

621.316.935
621.311.1
537.312.62
621.315.55.017.72

Tadeusz JANOWSKI
Paweł SURDACKI

STAN BADAŃ I PERSPEKTYWY ZASTOSOWANIA NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU W SYSTEMACH ENERGETYCZNYCH

STRESZCZENIE *W pracy dokonano przeglądu aktualnego stanu badań, projektowania i technologii nadprzewodnikowych ograniczników prądu (NOP). Scharakteryzowano zasadę działania oraz porównano właściwości podstawowych typów ograniczników. Wskazano najistotniejsze zagadnienia badawcze i projektowe układów NOP, które należy rozwiązać w najbliższej przyszłości. Przedstawiono możliwości zastosowań NOP w sieciach elektroenergetycznych oraz obecnie realizowane projekty tych układów.*

Słowa kluczowe: *nadprzewodnikowe ograniczniki prądu (NOP), energetyczne urządzenia nadprzewodnikowe, nadprzewodniki wysokotemperaturowe.*

prof. dr hab. inż. Tadeusz JANOWSKI
Pracownia Krioelektromagnesów w Lublinie
Zakład Badań Podstawowych Elektrotechniki
Instytut Elektrotechniki

dr inż. Paweł SURDACKI
Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii
Politechnika Lubelska

1. WSTĘP

Wzrastający wraz z postępującym rozwojem elektroenergetyki poziom prądów zwarcia powoduje, że stosowane dotychczas środki mające na celu ograniczenie skutków zwarć, tzn. wyłączniki, bezpieczniki, dławiki powietrzne, transformatory o dużej impedancji oraz sekcjonowanie układu elektroenergetycznego, zwiększają koszty przesyłania energii elektrycznej i obniżają niezawodność dostawy energii [1, 16, 17].

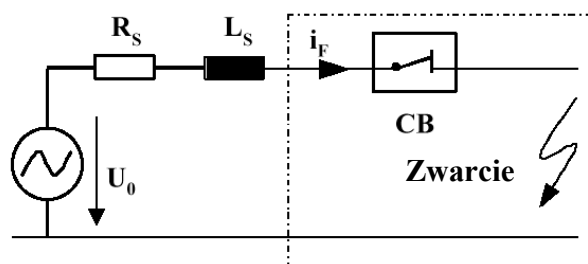
Koncepcja ograniczania prądów zwarciovych w sieciach elektroenergetycznych, która powstała na bazie urządzeń nadprzewodnikowych, opiera się na nieliniowej właściwości gwałtownego przejścia elementu nadprzewodnikowego od stanu nadprzewodzenia do stanu rezystywnego po przekroczeniu jego wartości krytycznej prądu [18, 21]. Nadprzewodnikowe ograniczniki prądów zwarciovych mogą zwiększyć wydajność sieci i zapewnić jej elastyczne rozszerzanie bez kosztownej wymiany dotychczas stosowanych urządzeń i aparatury łączeniowej. Zastosowanie nadprzewodnikowych ograniczników prądu może przynieść duże korzyści ekonomiczne, ponieważ wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na energię elektryczną nie będzie konieczności dostosowywania generatorów, transformatorów, aparatury łączeniowej i zabezpieczeń do wzrastających poziomów prądów zwarciovych [7, 17, 19, 20].

Warunki do realizacji nadprzewodnikowych ograniczników prądowych powstały dopiero przed kilku laty, kiedy opracowano technologię przemysłowego wytwarzania silnoproudowych elementów z nadprzewodników wysokotemperaturowych oraz kontaktowych układów chłodzenia (kriochłodziarek) [10, 11]. Prowadzone są na świecie intensywne badania i powstają pierwsze oferty dostawy takich urządzeń [3, 15]. W Polsce problematykę badań nadprzewodnikowych ograniczników prądu podjęto ostatnio w lubelskim ośrodku zastosowań nadprzewodnictwa [12, 22].

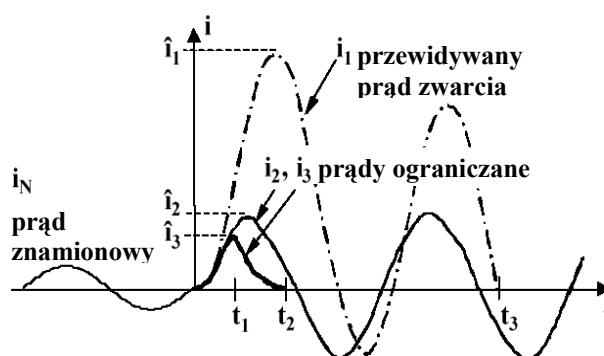
2. KONCEPCJA OGRANICZANIA PRĄDU ZWARCIA

W przypadku wystąpienia zwarcia w układzie elektroenergetycznym (rys.1), wzrost powstałego prądu zwarcia zależy od przyłożonego napięcia u_0 , impedancji obwodu $Z_s=R_s+jX_s$ oraz kąta fazowego, przy którym wystąpiło zwarcie. Najprostszą metodą ograniczenia przewidywanego prądu zwarcia i_1

(rys.2), mającego wartości kilkadziesiąt razy większe od prądu znamionowego i_N sieci, może być znaczne zwiększenie impedancji Z_s źródła zasilającego. Takie rozwiązanie wpływałoby jednak niekorzystnie na prąd przy zwiększaniu obciążenia odbiorców podczas pracy znamionowej. Bez zastosowania dodatkowego ograniczenia prądu, konwencjonalny wyłącznik prądowy CB rozłączy obwód w chwili t_3 przechodzenia prądu przez wartość zerową dopiero po kilku okresach od chwili powstania zwarcia. W tym czasie nadmierne wartości amplitudy prądu zwarcia, jak też szybkie zmiany jego wartości chwilowej mogą spowodować uszkodzenie lub



Rys.1. Schemat zastępczy układu elektroenergetycznego podczas zwarcia.



