

## 코일의 직·병렬결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 동작전류 증가

(Increase of Operational Current in a SFCL using Series or Parallel Coupling of Coils)

임성훈\*

(Sung-Hun Lim)

### 요 약

본 논문에서는 두 코일의 직·병렬결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 분석하였다. 구조는 병렬 또는 직렬로 연결된 두 코일과 두 코일 중 하나와 직렬 또는 병렬로 연결되는 초전도 소자로 구성된다. 동작원리는 사고전에는 초전도 소자는 초전도 상태에 있어 병렬 또는 직렬로 연결된 두 코일에 의해 발생하는 자속은 서로 상쇄되어 두 코일에 유기되는 전압이 제로를 유지하게 되지만 사고가 발생할 경우 초전도 소자의 저항이 발생되어 두 코일에서 발생하는 자속은 더 이상 상쇄되지 않게 된다. 따라서 두 코일에 전압이 유기되고 이에 따라 사고전류를 제한하게 된다. 단락실험을 통해 두 코일의 직·병렬결합에 따른 사고전류제한 특성을 분석하였으며 분석을 통해 사고전류제한기의 동작전류를 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

The fault current limiting characteristics of superconducting fault current limiter (SFCL) using magnetic coupling of two coils were investigated. This SFCL consists of a high-TC superconducting (HTSC) element and two coils with series or parallel connection on the same iron. In normal time, the inner magnetic fluxes generated by two coils are canceled in case that the HTSC element keeps superconducting state. However, in case that the resistance of the HTSC element happens by a short-circuit, the magnetic fluxes, not cancelled, induce the voltages across two coils and the fault current can be limited by the impedance of this SFCL.

This SFCL has the merit that the operational current of SFCL can be increased higher than the critical current of the superconducting element by adjusting the inductance ratio between two coils. To confirm its operation, the circuit for the fault simulation was constructed. From the measured voltage and current of the SFCL, it was confirmed that the operating current of this SFCL increased more than that of HTSC element's independent operation.

Key Words : Fault Current Limiting Characteristics, Superconducting Fault Current Limiter(SFCL), Magnetic Coupling, Inductance Ratio

\* 주저자 : 숭실대학교 전기공학부

Tel : 02-828-7268, Fax : 02-817-7961, E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr

접수일자 : 2007년 5월 30일, 1차심사 : 2007년 6월 5일, 심사완료 : 2007년 6월 22일

## 1. 서 론

해마다 증가되고 있는 전력요구와 전력설비 증가로 단락전류를 포함한 송전용량이 증가하고 있다. 특히 단락전류의 증가는 계통에 관련된 전력설비의 보호기준을 강화시켜야 되는 부담을 주고 있다. 단락사고시 대표적인 보호기기인 차단기의 경우 단락전류의 증가로 인한 용량초과로 단락용량이 높은 차단기로 교체를 시도하고 있기도 하다. 하지만 단락용량이 높은 차단기로의 교체는 차단기 교체에 따른 비용증가와 용량증대에 따른 기술적인 한계를 가지고 있다. 고임피던스 전력설비나 직렬리액터를 설치하는 방안도 있으나 평상시 손실발생과 계통에 무효전력을 발생시키게 되어 계통에 영향을 미치게 된다. 그 밖에 전력밀집지역에서는 모선분리를 실시하고 있으나, 이 또한 인접계통에 과부하나 전압변동과 같은 전력계통의 안정도 저하등을 감수해야 하며, 효과적인 분리방안을 검토해야 한다[1-2].

이러한 기존방안들의 문제점을 해결하고 기존 계통의 변경없이 신속히 단락전류를 감소시킬 수 있어 단락사고로부터 계통을 보다 효과적으로 보호할 수 있는 초전도 사고전류제한기에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[3-4]. 이러한 초전도체의 고유특성인 퀸치로 인한 저항발생을 이용한 초전도 사고전류제한기는 별도의 사고감지없이 사고전류 검출과 신속한 제한동작이 가능하며 평상시 계통에 미치는 영향이 없다는 점, 자동복귀 기능과 환경 친화적이라는 점이 보다 큰 매력이 되고 있다[3-6].

그러나 실계통에 초전도 사고전류제한기를 적용하기 위해서는 초전도 단위소자들의 직병렬 연결을 통한 용량증대가 요구되고 있으며 재료적인 제약등으로 단위소자가 갖는 통전용량과 한류저항을 증가시키기 위한 방안이 요구되고 있다[6-7].

