

Zasada działania trójuzwojeniowego bezrdzeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego

Streszczenie. W artykule przedstawiono zasadę działania indukcyjnego trójuzwojeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu. Ogranicznik trójuzwojeniowy jest konstrukcją bezrdzeniową, składającą się z dwóch uzwojeń nadprzewodnikowych i jednego konwencjonalnego uzwojenia miedzianego. Wszystkie trzy uzwojenia ogranicznika są magnetycznie sprzężone ze sobą. W artykule przedstawiono również model fizyczny ogranicznika trójuzwojeniowego na napięcie znamionowe 15 kV oraz wyniki przeprowadzonego testu zwarciovego.

Abstract. The article presents the principle of operation of an inductive three-winding superconductor current limiter. The three-winding limiter is a coreless construction, consisting of two superconducting windings and one conventional copper winding. All three limiter windings are magnetically coupled. The article also presents the physical model of a three-winding limiter for a rated voltage of 15 kV and the results of a short-circuit test. (The principle of operation of a three-windings superconducting fault current limiter).

Słowa kluczowe: ogranicznik prądu zwarciovego, nadprzewodnik, nadprzewodnictwo, taśma nadprzewodnikowa.

Keywords: fault current limiter, superconductor, superconductivity, superconducting tape.

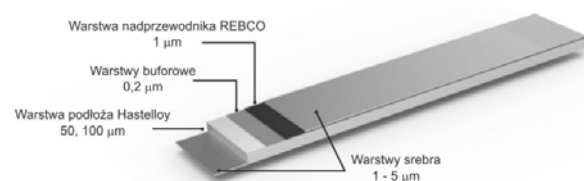
Wstęp

Idealny ogranicznik prądu zwarciovego powinien charakteryzować się zerową impedancją przy przepływie prądu znamionowego i możliwie dużą impedancją po wystąpieniu zwarcia w zabezpieczanym obwodzie. Wymagania te spełnia nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego, w którym wykorzystuje się niemal natychmiastowe przejście materiału nadprzewodnikowego ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystancyjnego po przekroczeniu prądu krytycznego I_c . Wieloletnie badania prowadzone w Instytucie Elektrotechniki i Politechnice Lubelskiej doprowadziły do opracowania trójuzwojeniowego indukcyjnego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu, który skutecznie ogranicza prąd zwarciovą bez stosowania rdzenia magnetycznego [1] - [7]. Badania nad podobnymi rozwiązaniami nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego są obecnie prowadzone również w Niemczech [8-9]. Opracowany w Polsce nadprzewodnikowy trójuzwojeniowy indukcyjny ogranicznik prądu to konstrukcja składająca się z dwóch uzwojeń nadprzewodnikowych i jednego uzwojenia miedzianego, które są sprzężone ze sobą magnetycznie. Podczas normalnej pracy wszystkie uzwojenia ogranicznika wymagają chłodzenia w ciekłym azocie do temperatury 77,4 K. Do wykonania uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika zostały zastosowane wysokotemperaturowe taśmy nadprzewodnikowe drugiej generacji (taśmy HTS 2G).

Taśma nadprzewodnikowa drugiej generacji

Taśmy HTS 2G mają budowę cienkowarstwową. Taśmy składają się z kilku naniesionych warstw na warstwę podłoża Hastelloy, z których najważniejsze to warstwa nadprzewodnika REBCO i warstwa stabilizatora wykonana najczęściej ze srebra – rysunek 1. W zależności od zastosowania taśmy HTS 2G mogą być dodatkowo pokrywane miedzią, stalą nierdzewną lub mosiądzem. Do wykonania uzwojeń ogranicznika przedstawionego w dalszej części artykułu użyto taśm nadprzewodnikowych typu SF produkowanych przez SuperPower. Taśmy te są specjalnie zaprojektowane do pracy w urządzeniach przemiennoprądowych. Taśmy te mają warstwę podłoża wykonaną z niemagnetycznego materiału o dużej rezystywności, dzięki czemu charakteryzują się małymi stratami przy przepływie przemiennego prądu roboczego. Do produkcji taśm HTS 2G firma SuperPower stosuje podłoża ze stopu Hastelloy o grubościach 30 μm , 50 μm i

