

Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Jakub Bernatt

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

ZAŁĄCZENIE TRANSFORMATORA DO SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

CONNECTING THE TRANSFORMER TO THE POWER GRID

Streszczenie: Załączenie transformatora nieobciążonego do sieci elektroenergetycznej wzbudza stan nieustalony. Przebieg prądu determinuje chwilowa wartość napięcia $u_{(t=0)} = U_m \sin \alpha$ i nieliniowa charakterystyka magnesowania $I = f(\Phi)$ rdzenia. W artykule przedstawiono kolejno załączenie do sieci transformatora jednofazowego z liniową i nieliniową charakterystyką magnesowania rdzenia oraz załączenie transformatora trójfazowego. Prąd może uzyskiwać wartość większą od prądu znamionowego. Dużą wartość prądu determinuje składowa zaburzeniowa, którą generuje składowa zaburzeniowa strumienia magnetycznego. Składowa zaburzeniowa prądu jest prądem stałym zanikającym do zera. Składowa ta powoduje chwilowe przeciążenie transformatora i oddziałuje niekorzystnie na sieć, gdyż wprowadza do sieci prąd stały.

Abstract: Connecting an unloaded transformer to the power grid induces an unsteady state. The current waveform is determined by the instantaneous value of the voltage $u_{(t=0)} = U_m \sin \alpha$ and the non-linear magnetization characteristic $I = f(\Phi)$ of the core. The article presents successively switching on to the network of a single-phase transformer with linear and non-linear core magnetization characteristics and switching on a three-phase transformer. The current may be higher than the rated current. The high value of the current is determined by the disturbance component generated by the disturbance component of the magnetic flux. The disturbance component of the current is a direct current decaying to zero. This component causes a temporary overload of the transformer and adversely affects the grid, as it introduces direct current into the grid.

Słowa kluczowe: transformator, stan jałowy, załączenie do sieci, charakterystyka magnesowania

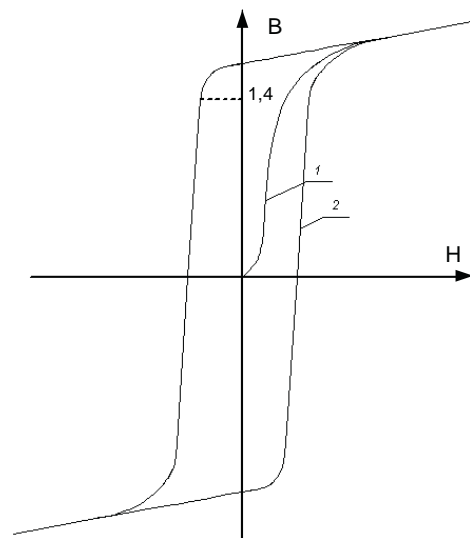
Keywords: transformer, no-load condition, connection to the network, magnetization characteristics

1. Wstęp

Stany zaburzeniowe (nieustalone) w przebiegach prądów transformatorów i maszyn elektrycznych występują przy każdej szybkiej zmianie warunków ich pracy (włączenie do sieci, zmiana obciążenia, zwarcie). Jednak przebieg nieustalony prądu transformatora po załączeniu do sieci elektroenergetycznej jest stanem szczególnym, gdyż determinuje go nieliniowa charakterystyka magnesowania rdzenia magnetycznego (Rys. 1).

Charakterystyki magnesowania obwodów ferromagnetycznych są nieliniowe i niejednoznaczne, są to pętle histerezy. Obwody magnetyczne w transformatorach (rdzenie) są wykonywane z blachy ferromagnetycznej o bardzo wąskiej pętli histerezy i indukcji nasycenia $1,4 \div 1,6$ T. Jeśli zbudujemy transformator w którym w rdzeniu indukcja nie przekroczy wartości $0,7$ T, to możemy założyć, że transformator ma liniową charakterystykę magnesowania. Transformatory energetyczne mają budowę zoptymalizowaną według kryterium kosztów, przy spełnieniu wymaganej sprawności i napięcia zwarcia.

W transformatorach wykorzystuje się charakterystykę magnesowania rdzenia do pułapu nasycenia.



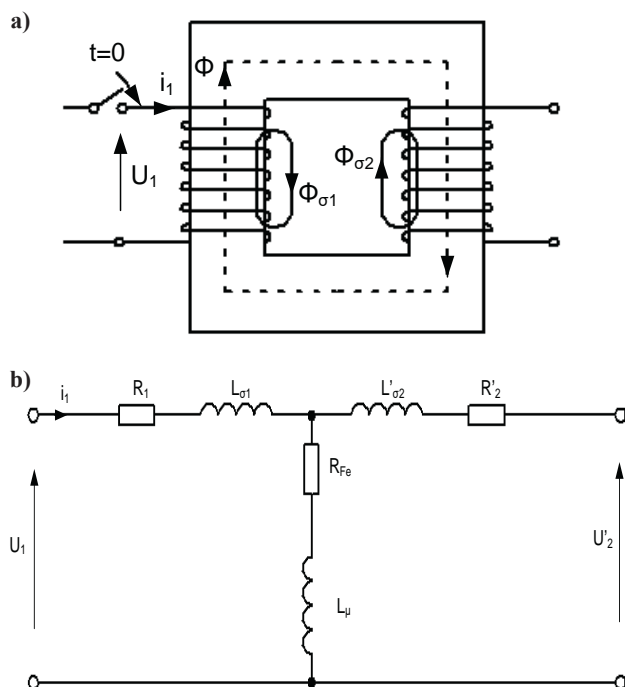
Rys. 1. Charakterystyka magnesowania rdzenia magnetycznego: 1 – pierwotna, 2 – pętla histerezy, pułap nasycenia 1,4 T

Przy załączeniu transformatora do sieci elektroenergetycznej, o napięciu równym napięciu znamionowemu transformatora, indukcja w rdzeniu osiąga wartość wyższą od indukcji nasycenia i ona determinuje przebieg prądu załączania. Aby pokazać wpływ nie-

liniowej charakterystyki magnesowania rdzenia na przebieg prądu, po załączeniu napięcia, rozpatrzmy kolejno: załączenie do sieci transformatora nieobciążonego: jednofazowego z liniową i nieliniową charakterystyką magnesowania rdzenia oraz załączenie transformatora trójfazowego.

