

Władysław MIZIA

Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

PARAMETRY ELEKTROMAGNETYCZNE AUTOTRANSFORMATORA I ICH WYZNACZANIE NA PODSTAWIE WYNIKÓW POMIAROWYCH

Streszczenie. W pracy zgodnie z [3] przedstawiono schemat zastępczy autotransformatora i podano ogólne zależności określające jego parametry. Następnie wykazano wpływ przekładni napięciowej na parametry schematu zastępczego autotransformatora o określonej mocy przewodniej i ustalono przybliżone zależności określające proporcje między parametrami schematu zastępczego przy zmianach przekładni napięciowej.

Uzasadniono, że wyniki pomiarów autotransformatora;

- w stanie jałowym przy zasilaniu strony dolnego napięcia,
 - w stanach zwarcia przy zwartej stronie dolnego lub górnego napięcia
- pozwalają na określenie parametrów schematu zastępczego.

ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF AN AUTOTRANSFORMER AND DETERMINATION OF THEM BASING ON MEASUREMENT RESULTS

Summary. The equivalent circuit of an autotransformer and the general relationships determining its parameters have been presented in the paper according to [3]. Influence of the voltage ratio on the equivalent circuit parameters of the autotransformer of the specified conducted volt - amperes has been proved. The approximate dependences determining relations between the equivalent circuit parameters at the voltage ratio changes have been given.

It has been proved that the measurement results of the autotransformer:

- during no - load state when supplying its low voltage winding,
- during short - circuit states when shorting the low or high voltage winding allow to determine the equivalent circuit parameters.

1. WSTĘP

W pracy [3] wykazano, że:

- moce własne części szeregowej i wspólnej uzwojenia autotransformatora są jednakowe i równe $(1 - \frac{1}{n})$ jego mocy przechodniej, przy czym przekładnia zwojowa

$$n = \frac{z_1}{z_2}, \quad (1)$$

- stosunek

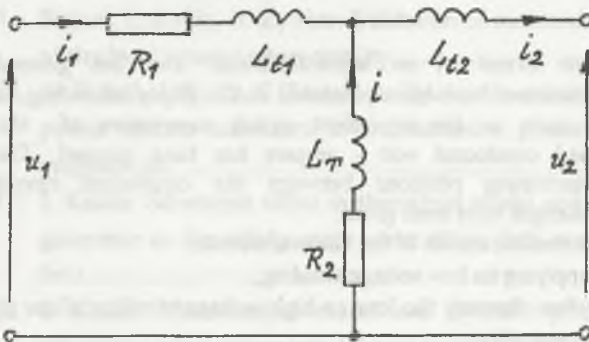
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_{1t}}{R_{2t}} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2, \quad (2)$$

przy czym:

R_1, R_2 - rezystancje części szeregowej uzwojenia o liczbie zwojów $(z_1 - z_2)$ i części wspólnej uzwojenia o liczbie zwojów z_2 ,

R_{1t}, R_{2t} - rezystancja strony pierwotnej, wtórnej i równoważnego dwuuzwojeniowego transformatora;

- właściwości autotransformatora można określać korzystając ze schematu zastępczego przedstawionego na rys. 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy autotransformatora

Fig. 1. Equivalent circuit of the autotransformer

W schemacie tym:

$$L_{11} = L_{1\sigma} + M_{\sigma} + \frac{z_1}{z_2} M_{Fe}, \quad (3)$$

$$L_{12} = -M_{Fe} - M_{\sigma} = -M, \quad (4)$$

$$L_T = L_{2\sigma} + M_{\sigma} + \frac{z_1}{z_1 - z_2} M_{Fe}, \quad (5)$$

przy czym:

