

doi:10.15199/48.2023.07.27

Wpływ masy płytek miedzianych na parametry nadprzewodnikowego ogranicznika udaru prądowego

Streszczenie. Omówione zostało przejście od nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego (SFCL) do nadprzewodnikowego ogranicznika udaru prądowego (SSCL). W oparciu o nową koncepcję przeanalizowana została zmiana konstrukcji istniejącego średnionapięciowego ogranicznika nadprzewodnikowego. Jest to zmiana masy miedzi, możliwa do prostego wykonania w istniejącym ograniczniku. Część nadprzewodząca w ograniczniku nie jest zmieniana. Poprzednio zaprojektowana i wykonana masa miedzi dostosowana została do ogranicznika SFCL.

Abstract. The transition from superconducting fault current limiter (SFCL) to superconducting surge current limiter (SSCL) is discussed. Based on the new concept, a change in the design of the existing medium-voltage superconducting limiter was analyzed. This is a change in the mass of copper that can be easily implemented in an existing limiter. The superconducting part in the limiter is not changed. The previously designed and manufactured copper mass was adapted to the SFCL. (The influence of the mass of copper plates on the parameters of a superconducting surge current limiter)

Słowa kluczowe: nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego (SFCL), nadprzewodnikowy ogranicznik udaru prądowego (SSCL), nadprzewodnik wysokotemperaturowy (HTS), I_c – prąd krytyczny nadprzewodnika.

Keywords: SFCL - Superconducting Fault Current Limiter, SSCL - Superconducting Surge Current Limiter, HTS – High Temperature Superconductor, I_c – critical current of the superconductor.

Wstęp

Nadprzewodnikowy ogranicznik prądu zwarciovego (superconducting fault current limiter - SFCL) dla sieci średniego napięcia, chłodzony z wykorzystaniem kriochłodziarki, sfinansowany przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, w ramach projektu: GEKON2/O2/267193/13/2015 został zaprojektowany, zbudowany oraz testowany z udziałem autora. Do budowy tego ogranicznika wykorzystana została taśma z wysokotemperaturowego nadprzewodnika II generacji (HTS 2G). Nazwa wykorzystanej w ograniczniku taśmy HTS to SF12100 (producent - SuperPower). Nadprzewodnik w taśmie SF12100 to ceramika itrowa Y-123. W przewodzie ogranicznika, z uwagi na podwyższenie parametrów ogranicznika, umieszczone są dwie taśmy HTS.

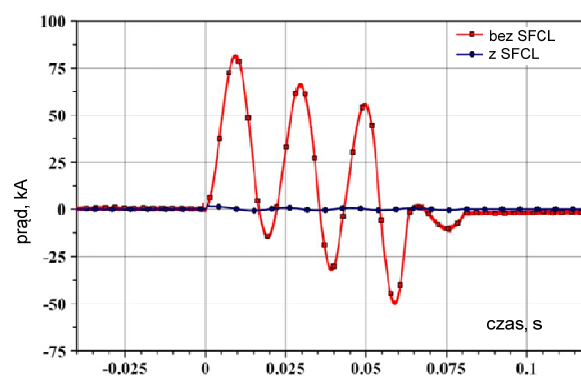
W odróżnieniu od poprzednich ograniczników dla sieci średniego napięcia, wykonanych z użyciem taśm SF12050, budowanych i badanych z udziałem autora, w których stosowany był system chłodzenia w kąpeli ciekłego azotu, ze stałą temperaturą roboczą ogranicznika 77,4 K, w tym ograniczniku SFCL istnieje możliwość zmiany roboczej temperatury pracy. Możliwość zmiany roboczej temperatury pracy pozwala na dostosowywanie parametrów ogranicznika dla potrzeb elektroenergetycznych.

Ogranicznik SFCL zbadany został w zwarciozni w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie (IEI). Moc generatora zwarciovego wynosiła 2,5 GVA. Prąd zwarciovego bez ogranicznika ustalono na 81,24 kA (rys. 1). Testy zwarciove ogranicznika SFCL zostały pomyślnie przeprowadzone. Pierwsza próba zwarciova rozpoczęła się przy temperaturze ogranicznika = 72 K (rys. 1-2) i te dane zostały wykorzystane w tym artykule.

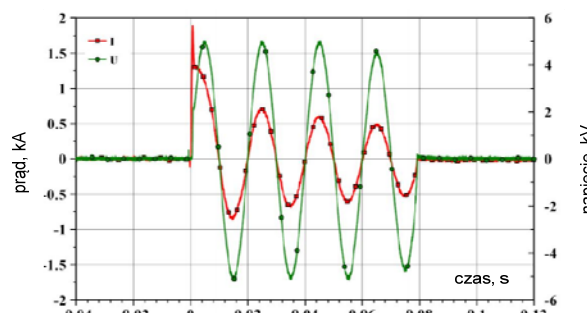
Maksymalny prąd zwarciovego ustawiony na 81,24 kA w generatorze zwarciowym został ograniczony przez SFCL do maksymalnego prądu równego 1,9 kA, przy temperaturze początkowej ogranicznika = 72 K (rys. 1-2).