Rys.2. Przebiegi prądu podczas zwarcia [21].

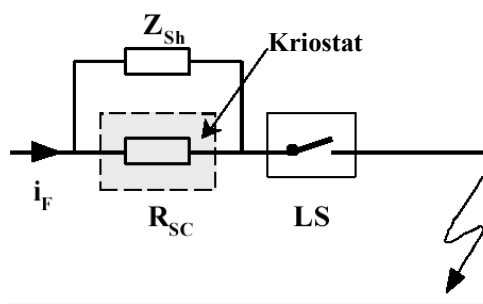
zniszczenie urządzeń elektroenergetycznych i aparatury łączeniowej, wywołane powstającymi siłami elektrodynamicznymi, naprężeniami mechanicznymi i cieplnymi, jak też gwałtownym wydzieleniem się energii cieplnej w miejscu wystąpienia zwarcia [21]. W celu ograniczenia pierwszej amplitudy prądu i_1 urządzenie ograniczające powinno zadziałać w czasie t_1 i ograniczyć wzrost prądu di/dt przynajmniej do zera. Można to zrealizować, eliminując napięcie na reaktancji źródła L_s poprzez skokowe wprowadzenie dużego napięcia w obwodzie na elemencie nieliniowym, który ograniczy prąd zwarcia (przebieg i_2) lub wyłączy go w chwili t_2 (przebieg i_3) [21]. Nadprzewodniki, które mają silnie nieliniową charakterystykę napięciowo-prądową, są doskonałymi materiałami, które mogą ograniczać nadmierne prądy w obwodach elektrycznych.

Koncepcja nadprzewodnikowych ograniczników prądu (NOP) typu rezystancyjnego powstała w latach osiemdziesiątych w kilku zagranicznych ośrodkach badawczych zajmujących się zastosowaniami nadprzewodnictwa [5, 17, 18, 19]. Początkowo opierała się ona na wykorzystaniu nadprzewodników niskotemperaturowych, których technologia rozwinęła się w stopniu wystarczającym do wprowadzenia ich do zastosowań przemysłowych. Jednak wysokie koszty wytwarzania nadprzewodników niskotemperaturowych i konieczność

stosowania skomplikowanej i kosztownej technologii kriogenicznej, opartej na ciekłym helu o temperaturze wrzenia ok. 4 K, spowolniły prace badawcze nad nadprzewodnikowymi ogranicznikami prądu. Odkrycie w 1986 r. wysokotemperaturowych nadprzewodników ceramicznych spowodowało powstanie nowych koncepcji rozwiązań nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego. Jednak dopiero w latach dziewięćdziesiątych, wraz z ulepszaniem technologii nowych materiałów ceramicznych o coraz wyższych temperaturach krytycznych i obniżaniem kosztów ich wytwarzania, rozwinęły się możliwości badań nad układami nadprzewodnikowych ograniczników prądu typu indukcyjnego [2, 18]. Ze względu na znacznie niższy koszt technologii chłodzenia ciekłym azotem o temperaturze wrzenia 77 K, ograniczniki z nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi mają szerokie potencjalne możliwości zastosowań, szczególnie w układach elektroenergetycznych.

3. OGRANICZNIKI TYPU REZYSTANCYJNEGO

Układy nadprzewodnikowych ograniczników prądu (NOP) typu rezystancyjnego (rys.3) opierają się na bezpośrednim włączeniu elementu nadprzewodnikowego do zabezpieczanej linii energetycznej [5, 6].



Rys.3. Schemat nadprzewodnikowego ogranicznika prądu typu rezystancyjnego w linii elektroenergetycznej.

Ograniczenie prądu zwarciovego następuje, gdy osiąga on wartość prądu krytycznego nadprzewodnika, który samoczynnie i gwałtownie przechodzi wtedy do stanu o dużej rezystancji.

Prąd przejmowany jest przez bocznikujący rezystor [23], cewkę [6] lub warystor o mniejszej impedancji. Wszystkie układy NOP typu rezystancyjnego charakteryzują się małym ciężarem i objętością, wy-

magają jednak użycia kosztownych przepustów prądowych, które doprowadzają prąd z linii energetycznej do układu kriogenicznego. Podczas pracy zwarcioviej przepusty stanowią źródło ciepła doprowadzanego do układu chłodzenia, co zwiększa koszty jego eksploatacji.

Konstrukcje [6] i [23] wykorzystują kosztowny włóknisty nadprzewodnik niskotemperaturowy NbTi ze stabilizatorem CuNi o wysokiej rezystywności, za-

projektowany do pracy przy prądach przemiennych rzędu kiloamperów, chłodzony ciekłym helum.

