

Marian PASKO

Instytut Elektrotechniki  
Teoretycznej i Przemysłowej  
Politechnika Śląska

## KOMPENSACJA SKŁADOWYCH PRĄDU ODBIORNIKA TRÓJFAZOWEGO ZASILANEGO PRZEZ SYMETRYCZNE ŹRÓDŁO NAPIĘCIA ODKSZTAŁCONEGO

**Streszczenie.** W artykule wskazano na możliwość skuteczniejszej kompensacji składowej reaktancyjnej prądu liniowego odbiornika trójfazowego zasilanego przez symetryczne źródło napięcia odkształconego niż to przedstawiono w pracy [9] (dla dowolnych napięć zasilających odbiornik trójfazowy).

Wykazano, że dla dowolnego liniowego odbiornika trójfazowego ze sprzężeniami istnieje możliwość całkowitej kompensacji składowej reaktancyjnej prądu za pomocą dwójników LC.

Ponadto w pracy przedstawiono możliwość kompensacji składowej ( $\underline{g}_i$ ) wyodrębnionej ze składowej ( $\underline{g}_i$ ) związanej z asymetrią fazową przewodności odbiornika dla danej harmonicznej za pomocą układów LC, dla wybranej skończonej liczby harmonicznych  $h = 3n \pm 1$ .

### 1. Wstęp

W pracach [1], [2], [4], [5] przeprowadzono analizę teoretyczną (jakościową) właściwości energetycznych obwodów wielofazowych z przebiegami odkształconymi. Analiza ta umożliwiła uzyskanie nowych rozkładów ortogonalnych prądów odbiornika w przestrzeniach  $L_n^2(0, T)$  oraz  $L_3^2(0, T)$  na wzajemnie ortogonalne składowe. Tylko składowa czynna ( $\underline{g}_i$ ) jest odpowiedzialna za przesył mocy czynnej do odbiornika, pozostałe składowe powodują niepotrzebne zwiększenie wartości skutecznej, prądu, a tym samym obniżają możliwości optymalnego wykorzystania źródła.

Kompensacja zbędnych składowych prądu, które nie uczestniczą w przesyłce mocy czynnej oraz symetryzacja, prowadzi do lepszego wykorzystania źródła. Ujawniona składowa reaktancyjna ( $\underline{x}_i$ ) może być skompensowana całkowicie lub częściowo za pomocą środków zaproponowanych dla obwodów jednofazowych [3], [8] dla dowolnych okresowych przebiegów napięć zasilających odbiornik trójfazowy. Natomiast składowa ( $\underline{g}_i$ ) nie jest w ogólnym przypadku kompensowalna za pomocą układów pasywnych tak dla obwodów jednofazowych, jak i wielofazowych [3], [1].

Jeżeli jednak dopuścić założenie, że źródło napięcia odkształconego zasilające odbiornik trójfazowy jest symetryczne np. kolejności zgodnej, tzn. spełniającej zależność

$$u_b(t) = u_a(t - T/3), \quad u_c(t) = u_a(t + T/3), \quad (1)$$

to wykorzystując zależność (1) można przeprowadzić diagonalizację pełnej macierzy  $Y_h$ ,  $h \in (3n+1)$ ,  $n \in \{0, 1, 2, \dots, m\}$  wyróżniając diagonalną macierz rzeczywistą i urojoną. Składową urojoną macierzy  $Y_h$  odpowiedzialną za składową reaktancyjną prądu można całkowicie skompensować metodami i środkami opisanymi w pracy [9], opierając się na twierdzeniu przedstawionym w pracy [8].

Ponadto możliwa staje się kompensacja składowej ( $_{as} \dot{i}$ ) związanej z asymetrią fazową przewodności odbiornika dla danej harmonicznej, (powodująca tzw. zjawisko nierównomierności obciążenia) za pomocą obwodów LC. Eliminacja składowej ( $_r \dot{i}$ ) oraz ( $_{as} \dot{i}$ ) prowadzi do pozostania składowej ( $_a \dot{i}$ ) odpowiedzialnej za całkowity przesył mocy czynnej do odbiornika, która jednocześnie minimalizuje straty mocy czynnej na symetrycznym doprowadzeniu oraz składowej ( $_{ds} \dot{i}$ ) związanej z dyspersją częstotliwościową, która nie przenosi mocy czynnej i jest w fazie lub przeciwfazie z napięciem fazowym danej fazy. Składowa ta nie wpływa na asymetrię obciążenia.

Celem niniejszego artykułu jest właśnie wskazanie na te możliwości kompensacyjne dla symetrycznego źródła zasilającego odbiornik trójfazowy.

