

## 모의전력계통에 적용된 두 개의 자기결합 회로를 갖는 직렬연결형 초전도 전류제한기의 전류제한 특성 분석

고석철<sup>1</sup>, 이신원<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> 공주대학교 산학협력단

<sup>2</sup> 중원대학교 컴퓨터시스템공학과

### Analysis on Current Limiting Characteristics of Series Connection-type SFCL with Two Magnetically Coupled Circuits Applied into a Simulated Power System

Seok-Cheol Ko<sup>1</sup> and Shin-Won Lee<sup>2,a</sup>

<sup>1</sup> Industry-University Cooperation Foundation, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea

<sup>2</sup> Department of Computer System Engineering, Jungwon University, Goesan 367-805, Korea

(Received October 16, 2012; Revised November 21, 2012; Accepted December 7, 2012)

**Abstract:** The series connection-type superconducting fault current limiter (SFCL) with two magnetically coupled circuits was suggested and its effectiveness through the analysis on the current limiting and recovery characteristics was described. The fault current limiting characteristics of the proposed SFCL as well as the load voltage sag compensating characteristics according to the winding direction were investigated. To confirm the fault current limiting and the voltage sag suppressing characteristics of the this SFCL, the short-circuit tests for the simulated power system with the series connection-type SFCL were carried out. The series connection-type SFCL designed with the additive polarity winding was shown to perform more effective fault current limiting and load voltage sag compensating operations through the fast quench occurrence right after the fault appears and the fast recovery operation after the fault removes than that with the subtractive polarity winding.

**Keywords:** The series connection-type, Superconducting fault current limiter (SFCL), Two magnetically coupled circuits, Additive polarity winding, Subtractive polarity winding

#### 1. 서 론

초전도 사고전류제한기는 지락사고와 단락사고 등으로 인한 전력계통의 고장전류 문제를 해결할 수 있는 새로운 개념의 보호기로서 여러 분야에서 많은 연구가 진행 중에 있다 [1-9]. 지금까지 연구된 초전도 전류제한기는 일반적으로 고장이 발생할 경우 고장전류 감지와 동시에 고장전류 제한동작이 동시에 이루어지는 일체형이기 때문에 신속한 전류제한 동작이

a. Corresponding author; [swlee@jwu.ac.kr](mailto:swlee@jwu.ac.kr)

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

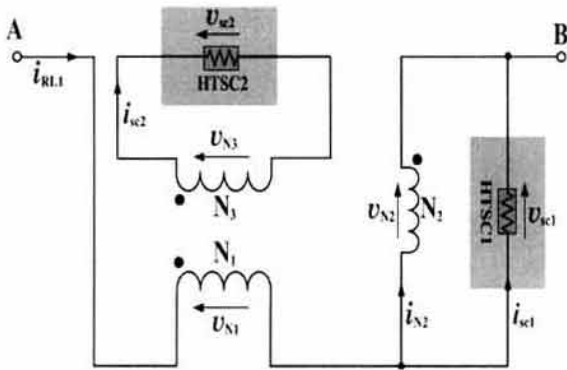


Fig. 1. Structure of series connection-type SFCL with two magnetically coupled circuits.

가능한 장점을 가지고 있으나, 초전도 전류제한기 자체가 고장전류를 모두 감당해야 되는 단점을 가지고 있다. 이에 대한 해결방안으로 자속구속형 초전도 전류제한기가 거론되었으며, 지금까지 발표된 연구는 고장 발생 시 여러 타입의 초전도 전류제한기 자체의 전류 제한 특성 및 회복 특성에 대한 분석이 이루어졌을 뿐, 계통에 자속구속형 초전도 전류제한기가 도입되었을 경우 고장전류를 포함하여 건전선로에 미치는 영향에 대한 고찰은 이루어지지 않고 있다. 또한, 전류제한기를 구성하는 초전도 소자의 전력부담을 경감하기 위한 방안으로 사고 시 사고 크기에 따라 피크전류를 분담하는 기능을 갖는 연구들이 진행되어 왔다. 한 개의 초전도 소자를 변압기 권선을 통해 분리·연결하는 자속구속형 초전도 전류제한기 모델과 트리거부분과 리미팅 부분으로 분리시켜 동작할 수 있는 초전도 전류제한기 모델, 그리고 두 개의 초전도 소자를 사용한 코일의 자기결합 방식의 전류제한기 모델들이 제안되어 왔으며, 기 발표된 논문들은 전류제한기의 자체적인 특성에 대해서만 분석이 이루어져 왔다 [10-12].

