

Ryszard NAWROWSKI*
Zbigniew STEIN*
Maria ZIELIŃSKA*

ANALIZA WARTOŚCI NAPIĘĆ WYJŚCIOWYCH TRANSFORMATORÓW SN/nn W ZALEŻNOŚCI OD CHARAKTERU I WARTOŚCI OBCIĄŻENIA

W referacie przedstawiono, przy wykorzystaniu programu Mathcad, wyniki obliczeń wartości napięć wyjściowych transformatorów energetycznych SN/nn przy różnych wymuszeniach obciążenia, zwłaszcza przy różnych wartościach współczynnika mocy. Pokazano wpływ niesymetrii obciążenia na wartości napięć.

SŁOWA KLUCZOWE: transformatory, współczynnik niesymetrii napięć, zmienność napięć, obciążenie niesymetryczne

1. WPROWADZENIE

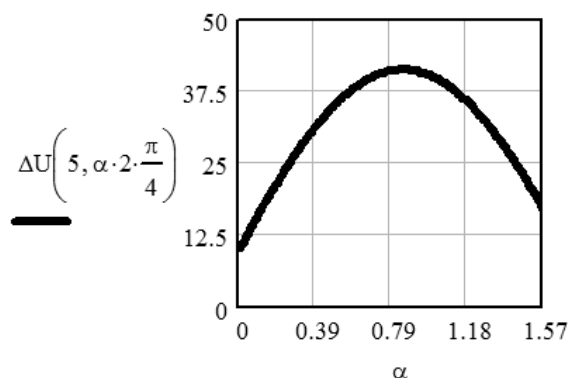
Transformatory energetyczne nazywane rozdzielczymi, wykorzystywane do transformacji napięcia średniego na napięcie niskie, pracują bez regulacji napięcia. Transformatory te mają z reguły trzy zaczepty nastawiane w stanie beznapięciowym. Transformatory te są eksploatowane w różnych sytuacjach obciążenia, to znaczy obciążane odbiornikami o różnym charakterze i przy częstych zmianach impedancji obciążenia. W sieciach niskiego napięcia, z reguły czteroprzewodowych, czyli z przewodem neutralnym, często występują obciążenia niesymetryczne jednofazowe. W sieciach przemysłowych występują także niesymetryczne obciążenia dwufazowe. Transformatory rozdzielcze są przystosowane do obciążeń niesymetrycznych jednofazowych przez stosowanie układów połączeń nie wrażliwych na tego typu obciążenia. Wartości napięć wyjściowych (wtórnych) zależą od wartości napięć wejściowych (pierwotnych) oraz od spadków napięcia. Spadki napięć zależą od natężenia prądu obciążenia oraz wartości współczynnika mocy. Podczas obciążeń symetrycznych wartość spadku napięcia można obliczać przy pomocy prostej zależności (1):

$$\Delta U(I, \alpha) = I(R \cos(\alpha) + X \sin(\alpha)) \quad (1)$$

Podczas obliczeń funkcji np. \cos i \sin przy wykorzystaniu programu Mathcad konieczne jest posługiwanie się funkcją pomocniczą kąta alfa, czyli zamiast pisać $\cos\varphi$ piszemy $\cos(2\alpha \cdot \pi/3)$.

* Politechnika Poznańska.

Na rysunku 1 przedstawiono spadek napięcia w funkcji kąta dla wybranego przykładu, dla którego $I = 5\text{ A}$, $R = 2\ \Omega$ oraz $X_L = 5\ \Omega$.

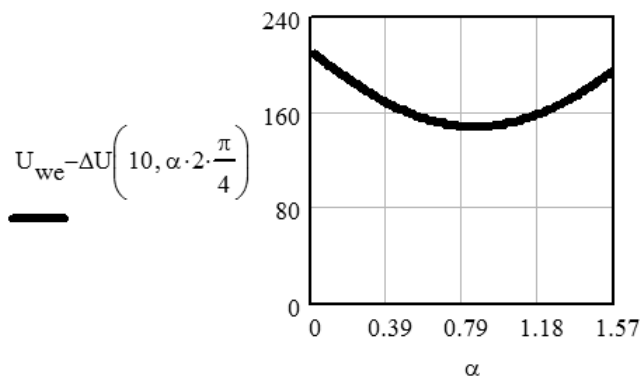


Rys. 1. Wpływ kąta na spadek napięcia

Na rysunku można łatwo zauważyć znaczący wpływ kąta obciążenia wartość spadku napięcia.

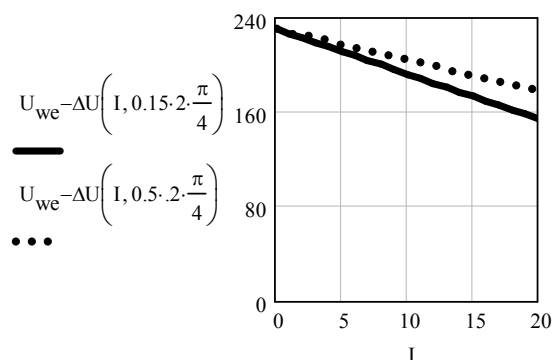
Dla podobnego przykładu, na rys. 2, pokazano wpływ kąta obciążenia na wartość napięcia wyjściowego. Jako napięcie wejściowe przyjęto znamionowe napięcie wtórne transformatora 231 V. Napięcie wyjściowe $U_{\text{wyj}} = U_{\text{we}} - \Delta U$.

$$U_{\text{wyj}}(\alpha) = 231 - (R \cos(\alpha) + X \sin(\alpha))$$



Rys. 2. Wpływ kąta na napięcie wyjściowe

Analiza wartości napięć wyjściowych podczas obciążeń niesymetrycznych jest bardziej złożona. Do analizy zagadnienia jest dogodnie posługiwać się metodą składowych symetrycznych przy wykorzystaniu programu obliczeniowego Mathcad.



Rys. 3. Wpływ natężenia prądu na napięcie wyjściowe, przy dwóch różnych wartościach kąta obciążenia

Przy wykorzystaniu tej metody można obliczać też współczynniki niesymetrii napięć wyjściowych transformatorów, jako stosunek składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia do składowej zgodnej, lub składowej kolejności zerowej do składowej zgodnej. Wartości tych współczynników należą do charakterystycznych parametrów jakości napięcia sieci. Jest bardzo ważne, by podczas eksploatacji silników trójfazowych ciągle sprawdzać wartość stosunku składowej symetrycznej kolejności przeciwnej napięcia do składowej zgodnej. Przekraczanie dopuszczalnej wartości tego wskaźnika, nie większego niż 0.2, może powodować przegrzewanie silników trójfazowych.

2. WZORY WYJŚCIOWE DO ANALIZY ZAGADNIENIA

Dla analizy zagadnienia trzeba przyjąć założenia wstępne. Najdogodniej jest przyjąć wartości impedancji obciążenia poszczególnych faz. Impedancje te można zapisać w postaci (2):

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

gdzie literami u, v, w oznaczono kolejne fazy.

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

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

$$\text{przeciwnej} \quad Z_2(k_1, k_2, k_3) = \frac{(Z_u(k_1) + a^2Z_v(k_2) + aZ_w(k_3))}{3} \quad (4)$$

$$\text{oraz zerowej} \quad Z_0(k_1, k_2, k_3) = \frac{(Z_u(k_1) + Z_v(k_2) + Z_w(k_3))}{3} \quad (5)$$

Impedancje w zapisie macierzowym przyjmują postać (6):

$$\begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{pmatrix} Z_u \\ Z_v \\ Z_w \end{pmatrix} \quad (6)$$

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 (7):

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{10} \\ M_{21} & M_{22} & M_{20} \\ M_{01} & M_{02} & M_{00} \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{D} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

gdzie:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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:

$$I_1(k_1, k_2, k_3) = M_{11}(k_1, k_2, k_3)U_{ntf} \frac{1}{D(k_1, k_2, k_3)} \quad (8)$$

– składowa prądu kolejności przeciwnej:

$$I_2(k_1, k_2, k_3) = M_{21}(k_1, k_2, k_3)U_{ntf} \frac{1}{D(k_1, k_2, k_3)} \quad (9)$$

– składowa prądu kolejności zerowej:

$$I_0(k_1, k_2, k_3) = M_{01}(k_1, k_2, k_3)U_{ntf} \frac{1}{D(k_1, k_2, k_3)} \quad (10)$$

Prądy fazowe oblicza się według wzorów:

$$\begin{pmatrix} I_a(k_1, k_2, k_3) \\ I_b(k_1, k_2, k_3) \\ I_c(k_1, k_2, k_3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1(k_1, k_2, k_3) \\ I_2(k_1, k_2, k_3) \\ I_0(k_1, k_2, k_3) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Prąd w przewodzie neutralnym opisuje wzór (12):

$$I_{po}(k_1, k_2, k_3) = I_a(k_1, k_2, k_3) + I_b(k_1, k_2, k_3) + I_c(k_1, k_2, k_3) \quad (12)$$

Napięcia fazowe opisują związki (13):

$$\begin{aligned} U_a(k_1, k_2, k_3) &= I_a(k_1, k_2, k_3) Z_{zu}(k_1) \\ U_b(k_1, k_2, k_3) &= I_b(k_1, k_2, k_3) Z_{zv}(k_2) \\ U_c(k_1, k_2, k_3) &= I_c(k_1, k_2, k_3) Z_{zw}(k_3) \end{aligned} \quad (13)$$

Składowe symetryczne napięć strony wtórnej transformatora można obliczać według wzorów (14):

$$\begin{aligned} U_1(k_1, k_2, k_3) &= \frac{(U_a(k_1, k_2, k_3) + aU_b(k_1, k_2, k_3) + a^2U_c(k_1, k_2, k_3))}{3} \\ U_2(k_1, k_2, k_3) &= \frac{(U_a(k_1, k_2, k_3) + a^2U_b(k_1, k_2, k_3) + aU_c(k_1, k_2, k_3))}{3} \\ U_0(k_1, k_2, k_3) &= \frac{(U_a(k_1, k_2, k_3) + U_b(k_1, k_2, k_3) + U_c(k_1, k_2, k_3))}{3} \end{aligned} \quad (14)$$

Współczynniki niesymetrii napięć strony wtórnej transformatora opisują związki (15):

$$\begin{aligned} K_u(k_1, k_2, k_3) &= \frac{|U_2(k_1, k_2, k_3)|}{|U_1(k_1, k_2, k_3)|} \\ K_{u0}(k_1, k_2, k_3) &= \frac{|U_0(k_1, k_2, k_3)|}{|U_1(k_1, k_2, k_3)|} \end{aligned} \quad (15)$$

3. PRZYKŁAD LICZBOWY

Posługując się parametrami transformatora o mocy 630 kVA i napięciach 15000V/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:

$$\begin{aligned} Z_{zu}(k_1) &= (k_1 Z_{odn} e^{j0.107 \cdot 2 \frac{\pi}{3}}) \\ Z_{zv}(k_2) &= (Z_{odn} \cdot 1.2 e^{j0.307 \cdot 2 \frac{\pi}{3}}) \end{aligned}$$

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

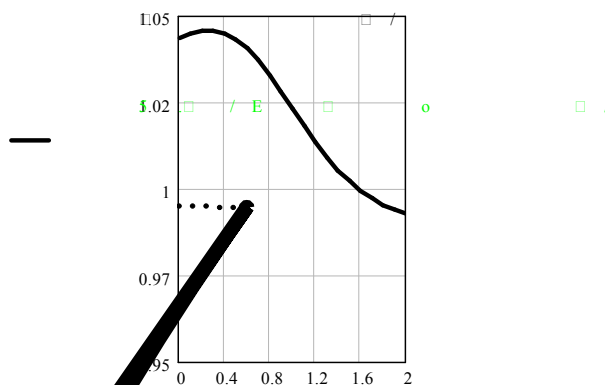
Dla tego przypadku obciążenia niesymetrycznego, przy różnych wartościach współczynników k_1 , k_2 oraz k_3 współczynniki niesymetrii napięć wynoszą:

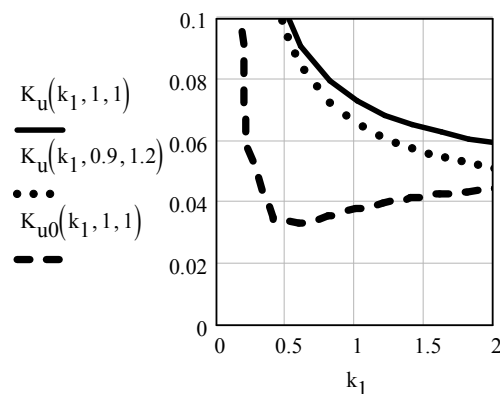
$$K_u(1,1,1) = 0,073 \quad K_u(1,0.85,0.9) = 0,067 \quad K_u(0.9,1,1) = 0,076$$

Dla przykładowych innych obciążeń uzyskuje się np:

$$K_u(1,1,1) = 0,022 \quad K_u(0.9,1,1) = 0,025 \quad K_u(1,0.85,0.9) = 0,025$$

Łatwo zauważyć, że dla rozpatrywanego przypadku obciążenia współczynniki niesymetrii przekraczają dopuszczalną wartość. Zmienność wartości współczynnika niesymetrii od wartości k_1 można prześledzić na rysunku 7.



Rys. 7. Zmienność współczynników niesymetrii napięć w funkcji współczynnika k_1

4. WNIOSKI

Na skutek przepływu prądu przez uzwojenia transformatora powstają spadki napięć. Wartości spadków napięć zależą nie tylko od natężenia prądu ale również od charakteru obciążenia czyli wartości współczynnika mocy. Przy obciążeniach pojemnościowych napięcia wyjściowe mogą wzrastać w porównaniu z napięciami wejściowymi. Przy obciążeniach niesymetrycznych napięcia wyjściowe mają w poszczególnych fazach różne wartości. Przy zasilaniu silników trójfazowych należy kontrolować wartość współczynnika niesymetrii i bo przy dużej jego wartości uzwojenia silnika mogą ulec przegrzaniu.

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.2009

ANALYSIS OF OUTPUT VOLTAGE IN MV/LV TRANSFORMERS ACCORDING TO THE LOAD TYPE AND VALUE

The paper presents the results of calculation of output voltage in MV/LV power transformers for various loads, with consideration of various power factor values. The computation was carried out with the use of Mcad software. The effect of load asymmetry on the voltage values is shown.