## 2. Rozkład ortogonalny prądu odbiornika trójfazowego w przestrzeni

$$\underline{L}_3^2(0, T)$$

Rozkład ten dokonano opierając się na pracach [1], [2], [4]. Rozpatrujemy obwód trójfazowy czteroprzewodowy (rys. 1), który posiada pełną macierz admitancyjną dla każdej harmonicznej o elementach

$$Y_{\alpha\beta h} = G_{\alpha\beta h} + j B_{\alpha\beta h}, \quad \alpha, \beta \in \{a, b, c\}, \quad h \in N, \quad G_{\alpha\beta h} = G_{\beta\alpha h}, \quad B_{\alpha\beta h} = B_{\beta\alpha h}. \quad (2)$$

Napięcie  $u = (u_a, u_b, u_c)$  oraz prąd  $i = (i_a, i_b, i_c) \in \underline{L}_3^2(0, T)$  odbiornika spełniają warunki

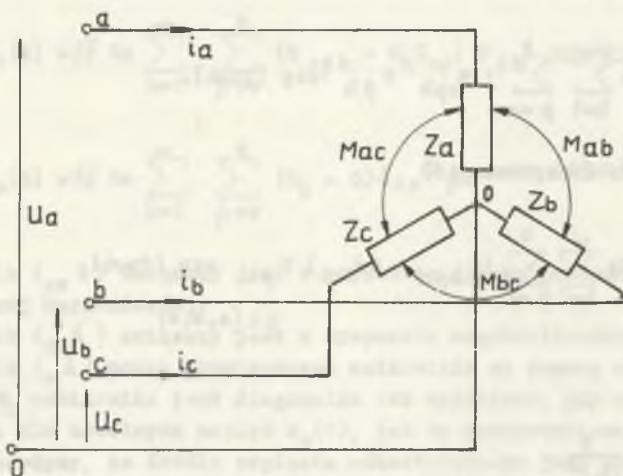
$$u_a(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} U_h \exp(jh\omega t), \quad (3)$$

$$u_b(t) = u_a(t - T/3), \quad u_c(t) = u_a(t + T/3), \quad (4)$$

wówczas prąd w danej fazie możemy zapisać w postaci

$$i_{\alpha}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{\beta=a}^c (G_{\alpha\beta h} + j B_{\alpha\beta h}) U_{\beta h} \exp(jh\omega t) \quad (5)$$

$$\alpha, \beta \in \{a, b, c\}.$$



Rys. 1

W pracach [1], [2], opierając się na pracy [3], przeprowadzono rozkład odbiornika na trzy składowki oraz wykazano ich wzajemną ortogonalność w sensie iloczynu skalarnego w przestrzeni  $L_3^2(0, T)$  zdefiniowanego następująco:

$$(u, i)_3 = \sum_{\alpha=a}^c \frac{1}{T} \int_0^T U_{\alpha}(t) i_{\alpha}(t) dt = \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \mathbf{U}_h^T \mathbf{I}_h^* = P. \quad (6)$$

Natomiast normę (np. napięcia) w przestrzeni  $L_3^2(0, T)$  określa wzór

$$\| \mathbf{U} \|_3 = \sqrt{\sum_{\alpha=a}^c \frac{1}{T} \int_0^T u_{\alpha}^2(t) dt}. \quad (7)$$

Poszczególne składowe prądu są określone wzorami

Składowa czynna

$$i_{\alpha}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} G U_{\alpha h} \exp(jh\omega t). \quad (8)$$

Składowa reaktancyjna

$$i_{\alpha}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{\beta=a}^c j B_{\alpha\beta h} U_{\beta h} \exp(jh\omega t). \quad (9)$$

Składowa rozrzutu (rozproszenia)

$$i_{\alpha}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{\beta=a}^c (G_{\alpha\beta h} - G\delta_{\alpha\beta}) U_{\beta h} \exp(jh\omega t). \quad (10)$$

$\beta \in \{a, b, c\}$

gdzie:

$$G = \frac{(\mathbf{u}|\mathbf{i})_3}{\|\mathbf{u}\|_3^2} = \frac{P}{\|\mathbf{u}\|_3^2}. \quad (11)$$

