

Wprowadzenie

W systemie elektroenergetycznym często stosowane są transformatory trójzwojeniowe. Wiążą one systemy o różnych poziomach napięć. Często też, jak w przypadku autotransformatora, trzecie uzwojenie jest połączone w trójkąt, co stwarza dogodne warunki do obniżenia impedancji dla składowej zerowej w sieci z uziemionym punktem neutralnym. Transformatory o liczbie uzwojeń większej niż trzy mają najczęściej specjalne zastosowanie i są rzadko stosowane.

Model trójfazowego transformatora trójzwojeniowego można utworzyć w rezultacie odpowiedniego złożenia trzech modeli trójzwojeniowego transformatora jednofazowego z uwzględnieniem sposobu połączenia uzwojeń. W przypadku transformatorów trójzwojeniowych jedno z uzwojeń jest zazwyczaj połączone w trójkąt (Δ) i wówczas z dużym przybliżeniem można pominąć odwzorowanie strumienia magnetycznego składowej zerowej. Przykład 5.4 pokazuje sposób formowania modelu transformatora trójzwojeniowego z wykorzystaniem programu ATP-EMTP.

Przykład Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..4. Korzystając z edytora graficznego ATPDraw opracować model fragmentu systemu elektroenergetycznego 220/110/10 kV z transformatorem Yn0yn0d11 o mocy 160 MV·A (rys. 2). Na stronie średniego napięcia (10 kV) umieszczone jest lokalne obciążenie o mocy $S_o = 32 + j18$ MV·A. Na stronę uzwojenia wtórnego przepływa moc $S_2 = 105 + j28$ MV·A. Pozostałe parametry rozpatrywanego systemu są podane poniżej.

Parametry transformatora:

moc znamionowa: $S_{rH} / S_{rL} / S_{rT} = 160/160 / 50$ MV·A;

znamionowe napięcie: 230/120/10,5 kV;

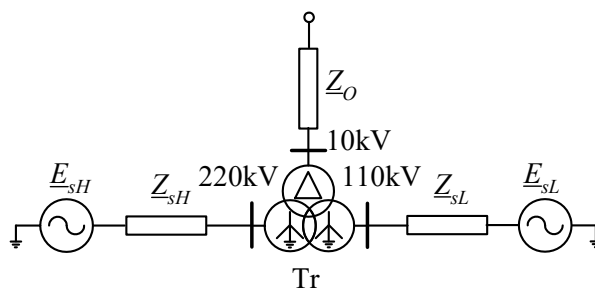
napięcia zwarcia: $u_{KHL} = 10\%$, $u_{KHT} = 33,5\%$, $u_{KLT} = 20,8\%$ (odniesione do uzwojenia H);

prąd biegu jałowego: $i_0 = 0,5\%$;

straty w żelazie rdzenia: $\Delta P_{Fe} = 0,25\%$;

rezystancja uzwojeń: 320/80/2,4 m Ω ;

impedancja źródeł: $Z_{1sH} = 0,35 + j3,77 \Omega$, $Z_{0sH} = 1,16 + j10,42 \Omega$; $Z_{1sL} = 0,18 + j1,55 \Omega$, $Z_{0sL} = 0,56 + j2,75 \Omega$.



Rys. 1. Schemat analizowanego systemu

Charakterystyka magnesowania rdzenia jest zamieszczona poniżej (Tabela 1).

Tabela 1. Charakterystyka magnesowania rdzenia transformatora (j.w.)

$i_\mu / i_{\mu 0}$	ψ / ψ_0
1,0	1,0
1,4259	1,2285
4,0846	1,5015
74,517	1,7745
322,0	1,911

Przekładnie uzwojeń określa się na podstawie napięć znamionowych:

$$g_{HT} = \frac{U_{rH}}{U_{rT}} = \frac{230}{\sqrt{310,5}} = 12,65, \quad g_{HL} = \frac{U_{rH}}{U_{rL}} = \frac{230}{120} = 1,92.$$

