POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ACADEMIC JOURNALS
No 91 Electrical Engineering 2017
DOI 10.21008/j.1897-0737.2017.91.0029

Ryszard NAWROWSKI*
Zbigniew STEIN*
Maria ZIELIŃSKA*

ANALIZA PRACY TRANSFORMATORÓW SN/NN PODCZAS OBCIĄŻEŃ NIESYMETRYCZNYCH

Obciążenia niesymetryczne są przyczyną niesymetrii napięć występujących na zaciskach strony wtórnej transformatorów energetycznych. Niesymetrię napięć charakteryzuje się przede wszystkim przez tzw. stopień niesymetrii napięć, określany przez stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej bądź zerowej do składowej kolejności zgodnej. Dopuszczalną wartość stopnia niesymetrii określają przepisy. W referacie przeanalizowano wpływ różnego rodzaju niesymetrii obciążeń na wartość współczynnika niesymetrii. Do analizy wykorzystano program Mathcad.

SŁOWA KLUCZOWE: transformator, obciążenie niesymetryczne, stopień niesymetrii

1. WPROWADZENIE

Transformatory energetyczne są w zasadzie przeznaczone do pracy przy obciążeniach symetrycznych, jednak w praktyce eksploatacyjnej, zwłaszcza przy zasilaniu sieci niskiego napięcia, są często obciążane niesymetrycznie. Przy tego rodzaju obciążeniach wiele różnego rodzaju parametrów trzeba obliczać w inny sposób niż przy obciążeniach symetrycznych. Obciążenia niesymetryczne wymuszają między innymi niesymetrię spadków napięć a tym samym niesymetrię wartości napięć po stronie dolnego napięcia transformatora, mimo że napięcia na zaciskach pierwotnych są symetryczne. Obowiązujące przepisy wprowadzają ograniczenia w zakresie stopnia niesymetrii napięć. I tak np. Ustawa 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 zalicza między innymi wymaganie, by w ciągu każdego tygodnia 95 % ze zbioru 10 minutowych średnich wartości skutecznych składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia zasilające-

* Politechnika Poznańska.

go mieściło się w przedziale od 0 % do 2 % wartości składowej zgodnej. Stosunki składowych symetrycznych napięć kolejności przeciwnej lub składowej zerowej do składowej kolejności zgodnej nazywa się współczynnikami niesymetrii napięć. Wymaganie dotyczące dopuszczalnych wartości współczynników niesymetrii 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 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

Do analizy zagadnienia najlepiej posługiwać 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 kolejności zgodnej, wyznacza się po uprzednim obliczeniu napięć wyjściowych transformatorów dla założonych niesymetrycznych impedancji obciążenia (odbiorników). Dla przyjętych wartości impedancji obciążenia poszczególnych faz zapisanych w postaci (1):

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

gdzie literami u, v, w oznaczono kolejne fazy.

Impedancje poszczególnych faz przedstawiają równania (2):

$$\begin{aligned} Z_{zu}(k_1) &= \left(k_1 Z_{odn} e^{j\cdot 0.107\cdot 2\frac{\pi}{3}} \right) \\ Z_{zv}(k_2) &= \left(Z_{odn}\cdot 1.1\cdot e^{jk_2\cdot 0.107\cdot 2\frac{\pi}{3}} \right) \\ Z_{zw}(k_3) &= \left(k_3\cdot 0.8\cdot Z_{odn} e^{-j\cdot 0.107\cdot 2\frac{\pi}{3}} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

Na podstawie tych impedancji obliczano 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 (3):

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

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 (4):

