi clasificate în două categorii principale, cum ar fi:

- fenomene staționare care au o anumită perioadă și se repetă aproape constant, fără modificări semnificative, cum ar fi armonicele și dezechilibrul,

în timp ce există și un parametru întâmplător inclus în anumite cazuri precum deformări ale formei de undă, flickere etc.

- fenomene tranzitorii, care au o durată limitată și sunt caracterizate prin modificări semnificative, cum ar fi vârfurile și goluri de tensiune, deformări ale formei de undă.

Analiza calității energiei electrice se referă la analiza parametrilor principali de alimentare cu energie electrică, adică tensiune, frecvență și dacă este posibil curentul. Primii doi parametri sunt caracteristici sistemului electroenergetic naval care trebuie menținuți de către regulatorul automat de tensiune și frecvență în limitele stabilite conform standardelor. Dimpotrivă, curentul este o cantitate care afectează calitatea energiei prin intermediul căderilor de tensiune ale sistemului datorită impedanțelor. Prin urmare, limitările actuale ale curentului (impuse de unele standarde) sunt necesare pentru a garanta o înaltă calitate a tensiunii.

Calitatea energiei electrice reprezintă un concept complex de estimare a produsului energie electrică, exprimat cu ajutorul indicatorilor, ale căror valori determinate pentru un anumit punct al rețelei și pentru un anumit interval de timp, pot fi comparate cu valori optime sau admisibile.

Sistemul de indicatori ai calității energiei electrice se referă în general la:

- variații ale valorilor eficace a tensiunii;
- abaterile tensiunii de la forma ideală;
- abateri ale frecvenței;
- abateri ale sistemului de tensiuni și curenți de la simetria de fază.

Dezvoltarea electronicii de putere care intră în structura unor echipamente electrice a mărit sensibilitatea acestora la deformațiile formei de undă și la nesimetria tensiunilor de alimentare dar, pe de altă parte, au devenit ele generatoare de perturbații, deformații și regimuri dezechilibrate.

Energia consumată de un receptor se regăsește în valoarea curentului electric absorbit din rețeaua de alimentare. Când curenții absorbiți de consumatori trec prin conductoarele rețelei electrice produc căderi de tensiune astfel încât mărimea tensiunii de alimentare este o funcție a căderilor de tensiune cumulate pe elementele rețelei.

De aceea, tensiunea de alimentare la bornele unui consumator este determinată atât de cererea individuală cât și de consumul simultan al celorlalți consumatori.

Indicii de calitate ai tensiunii se referă la:

- variațiile de tensiune;
- nesimetria tensiunii și curenților de alimentare;
- deformarea formei de undă a tensiunii și curentului.

Menținerea constantă a frecvenței necesită o capacitate de producție egală în orice moment cu cererea simultană a consumatorilor. Deoarece atât capacitatea de producție a energiei electrice cât și cererea se schimbă în cantități discrete există întotdeauna un risc de neadaptare având ca rezultat o creștere sau o scădere a frecvenței. Interconectarea rețelelor (prin existența la bordul navelor militare a două sau mai multe centrale electrice dispuse în zone diferite) poate conduce la o rezervă de putere suficient de mare în sistem care să reducă astfel riscul variației de frecvență.

Indicii de calitate ai frecvenței se referă în principal la variația frecvenței în raport cu cea nominală.

## 2. DISTORSIUNEA ARMONICĂ

Calitatea puterii armonice este caracterizată de existența unei forme de undă de tensiune și a unei forme de undă de curent periodice distorsionate, care pot fi exprimate prin analiza matematică Fourier, ca suprapunerea unei serii infinite de frecvențe peste cea fundamentală, precum și multiplii săi (armonicele de ordin înalt  $u_n$ ):

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_k \sqrt{2}U_k \cos(k\omega t + \alpha_k) \\ i_a(t) &= \sum_j \sqrt{2}I_{aj} \cos(j\omega t + \alpha_j) \end{aligned} \quad (1)$$

Distorsiunea armonică se datorează în principal dispozitivelor electronice de putere utilizate pentru cuplare și control, diferite niveluri de tensiune și frecvență de funcționare, de exemplu, în sistemele cu motoare electrice.[2]