Wielkość (11) jest tak samo zdefiniowana jak w pracy [6]. Jeżeli zdefiniować wielkość  $G_h$  i  $P_h$ , jak to uczyniono w pracach [1], [4], [7]

$$G_h = \frac{P_h}{\|U_h\|^2}, \quad (12)$$

gdzie:

$$P_h = \operatorname{Re} \sum_{\alpha=a}^c U_{\alpha h} I_{\alpha h}^*, \quad (13)$$

$$\|U_h\|^2 = \sum_{\alpha=a}^c U_{\alpha h} U_{\alpha h}^*, \quad (14)$$



to prąd ( $\underline{i}$ ) można rozłożyć na dwa składniki wzajemnie ortogonalne

$$\underline{i}_{as} = (i_{as}^a, i_{as}^b, i_{as}^c), \quad \underline{i}_{ds} = (i_{ds}^a, i_{ds}^b, i_{ds}^c), \quad \text{tzn.}$$

$$(\underline{i}_{ds} | \underline{i}_{as}) = 0.$$

Składniki te określone są przez następujące wzory:

$$i_{as}^{\alpha}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{\beta=a}^c (G_{\alpha\beta h} - G_h \delta_{\alpha\beta}) U_{\beta h} \exp(jh\omega t), \quad (15)$$

$$i_{ds}^{\alpha}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{\beta=a}^c (G_h - G) \delta_{\alpha\beta} U_{\beta h} \exp(jh\omega t). \quad (16)$$

Składnik ( $\underline{i}_{as}$ ) związany jest z asymetrią fazową przewodności odbiornika dla danej harmonicznej.

Składnik ( $\underline{i}_{ds}$ ) związany jest z dyspersją częstotliwościową przewodności. Składnik ( $\underline{i}_r$ ) można skompensować całkowicie za pomocą układów LC, gdy macierz  $\underline{B}_h$  odbiornika jest diagonalna lub częściowo, gdy macierz  $\underline{B}_h$  jest pełna i dla dowolnych napięć  $u_{\alpha}(t)$ , jak to przedstawiono w pracy [9]. Jeżeli założymy, że źródło napięcia odkształconego jest symetryczne (3), (4), to można wykazać, że kompensacja prądu ( $\underline{i}_r$ ) będzie całkowita dla dowolnej skończonej liczby harmonicznych. Ponadto istnieje możliwość skompensowania prądu ( $\underline{i}_{as}$ ) określonego wzorem (15) związanego z asymetrią fazową przewodności, za pomocą obwodów LC.

Zagadnienia te poruszane są w dalszej części pracy.

### 3. Diagonalizacja macierzy $\underline{Y}_r$ i kompensacja składowej reaktancyjnej

$\underline{i}_r$

Prąd odbiornika dla każdej fazy dany wzorem (5) można zapisać w postaci macierzowej

$$\underline{i} = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \underline{I}_h \exp(jh\omega t). \quad (17)$$

gdzie:

$$\mathbf{I}_h = \mathbf{Y}_h \mathbf{U}_h, \quad (18)$$

Zespolone wartości skuteczne prądu odbiornika dla danej harmonicznej. Macierz  $\mathbf{Y}_h$  można zdiagnozować osobno dla harmonicznych  $h = 3n + 1$  (kolejności zgodnej),  $h = 3n - 1$  (kolejności przeciwnej)  $n \in \{0, 1, 2 \dots m\}$ . Diagonalizacją dla harmonicznych  $3n$  (kolejności zerowej) nie będziemy się zajmować. Wykorzystując fakt, że dla symetrycznego źródła, dla harmonicznych

$h = 3n \pm 1$ ,  $\sum_{\alpha=a}^c U_{\alpha h} = 0$ , tzn., że dwa sąsiednie napięcia są względem siebie przesunięte o  $\gamma$  lub  $\gamma^2$ , gdzie

$$\gamma = \exp(j 120^\circ) = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (19)$$

$$\gamma^2 = \exp(-j 120^\circ) = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (20)$$

Równanie (18) dla harmonicznych  $3n + 1$  można przedstawić w postaci

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_{ah} &= \left[ G_{aah} + \gamma^2 G_{abh} + \gamma G_{ach} + j(B_{aah} + \gamma^2 B_{abh} + \gamma B_{ach}) \right] U_{ah}, \\ \mathbf{I}_{bh} &= \left[ \gamma G_{bah} + G_{bbh} + \gamma^2 G_{bch} + j(\gamma B_{bah} + B_{bbh} + \gamma^2 B_{bch}) \right] U_{bh}, \\ \mathbf{I}_{ch} &= \left[ \gamma^2 G_{cah} + \gamma G_{cbh} + G_{cch} + j(\gamma^2 B_{cah} + \gamma B_{cbh} + B_{cch}) \right] U_{ch}, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Wstawiając wzory (19) i (20) do (21) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{ah} &= \left[ G_{aah} - \frac{1}{2}(G_{abh} + G_{ach}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(B_{abh} - B_{ach}) \right] U_{ah} + j \left[ B_{aah} - \frac{1}{2}(B_{abh} + B_{ach}) + \right. \\ &+ \left. \frac{\sqrt{3}}{2}(G_{ach} - G_{abh}) \right] U_{ah}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{bh} &= \left[ G_{bbh} - \frac{1}{2}(G_{bah} + G_{cbh}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(B_{bch} - B_{bah}) \right] U_{bh} + j \left[ B_{bbh} - \frac{1}{2}(B_{bah} + B_{bch}) + \right. \\ &+ \left. \frac{\sqrt{3}}{2}(G_{bah} - G_{bch}) \right] U_{bh}, \end{aligned}$$

