

Janusz WALCZAK

OPTIMALIZACJA WARUNKÓW PRACY RZECZYWISTYCH TRÓJFAZOWYCH ŹRÓDEŁ NAPIĘĆ
ODKSZTAŁCONYCH

II. DEKOMPOZYCJA PRĄDU ŹRÓDŁA

Streszczenie. Artykuł stanowi kontynuację analizy optymalnych warunków pracy rzeczywistych, trójfazowych źródeł napięć okształconych [4], dotyczy dekompozycji całkowitego prądu źródła na cztery składniki. Pierwszy z tych składników stanowi prąd aktywny dostarczający do odbiornika zadaną moc czynną, realizujący zadany kompromis pomiędzy minimum wartości skutecznej prądu (w sensie normy przestrzeni L_3^2) a minimum jego zniekształceń. Pozostałe składniki wyróżnionego rozkładu prądu są niepożądane i należy je eliminować. W artykule omówiono zagadnienie wzajemnej ortogonalności wyróżnionych składników prądu źródła oraz zagadnienie ortogonalności wyróżnionych składników prądu źródła oraz zagadnienie ortogonalności tych składników względem SEM źródła. Podano koncepcję i warunek doboru układów do równoległej i szeregowej kompensacji niepożądanych składników prądu źródła.

1. WPROWADZENIE

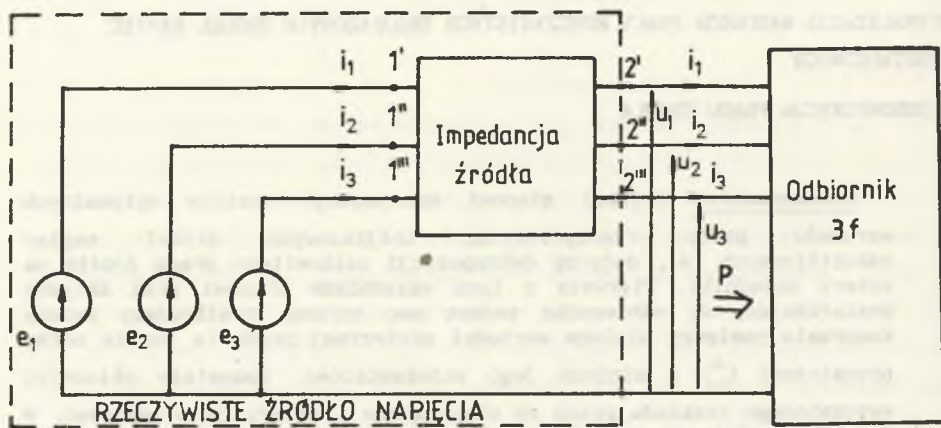
W artykule [4] analizowano warunki pracy trójfazowego źródła rzeczywistego napięć okształconych, zasilającego odbiornik trójfazowy (rys. 1).

Minimalizacja kwadratu normy przestrzeni Sobolewa $W_{2,a,3}^1$ funkcji prądu źródła, przy ograniczeniu równościowym na zadaną moc czynną doprowadzoną do odbiornika, spowodowała wyznaczenie prądu aktywnego źródła, określonego wzorem

$$i_a(t) = G_{\alpha 0} E_{\alpha 0} + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} G_{\alpha h} E_{\alpha h} \exp(jh\omega t), \quad (1)$$

gdzie $G_{\alpha h} = \frac{\lambda^*}{2V_h^2 + 2\lambda^* R_{\alpha\alpha h}}$, (2)

λ^* - rozwiązanie pewnego równania nieliniowego
(por. [4], wzór (39)).



