

Jacek HORISZNY*

ANALIZA WPLYWU NIEJEDNOCZESNOŚCI ZAMYKANIA BIEGUNÓW ŁĄCZNIKA NA PRĄDY ZAŁĄCZENIOWE TRANSFORMATORA W STANIE JAŁOWYM

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych prądów załączeniowych transformatora dla różnych sekwencji zamykania biegunów łącznika. Sekwencje różniły się kolejnością łączenia faz oraz czasami opóźnienia w zamykaniu biegunów. Rozważono także kilka wariantów stanu namagnesowania szczątkowego rdzenia. Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że przy jednoczesnym zamykaniu biegunów łącznika, właściwy dobór chwili załączenia pozwala na ograniczenie prądów załączeniowych do wartości nie mniejszych niż prąd znamionowy transformatora. Wprowadzenie odpowiednich opóźnień w zamykaniu biegunów daje możliwość znacznie skuteczniejszego zmniejszenia tych prądów. Obliczone optymalne czasy opóźnień pozwoliły zmniejszyć prądy włączania do poziomu charakterystycznego dla prądu biegu jałowego. Stwierdzono, że ten efekt jest osiągalny dla wszystkich wziętych pod uwagę stanów namagnesowania rdzenia.

1. UWAGI WSTĘPNE

Prąd załączeniowy transformatora jest prądem płynącym w uzwojeniu pierwotnym, po doprowadzeniu do zacisków tego uzwojenia napięcia zasilającego. W ogólnym przypadku ma charakter przebiegu nieustalonego, a obwód elektryczny transformatora, jak i obwód magnetyczny, znajduje się w tym czasie w stanie przejściowym. Na kształt przebiegu prądu załączeniowego, a w szczególności na jego wartości ekstremalne, mają wpływ różne czynniki. Należy do nich zaliczyć m. in. stan pracy transformatora, czyli to, czy włączenie zasilania nastąpiło w stanie jałowym, w stanie obciążenia czy w stanie zwarcia. Najpoważniejsze skutki włączenia napięcia mogą wystąpić w stanie jałowym. Wynika to stąd, że strumień magnetyczny w rdzeniu jest wtedy największy. W pozostałych dwóch stanach, znaczny prąd w stanie obciążenia, czy bardzo duży w stanie zwarcia, indukują w rdzeniu strumień magnetyczny osłabiający strumień całkowity.

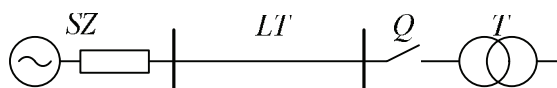
W każdym z wymienionych powyżej stanów pracy, wartość szczytowa prądu załączeniowego zależy przede wszystkim od kąta fazowego włączenia napięcia zasilającego i wartości strumieni szczątkowych w uzwojonych kolumnach rdzenia

* Politechnika Gdańska.

transformatora. Przy rozważaniu wpływu momentu zamknięcia łącznika należy wziąć pod uwagę opóźnienie, jakie występuje między momentami zamknięcia biegunów poszczególnych faz [3]. Określenie związków między powyższymi czynnikami a wartością szczytową prądu załączeniowego umożliwi opracowanie algorytmów załączania, dzięki którym wartości maksymalne prądu załączeniowego zostają zmniejszone do poziomu, przy którym nie wywołują reakcji systemów zabezpieczeń [2].

2. MODEL SYMULACYJNY

W celu przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych przebiegów prądów włączania przygotowano model obwodowy układu zasilania z transformatorem energetycznym. Jako narzędzie wykorzystano program ATP/EMTP, będący głównym składnikiem wyspecjalizowanego pakietu aplikacji, przeznaczonego do modelowania i analizy układów elektrycznych w stanach przejściowych [1]. Ogólną strukturę analizowanego układu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Struktura układu, w którym obliczono prądy załączeniowe transformatora

Obliczenia przeprowadzono dla stanu jałowego transformatora, dlatego strona wtórna pozostawała nie obciążona. Modelowany obwód tworzyły następujące elementy:

- system zasilający *SZ*,
- linia zasilająca transformator *LT*,
- transformator *T*,
- łącznik *Q*.

