

Marcin KAFARSKI

PRĄD W ZWARTYM UZWOJENIU WTÓRNYM NADPRZEWODNIKOWEGO OGRANICZNIKA PRĄDU TYPU INDUKCYJNEGO

STRESZCZENIE *W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienie związane z badaniem przebiegu prądu w zwartym uzwojeniu wtórnym nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego w chwili wystąpienia zwarcia w obwodzie, w którym znajduje się ogranicznik.*

Słowa kluczowe: *zwarcie, ogranicznik, modelowanie hybrydowe*

1. WSTĘP

Bardzo dużym zagrożeniem dla sieci elektroenergetycznych są zwarcia. Naprężenia będące skutkiem działania sił wywołanych przepływem prądu zwarciovego oraz duże ilości ciepła wydzielanego w wyniku przepływu tego prądu, mogą być przyczyną poważnych uszkodzeń elementów systemu elektroenergetycznego. Nie da się całkowicie wyeliminować możliwości występowania zwarć, ale można zapobiegać ich skutkom poprzez odpowiednio szybkie ograniczenie wartości prądu zwarciovego. Bardzo dobrze nadają się do tego nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego, które dzięki własnościom materiałów nadprzewodnikowych oferują czasy zadziałania rzędu kilkudziesięciu mikro sekund.

mgr Marcin KAFARSKI
e-mail: marcin24@pmail.pl

Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii
Politechnika Lubelska

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 248, 2010

2. BUDOWA OGRANICZNIKA

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu typu indukcyjnego składają się z miedzianego uzwojenia pierwotnego, wewnątrz (lub na zewnątrz) którego znajduje się nadprzewodnikowe, zwarte uzwojenie wtórne. W zależności od parametrów ogranicznika jakie chcemy uzyskać, wewnątrz może być także umieszczony rdzeń ferromagnetyczny [1].

Na rysunku 1 pokazany jest ogranicznik z rdzeniem zamkniętym i z wewnętrznym uzwojeniem wtórnym w postaci cylindrycznej kształtki nadprzewodnikowej. Na rysunku 2 natomiast widoczny jest ogranicznik w którym bezpośrednio na miedziane uzwojenie pierwotne nawinięte jest uzwojenie wtórne z taśmy nadprzewodnikowej pierwszej generacji – AMSC High Strength Wire (zwoje taśmy izolowane są od siebie taśmą kaptonową).



Rys. 1. Ogranicznik nadprzewodnikowy typu indukcyjnego z rdzeniem ferromagnetycznym. Po prawej stronie cylinder nadprzewodnikowy z materiału Bi-2223 o prądzie krytycznym $I_c = 625$ A

Obecnie panuje trend na udoskonalanie konstrukcji bezrdzeniowych. W konstrukcjach z rysunku 1 rdzeń zapewnia dobre sprzężenie magnetyczne między uzwojeniami jednak jest to urządzenie cięższe i droższe w produkcji.

Nawijanie uzwojeń bezpośrednio jedno na drugie także zapewnia dobre sprzężenie co eliminuje konieczność używania rdzenia, a parametry takiego ogranicznika uzależnione są głównie od rezystancji taśmy.



Rys. 2. Ogranicznik prądu z uzwojeniem wtórnym wykonanym z taśmy nadprzewodnikowej pierwszej generacji – AMSC High Strength Wire – o prądzie krytycznym $I_c = 118 \text{ A}$

3. ZASADA DZIAŁANIA OGRANICZNIKA

Uzwojenie pierwotne indukcyjnego ogranicznika prądu włączone jest szeregowo do chronionego obwodu. W warunkach znamionowych w uzwojeniu wtórnym indukuje się prąd o wartości wynikającej z przekładni zwojowej ogranicznika. Z uwagi na zerową rezystancję taśmy nadprzewodnikowej pole magnetyczne wewnątrz ogranicznika wywołane przez prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym jest całkowicie równoważone przez pole wytworzone w wyniku przepływu prądu w zwartym uzwojeniu wtórnym (zachodzi efekt ekranowania wnętrza ogranicznika od strumienia magnetycznego). W takim przypadku reaktancja ogranicznika jest praktycznie równa zero. Ogranicznik działa jak przekładnik prądowy.

