

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작전류와 각 코일의 전류분류 분석

Analysis on Operational Current and Current Distribution between Two Coils of Flux-lock Type SFCL

박충렬¹, 임성훈^{2,a}, 박형민³, 최효상³, 한병성¹

(Chung-Ryul Park¹, Sung-Hun Lim^{2,a}, Hyoung-Min Park³, Hyo-Sang Choi³, and Byoung-Sung Han¹)

Abstract

A flux-lock type superconducting fault current limiter(SFCL) consists of two coils, which are wound in parallel each other through an iron core, and a high-T_C Superconducting(HTSC) thin film connected in series with coil 2. If the current of the HTSC thin film exceeds its critical current by the fault accident, the resistance of the HTSC thin film generated, and thereby the fault current can be limited by the impedance of the flux-lock type SFCL. In this paper, we investigated the dependence of both the fault current limiting characteristics and the current distribution between two coils on the operational current of the flux-lock type SFCL through the equivalent circuit analyses and short circuit tests. From the comparison of both the results, the experimental results well agreed with the analyses for equivalent circuit.

Key Words : Flux-lock type SFCL, HTSC thin film, Critical current, Fault current limiting

1. 서 론

지속적인 전력수요의 증가와 더불어 대단위 발전설비가 증가됨에 따라 전력전송 용량이 날로 증가하게 되었다. 전력전송 용량의 증가는 단락사고로 인한 고장전류의 증가를 야기시켰고, 증가된 고장전류는 이미 차단기의 차단내력을 상회하게 되어 전력계통과 관련된 각종 전기설비의 안정도 문제에 심각한 영향을 주게 되었다. 따라서, 고장전류를 극복하기 위해 차단내력이 큰 차단기로서의 교체, 고임피던스 전력설비 채용, 직렬한류리액터 설

치, 파워퓨즈 설치 등 여러 가지 방안이 제시되었지만, 그 나름대로의 문제점을 여전히 안고 있다 [1]. 최근 들어 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 여러 가지 고온초전도 전류제한기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 금명간 실용화가 가능하리라 예측되고 있다[2-5]. 그 중에서도 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 고장전류가 코일과 소자에 양분되어 흐르기 때문에 고온초전도 소자의 파손 우려가 적고, 각 코일의 인덕턴스 비를 달리하여 제한되는 전류의 크기 조절이 가능하며, 단위소자의 통전전류 및 한류저항이 증가되는 구조로 되어 있어 단위소자의 수를 줄일 수 있는 잇점이 있다. 또한, 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 링이나 튜브형태의 고온초전도 소자대신 벌크나 YBa₂Cu₃O_x 박막형태로 제작된 저항형 한류소자를 사용하기 때문에 유도형 고온초전도 전류제한기에 비해 고온초전도체의 제작이 용이한 장점을 갖는다[6,7].

1. 전북대학교 전기공학과
(전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14)
2. 전북대학교 공업기술연구소센터
3. 조선대학교 전기공학과
a. Corresponding Author : superish73@hanmail.net
접수일자 : 2005. 6. 7
1차 심사 : 2005. 6. 21
심사완료 : 2005. 7. 19

본 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로부터 각 코일의 전류를 유도한 뒤, 코일 1과 2의 인덕턴스 변화에 따른 각 코일의 전류 변화를 분석하였다. 또한, 실험을 통해 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 인덕턴스 변화에 따른 고장전류제한 특성을 분석하였다. 마지막으로, 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 인덕턴스 변화에 따른 제한기 동작전류가 사고시 전류제한 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 구조 및 동작원리

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조는 그림 1과 같이 강자성체 철심에 코일 1과 코일 2가 각각 병렬 연결되어 있고, 고온초전도 소자(YBCO 박막)는 코일 2에 직렬로 연결되어 있다. 고온초전도 소자(YBCO 박막)는 임계온도 이하를 유지하기 위해 액체질소가 담겨져 있는 Cryostat 내부에 존재한다. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작 특성은 병렬로 연결된 코일 1과 코일 2의 결선 방향에 따라 가극결선시 동작과 감극결선시 동작으로 나누어진다. 코일 1과 코일 2에 유도되는 전압을 V_1 과 V_2 라 하면 각 코일의 전압은 식 (1)과 (2)와 같이 표현된다.

