

CONSIDERAȚII ȘI TEORII PRIVIND REGIMURILE NESIMETRICE

1 Definiții

Un sistem polifazat simetric de mărimi periodice sinusoidale este un ansamblu ordonat de mărimi sinusoidale $y_k(t)$, $k = 1 \dots n$, de perioadă T , care se succed la un interval de timp constant T/n (în cazul regimurilor nesinusoidale, definiția poate fi aplicată doar armonicilor fundamentale):

$$y_k(t) = y \left[t - (k-1) \frac{T}{n} \right] = \sqrt{2} Y \sin \left[\omega t + \gamma - (k-1) \frac{2\pi}{n} \right]; \quad k = \overline{1, n} \quad (1)$$

cu reprezentarea în complex de forma :

$$\underline{Y}_k = Y e^{j \left[\gamma - (k-1) \frac{2\pi}{n} \right]}, \quad k = \overline{1, n} \quad (2)$$

Aproape întreaga energie electrică din lume este produsă și distribuită prin sisteme trifazate de curent alternativ, la frecvența de 50 sau 60 Hz. Circuitele trifazate reprezintă doar o configurație particulară a elementelor și surselor de putere din aceste sisteme, fiind încadrate în cazul general al circuitelor polifazate. Utilizarea sistemelor trifazate a fost justificată de avantajele tehnice și economice confirmate în ani de experiență. Cu toate acestea, nu trebuie omisă utilitatea sistemelor cu număr mai mare de faze, ca de exemplu sistemele hexafazate sau dodecafazate întâlnite în cazul alimentării invertoarelor de puteri mari cerute de anumite procese industriale.

Despre o rețea electrică trifazată se spune că este echilibrată dacă impedanțele sale echivalente pe cele trei faze sunt identice, având module și argumente egale.

Rețeaua electrică este în schimb dezechilibrată dacă cel puțin una din impedanțele complexe de fază diferă de celelalte două.

Dacă rețeaua electrică este dezechilibrată sau este alimentată de la surse de tensiune nesimetrice, vor fi generate perturbații sub formă de nesimetrii, regimul de funcționare al rețelei fiind în acest caz nesimetric.

În literatura tehnică se întâlnește aproape în egală măsură atât denumirea de sistem și regim “nesimetric”, cât și cea de sistem și regim “dezechilibrat”. Deși nu a fost luată o hotărâre definitivă la nivel internațional privitoare la acest aspect, în unele țări, se utilizează cu precădere termenii “simetric / nesimetric” atunci când fac referire la sistemele de mărimi electrice care se succed în timp (tensiuni și curenți) și “echilibrat / dezechilibrat”

când se discută despre mărimile care nu au această proprietate (impedanțe și admitanțe), despre regimuri de funcționare sau puteri și energii.

În cazul abordărilor clasice, nesimetria sistemelor electroenergetice trifazate reale se poate aprecia pe baza factorilor de nesimetrie, exprimați cu ajutorul componentelor simetrice. Creșterea interesului pentru aspectele corelate ale calității energiei electrice a impus completarea cu noi precizări și modalități de evaluare a indicatorilor de regim dezechilibrat, care să ia în considerație limitările definiției componentelor simetrice. Astfel, în cazul regimurilor nesinusoidale, factorii de nesimetrie definiți pentru armonica fundamentală a curbelor de curent sau tensiune sunt completați de indicatori suplimentari [POT1].

2 Aplicabilitatea teoriei componentelor simetrice

Propusă în anul 1913 de Charles L. Fortescue și dezvoltată ulterior în scopul analizei defectelor nesimetrice în sistemele trifazate de către C.F.Wagner și R.D.Evans [BLA1, WAG1], metoda componentelor simetrice s-a dovedit esențială pentru înțelegerea și analiza funcționării sistemelor electroenergetice în regim dezechilibrat. Spre deosebire de metodele directe de analiză, metoda componentelor simetrice pune în evidență abaterile comportamentului elementelor dinamice de sistem față de regimul simetric și prezintă avantajul unei complexități reduse de calcul, studiul efectuându-se pe o singură fază, considerată referință.

Utilizată inițial în calculele de regim permanent stabilizat, metoda componentelor simetrice și-a dovedit aplicabilitatea și în studiile de regim tranzitoriu [ANT1, GRE1, LEH1, RUȘ3].

2.1 Ecuațiile generale ale teoriei componentelor simetrice

Metoda are la bază teorema lui Stokvis-Fortescue, conform căreia un sistem trifazat oarecare de mărimi sinusoidale se poate descompune în trei sisteme de componente simetrice-pozitive, negative și zero:

$$S(\mathbf{Y}) = S_+(\mathbf{Y}_+) + S_-(\mathbf{Y}_-) + S_0(\mathbf{Y}_0) \quad (3)$$

cu: $S(\mathbf{Y})$ - sistemul de fazori dat;

\mathbf{Y}_+ - fazorul de referință al sistemului de secvență pozitivă S_+ ;

\mathbf{Y}_- - fazorul de referință al sistemului de secvență negativă S_- ;

\mathbf{Y}_0 - fazorul de referință al sistemului de secvență zero S_0 .

Sistemele de fazori S_+ , S_- , S_0 se numesc *coordonate simetrice* ale sistemului S dat, iar fazorii \mathbf{Y}_+ , \mathbf{Y}_- , \mathbf{Y}_0 se numesc *componente simetrice* ale fazorilor dați.

Deci, orice mărime de fază (U sau I) nesimetrică (sinusoidală) poate fi determinată cu ajutorul componentelor simetrice, conform ec. (4). În practică secțiunile sistemelor electroenergetice sunt caracterizate de tensiunile de linie, aspect ce nu trebuie omis la reprezentarea rețelelor de secvență.

$$[\mathbf{Y}] = [\mathbf{A}] \cdot [\mathbf{Y}_{\text{sim}}] \quad (4)$$

cu: $[\mathbf{Y}] = [\underline{Y}_A \ \underline{Y}_B \ \underline{Y}_C]_t$ - vectorul coloană al mărimilor sistemului trifazat nesimetric;
 $[\mathbf{Y}_{sim}] = [\underline{Y}_0 \ \underline{Y}_+ \ \underline{Y}_-]_t$ - vectorul coloană al componentelor simetrice;

$$[\mathbf{A}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

matricea de transformare corespunzătoare (matricea Fortescue).

Componentele simetrice ale unui set de mărimi de fază pot fi scrise la rândul lor sub forma :

$$[\mathbf{Y}_{sim}] = [\mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{Y}] \quad (6)$$

cu $[\mathbf{A}]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix}$ - inversa matricei de transformare.

Sistemele de mărimi simetrice se caracterizează prin absența componentelor de secvență negativă și zero.

2.2 Semnificația fizică a componentelor simetrice

Descompunerea în componente simetrice a unui sistem polifazat oarecare nu reprezintă numai un simplu algoritm matematic utilizat în scopul simplificării metodei de studiu, ci corespunde unei realități fizice.

Astfel, componentele simetrice ale unui sistem de curenți sau de tensiuni pot fi măsurate direct și independent unele de altele și prezintă un comportament diferit în raport cu structura rețelei și cu natura aparatelor.

În timp ce componenta pozitivă produce câmpurile învârtitoare de secvență pozitivă în armăturile motoarelor, componenta negativă induce câmpurile care produc cuplurile de frânare.

Componenta de secvență zero intervine în toate cazurile de interferență între liniile de telecomunicații și liniile electrice de transport și distribuție. Curenții și tensiunile de secvență negativă și zero sunt de altfel componentele cele mai utilizate în protecția cu relee. Conectarea transformatoarelor de curent în paralel permite măsurarea componentei zero de curent ($3I_0$), în timp ce conexiunea triunghi deschis a transformatoarelor de tensiune permite determinarea componentei zero de tensiune ($3U_0$), ambele utilizate în protecțiile de secvență zero sau de cuvă ale generatoarelor, respectiv ale transformatoarelor de putere [BLA2].

Pe de altă parte, componentelor simetrice de curent și de tensiune le corespund componente de putere de același fel, direct măsurabile și având efecte diferite. Componenta pozitivă de putere își are sursa în generator, în timp ce componentele negativă și zero sunt produse în punctul de dezechilibru și circulă spre elementele echilibrate ale sistemului.

La rândul lor, impedanțele simetrice ale elementelor de sistem pot fi calculate sau măsurate, principiul fiind indicat în figura 1.

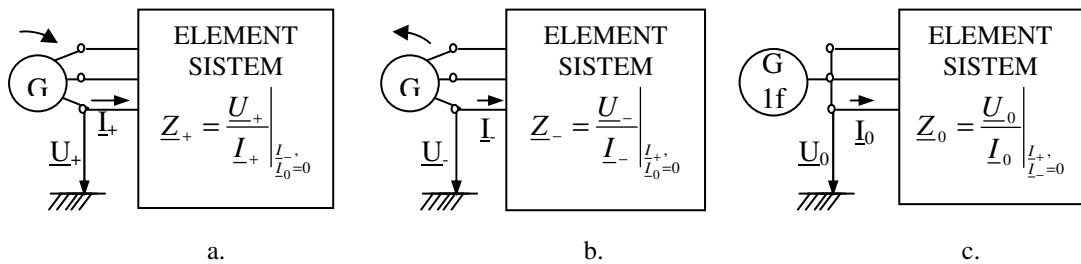


Fig.1 Schemele de determinare a impedanțelor simetrice: a.-pozitivă;b.-negativă;c.-zero

2.3 Extensii ale teoriei pentru sisteme hexafazate

Deși inițial a fost aplicată pentru studiul sistemelor electrice trifazate, metoda componentelor simetrice reprezintă o metodă generală de rezolvare a sistemelor polifazate dezechilibrate.

Conform metodei componentelor simetrice, un sistem nesimetric de n tensiuni sau curenți de fază de aceeași frecvență, reprezentat printr-un sistem nesimetric de n fazori, poate fi înlocuit prin n sisteme simetrice, formate fiecare din câte n fazori. Cele n unghiuri egale dintre fazorii unui sistem simetric pot fi determinate considerând reprezentarea grafică în planul complex a celor n valori distincte ale radicalului de ordinul n al unității. Cele n rădăcini ale ecuației $\underline{a}^n - 1 = 0$ sunt operatorii care determină unghiurile dintre

fazorii fiecărui sistem simetric, cu $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{n}}$ operatorul caracteristic din care se obțin ceilalți operatori \underline{a}^i , $i = 2, \dots, n$.

Dacă n nu este număr prim, unele din sistemele simetrice degenerază prin repetarea unor sisteme care au un număr de faze egal cu divizorii lui n .

Acesta este de exemplu cazul sistemelor hexafazate.

- operatorul de rotație: $\underline{a}_6 = e^{j\frac{2\pi}{6}}$;

- coordonatele de secvență $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$, pentru care:

$$S(\mathbf{Y}) = S_0(\mathbf{Y}_0) + S_1(\mathbf{Y}_1) + S_2(\mathbf{Y}_2) + S_3(\mathbf{Y}_3) + S_4(\mathbf{Y}_4) + S_5(\mathbf{Y}_5) \quad (7)$$

Sistemul studiat se împarte în șase sisteme simetrice de fazori. Pe lângă sistemele de fazori 1, 2 și 0, apar două sisteme de fazori care sunt sisteme trifazate de fazori repetate și un sistem bifazat de fazori repetat.

2.4 Relația între componentele simetrice

Ceea ce recomandă descompunerea mărimilor de fază nesimetrice în componente simetrice este de fapt independența acestor componente într-un sistem echilibrat. Sistemele electroenergetice sunt proiectate, din motive practice, să funcționeze simetric, începând de la generatoare până în punctul de conectare al consumatorilor monofazați, exceptând zonele de defect sau dezechilibru constructiv.

În sistemele trifazate, sursele și sarcinile trifazate pot fi conectate independent într-una din combinațiile: Y-Y, Y- Δ , Δ -Y, Δ - Δ sau Δ -Z, fiecare având comportamente distincte în ceea ce privește circulația componentelor nesimetrice de curent.

De exemplu, în cazul conexiunilor Y cu fir neutru condiția necesară pentru ca tensiunile la bornele receptorului să constituie un sistem simetric de mărimi este ca deplasarea neutrului să fie nulă (fir neutru de impedanță nulă), simetria fiind asigurată în cazul alimentării cu tensiuni simetrice. Deși în practică, simetria tensiunilor de fază la receptoare nu este riguros îndeplinită, datorită căderilor de tensiune diferite pe linia de alimentare, abaterile la receptoare se mențin în general în limite admisibile. Nesimetria tensiunilor poate atinge valori deranjante în cazul unei întreruperi a conductorului neutru (\underline{Z}_N foarte mare $\Rightarrow \underline{Y}_N \rightarrow 0$).

Pe de altă parte, condiția necesară pentru ca tensiunile de fază ale receptorului în stea, fără fir neutru, să fie simetrice este satisfăcută doar dacă receptorul este echilibrat. Datorită acestui fapt, în sistemele trifazate de distribuție doar receptoarele trifazate în stea echilibrate pot fi alimentate fără conductor neutru, în caz contrar acestea funcționând dezechilibrat datorită nesimetriei sistemului de tensiuni. Aceasta survine oricum la apariția unor defecțiuni în sistem, cum ar scurtcircuite sau întreruperi nesimetrice.

În cazul circuitelor în conexiune triunghi, metoda și relațiile de calcul sunt analoage celor corespunzătoare circuitelor cu conexiune stea, după ce în prealabil receptorul trifazat cu elemente cuplate magnetic a fost echivalat cu unul fără cuplaje magnetice, iar conexiunea sa triunghi a fost transfigurată într-una echivalentă stea. Indiferent de regimul de funcționare, suma curenților de linie pentru această configurație este nulă.

A. Cazul rețelelor trifazate simetrice

Curenții de o anumită secvență care circulă în rețelele simetrice determină doar căderi de tensiune de aceeași secvență.

Pentru componentele de secvență ale tensiunilor și curenților pe laturile unui circuit echivalent cu *conexiune* Δ se poate scrie:

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C}{3} = 0 \quad (8)$$

ceea ce înseamnă că prin conexiunea Δ nu circulă curenți de linie de secvență zero.

Componentele de secvență pozitivă și negativă ale curenților de fază sunt:

$$\underline{I}_f^+ = \sqrt{3}\underline{I}_\ell^+ e^{-j\pi/6}; \quad \underline{I}_f^- = \sqrt{3}\underline{I}_\ell^- e^{j\pi/6} \quad (9)$$

Faza de referință poate fi aleasă arbitrar, fără a influența rezultatele descompunerii.

Relații similare rezultă pentru tensiunile de linie ale *conexiunii* Y:

$$\underline{U}_\ell^0 = \frac{\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA}}{3} = 0 \quad (10)$$

punându-se în evidență lipsa componentei de secvență zero a tensiunii de linie.

În plus,

$$\underline{U}_\ell^+ = \sqrt{3}\underline{U}_f^+ e^{j\pi/6}; \quad \underline{U}_\ell^- = \sqrt{3}\underline{U}_f^- e^{-j\pi/6} \quad (11)$$

Dacă pe laturile circuitelor echivalente nu sunt amplasate surse sau nu există cuplaje magnetice între faze, se poate scrie:

$$\underline{Z}_\Delta \stackrel{def}{=} \frac{\underline{U}_\ell^+}{\underline{I}_\ell^+} = \frac{\underline{U}_\ell^-}{\underline{I}_\ell^-} \quad (12)$$

$$\underline{Z}_Y \stackrel{def}{=} \frac{U_f^+}{I_f^+} = \frac{U_f^-}{I_f^-} = \frac{Z_\Delta}{3} \quad (13)$$

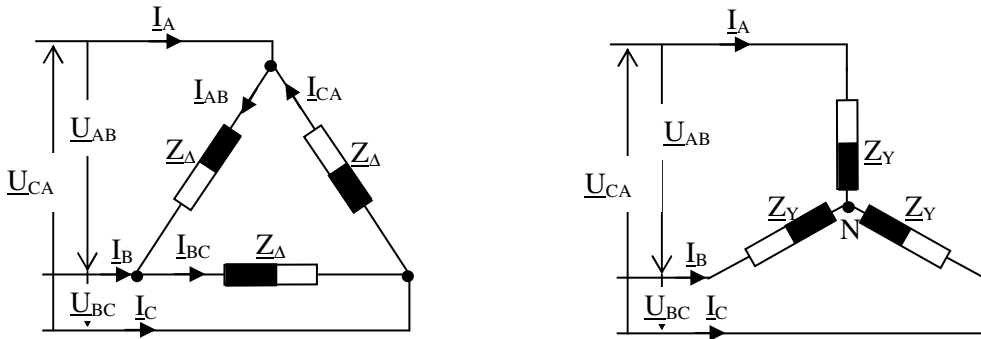


Fig.2 Conexiunile Δ și Y ale circuitelor simetrice

În cazul conexiunii Y cu neutrul legat la pământ printr-o impedanță \underline{Z}_N , curentul prin calea de întoarcere este:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 3\underline{I}_f^0 \quad (14)$$

relație care pune în evidență lipsa componentelor de secvență pozitivă și negativă a curenților prin conductorul neutru.

Curentul prin conductorul neutru determină o cădere de tensiune între neutru și pământ egală cu $\underline{U}_N = 3\underline{Z}_N \underline{I}_f^0$. Este important de aceea, să se facă o distincție clară între tensiunile față de pământ \underline{U}_f și tensiunile față de punctul neutru \underline{U}_{fN} în condiții de dezechilibru al sarcinii: $\underline{U}_f = \underline{U}_{fN} + \underline{U}_N$.

Aplicând descompunerea în componente simetrice sistemului căderilor de tensiune pe conductoarele fazelor față de pământ, se obține o ecuație matriceală de forma:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_f^0 \\ \underline{U}_f^+ \\ \underline{U}_f^- \end{bmatrix} = \underline{Z}_Y \begin{bmatrix} \underline{I}_f^0 \\ \underline{I}_f^+ \\ \underline{I}_f^- \end{bmatrix} + 3\underline{I}_f^0 \underline{Z}_N \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_+ & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_- \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_f^0 \\ \underline{I}_f^+ \\ \underline{I}_f^- \end{bmatrix} \quad (15)$$

unde $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_Y + 3\underline{Z}_N$; $\underline{Z}_+ = \underline{Z}_- = \underline{Z}_Y$.

Reprezentarea rețelei inițiale poate fi făcută astfel, conform ec. (15), cu ajutorul a trei scheme de secvență monofazate, independente între ele.

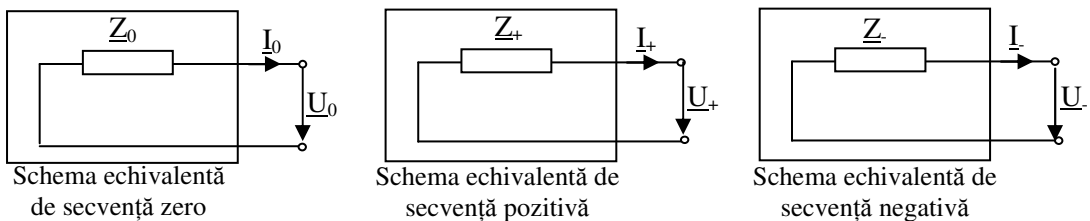


Fig.3 Schemele echivalente de secvență ale unei rețele trifazate

Pentru calculele de regim nesimetric, fiecare din schemele de secvență poate fi redusă la câte o impedanță echivalentă unică, notată $Z_+(X_+)$, $Z_-(X_-)$, respectiv $Z_0(X_0)$.

Fiecare dintre aceste mărimi reprezintă impedanța (reactanța) echivalentă între punctul de potențial zero și punctul de nesimetrie. Valorile lor vor fi diferite pentru fiecare tip de nesimetrie sau poziție a acesteia. Reducerea schemei de secvență pozitivă necesită determinarea circulației de curent înainte de apariția condițiilor de nesimetrie, pe baza teoremei lui Thévenin, în urma stabilirii impedanței echivalente Thévenin.

Tensiunile de secvență pozitivă și negativă pot fi privite ca tensiuni măsurate fie față de punctul neutru, fie față de pământ, neexistând nici o legătură de valoare finită între aceste două puncte pe schemele corespunzătoare.

Conexiunile Δ și Y cu neutrul nelegat la pământ ale impedanțelor fazelor nu asigură o cale de circulație pentru curenții de secvență zero, prima închizându-i, cea de-a doua întrerupându-i.

B. Cazul rețelilor trifazate nesimetrice

Spre deosebire de porțiunile echilibrate din rețea, în punctele sau segmentele de dezechilibru lucrurile se complică:

- i) curenții de secvență pozitivă într-o rețea nesimetrică determină atât căderi de tensiune de secvență pozitivă, cât și negativă și posibil zero;
- ii) curenții de secvență negativă într-o rețea nesimetrică determină atât căderi de tensiune de secvență negativă, cât și pozitivă și posibil zero;
- iii) curenții de secvență zero produc căderi de tensiune de orice secvență într-o rețea nesimetrică.

Pentru o rețea trifazată nesimetrică ce alimentează un consumator dezechilibrat, având impedanțele echivalente pe faze \underline{Z}_{AA} , \underline{Z}_{BB} , \underline{Z}_{CC} , se poate scrie următorul set de ecuații de legătură curenți-tensiuni de fază:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{Z}_{AA}\underline{I}_A + \underline{Z}_{AB}\underline{I}_B + \underline{Z}_{AC}\underline{I}_C \\ \underline{U}_B &= \underline{Z}_{BA}\underline{I}_A + \underline{Z}_{BB}\underline{I}_B + \underline{Z}_{BC}\underline{I}_C \\ \underline{U}_C &= \underline{Z}_{CA}\underline{I}_A + \underline{Z}_{CB}\underline{I}_B + \underline{Z}_{CC}\underline{I}_C\end{aligned}\quad (16)$$

Aplicând descompunerea în componente simetrice mărimilor de fază, rezultă:

$$\begin{aligned}\underline{U}_0 &= \underline{Z}_{00}\underline{I}_0 + \underline{Z}_{0+}\underline{I}_+ + \underline{Z}_{0-}\underline{I}_- \\ \underline{U}_+ &= \underline{Z}_{+0}\underline{I}_0 + \underline{Z}_{++}\underline{I}_+ + \underline{Z}_{+-}\underline{I}_- \\ \underline{U}_- &= \underline{Z}_{-0}\underline{I}_0 + \underline{Z}_{-+}\underline{I}_+ + \underline{Z}_{--}\underline{I}_-\end{aligned}\quad (17)$$

unde s-au utilizat notațiile:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{00} &= \underline{\xi}_0 + \underline{\mu}_0^1 + \underline{\mu}_0^2; \quad \underline{Z}_{0+} = \underline{\xi}_- + \underline{\mu}_+^1 + \underline{\mu}_0^2; \quad \underline{Z}_{0-} = \underline{\xi}_+ + \underline{\mu}_-^1 + \underline{\mu}_0^2 \\ \underline{Z}_{+0} &= \underline{\xi}_+ + \underline{a}^2 \underline{\mu}_-^1 + \underline{a} \underline{\mu}_0^2; \quad \underline{Z}_{++} = \underline{\xi}_0 + \underline{a}^2 \underline{\mu}_0^1 + \underline{a} \underline{\mu}_0^2; \quad \underline{Z}_{+-} = \underline{\xi}_- + \underline{a} \underline{\mu}_{0+}^1 + \underline{a} \underline{\mu}_{0+}^2 \\ \underline{Z}_{-0} &= \underline{\xi}_- + \underline{a} \underline{\mu}_+^1 + \underline{a}^2 \underline{\mu}_{0+}^2; \quad \underline{Z}_{-+} = \underline{\xi}_+ + \underline{a}^2 \underline{\mu}_{0-}^1 + \underline{a}^2 \underline{\mu}_{0-}^2; \quad \underline{Z}_{--} = \underline{\xi}_0 + \underline{a} \underline{\mu}_0^1 + \underline{a}^2 \underline{\mu}_0^2\end{aligned}\quad (18)$$

$$\begin{aligned}\underline{\xi}_0 &= \frac{1}{3}(\underline{Z}_{AA} + \underline{Z}_{BB} + \underline{Z}_{CC}); \quad \underline{\xi}_+ = \frac{1}{3}(\underline{Z}_{AA} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{BB} + \underline{a} \underline{Z}_{CC}); \\ \underline{\xi}_- &= \frac{1}{3}(\underline{Z}_{AA} + \underline{a} \underline{Z}_{BB} + \underline{a}^2 \underline{Z}_{CC});\end{aligned}\quad (18')$$

$$\begin{aligned}
\mu_{-0}^1 &= \frac{1}{3}(\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA} + \underline{Z}_{AB}); & \mu_{-0}^2 &= \frac{1}{3}(\underline{Z}_{CB} + \underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BA}) \\
\mu_{-+}^1 &= \frac{1}{3}(a\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA} + a^2\underline{Z}_{AB}); & \mu_{-+}^2 &= \frac{1}{3}(a\underline{Z}_{CB} + \underline{Z}_{AC} + a^2\underline{Z}_{BA}) \\
\mu_{--}^1 &= \frac{1}{3}(a^2\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{CA} + a\underline{Z}_{AB}); & \mu_{--}^2 &= \frac{1}{3}(a^2\underline{Z}_{CB} + \underline{Z}_{CA} + a\underline{Z}_{AB}) \\
\mu_{0+}^1 &= \frac{1}{3}(a^2\underline{Z}_{BC} + a\underline{Z}_{CA} + \underline{Z}_{AB}); & \mu_{0+}^2 &= \frac{1}{3}(a^2\underline{Z}_{CB} + a\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BA}) \\
\mu_{0-}^1 &= \frac{1}{3}(a\underline{Z}_{BC} + a^2\underline{Z}_{CA} + \underline{Z}_{AB}); & \mu_{0-}^2 &= \frac{1}{3}(a\underline{Z}_{CB} + a^2\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BA})
\end{aligned} \tag{18''}$$

Ecuatiile precedente pun în evidență faptul că cele trei scheme de secvență își pierd independența una față de celelalte, datorită impedențelor mutuale nenule, a căror determinare nu face decât să conducă la creșterea complexității calculului.

Dacă sistemul prezintă o simetrie totală, adică :

$$\underline{Z}_{AA} = \underline{Z}_{BB} = \underline{Z}_{CC} \text{ și } \underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z}_{BA} = \underline{Z}_{CB} = \underline{Z}_{AC}$$

sau chiar una ciclică :

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} \text{ și } \underline{Z}_{BA} = \underline{Z}_{CB} = \underline{Z}_{AC},$$

atunci matricea impedențelor de secvență este diagonală :

$$\underline{Z}_{0+} = \underline{Z}_{0-} = \underline{Z}_{+0} = \underline{Z}_{+-} = \underline{Z}_{-0} = \underline{Z}_{-+} = 0,$$

iar sistemul (2.17) va avea forma (2.15).

Aceste componente nu au neapărat o semnificație fizică (pot avea părți reale negative), dar ele se dovedesc utile în formularea matematică generală a teoriei componentelor simetrice.

C. Concluzii

În vederea determinării parametrilor de secvență ai elementelor unui sistem electroenergetic trebuie făcute următoarele precizări:

- i) impedențele prin care se caracterizează diferitele elemente ale sistemului în regim normal simetric sau tranzitoriu simetric sunt impedențe de secvență pozitivă;
- ii) impedențele elementelor care nu prezintă cuplaje magnetice între faze nu depind de ordinea de secvență a fazelor curentului; în aceste condiții toate impedențele de secvență ale unui astfel de element sunt egale ($\underline{Z}_{+} = \underline{Z}_{-} = \underline{Z}_{0}$);
- iii) elementele componente ale sistemului ale căror circuite cuplate magnetic sunt imobile unul față de celălalt, au impedențele pozitivă și negativă egale (inducția mutuală între faze nu se modifică prin schimbarea ordinii de secvență a fazelor unui sistem trifazat de curenți simetric) – cazul transformatoarelor, autotransformatoarelor, liniilor electrice, bobinelor de reactanță;
- iv) mașinile electrice rotative sunt caracterizate de mobilitatea relativă a cuplajelor magnetice, impedența lor pozitivă fiind de aceea diferită de cea negativă (ultima fiind întotdeauna mai mare);
- v) valoarea impedențelor de secvență zero depinde de modul de legare la pământ al punctelor neutre și de conductorul de întoarcere;
- vi) în sistemele trifazate, conductoarele neutre sunt parcurse de suma $3I_0$ a curenților de secvență zero ai fiecărei faze.

2.5 Legătura cu armonicile din sistem

Metoda componentelor simetrice este asociată în principiu frecvenței fundamentale a sistemului electroenergetic. Poate fi făcută însă o legătură a frecvențelor armonice cu cele trei secvențe după cum urmează:

- frecvența fundamentală echilibrată este de secvență pozitivă;
- armonicile de ordinul 3 ($3 \times 120^\circ$) sunt nedefazate în timp, circulând ca niște mărimi de secvență zero (circulă doar dacă sistemul este legat la pământ sau există al 4-lea conductor); ele circulă de asemenea într-o conexiune triunghi, similar secvenței zero;
- armonicile de ordinul $3k-1$ (5, 11, 17...) formează sisteme trifazate cu secvență negativă față de cea a fundamentalei;
- armonicile de ordinul $3k+1$ (7, 13, ...) sunt similare setului de mărimi de secvență pozitivă.

În cazul sistemelor trifazate în conexiune stea, fundamentala și armonicile de ordinul $3k\pm 1$ pot circula chiar în lipsa conductorului neutru sau a legării la pământ, spre deosebire de armonicile de ordinul $3k$.

În sistemele trifazate în conexiune triunghi armonicile $3k\pm 1$ pot circula în linii și în fazele separate ale triunghiului, în timp ce armonicile multiplu de 3 pot circula doar în interiorul triunghiului și nu în sistem.

2.6 Alte metode indirecte de analiză a regimurilor nesimetrice

În ciuda avantajelor dovedite pe care le prezintă utilizarea metodei componentelor simetrice în calculele de regim nesimetric, descompunerea amintită nu este singura soluție de simplificare a metodei de analiză, mărimile de stare pe fazele unui sistem putând fi înlocuite și prin alte componente. Nu mai puțin cunoscute și folosite în locul sau în paralel cu acestea, sunt de exemplu sistemele de componente cum ar fi cele introduse de Clarke și Stanley [CLA1] sau cele ale lui Park.

O descompunere generală poate fi scrisă sub forma:

$$[\mathbf{V}_f] = [\mathbf{T}] \cdot [\mathbf{V}_c] \quad (19)$$

și

$$[\mathbf{V}_c] = [\mathbf{T}]^{-1} \cdot [\mathbf{V}_f] \quad (19')$$

cu $[\mathbf{V}_f]$ - vectorul coloană al mărimilor de fază;

$[\mathbf{V}_c]$ - vectorul coloană al componentelor de descompunere;

$$[\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \text{ - matricea de transformare.}$$

Aceasta poate fi scrisă sub forma:

$$[\mathbf{C}]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

respectiv:

$$[\mathbf{C}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (20')$$

pentru sistemul de componente Clarke $[\mathbf{V}_c] = [V_\alpha \ V_\beta \ V_0]$,

și

$$[\mathbf{P}] = \begin{bmatrix} \cos \theta_d & -\sin \theta_d & 1 \\ \cos(\theta_d - 2\pi/3) - \sin(\theta_d - 2\pi/3) & 1 & \\ \cos(\theta_d + 2\pi/3) - \sin(\theta_d + 2\pi/3) & 1 & \end{bmatrix} \quad (21)$$

pentru sistemul de componente Park $[\mathbf{v}_c] = [v_d(t) \ v_q(t) \ v_0(t)]_t$.

Această descompunere implică alegerea, arbitrară, a coeficienților, singura restricție fiind legată de singularitatea matricei de transformare: $Det(\mathbf{T}) \neq 0$.

Scopul exprimării fazorilor inițiali în funcție de noile componente este simplificarea calculului și o mai bună înțelegere a problematicii urmărite. Componentele trebuie să aibă semnificație fizică, să fie utile pentru determinarea performanțelor sistemului, iar mărimile parametrice ($\underline{Z}, \underline{Y}$) asociate să se obțină ușor din încercări sau calcule.

În timp ce metoda componentelor simetrice prezintă, în cazul reprezentării mașinilor sincrone de construcție simetrică, avantajul independenței schemelor de secvență, calculul regimului nesimetric utilizând metoda componentelor Clarke sau descompunerea în componente d,q,0 devine dificil, implicând inversarea unor matrici de impedanțe/admitanțe complete, care includ parametri mutuali nenuli și inegali.

Dacă însă elementul studiat este pasiv, matricele de impedanță ale rețelelor de descompunere au aceeași formă, metodele prezentând aceleași avantaje.

Deși în literatură sunt întâlnite preocupări frecvente de a construi scheme echivalente în sistemul de componente Clarke pentru diferite nesimetrii din sistemul trifazat, schemele omit de obicei cuplajele de la generatoare, creându-se astfel impresia avantajului utilizării acestor componente.

În general, componentele Clarke furnizează o soluție imediată unor probleme relativ simple, care abordate prin alte metode ar solicita un timp mult mai mare, cum ar fi cazul sistemelor nesimetrice având două impedanțe de fază egale sau cu două faze simetrice în raport cu a treia (cazul defectelor bifazate) sau al regimurilor tranzitorii ale sistemelor simple.

Pe de altă parte, componentele α, β pot fi reprezentate în plan cartesian printr-un vector $\underline{V}_{\alpha,\beta} = V_\alpha + jV_\beta$. Axa α și axa β au aceeași orientare, iar axa β este defazată cu 90° față de α . Vectorii $\underline{U}_{\alpha,\beta}$ și $\underline{I}_{\alpha,\beta}$ pot caracteriza un sistem trifazat neinfluențat de componentele de secvență 0, \underline{U}_0 și \underline{I}_0 . În acest mod, un sistem trifazat cu patru conductoare poate fi descompus într-un sistem trifazat trei conductoare și unul monofazat, corespunzător componentelor de secvență 0.

De menționat este faptul că trecerea de la un sistem de reprezentare în componente la un altul se face relativ simplu.

Experiența a dovedit că metoda componentelor simetrice rămâne totuși cea mai avantajoasă pentru studiul regimurilor permanente simetrice sau nesimetrice.

3 Indicatori caracteristici ai regimului nesimetric

Sensibilitatea anumitor componente de sistem la nesimetria tensiunilor sau curenților impune fixarea unor limite acceptate atât de constructor, cât și de furnizor sau utilizator. Acceptarea acestui compromis tehnico-economic este posibilă cu condiția ca definirea unor indicatori caracteristici și metoda lor de determinare să fie stabilite clar.

În situația actuală, în care diversitatea definițiilor ar putea genera confuzii, elementele existente ar trebui grupate într-un cadru comun, raportate la o referință exactă și calculate cu o metodă precisă, dar simplă. Mai mult, evaluarea acestor indicatori trebuie să fie practică și menită, alături de alte măsuri, să stimuleze și nu să descurajeze adoptarea măsurilor de încadrare a lor în domenii recomandate.

Considerațiile anterioare se referă la *factorul de nesimetrie*, definit (astfel încât să îndeplinească toate condițiile generale impuse indicatorilor de calitate [GOL1]) ca raportul între valoarea efectivă a componentei negative sau zero a mărimii de stare urmărită și cea a componentei pozitive (pe armonica fundamentală). În ipoteza unui regim sinusoidal, comparația poate să se bazeze la fel de bine și pe valorile maxime sau medii.

Definiția anterioară este într-o oarecare măsură restrictivă, deoarece se limitează la modulul unui indicator complex, factorul de nesimetrie complex [PIE1, PIE2, BOG1]. Acesta este descris în coordonate polare conform ec. (2.24), cele două mărimi caracteristice ale sale putând fi determinate pe baza parametrilor mășurați în sistem.

3.1 Definiții ale indicatorilor

Factorul de nesimetrie de tensiune

Se definește:

- *Factorul de nesimetrie negativă de tensiune:*

$$k_{U-} = \frac{U_-}{U_+} \quad (22)$$

- *Factorul de nesimetrie zero de tensiune:*

$$k_{U_0} = \frac{U_0}{U_+} \quad (23)$$

- *Factorul de nesimetrie complex de tensiune:*

$$\underline{k}_U = \frac{\underline{U}_-}{\underline{U}_+} = k_U \cdot e^{j\varphi_U} \quad (24)$$

Acest indicator [PIE1, PIE2, BOG1] elimină restricțiile introduse de definițiile anterioare, care se limitau doar la modulul său, fiind descris în coordonate polare de două mărimi caracteristice, care pot fi determinate în urma măsurărilor în sistem.

Exprimat în funcție de fazorii tensiunilor de fază și respectiv de linie, indicatorul de mai sus poate fi scris sub forma:

$$\underline{k}_U = \frac{\underline{U}_A + a^2 \underline{U}_B + a \underline{U}_C}{\underline{U}_A + a \underline{U}_B + a^2 \underline{U}_C} = \frac{\underline{U}_{AB} - a \underline{U}_{BC}}{\underline{U}_{AB} - a^2 \underline{U}_{BC}} \quad (25)$$

Exprimarea conform ec. (25) are avantajul că permite determinarea rapidă a unui indicator de nesimetrie complet, doar prin măsurarea directă a tensiunilor de linie, chiar și pentru sistemele cu neutrul neaccesibil.

Modulul factorului de nesimetrie poate fi determinat pe baza valorilor măsurate ale tensiunilor de linie cu relația:

$$k_U^2 = \frac{1 - \sqrt{3 - 6u}}{1 + \sqrt{3 + 6u}} \quad (26)$$

unde:

$$u = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2} \quad (27)$$

în timp ce argumentul poate fi extras din relația:

$$\varphi_{kU} = \arctan \sqrt{3} \frac{U_{AB}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}^2 + U_{CA}^2 - 2U_{BC}^2} \quad (28)$$

cu $\text{sign}(\sin \varphi_{kU}) = \text{sign}(U_{AB}^2 - U_{CA}^2)$.

Mărimile de mai sus descriu complet nesimetria de tensiune. Utilizarea fazorilor de secvență zero nu se mai justifică, datorită faptului că efectul acestora este de cele mai multe ori neesențial, neafectând fenomenele de conversie a energiei în mașinile sincrone din centralele sistemului și în convertoare.

Factorul de nesimetrie de curent

În mod similar se vorbește despre:

- *Factorul de nesimetrie negativă de curent:*

$$k_{I-} = \frac{I_-}{I_+} \quad (29)$$

- *Factorul de nesimetrie zero de curent:*

$$k_{I0} = \frac{I_0}{I_+} \quad (30)$$

În cazul mașinilor sincrone de puteri mari, influența nesimetriei tensiunilor asupra funcționării lor se poate evalua în funcție de valorile maxime determinate pentru raportul între componenta negativă de curent și curentul nominal al mașinii:

$$k_I = \frac{I_-}{I_N} \quad (31)$$

Indicatorul astfel definit sau un indicator similar, rezultat prin multiplicarea acestuia cu timpul cât durează un defect nesimetric la borne, trebuie menținut într-un domeniu inferior valorii 0.1, respectiv 20, conform STAS 1893/1-87 [STA1].

Definiția se poate dovedi utilă mai ales în cazul sistemelor cu neutrul izolat ($I_A + I_B + I_C = 0$), mărimile implicate în calcul având semnificație fizică și putând fi la fel de ușor de determinat ca și în cazul nesimetriei de tensiune:

$$k_I = \frac{I_-}{I_N} = \frac{1}{3I_N} |I_A + a^2 I_B + a I_C| = \frac{1}{\sqrt{3}I_N} \left| I_A \cdot e^{-j\frac{\pi}{3}} + I_C \right| \quad (32)$$

Factorii de dezechilibru

Urmărind conceptul adoptat pentru definirea factorilor de nesimetrie, dezechilibrul rețelelor se poate caracteriza obiectiv cu ajutorul componentelor simetrice de calcul ale impedanțelor schemelor echivalente în stea [PAV1], prin utilizarea *factorilor de dezechilibru de calcul* (în ipoteza absenței cuplajelor între faze):

$$k_{Z_+} = \frac{Z_+}{Z_0}; k_{Z_-} = \frac{Z_-}{Z_0} \quad (33)$$

unde Z_+ , Z_0 , Z_- , numite impedanțe de calcul pozitivă, negativă și respectiv zero (definite ξ_0, ξ_+, ξ_- de ecuațiile (18')), sunt componentele rezultate în urma aplicării matricei de transformare Fortescue matricei impedanțelor de fază.

3.2 Legătura dintre indicatorii de nesimetrie

O relație între indicatorii caracteristici ai regimului nesimetric se poate stabili plecând de la relația de determinare a căderii de tensiune la bornele schemei de secvență negativă a unui element de sistem:

$$\underline{U}_- = \underline{Z}_- \cdot \underline{I}_- \quad (34)$$

unde cu \underline{Z}_- s-a notat impedanța negativă a elementului [ANT1].

Aceasta reprezintă impedanța pe care elementul studiat o opune trecerii componentei negative a curenților când aceștia străbat circuitul (principiul de determinare dat în figura 1.b).

Comprimarea informației și creșterea gradului său de generalizare pot fi obținute prin utilizarea valorii relative a impedanței negative:

$$\underline{z}_- = \frac{\underline{Z}_-}{Z_c} = r_- + jx_- = z_- \cdot e^{j\varphi_{z_-}} \quad (35)$$

cu $Z_c = \frac{U_N^2}{S_N}$ - impedanță de calcul și φ_{z_-} - argumentul fazorului impedanță \underline{Z}_- .

Pentru elementele statice de sistem (fără piese în mișcare relativă unele față de altele), impedanțele pozitivă și negativă sunt egale între ele și au exact valoarea celor determinate în regim de scurtcircuit:

$$\underline{Z}_+ = \underline{Z}_- \Rightarrow z_- \cong 1 \text{ și } Z_- \approx Z_k \quad (36)$$

cu \underline{Z}_+ - impedanța pozitivă a elementului (figura 2.1.a) și Z_k impedanța de scurtcircuit a elementului

În cazul mașinilor electrice rotative, impedanțele, predominant inductive, diferă major în funcție de sensul de rotație al câmpului electromagnetic generat de mărimile de la borne.

Domeniul valorilor în care se încadrează impedanțele negative este considerabil mai mic decât cel corespunzător elementelor statice.

Pe baza definițiilor indicatorilor introduși, factorul de nesimetrie de tensiune se poate scrie sub forma:

$$\underline{k}_u = \frac{\underline{U}_-}{\underline{U}_+} = \frac{\underline{U}_N}{\sqrt{3}\underline{U}_+} \cdot \underline{z}_- \cdot k_I \quad (37)$$

O parte din literatura de specialitate [GIL1, VEM1] recomandă utilizarea unei relații de dependență între nesimetria de tensiune și curent care include valorile complexe ale indicatorilor:

$$\frac{\underline{k}_U}{\underline{k}_I} = \frac{\underline{Z}_-}{\underline{Z}_+} \quad (38)$$

cu \underline{Z}_+ - impedanța pozitivă a circuitului echivalent

Deși nu se menționează explicit, această formulare a relației de dependență se bazează exclusiv pe valori obținute din măsurători.

Dacă se ține cont de posibilitatea apariției în rețelele electrice simultan a regimurilor deformant și nesimetric, se mai pot defini [GOL1]:

- *Factorul de nesimetrie negativă de tensiune corespunzător armonicii fundamentale:*

$$k_{s1}^- = \frac{U_1^-}{U_1^+} \quad (39)$$

- *Factorul de nesimetrie negativă, respectiv zero de putere aparentă:*

$$k_{ss}^- = \left| \frac{S_-}{S_+} \right|; k_{ss}^0 = \left| \frac{S_0}{S_+} \right| \quad (40)$$

- *Factorul de distorsiune pentru sistemul de secvență pozitivă:*

$$k_d^+ = \frac{U_d^+}{\sqrt{(U^+)^2 - (U_0^+)^2}} \quad (41)$$

4 Standarde pentru limitarea și controlul nesimetriilor în sistemele electroenergetice

Preocuparea crescândă din ultimii ani, atât din partea consumatorilor, cât și din partea companiilor de electricitate, privind asigurarea calității energiei, s-a manifestat pe planuri multiple, acțiunile fiind concentrate în principal pe patru direcții:

- introducerea unor standarde și precizarea unor obligații din partea furnizorului, omogene și stabilite de o autoritate autonomă, care să protejeze consumatorul;
- promovarea calității prin stabilirea unor instrumente de comparație, dintre care cele mai utilizate rămân standardele generale, care pot fi completate însă de măsuri mai mult sau mai puțin radicale (conform concepției actuale, consumatorii care depășesc limitele de perturbații alocate sunt deconectați) sau de măsuri stimulative ca tarifele modulate;
- găsirea unor metode de măsură a indicatorilor de calitate comparabile și controlabile;
- îmbunătățirea metodelor de diseminare a informației referitoare la conținutul noilor standarde de calitate.

Contribuția standardelor la îmbunătățirea calității energiei este certificat de experiență. Standardele, normele, recomandările practice și ghidurile privind indicatorii de calitate ai energiei electrice urmăresc în general, introducerea unor mărimi de control și prescrierea

limitelor acestora, dar la fel de bine pot oferi o estimare cantitativă a celor mai grave situații apărute în practică sau pot indica procedeele de proiectare a echipamentelor și dispozitivelor de îmbunătățire a acestor indicatori. În funcție de prioritățile stabilite pe plan național, se pot impune cerințe suplimentare documentelor cu valabilitate internațională.

Problemele legate de calitatea energiei găsesc astfel o rezolvare graduală, prin propunerea unor standarde corespunzătoare.

Preocupările privind îmbunătățirea prescripțiilor incluse de acestea, departe de a fi finalizate, caută, prin valorile recomandate și metodele de evaluare a acestora, să stimuleze și nu să descurajeze părțile interesate să ia măsurile adecvate de îmbunătățire a indicatorilor.

Totuși, normele în vigoare nu au reușit deocamdată să ofere niște instrumente eficiente pentru reducerea satisfăcătoare a problemelor de calitate a energiei, mai ales în contextul nou creat de piețele libere de electricitate, fiind necesare documente noi sau îmbunătățiri ale celor existente, care să fie introduse ca și clauze în contractele încheiate între furnizor și consumator.

Standardele discutate în continuare, prezentate sumar în scopul unei comparații generale, precizează limitele factorului de nesimetrie de tensiune sau/și de curent, făcând precizări și asupra nivelelor admise pentru distorsiunile curenților și tensiunilor.

◆ EN 50160 [CEN1]

Această normă europeană (aplicabilă din 1995) are ca obiect definirea și descrierea caracteristicilor tensiunii furnizate în punctul de conectare al consumatorului, prin intermediul rețelelor de medie și joasă tensiune, în condiții normale de exploatare.

Referitor la nivelul de nesimetrie al tensiunilor, atât la joasă tensiune, cât și la medie tensiune (≤ 35 kV), standardul prevede ca în condiții normale de funcționare, pentru o perioadă predeterminată (o săptămână), 95% din valorile efective calculate pentru intervale de 10 min ale componentei negative a tensiunii de alimentare să nu depășească 0.2% din componenta pozitivă. În anumite porțiuni, unde alimentarea de pe linie se face monofazat sau bifazat, nivelul de nesimetrie negativă a tensiunilor trebuie să fie inferior valorii de 3%.

◆ Standardele de calitate a energiei IEC

Aceste documente au fost propuse ca urmare a întâlnirii de lucru a Comitetului de acțiune IEC din 1996, care a inițiat elaborarea de noi standarde și rapoarte tehnice referitoare la calitatea energiei în rețelele electrice de medie și joasă tensiune. Întâlnirile grupului de lucru IEC și-au stabilit un număr de obiective prioritare care includ și considerațiile asupra nivelelor de calitate a energiei, materializate într-un set de standarde IEC, publicate în seria IEC 1000-X-X, care prescriu nivelurile de compatibilitate pentru perturbații conduse, inclusiv armonici și nesimetria de tensiune, în rețelele de joasă și medie tensiune (IEC-2-4 [IEC1]).

În ceea ce privește regimul nesimetric, standardele IEC limitează nivelul de compatibilitate pentru factorul de tensiune în rețelele de joasă tensiune la 2%, iar pentru motoarele asincrone la 1% (în cazul depășirii impunând reevaluarea puterii nominale a mașinii).

◆ Norma UNIPEDA (DISNORM 12/1989)

Cuprinde definițiile caracteristicilor fizice ale energiei electrice livrată din sistemele publice la joasă și medie tensiune, precum și valori ale indicatorilor de calitate.

În ceea ce privește nesimetria (negativă) de tensiune, *nivelul de compatibilitate indicat* este de 2%.

◆ **PE 143-2001 [TRA1]**

Normativul românesc privind limitarea regimului nesimetric și periodic nesinusoidal în rețelele electrice definește parametrii ce caracterizează cele două regimuri, în concordanță cu normele din alte țări.

Sunt precizate valori ca de exemplu nivelurile de compatibilitate și de planificare ale tensiunilor armonice conform CEI 1000-3-6, dar și nivelul total admisibil al factorului de nesimetrie pentru *rețelele de distribuție* de 2% (CEI 1000-2-2).

Definițiile și limitele precizate sunt în concordanță cu normele europene, fiind corelate cu probabilitatea de realizare a valorilor *în 95% din intervalul de referință de o săptămână*.

Pentru acei consumatori care nu se încadrează în limitele admise se fac recomandări pentru limitarea regimului la care se face referire.

◆ **Standardele germane [DIN1, VDE1]**

Recomandă pentru factorul de nesimetrie de tensiune valori limită de 1% pentru regimurile de funcționare de lungă durată ale mașinilor electrice rotative, dar mult mai restrictive pentru rețele de distribuție (0,7%).

Pe de altă parte, valorile maxim admise pentru factorii de nesimetrie de curent la bornele mașinilor sincrone depind de tipul constructiv, trebuind menținuți la *valori inferioare lui 5 sau 8% pentru generatoare și 8 sau 10 % pentru motoare*.

Referitor la regimul nesimetric, normativele britanice și franceze actuale impun pentru rețelele de înaltă tensiune (132, 225, 400 kV) valori ale factorilor de nesimetrie de tensiune nu mai mari de 2, respectiv 1 %. Pe de altă parte, partea americană, reprezentată de ANSI și IEEE nu a prevăzut nici o astfel de limită. Totuși, ca o compensare, studiile recente conduse independent de ANSI, NEMA și IEC au propus ca limite de nesimetrie: factorul de nesimetrie permanentă de tensiune - 5% și factorul de nesimetrie permanentă de curent - 10%.

Principalul dezavantaj al acestor standarde de calitate a energiei este faptul că în general valorile indicate nu iau în considerare influența simultană și reciprocă dintre sistemul de alimentare și consumator (IEEE 519 Std. Include totuși o secțiune relativ nouă: caracteristicile răspunsului sistemului [MCA1]).

În cazul regimurilor nesinusoidal sau nesimetric, valorile indicatorilor sunt prescrise individual, fără considerarea efectului echivalent. Stabilirea unor limite de nesimetrie în cazul unui regim nesinusoidal ar permite determinarea unor regimuri de funcționare mai avantajoase pentru componentele sistemului.

Normele de calitate a energiei precizează în general aceleași nivele de compatibilitate ale factorilor de nesimetrie în rețelele de distribuție.