$$I_{ch} = \left[ G_{cch} - \frac{1}{2}(G_{cah} + G_{cbh}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(B_{cah} - B_{cbh}) \right] U_{ch} + j \left[ B_{cch} - \frac{1}{2}(B_{cbh} + B_{cah}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(G_{cbh} - G_{cah}) \right] U_{ch}^*$$

Postępując analogicznie dla harmonicznych  $h = 3n - 1$ ,  $n \in \{1, 2, \dots, m\}$  (kolejności przeciwnej) otrzymujemy

$$\left. \begin{aligned} I_{ah} &= \left[ G_{aah} - \frac{1}{2}(G_{abh} + G_{ach}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(B_{abh} - B_{ach}) \right] U_{ah} + \\ &+ j \left[ B_{aah} - \frac{1}{2}(B_{abh} + B_{ach}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(G_{ach} - G_{abh}) \right] U_{ch}^* \\ I_{bh} &= \left[ G_{bbh} - \frac{1}{2}(G_{bah} + G_{bch}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(B_{bch} - B_{bah}) \right] U_{bh} + \\ &+ j \left[ B_{bbh} - \frac{1}{2}(B_{bah} + B_{bch}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(G_{bah} - G_{bch}) \right] U_{bh}^* \\ I_{ch} &= \left[ G_{cch} - \frac{1}{2}(G_{cah} + G_{cbh}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(B_{cah} - B_{cbh}) \right] U_{ch} + \\ &+ j \left[ B_{cch} - \frac{1}{2}(B_{cbh} + B_{cah}) - \frac{\sqrt{3}}{2}(G_{cbh} - G_{cah}) \right] U_{ch}^* \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Analizując wzory (22) i (23) można zauważyć, że różnią się tylko znakiem przed czynnikiem  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  tak dla części rzeczywistej, jak i urojonej. Wykorzystując ten fakt dalsze rozumowania będziemy prowadzić dla harmonicznych  $h = 3n + 1$ . Dla harmonicznych  $h = 3n - 1$  rozumowanie będzie analogiczne. Zapiszmy wzór (22) w zwęższej postaci i przyporządkujmy mu równoważny obwód elektryczny bez sprzężeń przedstawiony na rys. 2.

$$\left. \begin{aligned} I_{ah} &= Y'_{ah} \quad U_{ah} = (G'_{ah} + j B'_{ah}) U_{ah} \\ I_{bh} &= Y'_{bh} \quad U_{bh} = (G'_{bh} + j B'_{bh}) U_{bh} \\ I_{ch} &= Y'_{ch} \quad U_{ch} = (G'_{ch} + j B'_{ch}) U_{ch} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Wykorzystując uprzednio podane definicje dla poszczególnych prądów otrzymujemy

$$i_{\alpha}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} G U_{\alpha h} \exp(jh\omega t) \quad (25)$$

$$r_{\alpha}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} j B'_{\alpha h} U_{\alpha h} \exp(jh\omega t), \quad (26)$$

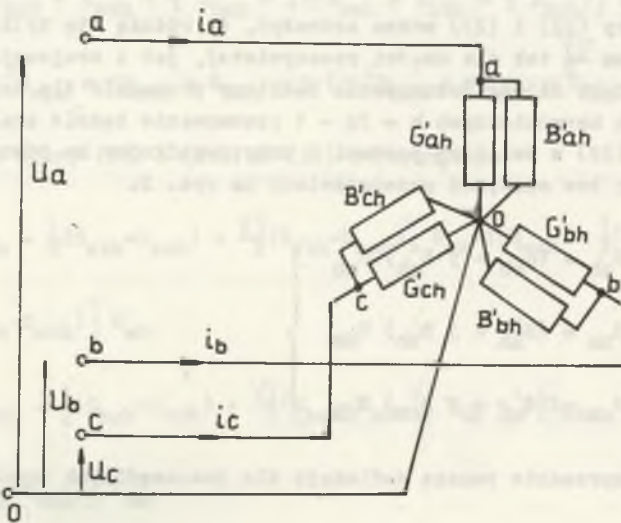
$$s_{\alpha}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} (G'_{\alpha h} - G_h) U_{\alpha h} \exp(jh\omega t), \quad (27)$$

$$d_{\alpha}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} (G_h - G) U_{\alpha h} \exp(jh\omega t) \quad (28)$$

$\alpha \in \{a, b, c\}, \quad h \in \mathbb{N}.$

gdzie:

$$G_h = \frac{P_h}{\|U_h\|^2} = \frac{G'_{ah} + G'_{bh} + G'_{ch}}{3} = \frac{\sum_{\alpha=a}^c G'_{\alpha h}}{3}. \quad (29)$$



Rys. 2



Problem kompensacji składowej  $r^i = (r^i_a, r^i_b, r^i_c)$  sprowadza się do syntezy trzech niezależnych dwójników LC, każdy kompensujący prąd  $r^i_\alpha(t)$  określony wzorem (26). Syntezę każdego z tych dwójników można sformułować następująco.

Wyznaczyć funkcję reaktancyjną  $B_r(\omega)$  określoną wzorami:

$$B_r(\omega) = \frac{A \prod_{i=1}^n (\omega^2 - \omega_{2i}^2 \pm 1)}{\omega \prod_{i=1}^n (\omega^2 - \omega_{2i}^2)}, \quad A \in \mathbb{R}, \quad \alpha \in \{a, b, c\}, \quad (30)$$

która dla zadanych częstotliwości  $\omega_h$  przyjmuje wartości:

$$B_r(\omega_h) = -B(\omega_h), \quad h \in N_S, \quad N_S \subset \mathbb{N}. \quad (31)$$

Procedurę syntezy należy przeprowadzić tak jak w pracach [8], [9].

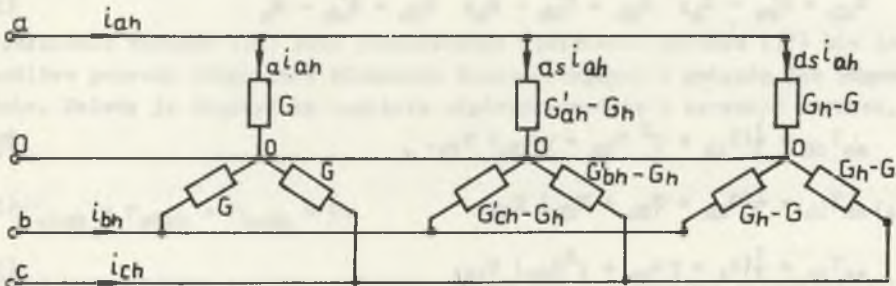
#### 4. Kompensacja składowej $_{as}^i$

Układ przedstawiony na rys. 2 po skompensowaniu składowej reaktancyjnej ( $r^i$ ) jest obwodem czysto rezystancyjnym i możemy mu przyporządkować schemat zastępczy przedstawiony na rys. 3 przy wykorzystaniu wzorów (25), (28).

Składowa  $_{ah}^i$  przenosząca moc czynną jest reprezentowana na rys. 3 przez trzy identyczne równoważne przewodności G.

Składowa ( $_{as}^i$ ) jest reprezentowana przez przewodności

$$G'_{ah} - G_h.$$



Rys. 3

Składowa ( $_{as}i_h$ ) jest reprezentowana przez przewodności

$$G_h - G.$$

Ponieważ dwie ostatnie nie uczestniczą w przenoszeniu mocy czynnej, co jest równoważne, że odpowiednie przewodności odpowiedzialne za te składowe nie pobierają mocy czynnej. Zachodzi zatem pytanie, czy składowych tych nie można skompensować za pomocą układów również nie pobierających mocy czynnej, a mianowicie układów LC.

Z literatury wiadomo, że każdy niesymetryczny obwód trójfazowy zasilany z symetrycznego źródła sinusoidalnego można zsymetryzować za pomocą obwodów pasywnych [10].

Spróbujemy przeprowadzić symetryzację obwodu przedstawionego na rys. 3 poprzez kompensację obu niepołączonych składowych ( $_{as}i$ ) i ( $_{ds}i$ ).

Rozważania przeprowadzimy dla jednej wybranej harmonicznej  $h = 3n + 1$ , wówczas  $P_h = P$ , co pociąga za sobą, że  $G_h = G$  i wówczas w takim układzie nie ujawnia się składowa dyspersji ( $_{ds}i_h$ ).

Ujawnia się składowa ( $_{as}i_h$ ) gdy tylko  $G'_{\alpha h} - G_h \neq 0$  i tę składową spróbujemy skompensować poprzez symetryzację.

