

피크전류제한 설정에 따른 피크전류제한 기능을 갖는 자속구속형 초전도한류기의 고장전류제한 특성 분석

(Analysis on Fault Current Limiting Characteristics According to Peak Current Limiting
Setting of a Flux-Lock Type SFCL with Peak Current Limiting Function)

고석철*

(Seok-Cheol Ko)

Abstract

In this paper, the fault current limiting characteristics of a flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) with peak current limiting function were analyzed through its short-circuit tests. The setting condition for the peak current limiting operation was derived from its electrical equivalent circuit, which was dependent on the inductance ratio between the third coil and the first coil. Through the analysis on the short-circuit tests for the flux-lock type SFCLs with the different inductance ratio between the third coil and the first coil, the setting value for the peak current limiting operation of the flux-lock type SFCL with peak current limiting function could be confirmed to be adjusted with the variation of the inductance ratio between the third coil and the first coil.

Key Words : Flux-Lock Type Superconducting Fault Current Limiter (SFCL),
Peak Current Limiting Function, Short-Circuit Tests

1. 서 론

전력수요 증가와 이에 따른 발전설비 확장을 포함한
계통의 루프화와 분산전원의 연계 등으로 계통의 단
락전류 증가를 가속시켜 왔으며, 단락전류 저감을 위

한 다양한 방안들이 적용되어 시도되고 왔다[1-2]. 하
지만 평상시 전력손실발생과 인접계통에 영향, 용량증
대에 따른 교체비용과 기술제약 등으로 고장전류 저
감을 위한 효과적인 방안으로 평상시 영저항특성으로
손실발생이 없고 계통에 영향이 없는 초전도한류기에
관심을 가져왔고 다양한 초전도한류기 개발이 진행되
어 왔다[3-6].

개발된 초전도한류기 중 자속구속형 초전도한류기
는 평상시 두 코일에서 발생하는 자속이 서로 상쇄되
지만 단락발생시에는 초전도모듈의 켄치발생으로 인
한 저항발생으로 상쇄되지 않게 되어 두 코일에 전압
이 유기되고 이로 인해 고장전류를 제한하게 되는 원

* 주저자 : 공주대학교 산학협력단 조교수
* Main author : Kongju National University,
Industry-University Cooperation
Foundation Assistant Professor
Tel : 041-850-0528, Fax : 041-856-0501
E-mail : suntrac@kongju.ac.kr
접수일자 : 2012년 10월 31일
1차심사 : 2012년 11월 2일
심사완료 : 2012년 12월 9일

리로 동작하게 된다. 이때 자속구속형 초전도한류기를 구성하고 있는 두 코일의 방향과 인덕턴스비를 조절함으로써 고장전류제한이 이루어지는 동작전류와 제한임피던스를 조절할 수 있는 특징을 가지고 있다 [6-8]. 또한 고장전류 감지와 고장전류 제한동작이 동시에 이루어지는 기존의 초전도한류기가 갖는 전류제한동작기간동안 고장전류를 모두 감당해야 하는 부담과 고장전류크기에 따른 임피던스조절이 용이하지 않은 단점을 개선한 고장발생 초기에 고장전류크기에 따라 피크전류제한이 가능한 초전도한류기가 제안되어 동작특성과 유용성이 보고된 바 있다[9-10]. 피크전류제한이란 고장발생 초기 고장전류의 크기가 클 경우 2개의 초전도 모듈을 사용하여 두 번의 전류제한 동작이 이루어짐으로써 초전도 모듈의 고장전류 부담을 줄이기 위한 방법 중의 하나이다.

본 논문에서는 이에 착안하여 고장발생 초기에 고장전류의 크기에 따라 피크전류제한 기능이 가능한 자속구속형 초전도한류기를 제안하였으며, 전기적인 등가회로부터 피크전류 제한동작을 위한 전류설정식을 도출하여, 단락모의실험을 통해 피크전류제한설정치에 따른 피크전류 제한특성을 분석하였다.

2. 본 문

2.1 구조, 동작원리 및 등가회로

고장발생 초기에 고장전류크기가 클 경우 피크전류 제한동작이 가능한 초전도한류기의 구조를 그림 1에

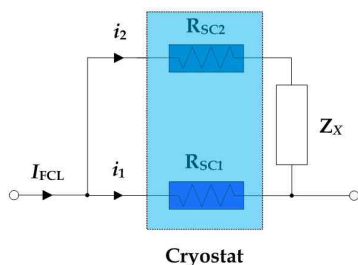


그림 1. 피크전류제한기능을 갖는 초전도한류기 구조
Fig. 1. Structure of a SFCL with peak current limiting function

나타내었다.

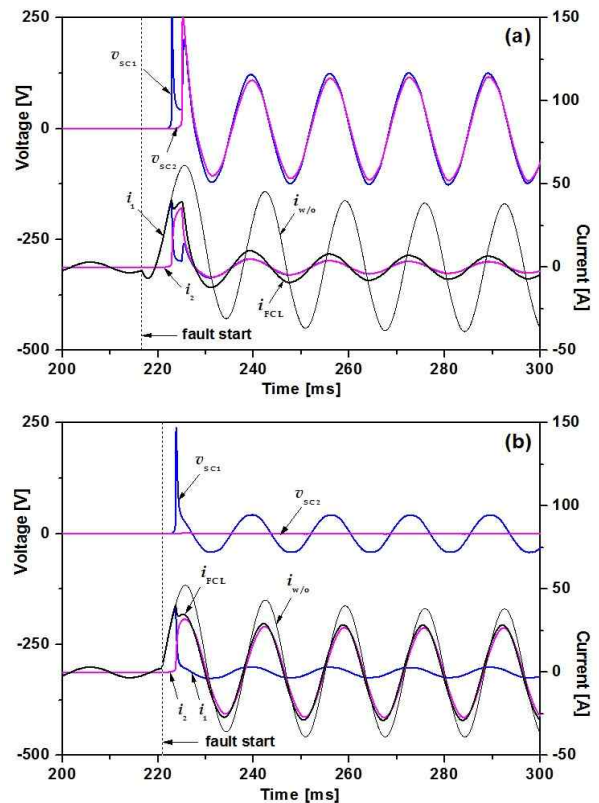


그림 2. 피크전류제한기능을 갖는 초전도한류기의 피크전류제한 동작파형
(a) 0도 고장발생시 (b) 90도 고장발생시
Fig. 2. Operational waveforms of a SFCL with peak current limiting function
(a) In case that a fault occurs at 0 angle
(b) In case that a fault occurs at 90 angle

피크전류제한기능을 갖는 초전도한류기는 그림 1에서 보는 바와 같이 전류제한을 담당하는 제한모듈이 두 개의 모듈로 분리된 구조를 가지며, 두 개의 모듈중 두 번째 모듈은 상전도 임피던스와 직렬로 연결된다. 정상시에는 두 개의 모듈은 초전도상태에 있기 때문에 전기적인 저항이 영인 상태에 있게 되므로 그림 2에서 보는 바와 같이 고장전에는 첫 번째 모듈로만 전류가 흐르게 된다. 하지만 고장발생과 동시에 첫 번째 모듈로 흐르던 고장전류가 첫 번째 모듈의 임계전류를 초과하게 되면 퀘칭발생으로 상전도 상태로 전이되며, 이때 발생하는 저항에 의해 고장전류가 제한되

어 고장전류의 일부가 두 번째 모듈로 분류되어 흐르게 된다. 만약 고장발생초기 고장전류의 피크값이 클 경우, 두 번째 모듈의 임계전류값을 초과하게 되어 두 번의 전류제한 동작이 이루어짐으로써 피크전류제한 동작을 수행하게 된다. 고장발생 초기에 고장전류의 초기피크값에 영향을 주는 조건으로 고장각에 따른 피크전류제한기능을 갖는 초전도한류기의 고장전류제한 특성을 모의하여 분석하였으며, 고장각이 0도와 90도에서 고장이 발생한 경우 초전도한류기의 고장전류제한 특성을 그림 2에 도시하였다. 고장각이 0도인 그림 2 (a)의 경우에는 고장발생초기에 고장전류의 피크값이 크게 되어 첫 번째 초전도모듈에서 전류제한이 이루어진 후 두 번째 초전도모듈에서도 임계전류초과에 따른 저항발생으로 전류제한동작이 이루어지는 것을 관찰할 수 있으며, 고장각이 90도인 경우, 즉 고장발생초기에 고장전류의 피크값이 작은 경우에는 첫 번째 초전도모듈에서만 전류제한동작이 이루어지는 것을 그림 2 (b)에서 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안한 피크전류제한 동작을 갖는 자속구속형 초전도한류기는 하나의 철심을 매개로 두 개의 권선이 직렬 또는 병렬로 연결되고 초전도 모듈이 두 개의 권선중 하나와 직렬 또는 병렬로 연결된 기존의 구조에 그림 3에서 보는 바와 같이 3차권선과 또 다른 초전도모듈을 추가한 구조를 갖는다.

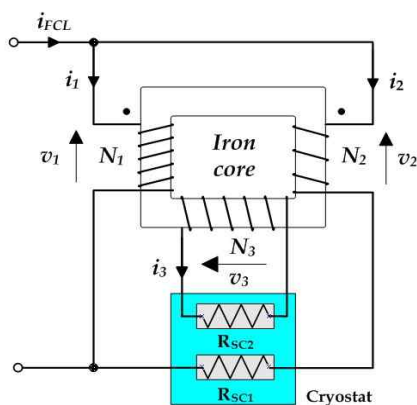


그림 3. 피크전류제한기능을 갖는 자속구속형 초전도한류기 구조
Fig. 3. Structure of a flux-lock type SFCL with peak current limiting function

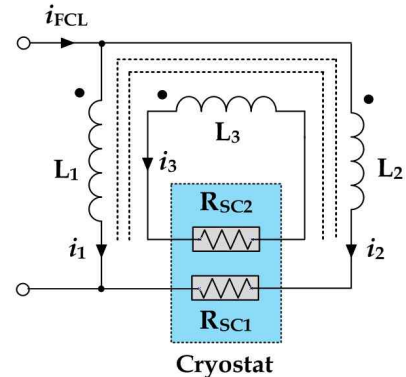


그림 4. 피크전류제한기능을 갖는 자속구속형 초전도한류기의 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuit of a flux-lock type SFCL with peak current limiting function

동작원리는 병렬로 연결된 두 개의 권선에서 발생되는 자속이 정상시에는 서로 상쇄되지만 단락발생시에는 두 번째 권선과 직렬연결된 초전도모듈에서 퀘칭으로 인한 저항발생으로 상쇄되지 않게 되어 두 개의 권선에 전압이 유기되고 이로 인해 고장전류를 제한하게 된다. 이와 동시에 상쇄되지 않은 철심내부의 자속으로 인해 3차 권선에도 전압이 유기되어 전류가 흐르게 된다. 이때 고장발생 초기에 고장전류의 크기가 클 경우 철심내부의 유기자속도 크게 발생하게 되어 3차 권선에 유기되어 흐르는 전류도 크게 상승하게 되고 3차 권선에 연결된 두 번째 초전도 모듈의 임계전류를 초과하게 되면 퀘칭발생으로 저항이 발생하게 되어 두 번째 고장전류제한 동작인 피크전류제한 동작을 고장발생 초기에 수행하게 된다. 피크전류 제한동작이 시작되는 고장전류의 크기는 그림 4에 나타난 전기적인 등가회로로부터 유도할 수 있으며, 식 (1)과 같이 1차와 3차 권선의 자기인덕턴스(L_1, L_3)와 3차 권선에 연결된 초전도 모듈의 임계전류값(IC)을 조절함으로써 설정할 수 있다.

$$I_{op} = I_C \sqrt{\frac{L_3}{L_1}} \quad (1)$$

2.2 실험장치 구성

등가회로로부터 전개한 피크전류제한이 시작되는

고장전류의 설정식 (1)로부터 피크전류제한 설정치에 따른 피크전류제한 특성을 분석하기 위한 단락모의회로를 구성하였으며, 구성도와 피크전류제한 기능을 갖는 자속구속형 초전도한류기의 각 구성요소들의 설계값들을 그림 5와 표 1에 나타내었다.

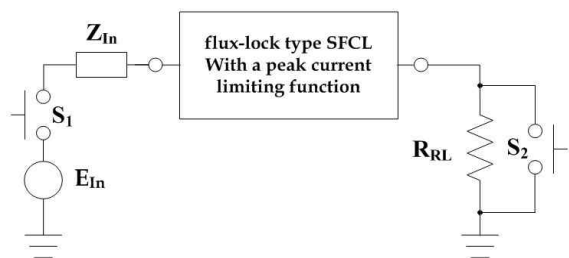


그림 5. 단락모의계통 구성도.
Fig. 5. Structure of a short-circuit simulated system

표 1. 피크전류제한 기능을 갖는 초전도한류기의 구성요소 사양
Table 1. Design specification of a flux-lock type SFCL with a peak current limiting function

Three coils		Value	Unit
L ₁	Self inductance of coil 1 (Turn number)	87.05 (60)	mH (turn)
L ₂	Self inductance of coil 2 (Turn number)	4.96 (15)	mH (turn)
가극	Winding direction between coil 1 and coil 2		
L ₃	Self inductance of coil 3 (Turn number)	87.05 (60) 136.99 (75)	mH (turn)
L ₃ /L ₁	Inductance ratio between coil 3 and coil 1	1 1.574	
HTSC elements (YBCO)		Value	Unit
T _C	Critical temperature	87	K
I _C	Critical current	27	A

그림 5의 단락모의회로 구성도에서 스위치 S₁를 투입하여 전원전압(E_{In})을 인가하였으며, 스위치 S₁이 투

입된 후 설정한 고장각에서 스위치 S₂를 투입함으로써 단락을 모의하였다. 또한, S₂를 5주기동안 투입한 후 개방시킴으로써 고장을 제거하였다.

2.3 실험결과 분석

피크전류제한 설정값에 따른 자속구속형 초전도한류기의 피크전류제한 특성을 조사하기 위해 등가회로로부터 전개한 피크전류제한이 시작되는 전류설정식 (1)로부터 3차권선과 1차권선의 인덕턴스 비를 1과 1.574로 설계한 경우에 대해 분석하였으며, 3차권선과 1차권선의 인덕턴스 비가 1에서 1.574로 증가함에 따라 제한이 시작되는 피크전류값은 각각 약 27A에서 33.9A로 증가되는 것을 식 (1)로부터 계산할 수 있다.

그림 6은 피크전류제한 기능을 갖는 자속구속형 초전도한류기의 3차권선과 1차권선의 인덕턴스 비에 따른 고장전류발생 직후 피크전류제한 동작특성을 보여 준다. 그림 6 (a)에서 보는 것처럼 3차권선과 1차권선의 인덕턴스 비를 1로 설계한 자속구속형 초전도한류기를 적용하여 160V 전원전압에서 단락을 모의한 경우 고장발생 직후 첫 번째 초전도모듈의 퀘칭으로 인한 저항발생으로 고장전류제한과 함께 3차권선에 유도된 전류가 두 번째 초전도모듈의 임계전류값을 초과함과 동시에 고장전류 또한 피크전류제한 설정값을 초과하게 되어 피크전류제한 동작이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 반면에 3차권선과 1차권선의 인덕턴스 비를 1.574로 설계하여 적용한 경우에는 인덕턴스 비를 1로 설계한 경우보다 피크전류제한값이 33.9A로 증가됨과 동시에 3차권선에 유가된 전류가 두 번째 초전도모듈의 임계전류값을 초과하지 않게 되어 피크전류제한 동작이 이루어지지 않는 것을 그림 6 (b)에서 관찰할 수 있다.

3차권선과 1차권선의 인덕턴스 비를 1.574로 설계한 경우 단락직후 고장전류의 피크크기를 증가시키기 위해 전원전압을 200V로 증가시켜 단락을 모의한 경우 그림 6 (c)에 도시한 바와 같이 3차권선의 전류가 임계전류값을 초과하게 되어 피크전류제한동작이 이루어지는 것을 분석할 수 있다.

그림 7은 3차권선과 1차권선의 인덕턴스 비에 따른

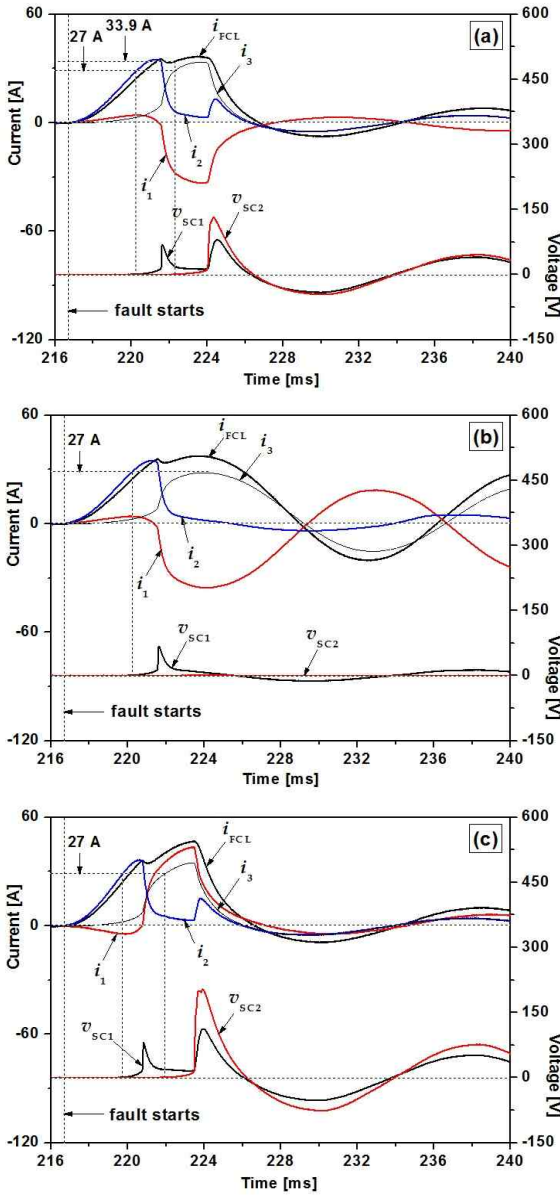


그림 6. 피크전류제한 기능을 갖는 자속구속형 초전도한류기의 3차권선과 1차권선의 인덕턴스비에 따른 고장발생직후 피크전류제한 특성
 (a) $L_3/L_1 = 1.000$ ($E_{in} = 160V$)
 (b) $L_3/L_1 = 1.574$ ($E_{in} = 160V$)
 (c) $L_3/L_1 = 1.574$ ($E_{in} = 200V$)
 Fig. 6. Peak current limiting characteristics of a flux-lock type SFCL with peak current limiting function according to inductance ratio between 3rd and 1st windings
 (a) $L_3/L_1 = 1.000$ ($E_{in} = 160V$)
 (b) $L_3/L_1 = 1.574$ ($E_{in} = 160V$)
 (c) $L_3/L_1 = 1.574$ ($E_{in} = 200V$)

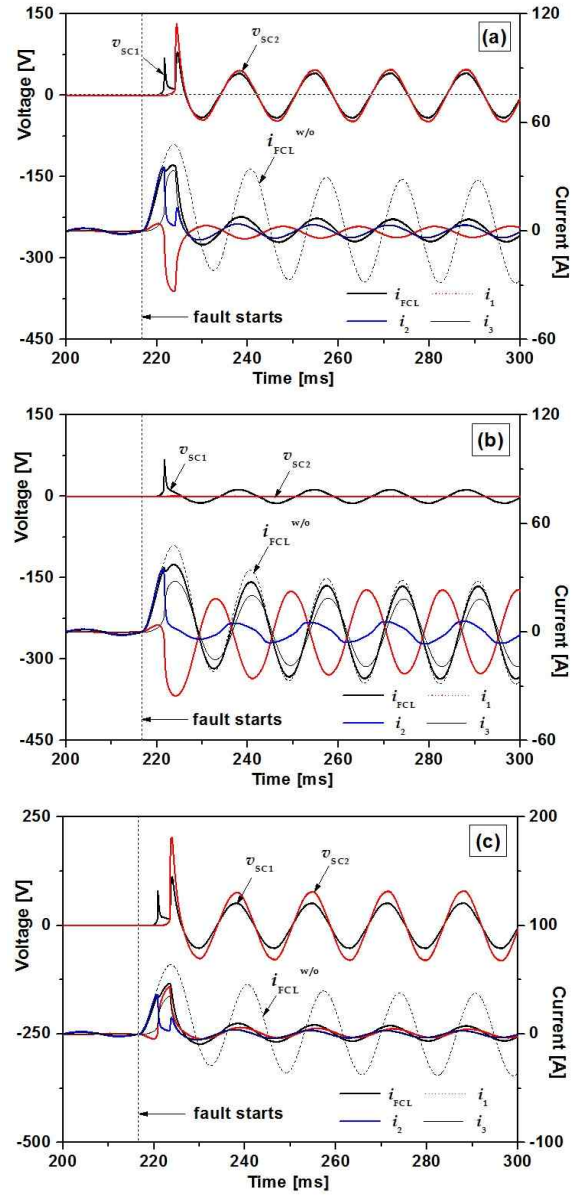


그림 7. 피크전류제한기능을 갖는 자속구속형 초전도한류기의 3차권선과 1차권선의 인덕턴스비에 따른 피크전류제한 특성
 (a) $L_3/L_1 = 1.000$ ($E_{in} = 160V$)
 (b) $L_3/L_1 = 1.574$ ($E_{in} = 160V$)
 (c) $L_3/L_1 = 1.574$ ($E_{in} = 200V$)
 Fig. 7. Peak current limiting characteristics of a flux-lock type SFCL with peak current limiting function according to inductance ratio between 3rd and 1st windings
 (a) $L_3/L_1 = 1.000$ ($E_{in} = 160V$)
 (b) $L_3/L_1 = 1.574$ ($E_{in} = 160V$)
 (c) $L_3/L_1 = 1.574$ ($E_{in} = 200V$)

피크전류제한기능을 갖는 자속구속형 초전도한류기의 고장전류제한 특성을 보여준다. 그림 6에서 분석한 것처럼 고장발생후 첫 번째 초전도모듈에서 켄치발생으로 저항이 발생한 후 3차권선에 유기된 전류가 두 번째 초전도모듈의 임계전류를 초과할 경우 피크전류제한 동작이 진행되는 것을 확인할 수 있으며, 피크전류제한 동작이 이루어진 경우에는 고장전류제한도 보다 크게 이루어지는 것을 그림 7에서 비교할 수 있다. 또한 고장발생후 첫 번째 초전도모듈에서 유기되는 전압은 1차권선과 2차권선에서 유기되는 전압의 차와 같은 크기로 유기되고 두 번째 초전도모듈에서 켄치발생으로 인해 유기되는 전압은 3차권선의 권선수가 증가함에 따라 증가하는 것을 피크전류제한 동작이 이루어진 그림 7 (a)와 7 (c)에서 분석할 수 있다.

본 논문에서 분석한 피크전류제한 기능을 갖는 자속구속형 초전도한류기의 피크전류제한이 이루어지는 설정값을 증가시킬 경우 고장초기 피크전류제한 동작의 미수행과 함께 전류제한 효과도 저하되는 현상을 관찰할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 고장발생 초기에 고장전류의 크기에 따라 피크전류제한 기능을 갖는 자속구속형 초전도한류기를 제안하였으며, 피크전류 제한동작을 위한 전류설정식을 등가회로로부터 도출하여, 단락모의실험을 통해 피크전류 제한설정에 따른 피크전류 제한특성을 분석하였다. 등가회로로부터 도출한 피크전류 제한 설정값을 증가시킬 경우 피크전류 제한이 진행되지 않는 것을 단락모의실험을 통해 분석할 수 있었다. 피크전류 제한 동작의 미수행과 함께 전류제한 효과의 저하현상에 대해서는 추후 연구를 통해 원인분석과 함께 향상방안에 보고할 것이다.

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] K.-W. Lee, "Power System Fault Current Problems and Superconducting Fault Current Limiter", Superconductivity and Cryogenics, pp.8~12, January 2001.
 [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] H. Yamaguchi, T. Kataoka, K. Yaguchi, S. Fujita, K. Yoshikawa, K. Kaiho, "Characteristics Analysis of Transformer Type Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. Appl. Superconduct., pp.815-818, June 2004.
 [5] T.K. Ko, "Development of High-Tc Superconducting Fault Current Limiter with Inductive Type Superconductivity and Cryogenics, pp. 18~22, January 2003.
 [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] 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.
 [9] Sung-Hun Lim, "Study on current limiting characteristics of SFCL with two trigger current levels", Physica C, vol. 470, pp. 1631-1635, Nov. 2010.
 [10] Tae-Hee Han, Sung-Hun Lim, "Analysis on Current Limiting Characteristics of a Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) with a Peak Current Limiting Function", IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 24, no. 1, pp. 47-51, Jan. 2011.

◆ 저자소개 ◆



고석철 (高錫喆)

1970년 3월 20일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003~2004년 한국기초과학지원연구원 전주센터 연구생. 2005~2008년 전남테크노파크 정책기획단 책임연구원, 2008~2012년 충남테크노파크 정책기획단 팀장. 2012년~현재 공주대학교 산학협력단 조교수.