정상 동작시 고온초전도 소자 양단전압은 0이므로 코일 1과 코일 2의 양단 전압은 같게 되며 이때, 각 코일에서 유기되는 자속은 서로 상쇄되므로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$V_1 = N_1 \frac{d\psi}{dt} \tag{1}$$

$$V_2 = \pm N_2 \frac{d\psi}{dt} \tag{2}$$

$$(N_1 \pm N_2) \frac{d\psi}{dt} = 0 \tag{3}$$

식 (3)에서 $N_1 \pm N_2 \neq 0$ 이 만족한다면 $d\psi/dt = 0$ 은 언제나 성립된다. 이것은 각 코일에 쇄교되는 자속은 시간적으로 변하지 않고 구속되어 있는 것처럼 동작하기 때문에 ‘자속구속형’이라고 칭하게 되었다. 고장전류가 고온초전도 소자의 임계전류를 초과하면 소자의 퀀치 발생으로 저항(R_{sc})이 발생하고 이로 인해 전압(V_{sc})이 유기된다. 결국 식 (3)은 더 이상 성립되지 않는다. 따라서 코일의 쇄교 자속은 시간에 따른 변화가 생기게 되고 각 코일에 전압이 유기되어 발생된 제한기의 임피던스에 의해 고장전류가 제한된다.

3. 등가회로 분석

그림 1의 구조로부터 그림 2의 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로를 유도할 수 있다.

그림 2의 등가회로로부터 식 (4), (5)와 같은 각 코일의 전류와 제한기 임피던스에 관한 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{I_{sc}}{I_{FCL}} = \frac{j\omega\sqrt{L_1}L}{R_{sc} + j\omega L^2} \tag{4}$$

$$\frac{I_1}{I_{FCL}} = \frac{R_{sc} + j\omega L(L - \sqrt{L_1})}{R_{sc} + j\omega L^2} \tag{5}$$

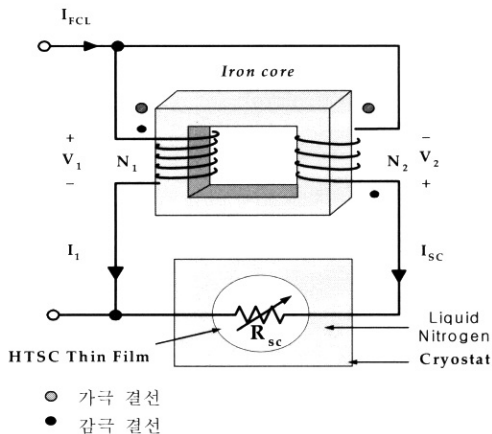


그림 1. 자속구속형 고온초전도 전류제한기 구조.
Fig. 1. Scheme of a flux-lock type SFCL.

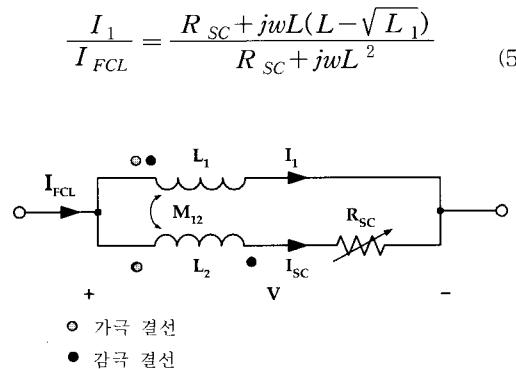


그림 2. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로.

Fig. 2. Equivalent circuit of a flux-lock type SFCL.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험 장치 및 방법

자속구속형 전류제한기의 초기 고장전류제한 시점에 대한 실험회로도에는 그림 4와 같이 나타난다. Vs는 60 Vrms로 인가된 전원 전압이고 Rin은 전류 변화를 측정하기 위한 1 Ω짜리 기준저항을 나타내며 부하저항 RL은 50 Ω으로 설정하였다. 코일 1과 코일 2를 감·가극으로 결선한 후 스위치 SW1을 닫아 회로에 전원전압을 인가했다. 회로에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하지 않았기 때문에 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 단락선로처럼 동작했다. 스위치 SW2를 닫아 단락사고를 발생시키면 고온초전도 소자에 흐르는 전류는 임계전류를 초과하게 되고 켄치가 발생했다. 이때, 회로에 흐르는 선로전류(IFCL), 코일 1에 흐르는 전류(I1), 초전도소자에 흐르는 전류(ISC), 코일 1, 2의 양단전압(V1, V2)과 초전도소자 양단전압(VSC)을 측정하였다. 또한, 코일 1과 2의 턴수를 변화시켜 위와 동일한 실험을 수행하였다.

위 식에서 $L = \sqrt{L_1} \pm \sqrt{L_2}$ 이고, +또는 -부호는 1, 2차 코일에 의한 자속의 증감에 따라 결정된다. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 사고 발생 직후에 고온초전도 소자에 흐르는 전류가 임계전류(Iq)에 도달 되었을 때, 제한되기 시작하는 선로전류를 제한기 동작전류(IIm)로 정의한다, 식 (4)에서 Rsc=0, Isc=Iq을 대입하여 정리하면 제한기 동작전류는 식 (6)과 같이 나타내어진다.

$$I_{Im} = \left(1 \pm \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}\right) I_q = \frac{L}{\sqrt{L_1}} I_q \quad (6)$$

위 식에서 보는 것처럼 제한기 동작전류 크기는 코일 1과 코일 2의 인덕턴스 값을 조절함으로써 설정할 수 있음을 확인할 수 있으며 이는 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 가장 큰 특징 중의 하나이다.

그림 3은 식 (6)을 이용하여 코일 1과 2의 인덕턴스 비에 따른 제한기의 동작전류와 고온초전도 소자의 임계전류의 비를 보여준다. 이는 코일 1과 2의 권선방향에 따른 쇄교자속의 증감에 따라 고장전류 제한특성이 다르게 나타남을 보여준다. 코일 1과 코일 1과 2의 권선방향을 감극 결선한 경우, 코일 1과 2의 인덕턴스비가 증가함에 따라 사고초기에 제한기 동작전류의 크기가 증가한다. 반면, 가극 결선한 경우 사고초기의 제한기 동작 전류가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

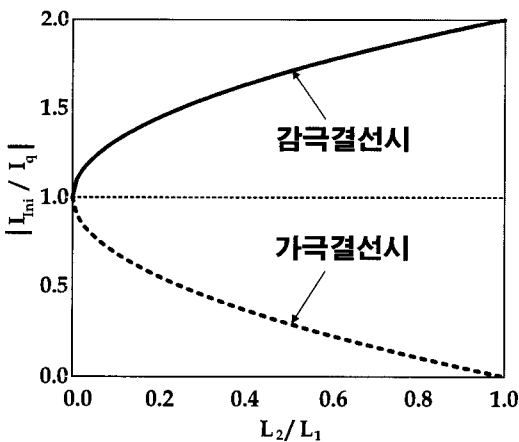


그림 3. L2/L1에 대한 IIm/Iq의 변화.
Fig. 3. Variation of IIm/Iq as a function of L2/L1.

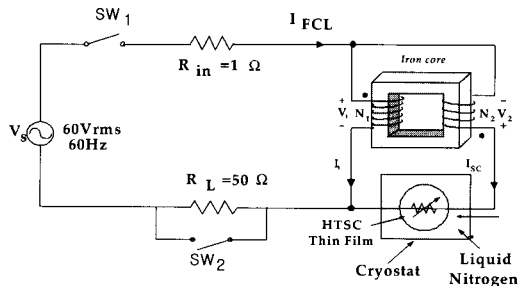


그림 4. 실험 회로 구성도.
Fig. 4. Diagram of the circuit for experiment.

4.2 실험 결과 및 고찰

그림 5는 인덕턴스 변화에 따른 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 감극 결선시 사고발생 이후 5주기 동안 전류파형을 나타낸 그림이다. 그림 5 (a), (b)에서 선로전류(IFCL)는 코일 1에 흐르는 전류(I1)와 고온초전도소자에 흐르는 전류(ISC)의 합으로 나타나며, 사고 직후 고온초전도소자에 흐르는 전류(ISC)가 17 A를 넘는 시점(Qr, (a) 59.65 [ms] (b) 59.82 ms)부터 제한되기 시작하였다. 이때의 선로전류(IFCL)를 제한기 동작전류(IIm), (a) 21.72 A, (b) 29.65 A)라 하며, 이 전류는 각각 최대 41.42 A, 51.17 A까지 상승하다 3주기 이후 9 A, 11 A이하로 제한되었다.