따라서, 본 논문에서는 고장 발생 초기 고장전류의 크기에 따라 피크전류 제한 기능이 부가된 두 개의 자기결합 회로를 갖는 직렬연결형 초전도 전류제한기를 제안하였으며, 제안된 초전도 전류제한기가 고장선로와 건전선로로 구성된 모의전력 계통에 도입되었을 경우 고장 발생 시 각 선로에 미치는 동작 특성을 분석하였다. 고장 발생 전후 초전도 소자의 감극결선과 가극결선의 권선방향에 따른 사고전류 제한과 회복 특성, 부하전압 보상 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 실험 방법

강자성체 두 개의 철심에 코일을 감아 사용한 두 개의 자기결합 회로를 갖는 직렬연결형 초전도 전류제한기의 구성도를 그림 1에 도시하였다. 제안한 초전도 전류제한기는 사고전류를 제한하는 기능과 피크전류를 제한하는 두 가지 역할을 수행하도록 설계되었다. 동작원리는 기본적으로 기존에 보고된 코일들 간

Table 1. Design parameters of a series connection-type SFCL with two magnetically coupled circuits.

Parameter	Value	Unit
Power Resistor $R_s$	1.2	$\Omega$
Sound Line Resistor $R_2$	0.108	$\Omega$
Sound Line Reactance $L_2$	2.655	mH
Road Resistor $R_{L2}$	10.3	$\Omega$
Fault Line Resistor $R_1$	0.104	$\Omega$
Fault Line Reactance $L_1$	2.562	mH
Road Resistor $R_{L1}$	51.5	$\Omega$
Turn number of $N_1$	60	Turns
Turn number of $N_2$	15, 30	Turns
Turn number of $N_3$	15	Turns
Critical Temperature	87	K
Critical Current	27	A

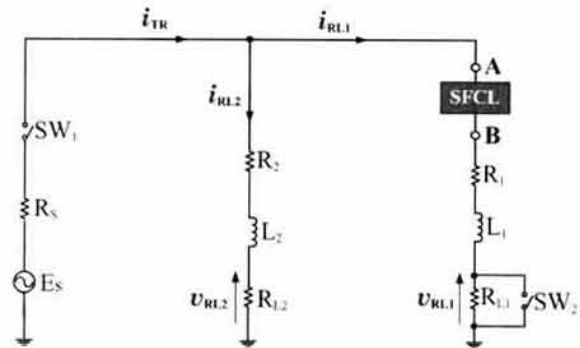


Fig. 2. Experimental circuit with fault and sound lines.

직렬 연결, 또는 병렬 연결된 자속구속형 초전도 전류제한기와 같다 [7]. 사고 발생 전 초전도 소자는 초전도 상태에 있기 때문에 영저항값을 유지하고 있으며, 각 코일에 흐르는 전류에 의해 발생하는 철심 내부의 자속은 서로 상쇄되기 때문에 3차 코일을 포함한 두 코일에는 영전압이 유지되며 이로 인해 초전도 전류제한기 전체전압도 영전압을 유지하게 된다. 사고가 발생할 경우, 사고전류에 의한 렌치 발생 때문

에 코일 2와 병렬로 연결된 초전도 소자 1의 저항발생이 두 코일들로부터 자속이 상쇄되지 않고 발생된다. 이것은 3차 코일을 포함하여 두 개의 코일에 전압이 유기되고 결과적으로 초전도 전류제한기의 첫 번째 사고 전류제한 작동에 기여한다. 게다가, 철심에 크게 유기된 자속이 초기 일시적인 사고전류의 요소가 큰 경우, 제 3차 코일에 전압이 크게 유기되는 것을 기대할 수 있다. 만약 3차 코일에 연결된 초전도 소자 2로 흐르는 전류가 큰 사고전류에 의해 첫 번째로 켄치된 후에 그의 임계전류를 초과한다면 두 번째 사고 전류 제한 동작이 순차적으로 코일 2와 병렬로 연결된 초전도 소자 1에서 이루어질 것이다.

사용한 자속 구속형 초전도 전류제한기에 대한 설계 파라미터를 표 1에 나타내었다. 3차 코일을 포함한 이 초전도 전류제한기를 구성하는 두 개의 코일들은 누설전류를 줄이기 위해 같은 철심에 밀집하게 감았다. 똑같은 임계전류를 갖는 YBCO 박막은 초전도 소자로서 사용되었으며, 이는 코일 2와 3에 각각 연결되어 있다. 초전도 소자는 임계온도 87 K를 갖는 YBCO 박막을 사용하였으며, 켄치 시 열 발생으로부터 박막소자를 보호하기 위해 200 nm의 두께로 Au 층을 증착하였다. 임계전류값은  $1 \mu\text{W}/\text{cm}$  기준 전압값을 기준으로 27 A로 측정되었다. 고장 발생을 모의하기 위해 그림 2와 같이 실험 회로를 구성하였다. 스위치 SW<sub>1</sub>을 투입한 후 고장주기 동안 스위치 SW<sub>2</sub>를 작동하여 5주기 동안 단락사고를 유발시켜 선로를 포함한 3개의 코일, 초전도 소자 1, 2에 흐르는 전류와 유기전압을 측정하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3(a)는 초전도 전류제한기가 설치되어 있지 않은 모의 실험계통에 고장이 발생할 경우, 각 피더 전류 ( $i_{RL1}$ ,  $i_{RL2}$ )와 부하전압 ( $v_{RL1}$ ,  $v_{RL2}$ )을 각각 보여준다. 고장 발생 동안 고장난 선로에서는 고장전류의 급격한 증가를 보이며, 건전 선로에서의 부하전압이 고장 발생 전에 비해 저하되는 것을 확인할 수 있다.

그림 3(b)와 3(c)는 가극결선인 경우, 두 개의 자기 결합을 갖는 직렬연결형 초전도 전류제한기의 전류제한 및 부하전압 보상특성을 보여준다. 그림 3(b)는 코일 2의 권선수를 30 Turn으로 하고 전원전압을 120 V를 인가했을 때의 파형을 보여주고, 그림 3(c)는 2차 코일의 권선수를 15 Turn으로 하고 전원전압을

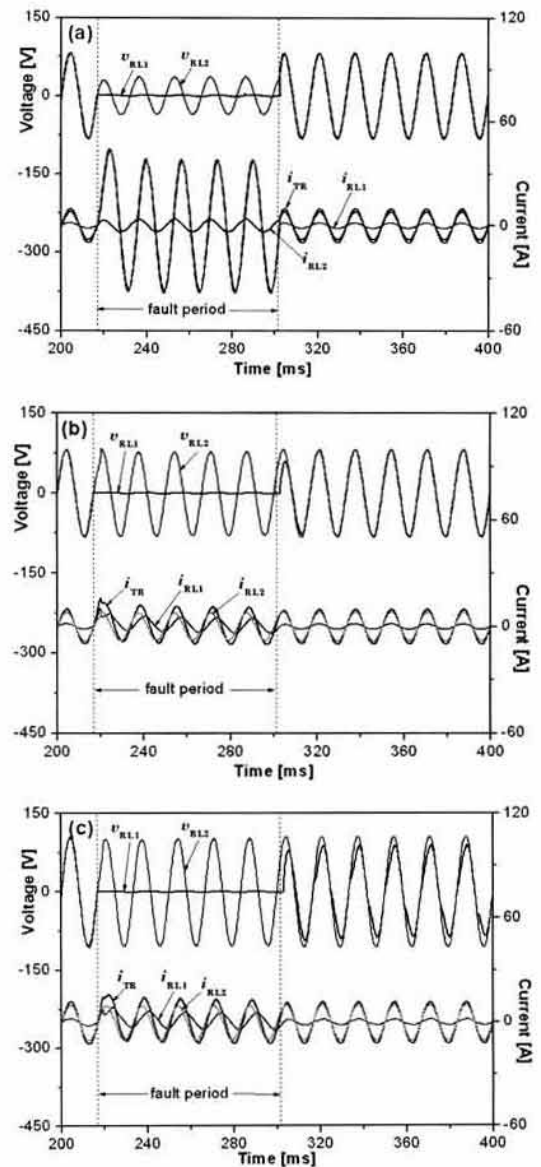


Fig. 3. Load voltage and fault current waveforms of fault and sound lines in case of the additive polarity winding due to the power voltage amplitudes. (a) without SFCL, (b) 120 V ( $N_2 = 30$  turns), (c) 160 V ( $N_2 = 15$  turns).

160 V를 인가했을 때의 전류제한 및 부하전압 보상 특성을 보여준다. 고장 발생 동안 부하전압에서는 건전 선로의 부하전압 ( $v_{RL2}$ )이 보상되어 고장 전의 전압을 유지하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 고장 발생 초기 고장전류의 피크 ( $i_{RL1}$ )가 감소되어 고장 선로의 고장전류가 제한되는 것을 알 수 있다.

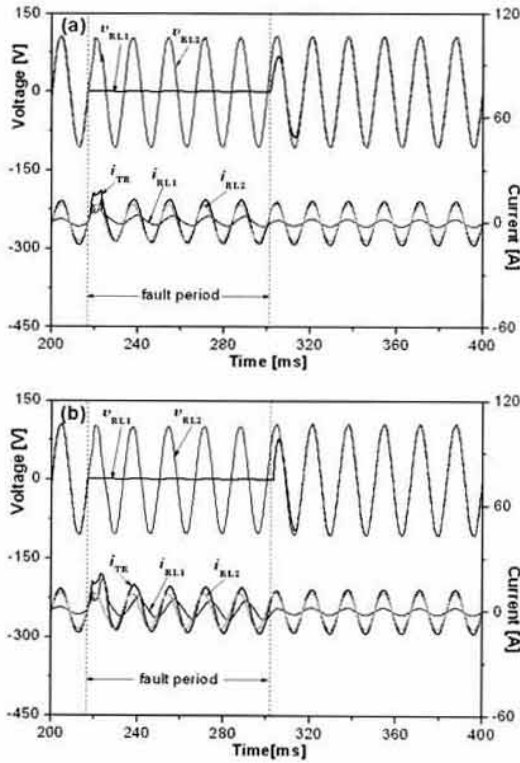


Fig. 4. Fault current limiting and load voltage compensating characteristics of fault and sound lines with series connection-type SFCL using two magnetically coupled circuits ( $N_2=30$  Turns). (a) The additive polarity winding, (b) the subtractive polarity winding.

그림 4는 결선방향에 따른 두 개의 자기결합을 갖는 직렬연결형 초전도 전류제한기의 전류제한과 부하전압 보상 특성을 보여준다. 고장 발생 시 감극결선 및 가극결선에서 고장전류는 반주기까지 증가하다가 그 이후부터 고장전류가 제한되는 것을 알 수 있다. 또한, 고장전류의 피크 ( $i_{m1}$ )는 감극결선보다 가극결선에서 작게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 건전선로에서의 부하전압 ( $v_{RL2}$ )은 고장 발생 동안 감극결선보다 가극결선에서 더 고장 전의 전압크기로 보상되는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 2차 코일의 권선수가 30 Turn일 경우, 두 개의 자기결합을 갖는 직렬연결형 초전도 전류제한기의 두 코일의 결선방향에 따른 고장전류 제한과 회복 특성을 비교하였다. 고장 발생 직후와 고장 제거 후 초전도 전류제한기를 구성하는 두 코일의 전압, 초전도 소자 1, 2의 전압, 3차 권선의 전압, 각 전류파형

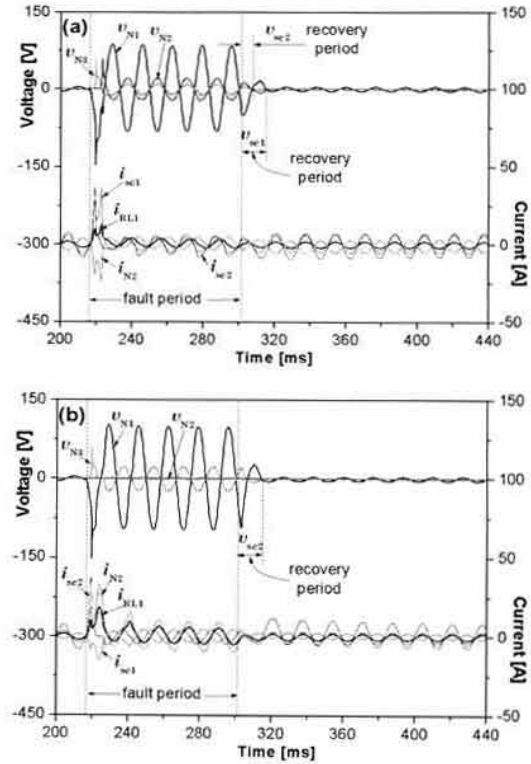


Fig. 5. Fault current limiting and recovery characteristics of series connection-type SFCL with two magnetically coupled circuits ( $N_2=30$  Turns). (a) The additive polarity winding, (b) the subtractive polarity winding.

을 나타내었다. 가극결선한 경우 코일 2의 전류 ( $i_{M2}$ )가 반전되는 것을 관찰할 수 있으며, 감극결선한 경우 초전도 소자 1에 흐르는 전류 ( $i_{s1}$ )가 반전되는 것을 볼 수 있다. 강자성체 철심의 각 코일에 유기되는 전압 ( $v_{M1}$ ,  $v_{M2}$ ,  $v_{M3}$ )과 초전도 소자 1, 2에 유기되는 전압 ( $v_{s1}$ ,  $v_{s2}$ )은 감극결선한 경우가 가극결선한 경우보다 크게 발생되었다. 고장 제거 후 초전도 소자의 상전도 상태에서 초전도 상태로 회복되는 특성은 초전도 소자 2의 경우에 있어서 감극결선 (13.36 ms)의 경우보다 가극결선 (4.99 ms)에서 회복시간이 짧게 되는 것을 비교할 수 있다. 또한, 2차 코일의 권선수가 30 Turn일 때, 감극결선의 경우보다 가극결선시 초전도 소자 1, 2가 순차적으로 켜치되어 제한한 초전도 전류제한기의 피크 전류를 제한하는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 2차 코일의 권선수가 15 Turn일 경우, 두 개의 자기결합을 갖는 직렬연결형 초전도 전류제한기

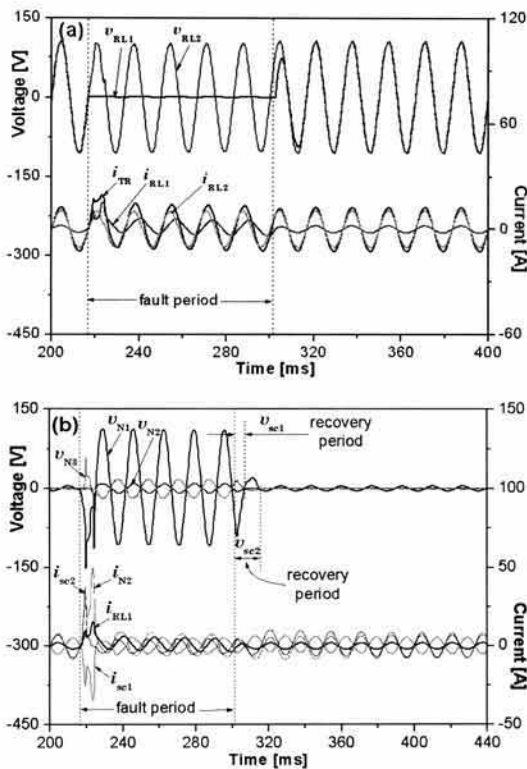


Fig. 6. Current-voltage curves in case of the subtractive polarity winding ( $N_2 = 15$  Turns). (a) Fault current limiting and load voltage compensating characteristics in a fault and sound lines, (b) fault current limiting and recovery characteristics in series connection-type SFCL with two magnetically coupled circuits.

의 감극결선 시 고장전류 제한과 부하전압 보상 특성 및 회복 특성 곡선을 보여준다. 이 경우 초전도 소자 1에 흐르는 전류 ( $i_{sc1}$ )가 반전되는 것을 볼 수 있다. 초전도 소자 1, 2가 순차적으로 켜치되어 제한한 초전도 전류제한기의 피크 전류를 제한하는 것을 볼 수 있다. 고장 제거 후 초전도 소자의 상전도 상태에서 초전도 상태로 회복되는 특성은 초전도 소자 1 (5.40 ms)의 경우가 초전도 소자 2 (13.98 ms)의 경우보다 회복 시간이 짧게 되는 것을 비교할 수 있다. 고장 발생 시 고장전류는 반주기까지 증가하다가 그 이후부터 고장전류 ( $i_{RL1}$ )가 제한되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 고장 발생 동안 부하전압에서는 건전 상 부하전압 ( $v_{RL2}$ )이 보상되어 고장 전의 전압을 유지하고 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 두 개의 자기결합을 갖는 직렬연결형 초전도 전류제한기의 전력계통 적용에 따른 특성을 단락발생 모의실험을 통해 분석하였다. 먼저, 초전도 전류제한기를 설치하지 않았을 경우와 입력전원을 증가했을 경우, 부하전압 보상 특성을 분석하였다. 또한 1차 코일과 2차 코일 간의 결선방향에 따른 고장 전류제한 및 부하전압 보상 특성, 회복 특성 등을 분석하였다. 초전도 소자 1, 2가 순차적으로 켜치되어 고장 발생 초기 피크전류를 분담하여 제한한 후 각각의 회복특성을 살펴보았다. 2차 코일의 권선수가 15 turns인 감극결선일 경우, 부하전압 보상특성과 회복 특성을 분석하였다. 결선방향을 가극으로 결선한 경우가 감극으로 결선한 것보다 전류제한 특성, 부하전압 보상 특성, 회복 특성이 향상됨을 모의계통 실험을 통해 확인할 수 있었다.

#### REFERENCES

- [1] H. Kadoe and M. Ichikawa, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 7, 993 (1997).
- [2] S. H. Lim, Y. S. Cho, H. S. Choi, and B. S. Han, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 17, 1807 (2007).
- [3] S. H. Lim and J. C. Kim, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 18, 729 (2008).
- [4] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, *Phys. C*, 416, 34 (2004).
- [5] S. H. Lim, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 17, 1895 (2007).
- [6] S. H. Lim, *J. Electr. Eng. Technol.*, 3, 213 (2008).
- [7] S. H. Lim, J. F. Moon, and J. C. Kim, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 19, 1900 (2009).
- [8] S. H. Lim, *Phys. C*, 470, 1631 (2010).
- [9] S. H. Lim and I. K. You, and J. C. Kim, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 21, 1275 (2011).
- [10] S. C. Ko, S. H. Lim, and T. H. Han. *Phys. C, Article in Press* (2012).
- [11] T. H. Han and S. H. Lim. *J. KIEEME*, 24, 47 (2011).
- [12] S. H. Lim, S. C. Ko, and T. H. Han. *Phys. C, Article in Press* (2012).