본 논문에서는 직렬 또는 병렬로 연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 분석하였다. 이를 위해 고온초전도 소자와 리액터를 설계 제작하였으며, 모의단락실험장치를 구성하여 모의단락실험을 수행하였다. 모의단락실험과 등가회로 분석을 통해 단위초전도 소자의 저항발생과 사고전류 제한특성을 단위소자가

단독으로 동작할 경우와 비교하였다.

분석과 실험을 통해 직렬 또는 병렬로 연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류 제한기는 단위초전도 소자가 갖는 임계전류보다 큰 전류에서 사고전류제한이 가능한 특징을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 구조 및 동작원리

두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기는 철심을 매개로 직렬 또는 병렬로 연결되는 두 개의 코일과 고온초전도 소자로 구성된다. 이때 고온초전도 소자는 두 코일중에 하나와 직렬 또는 병렬로 연결된다.

평상시에는 초전도 소자는 초전도 상태로 영저항을 유지하게 되며 이로 인해, 두 코일에서 발생하는 자속은 서로 상쇄된다. 따라서 각 코일의 전압은 유기되지 않게 되고 단락회로로 동작하게 된다. 반면에 단락사고가 발생되어 두 코일에 흐르는 전류가 증가될 경우 초전도 소자에 흐르는 전류도 증가하게 되며, 이때 초전도소자의 퀸치로 저항이 발생하게 되면 두 코일에서 발생하는 자속은 더 이상 상쇄되지 않게 되고 두 코일에 전압이 유기됨으로써 사고전류가 제한되게 된다. 이때 두 코일의 인덕턴스 비를 조절함으로써 사고시제한기 동작전류를 조절할 수 있으며, 초전도 소자가 가지고 있는 임계전류값보다 큰 전류값에서 사고전류 제한동작이 가능하게 된다.

### 2.2 등가회로 분석

그림 1은 두 코일의 직·병렬 연결에 따른 제한기의 구조를 보여주며 그림 2의 각각의 등가회로로부터 사고발생시 초전도소자의 임계전류값(IC)에 대한 사고전류제한기의 동작전류(IOP)의 비를 식 (1)과 (2)와 같이 유도할 수 있다.

코일의 직·병렬결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 동작전류 증가

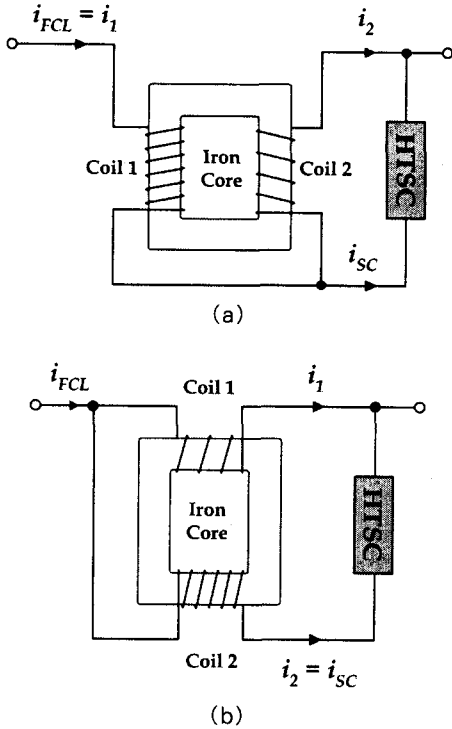


그림 1. 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류 제한기의 구조  
(a) 직렬연결형 (b) 병렬연결형  
Fig. 1. Structure of superconducting fault current limiter (SFCL) using magnetic coupling of two coils  
(a) Series connection type  
(b) Parallel connection type

$$\frac{I_{OP}}{I_C} = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{L}-1} \quad (1)$$

$$\frac{I_{OP}}{I_C} = 1 + \sqrt{L} \quad (2)$$

유도한 수식에서  $L$ 는 두 코일의 인덕턴스비 ( $L_1/L_2$ )를 나타낸다. 수식에서 보는 바와 같이 두 코일의 인덕턴스비를 증가함에 따라 제한기의 동작전류크기가 증가하게 됨을 기대할 수 있다.