100 μm . Od grubości zastosowanego podłoża zależy wytrzymałość taśmy nadprzewodnikowej i jej pojemność cieplna. Podczas przepływu prądu zwarciovego przez ogranicznik taśma nadprzewodnikowa przechodzi ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego. Podczas zwarcia przepływ prądu zwarciovego powoduje bardzo szybkie nagrzewanie taśmy nadprzewodnikowej i wzrost jej rezystancji. Taśma nadprzewodnikowa w ciągu kilkadziesiątu milisekund od chwili wystąpienia zwarcia nagrzewa się od temperatury 77,4 K do 300 K. Taśmy nadprzewodnikowe o grubszym podłożu, a co za tym idzie większej pojemności cieplnej, umożliwiają budowę nadprzewodnikowych ograniczników prądu o dłuższym czasie ograniczania prądu. Warstwa nadprzewodnika REBCO (ang. Rare-earth barium copper oxide) ma najczęściej grubość 1 μm . Grubość warstwy srebra, od której w głównej mierze zależy rezystancja taśmy w stanie rezystywnym, może być zamówiona w dość szerokim zakresie od 1 μm do 5 μm . Do wykonania ograniczników opisanych w dalszej części artykułu użyto taśmy SF12050 ze standardową grubością warstwy srebra 2 μm . Podstawowe parametry taśmy SF12050 zamieszczono w tabeli 1.



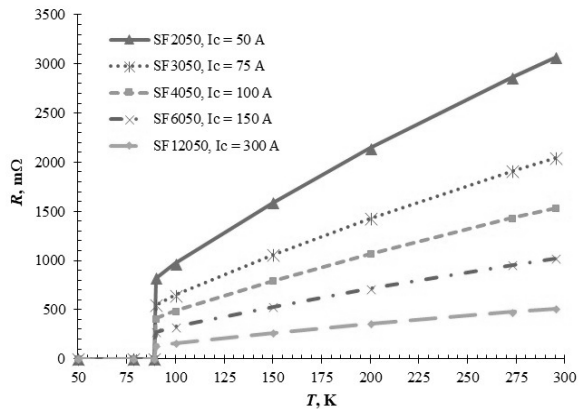
Rys.1. Struktura wewnętrzna taśmy nadprzewodnikowej typu SF produkowanej przez firmę SuperPower (A Furukawa Company)

Tabela 1. Parametry taśmy nadprzewodnikowej SF12050

Parametr	Wartość
Minimalny prąd krytyczny I_c	300 A
Szerokość taśmy	12 mm
Całkowita grubość taśmy	0,055 mm
Grubość warstwy srebra	2 μm
Grubość warstwy stabilizatora	50 μm
Minimalna średnica gięcia	11 mm

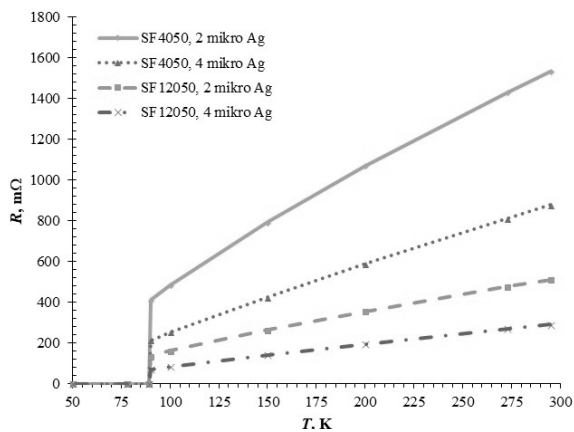
Taśmy typu SF z podłożem o grubości 50 μm produkowane są w pięciu szerokościach: 2 mm (taśma SF2050), 3 mm (taśma SF3050), 4 mm (taśma SF4050), 6 mm (taśma SF6050) oraz 12 mm (taśma SF12050). Wraz ze wzrostem

szerokości taśmy nadprzewodnikowej rośnie wartość prądu krytycznego I_c , maleje natomiast wartość rezystancji taśmy w stanie rezystywnym (rys. 2). Wzrost wartości rezystancji taśmy nadprzewodnikowej wraz ze wzrostem temperatury jest w głównej mierze wynikiem wzrostu rezystywności srebra wraz ze wzrostem temperatury, ponieważ rezystywność podłoża Hastelloy zmienia się w niewielkim zakresie.



Rys.2. Rezystancja taśm SF firmy SuperPower o długości 1 metra w funkcji temperatury (grubość warstwy srebra - 2 μ m)

Największy wpływ na rezystancję taśmy ma grubość warstwy srebra. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie zmian rezystancji taśmy nadprzewodnikowej w funkcji temperatury dla różnych grubości warstwy srebra dla dwóch różnych szerokości taśmy nadprzewodnikowej 4 mm (SF4050) i 12 mm (SF12050). Dwukrotny wzrost grubości warstwy srebra z 2 μ m do 4 μ m powoduje niemal dwukrotnie mniejszą wartość rezystancji taśmy nadprzewodnikowej w tej samej temperaturze.

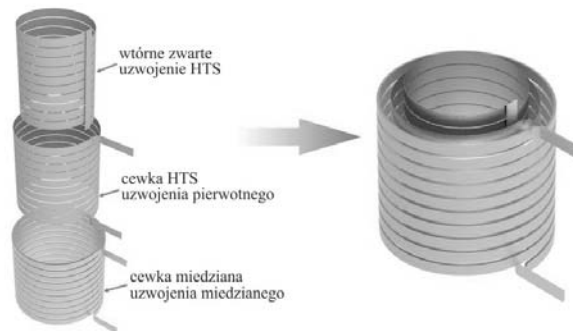


Rys.3. Rezystancja taśm SF4050 i SF12050 firmy SuperPower w funkcji temperatury dla dwóch różnych grubości warstwy srebra 2 μ m i 4 μ m

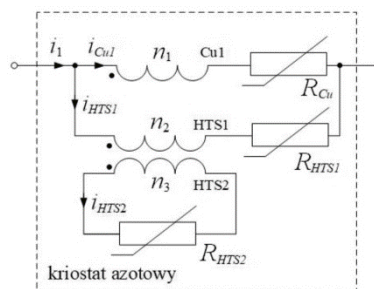
Zasada działania trójuzwojeniowego bezrdzeniowego ogranicznika prądu zwarciovego

Trójuzwojeniowy ogranicznik prądu zwarciovego składa się z cewek nadprzewodnikowych (pierwotnej i wtórnej) oraz jednej pierwotnej cewki miedzianej. Uzwojenia ogranicznika są umieszczone koncentrycznie – rysunek 4. Na rysunku 5 przedstawiono schemat zastępczy trójuzwojeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego. Ogranicznik tego typu jest szeregowo włączany w obwód chroniony. Zasadę działania trójuzwojeniowego bezrdzeniowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego pokazano na rysunku 6 i 7. Na

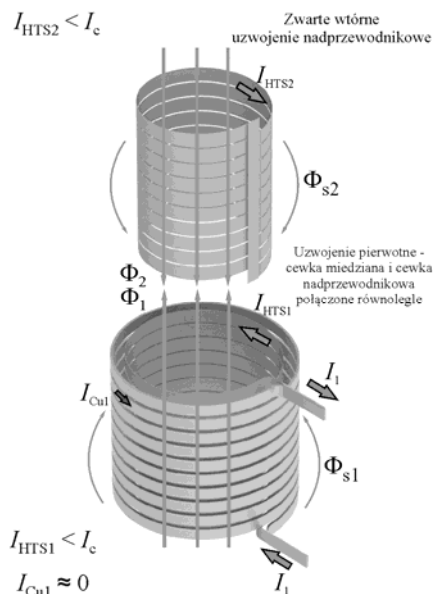
rysunkach 6 i 7 wtórne uzwojenie nadprzewodzące jest wysunięte w górę, w celu zwiększenia czytelności.



Rys.4. Budowa trójuzwojeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego



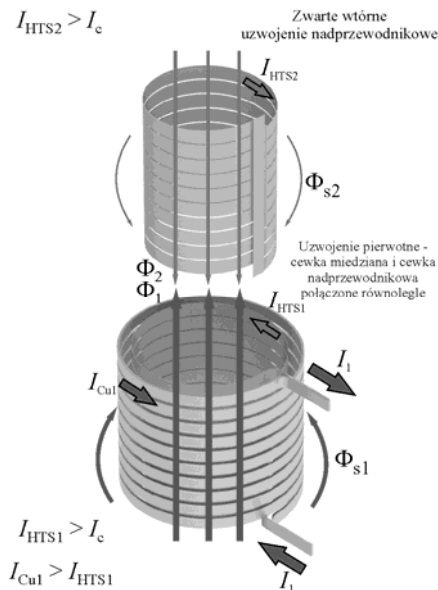
Rys. 5. Schemat zastępczy trójuzwojeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego



Rys.6. Zasada działania trójuzwojeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego w stanie wyczekiwania ogranicznika

Po schłodzeniu ogranicznika do temperatury pracy 77,4 K w kąpeli ciekłego azotu oba uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika znajdują się w stanie nadprzewodzącym, a ogranicznik w stanie wyczekiwania (rys.6). Rozpływ prądu znamionowego I_1 pomiędzy cewkami uzwojenia pierwotnego ogranicznika zależy od impedancji cewek i stopnia sprzężenia magnetycznego cewek uzwojenia pierwotnego ze zwartym nadprzewodzącym uzwojeniem wtórnym ogranicznika.

Jeżeli cewka nadprzewodząca ma indukcyjność o zbliżonej wartości do indukcyjności cewki miedzianej uzwojenia pierwotnego, prąd znamionowy przepływa przez cewkę nadprzewodzącą o zerowej rezystancji ($I_1 \approx I_{HTS1}$), a tylko niewielki prąd I_{Cu1} płynie przez cewkę miedzianą uzwojenia pierwotnego. Zmienny w czasie strumień magnetyczny wytwarzany przez uzwojenie pierwotne ogranicznika indukuje prąd I_{HTS2} we wtórnym zwartym uzwojeniu nadprzewodzącym, który wytwarza strumień magnetyczny przeciwny do strumienia magnetycznego uzwojenia pierwotnego, całkowicie go znosząc, co przejawia się niską impedancją całego układu. Napięcie na ograniczniku w stanie oczekiwania jest wynikiem spadku napięcia na rezystancji uzwojenia pierwotnego oraz spadku napięcia na reaktancji rozpraszania.



Rys.7. Zasada działania trójuzwojeniowego nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu indukcyjnego w stanie ograniczania prądu zwarciovego

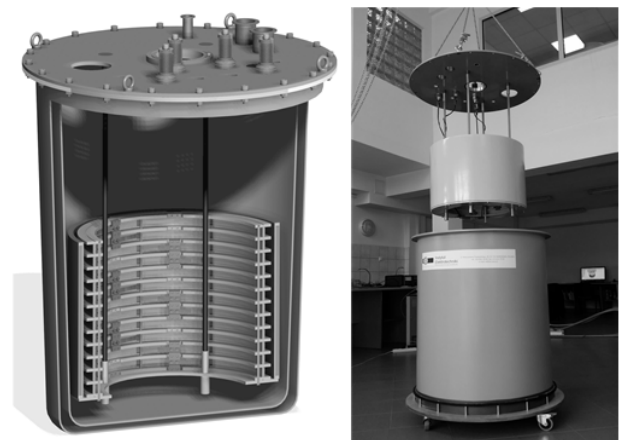
Po wystąpieniu zwarcia w obwodzie chronionym ogranicznik przechodzi do stanu ograniczania prądu – rysunek 7. Prądy w uzwojeniu pierwotnym I_{HTS1} i wtórnym nadprzewodnikowym I_{HTS2} gwałtownie rosną. Po przekroczeniu wartości krytycznej I_c we wtórnym uzwojeniu nadprzewodnikowym, gwałtownie rośnie jego rezystancja, a jego przepływ maleje. Wzrost rezystancji cewki nadprzewodzącej uzwojenia pierwotnego powoduje zmianę przepływu prądu, zmuszając prąd zwarciový I_1 do przepływu przez cewkę miedzianą uzwojenia pierwotnego ogranicznika. Strumień magnetyczny indukowany przez uzwojenie pierwotne nie jest już kompensowany przez przeciwnie skierowany strumień uzwojenia wtórnego i ogranicznik dla obwodu chronionego zachowuje się jak dławik. W ograniczniku trójuzwojeniowym prąd zwarciový jest ograniczany przede wszystkim przez indukcyjność cewki miedzianej.

W stanie oczekiwania uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika muszą mieć temperaturę roboczą niższą od temperatury krytycznej T_c , dlatego muszą być chłodzone przy użyciu ciekłego azotu. W ograniczniku trójuzwojeniowym pierwotne uzwojenie miedziane jest również chłodzone w kriostacie azotowym. Chłodzenie pierwotnego uzwojenia miedzianego w kąpeli z ciekłym azotem umożliwia znaczne zmniejszenie przekroju miedzianego przewodnika przy zachowaniu tego samego prądu znamionowego, a także zapewnia lepsze sprzężenie magnetyczne pomiędzy uzwojeniem pierwotnym i wtórnym

ogranicznika. Taka konstrukcja ogranicznika indukcyjnego pozwala na znaczne zmniejszenie masy i rozmiaru uzwojenia miedzianego, ponieważ rezystywność miedzi jest około 7,6 razy niższa przy 77,4 K w porównaniu do rezystywności w temperaturze pokojowej. Ponieważ uzwojenie pierwotne ogranicznika składa się z dwóch cewek nadprzewodzącej i miedzianej połączonych równoległe, chroniony obwód pozostaje zamknięty w przypadku ewentualnego uszkodzenia cewki nadprzewodzącej.

Trójuzwojeniowy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu o parametrach znamionowych 15 kV / 140 A

Praktyczną realizację trójuzwojeniowego ogranicznika prądu o parametrach znamionowych 15 kV / 140 A przedstawiono na rysunku 8. Główne parametry ogranicznika prądu zamieszczono w tabeli 3. Ogranicznik prądu zwarciovego składa się z trzech uzwojeń sprzężonych magnetycznie i chłodzonych w kąpeli ciekłego azotu.



Rys.8. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego typu indukcyjnego o parametrach znamionowych 6,9 kV / 600 A

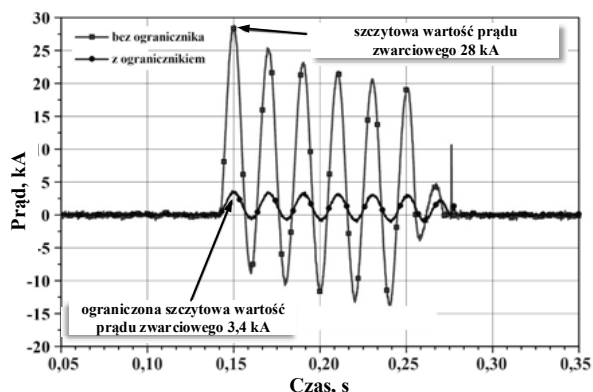
Tabela 3. Parametry ogranicznika o parametrach znamionowych 15 kV / 140 A

Parametr		Wartość
Napięcie znamionowe	U_n	15 kV
Prąd znamionowy	I_n	140 A
Spodziewany prąd zwarciový	i_{peak}	40 kA
Ograniczony prąd zwarciový	i_p	< 5 kA
Czas zwarcia	t	160 ms
Temperatura pracy	T	77,4 K

Uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika zostały podzielone na dwaście cewek typu krążkowego. Karkasy uzwojeń oraz kriostat azotowy zostały wykonane z kompozytu epoksydowo-szklanego. Oba uzwojenia nadprzewodnikowe zostały nawinięte na jednym karkasie. Długość taśmy nadprzewodnikowej drugiej generacji SF12050 przypadająca na jedną cewkę wynosiła 19 metrów, co odpowiada napięciu 1 kV przypadającego na jeden moduł. Cewki pierwotnego uzwojenia HTS były połączone ze sobą szeregowo. Cewki nadprzewodnikowego uzwojenia wtórnego były połączone ze sobą po dwie sztuki, zaprojektowano w ten sposób sześć zwartych uzwojeń wtórnych HTS izolowanych od siebie. Cewki uzwojenia wtórnego HTS były sprzężone magnetycznie z pierwotnym uzwojeniem HTS i pierwotnym uzwojeniem miedzianym. W uzwojeniach nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zastosowano taśmę ReBCO o szerokości 12 mm firmy SuperPower z warstwą srebra o grubości 2 μm . Długość taśmy jest

określana przez temperaturę taśmy HTS w chwili wyłączenia zwarcia oraz przez dopuszczalną wartość napięcia na ograniczniku podczas ograniczania prądu zwarciego. Zakładając maksymalną temperaturę taśmy nadprzewodnikowej 200 K po 160 ms trwania zwarcia dobrano długość taśmy nadprzewodnikowej, która wynosiła 229 m dla pierwotnego i 229 m dla wtórnego uzwojenia nadprzewodnikowego. Miedziane i nadprzewodnikowe uzwojenia pierwotne są połączone równolegle do siebie. Taśma nadprzewodnikowa została zaizolowana folią kaptonową o grubości 0,05 mm z klejem silikonowym. Szczegóły konstrukcji ogranicznika można znaleźć w [6], [7]. Wszystkie uzwojenia, w tym pierwotne miedziane, są chłodzone ciekłym azotem, co pozwoliło na zredukowanie masy urządzenia. Karkasy uzwojeń i kriostrat azotowy wykonano z kompozytu epoksydowo-szklanego. Pierwotne uzwojenie miedziane połączone równolegle z pierwotnym uzwojeniem nadprzewodnikowym ma 185 izolowanych zwojów. Uzwojenie miedziane nawinięte jest śrubowo, bezpośrednio na karkasie z kompozytu epoksydowo-szklanego typu E, miedzianym izolowanym drutem nawojowym o wymiarach poprzecznych 1,8 mm x 7,5 mm. Ze względu na występowanie dużych sił elektrodynamicznych występujących w uzwojeniu podczas przepływu prądu zwarciego, uzwojenie miedziane ogranicznika zostało dodatkowo po nawinięciu wzmocnione matami z włókna szklanego oraz zaimpregnowane żywicą epoksydową. Zapobiega to przemieszczaniu się zwojów podczas przepływu prądu zwarciego.

Testy zwarcie ogranicznika przeprowadzono w Laboratorium Badawczym Aparatury Rozdzielczej Instytutu Elektrotechniki. Ogranicznik został schłodzony do 77,4 K w kriostacie z ciekłym azotem. Przeprowadzone pomiary eksperymentalne składały się z cyklu trzech prób zwarcieowych. Do pierwszego schłodzenia ogranicznika zużyto około 400 litrów ciekłego azotu. Zarejestrowane przebiegi prądów zwarcieowych w układzie bez ogranicznika i z zastosowanym ogranicznikiem pokazano na rysunku 9. Szczytowa wartość prądu zwarciego została ograniczona z 28 kA do 3,4 kA. Podczas zwarcia wartość skuteczna napięcia na ograniczniku wynosiła 4,24 kV. Analizując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że ośmiokrotne ograniczenie szczytowej wartości prądu zwarciego w czasie krótszym niż 5 milisekund pozwala na skuteczne zabezpieczenie urządzeń sieciowych przed dynamicznymi skutkami przepływu prądu zwarciego.



Rys.9. Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciego typu indukcyjnego o parametrach znamionowych 6,9 kV / 600 A

Podsumowanie

W artykule przedstawiono zasadę działania nadprzewodnikowego trójuzwojeniowego indukcyjnego ogranicznika prądu zwarciego. Zastosowane w tej

konstrukcji miedzianego uzwojenia pierwotnego połączonego równolegle z pierwotnym uzwojeniem nadprzewodnikowym pozwala zmniejszyć moc wydzielaną w uzwojeniach nadprzewodnikowych podczas przepływu prądu zwarciego, jak również zabezpiecza obwód zwarcieowy przed otwarciem w przypadku uszkodzenia taśmy HTS 2G uzwojenia nadprzewodnikowego. Ogranicznik ma małą masę dzięki zastosowaniu konstrukcji bezrzedzeniowej i kriogenicznego chłodzenia uzwojenia miedzianego. Ze względu na wzrost temperatury uzwojeń nadprzewodnikowych ogranicznika w bardzo krótkim czasie podczas przepływu prądu zwarciego, zwarcie powinno być wyłączone przez konwencjonalny wyłącznik zwarcieowy przed osiągnięciem maksymalnej dopuszczalnej temperatury przez uzwojenia nadprzewodnikowe ogranicznika. Wyłącznik może być jednak dobrany na znacznie mniejszy prąd znamionowy wyłączalny. Przeprowadzone testy zwarcieowe potwierdziły skuteczność działania ogranicznika trójuzwojeniowego.

Autorzy: dr hab. inż. Michał Majka, Politechnika Lubelska, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: m.majka@pollub.pl; dr hab. inż. Janusz Kozak, Instytut Elektrotechniki, Zakład Wielkich Mocy, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: j.kozak@iel.waw.pl.

LITERATURA

- [1] Majka M., Kozak J., Kozak S., HTS tapes selection for superconducting current limiters, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, issue: 4, (2017), article number: 5601405, DOI: 10.1109/TASC.2017.2669191.
- [2] Wojtasiewicz G., Janowski T., Kozak S., Kozak J., Majka M., Kondratowicz-Kucewicz B., Experimental investigation of a model of a transformer-type superconducting fault current limiter with a superconducting coil made of a 2G HTS tape, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 24, issue: 3, (2014), article number: 5601005, DOI: 10.1109/TASC.2013.2295117.
- [3] Majka M., Kozak S., The application of the first and second generation superconducting wires for superconducting fault current limiter construction, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 85, issue: 5, 2009, pp. 183-185, 2009.
- [4] Kozak J., Majka M., Kozak S., Janowski T., Design and tests of coreless inductive superconducting fault current limiter, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 22, issue: 3, (2012), article number: 5601804, DOI: 10.1109/TASC.2011.2178977.
- [5] Janowski T., Wojtasiewicz G., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Kozak J., Majka M., Superconducting winding for inductive type SFCL made of HTS tape with increased resistivity, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 19, issue: 3, (2009), pp. 1884 – 1887, DOI: 10.1109/TASC.2009.2018068.
- [6] Kozak J., Majka M., Kozak S., Experimental results of a 15 kV, 140 A Superconducting fault current limiter, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 27, issue: 4, (2017), article number: 5600504, DOI: 10.1109/TASC.2017.2651120.
- [7] Majka M., Kozak J., Kozak S., Wojtasiewicz G., Janowski T., Design and numerical analysis of the 15 kV class coreless inductive type SFCL, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 25, issue: 3, (2015), article number: 5601005, DOI: 10.1109/TASC.2014.2375344.
- [8] Schacherer C., Bauer A., Elschner S., Goldacker W., Kraemer H.P., Kudymow A., Naeckel O., Strauss S., Zermeno V.M.R. SmartCoil-Concept of a Full-Scale Demonstrator of a Shielded Core Type Superconducting Fault Current Limiter, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 27, issue: 4, (2017), article number: 5600306, DOI: 10.1109/TASC.2016.2642139.
- [9] Kudymow A., Bauer A., Elschner S., Goldacker W., Kraemer H.P., Noe M., Strauss S., Schacherer C., Smartcoil-design, assembly and test of a 10 MVA superconducting air coil fault current limiter, *Superconductor Science & Technology*, vol. 32, issue: 6, (2019), article number: 065022, DOI: 10.1088/1361-6668/ab099a.