

병렬연결된 두 코일을 가진 자속구속형 초전도 전류제한기의 공극유무에 따른 전류제한 특성 분석

(Analysis on Fault Current Limiting Characteristics Dependent on Air-Gap in a Flux-Lock Type SFCL with parallel connection of two coils)

임성훈 · 김재철*

(Sung-Hun Lim · Jae-Chul Kim)

요 약

병렬연결된 두 코일을 가진 자속구속형 초전도 전류제한기의 사고발생시 철심의 포화를 억제하기 위한 방안으로 공극을 도입하였다. 하지만, 공극의 도입으로 인해 자화전류가 증가하게 되어 자속구속형 초전도 전류제한기의 임피던스 감소를 초래하게 된다. 본 논문에서는 공극유무에 따른 병렬연결된 두 코일을 가진 자속구속형 초전도 전류제한기의 전류제한 특성을 등가회로와 실험결과에 대한 비교분석을 통해 공극도입의 장·단점을 확인하였다.

Abstract

Air-gap was introduced to suppress the saturation of the iron core comprising the flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) with parallel connection of two coils. However, the air-gap makes the impedance of this SFCL decreased and can result in uselessness of the SFCL. To analyze the current limiting characteristics of the SFCL with the air-gap, the experimental circuit for short-circuit test was constructed. Through the comparison with the current limiting characteristics of the SFCL without air-gap, the merit and the demerit of the flux-lock type SFCL with the air-gap were discussed.

Key Words : Saturation, Flux-Lock Type SFCL, Air-Gap, Current Limiting Characteristics

1. 서 론

병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 자속구속형 초전도 전류제한기는 제한기동작전류와 임피

던스를 코일의 인덕턴스비에 의해 조절할 수 있는 특징이 있다[1-3]. 기본동작원리는 정상시에는 자기적으로 결합된 두 코일에서 발생하는 자속이 상쇄되지만 고장이 발생할 경우 초전도 소자의 저항발생에 의해 상쇄되지 않게 되어 두 코일에 전압이 유기됨으로써 고장전류가 제한된다. 하지만, 고장과 동시에 크게 상승한 고장전류는 철심내부자속의 증가로 철심의 포화를 야기하게 되어 제한기의 전류제한효과를 저하시키게 된다[4-5].

* 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수
Tel : 02-820-0647, Fax : 02-817-7961
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
접수일자 : 2008년 10월 10일
1차심사 : 2008년 10월 14일
심사완료 : 2008년 12월 1일

병렬연결된 두 코일을 가진 자속구속형 초전도 전류제한기의 공극유무에 따른 전류제한 특성 분석

본 논문에서는 사고시 철심의 포화를 억제할 수 있는 방안으로 공극을 도입한 자속구속형 초전도 전류제한기의 전류제한특성을 실험을 통해 분석하였으며, 공극이 없는 제한기의 전류제한특성과 비교함으로써 장·단점을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 구조 및 동작원리

병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 자속구속형 초전도 전류제한기의 구조는 그림 1과 같이 하나의 철심을 매개로 두 코일이 병렬로 연결된 구조이며 두 코일중 하나와 초전도 소자가 직렬 연결된다. 이때, 철심은 갑작스런 단락전류 증가로 인한 자속의 포화를 방지하기 위해 공극을 도입하였다. 기본 동작원리는 정상시에는 두 코일에서 발생된 자속이 상쇄되었다가 단락사고이후 초전도 소자의 저항 발생으로 상쇄되지 않아 코일에 전압이 유기되어 제한기 임피던스에 의해 고장전류를 제한할 수 있게 된다.

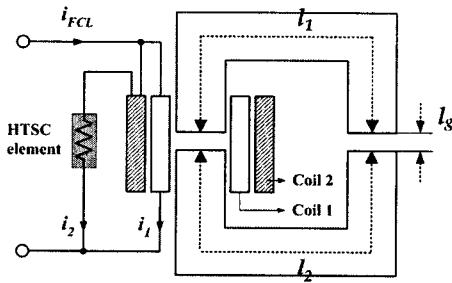


그림 1. 병렬연결된 두 코일을 가진 자속구속형 초전도 전류제한기의 구조
Fig. 1. Structure of a flux-lock type SFCL with parallel connection of two coils