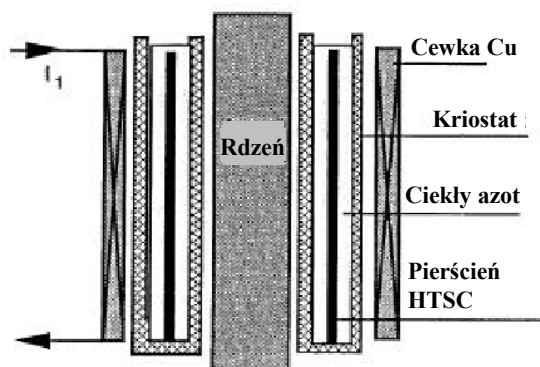
Zagadnienia projektowe, wymagające rozwiązania, to: obniżenie wartości krytycznych prądu wielożyłowego przewodu przy prądzie przemiennym w stosunku do wartości przy prądzie stałym, niekontrolowane zanikanie nadprzewodzenia, wywołane przemieszczaniem się przewodu pod wpływem sił elektrodynamicznych oraz znaczne odparowywanie ciekłego helu w czasie pracy zwarciowej, co wymaga współpracy z kriochłodziarką. W coraz liczniejszych pracach mających na celu zastosowanie nadprzewodników wysokotemperaturowych w rezystancyjnych układach NOP istotnym problemem jest zmniejszenie strat przy prądach przemiennych, co zostało już wcześniej rozwiązane dla nadprzewodników niskotemperaturowych.

Zaletą NOP typu rezystancyjnego jest bardzo duża wartość rezystywności nadprzewodników wysokotemperaturowych, przekraczająca $10 \mu\Omega\text{m}$, co prowadzi do zmniejszenia objętości elementu nadprzewodnikowego. Po zadziałaniu ogranicznika następuje zbyt duży wzrost temperatury elementu, związany z niewielką pojemnością cieplną ceramiki nadprzewodnikowej. W celu zwiększenia pojemności cieplnej, w konstrukcji [5] użyto cienkich warstw ($0,2 - 2 \mu\text{m}$) nadprzewodnika wysokotemperaturowego na podłożu szafiru lub cyrkonu stabilizowanego itrem (YSZ), co jednak podwyższa złożoność i koszt rozwiązania.

4. OGRANICZNIKI TYPU INDUKCYJNEGO

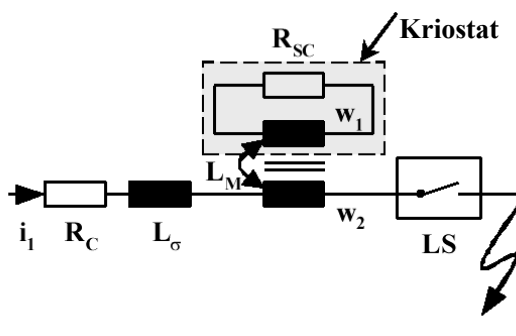
Układ NOP typu indukcyjnego (rys.4 i 5) składa się z niewarstwowanego rdzenia ferromagnetycznego, miedzianego uzwojenia pierwotnego i pierścienia nadprzewodnikowego w kształcie tuby [2, 13]. Uzwojenie pierwotne jest połączone szeregowo z zabezpieczoną linią energetyczną lub urządzeniem. Uzwojeniem wtórnym jest nadprzewodnikowy pierścień, pracujący jako zwój zwarty.

Pierścień nadprzewodnikowy znajduje się w kriostatcie z ciekłym azotem. Gdy nadprzewodnikowy pierścień jest w stanie nadprzewo-



Rys.4. Przekrój układu NOP typu indukcyjnego.

dzenia, rdzeń ferromagnetyczny jest ekranowany od strumienia magnetycznego uzwojenia pierwotnego i impedancja tego uzwojenia jest mała. Gdy prąd w pierścieniu zwiększa się do wartości krytycznej nadprzewodnika, następuje gwałtowne przejście ze stanu nadprzewodzenia do stanu rezystywnego. Powstająca rezystancja jest transformowana do uzwojenia pierwotnego i powiększając jej wartość tworzy impedancję układu NOP o znacznej wartości ograniczającą prąd zwarcia. Gwałtowny wzrost strumienia magnetycznego w rdzeniu powoduje jego nasycenie. Zaletami indukcyjnych układów NOP są: separacja elektryczna elementu nadprzewodnikowego od obwodu linii energetycznej oraz brak przepustów prądowych. Wadami tych układów są stosunkowo duży ciężar i objętość związane z koniecznością użycia rdzenia ferromagnetycznego.



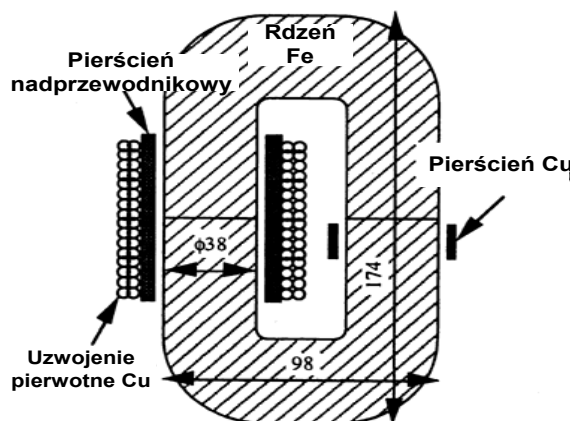
Rys.5. Schemat układu NOP typu indukcyjnego w linii elektroenergetycznej.

Kilka zespołów na świecie [14, 15, 19] zajmuje się badaniem tego typu rozwiązania, wskazując na obiecujące perspektywy jego działania i zastosowania, co znalazło wyraz w pierwszym działającym obwodzie transformatora hydroelektrowni [19]. Zagadnienia projektowe, które wymagają dalszego zbadania i rozwiązania, to: możliwość wykorzystania niemetalicznych kriostatów w celu redukcji indukowanych prądów wi-

rowych, przeciwdziałanie rozrywającym lub ściskającym siłom elektrodynamicznym działającym na pierścień nadprzewodnikowy, powstającym w stanach przejściowych ogranicznika, redukcja przejściowej niejednorodności cieplnej układu, optymalizacja czasu ponownego schłodzenia i odzyskania właściwości nadprzewodzenia oraz możliwość wykorzystania dodatkowego (trójnego) uzwojenia do sterowania poziomem prądu wyzwalań, jak też pierścienia miedzianego pochłaniającego część energii wydzielonej podczas zwarcia (rys.6).

W związku z udoskonaleniem przekaźników mikroprocesorowych, które mogą wykrywać zwarcia już w pierwszym półokresie, należy również zbadać możliwość zastosowania zewnętrznych układów wyzwalań ograniczników. Dałoby to możliwość uniezależnienia sterowania poziomem prądu wyzwalań od właściwości nadprzewodnika i zmienności jego punktu pracy w warunkach kriogenicznych. Obecnie większość prac koncentruje się jednak wciąż na układach samowyzwalających NOP.

W czasie ograniczania prądu zwarcowego niektóre części elementu nadprzewodnikowego mogą wcześniej niż inne wchodzić w stan przejściowy zanikania nadprzewodzenia, w wyniku niejednorodnego rozkładu parametrów materiałowych, temperatury i pola magnetycznego [2, 19]. Niejednorodność ta jest szczególnie istotna, gdy prąd wyzwolenia ogranicznika jest bliski szczytowemu prądowi zwarcia, co może prowadzić do wydłużenia czasu trwania stanu przejściowego przechodzenia do stanu rezystywnego, połączonego z niekompletną komutacją prądu zwarcia do elementu bocznikującego.



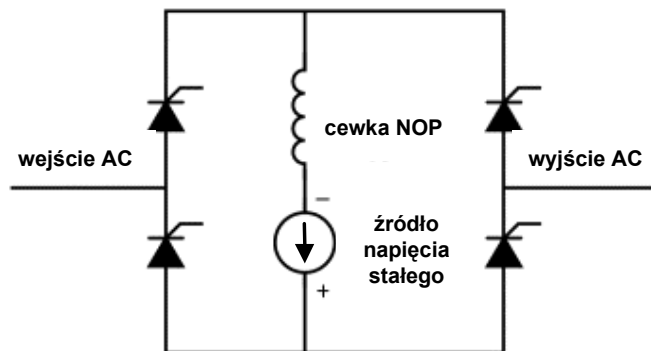
Rys.6. Konstrukcja układu NOPZ typu indukcyjnego z pierścieniem miedzianym pochłaniającym część energii wydzielonej podczas zwarcia w celu zmniejszenia czasu schładzania pierścienia ekranującego [3].

W badaniach układów NOP należałoby określić poziom temperatury, pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych, przy których możliwa byłaby niezawodna i efektywna praca ogranicznika w warunkach znacznej niejednorodności parametrów. Dla nadprzewodników niskotemperaturowych, przy dużej prędkości propagacji zaburzenia rezystywnego rzędu $10\text{-}10^3$ m/s, następuje stosunkowo szybkie wyrównywanie niejednorodności rozkładu temperatury. Jednak dla układów z nadprzewodnikiem wysokotemperaturowym, dla którego prędkość propagacji jest zaledwie rzędu 10^{-2} m/s, zagadnienie pracy przy niejednorodnościach do czasu otwarcia wyłącznika w chwili osiągnięcia zerowej wartości chwilowej prądu, wymaga analizy i pogłębionych badań projektowych.

Analizy wymaga również zagadnienie minimalizacji czasu schłodzenia i powrotu elementu nadprzewodnikowego do pracy znamionowej w sieci, który jest rzędu sekund [19]. Jednym z możliwych rozwiązań jest połączenie równoległe kilku elementów NOP, przy którym zimny element jest dostępny natychmiast po zadziałaniu układu ogranicznika. Wadą tego rozwiązania jest znaczna złożoność i koszt konstrukcji, brak cieplnego sprzężenia pomiędzy elementami i konieczność stosowania układu przełączania.

5. INNE TYPY OGRANICZNIKÓW

Obok omawianych rozwiązań układów NOP, których działanie oparte jest na procesie zanikania nadprzewodzenia, w pracach [8, 9, 14] zaproponowano nadprzewodnikowy ogranicznik prądu w układzie mostkowego prostownika tyrystorowego (rys.7).



Rys.7. Schemat NOP w układzie mostka tyrystorowego.

Cewka nadprzewodnikowa w tym układzie pracuje znamionowo w stanie nadprzewodzenia przy prądzie stałym, nie wnosząc do zabezpieczanej linii żadnej impedancji. Przy pracy zwarciowej nagły wzrost prądu powoduje pojawienie się w obwodzie impedancji cewki nadprzewodnikowej, ograniczającej prąd zwarcia. W powyższym roz-

wiązaniu cewka stale pracuje w stanie nadprzewodzenia i stany przejściowe związane z utratą tego stanu nie są istotne przy analizie pracy układu.

6. STANY PRZEJŚCIOWE NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKÓW PRĄDU

W analizie i projektowaniu układów NOP typu rezystancyjnego i indukcyjnego istotną rolę odgrywa praca elementu nadprzewodnikowego w stanach przejściowych [19]. W stanach tych można wyróżnić trzy fazy czasowe (rys.8):

- 1) praca bezpośrednio przed rozpoczęciem ograniczania prądu,
- 2) narastanie rezystancji od wartości zerowej do maksymalnej,
- 3) praca przy pełnym zaniku nadprzewodzenia aż do zadziałania wyłącznika prądowego.

Element nadprzewodnikowy zwiększa swą rezystancję od zera do znacznej wartości, która może ograniczyć prąd zwarcia. Zachodzący proces

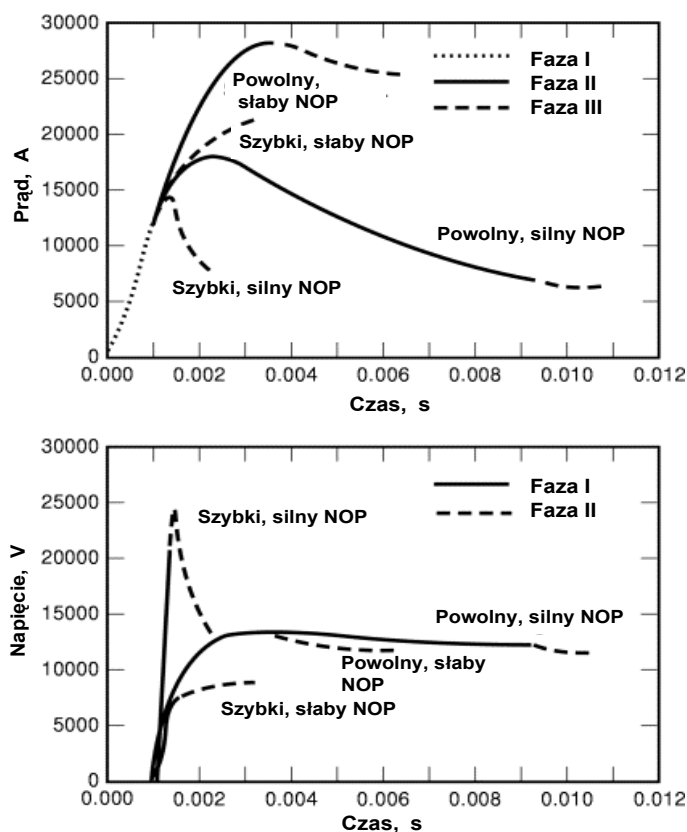
propagacji strefy rezystywnej jest trudny do opisu matematycznego, ze względu na szybko zmieniający się w czasie prąd, rezystancję i napięcie, które są sprzężone z bardzo niejednorodnymi niestacjonarnymi rozkładami indukcji magnetycznej, krytycznej gęstości prądu, temperatury rzeczywistej i krytycznej oraz zmieniającymi się w czasie i przestrzeni przewodnością cieplną i ciepłem właściwym materiału.

W zależności od wartości uzyskiwanej rezystancji elementu nadprzewodnikowego, analizowane układy NOP można podzielić na układy o działaniu słabym lub mocnym. W zależności od szybkości wzrostu tej rezystancji można wyróżnić układy o działaniu szybkim lub powolnym.

Siła i szybkość działania układu NOP zależy od parametrów układu energetycznego jak też od parametrów samego ogranicznika: rezystancji, ciepła właściwego, prądu zadziałania i różnicy pomiędzy temperaturami krytycznymi i rzeczywistymi.

W działaniu układów NOPZ można wyróżnić cztery uproszczone przypadki (rys.8): a) silne szybkie, b) silne powolne, c) słabe szybkie, d) słabe powolne.

Ogranicznik o działaniu silnym i szybkim daje najmniejszą wartość szczytową ograniczanego prądu, jednak powoduje znaczne przepięcia na zaciskach. Osłabienie szybkiego ogranicznika zmniejsza wartości przepięć kosztem zwiększenia wartości ograniczanego prądu. Spowolnienie silnego ogranicznika zwiększy poziom ograniczania prądu i może zwiększyć przepięcia. Zarówno siła i szybkość ogranicznika są pożądane dla jego skutecznego działania, jednak muszą one być optymalnie zaprojektowane, aby zminimalizować poziom przepięć na zaciskach układu. Gdy wymagane jest tylko słabe ograniczanie prądu, wartości przepięć układu mogą być sterowane prędkością działania elementu



Rys.8. Przebiegi prądu i napięcia dla różnych układów NOP w zależności od wartości rezystancji i szybkości jej przyrostu.

nadprzewodnikowego. Istotnym zagadnieniem przy doborze parametrów działania układu jest również sterowanie wydzielaniem energii w warunkach zwarciowych, w celu przeciwdziałania niepożądanym przegrzaniom i uszkodzeniu układu.

7. PERSPEKTYWY ZASTOSOWANIA OGRANICZNIKÓW NADPRZEWODNIKOWYCH W SYSTEMACH ENERGETYCZNYCH

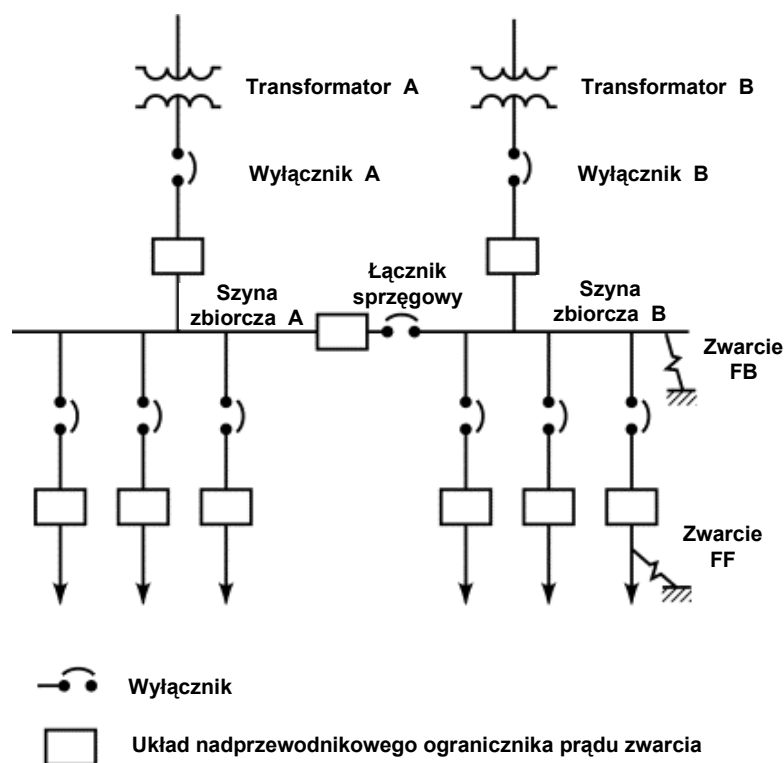
Aktualnie badane są możliwości ograniczania prądów zwarcia przez ograniczniki nadprzewodnikowe, umieszczone szeregowo z klasycznymi wyłącznikami prądowymi w różnych miejscach podstacji energetycznej (rys.9) [14, 17, 19]:

- 1) po stronie wtórnej transformatora B, co ograniczy prąd zwarcia FB na szynach zbiorczych,
- 2) w przewodzie zasilającym, w przypadku zwarcia FF,
- 3) szeregowo z łącznikiem sprzęgowym szyn zbiorczych.

Połączenie szyn zbiorczych transformatorów A i B polepsza możliwość regulacji napięcia obciążenia i ogólną niezawodność układu, kosztem znacznie podwyższonych prądów zwarcia, pochodzących od obu transformatorów. W przypadku takiego zwarcia FB szyn zbiorczych, ogranicznik prądowy współpracujący z klasycznym łącznikiem sprzęgowym może zapewnić dalszą bezpieczną pracę układu.

Dzięki zastosowaniu układów NOP do ograniczania prądów zwarcia do niskiego poziomu, można będzie zwiększyć bezpieczeństwo, niezawodność i sprawność układu elektroenergetycznego, jak też poprawić jakość przesyłanej energii elektrycznej. W związku z pojawieniem się wielu konkurencyjnych dostawców na rynku energii elektrycznej, postępująca deregulacja energetyki wymusza konieczność łączenia niezależnych producentów energii oraz jej importu. Przy włączeniu do sieci układów NOP, rosnące wartości prądów zwarcia połączonych układów elektroenergetycznych nie będą wymagały stosowania transformatorów i dławików o zwiększonej impedancji, budowy nowych podstacji przesyłowych lub dostosowania ich wyposażenia do znacznie większych prądów zwarcia. Nie będzie też konieczne sekcjonowanie układu elektroenergetycznego dla zapobieżenia nadmiernym wartościom prądów zwarcia. Zabezpie-

czenie przed nadmiernymi prądami zwarcia umożliwi z kolei wprowadzenie do układu elektroenergetycznego innych urządzeń nadprzewodnikowych: generatorów, silników, transformatorów i kablowych linii przesyłowych, które są wrażliwe na działanie prądów zwarcia.



Rys.9. Możliwości lokalizacji układów NOP w podstacji energetycznej.

Obecnie nie opracowano jeszcze standardów, które układy nadprzewodnikowych ograniczników prądu zwarcia, podobnie jak transformatory i klasyczne wyłączniki prądowe, powinny spełniać w celu zastosowania ich w układach użytkowych, spełniających wymagania bezpieczeństwa (zagrożenia związane ze znacznymi polami rozproszenia) oraz niezawodności i dostępności, przy pracy zwarciowej, znamionowej i przy przeciążeniach. Układy NOP powinny mieć jednak możliwość natychmiastowej reakcji na wystąpienie zwarcia w sieci, szybkiego (poniżej jednego okresu) ograniczania prądu zwarcia do pożądanej wartości, w tym również ograniczania prądu do wartości zerowej w sytuacjach krytycznych. Powinny także mieć zdolność ograniczania serii następujących po sobie zwarć, samoczynnego powrotu (bez konieczności obsługi) do początkowego stanu pracy znamionowej po zadziałaniu. Ponadto powinny charakteryzować się zwartą budową, niewielką masą, niezawodnością działania i niskim kosztem [1, 16, 17].

Zastosowania układów NOP na skalę przemysłową wiązałyby się również z koniecznością rozwiązania złożonych problemów, specyficznych dla technologii urządzeń nadprzewodnikowych. Zagadnienia te są dopiero na etapie badań naukowych, projektów technologicznych będących w fazie opracowywania oraz nielicznych jeszcze ukończonych i wdrożonych konstrukcji.

8. INFORMACJE O PROJEKTOWANYCH I ZREALIZOWANYCH NADPRZEWODNIKOWYCH OGRANICZNIKACH PRĄDU

W ostatnich latach zbudowano kilka przemysłowych rozwiązań układów NOP w USA, m.in. przez firmę General Atomic [1, 7] (ograniczniki typu rezystancyjnego o napięciach znamionowych 2,4 kV oraz 15 kV), a także w Japonii [3] (ograniczniki o napięciach 6,6 kV oraz 22 kV). W Europie zrealizowano lub realizuje się kilka dużych i szereg małych projektów nadprzewodnikowych ograniczników prądu [15].

Firma szwajcarsko-szwedzka ABB zainstalowała w elektrowni wodnej w Szwajcarii indukcyjny trójfazowy układ NOP o mocy 1,2 MVA [18]. Następnie testowała ona bardziej zwarty prototyp o mocy 1,6 MVA typu rezystancyjnego przy użyciu nadprzewodnika wysokotemperaturowego z materiału Bi-2212 zastosowanego też wcześniej w jednostce 1,2 MVA. Objętość urządzenia zmniejszyła się do ok. 25% objętości jednostki 1,2 MVA typu indukcyjnego. Firma Siemens (Niemcy) badała ograniczniki typu rezystancyjnego [5]. Skoncentrowała się na pracach nad elementami przełączającymi o wymiarach 20 x 20 cm², pokrytych cienkimi (ok. 1,2 μm) warstwami nadprzewodnika YBCO. Elementy przełączające wykazywały wartości krytycznej gęstości prądu ponad 10⁹ A/m² z gęstościami mocy przekraczającymi 3 MW/m². Model o mocy 100 kVA z pięcioma elementami przełączającymi posłużył do zbudowania jednostki trójfazowej o mocy 1 MVA, która została pomyślnie przetestowana. Planowany jest do testowania w sieci elektroenergetycznej układ trójfazowy o mocy 30 MVA. W celu znacznego zredukowania strat przemiennoprądowych, firma Siemens projektuje układ z wieloma elementami nadprzewodnikowymi połączonymi równolegle. Projekt kierowany przez firmę ACCEL [15] ma na celu zbudowanie i testowanie w 2002 r. jednostki demonstracyjnej o mocy 10 MVA ogranicznika typu rezystancyjnego opartego na materiałach Bi2212 i YBCO.

W ramach projektu BYFAULT (Barcelona, Hiszpania) [4] badany jest hybrydowy układ ogranicznika, w którym ograniczenia prądu dokonują sztabki

YBCO, które zwierają uzwojenie wtórne transformatora. Projekt ten, wspierany przez Unię Europejską, ma na celu zbudowanie jednostki o mocy 17 MVA.

We współpracy Uniwersytetu w Budapeszcie, Ben Gurion University (Izrael) oraz IPHT Jena (Niemcy) [15] opracowywany jest projekt stanowiska do testowania generatora synchronicznego o mocy 12 kVA zabezpieczonego wysokotemperaturowym ogranicznikiem prądu. Jest on związany z przygotowywanym projektem „mini elektrowni” o mocy ok. 10 kVA, w której skład wchodziłyby wyłącznie urządzenia zbudowane z nadprzewodników wysokotemperaturowych: generatora, transformatora, indukcyjnego zasobnika energii, wirującego koła zamachowego (opartego na łożyskach nadprzewodnikowych), silnika oraz ogranicznika prądu.

Badania wysokotemperaturowych ograniczników prądu są również prowadzone w Wielkiej Brytanii (IRC in SC – Cambridge, EA Technology), we Włoszech (CISE S.p.A.), Francji (GEC Alstom) i Niemczech (Forschungszentrum Karlsruhe).

LITERATURA

1. Bobrowski W., Nadprzewodniki w elektrotechnice, Wiadomości Elektrotechniczne, Rok LXIX, 2001 nr 7-8, str. 280-288.
2. Cave J. R., et al., Testing and modelling of inductive superconducting fault current limiters. IEEE Trans. Appl. Supercond., 7: 832-835, 1997.
3. Fukagawa H., Matsumura T., Ohkuma T., Sugimoto S., Genji T., Uezono H., Current state and future plans of fault current limiting technology in Japan, CIGRE'2000, 13-208.
4. Granados X., Puig T., Teva J., et al., Quench Behavior of the Switching Elements of a Hybrid HTS Current Limiter, IEEE Trans. Appl. Supercond. 11 (2001) 2406-2409.
5. Gromoll B., et al., Resistive current limiters with YBCO films, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 7, pp. 828-831, 1997.
6. Hara T., et al., Development of a new 6.6kV/1500A-class superconducting fault current limiter for electric power systems. IEEE Trans. Power Delivery, 8, pp. 182-192, 1993.
7. Hassenzahl W.V., Superconductivity, an Enabling Technology for 21st Century Power Systems?, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, 2001, pp. 1447-1453.
8. Hoshino T., Salim K.M., Nishikawa M., Muta I., Nakamura T., DC Reactor Effect on Bridge Type Superconducting Fault Current Limiter During Load Increasing, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 11, 2001, pp. 1944-1947.
9. 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.
10. Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Kozak S., Wojtasiewicz G., Postępy w zastosowaniach nadprzewodników, Prace Nauk. Inst. Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnol. Polil. Wrocławskiej nr 37, Konferencje nr 12, 2000, str.261-268.

11. Janowski T., Recent development and perspectives of superconductivity applications, The 3rd Int. Conf. Electromagn. Devices and Processes in Environment Protection ELMECO, Nałęczów, 4-6 June 2000, pp.166-173.
12. Janowski T., Surdacki P., Konstrukcje i zastosowania nadprzewodnikowych ograniczników prądu, Prace Trzeciej Krajowej Konferencji "Postępy w Elektrotechnice Stosowanej" PES-3, PTETiS, Wyd. Elektr. Pol. Warsz., Zakopane Kościelisko, 18-22.06.2001, str. 397-404.
13. Kado H., M. Ichikawa, Performance of a high-Tc superconducting fault current limiter, IEEE Trans. Appl. Supercond. 7, 993-996, 1997.
14. Leung E., Surge protection for power grids, IEEE Spectrum, 34 (7): 26-30, 1997.
15. Mikkonen R., Highlights of SC Power Applications in Europe, 17th Int. Conf. on Magnet Technology, CERN, Geneva, 24-28 Sept. 2001, TUIN2B2-03, p. 64.
16. Noe M., Oswald B.R., Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems, Applied Superconductivity Conference, Palm Desert (USA) 1998.
17. Norris W.T., Power A., Fault current limiters using superconductors, Cryogenics, vol. 37, 1997, No. 10, pp. 657-665.
18. 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.
19. 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.
20. Sjöström M., Politano D., Technical and Economical Impacts on a Power System by Introducing an HTS FCL, IEEE Trans. on Applied Supercond., vol. 11, 2001, pp. 2042-2045.
21. Steurer M., Froehlich K., Current limiters –state of the art, Fourth Workshop & Conference on EHV Technology, Indian Institute of Science, Bangalore, India, 15-16 July 1998.
22. Surdacki P., Janowski T., Wojtasiewicz G., Investigation of an inductive high-Tc superconducting fault current limiter experimental model, Proc. of the 5th European Conference on Applied Superconductivity, EUCAS, Copenhagen, Technical University of Denmark, August 26-30, 2001, E4.2-16, pp. 165-166.
23. Verhaege T., et al., Experiments with a high voltage (40 kV) superconducting fault current limiter, Cryogenics, no. 36, 1996, pp. 521-526.

Rękopis dostarczono, dnia 08.03.2002 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Krystyn Pawluk

STATE-OF-ART AND APPLICATION PROSPECTS FOR SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITERS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

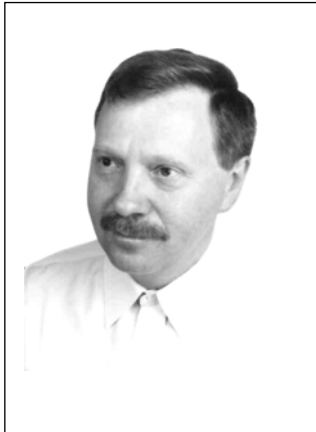
T. JANOWSKI, P. SURDACKI

ABSTRACT *This paper presents the review of the contemporary concept, design and technology approaches to the superconducting fault current limiters (SFCL). The essential features of each type of the SFCL have been highlighted and the research problems to solve in the near future have been suggested. The SFCL device application advantages and the ongoing and accomplished projects have been summarized.*

Keywords: *superconducting fault current limiter (SFCL), superconducting power devices, high temperature superconductors (HTS).*

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Janowski ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Łódzkiej (1961). Uzyskał stopień doktora nauk technicznych (1968) i doktora habilitowanego (1991) na Wydziale Elektrycznym tejże Politechniki. Tytuł naukowy profesora uzyskał w 1994 r. Od ukończenia studiów pracował w Katedrze Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Politechniki Łódzkiej a od 1968 roku w Politechnice Lubelskiej. Obecnie pracuje na stanowisku profesora zwyczajnego i jest dyrektorem Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii w Politechnice Lubelskiej oraz kierownikiem Pracowni Kriomagnesów w Zakładzie Badań Podstawowych Elektrotechniki w IEL w Warszawie. Zajmuje się zastosowaniem nadprzewodników w elektro-technice.





Dr inż. Paweł Surdacki ukończył studia (1981) i uzyskał stopień doktora nauk technicznych (1993) na Wydziale Elektrycznym Politechniki Lubelskiej. Od ukończenia studiów pracował w Zakładzie a następnie Katedrze Podstaw Elektrotechniki, od 1994 r. pracuje jako adiunkt w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Lubelskiej. Jest autorem lub współautorem około siedemdziesięciu publikacji naukowych. Zajmuje się silnoprądowymi urządzeniami nadprzewodnikowymi oraz ich zastosowaniami energetycznymi. Jest członkiem m.in. PTZE, PTETiS oraz International Compumag Society, a także komitetów organizacyjnych International Conference on Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO I Seminarium "Zastosowania Nadprzewodników".