### 2.3 실험장치 구성

그림 3은 두 코일의 자기결합을 이용한 고온초전

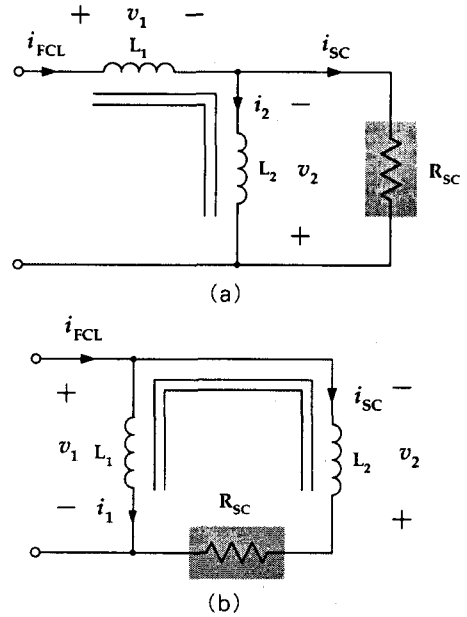


그림 2. 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류 제한기의 등가회로  
(a) 직렬연결형 (b) 병렬연결형  
Fig. 2. Equivalent circuit of SFCL using magnetic coupling of two coils  
(a) Series connection type  
(b) Parallel connection type

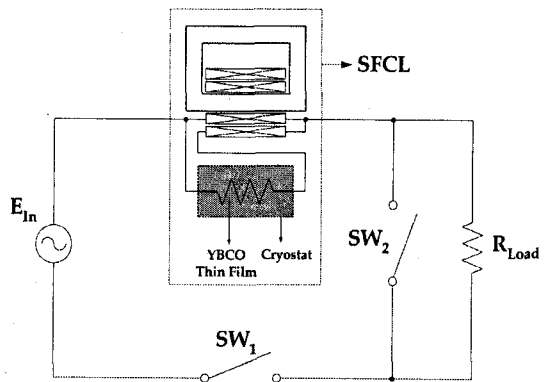


그림 3. 초전도 사고전류제한기의 모의실험회로도  
Fig. 3. Experimental circuit of SFCL

도 사고전류제한기의 사고전류 제한특성을 모의하기 위한 실험장치 구성을 보여준다. 철심에 결선된 두 코일의 병렬과 직렬연결에 따라 초전도 소자를 연결하여 제한기 회로를 구성하였으며, 구성된 사고

전류제한기를 전원과 부하에 연결하였다. 실험에 사용한 코일 1과 코일 2의 인덕턴스는 48[mH], 4[mH] 값을 사용하였으며 초전도 소자는 YBCO 박막을 식각공정을 통해 제작하여 사용하였다. 제작한 초전도 소자의 임계전류, 임계온도는 24[A], 90[K] 로 측정되었다. 또한, 단락시 제한기 보호를 위해 전원저항으로 1[Ω]을 사용하였으며 부하저항은 50.1[Ω]을 사용하였다. 단락사고 모의는 SW<sub>1</sub>을 전원전압이 영이 되는 시점에서 투입한 후 SW<sub>2</sub>을 주어진 사고주기동안 투입하여 실시하였으며, 각 코일에 흐르는 전류와 고온초전도 소자양단전압을 포함한 각 코일의 유기전압을 측정하여 사고전류제한 특성을 분석하였다.

### 2.4 실험결과 분석

그림 4는 두 코일의 직렬연결시 고온초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 보여준다. 사고 전에는 철심내부의 자속이 상쇄되어 각 코일의 전압이 제로값을 유지하고 있는 것을 볼 수 있으며, 사고와 동시에 초전도 소자에 저항이 발생되어 각 코일의 전압이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 사고전후 초전도 소자에 흐르는 전류는 두 코일의 반대방향 결선으로 반전되어 나타남을 볼 수 있다. 또한 사고 발생직후 선로전류의 크기가 소자에 흐르는 전류의 크기보다 큰 값에서 제한이 이루어지는 것을 전류파형으로부터 관찰할 수 있다.

그림 5는 두 코일의 병렬연결시 사고전류제한 특성을 보여준다. 직렬연결시와 마찬가지로 사고발생 직후 선로전류가 초전도 소자에 흐르는 전류보다 큰 값에서 제한이 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있으며, 앞서 등가회로에서 유도한 관계식에서 분석한 결과와 일치함을 확인할 수 있다. 반면에 병렬연결 시에는 직렬연결시보다 사고시 초전도소자에 유기되는 전압이 크게 나타남을 비교할 수 있다.