Model układu zasilania w analizowanym obwodzie przyjęto w postaci układu zastępczego, w którym występuje idealne trójfazowe symetryczne źródło napięciowe. Szeregowo ze źródłem umieszczono układy RL modelujące wewnętrzną impedancję układu zastępczego.

Do modelowania linii zasilającej wykorzystano model biblioteczny programu ATP/EMTP w postaci układu elementów skupionych. W takim modelu nie są możliwe do uwzględnienia zjawiska falowe w linii, które jednak z założenia zostały pominięte w przeprowadzonej analizie. Uproszczenie takie uzasadnia bardzo duża dysproporcja w szybkości zachodzenia tych zjawisk i procesów związanych z magnesowaniem rdzenia transformatora. W modelu są brane pod uwagę sprzężenia magnetyczne i elektryczne między przewodami fazowymi linii.



Transformator był reprezentowany przez model biblioteczny programu ATP/EMTP, ale uzupełniony o dodatkowe gałęzie zewnętrzne, umożliwiające wprowadzenie do modelu charakterystyki magnesowania w postaci pętli histerezy.

Biblioteka programu ATP/EMTP zawiera dość rozbudowaną listę modeli łączników. W żadnym z nich jednak nie uwzględniono modelu łuku elektrycznego, który może mieć znaczący wpływ na przebieg prądu w obwodzie. Może zarówno ograniczyć wartość tego prądu, jak i wpłynąć na moment jego przerywania. Z tego powodu model łącznika z biblioteki programu uzupełniono o wcześniej opracowany obwodowy model łuku elektrycznego, pozwalający na uwzględnienie jego wpływu na procesy komutacyjne [6].

3. BADANIA SYMULACYJNE

3.1. Jednoczesne zamknięcie biegunów łącznika

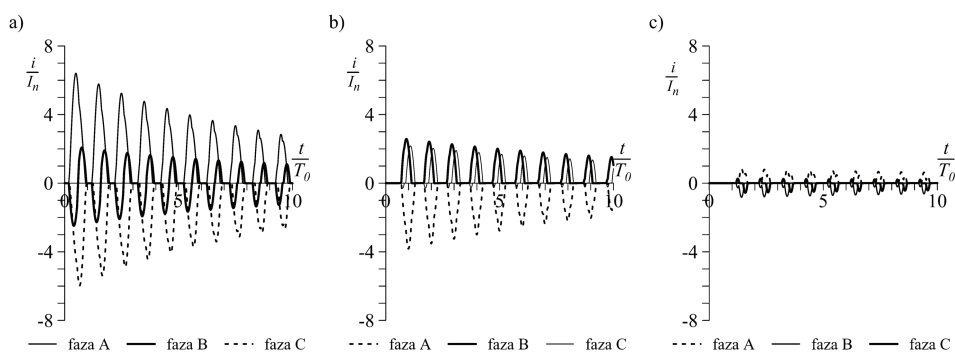
W pierwszej części badań przeprowadzono obliczenia symulacyjne przebiegów prądów włączania transformatora przy założeniu, że bieguny zamykają się jednocześnie. Przeprowadzono szereg symulacji dla zmieniającego się kąta załączenia napięcia oraz dla różnych wartości strumieni szczytowych objętych uzwojeniami poszczególnych faz. Kąt włączenia napięcia przyjmowano w taki sposób, aby opóźnienie zamknięcia łącznika w stosunku do fazy napięcia zmieniało się co 1ms w przedziale od zera do 20 ms. Dobór wartości strumieni szczytowych oparto o wyniki symulacji przedstawione w [5]. Przyjęte zestawy strumieni, określające ich wartości w poszczególnych kolumnach, znajdują się w tabeli 1. Ich wartości podano w procentach wartości maksymalnej strumienia przy pracy znamionowej transformatora.

