

STUDIU CALITATIV PRIVIND IMPACTUL PARAMETRILOR DE CALITATE A ENERGIEI ELECTRICE ASUPRA FUNCȚIONĂRII MOTOARELOR ASINCRONE

Ana-Maria Marilena DUMITRU, Emil CAZACU, Lucian PETRESCU
Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea POLITEHNICA din București
marilena.dumitru96@stud.electro.upb.ro, emil.cazacu@upb.ro, lucian.petrescu@upb.ro

Rezumat. Una dintre cele mai comune cerințe în aplicațiile industriale moderne este reducerea la minimum a costurilor asociate cu exploatarea întreținerea și eventualele reparații ale sistemelor componente. În procesele industriale, motoarele cu inducție sunt cele mai des folosite convertitoare electromecanice din cadrul sistemelor de acționare electrică. Dezvoltarea extensivă a electronicii de putere, precum și costul relativ redus de fabricație al motoarelor asincrone a determinat o incidentă foarte ridicată a prezenței sistemelor de acționare cu motoare de inducție în cadrul sistemelor industriale. Utilizarea dispozitivelor semiconductoare pentru controlul parametrilor de acționare a motoarelor de inducție facilitează reglarea sistemului și, astfel, îmbunătățește foarte mult flexibilitatea acestuia. Cu toate acestea, utilizarea optimă a unor astfel de motoare electrice este limitată din cauza posibilității apariției unor defecte specifice, cauzate de calitatea energiei electrice de alimentare. În acest context, prezenta lucrare propune o analiză asupra defectelor ce apar frecvent în cazul motoarelor cu inducție din sistemele industriale de acționare electrică ca urmare a abaterilor de la calitatea energiei electrice a parametrilor sistemului de alimentare al acestora. Sunt preponderent investigate două abateri de la calitatea energiei și anume, dezechilibrul valorii tensiunilor aplicate pe fazele motorului, respectiv distorsiunile armonice ale formelor de undă a tensiunilor aplicate motorului. În același timp, se face o analiză a ratei defectelor în funcție de diverse caracteristici ale motoarelor de inducție.

1. INTRODUCERE

Motoarele asincrone sunt utilizate pe scară largă într-o paletă vastă de aplicații asigurând continuitatea operațională a proceselor industriale [1]. În majoritatea covârșitoare a acestor aplicații, motoarele sunt capabile să convertească energia electrică în energie mecanică prin dispozitive de acționare, pompe, compresoare și/sau alte subsisteme cu viteze variabile [2]. Motoarele cu inducție funcționează sub diferite solicitări, de diverse naturi care îi pot afecta durata de viață, implicând inițial apariția unor defecte. Cele mai frecvente se pot manifesta prin: defecte ale rulmentului, excentricitatea rotorului, oscilația cuplului de sarcină, scurtcircuit, bare rupte de rotor, etc. Detectarea acestor defecte în stadiu incipient poate reduce costurile de întreținere și poate evita scoaterea din funcțiune prematură a motorului [3].

Unul dintre factorii care confirmă reducerea eficienței unui motor cu inducție trifazat este prezența perturbărilor calității energiei electrice, în special a celor legate de tensiunea de alimentare, preponderent dezechilibrul de tensiune și distorsiunea armonică a formei sale de undă [5]. Dezechilibrul de tensiune la frecvență fundamentală și distorsiunile armonice sunt prezente în mod normal în tensiunea de alimentare la un nivel foarte redus, care nu afectează funcționarea motoarelor. Aceste perturbații sunt, de regulă, simultane și acționează în timp asupra parametrilor de funcționare ai motorului [4]. Motorul de inducție poate fi alimentat cu tensiuni dezechilibrate din diverse motive: conexiuni de rezistență (impedanță) ridicată, prezența unor sarcini monofazate sau transformatoarele de alimentare au o fază „căzută” (fără tensiune). În general, acest dezechilibrul de tensiune conduce la următoarele efecte: creșterea pierderilor motorului (în principal pierderea de cupru), reducerea cuplului de pornire, reducerea

cuplului nominal și scăderea valorii randamentului de regim al motorului asociată cu creșterea temperaturii înfășurărilor, zgomot adițional și vibrația arborelui [3]. În plus, această problemă este agravată de faptul că prezența unui mic dezechilibru în tensiunile de linie va provoca un dezechilibru în curenții de linie care poate fi, de multe ori, semnificativ mai mare [6]. Abaterea de la forma de undă sinusoidală a tensiunii aplicate motorului generează o serie de efecte negative care se manifestă prin [2–7]: creșterea temperaturii înfășurărilor și a miezului magnetic, cauzate de pierderile suplimentare în materialul conductor (pierderi în Cu) și în materialele magnetice (pierderi în Fe), modificări ale cuplului mașinii electrice, care conduc la reducerea randamentului acesteia, modificări importante ale valorii inducției magnetice în întrefierul mașinii, Apariția de oscilații ale cuplului motorului la arbore, care generează solicitări mecanice adiționale celor nominale mașinii, interacțiuni între fluxul magnetic determinat de armonică fundamentală și cel determinat de armonicile superioare.

Lucrarea își propune să analizeze calitativ, dar și cu incursiuni cantitative, efectele acestor două frecvențe perturbatorii de calitate a energiei electrice asupra sistemelor de acționare cu motoare de inducție alimentate în joasă tensiune.

2. ABATERI DE LA CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE

2.1 Dezechilibru de tensiune

Pentru definirea unor indicatori cantitativi prin care să se evalueze nesimetria mărimilor trifazate (tensiuni sau/și curenți), sunt folosite la momentul actual două standarde diferite: *standardul european* [46] și *standardul nord american* [46]. Valorile indicatorilor de nesimetrie definiți în raport cu aceste standarde și prezentați în cele ce urmează, diferă semnificativ unul față de altul. Din acest motiv, se impune cunoașterea exactă a standardului folosit în aprecierea parametrilor de nesimetrie, atât în calcule cât și în algoritmi implementați de aparatele de măsură (analizoare de calitate a energiei).

