

Równania wyjściowe do analizy zagadnienia wpływu niesymetrii obciążenia transformatorów na stopień niesymetrii napięć w sieci

Streszczenie: Stopień niesymetrii napięć w sieci elektroenergetycznej jest ograniczony a jego wartość również określają przepisy. Niesymetrię napięć wyjściowych transformatorów energetycznych w największym stopniu wymuszają obciążenia niesymetryczne. W referacie, przy wykorzystaniu programu Mathcad przeanalizowano wpływ różnego rodzaju niesymetrii obciążeń na wartość współczynnika niesymetrii.

Abstract: The degree of voltage asymmetry of electric power network is constrained and its value is defined by the regulations too. Asymmetry of output voltage of power transformer is caused chiefly by asymmetric loads. The paper presents analyzes the effect of various types of load asymmetry on the value of the asymmetry factor. The analyzes are carried out with the help of Mathcad software. (Basic equations for analysis of the effect of transformer load asymmetry on the degree of voltage asymmetry).

Słowa kluczowe: stopień niesymetrii napięć, obciążenia niesymetryczne, współczynnik niesymetrii, transformatory energetyczne.

Keywords: the degree of voltage asymmetry, asymmetric loads, asymmetry factor, power transformer.

doi:10.12915/pe.2014.04.52

Wprowadzenie

Do parametrów jakościowych energii elektrycznej należy między innymi wymaganie, by w ciągu każdego tygodnia 95% ze zbioru 10 minutowych średnich wartości składowych symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia zasilającego mieściło się w przedziale od 0 % do 2 % wartości składowej zgodnej. To wymaganie nie jest powszechnie znane i często jest lekceważone, bowiem praktycznie dotyczy tylko obwodów zasilanych napięciem trójfazowym czyli sieci zasilających odbiorniki trójfazowe, zwłaszcza silniki. Znajomość tego parametru ma jednak duże znaczenie praktyczne, bowiem w przypadku silników wpływa na obniżenie stopnia wykorzystania ich mocy znamionowych.

Charakterystyka zagadnienia

Do analizy zagadnienia posłużono się, metodą składowych symetrycznych przy wykorzystaniu programu obliczeniowego Mathcad. Współczynniki niesymetrii napięć wyjściowych transformatorów, jako stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia do składowej zgodnej, lub składowej kolejności zerowej do składowej zgodnej, wyznaczano po uprzednim obliczeniu napięć wyjściowych transformatorów dla założonych niesymetrycznych impedancji obciążenia (odbiorników). Wartości impedancji obciążenia poszczególnych faz zapisano w postaci

$$(1) \quad Z_{\text{odb } u, v, w} = k_{1,2,3} Z_{\text{odn}} \exp j0.107 \cdot \frac{2\pi}{3}$$

gdzie literami u, v, w, oznaczono kolejne fazy.

Na podstawie impedancji poszczególnych faz oblicza się impedancje składowych symetrycznych kolejności:

– zgodnej

$$(2a) \quad Z_1(k_1, k_2, k_3) = \frac{(Z_u(k_1) + aZ_v(k_2) + a^2Z_w(k_3))}{3}$$

– przeciwnej

$$(2b) \quad Z_2(k_1, k_2, k_3) = \frac{(Z_u(k_1) + a^2Z_v(k_2) + aZ_w(k_3))}{3}$$

– zerowej

$$(2c) \quad Z_0(k_1, k_2, k_3) = \frac{(Z_u(k_1) + Z_v(k_2) + Z_w(k_3))}{3}$$

Impedancje w zapisie macierzowym przyjmują postać:

$$(3) \quad \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{pmatrix} Z_u \\ Z_v \\ Z_w \end{pmatrix}$$

Po rozłożeniu napięć zasilających oraz prądów i impedancji odbiornika na składowe symetryczne oraz po przekształceniu równań typu $U = IZ$ na równania odwrotne typu $I = YU$ otrzymuje się równania prądów składowych symetrycznych w postaci:

$$(4) \quad \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{10} \\ M_{21} & M_{22} & M_{20} \\ M_{01} & M_{02} & M_{00} \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{D} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{pmatrix}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} D_1(k_1, k_2, k_3) &= (Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_{\mu 0}) \\ D_2(k_1, k_2, k_3) &= -Z_1(k_1, k_2, k_3)Z_2(k_1, k_2, k_3)[3Z_0(k_1, k_2, k_3) + (Z_z + Z_z + Z_{\mu 0})] \\ D_3(k_1, k_2, k_3) &= Z_1(k_1, k_2, k_3)^3 + Z_2(k_1, k_2, k_3)^3 \\ D(k_1, k_2, k_3) &= D_1(k_1, k_2, k_3) + D_2(k_1, k_2, k_3) + D_3(k_1, k_2, k_3) \\ M_{11}(k_1, k_2, k_3) &= (Z_z + Z_0(k_1, k_2, k_3))(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_{\mu 0}) - Z_1(k_1, k_2, k_3)Z_2(k_1, k_2, k_3) \\ M_{12}(k_1, k_2, k_3) &= Z_1(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_2(k_1, k_2, k_3)(Z_{\mu 0} + Z_0(k_1, k_2, k_3)) \\ M_{10}(k_1, k_2, k_3) &= Z_2(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_1(k_1, k_2, k_3)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z) \\ M_{20}(k_1, k_2, k_3) &= Z_1(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_2(k_1, k_2, k_3)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z) \\ M_{21}(k_1, k_2, k_3) &= (Z_2(k_1, k_2, k_3))^2 - (Z_1(k_1, k_2, k_3))(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_{\mu 0}) \\ M_{01}(k_1, k_2, k_3) &= Z_1(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_2(k_1, k_2, k_3)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z) \\ M_{02}(k_1, k_2, k_3) &= Z_2(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_1(k_1, k_2, k_3)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z) \\ M_{00}(k_1, k_2, k_3) &= (Z_z + Z_0(k_1, k_2, k_3))^2 - Z_1(k_1, k_2, k_3)Z_2(k_1, k_2, k_3) \\ M_{22}(k_1, k_2, k_3) &= (Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_{\mu 0}) + \\ &\quad - Z_1(k_1, k_2, k_3)Z_2(k_1, k_2, k_3) \end{aligned}$$

Jeżeli przyjąć, że w napięciu zasilającym uwzględnia się tylko składową kolejności zgodnej, to składowe symetryczne prądów strony wtórnej transformatora opisują wzory:

– składowa prądu kolejności zgodnej

$$(5a) \quad I_1(k_1, k_2, k_3) = M_{11}(k_1, k_2, k_3)U_{\text{nif}} \frac{1}{D(k_1, k_2, k_3)}$$

– składowa prądu kolejności przeciwnej

$$(5b) \quad I_2(k_1, k_2, k_3) = M_{21}(k_1, k_2, k_3)U_{\text{nif}} \frac{1}{D(k_1, k_2, k_3)}$$

– składowa prądu kolejności zerowej

$$(5c) \quad I_0(k_1, k_2, k_3) = M_{01}(k_1, k_2, k_3) U_{ntr} \frac{1}{D(k_1, k_2, k_3)}$$

Prądy fazowe oblicza się wg. wzorów:

$$(6) \quad \begin{pmatrix} I_a(k_1, k_2, k_3) \\ I_b(k_1, k_2, k_3) \\ I_c(k_1, k_2, k_3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(k_1, k_2, k_3) \\ I_2(k_1, k_2, k_3) \\ I_0(k_1, k_2, k_3) \end{pmatrix}$$

Prąd w przewodzie neutralnym opisuje wzór:

$$(7) \quad I_{po}(k_1, k_2, k_3) = I_a(k_1, k_2, k_3) + I_b(k_1, k_2, k_3) + I_c(k_1, k_2, k_3)$$

Napięcia fazowe opisują związki:

$$U_a(k_1, k_2, k_3) = I_a(k_1, k_2, k_3) Z_{zu}(k_1)$$

$$(8) \quad U_b(k_1, k_2, k_3) = I_b(k_1, k_2, k_3) Z_{zv}(k_2)$$

$$U_c(k_1, k_2, k_3) = I_c(k_1, k_2, k_3) Z_{zw}(k_3)$$

Natomiast składowe symetryczne napięcie strony wtórnej transformatora można obliczać wg. wzorów:

$$(9a) \quad U_1(k_1, k_2, k_3) = \frac{U_a(k_1, k_2, k_3) + aU_b(k_1, k_2, k_3) + a^2U_c(k_1, k_2, k_3)}{3}$$

$$(9b) \quad U_2(k_1, k_2, k_3) = \frac{U_a(k_1, k_2, k_3) + a^2U_b(k_1, k_2, k_3) + aU_c(k_1, k_2, k_3)}{3}$$

$$(9c) \quad U_0(k_1, k_2, k_3) = \frac{U_a(k_1, k_2, k_3) + U_b(k_1, k_2, k_3) + U_c(k_1, k_2, k_3)}{3}$$

Współczynniki niesymetrii napięć strony wtórnej transformatora opisują związki:

$$(10a) \quad K_u(k_1, k_2, k_3) = \frac{|U_2(k_1, k_2, k_3)|}{|U_1(k_1, k_2, k_3)|}$$

$$(10b) \quad K_{u0}(k_1, k_2, k_3) = \frac{|U_0(k_1, k_2, k_3)|}{|U_1(k_1, k_2, k_3)|}$$

Wyniki przykładowych obliczeń i ich analiza

Posługując się parametrami transformatora o mocy 630 kVA i napięciach 15000 V/420 - 242,5 V oraz napięciu zwarcia 5.6 % obliczono charakterystyczne wielkości wyjściowe istotne dla tytułu artykułu. Na rysunkach przedstawiono w postaci graficznej niektóre wyniki obliczeń. Obliczenia przeprowadzono na przykładzie niesymetrycznego odbiornika o następujących parametrach:

$$Z_{zu}(k_1) = (k_1 Z_{odn} e^{j \cdot 0.107 \cdot 2 \frac{\pi}{3}})$$

$$(11) \quad Z_{zv}(k_2) = (Z_{odn} \cdot 1.2 e^{j \cdot 0.307 \cdot 2 \frac{\pi}{3}})$$

$$Z_{zw}(k_3) = (k_3 \cdot 0.8 Z_{odn} e^{j \cdot 0.207 \cdot 2 \frac{\pi}{3}})$$

Dla tego przypadku obciążenia niesymetrycznego, przy różnych wartościach współczynników k_1 , k_2 oraz k_3 współczynniki niesymetrii napięć wynoszą:

$$K_u(1,1,1) = 0,073$$

$$K_u(1,0.85,0.9) = 0,067$$

$$K_u(0.9,1,1) = 0,076$$

Dla przykładowych innych obciążeń uzyskuje się np.:

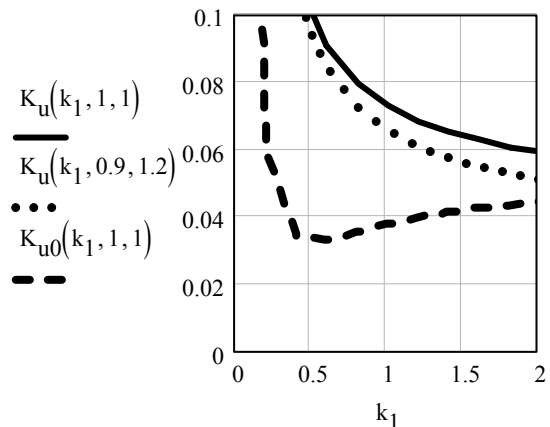
$$K_u(1,1,1) = 0,022$$

$$K_u(0.9,1,1) = 0,025$$

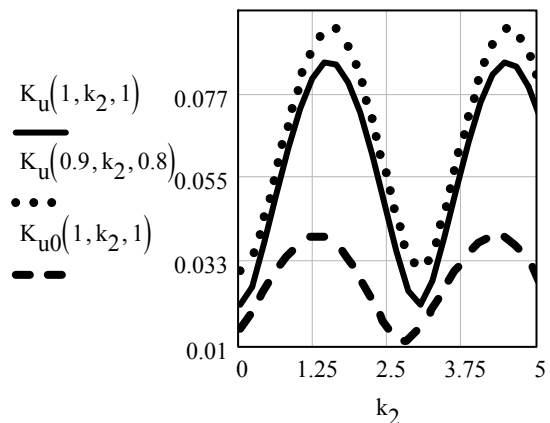
$$K_u(1,0.85,0.9) = 0,025$$

Łatwo zauważyć, że dla rozpatrywanego przypadku obciążenia współczynniki niesymetrii przekraczają dopuszczalną wartość. Zmienność wartości

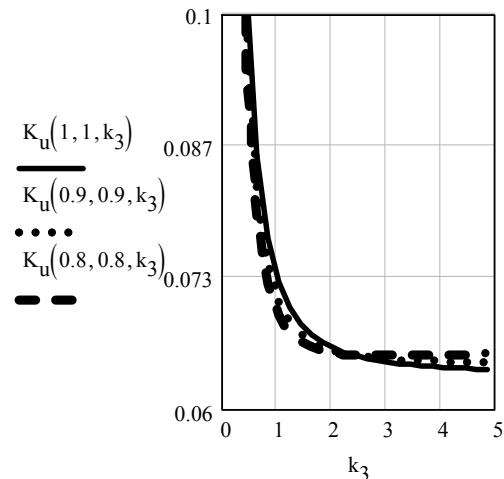
współczynników niesymetrii od wartości k_1 , k_2 oraz k_3 pozwalają śledzić rysunki.



Rys. 1. Zależność współczynników niesymetrii od wskaźnika k_1



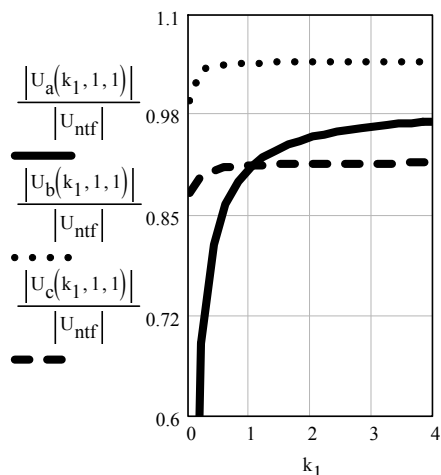
Rys. 2. Zależność współczynników niesymetrii od wskaźnika k_2



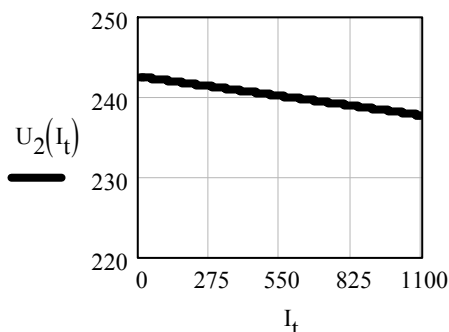
Rys. 3. Zależność współczynników niesymetrii od wskaźnika k_3

Napięcie wyjściowe (wtórne) transformatora jest mniejsze od wejściowego (pierwotnego) o spadek napięcia, czyli $U_2 = U_1 - \Delta U$. Znamionowe napięcie wyjściowe transformatora jest napięciem strony wtórnej nieobciążonego transformatora. W przypadku transformatora SN/nn, będzie to np. 15575/420 – 242.5 V, gdzie 242.5 jest znamionowym napięciem fazowym. Należy mieć na uwadze, że takie napięcia znamionowe transformatora dotyczą znamionowego napięcia sieci niskiego napięcia 400/231 V. Przy obciążeniu transformatora prądem znamionowym, przy $\cos\varphi = 0.8$ napięcie wyjściowe $U_2 = 230.9$ V, natomiast przy $\cos\varphi = 0.929$ (czyli przy $\tan\varphi = 0.4$) napięcie wyjściowe

wzrasta do wartości 233.3 V. Na rys. 5 pokazano wpływ natężenia prądu na napięcie wyjściowe transformatora przy stałej wartości współczynnika mocy obciążenia.



Rys.4. Zależność napięć fazowych od wskaźnika k_1



Rys.5. Zależność napięcia wyjściowego transformatora od natężenia prądu, przy stałej wartości współczynnika mocy

Podsumowanie i wnioski

W sieci elektroenergetycznej zasilającej odbiorniki trójfazowe, a zwłaszcza silniki indukcyjne, należy kontrolować wartości napięć, zwłaszcza międzyfazowych, by nie przekraczać dopuszczonych przez przepisy stopni niesymetrii napięć. Przy dużych niesymetriach napięć, w silnikach nie tylko niesymetryczne są natężenia prądów w poszczególnych fazach ale przede wszystkim, z powodu dużej wartości składowej kolejności przeciwnej napięcia, obniża się wartość składowej kolejności zgodnej przez co zmniejsza się, możliwa do wykorzystania, moc użyteczna silnika

LITERATURA

- [1] Stein Z. Eksploatacja maszyn elektrycznych. Rozdz. 5.6 w Poradniku Inżyniera Elektryka, WNT, Warszawa 2007.
- [2] Stein Z. Zielińska M. Wykorzystanie programu MCAD do badania wykorzystania mocy znamionowej silników indukcyjnych w warunkach niesymetrii 3-fazowego układu napięć. Materiały ZKwE, Poznań. 2008.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Ryszard Nawrowski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Ryszard.Nawrowski@put.poznan.pl, prof. dr hab. inż. Zbigniew Stein, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Zbigniew.Stein@put.poznan.pl, dr inż. Maria Zielinska, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Maria.Zielinska@put.poznan.pl.