

MIJLOACE DE SIMETRIZARE A SARCINII IN SISTEMELE ELECTROENERGETICE DEZECHILIBRATE

1. Simetrizarea curenților de sarcină

Atenuarea dezechilibrelor produse de sarcinile conectate în sistemele electroenergetice se înscrie în seria măsurilor adoptate pentru optimizarea funcționării acestora.

Soluția pentru problemele legate de apariția dezechilibrelor este fie una de natură organizatorică, constând în reconfigurarea schemelor rețelelor de alimentare, fie acționează direct asupra cauzei acestor perturbații: consumatorii dezechilibrați. În această variantă se urmărește instalarea unor scheme de simetrizare, a căror structură să echilibreze sarcina.

Dimensionarea acestor instalații trebuie să aibă în vedere și alte aspecte legate de calitatea și eficiența transmiterii energiei electrice la consumator, în vederea corelării cu măsurile suplimentare vizând aceste obiective sau pentru evitarea agravării acestora.

În scopul simetrizării curenților de sarcină se pot introduce la bornele de alimentare ale consumatorului, funcție de configurația rețelei, unul până la două compensatoare statice de putere reactivă (în conexiune Y și Δ), al căror rol este de a asigura o injecție de putere reactivă diferită pe fiecare fază, funcție de necesarul determinat prin măsurători. În prezența lor, sarcina văzută dinspre sistemul de alimentare apare echilibrată.

O bună dimensionare a compensatoarelor poate asigura în același timp și o compensare eficientă a puterii reactive.

1.1. Cazul consumatorilor dezechilibrați în rețele trifazate cu patru conductoare

Consumatorul trifazat, reprezentat prin admitanțele sale echivalente de fază \underline{Y}_{ABC}^C , se consideră alimentat de la o rețea electrică trifazată cu patru conductoare, caracterizată de un sistem de tensiuni sinusoidale simetrice \underline{U}_{ABC} (figura 1).

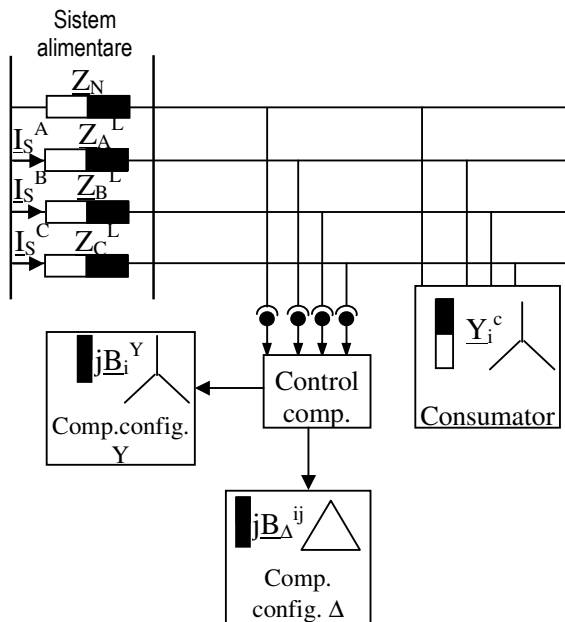


Fig.1. Alimentarea unui consumator trifazat dezechilibrat prevăzut cu compensatoare în conexiune Y și Δ

În această ipoteză, curenții de secvență la consumator pot fi descriși de ecuația matriceală:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_0^c \\ \underline{I}_+^c \\ \underline{I}_-^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_0^c \\ \underline{Y}_+^c \\ \underline{Y}_-^c \end{bmatrix} U \quad (1)$$

unde laturile admitanțele de secvență ale consumatorului sunt date de ecuațiile:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_0^{c \text{ not}} &= 1/3 \left[(G_A^c + \underline{a}^2 G_B^c + \underline{a} G_C^c) + j(B_A^c + \underline{a}^2 B_B^c + \underline{a} B_C^c) \right] \\ \underline{Y}_+^{c \text{ not}} &= 1/3 \left[(G_A^c + G_B^c + G_C^c) + j(B_A^c + B_B^c + B_C^c) \right] \\ \underline{Y}_-^{c \text{ not}} &= 1/3 \left[(G_A^c + \underline{a} G_B^c + \underline{a}^2 G_C^c) + j(B_A^c + \underline{a} B_B^c + \underline{a}^2 B_C^c) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Aplicarea unei descompuneri în componente simetrice curenților de fază prin cele două compensatoare pune în evidență relațiile între mărimile caracteristice de forma:

- compensatorul în schemă Y:

$$\begin{aligned} \underline{I}_0^Y &= j(B_A^Y + \underline{a}^2 B_B^Y + \underline{a} B_C^Y) U / 3 \\ \underline{I}_+^Y &= j(B_A^Y + B_B^Y + B_C^Y) U / 3 \\ \underline{I}_-^Y &= j(B_A^Y + \underline{a} B_B^Y + \underline{a}^2 B_C^Y) U / 3 \end{aligned} \quad (3)$$

- compensatorul în schemă Δ:

$$\begin{aligned} \underline{I}_0^\Delta &= 0 \\ \underline{I}_+^\Delta &= j(B_{AB}^\Delta + B_{BC}^\Delta + B_{CA}^\Delta) U \\ \underline{I}_-^\Delta &= j(\underline{a}^2 B_{AB}^\Delta + B_{BC}^\Delta + \underline{a} B_{CA}^\Delta) U \end{aligned} \quad (4)$$

Prin introducerea compensatoarelor se urmărește anularea componentelor de secvență negativă și zero ale curenților de sarcină. Anularea acestor componente se poate face fie prin conectarea în sistem a câte unui compensator, fie utilizându-le pe amândouă. Sub aspect matematic, aceste obiective pot fi reprezentate de ecuațiile:

$$\begin{aligned} \Re(\underline{I}_-^c + \underline{I}_-^Y + \underline{I}_-^\Delta) &= 0 \\ \Im(\underline{I}_-^c + \underline{I}_-^Y + \underline{I}_-^\Delta) &= 0 \\ \Re(\underline{I}_0^c + \underline{I}_0^Y) &= 0 \\ \Im(\underline{I}_0^c + \underline{I}_0^Y) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Cum prin aplicarea acestei soluții de simetrizare se acționează direct asupra circulației de putere reactivă în rețeaua de alimentare, o consecință firească este adaptarea acestor măsuri în direcția compensării puterii reactive în nodul de conectare al sarcinii. Acest criteriu completează, din punct de vedere matematic, sistemul nedeterminat (5), prin introducerea unei relații de forma:

$$\Im(\underline{I}_+^c + \underline{I}_+^Y + \underline{I}_+^\Delta) = 0 \quad (5')$$

Soluția sistemului de ecuații (5, 5') furnizează expresiile parametrilor (susceptanțelor) celor două compensatoare, ca funcții de evoluția în timp a mărimilor de stare la bornele sarcinii de simetrizat:

$$[\mathbf{B}] = [\mathbf{T}] \cdot [\mathbf{M}] \quad (6)$$

cu: $[\mathbf{B}] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} B_A^Y & B_B^Y & B_C^Y & B_{AB}^\Delta & B_{BC}^\Delta & B_{CA}^\Delta \end{array} \right]_t$ - vectorul coloană al susceptanțelor compensatoarelor;

$$[\mathbf{M}] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} P_A^c / (U_A^c)^2 & P_B^c / (U_B^c)^2 & P_C^c / (U_C^c)^2 & Q_A^c / (U_A^c)^2 & Q_B^c / (U_B^c)^2 & Q_C^c / (U_C^c)^2 \end{array} \right]_t$$

vectorul coloană al mărimilor de stare măsurate în nodul de conectare al sarcinii;

$[\mathbf{T}]$ – matricea de legătură susceptanțe / mărimi de stare măsurate, a cărei formă este determinată de aspectele urmărite prin adoptarea soluției de compensare.

Unicitatea soluției sistemului (5) poate fi determinată prin considerarea unui aspect suplimentar referitor la funcționarea ansamblului compensator-consumator și introducerea unei a 6-a ecuații corespondente.

Deși prezintă avantajul că nu depinde (direct) de tensiunile de alimentare, nu se recomandă o exprimare a susceptanțelor compensatoarelor funcție de admitanțele sarcinii, datorită variației continue a acestora pe perioada de timp urmărită. O alternativă care poate oferi posibilitatea realizării unei simetrizări în timp real, constă în determinarea susceptanțelor compensatoarelor pe baza valorilor tensiunilor și puterilor / curenților măsurate în nodul de alimentare a sarcinii.

Condiția suplimentară se poate referi la:

i) Eliminarea componentei imaginare a curentului de sarcină de secvență pozitivă de către un singur compensator, în timp ce al doilea nu produce deloc această componentă (ex. compensator-Y, respectiv -Δ).

Această condiție este descrisă de ecuația:

$$B_{AB}^\Delta + B_{BC}^\Delta + B_{CA}^\Delta = 0 \quad (7)$$

ii) Minimizarea pierderilor de putere determinate de compensatoare

Condiția suplimentară care rezultă din această ipoteză este ca suma pătratelor curenților compensatoarelor, c , să fie minimă (când se impune valoarea unuia dintre parametrii compensatoarelor, ex. B_A^Y):

$$c = \left[(B_A^Y)^2 + (B_B^Y)^2 + (B_C^Y)^2 + 3(B_{AB}^\Delta)^2 + 3(B_{BC}^\Delta)^2 + 3(B_{CA}^\Delta)^2 \right] U^2 \quad (8)$$

$$c = \min \Leftrightarrow \frac{dc}{dB_A^Y} = 0 \quad (8')$$

iii) Dimensionarea economică a compensatoarelor

Pentru această ipoteză se urmărește minimizarea puterilor neactive la compensatoare, considerându-se și de această dată valoarea unuia dintre parametrii compensatoarelor ca referință (ex. B_A^Y):

$$q = \left[(B_A^Y)^2 + (B_B^Y)^2 + (B_C^Y)^2 + 9(B_{AB}^\Delta)^2 + 9(B_{BC}^\Delta)^2 + 9(B_{CA}^\Delta)^2 \right] U^4 \quad (9)$$

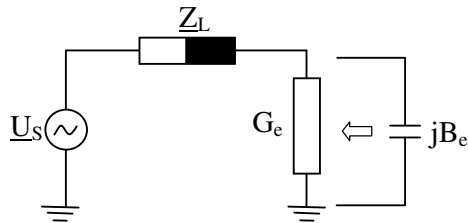
$$\frac{dq}{dB_A^Y} = 0 \quad (9')$$

Parametrii compensatorului în schemă triunghi respectă aceeași lege de variație ca și în cazul ii).

iv) Reglajul tensiunii

Dimensionarea elementelor compensatoarelor conform acestei condiții urmărește ca acestea să asigure, pe lângă simetrizarea curenților de sarcină și creșterea factorului de putere și anularea pierderilor de tensiune pe rețeaua de alimentare a consumatorului.

Ansamblul compensatoare-consumator (figura 6.2) se comportă ca un consumator echilibrat cu conductanța echivalentă G_e :



$$G_e \stackrel{def}{=} \frac{1}{3} (G_A^c + G_B^c + G_C^c) \quad (10)$$

Fig.6.2. Schema echivalentă a sistemului după compensare

1.2. Cazul consumatorilor dezechilibrați în rețele trifazate cu trei conductoare

Strategia anterioară de simetrizare a curenților de sarcină poate fi adoptată și în acest caz (fig.3.a), ținând cont de particularitățile de funcționare ale consumatorilor conectați în cadrul acestor rețele. Schema de compensator adoptată în acest caz poate fi în general, una în configurație triunghi.

i) Simetrizarea curenților de sarcină

În condițiile în care se urmărește doar simetrizarea curenților de sarcină, schemele adoptate pentru echilibrarea sarcinii pot fi de tip Steinmetz sau vor conține doar două bobine, dimensionarea lor realizându-se conform aceluiași principiu ca și pentru un consumator bifazat de simetrizat (figura 3.b).

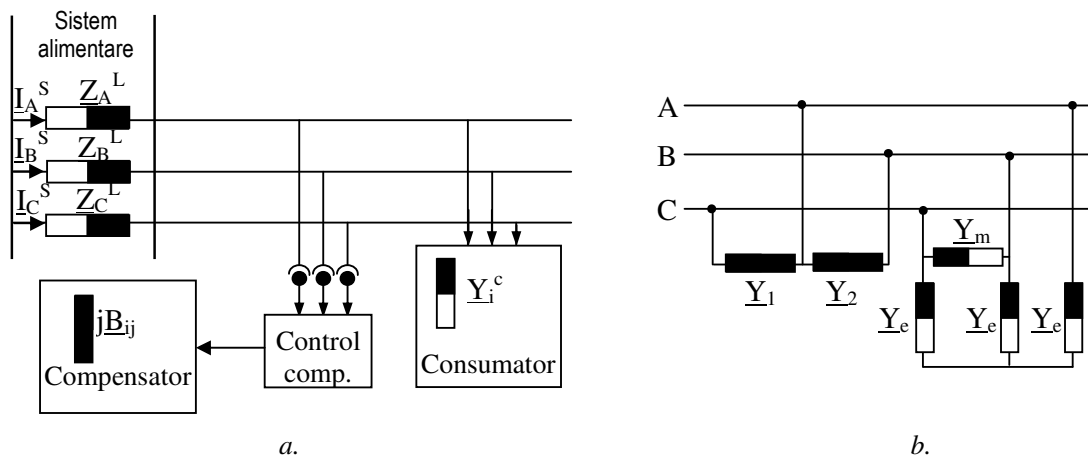


Fig.3. Alimentarea unui consumator trifazat dezechilibrat prevăzut cu compensator de simetrizare a curenților: a – structura ansamblului consumator-compensator; b – schema electrică echivalentă

Cele două elemente ale compensatorului pot fi amplasate pe laturile complementare celei atașate conductanței de sarcină monofazate echivalente astfel încât în ansamblu, această configurație să determine anularea componentei negative de curent (pentru acest tip de rețea $I_0 = 0$).

Condiția de dimensionare a compensatorului presupune anularea componentei negative de curent:

$$\begin{aligned}\Re(\underline{I}_-) &= 0 \\ \Im(\underline{I}_-) &= 0\end{aligned}\quad (11)$$

astfel încât parametrii compensatorului vor fi dați de relațiile:

$$\begin{aligned}B_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}}G_m + B_m \\ B_2 &= -\frac{1}{\sqrt{3}}G_m + B_m\end{aligned}\quad (12)$$

unde: $G_m = \Re Y_m$; $B_m = \Im Y_m$.

Separând sarcina monofază echivalentă de restul componentelor care definesc consumatorul dezechilibrat și integrând-o în ansamblul care conține elementele compensatorului se obține o configurație similară compensatorului Δ pentru anularea componentelor simetrice, pentru care componentele de fază ale curenților pot fi definite conform unor relații de forma:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A^{ce} &= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{3}(I_{1,a} + I_{2,a}) - I_{1,r} + I_{2,r} + j \left[-I_{1,a} + I_{2,a} + \sqrt{3}(-I_{1,r} - I_{2,r}) \right] \right\} \\ \underline{I}_B^{ce} &= \frac{1}{2} \left[-\sqrt{3}I_{2,a} - 2I_{2,r} - 2I_{m,r} + j(-I_{2,a} + \sqrt{3}I_{2,r} - 2I_{m,a}) \right] \\ \underline{I}_C^{ce} &= \frac{1}{2} \left[-\sqrt{3}I_{1,a} - I_{1,r} + 2I_{m,r} + j(I_{1,a} + \sqrt{3}I_{1,r} + 2I_{m,a}) \right]\end{aligned}\quad (13)$$

unde \underline{I}_i^{ce} - curenții de fază ai ansamblului compensator – sarcină echivalentă monofază;
 I_{1a} , I_{1r} , I_{2a} , I_{2r} , I_{ma} , I_{mr} - componentele activă, respectiv reactivă ale curenților pe laturile ansamblului compensator – sarcină echivalentă monofază.
 Consumul de putere activă pe fiecare fază a subansamblului precizat este:

$$\begin{aligned}P_A^{ce} &= \frac{1}{2}U_+ \left[\sqrt{3}(I_{1,a} + I_{2,a}) - I_{1,r} + I_{2,r} \right] \\ P_B^{ce} &= \frac{1}{2}U_+ \left[-\sqrt{3}(I_{2,a} - 2I_{m,r}) - I_{2,r} \right] \\ P_C^{ce} &= \frac{1}{2}U_+ \left[-\sqrt{3}I_{1,a} + I_{1,r} + 2I_{m,r} \right]\end{aligned}\quad (14)$$

putându-se observa că puterea activă corespunzătoare este nulă: $P_A^{ce} + P_B^{ce} + P_C^{ce} = 0$.

În prezența compensatorului, consumatorul privit dinspre sursă se comportă ca unul echilibrat, absorbind pe fazele rețelei o putere activă totală:

$$P_{tot} = P_A + P_B + P_C = 3G_e U_+^2 \quad (15)$$

Grupul compensator-sarcină echivalentă monofază realizează, pe ansamblul celor trei faze ale rețelei, o redistribuire a puterilor active, fără să determine o modificare a sensului de circulație a acestora, dinspre consumatorul dezechilibrat spre celelalte componente echilibrate ale rețelei. Ansamblul compensator-consumator dezechilibrat absoarbe doar puterea activă necesară acoperirii consumului pe sarcina trifază echivalentă simetrică. Concluzia este aplicabilă și în cazul puterilor reactive în nodul de conectare al ansamblului consumator dezechilibrat-compensator.