În contradicție cu alte probleme de calitate a energiei, distorsiunea armonică este un fenomen de abatere de la starea de echilibru existent în mod constant. Impactul distorsiunii armonice ale tensiunii și/sau curentului sunt:

- încălzirea suplimentară în mașinile electrice și cablurile de cabluri (ducând la o îmbătrânire prematură sau cerințe suplimentare de răcire)
- scăderea preciziei și eficienței echipamentelor de măsurare, care nu sunt construite pentru măsurători de cantități electrice non-sinusoidale
- amplificarea fenomenelor de rezonanță care rezultă la supratensiuni semnificative și/sau supracurenți
- declanșare falsă a aparatului de protecție
- defectarea echipamentelor sensibile la armonici
- probleme de interferență electromagnetică (EMI) cu echipamente electronice sensibile (aparate de navigație, comunicații și automatizare)
- creșterea pierderilor prin putere deformantă (aceasta nu poate fi evidențiată decât în momentul determinării armonicilor de tensiune și curent).

Armonicele sunt caracterizate de multe standarde ca o problemă de calitate a tensiunii, așa cum este tensiunea sistemului electroenergetic de alimentare care este controlată direct și reglementată de standarde. Dimpotrivă, curentul este determinat de diferitele sarcini furnizate, prin urmare, calitatea curentului nu poate fi ușor controlat, în ciuda faptului că distorsiunea curentului este reflectată și la tensiune, prin căderea de tensiune pe impedanțele circuitului. De aceea, trebuie acordată mai multă atenție calității energiei electrice definite de numărul consumatorilor instalați la bord sau de consumatorii de puteri mari (consumatori semnificativi la care cererea de energie afectează capacitatea sistemului electroenergetic).

În ceea ce privește indicii care caracterizează nivelul de distorsiune, pe lângă armonici individuale de tensiune și curent  $U_n$  și  $I_n$ , (a se vedea ecuația (1)), *factorul de distorsiune* THD (total harmonic distortion factor - THD) este caracteristic pentru regimul periodic nesinusoidal în ansamblu (total):

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} U_n^2}}{U_1} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} I_n^2}}{I_1} \quad (2)$$

$$THD = \frac{1}{U_1} \times \sqrt{\sum_{i=2}^{40} (U_i^2)} \quad (3)$$

unde  $U_i$  este valoarea efectivă a armonicii de tensiune  $i$ , iar  $U_1$  este valoarea efectivă a fundamentalei. (pentru armonicile de ordin superior (peste 25), standardele nu precizează limitele deoarece ele au o valoare foarte mică, din cauza fenomenelor de rezonanță. Limitarea armonicilor este indirectă, prin factorul de distorsiune a tensiunii).[1]

Pentru a putea determina THD (conform definiției THD) trebuie să se măsoare simultan ambele componente: fundamentala și armonicile de ordin superior.

Pe lângă distorsiunea armonică tipică constând din mulți întregi ai frecvenței fundamentale și constituie cel mai semnificativ tip de distorsiune armonică, așa-numitele „interarmonice” și „subarmonice”, adică mulți neîntregi și parțiali de mulți ai frecvenței fundamentale cuprind respectiv un fel de distorsiune care nu este bine definită sau precizată.

În ceea ce privește măsurile de atenuare a problemelor de distorsiune armonică, acestea cuprind fie intervenția unor filtre adecvate (combinații de elemente pasive – bobine și condensatori - reglați la anumite frecvențe) sau introducerea unei îmbunătățiri a tehnicii de comutație pentru convertoarele de putere sau chiar utilizarea unor convertoare mai complicate (convertoare de ordine de impulsuri mari, de exemplu 12 impulsuri).

Distorsiunea armonică este produsă în principal de variație rapidă de tensiune – o singură variație rapidă a valorii efective a tensiunii între două valori consecutive, menținute în timpul unor durate definite, dar nespecificate. (vezi Figura 1).[3]

Convertoarele trifazate sunt cea mai importantă sursă de perturbare a tensiunii. Creșterea formei de undă este un fenomen de stare stabilă, dar față de problemele de poluare armonică descrise anterior, aceste deformări sunt caracteristice frecvențelor mari.