W przypadku kiedy w obwodzie pierwotnym popłynie prąd zwarciový znacznie przewyższający wartość znamionową wtedy w uzwojeniu wtórnym (nadprzewodnikowym) indukuje się prąd o amplitudzie większej od wartości krytycznej. Nadprzewodnik przechodzi do stanu rezystywnego, zanika efekt ekranowania wnętrza ogranicznika, skutkiem czego jest nagłe pojawienie się znacznej reaktancji (impedancji). Ogranicznik działa w takim przypadku jak dławik prądowy.

Wartość impedancji w stanie zwarcia zależy od rezystancji uzwojenia nadprzewodnikowego oraz od tego czy użyty został rdzeń ferromagnetyczny czy nie.

Po ustąpieniu zwarcia ogranicznik może automatycznie powrócić do stanu nadprzewodzącego, jednak jest to uzależnione od czasu trwania zwarcia. Przepływ prądu w stanie rezystywnym może spowodować zwiększenie temperatury uzwojenia, a jego powrót do stanu nadprzewodzącego jest wówczas zależny od warunków ponownego schłodzenia. Badania eksperymentalne ogranicznika z rysunku 2 pokazały, że dla zwarć trwających do 60 ms ogranicznik powraca do stanu nadprzewodzącego natychmiast po wyłączeniu zwarcia. Dla zwarć dłuższych może być jednak konieczne odłączenie ogranicznika z obwodu na czas kilku bądź kilkunastu sekund aby umożliwić mu ponowne schłodzenie się do temperatury roboczej gdyż nawet niewielki prąd płynący po ustąpieniu zwarcia może powodować podtrzymywanie lub nawet wzrost temperatury uzwojenia.

Czas przejścia nadprzewodnika ze stanu nadprzewodzącego do rezystywnego jest zanedbywalnie krótki w stosunku do czasu trwania jednego okresu. Właściwość ta sprawia, że nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego zadziała w czasie poniżej 5ms czyli w ciągu pierwszej ćwiartki okresu. Oznacza to, że obwód jest chroniony przed działaniem prądu udarowego.

4. PRĄD W UZWOJENIU WTÓRNYM

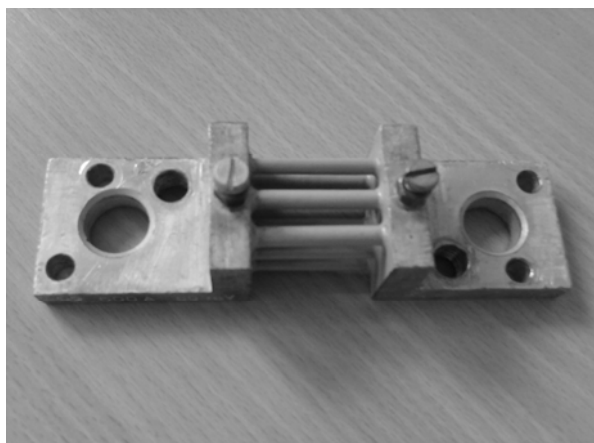
W stanie znamionowym prąd płynący w uzwojeniu nadprzewodnikowym ma amplitudę mniejszą od wartości prądu krytycznego zatem jego przebieg ma kształt sinusoidalny i jest w przeciwfazie z prądem pierwotnym.