2.2 등가회로 분석

공극이 도입된 철심에 두 코일이 병렬로 결선된 제한기의 전기등가회로는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다[2, 5]. 그림에서 R_{l1} , R_{l2} , L_{l1} , L_{l2} 는 각각 두 코일의 동선저항, 누설인덕턴스를 나타내며, R_{sc} 는 초

전도 소자의 상전도 저항을 나타낸다. L 과 L_g 는 철심의 평균자로길이(l_1+l_2), 공극자로길이(l_g), 철심단면적(A)로부터 식 (1)과 (2)와 같이 결정할 수 있다.

$$L = \frac{N_1^2 \mu_0 \mu_r A}{l_1 + l_2} \quad (1)$$

$$L_g = \frac{N_1^2 \mu_0 A}{2l_g} \quad (2)$$

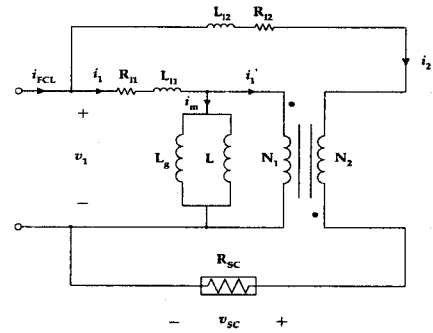


그림 2. 제한기 전기등가회로
Fig. 2. Electrical equivalent circuit of SFCL

그림 2의 등가회로에서 i_m , i_1' 전류를 구할 수 있으며[2-3], 철심에 공극이 없는 경우에는 $L_g = \infty$ 가 된다. 따라서, 철심이 포화될 경우에는 철심의 자로에 해당되는 자화인덕턴스 L 이 감소되어 고장전류의 제한이 충분히 이루어지지 않게 된다. 철심에 공극을 도입한 경우에는 $L_g \neq \infty$ 이 되며 $L_g < L$ 이 되도록 설계하여 단락전류가 증가되더라도 L_g 로 일부전류가 흐르게 함으로서 철심의 포화가 억제되는 효과를 기대할 수 있다. 반면에 제한기 전체임피던스는 감소되어 제한되는 전체단락전류의 크기는 증가될 수 있음을 예상할 수 있다.

2.3 실험장치 구성

전류제한 실험을 위해 구성한 각 구성요소들의 설계값들을 표 1에 나열하였으며 그림 3은 병렬연결된 두 코일을 가진 초전도 전류제한기의 전류제한 특성을 모의하기 위한 실험장치 구성을 보여준다. 초전도 소자는 식각공정을 통해 제작한 YBCO 박막을

사용하였으며, 초전도소자의 임계전류를 고려하여 전원저항(R_{in})과 부하저항(R_{Load})은 각각 2.3[Ω], 41.6 [Ω]을 사용하였다. 단락사고 모의는 SW_1 을 전원전압이 영이 되는 시점에서 투입한 후 SW_2 를 설정한 주기동안 투입하여 실시하였으며, 각 코일에 흐르는 전류와 초전도 소자양단전압을 포함한 각 코일의 유기전압을 측정하여 전류제한 특성을 분석하였다.

표 1. 두 코일이 병렬로 결선된 자속구속형 초전도 전류제한기 설계사양

Table 1. Design specification of SFCL with parallel connection of two coils

Flux-Lock Type SFCL		Value	Unit
Iron core			
l_1+l_2	Total length of flux path	806	mm
l_g	Length of air gap	2	mm
S	Cross sectional area	3201	mm ²
Two coils			
$N_1 (L_1)$	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			
Material	YBCO		
I_c	Critical current	21	A

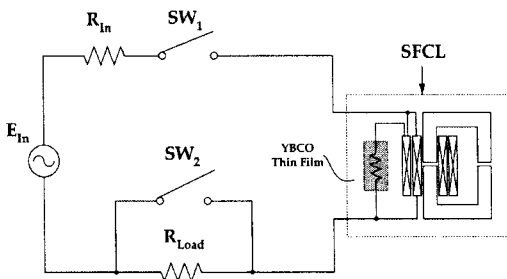


그림 3. 단락사고 모의실험회로도

Fig. 3. Experimental circuit for short-circuit test

2.4 실험결과 분석

그림 4는 두 코일의 결선방향을 감극결선한 경우 공극유무에 따른 자속구속형 초전도 전류제한기의 단락고장직후 전류제한특성을 보여준다. 고장이 발생한 후 초전도 소자의 퀘칭으로 인해 저항이 발생하게 되면 자화전류(i_m)가 유도되어 흐르게 되는 것을 볼 수 있으며, 특히 공극이 존재할 경우에는 앞선 등가회로에서 분석한 바와 같이 보다 큰 자화전류가 흐르게 되는 것을 확인할 수 있으며 공극이 없는 경

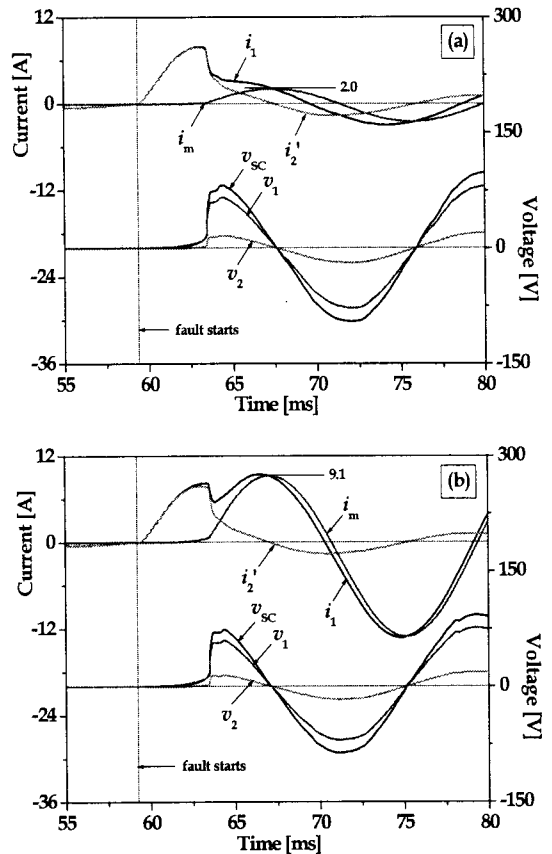


그림 4. 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 감극결선시 사고초기 사고전류제한 특성

- (a) 공극이 없을 경우
- (b) 공극이 존재할 경우

Fig. 4. Fault current limiting characteristics of a flux-lock type SFCL in case of subtractive polarity winding
(a) Without an air gap
(b) With an air gap

우에 비해 4.5배가량의 큰 자화전류가 흐르는 것을 비교할 수 있다. 그림 5는 두 코일의 결선방향을 가극결선한 경우 공극유무에 따른 사고직후 전류제한 특성을 보여준다.

가극결선하여 공극을 도입한 경우에도 자화전류 크기가 공극이 존재하지 않은 경우에 비해 4.5배가량 크게 흐르는 것을 볼 수 있으며 감극결선한 경우에 비해 보다 큰 자화전류가 흐르는 것을 분석할 수 있다. 반면에 감극결선한 경우와 가극결선한 경우 두 코일을 포함하여 초전도 소자에 유기되는 전압은

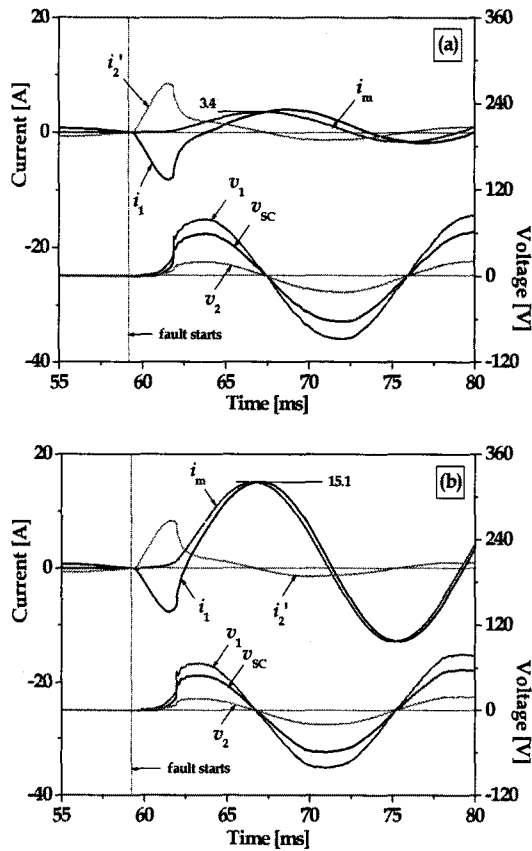


그림 5. 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 감극결선시 사고초기 사고전류제한 특성
(a) 공극이 없을 경우
(b) 공극이 존재할 경우

Fig. 5. Fault current limiting characteristics of a flux-lock type SFCL in case of subtractive polarity winding
(a) Without an air gap
(b) With an air gap

공극 존재유무에 관계없이 큰 변화가 없는 것을 그림 4와 5로부터 비교할 수 있다.

그림 6은 고장기간동안 제한기에 의해 제한되는 선로전류파형을 보여주며, 감극결선과 가극결선한 모든 경우에서 제한되는 선로전류의 크기가 공극이 존재한 경우가 존재하지 않은 경우보다 크게 되는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 분석한 바와 같이 공극이 존재하게 되면 자화전류크기가 증가되어 제한되는 전체전류의 크기 또한 증가한 것에 기인된 것으로 분석할 수 있다. 또한, 공극이 도입된 경우 제

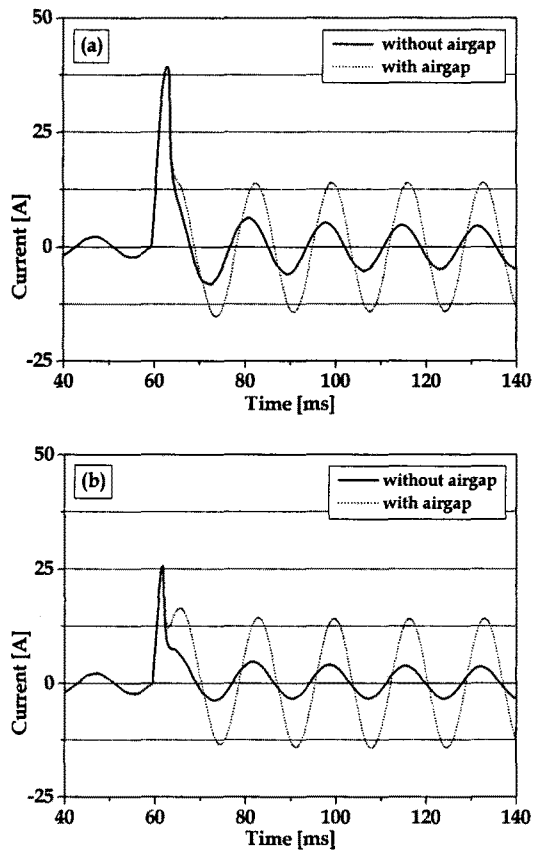


그림 6. 자속구속형 초전도 사고전류제한기의 공극유무에 따른 선로전류파형
(a) 감극결선한 경우
(b) 가극결선한 경우

Fig. 6. Line current waveform of a flux-lock type SFCL with air gap or without air gap
(a) In case of subtractive polarity winding
(b) In case of additive polarity winding

한되는 선로전류의 크기는 결선방향에 관계없이 비슷한 크기로 제한되는 것을 볼 수 있다.

위의 분석을 통해, 두 코일의 병렬연결을 갖는 자속구속형 초전도 전류제한기를 구성하는 철심의 사고발생시 포화를 방지하기 위해 공극을 도입하여 방지할 수 있으나 자화전류 증가에 따른 제한기의 임피던스 감소를 감수해야 되는 것을 분석할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 병렬연결된 두 코일의 자기결합을 이용한 초전도 전류제한기의 고장발생시 철심의 포화를 방지하기 위한 방안으로 공극을 도입할 경우 전류제한 특성을 등가회로와 실험을 통해 분석하였다. 공극이 존재할 경우 철심의 포화는 억제되지만 자화전류의 증가로 공극이 없는 경우보다 단락전류가 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Sung-Hun Lim, Tae-Hee Han, Seong-Woo Yim, Hyo-Sang Choi, and Byoung-Sung Han, "Current Limiting Characteristics of a Flux-Lock Type SFCL Dependent on Fault Angles and Core Saturation", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, pp. 1827-1830, June 2007.

◆ 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