두 코일의 직·병렬연결시 사고발생 직후 각 코일과 초전도 소자, 선로에 흐르는 전류들의 변화를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 사고발생후 초전도 소자에 흐르는 전류가 임계값에 도달되는 시간이 병렬연결한 경우가 직렬연결한 경우보다 짧게 나타나는

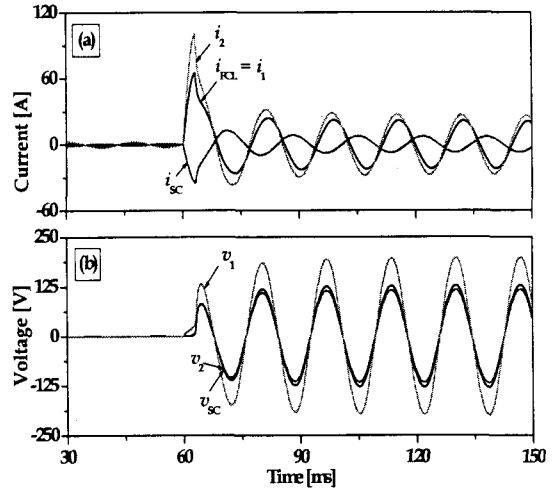


그림 4. 직렬연결시 사고전류제한 특성  
(a) 전류파형 (b) 전압파형

Fig. 4. Fault current limiting characteristics of SFCL in case of series connection of two coils  
(a) Current waveforms  
(b) Voltage waveforms

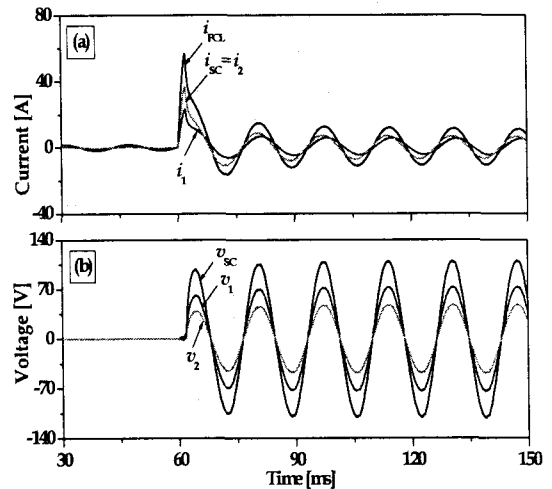


그림 5. 병렬연결시 사고전류제한 특성  
(a) 전류파형 (b) 전압파형

Fig. 5. Fault current limiting characteristics of SFCL in case of parallel connection of two coils  
(a) Current waveforms  
(b) Voltage waveforms

코일의 직·병렬결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 동작전류 증가

것을 비교할 수 있으며, 반면에 초전도 소자에 유기되는 전압은 직렬연결한 경우가 보다 작게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이는 그림 4와 그림 5에서 확인할 수 있듯이 병렬연결한 경우에는 초전도 소자에 인가되는 전압은 두 코일에 유기되는 전압의 합으로 나타나는 반면, 직렬연결한 경우에는 코일 2에 걸리는 전압이 초전도 소자에 인가된 결과임을 분석할 수 있다.

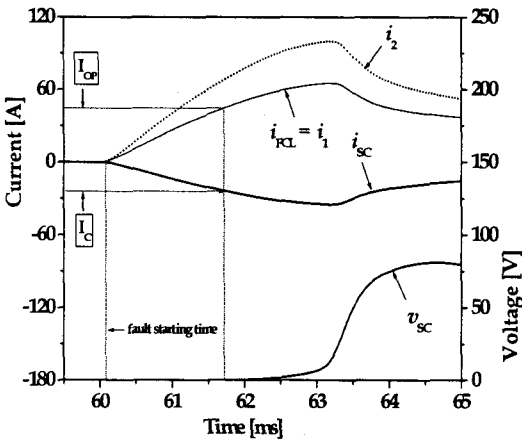


그림 6. 직렬연결시 초기사고전류제한 특성  
Fig. 6. Initial fault current limiting characteristics of SFCL in case of series connection of two coils

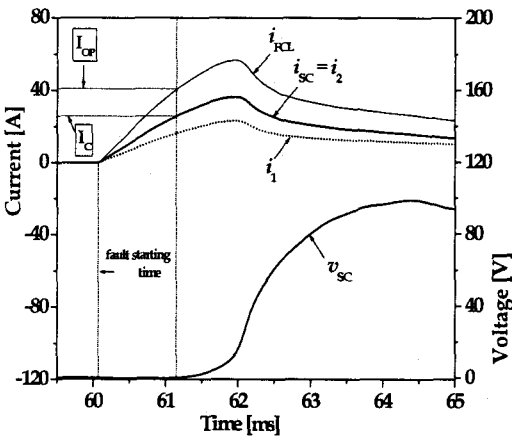


그림 7. 병렬연결시 초기사고전류제한 특성  
Fig. 7. Initial fault current limiting characteristics of SFCL in case of parallel connection of two coils