Tabela 1. Zestawy strumieni szczytowych określone na drodze symulacji [5]

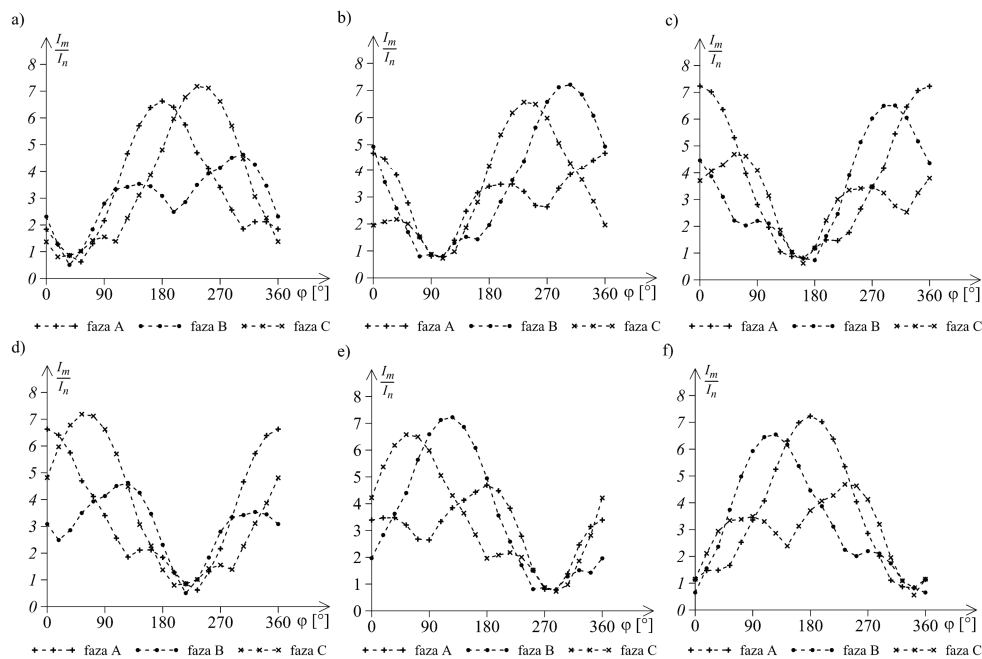
nr	faza L1	faza L2	faza L3
1	-23,9%	-47,3%	71,2%
2	48,2%	-71,1%	22,9%
3	70,7%	-22,0%	-48,6%
4	23,9%	47,3%	-71,2%
5	-48,4%	71,2%	-22,8%
6	-70,7%	22,1%	48,6%

Na rys. 2 przedstawiono wybrane spośród wszystkich obliczonych, przykładowe przebiegi prądów załączeniowych. Oś odciętych tych wykresów jest wyskalowana w jednostkach równych okresowi napięcia zasilającego, natomiast

oś rzędnych jest wyskalowana w jednostkach względnych prądu, gdzie wartością odniesienia jest prąd znamionowy transformatora po stronie pierwotnej.



Rys. 2. Obliczone prądy załączeniowe dla zestawów strumieni szczytkowych z tabeli 1 i różnych faz załączenia napięcia: a) zestaw strumieni nr 3, faza załączenia 72° ; b) zestaw strumieni nr 4, faza załączenia 18° ; c) zestaw strumieni nr 6, faza załączenia 342°



Rys. 3. Wartości szczytowe obliczonych prądów załączeniowych dla różnych zestawów strumieni szczytkowych z tabeli 1, przedstawione w funkcji fazy załączenia napięcia: a) dla zestawu strumieni nr 1; b) dla zestawu strumieni nr 2; c) dla zestawu strumieni nr 3; d) dla zestawu strumieni nr 4; e) dla zestawu strumieni nr 5; f) dla zestawu strumieni nr 6

Na podstawie tych wykresów można stwierdzić, że charakter zmian przedstawionych przebiegów w każdym z pokazanych przypadków jest podobny, natomiast różnice zachodzą przede wszystkim w wartościach maksymalnych i fazach początkowych. Niewątpliwie wpływ na to mają główne parametry, przy zmienności których uzyskano przedstawione wyniki.

Zależność między tymi parametrami i wartościami prądów w sposób pełny przedstawia rys. 3. Pokazano na nim wykresy wartości szczytowych prądów poszczególnych faz w funkcji kąta załączenia napięcia. Każdy rysunek dotyczy innego zestawu wartości strumieni szczytkowych wziętego z tabeli 1. Można na nich zaobserwować, że wartości minimalne w każdym z przypadków są położone prawie w tym samym miejscu osi odciętych i w pobliżu dolnej granicy przedziału wartości funkcji. To spostrzeżenie jest dość istotne. Wynika stąd, że dla każdego z rozważanych zestawów strumieni szczytkowych można określić taki kąt załączenia napięcia, przy którym prądy załączeniowe osiągną wartości szczytowe najmniejsze, porównywalne z prądem znamionowym transformatora. Przebiegi prądów dla takiej sytuacji przedstawia rys. 2c. Może to stanowić prostą metodę zmniejszania prądów załączeniowych. Jednak zasadniczą trudność stanowi tutaj określenie strumieni szczytkowych, których znajomość jest głównym warunkiem właściwego doboru momentu zamknięcia styków łącznika zasilającego.

3.2. Niejednoczesne zamknięcie biegunów łącznika

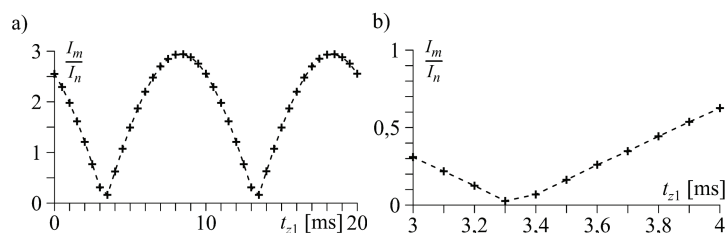
W tej części badań przeprowadzono obliczenia symulacyjne przebiegów prądów włączania transformatora przy założeniu, że biegun jednej z faz zamyka się z późnieniem w stosunku do pozostałych dwóch, zamykających się jednocześnie. Obliczenia przeprowadzono w dwóch etapach:

- a) W pierwszym transformator był zasilany dwufazowo (uzwojenie pierwotne w połączeniu w trójkąt) – łączniki w dwóch fazach zamykały się w chwili t_{z1} . Obliczono prąd płynący w obwodzie i wyznaczono wartość szczytową dla różnych wartości czasu włączenia z przedziału (0, 20 ms).
- b) W etapie drugim obliczono prądy trzech faz i wyznaczono ich wartości szczytowe w sytuacji, gdy te same dwa łączniki, co w etapie (a), zamknęły się w optymalnym momencie t_{z1} , a następnie trzeci zamykał się w momencie t_{z2} . Czas t_{z1} wybrano na podstawie wyników obliczeń etapu (a) jako ten, dla którego uzyskano najmniejszą wartość szczytową prądu. Czas t_{z2} zmieniano identycznie jak t_{z1} w etapie (a).

