

1. REPREZENTAREA NESIMETRIILOR

1.1. TIPURI DE NESIMETRII ÎN SISTEMELE ELECTROENERGETICE

Fie că sunt de natură funcțională sau sunt generate la nivel structural al sistemelor electroenergetice, sursele problemelor legate de calitatea energiei electrice perturbă, în general concomitent, regimurile definite prin proiectare ca normale, cum ar fi cel *simetric* sau cel sinusoidal, putând fi împărțite în mai multe categorii:

- sarcinile, echipamentele și componentele de sistem actuale;
- subsistemele de transport și distribuție a puterii (în funcție de modul de tratare a neutrului).

În funcție de natura cauzei care le-a determinat, dezechilibrele într-un sistem electroenergetic pot fi *temporare* sau *permanente*.

Regimul dezechilibrat *temporar* se datorează influenței asupra sistemului a unor defecte de natură diferită (scurt-circuite sau întreruperi nesimetrice) sau introducerii accidentale în rețea a unor elemente nesimetrice și dispare odată cu dispariția cauzei care l-a generat. Studiul său prezintă interes pentru teoria și concepția dispozitivelor de protecție, precum și în cazul studiilor de stabilitate.

Regimul dezechilibrat *permanent* apare atunci când rețeaua este încărcată nesimetric, ca urmare a unei repartii defectuoase a sarcinii pe cele trei faze. Gradul de dezechilibru în acest caz este în general mic, putând atinge însă valori importante în cazul unor consumatori industriali monofazați de putere mare. Deși ponderea consumatorilor industriali este majoră (cuptoare cu arc, instalațiile de sudură, tracțiunea electrică feroviară etc.), nu trebuie neglijat nici aportul, din ce în ce mai semnificativ, al consumatorilor casnici monofazați. De asemenea, unele elemente de transfer al energiei electrice prezintă impedențe diferite pe faze, ca urmare a faptului că cele trei conductoare de fază au poziții relative unele față de altele sau față de pământ inegale (liniile electrice netranspuse, rețelele de bare conductoare, rețelele scurte ale cuptoarele electrice etc.).

1.2. MODELE DE REPREZENTARE ÎN COMPONENTE SIMETRICE ALE ELEMENTELOR DE REȚEA

1.2.1. Sarcini echilibrate

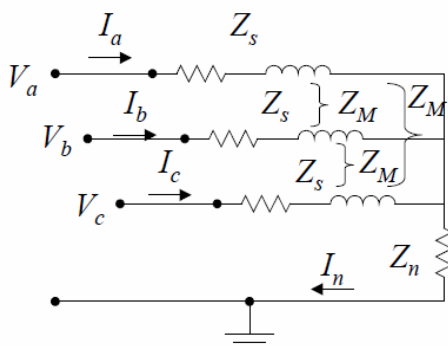


Fig.1. Schema electrică echivalentă trifazată a unei sarcini echilibrate

cu ecuațiile echivalente:

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_S + Z_n & Z_M + Z_n & Z_M + Z_n \\ Z_M + Z_n & Z_S + Z_n & Z_M + Z_n \\ Z_M + Z_n & Z_M + Z_n & Z_S + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{V}_{abc} = \mathbf{Z}_{abc} \cdot \mathbf{I}_{abc} \quad (1')$$

Aplicând descompunerea în componente simetrice rezultă:

$$\mathbf{V}_{0+-} = \mathbf{Z}_{0+-} \cdot \mathbf{I}_{0+-} \quad (2)$$

cu impedanța echivalentă în componente simetrice:

$$\mathbf{Z}_{0+-} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s + 3\underline{Z}_n + 2\underline{Z}_M & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_s - \underline{Z}_M & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_s - \underline{Z}_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2.2. Linii electrice

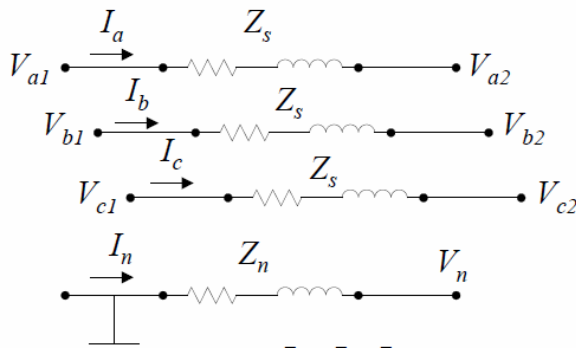


Fig.2. Schema electrică echivalentă trifazată a unei linii electrice

$$\underline{I}_n + \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$$

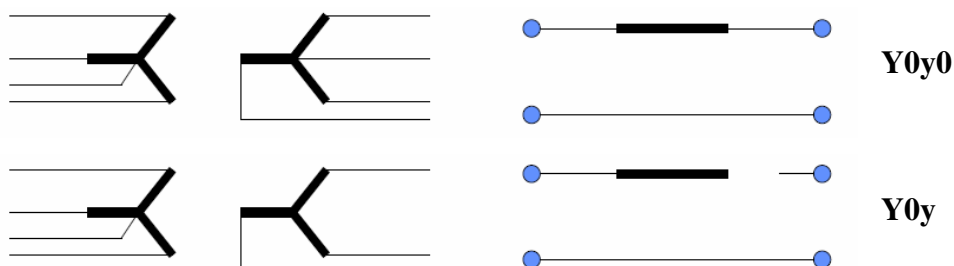
$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_S + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_S + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_S + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

