

## 공극이 도입된 철심에 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기의 고장전류 제한 및 히스테리시스 특성

(Fault Current Limiting and Hysteresys Characteristics of a SFCL using Magnetic Coupling of Two Coils on the Iron Core with an Air-Gap)

임성훈\* · 김재철\*\*

(Sung-Hun Lim · Jae-Chul Kim)

### Abstract

In this paper, the fault current limiting and the hysteresys characteristics of a superconducting fault current limiter (SFCL) using magnetic coupling of two coils on the iron core with an air-gap were analyzed. The introduction of the air-gap in the SFCL with magnetically coupled two coils can suppress the saturation of the iron-core and, on the other hand, make the limiting impedence of the SFCL decreased, which results from the increase of the exciting current. To analyze the effect of the air-gap on the fault current limiting characteristics of the SFCL, the hysteresys curves of the iron core comprising the SFCL were derived from the short-circuit experiment and the variation in the voltage-current trace of the SFCL during the fault period was analyzed. Through the comparison with the current limiting characteristics of the SFCL without air-gap, the air-gap could be confirmed to contribute to the suppression of the iron core's saturation through the increase of the SFCL's burden from the short-circuit current.

Key Words : Hysteresys Characteristics, Superconducting Fault Current Limiter(SFCL), Air-Gap, Saturation, Current Limiting Characteristics

### 1. 서 론

산업발전에 따른 전력수요 증가와 발전설비 확장은 고장전류증가를 가속시켜 왔으며, 고장전류 저감을 위

한 효과적인 방안중에 하나로 초전도한류기를 적용하기 위한 연구들이 진행되고 있다[1-3]. 현재까지 개발된 초전도한류기 중, 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 한류기는 평상시 상쇄되었던 두 코일에서 발생하는 자속이 단락발생시 초전도 소자의 저항발생으로 상쇄되지 않게 되어 두 코일에 전압이 유기됨으로써 고장전류를 제한하며, 고장발생시 전류제한 동작이 이루어지는 동작전류와 제한 임피던스를 두 코일의 인덕턴스비에 의해 조절할 수 있는 특징이 있다[4-6]. 반

\* 주저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수  
\*\* 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수  
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-0780  
E-mail : jckim@ssu.ac.kr  
접수일자 : 2011년 1월 4일  
1차심사 : 2011년 1월 14일  
심사완료 : 2011년 1월 31일

면에 고장발생과 동시에 크게 상승한 고장전류는 철심내부자속의 증가로 철심의 포화를 야기할 수 있으며 이는 초전도한류기의 전류제한효과를 저하시키게 된다. 이를 해결하기 위한 방안으로 두 개의 자기경로를 갖는 철심을 사용하거나 별도의 3차권선을 설치하는 방안이 제안된 바 있으나 제작 초기에 이를 고려한 설계와 특수한 형태의 철심제작에 따른 비용상승을 초래하게 된다[7-8].

본 논문에서는 손쉽게 철심의 포화를 억제할 수 있는 방안으로 공극을 도입한 자기결합을 이용한 초전도한류기의 전류제한특성을 모의실험을 통해 분석하였으며, 공극의 도입에 따른 초전도한류기의 임피던스와 철심의 히스테리시스 특성을 비교하였다. 자기결합을 이용한 초전도한류기의 두 코일의 각 결선방향에 대해 공극의 유무에 따른 히스테리시스특성과 전압, 전류부담 변화의 비교분석을 통해 공극의 도입이 철심내부의 최대자속을 감소시켜줌으로써 포화가능성을 제거시켜줄 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 구조 및 등가회로

두 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기의 구조는 그림 1과 같이 하나의 철심을 매개로 두 코일이 병렬로 적층된 연결구조를 가지며, 초전도소자는 두 코일중 하나와 직렬로 연결된다. 공극은 상하 두 개로 분리된 철심의 경계면에 도입하였다. 동작원리는 정상시 두 코일에서 상쇄되었던 자속이 단락발생시 초전도 소자의 저항발생으로 상쇄되지 않게 되고 각 코일에 전압이 유기되어 제한임피던스가 발생됨으로써 고장전류를 제한할 수 있게 된다[1-3].

