

논문 22-12-13

## 두 개의 자기경로 철심을 갖는 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 히스테리시스 특성

### Hysteresis Characteristics of a SFCL using a Magnetic Coupling of Coils with an Iron Core of Two Magnetic Paths

임성훈<sup>1,a</sup>

(Sung-Hun Lim<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

The iron core, which comprises the superconducting fault current limiter (SFCL) using magnetic coupling of coils, can be operated in the saturation region, especially at the initial fault period. This operation of the iron core in the saturation region deteriorates the fault current limiting operation of the SFCL. To solve the saturation problem of the SFCL using magnetic coupling of coils, the iron core with two magnetic paths, which has an air-gap in one of them, was adopted. In this paper, the hysteresis characteristics of SFCL using magnetic coupling of coils, which were wound in the iron core with two magnetic paths, were analyzed. Through comparative analysis on the hysteresis characteristics of the iron core comprising SFCL, the hysteresis characteristics of the iron core with two magnetic paths were confirmed to be kept in the non-saturation region during the fault period and thus, the effective fault current limiting operation of the SFCL using the magnetic coupling of coils could be performed.

**Key Words** : Superconducting fault current limiter (SFCL), Saturation region, Fault current limiting function, Magnetic coupling, Hysteresis characteristics

#### 1. 서론

실계통에 적용하기 위해 초전도전류제한기의 용량증대를 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 실계통에 적용하기 위한 초전도전류제한기의 용량증대는 초전도전류제한기를 구성하는 단위 초전도소자들의 직·병렬 연결을 통해 이루어졌지만, 이는 초전도전류제한기의 가격을 상승시킬 뿐 아니라 켄치발생시 초전도전류제한기를 구성하는 단위 초전도 소자들의 불균일한 전력부담이 실계통 적용을 위한 초전도전류제한기 개발에 장애가 되어 왔

다. 뿐만 아니라, 초전도전류제한기의 임피던스 조절이 용이하지 않은 점, 고장제거시 초전도상태로 신속한 회복을 기대하기 어려운 점, 이로 인해 전력계통의 보호기와 협조가 용이하지 않는 점과 같은 문제들을 해결하기 위한 연구가 진행되어 왔다[1-3].

이와 같은 기존의 초전도전류제한기를 실계통에 적용하기 위한 노력으로 초전도전류제한기를 구성하는 단위 초전도소자의 부담을 줄이고 개수를 감소시킬 수 있는, 두 코일의 직렬 또는 병렬 연결된 자기결합을 이용한 초전도전류제한기가 개발되어 이에 대한 연구가 진행되어 왔다[4-6].

개발된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기는 제한기 임피던스가 두 코일의 인덕턴스비와 권선방향에 따라 조절이 가능한 구조를 가지고 있어, 제한기를 구성하는 초전도 소자들의 전력부담을 감소시킬 수 있을 뿐 아니라 계통의 고

1. 숭실대학교 전기공학부

(서울시 동작구 상도5동 1-1)

a. Corresponding Author : superish73@ssu.ac.kr

접수일자 : 2009. 9. 7

1차 심사 : 2009. 10. 15

심사완료 : 2009. 11. 16

장전류 변화에 대해 융통성있게 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다[5-7].

반면에, 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 구성요소인 철심의 포화발생은 초전도전류제한기의 전류제한을 위한 기능을 저하시킬 수 있게 된다[8].

본 논문에서는 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기를 구성하는 철심의 포화억제방안으로 두 개의 자기경로를 갖는 E-I형태의 철심을 적용하여 전류제한특성 실험을 실시하였다. 철심의 등가회로분석과 단락모의실험을 통해 제한기를 구성하는 철심의 히스테리시스 곡선을 도출하였으며, 두 개의 자기경로를 갖는 철심의 경우 기존의 철심보다 개선된 히스테리시스 특성을 보여주는 것을 확인할 수 있었다.

## 2. 등가회로 분석 및 실험장치 구성

### 2.1 구조 및 등가회로

코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기를 구성하는 철심의 포화를 억제하기 위한 방안으로, 두 개의 자기경로를 형성하기 위해 세 개의 다리를 갖는 E-I형태의 철심으로 구성된 초전도전류제한기의 구조와 등가회로를 그림 1에 나타내었다. 이때, 철심 세 개의 다리중 가운데 다리는 철심의 자기저항을 크게 하기 위해 공극을 도입하였다[8].

고장발생시 기본동작원리는 왼쪽 다리에 위치한 두 코일에서 발생되는 자속이 초전도소자의 켄치로 인한 저항발생으로 상쇄되지 않게 되어 자기저항이 작은 오른쪽 다리를 통해 자기경로를 형성하게 된다. 이때, 발생되는 제한기 등가임피던스는 식 (1)과 같이 유도할 수 있다. 만약, 자속이 보다 증가되어 철심의 오른쪽 다리가 포화될 경우 철심의 가운데 다리를 통해 자기경로를 형성하게 되며, 식 (2)에 나타낸 제한기 등가임피던스에 의해 고장전류가 제한되기 때문에 철심의 포화로 인한 임피던스 감소를 피할 수 있게 된다[8].

$$Z_{FCL} \approx wL_2 \quad (1)$$

$$Z_{FCL} \approx w \frac{L_g L_3}{L_g + L_3} \quad (2)$$

### 2.2 실험장치 구성

코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 단락모의실험을 위해 전원과 부하가 연결된 실험

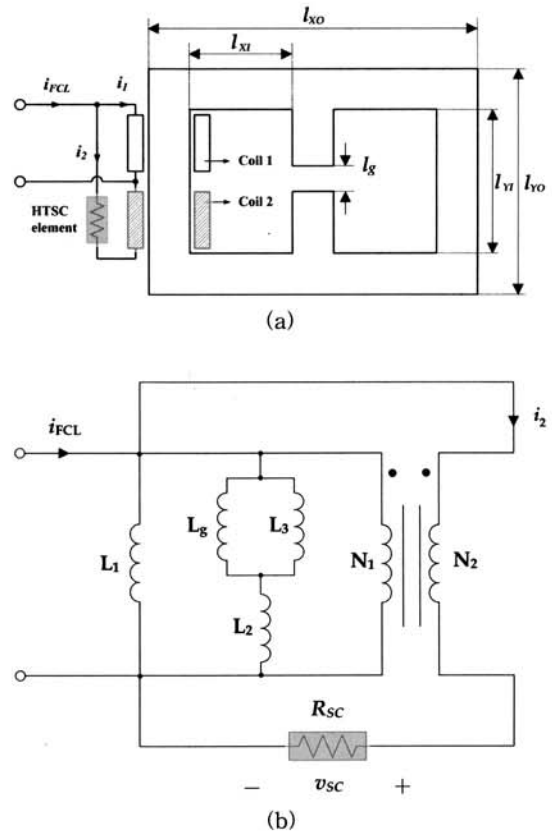


그림 1. 두 자기경로를 갖는 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 구조 및 등가회로.

(a) 구조. (b) 등가회로.

Fig. 1. Structure and equivalent circuit of a SFCL with two magnetic paths using magnetic coupling of coils.

(a) Structure. (b) Equivalent circuit.

회로도도 그림 2에 나타내었으며, 단락실험을 통해 각 코일의 전압, 전류를 측정하여 철심의 히스테리시스 곡선을 도출하였다[9]. 실험에 사용한 두 개의 자기경로를 갖는 철심을 포함한 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 사양을 표 1에 나타내었다. 그림 2의 단락모의실험회로도에서 사용된 전원저항 및 부하저항은 각각 1.15 Ω, 51.5 Ω으로 설정하였으며, 120 V의 전원전압에서 전원단 스위치(SW<sub>1</sub>)를 투입한 후 부하단 스위치(SW<sub>2</sub>)를 투입하여 단락을 모의하였다.

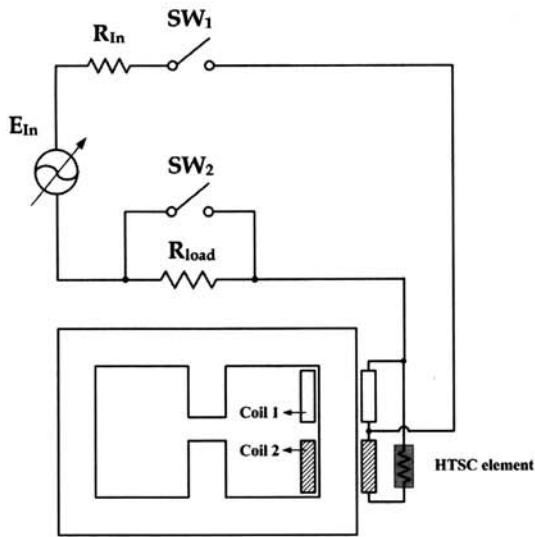


그림 2. 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 모의실험 구성도.  
 Fig. 2. Experimental circuit of a SFCL using magnetic coupling of coils.

표 1. 두 개의 자기경로를 갖는 철심 및 코일 사양.

Table 1. Specification of an iron core with two magnetic paths and coils.

철심			코일		
설계변수	값	단위	설계변수	값	단위
$l_{y0}$	235	mm	코일 1의 권선수	60	Turns
$l_{x0}$	263	mm			
$l_{y1}$	137	mm	코일 2의 권선수	30	Turns
$l_{x1}$	58	mm			
$l_g$	5	mm	결선방향	가극	

### 3. 결과 및 고찰

두 개의 자기경로를 갖는 초전도전류제한기의 히스테리시스 특성을 분석하기 앞서 고장발생시 전류제한 특성을 분석하였으며, 한 개의 자기경로를 갖는 초전도전류제한기의 히스테리시스 특성과 비교하였다.

그림 3은 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 전류파형을 보여준다. 한 개의 자기경로를 갖는 초전도전류제한기의 경우(그림 3(a)), 고장발생직후 초전도 소자의 켄치를 통해 코일의 전류를 포함한 선로의 고장전류( $i_{FCL}$ )가 첫 번째 피크값에

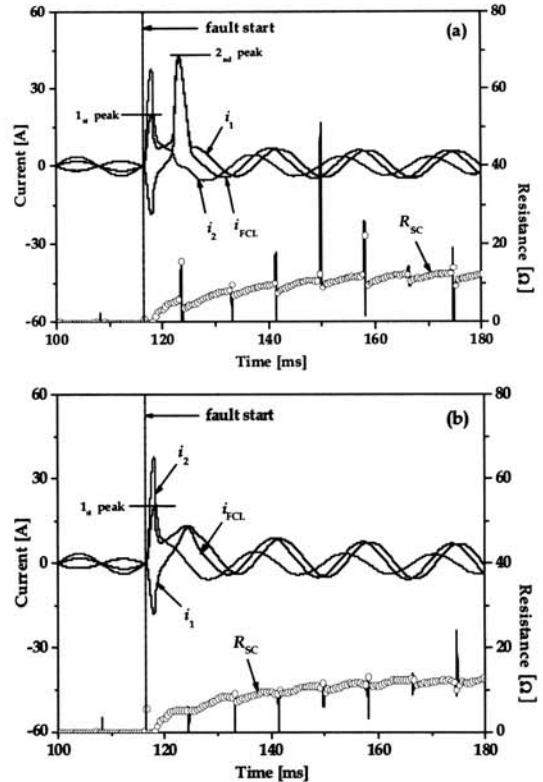


그림 3. 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 전류 및 초전도소자 저항파형 (a) 하나의 자기경로를 갖는 철심을 사용한 경우, (b) 두 개의 자기경로를 갖는 철심을 사용한 경우.

Fig. 3. HTSC element's resistance curve and current waveform of a SFCL using magnetic coupling of coils (a) In case of iron core with one magnetic path, (b) In case of iron core with two magnetic paths.

도달된 후 제한되지만 반전되어 흐르던 코일 1의 전류가 다시 상승하여 피크값에 도달함에 따라 선로전류에서도 두 번째 피크가 발생되는 것을 확인할 수 있다. 이후 초전도 소자의 저항이 증가함에 따라 일정값 피크값으로 수렴되어 제한되는 것을 볼 수 있다. 반면에, 두 개의 자기경로를 갖는 철심을 이용한 전류제한기의 경우(그림 3.1(b))에는 동작원리에서 기술한 바와 같이 두 번째 피크가 나타나지 않는 것을 관찰할 수 있다.

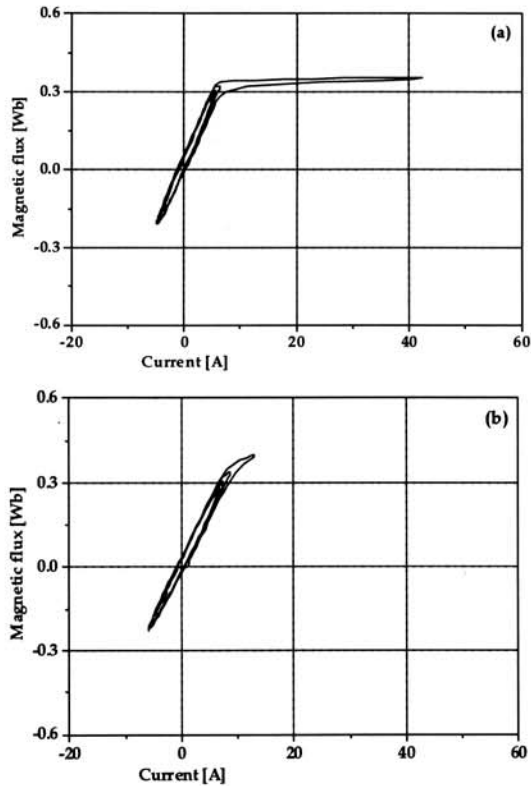


그림 4. 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기를 구성하는 철심의 히스테리시스 곡선 (a) 하나의 자기경로를 갖는 철심을 사용한 경우, (b) 두 개의 자기경로를 갖는 철심을 사용한 경우.

Fig. 4. Hysteresis curve of an iron core comprising a SFCL using magnetic coupling of coils (a) In case of iron core with one magnetic path, (b) In case of iron core with two magnetic paths.

단락모의실험을 통해 측정된 전압, 전류로부터 등가회로에서 도시한 자화전류와 철심내부의 자속으로부터 히스테리시스특성 곡선을 유도할 수 있으며[9], 결과곡선을 그림 4에 나타내었다. 한 개의 자기경로를 갖는 초전도전류제한기의 경우(그림 4(a)), 고장 첫주기에 철심의 포화로 인해 포화영역으로 이동하는 것을 분석할 수 있는 반면, 두 개의 자기경로를 갖는 초전도전류제한기의 경우(그림 4(b))에는 고장기간동안 비포화영역에 머무는 것을 비교할 수 있다.

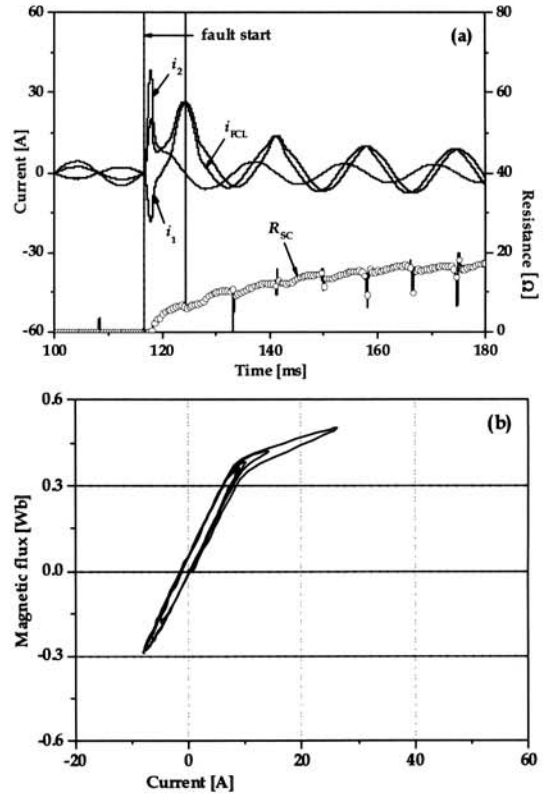


그림 5. 두 개의 자기경로를 갖는 철심을 갖는 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 전류, 초전도소자 저항 및 히스테리시스 곡선. (a) 전류 및 저항곡선. (b) 히스테리시스 곡선.

Fig. 5. Current waveform, HTSC element's resistance curve and hysteresis curve of an iron core with two magnetic paths comprising a SFCL using magnetic coupling of coils. (a) Current waveform, HTSC element's resistance curve. (b) hysteresis curve.

두 개의 자기경로를 갖는 철심을 이용한 초전도전류제한기의 고장전류증가에 따른 전류제한 특성과 히스테리시스 특성을 분석하기 위해 전원전압을 160 V로 증가시켜 단락모의를 실시하였으며 결과를 그림 5에 도시하였다. 고장전류가 증가됨에 따라 초전도소자의 저항도 증가되는 것을 확인할 수 있으며, 억제되었던 고장전류의 두 번째피크가 약간 상승하여 나타나는 것을 볼 수 있다. 히스테

리시스특성 곡선에서는 포화영역으로 이동하지만 포화영역에서의 자화인덕턴스가 식 (2)에 유도한 값으로 감소되지 않고 나타나는 것을 그림 5(b)에서 확인할 수 있다.

앞에서 분석한 단락모의 실험결과로부터 전류제한특성과 유도한 히스테리시스특성 분석을 통해 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기의 고장발생시 철심의 포화로 인한 임피던스 감소를 두 개의 자기경로를 갖는 철심을 이용하여 해결할 수 있음을 본 논문을 통해 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 코일의 자기결합을 이용한 초전도전류제한기를 구성하는 철심의 포화억제방안으로 두 개의 자기경로를 갖는 E-I형태의 철심을 적용한 초전도 전류제한기를 제안하여 전류제한 특성실험을 실시하였다.

두 개의 자기경로중 하나는 공극을 포함한 구조를 가지고 있으며, 철심의 등가회로분석을 통해 철심의 포화여부에 따라 제한기 임피던스를 각각 유도하였다. 포화시 제한기 임피던스가 감소되지 않는 것을 확인할 수 있었으며, 단락모의 실험을 통해 제한기를 구성하는 철심의 히스테리시스 곡선을 도출하였다. 도출된 히스테리시스 곡선으로부터 두 개의 자기경로를 갖는 철심의 경우 기존의 철심보다 개선된 히스테리시스 특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 논문은 2009년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(과제번호 : 2009-0075355)로서 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

[1] K.-B. Park, J.-S. Kang, B.-W. Lee, I.-S. Oh, H.-S. Choi, H.-R. Kim, and O.-B. Hyun, "Quench behavior of YBaCuO films for fault current limiters under magnetic field", IEEE

Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, p. 2092, 2003.

- [2] O.-B. Hyun, S.-D. Cha, H.-R. Kim, H.-S. Choi, and S.-D. Hwang, "Shunt-assisted simultaneous quenches in series-connected resistive SFCL components", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, p. 2060, 2003.
- [3] J.-W. Sim, Y.-S. Choi, H.-R. Kim, and O.-B. Hyun, "Equal current distribution in parallel circuits of resistive superconducting fault current limiters using multiple superconducting inter-phase transformers", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, p. 2092, 2003.
- [4] S.-H. Lim, H.-S. Choi, D.-C. Chung, S.-C. Ko, and B.-S. Han, "Impedance variation of a flux-lock type SFCL dependent on winding direction between coil 1 and coil 2", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2, p. 2039, 2005.
- [5] 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", Physica C, Vol. 416, p. 34, 2004.
- [6] S.-H. Lim, "Operational characteristics of a flux-lock type SFCL with series connection of two coils", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, p. 1895, 2007.
- [7] S.-H. Lim, J.-F. Moon, and J.-C. Kim, "Current limiting and recovery characteristics of SFCLs using magnetic coupling of two coils", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, p. 1900, 2009.
- [8] M.-S. Joo and T.-K. Ko, "Novel design and operational characteristics of inductive high-TC superconducting fault current limiter", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 7, No. 2, p. 1005, 1997.
- [9] S.-H. Lim, H.-S. Choi, and B.-S. Han, "The improved hysteresis characteristics of flux-lock type SFCL using third winding", Physica C, Vol. 406, p. 37, 2004.