그림 6은 인덕턴스 변화에 따른 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 가극 결선시 5주기 동안 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 6에서 선로전류 (I_{FCL})는 고온초전도소자에 흐르는 전류(I_{SC})와 코일 1에 흐르는 전류(I_1)의 차로 나타나며, 제한기 초기 동작전류(I_{mi})는 각각 59.45, 59.31 ms에서 11.69 A, 5.52 A로 나타났다. 사고발생 후 선로전류(I_{FCL})의 최대 피크의 크기는 각각 20.75 A, 10.41 A로 나타난다 3주기 이후 5 A, 3 A이하로 제한되었다.

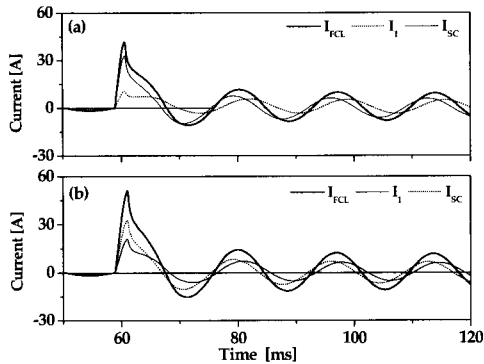


그림 5. 감극 결선시 전류파형.
(a) $L_2/L_1=0.577$ (b) $L_2/L_1=0.816$
Fig. 5. Current waveforms after a fault instance in case subtractive polarity winding (a) $L_2/L_1=0.577$ (b) $L_2/L_1=0.816$.

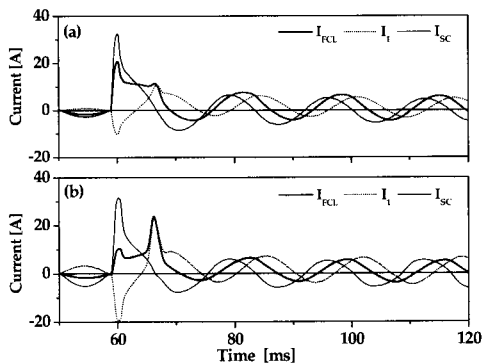


그림 6. 가극 결선시 전류파형.
(a) $L_2/L_1=0.577$ (b) $L_2/L_1=0.816$
Fig. 6. Current waveforms after a fault instance in case additive polarity winding (a) $L_2/L_1=0.577$ (b) $L_2/L_1=0.816$.

그림 7은 코일 1과 코일 2의 인덕턴스 비(L_2/L_1)의 변화에 따라 고온초전도소자에 흐르는 전류 (I_{SC})가 임계전류($I_q=17$ A)를 넘어서는 순간 코일에 흐르는 전류와 선로전류 비($|I_{mi}/I_q|$, $|I_{mi}/I_1|$)의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 3에서와 같이 감극 결선한 경우 코일 1과 코일 2의 인덕턴스 비(L_2/L_1)가 커질수록 임계전류와 제한기 동작전류의 비($|I_{mi}/I_q|$)는 증가하며, 가극 결선한 경우 코일 1과 코일 2의 인덕턴스 비(L_2/L_1)가 증가할수록 임계전류와 제한기 동작전류의 비($|I_{mi}/I_q|$)가 감소하는 것을 제 차 확인할 수 있었다. 또한, 그림 7에서 코일 1과 코일 2의 인덕턴스 비(L_2/L_1)가 증가할수록 코일 1과 동작전류의 비($|I_{mi}/I_1|$)는 감, 가극 결선시 모두 감소하는 것을 확인하였다.