Na podstawie przedstawionych danych można określić impedancje zwarciove transformatora:

$$Z_{HL} = \frac{u_{KHL}}{100} \frac{U_{rH}^2}{S_{rH}} = \frac{10}{100} \frac{230^2}{160} = 33,06 \, \Omega, \quad Z_{HT} = \frac{u_{KHT}}{100} \frac{U_{rH}^2}{S_{rH}} = \frac{33,5}{100} \frac{230^2}{160} = 110,76 \, \Omega,$$

$$Z_{LT} = \frac{u_{KLT}}{100} \frac{U_{rH}^2}{S_{rH}} = \frac{20,8}{100} \frac{230^2}{160} = 68,77 \, \Omega.$$

Obliczenia te odnoszą się do napięcia strony H. Impedancje poszczególnych uzwojeń (rys. 1) określa się z zależności (odniesione do strony H):

$$Z_H = 0,5(Z_{HL} + Z_{HT} - Z_{LT}) = 0,5(33,06 + 110,76 - 68,77) = 37,52 \, \Omega,$$

$$Z'_L = 0,5(Z_{HL} + Z_{LT} - Z_{HT}) = 0,5(33,06 + 68,77 - 110,76) = -4,46 \, \Omega,$$

$$Z'_T = 0,5(Z_{HT} + Z_{LT} - Z_{HL}) = 0,5(110,76 + 68,77 - 33,06) = 73,23 \, \Omega,$$

$$\text{skąd: } Z_L = Z'_L / g_{HL}^2 = -4,46 / 1,92^2 = -1,21 \, \Omega, \quad Z_T = Z'_T / g_{HT}^2 = 73,23 / 12,65^2 = 0,458 \, \Omega.$$

Przy znanych wartościach rezystancji uzwojeń, można obliczyć ich reaktancje, na przykład:

$$X_H = \sqrt{Z_H^2 - R_H^2},$$

jednak, łatwo zauważyć, że wartości reaktancji praktycznie nie różnią się od wartości impedancji.

W celu określenia charakterystyki magnesowania w wielkościach mianowanych założmy, że jest ona odniesiona do strony H transformatora. Wielkości względne (Tabela 1) należy pomnożyć odpowiednio przez wartości znamionowe:

$$\psi_0 = \frac{\sqrt{2} U_{rH}}{\sqrt{3} \cdot 2\pi f} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230000 / \sqrt{3}}{314,16} = 597,77 \, \text{Vs},$$

$$i_{\mu 0} = \sqrt{2} I_{rH} i_0 / 100 = \sqrt{2} \cdot \frac{160000}{\sqrt{3} \cdot 230} \cdot 0,005 = 2,84 \, \text{A},$$

w wyniku czego otrzymuje się odpowiednie wartości charakterystyki magnesowania względem uzwojenia 230 / $\sqrt{3}$ kV (Tabela 2). Rezystancja obliczona względem uzwojenia strony H:

$$R_{Fe} = \frac{U_{rH}^2}{\Delta P_{Fe}} = \frac{100 U_{rH}^2}{\Delta P_{Fe} S_{rH}} = \frac{100 \cdot 230^2}{0,25 \cdot 160} = 132 \, \text{k}\Omega.$$

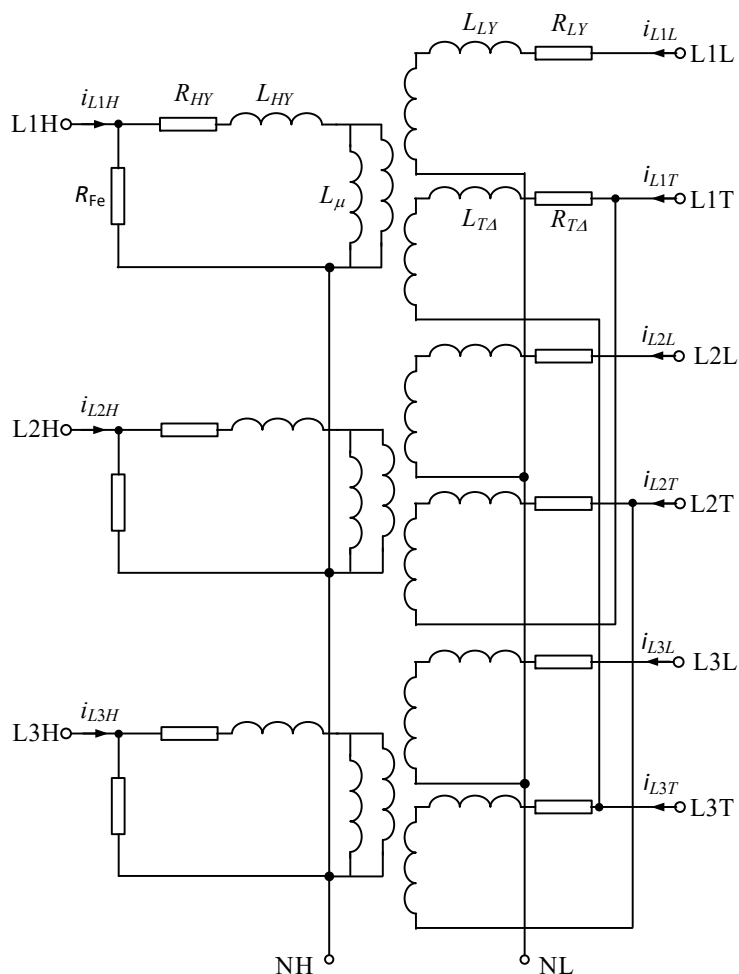
Tabela 2. Charakterystyka magnesowania rdzenia transformatora
względem uzwojenia 230 / $\sqrt{3}$ kV: $\psi = f(i_\mu)$