- indukcyjność rozproszenia części szeregowej uzwojenia o liczbie zwojów $(z_1 - z_2)$ i części wspólnej uzwojenia o liczbie zwojów z_2

$$L_{1\sigma} = (z_1 - z_2)^2 \Lambda_{1\sigma}, \quad (6)$$

$$L_{2\sigma} = z_2^2 \Lambda_{2\sigma}, \quad (7)$$

- składowa indukcyjności wzajemnej części składowych uzwojenia wynikająca z pola magnetycznego rozproszenia

$$M_{\sigma} = (z_1 - z_2) z_2 \Lambda_{\sigma}, \quad (8)$$

- składowa indukcyjności wzajemnej części składowych uzwojenia wynikająca z pola magnetycznego głównego

$$M_{Fe} = (z_1 - z_2) z_2 \Lambda_{Fe}, \quad (9)$$

- $\Lambda_{1\sigma}, \Lambda_{2\sigma}, \Lambda_{\sigma}, \Lambda_{Fe}$ - permeancje dla pól rozproszenia i permeancja rdzenia magnetycznego.

Parametry schematu zastępczego - rezystancje R_1, R_2 , indukcyjności L_T, L_{11}, L_{12} - mogą być określone w sposób obliczeniowy [3] na podstawie danych projektowych dotyczących rdzenia magnetycznego i poszczególnych części składowych uzwojenia. Dane projektowe zależą od mocy własnych części składowych uzwojenia, a więc przy określonej mocy przechodniej autotransformatora od jego przekładni zwojowej praktycznie równej przekładni napięciowej.

2. WPŁYW PRZEKŁADNI NAPIĘCIOWEJ NA PARAMETRY SCHEMATU ZASTĘPCZEGO

Pełne ujęcie wpływu przekładni napięciowej na parametry schematu zastępczego wymaga znajomości wyników wariantowych obliczeń projektowych autotransformatora o

określonej mocy przewodniej. W przypadku przybliżonej oceny wpływu przekładni napięciowej na właściwości autotransformatora często wystarcza znajomość proporcji między parametrami schematu zastępczego. Stosunek rezystancji części szeregowej i wspólnej uzwojenia autotransformatora określa wyrażenie (2), a po uwzględnieniu przybliżonej zależności

$$R_{1t} \approx R_{2t}' = R_{2t} n^2 \quad (10)$$

obowiązującej dla transformatorów dwuuzwojeniowych otrzymuje się:

$$\frac{R_1}{R_2} = (n-1)^2, \quad (11)$$

Na podstawie zależności (3,4,5) po uwzględnieniu wyrażen (6,7,8,9) otrzymuje się:

$$L_{11} = \frac{z_1^2 (n-1)}{n} \left[\frac{n-1}{n} \Lambda_{1\sigma} + \frac{1}{n} \Lambda_{\sigma} + \Lambda_{Fe} \right], \quad (12)$$

$$L_{12} = \frac{-z_1^2 (n-1)}{n^2} (\Lambda_{\sigma} + \Lambda_{Fe}), \quad (13)$$

$$L_T = \frac{z_1^2}{n} \left(\frac{1}{n} \Lambda_{2\sigma} + \frac{n-1}{n} \Lambda_{\sigma} + \Lambda_{Fe} \right), \quad (14)$$

Przekładnia napięciowa autotransformatorów $1,2 < n \leq 2$, a permeancje $\Lambda_{1\sigma}, \Lambda_{2\sigma}, \Lambda_{\sigma}$ dla pól rozproszenia są wielokrotnie mniejsze od permeancji Λ_{Fe} rdzenia magnetycznego, a więc

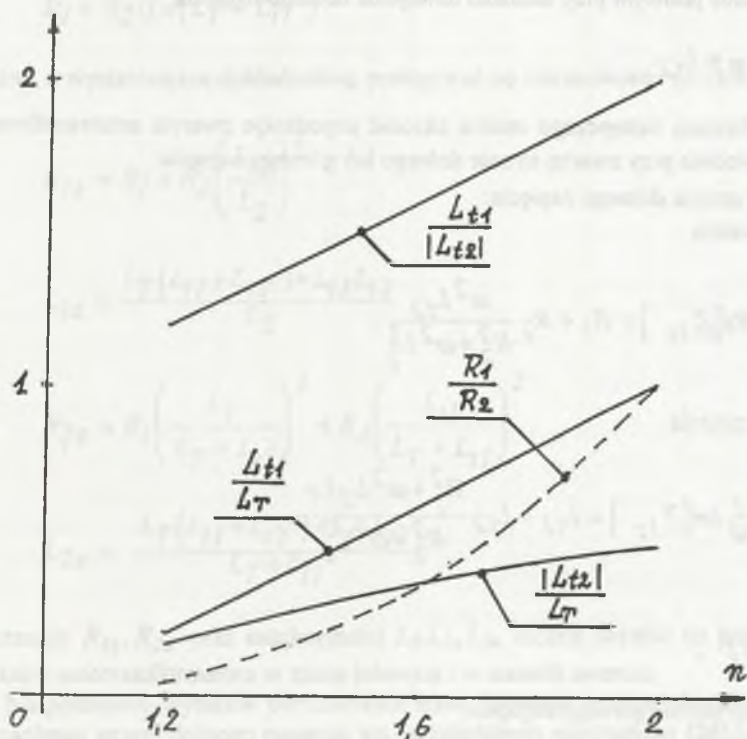
$$\begin{aligned} \frac{n-1}{n} \Lambda_{1\sigma} + \frac{1}{n} \Lambda_{\sigma} &\ll \Lambda_{Fe}, \\ \Lambda_{\sigma} &\ll \Lambda_{Fe}, \\ \frac{1}{n} \Lambda_{2\sigma} + \frac{n-1}{n} \Lambda_{\sigma} &\ll \Lambda_{Fe}. \end{aligned} \quad (15)$$

Na podstawie wyrażen (12,13,14) po uwzględnieniu nierówności (15) otrzymuje się zależności przybliżone

$$\frac{L_{t1}}{|L_{t2}|} = n, \tag{16}$$

$$\frac{L_{t1}}{L_T} = n - 1, \tag{17}$$

$$\frac{|L_{t2}|}{L_T} = \frac{n-1}{n}. \tag{18}$$



Rys.2. Przybliżone proporcje między parametrami schematu zastępczego autotransformatora o określonej mocy przewodnej przy zmianach przekładni napięciowej

Fig.2. Approximate relations between the equivalent circuit parameters of the autotransformer of the specified conducted volt - ampers at the voltage ratio changes

Zależności (11,16,17,18) przedstawione również na rys. 2 określają przybliżone proporcje między parametrami schematu zastępczego autotransformatora, o określonej mocy przechodniej, przy zmianach przekładni napięciowej. Uwzględniając podane proporcje można np. sporządzić wykresy wskazowe napięć i prądów przy różnych przekładniach napięciowych, które można wykorzystać do oceny właściwości autotransformatora przy pracy ustalonej.

3. PARAMETRY AUTOTRANSFORMATORA W WYBRANYCH STANACH PRACY I ICH OKREŚLENIE NA PODSTAWIE WYNIKÓW POMIAROWYCH

Autotransformatory energetyczne mają zwykle duże moce przechodnie i realizacja pomiarów takich obiektów jest możliwa dla wybranych stanów pracy, którymi są stan jałowy i stan zwarcia. Zgodnie ze schematem zastępczym (rys.1) indukcyjność autotransformatora pracującego w stanie jałowym przy zasilaniu uzwojenia dolnego napięcia

$$L_2 = L_T + L_{t2}. \quad (19)$$

Na podstawie schematu zastępczego można określić impedancje zwarcia autotransformatora $\underline{Z}_{1z}, \underline{Z}_{2z}$ odpowiednio przy zwartej stronie dolnego lub górnego napięcia.

Przy zwartej stronie dolnego napięcia:

- rezystancja zwarcia

$$R_{1z} = \operatorname{Re}[\underline{Z}_{1z}] = R_1 + R_2 \frac{\omega^2 L_{t2}}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}, \quad (20)$$

- indukcyjność zwarcia

$$L_{1z} = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}[\underline{Z}_{1z}] = L_{t1} + L_{t2} \frac{R_2^2 + \omega^2 L_2 L_T}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}, \quad (21)$$

przy czym:

$$\omega = 2\pi f,$$

Przy zwartej stronie górnego napięcia:

- rezystancja zwarcia

$$R_{2z} = \operatorname{Re}[\underline{Z}_{2z}] = \frac{R_1(R_2^2 + \omega^2 L_T^2) + R_2(R_1^2 + \omega^2 L_{t1}^2)}{(R_1 + R_2)^2 + \omega^2 (L_T + L_{t1})^2}, \quad (22)$$

– indukcyjność zwarcia

$$L_{2z} = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}[Z_{2z}] = L_{12} + \frac{L_T(R_1^2 + \omega^2 L_{11}^2) + L_{11}(R_2^2 + \omega^2 L_T^2)}{(R_1 + R_2)^2 + \omega^2(L_T + L_{11})^2}. \quad (23)$$

Indukcyjność L_{12} schematu zastępczego autotransformatora jest ujemna. Ponadto autotransformatory energetyczne mają duże moce przechodnie i są budowane na znamionową częstotliwość 50 Hz, a więc

$$\begin{aligned} R_1 &\ll \omega L_{11}, \\ R_2 &\ll \omega L_2, \\ R_1 + R_2 &\ll \omega(L_T + L_{11}) \end{aligned} \quad (24)$$

i można, z wystarczającą dokładnością, posługiwać się zależnościami przybliżonymi

$$R_{1z} = R_1 + R_2 \left(\frac{L_{12}}{L_2} \right)^2, \quad (25)$$

$$L_{1z} = \frac{L_T(L_{11} + L_{12}) + L_{11}L_{12}}{L_2}, \quad (26)$$

$$R_{2z} = R_1 \left(\frac{L_T}{L_T + L_{11}} \right)^2 + R_2 \left(\frac{L_{11}}{L_T + L_{11}} \right)^2, \quad (27)$$

$$L_{2z} = \frac{L_T(L_{11} + L_{12}) + L_{11}L_{12}}{L_T + L_{11}}. \quad (28)$$

Rezystancje R_{1z}, R_{2z} oraz indukcyjności L_2, L_{1z}, L_{2z} , można określić na podstawie wyników pomiarów autotransformatora w stanie jałowym i w stanach zwarcia.

Na podstawie wyników pomiarowych stanu jałowego autotransformatora trójfazowego przy zasilaniu strony dolnego napięcia, po uwzględnieniu nierówności (24) i pominięciu strat w rdzeniu magnetycznym, indukcyjność

$$L_2 = \frac{U_2}{\omega \sqrt{3} I_{20}} \quad (29)$$

przy czym:

U_2 - napięcie międzyprzewodowe,
 I_{20} - fazowy prąd jałowy.

Na podstawie wyników pomiarowych stanu zwarcia autotransformatora trójfazowego przy zasilaniu strony

- napięcia górnego

$$R_{1z} = \frac{P_{1z}}{3I_{1z}^2}, \quad (30)$$

$$Z_{1z} = \frac{U_{1z}}{\sqrt{3} I_{1z}}, \quad (31)$$

$$L_{1z} = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_{1z}^2 - R_{1z}^2}, \quad (32)$$

- dolnego napięcia

$$R_{2z} = \frac{P_{2z}}{3I_{2z}^2}, \quad (33)$$

$$Z_{2z} = \frac{U_{2z}}{\sqrt{3} I_{2z}}, \quad (34)$$

$$L_{2z} = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_{2z}^2 - R_{2z}^2}, \quad (35)$$

przy czym:

U_{1z}, U_{2z} - napięcie międzyprzewodowe,

I_{1z}, I_{2z} - fazowe prądy zwarcia,

P_{1z}, P_{2z} - moce czynne pobierane przez autotransformator.