Standardul European analizează nesimetria unui sistem trifazat sinusoidal în baza teoremei Fortescue [16, 17]. Aceasta permite descompunerea unui sistem trifazat sinusoidal nesimetric $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ în trei sisteme monofazate independente $\underline{U}^+, \underline{U}$ și \underline{U}^0 de secvență pozitivă, negativă și respectiv zero, luând astfel în considerație, atât nesimetria de modul, cât și nesimetria de fază:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}^0 \\ \underline{U}^+ \\ \underline{U}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix}, \text{ unde: } a = \exp\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (1)$$

Valorile astfel determinate ale mărimilor de secvență pozitivă, negativă și zero permit calculul factorilor de nesimetrie:

$$\begin{aligned} \hookrightarrow \text{Factorul de nesimetrie negativă:} & \quad k_s^- = \frac{|\underline{U}^-|}{|\underline{U}^+|} \\ \hookrightarrow \text{Factorul de nesimetrie zero:} & \quad k_s^0 = \frac{|\underline{U}^0|}{|\underline{U}^+|} \end{aligned} \quad (2)$$

Observații:

1) Factorul de nesimetrie negativă k_s^- (unbalance factor) este indicatorul major în

aprecierea nivelului de asimetrie. În acest sens, normativele europene stabilesc limite maxime ale acestui parametru pentru care sistemul se consideră simetric [8–11]: pentru tensiune o valoare de maxim 2 %, iar pentru curent 20-30 %.

2) Factorul de nesimetrie zero k_s^0 apare în sistemele cu conductor neutru unde valoarea secvenței homopolare (zero) este nenulă. În sistemele fără conductor neutru valoarea acestui factor este nulă.

3) Problema principală a definiției indicatorilor de nesimetrie din standardul european este faptul că utilizarea descompunerii Fortescue reclamă variația sinusoidală a formelor de undă. Cum în instalațiile electrice actuale marea majoritate a mărimilor sunt deformate, pentru a utiliza factorii anteriori, s-a stabilit că *evaluarea nesimetriei poate fi asociată numai mărimilor fundamentale* (de primă armonică). Acest lucru presupune inițial o descompunere Fourier a mărimilor înainte de a aplica teorema lui Fortescue [16, 32]. Prin extensie, au fost asociate componente pozitive, negative și zero și celorlalte armonici care rezultă din descompunerea mărimilor nesinusoidale.

Standardul Nord American nu impune pentru evaluarea nesimetriei ca mărimile să fie sinusoidale și ia în considerație exclusiv nesimetria de modul (valoare efectivă), pe baza relației [8–11]:

$$k_n = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{\text{med}}} \cdot 100 \% = \frac{U_{\max(1,2,3)} - U_{\text{med}}}{U_{\text{med}}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

$$\text{unde: } U_{\text{med}} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}, \text{ iar } U_{\max(1,2,3)} = \max(U_A, U_B, U_C),$$

în care U_A, U_B, U_C reprezintă amplitudinile celor trei tensiuni de fază ale sistemului investigat.

Pentru evaluarea nesimetriei este utilizat și implementat în unele analizoare de calitate a energiei electrice și *factorul de nesimetrie a mărimilor între faze* k_s^f , definit în funcție de valorile maxime ale tensiunilor de linie (între faze) U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} [14, 16]:

$$k_s^f = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}} \text{ cu } \beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2} \quad (4)$$

De regulă, dezechilibrul este provocat de dispariția unei faze (defect de asimetrie) sau de prezența unor sarcini monofazate puternice în imediata apropiere a motorului sau chiar la sursă.

Atunci când dezechilibrul de tensiune este mai mare de un procent (1 %), reducerea puterii motorului (declasarea puterii sale) va ajuta la atenuarea efectelor tensiunii dezechilibrate. Dacă dezechilibrul de tensiune depășește cinci procente (5 %), este recomandat ca motorul să nu fie utilizat deloc chiar și atunci când puterea motorului a fost redusă față de cea nominală. Când un dezechilibru de tensiune depășește trei procente (3 %), cauza principală a dezechilibrării trebuie identificată și remediată [8]. În Tabelul 1, este evidențiat impactul nivelului de dezechilibru al tensiunii asupra caracteristicilor de funcționare ale unui motor.

Tabelul 1

Impactul nivelului de dezechilibru al tensiunii asupra caracteristicilor de funcționare ale unui motor cu inducție [9]

Nivelul dezechilibrului [%]	0	2	3,5	5
Curentul absorbit	I_n	$1,01 \cdot I_n$	$1,04 \cdot I_n$	$1,075 \cdot I_n$
Creșterea procentuală a pierderilor [%]	0	4	12,5	25
Solicitare termică estimată [%]	100	105	114	128

Efectul tensiunilor dezechilibrate asupra motoarelor cu inducție este echivalent cu

introducerea unei „tensiuni de secvență negativă” cu o rotație opusă celei care se produce la tensiuni echilibrate. Aceste tensiuni cu secvență negativă produc un câmp magnetic în întrefier care se rotește împotriva rotației rotorului, având tendința de a produce curenți mari. Fiecare set de tensiuni de secvență pozitivă și negativă produc curenți echilibrați corespunzători în motoarele cu inducție, iar suprapunerea celor două seturi de vectori de curent reprezintă curenții efectivi produși în cele trei faze satorice de tensiunile dezechilibrate originale. Comportarea mașinii la tensiunea de secvență pozitivă este în esență aceeași cu funcționarea normală echilibrată. Curenții de secvență negativă, totuși, stabilesc un câmp invers, astfel încât, dacă alunecarea rotorului este s în raport cu câmpul de secvență pozitivă, va fi $2-s$ în raport cu câmpul de secvență negativă [10].

Circuitele echivalente ale motoarelor cu inducție pentru fiecare secvență sunt prezentate de mulți autori, (de exemplu, [11]). Motorul se comportă ca adăugarea a două motoare separate, unul care funcționează la alunecare s cu tensiunea la borne egală cu tensiunea secvenței pozitive și celălalt funcționând cu o alunecare de $2-s$ și o tensiune la borne egală cu tensiunea secvenței negative. Cu acest model este ușor de observat că fluxul de secvență negativă rulează la o viteză care este aproximativ de două ori mai mare decât viteza de sincronism față de rotor, atunci pierderile în miezul rotorului cresc semnificativ [10]. Standardul IEC 60034-26 [9] pune la dispoziție o regulă de declasare a puterii motorului în funcție de dezechilibrul tensiunilor – Fig. 1. Aceasta poate să fie utilizată atunci când acest fenomen este cunoscut sau previzibil pentru rețeaua din care se alimentează motorul. Coeficientul de denotare permite fie supradimensionarea motorului pentru a rezista efectelor dezechilibrului, fie reducerea puterii sale în instalațiile ce manifestă un dezechilibru de tensiune. Nesimetria tensiunilor trifazate poate fi determinată și de defazaje diferite de $2\pi/3$ între tensiunile de fază. Acest lucru poate avea ca efect perturbarea funcționării convertoarelor statice de putere (a dispozitivelor electronice de putere comandate). În cazul în care tensiunile sunt dezechilibrate, puterea nominală a motorului trebuie înmulțită cu factorul prezentat în Fig. 2 pentru a reduce posibilitatea deteriorării motorului. Dacă dezechilibrul este de 1 % nu există nicio problemă, dacă dezechilibrul este de 2 % factorul de declasare va fi 0,96, dar dacă dezechilibrul este de 5 % coeficientul de declasare va fi 0,76. Apoi, funcționarea motorului peste o condiție de dezechilibru de tensiune de 5 % nu este recomandată [10].