그림 8, 9, 10, 11은 자속구속형 고온초전도 전류 제한기를 감, 가극으로 결선한 후 코일 1의 인덕턴스를 일정하게 유지하고, 코일 2의 인덕턴스 증가에 따른 고온초전도 소자저항(R_{SC})에 따른 I_{SC}/I_{FCL} , I_1/I_{FCL} 의 변화를 나타낸 것이다. 사고후 소자저항 (R_{SC}) 변화에 따른 I_{SC}/I_{FCL} , I_1/I_{FCL} 의 변화를 분석하기 위하여 사고발생 직후 퀵발생 시점(Q_1)과 5 주기 동안 매 주기의 선로전류(I_{FCL}) 피크 값에서 계산하였다. 그림 8과 그림 9의 감극 결선한 경우 각 시점에서의 I_{SC}/I_{FCL} 과 I_1/I_{FCL} 의 합은 1로 일정하게 나타난 반면, 그림 10과 11의 가극결선한 경우에는 각 시점에서의 I_{SC}/I_{FCL} 과 I_1/I_{FCL} 의 차는 1로 일정하게 나타났다. 이는 식 (4)와 (5)의 관계에서도 확인한 결과와 일치했다.

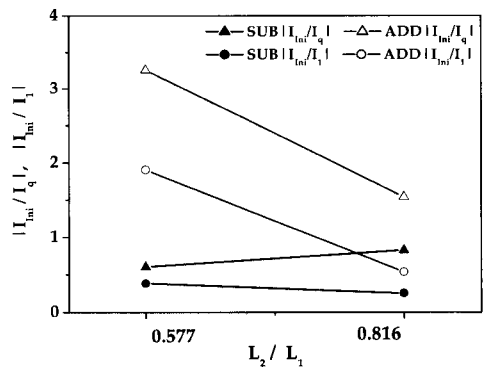


그림 7. L_2/L_1 의 변화에 따른 $|I_{mi}/I_q|$, $|I_{mi}/I_1|$ 의 변화.
Fig. 7. The variance of $|I_{mi}/I_q|$, $|I_{mi}/I_1|$ according to the variance of L_2/L_1 .

그림 8, 9, 10, 11에서 사고초기 코일 1에 흐르는 전류(I_1)과 고온초전도 소자에 흐르는 전류(I_{SC})사이 전류분류 차는 감극 결선한 경우가 가극 결선한 경우보다 작게 나타나다가 3주기 이후에는 비슷하게 나타난다. 또한 감극결선의 경우 코일 2의 인덕턴스가 증가할수록 사고초기 전류분류 차는 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 반면에, 가극결선의 경우 코일 2의 인덕턴스가 증가할수록 사고초기

전류분류 차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 요약하면, 자속구속형 고온초전도 전류제한기를 구성하는 두 코일의 권선방향과 인덕턴스의 비에 따라 사고초기에 각 코일에 흐르는 전류크기에는 차이가 발생하지만 사고가 진행됨에 따라 각 코일에도통되는 전류크기는 거의 동일한 값으로 수렴함을 확인할 수 있었다.

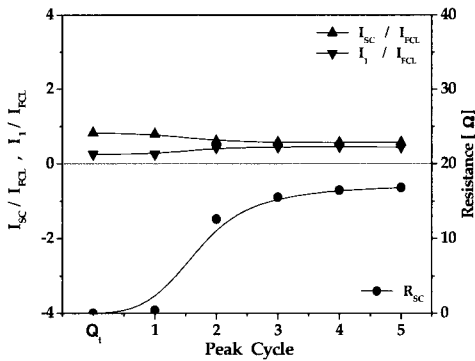


그림 8. 감극결선시 고온초전도 소자저항(R_{SC})과 I_{SC}/I_{FCL} , I_1/I_{FCL} 의 변화($L_2/L_1=0.577$).
 Fig. 8. The variance of I_{SC}/I_{FCL} , I_1/I_{FCL} and resistance of HTSC element in case of subtractive polarity winding($L_2/L_1=0.577$).

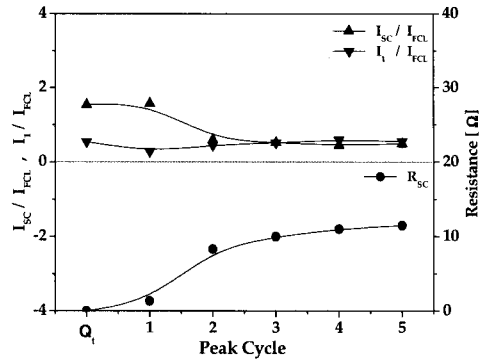


그림 10. 가극결선시 고온초전도 소자저항(R_{SC})과 I_{SC}/I_{FCL} , I_1/I_{FCL} 의 변화($L_2/L_1=0.577$).
 Fig. 10. The variance of I_{SC}/I_{FCL} , I_1/I_{FCL} and resistance of HTSC element in case of additive polarity winding($L_2/L_1=0.577$).

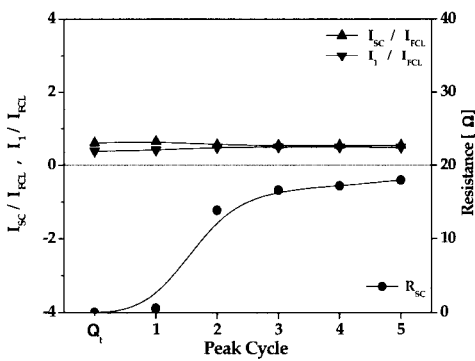


그림 9. 감극결선시 고온초전도 소자저항(R_{SC})과 I_{SC}/I_{FCL} , I_1/I_{FCL} 의 변화($L_2/L_1=0.816$).
 Fig. 9. The variance of I_{SC}/I_{FCL} , I_1/I_{FCL} and resistance of HTSC element in case of subtractive polarity winding($L_2/L_1=0.816$).

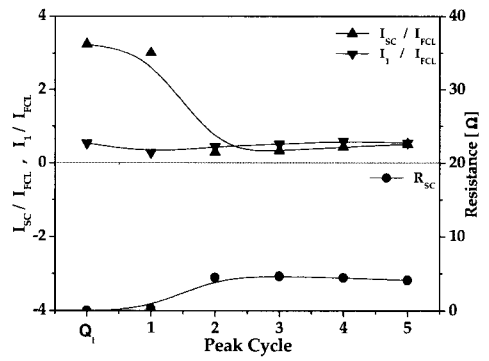


그림 11. 가극결선시 고온초전도 소자저항(R_{SC})과 I_{SC}/I_{FCL} , I_1/I_{FCL} 의 변화($L_2/L_1=0.816$).
 Fig. 11. The variance of I_{SC}/I_{FCL} , I_1/I_{FCL} and resistance of HTSC element in case of additive polarity winding($L_2/L_1=0.816$).

5. 결론

본 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로를 분석한 뒤 감·가극 결선의 경우 사고발생 직후 제한기 동작전류에 대해 살펴보았다. 그 결과, 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 감극결선시 코일 1, 2의 인덕턴스 비와 가극결선시 코일 1, 2의 인덕턴스 비가 동일한 경우, 제한기 동작전류는 가극결선시가 감극결선시 보다 작게 나타났다. 또한, 코일 1과 코일 2 사이의 초기 전류분류 차는 가극결선시가 감극결선시보다 크게 나타났으나, 3주기 이후부터는 결선방향에 관계없이 동일하게 분류되는 것을 확인하였다.

참고 문헌

[1] 김준환, 이강완, “전력계통, 고장전류 증대와 대응방안”, 전기저널, 1권, 2호, p. 19, 1998.

[2] L. salasoo, A. F. Imece, R. W. Delmerico, and R. D. Wyatt, “Comparison of superconducting fault limiter concepts in electric utility applications”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, No. 2, p. 1079, 1995.

[3] 임성훈, 최명호, 이현수, 한병성, “차폐유도형 고온초전도 전류제한기의 설계 및 특성 시뮬레이션”, 전기학회논문지, 48C권, 3호, p. 173, 1999.

[4] 김태중, 강형구, 고태국, “유도형 고온초전도 한류기용 prototype 직류 리액터의 설계 및 제작”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 12S호, p. 1292, 2003.

[5] M. Yamaguchi, S. Fukui, T. Satoh, Y. Kaburaki, T. Horikawa, and T. Honjo, “Performance of DC reactor type fault current limiter using high temperature superconducting coil”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, No. 2, p. 940, 1999.

[6] 박충렬, 임성훈, 박형민, 최효상, 한병성, “자속구속형 전류제한기의 초기 사고전류 제한시점 변화”, 전기전자재료학회논문지, 18권, 3호, p. 269, 2005.

[7] 박형민, 임성훈, 박충렬, 최효상, 한병성, “자속구속형과 저항형 초전도 전류제한기의 특성비교”, 전기전자재료학회논문지, 18권, 4호, p. 363, 2005.