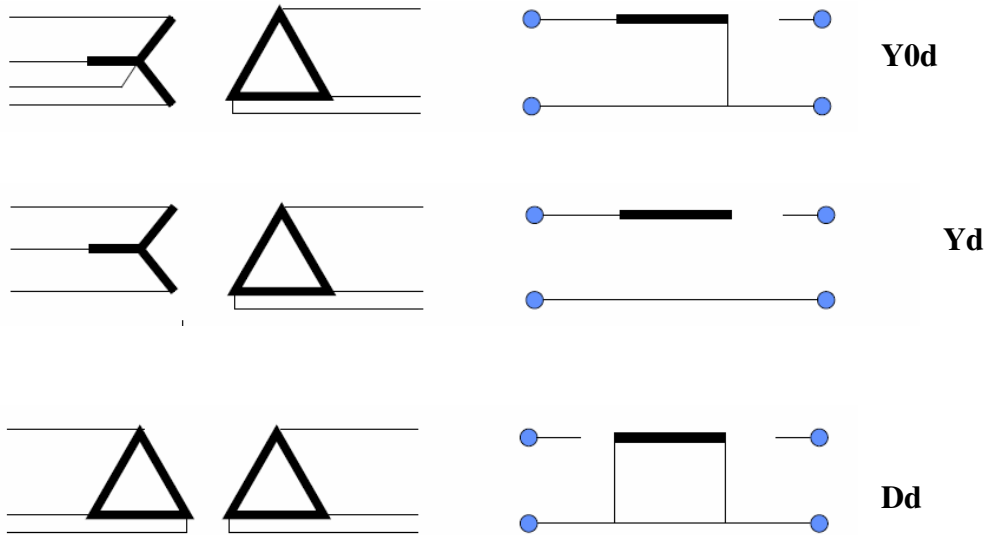
$$\mathbf{V}_{abc1} = \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{I}_{abc} + \mathbf{V}_{abc2}$$

Rezultă:

$$\mathbf{Z}_{0+-} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Z}_{abc} \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s + 3\underline{Z}_n & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_s & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2.3. Transformatoare cu două înfășurări





1.3. MODELE DE REPREZENTARE ÎN COMPONENTE SIMETRICE ALE CONSUMATORILOR DEZECHILIBRAȚI

O descriere cât mai fidelă a comportamentului, structurii și răspunsului elementului *consumator* presupune utilizarea unei combinații de modele elementare pentru aproximarea acestuia în cadrul analizei unui anume regim de funcționare.

Pentru reprezentarea unui consumator trifazat dezechilibrat se poate utiliza un model generalizat, obținut prin asocierea a nouă modele elementare de sarcină, reprezentând cererea de consum funcție de tensiune. Pe fiecare fază este dispus câte un model de sarcină $P=ct.$, unul $I=ct.$ și unul $Z=ct.$ Pentru simplificarea analizei, modelele reprezentate mai jos pot fi integrate în cadrul unor algoritmi de circulație de sarcină fie doar ca modele de tip $P=ct.$, fie ca o combinație $P=ct., Z=ct.$

1.3.1. Conversoare de componente simetrice

Consumatorii dezechilbrați au caracteristici care pot influența întregul sistem care îi include. O particularitate interesantă a acestora a fost pusă în evidență de Profesorul A.Țugulea, care le-a caracterizat comportamentul ca fiind similar celui al unor *convertoare de componente simetrice*. Conform teoriei Profesorului Țugulea, dacă aceste receptoare sunt alimentate de la o sursă de putere foarte mare, ce generează un sistem de t.e.m. simetrice de secvență pozitivă, ele vor primi putere doar pe componenta simetrică pozitivă. Doar o parte din această putere este destinată consumului propriu, restul fiind convertită în componente negative și zero de putere, care vor alimenta ceilalți consumatori echilbrați din sistem.

