

Ryszard NAWROWSKI*
Zbigniew STEIN*
Maria ZIELIŃSKA*

OBLICZANIE WPLYWU NIESYMETRYCZNYCH OBCIĄŻEŃ TRANSFORMATORÓW SN/NN NA WSPÓŁCZYNNIKI NIESYMETRII NAPIĘĆ W SIECI NISKIEGO NAPIĘCIA

Stopień niesymetrii napięć w sieci elektroenergetycznej jest ograniczony a jego wartość określają przepisy. Niesymetrię napięć wyjściowych transformatorów energetycznych w największym stopniu wymuszają obciążenia niesymetryczne. W referacie przeanalizowano wpływ różnego rodzaju niesymetrii obciążeń na wartość tego współczynnika. Do analizy wykorzystano program Mathcad.

1. WPROWADZENIE

W oparciu o Ustawę z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo Energetyczne, tekst jednolity z późniejszymi zmianami, wraz z aktami wykonawczymi a w szczególności z rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2007 r. nr 93, poz. 623 wraz z późniejszymi zmianami) do parametrów jakościowych energii elektrycznej należy między innymi wymaganie, by w ciągu każdego tygodnia 95 % ze zbioru 10 minutowych średnich wartości skutecznych składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia zasilającego mieściło się w przedziale od 0 % do 2 % wartości składowej zgodnej. To wymaganie nie tylko nie jest powszechnie znane ale zwykle jest lekceważone, bowiem praktycznie dotyczy tylko obwodów zasilanych napięciem trójfazowym czyli sieci zasilających odbiorniki trójfazowe, zwłaszcza silniki. Przy okazji warto zwrócić uwagę, że normy dotyczące maszyn synchronicznych wymagają, by w napięciu sieci do której przyłączane są maszyny synchroniczne stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia do składowej zgodnej nie przekraczał wartości 1 %, czyli wymaganie podane w normie jest ostrzejsze niż podane w rozporządzeniu Ministra. W praktyce eksploatacyjnej sieci elektroenergetycznych maszyny synchroniczne stosunkowo rzadko są przyłączane bezpośrednio do sieci niskiego

* Politechnika Poznańska.

napięcia w których stopień niesymetrii napięć jest stosunkowo wysoki. Stopień niesymetrii napięć w sieci wysokiego napięcia, do których zwykle są przyłączane maszyny synchroniczne, jest na ogół mniejszy niż w sieci niskiego napięcia. Duży stopień niesymetrii napięć w sieci wysokiego napięcia występuje w tych przypadkach, gdy do sieci są przyłączone dużej mocy odbiorniki jedno (dwu) fazowe. Przypadki takie dotyczą najczęściej zasilania np. pieców indukcyjnych, rzadziej łukowych. Duże obciążenia niesymetryczne występują w trakcji kolejowej prądu przemiennego 25 kV, w której z trójfazowej sieci elektroenergetycznej bezpośrednio jest zasilana sieć trakcyjna. W takich przypadkach, nawet w sieci o napięciu 110 kV, z której są zasilane sieci trakcyjne, stopień niesymetrii napięć jest stosunkowo duży. Niesymetria napięć z tej sieci, przenosi się poprzez transformatory, na inne sieci zwłaszcza o niższym napięciu.. Na razie w Polsce nie przewiduje się, w najbliższej przyszłości, budowy sieci trakcji kolejowej prądu przemiennego o napięciu 25 kV.

W przypadkach transformatorów SN/nn, nawet przy symetrii napięć pierwotnych (średniego napięcia), obciążenia niesymetryczne wymuszają po stronie wtórnej niesymetrię napięć, której współczynniki niesymetrii zwykle przekraczają wartości dopuszczone przez przepisy. Na niesymetrię napięć zasilających bardzo wrażliwe są silniki trójfazowe, które przy większych niesymetriach napięć, ze względu na możliwość przegrzania, nie mogą być obciążane mocą znamionową, Również prędkość obrotowa tych silników jest mniejsza od znamionowej przez co wydajność urządzeń napędzanych przez te silniki maleje.

