

Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego

Streszczenie. Artykuł opisuje propozycję modelu numerycznego sznurkowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciowego typu rezystancyjnego, oraz dwóch bloków obliczeniowych realizujących zadanie modelowania materiału nadprzewodnikowego i procesu wymiany ciepła w ciekłym azocie.

Abstract. The paper describes basics of proposed numerical model of resistive superconducting fault current limiter. It was design in Scilab/Xcos environment, base on author's made calculation blocks. Paper presents simulation results. **(Numerical model of the resistive type superconducting fault current limiter)**

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, nadprzewodnikowe ograniczniki prądu, bifilarne uzwojenie, rezystancyjne NOP
Keywords: numerical modeling, superconducting fault current limiter, bifilar coil, resistive SFCL

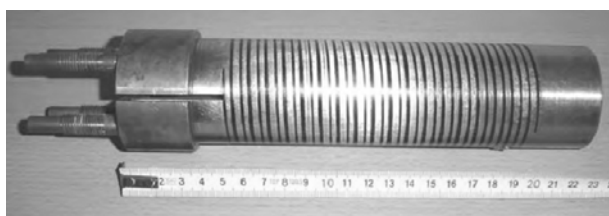
Wstęp

Nadprzewodnikowe ograniczniki prądu zwarciowymi są pewnymi urządzeniami zdolnymi ograniczyć wartość już pierwszego piku prądu awaryjnego (zwarciowego) do poziomu bezpiecznego. Zazwyczaj stosuje się je razem z aparaturą konwencjonalną, jednakże pracującą przy mniejszych wartościach prądu awaryjnego. Istotną cechą dodatkową ograniczników nadprzewodnikowych jest brak konieczności serwisowania urządzenia po zadziałaniu.

Modelowanie numeryczne ograniczników prądu zwarciowego i analiza ich działania w określonych sytuacjach może być pomocna na etapie projektowania urządzenia [1]. W artykule zaprezentowano założenia, sposób budowy i test modelu numerycznego ogranicznika rezystancyjnego zbudowanego w środowisku Scilab/Xcos za pomocą toolbox'a Coselica.

Rezystancyjny Nadprzewodnikowy Ogranicznik Prądu

Jednym z podstawowych i opartych na głównej właściwości materiału nadprzewodnikowego urządzeniem nadprzewodnikowych jest rezystancyjny ogranicznik prądu zwarciowego. Jest to aparat wykorzystujący nieliniową zależność rezystywności nadprzewodnika od wartości natężenia prądu płyną przez ten materiał. Dodatkową istotną cechą konstrukcji ograniczników rezystancyjnych jest ich bezindukcyjność. Przykładem ogranicznika tego typu jest produkt firmy Nexans, jak pokazano na Rys.1, o nazwie kodowej C02-034 opartej na materiale nadprzewodnikowym BSCCO 2212 o wartości prądu krytycznego 125 A i temperaturze krytycznej 90 K. Ogranicznik ten jest wykonany w postaci cewki bifilarnej [4].

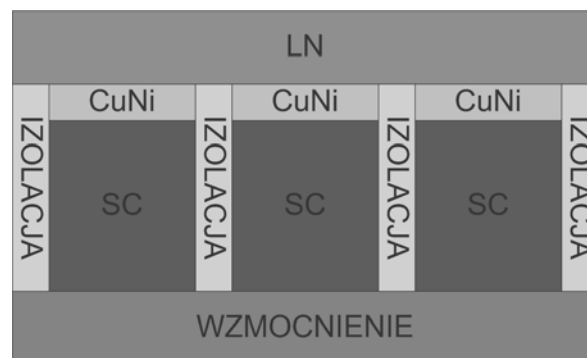


Rys.1. Rezystancyjny nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciowego

Ogranicznik wykonany jest w postaci wydrążonego walca z nadprzewodnika B 2212, który wlutowywany jest w cylinder z miedzioniklu. Następnie do wnętrza wkleja się wzmocnienie z tworzywa sztucznego. W celu osiągnięcia budowy bifilarnej nacina się odpowiednio wytworzony

cylinder, a przerwy między zwojowe wypełnia się materiałem izolacyjnym, jak pokazano na Rys.2.

Budując model numeryczny materiału nadprzewodnikowego należy uwzględnić jego nieliniową charakterystykę która jest funkcją trzech parametrów: temperatury, gęstości prądu oraz natężenia zewnętrznego pola magnetycznego, opisanymi wartościami krytycznymi. W przypadku konstrukcji bezindukcyjnych wpływ pola magnetycznego można pominąć. Opis matematyczny sprowadza się więc do zaproponowania równań dwóch zmiennych, prądu i temperatury.



Rys. 2. Fragment przekroju ogranicznika bifilarnego.

Zaproponowany model numeryczny ogranicznika zbudowano z wykorzystanie zależności wiążących rezystancję nadprzewodnika z wartościami chwilowymi prądu i temperatury i ich parametrami krytycznymi (1)(2),

$$(1) \quad R = R_r + \frac{R_n}{e^{I_c - |i_N|} + 1}$$

$$(2) \quad I_c = I_{c0} \frac{T_c - T}{T_c - T_0}$$

gdzie: R_r – resztkowa wartość rezystancji nadprzewodnika w stanie nadprzewodzącym, R_n – rezystancja w stanie rezystywnym, I_c – krytyczna wartość prądu w danej temperaturze, I_{c0} – krytyczna wartość prądu w temperaturze T_0 , T_c – temperatura krytyczna.

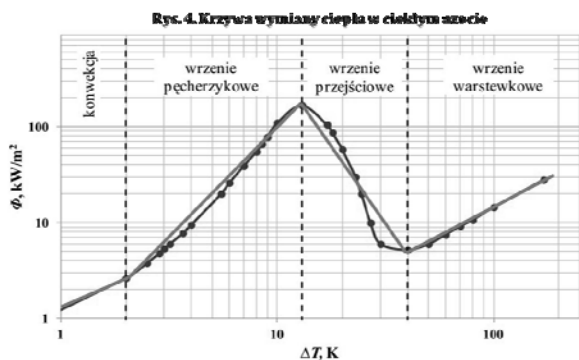
Z wykorzystanie powyższych równania w toolbox'ie Coselica wspierającym środowisko obliczeniowe Scilab/Xcos zbudowany został blok obliczeniowy odpowiedzialny za symulowanie działania elementu

wykonanego z nadprzewodnika. Blok ten nie tylko modeluje nieliniową wartość rezystancji obiektu, ale także jego temperaturę.

Model numeryczny wymiany ciepła na granicy ciało stałe ciekły azot

Ważnym zagadnieniem przy konstruowaniu modeli numerycznych urządzeń nadprzewodnikowych jest właściwe zamodelowanie procesu chłodzenia ciekłym azotem. Analiza tego zjawiska została opisana w szeregu publikacji, a sam proces opisany krzywą nieliniową będącą funkcją gradientu temperatury [2][3], jak pokazano na Rys.3.

Przedstawiona charakterystyka ma charakter pomiarowy, w efekcie zaimplementowanie jest do modelu numerycznego możliwe jest na dwa sposoby: aproksymację lub digitalizację danych pomiarowych.



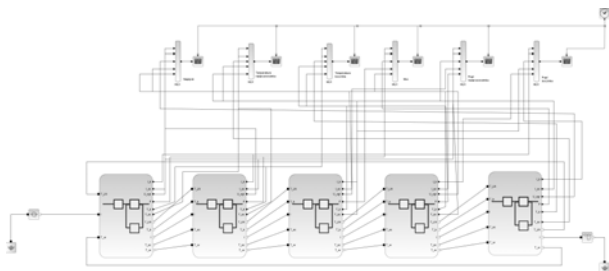
Rys. 3. Krzywa wymiany ciepła w ciekłym azocie

W przypadku konstruowanego modelu wykorzystano pierwsze podejście i przeprowadzono aproksymację liniową z podziałem na cztery zakresy pracy, jak pokazano na Rys.3. Za pomocą zapisanych równań aproksymacyjnych zbudowano blok symulujący wymianę ciepła pomiędzy metalem a ciekłym azotem.

Model numeryczny ogranicznika rezystancyjnego

Środowisko obliczeniowe Scilab jest bardzo dobrym narzędziem matematycznym, które w uzupełnieniu od modułu Xcos i toolbox Coselica umożliwia budowanie złożonych modeli numerycznych. Jest to program darmowy rozprowadzany na zasadach open-source. Dzięki temu możliwa jest ingerencja w kod źródłowy o dodawanie własnych elementów do tego środowiska obliczeniowego.

Za pomocą opracowanych bloków elementu nadprzewodzącego i modelu wymiany ciepła w ciekłym azocie zbudowano model numeryczny ogranicznika nadprzewodnikowego typu rezystancyjnego opartego na uzwojeniu bifilarnym, jak pokazano na Rys.4.



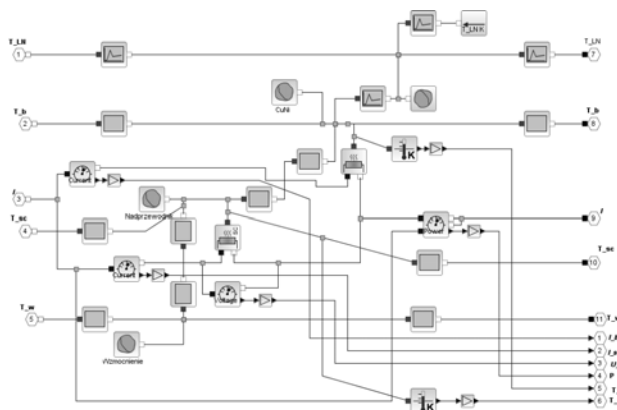
Rys. 4. Model numeryczny nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego – bifilarny

Konstruując model przyjęto szereg założeń upraszczających:

- Wpływ pola magnetycznego jest pomijany
- Wzmocnienie i izolacja wykonane z tworzywa sztucznego stanowią doskonałą izolację cieplną
- Uzwojenie cewki bifilarnej dla potrzeb modelu podzielono na 5 części
- Każdy z członów modelu ogranicznika zgrupowano w tzw. SuperBlock. Wykorzystano sondy pomiarowe do analizy przebiegów temperatury, mocy, prądu i napięcia w poszczególnych sygnetach modelu.

Zaproponowany model jest modelem sprzężonym prądowo-cieplnym. Każdy z członów, jak pokazano na Rys.5, analizuje przepływ prąd i temperatury pomiędzy poszczególnymi elementami.

Na podstawie zapisanej sieci połączeń pomiędzy blokami obliczeniowymi Xcos buduje model matematyczny, układ równań nieliniowych, gdzie zmiennymi są prądy i strumienie ciepła, a następnie rozwiązuje go.



Rys. 5. Model numeryczny pojedynczego członu ogranicznika

Wyniki symulacji

Dla analizowanego przypadku ustawiono parametry elementów modelu zgodnie z danymi zestawionymi w tabeli 1.

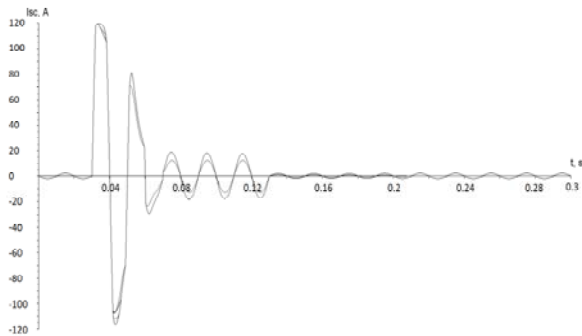
Tabela 1. Parametry modelu

Napięcie zasilania	1 kV
Prąd krytyczny ($T_0=77\text{ K}$)	125 A
Temperatura krytyczna	90 K
Pole przekroju nadprzewodnika	$7,5\text{ mm}^2$
Pole przekroju miedzioniklu	$1,25\text{ mm}^2$
Długość uzwojenia	5,4 m
Rezystywność szcztkowa	$2 \cdot 10^{-12}\ \Omega\text{m}$
Rezystywność nadprzewodnika w stanie normalnym	$10\text{-}4\ \Omega\text{m}$
Rezystywność miedzioniklu	$45,6 \cdot 10^{-8}\ \Omega\text{m}$
Przewodność cieplna nadprzewodnika	$4,7\text{ W}/(\text{mK})$
Ciepło właściwe nadprzewodnika	$4,15 \cdot 10^6\text{ J}/(\text{m}^3\text{K})$
Przewodność cieplna miedzioniklu	$18\text{ W}/(\text{mK})$
Ciepło właściwe miedzioniklu	$10,26 \cdot 10^4\text{ J}/(\text{m}^3\text{K})$
Szerokość zwoju cewki	2,5 mm

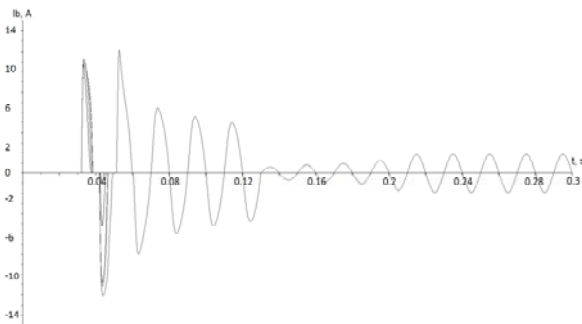
Wyniki symulacji w postaci przebiegów czasowych zestawiono poniżej na Rys. 6-9.

Zauważyć można selektywne przechodzenie poszczególnych segmentów ze stanu nadprzewodnictwa, począwszy od wewnętrznego członu. Człon ten jako pierwszy traci właściwość nadprzewodzenia na skutek wzrostu temperatury. Jego rezystancja gwałtownie rośnie. W efekcie powoduje on że wartość prądu maleje, a temperatura pozostałych członów stabilizuje się.

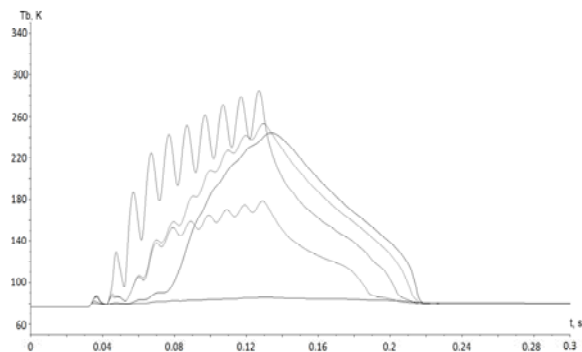
Efekt ten potwierdzany jest przez eksperymenty pomiarowe podczas których dochodzi do punktowych uszkodzeń ogranicznika rezystancyjnego na skutek gwałtownego, dużego wzrostu temperatury.



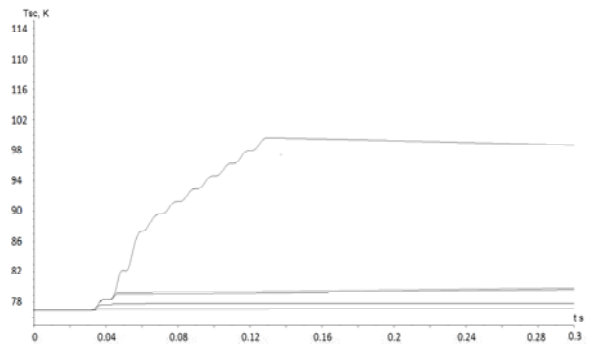
Rys. 6. Przebiegi prądów płynących przez elementy nadprzewodzące



Rys. 7. Przebiegi prądów płynących przez miedzioniklowe boczniki



Rys. 8. Przebiegi zmian temperatury nadprzewodnika w poszczególnych segmentach



Rys. 9. Przebiegi zmian temperatury miedzioniku w poszczególnych segmentach

Wnioski

Opracowany model numeryczny dobrze oddaje specyfikę zachowania ogranicznika bifilarnego przy ograniczaniu prądu zwarciovego. Przebiegi symulacyjne znajdują potwierdzenie w wynikach eksperymentów pomiarowych, zakończonych punktowym uszkodzeniem uzwojenia ogranicznika. Zbudowanie modelu zapewniającego większą dyskretyzację uzwojenia ogranicznika okazało się niemożliwe ze względu na ograniczenia wynikające z wydajności systemu komputerowego oraz samych ograniczeń środowiska obliczeniowego. Przekroczenie w projektowanym modelu pewnej liczby bloków obliczeniowych powoduje zawieszenie programu obliczeniowego w chwili próby zapisania modelu lub uruchomienia symulacji.

Autorzy: dr inż. Michał Łanczont, Politechnika Lubelska, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: m.lanczont@pollub.pl

LITERATURA

- [1] Łanczont M., Rezystancyjny nadprzewodnikowy ogranicznik prądu – analiza numeryczna w środowisku SciLab, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89 Nr 2b/2013, s.315-318
- [2] D. Czerwiński: Modelling the critical parameters of high temperature superconductor devices in transient states, *Politechnika Lubelska*, 2013
- [3] Jaroszyński L., D. Czerwiński: Modelowanie numeryczne elementów nadprzewodnikowych, *VIII Seminarium Zastosowania Nadprzewodników*, p. 112-121, Naęczów 2007
- [4] Kozak S., Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak J., Wojtasiewicz G., Experimental and numerical analysis of energy losses in resistive SFCL, *IEEE Transaction on* (vol. 15), p. 2098-2101, 2005