그림 8은 두 코일의 직·병렬연결에 따른 사고시 초전도 소자에서 발생하는 저항곡선을 보여준다. 초전도 소자가 독립적으로 사고전류를 제한할 경우의 저항곡선을 동시에 도시하였으며, 독립적으로 동작할 경우보다 다소 증가되어 나타남을 확인할 수 있다.

향후 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기를 구성하는 초전도 소자의 저항증가를 고려한 분석을 수행하고자 한다.

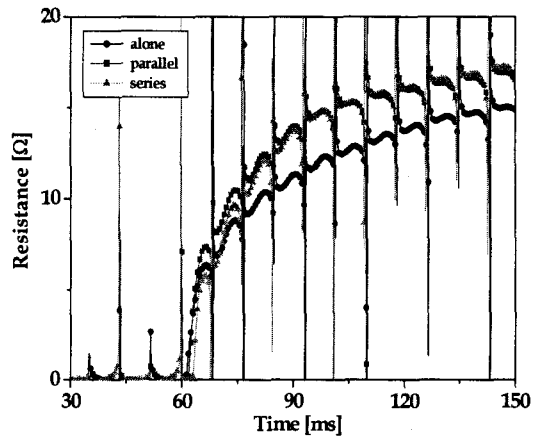


그림 8. 초전도 소자의 저항곡선  
Fig. 8. Resistance curves of HTSC element

### 3. 결 론

본 논문에서는 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 사고전류제한 특성을 등가회로와 실험을 통해 분석하였다. 분석을 통해 두 코일의 직·병렬연결시 모두 단위초전도 소자가 갖는 임계전류보다 큰 전류에서 사고전류제한동작이 이루어짐을 실험을 통해 확인하였다. 향후 자기결합을 이용한 초전도 사고전류제한기의 두 코일의 결선방향과 초전도 소자가 독립적으로 동작할 경우를 고려하여 초전도 소자측면에서의 저항증가와 전력부담을 비교분석하고자 한다.

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

## References

- [1] E. Thuries, V. D. Pham, Y. Laumond, T. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, and M. Bekhaled, "Toward the superconducting fault current limiter," *IEEE Trans. On Power Del.*, vol. 6, no. 2, pp. 801-808, April 1991.
- [2] W. Paul and M. Chen, "Superconducting control for surge currents," *IEEE Spectrum*, vol. 35, pp. 49-54, May 1998.
- [3] T. Onishi, M. Kawasumi, K.-I. Sakaki and R. Akimoto, "An experimental study on a fast self-acting magnetic shield type superconducting fault current limiter," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 12, pp. 868-871, Mar. 2002.
- [4] H. Yamaguchi, T. Kataoka, K. Yaguchi, S. Fujita, K. Yoshikawa, and K. Kaiho, "Characteristics Analysis of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, no. 2, pp. 815-818, June 2004.
- [5] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "The fault current limiting characteristics of a flux-lock type high-TC superconducting fault current limiter using a series resonance," *Cryogenics*, vol. 44, pp. 249-254, April 2004.
- [6] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "Fault Current Limiting Characteristics due to Winding Direction between Coil 1 and Coil 2 in a flux-lock type SFCL," *Phys. C*, vol. 416, pp. 34-42, November 2004.
- [7] Sung-Hun Lim, Hyo-Sang Choi, Seokcheol Ko, Hyeong-Gon Kang, and Byoung-Sung Han, "Fault Current Limiting Characteristics of New Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter using Flux Linkage," *phys. Stat. sol. (c)*, vol. 2, no. 5, pp. 1755-1760, March 2005.
- [8] S. H. Lim, H. S. Choi, and B. S. Han, "The improved hysteresis characteristics of flux-lock type SFCL using third winding," *Phys. C*, vol. 406, pp. 37-45, July 2004.

## ◇ 저자소개 ◇

### 임성훈 (林成勳)

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004~2005년 전북대학교 공업기술연구소 연구원. 2006년 3월~현재 숭실대학교 전기공학부 전임강사.

Tel : (02)828-7268

Fax : (02)817-7961

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr