

Sławomir KOZAK

NADPRZEWODNIKOWY OGRANICZNIK PRĄDU – MAGNETODYNAMICZNY MODEL POŁOWO-OBWODOWY

STRESZCZENIE *Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu mogą być wykorzystywane do ograniczania poziomu prądów zwarciowych w sieciach energetycznych. Ograniczniki te, w przeciwieństwie do dławików czy transformatorów wysokoimpedancyjnych ograniczają prądy zwarciowe bez zwiększania impedancji obwodu w warunkach pracy znamionowej. W nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu typu rezystancyjnego element nadprzewodnikowy włączony jest bezpośrednio, szeregowo od obwodu. Prąd zwarciowy powoduje przejście nadprzewodnika do stanu rezystywnego i w obwodzie pojawia się rezystancja ograniczająca prąd zwarcia. W nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu typu indukcyjnego nadprzewodnikowy ogranicznik rezystancyjny umieszczony jest po stronie wtórnej transformatora. Impedancja tego ogranicznika jest bliska zeru w warunkach znamionowych, ponieważ zerowa impedancja wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego przenoszona jest na stronę pierwotną. Podczas zwarcia rezystancja ze strony wtórnej przenoszona jest do obwodu i ogranicza prąd zwarciowy. W pracy opisany został model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego. Model fizyczny takiego ogranicznika zbudowany został w Pracowni Krioelektromagnesów. Charakterystyki napięciowo-prądowe modelu fizycznego zmierzone w temperaturze pokojowej (295 K) wykorzystane zostały do weryfikacji modelu numerycznego. Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego opracowany został przy wykorzystaniu modułu magnetodynamicznego MD sprzężonego z obwodem zewnętrznym w programie poleowym FLUX2D. Model numeryczny wykorzystany został do przeanalizowania wpływu wybranych parametrów na charakterystyki napięciowo-prądowe ogranicznika. Pokazano, że zmiana geometrii rdzenia magnetycznego wpływa znacząco na te charakterystyki.*

Słowa kluczowe: nadprzewodnikowy ogranicznik prądu, model numeryczny, FLUX2D.

Dr inż. Sławomir KOZAK

Institut Elektrotechniki w Warszawie,
Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki,
Pracownia Krioelektromagnesów – Lublin

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 211, 2002

1. WSTĘP

Konwencjonalne metody eliminacji prądów zwarciovych wymagają stosowania kosztownych wyłączników prądowych dużej mocy oraz innych urządzeń pomocniczych, których zastosowanie podraża koszt systemu energetycznego, wpływa na jego rozczłonkowanie oraz obniża stabilność i niezawodność pracy. Dlatego też poszukuje się innych metod eliminacji prądów zwarciovych, pozwalających na zastosowanie tańszych a zarazem wydajniejszych zabezpieczeń zwarciovych. Jedną z takich metod wykorzystuje nadprzewodnikowe ograniczniki prądów zwarciovych [4],[6],[10].

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądów zwarciovych składają się z nieliniowych elementów o zmiennej impedancji, włączanych szeregowo w obwód elektryczny. Wykazują one małą impedancję podczas znamionowych warunków pracy oraz dużą impedancję w warunkach zwarcia. Szybki powrót do stanu nadprzewodzącego po ustąpieniu zwarcia oraz długi czas pracy przy niskich kosztach utrzymania to podstawowe zalety nadprzewodnikowych ograniczników prądów zwarciovych [6],[10],[11].