2. Transformator jednofazowy z liniową charakterystyką magnesowania

Na rysunku 1 przedstawiono transformator jednofazowy i jego schemat zastępczy. W gałęzi szeregowej schematu zastępczego rezystancje (R_1, R_2) reprezentują straty mocy w uzwojeniach: pierwotnym (1) i wtórnym (2), a indukcyjności ($L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$) reprezentują strumień magnetyczny rozproszenia ($\Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$), to jest strumienie sprzężone tylko z jednym z uzwojeń. Strumienie ($\Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$) zamykają się w dużej części w powietrzu, zatem są liniowo zależne od prądów I_1 i I_2 , a indukcyjności ($L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$) mają wartość stałą. W gałęzi równoległej rezystancja R_{Fe} reprezentuje straty mocy w rdzeniu, a indukcyjność L_{μ} reprezentuje strumień magnetyczny główny Φ sprzężony z obydwooma uzwojeniami. Przy założonej liniowej charakterystyce magnesowania rdzenia indukcyjność $L_{\mu} = \text{constans}$. Przy nieliniowej charakterystyce magnesowania indukcyjność L_{μ} jest parametrem nieliniowym o nieliniowości proporcjonalnej do średniej charakterystyki magnesowania $\Phi = f(I_{10})$. W schemacie zastępczym (Rys. 2b), dla uproszczenia obliczeń, parametry (R_{Fe}, L_{μ}) są połączone szeregowo.



Rys. 2. Załączenie transformatora do sieci; a) szkic transformatora, b) schemat zastępczy

Przebieg prądu i_{10} stanu jałowego, po załączeniu napięcia sinusoidalnego, obliczymy w oparciu o schemat zastępczy transformatora nieobciążonego. Założenia:

$$I_2 = 0$$

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \alpha)$$

$$(L_{\sigma 1} + L_{\mu}) = \text{constans}, i_{10} = i_1$$

Równanie napięć

$$U_{1m} \sin(\omega t + \alpha) = (R_1 + R_{Fe}) i_1 + (L_{\sigma 1} + L_{\mu}) \frac{di_1}{dt}$$

Prąd i_1 ma dwie składowe

$$i_1 = i_1' + i_1''$$

Pierwsza jest składową periodyczną

$$i_1' = I_{1m} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_0)$$

$$I_{1m} = U_{1m} / \sqrt{(R_1 + R_{Fe})^2 + \omega^2 (L_{\sigma 1} + L_{\mu})^2}$$

$$\varphi_0 = \arctan \omega (L_{\sigma 1} + L_{\mu}) / (R_1 + R_{Fe}) \approx \pi/2$$

Równania powyższe opisują przebieg prądu w stanie ustalonym.

Składowa druga jest aperiodyczna

$$i_1'' = -I_{1m} \sin(\alpha - \varphi_0) e^{-t/\tau_0}$$

$$\tau_0 = (L_{\sigma 1} + L_{\mu}) / (R_1 + R_{Fe}) \approx L_{\mu} / R_{Fe}$$

Na przykład dla transformatora o danych znamionowych; 400 kVA, 21/0,42 kV, 11/550 A, straty mocy w rdzeniu $\Delta P_{Fe} = 487$ W, prąd stanu jałowego $i_{10}(0\%) = 0,17\%$,

$$I_0 = I_{1N} i_{10}(0\%) / 100 = 11 \cdot 0,17 / 100 = 0,019 \text{ A}$$

Parametry schematu zastępczego dla stanu jałowego można obliczyć przyjmując $R_1 = 0, L_{\sigma 1} = 0$ gdyż $R_1 \ll R_{Fe}$ i $L_{\sigma 1} \ll L_{\mu}$ oraz $R_{Fe} \ll \omega L_{\mu}$.

$$L_{\mu} \approx 1/\omega U_{1N} / (\sqrt{3} I_{10}) = 1/314 (21 \cdot 10^3) / (\sqrt{3} \cdot 0,019) \approx 2030 \text{ H}$$

$$R_{Fe} = (\Delta P_{Fe}) / (3 \cdot I_0) = 487 / (3 \cdot 0,019) \approx 8540 \Omega$$

Elektromagnetyczna stała czasowa

$$\tau_0 \approx L_{\mu} / R_{Fe} = (2030) / (8540) \approx 0,28 \text{ s.}$$

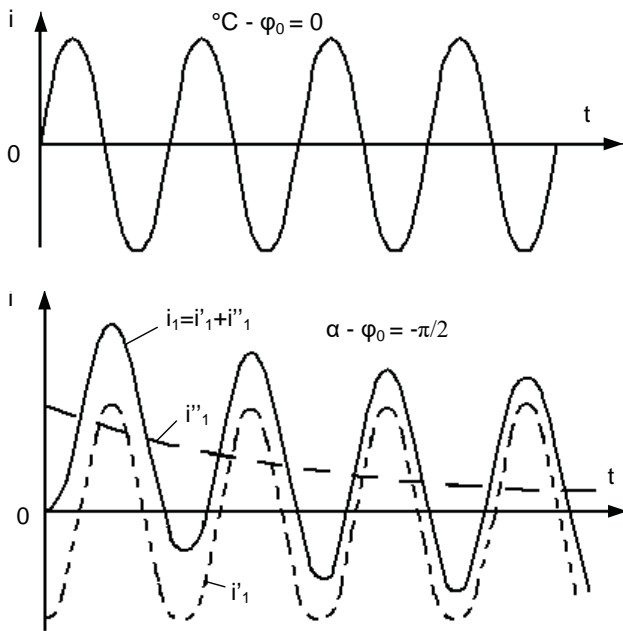
Prąd załączenia

$$I_{1m} = \sqrt{2} I_0 = \sqrt{2} \cdot 0,019 = 0,027 \text{ A}$$

$$i_1 = 0,027 \sin(\omega t + \alpha - \varphi_0) - 0,027 \sin(\alpha - \varphi_0) e^{-t/0,28} \text{ A}$$

Prąd i_1 załączenia transformatora ustabilizuje się po około 1 s.

Korzystny przypadek załączenia transformatora wystąpi gdy $i_1^{\wedge} = 0$, to znaczy gdy $(\alpha = \varphi_0)$, czyli gdy $(\alpha = \pm\pi/2)$, wówczas napięcie w chwili załączenia jest w amplitudzie $u_1(t=0) = [\pm U]_1m$ (Rys. 3a). Przypadek najbardziej niekorzystny załączenia transformatora wystąpi w chwili gdy $(\alpha - \varphi_0) = \mp\pi/2$, wówczas $i_1(t=0)^{\wedge} = \pm I_1m$ (Rys. 3b). Jest to przypadek gdy napięcie w chwili załączenia przechodzi przez zero $u_1(t=0) = 0$.