i_μ, A	ψ, Vs
2,84	597,8
4,05	734,4
11,6	897,6
211,6	1060,7
914,50	1142,3

Impedancję obciążenia w sieci 10 kV można określić według następującej zależności (impedancje połączone w trójkąt):

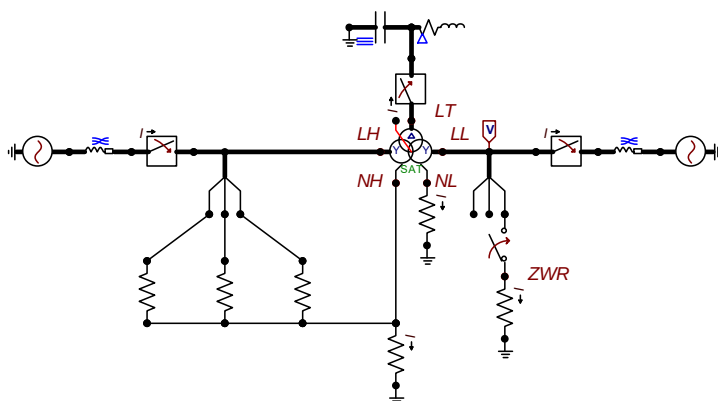
$$\underline{Z}_o = \frac{U_{rT}^2}{S_o^* / 3} = \frac{10,5^2}{(32 - j18) / 3} = 7,85 + j4,42 \, \Omega.$$

W przypadku transformatora trójuzwojeniowego zazwyczaj reaktancja jednego z uzwojeń jest ujemna, co może prowadzić do numerycznej niestabilności modelu. Problem ten można obejść przez umieszczenie modelu gałęzi poprzecznej reprezentującej straty czynne w rdzeniu, w postaci rezystancji R_{Fe} , nie w punkcie gwiazdowym schematu zastępczego, lecz na jednym z zacisków transformatora (w tym wypadku obliczenia zostały wykonane dla strony H) [1, 2]. Schemat modelu rozważanego transformatora jest pokazany na rys. 3. Gałęzie poprzeczne zredukowane do nieliniowych indukcyjności są reprezentowane w standardowym modelu zgodnie z zasadami przyjętymi w programie ATPDraw, natomiast rezystancje poprzeczne R_{Fe} są dodane na zewnątrz modelu, co zapewnia stabilność rozwiązania.