Rozłożmy prąd ( $_{as}i_h$ ) przy założeniu, że źródło zasilające ma tylko składową zgodną  $U_{1h}$  ( $U_{2h} = 0$ ,  $U_{0h} = 0$ ).

Korzystając z teorii składowych symetrycznych otrzymujemy

$$\begin{bmatrix} {}_{as}I_{0h} \\ {}_{as}I_{1h} \\ {}_{as}I_{2h} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \gamma & \gamma^2 \\ 1 & \gamma^2 & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{Ah} & 0 & 0 \\ 0 & G_{Bh} & 0 \\ 0 & 0 & G_{Ch} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \gamma^2 & \gamma \\ 1 & \gamma & \gamma^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ U_{1h} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

gdzie:

$$G_{Ah} = G'_{ah} - G_h; \quad G_{Bh} = G'_{bh} - G_h; \quad G_{Ch} = G'_{ch} - G_h \quad (33)$$

stąd:

$${}_{as}I_{0h} = \frac{1}{3}(G_{Ah} + \gamma^2 G_{Bh} + \gamma G_{Ch}) U_{1h}, \quad (34)$$

$${}_{as}I_{1h} = \frac{1}{3}(G_{Ah} + G_{Bh} + G_{Ch}) U_{1h}, \quad (35)$$

$${}_{as}I_{2h} = \frac{1}{3}(G_{Ah} + \gamma G_{Bh} + \gamma^2 G_{Ch}) U_{1h}. \quad (36)$$

Warunkiem symetryzacji będzie spełnienie warunków

$$G_{Ah} + \gamma^2 G_{Bh} + \gamma G_{Ch} = 0 \quad (37)$$

brak składowej zerowej i

$$G_{Ah} + \gamma G_{Bh} + \gamma^2 G_{Ch} = 0 \quad (38)$$

brak składowej przeciwnej.

Przeprowadźmy kompensację składowej zerowej, wpinając pomiędzy daną fazę a przewód zerowy układy kompensacyjne złożone z elementów LC. Musi być spełniony warunek

$$Y_{akh} + G_{Ah} + \gamma^2(G_{Bh} + Y_{bkh}) + \gamma(G_{Ch} + Y_{ckh}) = 0 \quad (39)$$

i jednocześnie narzucamy warunek, że elementy kompensujące nie mogą pobierać mocy biernej, zatem

$$Y_{akh} + Y_{bkh} + Y_{ckh} = 0. \quad (40)$$

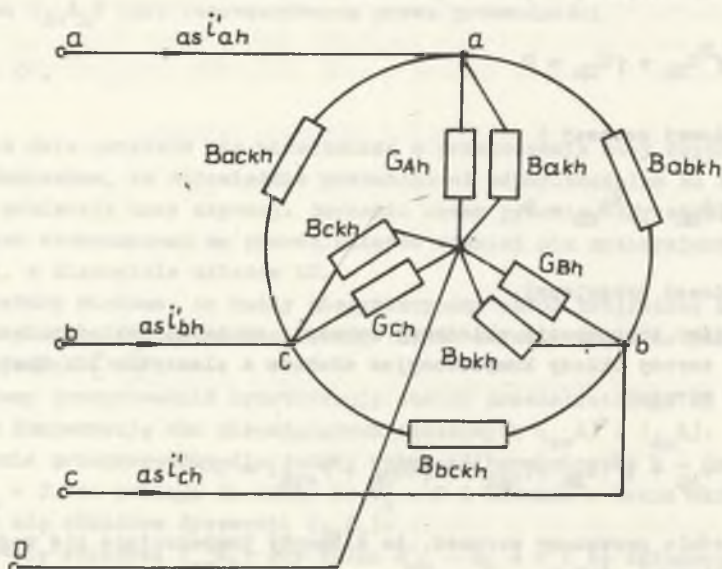
Spełnienie warunków (39) i (40) prowadzi do układu trzech równań o trzech niewiadomych  $B_{akh}$ ,  $B_{bkh}$  i  $B_{ckh}$ . Po rozwiązaniu otrzymujemy

$$\left. \begin{aligned} B_{akh} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{Bh} - G_{Ch}), \\ B_{bkh} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{Ch} - G_{Ah}), \\ B_{ckh} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{Ah} - G_{Bh}). \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Spełnienie warunku (39) przy jednoczesnym spełnieniu warunku (37) nie jest możliwe poprzez połączenie elementów kompensacyjnych w gwiazdę jak poprzednio. Należy je włączyć na napięcie międzyprzewodowe i narzucić warunek, że

$$Y_{abkh} + Y_{abkh} + Y_{bckh} = 0. \quad (42)$$

Układ kompensujący zarówno składową zerową jak i przeciwną przedstawiony jest na rys. 4.