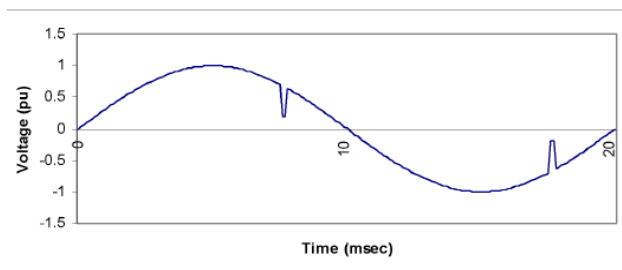


Fig. 1. Forma de undă cu goluri.

Acest fenomen poate cauza probleme echipamentelor electronice care utilizează treceri prin zero pentru calculul frecvenței sau al timpului. Perturbațiile tranzitorii și zgomotul electric se transmit prin semnale electrice permanente sau tranzitorii, periodice sau aleatoare, care influențează nedorit funcționarea

circuitelor electrice. Ele sunt datorate activităților umane sau datorită fenomenelor naturale și provoacă deteriorarea semnalelor purtătoare de informație, alterarea funcțiilor sau chiar scoaterea din funcțiune a aparatelor electrice. În plus, zgomotul cuprinde semnale cu conținut spectral în bandă largă mai mică de 200 kHz suprapuse la tensiunea sau curentul sistemului de alimentare în conductorii de fază sau care se găsesc pe conductori neutri sau pe liniile de semnal. Zgomotul este cauzat de dispozitive electronice de putere, circuite de control, echipamente de arc și surse de alimentare de comutare. Zgomotul deranjează dispozitive electronice precum microcomputerele și controlere programabile. În situația în care amplitudinea tensiunii de zgomot depășește nivelul acceptabil, aceasta poate duce la estomparea nivelului de tensiune al semnalului util. Soluțiile tehnice pentru problemele de zgomot includ filtre, transformatoare de izolare etc.

### 3. VÂRFURI, GOLURI, REGIMURI TRANZITORII

Rețelele electrice sunt supuse perturbațiilor neperiodice de scurtă durată de tensiune și de curent cauzate de operațiile de comutare (producere sau întrerupere a energiei electrice), scurtcircuite, siguranțe sau chiar fulgerele. Denumirea acestor tulburări variază în funcție de anumite caracteristici ale acestora (de exemplu, tranzitorii, vârfuri, goluri etc.). Golurile de tensiune sunt evenimente care prezintă o scădere temporară a tensiunii RMS (Root Mean Square) – valoare efectivă măsurată. Sunt cauzate de o creștere a curentului în sistem (din cauza unui scurtcircuit sau în timpul pornirii unui motor de putere considerabilă. Un vârf de tensiune este o creștere temporară a tensiunii RMS. Vârfulurile de tensiune sunt de obicei cauzate de defecțiune în sistemele neîmpământate.

Mărimea golurilor induse de defecțiune depinde de impedanța sursei, configurația sistemului, impedanța defectului, tipul defectului și distanța până la defect. Durata lor depinde de funcționarea sistemului de protecție, care variază de la jumătate de ciclu (funcționarea siguranței) la mai multe cicluri (funcționarea întreruptoarelor). Golurile de tensiune sunt responsabile pentru oprirea computerelor, modificarea vitezelor reglabile, echipamente electronice și echipamente de control al proceselor. Vârfulurile de tensiune pot fi dăunătoare pentru rezistența de izolație. Atenuarea golurilor de tensiunii poate fi realizată cu ajutorul surplusului de energie (cum ar fi un UPS) sau cu echipamente electronice de putere care pot compensa pierderea parțială a tensiunii.

Un regim tranzitoriu și un vârf reprezintă o schimbare bruscă a tensiunii sau a curentului sau

ambele. Pot fi unidirecționale sau oscilatorii în polaritate. Acțiunile de comutare sunt cauze tipice ale vârfurilor și regimurilor tranzitorii. De exemplu, un vârf poate apar în faza inițială a fenomenului „tranzitoriu” în urma creșterii tensiunii (vezi Figura 2). Această creștere a tensiunii conduce la oscilații în rețeaua cu frecvența de rezonanță a întregului sistem.

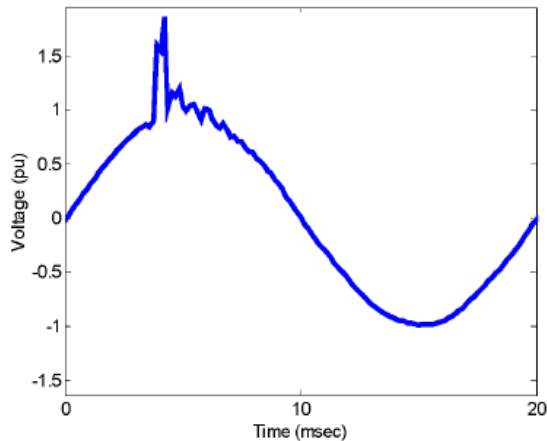


Fig. 2. Măsurarea regimului tranzitoriu a tensiunii dintr-o rețea de joasă tensiune.

Principalii parametri de calitate ai tensiunii sunt prezentați în tabelul de mai jos. (vezi Tabelul 1).[4]

Tabelul 1. Calitatea curbei de tensiune

Fenomen	Limite admisibile
Limite pentru tensiune	$\pm 5\%$ față de tensiunea nominală
Flicker	$P_{lt} \leq 1$ , pentru 95% din săptămână
Variații rapide de tensiune în regim normal	$\pm 5\%$ față de tensiunea nominală $U_n$
Nesimetrie (componenta negativă) - $K_n$	La JT și MT, $K_n \leq 2\%$ , pentru 95% din săptămână; în unele zone se poate atinge 3%; La IT, $K_n \leq 1\%$ , pentru 95% din săptămână
Frecvența	50 Hz + 4/- 6 %

În condiții normale de funcționare, tensiunile armonice nu trebuie să depășească limitele maxime indicate în tabelele 2 și 3.[4]

Vârfurile de tensiune și de curent precum și regimurile tranzitorii au consecințe nefaste asupra circuitelor electrice, cum ar fi:

- defectarea izolației
- defectarea comutatoarelor semiconductoare când la erori în dispozitivele de procesare a datelor
- variații a vitezelor reglabile
- defectarea dispozitivele de protecție în tensiune cât și în curent.

Tabelul 2. Valorile efective ale armonicilor impare de tensiune

Armonici impare (% din fundamentală):			
Nu multiplu de 3		Multiplu de 3	
Rang	Prag	Rang	Prag
5	6%	3	5%
7	5%	9	1,5%
11	3,5%	15 și 21	0,5%
13	3%		
17	2%		
19,23,25	1,5%		

Tabelul 3. Valorile efective ale armonicilor pare de tensiune

Armonici pare (% din fundamentală):	
Rang	Prag
2	2%
4	1%
6 la 24	0,5%

#### 4. MODULAȚIE/SARCINI PULSATE

Variațiile periodice sau cvasi-periodice ale tensiunii și frecvenței cauzate de regulator automat de tensiune sau încărcarea aleatorie repetată cu frecvență mai mică decât cea nominală sunt menționate în STANAG 1008 ca „modulație”. În Figura 4, este prezentată modulația tensiunii și frecvenței.[3] Pentru cuantificarea modulației de tensiune sau frecvență ca diferență între valoarea maximă și cea minimă, se utilizează ca procent din dublul valorii tensiunii nominale. Sunt propuse limitele de 2% și 0,5% pentru tensiune și respectiv frecvență. Fluctuațiile sistematice ale tensiunii cu valoare redusă se numește flicker și reprezintă impresia de jenă vizuală produsă de o sursă luminoasă a cărei luminozitate sau distribuție spectrală variază în timp datorită variației tensiunii la alimentare. Fluctuațiile sunt caracterizate și normate prin severitatea flickerului pe termen scurt ( $P_{st}$ ), măsurate pe o perioadă de 10 minute, cu aparate specializate, respectiv pe termen lung ( $P_{lt}$ ), calculate pe o perioadă de 2 ore (12 intervale de 10 minute):

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (4)$$

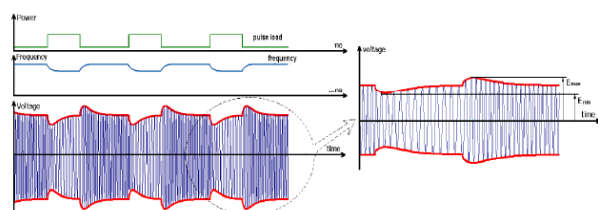


Fig. 4. Modulația de tensiune și frecvență.

