

Władysław MIZIA

PARAMETRY ELEKTROMAGNETYCZNE AUTOTRANSFORMATORÓW ENERGETYCZNYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono celowość stosowania autotransformatorów trójfazowych do połączenia przesyłowych linii elektroenergetycznych najwyższych napięć, a następnie określono parametry części składowych uzwojenia i na podstawie równań wprowadzono schemat zastępczy autotransformatora. Podano zależności umożliwiające określenie parametrów schematu zastępczego - rezystancji i indukcyjności - na podstawie danych projektowych autotransformatora. Określono również sposób wyznaczenia parametrów schematu zastępczego na podstawie wyników pomiarów autotransformatora w charakterystycznych stanach pracy.

ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF ENERGY AUTOTRANSFORMERS

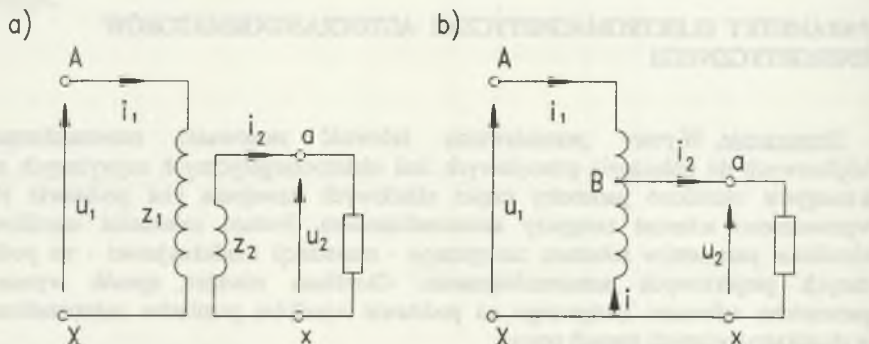
Summary. The paper discusses the expedience of applying triphase autotransformers connect high-voltage power transmission lines. The parameters of the component parts of the winding have been determined and, basing on equations, a substitute diagram of an autotransformer is introduced. Relations which enable to determine the parameters of the substitute diagram - effective resistance and inductance - basing on design data of the autotransformer are presented. Moreover, the way of determining the parameters of the substitute diagram basing on results of measurements of the autotransformer under characteristic operating conditions is discussed.

ELEKTROMAGNETISCHE PARAMETER ENERGETISCHER AUTOTRANSFORMATOREN

Zusammenfassung. Der Aufsatz erörtert die Zweckmässigkeit der Anwendung dreiphasiger Spartransformatoren zur Verbindung von Starkstromfernleitungen. Ermittelt wurden die Parameter der einzelnen Elemente der Wicklung, und anhand von Gleichungen wurde ein Ersatzschaltplan eines Autotransformators eingeführt. Beziehungen wurden angeführt, die es ermöglichen, die Parameter des Ersatzschaltplans - des Wirkwiderstandes und der Induktivität - anhand der Entwurfsdaten des Autotransformators zu bestimmen. Auch die Art und Weise der Bestimmung der Parameters des Ersatzschaltplans in Anlehnung an Messergebnisse des Autotransformators bei charakteristischen Arbeitszuständen ist erörtert worden.

1. WSTĘP

Rezygnując z elektrycznego rozdzielania strony pierwotnej i wtórnej transformator dwuuzwojeniowy (rys. 1a) można zastąpić transformatorem o jednym uzwojeniu (rys. 1b), czyli autotransformatorem.



Rys. 1. Schematy: a) - transformatora, b) - autotransformatora

Fig. 1. Diagrams of a) - transformer b) - autotransformer

Uzwojenie autotransformatora dzieli się na części:

- szeregową (A-B) o liczbie zwojów $(z_1 - z_2)$,
- wspólną (B-X) o liczbie zwojów z_2 .