W przypadku wystąpienia zwarcia sytuacja jest znacznie bardziej skomplikowana. Weźmy pod uwagę pierwszy półokres prądu wtórnego, od momentu wystąpienia zwarcia do pierwszego „przejścia przez zero”. Prąd ten rośnie sinusoidalnie do momentu osiągnięcia wartości chwilowej przekraczającej wartość krytyczną. Wówczas nadprzewodnik natychmiastowo przechodzi do stanu rezystywnego, a impedancja ogranicznika gwałtownie wzrasta. Skutkiem tego jest spadek wartości chwilowej prądu w uzwojeniu pierwotnym co z kolei powoduje zmniejszenie się wartości chwilowej prądu wtórnego poniżej wartości krytycznej. W tym momencie nadprzewodnik ponownie przechodzi do stanu nadprzewodzącego, tym samym impedancja ogranicznika raptownie maleje i prąd pierwotny ponownie wzrasta powodując wzrost prądu wtórnego powyżej wartości krytycznej.

Cykl ten powtarza się do momentu, aż napięcie wymuszające na ograniczniku spowoduje wyidukowanie się w uzwojeniu wtórnym prądu, którego wartości chwilowe będą mniejsze od wartości krytycznej.

5. EKSPERYMENTALNE WYZNACZANIE PRZEBIEGU PRĄDU WTÓRNEGO

Wykonanie pomiaru wartości prądu chwilowego w zwartym uzwojeniu wtórnym ogranicznika nie było możliwe za pomocą dostępnej w laboratorium aparatury. Aby jednak uzyskać kształt przebiegu prądu w uzwojeniu wtórnym podczas przepływu przez uzwojenie pierwotne prądu zwarciego zastosowano pewną modyfikację ogranicznika. Do nadprzewodnikowego uzwojenia wtórnego został włączony bocznik (rys. 3) o rezystancji $R_{bocz} = 0,1 \text{ m}\Omega$, na którym za pomocą oscyloskopu mierzone było napięcie chwilowe (prąd chwilowy).

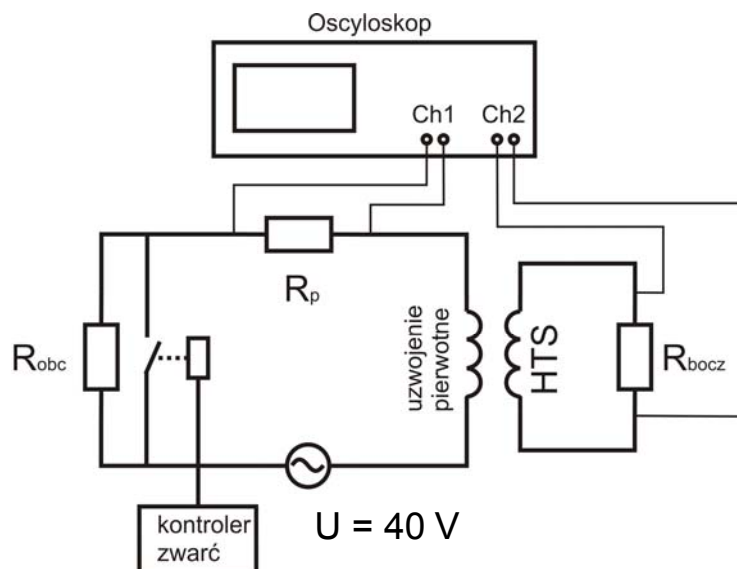


Rys. 3. Bocznik o rezystancji $R_{bocz} = 0,1 \text{ m}\Omega$



Rys. 4. Ogranicznik z zamontowanym bocznikiem

Schemat układu pomiarowego pokazano na rysunku 5.

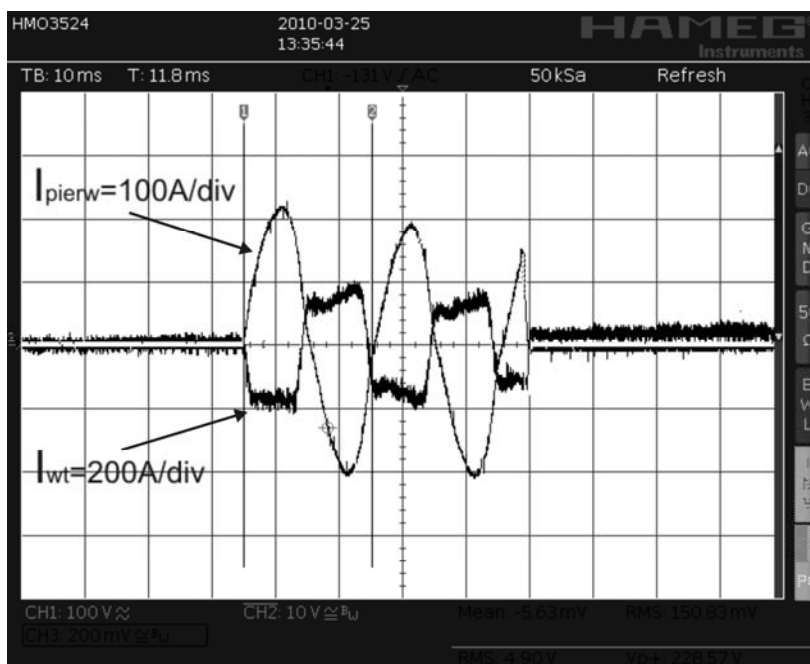


Rys. 5. Schemat układu pomiarowego:

R_p – rezystor na którym mierzono napięcie chwilowe (prąd w obwodzie pierwotnym), R_{obc} – obciążenie zwierane za pomocą kontrolera umożliwiającego ustawienie czasu jak i momentu wystąpienia zwarcia, U – napięcie (skuteczne) zasilania, HTS (High Temperature Superconductor) – nadprzewodnikowe uzwojenie wtórne (33 zwoje), uzwojenie pierwotne – drut miedziany (100 zwojów)

Należy mieć na uwadze, że w zwartym uzwojeniu wtórnym ogranicznika rezystancja zmienia się od wartości zerowej (stan nadprzewodzący) do wartości jaką ma taśma w stanie rezystywnym. Natomiast w zaprezentowanym układzie rezystancja obwodu wtórnego w stanie nadprzewodzącym równa się rezystancji bocznika wraz z przymocowanymi do niego mocowaniami miedzianymi do których przylutowana jest taśma nadprzewodnikowa. W prezentowanym modelu rezystancja bocznika wraz z mocowaniami wynosi $38 \text{ m}\Omega$, natomiast rezystancja taśmy w stanie rezystywnym równa się $0,408 \Omega$.

W wyniku pomiarów otrzymano przebiegi prądów pierwotnego i wtórnego (rys. 6). W przebiegu prądu wtórnego widoczne są „wypląszczenia” w miejscach gdzie osiąga on wartość krytyczną. Nie kształtują się one jednak na jednym poziomie we wszystkich widocznych półokresach co jest spowodowane między innymi nagrzewaniem się taśmy nadprzewodnikowej jak i nachyleniem charakterystyki prądu pierwotnego w danej chwili czasu. Na oscylogramie widoczne jest także nieznaczne pochylenie charakterystyki prądu pierwotnego. Prądy chwilowe pierwotny jak i wtórny zależą od rezystancji uzwojenia wtórnego jak i od siebie nawzajem co sprawia, że nadprzewodnikowy ogranicznik indukcyjny jest urządzeniem trudnym do opisu analitycznego.



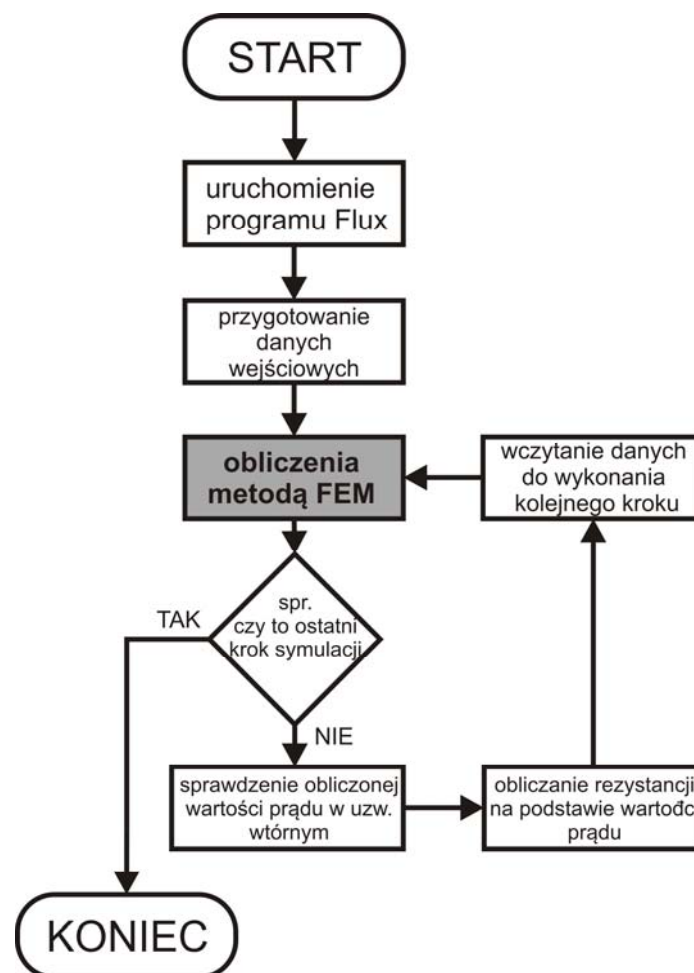
Rys. 6. Oscylogram przedstawiający przebieg prądu pierwotnego (I_{pierw}) oraz prądu wtórnego (I_{wt})

W celu oszacowania wpływu rezystancji bocznika na wartość maksymalną prądu (wartość pierwszego piku) w uzwojeniu pierwotnym, wykonano pomiar prądu płynącego przez ogranicznik ze zwartym uzwojeniem wtórnym. Wartość maksymalna prądu pierwotnego wynosi wówczas $I_m = 220$ A, natomiast dla ogranicznika z bocznikiem $I_m = 228$ A.

5. MODELOWANIE HYBRYDOWE PRZEBIEGU CHARAKTERYSTYKI PRĄDU WTÓRNEGO

Przebieg prądu wtórnego ma zasadnicze znaczenie dla określenia parametrów nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego. Niezastąpione w tej dziedzinie jest użycie programów komputerowych bazujących na metodzie elementów skończonych. Do wykonania symulacji skorzystano z pakietu Flux. Program umożliwia wirtualną konstrukcję urządzenia, opis fizyczny poszczególnych jego elementów oraz dołączenie obwodu zewnętrznego. Flux posiada kilka modułów obliczeniowych. Do symulacji ogranicznika skorzystano z modułu „Transient magnetic”. Istotną wadą programu jest jednak brak możliwości uzależnienia rezystancji od prądu, a jest to zależność kluczowa przy sy-

mulacji ogranicznika. Wykorzystując fakt, iż programy polowe wykonują obliczenia krokowo, stworzono program zarządzający modułem obliczeniowym pakietu Flux. Schemat blokowy według którego pracuje program widoczny jest na rysunku 7. Główny etap symulacji oznaczono kolorem szarym. W tej części pracuje moduł obliczeniowy Flux-a. Za obliczanie rezystancji pomiędzy kolejnymi krokami symulacji oraz za kontrolowanie współdziałania programów podczas całego procesu symulacji odpowiedzialny jest program napisany przez autora.

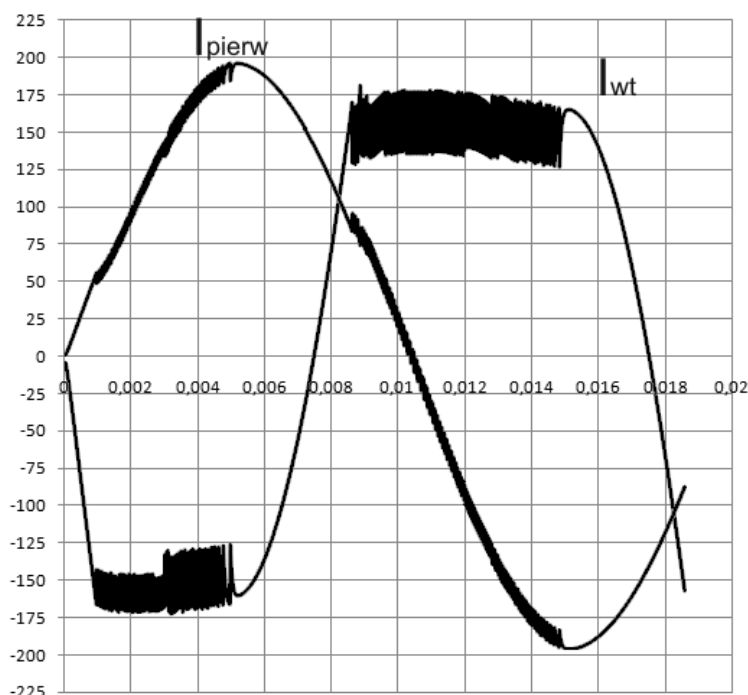


Rys. 7. Schemat blokowy przedstawiający kolejne etapy symulacji ogranicznika

Na podstawie tak stworzonego modelu hybrydowego przeprowadzono symulację układu z rysunku 5. Wyniki obliczeń dla pierwszego okresu po wystąpieniu zwarcia zostały przedstawione na rysunku 8.

Wypląszczenie charakterystyki prądu wtórnego widoczne na wykresie uzyskanym z symulacji jak i na oscylogramie (rys. 6) znajduje się wyżej niż wska-

zywałyby na to wartość krytyczna prądu taśmy podawana przez producenta. Dla taśmy użytej do wykonania uzwojenia badanego ogranicznika producent podaje $I_c = 118$ A. W praktyce jednak prąd ten różni się od podanej wartości. Zdarza się także, że kilka jednakowych odcinków taśmy pochodzących z tej samej szpuli ma bardzo zróżnicowane wartości prądu krytycznego.



Rys. 8. Wyniki symulacji
 I_{pierw} – prąd pierwotny, I_{wt} – prąd wtórny

6. PODSUMOWANIE

Kształt charakterystyki prądu wtórnego ma znaczący wpływ na właściwości ograniczające indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu, a hybrydowy model numeryczny pozwala wyznaczyć przebiegi prądu w uzwojeniu nadprzewodnikowym.

Obecnie prowadzone są badania pozwalające uzyskać charakterystyki prądowo napięciowe taśm nadprzewodnikowych z których wykonywane są uzwojenia ograniczników. Charakterystyki te posłużą do wyznaczenia zależności rezystancji taśmy od prądu. Będą one użyte w modelu numerycznym co pozwoli na dokładniejsze odwzorowanie kształtu przebiegu prądu.

LITERATURA

1. Janowski T.: Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu, Praca zbiorowa, Lublin 2002.
2. Kozak S.: Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 221, 2005.
3. Duron. J.: 3D Finite Elements Simulations of Strip Lines in a YBCO/Au Fault Current Limiter.

Rękopis dostarczono dnia 19.10.2010 r.

CURRENT ON SECONDARY WINDING THE INDUCTIVE SUPERCONDUCTOR FAULT CURRENT LIMITER

M. KAFARSKI

ABSTRACT *This paper presents measurements of current on secondary winding the inductive superconductor fault current limiter. Hybrid model of superconductor current limiter was also shortly described.*

Mgr Marcin KAFARSKI w 2007 r. ukończył studia na kierunku Fizyka (specjalność Fizyka komputerowa) na UMCS w Lublinie. W tym samym roku rozpoczął studia doktoranckie na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.