Datorită noilor sisteme de armament naval care necesită o putere mare (de ordinul MW) pentru un interval foarte scurt, de ordinul a câteva secunde și chiar milisecunde, sunt principala cauză a modulației tensiunii/frecvenței.

Conform STANAG 1008, sarcinile pulsatorii nu trebuie să depășească limitele specificate de următoarele ecuații: [11]

$$Q_{puls} < 0,065 \cdot S_n \quad \text{și} \quad P_{puls} < 0,25 \cdot S_n \quad (5)$$

## 5. DEZECHILIBRU DE TENSIUNE

Într-un sistem trifazic simetric, tensiunile de fază sunt egale ca mărime și sunt defazate cu 120°. Abateră de la această simetrie (dezechilibru) este cauzată de mai mulți factori:

- distribuția asimetrică a sarcinilor monofazate sau bifazate între cele trei faze;
- generare monofazată (panouri fotovoltaice mici, celule de combustibil etc.);
- motoare electrice cu înfășurări străpunse pe cale să se defecteze.

Dezechilibrul tensiunilor cauzează următoarele probleme:

- la motoarele cu inducție - mașina nu produce cuplul complet, apar solicitări mecanice în rulmenți din cauza componentelor cuplului indus la o frecvență dublă a sistemului, în timp ce statorul și rotorul, în special, sunt încălzite excesiv (ducând la îmbătrânirea termică mai rapidă). Căldura este produsă de curenții induși prin rotirea rapidă (în sens relativ) a câmpului magnetic opus /negativ, așa cum este văzut de rotor;
- la generatoare sincrone – apar fenomene similare celor descrise pentru mașina de inducție, în principal excesul de încălzire este mult mai pronunțat;
- la convertoare electronice de putere care se confruntă cu tensiuni armonice. Curenții excesivi asociați cu acest lucru ar putea duce la declanșarea acționării sistemelor.

## 6. PUTEREA DEFORMANTĂ

Regimurile periodice nesinusoidale, denumite și regimuri deformante, sunt cauzate în special de elemente neliniare care alimentate chiar la tensiuni sinusoidale au curenți nesinusoidali. Aceștia produc căderi de tensiune nesinusoidale, sporesc pierderile de putere și afectează indicii de calitate ai funcționării sistemului electroenergetic.[5,6]

Pentru calculul puterii deformante, curentul  $i$  a fost separat în cele două componente ortogonale activă  $i_a$  și reactivă  $i_r$

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} \sum_j I_j \cos \varphi_j \cos(j\omega t + \alpha_j) \\ i_r &= \sqrt{2} \sum_j I_j \sin \varphi_j \sin(j\omega t + \alpha_j) \end{aligned} \quad (6)$$

$$i = i_a + i_r \div I^2 = I_a^2 + I_r^2$$

Fiecare din acestea se poate descompune în câte două componente, liniară și reziduală

$$\begin{aligned} i_a &= i_p + i_{ad} \\ i_r &= i_q + i_{rd} \end{aligned} \quad (7)$$

Relațiile ortogonale dintre puterile asociate relațiilor ortogonale dintre valorile efective ale curenților (8) se exprimă ca relații între puteri aparente corespunzătoare valorilor efective de tensiuni și curenți

$$\begin{aligned} I_a^2 &= I_p^2 + I_{ad}^2 \\ I_r^2 &= I_q^2 + I_{rd}^2 \\ I_d^2 &= I_{ad}^2 + I_{rd}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} S^2 &= U^2 I^2 = U^2 (I_a^2 + I_r^2) = U^2 (I_p^2 + I_{ad}^2) + U^2 (I_q^2 + I_{rd}^2) \\ &= U^2 I_p^2 + U^2 I_q^2 + U^2 I_{ad}^2 + U^2 I_{rd}^2 = P^2 + Q^2 + D_a^2 + D_r^2 \end{aligned}$$

Dacă se folosesc identități Lagrange puterile efective se exprimă ca sume algebrice ale unor puteri elementare armonice.

$$\begin{aligned} &\left( \sum_k U_k^2 \right) \left( \sum_k I_k^2 \cos^2 \varphi_k + \sum_k I_k^2 \sin^2 \varphi_k \right) \equiv \left( \sum_k U_k I_k \cos \varphi_k \right)^2 + \\ &\left( \sum_k U_k I_k \sin \varphi_k \right)^2 + \sum_{j < k} (U_k I_j \cos \varphi_j - U_j I_k \cos \varphi_k)^2 + \\ &+ \sum_{j < k} (U_k I_j \sin \varphi_j - U_j I_k \sin \varphi_k)^2 \end{aligned}$$

Puterile elementare deformante, activă

$$D_{akj} = U_k I_j \cos \varphi_j - U_j I_k \cos \varphi_k$$

și reactivă

$$D_{rkj} = U_k I_j \sin \varphi_j - U_j I_k \sin \varphi_k$$

se deosebesc de cele clasice (propușe de C. Budeanu) fiind independente de fazele inițiale ale armonicilor tensiunii și curentului reprezentând soluții unice dependente numai de defazajele armonicilor de tensiune și curent.[7,8,9]

Puterea deformantă totală are însă o expresie identică cu cea clasică

$$D = \sqrt{D_a^2 + D_r^2} = \sqrt{\sum_{j < k} U_k^2 I_j^2 + \sum_{j < k} U_j^2 I_k^2 - 2 \sum_{j < k} U_k U_j I_k I_j \cos(\varphi_k - \varphi_j)} \quad (9)$$

Alte expresii se obțin cu următoarea identitate Lagrange

$$D^2 = \left( \sum_k U_k^2 \right) \left( \sum_k I_{adk}^2 + \sum_k I_{rdk}^2 \right) = \left( \sum_k U_k I_{adk} \right)^2 + \left( \sum_k U_k I_{rdk} \right)^2 + \sum_{j < k} \left( U_k I_{adj} - U_j I_{adk} \right)^2 + \sum_{j < k} \left( U_k I_{rdj} - U_j I_{rdk} \right)^2 \equiv D_a^2 + D_r^2 \quad (10)$$

Deoarece

$$\sum_k U_k I_{adk} = \sum_k [U_k (I_k \cos \varphi_k - GU_k)] = \sum_k (P_k - P_k) = 0$$

$$\sum_k U_k I_{rdk} = \sum_k [U_k (I_k \sin \varphi_k - BU_k)] = \sum_k (Q_k - Q_k) = 0$$

rezultă și alte expresii formal diferite de cele anterioare

$$D_a^2 = \sum_{j < k} \left( U_k I_{adj} - U_j I_{adk} \right)^2 = \sum_{j < k} D_{akj}^2$$

$$D_r^2 = \sum_{j < k} \left( U_k I_{rdj} - U_j I_{rdk} \right)^2 = \sum_{j < k} D_{rkj}^2 \quad (11)$$

## 7. CONCLUZII

Stabilirea unor indici de calitate care să caracterizeze sistemul energetic de la bordul navelor duce la o exploatare sigură a agregatelor și la sporirea siguranței de navigație și reducerea costurilor de exploatare.

Pentru a face o analiză a factorilor de calitate ai sistemelor electroenergetice este importantă cunoașterea expresiilor acelor parametri ai coeficienților care dăunează sistemului energetic, ducând la pierderi de putere. Din analiza modului de definire și de calcul al puterii reactive și al puterii deformante în sistemele monofazate cât și al puterii de neechilibru din cele trifazate nesimetrice și nesinusoidale, rezultă următoarele concluzii:

– definirea unor puteri inactive trebuie subordonată compensării componentelor de curenți corespunzători (reactivi, deformanți, reziduali). Compensarea componentelor de curenți inactivi se face în scopul îmbunătățirii parametrilor de performanță a funcționării sistemelor electroenergetice. Această compensare trebuie realizată fără a neglija aspectele fizice ale fenomenelor.