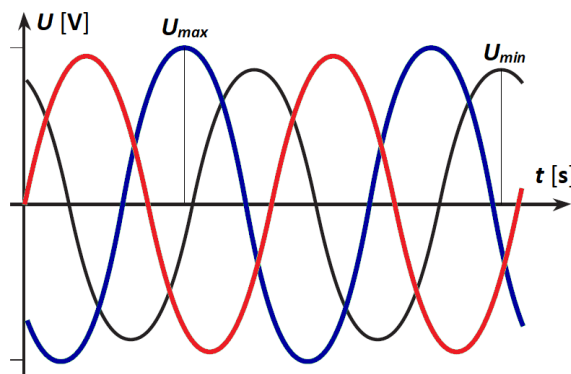


Fig. 1 – Formele de undă ale tensiunilor pentru un sistem trifazat dezechilibrat [9].

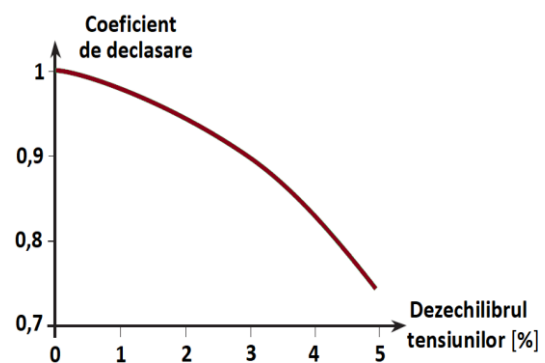


Fig. 2 – Coeficientul de declasare a puterii nominale a unui motor în funcție de dezechilibrul de tensiune [9].

2.2 Distorsiunea armonică

Distorsiunile armonice de tensiune sunt fenomene asociate cu un regim nesinusoidal pentru formele de undă ale tensiunilor și curenților de alimentare a motorului de inducție. În acest studiu, cuantificarea distorsiunii armonice folosind indicatorul $THD\%$ (distorsiunea armonică totală a tensiunii) în conformitate cu [5]:

$$THD = \frac{1}{V_1} \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

în care: V_h este tensiunea armonică de ordinul h , V_1 reprezintă tensiunea fundamentală măsurată, iar h_{max} este ordinul armonicii maxime.

Deși distorsionată, alimentarea cu tensiune este periodică și, prin urmare, poate fi descompusă într-o succesiune infinită de unde sinusoidale prin aplicarea seriei Fourier. Având în vedere $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, se pot observa următoarele caracteristici ale semnalelor distorsionate [5]:

- armonicile de ordin $h = 3k + 1$ sunt secvențe pozitive;
- armonicile de ordin $h = 3k + 2$ sunt secvențe negative;
- armonicile de ordin $h = 3k + 3$, numite și armonici triple, sunt secvențe 0.

Secvența contează, în principal, atunci când vorbim despre motoare AC, deoarece rotația mecanică a rotorului depinde de cuplul produs de „rotația” secvențială a puterii trifazate aplicate. Armonicile de secvență pozitivă funcționează pentru a acționa rotorul în direcția corectă, în timp ce armonicile superioare de secvență negativă funcționează de fapt împotriva direcției de rotație a rotorului. Armonicile cu secvență zero nu contribuie nici la a nu diminuea cuplul rotorului. Un exces de armonici cu secvență negativă (a 5-a, a 11-a, a 17-a și/sau a 23-a) în puterea furnizată unui motor trifazat de inducție de curent alternativ va avea ca rezultat degradarea performanței acestuia și creșterea probabilității apariției unui defect datorita supraîncălzirii componentelor sale active [5].

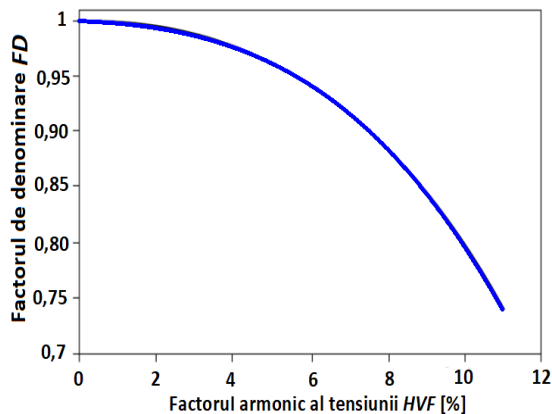


Fig. 3 – Coeficientul de declasare a puterii nominale a unui motor în funcție de factorul armonic al tensiunii HVF [9].

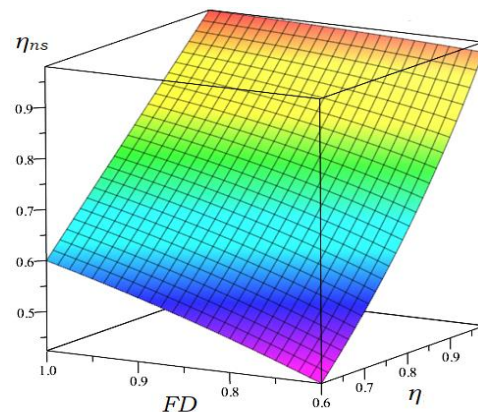


Fig. 4 – Randamentul motorului în regim deformant în funcție de cel în regim sinusoidal și coeficientul de declasare [9].

Pentru a putea conserva caracteristicile motorului alimentat cu tensiuni nesinusoidale, standardul IEC TS 60034-25 [9] impune denominarea puterii acestuia Fig. 3. Factorul de declasare FD este indicat în funcție de un parametru specific de calitate a energiei (a tensiunii): factor armonic al tensiunii HVF (Harmonic Voltage Factor):

$$HVF = \sqrt{\sum_{h=5}^{h_{max}} \frac{V_h^2}{V_1^2}} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

în care V_1 reprezintă valoarea efectivă a armonicii fundamentale, iar V_h sunt valorile efective ale armonicilor pare ale tensiunii care nu sunt divizibile cu 3.

De regulă, o declasare a puterii motorului cu $5 \div 10 \%$ poate fi impusă în cazuri foarte

defavorabile. Pentru o tensiune distorsionată cunoscută (în care parametrul HVF poate fi determinat), randamentul motorului η_{ns} poate fi exprimat funcție de randamentul său în regim sinusoidal η și factorul de denominare FD – Fig. 4 [9]:

$$\eta_{ns} = \frac{\eta \cdot FD^2}{1 + \eta \cdot (FD^2 - 1)} \cdot 100 \% \quad (7)$$

1. Efectul simultan al dezechilibrului tensiunii și al distorsiunii sale armonice

După cum s-a menționat și anterior, unul dintre factorii care confirmă reducerea eficienței unui motor cu inducție trifazat (TIM) este prezența perturbărilor calității energiei electrice (EPQ) în tensiune de alimentare, cum ar fi dezechilibrul de tensiune și distorsiunea armonică. Diferite studii evaluează efectele acestora fenomene aplicate individual la TIM. Cu toate acestea, măsurătorile reale arată că prezența concomitentă a acestor fenomene este comună în sistemul electric [5]. Prin urmare, mai jos se va prezenta o analiză prin care se investighează comportamentul cuplului și eficiența TIM atunci când este alimentat simultan cu tensiuni dezechilibrate și distorsiuni armonice.

Inițial, se urmărește identificarea efectelor asupra cuplului și eficienței TIM prin utilizarea separată a tensiunilor dezechilibrate și a distorsiunii armonice. Ulterior, rezultatele obținute se vor adăuga la cele care realizează analiza acestor două fenomene concomitent. Acestea fac obiectul impactului calității energiei asupra motoarelor trifazate cu inducție.

Procedura adoptată pentru implementarea acestei cercetări constă în aplicarea pe TIM a unor condiții variabile de tensiune cu prezența dezechilibrului și a distorsiunilor armonice. Este de remarcat faptul că în investigațiile privind efectele perturbărilor asupra echipamentelor sistemului electric, alegerea condițiilor care trebuie aplicate este caracterizată ca fiind una dintre cele mai importante etape. Așadar, în acest studiu, condițiile folosite sunt împărțite în patru baze de date, grupate în funcție de fenomenul dominant studiat.

Baza de date cu numărul 1 este formată din module și unghiuri ale tensiunilor de linie dezechilibrate, când nu există distorsiuni armonice prezente. Seturile de valori ale bazelor de date 2 și 3 sunt formate din tensiuni echilibrate la frecvența fundamentală și cu variații armonice de ordinele 2, 4, 5 și 7. De fapt, baza de date 2 constă în valori echilibrate ale tensiunii la frecvența fundamentală și cu distorsiuni armonice într-o singură ordine, în timp ce baza de date 3 prezintă și valori fundamentale echilibrate, dar cu două ordine distincte de distorsiune.

Cu aceste baze de date, procedurile de laborator sunt realizate pentru a obține comportamentul motorului atunci când este supus unor condiții de dezechilibru de tensiune și armonici aplicate separat. Pentru analiza comportării TIM-ului supus simultan condițiilor de dezechilibru de tensiune și distorsiune armonică, se folosește baza de date 4 care constă în combinațiile valorilor prezente în bazele de date 1, 2 și 3. În această etapă, se urmărește identificarea și, în consecință, alegerea condițiilor cu semnale de dezechilibru și armonici care prezintă cele mai mici valori ale cuplului și randamentului [5].

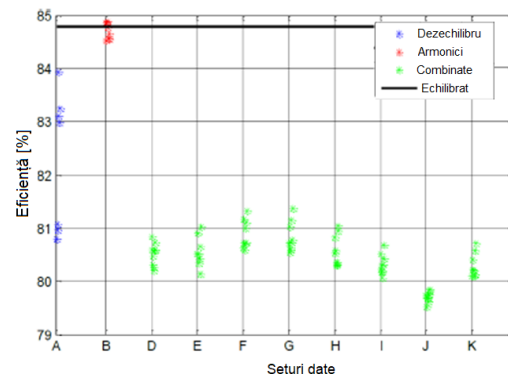
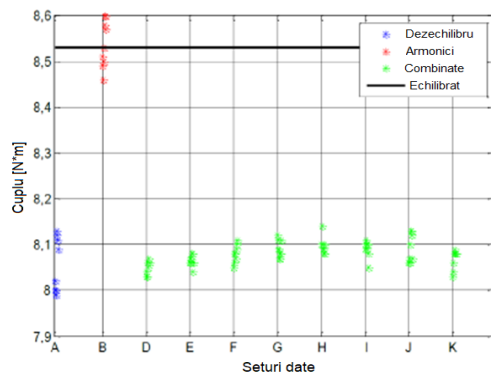


Fig. 5 – Cuplul și eficiența motorului de inducție în prezența dezechilibrului și a regimului nesinusoidal cu o singură armonică superioară [5].

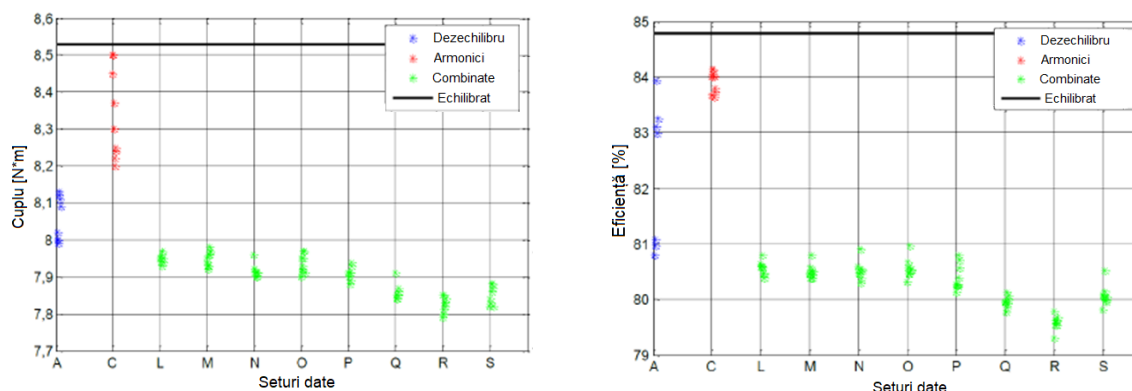


Fig. 6 – Cuplul și eficiența motorului de inducție în prezența dezechilibrului și a regimului nesinusoidal cu o două armonici superioare [5].

În Fig. 5 din partea stângă sunt reprezentate datele cuplului TIM supus unor seturi de valori ale tensiunii cu prezența dezechilibrului, al unui ordin armonic și a combinațiilor ambelor fenomene. Cuplul este afectat semnificativ de dezechilibrul de tensiune, iar inserarea distorsiunii armonice de un singur ordin nu are ca rezultat o modificare semnificativă a valorii acestui parametru. Imaginea din dreapta Fig. 5 arată datele de eficiență ale TIM supus unor seturi de valori ale tensiunii cu prezența dezechilibrului, armonică de un ordin și combinațiile ambelor fenomene. De aici se observă că adăugarea de armonici la o condiție dezechilibrată culminează cu reducerea valorii eficienței în diferite cazuri.

În Fig.6 , prima imagine este reprezentată de datele cuplului TIM-ului supus unor seturi de valori ale tensiunii în prezența dezechilibrului, două ordine armonice, și combinațiile ambelor fenomene. În acest caz se observă că dezechilibrul este mai dăunător cuplului decât distorsiunea armonică. Aceasta permite concluzia că introducerea dezechilibrului conduce la scădere de cuplu mai mare față de armonicile multiplu de doi. Și nu în ultimul rând, în partea din dreapta a Fig. 6 sunt ilustrate datele de eficiență ale TIM-ului supus unor seturi de valori ale tensiunii în prezența dezechilibrului, a armonicilor superioare, și combinațiile ambelor fenomene. Se observă că, în același mod constatat pentru cuplu, atunci când se evaluează doar prezența unei perturbări, dezechilibrul pare a fi mai dăunător eficienței motorului. Pe lângă asta, aplicarea în comun a fenomenelor este situația în care se constată o reducere mai mare a valorii eficienței.

Pe baza unor rezultate numerice obținute, în [5] s-a demonstrat că variațiile medii pentru cuplul și eficiența TIM atunci când este supus simultan condițiilor de tensiune de dezechilibr și distorsiunii armonice cu două ordine, au fost de până la 7,79 %, respectiv 5,37 %. În final, s-a constatat că efectele cauzate de prezența simultană a dezechilibrului și a distorsiunii armonice nu corespund cu suma efectelor cauzate individual.

3. EVALUAREA IMPACTULUI ASUPRA EFICIENȚEI ENERGETICE ÎN CAZUL MOTOARELOR CU INDUCȚIE

Motoarele cu inducție au o aplicație largă în industria petrochimică, un mediu în care este foarte important să se reducă numărul de defecte la un minim absolut. În cadrul activităților off-shore, de exemplu, motoarele sunt adesea pornite direct. Acest lucru duce la curenți mari de pornire și pulsații de cuplu; se presupune că aceste condiții contribuie la defecțiunile înfășurării rotorului și ale rulmenților [13].

Sunt disponibile mai multe metode pentru detectarea defecțiunilor. Principalele grupe sunt: *mecanice* (vibrații, impulsuri de șoc, acustice, fluctuații de viteză) și *electrice* (curenți,

întrefier cuplu, putere instantanee a statorului, câmp magnetic, supratensiuni). O detectare fiabilă a defecțiunii trebuie să se bazeze pe o combinație de metode, cum ar fi: monitorizarea performanței, a vibrațiilor, a pulsului de șoc, monitorizarea emisiilor acustice, monitorizarea fluctuațiilor vitezei, monitorizarea curentului, a cuplului, monitorizarea instantanee a puterii statorului, a câmpului magnetic, a temperaturii sau monitorizarea vizuală [13].

O defecțiune la o componentă este o condiție de capacitate redusă legată de cerințele minime specificate și este rezultatul uzurii normale, al specificațiilor sau al designului slab, al montajului (inclusiv aliniere slabă), utilizare greșită sau o combinație din acestea. Dacă o defecțiune nu este detectată sau dacă i se permite să se dezvolte în continuare, aceasta poate duce la avarie. În contextul actual, sunt înregistrate acele defecțiuni care au dus la un eșec sau la oprirea neplanificată a utilajului [13].

Tabelele de mai jos pun în evidență diferite caracteristici ale motorului și condiții de acționare în funcție de numărul de motoare, dimensiunea eșantionului, numărul de defecțiuni și rata de defecțiuni. Tabelul 2 arată relația dintre rata de defecțiuni și puterea motorului. Tabelul arată cea mai mare rată de eșec pentru cea mai mare putere. Cu toate acestea, numărul de astfel de motoare este scăzut, astfel încât concluzia este incertă. Tabelul 3 exprimă relația dintre rata de defecțiune și tensiune. Creșterea tensiunii indică o rată de eșec mai mare. Din Tabelul 4 care definește relația dintre rata de eșec și vârstă, se observă că motoarele de cea mai mică și cea mai mare vârstă au cea mai mare rată de defecțiuni. Și nu în ultimul rând, Tabelul 5 arată relația dintre rata de eșec și numărul mediu de ore de funcționare pe zi. Rezultatele raportate au fost elaborate în baza unei investigații asupra defecțiunilor motoarelor cu colivie din industriile petroliere, industria petrochimică, terminalele de gaze și rafinării.

Tabelul 2

Puterea motorului versus rata defectului [13].

Putere [kW]	100-500	501-5001	1001-2000	2001-4000	4001-6000	6001-8000	8001
Nr. motoare	228	126	47	36	30	11	5
Dimensiunea eșantionului	3208	1556	474	378	313	112	94
Nr. defectelor	164	33	15	11	9	11	7
Rata defectului [%]	5.11	2.12	3.16	2.91	2.88	9.82	7.45

Tabelul 3

Tensiunea versus rata defectului [13].

Tensiune [V]	3000-5000	6000	6600-10500	11000-13800
Nr. motoare	16	366	39	62
Dimensiunea eșantionului	444	4761	445	485
Nr. defectelor	5	211	13	21
Rata defectului [%]	1.13	4.43	2.92	4.33

Tabelul 4

Vârsta versus rata defectului [13].

Vârsta [ani]	0-5	5.1-10	10.1-15	15.1-20	20.1-25	25.1
Nr. motoare	40	224	124	7	33	55
Dimensiunea eșantionului	127	1919	1546	124	725	1694
Nr. defectelor	6	43	51	6	39	105
Rata defectului [%]	4.72	2.24	3.30	4.84	5.38	6.20

Tabelul 5

Numărul mediu de ore de funcționare pe zi versus rata defectului [13].			
Ore/zi	0-5	6-15	16-24
Nr. motoare	92	111	280
Dimensiunea eșantionului	1030	1357	3748
Nr. defectelor	26	65	159
Rata defectului [%]	2.52	4.79	4.24

De-a lungul anilor, interesul pentru implementarea acțiunilor de eficiență energetică a fost adoptat de multe țări. În ceea ce privește motoarele electrice, parametrul de referință este randamentul, clasificat pentru prima dată de IEC 60034-30-1 [14] în 2008. În prezent, patru clase de eficiență sunt definite de standard, adică IE1, IE2, IE3 și IE4 și este de așteptat ca următoarea ediție să definească clasa de eficiență IE5. Din această clasificare, producătorii au prezentat diferite propuneri către obținerea unor eficiențe tot mai mari în motoarele electrice [15]. Având în vedere eficiența tot mai mare la motoarele electrice, ca urmare a implementării noilor tehnologii, au fost prezentate studii care compară diferite clase de eficiență în [16–20], beneficiile economice și tehnice. Motoarele care nu au atins clasa de randament IE1 au fost clasificate ca IE0 și numite motoare nereglementate, care până în anul 2000 reprezentau 80 % din consumul global de energie electrică de către motoarele electrice. Odată cu implementarea politicilor și a reglementărilor care au promovat înlocuirea între tehnologii, precum și sfârșitul duratei de viață a acestora, acest procent a ajuns să fie 30 % din consumul de energie în 2017. În 2014 a fost definită clasa de eficiență IE4, cu care eficiențe mai mari de 96 % pot fi obținute prin sistemul de management integrat [15].

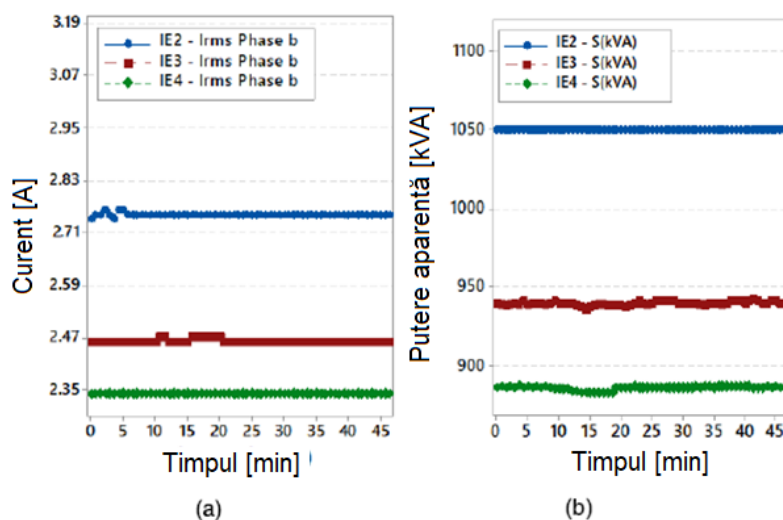


Fig. 7 – Comparație motoare de eficiență înaltă: a) valoarea efectivă a curentului -fază b-, b) puterea totală în motoarele din clasele IE2, IE3 și IE4 [15]

Din Fig. 7 se observă cum motoarele din clasa de eficiență IE4 prezintă scăderi de 14 % și 5 % în raport cu curentul total și de 17 % și 6 % în raport cu puterea totală comparativ cu motoare din clasa IE2 și, respectiv, IE3. Chiar dacă singura diferență constructivă între aceste tehnologii o reprezintă magneții permanenți din rotor, motorul cu magneți permanenți clasă IE4 prezintă cei mai mici curenți și și cel mai mic consum dintre cele trei tehnologii analizate. Magneții permanenți influențează atât în reducerea curentului total, prin reducerea curentului de magnetizare datorat câmpului magnetic al magneților și, în consecință, consumului total. În plus, funcționarea sincronă are ca rezultat pierderi mai mici ale rotorului și, prin urmare, temperaturi interne și externe mai scăzute.

Cu toate acestea, magnetii permanenți au ca rezultat o formă de undă de curent mai distorsionată, așa cum se arată în Fig. 8, în comparație cu SCIM – Squirrel Cage Induction Motor (IE2 și IE3). Armonicile de curent predominante găsite în LSPMM - Line-Start PM Motor (IE4) sunt cele de ordinul 3, 5, 7, 17 și 23, în timp ce pentru motoarele din clasa IE2 și IE3, conținutul armonici de curent prezintă procente mici de ordinul 3 și 7, rezultând o rată totală de distorsiune vizibil mai mică, așa cum este arătat în Fig. 9. Se observă cum LSPMM prezintă o distorsiune armonică totală a curentului mai mare în comparație cu motoarele din clasa IE2 și IE3 [15].

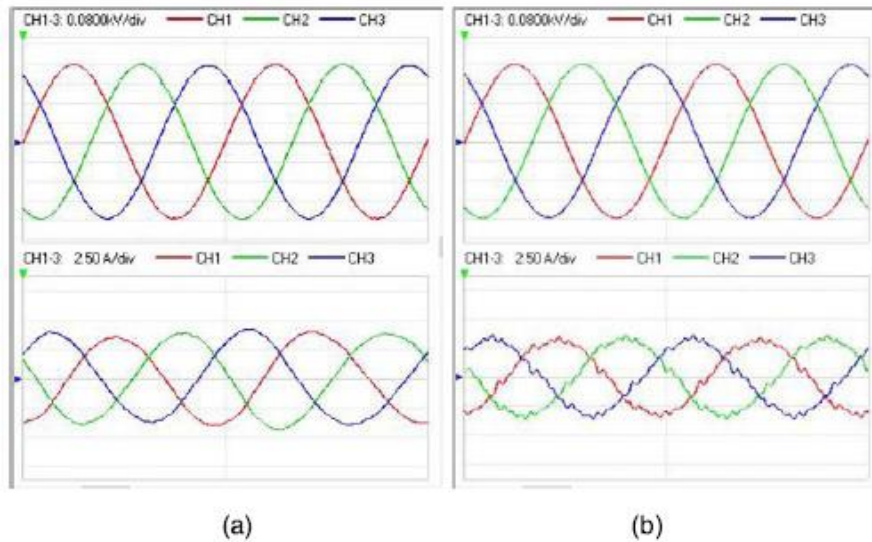


Fig. 8 – Formele de undă a tensiunii și curentului a fazelor A-B-C pentru (a) IE3-SCIM și (b) IE4-LSPMM [15]

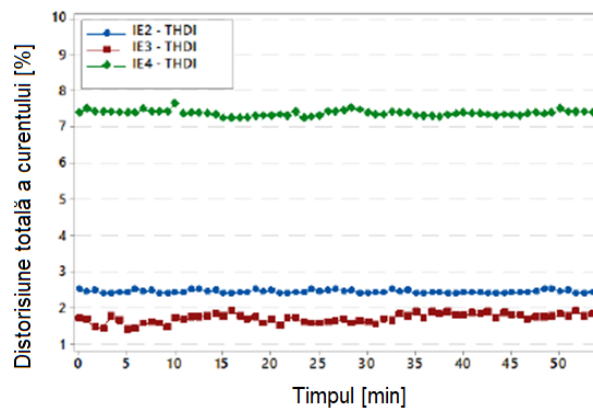
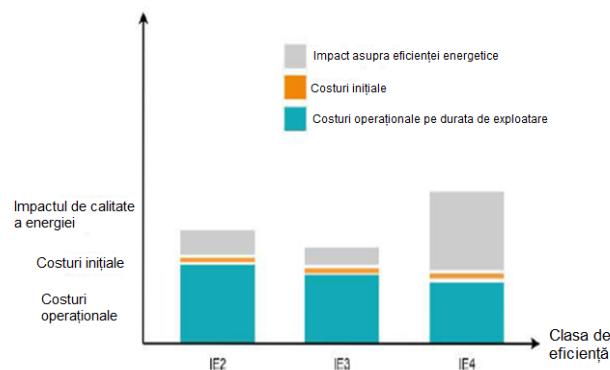


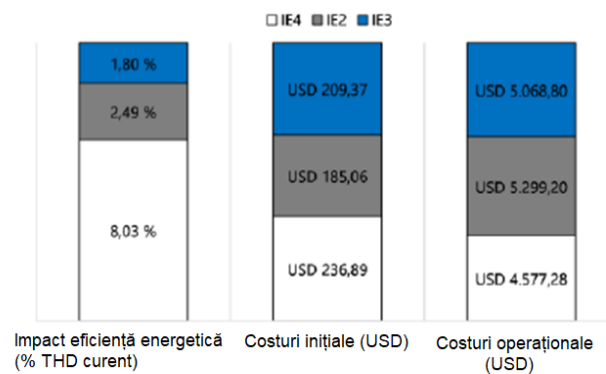
Fig. 9 – Distorsiunea armonică totală a curentului pentru clasele de motoare IE2, IE3 și IE4 [15]

Implementarea materialelor de înaltă calitate se traduce în costuri inițiale mai mari; costul inițial reprezintă totuși mai puțin de 5 % din costul de funcționare al motorului electric în timpul duratei sale de viață utilă. Pentru a analiza mai bine eficiența motoarelor electrice, s-au făcut estimări din măsurătorile înregistrate prezentate în Fig. 10, precum și costurile inițiale de achiziție și de exploatare pe toată durata de viață utilă a fiecărui motor, cu scopul de a le compara din punct de vedere economic, dar și al calității, așa cum sunt prezentate în Fig. 10 (a). Deci, economia prin achiziționarea motoarelor electrice cu diferite clase de randament trebuie respectată având în vedere reducerea în consum și durata de viață utilă estimată în funcție de puterea nominală a motorului – Fig. 10 (b) prezintă o comparație detaliată între costurile inițiale, costurile operaționale de-a lungul duratei sale de viață utilă și impactul asupra calității energiei pentru cele trei motoarele electrice IE2, IE3 și IE4, cu o putere de 0,75 kW, având în vedere consumul măsurat și prezentat în Fig. 10, cu 8.000 ore de funcționare și un cost al energiei

electrice de 0,08 USD/kWh [15].



(a)



(b)

Fig. 10 – Relația cost-beneficiu-impact pentru motoarele eficiente: (a) Tehnic (calitatea puterii) și comparație economică pentru motoare clasă IE2, IE3 și IE4 și (b) comparație cantitativă în termeni economici și tehnici.

Se poate observa cum, din punct de vedere economic, implementarea unor motoare electrice mai eficiente are ca rezultat economii mai mari pe termen lung, indiferent de costul lor inițial. Aceasta este, fără îndoială, principala motivație pentru a înlocui mai puțin motoare eficiente de către altele mai eficiente. Totuși, impactul acestora la scară largă, inclusiv aspecte legate de reglementarea calității energiei electrice, trebuie, de asemenea, analizate pentru a verifica dacă instalația industrială respectă legislația în vigoare cu privire la indicatorii de calitate a energiei, cum ar fi distorsiunile armonice totale ale curentului și tensiunii în punctul de cuplare comună cu rețeaua electrică [15].

4. CONCLUZII

Lucrarea a examinat calitativ și stocastic influența abaterii parametrilor de calitate a energiei electrice pentru tensiunea de alimentare a motoarelor electrice trifazate din sistemele de acționare electrică. Studiul a fost concentrat pe efectele nesimetriei sistemului de alimentare a motoarelor asincrone și pe distorsiunea armonică a acestor forme de undă pentru aceste tensiuni. Investigația a luat în considerare atât prezența separată a celor două tipuri de distorsiuni cât și de considerarea lor simultană în sistemul de alimentare.

Cele mai importante efecte ale *nesimetriei tensiunilor* de alimentare asupra motoarelor constau în încălzirile datorate pierderilor suplimentare. Acestea din urmă sunt cauzate de curenții de secvență negativă și zero care parcurg înfășurările motoarelor. De asemenea, nesimetria tensiunilor produce, în mașinile electrice, *cupluri pulsatorii de frecvență ridicată* și, în consecință, vibrații, care se accentuează în cazul nesimetriilor fluctuante. În același timp, rezultă o reducere a randamentului motoarelor. Experiența arată că *durata de viață a motoarelor*

asincron scade la jumătate, la o nesimetrie a tensiunilor de numai 4 %.

Se poate considera, cu o precizie destul de ridicată, că funcționarea motorului asincron în regim *periodic nesinusoidal* este echivalentă cu funcționarea mai multor motoare (numărul acestora fiind egal cu numărul armonicilor existente în tensiunea de alimentare distorsionată), cuplate pe același ax, dar care sunt alimentate cu tensiuni de valoare efectivă și pulsații diferite. Fiecare armonică determină cupluri motoare sau rezistente, care se adaugă sau se scad (în funcție de acțiunea lor) la cuplul principal generat de armonica fundamentală. Unei armonici de succesiune pozitivă îi corespunde alunecarea $s = 1 - 1/k$. Pentru toate alunecările cuprinse între limitele $s = 1$ și $s = 1 - 1/k$, rotorul se învârtă cu o viteză inferioară celei a armonicii, și atunci armonica tensiunii electromotoare de rang k va determina un cuplu motor. Pentru alunecările cuprinse între limitele $s = 1 - 1/k$ și $s = 0$, rotorul se învârtă cu o viteză superioară armonicii de rang k și va apărea un cuplu rezistent. Cuplul motor al armonicii se va adăuga la cuplul principal, iar cuplul rezistent se va scădea. Unei armonici de succesiune negativă îi corespunde alunecarea $s = 1 + 1/k$. Pentru toate alunecările cuprinse între limitele $s = 1$ și $s = 0$, armonicile de succesiune negativă ale tensiunii determină cupluri rezistente. Principalele efecte negative care apar la mașinile electrice rotative, determinate de poluarea armonică a rețelei în care sunt conectate sunt: creșterea temperaturii înfășurărilor și a miezului magnetic datorate pierderilor suplimentare în materialul conductor și în materialele magnetice; modificări ale cuplului mașinii electrice, care conduce la reducerea randamentului acesteia; apariția de oscilații ale cuplului de torsiune pe arborele mașinii electrice, care contribuie la îmbătrânirea materialului și la vibrații suplimentare; modificări ale inducției magnetice în întrefierul mașinii datorită armonicilor; interacțiuni între fluxul magnetic determinat de armonica fundamentală și fluxul magnetic determinat de armonice.

Din punct de vedere economic, implementarea unor motoare electrice mai eficiente are ca rezultat economii mai mari pe termen lung, indiferent de costul lor inițial. Aceasta este, fără îndoială, principala motivație pentru a înlocui mai puțin motoare eficiente cu altele mai eficiente. Pentru a clarifica mai bine acest punct, clasa IE4 LSPMM, conform imaginilor prezentate mai sus, este desemnată ca fiind cea mai eficientă, dar cea mai impactantă în ceea ce privește distorsiunea armonică.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'18, ediția 2022.

BIBLIOGRAFIE

1. Berzoy, O.A. Mohammed, J. Restrepo, *Analysis of the impact of stator interturn short-circuit faults on induction machines driven by direct torque control*, IEEE Transactions on Energy Conversion, 33, 3, pp. 1463-1474, 2018.
2. M.A. Ugwiri, M. Carratù, A. Pietrosanto, V. Paciello, A. Lay-Ekuakille, *Vibrations measurement and current signatures for fault detection in asynchronous motor*, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 1-6, 2020.
3. M.Y. Kaikaa, Z. Kecita, E. Elbouchikhi, M.E.H. Benbouzid, *Effect of unbalanced voltages on static eccentricity fault diagnosis in induction motors*, IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 6335-6340, 2016.
4. S.X. Duarte, N. Kagan, *A power-quality index to assess the impact of voltage harmonic distortions and unbalance to three-phase induction motors*, IEEE Transactions on Power Delivery, 25, 3, pp. 1846-1854, July 2010.
5. A.B.F. Neves, M.V.B. de Mendonça, A. de Leles Ferreira Filho, G.Z. Rosa, *Effects of voltage unbalance and harmonic distortion on the torque and efficiency of a three-phase induction motor*, 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 943-948, 2016.
6. C.-Y. Lee, *Effects of unbalanced voltage on the operation performance of a three-phase induction motor*, IEEE Transactions on Energy Conversion, 14, 2, pp. 202-208, June 1999.

7. H. Li, K.W. Klontz, *An investigation of current harmonic influence on induction motor in hybrid electric vehicle application*, IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), pp. 1-6, 2017.
8. G. Bhuvaneswari, S. Charles, M.G. Nair, *Power quality studies on a soft-start for an induction motor*, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1-6, 2008.
9. E. Cazacu, L. Petrescu, V. Ioniță. *Elemente de calitate și eficiență a energiei în instalațiile electrice moderne*. București: Editura Matrix Rom, 2020.
10. E. Quispe, G. Gonzalez, J. Aguado, *Influence of unbalanced and waveform voltage on the performance characteristics of three-phase induction motors*, 2004.
11. P. Pillay, P. Hofmann, M. Manyage, *Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over or undervoltages*, IEEE Transactions on Energy Conversion, 17, 4, pp. 485-491, December 2002,
12. ***International Electrotechnical Commission, Rotating Electrical Machines : Part 26 (IEC 60034-26) *Effects of unbalanced voltages on the performance of induction motors*, Ginebra: IEC,15 p., 2002.
13. O.V. Thorsen, M. Dalva, *Failure identification and analysis for high voltage induction motors in petrochemical industry*, Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242), pp. 291-298, 1998.
14. ****Rotating electrical machines-part 30-1: efficiency classes of line operated ac motors (IE Code)*, Standard IEC 60034-30-1:2014, <https://webstore.iec.ch/publication/136>, 2022
15. J.M. Tabora et al., *Assessing energy efficiency and power quality impacts due to high-efficiency motors operating under nonideal energy supply*, IEEE Access, 9, pp. 121871-121882, 2021.
16. F.J.T.E. Ferreira, B. Leprettre, A.T. de Almeida, *Comparison of protection requirements in IE2-, IE3-, and IE4-class motors*, IEEE Trans. Ind. Appl., 52, 4, pp. 3603-3610, July 2016.
17. J. Muñoz Tabora, M.E. de Lima Tostes, E. Ortiz de Matos, T. Mota Soares, U.H. Bezerra, *Voltage harmonic impacts on electric motors: a comparison between IE2, IE3 and IE4 induction motor classes*, Energies, 13, 13, p. 3333, June 2020.
18. J.M. Tabora, M.E. De Lima Tostes, E.O. De Matos, U.H. Bezerra, T.M. Soares, B.S. De Albuquerque, *Assessing voltage unbalance conditions in IE2, IE3 and IE4 classes induction motors*, IEEE Access, 8, pp. 186725-186739, 2020.
19. F.J.T.E. Ferreira, G. Baoming, A.T. de Almeida, *Reliability and operation of high-efficiency induction motors*, IEEE Trans. Ind. Appl., 52, 6, pp. 4628-4637, 2016.
20. A.T. de Almeida, F.J.T.E. Ferreira, G. Baoming, *Beyond induction motors-technology trends to move up efficiency*, IEEE Trans. Ind. Appl., 50, 3, pp. 2103-2114, May/June, 2014.