Rys. 1. Odbiorniki 3-fazowy zasilany z rzeczywistego źródła napięcia odkształconego

Fig. 1. 3-phase receiver supplied by nonideal and nonsinusoidal voltage source

Prąd aktywny (1) wyznaczono przy założeniu, że operator impedancyjny źródła (opisany dla każdej harmonicznej $h \in \mathbb{N}$ macierzą $Z_{\alpha\beta h}$, $\alpha, \beta \in \{1, 2, 3\}$) spełnia warunki określone wzorem:

$$\bigwedge_{h \in \mathbb{N}} Z_{\alpha\beta h} = \begin{cases} R_{\alpha\alpha h} + jX_{\alpha\alpha h} & \text{dla } \alpha = \beta \\ jX_{\alpha\beta h} & \text{dla } \alpha \neq \beta, X_{\alpha\beta h} = X_{\beta\alpha h} \end{cases} \quad (3)$$

Zagadnieniem dekompozycji prądu całkowitego źródła (rys. 1) na szereg składników (w tym składnik aktywny (1)) poświęcona jest dalsza część artykułu.

2. DEKOMPOZYCJA PRĄDU ŹRÓDŁA

Przyjmijmy, że odbiornik jest czterobiegunnikiem SLS (rys.1) i że jest on opisany dla każdej harmonicznej $h \in \mathbb{N}$ macierzą impedancji $Z_{\alpha\beta h}$, $\alpha, \beta \in \{1, 2, 3\}$.

Prądy fazowe źródła (odbiornika) i_{α} określa wzór:

$$i_{\alpha} = G_{\alpha\beta h} E_{\beta 0} + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} z_{\alpha\beta h} Y_{\alpha\beta h} E_{\beta h} \exp(jh\omega t), \quad (4)$$

$$\alpha \in \{1, 2, 3\}$$

gdzie $Y_{\alpha\beta h} = G_{\alpha\beta h} + jB_{\alpha\beta h}$, (5)

$Y_{\alpha\beta h}$ - macierz odwrotna do macierzy $Z_{\alpha\beta h} + Z_{\alpha\beta h}$, czyli macierz admitancji układu widziana z zacisków źródła idealnego ($1'$, $1''$, $1'''$), (rys.1).

Prąd różnicowy $i_{b\alpha}$ (określony podobnie jak w pracach [1], [2]) określa wzór:

$$\begin{aligned} i_{b\alpha} &= i_{\alpha} - i_{\alpha} = \\ &= \sum_{\beta=1}^3 \left(G_{\alpha\beta 0} - G_{\alpha\beta 0} \delta_{\alpha\beta} \right) E_{\beta 0} + \\ &+ \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{\beta=1}^3 \left(z_{\alpha\beta h} Y_{\alpha\beta h} - G_{\alpha\beta h} \delta_{\alpha\beta} \right) E_{\beta h} \exp(jh\omega t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\alpha \in \{1, 2, 3\}.$$

Z twierdzenia o rzucie ortogonalnym w przestrzeniach Hilberta oraz ze wzoru ([4], wzór (39)) wynika nieortogonalność prądów i_a , i_b zarówno w normie przestrzeni $L^2_3(0; T)$, jak i przestrzeni $W^1_{2, \alpha, 3}(0; T)$:

$$\left(i_a, i_b \right)_{L^2_3} = \left(i_a, i_b \right)_{L^2_3} \neq 0 \quad (7)$$

$$\left(i_a, i_b \right)_W = \left(i_a, i_b \right)_W \neq 0. \quad (8)$$

Prąd i_b (wzór (6)) wydawany przez źródło przenosi moc czynną.

Prąd $i_{b\alpha}$ przedstawmy w postaci sumy:

$$i_{b\alpha} = i_{r\alpha} + i_{s\alpha}, \quad (9)$$

gdzie :

$$i_{r\alpha} = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{\beta=1}^3 jB_{\alpha\beta h} E_{\beta h} \exp(jh\omega t) , \quad (10)$$

$$i_{s\alpha} = \sum_{\beta=1}^3 \left(G_{\alpha\beta o} - G_{\alpha o} \delta_{\alpha\beta} \right) E_{\beta o} + \\ + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{\beta=1}^3 \left(G_{\alpha\beta h} - G_{\alpha h} \delta_{\alpha\beta} \right) E_{\beta h} \exp(jh\omega t) . \quad (11)$$

Prąd $i_{r\alpha}$ nazywamy reaktancyjnym, odpowiada on za wymianę energii pola EM w układzie SEM - impedancje wewnętrzne źródła i odbiornika. Potrzeba wyodrębnienia tego składnika prądu wynika z możliwości jego kompensacji za pomocą układów pasywnych LC (por. [1], [2]).