2. RÓWNANIA WYJŚCIOWE DO ANALIZY ZAGADNIENIA

Dla analizy zagadnienia posłużono się, w zastosowaniu do maszyn elektrycznych i transformatorów, 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). Dla przyjętych wartości impedancji obciążenia poszczególnych faz zapisanych w postaci

$$Z_{\text{odb } u, v, w} = k_{1,2,3} Z_{\text{odn}} \exp j0.1072\pi / 3$$

gdzie literami u, v, w oznaczono kolejne fazy. Impedancje poszczególnych faz:

$$Z_{\text{zu}}(k_1) = \left(k_1 Z_{\text{odn}} e^{j0.1072\frac{\pi}{3}} \right)$$

$$Z_{zv}(k_2) = \left(Z_{odn} \cdot 1.1 \cdot e^{jk_2 \cdot 0.107 \cdot 2 \frac{\pi}{3}} \right)$$

$$Z_{zw}(k_3) = \left(k_3 \cdot 0.8 \cdot Z_{odn} e^{-j \cdot 0.107 \cdot 2 \frac{\pi}{3}} \right)$$

Na podstawie tych impedancji obliczono impedancje składowych symetrycznych kolejności zgodnej, $Z_1(k_1, k_2, k_3) = 1/3(Z_u(k_1) + a \cdot Z_v(k_2) + a^2 \cdot Z_w(k_3))$, przeciwnej $Z_2(k_1, k_2, k_3) = 1/3(Z_u(k_1) + a^2 \cdot Z_v(k_2) + a \cdot Z_w(k_3))$, i zerowej $Z_0(k_1, k_2, k_3) = 1/3(Z_u(k_1) + Z_v(k_2) + Z_w(k_3))$,

Impedancje składowych symetrycznych w zapisie macierzowym przyjmują postać:

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

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

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

$$D_1(k_1, k_2, k_3) = (Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_{\mu 0})$$

$$D_2(k_1, k_2, k_3) = -Z_1(k_1, k_2, k_3)Z_2(k_1, k_2, k_3)[3Z_0(k_1, k_2, k_3) + (Z_z + Z_z + Z_{\mu 0})]$$

$$D_3(k_1, k_2, k_3) = Z_1(k_1, k_2, k_3)^3 + Z_2(k_1, k_2, k_3)^3$$

$$D(k_1, k_2, k_3) = D_1(k_1, k_2, k_3) + D_2(k_1, k_2, k_3) + D_3(k_1, k_2, k_3)$$

$$M_{11}(k_1, k_2, k_3) = (Z_z + Z_0(k_1, k_2, k_3))(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_{\mu 0}) - Z_1(k_1, k_2, k_3)Z_2(k_1, k_2, k_3)$$

$$M_{12}(k_1, k_2, k_3) = Z_1(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_2(k_1, k_2, k_3)(Z_{\mu 0} + Z_0(k_1, k_2, k_3))$$

$$M_{10}(k_1, k_2, k_3) = Z_2(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_1(k_1, k_2, k_3)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z)$$

$$M_{21}(k_1, k_2, k_3) = Z_2(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_1(k_1, k_2, k_3)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_{\mu 0})$$

$$M_{20}(k_1, k_2, k_3) = Z_1(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_2(k_1, k_2, k_3)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z)$$

$$M_{01}(k_1, k_2, k_3) = Z_1(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_2(k_1, k_2, k_3)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z)$$

$$M_{02}(k_1, k_2, k_3) = Z_2(k_1, k_2, k_3)^2 - Z_1(k_1, k_2, k_3)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z)$$

$$M_{00}(k_1, k_2, k_3) = (Z_z + Z_0(k_1, k_2, k_3))^2 - Z_1(k_1, k_2, k_3)Z_2(k_1, k_2, k_3)$$

$$M_{22}(k_1, k_2, k_3) = (Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_z)(Z_0(k_1, k_2, k_3) + Z_{\mu 0}) - Z_1(k_1, k_2, k_3)Z_2(k_1, k_2, k_3)$$