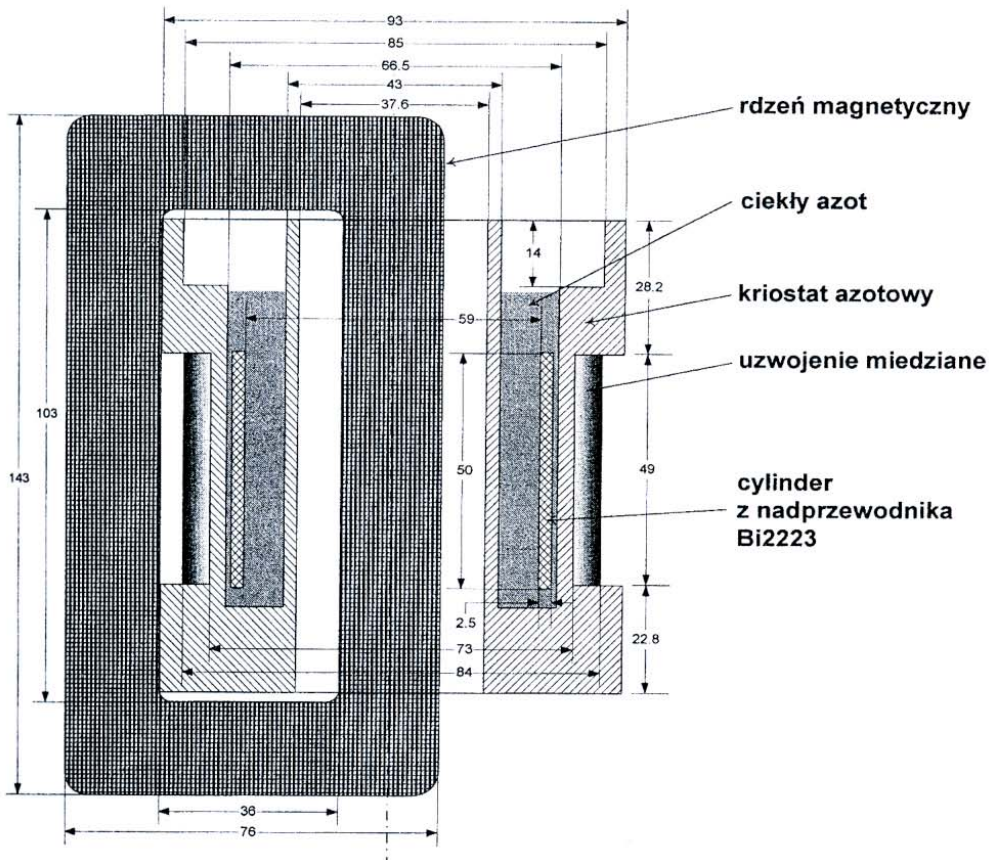
Istnieją dwa podstawowe typy nadprzewodnikowych ograniczników prądów zwarciovych. Są to ograniczniki rezystancyjne, których praca opiera się na zmianie rezystancji elementu nadprzewodnikowego, oraz indukcyjne, działające na zasadzie ekranowania strumienia magnetycznego [5],[10],[11].

W rezystancyjnych ogranicznikach prądowych ograniczanie prądu zwarciovego zachodzi w następstwie wzrostu rezystancji obwodu elektrycznego. Elementem ograniczającym prąd jest element nadprzewodnikowy (włączony szeregowo w obwód), który w znamionowych warunkach pracy (tj. w stanie bezzwarciovym) znajduje się w stanie nadprzewodzącym, a więc stanowi zerową rezystancję dla przepływu prądu [4],[7],[11]. Podczas zwarcia element nadprzewodnikowy przechodzi niemal natychmiastowo do stanu rezystywnego ograniczając wartość prądu zwarciovego.

Indukcyjne ograniczniki nadprzewodnikowe mają budowę transformatora ze zwartym uzwojeniem wtórnym w postaci cylindra z nadprzewodnika wysokotemperaturowego, który podczas znamionowych warunków pracy ogranicznika (w stanie nadprzewodzącym) pełni rolę ekranu magnetycznego, uniemożliwiając strumieniowi magnetycznemu indukowanemu w cewce pierwotnej wnikanie do rdzenia magnetycznego ogranicznika [6],[7],[11],[10]. Uzwojenie pierwotne wykonane z miedzi włączone jest bezpośrednio do obwodu elektrycznego [7],[11]. Cylinder nadprzewodnikowy, którego wyjście ze stanu nadprzewodzącego ogranicza prąd zwarciovym nie jest połączony galwanicznie z obwodem

zabezpieczanym. Prąd w cylindrze nadprzewodnikowym jest indukowany przez prąd w miedzianym uzwojeniu pierwotnym. Brak doprowadzeń prądowych do elementu nadprzewodnikowego to podstawowa zaleta ogranicznika typu indukcyjnego [10],[11].

Modele numeryczne zweryfikowane eksperymentalnie pozwalają w prosty i tani sposób wykorzystać wyniki eksperymentalne do uzyskania odpowiedzi na szereg pytań związanych z działaniem i wpływem różnych parametrów na pracę urządzeń nadprzewodnikowych. Przedstawiony w pracy magnetodynamiczny model numeryczny polowo-obwodowy opisujący wybrany wycinek zjawisk związanych z działaniem nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego pozwala analizować wpływ parametrów ogranicznika na parametry obwodu elektrycznego w którym pracuje ogranicznik.



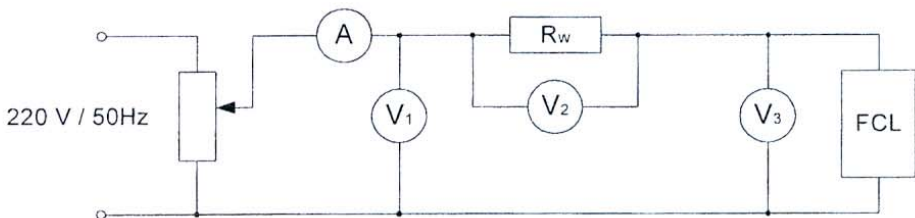
Rys.1. Przekrój nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego (wymiary w milimetrach).

2. NADPRZEWODNIKOWY OGRANICZNIK PRĄDU TYPU INDUKCYJNEGO

Na rysunku 1 przedstawiony jest przekrój nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego, zbudowanego w Pracowni Krioelektromagnesów w Lublinie. Podstawowe części składowe ogranicznika to:

- 1) cylinder z nadprzewodnika wysokotemperaturowego Bi2223 (Can Superconductors) o średnicy wewnętrznej 0.059 m, wysokości 0.05 m i grubości ścianki 0.0025 m i prądzie krytycznym = 625 A w temperaturze 77 K,
- 2) kriostat azotowy wykonany z ertalonu (ternamid) z nawiniętym uzwojeniem miedzianym,
- 3) rdzeń magnetyczny o przekroju $0.02 \times 0.02 \text{ m}^2$, wysokości kolumny 0.103 m i szerokości okna 0.036 m.

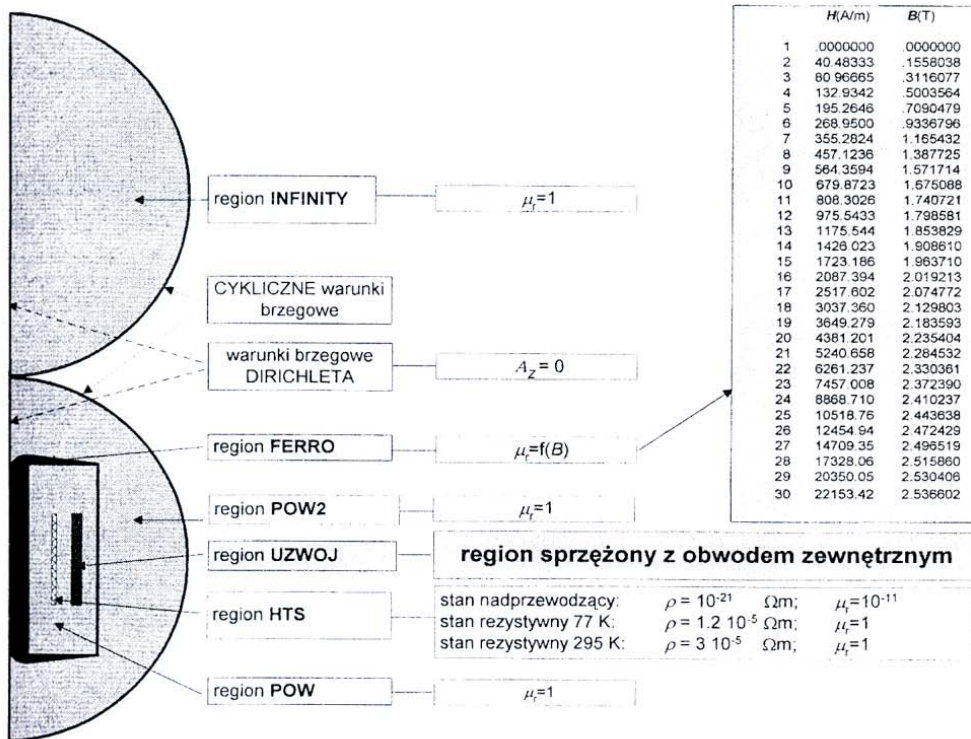
Na rysunku 2 przedstawiony został układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk statycznych indukcyjnego ogranicznika prądu. Jest to typowy układ z 3 woltmierzami i amperomierzem, umożliwiający wyznaczenie spadku napięcia oraz przesunięcia fazowego na ograniczniku.



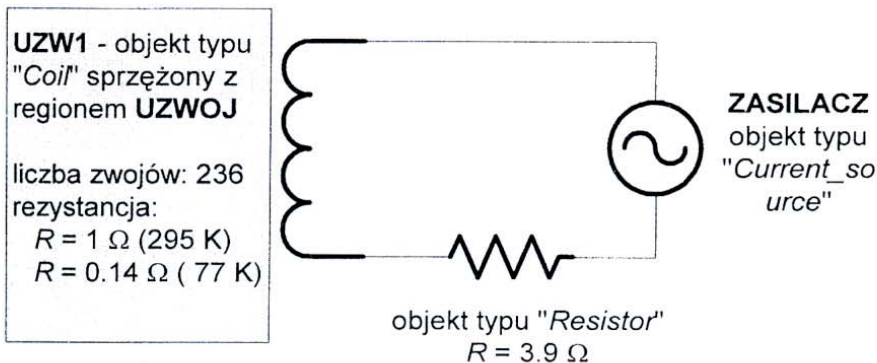
Rys.2. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk statycznych ogranicznika prądu (FCL) [2].

Szczegółowe wyniki badań eksperymentalnych oraz parametry układu pomiarowego zamieszczono w [8]. Ogranicznik badany był w temperaturze pokojowej 295 K oraz w temperaturze ciekłego azotu – 77 K. Wyniki badań eksperymentalnych w temperaturze 295 K wykorzystane zostały do weryfikacji magnetodynamicznego polowo-obwodowego modelu numerycznego ogranicznika.

3. MODEL NUMERYCZNY NADPRZEWODNIKOWEGO OGRANICZNIKA PRĄDU TYPU INDUKCYJNEGO



Rys.3. Geometria i właściwości regionów części polowej modelu numerycznego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego – Flux2D [2].



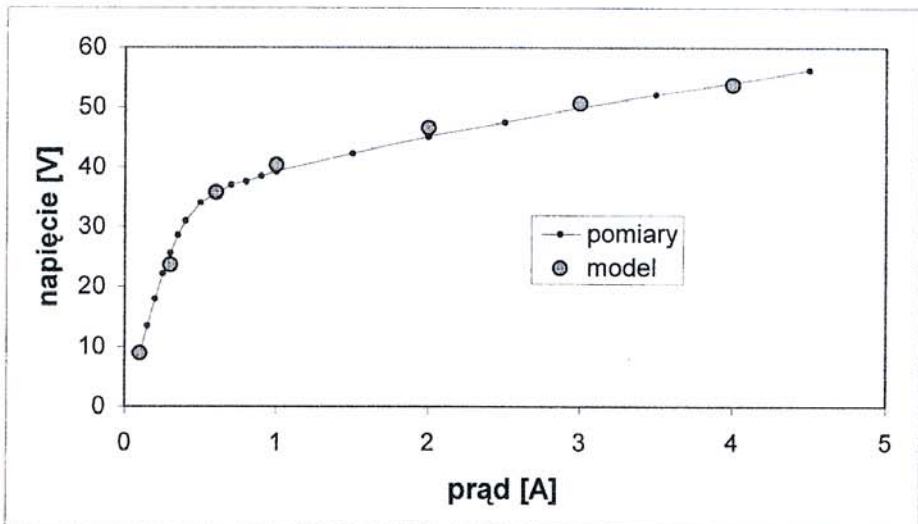
Rys.4. Schemat część obwodowej modelu numerycznego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego – FLUX2D [3].

Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego opracowany został przy wykorzystaniu modułu magnetodynamicznego MD sprzężonego z obwodem zewnętrznym w programie polowym FLUX2D. Geometria układu rzeczywistego z rysunku 1 zastąpiona została uproszczoną geometrią osiowosymetryczną w przestrzeni 2D – rysunek 3. Model obliczeniowy składa się z 6 obszarów i 4 brzegów, na których zdefiniowane są warunki brzegowe:

- CYKLICZNE – brzeg otwarty,
- DIRICHLETA – oś obrotu.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat części obwodowej modelu numerycznego ogranicznika prądu (FLUX2D), który odpowiada funkcjonalnie schematowi z rysunku 2. Przesunięcie fazowe na ograniczniku obliczane jest przez program FLUX2D, więc można było zrezygnować z układu z 3 woltmierzami.

Do weryfikacji geometrii oraz właściwości fizycznych regionów w modelu numerycznym wybrane zostały wyniki pomiarów w temperaturze pokojowej. Na rysunku 5 przedstawione zostały wyniki pomiarów spadku napięcia na ograniczniku w funkcji prądu w temperaturze pokojowej [8] oraz wyniki obliczeń przy wykorzystaniu modelu numerycznego.

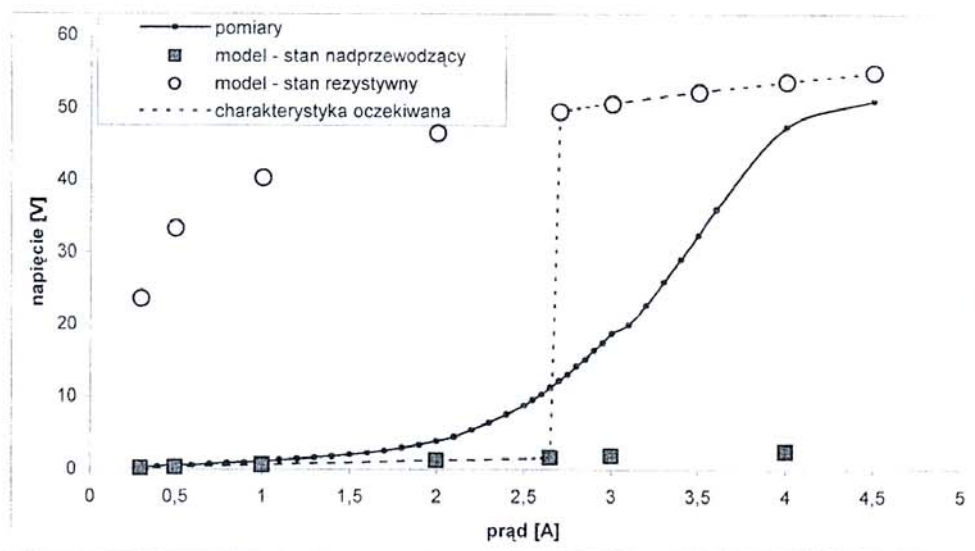


Rys.5. Charakterystyka statyczna nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w temperaturze pokojowej (295 K).

Na rysunku 6 przedstawione zostały wyniki pomiarów spadku napięcia na ograniczniku w funkcji prądu w temperaturze 77 K oraz wyniki obliczeń przy użyciu modelu numerycznego w stanie nadprzewodzącym oraz rezystywnym.

Linia przerywaną zaznaczony został teoretyczny przebieg zmian napięcia na ograniczniku w funkcji prądu przy założeniu, że cylinder nadprzewodnikowy przechodzi skokowo, w całości, ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego.

Rzeczywista charakterystyka napięciowo-prądowa modelu fizycznego ograniczona jest od dołu charakterystyką modelu numerycznego w stanie nadprzewodzącym oraz od góry charakterystyką modelu w stanie rezystywnym (rys.6). Optymalnie działający nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego powinien charakteryzować się możliwie najmniejszym spadkiem napięcia w stanie nadprzewodnikowym oraz możliwie największym spadkiem napięcia w stanie rezystywnym.



Rys.6. Charakterystyka statyczna nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w temperaturze ciekłego azotu (77 K).

Magnetodynamiczny model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego zweryfikowany eksperymentalnie pozwala prowadzić badania zmierzające do określenia wpływu różnych parametrów konstrukcyjnych na charakterystyki napięciowo-prądowe ogranicznika. Model ten jest więc wygodnym narzędziem wspomagającym projektowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądu ograniczającym kosztowne badania eksperymentalne (ostateczna weryfikacja wyników).

W obliczeniach zmierzających do określenia wpływu wybranych parametrów na charakterystyki statyczne nadprzewodnikowego ogranicznika prądu jako parametr umożliwiający porównywanie charakterystyk wybrana została

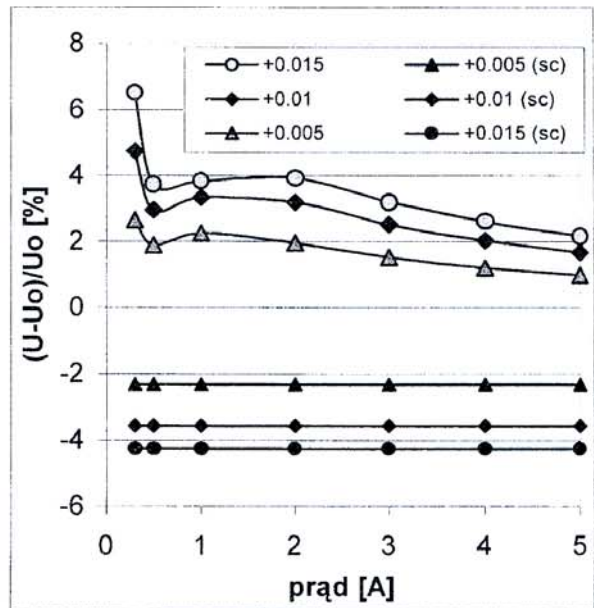
względna procentowa zmiana napięcia w odniesieniu do charakterystyk statycznych modelu numerycznego ogranicznika o geometrii modelu fizycznego:

$$100\% \cdot \frac{U - U_0}{U_0}$$

gdzie: U – spadek napięcia na ograniczniku ze zmienioną geometrią, U_0 – spadek napięcia na ograniczniku o geometrii modelu fizycznego.

Rysunek 7 przedstawia zmiany charakterystyk statycznych ogranicznika w stanie rezystywnym oraz nadprzewodzącym przy zmianie szerokości okna rdzenia magnetycznego. Liczby w legendzie opisujące poszczególne krzywe oznaczają długość (w metrach), o jaką wzrasta szerokość okna.

Zwiększenie szerokości okna o 0,005 m, 0,01 m oraz 0,015 m powoduje zwiększenie napięcia w stanie rezystywnym o od 1% do 6,5% (rys.7) oraz zmniejszenie napięcia w stanie nadprzewodzącym o 2,3...4,2% (rys.7).



Rys.7. Zmiany charakterystyk statycznych nadprzewodnikowego ogranicznika prądu w temperaturze 77 K w stanie rezystywnym oraz nadprzewodzącym (sc) przy zmianie szerokości okna rdzenia magnetycznego.

4. PODSUMOWANIE

Opracowany magnetodynamiczny model numeryczny polowo-obwodowy ogranicznika typu indukcyjnego zweryfikowany został eksperymentalnie pod kątem parametrów konstrukcyjnych oraz magnetycznych. Model numeryczny umożliwia badanie wpływu parametrów konstrukcyjnych, elektromagnetycznych i materiałowych na charakterystyki napięciowo-prądową ogranicznika.

Optymalnie działający nadprzewodnikowy ogranicznik prądu typu indukcyjnego powinien charakteryzować się możliwie najmniejszym spadkiem napięcia w stanie nadprzewodnikowym oraz możliwie największym spadkiem napięcia w stanie rezystywnym.

Zwiększenie szerokości okna rdzenia magnetycznego wpływa korzystnie zarówno na charakterystykę w stanie rezystywnym oraz nadprzewodnikowym powodując zwiększenie napięcia w stanie rezystywnym oraz zmniejszenie napięcia w stanie nadprzewodzącym.

LITERATURA

1. Cave J. R., et al., Testing and modelling of inductive superconducting fault current limiters. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 7: 832-835, 1997.
2. CEDRAT, FLUX2D – CAD Package for electromagnetic and Thermal Analysis using Finite Elements, *User's Guide*,
3. CEDRAT, FLUX2D – CAD Package for electromagnetic and Thermal Analysis using Finite Elements, *Circuit Equations Coupling*,
4. Hassenzahl W.V., Superconductivity, an Enabling Technology for 21st Century Power Systems ?, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 11, 2001, pp. 1447-1453.
5. Ise T., Nguyen H., Kumagai S., Reduction of Inductance and Current Rating of the Coil and Enhancement of Fault Current Limiting Capability of a Rectifier Type Superconducting Fault Current Limiter", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 11, 2001, pp. 1932-1935.
6. Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Wojtasiewicz G., Postępy w zastosowaniach nadprzewodników, *Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej*, nr 37, seria: Konferencje nr 12, Jamrozowa Polana, 2000, str.261-268.
7. Kozak S., Wojtasiewicz G., Wybrane zastosowania nadprzewodnictwa w energetyce, *XXIV-SPETO 2001*, Gliwice - Ustroń 2001, str.131-134.
8. Kozak S., Wojtasiewicz G., Pomiaru charakterystyk statycznych modelu nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego, *III Seminarium „Zastosowania nadprzewodników*, Lublin - Nałęczów 2001, str. 111-120 .
9. Kozak S., Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego, *III Seminarium „Zastosowania nadprzewodników*, Lublin - Nałęczów 2001, str. 121-126.
10. Paul W., Chen M., Lakner M., Rhyner J., Braun D., Lanz W., Fault current limiter based on high temperature superconductors – different concepts, test results, simulations, applications, *Physica C 354* (2001) 27-33.
11. Salasoo L., Boenig H. J., Superconducting Fault Current Limiters, *Webster J.G. (ed.), Wiley Encyclop. of Electr. and Electronics Eng.*, vol. 20, John Wiley & Sons, Inc., New York 1999.

Rękopis dostarczono, dnia 14.02.2002 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Krystyn Pawluk

SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER– MAGNETODYNAMIC CIRCUIT-FEM NUMERICAL MODEL

S.KOZAK

SUMMARY: *The superconducting fault current limiters (SFCL) can be used to limit the short-circuit current level in electrical transmission and distribution networks. These fault current limiters, unlike reactors or high-impedance transformers, will limit fault currents without adding impedance to the circuit during normal operation. In one concept of SFCL – serial resistive limiter, the superconductor is inserted in the circuit directly. During a fault, the fault current pushes the superconductor into a resistive state and resistance, which limits the fault current, appears in the circuit. Another concept – inductive limiter, uses a resistive limiter on a transformer secondary. The impedance of this limiter under standard operation conditions is nearly zero, since the zero impedance of the secondary superconducting winding is reflected to the primary. In the event of a fault, the resistance in the secondary is reflected into the circuit and limits the fault current.*

The paper describes a numerical model of an inductive type superconducting fault current limiter. A physical model of that SFCL was made in the Cryomagnet Laboratory. The voltage-current characteristic of the model measured in room temperature (295 K) was used to verify the numerical model. The numerical model of the inductive SFCL was made using the magnetodynamics (MD) physical domain of the CAD package FLUX2D coupled with circuit equations. The numerical model was used to analyse the influence of selected parameters on SFCL voltage-current characteristics. The paper shows that the changes of the iron core geometry influence those characteristics significantly.



Dr inż. Sławomir Kozak urodził się w 1956 roku. W 1980 roku ukończył studia na Politechnice Lubelskiej uzyskując stopień magistra inżyniera elektryka. Od września 1980 roku zatrudniony jest w Instytucie Elektrotechniki w Pracowni Krio-elektromagnesów Zakładu Badań Podstawowych Elektrotechniki, obecnie na stanowisku adiunkta. W 1990 uzyskał w Instytucie Elektrotechniki stopień doktora, specjalność – Nadprzewodnictwo. Głównym obszarem jego zainteresowań naukowych są stałoprądowe i przemiennoprądowe zastosowania nadprzewodników nisko- i wysokotemperaturowych takie jak: elektromagnesy nadprzewodnikowe, nadprzewodnikowe separatory magnetyczne, nadprzewodnikowe ograniczniki prądu i kriogeniczne przepusty prądowe.

Badania dotyczące elektromagnesów nadprzewodnikowych koncentruje na wytwarzaniu silnych pól magnetycznych, sekcjonowaniu uzwojeń, nawojowych materiałach nadprzewodnikowych ze szczególnym uwzględnieniem taśm Bi2223/Ag i Bi2212/Ag oraz tradycyjnych przewodów nadprzewodnikowych NbTi/Cu i Nb₃Sn/Cu oraz na zagadnieniach chłodzenia techniką w kąpieli i kontaktową z wykorzystaniem kriochłodziarki.

Badania dotyczące nadprzewodnikowych separatorów magnetycznych obejmują optymalizowanie uzwojeń nadprzewodnikowych oraz przestrzeni roboczej separatora pod kątem maksymalnej wydajności i jakości separacji, trajektorie cząstek w przestrzeni roboczej separatora oraz wychwytywanie materiału ferromagnetycznego na ścianie separatora.

Wykorzystanie masywnych nadprzewodników wysokotemperaturowych Bi2223 i Bi2212 w rezystancyjnych i indukcyjnych nadprzewodnikowych ogranicznikach prądu oraz w przepustach prądowych to jego podstawowe obszary zainteresowań związanych z energetyką. Analizuje zagadnienia magnetodynamiczne i cieplne oraz wpływ wewnętrznych parametrów ograniczników na parametry zewnętrznych obwodów zwarciovych (zagadnienia polowo-obwodowe).

Bierze udział w projektowaniu, budowaniu oraz badaniach eksperymentalnych urządzeń nadprzewodnikowych pracujących w temperaturach kriogenicznych (niska temperatura, wysoka próżnia). Zajmuje się tworzeniem modeli matematycznych i numerycznych opisujących zjawiska magnetostatyczne, magnetodynamiczne, elektro-cieplne i hydrodynamiczne występujące w urządzeniach nadprzewodnikowych.

Bierze czynny udział w pracach normalizacyjnych z dziedziny nadprzewodnictwa w Normalizacyjnej Komisji Problemowej nr 290 ds. Technik Specjalnych w Elektryce. Jest członkiem Lubelskiego Towarzystwa Naukowego oraz Polskiego Towarzystwa Zastosowań Elektromagnetyzmu. Autor 35 publikacji w tym 19 samodzielnych.

