

SYMULACJE KOMPUTEROWE I BADANIA NAPIĘĆ I PRĄDÓW PODCZAS ZAŁĄCZANIA TRANSFORMATORÓW ENERGETYCZNYCH

Jakub FURGAŁ, Maciej KUNIEWSKI, Piotr PAJĄK

Miejsce pracy:

1. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel: (12) 617 37 61 fax: (12) 634 57 21
e-mail: furgal@agh.edu.pl; maciek@agh.edu.pl; ppajak@agh.edu.pl

Streszczenie: Podczas załączania transformatorów przebiegi napięć i prądów różnią się od przebiegów sinusoidalnych, a ich wartości są znacznie większe od wartości prądów roboczych. Przepływ prądów o dużych wartościach maksymalnych ma wpływ na jakość energii elektrycznej oraz pracę transformatorów. Prowadzone są prace badawcze, których celem jest opracowanie metod ograniczania prądów załączania transformatorów.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych oraz badań napięć i prądów załączania transformatorów. Wyniki obliczeń porównano z wynikami badań eksperymentalnych. Analizowano możliwość zastosowania metody synchronizacji łączy do ograniczania prądów załączania transformatorów.

Słowa kluczowe: transformatory, prądy załączania transformatorów, symulacje i pomiary

1. WPROWADZENIE

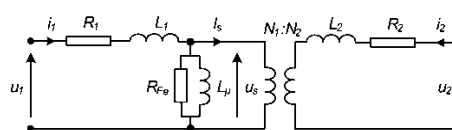
Przebiegi prądów podczas załączania transformatorów różnią się od przebiegów sinusoidalnych, a ich wartości maksymalne są znacznie większe od wartości prądów nominalnych. Prowadzona jest szczegółowa analiza prądów załączania transformatorów szczególnie ze względu na potrzebę ograniczania tych prądów. Skutkami przepływu dużych prądów załączania transformatorów może być niewłaściwa praca maszyn elektrycznych oraz błędne działanie układów zabezpieczających. Prąd powstających podczas załączania transformatorów powoduje odkształcenia napięć [1]. Przepływ prądu chwilowego o dużych wartościach maksymalnych powoduje generowanie sił elektrodynamicznych oddziałujących na uzwojenia. Siły takie mogą przekraczać kilkukrotnie siły elektrodynamiczne powstające podczas normalnej pracy transformatorów. Prowadzone są prace badawcze, których celem jest doskonalenie metod ograniczania prądów załączania transformatorów. Prace te obejmują między innymi symulacje prądów prowadzone przy zastosowaniu istniejących programów komputerowych [2,3]. Ograniczanie prądów załączania transformatorów nabiera obecnie szczególnego

znaczenia ze względu na wzrost liczby łączy transformatorów szczególnie współpracujących z generatorami wiatrowymi i małymi elektrowniami wodnymi. Współpraca takich generatorów z układem elektroenergetycznym jest uzależniona od wyników analizy warunków technicznych i ekonomicznych pracy.

W artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych oraz badań prądów załączania transformatorów, wykonanych przy zastosowaniu programów Electromagnetics Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP) i MATLAB/Simulink. Wyniki obliczeń porównano z badaniami eksperymentalnymi. Na podstawie wyników obliczeń analizowano możliwość zastosowania metody synchronizacji łączy do ograniczania prądów załączania transformatorów.

2. SCHEMAT ZASTĘPCZY TRANSFORMATORÓW

Schemat zastępczy dwuczęściowy dwuuzwojeniowych transformatorów jednofazowych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy dwuczęściowy transformatorów jednofazowych

Zależności napięciowo-prądowe dla schematu zastępczego transformatorów mają następującą postać:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1 + R_{Fe}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_s(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ -\frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1 + L_{Fe}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_s(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{L^2} \begin{bmatrix} \frac{1}{g^2} & -\frac{1}{g} \\ -\frac{1}{g} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{R_2}{L_2} & 0 \\ 0 & \frac{R_2}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie: R_1, R_2 - rezystancje uzwojeń, Ω ,
 L_1, L_2 - indukcyjności rozproszenia uzwojeń, H,

U_1, U_2 - napięcia strony pierwotnej transformatora, kV,
 U_s - napięcie na gałęzi poprzecznej, kV,
 \mathcal{G} - przekładnia transformatora, -,
 L_μ - indukcyjność magnesowania, H.

Wartości parametrów schematu zastępczego można obliczyć ze zależności zamieszczonych w [4] przy wykorzystaniu danych znamionowych transformatorów.

Modelowanie transformatorów wymaga uwzględnienia nieliniowości indukcyjności magnesowania L_μ , wynikającej z nieliniowej zależności indukcji magnetycznej materiału rdzenia od natężenia pola magnetycznego. Schematy zastępcze transformatorów trójfazowych są tworzone przez połączenie schematów transformatorów jednofazowych odzwierciedlających układ połączeń transformatora modelowanego.

3. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH MODELI TRANSFORMATORÓW

W celu symulacji napięć i prądów załączania transformatorów wykorzystano model *Saturable Transformer* programu *EMTP-ATP* oraz model trójfazowego transformatora dwuzwojowego, zaimplementowany w środowisku *MATLAB/Simulink*.

Przebiegi prądów załączania transformatorów są zależne przede wszystkim od zjawisk w rdzeniach ferromagnetycznych [5]. Uwzględnienie nieliniowości charakterystyki magnesowania rdzenia jest możliwe przy wykorzystaniu modelu rdzenia zaimplementowanego w modelu transformatora bądź poprzez dołączenie do zacisków wejściowych modelu transformatora zewnętrznego obwodu elektrycznego reprezentującego rdzeń.

3.1. MODEL SATURABLE TRANSFORMER PROGRAMU EMTP-ATP

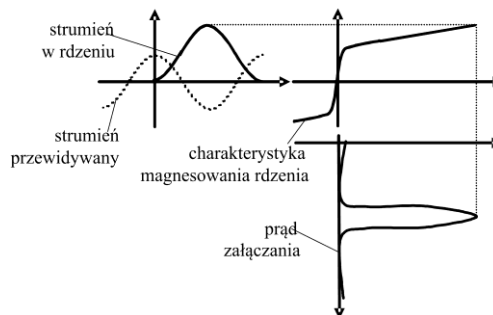
Parametry elementów gałęzi podłużnej modelu transformatorów oblicza się przy wykorzystaniu danych znamionowych transformatora. Gałąź poprzeczna schematu zastępczego transformatorów, reprezentująca rdzeń, jest włączana po stronie wysokiego napięcia transformatora. Charakterystyka rdzenia ma postać zależności $\Psi=f(i)$ lub zależności $U=f(I)$. Przebieg charakterystyki w obszarze nasycenia jest aproksymowany liniowo na podstawie współrzędnych dwóch punktów charakterystyki magnesowania, wyznaczonych przy największych napięciach. W modelu możliwe jest uwzględnienie konstrukcji rdzenia oraz reluktancji rdzenia dla składowej zerowej [6].

3.2. MODEL TRANSFORMATORÓW W ŚRODOWISKU MATLAB

Gałąź podłużna modelu uwzględnia rezystancje uzwojeń oraz ich indukcyjności rozproszenia [7]. Gałąź poprzeczna reprezentuje charakterystykę magnesowania transformatora oraz straty w rdzeniu. Straty całkowite w rdzeniu są uwzględniane poprzez liniową rezystancję R_m (rys.1). Model umożliwia uwzględnienie zjawiska histerezy magnetycznej. Pętla histerezy jest określana przez wprowadzenie strumienia remanentu, prądu koercji I_c , współrzędnych punktu nasycenia rdzenia oraz stromości określonej w punkcie o współrzędnych $(B=0, H=H_c)$. Uwzględnienie pętli histerezy w modelu powoduje wydłużenie czasu obliczeń. W prowadzonych symulacjach pominięto zjawisko histerezy magnetycznej rdzenia. W modelu możliwe jest uwzględnienie resztkowego strumienia magnetycznego rdzenia [8].

4. PRZEBIEGI NAPIĘĆ I PRĄDÓW PODCZAS ZAŁĄCZANIA TRANSFORMATORÓW

Po wyłączeniu transformatora energetycznego rdzeń może pozostać namagnesowany. Na wartość strumienia remanentu ma wpływ charakterystyka magnesowania materiału ferromagnetycznego, pojemność transformatora oraz wartość prądu ucięcia [9]. Namagnesowanie rdzenia ma wpływ na przebieg strumienia magnetycznego.



Rys. 2. Schemat mechanizmu powstawania przetężeń podczas załączania transformatorów

Przebieg strumienia magnetycznego w rdzeniu po załączeniu transformatora wyraża wzór:

$$\phi(t) = [\phi_m \cos(\varphi) \pm \phi_r] e^{-\frac{R}{L}t} - \phi_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

gdzie: Φ, Φ_m, Φ_r - wartość chwilowa, maksymalna strumienia magnetycznego, wartość remanentu magnetycznego, Wb,

ϕ - kąt fazowy, deg,

R - rezystancja obwodu, Ω ,

L - indukcyjność obwodu, H,

t - czas, s,

ω - pulsacja, s^{-1} .

W równaniu (3) można wyróżnić składową oscylującą, związaną z napięciem zasilania, oraz składową stałą, równą różnicy między strumieniem remanentu a wartością początkową strumienia wymuszającego.

Przebieg prądu podczas załączania transformatora wyraża zależność:

$$i(t) = \frac{z\phi(t)}{L(\phi)} \quad (4)$$

gdzie: $i(t)$ - prąd, A,

z - liczba zwojów w uzwojeniu, -,

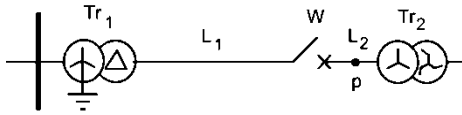
$\Phi(t)$ - strumień magnetyczny, Wb,

$L(\Phi)$ - indukcyjność uzwojenia, zależna od strumienia magnetycznego, H.

Ze wzoru (4) wynika, że wzrost strumienia magnetycznego powodujący nasycenie rdzenia może spowodować znaczne zwiększenie wartości maksymalnych prądów płynących podczas załączania transformatorów [4].

5. POMIARY NAPIĘĆ I PRĄDÓW ZAŁĄCZANIA TRANSFORMATORÓW

Wykonano symulacje i badania napięć i prądów podczas załączania transformatorów. Schemat stanowiska doświadczalnego zamieszczono na rysunku 3. Zawiera ono transformator zasilający 15/0,4 kV (Tr_1), wyłączany transformator doświadczalny 6/0,4 kV (Tr_2) oraz linie zasilające L_1 i L_2 .

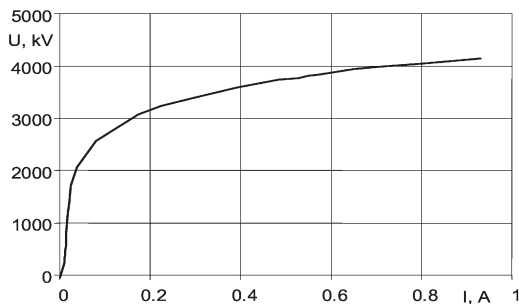


Rys. 3. Schemat stanowiska do badań napięć i prądów podczas załączania transformatorów: Tr_1 - transformator zasilający, Tr_2 - transformator doświadczalny, L_1 , L_2 - linie zasilające, W - wyłącznik próżniowy, p - punkt rejestracji napięć i prądów fazowych

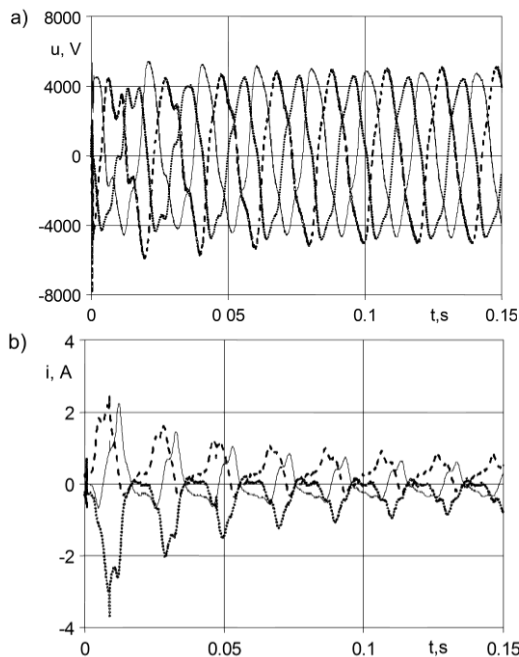
Podstawowe parametry transformatorów pracujących w układzie doświadczalnym (rys. 3) zamieszczono w tabeli 1. Doświadczalną zależność $u=f(i)$ transformatora typu TOC 20/10 przedstawiono na rysunku 4. Linia L_1 jest wykonana przy użyciu kabla o długości 80 m, a linia L_2 ma postać przewodów sztywnych o długości 2m. W układzie doświadczalnym zastosowano wyłącznik próżniowy typu $VD4$.

Tabela 1. Podstawowe parametry transformatorów w układzie doświadczalnym (rys. 3)

parametr/typ	TNOSCT-250/15.75PNS	TOC 20/10
S_n , kVA	250	20
U_n , kV	15,75/0,4	6/0,4
U_z , %	4,5	4,29
ΔP_{Fe} , kW	0,486	0,02
ΔP_{Cu} , kW	3,509	0,22
I_0 , %	1,0	0,54



Rys. 4. Charakterystyka magnesowania transformatora doświadczalnego typu TOC 20/10 (rys. 3, tab. 1)

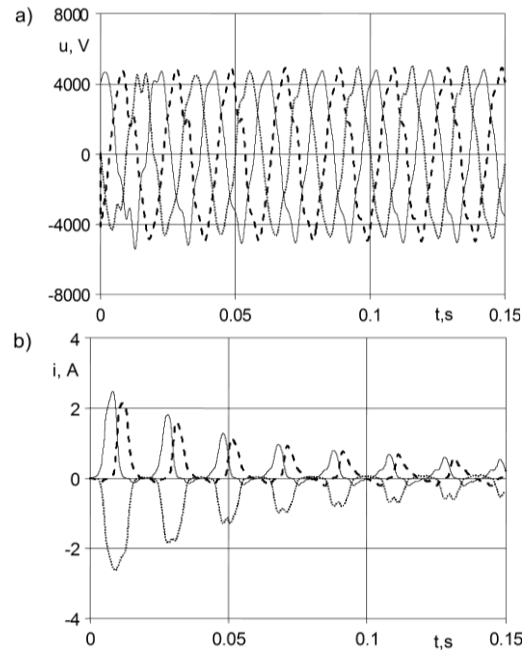


Rys. 5. Przebiegi doświadczalne napięć i prądów podczas załączania transformatora typu TOC 20/10 (rys. 3): a - przebiegi napięć fazowych, b - przebiegi prądów fazowych transformatora

Badania obejmowały rejestracje przebiegów napięć i prądów fazowych w punkcie P (rys. 3) podczas załączania transformatora typu TOC 20/10. Na rysunku 5 zamieszczono wybrane zarejestrowane przebiegi napięć i prądów fazowych.

6. WYNIKI SYMULACJI

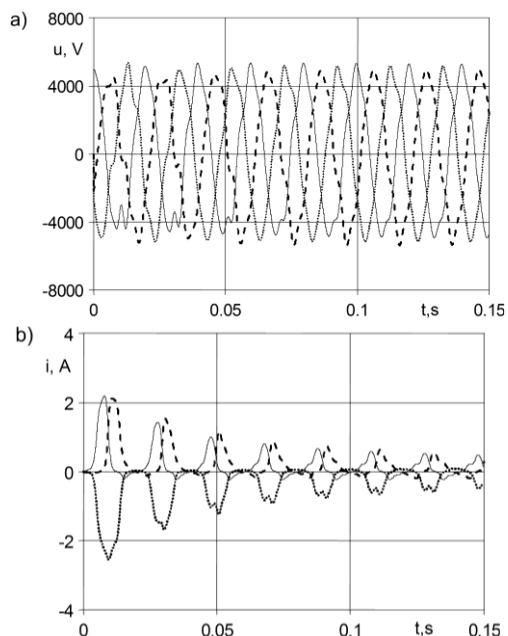
Wykonano symulacje napięć i prądów podczas załączania transformatora typu TOC 20/10 w układzie doświadczalnym (Tr_2 - rys. 3).



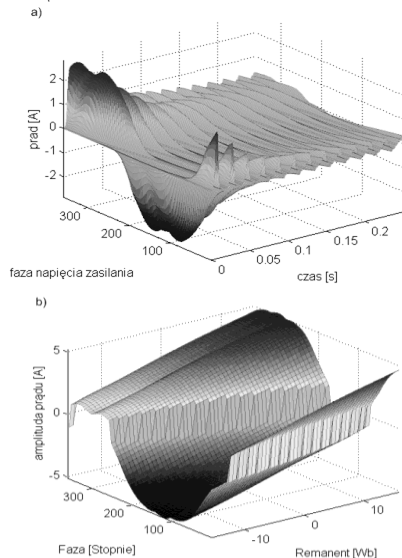
Rys. 6. Wyniki symulacji napięć i prądów fazowych załączania transformatora wykonanych przy zastosowaniu programu EMTP-ATP: a - przebiegi napięć fazowych, b - przebiegi prądów fazowych transformatora

Do symulacji napięć i prądów załączania transformatora wykorzystano modele układu doświadczalnego (rys. 3), opracowane w programie *EMTP-ATP* (ver. 5.6p6) i w środowisku *MATLAB* (ver.7.9). Do modelowania transformatorów w *EMTP-ATP* użyto model *Saturable Transformer*. Do symulacji napięć i prądów transformatorów w programie *MATLAB* wykorzystano model transformatorów zaimplementowany w środowisku *Simulink*. W obu modelach uwzględniono charakterystykę magnesowania transformatora, przedstawioną na rysunku 4. Wyniki symulacji napięć i prądów generowanych podczas załączania transformatora, wyznaczone przy zastosowaniu przedstawionych modeli transformatorów w programie *EMTP-ATP* i środowisku *MATLAB*, przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Wyniki symulacji mają postać przebiegów napięć fazowych na zaciskach transformatora (punkt p, rys. 3) oraz prądów płynących podczas załączania transformatora.

Niewielkie różnice między przebiegami napięć i prądów załączania transformatora TOC 20/10 (Tr_2 - rys.3), wyznaczonymi w wyniku symulacji wykonanych przy zastosowaniu programów *EMTP-ATP* i *Matlab/Simulink* wynikają głównie z różnych sposobów odwzorowywania obwodów magnetycznych transformatora w modelach transformatorów zastosowanych do symulacji. Przebiegi teoretyczne napięć i prądów załączania transformatora są zbliżone do wyników eksperymentalnych zamieszczonych na rysunku 5.



Rys. 7. Wyniki symulacji napięć i prądów fazowych załączania transformatora wykonanych w środowisku *MATLAB\Simulink*



Rys. 8. Zależność wartości maksymalnych prądów załączania transformatora typu TOC 20/10 (rys. 3) od fazy załączania i remanentu magnetycznego rdzenia: a - przebiegi prądów załączania transformatora w funkcji fazy załączania, b - zależność wartości maksymalnych prądów załączania transformatora od fazy i remanentu

W celu oceny możliwości ograniczania wartości maksymalnych prądów podczas załączania transformatorów wykonano symulacje przebiegów prądów załączania przy różnych fazach włączania napięcia zasilającego. Na podstawie wyników symulacji wyznaczono także zależność

wartości maksymalnych prądu załączania transformatora od fazy załączania napięcia zasilania oraz remanentu magnetycznego rdzenia. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 8.

Wyniki symulacji potwierdzają możliwość zastosowania metody synchronizacji łączeń do ograniczania wartości prądów załączania transformatora oraz wpływ wartości remanentu magnetycznego na wartości maksymalne prądów załączania transformatorów.

7. PODSUMOWANIE

Wykonano symulacje napięć i prądów załączania transformatorów przy zastosowaniu wybranych modeli transformatorów, istniejących w programie EMTP-ATP i środowisku MATLAB/Simulink. Niewielkie różnice między przebiegami napięć i prądów wynikają głównie z różnych sposobów odwzorowywania rdzeni transformatorów w zastosowanych modelach. Wyniki symulacji potwierdzają badania eksperymentalne. Symulacje uwidaczniają wpływ fazy załączania napięcia i remanentu magnetycznego rdzenia na wartości maksymalne napięć i prądów załączania transformatorów.

Literatura

1. Smith K. S., Ran L., Leyman B.: Analysis of transformer inrush transients in offshore electrical systems, *IEEE Proc-Gener. Trans. Dist.*, Vol. 146, No. 1, Jan. 1999, pp. 89-95
2. Furgał J., Symulacje prądów załączania transformatorów, *Prz. Elektrot.*, R. 83, Nr 7- 8/2007, str. 82 - 85
3. Jansen C. P. J., Sloopweg J. G., de Groot R. A. C. T., Calculation of transformer inrush currents occurring during the energizing of the public grid after major black-out, *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, 27-30 June 2005, St. Petersburg, pp. 1- 7
4. Jezierski E., *Transformatory* (wyd. 2), WNT, Warszawa 1983
5. Martinez-Valeasco J. A., Mork B. A., Transformer modeling for low- and mid- frequency transient – a review, *IEEE Trans. on Pow. Del.*, Vol. 20, No. 2, Apr. 2005, pp. 1625 - 1632
6. Dommel H. W and et. al., *Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)*, Portland, OR: Prepared for BPA, Aug. 1986
7. Brandwajn V., Dommel W. H., Dommel I. I., Matrix representation of three-phase n-winding transformers for steady state and transient studies, *IEEE Trans. on Pow. App. and Sys.*, Vol. 101, No. 6, June 1982, pp. 1369 - 1378
8. strona internetowa: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/powersys/>
9. Brunke J. H., Fröhlich K. J., Elimination of transformer inrush currents by controlled switching - Part I: theoretical considerations, *IEEE Trans. on Pow. Del.*, Vol. 16, No. 2, Apr., 2001, pp. 276 - 280

COMPUTER SIMULATIONS AND INVESTIGATIONS OF VOLTAGES AND CURRENTS DURING ENERGETIZATION OF POWER TRANSFORMERS

Keywords: transformers, inrush currents, simulations, measurements

Waveforms of currents and voltages generated during switching on of transformers are different than sinusoidal shapes and maximal values of currents are considerably higher than nominal values. The flow of inrush current has influence on quality of electric power and condition of power transformers.

Results of simulations and investigations of voltages and currents during switching on of a power transformer are presented in the paper. Simulation results were compared to investigations. The possibility of use of the method of controlled switching to reduce of transformer inrush currents was analysed.