Rys. 3. Przebiegi prądu po załączeniu transformatora: a) przy $u_1(t=0) = U_1m$, b) przy $u_1(t=0) = 0$

3. Transformator jednofazowy z nieli-niową charakterystyką magnesowania

W transformatorze rzeczywistym rdzeń magnetyczny nasyca się, indukcyjność L_μ jest funkcją strumienia magnetycznego skojarzonego ψ z uzwojeniem (1) o liczbie zwojów N_1

$$L_\mu = \psi / i_1 = (N_1 \Phi) / i_1 \neq \text{constans}$$

L_μ zależy od punktu położenia na charakterystyce magnesowania rdzenia $I_1 = f(\Phi)$.

$$\begin{aligned} [L_\mu i]_1 &= N_1 \Phi \\ d(L_\mu i_1) / dt &= N_1 d\Phi / dt \end{aligned}$$

Równanie napięcia przy założeniu $L_\sigma = 0$. Założenie jest zasadne, gdyż $\Phi_\sigma \ll \Phi$.

$$U_1m \sin(\omega t + \alpha) = (R_1 + R_{Fe}) i_1 + N_1 d\Phi / dt$$

Równanie ma dwie niewiadome: i_1 i Φ , które należy obliczyć. Za i_1 podstawiamy

$$\begin{aligned} i_1 &= (N_1 \Phi) / L_\mu \\ U_1m \sin(\omega t + \alpha) &= \\ &= (R_1 + R_{Fe}) (N_1 \Phi) / L_\mu + N_1 d\Phi / dt \end{aligned}$$

Równanie z którego obliczamy strumień Φ jest nieliniowe. Równanie linearyzujemy dzieląc go stronami przez N_1 . Otrzymujemy równanie napięcia przypadającego na jeden zwoj

$$U_1m / N_1 \sin(\omega t + \alpha) = (R_1 + R_{Fe}) / L_\mu \Phi + d\Phi / dt$$

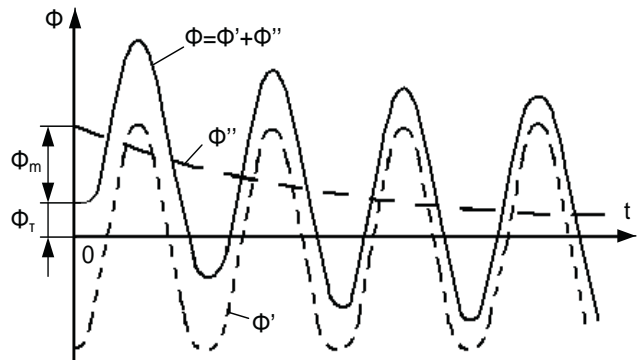
W równaniu tym wyrazy po prawej stronie mają znacząco różniące się wartości

$$(R_1 + R_{Fe}) / L_\mu \Phi \ll d\Phi / dt$$

Nie możemy jednak pominąć współczynnika $(R_1 + R_{Fe}) / L_\mu$ przyjmują jego wartość równą zero, gdyż on reprezentuje tłumienie przebiegu niestabilnego strumienia Φ . Wynik rozwiązania równania, to jest przebieg strumienia Φ , będzie poprawny jeśli założymy $L_\mu = \text{constans}$. Przy tym założeniu przebieg strumienia Φ można przedstawić jako sumę dwóch składowych

$$\Phi = \Phi^{\wedge'} + \Phi^{\wedge''}$$

jak to przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przebieg strumienia magnetycznego przy niekorzystnej chwili załączenia napięcia transformatora

$\Phi^{\wedge'}$ – składowa periodyczna strumienia magnetycznego w stanie ustalonym jest równa strumieniowi Φ , $\Phi^{\wedge''}$ – składowa aperiodyczna strumienia magnetycznego.

$$\Phi^{\wedge'} = \Phi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

$$\begin{aligned} \Phi_m &= \\ &= (L_\mu u_1m) / (N_1 \sqrt{(R_1 + R_{Fe})^2 + \omega^2 L_\mu^2}) \end{aligned}$$

$$\varphi = \arctg(\omega L_\mu / (R_1 + R_{Fe})) \approx \pi/2$$

Składową aperiodyczną strumienia $\Phi^{\wedge''}$ oblicza się z równania

$$0 = (R_1 + R_{Fe}) / L_\mu \Phi^{\wedge''} + (d\Phi^{\wedge''}) / dt$$

$$\Phi^{\wedge''} = C e^{-(t/\tau_0)}$$

$$\tau_0 = L_\mu / (R_1 + R_{Fe}) \approx L_\mu / R_{Fe}$$

C – stałą całkowania wyznaczana się z warunków początkowych. W chwili załączenia napięcia

rdzeń może mieć strumień magnetyczny remanentu $[\pm\Phi]_r$. Gdy kąty w chwili załączania $(\alpha-\varphi)=0$ lub π otrzymujemy

$$[\Phi]_{((t=0))}=[\Phi^{\wedge'}+\Phi^{\wedge''}]_{((t=0))} = -\Phi_m \sin(\alpha-\varphi)+C=\pm\Phi_r$$

Stąd

$$C=\Phi_m \sin(\alpha-\varphi)\pm\Phi_r$$

i ostatecznie

$$\Phi^{\wedge''}=[\Phi_m \sin(\alpha-\varphi)\pm\Phi_r] e^{-(t/\tau_0)}$$

W stanie jałowym transformatora straty mocy $\Delta P_{Fe} \gg \Delta P_{Cu1}$ i w schemacie zastępczym (Rys. 2b) rezystancja $R_1 \ll R_{Fe}$. Tłumienia składowej aperiodycznej strumienia $\Phi^{\wedge''}$ zapewnia rezystancja R_{Fe} czyli straty mocy w rdzeniu ΔP_{Fe} , które w czasie załączania transformatora do sieci pełnią funkcję pozytywną.

Elektromagnetyczna stała czasowa τ_0 nie jest wartością stałą, gdyż zależy od indukcyjności L_μ , czyli od aktualnego położenia punktu na charakterystyce magnesowania $\Phi=f(i)$, dla stanu nasyconego ma wartość mniejszą, a dla stanu nienasyconego większą.