Prąd rozproszenia i wynika z dyspersji konduktancji zastępczych widzianych z zacisków SEM źródła względem konduktancji zastępczych $G_{\alpha h}$. Prąd ten można przedstawić w postaci sumy dwóch składników:

$$i_{s\alpha} = i_{as\alpha} + i_{ds\alpha} , \quad (12)$$

gdzie

$$i_{as\alpha} = \sum_{\beta=1}^3 \left(G_{\alpha\beta o} - G_{\alpha o} \delta_{\alpha\beta} \right) E_{\beta o} + \\ + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{\beta=1}^3 \left(G_{\alpha\beta h} - G_{\alpha h} \delta_{\alpha\beta} \right) E_{\beta h} \exp(jh\omega t) , \quad (13)$$

$$i_{ds\alpha} = \sum_{\beta=1}^3 \left(G_{\alpha o} - G_{\alpha o} \delta_{\alpha\beta} \right) E_{\beta o} + \\ + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{\beta=1}^{\infty} \left(G_{\alpha h} - G_{\alpha h} \delta_{\alpha\beta} \right) E_{\beta h} \exp(jh\omega t) , \quad (14)$$

$$G_h = \frac{P_n}{|E_h|^2} , \quad (15)$$

$$P_h = \operatorname{Re} \sum_{\alpha=1}^3 E_{\alpha h} J_{\alpha h}^* \quad (16)$$

Składnik i_{as} prądu źródła wynika z asymetrii fazowej konduktancji widzianej z zacisków źródła, a składnik i_d prądu wynika z asymetrii częstotliwościowej konduktancji widzianych z zacisków źródła (por. prace [1], [2]).

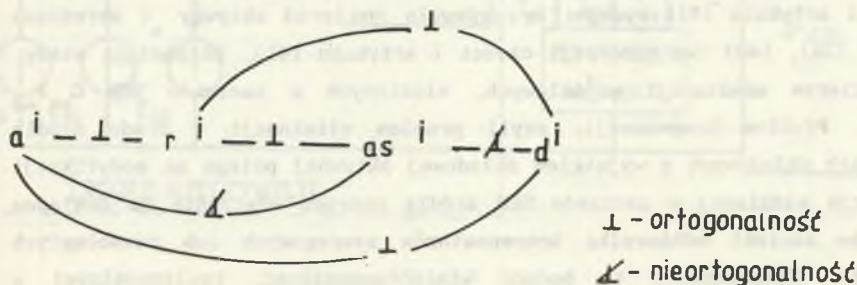
Tak samo jak w pracy [1], drogą prostych przekształceń, można wykazać wzory:

$$\begin{aligned} (i_a, i_r)_W &= 0, & (i_a, i_{as})_W &\neq 0, \\ (i_r, i_s)_W &= 0, & (i_a, i_d)_W &\neq 0, \\ (i_r, i_{as})_W &= 0, & (i_{as}, i_d)_W &\neq 0, \\ (i_r, i_d)_W &= 0, & (i_e, i_r)_{L_3^2} &= 0, \\ (i_a, i_s)_W &\neq 0, & (i_e, i_s)_{L_3^2} &\neq 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Całkowity prąd odbiornika można przedstawić w postaci wzoru:

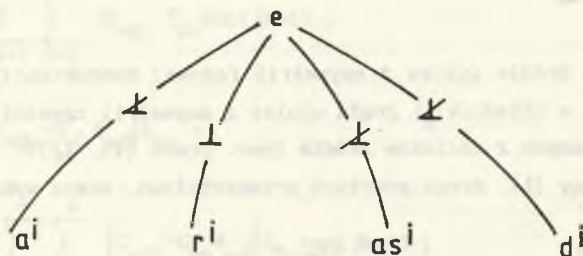
$$i = i_a + i_r + i_s = i_a + i_r + i_{as} + i_d \quad (18)$$

Wynik badania ortogonalności wyróżnionych składowych prądu (wzór (17)) względem siebie i względem SEM napięcia zasilania przedstawiono na rys.2,3.



Rys.2. Ortogonalność składowych prądu źródła w normie L_3^2 i $W_{2,\alpha,3}^1$

Fig.2. Orthogonality of current source components in the norm L_3^2 i $W_{2,\alpha,3}^1$



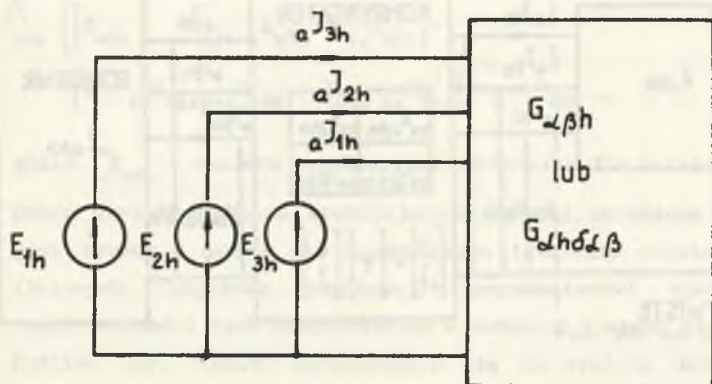
Rys. 3. Ortogonalność składowych prądu źródła względem SEM źródła w normie L_3^2

Fig. 3. Orthogonality of current source components for electromotive force (SEM) in the norm L_3^2

Uzyskane wyniki odnośnie ortogonalności składowych prądu źródła są podobne jak w pracy [3] dla zasilania jednofazowego. Nieortogonalność niektórych z wyżej wymienionych składowych prądu źródła nie pozwala na konstrukcje prostopadłościanu mocy, jak to przeprowadzono w pracy [1] dla bezimpedancyjnych źródeł zasilania.

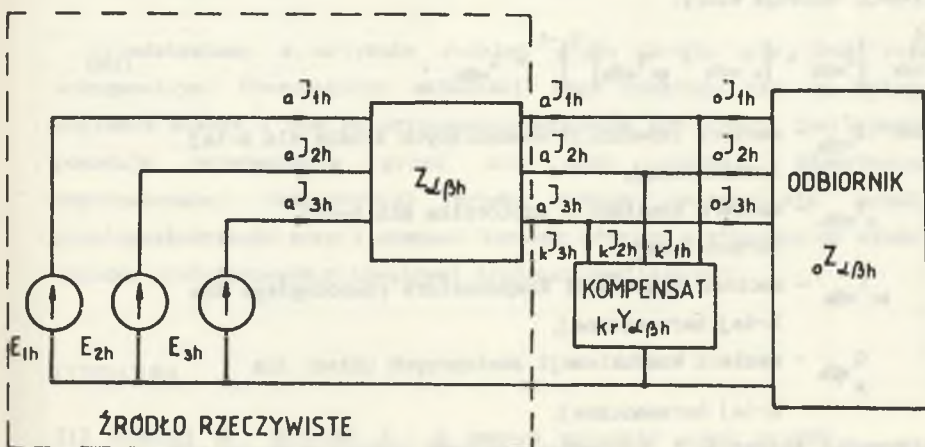
3. UWAGI O KOMPENSACJI

Optymalna praca źródła zasilającego (w sensie określonym wzorami (5), (6) części I artykułu [4]) wymaga, by wydawało ono prąd aktywny α określony wzorami (34), (40) (wg numeracji części I artykułu [4]), co nastąpi wtedy, gdy macierze admitancji wejściowych, widzianych z zacisków SEM $G_{\alpha\beta}$ (rys.4). Problem kompensacji, czyli problem eliminacji z prądu źródła wszystkich składowych z wyjątkiem składowej aktywnej polega na modyfikacji admitancji widzianej z zacisków SEM źródła poprzez włączenie na dostępne fizycznie zaciski odbiornika kompensatorów szeregowych lub równoległych (rys.5,6). Kompensatory te będące wielobiegownikami, realizowalnymi w zadanych klasach, elementów nie powinny pobierać ze źródła zasilającego mocy czynnej.



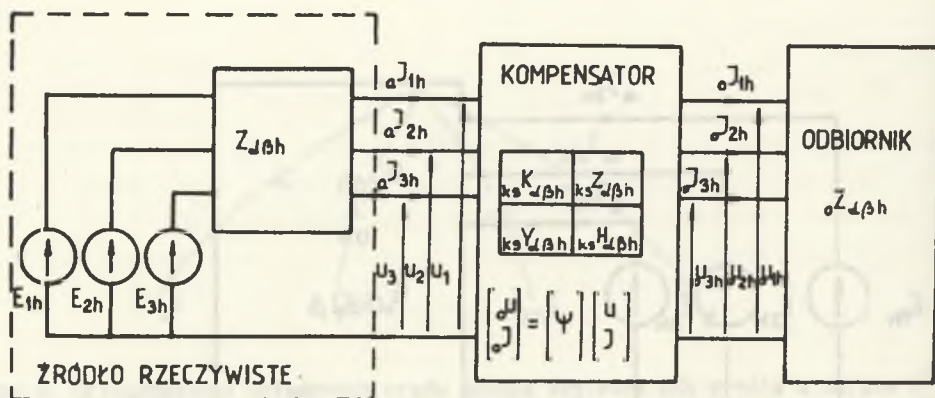
Rys.4. Stan optymalny pracy trójfazowego źródła napięcia

Fig.4. Optimum operating conditions of 3-phase voltage source



Rys.5. Koncepcja kompensacji równoległej

Fig.5. Idea of parallel compensation



Rys. 6. Koncepcja kompensacji szeregowej

Fig. 6. Idea of series compensation

W przypadku kompensacji równoległej warunki kompensacji wszystkich wyróżnionych składowych prądów fazowych źródła, z wyjątkiem składowej aktywnej, opisują wzory:

$$\bigwedge_{h \in N} \left(Z_{\alpha\beta h} + \left(Y_{\alpha\beta h} + Y_{kr\alpha\beta h} \right)^{-1} \right)^{-1} = G_{\alpha\beta h} \quad (19)$$

gdzie: $Z_{\alpha\beta h}$ - macierz impedancji wewnętrznych źródła dla h-tej harmonicznej,

$Y_{\alpha\beta h}$ - macierz admitancji odbiornika dla h-tej harmonicznej,

$Y_{kr\alpha\beta h}$ - macierz admitancji kompensatora równoległego dla h-tej harmonicznej,

$G_{\alpha\beta h}$ - macierz konduktancji zastępczych układu dla h-tej harmonicznej.

W przypadku kompensacji szeregowej warunki doboru kompensatora opisanego równaniami:

$$\bigwedge_{h \in N} U_{\alpha h} = K_{\alpha\beta h} U_{\beta h} + Z_{\alpha\beta h} I_{\beta h} \quad (20)$$

$$\bigwedge_{h \in N} I_{\alpha h} = Y_{\alpha\beta h} U_{\beta h} + H_{\alpha\beta h} I_{\beta h} \quad (21)$$

gdzie: $K_{\alpha\beta h}$, $Z_{\alpha\beta h}$, $Y_{\alpha\beta h}$, $H_{\alpha\beta h}$ macierze immitancji kompensatora szeregowego dla h-tej harmonicznej, są następujące:

$$\bigwedge_{h \in \mathbb{N}} \left[\left(Z_{\alpha\beta h} + K_{\xi\gamma h} \circ Z_{\gamma\delta h} + Z_{\alpha\xi h} \right) \cdot \left(1 + K_{\eta\gamma h}^{-1} Y_{\gamma\delta h} \cdot Z_{\delta\xi h} K_{\beta\gamma h}^{-1} \right) \right]^{-1} = G_{\alpha\beta h}, \quad (22)$$

gdzie: $Z_{\alpha\beta h}$ - macierz impedancyjna odbiornika dla h-tej harmonicznej.

Dobór wielobiegunków spełniających warunki określone wzorami (19), (22) jest trudny i wiąże się z problemem istnienia rozwiązań układów równań liniowych (względem admitancji kompensatorów) spełniających warunki realizowalności tych kompensatorów w zadanych klasach elementów.

Możliwe jest również ograniczenie się do syntezy układów kompensujących wybrane składowe przedstawionego w artykule rozkładu prądu. Wymieniony problem nawet dla układów jednofazowych z rzeczywistymi źródłami zasilającymi nie zawsze musi posiadać rozwiązanie [3].

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule rozkład prądu źródła nie jest rozkładem ortogonalnym. Poszczególne składniki tego rozkładu nie są ortogonalne względem siebie i nie są ortogonalne względem SEM źródła zasilającego, co powoduje przenoszenie przez nie mocy czynnej. Nieortogonalność zaproponowanej dekompozycji prądu źródła uniemożliwia konstrukcję prostopadłością mocy i stanowi istotną różnicę w stosunku do właściwości układów wielofazowych z idealnymi źródłami zasilającymi.

LITERATURA

- [1] Brodzki M., Walczak J.: O pewnym sposobie oceny prądów odkształconych odbiorników wielozaciskowych wykorzystującym pojęcie przestrzeni Sobolewa. XI SPETO. 20-23 kwiecień. Wisła 1988.
- [2] Brodzki M., Walczak J.: Nowa definicja mocy w układach z przebiegami odkształconymi wykorzystująca pojęcie przestrzeni Sobolewa. XII KKT01UE. Myczkowce, 17-20. X. 1989.

- [3] Walczak J.: Rozkład prądu odbiornika dwuzaciskowego zasilanego napięciem odkształconym z rzeczywistego źródła napięcia. XIII SPETO. 20-25 maj. Wisła 1990.
- [4] Walczak J.: Optymalizacja warunków pracy rzeczywistych, trójfazowych, źródeł napięć odkształconych.
I. Wyznaczanie prądu aktywnego źródła. ZN. Pol. Śl. Elektryka. z.122, 1991.

Recenzent: doc.dr inż. Zdzisław Klonowicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 26 lutego 1991 r.

OPTIMIZATION OF OPERATING CONDITIONS OF NONIDEAL AND NONSINUSOIDAL THREE-PHASE VOLTAGE SOURCES

II. DECOMPOSITION OF THE SOURCE CURRENT

S u m m a r y

The paper is a continuation of the analysis of the optimum operating conditions of nonideal and nonsinusoidal three-phase voltage sources [4] and describes decomposition of the source current into four components. The active current supplying the receiver with the active power is the first of the components, it realizes a given compromise between the minimum RMS value current (in the sense of a space norm L_3^2) and the minimum of its distortion. The other components of the current decomposition are undesirable and they should be eliminated. The paper discusses the questions of mutual orthogonality of the source current components and the problem of orthogonality of these components towards electromotive force of the source. The idea and the conditions of the system selection for parallel and serial compensation of undesirable components of the source current have been given.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ УСЛОВИИ РЕАЛЬНЫХ ТРЕХФАЗОВЫХ ИСТОЧНИКОВ
НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

II ДЕКОМПОЗИЦИЯ ТОКА ИСТОЧНИКА

Резюме

Данная статья является продолжением анализа оптимальных условий работы реальных, трёхфазных источников несинусоидальных напряжений. Она относится к декомпозиции общего тока на четыре составляющие. Первая составляющая является активным током, который транспортирует определённую активную мощность к приёмнику и которой определяет заданный компромисс между минимумом от эффективного тока (в смысле нормы пространства L^2_2) а минимум от его деформации. Другие составляющие этой декомпозиции нежелательные и надо их исключать. В работе решена проблема взаимной ортогональности составляющих тока и также проблема ортогональности этих составляющих относительно ЭДС источника. Представлена концепция и условия подбора компенсационных устройств для параллельной и последовательной компенсации нежелательных составляющих тока.