Dla autotransformatora (rys.1b)

$$i_2 = i_1 + i, \quad (1)$$

a przy pominięciu prądu jałowego

$$i_1(z_1 - z_2) - i z_2 = 0. \quad (2)$$

Z równań(1, 2) wynika, że:

- prąd w części szeregowej uzwojenia

$$i_1 = i_2 \frac{z_2}{z_1} = \frac{i_2}{n}, \quad (3)$$

- prąd w części wspólnej uzwojenia

$$i = i_2 \frac{z_1 - z_2}{z_1} = i_2 \left(1 - \frac{1}{n}\right) = i_2 r, \quad (4)$$

przy czym:

$$n = \frac{z_1}{z_2} - \text{przekładnia zwojowa,}$$

$$r = \frac{z_1 - z_2}{z_1} = \left(1 - \frac{1}{n}\right) - \text{współczynnik redukcji.} \quad (5)$$

Przy tym samym prądzie i_2 obciążenia prąd

- w części szeregowej uzwojenia autotransformatora jest taki sam jak w uzwojeniu pierwotnym transformatora,
- w części wspólnej uzwojenia autotransformatora stanowi r prądu w uzwojeniu strony wtórnej transformatora.

Jeżeli dodatkowo uwzględni się, że przy tych samych gęstościach prądów (warunkach chłodzenia uzwojeń) rezystancja

- części szeregowej uzwojenia autotransformatora

$$R_1 = \frac{z_1 - z_2}{z_1} R_{1t} = R_{1t} r, \quad (6)$$

- części wspólnej uzwojenia autotransformatora

$$R_2 = \frac{R_{2t}}{r}, \quad (7)$$

wówczas straty

- w części szeregowej uzwojenia

$$\Delta P_{u1} = I_1^2 R_1 = I_1^2 R_{1t} r = \Delta P_{u1t} r, \quad (8)$$

- w części wspólnej uzwojenia

$$\Delta P_{u2} = (I_2 r)^2 R_2 = I_2^2 R_{2t} r = \Delta P_{u2t} r, \quad (9)$$

przy czym:

R_{1t}, R_{2t} - rezystancje uzwojeń strony pierwotnej i wtórnej transformatora,

$\Delta P_{u1t}, \Delta P_{u2t}$ - straty w uzwojeniach strony pierwotnej i wtórnej transformatora.

Straty w uzwojeniu autotransformatora stanowią r strat w uzwojeniach odpowiadającego mu transformatora. Zastosowanie autotransformatora powiększa sprawność transformowania. Moce znamionowe uzwojeń transformatora dwuuzwojeniowego są jednakowe i równe mocy znamionowej transformatora:

$$S_n = U_{1n} I_{1n} = U_{2n} I_{2n} . \quad (10)$$

Dla autotransformatora o tych samych co w transformatorze znamionowych napięciach i prądach strony pierwotnej i wtórnej, a więc o tej samej mocy przenoszonych tzw. mocy przechodniej

– moc własna części szeregowej uzwojenia

$$S_s = (U_{1n} - U_{2n}) I_{1n} = S_n \frac{U_{1n} - U_{2n}}{U_{1n}} = S_n r , \quad (11)$$

– moc własna części wspólnej uzwojenia, po uwzględnieniu zależności (4)

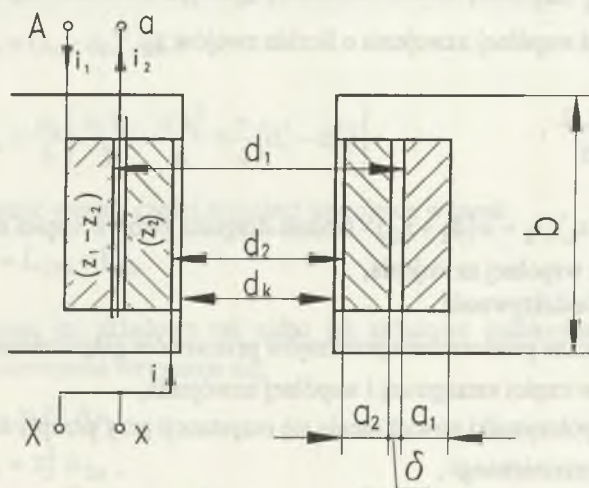
$$S_w = U_{2n} I_n = U_{2n} I_{2n} r = S_n r , \quad (12)$$