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

gdzie

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

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

$$D_2(k_1,k_2,k_3) = -Z_1(k_1,k_2,k_3)Z_2(k_1,k_2,k_3)[3Z_0(k_1,k_2,k_3) + (Z_z + Z_z + Z_{\mu 0})]$$
$$D_3(k_1,k_2,k_3) = Z1(k_1,k_2,k_3)^3 + Z_2(k_1,k_2,k_3)^3$$
$$M_{11}(k_1,k_2,k_3) = (Z_z + Z_0(k_1,k_2,k_3))(Z_0(k_1,k_2,k_3) + Z_{\mu 0}) - Z_1(k_1,k_2,k_3)Z_2(k_1,k_2,k_3)$$
$$M_{12}(k_1,k_2,k_3) = Z_1(k_1,k_2,k_3)^2 - Z_2(k_1,k_2,k_3)(Z_{\mu 0} + Z_0(k_1,k_2,k_3))$$
$$M_{10}(k_1,k_2,k_3) = Z_2(k_1,k_2,k_3)^2 - Z_1(k_1,k_2,k_3)(Z_0(k_1,k_2,k_3) + Z_z)$$
$$M_{21}(k_1,k_2,k_3) = Z_2(k_1,k_2,k_3)^2 - Z_1(k_1,k_2,k_3)(Z_0(k_1,k_2,k_3) + Z_{\mu 0})$$
$$M_{20}(k_1,k_2,k_3) = Z_1(k_1,k_2,k_3)^2 - Z_2(k_1,k_2,k_3)(Z_0(k_1,k_2,k_3) + Z_z)$$
$$M_{01}(k_1,k_2,k_3) = Z_1(k_1,k_2,k_3)^2 - Z_2(k_1,k_2,k_3)(Z_0(k_1,k_2,k_3) + Z_z)$$
$$M_{02}(k_1,k_2,k_3) = Z_2(k_1,k_2,k_3)^2 - Z_1(k_1,k_2,k_3)(Z_0(k_1,k_2,k_3) + Z_z)$$
$$M_{00}(k_1,k_2,k_3) = (Z_z + Z_0(k_1,k_2,k_3))^2 - Z_1(k_1,k_2,k_3)Z_2(k_1,k_2,k_3))$$
$$M_{22}(k_1,k_2,k_3) = (Z_0(k_1,k_2,k_3) + Z_z)(Z_0(k_1,k_2,k_3) + Z_{\mu 0}) - Z_1(k_1,k_2,k_3)Z_2(k_1,k_2,k_3)$$

Jeżeli przyjąć, że w napięciu zasilającym uwzględnia się tylko składową kolejności zgodnej, to składowe symetryczne prądów strony wtórnej transformatora opisują wzory (5, 6, 7):

– składowa prądu kolejności zgodnej

$$I_1(k_1,k_2,k_3) = M_{11}(k_1,k_2,k_3)U_{ntf}\frac{1}{D(k_1,k_2,k_3)} \tag{5}$$

– składowa prądu kolejności przeciwnej

$$I_2(k_1,k_2,k_3) = M_{21}(k_1,k_2,k_3)U_{ntf}\frac{1}{D(k_1,k_2,k_3)} \tag{6}$$

– składowa prądu kolejności zerowej

$$I_0(k_1,k_2,k_3) = M_{01}(k_1,k_2,k_3)U_{ntf}\frac{1}{D(k_1,k_2,k_3)} \tag{7}$$

Prądy fazowe oblicza się wg równań (8):

$$\begin{pmatrix} I_a(k_1,k_2,k_3) \\ I_b(k_1,k_2,k_3) \\ I_c(k_1,k_2,k_3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(k_1,k_2,k_3) \\ I_2(k_1,k_2,k_3) \\ I_3(k_1,k_2,k_3) \end{pmatrix} \tag{8}$$

Prąd w przewodzie neutralnym opisuje wzór (9):

$$I_{po}(k_1,k_2,k_3) = I_a(k_1,k_2,k_3) + I_b(k_1,k_2,k_3) + I_c(k_1,k_2,k_3) \tag{9}$$

Napięcia fazowe opisują związki (10):

$$\begin{aligned} U_a(k_1,k_2,k_3) &= I_a(k_1,k_2,k_3)Z_{zu}(k_1) \\ U_b(k_1,k_2,k_3) &= I_a(k_1,k_2,k_3)Z_{zv}(k_2) \\ U_c(k_1,k_2,k_3) &= I_c(k_1,k_2,k_3)Z_{zw}(k_3) \end{aligned} \tag{10}$$

Natomiast składowe symetryczne napięć strony wtórnej transformatora można obliczać wg wzorów (11):

$$U_1(k_1,k_2,k_3)=\frac{1}{3}(U_a(k_1,k_2,k_3)+aU_b(k_1,k_2,k_3)+a^2U_c(k_1,k_2,k_3))$$
$$U_2(k_1,k_2,k_3)=\frac{1}{3}(U_a(k_1,k_2,k_3)+a^2U_b(k_1,k_2,k_3)+aU_c(k_1,k_2,k_3)) \qquad (11)$$
$$U_0(k_1,k_2,k_3)=\frac{1}{3}(U_a(k_1,k_2,k_3)+U_b(k_1,k_2,k_3)+U_c(k_1,k_2,k_3))$$

Współczynniki niesymetrii napięć strony wtórnej transformatora opisują związki (12, 13):

– współczynnik niesymetrii napięcia składowej przeciwnej do zgodnej $K_u = U_2/U_1$

$$K_u(k_1,k_2,k_3)=\frac{|U_2(k_1,k_2,k_3)|}{|U_1(k_1,k_2,k_3)|} \qquad (12)$$

oraz

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

$$K_{u0}(k_1,k_2,k_3)=\frac{|U_0(k_1,k_2,k_3)|}{|U_1(k_1,k_2,k_3)|} \qquad (13)$$

Dla praktyki eksploatacyjnej sieci elektroenergetycznych do obliczania współczynnika niesymetrii napięć składowej symetrycznej kolejności przeciwnej do składowej kolejności zgodnej najwygodniejszy jest wzór (14):

$$K_u=\sqrt{6\frac{(U_{ab}^2+U_{bc}^2+U_{ca}^2)}{(U_{ab}+U_{bc}+U_{ca})^2}-2} \qquad (14)$$

We wzorze tym występują tylko napięcia międzyprzewodowe U_{ab}, U_{bc} oraz U_{ca}, co bardzo ułatwia obliczanie współczynnika niesymetrii.

3. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

Posługując się parametrami transformatora o mocy 800 kVA i napięciach 15000 V/420– 242,5 V oraz napięciu zwarcia 6 % obliczono charakterystyczne wielkości wyjściowe istotne dla tytułu artykułu. Na rysunkach przedstawiono w postaci graficznej niektóre wyniki obliczeń. Obliczenia przeprowadzono na przykładzie odbiornika o następujących parametrach (15):

$$Z_{zu}(k_1)=\left(k_1Z_{odn}e^{j\cdot 0.107\cdot 2\frac{\pi}{3}}\right)$$

$$Z_{zv}(k_2) = \left(Z_{odn} 1.2 e^{jk_2 \cdot 0.307 \cdot 2\frac{\pi}{3}} \right) \tag{15}$$

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

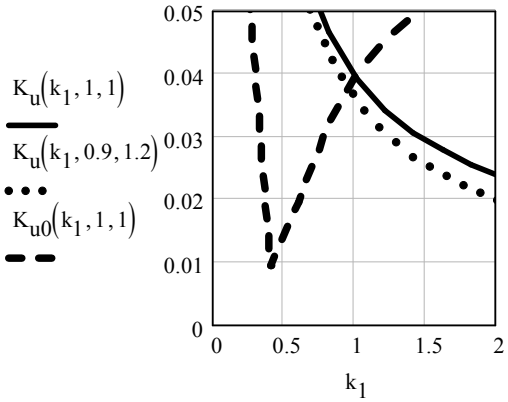
w których odpowiednio k_1, k_2 oraz k_3 umożliwiają dowolne zmienianie wartości impedancji.