De aceea separarea ortogonală a puterilor trebuie asociată separării ortogonale a curenților.

Relația de ortogonalitate a componentelor puterii aparente,

$$S^2 = P^2 + Q^2 \div (UI)^2 = (UI \cos \varphi)^2 + (UI \sin \varphi)^2$$

rezultă nu numai formal din expresiile matematice ci și fizic pe baza valorilor efective ale componentelor oscilante de putere instantanee.

– pentru studiul diverselor aspecte ale fenomenelor reactive și deformante, este utilă atât analiza în domeniul timp (a undelor de tensiune și curent ca funcții de timp) cât și analiza în domeniul frecvenței (aspectelor dependente de frecvență).

“Puterea reactivă compensabilă”, obținută printr-o analiză sistemică, constituie și generalizarea diverselor expresii de puteri reactive corespunzătoare unor spectre particulare dependente de frecvență, ale reactanțelor sau susceptanțelor ca funcții de sistem, încadrându-se într-o teorie sistemică a circuitelor dipolare.

– am obținut o expresie a puterii deformante care nu depinde de fazele inițiale ale funcțiilor armonice ci numai de defazajele lor.

– termenul “regim deformant” trebuie completat cu precizarea mărimii la care se referă, „regim deformant de curent”, „regim deformant de tensiune” sau „regim deformant de putere” (termeni nesinonimi).

– utilizarea formală a vectorilor reprezentativi spațiali conduce la expresii eronate ale puterii reactive din sistemele trifazate nesimetrice. Am obținut două expresii corecte pentru puterea activă care este partea reală a puterii complexe și două expresii diferite

$$Q = \text{Im} 3 \left( \underline{U}_1 \underline{I}_1^* + \underline{U}_2 \underline{I}_2 \right) = Q_1 - Q_2 \quad \text{și}$$

$$Q = \text{Im} 3 \left( \underline{U}_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_2 \underline{I}_2^* \right) = -Q_1 + Q_2 \quad \text{pentru}$$

puterea reactivă care este partea imaginară a puterii complexe pentru aceeași putere activă.

Folosirea fazorilor rotitori (Fresnel) conduce la o soluție unică pentru puterea activă și reactivă (corectă).

– pentru cazurile practice când unda de tensiune are un factor de distorsiune relativ mic se impune separarea componentelor armonice de curent de componenta fundamentală. Compensarea reactivă se efectuează atunci numai pentru fundamentala componentei reactive a curentului, rămânând ca pentru reziduul deformant al curentului să se efectueze compensarea cu filtre de absorbție (filtre rezonante sau filtre active).

– expresia corectă a puterii complexe trifazate pentru sistemul dezechilibrat, unică și completă este redată de  $p = \frac{3}{2} \text{Re}[\underline{u}_1 \underline{i}^- + \underline{u}_2 \underline{i}^+] = \text{Re} \underline{s}$ , care

oferă o soluție corectă pentru puterea complexă  $\underline{s}$  și deci pentru părțile reale (puteri active) ale acesteia precum și pentru părțile imaginare (puteri reactive)

$$q = \frac{3}{2} \operatorname{Im}[\underline{u}_1 \underline{i}^- + \underline{u}_2 \underline{i}^+] = \operatorname{Im} \underline{s}.$$

– puterea “de neechilibru N” denumită și “putere de nesimetrie” nu trebuie confundată, așa cum se face uneori, cu puterea oscilantă (fluctuantă),  $S_{osc}$ , de care diferă prin semnul componentei de neortogonalitate.

– numai analiza mărimilor (curenți, tensiuni, puteri) caracteristice fazelor sistemului trifazat prezintă importanță deosebită teoretică și practică pentru realizarea echilibrării sistemelor dezechilibrate precum și pentru analiza curenților și puterilor ce încarcă fazele sistemului.

Analiza puterilor întregului sistem trifazat oferă indicații sumare, datorate compensării între fazele sistemului a unor puteri active și reactive ale fazelor.