Strumień

$$\Phi=\Phi_m \sin(\omega t+\alpha-\varphi)+[\Phi_m \sin(\alpha-\varphi)\pm\Phi_r] e^{-(t/\tau_0)}$$

Najbardziej sprzyjających warunkach załączania napięcia gdy $\alpha=\pi/2$ i gdy $\Phi_r=0$

$$u_1=U_{1m} \sin(\omega t\pm\pi/2)$$

przebieg strumienia jest ustalony i zaczyna się od zera

$$\Phi=[(-\Phi)]_m \sin(\omega t+\alpha-\varphi)=\Phi_m \sin \omega t$$

Najbardziej niekorzystny przypadek załączania napięcia to $\alpha=0$ lub π i $\Phi_r>0$

$$u_1=U_{1m} \sin(\omega t)$$

$$\Phi=\Phi_m \sin(\omega t-\pi/2)-(\Phi_m\pm\Phi_r) e^{-(t/\tau_0)}$$

Przypadek ten ilustruje rys. 4.

Maksymalną wartość strumień Φ_{max} uzyskuje po pół okresie $\omega t\approx\pi$

$$e^{-(t/\tau_0)}=e^{(-\pi/(\omega\tau_0))}\approx 0,8$$

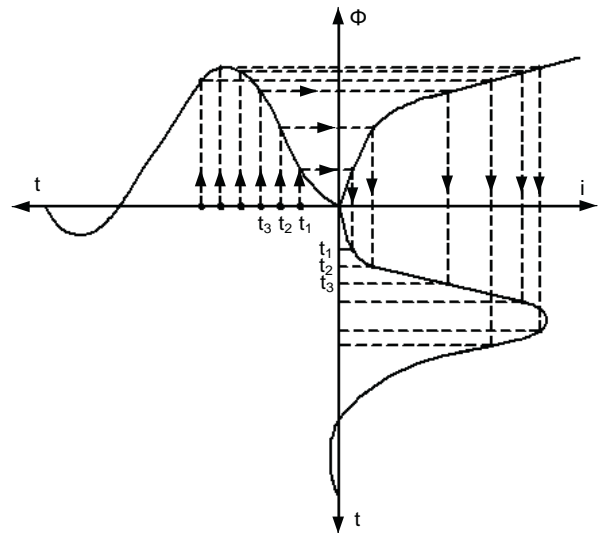
gdyż $(R_1+R_{Fe})\ll\omega L_\mu$. Strumień

$$\Phi_{max}\approx\Phi_m+0,8(\Phi_m\pm\Phi_r)$$

Strumień Φ_{max} może być ponad dwa razy większy od strumienia ustalonego Φ . Tak duży strumień Φ_{max} bardzo silnie nasycza rdzeń i wymusza dużą wartość prądu magnesującego, gdyż siła magnetyczna ($N_1 i_1$) musi pokryć spadki napięcia magnetycznego w rdzeniu.

Graficzne wyznaczenie przebiegu prądu załączania transformatora.

Graficzną metodę wyznaczenia przebiegu prądu magnesującego i_1 robimy przy założeniach: $R_1=0, L_{\sigma 1}=0, R_{Fe}$, są to parametry schematu zastępczego na rys. 2b. Na rys. 5, w prawym górnym prostokącie przedstawiono charakterystykę magnesowania rdzenia $\Phi=f(i)$, lewa część rysunku przedstawia przebieg strumienia $\Phi=f(t)$. Jeżeli te dwie funkcje są znane to można wyznaczyć graficznie przebieg prądu i magnesującego, w przybliżeniu jest to prąd załączania transformatora nieobciążonego (prawy dolny prostokąt). Z funkcji przebiegu strumienia $\Phi=f(t)$, dla kolejnych chwil czasowych: t_1, t_2, t_3 itd. wyznacza się wartości chwilowe strumienia Φ_1, Φ_2, Φ_3 itd., a z charakterystyki $\Phi=f(i)$ wartości chwilowe prądu i_1, i_2, i_3 itd. Dla przejrzystości rysunku charakterystyka $\Phi=f(i)$ jest zdeformowana (w zakresie nienasyconym rozciągnięta, a nasyconym skurczona) oraz założono $\Phi_r=0$. Przebiegi rzeczywiste prądu i załączania transformatora są znacząco większe od tych na rys. 5, determinuje je wartość maksymalna strumienia Φ_{max} w pierwszym półokresie. Przy $\Phi_r>0$ wartość maksymalna strumienia Φ_{max} może być większa od $2\Phi_N$, a wartość maksymalna prądu (wartość udarowa) $I_{max}>\sqrt{2} I_N$. Zdarza się, że w czasie załączania transformatora działa zabezpieczenie.

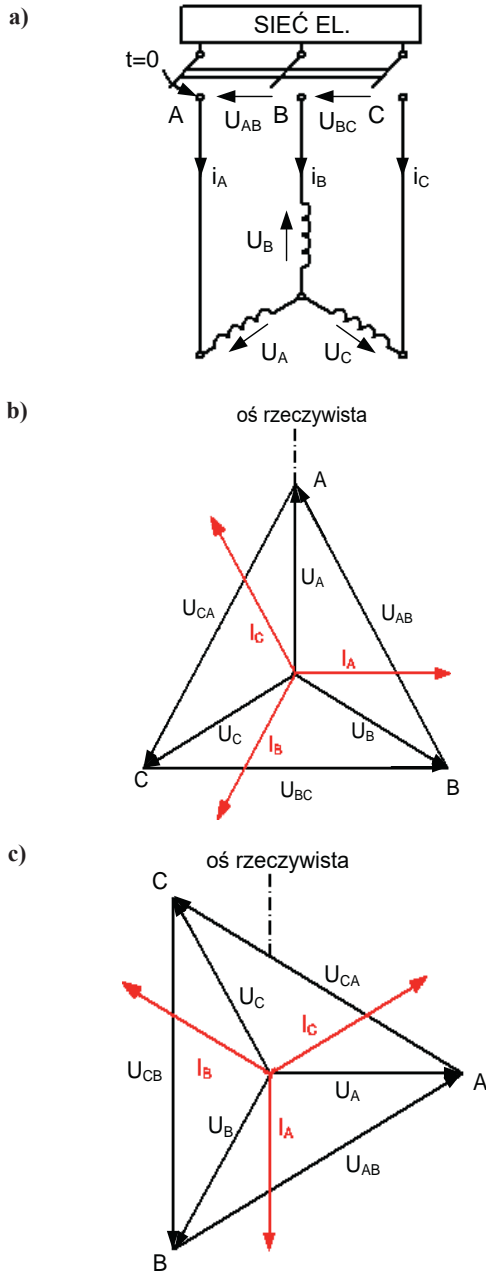


Rys. 5. Wyznaczenie przebiegu prądu załączania transformatora nieobciążonego, $\Phi_r=0$

4. Transformator trójfazowy z linową charakterystyką magnesowania rdzenia

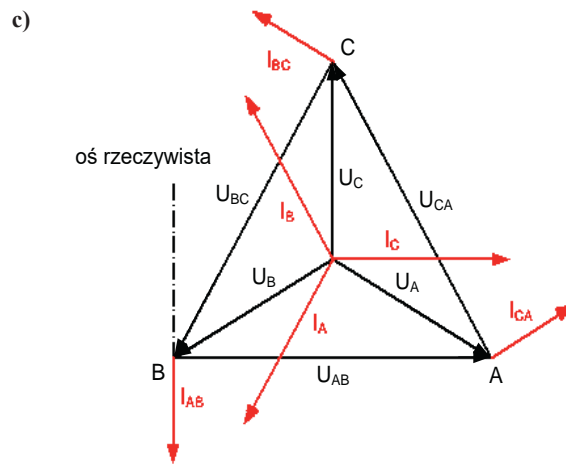
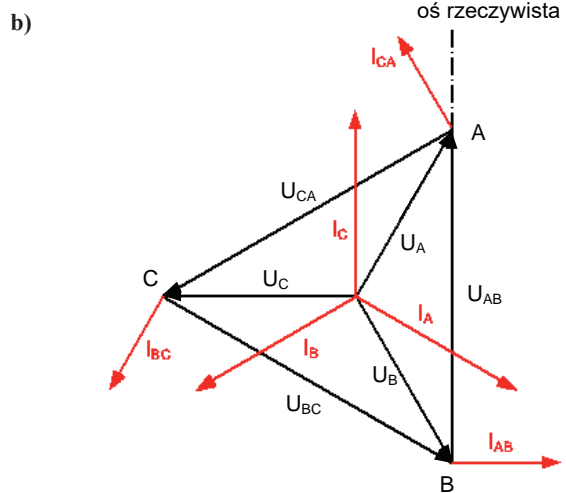
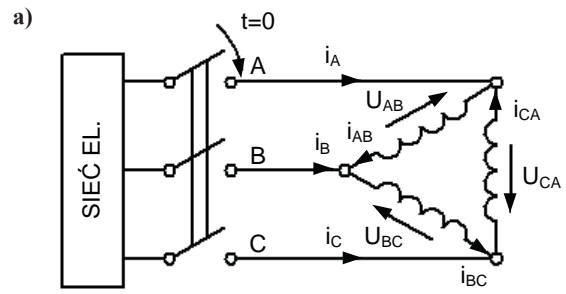
Uzwojenie pierwotne transformatora trójfazowego może być połączone w gwiazdę lub w trójkąt. Dla układu gwiazdy napięcie na uzwojeniu jest identyczne z napięciem fazowym sieci $u_A(t)=u_A$ (sieci) (t) i opóźnia się w stosunku do napięcia międzyfazo-

wego sieci u_{AB} sieci) (t) o kąt $\pi/6=30^\circ$ (Rys. 6). Dla układu trójkąta napięcia na uzwojeniu AB jest równe napięciu międzyfazowemu sieci u_{AB} (t) = u_{AB} sieci (t) (Rys. 7). Jeżeli mówimy o szczególnych przypadkach załączania napięcia (chwila $t=0$), to przy uzwojeniu połączonym w gwiazdę $u_A(t=0)$ sieci = U_{Am} lub 0, a przy uzwojeniu połączonym w trójkąt $u_{AB}(t=0)$ sieci = U_{ABm} lub 0.



Rys. 6. Wskazy napięć i prądów dla stanu ustalonego: a) uzwojenie połączone w gwiazdę b) przy $u_{Asieci}=U_{Am}$, c) przy $u_{Asieci}=0$

Wykresy wskazowe napięć i prądów na rys. 6 i 7 korespondują ze schematem zastępczym transformatora (Rys. 2b) przy założeniach: $R_{Cu}=0$, $L_{\sigma 1}=0$, $R_{Fe} \ll \omega L_{\mu}$. Przy tych założeniach transformator reprezentuje tylko indukcyjność L_{μ} . Przebieg prądu



Rys. 7. Wskazy napięć i prądów dla stanu ustalonego: a) uzwojenie połączone w trójkąt, b) przy u_{AB} sieci = U_{ABm} , c) przy u_{AB} sieci = 0

na indukcyjności jest opóźniony w stosunku do napięcia o kąt $\pi/2$. Przebieg prądu przy załączeniu napięcia na indukcyjność zawsze zaczyna się od zera, generuje to składowe: periodyczną i aperiodyczną prądu

$$i_{((t=0))} = i_{((t=0))} + i_{((t=0))} = 0$$

W chwili załączenia napięcia

$$i_{((t=0))} = -i_{((t=0))} = 0$$

a w stanie ustalonym

$$i_{((t=\infty))} = 0$$

$$i_{((t=\infty))} = i_{((t=\infty))}$$

Składowa aperiodyczna zanika do zera w przybliżeniu według funkcji wykładniczej

$$i^{\wedge} = i_{(t=0)}^{\wedge} e^{-(t/\tau_0)}$$

Wynika stąd, że składową aperiodyczną opisują jednoznacznie dwa parametry $i_{(t=0)}^{\wedge}$ i τ_0 , dlatego skoncentrujemy się na analizie parametru $i_{(t=0)}^{\wedge}$, który determinuje prąd maksymalny załączenia transformatora.

Uzwojenie połączone w gwiazdę

W układzie trójfazowym składowe aperiodyczne prądu muszą spełniać warunek

$$i_A^{\wedge}(t) + i_B^{\wedge}(t) + i_C^{\wedge}(t) = 0$$

Stany zaburzeniowe przebiegów prądu załączenia transformator do sieci zależą od wartości składowych aperiodycznych w chwili załączenia: $i_A(t=0)^{\wedge}$, $i_B(t=0)^{\wedge}$, $i_C(t=0)^{\wedge}$, istotne jest aby je wyznaczyć. Wykorzystując wykresy wskazowe napięć i prądów w stanie ustalonym, na płaszczyźnie Gaussa, określimy wartości składowych periodycznych $i_A(t=0)^{\wedge}$, $i_B(t=0)^{\wedge}$, $i_C(t=0)^{\wedge}$, a ze składowych periodycznych wyznaczmy wartości składowe aperiodyczne prądu $i_A(t=0)^{\wedge}$, $i_B(t=0)^{\wedge}$, $i_C(t=0)^{\wedge}$ w chwili $(t=0)$ załączenia napięcia. Rozpatrzmy dwa przypadki załączenia napięcia w jednej z faz (np. A)

$$u_A(t=0) = U_{Am} \sin(\omega t + \pi/2) = U_{Am}$$

$$u_A(t=0) = U_{Am} \sin \omega t = 0$$

Przypadek pierwszy

$$u_A(t=0) = U_{Am}$$

Na wykresie wskazowym dla stanu ustalonego (Rys. 6b), przy wirowaniu wskazów w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, napięcie fazowe spóźnia się w stosunku do napięcia międzyprzewodowego sieci $u_{(AB(t=0))}$ o kąt $\pi/6$

$$u_{(AB \text{ sieci})} = U_{ABm} \sin(\omega t + 2/3 \pi)$$

Przy uwzględnieniu w schemacie zastępczym (Rys. 2b) tylko indukcyjności L_{μ} prąd i_A spóźnia się w stosunku do napięcia u_A o kąt $\pi/2$

$$i_A(t=0) = \sqrt{2} I_0 \sin \omega t = 0$$

I_0 jest wartością skuteczną prądu jałowego w stanie ustalonym.

W uzwojeniu fazy A przebieg prądu $i_A(t=0)$ jest równy składowej periodycznej,

$$i_A(t=0) = i_A(t=0)^{\wedge} = 0$$

Składowa aperiodyczna prądu nie występuje

$$i_A(t=0)^{\wedge} = -i_A(t=0)^{\wedge} = 0$$

W fazach B i C chwilowe wartości napięcia

$$u_B(t=0) = U_{Am} \sin(\omega t - 1/6 \pi) = -1/2 U_{Am}$$

$$u_C(t=0) = U_{Am} \sin(\omega t - 5/6 \pi) = -1/2 U_{Am}$$

Prądy składowych periodycznych spóźniają się w stosunku do napięć o kąt $\pi/2$. Wartości chwilowe prądów wynoszą

$$i_B(t=0)^{\wedge} = [\sqrt{2} I_0] \sin(\omega t - 2/3 \pi) = -\sqrt{3}/\sqrt{2} I_0$$

$$i_C(t=0)^{\wedge} = \sqrt{2} I_0 \sin(\omega t + 2/3 \pi) = \sqrt{3}/\sqrt{2} I_0$$

Składowe aperiodyczne prądu mają tę samą wartość o znakach przeciwnych

$$i_B(t=0)^{\wedge} = -i_C(t=0)^{\wedge} = \sqrt{3}/\sqrt{2} I_0$$

$$i_C(t=0)^{\wedge} = -i_B(t=0)^{\wedge} = -\sqrt{3}/\sqrt{2} I_0$$

Drugi przypadek załączenia napięcia, gdy napięcie jednej z faz

$$u_A(t=0) = U_{Am} \sin \omega t = 0$$

Składowa periodyczna prądu w fazie A jest maksymalna, równa amplitudzie (Rys. 6c)

$$i_A(t=0)^{\wedge} = \sqrt{2} I_0 \sin(\omega t - \pi/2) = -\sqrt{2} I_0$$

Składowa aperiodyczna

$$i_A(t=0)^{\wedge} = -i_A(t=0)^{\wedge} = \sqrt{2} I_0$$

Napięcia na pozostałych fazach

$$u_B(t=0) = U_{Am} \sin(\omega t - 2/3 \pi) = [-\sqrt{3}/2 U_{Am}]$$

$$u_C(t=0) = U_{Am} \sin(\omega t + 2/3 \pi) = [\sqrt{3}/2 U_{Am}]$$

Napięcie te wymuszają w fazach B i C składowe periodyczne prądu

$$i_B(t=0)^{\wedge} = \sqrt{2} I_0 \sin(\omega t + 5/6 \pi) = 1/\sqrt{2} I_0$$

$$i_C(t=0)^{\wedge} = \sqrt{2} I_0 \sin(\omega t + 1/6 \pi) = 1/\sqrt{2} I_0$$

Składowe aperiodyczne prądu

$$i_B(t=0)^{\wedge} = i_C(t=0)^{\wedge} = -1/\sqrt{2} I_0$$

Z rozważań tych wynika, że przy załączeniu transformatora trójfazowego, z uzwojeniami połączone w gwiazdę, wyłącznikiem standardowym załączającym napięcie równocześnie na trzy fazy, zawsze występuje stan nieustalony generujący składowe aperiodyczne prądu. Jeżeli w chwili $(t=0)$ napięcie na jednej z faz jest w amplitudzie $u_A(t=0) = U_{Am}$, to składowa aperiodyczna prądu

$$i_B(t=0)^{\wedge} = \sqrt{3}/\sqrt{2} I_0$$

Jeżeli w chwili $(t=0)$ napięcie w jednej z faz przechodzi przez zero $u_A(t=0) = 0$, to składowa aperiodyczna prądu

$$i_A(t=0)^{\wedge} = \sqrt{2} I_0$$

Stosunek aperiodycznych prądu przy $\alpha=0$ i przy $\alpha=\pi/2$ wynosi

$$\begin{aligned} (i_A(t=0)^{\wedge}) / (i_B(t=0)^{\wedge}) &= \\ = (\sqrt{2} I_0) / (\sqrt{3} / \sqrt{2} I_0) &= 1,15 \end{aligned}$$

Uzwojenie połączone w trójkąt

Rozparzymy korzystną chwilę załączenia gdy napięcie na jednym uzwojeniu jest w amplitudzie

$$u_{AB}(t=0) = U_{ABm} \sin(\omega t + \pi/2) = U_{ABm}$$

Prąd w uzwojeniu AB spóźnia się o kąt $\pi/2$ i ma wartość chwilową

$$i_{AB}(t=0) = \sqrt{2} / \sqrt{3} I_0 \sin(\omega t + \pi) = 0$$

$\sqrt{2} I_0$ – amplituda prądu ustalonego sieci, $\sqrt{3}$ – uwzględnia mniejszą wartość prądu I_{AB} w uzwojeniu połączonym w trójkąt w stosunku do prądu sieci I_A (układ gwiazdy).