ponieważ, przy pominięciu prądu jałowego współczynnik redukcji

$$r = \frac{z_1 - z_2}{z_1} = \frac{U_{1n} - U_{2n}}{U_{1n}} .$$

Moce własne każdej z dwóch części uzwojenia autotransformatora są jednakowe i równe r jego mocy przechodniej (mocy znamionowej uzwojenia odpowiadającego mu transformatora). Wymiary geometryczne rdzenia magnetycznego i uzwojeń transformatora lub autotransformatora zależą od mocy własnych ich uzwojeń. Autotransformator, którego moc przechodnia równa się mocy znamionowej transformatora, ma więc mniejsze od niego wymiary geometryczne, co daje oszczędności wynikające głównie ze zmniejszonego zużycia blach i przewodów nawojowych. Stosując autotransformator można zmniejszyć koszty transformowania, ponieważ w porównaniu z transformatorem maleją $1/r$ razy straty w uzwojeniach, zmniejszają się straty w rdzeniu magnetycznym i koszty budowy. Zmniejszenie to zależy od współczynnika redukcji, a więc od przekładni napięciowej autotransformatora. Stosowanie autotransformatora jest szczególnie korzystne, jeżeli jego przekładnia spełnia nierówność $1,2 < n < 2$.

Z tego powodu autotransformatory energetyczne są stosowane w układach przesyłowych sieci elektroenergetycznych dla połączenia z sobą sieci o napięciach np. 60 i 110 kV, 110 i 220 kV. Są to więc autotransformatory trójfazowe o dużych mocach przechodnich. Konstrukcja autotransformatora trójfazowego jest praktycznie taka sama jak transformatora trójfazowego rdzeniowego z uzwojeniami cylindrycznymi. W autotransformatorze energetycznym obniżającym napięcie na kolumnie rdzenia jest umieszczone uzwojenie, którego część wspólna jest wewnątrz części szeregowej.



Rys. 2. Podstawowe wymiary rdzenia magnetycznego oraz części szeregowej i wspólnej uzwojenia

Fig. 2. Basic dimensions of the magnetic core and series connection and common part of the winding

Na rys.2 podano podstawowe wymiary rdzenia magnetycznego oraz części szeregowej i wspólnej uzwojenia, przy czym zastępcza średnica kolumny rdzenia

$$d_k = \sqrt{\frac{4 S_k}{\pi}}, \quad (13)$$

gdzie: S_k - powierzchnia przekroju poprzecznego kolumny.

2. REZYSTANCJE I INDUKCYJNOŚCI POSZCZEGÓLNYCH CZĘŚCI UZWOJENIA

Rezystancja części szeregowej uzwojenia o liczbie zwojów $(z_1 - z_2)$

$$R_1 = \frac{k_1}{\gamma S_1} \int_0^{a_1} \frac{z_1 - z_2}{a_1} \pi(d_1 + 2x) dx = \frac{k_1(z_1 - z_2) l_1}{\gamma S_1} \quad (14)$$

i analogicznie części wspólnej uzwojenia o liczbie zwojów z_2

$$R_2 = \frac{k_2 z_2 l_2}{\gamma S_2}, \quad (15)$$

przy czym:

$l_1 = \pi(d_1 + a_1)$, $l_2 = \pi(d_2 + a_2)$ - średnie długości zwojów części szeregowej i wspólnej uzwojenia,

γ - konduktywność

S_1, S_2 - łączna powierzchnia przekrojów przewodów gałęzi równoległych w części szeregowej i wspólnej uzwojenia,

k_1, k_2 - współczynniki powiększenia się rezystancji przy przepływie prądu przemiennego.

Współczynniki k_1, k_2 zależą od konduktywności przewodów, temperatury, częstotliwości, wymiarów przekroju poprzecznego przewodu nawojowego i rodzaju przeplecenia.