### BIBLIOGRAFIE

- [1] V Dobref, V, Popov P and Deliu F, *Total Harmonic Distortion Factor Evaluation in Shipboard Electrical Networks*, Scientific Bulletin of Naval Academy, Vol. XXI 2018, pg. 61-67
- [2] Manea, F., „*La compensation et la définition des puissances réactives compensables des circuits en régimes périodiques 98 nonsinusoidaux*”, Rev. Roum. Sci. Techn. Energ., 31.4, pag. 379-385, București, 1986
- [3] J. Prousalidis, E. Styvaktakis, I.K. Hatzilau, F. Kanellos, S. Perros, E. Sofras, -*Electric Power Supply Quality in ship systems: an overview*, Int. J. Ocean Systems Management, Vol. 1, No. 1, 2008
- [4] A N R E - Standard de performanță pentru serviciul de distribuție a energiei electrice- 2007
- [5] Manea, F., Samoilescu, G., Dragomir, E., - „*Aspecte vechi și noi ale puterilor sistemelor periodice nesimetrice și nesinusoidale*”, Sesiunea 100 jubiliară de comunicări științifice Academia Navală „Mircea Cel Bătrân”, Constanța, 14-16 noiembrie, 2002
- [6] Manea, F., „*The instantaneous power of three-phase nonsymmetric systems*”, Rev. Roum. Sci. Techn. Energ., 47.2, pag. 135-140, București, 2002 [28]
- [7] Manea, F., „*The measurable reactive instantaneous power of three-phase non-symmetric sinusoidal system*”, Rev. Roum. Sci. Techn. Energ., 50.1, pag. 11-18, București, 2005
- [8] Iliovici, A., „*Définition et mesure de la puissance et de l'énergie réactives*”, Bull. Soc. Frac. des Electriciens 11.1925
- [9] Akagi, H., Nabae, A., „*The p-q theory in three phase systems under non-sinusoidal conditions*”, Ener. Trans. on El. Power (ETEP) Energ. 3.1, 1993
- [10] Budeanu, C. „*Puissance's reactives et fictives*”, IRE, București, 1927
- [11] Budeanu, C., „*L'etude des phenomena's reactive et deformanets*”, Buletinul Universității Politehnice din Buc. Vol. XIV 1948, Nr. 1, pag. 79-88 [18]
- [12] Budeanu, C., „*Sur les manifestations déformantes des machines et des appareils électriques*”. Revue d'El. Et d'En., Tom I, 1956, No 2, pag. 37-48
- [11] STANAG 1008 (Ediția 8) *Characteristics of Shipboard Electrical Power System in Warship of the North Atlantic Treaty Navies.*

### Despre autori

Ș.l. dr. ing. **Eduard DRAGOMIR**

Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța

Este absolvent al Academiei Navale „Mircea cel Bătrân”, Constanța în 1996 și 2002. În perioada 1996-2010 a deținut diverse funcții de ofițer electromecanic la bordul celei mai mari nave militare construită în săntierele navale românești, Fregata “Mărășești”. În perioada 2010-2019 a deținut diverse funcții de conducere în Forțele Navale fiind și cadru didactic asociat al Academiei Navale „Mircea cel Bătrân” și al Școlii de Maiștri Militari de Marină “Amiral I. Murgescu.”. Din anul 2019 este cadru didactic la această instituție iar din anul 2010 este membru AGIR.

Ș.l. dr. ing. **Leon PANĂ**

Academia Navală „Mircea cel Bătrân”, Constanța

Este absolvent al Universității din Petroșani, specializarea Electromecanică în anul 1996 și specializarea Matematică în anul 2002. Este doctor în Inginerie electrică la Universitatea din Petroșani. Diploma de masters a obținut-o în specializarea Matematică didactică. În perioada 1998-2019 a ocupat funcțiile de preparator, asistent și șef lucrări în cadrul Universității din Petroșani, Departamentul de Automatică, Calculatoare, Inginerie Electrică și Energetică. În prezent este șef lucrări la Departamentul de Inginerie Electrică și Electronică Navală, Academia Navală „Mircea cel Bătrân”. Este autor și coautor a două cărți de specialitate, cinci lucrări în reviste ISI și 8 lucrări în conferințe ISI.