Rys. 4

Wyrażając prądy w poszczególnych fazach dla rys. 4 poprzez napięcia odpowiednich faz otrzymujemy.

$$as I'_{ah} = [G_{Ah} + jB_{akh} + jB_{abkh}(1 - \gamma^2) - jB_{abkh}(\gamma - 1)] U_{ah} = Y'_{Ah} U_{ah} \quad (43)$$

$$as I'_{bh} = [G_{Bh} + jB_{bkh} + jB_{bckh}(1 - \gamma^2) - jB_{abkh}(\gamma - 1)] U_{bh} = Y'_{Bh} U_{bh} \quad (44)$$

$$as I'_{ch} = [G_{Ch} + jB_{ckh} + jB_{cakh}(1 - \gamma^2) - jB_{bckh}(\gamma - 1)] U_{ch} = Y'_{Ch} U_{ch} \quad (45)$$

Spełnienie warunku

$$Y'_{Ah} + \gamma Y'_{Bh} + \gamma^2 Y'_{Ch} = 0 \quad (46)$$

i warunku (42) prowadzi do wyznaczenia szukanych wartości susceptancji układów kompensujących połączonych w trójkąt poprzez wartości  $G_{Ah}$ ,  $G_{Bh}$ ,  $G_{Ch}$ .

Otrzymujemy

$$B_{abkh} = \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_{Ah} - G_{Bh})$$



$$\left. \begin{aligned} B_{bckh} &= \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_{Bh} - G_{Ch}) \\ B_{ackh} &= \frac{2}{3\sqrt{3}} (G_{Ch} - G_{Ah}) \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Po eliminacji składowej zerowej  ${}_{as}I_{ch}$  i przeciwnej  ${}_{as}I_{2h}$  w układzie pozostanie składowa zgodna prądu  ${}_{as}I_{1h}$  określone wzorem (35). Wykorzystując wzór (29) można zauważyć, że dla każdej harmonicznej

$$G_{Ah} + G_{Bh} + G_{Ch} = 0, \quad (48)$$

co powoduje, że składowa  ${}_{as}I_{1h} = 0$ .

Zatem składową ( ${}_{as}i$ ) można skompensować za pomocą elementów reaktancyjnych włączonych jak na rys. 4 dla dowolnej liczby harmonicznych.

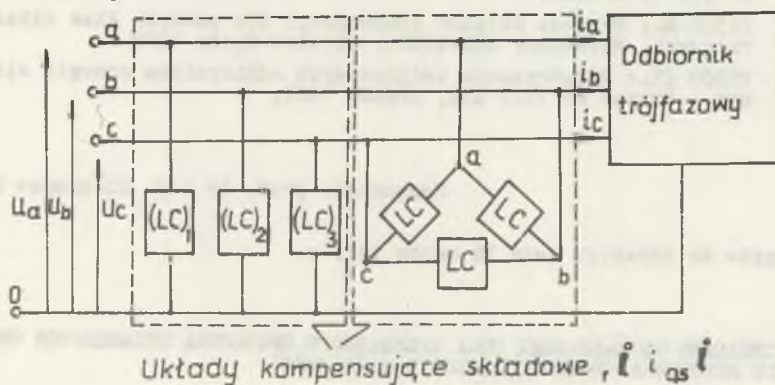
Jeżeli źródło zawiera więcej niż jedną harmoniczną, to  $G_h \neq G$  i wówczas pojawia się składowa ( ${}_{ds}i$ ), która nie może być skompensowana za pomocą elementów wyznaczonych poprzez wzory (41) i (47).

Natomiast, czy istnieje możliwość jej skompensowania za pomocą elementów bezstratnych wymaga dokładnego przeanalizowania.

## 5. Zakończenie

Przedstawiony sposób kompensacji składowej reaktancyjnej ( ${}_{r}i$ ) oraz składowej ( ${}_{as}i$ ) związanej z asymetrią fazową przewodności został przeprowadzony przy założeniu symetrycznego źródła napięcia odkształconego zasilającego odbiornik trójfazowy, co w praktyce jest zazwyczaj spełnione.

Włączenie kompensatorów służących do kompensacji składowej ( ${}_{r}i$ ) i ( ${}_{as}i$ ) przedstawione jest na rys. 5.