Indukcyjność własna części szeregowej uzwojenia

$$L_1 = \frac{\Psi_1}{i_1}, \quad (16)$$

przy czym z podziału pola magnetycznego na:

- pole główne, którego linie zamykają się wyłącznie w rdzeniu magnetycznym
- pole rozproszenia, którego linie zamykają się w strefie uzwojeń poza rdzeniem magnetycznym

wynika, że

$$\Psi_1 = \Psi_{1Fe} + \Psi_{1\sigma}, \quad (17)$$

a więc

$$L_1 = L_{1Fe} + L_{1\sigma}. \quad (18)$$

Składowa

$$L_{1Fe} = \frac{\Psi_{1Fe}}{i_1} = (z_1 - z_2) \frac{\Phi_{Fe}}{i_1} = (z_1 - z_2)^2 \Lambda_{Fe} \quad (19)$$

przy czym:

$(z_1 - z_2)$ - liczba zwojów części szeregowej uzwojenia,

Λ_{Fe} - permeancja rdzenia.

Wyznaczając składową $L_{1\sigma}$ tak jak przedstawiono w pracy [1], otrzymuje się

$$L_{1\sigma} = (z_1 - z_2)^2 \Lambda_{1\sigma} \quad (20)$$

przy czym:

$$\Lambda_{1\sigma} = \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_1 l_1}{3} - \frac{\pi a_1^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_k^2) \right] \quad (21)$$

Indukcyjność własna części wspólnej uzwojenia wynosi:

$$L_2 = L_{2Fe} + L_{2\sigma} \quad (22)$$

Wyznaczając jej składowe tak samo jak składowe indukcyjności własnej części szeregowej uzwojenia otrzymuje się:

$$L_{2Fe} = z_2^2 \Lambda_{Fe} \quad (23)$$

$$L_{2\sigma} = z_2^2 \Lambda_{2\sigma} \quad (24)$$

$$\Lambda_{2\sigma} = \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_2 l_2}{3} - \frac{\pi a_2^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_k^2) \right] \quad (25)$$

Indukcyjność wzajemna części szeregowej i wspólnej uzwojenia

$$M = M_{Fe} + M_{\sigma} \quad (26)$$

Wyznaczając składowe M_{Fe} , M_{σ} tak jak przedstawiono w pracy [1], otrzymuje się:

$$M_{Fe} = (z_1 - z_2) z_2 \Lambda_{Fe} \quad (27)$$

$$M_{\sigma} = (z_1 - z_2) z_2 \Lambda_{\sigma} \quad (28)$$

przy czym:

$$\Lambda_{\sigma} = \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_2 l_2}{2} - \frac{\pi a_2^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_k^2) \right] \quad (29)$$

Wprowadzone rezystancje oraz indukcyjności własne i wzajemne części szeregowej i wspólnej uzwojenia pozwalają na sformułowanie równań ogólnych autotransformatora, wprowadzenie schematu zastępczego i określenie jego parametrów.

3. RÓWNANIA OGÓLNE I SCHEMAT ZASTĘPCZY

Napięcie zasilania autotransformatora ma zwykle znamionową częstotliwość, a jego wartość jest zbliżona do napięcia znamionowego. W tych warunkach zasilania parametry uzwojeń - rezystancje i indukcyjności - są praktycznie stałe i przyjmuje się, że autotransformator jest elementem liniowym. Dodatkowo pomija się straty w rdzeniu magnetycznym oraz pojemności międzyzwojowe i międzyzwojeniowe.

Dla autotransformatora obniżającego napięcie

- napięcie zasilania

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d \Psi_1}{dt} + u_2, \quad (30)$$

- napięcie strony wtórnej,

$$u_2 = \frac{d \Psi_2}{dt} - R_2 i, \quad (31)$$

a ponadto spełnione są zależności:

$$i_2 = i_1 + i, \quad (32)$$

$$i_1(z_1 - z_2) - i z_2 = i_0 z_1, \quad (33)$$

przy czym:

i_0 - prąd jałowy.

