Curs 8

CONSIDERAŢII ŞI TEORII PRIVIND REGIMURILE NESIMETRICE

1 Definiţii

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

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

cu reprezentarea în complex de forma :

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

Aproape întreaga energie electrică din lume este produsă şi distribuită prin sisteme trifazate de curent alternativ, la frecvenţa de 50 sau 60 Hz. Circuitele trifazate reprezintă doar o configuraţie particulară a elementelor şi surselor de putere din aceste sisteme, fiind încadrate în cazul general al circuitelor polifazate. Utilizarea sistemelor trifazate a fost justificată de avantajele tehnice şi economice confirmate în ani de experienţă. 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 *reţea electrică* trifazată se spune că este *echilibrată* dacă impedanţele sale echivalente pe cele trei faze sunt identice, având module şi argumente egale.

Reţeaua electrică este în schimb *dezechilibrată* dacă cel puţin una din impedanţele complexe de fază diferă de celelalte două.

Dacă reţeaua electrică este dezechilibrată sau este alimentată de la surse de tensiune nesimetrice, vor fi generate perturbaţii sub formă de *nesimetrii*, *regimul de funcţionare* al reţelei fiind în acest caz *nesimetric*.

În literatura tehnică se întâlneşte aproape în egală măsură atât denumirea de sistem şi regim "nesimetric", cât şi cea de sistem şi regim "dezechilibrat". Deşi nu a fost luată o hotărâre definitivă la nivel internaţional privitoare la acest aspect, în unele ţări, se utilizează cu precădere termenii "simetric / nesimetric" atunci când fac referire la sistemele de mărimi electrice care se succed în timp (tensiuni şi curenţi) şi "echilibrat / dezechilibrat" când se discută despre mărimile care nu au această proprietate (impedanțe şi admitanțe), despre regimuri de funcționare sau puteri şi energii.

În cazul abordărilor clasice, nesimetria sistemelor electroenergetice trifazate reale se poate aprecia pe baza factorilor de nesimetrie, exprimați cu ajutorul componentelor simetrice.

2 Aplicabilitatea teoriei componentelor simetrice

Propusă în anul 1913 de Charles L. Fortescue şi dezvoltată ulterior în scopul analizei defectelor nesimetrice în sistemele trifazate de către C.F.Wagner şi R.D.Evans, metoda componentelor simetrice s-a dovedit esențială pentru înțelegerea şi 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 şi 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 şi-a dovedit aplicabilitatea şi în studiile de regim tranzitoriu.

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 şi zero:

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

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 $\underline{Y}_+$, $\underline{Y}_-$, $\underline{Y}_0$ 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.

$$[\mathbf{Y}] = [\mathbf{A}] \cdot [\mathbf{Y}_{\text{sim}}] \tag{4}$$

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;

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

matricea de transformare corespunzătoare (matricea Fortescue).

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

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

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 şi 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 şi independent unele de altele şi prezintă un comportament diferit în raport cu structura rețelei şi 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 şi liniile electrice de transport şi distribuție. Curenții şi tensiunile de secvență negativă şi zero sunt dealtfel 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.

Pe de altă parte, componentelor simetrice de curent şi de tensiune le corespund componente de putere de acelaşi fel, direct măsurabile şi având efecte diferite. Componenta pozitivă de putere îşi are sursa în generator, în timp ce componentele negativă şi zero sunt produse în punctul de dezechilibru şi 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.

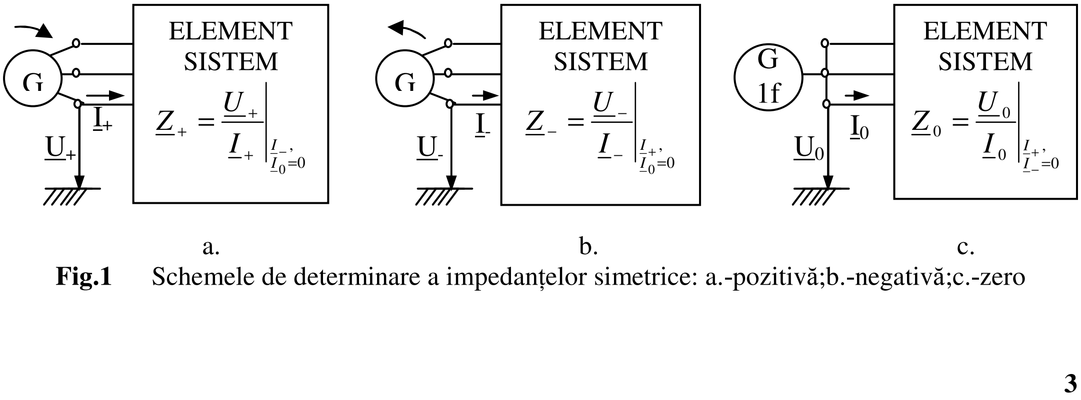


Fig.1 Schemele de determinare a impedanțelor simetrice: a.-pozitivă;b.-negativă;c.-zero

2.3 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 şi 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 priveşte 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. Deşi 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$\Rightarrow \underline{Y}_N \to 0$).

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 şi 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 aceeaşi secvență.

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

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C}{3} = 0 \tag{7}$$

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

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

$$\underline{I}_f^+ = \sqrt{3}\underline{I}_\ell^+ e^{-j\pi/6}; \quad \underline{I}_f^- = \sqrt{3}\underline{I}_\ell^- e^{j\pi/6} \tag{8}$$

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

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

$$\underline{U}_\ell^0 = \frac{\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA}}{3} = 0 \tag{9}$$

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

În plus,

$$\underline{U}_{\ell}^{+} = \sqrt{3}\underline{U}_{f}^{+} e^{j\pi/6}; \quad \underline{U}_{\ell}^{-} = \sqrt{3}\underline{U}_{f}^{-} e^{-j\pi/6} \tag{10}$$

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

$$\underline{Z}_{\Delta} \overset{def}{=} \frac{\underline{U}_{\ell}^{+}}{\underline{I}_{\ell}^{+}} = \frac{\underline{U}_{\ell}^{-}}{\underline{I}_{\ell}^{-}} \tag{11}$$

$$\underline{Z}_{Y} \overset{def}{=} \frac{\underline{U}_{f}^{+}}{\underline{I}_{f}^{+}} = \frac{\underline{U}_{f}^{-}}{\underline{I}_{f}^{-}} = \frac{\underline{Z}_{\Delta}}{3} \tag{12}$$

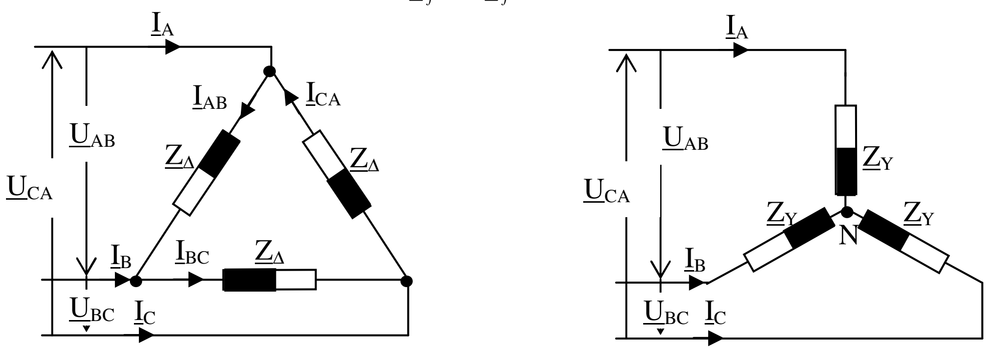


Fig.2 Conexiunile Δ și Y ale circuitelor simetrice

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

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 3\underline{I}_f^0 \tag{13}$$

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

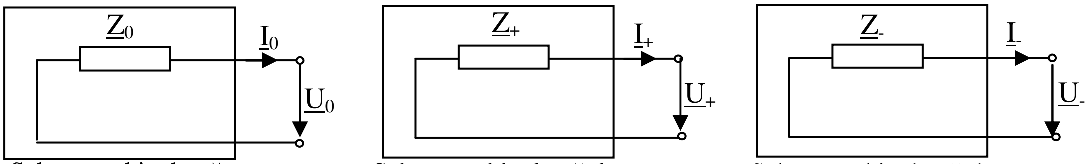
Curentul prin conductorul neutru determină o cădere de tensiune între neutru și pământ egală cu $\underline{U}_N = 3\underline{Z}_N \underline{I}_f^0$. Este important de aceea, să se facă o distincție clară între tensiunile față de pământ $\underline{U}_f$ și tensiunile față de punctul neutru $\underline{U}_{fN}$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

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_f^0 \\ \underline{U}_f^+ \\ \underline{U}_f^- \end{bmatrix} = \underline{Z}_Y \begin{bmatrix} \underline{I}_f^0 \\ \underline{I}_f^+ \\ \underline{I}_f^- \end{bmatrix} + 3\underline{I}_f^0 \underline{Z}_N \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_+ & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_- \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_f^0 \\ \underline{I}_f^+ \\ \underline{I}_f^- \end{bmatrix} \tag{14}$$

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

Reprezentarea rețelei inițiale poate fi făcută astfel, conform ec. (14), cu ajutorul a trei scheme de secvență monofazate, independente între ele.



Schema echivalentă de secvență zero

Schema echivalentă de secvență pozitivă

Schema echivalentă de secvență negativă

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 şi 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 şi 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 şi 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 rețelelor 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 şi negativă şi posibil zero;
ii) curenții de secvență negativă într-o rețea nesimetrică determină atât căderi de tensiune de secvență negativă, cât şi pozitivă şi 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:

$$\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{Z}_{AA}\underline{I}_A + \underline{Z}_{AB}\underline{I}_B + \underline{Z}_{AC}\underline{I}_C \\ \underline{U}_B &= \underline{Z}_{BA}\underline{I}_A + \underline{Z}_{BB}\underline{I}_B + \underline{Z}_{BC}\underline{I}_C \\ \underline{U}_A &= \underline{Z}_{CA}\underline{I}_A + \underline{Z}_{CB}\underline{I}_B + \underline{Z}_{CC}\underline{I}_C \end{aligned} \tag{15}$$

Aplicând descompunerea în componente simetrice mărimilor de fază, rezultă:

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 &= \underline{Z}_{00}\underline{I}_0 + \underline{Z}_{0+}\underline{I}_+ + \underline{Z}_{0-}\underline{I}_- \\ \underline{U}_+ &= \underline{Z}_{+0}\underline{I}_0 + \underline{Z}_{++}\underline{I}_+ + \underline{Z}_{+-}\underline{I}_- \\ \underline{U}_- &= \underline{Z}_{-0}\underline{I}_0 + \underline{Z}_{-+}\underline{I}_+ + \underline{Z}_{--}\underline{I}_- \end{aligned} \tag{16}$$

unde s-au utilizat notațiile:

$$\begin{array}{lll} \underline{Z}_{00}=\underline{\xi}_0+\underline{\mu}_0^1+\underline{\mu}_0^2; & \underline{Z}_{0+}=\underline{\xi}_-+\underline{\mu}_+^1+\underline{\mu}_{0+}^2; & \underline{Z}_{0-}=\underline{\xi}_++\underline{\mu}_-^1+\underline{\mu}_{0-}^2 \\ \underline{Z}_{+0}=\underline{\xi}_++\underline{a}^2\underline{\mu}_-^1+\underline{a}\underline{\mu}_{0-}^2; & \underline{Z}_{++}=\underline{\xi}_0+\underline{a}^2\underline{\mu}_0^1+\underline{a}\underline{\mu}_0^2; & \underline{Z}_{+-}=\underline{\xi}_-+\underline{a}\underline{\mu}_{0+}^1+\underline{a}\underline{\mu}_{0+}^2 \\ \underline{Z}_{-0}=\underline{\xi}_-+\underline{a}\underline{\mu}_+^1+\underline{a}^2\underline{\mu}_{0+}^2; & \underline{Z}_{-+}=\underline{\xi}_++\underline{a}^2\underline{\mu}_{0-}^1+\underline{a}^2\underline{\mu}_{0-}^2; & \underline{Z}_{--}=\underline{\xi}_0+\underline{a}\underline{\mu}_0^1+\underline{a}^2\underline{\mu}_0^2 \end{array} \tag{17}$$

$$\begin{array}{l} \underline{\xi}_0=\frac{1}{3}\left(\underline{Z}_{AA}+\underline{Z}_{BB}+\underline{Z}_{CC}\right);\ \underline{\xi}_+=\frac{1}{3}\left(\underline{Z}_{AA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{BB}+\underline{a}\underline{Z}_{CC}\right); \\ \underline{\xi}_-=\frac{1}{3}\left(\underline{Z}_{AA}+\underline{a}\underline{Z}_{BB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CC}\right); \end{array} \tag{17'}$$

$$\begin{array}{ll} \underline{\mu}_0^1=\frac{1}{3}\left(\underline{Z}_{BC}+\underline{Z}_{CA}+\underline{Z}_{AB}\right); & \underline{\mu}_0^2=\frac{1}{3}\left(\underline{Z}_{CB}+\underline{Z}_{AC}+\underline{Z}_{BA}\right) \\ \underline{\mu}_+^1=\frac{1}{3}\left(\underline{a}\underline{Z}_{BC}+\underline{Z}_{CA}+\underline{a}^2\underline{Z}_{AB}\right); & \underline{\mu}_+^2=\frac{1}{3}\left(\underline{a}\underline{Z}_{CB}+\underline{Z}_{AC}+\underline{a}^2\underline{Z}_{BA}\right) \\ \underline{\mu}_-^1=\frac{1}{3}\left(\underline{a}^2\underline{Z}_{BC}+\underline{Z}_{CA}+\underline{a}\underline{Z}_{AB}\right); & \underline{\mu}_-^2=\frac{1}{3}\left(\underline{a}^2\underline{Z}_{BC}+\underline{Z}_{CA}+\underline{a}\underline{Z}_{AB}\right) \\ \underline{\mu}_{0+}^1=\frac{1}{3}\left(\underline{a}^2\underline{Z}_{BC}+\underline{a}\underline{Z}_{CA}+\underline{Z}_{AB}\right); & \underline{\mu}_{0+}^2=\frac{1}{3}\left(\underline{a}^2\underline{Z}_{CB}+\underline{a}\underline{Z}_{AC}+\underline{Z}_{BA}\right) \\ \underline{\mu}_{0-}^1=\frac{1}{3}\left(\underline{a}\underline{Z}_{BC}+\underline{a}^2\underline{Z}_{CA}+\underline{Z}_{AB}\right); & \underline{\mu}_{0-}^2=\frac{1}{3}\left(\underline{a}\underline{Z}_{CB}+\underline{a}^2\underline{Z}_{AC}+\underline{Z}_{BA}\right) \end{array} \tag{17''}$$

Ecuațiile precedente pun în evidență faptul că cele trei scheme de secvență îşi pierd independența una față de celelalte, datorită impedanțelor mutuale nenule, a căror determinare nu face decât să conducă la creşterea complexității calculelor.

Dacă sistemul prezintă o simetrie totală, adică :
$\underline{Z}_{AA}=\underline{Z}_{BB}=\underline{Z}_{CC}$ şi $\underline{Z}_{AB}=\underline{Z}_{BC}=\underline{Z}_{CA}=\underline{Z}_{BA}=\underline{Z}_{CB}=\underline{Z}_{AC}$
sau chiar una ciclică :
$\underline{Z}_{AB}=\underline{Z}_{BC}=\underline{Z}_{CA}$ şi $\underline{Z}_{BA}=\underline{Z}_{CB}=\underline{Z}_{AC}$,
atunci matricea impedanțelor de secvență este diagonală :
$\underline{Z}_{0+}=\underline{Z}_{0-}=\underline{Z}_{+0}=\underline{Z}_{+-}=\underline{Z}_{-0}=\underline{Z}_{-+}=0$,
iar sistemul (16) va avea forma (14).

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) impedanțele prin care se caracterizează diferitele elemente ale sistemului în regim normal simetric sau tranzitoriu simetric sunt impedanțe de secvență pozitivă;

ii) impedanțele elementelor care nu prezintă cuplaje magnetice între faze nu depind de ordinea de secvență a fazelor curentului; în aceste condiții toate impedanțele 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 impedanțele pozitivă şi 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) maşinile electrice rotative sunt caracterizate de mobilitatea relativă a cuplajelor magnetice, impedanța lor pozitivă fiind de aceea diferită de cea negativă (ultima fiind întotdeauna mai mare);

v) valoarea impedanțelor de secvență zero depinde de modul de legare la pământ al punctelor neutre şi de conductorul de întoarcere;

vi) în sistemele trifazate, conductoarele neutre sunt parcurse de suma $3I_0$ a curenților de secvență zero ai fiecărei faze.

2.4 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 x 120^0) sunt nedefazate în timp, circulând ca nişte 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 şi armonicile de ordinul 3k±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±1 pot circula în linii şi în fazele separate ale triunghiului, în timp ce armonicile multiplu de 3 pot circula doar în interiorul triunghiului şi nu în sistem.

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 şi de furnizor sau utilizator. Acceptarea acestui compromis tehnico-economic este posibilă cu condiția ca definirea unor indicatori caracteristici şi 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 şi calculate cu o metodă precisă, dar simplă. Mai mult, evaluarea acestor indicatori trebuie să fie practică şi menită, alături de alte măsuri, să stimuleze şi 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 caliatate) ca raportul între valoarea efectivă a componentei negative sau zero a mărimii de stare urmărită şi cea a componentei pozitive (pe armonica fundamentală). În ipoteza unui regim sinusoidal, comparația poate să se bazeze la fel de bine şi 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.

3.1 Definiții ale indicatorilor

Factorul de nesimetrie de tensiune

Se defineşte:

- *Factorul de nesimetrie negativă de tensiune:*

$$k_{U_-} = \frac{U_-}{U_+} \tag{18}$$

- *Factorul de nesimetrie zero de tensiune:*

$$k_{U_0} = \frac{U_0}{U_+} \tag{19}$$

- *Factorul de nesimetrie complex de tensiune:*

$$\underline{k}_U = \frac{\underline{U}_-}{\underline{U}_+} = k_U \cdot e^{j\varphi_U} \tag{20}$$

Acest indicator 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 şi respectiv de linie, indicatorul de mai sus poate fi scris sub forma:

$$\underline{k}_U = \frac{\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C}{\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C} = \frac{\underline{U}_{AB} - a\underline{U}_{BC}}{\underline{U}_{AB} - a^2\underline{U}_{BC}} \tag{21}$$

Exprimarea conform ec. (21) are avantajul că permite determinarea rapidă a unui indicator de nesimetrie complet, doar prin măsurarea directă a tensiunilor de linie, chiar şi pentru sistemele cu neutrul neaccesibil.

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

$$k_U^2 = \frac{1-\sqrt{3-6u}}{1+\sqrt{3+6u}} \tag{22}$$

unde:

$$u = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{\left(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2\right)^2} \tag{23}$$

în timp ce argumentul poate fi extras din relația:

$$\varphi_{kU} = \arctan\sqrt{3}\,\frac{U_{AB}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}^2 + U_{CA}^2 - 2U_{BC}^2} \tag{24}$$

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

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 maşinile sincrone din centralele sistemului şi în convertoare.*

Factorul de nesimetrie de curent

În mod similar se vorbeşte despre:

- *Factorul de nesimetrie negativă de curent:*

$$k_{I-} = \frac{I_-}{I_+} \tag{25}$$

- *Factorul de nesimetrie zero de curent:*

$$k_{I0} = \frac{I_0}{I_+} \tag{26}$$

În cazul maşinilor 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 şi curentul nominal al maşinii:

$$k_I = \frac{I_-}{I_N} \tag{27}$$

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].

3.2 Indicatori de nesimetrie suplimentari

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

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

$$k_{s1}^- = \frac{U_1^-}{U_1^+} \tag{28}$$

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

$$k_d^+ = \frac{U_d^+}{\sqrt{\left(U^+\right)^2 - \left(U_0^+\right)^2}} \tag{29}$$

4 Standarde pentru limitarea şi controlul nesimetriilor în sistemele electroenergetice

Standardele discutate în continuare, precizează limitele factorului de nesimetrie de tensiune sau/şi de curent, făcând precizări şi asupra nivelelor admise pentru distorsiunile curenților şi tensiunilor.

- **EN 50160**

Referitor la nivelul de nesimetrie al tensiunilor, atât la joasă tensiune, cât şi 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 *depăşească 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**

În ceea ce priveşte 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 depăşirii impunând reevaluarea puterii nominale a maşinii).

- **Norma UNIPEDE (DISNORM 12/1989)**

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

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

- **PE 143-2001**

Normativul românesc precizează valorile nivelurilor de compatibilitate şi de planificare ale tensiunilor armonice conform CEI 1000-3-6, dar şi nivelul total admisibil al factorului de nesimetrie pentru *rețelele de distribuție* de *2%* (CEI 1000-2-2).

Definițiile şi 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.

Referitor la regimul nesimetric, normativele britanice şi franceze actuale impun pentru rețelelele 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 şi IEEE nu a prevăzut nici o astfel de limită. Totuşi, ca o compensare, studiile recente conduse independent de ANSI, NEMA şi IEC au propus ca limite de nesimetrie: factorul de nesimetrie permanentă de tensiune - 5% şi 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 şi reciprocă dintre sistemul de alimentare şi consumator (IEEE 519 Std. include totuşi o secțiune relativ nouă: caracteristicile răspunsului sistemului).
Normele de calitate a energiei precizează în general aceleaşi nivele de compatibilitate ale factorilor de nesimetrie în rețelele de distribuție.