Po analizie wyników eksperymentalnych (próby zwarciove w zwarciozni w IEI) oraz po analizie wyników modelu numerycznego ogranicznika (model numeryczny zweryfikowany wynikami zwarc, wykonany przez autora) [1,6], pojawiła się inna koncepcja wykorzystania

nadprzewodnikowych ograniczników prądu w elektroenergetyce. Ta koncepcja to przejście z nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego - SFCL na nadprzewodnikowy ogranicznik udaru prądowego - SSCL. Ta zmiana zmniejsza czas nagrzewania ogranicznika podczas zwarcia z 0,08 s do 0,01 s [1].



Rys.1. Przebieg prądu zwarciovego (zmierzony w zwarciozni w IEI) w badanym układzie bez SFCL i z SFCL (temperatura początkowa $T_0 = 72$ K) [1]



Rys.2. Przebieg zmierzonego prądu zwarciovego i zmierzonego napięcia (zarejestrowane w zwarciozni w IEI) w badanym ograniczniku SFCL przy ($T_0 = 72$ K). I – prąd, U – napięcie [1]

W tym artykule wykorzystane zostały publikacje [1–6]. Zamieszczone dodatkowo (w rozdziale „LITERATURA”) kolejne przykładowe publikacji [7–12] z 2022 roku,

pokazały, że temat nadprzewodnikowych ograniczników SFCL jest nadal aktualny. Artykuł [7] prezentuje ideę SIC-SFCL. W artykule [8] przedstawiony został średnionapięciowy, trójfazowy nadprzewodnikowy ogranicznik SFCL. W artykułach [9-10] opisano analizę mechaniczną podczas ograniczania prądu przez ogranicznik SFCL. W artykule [11] opisano projekt dotyczący ogranicznika SFCL wysokiego napięcia. W artykule [12] opisano projekt mający na celu poprawę właściwości kabli nadprzewodnikowych dla ograniczników SFCL. W wybranych artykułach [7-12] (oraz w innych artykułach) ograniczniki SFCL nie były chłodzone kriochłodziarką. Ograniczniki te chłodzone są głównie ciekłym azotem. W opinii autora, ograniczniki SFCL stosowane w elektroenergetyce powinny być chłodzone nie cieczą, a kriochłodziarką.

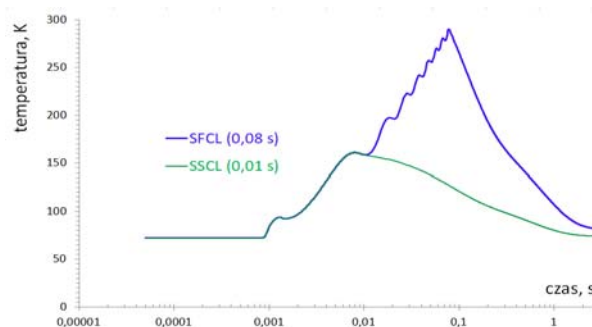
Zalety przejścia z SFCL na SSCL

Na rysunku 3 przedstawione jest porównanie przebiegów temperatury taśm HTS w ograniczniku podczas zwarcia, w których ogranicznik zostaje rozłączony po 0,01 s lub po 0,08 s [1]. Czas równy 0,01 s to czas, w którym ograniczany prąd po raz pierwszy przekracza zero (rys. 2). Podczas ograniczania prądu zwarcia taśmy HTS przechodzą ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego. W stanie rezystywnym wydzielane jest ciepło w taśmach HTS i ciepło przepływa do płytek miedzianych zainstalowanych do chłodzenia ogranicznika. Żeby taśmy HTS nie zostały uszkodzone, wzrost temperatury nie może przekroczyć 450 K. Z tego powodu maksymalny czas działania ogranicznika nie jest duży i w przypadku tego zbudowanego ogranicznika SFCL maksymalny czas ograniczania został przyjęty jako 0,08 s, przy założonej minimalnej temperaturze początkowej pracy ogranicznika równej 38 K. Po obniżeniu temperatury początkowej ogranicznika do wartości mniejszej niż 38 K należałoby zmniejszyć czas ograniczania prądu z 0,08 s do czasu mniejszego. Według tabeli 1 maksymalna temperatura podczas ograniczania zwarcia wynosi 290 K przy temperaturze początkowej równej 72 K i jest dużo niższa niż dopuszczalna temperatura 450 K.

Dlaczego po obniżeniu temperatury pracy ogranicznik nadprzewodnikowy nagrzewa się do wyższych temperatur podczas ograniczania prądu zwarcia? Dlatego, że przy niższej temperaturze, taśmy HTS w ograniczniku przechodzą ze stanu nadprzewodzącego do stanu rezystywnego przy wyższej wartości prądu. Jeżeli przyjmujemy, że w zastosowanych, w zbudowanym ograniczniku, taśmach HTS rozmiar prądu krytycznego w temperaturze 77,4 K (temperatura ciekłego azotu) jest równy 100% to w temperaturze 72 K rozmiar prądu krytycznego wzrasta do 150% a w temperaturze 38 K wzrasta do 600%. Powoduje to, że według obliczeń, w istniejącym ograniczniku, dla $T_0 = 72$ K maksymalna moc wydzielana podczas ograniczania prądu jest rzędu 6 MW a dla $T_0 = 38$ K jest rzędu 41 MW. Przy starcie ograniczania prądu (SFCL(0,08 s)) od temperatury $T_0 = 72$ K przyrost temperatury taśm HTS wynosi 218 K (= 290 K – 72 K) a od temperatury $T_0 = 38$ K przyrost temperatury taśm HTS wynosi 412 K (= 450 K – 38 K).

Po rozłączeniu ogranicznika, z założenia, prąd nie płynie w ograniczniku i ciepła nie przybywa. Taśmy HTS ogranicznika są schładzane (stygają), na początku głównie przez przepływ ciepła z taśm HTS do płytek miedzianych. Kriochłodziarka podłączona do płytek miedzianych zacznie je schładzać, gdy ich temperatura wzrośnie powyżej ustawionej temperatury początkowej (przed ograniczeniem zwarcia). Na rysunku 3 pokazane jest jak nagrzewają się taśmy HTS ogranicznika SFCL od czasu 0 s do czasu 0,08

s a ogranicznika SSCL od czasu 0 s do czasu 0,01 s. W obu przypadkach od 0 s do 0,0008 s ograniczniki nie nagrzewają się, ponieważ prąd w taśmach nadprzewodnikowych nie przekroczył jeszcze wartości krytycznej (w badanym ograniczniku). Do 0,0008 s taśmy HTS w tych badanych ogranicznikach są w stanie nadprzewodzącym. Po 0,0008 s taśmy HTS w tych badanych ogranicznikach przechodzą do stanu rezystywnego. Taśmy HTS są w ograniczniku tak szybko nagrzewana podczas ograniczania prądu zwarcia, że nawet przy pierwszym przejściu prądu przez zero (czas = 0,01 s) taśmy HTS nie powracają do stanu nadprzewodzącego. Po wyłączeniu prądu taśmy HTS ogranicznika schładzane są (stygają) do czasu 3 s (na rys. 3). Taśmy HTS ogranicznika SFCL zaczyna się schładzać od 0,08 s a ogranicznika SSCL od 0,01 s. Oba te ograniczniki na rysunku 3 są konstrukcyjnie takie same, ale inaczej działają (czasowo).



Rys.3. Zmiany temperatury taśm HTS ogranicznika podczas zwarcia (0 s -> 0,08 s) i schładzania (stygnięcia) (0,08 s -> 3 s) - SFCL (0,08 s) oraz podczas zwarcia (0 s -> 0,01 s) i schładzania (stygnięcia) (0,01 s -> 3 s) - SSCL (0,01 s). Temperatura przed zwarcie = 72 K [1]

Tabela 1. Temperatura maksymalna taśm HTS (podczas ograniczania zwarcia) T_{max} i temperatura końcowa taśm HTS (po 3 s) $T_{(3s)}$ ogranicznika wg. rysunku 3 oraz czas schładzania do T_0 ($T_{max} > T_0$) przez kriochłodziarkę. T_0 - temperatura początkowa, t_{zw} - czas ograniczania prądu zwarcia

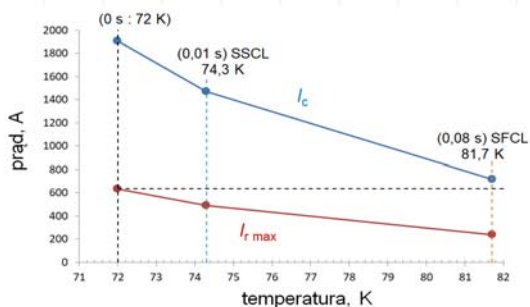
	T_0	t_{zw}	T_{max}	$T_{(3s)}$	$T_{max} \rightarrow T_0$
SFCL	72 K	0,08 s	290 K	81,7 K	6300 s
SSCL	72 K	0,01 s	161 K	74,3 K	1500 s

W tabeli 1 wartości temperatury maksymalnej taśm HTS (podczas ograniczania zwarcia) T_{max} i temperatury końcowej taśm HTS $T_{(3s)}$ podano zgodnie z rysunkiem 3. Temperatura maksymalna T_{max} w SSCL (0,01 s) jest znacznie niższa niż temperatura maksymalna T_{max} w SFCL (0,08 s). Temperatura końcowa $T_{(3s)}$ po zwarcie z użyciem SSCL (0,01 s) jest znacznie niższa niż $T_{(3s)}$ po zwarcie z użyciem SFCL (0,08 s).

Na rysunku 4 oraz w tabeli 2 przedstawiono podstawowe parametry ogranicznika - I_c i $I_{r,max}$ przed zwarcie (0 s) oraz po czasie 3 s po zwarcie trwającym: 0,01 s w SSCL i 0,08 s w SFCL. Przyjęte zostało w tabeli 2 i na rysunku 4, że $I_{r,max}$ jest 3 razy mniejsze niż I_c . Czyli po przekroczeniu $I_{r,max}$ mniej niż 3 razy nadprzewodnikowy ogranicznik prądu nie zacznie jeszcze działać – nie zacznie ograniczać prądu.

Po ograniczeniu zwarcia ogranicznik podłączony do układu zabezpieczeń zmienia parametry w wyniku wzrostu temperatury ogranicznika co oczywiście zwiększa temperaturę taśm nadprzewodnikowych. Wzrost temperatury nadprzewodnika zmniejsza jego prąd krytyczny I_c . W przypadku zastosowanej w omawianym ograniczniku taśmie HTS (SF12100) maksymalna temperatura pracy to mniej niż 89 K. Od temperatury równej i wyższej od 89 K ta taśma HTS przechodzi ze stanu nadprzewodzącego do

stanu rezystywnego. Wtedy $I_c = 0$ A a według zależności w ograniczniku również $I_{r,max} = 0$ A oraz $I_r = 0$ A.

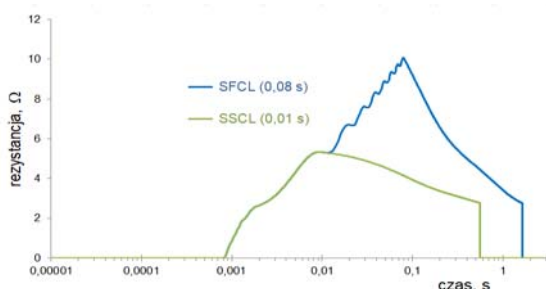


Rys. 4. Podstawowe parametry ogranicznika - I_c i $I_{r,max}$ przed zwarciem w temperaturze $T_0 = 72$ K (0 s) oraz w temperaturze $T_{(3s)}$ po zwarciu trwającym: 0,01 s i 0,08 s. Zgodnie z tabelą 2. I_c – prąd krytyczny nadprzewodnika (taśm HTS) w ograniczniku. $I_{r,max}$ – maksimum prądu znamionowego ogranicznika [1]

Tabela 2. I_c – prąd krytyczny nadprzewodnika (taśm HTS) w ograniczniku w funkcji temperatury. Prąd znamionowy ogranicznika I_r - wartość skuteczna, $I_{r,max}$ – maksimum prądu znamionowego

temperatura	I_c	I_r	$I_{r,max}$
$T_0 = 72$ K	1909 A	450 A	636 A
$T_{(3s)}(SSCL) = 74,3$ K	1471 A	347 A	490 A
$T_{(3s)}(SFCL) = 81,7$ K	718 A	169 A	239 A

Po zwarciu ogranicznika trwającym 0,08 s I_c obliczone po zwarciu (po 3 s) jest niewiele większe od $I_{r,max}$ przed zwarciem ($I_{r,max}(72$ K)). Ogranicznik będzie działał poprawnie przy prądzie znamionowym. W przypadku przekroczenia prądu znamionowego o 13% zadziała ogranicznik (przy 113% $I_{r,max}(72$ K)), ale powinno to nastąpić (z założenia) dopiero po trzykrotnym przekroczeniu prądu znamionowego (przy 300% $I_{r,max}(72$ K)).



Rys. 5. Zmiany rezystancji taśm HTS ogranicznika podczas zwarcia (0 s - 0,08 s) i stygnięcia „SFCL (0,08 s)” oraz podczas zwarcia (0 s - 0,01 s) i stygnięcia „SSCL (0,01 s)” dla temperatury początkowej ogranicznika przed zwarciem = 72 K

Tabela 3. Rezystancja maksymalna R_{max} ogranicznika w czasie ograniczenia zwarcia oraz czas powrotu taśm HTS ze stanu rezystywnego do stanu nadprzewodzącego t_{R-N} (po ustaniu zwarcia) wg. rysunku 5. T_0 - temperatura początkowa, t_{zw} czas trwania zwarcia. Temperatura maksymalna (podczas ograniczania zwarcia) T_{max}

	T_0	t_{zw}	T_{max}	R_{max}	t_{R-N}
SFCL	72 K	0,08 s	290 K	10,08 Ω	1,55 s
SSCL	72 K	0,01 s	161 K	5,33 Ω	0,55 s

Po zwarciu ogranicznika trwającym 0,01 s I_c jest 231% większe od $I_{r,max}(72$ K) przed zwarciem. 231% to mniej niż wymagane 300%, ale jest to akceptowalna wartość w porównaniu do 113% dla zwarcia SFCL (0,08 s).

Drugą, bardzo istotną różnicę przedstawiono na rysunku 5 i w tabeli 3. Najważniejsze jest to, że po zwarciu SSCL (0,01 s) ogranicznik powraca ze stanu rezystywnego do stanu nadprzewodzącego po czasie krótszym niż 1 s, a dokładnie po = 0,55 s. Ma to fundamentalne znaczenie z punktu widzenia elektroenergetyki. Układ zasilania, po odłączeniu

w czasie zwarcia, zostaje ponownie załączony po czasie krótszym niż 1 s. Tak więc ten ogranicznik SSCL (0,01 s) można ponownie podłączyć do systemu po czasie mniejszym niż 1 s. Oczywiście ogranicznik nie będzie działał tak jak przed zwarciem. Zacznie działać, gdy prąd przekroczy 1471 A, a powinien zacząć działać dopiero, gdy prąd przekroczy 1909 A. Oczywiście prąd przeciążeniowy (tutaj przyjęty jako 300%) jest wartością umowną. Konsultując ze specjalistami z obszaru elektroenergetyki należy ustalić, czy takie chwilowe zmniejszenie krotności prądu przeciążenia jest dopuszczalne, czy nie. Tak czy inaczej, po zwarciu potrzebne jest żeby ogranicznik szybko wrócił do temperatury sprzed zwarcia. W omawianym przypadku do temperatury 72 K. W skonstruowanym ograniczniku SSCL powrót do temperatury 72 K (74,3 K -> 72 K) trwa 1500 s (tab. 1). [1]

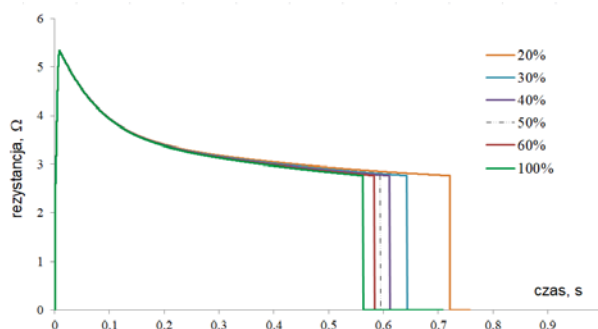
Ogranicznik pracujący w trybie SFCL (0,08 s) nie może być ponownie włączony do układu po czasie krótszym niż 1 s, ponieważ powraca do stanu nadprzewodzącego dopiero po 1,55 s. Czas schładzania do temperatury = 72 K (81,7 K -> 72 K) wynosi 6300 s. [1]

Zmiana masy płytek miedzianych w SSCL

W poprzednim rozdziale omówiono koncepcję zmiany działania istniejącego ogranicznika nadprzewodnikowego. Teraz, w oparciu o nową koncepcję, przeanalizowana zostanie zmiana konstrukcji ogranicznika. Jest to prosta do wykonania zmiana masy w istniejącym ograniczniku nadprzewodnikowym. Część nadprzewodnikowa nie zostaje zmieniona. Analizowana zmiana masy ogranicznika to zmiana masy płytek miedzianych, których masa w istniejącym ograniczniku wynosi 76,8 kg. Płytki miedziane w tym zbudowanym ograniczniku nadprzewodnikowym nie przewodzą prądu tylko odbierają ciepło generowane w taśmach nadprzewodnikowych. Płytki miedziane stykają się z taśmami nadprzewodnikowymi przez izolatory średnionapięciowe a do płytek miedzianych podłączona jest kriochłodziarka. Dane z „100%” dotyczą istniejącego ogranicznika i służą do celów porównawczych. Zmianę masy płytek miedzianych można wykonać w prosty sposób w istniejącym ograniczniku nadprzewodnikowym.

Na rysunku 6 przedstawiono zmiany rezystancji taśm HTS ogranicznika w czasie zwarcia (0 s - 0,01 s) i chłodzenia (0,01 s - 1 s) dla temperatury początkowej ogranicznika przed zwarciem = 72 K.

Czas powrotu taśmy HTS ze stanu rezystywnego do stanu nadprzewodzącego wzrasta wraz ze zmniejszaniem się masy (%) płytek miedzianych w ograniczniku. Jednak nawet w przypadku 20% masy płytek miedzianych czas powrotu taśm HTS ze stanu rezystywnego do stanu nadprzewodzącego jest krótszy niż 1 s (t_{R-N} (20%) = 0,71 s - tab. 4).

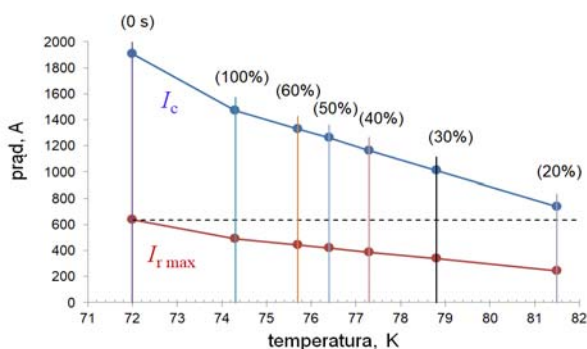


Rys. 6. Zmiany rezystancji taśm HTS ogranicznika podczas zwarcia (0 s - 0,01 s) i chłodzenia (0,01 s - 1 s) dla temperatury początkowej ogranicznika przed zwarciem ($T_0 = 72$ K) jako funkcja masy płytek miedzianych w ograniczniku (%).

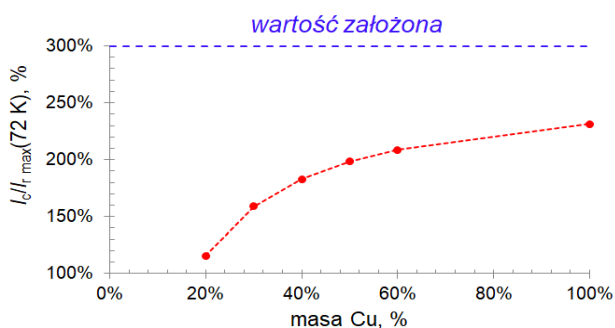
Tabela 4. I_c - prąd krytyczny nadprzewodnika (taśm HTS) w ograniczniku oraz $I_{r,max}$ - maksimum prądu znamionowego w funkcji temperatury $T_{(3s)}$ - 3 sekundy po zwarciu trwającym 0,01 s. t_{R-N} - czas powrotu taśm HTS ze stanu rezystywnego do stanu nadprzewodzącego (po ustaniu zwarcia). $T_0 = 72$ K, $I_{r,max}$ (przy 72 K) = 636 A, I_c (przy 72 K) = 1909 A, %Cu - %masy płytek miedzianych

% Cu	20%	30%	40%	50%	60%	100%
$T_{(3s)}$	81,5 K	78,8 K	77,3 K	76,4 K	75,7 K	74,3 K
$I_{r,max}$	245,1 A	337,2 A	388 A	420,4 A	442,7 A	490,4 A
I_c	735 A	1011 A	1164 A	1261 A	1328 A	1471 A
t_{R-N}	0,71 s	0,63 s	0,60 s	0,58 s	0,57 s	0,55 s
$T_{(3s)} > 72$ K	1290 s	1360 s	1410 s	1440 s	1460 s	1500 s
$I_c / I_{r,max}(72$ K)	116%	159%	183%	198%	209%	231%

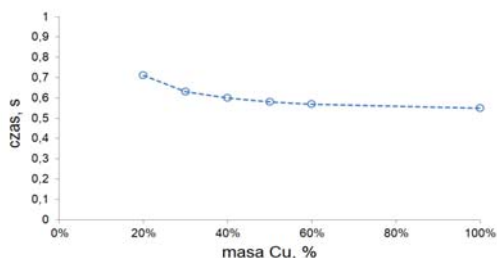
Na rysunku 7 oraz w tabeli 4 przedstawiono podstawowe parametry ogranicznika - I_c i $I_{r,max}$ przed zwarciem (0 s) i po zwarciu trwającym 0,01 s w funkcji masy (%) płytek miedzianych ogranicznika. Po ograniczeniu zwarcia ogranicznik podłączony do układu zabezpieczeń zmienia parametry w wyniku wzrostu temperatury ogranicznika (taśm HTS).



Rys. 7. Podstawowe parametry ogranicznika - I_c i $I_{r,max}$ przed zwarciem (0 s) i po zwarciu trwającym 0,01 s przy zmniejszającej się masie płytek miedzianych w ograniczniku. Zgodnie z tabelą 4.



Rys. 8. Wpływ masy (%) płytek miedzianych w ograniczniku na odchylenie od wartości założonej ogranicznika = 300%. Wartość I_c w temperaturze po zwarciu. Wartość $I_{r,max}(72$ K) w temperaturze przez zwarciem. Zgodnie z tabelą 4.

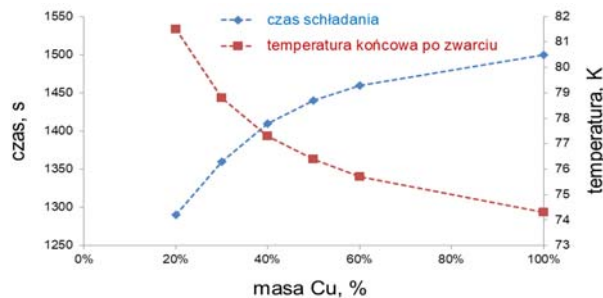


Rys. 9. Czas przejścia SSCL ze stanu rezystywnego (po zwarciu) do stanu nadprzewodzącego w funkcji masy płytek miedzianych w ograniczniku (%). Zgodnie z tabelą 4.

Na rysunku 8 pokazano, jak zmniejszenie masy płytek miedzianych w ograniczniku wpływa na parametr

ogranicznika $I_c / I_{r,max}$ (72 K). Wniosek, czy możliwe jest zmniejszenie masy płytek miedzianych w ograniczniku, nie jest jednoznaczny. Główną zaletą jest to, że ogranicznik jest lżejszy (i mniejszy) jeżeli zmniejszona zostanie masa płytek miedzianych.

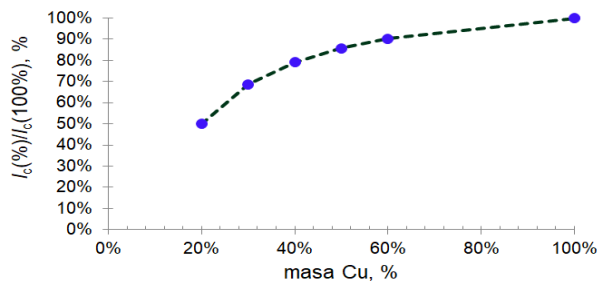
Drugą zaletą (rys. 9, tab. 4) jest to, że redukcja masy płytek miedzianych nawet do 20% nie zwiększa czasu przejścia ogranicznika ze stanu rezystywnego (po zwarciu) do stanu nadprzewodzącego do ponad 1 s (t_{R-N} (20%) = 0,71 s). Tak więc ogranicznik może być ponownie włączony przez system elektroenergetyczny po ograniczeniu zwarcia.



Rys. 10. Wpływ masy płytek miedzianych w ograniczniku (%) na temperaturę końcową po zwarciu $T = T_{(3s)}$ oraz na czas schładzania ogranicznika kriochłodziarką od temperatury $T_{(3s)}$ do temperatury $T_0 = 72$ K. Zgodnie z tabelą 4.

Trzecią zaletą (rys. 10) jest to, że redukcja masy płytek Cu skraca czas schładzania ogranicznika kriochłodziarką do temperatury początkowej (w tym przypadku do temperatury 72 K), z 1500 s przy 100% Cu do 1290 s przy 20% Cu. Redukcja czasu chłodzenia do temperatury 72 K przy redukcji masy płytek Cu następuje pomimo tego, że redukcja masy płytek Cu powoduje wzrost temperatury po ograniczeniu zwarciovym z 74,3 K przy 100% Cu do 81,5 K przy 20% Cu (rys. 10).

Jedyną wadą zmniejszenia masy płytek Cu w ograniczniku SSCL jest obniżenie jego parametrów $I_c / I_{r,max}$ (72 K) (rys. 8). Wynika to z tego, że $T_{(3s)}$ po zwarciu jest funkcją masy Cu i rośnie przy zmniejszaniu masy Cu. Wzrost temperatury $T_{(3s)}$ zmniejsza wartość I_c taśm HTS. Ale porównując wartości I_c ogranicznika tylko po zwarciu, to wada zmniejszenia masy płytek Cu wydaje się mniejsza niż na rysunku 8. Na rysunku 11 przedstawiony jest procentowy stosunek I_c z obniżoną masą Cu do I_c bez obniżenia masy Cu. Przy obniżeniu masy Cu do 50% I_c zmniejsza się tylko do 85%. Przy obniżeniu masy Cu do 20% I_c zmniejsza się tylko do 50%.



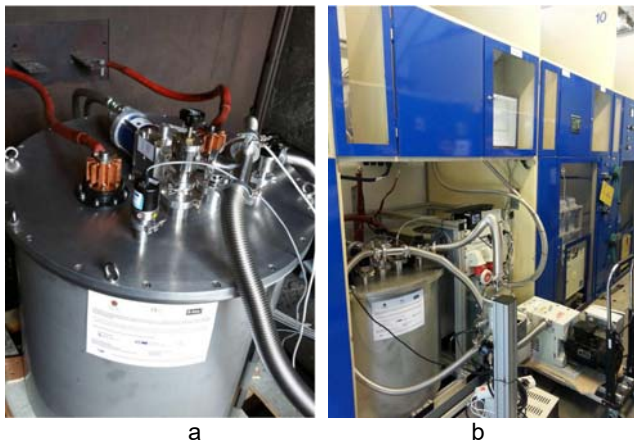
Rys. 11. Wpływ masy (%) płytek miedzianych w ograniczniku na zmianę I_c po zwarciu w stosunku do I_c z masą Cu równą 100%. Zgodnie z tabelą 4

Dlaczego zmiana masy SSCL?

Analizowana redukcja masy miedzi w ograniczniku wynikała z prostego problemu w elektroenergetyce. Trzeci średnionapięciowy ogranicznik SFCL (omawiany w tym artykule) został zbudowany (z udziałem autora) tak, aby

głównie „przeżył” podczas zwarć w zwarciowni IEL. Pierwszy skonstruowany i badany ogranicznik SFCL uszkodził się mechanicznie podczas pierwszego zwarcia. Drugi skonstruowany ogranicznik SFCL zadziałał podczas dwóch zwarć, a trzecie zwarcie go uszkodziło (w zwarciowni IEL).

Trzeci ogranicznik SFCL (który jest bazą tego artykułu) ograniczył zwarcia podczas wszystkich wykonanych prób zwarciowych w IEL (rys.12a) i nie jest uszkodzony.



Rys. 12. Trzeci ogranicznik SFCL, umieszczony w kriostacie podłączony w zwarciowni IEL (a) oraz zainstalowany na jeden tydzień w stacji średnionapięciowej w IEL (b).

Ponieważ trzeci ogranicznik SFCL nie został uszkodzony po próbach zwarciowych, został zainstalowany na jeden tydzień w stacji średnionapięciowej w IEL (rys.12b). I wtedy okazało się co jest problemem. Ogranicznik SFCL (w kriostacie) zmieścił się całkowicie w przydzielonej podstacji, ale część kriochłodziarki stała na zewnątrz. Oczywiście specjaliści z obszaru elektroenergetyki zgodzili się na zainstalowanie tego ogranicznika na jeden tydzień. Gdyby miał zostać zainstalowany na stałe, to ogranicznik i wszystkie części kriochłodziarki musiałyby się zmieścić w całości w podstacji.

I tutaj pojawiło się pytanie, jak zmniejszyć rozmiary ogranicznika? Najprostszą drogą do zmiany rozmiaru istniejącego ogranicznika jest zmniejszenie masy płytek miedzianych. Masa płytek miedzianych jest dominująca w tym zbudowanym ograniczniku i wynosi 76,8 kg. Masa taśm HTS to tylko 1,6 kg a masa izolatorów to tylko 0,92 kg. W opinii autora, po zmniejszeniu masy płytek miedzianych w istniejącym ograniczniku, należałoby zastosować kriostat o mniejszej średnicy i dopiero to zmniejszyłoby rozmiar ogranicznika.

Specjaliści z obszaru elektroenergetyki zgodzili się na zainstalowanie tego ogranicznika na tydzień, pomimo, że nie zmieścił się w całości w podstacji. Zgodzili się tylko dlatego, że ogranicznik nie był chłodzony ciekłym azotem ale kriochłodziarką. Oraz zgodzili się dodatkowo, ponieważ kompresor helowy w zastosowanej kriochłodziarkę nie była chłodzona wodą ale wiatrakiem powietrznym napędzanym elektrycznie.

Wnioski

- Zmiana koncepcji działania ogranicznika z nadprzewodnikowego ogranicznika prądu zwarciovego (SFCL) na nadprzewodnikowy ogranicznik udaru prądowego (SSCL) jest słuszna i nie ma wad. Wszystkie przedstawione dane pokazują, że tą nową koncepcję należy stosować.

- Zmiana masy ogranicznika SSCL może zostać wykonana w największej skali tylko poprzez zmniejszenie masy płytek miedzianych w ograniczniku.

- Zmiana masy płytek miedzianych w ograniczniku SSCL wpływa na wiele parametrów ogranicznika, na większość korzystnie, a na jeden niekorzystnie.

- Wszystkie prezentowane dane pokazały, co można zyskać, a co stracić zmieniając masę płytek miedzianych w ograniczniku SSCL.

- Chłodzenie kontaktowe za pomocą kriochłodziarki jest jedyną (w opinii autora wynikającej z konsultacji ze specjalistami z obszaru elektroenergetyki) możliwością chłodzenia ogranicznika nadprzewodnikowego w elektroenergetyce. Dodatkowo, kompresor helowy kriochłodziarki musi być chłodzony powietrzem a nie wodą.

- Kriochłodziarka umożliwia, w bardzo szerokich granicach, dostosowanie parametrów ogranicznika dla potrzeb elektroenergetycznych. Przykładowo, ogranicznik SFCL badany w zwarciowni IEL (schłodzony kriochłodziarką do temperatury = 72 K) miał parametry równe 150% w porównaniu gdyby był chłodzony ciekłym azotem (temperatura = 77,4 K).

Autor: prof. dr hab. inż. Sławomir Kozak, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38 A, 20-618 Lublin, E-mail: s.kozak@pollub.pl.

LITERATURA

- [1] Kozak S., Superconducting Surge Current Limiter, *Energies*. – (2021), vol. 14, no. 21, 1-17
- [2] Kozak S., Majka M., Kozak J., Analysis of Superconducting Fault Current Limiter 6 kV/0.14 kA, *ACTA PHYSICA POLONICA A*, (2020), no. 5, vol. 138, 752-755
- [3] Kozak S., Majka M., Kozak J., Wpływ temperatury na pracę nadprzewodnikowego ogranicznika prądu dla sieci średnich napięć, *PRACE IEL* (2020), vol. LXVI, 39-47, <https://iel.lukasiewicz.gov.pl/pl/prace-iel-2020.html>
- [4] Kozak J., Majka M., Kozak S. Design Considerations on a Resistive Superconducting Fault Current Limiter. *ACTA PHYSICA POLONICA A*, (2020), no. 5, vol. 138, 710-714
- [5] Kozak J., Majka M., Kozak S. Experimental Results of a 15 kV, 140 A Superconducting Fault Current Limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, (2017), vol. 27, no. 4. Art. no: 5600504, DOI: 10.1109/TASC.2017.2651120
- [6] Kozak S., *MODELOWANIE NUMERYCZNE NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU*. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki, Warszawa (2013), 1-126, ISBN 978-83-61956-07-5
- [7] Gabriel dos Santos, Flávio G. R. Martins, Felipe Sass, Guilherme Gonçalves Sotelo, Antonio Morandi, Francesco Grilli. A 3-D Finite-Element Method Approach for Analyzing Different Short Circuit Types in a Saturated Iron Core Fault Current Limiter. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* VOL. 32, NO. 3, 5600713, APRIL (2022)
- [8] Hans-Peter Kraemer, Anne Bauer, Michael Frank, Peter van Hasselt, Peter Kummeth, Manfred Wohlfart, Christian Schacherer, Tabea Arndt, Thomas Janetschek. ASSiST - A Superconducting Fault Current Limiter in a Public Electric Power Grid. *IEEE Trans.on Power Delivery*, VOL. 37, NO. 1, FEBRUARY (2022)
- [9] Anabela G. Pronto, Filipe Vale, Nuno Vilhena, João Murta-Pina. Electromechanical Analysis of Core- and Shell-Type Inductive Superconducting Fault Current Limiters Under General Fault Conditions. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* VOL. 32, NO. 1, 5600105, JANUARY (2022)
- [10] Jianfa Wu, Yaxiong Tan, Shushan Luo, Yingdun Hei. Study on Energy Dissipation Mechanism of HTS Tapes in the Impact and Recovery Process. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* VOL. 32, NO. 2, 5600408, MARCH (2022)
- [11] PeiqianGuo, Zhichang Yuan, Tao Ma, Chao Sheng, Meng Song, Shaotao Dai, Pandian Luo, Li Li. Study of 160 kV/1 kA R-SFCL Design and Application in Nanao MMC-MTDC Project. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* VOL. 32, NO. 2, 5400111, MARCH (2022)
- [12] Tixador P., Akbar A., Bauer M., Bocchi M., Calleja A., Creusot C., Deutscher G., Gomory F., Noe M., Obradors X., Pekarciková M., Sirois F. Some Results of the EU Project FASTGRID. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* VOL. 32, NO. 4, 5601006, JUNE (2022)