Rys. 5

Wydaje się celowe zastąpienie jednym kompensatorem połączonym w trójkąt służącym zarówno do kompensacji składowej ( $\mathbf{i}_R$ ), jak i ( $\mathbf{i}_{as}$ ). Niemniej jednak przedstawiony sposób nie jest ogólny i wymaga dalszych badań zarówno nad syntezą układów kompensacji składowej reaktancyjnej ( $\mathbf{i}_R$ ), jak i składowej ( $\mathbf{i}_{as}$ ) oraz ( $\mathbf{i}_{as}$ ) przy dowolnych napięciach zasilających odbiornik trójfazowy (wielofazowy).

## LITERATURA

- [ 1 ] BRODZKI M., PASKO M.: Definicje pewnych mocy dla układów wielofazowych o przebiegach odkształconych. Roprawy Elektrotechniczne Z. 2 1989 (w druku).
- [ 2 ] BRODZKI M., PASKO M., UMIŃSKA-BORTLICZEK M.: Jednolita teoria mocy dla obwodów trójfazowych z przebiegami odkształconymi w oparciu o ortogonalny rozkład prądu w przestrzeni  $L_2^3(0,T)$ . Materiały X-SPETO, Gliwice-Wisła 1987.
- [ 3 ] CZARNECKI L.S.: Interpretacja i identyfikacja właściwości energetycznych obwodów jednofazowych z przebiegami odkształconymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 91, Gliwice 1984.
- [ 4 ] CZARNECKI L.S.: Ortogonalny rozkład prądu źródła napięcia odkształconego zasilającego asymetryczny nieliniowy odbiornik trójfazowy. Materiały X-SPETO, Gliwice-Wisła 1987.
- [ 5 ] CZARNECKI L.S.: New Power theory of the 3-phase non-linear asymmetrical circuits supplied from nonsinusoidal voltage sources. Materiały ISCAS 88. Finlandia.
- [ 6 ] FRYZE ST.: Wybrane zagadnienia teoretyczne podstaw elektrotechniki. PWN, Warszawa-Wrocław 1966.
- [ 7 ] NOWOMIEJSKI Z.: Moc i energia elektryczne w układach elektrycznych o dowolnych ustalonych przebiegach. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka z. 15, Gliwice 1963.
- [ 8 ] PASKO M., WALCZAK J.: Metoda syntezy układów kompensacji składowej reaktancyjnej prądu odbiornika dwuzaciskowego zasilanego napięciem odkształconym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 113 (w druku).
- [ 9 ] PASKO M.: Synteza układów kompensacji dla pewnych klas układów trójfazowych. Materiały XII-SPETO, Gliwice-Wisła 1989.
- [ 10 ] PIROG ST.: Symetryzacja trójfazowych odbiorników energii elektrycznej - Skrypt Nr 1122 AGH, Kraków 1988.

Recenzent: prof. dr inż. Stanisław Bolkowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 marca 1989 r.

КОМПЕНСАЦИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО ПРИЕМНИКА ПИТАЮЩЕГОСЯ ОТ СИММЕТРИЧНОГО ИСТОЧНИКА НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО НАПЯЖЕНИЯ

## Р е з ю м е

В статье показана возможность более эффективной компенсации реактивной составляющей тока линейного трехфазного приемника, питающегося от симметри-

ного источника несинусоидального напряжения, чем как это представлено в работе [9] / для любых произвольных напряжений питающих трехфазный приемник/. Доказано, что для любого линейного трехфазного приемника с электромагнитной связью существует возможность полной компенсации реактивной составляющей  $i_r$  / тока с помощью двухполюсников LC. Кроме того в работе представлена возможность компенсации составляющей  $i_{as}$  / выделенной из составляющей связанной с фазовой асимметрией проводимости приемника для данной гармоники с помощью систем LC для выбранного конечного числа гармоник  $h = 3n \pm 1$ .

COMPENSATION OF THE CURRENT COMPONENTS OF A THREE-PHASE LOAD SUPPLIED WITH A SYMMETRICAL NONSINUSOIDAL VOLTAGE SOURCE

S u m m a r y

A possibility of more effective compensation of the reactive part of current of a linear, three-phase load supplied with a symmetrical, nonsinusoidal voltage source than it was presented in [9] (for any voltages of a three-phase load) has been shown.

It has been proved that for any linear, three-phase load with mutual inductances there is a possibility of total compensation of the reactive part ( $i_r$ ) of current by means of two-terminal LC networks.

Moreover, a possibility of compensation of the component ( $i_{as}$ ) (separated from the component  $i_s$ ) connected with phase-asymmetry of the load conductance for a given harmonic by means of LC networks for finite number of harmonics,  $h = 3n \pm 1$  has been presented in the paper.