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

$$I_1(k_1, k_2, k_3) = M_{11}(k_1, k_2, k_3)U_{ntf} \frac{1}{D(k_1, k_2, k_3)}$$

– składowa prądu kolejności przeciwnej

$$I_2(k_1, k_2, k_3) = M_{21}(k_1, k_2, k_3)U_{ntf} \frac{1}{D(k_1, k_2, k_3)}$$

– składowa prądu kolejności zerowej

$$I_0(k_1, k_2, k_3) = M_{01}(k_1, k_2, k_3)U_{ntf} \frac{1}{D(k_1, k_2, k_3)}$$

Prądy fazowe oblicza się wg wzorów:

$$\begin{pmatrix} I_a(k_1, k_2, k_3) \\ I_b(k_1, k_2, k_3) \\ I_c(k_1, k_2, k_3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(k_1, k_2, k_3) \\ I_2(k_1, k_2, k_3) \\ I_3(k_1, k_2, k_3) \end{pmatrix}$$

Prąd w przewodzie neutralnym opisuje wzór:

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

Napięcia fazowe opisują związki:

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

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

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

Natomiast składowe symetryczne napięć strony wtórnej transformatora można obliczać wg wzorów:

$$U_1(k_1, k_2, k_3) = \frac{1}{3}(U_a(k_1, k_2, k_3) + aU_b(k_1, k_2, k_3) + a^2U_c(k_1, k_2, k_3))$$

$$U_2(k_1, k_2, k_3) = \frac{1}{3}(U_a(k_1, k_2, k_3) + a^2U_b(k_1, k_2, k_3) + aU_c(k_1, k_2, k_3))$$

$$U_0(k_1, k_2, k_3) = \frac{1}{3}(U_a(k_1, k_2, k_3) + U_b(k_1, k_2, k_3) + U_c(k_1, k_2, k_3))$$

Współczynniki niesymetrii napięć strony wtórnej transformatora opisują związki: współczynnik niesymetrii napięcia składowej przeciwnej do zgodnej $K_u = U_2/U_1$

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

współczynnik niesymetrii napięcia składowej zerowej do zgodnej $K_{u0} = U_0/U_1$

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

Dla praktyki eksploatacyjnej sieci elektroenergetycznych do obliczania współczynnika niesymetrii napięć składowej symetrycznej kolejności przeciwnej do składowej kolejności zgodnej najwygodniejszy jest wzór:

$$K_u = \sqrt{6 \frac{(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)}{(U_{ab} + U_{bc} + U_{ca})^2} - 2}$$

We wzorze występują tylko napięcia międzyprzewodowe U_{ab} , U_{bc} oraz U_{ca} .

3. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

Posługując się parametrami transformatora o mocy 800 kVA i napięciach 15000V/420- 242,5 V oraz napięciu zwarcia 5.6 % obliczono charakterystyczne wielkości wyjściowe istotne dla tytułu referatu. Na rysunkach przedstawiono w postaci graficznej niektóre wyniki obliczeń. Obliczenia przeprowadzono na przykładzie odbiornika o następujących parametrach:

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

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

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

Dla przyjętych niesymetrycznych impedancji obciążenia obliczono współczynniki niesymetrii. Otrzymano następujące przykładowe wyniki:

$$K_u(1, 1, 1) \cdot 1 = 0.022$$

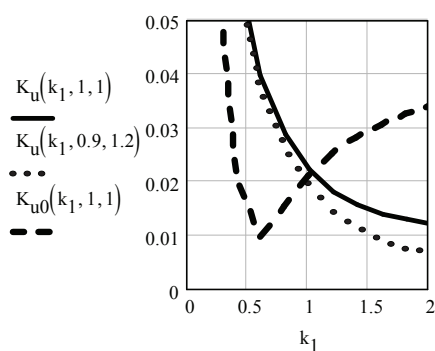
$$K_u(0.9, 1, 1) \cdot 1 = 0.025$$

$$K_u(1, 0.85, 0.9) \cdot 1 = 0.025$$

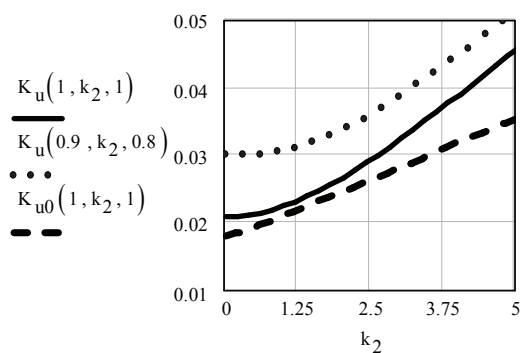
Łatwo zauważyć, że dla rozpatrywanego przypadku współczynniki niesymetrii przekraczają dopuszczalną wartość. Zmienność wartości współczynników w zależności od wskaźników niesymetrii pozwalają śledzić rysunki 1- 3. Na rys. 4, 5 i 6 przedstawiono wpływ wskaźników niesymetrii na

wartości napięć fazowych. Na rysunkach łatwo zauważyć, jak różne są wartości napięć fazowych.

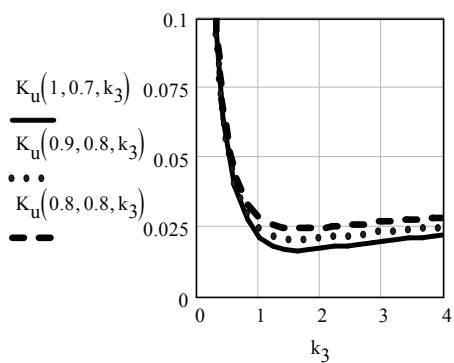
Na rys. 7, 8 oraz 9 przedstawiono wpływ niesymetrii napięć zasilających silnik indukcyjny na jego wybrane właściwości eksploatacyjne. W tym przypadku pokazano wpływ niesymetrii napięć na charakterystyki momentu w funkcji prędkości obrotowej oraz, na rys. 9, na możliwości wykorzystania mocy znamionowej silnika.



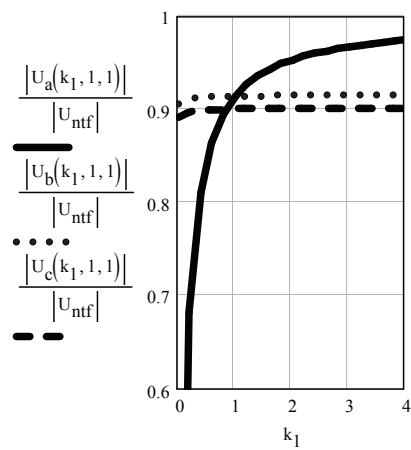
Rys. 1. Zależność współczynników niesymetrii od wskaźnika k_1



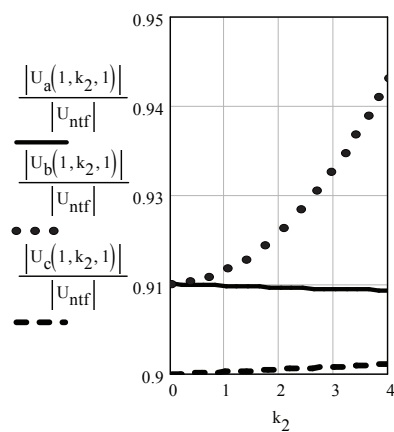
Rys. 2. Zależność współczynników niesymetrii od wskaźnika k_2



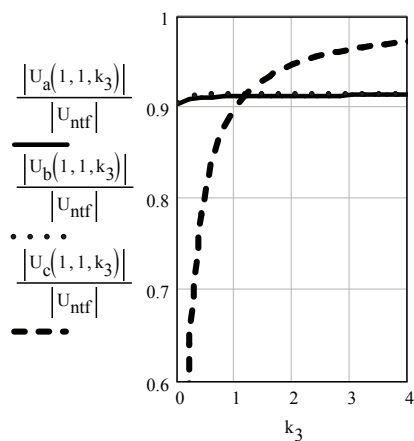
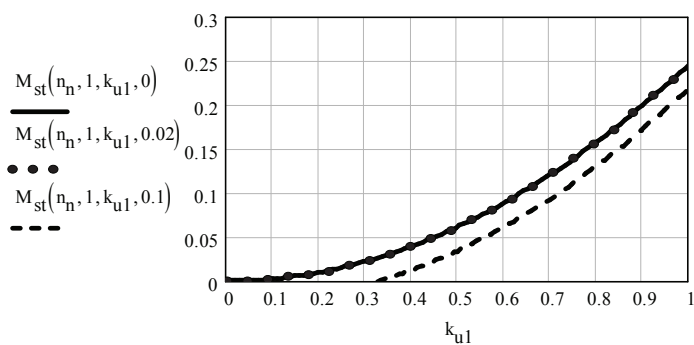
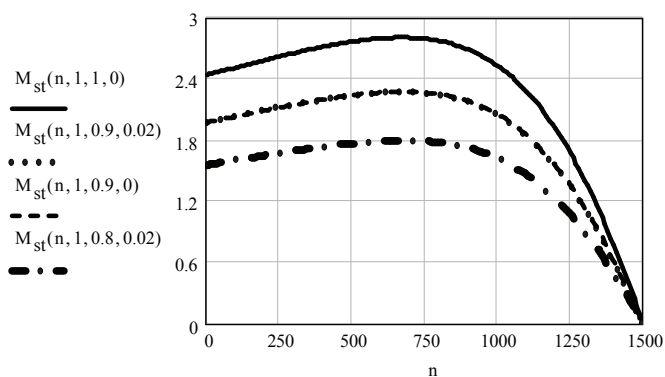
Rys. 3. Zależność współczynników niesymetrii od wskaźnika k_3

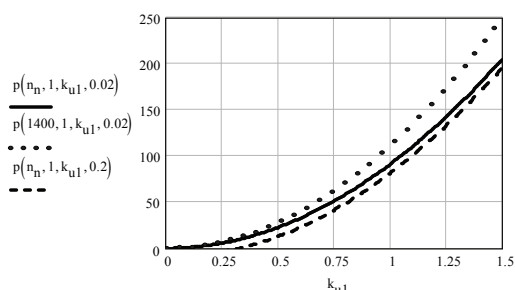


Rys.4. Zależność napięć fazowych od wskaźnika k_1



Rys. 5. Zależność napięć fazowych od wskaźnika k_2

Rys. 6. Zależność napięć fazowych od wskaźnika k_3 Rys. 7. Zależność charakterystyk momentu silnika indukcyjnego od wskaźnika k_1 Rys. 8. Zależność charakterystyk momentu silnika indukcyjnego od prędkości obrotowej dla różnych wartości współczynników niesymetrii napięć zasilających $U_1 = 1, 0.9$ oraz 0.8 oraz $U_2 = 0$ i 0.02



Rys. 9. Zależność względnej wartości mocy użytecznej silnika indukcyjnego od współczynnika k_1 przy dwóch różnych wartościach składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia zasilającego $U_2 = 0.02$ oraz $U_2 = 0.2$

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W sieci elektroenergetycznej zasilającej odbiorniki trójfazowe, a zwłaszcza silniki indukcyjne, zależy kontrolować wartości napięć, zwłaszcza międzyfazowych, by nie przekraczały 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.

CALCULATION OF THE EFFECT OF ASYMMETRIC LOADS OF MV/LV TRANSFORMERS ON THE VOLTAGE UNBALANCE FACTORS IN LOW VOLTAGE NETWORK

Degree of voltage asymmetry in electric power network is restrained to the value determined by proper regulations. Asymmetry of output voltage of a power transformer is caused chiefly by asymmetric loads. The paper presents analysis of the effect of various kinds of load asymmetry on the value of the factor. The analysis was carried out with the help of the Mathcad software.