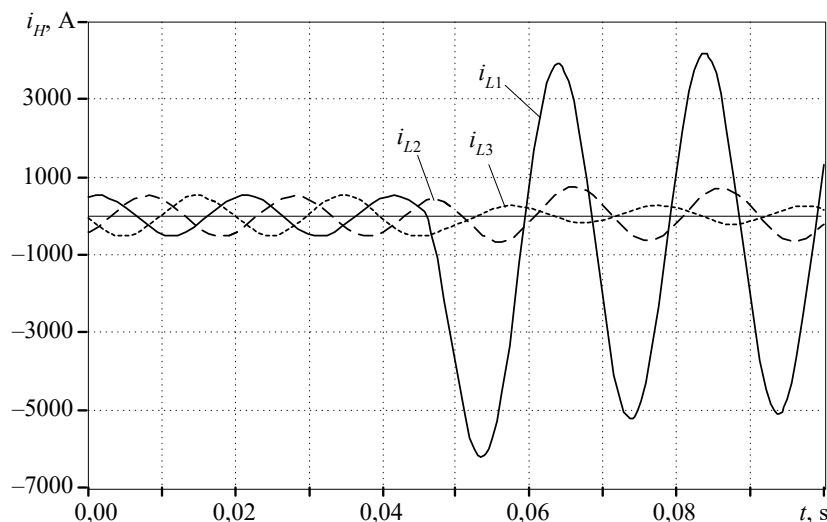
Rys.2. Schemat modelu analizowanego transformatora trójzwojeniowego

Schemat modelu analizowanego systemu jest pokazany na rys. 4. Ponieważ sieć 10 kV pracuje z izolowanym punktem neutralnym, więc w celu stabilizacji modelu szyny strony T transformatora w każdej fazie połączono z ziemią poprzez pojemności o wartości 10 nF (odpowiada jej susceptancja 10,87 μ S). Jest to wartość równoważna pojemności kilkudziesięciu metrów kabla, co nie zmienia warunków pracy analizowanego układu.



Rys. 3. Schemat modelu ATPDraw analizowanego system

Można zauważyć (rys. 4), że model transformatora jest utworzony ze standardowego bloku transformatora trójzwojeniowego, który jest uzupełniony elementami reprezentującymi rezystancję strat R_{Fe} . Zostały one wyprowadzone na zewnątrz modelu transformatora w celu uniknięcia numerycznych oscylacji, których powodem jest ujemna wartość impedancji jednej z gałęzi modelu transformatora – w tym przypadku Z_L . Model z rys. 3 jest zapisany w pliku *Traf_yyd_54.acp*.



Rys. 5. Przebieg prądu na stronie H transformatora

Łączą się one ze wspólnym punktem gwiazdowym strony H transformatora. Punkt ten jest uziemiony przez rezystancję $R_N = 1,0 \, \Omega$.

W rozpatrywanym modelu zasymulowano zwarcie L1–G na szynach 110 kV transformatora. W celu wydzielania jednej fazy z trójfazowego systemu zastosowano rozdzielacz (ang. *splitter*). Rezystancja zwarcia $R_z = 0,5 \Omega$. Przebieg prądu zarejestrowanego na wyłączniku strony H transformatora jest pokazany na rys. 5.

Wariantem zadania przedstawionego w powyższym przykładzie jest zamiana transformatora trójzwojeniowego na model autotransformatora, co jest bardzo częstym rozwiązaniem stosowanym w systemie elektroenergetycznym. Jest to pokazane w kolejnym przykładzie.

Przykład Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania..4_a. Korzystając z edytora graficznego ATPDraw opracować model fragmentu systemu elektroenergetycznego z transformatorem YNa0d11 400/110/15 kV o mocy 450 MVA o danych znamionowych jak w Tabeli 3 [3]. Na stronie średniego napięcia (15 kV) umieszczone jest lokalne obciążenie o mocy $S_{oT} = 32 + j18$ MVA. Pozostałe parametry rozpatrywanego systemu są podane poniżej.

Tabela 3. Znamionowe parametry transformatora

Parametr	Wartość
Układ połączeń	YNa0d11
Moce uzwojeń	GN i DN
	TN
Napięcia znamionowe	GN
	DN
	TN
Prądy znamionowe	GN
	DN
	TN
Straty obciążeniowe	GN-DN
	GN-TN
	DN-TN
Napięcia zwarcia	GN-DN
	GN-TN
	DN-TN
Straty jałowe	

Zauważmy, że w literaturze często przyjmuje się podwójne oznaczenia dla stron transformatora: GN ↔ H, DN ↔ L, TN ↔ T, czy też: GN-DN ↔ H-L, co również jest stosowane poniżej.

Przyjęto charakterystykę magnesowania rdzenia transformatora, jak w Tabeli 1, co prowadzi do wartości mianowanych charakterystyki jak w Tabeli 4 (w odniesieniu do uzwojenia GN). Wielkości względne (Tabela 1) należy pomnożyć odpowiednio przez wartości znamionowe (założono $i_0 = 0,5\%I_{GN}$):

$$\psi_0 = \frac{\sqrt{2}U_{rH}}{\sqrt{3} \cdot 2\pi f} = \frac{\sqrt{2} \cdot 410000 / \sqrt{3}}{314,16} = 1065,59 \text{ Vs},$$

$$i_{\mu 0} = \sqrt{2}I_{GN}i_0 / 100 = \sqrt{2} \cdot 633,7 \cdot 0,005 = 4,48 \text{ A},$$

w wyniku czego otrzymuje się odpowiednie wartości charakterystyki magnesowania względem uzwojenia 410/ $\sqrt{3}$ kV (Tabela 4). Rezystancja strat biegu jałowego obliczona względem uzwojenia strony H:

$$R_{Fe} = \frac{U_{rH}^2}{\Delta P_{Fe}} = \frac{U_{GN}^2 / 3}{\Delta P_{Fe} / 3} = \frac{410^2 / 3}{81,63} = 686,43 \text{ k}\Omega.$$

Tabela 4. Charakterystyka magnesowania rdzenia transformatora
względem uzwojenia 410/ $\sqrt{3}$ kV: $\psi = f(i_\mu)$

$i_\mu, \text{ A}$	$\psi, \text{ Vs}$
4,48	1065,6
6,39	1309,1
18,3	1600,0
333,84	1890,9
1442,6	2036,4

Straty obciążeniowe oraz napięcia zwarcia są podane w Tabeli 3 w odniesieniu do schematu zastępczego trójkąta (pomiędzy poszczególnymi stronami transformatora), co należy uwzględnić przy obliczaniu parametrów zastępczych impedancji:

$$R_{HL} = R_{GN-DN} = \frac{\Delta P_{GN-DN} U_n^2}{S_n^2} = \frac{746,32 \cdot 410^2}{450^2 \cdot 1000} = 0,619 \Omega \text{ i podobnie:}$$

$$R_{HT} = R_{GN-TN} = \frac{142,80 \cdot 410^2}{50^2 \cdot 1000} = 9,60 \Omega, \quad R_{LT} = R_{DN-TN} = \frac{151,38 \cdot 410^2}{50^2 \cdot 1000} = 10,18 \Omega$$

Można stąd otrzymać rezystancje podłużne gałęzi schematu gwiazdowego odniesione do napięcia GN:

$$R_{GN} = (R_{GN-DN} + R_{GN-TN} - R_{DN-TN}) / 2 = (0,619 + 9,60 - 10,18) / 2 = 0,02 \Omega,$$

$$R_{DN} = (R_{GN-DN} + R_{DN-TN} - R_{GN-TN}) / 2 = (0,619 + 10,18 - 9,60) / 2 = 0,59 \Omega,$$

$$R_{TN} = (R_{DN-TN} + R_{GN-TN} - R_{GN-DN}) / 2 = (10,18 + 9,60 - 0,619) / 2 = 9,58 \Omega.$$

W odniesieniu do rezystancji zastosujemy następujące zależności:

$$X_{HL} = X_{GN-DN} = \frac{u_{kGN-DN} U_n^2}{S_n} = \frac{0,1343 \cdot 410^2}{450} = 50,169 \Omega \text{ i podobnie:}$$

$$X_{HT} = X_{GN-TN} = \frac{1,0467 \cdot 410^2}{450} = 391,0 \Omega, \quad X_{LT} = X_{DN-TN} = \frac{1,3797 \cdot 410^2}{450} = 515,4 \Omega$$

Można stąd otrzymać reaktancje podłużne gałęzi schematu gwiazdowego odniesione do napięcia GN:

$$X_{GN} = (X_{GN-DN} + X_{GN-TN} - X_{DN-TN}) / 2 = (50,169 + 391,0 - 515,4) / 2 = -37,11 \Omega,$$

$$X_{DN} = (X_{GN-DN} + X_{DN-TN} - X_{GN-TN}) / 2 = (50,169 + 515,4 - 391,0) / 2 = 87,28 \Omega,$$

$$X_{TN} = (X_{DN-TN} + X_{GN-TN} - X_{GN-DN}) / 2 = (515,4 + 391,0 - 50,169) / 2 = 428,11 \Omega.$$

W modelu ATP transformatora, wielkości te należy odnieść do napięć znamionowych na poszczególnych jego wierzchołkach. W tym celu obliczamy przekładnie zwojowe poszczególnych par uzwojeń:

$$\mathcal{G}_{HT} = \frac{U_{GN}}{U_{TN}} = \frac{410}{\sqrt{3}15,75} = 15,03, \quad \mathcal{G}_{HL} = \frac{U_{GN}}{U_{DN}} = \frac{410}{230} = 1,783.$$

Wobec tego, parametry impedancji podłużnej uzwojeń DN oraz TN przyjmują następujące wartości:

$$R_L = R_{DN} = 0,59 / \mathcal{G}_{HL}^2 = 0,0531 \Omega, \quad R_T = R_{TN} = 9,58 / \mathcal{G}_{HT}^2 = 0,0424 \Omega,$$

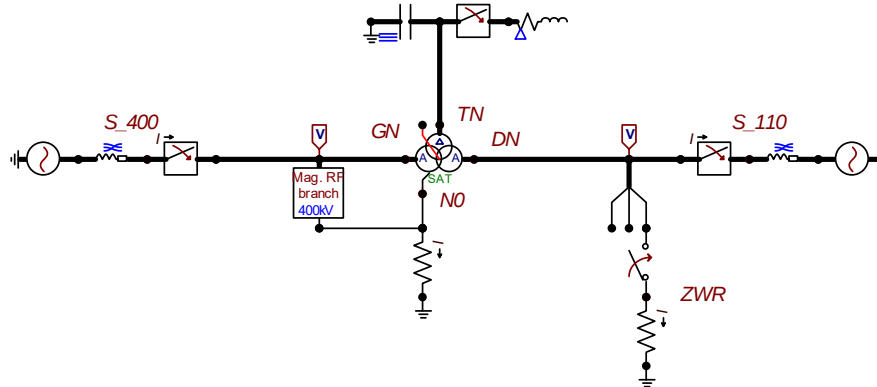
$$X_L = X_{DN} = 87,28 / \mathcal{G}_{HL}^2 = 7,855 \Omega, \quad X_T = X_{TN} = 428,11 / \mathcal{G}_{HT}^2 = 1,895 \Omega.$$

Można sprawdzić, że wartości reaktancji praktycznie nie różnią się od wartości impedancji.

Impedancję obciążenia w sieci 15 kV można określić według następującej zależności dla każdej fazy (impedancje połączone w trójkąt):

$$\underline{Z}_o = \frac{U_T^2}{S_{oT}^* / 3} = \frac{15,75^2}{(32 - j18) / 3} = (17,67 + j9,94) \Omega.$$

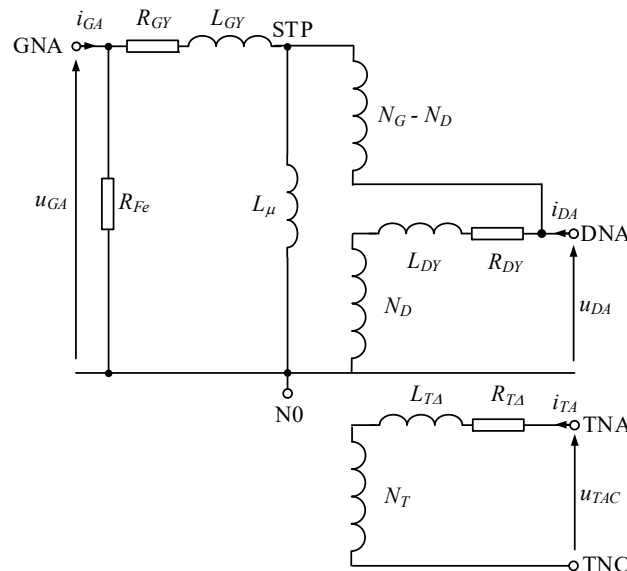
Schemat modelu analizowanego systemu jest pokazany na rys. 6. Ponieważ sieć 15 kV pracuje z izolowanym punktem neutralnym, więc w celu stabilizacji modelu, szyny strony T transformatora w każdej fazie połączone z ziemią poprzez pojemności o wartości 10 nF (odpowiada jej susceptancja 10,87 μ S). Jest to wartość równoważna pojemności kilkudziesięciu metrów kabla, co nie zmienia warunków pracy analizowanego układu.