Przebieg prądu i_{AB} zaczyna się od zera i składowa aperiodyczna prądu nie występuje.

$$i_{AB}^{\wedge} = 0$$

W dwóch pozostałych fazach napięcia

$$u_{BC}(t=0) = U_{ABm} \sin(\omega t - 1/6 \pi) = [-1/2 U]_{ABm}$$

$$\begin{aligned} u_{CA}(t=0) &= U_{ABm} \sin(\omega t - 5/6 \pi) = \\ &= [-1/2 U]_{ABm}. \end{aligned}$$

Napięcia te generują prądy składowych periodycznych i aperiodycznych, gdyż przebiegi prądu i_{BC} i i_{CA} zaczynają się od zera

$$i_{BC}(t=0)^{\wedge} = \sqrt{2} / \sqrt{3} I_0 \sin(\omega t - 2/3 \pi) = -1 / \sqrt{6} I_0$$

$$i_{CA}(t=0)^{\wedge} = \sqrt{2} / \sqrt{3} I_0 \sin(\omega t + 2/3 \pi) = 1 / \sqrt{6} I_0$$

$$i_{BC}(t=0)^{\wedge} = 1 / \sqrt{6} I_0$$

$$i_{CA}(t=0)^{\wedge} = -1 / \sqrt{6} I_0$$

Prądy aperiodyczne są prądami stałymi zanikającymi ze stałą czasową τ_0 . Prąd $i_{BC}(t=0)^{\wedge}$ płynie zgodnie ze strzałką do węzła B, a prąd $(-i_{CA}(t=0)^{\wedge})$ płynie przeciwnie do strzałki do węzła A. Prądy aperiodyczne w przewodach sieciowych (Rys. 7a,b)

$$i_A(t=0)^{\wedge} = 1 / \sqrt{6} I_0$$

$$i_B(t=0)^{\wedge} = 1 / \sqrt{6} I_0$$

$$i_C(t=0)^{\wedge} = -\sqrt{2} / \sqrt{3} I_0$$

Drugi przypadek załączenia napięcia $u_{ABC}(t=0)$ występuje gdy napięcie na uzwojeniu jednej z faz

$$u_{AB}(t=0) = U_{ABm} \sin \omega t = 0$$

W stanie ustalonym ($t = \infty$) przebieg prądu spóźnia się w stosunku do napięcia o kąt $\pi/2$, gdy napięcie $u_{AB}(t=0) = 0$ to prąd $i_{AB}(t=0) = -I_{ABm}$ i jest równy wartości chwilowej składowej periodycznej (Rys. 7c)

$$i_{AB}(t=0)^{\wedge} = -I_{ABm} = -\sqrt{2} / \sqrt{3} I_0$$

Składowa aperiodyczna prądu

$$i_{AB}(t=0)^{\wedge} = -i_{AB}(t=0)^{\wedge} = [\sqrt{2} / \sqrt{3} I]_0$$

Napięcia na uzwojeniach pozostałych faz

$$\begin{aligned} u_{BC}(t=0) &= [U]_{ABm} \sin(\omega t - 2/3 \pi) = \\ &= [-\sqrt{3} / 2 U]_m \end{aligned}$$

$$u_{CA}(t=0) = U_{ABm} \sin(\omega t + 2/3 \pi) = [\sqrt{3} / 2 U]_m$$

Składowe periodyczne prądów faz AB, BC, CA spóźniają się w stosunku do napięć

$$\begin{aligned} i_{AB}(t=0)^{\wedge} &= \sqrt{2} / \sqrt{3} I_0 \sin(\omega t - 1/2 \pi) = \\ &= [-\sqrt{2} / \sqrt{3} I]_0 \end{aligned}$$

$$i_{BC}(t=0)^{\wedge} = \sqrt{2} / \sqrt{3} I_0 \sin(\omega t - 7/6 \pi) = [1 / \sqrt{6} I]_0$$

$$i_{BC}(t=0)^{\wedge} = \sqrt{2} / \sqrt{3} I_0 \sin(\omega t + 1/6 \pi) = [1 / \sqrt{6} I]_0$$

Składowe aperiodyczne prądów

$$i_{AB}(t=0)^{\wedge} = [\sqrt{2} / \sqrt{3} I]_0$$

$$i_{BC}(t=0)^{\wedge} = -[1 / \sqrt{6} I]_0$$

$$i_{CA}(t=0)^{\wedge} = -[1 / \sqrt{6} I]_0$$

Prądy aperiodyczne w przewodach sieciowych

$$\begin{aligned} i_A(t=0)^{\wedge} &= i_{AB}(t=0)^{\wedge} [-i_{CA}(t=0)^{\wedge}] = \\ &= [\sqrt{2} / \sqrt{3} I]_0 + [1 / \sqrt{6} I]_0 = \sqrt{3} / \sqrt{2} I_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_B(t=0)^{\wedge} &= -i_{AB}(t=0)^{\wedge} [+i_{BC}(t=0)^{\wedge}] = \\ &= -[\sqrt{2} / \sqrt{3} I]_0 [-1 / \sqrt{6} I]_0 = -\sqrt{3} / \sqrt{2} I_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_A(t=0)^{\wedge} &= i_{CA}(t=0)^{\wedge} [-i_{BC}(t=0)^{\wedge}] = \\ &= [-1 / \sqrt{6} I]_0 + [1 / \sqrt{6} I]_0 = 0 \end{aligned}$$

Z rozważań tych wynika, że przy załączeniu transformatora trójfazowego, z uzwojeniem połączonym w trójkąt, wyłącznikiem załączającym napięcie równocześnie na trzy fazy, zawsze występuje stan nieustalony generujący składowe aperiodyczne prądu. Stosunek składowych aperiodycznych prądów przy $u_{AB}(t=0) = U_{ABm}$ i $u_{AB}(t=0) = 0$ wynosi

$$\begin{aligned} (i_C(t=0)^{\wedge}) / (i_C(t=0)^{\wedge}) &= \\ (\sqrt{3} / \sqrt{2} I_0) / (\sqrt{2} / \sqrt{3} I_0) &= 1,5 \end{aligned}$$

Porównując wartości maksymalne składowych aperiodycznych prądu sieci, przy uzwojeniu połączonym w gwiazdę $i_{(t=0)sieciY^{\wedge}}$ i przy uzwojeniu połączonym w gwiazdę $i_{(t=0)sieci\Delta^{\wedge}}$,

– przy napięciu na jednej z faz $u_{((t=0))} = U_m$

$$\begin{aligned} (i_{(t=0)sieciY^{\wedge}}) / (i_{(t=0)sieci\Delta^{\wedge}}) &= \\ = (\sqrt{3} / \sqrt{2} I_0) / (\sqrt{2} / \sqrt{3} I_0) &= 1,5 \end{aligned}$$

– przy napięciu na jednej z faz $u_{((t=0))} = 0$

$$\begin{aligned} (i_{(t=0)sieciY^{\wedge}}) / (i_{(t=0)sieci\Delta^{\wedge}}) &= \\ = (\sqrt{2} I_0) / (\sqrt{3} / \sqrt{2} I_0) &= 1,15 \end{aligned}$$

Zaburzenie prądu w czasie załączenia transformatora z uzwojeniem pierwotnym połączony w gwiazdę jest większe.