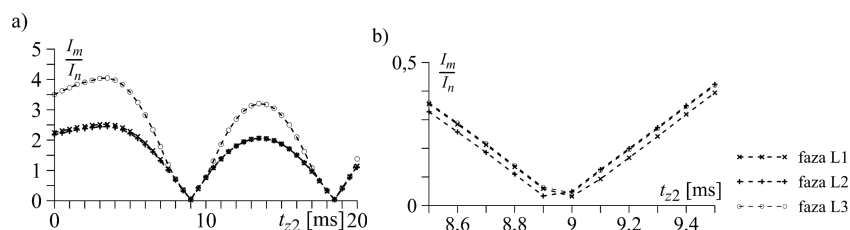
Obliczenia w obu etapach przeprowadzono dla określonego zestawu strumieni szczytkowych. Końcowym celem obliczeń było określenie czasów t_{z1} i t_{z2} , przy których wartości szczytowe prądów w trzech fazach są najmniejsze dla danego zestawu strumieni szczytkowych. Dla przypadku, w którym wszystkie strumienie szczytkowe są zerowe, przeanalizowano trzy warianty zamykania styków łącznika:

- A) w chwili t_{z1} zamykają się styki w fazach L1 i L2, po nich, w chwili t_{z2} , zamykają się styki w fazie L3,
 B) w chwili t_{z1} zamykają się styki w fazach L2 i L3, po nich, w chwili t_{z2} , zamykają się styki w fazie L1,
 C) w chwili t_{z1} zamykają się styki w fazach L1 i L3, po nich, w chwili t_{z2} , zamykają się styki w fazie L2.

Rys. 4 przedstawia wyniki obliczeń przeprowadzonych w etapie (a), dla wariantu (A) zamykania styków łącznika, w skali obejmującej cały przedział wartości czasu t_{z1} oraz w skali rozszerzonej. Przedstawiono na nim wartości szczytowe prądu, wyznaczone na podstawie otrzymanych przebiegów. Na rys. 5, przedstawiono wyniki obliczeń w etapie (b) dla wariantu (A). Zamieszczono na nim wyznaczone wartości szczytowe prądów we wszystkich fazach. Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla etapów (a) i (b) w wariantach (B) oraz w wariantach (C) pracy łącznika. W każdym przypadku poszukiwano minimum wartości szczytowej prądu i odpowiadających mu wartości t_{z1} i t_{z2} .



Rys. 4. Wartości szczytowe prądu załączeniowego obliczone w etapie (a), dla wariantu (A) pracy łącznika: a) w skali pełnej, b) w skali rozszerzonej wokół pierwszego minimum



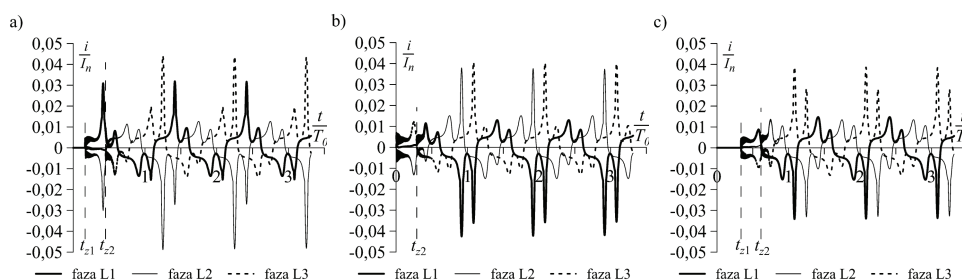
Rys. 5. Wartości szczytowe prądów załączeniowych obliczone w etapie (b) dla wariantu (A) pracy łącznika: a) w skali pełnej, b) w skali rozszerzonej

W tabeli 2 zamieszczono wartości optymalnych czasów t_{z1} i t_{z2} wyznaczone w opisany powyżej sposób dla wymienionych trzech wariantów pracy łącznika. Przebiegi prądów podczas załączania z niejednoczesnym zamykaniem styków i czasami opóźnień zamieszczonymi w tabeli przedstawiono na rys. 6. Wartości prądów odniesiono do wartości znamionowej prądu transformatora. Można zauważyć, że we wszystkich przypadkach uzyskano efekt znacznego zmniejszenia prądów. Wartości szczytowe nie przekroczyły 5%.

Przedstawioną powyżej metodą obliczono optymalne czasy t_{z1} i t_{z2} dla wszystkich zestawów strumieni szczytkowych z tabeli 1. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 3. Oprócz wartości t_{z1} i t_{z2} znajdują się w niej wartości szczytowe prądów fazowych płynących w obwodzie przy takich czasach opóźnienia zamykania styków. Można zauważyć, że otrzymane wartości szczytowe mieszczą się w przedziale od 1,5% do 4,5% wartości znamionowej prądu.

Tabela 2. Optymalne czasy załączania biegunów łącznika przy braku strumieni szczytkowych

wariant załączania	t_{z1} [ms]	t_{z2} [ms]
A	3,3	9,0
B	0,0	5,8
C	6,7	12,3



Rys. 6. Przebiegi prądów podczas załączania z niejednoczesnym zamykaniem styków i czasami opóźnień z w tabeli 3: a) dla wariantu (A), b) dla wariantu (B), c) dla wariantu (C)

Tabela 3. Optymalne czasy załączania biegunów łącznika dla strumieni szczytkowych z tabeli 2

nr zestawu strumieni	t_{z1} [ms]	t_{z2} [ms]	$\frac{I_{1m}}{I_n}$	$\frac{I_{2m}}{I_n}$	$\frac{I_{3m}}{I_n}$
1	2,6	6,5	0,029	0,025	0,020
2	4,9	6,9	0,024	0,016	0,028
3	5,8	9,3	0,015	0,015	0,015
4	4,1	10,1	0,030	0,029	0,035
5	1,7	10,0	0,034	0,033	0,045
6	0,9	8,4	0,029	0,034	0,030

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie uzyskanych rezultatów można sformułować następujące wnioski:

- Załączanie z niejednoczesnym zamykaniem biegunów łącznika pozwala ograniczyć prąd załączeniowy we wszystkich fazach do poziomu wartości porównywalnych z prądem biegu jałowego.
- Efekt ograniczenia prądów jest osiągalny dla wszystkich stanów namagnesowania rdzenia.
- Ograniczenie prądów jest możliwe w sytuacji, gdy znane są strumienie szczątkowe w rdzeniu i można osiągnąć precyzyjne nastawianie chwil zamknięcia poszczególnych biegunów łącznika.

LITERATURA

- [1] ATP Role Book, Lueven EMTP Center 1987, www.eeug.org.
- [2] Blume L. F., Camilli G., Farnham S. B., Peterson H. A., Transformer Magnetizing Inrush Currents and influence on system operation, AIEE Trans. Power. App. Syst., Vol 70, pp.323-327, Jan. 1951.
- [3] Brunke J. H., Frohlich K. J., Elimination of transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part I: Theoretical Considerations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No.2, January 2001.
- [4] Brunke J. H., Frohlich K. J., Elimination of transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part II: Application and Performance Considerations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No.2, January 2001.
- [5] Horiszny J., Aftyka W., Numerical calculation of three-phase transformer's residual flux in ATP and PSpice programs, XII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering ISTET' 03, Warszawa 2003.
- [6] Horiszny J., Modelowanie nieliniowej charakterystyki łącznika w obwodzie elektrycznym. XXVII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów. IC-SPETO 2004. Gliwice – Niedzica 2004, Materiały konferencyjne, Politechnika Śląska.

NUMERICAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF ASYNCHRONOUS SWITCH POLES CLOSING ON THE TRANSFORMER INRUSH CURRENT

This paper presents the results of numerical calculations of a transformer inrush currents for different sequences of the breaker poles closing. The sequences differed in the order of phases closing and in the delays of the poles closing. Also several variants of the residual magnetization of the core were considered. Basing on the analysis results, it was found that while the switch poles are closing simultaneously, proper selection of the closing time allows us to limit the inrush current to not less than the rated current of the transformer. A significant improvement in the inrush current reduction is possible if the appropriate delays in closing of the poles are inserted. The optimal delays were calculated to allow currents to reduce to the magnetizing current level. It was found that this effect is possible for all magnetization states of the core taken into account.