Rys. 6. Schemat modelu ATPDraw analizowanego system

Można zauważyć (rys. 6), że model transformatora jest utworzony ze standardowego bloku transformatora trójzwojeniowego, który jest uzupełniony elementami reprezentującymi rezystancję strat R_{Fe} . Zostały one wyprowadzone na zewnątrz modelu transformatora w celu uniknięcia numerycznych oscylacji, których powodem jest ujemna wartość impedancji jednej z gałęzi modelu transformatora – w tym przypadku Z_L . Model z rys. 6 jest zapisany w pliku *Traf_yyd_54_a.acp*.

Łączą się one ze wspólnym punktem gwiazdowym strony H transformatora. Punkt ten jest uziemiony przez rezystancję $R_N = 1,0 \Omega$. Schemat jednej fazy modelu autotransformatora jest pokazany na rys. 7.

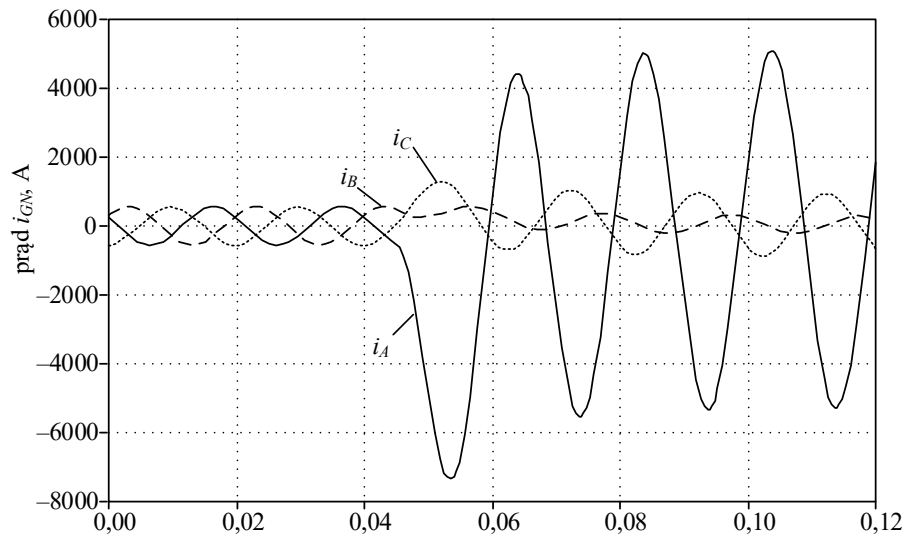


Rys. 7. Schemat połączeń fazy A autotransformatora

W rozpatrywanym modelu zasymulowano zwarcie L1–G na szynach 110 kV transformatora. Rezystancja zwarcia $R_z = 0,5 \Omega$. Przebieg prądu zarejestrowanego na wyłączniku strony H transformatora jest pokazany na rys. 8.

Biorąc pod uwagę schemat zastępczy, autotransformator niewiele różni się od transformatora. Uzwojenie strony L jest w takim wypadku częścią uzwojenia strony H (rys. 7). Takie rozwiązanie prowadzi do mniejszych rozmiarów transformatora i jest tańsze. Oba uzwojenia pozostają połączone galwanicznie, co w niektórych przypadkach może być niedopuszczalne (na przykład w obwodach pomiarowych).

W programie ATP-EMTP model gałęzi poprzecznej jest umieszczony na stronie pierwotnej w schemacie zastępczym transformatora.



Rys. 8. Przebieg prądu na stronie H transformatora

Literatura

1. CHEN X., *Negative inductance and numerical instability of saturable transformer component in EMTP*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, October 2000, s. 1199–1204.
2. HENRIKSEN T., *How to Avoid Unstable Time Domain Responses Caused by Transformer Models*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, s. 516–522.
3. KACEJKO P., MILLER P., WANCERZ M., ZIÓŁEK P., *Modernizacja krajowej sieci przesyłowej –jednostki transformatorowe 400/110 kV 450 MVA*, Rynek energii elektrycznej. Rozwój i funkcjonowanie rynków energii, Lublin 2016, s. 29 – 40.