4. PARAMETRY SCHEMATU ZASTĘPCZEGO

Wyznaczone rezystancje R_{1z}, R_{2z} i indukcyjności L_2, L_{1z}, L_{2z} na podstawie wyników pomiarów autotransformatora w stanie jałowym i w stanach zwarcia pozwalają na określenie parametrów schematu zastępczego. Korzystając bowiem z zależności (19,26,28) otrzymuje się:

$$L_T = L_2 \sqrt{\frac{L_{1z}}{L_{2z}} - \frac{L_{1z}}{L_2}}, \quad (36)$$

$$L_{11} = L_2 \left(\frac{L_{1z}}{L_{2z}} - \sqrt{\frac{L_{1z}}{L_{2z}} - \frac{L_{1z}}{L_2}} \right), \quad (37)$$

$$L_{12} = L_2 \left(1 - \sqrt{\frac{L_{1z}}{L_{2z}} - \frac{L_{1z}}{L_2}} \right), \quad (38)$$

a na podstawie zależności (25,27)

$$R_1 = \frac{R_{1z} L_2^2 L_{11}^2 - R_{2z} (L_T + L_{11})^2 L_{12}^2}{L_2^2 L_{12}^2 - L_T^2 L_{12}^2}, \quad (39)$$

$$R_2 = \frac{L_2^2 [R_{2z} (L_T + L_{11})^2 - R_{1z} L_T^2]}{L_2^2 L_{11}^2 - L_T^2 L_{12}^2}. \quad (40)$$

Parametry schematu zastępczego wyznaczone na podstawie wyników pomiarów autotransformatora pracującego w stanie jałowym i w stanach zwarcia pozwalają na weryfikację parametrów wyznaczonych w sposób obliczeniowy [3] na podstawie danych projektowych autotransformatora dotyczących rdzenia magnetycznego i poszczególnych części uzwojenia.

Weryfikacja taka jest niezbędna, ponieważ obliczeniowe określenie parametrów jest przybliżone ze względu na przyjmowane założenia upraszczające przy określaniu:

- przestrzennych rozkładów indukcji magnetycznej pola rozproszenia ,
- permeancji rdzenia magnetycznego.

Znajomość schematu zastępczego oraz jego parametrów pozwala na analizę i ocenę właściwości autotransformatora w ustalonych i nie ustalonych stanach pracy.

LITERATURA

1. Jabłoński M.: Transformatory. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 1994.
2. Mizia W.: Wpływ rozmieszczenia uzwojeń cylindrycznych na parametry schematu zastępczego autotransformatora dwuuzwojeniowego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej „ELEKTRYKA” nr 138. Gliwice 1994.
3. Mizia W.: Transformatory. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 1996.

4. Turowski J.: Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych. WNT, Warszawa 1982.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz
Profesor Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 30 maja 1997 r.

Abstract

The equivalent circuit of an autotransformer has been presented and the general relationships determining its parameters have been given in the paper according to [3]. The parameters have been expressed by the numbers of turns of the winding the permeances of magnetic leakage fields and the permeances of the magnetic core. Influence of the voltage ratio on the equivalent circuit parameters of the autotransformer of the specified conducted volt - amperes has been proved. The approximate dependences determining relations between the equivalent circuit parameters at the voltage ratio changes have been given. These relations have been shown in Fig. 2. It has been proved that the measurement results of the autotransformer:

- during no - load state when supplying its primary low voltage winding
- during short - circuit states when shorting the low or high voltage winding allow to determine the equivalent circuit parameters.

The equivalent circuit parameters determined on the ground of the measurement results allow to verify the parameters calculated basing on the autotransformer design date dealing with magnetic core and the particular winding components.