5. Wpływ charakterystyki magnesowania na przebieg prądu magnesującego

Strumienie magnetyczne $\Phi_{(A,B,C)}$ w kolumnach rdzenia transformatora trójfazowego w chwili załączania napięcia są równe strumieniowi remanentu

$$\Phi_{(A,B,C(t=0))} = \Phi_{(rA,B,C)}$$

Przy przebiegu napięcia w uzwojeniu fazy A

$$u_A(t=0) = U_m \sin(\omega t + \alpha) = U_m \sin \alpha$$

przebieg strumienia magnetycznego determinuje składowa aperiodyczna w chwili załączania napięcia. Przy założeniach: $R_{Cu}=0$, $L_{\sigma 1}=0$, $R_{Fe} \ll \omega L_{\mu}$ składowa aperiodyczna strumienia

$$\Phi_A(t=0)^{\wedge} = (\Phi_m \sin(\alpha_A) \pm \Phi_r)$$

Wartość maksymalna $\Phi_A(t=0)^{\wedge} = \Phi_{Amax}^{\wedge}$ będzie gdy napięcie na uzwojeniu A będzie przechodzić przez zero $\alpha_A=0$ i $\Phi_r > 0$ wówczas

$$\Phi_A(t=0)^{\wedge} = (\Phi_m + \Phi_r)$$

Przebieg strumienia magnetycznego w stanie ustalonym spóźnia się w stosunku do napięcia o kąt $\pi/2$

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2) - (\Phi_m \pm \Phi_r) e^{-(t/\tau_0)}$$

Przebieg prądu załączenia transformatora obliczamy wykorzystując charakterystykę magnesowania blachy $H=f(B)$, którą należy przeliczyć na charakterystykę rdzenia transformatora $I=f(\Phi)$ według wzorów

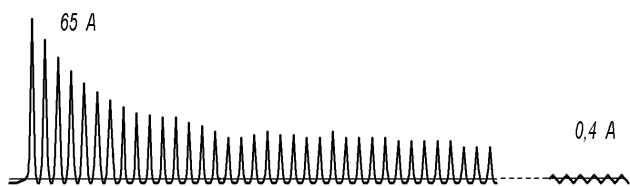
$$I = (l_{Fe} H) / N$$

$$\Phi = S_{Fe} B$$

N – jest liczbą zwojów na kolumnie, S_{Fe} – efektywny przekrój kolumny, l_{Fe} – długość rdzenia przypadającego na jedną fazę.

Na rys. 8 przedstawiono oscylogram prądu załączenia transformatora 400 kVA, 6 kV/400V. przy niekorzystnej chwili załączenia napięcia w fazie A. Prąd znamionowy transformatora

$$I_{1N} = S_n / (\sqrt{3} U_N) = 400 / (\sqrt{3} \cdot 6000) [\cdot 10]^3 = 38,5 \text{ A}$$



Rys. 8. Przykładowy przebieg prądu załączenia transformatora przy niekorzystnej chwili załączenia napięcia

Prąd załączenia

$$[I_{1max=i}]_{(t=\pi/\omega)} = 65 \text{ A}$$

Wartość ustalona prądu stanu jałowego $I_0 = 0,4 \text{ A}$

Wartość względna prądu maksymalnego załączenia w stosunku do prądu ustalonego stanu jałowego

$$I_{1max}/I_{10} = 65/0,4 = 162$$

i w stosunku do prądu znamionowego

$$I_{1max}/I_{1N} = 65/38,5 = 1,7$$

Tak duże wartości prądu załączania transformatora są spowodowane są składową aperiodyczną strumienia magnetycznego, która powoduje bardzo duże nasycenie rdzenia. Duża indukcyjność L_{μ} uzwojenia przy otwartym uzwojeniu wtórnym (stan jałowy) determinuje stałą czasową τ_0 i stosunkowo długi czas (ponad 1 sek.) ustalania się prądu stanu jałowego. Proporcje między prądami w poszczególnych fazach będą podobne do prądów przy liniowej charakterystyce magnesowania lecz ich wartości należy przeliczać w stosunku do prądu maksymalnego na rys. 8.

6. Podsumowanie

Załączenie transformatora do sieci elektroenergetycznej wzbudza stan nieustalony, który oddziałuje na sieć i chwilowe przeciążenie transformatora, gdyż prąd załączenia może uzyskiwać wartość większą od prądu znamionowego. Prąd załączenia determinują dwa parametry: wartość chwilowa napięcia $u_{((t=0))} = U_m \sin \alpha$, oraz nieliniowa charakterystyka magnesowania $I=f(\Phi)$ rdzenia. Dużą wartość prądu generuje składowa zaburzeniowa strumienia magnetycznego $\Phi_{((t=0))}^{\wedge}$. Składowa zaburzeniowa prądu jest wymuszona przez składową zaburzeniową strumienia magnetycznego $\Phi_{((t=0))}^{\wedge}$.

$$i^{\wedge} = i_{((t=0))}^{\wedge} e^{-(t/\tau_0)}$$

Składowa zaburzeniowa prądu i^{\wedge} jest prądem stałym zanikającym do zera z elektromagnetyczną stałą czasową τ_0 . Tłumienie składowej prądu i^{\wedge} zapewniają straty mocy w rdzeniu ΔP_{Fe} . W czasie załączania transformatora straty ΔP_{Fe} spełniają pozytywną rolę, skracając czas ustalania się prądu transformatora.

Szkodliwy wpływ prądu zaburzeniowego i^{\wedge} na sieć elektroenergetyczną wynika z tego, że jest to prąd stały o dużej wartości „wstrzykiwany” do sieci prądu zmiennego. Jeżeli w sieci pracują inne transformatory i urządzenia napędzane silnikami elektrycznymi, to przepływ prądu stałego powoduje zaburzenie ich pracy.

Literatura

- [1] *Transformatory. Metody badań. Pomiar strat i prądu stanu jałowego*, PN-E-04070-08:1981.
- [2] J. Horiszny: *Analiza i ograniczenie prądów włączania transformatorów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Gdańskiej, 2016, ISBN 978-83-7348-679-9.
- [3] M. Jabłoński, *Badanie transformatorów w przemyśle i eksploatacji*, WNT, Warszawa 1969.
- [4] E. Jezierski: *Transformatory. Podstawy teoretyczne*, WNT, 1983.
- [5] С.Б. Васютинский: *Вопросы теории и расчета трансформаторов*, Издательство „Энергия” 1970, стр. 432.
- [6] А.И. Вольдек: *Электрические машины*, Издательство „Энергия” 1974, стр 839.

Autorzy

Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec