

Assessing Losses of Power and Electrical Energy in Unbalanced Medium Voltage Distribution Networks

Toader C.¹, Golovanov N.¹, Porumb R.¹, Trishtiu I.¹,
Bulac C.¹, Mandish Al.¹, M. Tirshu²

¹ University Polytechnic of Bucharest, Bucharest, Romania

² Institute of Power Engineering of Academy of Sciences of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. The work is dedicated to calculating electricity losses related to power lines average voltage overhead or underground, which in terms of construction can be three-phase (three or four wire) in unbalanced sinusoidal harmonic, determining energy efficiency indicators (such as positive and negative factors of unbalance) thereof. It examines a case study and argues the results.

Keywords: indicators of unbalance of electricity, power and energy loss calculation.

Evaluarea pierderilor de putere și energie electrică în rețele electrice de distribuție de medie tensiune dezechilibrate

Toader C.¹, Golovanov N.¹, Porumb R.¹, Triștiu I.¹,
Bulac C.¹, Mandiș Al.¹, Tîrșu M.²

¹ Universitatea Politehnică București, București, România

² Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

Rezumat: Lucrarea este dedicată calculului pierderilor de putere și energie electrică aferente liniilor electrice de medie tensiune, care din punct de vedere constructiv pot fi aeriene sau subterane, iar din punct de vedere funcțional pot fi trifazate sau monofazate, în regim armonic sinusoidal nesimetric, determinându-se indicatori de eficiență energetică (ca de exemplu factori de nesimetrie negativă și pozitivă) ale acestora. Se analizează un studiu de caz și se argumentează rezultatele obținute.

Cuvinte-cheie: indicatori de nesimetrie a curenților electrici, calculul pierderilor de putere și energie electrică.

Оценка потерь мощности и электрической энергии в несбалансированных распределительных сетях среднего напряжения

Тоадер К.¹, Голованов Н.¹, Порумб Р.¹, Триштиу И.¹,
Булак К.¹, Мандиш А.¹, Тыршу М.²

¹ Политехнический Университет Бухарест, Бухарест, Румыния

² Институт Энергетики Академии Наук Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Работа посвящена расчётам потерь мощности и электрической энергии на распределительных линиях электропередачи средней мощности, которые с точки зрения конструкции могут быть воздушного и подземного исполнения, а функционально – трёхфазные либо однофазные, в несимметричном синусоидальном гармоническом режиме, определяя показатели энергоэффективности (к примеру, показатели положительной и отрицательной асимметрии). Анализируется тематическое исследование, и аргументируются полученные результаты.

Ключевые слова: показатели несимметричности электрических токов, расчёт потерь мощности и электрической энергии.

Sistemele de energie electrică sunt considerate, la proiectare, ca fiind echilibrate și încărcate simetric.

În aceste regimuri toate elementele componente – generatoare, transformatoare, linii și utilizatori - prezintă parametri de circuit identici pe fiecare fază, iar sistemele de tensiuni și de curenți electrici, în orice secțiune, sunt simetrice. Dacă unul dintre elementele rețelei sau ale utilizatorului se dezechilibrează, regimul devine nesimetric (sau dezechilibrat), iar

sistemele de tensiuni și curenți electrici își pierd simetria.

Apariția dezechilibrelor sau a încărcării nesimetrice determină regimuri în care curenții electrici și tensiunile de secvență pozitivă, negativă și zero pot determina creșterea pierderilor și chiar daune în funcționarea unor echipamente.

Preocupările pentru limitarea efectelor induse de nesimetriei s-au concretizat în normative pentru operatorii de transport și de distribuție a energiei electrice.

Pentru evaluarea nesimetriei curbelor de tensiune sau de curent electric se folosește teoria Fortescue a componentelor simetrice. Această teorie se poate aplica numai mărimilor sinusoidale; în practică mărimile nesimetrice se referă la armonica fundamentală.

Se considera ca fiind relevantă numai componenta de secvență negativă a mărimilor trifazate. Evaluarea utilizată în Europa pe baza teoriei Fortescue conduce la valori substanțial diferite față de evaluarea pe baza indicatorilor IEEE.

1. DEZECHILIBRUL REȚELEI ELECTRICE – DEFINIȚII

Consecința cea mai defavorabilă a dezechilibrului de tensiune este circulația unor componente de curent electric (negativă și zero) ce produc pierderi suplimentare, cupluri parazite la motoare electrice de tensiune alternativă, creșterea uzurii etc.

Cauzele care produc dezechilibrul sistemului trifazat pot fi:

- **Temporare** – în general, apar datorită influenței defectelor asupra rețelei, care se pot produce între două sau mai multe conductoare cu sau fără punere la pământ; aceste defecte determină apariția unor variații ale tensiunii și curentului electric, diferite pe cele trei faze și dispar odată cu defectul;
- **Permanente** – dezechilibrul fazelor este provocat de cauze de natură constructivă (liniile electrice nu sunt perfect simetrice geometric sau în rețelele de joasă tensiune, o parte din utilizatori sunt monofazați și se alimentează din rețele trifazate etc.).

Propagarea sistemelor de secvență zero (homopolară) este limitată de transformatoarele cu conexiune în triunghi. Propagarea tensiunilor de succesiune negativă (inversă) dintr-o rețea de tensiune inferioară către una de tensiune superioară se face cu atenuare puternică în funcție de puterea de scurtcircuit a sistemului de tensiune ridicată, în timp ce propagarea dintr-o rețea spre alta de tensiune inferioară se face cu o atenuare care depinde de prezența mașinilor rotative trifazate, care au un puternic efect de reechilibrare.

Simetrizarea curenților electrici are drept efect principal scăderea pierderilor tehnice din rețelele electrice atât ale utilizatorilor, cât și ale SEN.

Calculul indicatorilor caracteristici ai mărimilor nesimetrice în cazul regimurilor nesimetrice, se poate face cu ajutorul teoriei

componentelor simetrice (teorema lui Fortescue) pe baza datelor obținute din măsurări din care să rezulte valorile mărimilor urmărite pe fiecare fază sau între faze. Măsurarea componentelor simetrice (pozitivă, negativă și zero) este realizabilă, în mod obișnuit, prin montaje adecvate ale aparatelor de măsurare specializate.

Simetrizarea rețelelor se poate realiza fie pe cale naturală, fie pe cale artificială. Simetrizarea pe cale naturală presupune încărcarea echilibrată a fazelor cu receptoare monofazate care să realizeze simetria.

Dacă funcționarea acestor receptoare este reciproc independentă, echilibrarea dispare când unul din receptoare iese din funcțiune sau își schimbă regimul de funcționare din considerente tehnologice; este cazul cuptoarelor industriale monofazate sau bifazate (de inducție) sau al tracțiunii electrice.

Simetrizarea naturală este eficientă numai acolo unde regimul receptoarelor monofazate este relativ uniform, cum este cazul cartierelor de locuințe și străzilor, stadioanelor, halelor industriale etc. Puterile acestor receptoare sunt relativ mici.

Simetrizarea artificială se realizează cu echipamente specifice, special concepute, care se conectează împreună cu receptoarele dezechilibrate de puteri mari pentru a forma receptoare echivalente echilibrate.

2. NESIMETRII ALE TENSIUNILOR ȘI CURENȚILOR ELECTRICI ÎN REȚELE ELECTRICE

O rețea trifazată, compusă din linii, generatoare și receptoare, poate fi reprezentată într-o schemă echivalentă prin impedanțele respective. Așa cum s-a menționat mai sus, în cazul în care impedanțele pe cele trei faze ale rețelei sunt identice, adică au același modul și același argument, rețeaua se numește **echilibrată**. Dacă cel puțin una din impedanțele complexe diferă de celelalte, **rețeaua respectivă se dezechilibrează**.

Într-un sistem trifazat echilibrat, alimentat cu un sistem de tensiuni simetric, curenții electrici care iau naștere în diversele elemente, precum și căderile de tensiune corespunzătoare, formează sisteme trifazate simetrice.

Cu excepția scurtcircuitului trifazat, celelalte tipuri de defecte între conductoarele rețelei, cu și fără legătură cu pământul, conduc la variații de tensiune trecătoare nesimetrice în rețea, mai mult sau mai puțin pronunțate. Pentru studiul unor

astfel de scurtcircuite se utilizează teoria componentelor simetrice. Aplicarea metodei componentelor simetrice presupune calculul a trei componente independente (de succesiune pozitivă, negativă și zero), fără legături între ele, în afara condițiilor de la locul de scurtcircuit. Fiecare dintre aceste componente are propria impedanță. Tipul de nesimetrie sau de dezechilibru din rețea poate fi reprezentat printr-o interconectare între rețele echivalente de diferite succesiuni.

Dezechilibrul impedanțelor, provocat de unele cauze de natură constructivă sau dezechilibru provocat de repartitia neuniformă a sarcinii pe cele trei faze ale rețelei de alimentare, conduce la apariția unor **regimuri nesimetrice permanente**, care sunt caracterizate prin apariția unor componente de secvență negativă/zero a tensiunilor și a curenților electrici în rețeaua respectivă.

În general, **din punct de vedere constructiv**, liniile electrice aeriene de înaltă tensiune nu sunt „echilibrate”. În cazul dispunerii celor trei conductoare ale unui circuit după vârful unui triunghi echilateral, apare necesară o supraînălțare suplimentară a stâlpilor de susținere și o transpunere repetată a conductoarelor pentru a simetriza aceste circuite, ceea ce uneori nu se poate realiza total. Chiar și în aceste condiții rezultă un dezechilibru al impedanțelor. În cazul dispunerii pe orizontală a celor trei conductoare, conductorul central prezintă – la curenți electrici de secvență pozitivă/negativă – o impedanță inferioară cu 6-10% față de cea a celorlalte conductoare. În această situație, căderea de tensiune este mai mică, ceea ce atrage o ușoară nesimetrie la bornele utilizatorilor.

Dezechilibrul sarcinii poate fi provocat, spre exemplu, de receptoarele cu construcție nesimetrică care, conectate la rețelele trifazate, absorb curenți electrici diferiți pe cele trei faze. Această situație conduce la o nesimetrie a sistemului de tensiuni. Probabilitatea de apariție a dezechilibrului pe cele trei faze este mai mare în cazul rețelelor cu utilizatori monofazați sau bifazați (tracțiune electrică, sudare, instalații electrotermice monofazate sau bifazate, echipamente electrocasnice etc.).

În același timp, în zonele rurale și chiar în zonele urbane periferice, alimentarea sarcinilor reduse și dispersate determină un tranzit de putere prin liniile electrice mult inferior față de capacitatea acestora. În aceste condiții, preocupările de reducere a cheltuielilor de

investiții au condus la apariția și dezvoltarea așa numitului **sistem mixt de distribuție trifazat-monofazat**. Astfel de sisteme se întâlnesc în America de Nord (sistemul mixt cu neutrul distribuit cu conductor neutru), în Australia (Sistemul mixt fără conductor neutru). Acest mod de realizare a sistemului de distribuție poate induce importante nesimetrii ale mărimilor electrice în sistemul trifazat de alimentare).

În funcție de structura defectului care conduce la nesimetrie pot fi

- nesimetrii longitudinale, apărute ca urmare a întreruperii unei faze;
- nesimetrii transversale, apărute în urma unor scurtcircuite între faze sau fază-pământ;
- nesimetrii simple sau multiple, în funcție de numărul de impedanțe sau admitanțe care intervin;
- nesimetrii, cauzate de componentele de secvență zero și negative.

3. MĂRIMI CARACTERISTICE ȘI NIVELURI ADMISIBILE

În general, nesimetria unui sistem de tensiuni (sau de curenți electrici) se evaluează cu indicatori care exprimă procentual raportul dintre componenta de secvență negativă (inversă) și/sau zero (homopolară) pe de o parte și componenta de secvență pozitivă (directă), pe de altă parte. Astfel se poate defini [1]:

- factorul de nesimetrie negativă ca fiind:

$$k_{ns}^- = \frac{A^-}{A^+}, \quad (1)$$

în care: A^- este valoarea efectivă a componentei de secvență negativă a tensiunii sau a curentului electric; A^+ - componenta de secvență pozitivă.

- factorul de nesimetrie zero este

$$k_{ns}^0 = \frac{A^0}{A^+}, \quad (2)$$

în care A^0 este componenta de secvență zero a tensiunii sau a curentului electric.

În normative și reglementări se fac precizări numai asupra nivelurilor admisibile de nesimetrie referitoare la tensiune. Astfel, în SR EN 50160/2012 [2] se consideră că o rețea electrică se poate considera practic echilibrată dacă factorul de nesimetrie negativă nu depășește valoarea de 2%, considerată ca limită de compatibilitate

În nodul de sistem în care se conectează o stație de alimentare a tracțiunii electrice feroviare, factorul de nesimetrie negativă de tensiune poate ajunge până la 3%.

Uneori, pentru estimarea factorului de nesimetrie negativă de tensiune raportarea se face la tensiunea nominală, considerându-se că aceasta este suficient de apropiată de componenta de succesiune pozitivă.

Nivelurile de planificare, utilizate în mod practic pentru evaluarea nesimetriei în rețeaua electrică, pentru dezechilibrul de tensiune sunt egale sau mai mici față de nivelurile de compatibilitate și trebuie să permită coordonarea dezechilibrelor de tensiune între diferitele niveluri de tensiune.

În tabelul 1 [3] sunt indicate valorile de planificare recomandate pentru diferite niveluri de tensiune.

Tabelul 1

Valori indicative ale nivelurilor de planificare pentru nesimetria de tensiune (factorul de nesimetrie negativă) pentru rețele de MT, IT, FIT

Nivelul de tensiune	Nivelul de planificare L_n
kV	%
MT	1,8
IT	1,4
FIT	0,8

Nota 1 – Valorile indicate asigură ca emisiile utilizatorilor de la JT și ale instalațiilor nesimetrice să permită realizarea nivelului de compatibilitate de 2% a sistemelor de JT. Pentru rețelele de MT la care se utilizează un nivel de compatibilitate de 3% (1,5 ori nivelul de compatibilitate de 2%), nivelul de planificarea poate fi ales de 1,5 ori valoarea indicată în acest tabel (adică valoarea de 2,7).

Nota 2 – Valorile indicate în tabel iau în considerare un factor de transfer egal cu 0,9 de la MT la JT și de 0,95 la transferul de la IT la MT, cu un exponent egal cu 1,4 în legea de însumare. Alocarea este bazată pe o egală împărțire a contribuției dezechilibrului la fiecare nivel de tensiune.

Nota 3 – Valorile din tabel nu au rolul de a controla nesimetria care apare datorită unor evenimente necontrolabile sau excepționale precum funcționarea necorespunzătoare a unor echipamente, scurtcircuite, operații de comutare etc.

4. CALCULUL PIERDERILOR DE ENERGIE ELECTRICĂ ÎN REȚELELE ELECTRICE ÎN REGIM ARMONIC NESIMETRIC

4.1. Introducere

Este cunoscut faptul partea tehnică a pierderilor de putere și energie electrică are două subclase: reală și teoretică.

Componenta tehnică teoretică a pierderilor de energie se poate optimiza, în sensul minimizării ei. În acest fel, pierderile de energie electrică pot fi considerate ca un indicator ce caracterizează funcționarea rețelei electrice respective [4].

4.2. Informații necesare privind liniile electrice (LE)

Pentru calculul pierderilor de energie dintr-un PT este necesar să se cunoască topologia sau schema electrică monofilară (fig. 1) [5];

În figura 1 au fost utilizate notațiile:

- s este aria secțiunii transversale a conductoarelor active;
- l - lungimea liniei;
- ρ - rezistivitatea materialului conductoarelor liniei electrice;
- X_0 - reactanța specifică longitudinală a conductoarelor liniei;
- B_0 - susceptanța transversală a liniei;
- G_0 - conductanța transversală a liniei.

Parametrii liniei electrice, cu n circuite, rezultă:

- Rezistența și reactanța longitudinală a liniei

$$R_L = \frac{\rho \cdot l}{n \cdot s}; \quad X_L = \frac{X_0 \cdot l}{n}; \quad (3)$$

- Conductanța și susceptanța transversală a liniei

$$G_L = n \cdot G_0 \cdot l; \quad B_L = n \cdot B_0 \cdot L \quad (4)$$

4.3. Graficul de sarcină al utilizatorului

Prin ipoteză se admite că sistemul de achiziție are o interfață ce poate achiziționa datele de la medie tensiune și deci este posibilă obținerea informațiilor privind mărimile:

U – tensiunea liniei,

I – curentul electric absorbit de utilizatorii de energie electrică,

P - puterea activă aferentă utilizatorului,

W_a - energia activă aferentă utilizatorului la intervale de timp egale Δt ,

Q - puterea reactivă a utilizatorului,

W_r - energia reactivă în aceleași intervale de timp Δt .

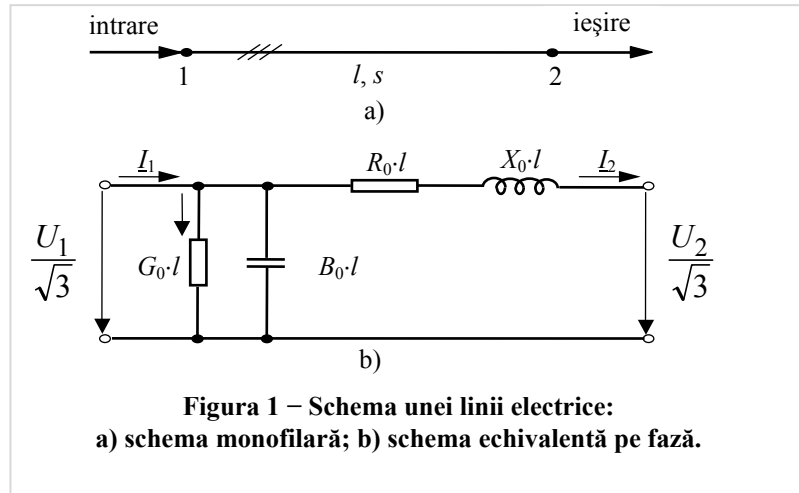


Figura 1 – Schema unei linii electrice:
a) schema monofilară; b) schema echivalentă pe fază.

Datele obținute permit construcția graficelor de sarcină, atât pentru fiecare fază în parte, cât și pe ansamblul sistemului trifazat.

Indicatorii curbelor de sarcina cei mai utilizați sunt [6]:

- puterea aparentă medie S_{med}

$$S_{med} = \frac{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}}{t_f}; \quad (5)$$

- factorul de umplere k_u :

$$k_u = \frac{S_{med}}{S_M}; \quad (6)$$

- factorul de formă al graficului de sarcină k_f^2

$$k_f^2 = a + \frac{1-a}{k_u}, \quad (7)$$

în care: S_M este puterea aparentă maximă, a - factor de regresie cuprins în domeniul $a \in [0,15; 0,30]$ iar t_f - timpul de funcționare al utilizatorului.

4.4. Pierderi de putere și energie electrică ale liniilor electrice de fără conductor neutru

4.4.1. Pierderi de putere și energie activă ale liniilor electrice trifazate fără conductor neutru

În cazul liniilor electrice trifazate fără conductor neutru, în construcție simetrică, sunt valabile relațiile [7]:

- Pierderile de putere activă ΔP_L

$$\Delta P_L = \Delta P_{0L} + R_L \cdot (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) \quad (8)$$

în care

$$\Delta P_{0L} = G_{oL} \cdot U_n^2 \quad (9)$$

- Pierderile de energie electrică activă

$$\Delta W_{aL} = [\Delta P_{0L} + R_L \cdot (I_A^2 \cdot k_A^2 + I_B^2 \cdot k_B^2 + I_C^2 \cdot k_C^2)] \cdot t_f \quad (10)$$

în care: I_A, I_B, I_C sunt curenții electrici medii de funcționare ai liniei;

k_A, k_B, k_C - factorii de formă ai graficelor de sarcină pentru fiecare fază.

Considerând tensiunile de alimentare simetrice, iar curenții electrici nesimetrice, ipoteza valabilă în sistemele de distribuție, curenții electrici de secvență sunt [7]:

- Pozitivă

$$(I^+)^2 = \left(\frac{1}{3}\right)^2 \cdot \sum_{m \in F} I_m^2 + 2 \cdot \sum_{u,v \in F} I_u \cdot I_v \cdot \cos\left(\phi_{uv} + \frac{4 \cdot \pi}{3}\right) \quad (11)$$

- negativă

$$(I^-)^2 = \left(\frac{1}{3}\right)^3 \cdot \sum_{m \in F} I_m^2 + 2 \cdot \sum_{u,v \in F} I_u \cdot I_v \cdot \cos\left(\phi_{uv} + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \quad (12)$$

Unghiurile ϕ_{uv} aparțin mulțimii:

$$\phi_{uv} \in (\phi_{AB}; \phi_{BC}; \phi_{CA}); \quad u, v \in F \quad (13)$$

unde F este mulțimea fazelor liniei, iar unghiurile ϕ_{uv} sunt:

$$\begin{aligned} \phi_{AB} &= \phi_A - \phi_B; \quad \phi_{BC} = \phi_B - \phi_C; \\ \phi_{CA} &= \phi_C - \phi_A. \end{aligned} \quad (14)$$

Utilizând factorii de nesimetrie, relația (8) devine:

$$\Delta P_L = \Delta P_{0L} + R_L \cdot \left[1 + (k_I^-)^2\right] x^2, \quad (15)$$

$$x = \left(\frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I^+}{U_n}\right)^2$$

unde factorii k_I^- se definesc cu relații cunoscute ținând seama de relațiile (11) și (12).

Mărimile $U^+ = U_n$ și I^+ sunt componentele de succesiune pozitivă ale tensiunii și respectiv ale curentului electric, aceasta din urmă fiind definită cu relația (12).

Dacă se definește factorul de formă k_f^2 cu relația :

$$k_f^2 = \frac{I_A^2 \cdot k_A^2 + I_B^2 \cdot k_B^2 + I_C^2 \cdot k_C^2}{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}, \quad (16)$$

atunci relația (10) care după înlocuire cu factorii de nesimetrie (k_I^-) și de expresiile componentelor de succesiune pozitivă din (11) conduce la forma:

$$\Delta W_{al} = \left\{ \Delta P_{0L} + R_L \left(\frac{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I^+}{U_n} \right)^2 \cdot [1 + (k_I^-)^2] \cdot k_f^2 \right\} \cdot t_f \quad (17)$$

Se notează cu S^+ mărimea [2, 6]

$$S^+ = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I^+ \quad (18)$$

care definește puterea aparentă de succesiune pozitivă.

Dacă se introduce factorul de încărcare al curentului electric α_I definit de [5]:

$$\alpha_I = \frac{I^+}{I_n} \quad (19)$$

atunci relațiile (15) și (17) devin:

$$\Delta P_L = \Delta P_{0L} + \Delta P_L \cdot [1 + (k_I^-)^2]; \quad (20)$$

$$\Delta W_{al} = \left\{ \Delta P_{0L} + \Delta P_L \cdot k_f^2 \cdot \alpha_I^2 \cdot [1 + (k_I^-)^2] \right\} \cdot t_f.$$

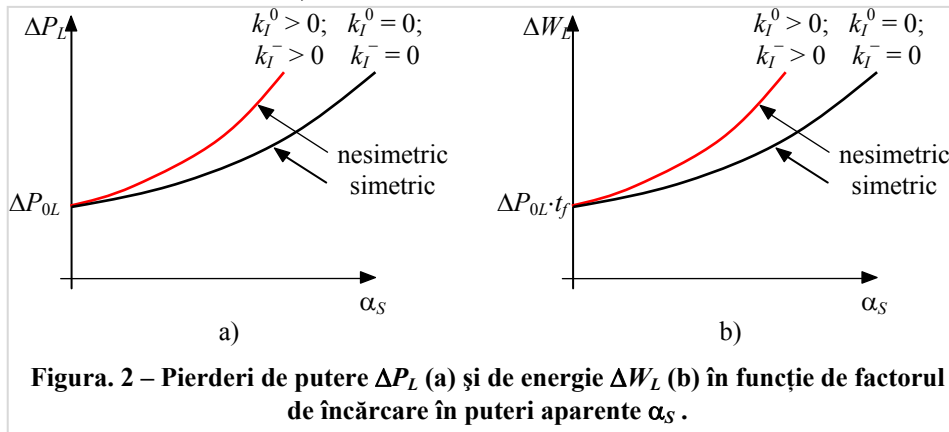


Figura. 2 – Pierderi de putere ΔP_L (a) și de energie ΔW_L (b) în funcție de factorul de încărcare în puteri aparente α_S .

Alegând ca variabilă mărimea α_I , derivatele funcțiilor din relațiile (20) se anulează astfel:

- pentru ΔP_L , $\alpha_I = 0$;
- pentru ΔW_{al} , $\alpha_I = 0$.

În ipoteza că tensiunea rețelei $U_n = \text{const.}$ în locul factorului de încărcare în curent electric definit în relația (19), prin amplificarea acesteia cu tensiunea rețelei se poate defini un factor de încărcare în puteri aparente:

$$\alpha_S = \frac{S^+}{S_n} \quad (21)$$

Variațiile expresiilor din (20) în funcție de factorul de încărcare al puterii aparente, α_S , sunt prezentate în figura 2.

4.4.2. Pierderi de putere și energie reactivă la liniilor electrice trifazate fără conductor neutru

Pornind de la relațiile de definiție ale mărimilor asociate liniilor electrice trifazate fără conductor neutru, în construcție simetrică, expresiile pierderilor de putere reactivă și de energie reactivă rezultă.

- Pierderile de putere reactivă ΔQ_L

$$\Delta Q_L = \Delta Q_{0L} + X_{fL} \cdot (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2), \quad (22)$$

în care

$$\Delta Q_{0L} = B_{0L} \cdot U_n^2; \quad (23)$$

- Pierderile de energie electrică reactivă

$$\Delta W_{rL} = \left[\Delta Q_{0L} + X_{fL} \cdot \left(\frac{I_A^2 \cdot k_A^2 + I_B^2 \cdot k_B^2 + I_C^2 \cdot k_C^2}{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2} \right) \right] \cdot t_f \quad (24)$$

Utilizând factorii de nesimetrie, relația (22) devine:

$$\Delta Q_L = \Delta Q_{0L} + X_{jL} \cdot \left[1 + (k_I^-)^2 \right] \cdot (I^+)^2 \quad (25)$$

Dacă se definește factorul de formă k_f^2 cu relația (16), atunci relația (24) care după înlocuire cu la forma:

$$\Delta W_{rL} = \left\{ \Delta Q_{0L} + \Delta Q_{jL} \cdot k_f^2 \cdot \alpha_s^2 \cdot \left[1 + (k_I^-)^2 \right] \right\} \cdot t_f \quad (27)$$

Variațiile expresiilor din (25) și (27) în funcție de factorul de încărcare al puterii aparente, α_s , sunt prezentate în figura 3.

Relațiile obținute sunt exemplificate în studiul de caz prezentat la paragraful 5 al lucrării.

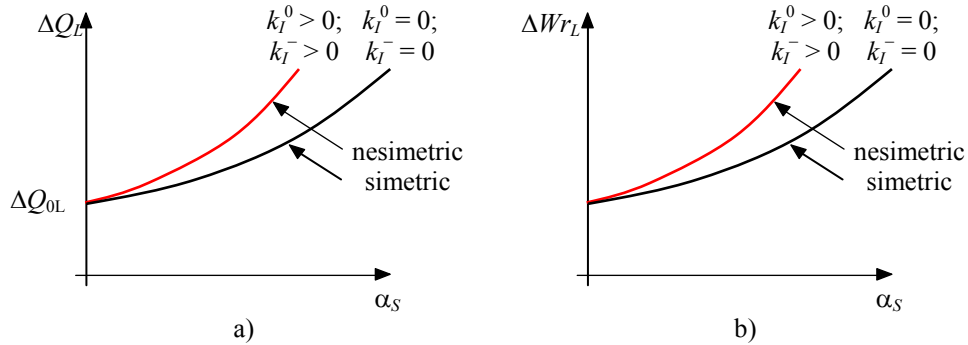


Figura. 3 – Pierderi de putere ΔQ_L (a) și de energie ΔW_{rL} (b) în funcție de factorul de încărcare în puteri aparente α_s .

5. STUDIU DE CAZ PENTRU O LINIE ELECTRICĂ DE MEDIE TENSIUNE

Utilizând modelul matematic prezentat anterior, s-a realizat o aplicație numerică pentru determinarea pierderilor de putere și respectiv de energie pentru o linie electrică aeriană *simplu circuit* ($n = 1$) de 20 kV cu caracteristicile indicate în tabelul 2.

Tabelul 2.

Caracteristici ale conductoarelor pentru o linie aeriană de 20 kV

U_n	n	l	γ	s	R_0	X_0	R	X
kV	circ	km	Sm/m ²	m ²	Ω/km	Ω/km	Ω	Ω
20	1	15	35	0	0.2	0.3	3.1	5.5
		5			1	72	5	8

Folosind relațiile prezentate anterior au rezultat valorile numerice din tabelele 3 și 4, în care este

evidențiată încărcarea dezechilibrată a liniei pentru care s-a efectuat această analiză.

Tabelul 3.

Încărcările pentru un tronson de rețea electrică dezechilibrată

I_A	I_B	I_C		I
A	A	A	A	A
100	50	86.6	76.38	28.87

Tabelul 4.

Încărcările simetrice pentru un tronson de rețea electrică echilibrată

I^+	I
A	A
76.38	0

În Tabelul 5 sunt redată pierderile de putere în regimuri simetrice și nesimetrice.

Tabelul 5.

Pierderi de putere și energie pentru linia de 20 kV prezentată în regim simetric și nesimetric

I^+	I	k_I^-	ΔP_L	ΔQ_L	t_f	k_f	ΔW_{aL}	ΔW_{rL}	W_a	CPT	cazul
A	A	%	kW	kVAr	ore		kWh	kVArh	kWh	%	-
76.38	28.87	37.8	63.0	111.6	8760	1.05	613	978	23177	2.65	nesimetric
76.38	0	0	55.1	97.7	8760	1.05	536	855	23177	2.31	simetric

Datele din tabelul 5 pun în evidența următoarele:

- în cazul real (*regim nesimetric*) pierderile de energie activă în procente sunt de 2.65%;
- în situația compensării nesimetriei de $k_f=37.8\%$ (*realizarea regimului simetric*) pierderile de energie activă procentuale ajung la 2,31%.

6. CONCLUZII

Nesimetriile din rețelele electrice pot determina:

- încălziri datorate pierderilor suplimentare în mașinile electrice rotative de tensiune alternativă;
- cupluri parazite în mașinile rotative ce se manifestă prin vibrații;
- alimentarea convertoarelor alternativ – continuu (punți redresoare) cu tensiuni nesimetrice conduce la apariția de componente continue în spectrul armonic;
- funcționarea protecțiilor de distanță este perturbată de asemenea de prezența tensiunilor de secvență negativă.

În sistemele electroenergetice trifazate, *nesimetria tensiunilor și a curenților electrici, este o importantă sursă de pierderi suplimentare de putere și energie electrică.*

Aceste abateri de la regimul normal de funcționare (simetric și sinusoidal), trebuie să fie identificate prin măsurători adecvate prevăzute de norme.

Dacă abaterile parametrilor caracteristici depășesc valorile acceptate de reglementările în vigoare, este necesar să se prevadă măsuri de corecție corespunzătoare.

Modelul teoretic dezvoltat este util prin elaborarea detaliată a unor măsuri tehnico-organizatorice, puncte de vedere financiare care să valideze și să justifice strategia rentabilizării distribuției energiei electrice [8].

Dintre măsurile care pot fi adoptate pentru limitarea nesimetrie pot fi indicate:

- alegerea parametrilor liniilor (secțiune și perditanță) astfel încât să fie asigurat necesarul utilizatorilor cu minim de pierderi (putere și energie);
- asigurarea regimului de încărcare simetric și echilibrat care permite, la același tranzit de energie electrică, randamente ridicate,

implicit pierderi de putere activă și energie electrică minime;

- măsuri tarifare adecvate pentru o mai bună aplatizare a graficelor de sarcină care, în regim simetric (și nesimetric), conduce la pierderi de putere și energie mai mici.

În cazul unor nesimetrii care depășesc valorile admise pot fi utilizate instalații specializate de simetrizare. La utilizarea acestora este necesar a lua în considerație[9]:

- *amplasarea eficientă a instalațiilor de simetrizare;*
- *dimensionarea tehnico-economică a instalațiilor de simetrizare și compensare a nesimetriilor;*

Toate aceste elemente sunt cunoscute și concretizate prin toate normativele în vigoare care trebuie completate cu studii pentru grafice tip de sarcină ce vor putea permite elaborarea unor noi reglementări în domeniul tarifelor de energie electrică convingătoare pentru utilizator de necesitatea ridicării eficienței distribuției și utilizării energiei electrice.

Bibliografie

- [1] Albert Hermina ș.a., *Calitatea energiei electrice. Contribuții. Rezultate. Perspective*, Editura AGIR, București, 2013.
- [2] *Caracteristici ale tensiunii în rețele electrice publice de distribuție*, SR EN 50160:2011.
- [3] *Normă tehnică energetică privind limitarea regimului datorat conectării instalațiilor nesimetrice în rețelele electrice de transport și de distribuție*, ANRE 2014.
- [4] *Czarnecki L. S., Power Related Phenomena in Three-Phase Unbalanced System*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No.3, July 1995, pg. 1168.1176.
- [5] Blackburn C.F., Evans R. D., *Symmetrical components for Power Systems Engineering*, Marcel Dekker Inc., New York 1993.
- [6] Iordănescu I. ș.a., *Instalații electroenergetice și elemente de audit industrial*, Editura N'Ergo, București, 2008.
- [7] Georgescu Gh., Gavrițaș M., Rădășanu D., *Calculul și reducerea pierderilor de putere și energie în rețelele electrice*, Publisher Spectrum, Iași, 1997.
- [8] Ferrero A., Leva S., Morando A., *A systematic, mathematically and practically sound approach to the energy balance in three-wire three-phase systems*, L'Energia Elettrica, vol.81, 2004.
- [9] Golovanov N., Postolache P., Toader C., *Eficiența și calitatea energiei electrice*, AGIR Publishing House, Bucharest, 2007.

Despre autori.

	<p>Profesor dr.ing. la catedra Sisteme Electroenergetice, facultatea Energetică, Universitatea Politehnica din București, specialist în domeniul utilizării eficiente a energiei electrice și în domeniul calității energiei electrice, autor, prim autor sau coautor la un număr de peste 30 cărți sau tratate. Are peste 100 lucrări științifice publicate în reviste de specialitate din țară și străinătate.</p>		<p>Profesor dr.ing la Universitatea Politehnica din București. Cursuri și dezvoltarea de noi cursuri în ceea ce privește resursele regenerabile de energie (RR), producție distribuită (DG), DG Integrarea în sistemele distribuție electrice tradiționale, calitatea energiei electrice și de eficiență energetică. E-mail: raduporumb@yahoo.com</p>
---	--	---	---

Articolul a fost prezentat la Conferința "Energetica Moldovei 2016"