Indiferent de natura nesimetriilor dintr-un sistem care funcționează în regim sinusoidal, puterea aparentă, și corespunzător puterile activă și reactivă, se pot separa în trei componente corespunzătoare componentelor simetrice de secvență, astfel încât, bilanțul puterilor pentru

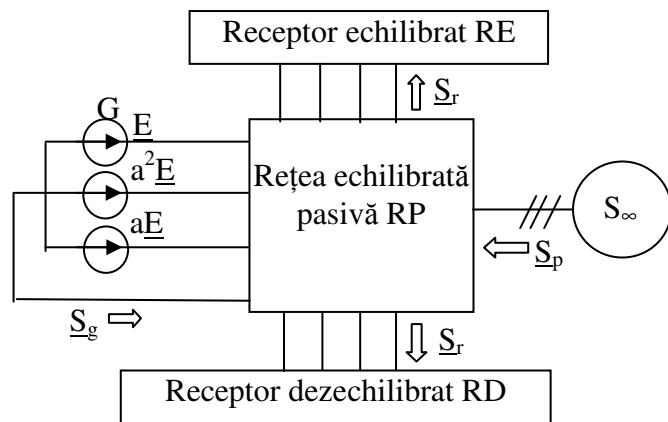


Fig.3. Schema de principiu a unui subsistem cu un receptor echilibrat și unul dezechilibrat, alimentați de la un generator și un sistem de putere infinită

componentele definite se poate scrie sub forma:

$$\underline{S}_g^k + \underline{S}_p^k = \underline{S}_{rd}^k + \underline{S}_{re}^k + \underline{S}_{rp}^k \quad (6)$$

unde indicii desemnează:

$k=0, +, -$ indicele de secvență (zero, pozitivă, negativă);

g - puterile debitate de generatoare;

p - puterea debitată de sistemul de putere infinită;

re, rd - puterile primite de receptori (echilibrați, respectiv dezechilibrați);

rp - puterea absorbită de rețeaua electrică de transmisie.

În ipoteza în care generatoarele și sursele de putere infinită din sistem generează doar puteri de simetrie, relația (6) se poate rescrie sub forma:

$$\begin{aligned} \underline{S}_g + \underline{S}_p &= \underline{S}_{sg} + \underline{S}_{sp} = \underline{S}_{sre} + \underline{S}_{srd} + \underline{S}_{srp} \\ \underline{S}_{nrd} &= -(\underline{S}_{nre} + \underline{S}_{nrp}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{rd} &= \underline{S}_{srd} + \underline{S}_{nrd} \\ P_g + P_p &= P_{sg} + P_{sp} = P_{sre} + P_{srd} + P_{srp} \\ P_{nrd} &= -(P_{nre} + P_{nrp}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_{rd} &= P_{srd} + P_{nrd} \\ Q_g + Q_p &= Q_{sg} + Q_{sp} = Q_{sre} + Q_{srd} + Q_{srp} \\ Q_{nrd} &= -(Q_{nre} + Q_{nrp}) \end{aligned} \quad (8')$$

$$Q_{rd} = Q_{srd} + Q_{nrd}$$

pentru care s-au definit puterile corespunzătoare secvenței pozitive *puteri de simetrie* (indicele s), iar cele corespunzătoare secvențelor negativă și zero *puteri de nesimetrie* (indicele n).

Diagrama circulației puterilor definite este reprezentată în figura 4.

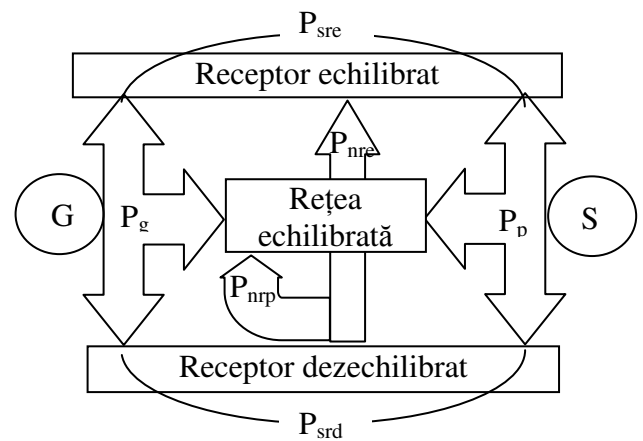


Fig.4. Diagrama fluxurilor de energie

Receptorul dezechilibrat primește de la sursele din sistem puterea \underline{S}_{srd} , din care consumă doar puterea \underline{S}_{rd} , surplusul \underline{S}_{nrd} fiind retrocedat rețelei pentru acoperirea puterilor de nesimetrie "consumate" de partea echilibrată a acesteia.

1.3.2. Modelarea consumatorilor trifazați dezechilibrați cu ajutorul sarcinilor monofazate echivalente

Metoda pornește de la reprezentarea, în termeni de admitanțe de fază, a sarcinilor trifazate și se dezvoltă pe *ideea evaluării gradului de dezechilibru al acestora cu ajutorul unei sarcini monofazate echivalente, suprapusă peste o alta trifazată echilibrată*.

Orice consumator nesimetric reprezintă un caz generic de nesimetrie transversală, putând fi echivalat cu ajutorul unei **conexiuni stea** sau **triunghi** de admitanțe inegale pe cele trei faze.

Se poate demonstra echivalența între reprezentarea standard în termeni de admitanțe a unei sarcini trifazate nesimetrice în conexiune stea sau triunghi și cea a corespunzătoare conexiunii într-un nod comun a unei sarcini monofazate conectate între două faze ale sistemului (nesimetrie transversală, caracterizată de \underline{Y}_m) și a unei trifazate simetrice, dată de \underline{Y}_e (fig.5.b).

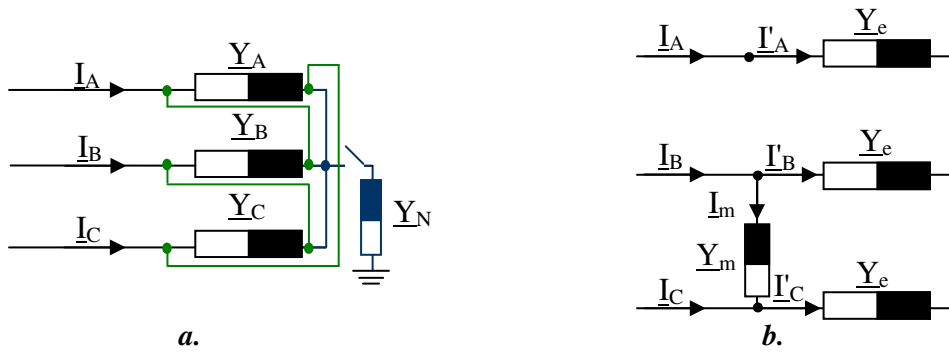


Fig.5. Reprezentarea sarcinilor trifazate dezechilibrate: a. reprezentare standard în termeni de admitanțe; b. modelul echivalent al sarcinii monofazate

Fiecărui caz de alimentare îi corespunde o relație de corespondență între cele două reprezentări echivalente de tipul (25), cu termeni matriceali definiți de natura conexiunii.

$$[\mathbf{I}_n] = [\mathbf{Y}_{n,dez}] \cdot [\mathbf{U}_n] = [\mathbf{Y}_{n,echiv}] \cdot [\mathbf{U}_n] \quad (9)$$

cu $[\mathbf{I}_n]$, $[\mathbf{U}_n]$ – vectorul coloană al curenților, respectiv tensiunilor în nodurile de intrare ale modelului;

$[\mathbf{Y}_{n,dez}]$ – matricea admitanțelor nodale ale sarcinii dezechilibrate;

$[\mathbf{Y}_{n,echiv}]$ – matricea admitanțelor nodale ale modelului echivalent.

În plus, fiecărei situații considerate i se alocă un set propriu de termeni matriceali implicați în reprezentarea modelului în termeni de componente simetrice.

$$[\mathbf{I}_{sim}] = [\mathbf{Y}_{sim}] \cdot [\mathbf{U}_{sim}] \quad (10)$$

cu $[\mathbf{I}_{sim}]$, $[\mathbf{U}_{sim}]$ – vectorii coloană ai componentelor simetrice de curent, respectiv de tensiune ai modelului trifazat;

$[\mathbf{Y}_{sim}]$ – matricea admitanțelor de succesiune.

În ipoteza în care alimentarea sarcinii se face, direct de la sistemul de alimentare, cu tensiuni simetrice ($\underline{U}_A = \underline{U}_+$; $\underline{U}_- = \underline{U}_0 = 0$), comportamentul acesteia poate fi descris de o ecuație matriceală de forma (9), ai cărei termeni sunt dați după cum urmează:

$$[\mathbf{I}_n]^{not} = [\underline{I}_A \quad \underline{I}_B \quad \underline{I}_C]_t \quad (11)$$

$$[\mathbf{U}_n]^{not} = [\underline{U}_A \quad \underline{U}_B \quad \underline{U}_C]_t = [\underline{U}_A \quad a^2 \cdot \underline{U}_A \quad a \cdot \underline{U}_A]_t \quad (12)$$

$$[\mathbf{Y}_{n,dez}] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_A & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_B & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_C \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[\mathbf{Y}_{n,echiv}] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_e & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_e + \underline{Y}_m & -\underline{Y}_m \\ 0 & -\underline{Y}_m & \underline{Y}_e + \underline{Y}_m \end{bmatrix} \quad (13')$$

Scierea în termeni de componente simetrice este caracterizată de:

$$[\mathbf{I}_{sim}] = [\underline{I}_0 \quad \underline{I}_+ \quad \underline{I}_-]_t \quad (14)$$

$$[\mathbf{U}_{sim}] = [0 \quad \underline{I}_+ \quad 0]_t \quad (15)$$

$$[\mathbf{Y}_{sim}] = \begin{bmatrix} \underline{Y}_e & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_e + \underline{Y}_m & -\underline{Y}_m \\ 0 & -\underline{Y}_m & \underline{Y}_e + \underline{Y}_m \end{bmatrix} \quad (16)$$

În situația considerată, componentele simetrice de curent prin rețeaua care alimentează sarcina echivalentă pot fi descrise de ecuațiile:

$$\begin{cases} \underline{I}_+ = (\underline{Y}_e + \underline{Y}_m)\underline{U}_+ \\ \underline{I}_- = -\underline{Y}_m\underline{U}_+ \end{cases} \quad (17)$$

care determină o conexiune între coordonatele simetrice ale schemei echivalente de forma celei din figura 7.

Relația de dependență între valorile admitanțelor celor două reprezentări este dată sub forma:

$$\begin{aligned} \underline{Y}_e &= \frac{2\underline{Y}_A - \underline{a}^2\underline{Y}_B - \underline{a}\underline{Y}_C}{3} = -\underline{a}^2\underline{Y}_B - \underline{a}\underline{Y}_C = \underline{Y}_A \\ \underline{Y}_m &= -\frac{\underline{Y}_A + \underline{a}\underline{Y}_B + \underline{a}^2\underline{Y}_C}{3} = \frac{\underline{a}^2(\underline{Y}_C - \underline{Y}_B)}{\underline{a} - 1} = \frac{\underline{a}(\underline{Y}_B - \underline{Y}_A)}{\underline{a} - 1} \end{aligned} \quad (18)$$

Același principiu de echivalare poate fi adoptat și în **cazul conexiunii Y cu neutrul legat la pământ** și al **conexiunii Δ** sau pentru consumatorii conectați în secundarul stațiilor proprii de alimentare. În această situație ultim menționată, legătura între schemele de succesiune trebuie să țină cont și de tipul conexiunii transformatoarelor care echipează aceste stații. Indiferent de nivelul de nesimetrie al consumatorilor sau de tipul acestora, prin adoptarea modelului sarcinii monofazate echivalente se generează un model integrat transformator-consumator, cu ajutorul căruia se poate determina direct nivelul de încărcare al fazelor rețelei de alimentare în nodul de conectare al stației.

3. CAUZELE REGIMULUI NESIMETRIC

Regimul nesimetric permanent poate fi determinat de:

- sarcinile inegale pe cele trei faze ale rețelei de alimentare de tensiune alternativă trifazată;
- receptoarele monofazate repartizate inegal pe cele trei faze (iluminat stradal, consumatori casnici etc.);
- receptoare bifazate (aparate de sudare electrică, cuptoare electrice de inducție la frecvență industrială, tracțiune electrică etc.);
- receptoare trifazate dezechilibrate (cupatoare cu arc electric);
- impedanțe diferite ale liniilor electrice pe cele trei faze (în special liniile electrice aeriene).

4. EFECTELE REGIMULUI NESIMETRIC

4.1. Influențe asupra consumatorilor

În cazul consumatorilor, influența regimurilor nesimetrice prezintă aspecte specifice în funcție de unele caracteristici ale receptoarelor alimentate. Astfel, prezența la bornele mașinilor rotative a unor tensiuni nesimetrice conduce, chiar pentru o componentă de secvență negativă de valoare scăzută, la o creștere considerabilă a pierderilor de putere activă, ceea ce are ca efect încălzirea suplimentară a înfășurărilor și a diferitelor părți ale statorului și ale rotorului. Creșterea temperaturii afectează izolația înfășurărilor; de exemplu, prin creșterea temperaturii cu 8°C, durata de viață a izolației de clasă A a înfășurărilor scade la jumătate. Prin construcție, motoarele asincrone prezintă o impedanță de secvență negativă comparabilă cu impedanța în regim de pornire, ea fiind de circa 5 ori mai mare decât impedanța de

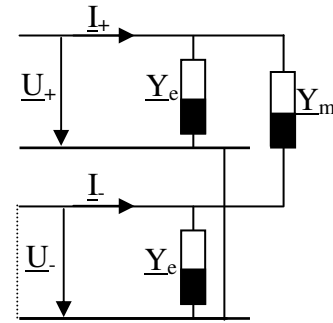


Fig.6. Conexiunea schemelor de succesiune pentru modelul sarcinii monofazate echivalente

secvență pozitivă. Ca urmare, un motor asincron alimentat cu tensiuni nesimetrice absoarbe un curent de secvență negativă important, care va determina:

- încălzirea suplimentară a statorului și a rotorului;
- diminuarea puterii disponibile, a cuplului util și a duratei de viață.

Parametru	Nesimetria tensiunilor (%)			
	0	2	3,5	5
Curentul de secvență negativă, (%)	0	15	27	38
Curentul din stator, (%)	100	101	104	107,5
Creșterea pierderilor, (%)				
- medie în stator	0	2	8	15
- maximă				
- în stator	0	33	63	93
- în rotor	0	12	39	76
- în general, în motor	0	8	25	50
Creșterea temperaturii, (oC)				
- Clasă A	60	65	75	90
- Clasă B	80	86	100	120

Având în vedere aspectele menționate anterior, producătorii de mașini electrice recomandă reducerea corespunzătoare a gradului de încărcare al mașinii ($\beta = P/P_n$ pentru mașini rotative, respectiv $\beta = S/S_n$ pentru transformatoare) odată cu creșterea gradului de nesimetrie.

- Importante efecte negative apar și în cazul alimentării cu tensiuni nesimetrice a *bateriilor de condensatoare*. Deoarece puterea reactivă pe fiecare fază depinde de pătratul tensiunii aplicate

$$Q_f = \frac{U_f^2}{X_C}$$

Bateria de condensatoare, racordată la o rețea cu tensiune nesimetrică, contribuie ea însăși la agravarea nesimetriei având în vedere faptul că pe faza cea mai încărcată (cu tensiunea pe fază cea mai mică) va fi debitată cea mai redusă putere reactivă și deci cea mai redusă îmbunătățire a factorului de putere.

Nesimetria tensiunilor trifazate poate fi determinată și de defazaje diferite de $2\pi/3$ între tensiunile de fază. În acest caz, se constată o perturbare a funcționării convertoarelor statice de putere (tiristoare cu comandă pe fază) rezultând o funcționare nesincronizată a tiristoarelor din schema redresorului comandat.

Analiza armonică a curenților absorbiți din rețeaua de alimentare pune în evidență următoarele:

- în afara armonicilor caracteristice (de rang $k = p \cdot m \pm 1$ $m = 1, 2, \dots$) apar și armonici necaracteristice (de exemplu, în cazul unui redresor cu 6 pulsuri, curentul de intrare conține armonici de rang $k = 6m + 3$, $m = 0, 1, 2, \dots$);
- valorile efective ale componentelor armonice diferă atât față de cazul alimentării cu tensiuni simetrice cât și între cele trei faze;
- rezultă nesimetria curenților absorbiți, aceasta fiind mai importantă pentru armonicile necaracteristice (de exemplu, coeficientul de nesimetrie variază între 50% - 100% pentru armonica de rang 3 față de 10 - 20% pentru armonicile caracteristice de rang 5 și 7).

Nesimetria curenților de linie determină pierderi suplimentare de putere

$$\frac{\Delta P_{nes}}{\Delta P} = 1 + (k_I^-)^2 + (k_I^0)^2 (1 + 3 \cdot R_n / R)$$

Dacă se presupune că defazajele între curenți sunt egale și că $R = Rn$, relația anterioară poate fi pusă sub forma

$$\frac{\Delta P_{nes}}{\Delta P} = 1 + 5 \cdot (k_I^-)^2$$

4.2. Influențe asupra sistemului energetic

Pentru furnizorii de energie electrică, existența regimului dezechilibrat provoacă efecte asupra mașinilor sincrone, a transformatoarelor și bateriilor de condensatoare, determină creșterea consumului propriu tehnologic și influențează negativ funcționarea sistemului de protecție.

O deosebită importanță o are influența nesimetriei tensiunilor asupra regimurilor de funcționare ale *mașinilor sincrone* de puteri mari, frecvent întâlnite ca generatoare în centralele electrice. Studiile efectuate în acest sens au permis elaborarea de normative care reglementează funcționarea mașinilor sincrone în regimuri nesimetrice.

Pentru rețelele de distribuție de joasă tensiune, pierderile suplimentare determinate de nesimetria sistemului curenților de linie de calculează tot cu relația standard; pentru liniile de transport de medie și înaltă tensiune, calcularea pierderilor suplimentare este ceva mai complicată, necesitând luarea în considerare a factorului complex de nesimetrie al sistemului de curenți.

În afara pierderilor de putere în conductorul neutru evidențiate anterior, curenții de secvență zero cauzează și probleme de interferență cu sistemele de telecomunicații, respectiv sistemele de protecție. Pentru acestea din urmă, este greu de deosebit componenta produsă de defectele monofazate, de cea determinată de sarcinile puternic dezechilibrate existente în sistem. Pe de altă parte, curenții de secvență zero pot induce tensiuni în sistemele de comunicații învecinate, conducte de gaz sau conducte de apă (prin cuplaje magnetice sau rezistive).

5. MIJLOACE DE SIMETRIZARE A SARCINII ÎN REȚELELE ELECTRICE DEZECHILIBRATE

5.1. SIMETRIZAREA CURENȚILOR DE SARCINĂ

Pentru limitarea nesimetriilor determinate de consumatorii dezechilibrați sunt posibile, în principiu, două soluții:

- reconfigurarea schemei de alimentare a receptoarelor consumatorului pentru a asigura o simetrizare a sarcinii;
 - utilizarea unor scheme speciale de simetrizare.
- Schemele de simetrizare* pot fi realizate în două moduri:
- cu transformatoare monofazate;
 - cu elemente reactive suplimentare

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.

5.1.1. 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 7).

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:

$$\begin{aligned} \Re e(I_{-}^c + I_{-}^Y + I_{-}^{\Delta}) &= 0 \\ \Im m(I_{-}^c + I_{-}^Y + I_{-}^{\Delta}) &= 0 \\ \Re e(I_{0}^c + I_{0}^Y) &= 0 \\ \Im m(I_{0}^c + I_{0}^Y) &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

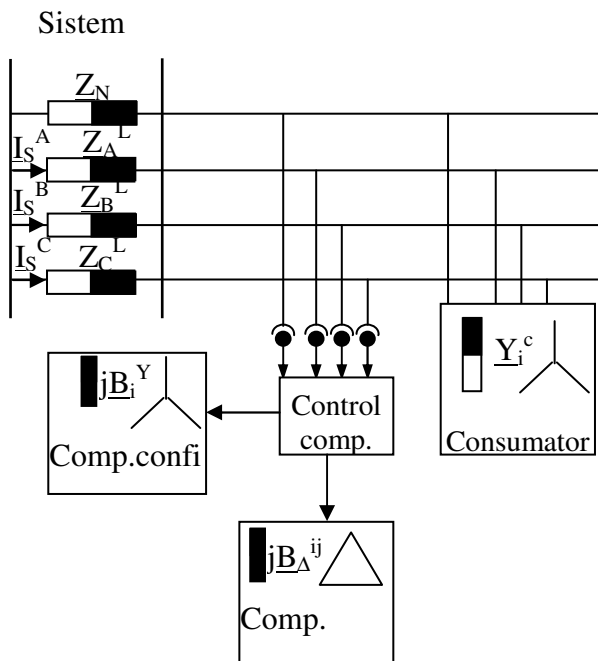


Fig.7. Alimentarea unui consumator trifazat dezechilibrat prevăzut cu compensatoare în conexiune Y și Δ

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

$$\begin{bmatrix} I_{0}^c \\ I_{+}^c \\ I_{-}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{0}^c \\ Y_{+}^c \\ Y_{-}^c \end{bmatrix} U \quad (20)$$

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

$$\begin{aligned} Y_{0}^{c \text{ not}} &= 1/3 \left[(G_A^c + \underline{a}^2 G_B^c + \underline{a} G_C^c) + j(B_A^c + \underline{a}^2 B_B^c + \underline{a} B_C^c) \right] \\ Y_{+}^{c \text{ not}} &= 1/3 \left[(G_A^c + G_B^c + G_C^c) + j(B_A^c + B_B^c + B_C^c) \right] \\ Y_{-}^{c \text{ not}} &= 1/3 \left[(G_A^c + \underline{a} G_B^c + \underline{a}^2 G_C^c) + j(B_A^c + \underline{a} B_B^c + \underline{a}^2 B_C^c) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

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:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_0^Y &= j(B_A^Y + \underline{a}^2 B_B^Y + \underline{a} B_C^Y)U/3 \\
\underline{I}_+^Y &= j(B_A^Y + B_B^Y + B_C^Y)U/3 \\
\underline{I}_-^Y &= j(B_A^Y + \underline{a} B_B^Y + \underline{a}^2 B_C^Y)U/3
\end{aligned} \tag{22}$$

- compensatorul în schemă Δ :

$$\begin{aligned}
\underline{I}_0^\Delta &= 0 \\
\underline{I}_+^\Delta &= j(B_{AB}^\Delta + B_{BC}^\Delta + B_{CA}^\Delta)U \\
\underline{I}_-^\Delta &= j(\underline{a}^2 B_{AB}^\Delta + B_{BC}^\Delta + \underline{a} B_{CA}^\Delta)U
\end{aligned} \tag{23}$$

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.

Soluția sistemului de ecuații (19) furnizează expresiile parametrilor (susceptanțelor) celor două compensatoare, ca funcții de evoluția în timp a mărimilor de stare la bornele sarcinii de simetrizat:

$$[\mathbf{B}] = [\mathbf{T}] \cdot [\mathbf{M}] \tag{24}$$

cu: $[\mathbf{B}]^{not} = [B_A^Y \ B_B^Y \ B_C^Y \ | \ B_{AB}^\Delta \ B_{BC}^\Delta \ B_{CA}^\Delta]$ - vectorul coloană al susceptanțelor compensatoarelor;

$$[\mathbf{M}]^{not} = \left[P_A^c / (U_A^c)^2 \ P_B^c / (U_B^c)^2 \ P_C^c / (U_C^c)^2 \ | \ Q_A^c / (U_A^c)^2 \ Q_B^c / (U_B^c)^2 \ Q_C^c / (U_C^c)^2 \right]_t -$$

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

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 (19), prin introducerea unei relații de forma:

$$\Im(\underline{I}_+^c + \underline{I}_+^Y + \underline{I}_+^\Delta) = 0 \tag{25}$$

5.1.2. 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.8.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 8.b).

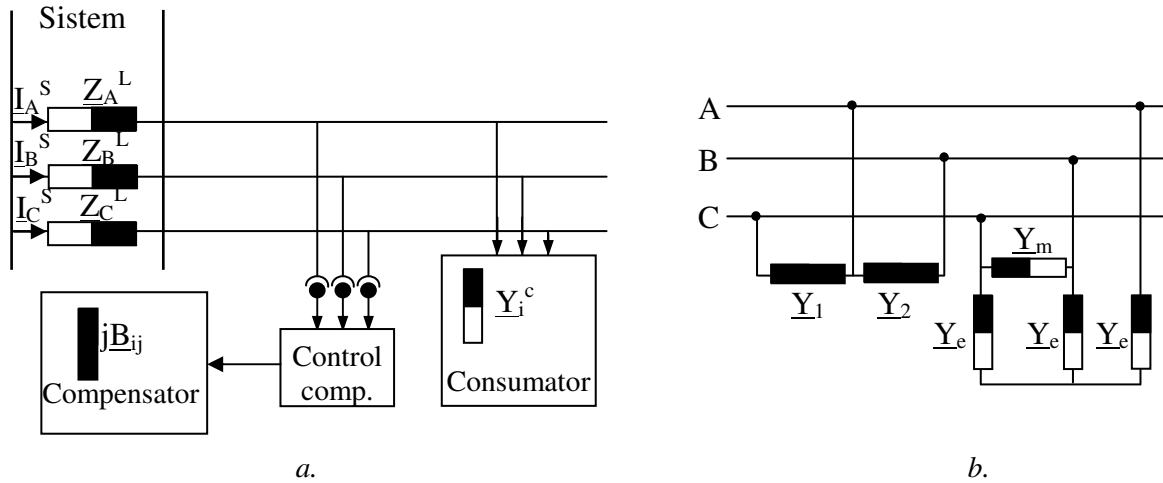


Fig.8. Alimentarea unui consumator trifazat dezechilibrat prevăzut cu compensator de simetrizare a curenților: a – structura ansamblului consumator-compensator; b – schema electrică echivalentă

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 $\underline{I}_0 = 0$).

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

$$\begin{aligned} \Re(\underline{I}_-) &= 0 \\ \Im(\underline{I}_-) &= 0 \end{aligned} \quad (26)$$

astfel încât parametrii compensatorului vor fi dați de relațiile:

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}} G_m + B_m \\ B_2 &= -\frac{1}{\sqrt{3}} G_m + B_m \end{aligned} \quad (27)$$

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

Separând sarcina monofazată 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:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A^{ce} &= \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{3}(I_{1,a} + I_{2,a}) - I_{1,r} + I_{2,r} + j \left[-I_{1,a} + I_{2,a} + \sqrt{3}(-I_{1,r} - I_{2,r}) \right] \right\} \\ \underline{I}_B^{ce} &= \frac{1}{2} \left[-\sqrt{3}I_{2,a} - 2I_{2,r} - 2I_{m,r} + j(-I_{2,a} + \sqrt{3}I_{2,r} - 2I_{m,a}) \right] \end{aligned} \quad (28)$$

$$\underline{I}_C^{ce} = \frac{1}{2} \left[-\sqrt{3}I_{1,a} - I_{1,r} + 2I_{m,r} + j(I_{1,a} + \sqrt{3}I_{1,r} + 2I_{m,a}) \right]$$

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

$$\begin{aligned} P_A^{ce} &= \frac{1}{2} U_+ \left[\sqrt{3}(I_{1,a} + I_{2,a}) - I_{1,r} + I_{2,r} \right] \\ P_B^{ce} &= \frac{1}{2} U_+ \left[-\sqrt{3}(I_{2,a} - 2I_{m,r}) - I_{2,r} \right] \\ P_C^{ce} &= \frac{1}{2} U_+ \left[-\sqrt{3}I_{1,a} + I_{1,r} + 2I_{m,r} \right] \end{aligned} \quad (29)$$

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:

$$P_{tot} = P_A + P_B + P_C = 3G_e U_+^2 \quad (30)$$

Grupul compensator-sarcină echivalentă monofazată 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 trifazată echivalentă simetrică. Concluzia este aplicabilă și în cazul puterilor reactive în nodul de conectare al ansamblului consumator dezechilibrat-compensator.*