Strumienie sprzężone

$$\Psi_1 = L_1 i_1 - M i = (L_{1Fe} + L_{1\sigma}) i_1 - (M_{Fe} + M_{\sigma}) i, \quad (34)$$

$$\Psi_2 = M i_1 - L_2 i = (M_{Fe} + M_{\sigma}) i_1 - (L_{2Fe} + L_{2\sigma}) i. \quad (35)$$

Z zależności (32), (33) wynika, że:

$$i = i_1 \frac{z_1 - z_2}{z_2} - i_0 \frac{z_1}{z_2}, \quad (36)$$

$$i_1 = i_0 \frac{z_1}{z_2 - z_2} + i \frac{z_2}{z_1 - z_2}. \quad (37)$$

Korzystając z zależności (18), (19), (27), (28), (34) oraz (22), (23), (35) otrzymuje się wyrażenia na strumień sprzężone

$$\Psi_1 = \left[L_{1\sigma} - \frac{z_1 - z_2}{z_2} M_{\sigma} \right] i_1 + \frac{z_1}{z_2} (M_{Fe} + M_{\sigma}) i_0, \quad (38)$$

$$\Psi_2 = \left[\frac{z_1}{z_1 - z_2} M_{\sigma} - L_{2\sigma} \right] i + \frac{z_1}{z_1 - z_2} (M_{Fe} + M_{\sigma}) i_0. \quad (39)$$

Z zależności (33) wynika, że

$$i_0 = i_1 \frac{z_1 - z_2}{z_1} - i \frac{z_2}{z_1}. \quad (40)$$

Wprowadzając zależność (40) do równań (38), (39) a następnie uwzględniając wyrażenie (32) otrzymuje się:

$$\Psi_1 = \left(L_{1\sigma} + \frac{z_1}{z_2} M_{Fe} + M_{\sigma} \right) i_1 - (M_{Fe} + M_{\sigma}) i_2, \quad (41)$$

$$\Psi_2 = (M_{Fe} + M_{\sigma}) i_2 - i \left(L_{2\sigma} + M_{\sigma} + \frac{z_1}{z_1 - z_2} M_{Fe} \right). \quad (42)$$

Jeżeli zależności (41), (42) zostaną wprowadzone do równań napięciowych (30), (31) wówczas:

$$u_1 = R_1 i_1 + \left[L_{1\sigma} + \frac{z_1}{z_2} M_{Fe} + M_{\sigma} \right] \frac{d i_1}{d t} - (M_{Fe} + M_{\sigma}) \frac{d i_2}{d t} + u_2, \quad (43)$$

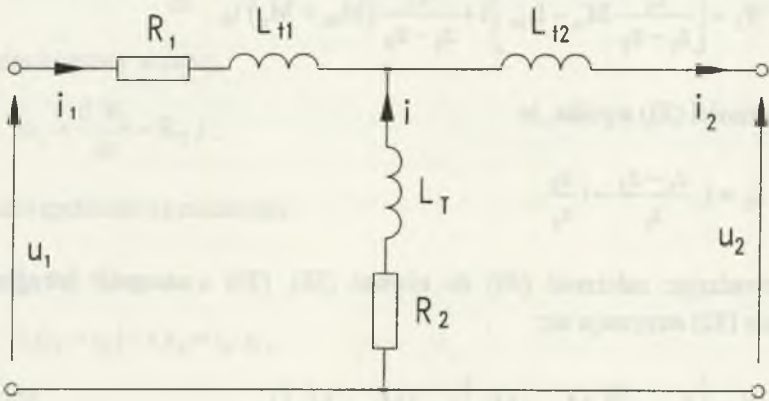
$$u_2 = (M_{Fe} + M_{\sigma}) \frac{d i_2}{d t} - \left[L_{2\sigma} + M_{\sigma} + \frac{z}{z_1 - z_2} M_{Fe} \right] \frac{d i}{d t} - R_2 i. \quad (44)$$