두 코일이 병렬로 결선된 초전도 한류기의 등가회로는 두 코일의 동손저항, 누설인덕턴스 및 철손저항을 무시한다면 그림 2와 같이 자화인덕턴스를 포함한 변압기 등가회로로 나타낼 수 있다[7-8]. 그림에서  $R_{SC}$ 는 초전도 소자의 상전도 저항,  $L$ 과  $L_g$ 는 철심의 평균 자로길이( $l_1+l_2$ ), 공극자로길이( $l_g$ ), 철심단면적( $A$ )로부터 결정할 수 있는 철심의 자화인덕턴스를 나타낸

다. 그림 2의 등가회로로부터 제한임피던스는 식 (1)과 같이 유도할 수 있으며,  $L_{eq}$ 는  $L$ 과  $L_g$ 로 구성되는 등가자화인덕턴스를 나타낸다. 식 (1)에서 ‘±’은 두 코일의 결선방향에 따라 결정되며, 같은 방향(가극)일 경우에는 ‘+’를, 반대방향(감극)일 경우에는 ‘-’로 결정된다. 또한, 식 (1)에서 공극을 도입한 경우( $L_g \neq \infty$ )에 제한임피던스가 도입하지 않은 경우보다 감소되는 것을 분석할 수 있다.

$$Z_{FCL} = \frac{1}{\frac{N_2}{N_1} \frac{I_2}{V_1} + \frac{1}{j\omega L_{eq}} + \frac{I_2}{R_{SC} I_2 \pm V_2}} \quad (1)$$

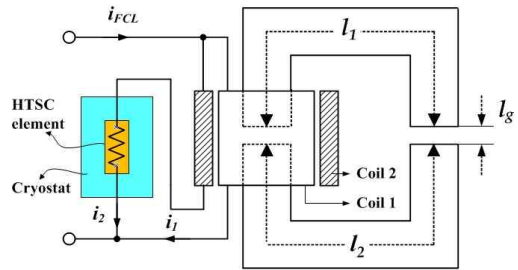


그림 1. 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기의 구조  
Fig. 1. Structure of a SFCL using magnetic coupling of two coils

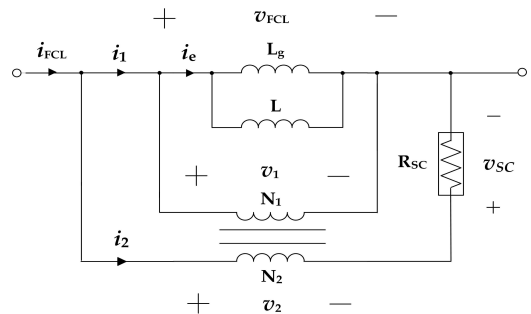


그림 2. 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기의 등가회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of a SFCL using magnetic coupling of two coils

그림 2의 등가회로로부터 코일전압을 적분함으로써 쇄교자속을 계산할 수 있으며, 여자전류와 쇄교자속을 이용하여 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기를 구성하는 철심의 히스테리시스특성을 도시하여 분석하였다.

### 2.2 실험장치 구성

그림 3은 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 한류기의 고장전류제한 특성을 모의하기 위한 실험장치 구성을 보여준다. 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기를 구성하는 각 구성요소들의 설계값들을 표 1에 나열하였다. 표 1에는 나타내지 않았지만 두 코일의 동선저항과 누설인덕턴스를 무시한다면 공극이 없는 경우 두 코일의 상호인덕턴스의 최대값은 두 코일의 자기인덕턴스로부터 약 15.6[mH]로 계산할 수 있다.

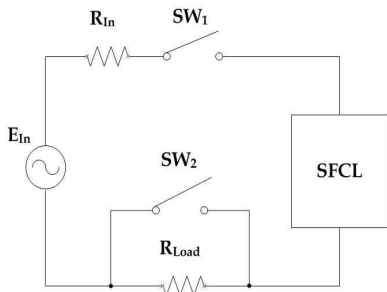


그림 3. 단락사고 모의실험회로도  
Fig. 3. Experimental circuit for short-circuit test

표 1. 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기 구성요소 사양

Table 1. Design specification of SFCL using a magnetic coupling of two coils

Iron core		Value	Unit
$l_1+l_2$	Total length of flux path	806	mm
$l_g$	Length of air gap	2	mm
A	Cross sectional area	3201	mm <sup>2</sup>
Two coils		Value	Unit
$N_1 (L_1)$	Turn number of coil 1	60(48.4)	Turn(mH)
$N_2 (L_2)$	Turn number of coil 2	15(5.0)	Turn(mH)
HTSC element		Value	Unit
Material	YBCO		
$I_c$	Critical current	21	A

초전도한류기를 구성하는 초전도 소자는 박막형태로 제작한 YBCO를 사용하였으며, 전원전압 70[V<sub>rms</sub>]

인가시 전원저항( $R_{in}$ )과 부하저항( $R_{Load}$ )은 초전도소자의 임계전류(21[A])를 고려하여 각각 1.15[Ω], 41.6 [Ω]을 사용하였다. 단락고장은  $SW_1$ 을 투입한 후  $SW_2$ 를 전원전압이 영이 되는 시점에서 5주기동안 투입하여 단락을 모의하였으며, 각 코일에 흐르는 전류와 초전도소자 양단전압을 포함한 각 코일의 유기전압을 측정하여 분석하였다. 구성된 실험회로도로부터 초전도한류기가 없을 경우 단락전류는 60.87[A<sub>rms</sub>]로 계산할 수 있다.