Dla przyjętych niesymetrycznych impedancji obciążenia obliczono współczynniki niesymetriii. Otrzymano następujące przykładowe wyniki (16):

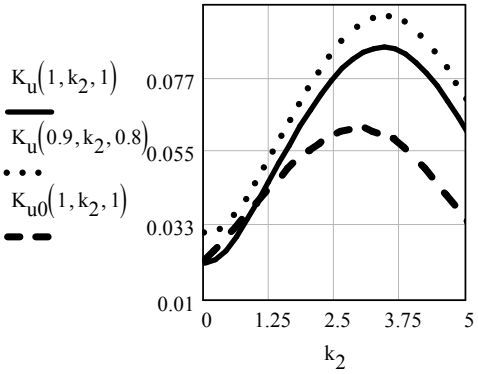
$$\begin{aligned} K_u &= (1,1,1) \cdot 1 = 0.022 \\ K_u &= (0.9,1,1) \cdot 1 = 0.025 \\ K_u &= (1,0.85,0.9) \cdot 1 = 0.025 \end{aligned} \tag{16}$$

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. Rysunki 7, 8, 9 przedstawiają wpływ wskaźników niesymetrii na wartość prądów fazowych strony pierwotnej. Na rysunku 10, 11 zobrazowano przebiegi współczynników niesymetrii w funkcji współczynnika k_1, k_2 oraz k_3.

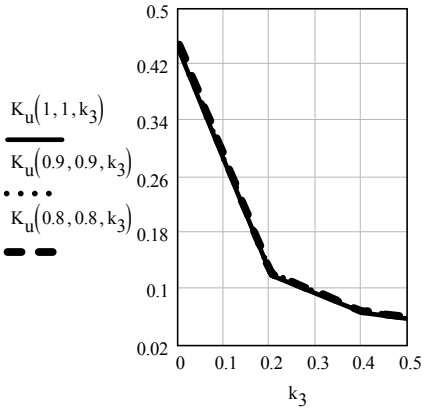
Na rys. 13, 14 oraz 15 przedstawiono wpływ niesymetrii napięć zasilających silnik indukcyjny na jego wybrane właściwości eksploatacyjne. W tym przypadku pokazano wpływ niesymetrii napięć na charakterystyki momentu w funkcji prędkości obrotowej oraz na możliwości wykorzystania mocy znamionowej silnika.



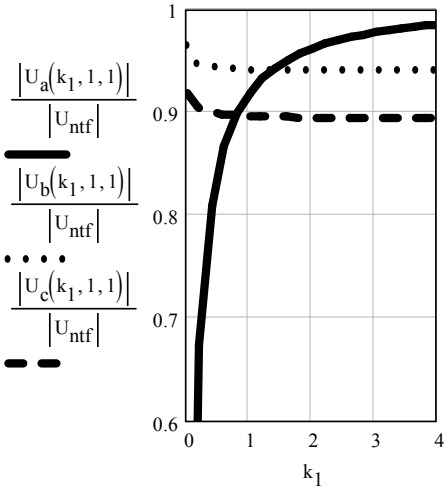
Rys. 1. Zależność współczynników niesymetrii od wskaźnika k_1



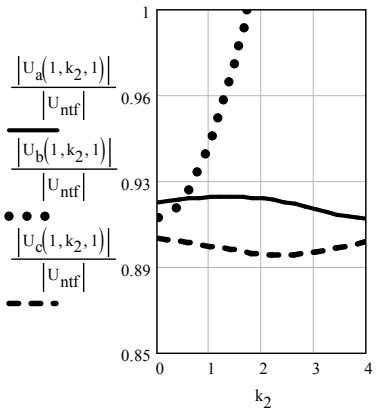
Rys. 2. Zależność współczynników niesymetrii od wskaźnika k_2



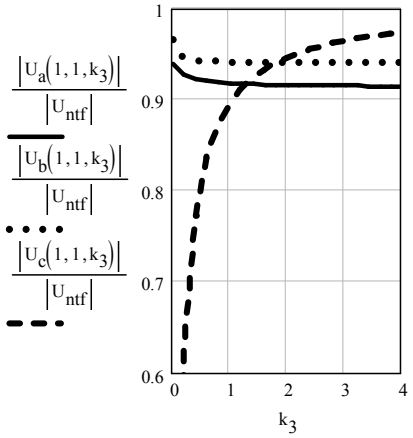
Rys. 3. Zależność współczynników niesymetrii od wskaźnika k_3



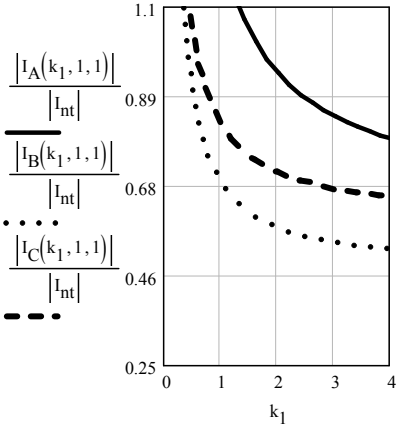
Rys. 4. Zależność napięć fazowych od wskaźnika k_1



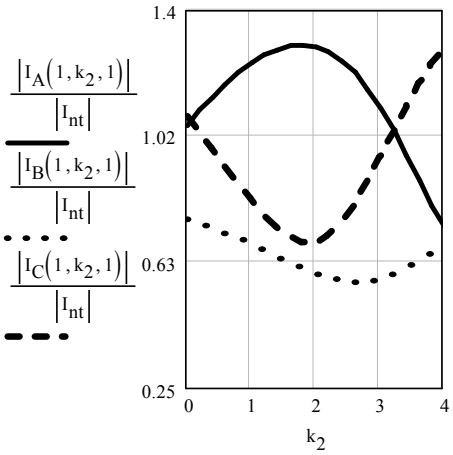
Rys. 5. Zależność napięć fazowych od wskaźnika k_2



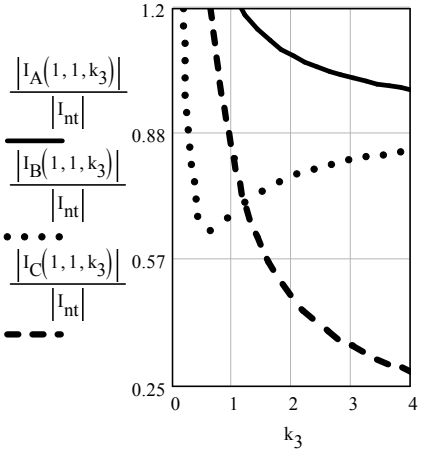
Rys. 6. Zależność napięć fazowych od wskaźnika k_3



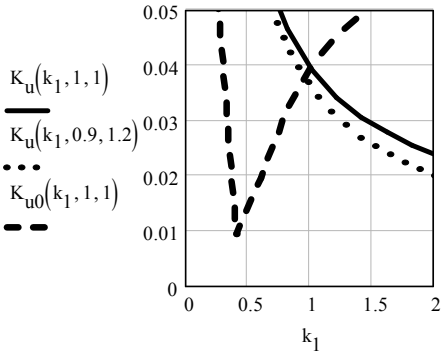
Rys. 7. Przebiegi prądów fazowych strony pierwotnej w funkcji współczynnika k_1



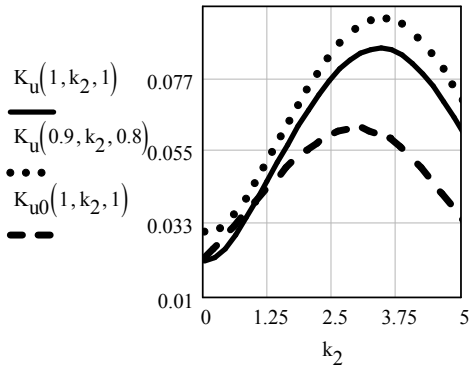
Rys. 8. Przebiegi prądów fazowych strony pierwotnej w funkcji współczynnika k_2



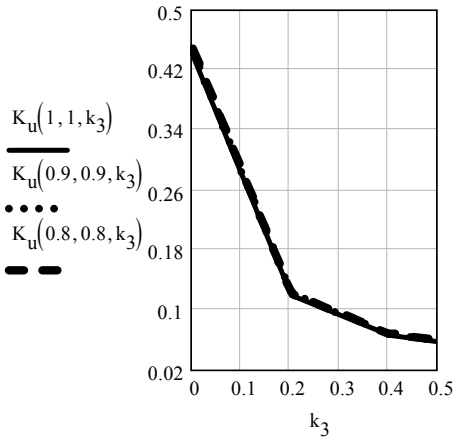
Rys. 9. Przebiegi prądów fazowych strony pierwotnej w funkcji współczynnika k_3



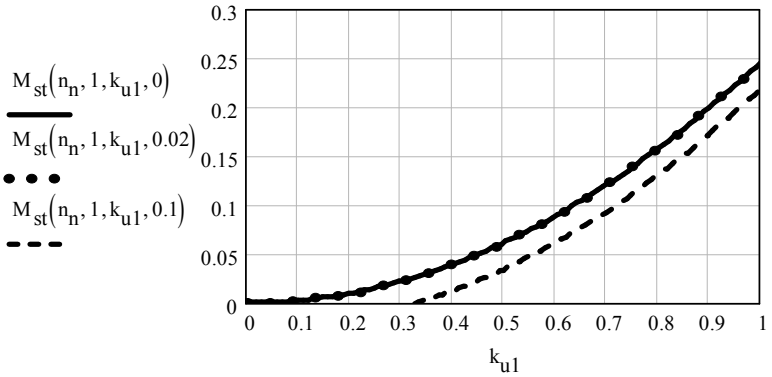
Rys. 10. Przebiegi wskaźników niesymetrii w funkcji współczynnika k_1



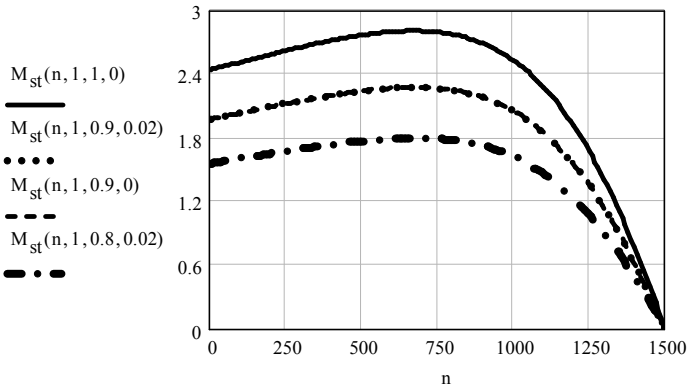
Rys. 11. Przebiegi współczynników niesymetrii w funkcji współczynnika k_2



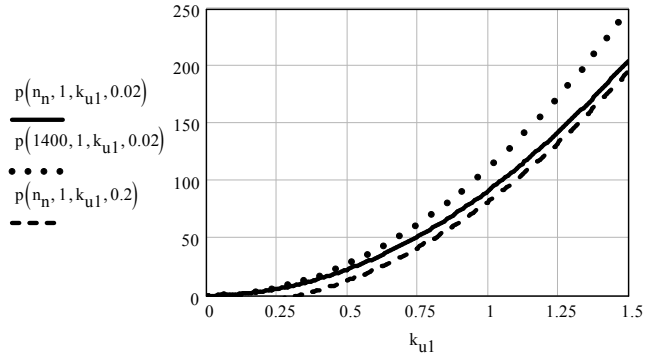
Rys.12. Przebiegi współczynników niesymetrii w funkcji współczynnika k_3



Rys. 13. Zależność charakterystyk momentu silnika indukcyjnego od wskaźnika k_1



Rys. 14. 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. 15. 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 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 układu 3–fazowego napięć. Materiały X Konferencji ZKwE, Poznań, 18–20 kwietnia 2005, s. 309–310.

ANALYSIS OF OPERATION OF MV AND LV TRANSFORMERS DURING ASYMMETRIC LOADS

Asymmetric loads constitute the cause of asymmetries occurring on secondary side terminals of power transformers. Voltage asymmetry is characterised, above all, by the so called degree of voltage asymmetry, determined by the ratio of symmetric negative or zero sequence component to the positive sequence component. The permissible value of the degree of asymmetry is determined by legal regulations. The paper analyses the effect of different types of load asymmetry on the value of asymmetry factor. The Mathcad software was used to carry out the analysis.

(Received: 16. 01. 2017, revised: 15. 02. 2017)