Równaniom (32), (43), (44) odpowiada schemat zastępczy autotransformatora (rys. 3), w którym przyjęto oznaczenia:

$$L_{t1} = L_{1\sigma} + M_{\sigma} + \frac{z_1}{z_2} M_{Fe} , \quad (45)$$

$$L_{t2} = -M_{Fe} - M_{\sigma} = -M , \quad (46)$$

$$L_T = L_{2\sigma} + M_{\sigma} + \frac{z_1}{z_1 - z_2} M_{Fe} . \quad (47)$$



Rys. 3. Schemat zastępczy autotransformatora

Fig. 3. Substitute diagram of an autotransformer

W schemacie zastępczym indukcyjności L_{t1} , L_{t2} nie wynikają wyłącznie z pola magnetycznego rozproszenia, przy czym indukcyjność $L_{t2} < 0$. Wprowadzony schemat zastępczy umożliwia analizę pracy autotransformatora w stanie ustalonym i niestalonym, przy czym ilościowe ujęcie zagadnień wymaga znajomości jego parametrów - rezystancji i indukcyjności.

4. PARAMETRY SCHEMATU ZASTĘPCZEGO I ICH WYZNACZANIE

Indukcyjności autotransformatora (rys.3) pracującego w stanie jałowym przy zasilaniu uzwojenia

- górnego napięcia

$$L_g = L_T + L_{t1}, \quad (48)$$

- dolnego napięcia

$$L_d = L_T + L_{t2}, \quad (49)$$

a po wprowadzeniu zależności (45), (46), (47)

$$L_g = L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} + 2M_{\sigma} + \frac{z_1^2}{z_2(z_1 - z_2)} M_{Fe}, \quad (50)$$

$$L_d = L_{\sigma 2} + \frac{z_2}{z_1 - z_2} M_{Fe}. \quad (51)$$

Autotransformatory energetyczne mają duże moce przechodnie i w analizie ich właściwości eksploatacyjnych w stanie ustalonym, z wyjątkiem zagadnień dotyczących strat mocy czynnej, mogą być pominięte rezystancje części szeregowej i wspólnej uzwojenia.

Przy takim założeniu indukcyjność autotransformatora (rys.3) przy zwartej stronie:

- dolnego napięcia

$$L_{z1} = \frac{L_T(L_{t1} + L_{t2}) + L_{t1} L_{t2}}{L_T + L_{t2}}, \quad (52)$$

- górnego napięcia

$$L_{z2} = \frac{L_T(L_{t1} + L_{t2}) + L_{t1} L_{t2}}{L_T + L_{t1}}, \quad (53)$$

a zatem, po uwzględnieniu zależności (48), (49), stosunek

$$\frac{L_{z1}}{L_{z2}} = \frac{L_g}{L_d}. \quad (54)$$

Wprowadzając zależności (45), (46), (47), (49) do wyrażenia (52) indukcyjność

$$L_{z1} = \frac{1}{L_d} \left[L_{1\sigma} \left(L_{2\sigma} + \frac{z_2}{z_1 - z_2} M_{Fe} \right) - M_{\sigma} (2M_{Fe} + M_{\sigma}) + \frac{z_1 - z_2}{z_2} L_{2\sigma} M_{Fe} \right], \quad (55)$$

a po uwzględnieniu zależności (51) i nierówności

$$L_{2\sigma} \ll \frac{z_2}{z_1 - z_2} M_{Fe},$$

$$M_{\sigma} \ll M_{Fe}$$

otrzymuje się zależność przybliżoną

$$L_{z1} = (z_1 - z_2)^2 \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_1 l_1}{3} + \frac{a_2 l_2}{3} + \delta l_{\delta} - \frac{\pi}{6} (a_1^2 - a_2^2) \right]. \quad (56)$$

Na podstawie wyrażeń (50, 51, 54) po uwzględnieniu nierówności

$$L_{\sigma 2} \ll \frac{z_2}{z_1 - z_2} M_{Fe},$$

$$L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} + 2M_{\sigma} \ll \frac{z_1^2}{z_2(z_1 - z_2)} M_{Fe},$$

otrzymuje się zależność przybliżoną:

$$L_{z2} = \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2 L_{z1} = \frac{L_{z1}}{n^2}. \quad (57)$$

Wyrażenia (56), (57) określają wielkości, których dobór pozwala na uzyskanie indukcyjności L_{z1} , L_{z2} autotransformatora, przy których prądy zwarcia są ograniczone do dopuszczalnych wartości ze względu na wytrzymałość mechaniczną uzwojeń lub moc wyłączalną wyłącznika. Indukcyjności te przy określonych danych znamionowych autotransformatora można kształtować głównie przez zmiany wysokości b kolumny rdzenia magnetycznego i szczeliny δ między częścią szeregową i wspólną uzwojenia (rys. 1).

Rozwiązując układy równań utworzone z zależności (48), (49), (52) lub (48), (49), (53) otrzymuje się:

$$L_T = \sqrt{L_d(L_g - L_{z1})} \quad (58)$$

lub

$$L_T = \sqrt{L_g(L_d - L_{z2})}. \quad (59)$$

Przedstawiona analiza umożliwia określenie parametrów schematu zastępczego - rezystancji R_1, R_2 i indukcyjności L_T, L_{t1}, L_{t2} - na podstawie danych projektowych dotyczących rdzenia magnetycznego i poszczególnych części uzwojenia. Podane zależności na indukcyjności są przybliżone ze względu na przyjęte uproszczenia przy określeniu rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej pola rozproszenia. Również obliczeniowe określenie permeancji rdzenia jest mało dokładne. Parametry schematu zastępczego określone na podstawie danych projektowych można poddać weryfikacji wyznaczając je na podstawie wyników pomiarów autotransformatora.

Z zależności (48), (49), (58), (59) wynika, że pomiarowe wyznaczanie indukcyjności L_T, L_{t1}, L_{t2} schematu zastępczego autotransformatora jest możliwe i wymaga przeprowadzenia pomiarów:

- w stanie jałowym przy zasilaniu strony górnego a następnie dolnego napięcia i określenie na ich podstawie indukcyjności L_g, L_d ,
- w stanie zwarcia przy zasilaniu strony górnego lub dolnego napięcia i określenie na ich podstawie indukcyjności L_{z1} lub L_{z2} .

Znajomość schematu zastępczego i jego parametrów pozwala na przeprowadzenie analizy właściwości autotransformatora w dowolnym stanie nieustalonym i przy pracy ustalonej.

LITERATURA

- [1] Mizia W.: Wpływ rozmieszczenia uzwojeń cylindrycznych na parametry schematu zastępczego transformatora dwuuzwojeniowego. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej seria ELEKTRYKA z. 138, Gliwice 1994.
- [2] Jezierski E.: Transformatory - podstawy teoretyczne. WNT, Warszawa 1965.
- [3] Turowski J.: Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych. WNT, Warszawa 1982.

Recenzent: doc.dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994r.

Abstract

The paper deals with the savings achieved thanks to the application of triphase autotransformers instead of simple transformers for the purpose of connecting high-voltage power transmission lines. Assuming that the individual parts of the winding - those connected in series and the common ones - are of cylindrical shape and are mounted on each other on the column of the magnetic core, their effective resistance as well as their mutual and self-inductance have been determined. Ignoring the losses in the magnetic core and assuming that an autotransformer is a linear element, equations which models their operation have been derived. Basing on these equations, a substitute diagram is introduced and relations which enables to determine its parameters - of the effective resistance and inductance - making use of design data of the magnetic core and the components of the winding is presented. Special attention has been drawn to the possibility of adjusting of these parameters in order to restrict short-circuit currents to admissible values with regard to the mechanical resistance of the winding or the switch-off power of the circuit-breaker. The way of determining the parameters of the substitute diagram basing on measurements of the autotransformer has been presented, too, viz.:

- off-load state, voltage supplied to the upper and then to the lower voltage side,
- at short-circuit state, voltage supplied to the upper or to the lower voltage side.

The presented substitute diagram and knowledge of its parameters permit analysis of the autotransformer in any transient state and in steady-state conditions.