### 2.3 실험결과 분석

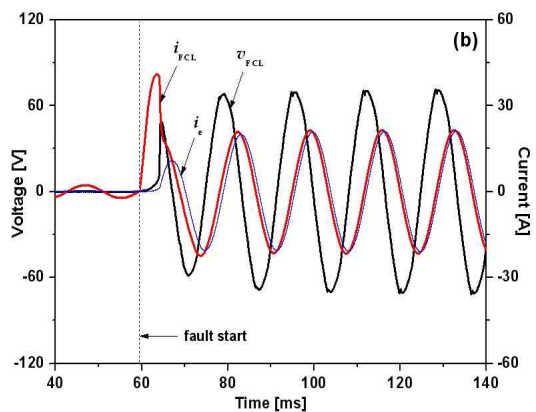
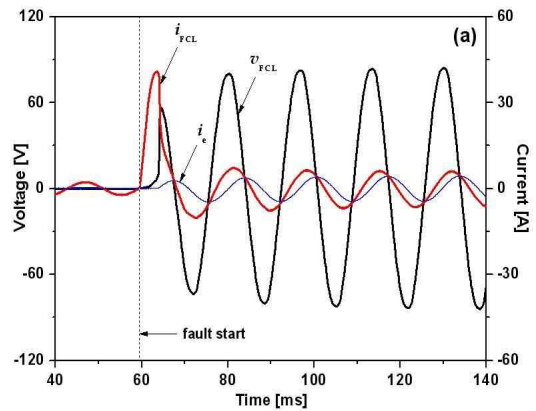


그림 4. 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기의 단락발생시 고장전류제한 특성(감극결선시)  
(a)공극이 없을 경우, (b)공극이 존재할 경우.

Fig. 4. Fault current limiting characteristics of a SFCL with magnetic coupling of two coils(subtractive polarity winding)  
(a) Without an air gap,  
(b) With an air gap

그림 4는 두 코일의 결선방향을 감극결선한 경우 공극유무에 따른 자기결합을 이용한 초전도한류기의 단락고장발생 전후 한류기 양단전압( $v_{FCL}$ ), 도통전류( $i_{FCL}$ ) 및 여자전류( $i_e$ ) 파형을 보여준다. 고장발생직후부터 한류기 전압이 유기되고 여자전류가 흐르게 되는 것을 볼 수 있으며, 공극이 있는 경우가 공극이 없는 경우보다 여자전류가 보다 크게 증가되는 것을 비교할 수 있다. 특히 공극이 있는 경우에는 크게 증가된 여자전류로 인해 한류기 도통전류의 위상이 한류기 양단전압의 위상과 90도 차이가 나는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 식 (1)에 나타낸 한류기의 제한임피던

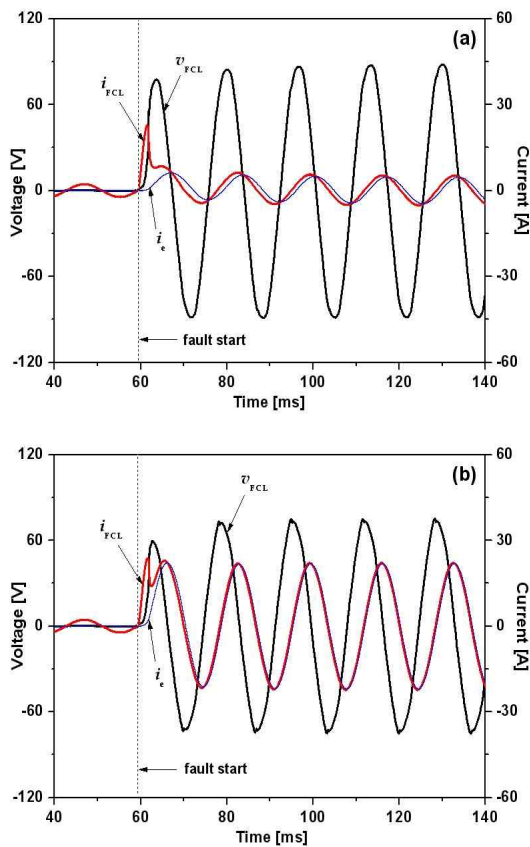


그림 5. 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기의 단락발생시 고장전류제한 특성(가극결선시)  
(a)공극이 없을 경우, (b)공극이 존재할 경우  
Fig. 5. Fault current limiting characteristics of a SFCL with magnetic coupling of two coils(subtractive polarity winding)  
(a) Without an air gap,  
(b) With an air gap

스에서 리액턴스성분이 저항성분보다 크게 증가됨을 유추할 수 있다.

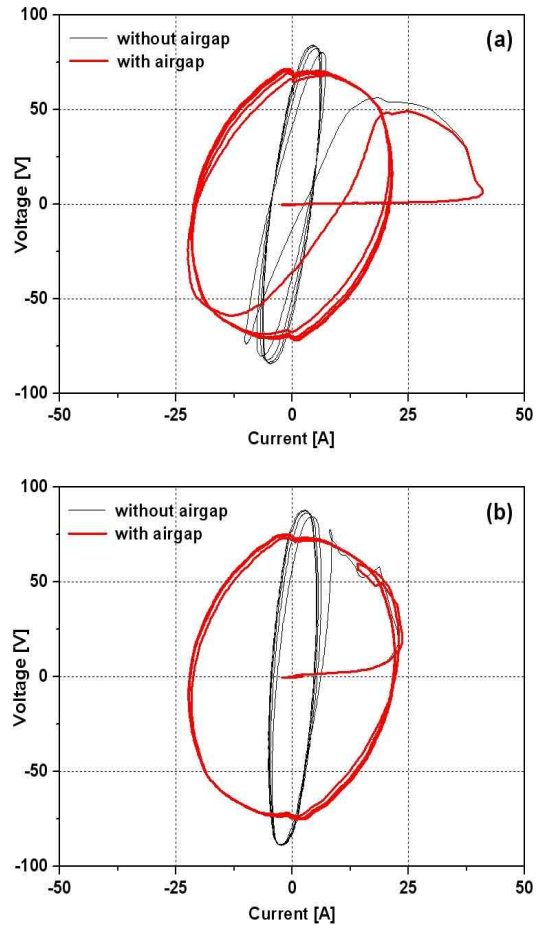


그림 6. 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기의 단락발생시 전압, 전류 궤적  
(a) 감극결선시, (b) 가극결선시  
Fig. 6. Voltage and current trace of a SFCL using magnetic coupling of two coils  
(a) In case of the subtractive polarity winding  
(b) In case of the additive polarity winding

두 코일의 결선방향을 가극결선한 경우의 공극유무에 따른 고장전류제한 파형(그림 5)에서도 감극결선한 경우와 유사한 결과를 얻을 수 있으며, 가극결선한 경우의 제한임피던스가 감극결선한 경우보다 크기 때문에 공극이 없는 경우에 한류기 도통전류, 즉 제한되는 고장전류의 크기가 감극결선한 경우보다 감소되는 것을 그림 4 (a)와 그림 5 (a)로부터 비교분석할 수 있

다. 이로 인해 공극이 없는 가극결선한 경우에는 한류기 여자전류크기와 비슷한 크기로 고장전류가 제한되어 흐르는 것을 그림 5 (a)에서 볼 수 있다.

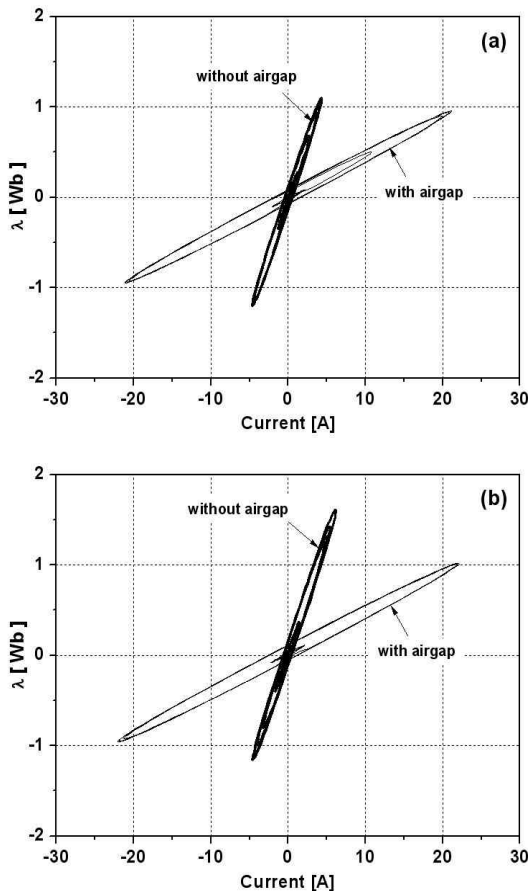


그림 7. 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기의 히스테리시스 곡선

(a) 감극결선시, (b) 가극결선시

Fig. 7. Hysteresis curves of a SFCL using magnetic coupling of two coils

(a) In case of the subtractive polarity winding  
(b) In case of the additive polarity winding

그림 5에서 도시한 한류기 양단전압과 도통전류로부터 공극유무에 따른 고장기간동안 한류기의 전압, 전류궤적을 비교할 수 있으며, 그림 6에 나타내었다. 결선방향에 관계없이 공극이 있는 경우가 없는 경우에 비해 한류기의 전류궤적이 증가되는 반면 전압궤적은 약간 감소되는 것을 비교할 수 있다. 또한 공극이 도입됨에 따라 전압, 전류궤적이 타원에 가까워짐

는 것을 볼 수 있으며, 이는 식 (1)에서 분석한 제한임피던스에서 공극이 도입됨에 따라 리액턴스성분이 증가되는 것과 일치되는 결과임을 분석할 수 있다.

마지막으로 여자전류와 쇄교자속을 이용하여 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기의 공극유무에 따른 철심의 히스테리시스곡선을 그림 7에 나타내었다. 공극을 도입하지 않은 경우에는 가극결선한 경우가 감극결선한 경우보다 쇄교자속의 최대값이 크게 증가되는 것을 비교할 수 있으며, 이는 가극결선한 경우가 철심의 포화가능성이 크음을 의미한다. 반면에 두 코일의 결선방향에 관계없이 공극을 도입한 경우가 공극을 도입하지 않은 경우보다 쇄교자속의 최대값 감소와 함께 히스테리시스 곡선의 기울기가 감소되는 것을 볼 수 있으며, 공극의 도입으로 철심의 포화가능성을 제거할 수 있음을 분석할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도한류기의 공극도입 유무에 따른 제한임피던스를 등가회로로부터 유도하였으며, 고장전류제한 특성과 히스테리시스 특성을 모의단락시험을 통해 분석하였다. 분석을 통해 공극이 존재할 경우 두 코일의 권선방향에 관계없이 여자전류의 증가로 고장전류는 증가하였지만, 쇄교자속의 최대값과 히스테리시스 곡선의 기울기가 감소되는 것을 관찰할 수 있었으며, 공극을 도입함으로써 철심내부의 최대자속감소로 인해 철심의 포화가능성을 제거할 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2008-38) 주관으로 수행된 과제입니다.

#### References

- [1] T. Hara, T. Okuma, T. Yamamoto, D. Ito, K. Tasaki, and K. Tsurunaga, "Development of a new 6.6kV/1500A class superconducting fault current limiter for electric power system," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 1, pp.

- 182-192, Jan. 1993.
- [2] O. B. Hyun, J. W. Sim, h. R. Kim, K. B. Park, S. W. Yim, and I. S. Oh, "Reliability Enhancement of the Fast Switch in a Hybrid Superconducting Fault Current Limiter by Using Power Electronic Switches", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, pp. 1843-1846, June 2009.
  - [3] Ok-Bae Hyun, Kwon-Bae Park, Jungwook Sim, Hye-Rim Kim, Seong-Woo Yim, and Il-Sung Oh, "Introduction of a Hybrid SFCL in KEPCO Grid and Local Points at Issues", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp. 1946-1949, June 2009.
  - [4] 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.
  - [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", Phys. C, vol. 416, pp. 34-42, November 2004.
  - [6] Sung-Hun Lim, Hyo-Sang Choi, Dong-Chul Chung, Seokcheol Ko, and Byoung-Sung Han, "Impedance Variation of a Flux-Lock Type SFCL Dependent on Winding Direction Between Coil 1 and Coil 2", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, pp. 2039-2042, June 2005.
  - [7] 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.
  - [8] Sung-Hun Lim, Jong-Fil Moon, and Jae-Chul Kim, "Improvement on Current Limiting Characteristics of a Flux-Lock Type SFCL Using E-I Core", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 19, no. 3, pp. 1904-1907, June 2009.

◇ 저자소개 ◇



**임성훈**(林成勳)

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 조교수.

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr



**김재철**(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 공대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.

E-mail : jckim@ssu.ac.kr