

고온초전도체를 이용한 자속구속 리액터의 히스테리시스 특성

임성훈\*, 최효상\*\*, 고석철\*\*\*, 이종화\*\*\*\*, 박식\*\*\*\*, 강형곤\*\*\*\*, 한병성\*\*\*\*

\*전북대학교 공업기술연구소, \*\*조선대학교 전기공학과,  
\*\*\*전북대학교 전자정보공학부, \*\*\*\*전북대학교 반도체물성연구소

Hysteresis Characteristics of Flux-Lock Reactor using HTSC

Sung-Hun Lim\*, Hyo-Sang Choi\*\*, Seok-Cheol Ko\*\*\*, Jong-hwa Lee\*\*\*\*,  
Sick Park\*\*\*\*, Hyeong-Gon Kang\*\*\*\*, Byoung-Sung Han\*\*\*\*

\*The Research Center of Industrial Technology, Engineering Research Institute, Chonbuk National Uni., \*\*Department of Electrical Engineering, Chosun Uni.,

\*\*\*Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National Uni.,

\*\*\*\*Semiconductor Physics Research Center, Chonbuk National Uni.

**Abstract** - For the design to prevent the saturation of iron core and the effective fault current limitation, the analysis for the operation of the flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) with consideration for the hysteresis characteristics of iron core is required. In this paper, the hysteresis characteristics of flux-lock reactor, which is an essential component of flux-lock type SFCL, was investigated. The hysteresis loss of iron core in flux-lock type SFCL does not happen due to its winding's structure especially in the normal state. From the equivalent circuit for the flux-lock type SFCL and the fault current limiting experiments, the hysteresis curves could be drawn. Through the analysis for both the hysteresis curves and the fault current limiting characteristics due to the number of turns for the 1st and 2nd winding, the increase of the number of turns in the 2nd winding of the flux-lock type SFCL had a role to prevent the iron core from saturation.

1. 서 론

점차 증가되고 있는 전력요구와 전력공급으로 인해 단락사고시 사고전류 또한 증가하게 되어 가까운 장래에는 기존의 차단기의 단락용량을 초과할 것으로 예상되고 있다. 이로 인해 기존의 차단기 교체에 따른 비용부담 감소와 보다 신속한 사고전류제한을 동시에 수행할 수 있는 전류제한기 개발이 요구되고 있다. 이와 같은 필요성에 따라 고온초전도체를 이용한 전류제한기는 매년 증가되고 있는 전력요구와 전력공급으로 인한 전력계통의 용량 증가로 기존의 차단기의 용량증가와 성능향상을 위해 발생하는 추가비용을 줄일수 있는 장점으로 인해 상용화를 위한 연구가 지속되고 있다. 지금까지 개발된 고온초전도 전류제한기중 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 단위소자가 갖는 통전용량을 증가시킬 수 있을 뿐 아니라 사고초기에 제한되는 전류크기를 구성하고 있는 코일의 인덕턴스를 조절하여 설정할 수 있으며 자체 인가코일을 이용하여 별도의 전원없이 한류동작시에만 자체가 고온초전도 소자에 가해짐으로서 사고시 소자의 저항을 증가시킬 수 있는 특징이 있다.

본 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한기를 구성하는 자속구속 리액터의 히스테리시스 특성을 조사하

였다. 이를 위해 자속구속 리액터를 설계, 제작하였으며 사고시 각 코일에 흐르는 전류를 측정하였다. 자속구속형 고온초전도 전류제한기에 대한 히스테리시스 특성을 반영한 등가회로와 측정된 각 코일에 흐르는 전류로부터 1, 2차권선의 턴수에 따른 전류제한 특성과 철심의 히스테리시스 특성의 변화를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작원리

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조는 그림 1과 같으며 사고가 발생되어 고온초전도 소자의 임계전류를 넘는 전류가 흐르게 되면 발생된 저항으로 인해 쇄교자속에 시간변화가 생겨 각 코일에 전압이 유기되고 이로 인해 사고전류는 제한된다.

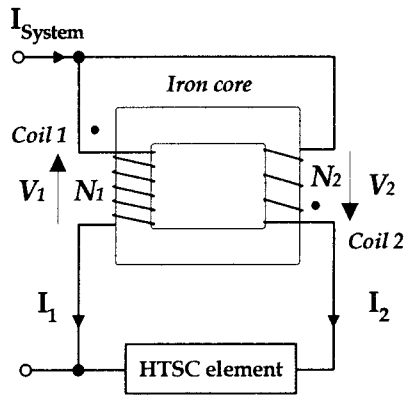


그림 1. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구조

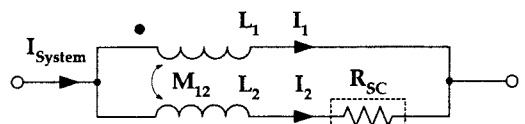


그림 2. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로

그림 1의 구조로부터 그림 2의 등가회로를 얻을 수 있으며 여기서  $L_1, L_2$ 는 각 코일의 인덕턴스,  $w$ 는 각 주파수,  $I_{System}$ 는 제한기에 의해 제한되는 선로전류를 나타낸다. 위 식에서  $L = \sqrt{L_1} \pm \sqrt{L_2}$ 으로, + 또는 - 부호는 1, 2차 권선에 의한 자속의 증감에 따라 결정된다. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 사고발생 직후에 고온초전도 소자에 흐르는 전류가 임계전류값 ( $I_q$ )에 도달되었을 때 초기 제한전류를  $I_{ini}$ 로 정의하면 등가회로로부터 유도한 식에서 식 (1)의 관계를 얻을 수 있다.

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

식 (1)은 초기 제한되는 선로전류크기를 코일 1과 2의 인덕턴스값을 조절함으로써 설정할 수 있음을 보여준다.

## 2.2 히스테리시스 특성을 고려한 자속구속 리액터의 등가회로

자속구속 리액터의 히스테리시스 특성을 고려한 자속구속형 고온초전도전류기의 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있으며 정상상태 뿐 아니라 과도상태에서의 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 특성을 나타낼 수 있다. 그림에서 여자전류,  $i_e$ 는 여자임피던스에 따라 달라지며 철심의 비선형 특성인 히스테리시스 특성으로 인해 여자 임피던스는 자속에 따라 변하게 된다. 그림에서 1차 전류  $i_1(t)$ 는 여자전류  $i_e(t)$ 와 2차 전류의 1차측으로 환산된 전류  $i_1'(t)$  합으로 나타나며 여자전류는 식 (2)과 같이 표현된다.

$$i_e(t) = i_1(t) - i_1'(t) \quad (2)$$

또한 자속구속 리액터를 구성하고 있는 철심의 내부자속  $\psi(t)$ 은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\psi(t) = \int v_1(t) dt \quad (3)$$

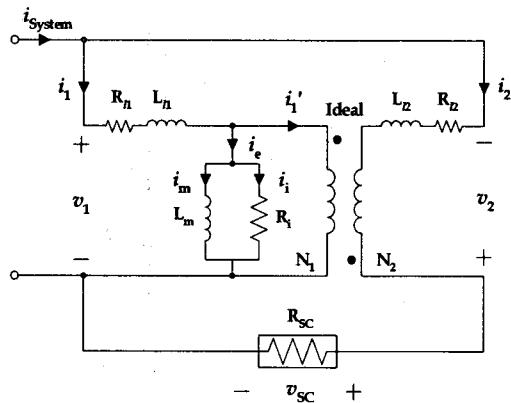


그림 3. 히스테리시스 특성을 고려한 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로

식 (2), (3)에서 계산한 자속과 여자전류로부터 사고시 자속구속 리액터를 구성하는 철심의 히스테리시스 곡선을 얻을 수 있다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

자속구속 리액터의 히스테리시스 특성을 분석하기 위해 먼저, 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 사고전류제한 특성을 실험하였으며 각 코일에 흐르는 전류와 고온초전도 소자양단전압을 포함한 각 코일의 유기전압을 CT, PT를 통해 측정하였다. 측정된 전압, 전류로부터 소자양단 저항을 포함한 철심내부의 자속과 여자전류값을 계산하였다. 그림 4는 실험회로도를 보여주며 전원저항( $R_s$ )과 부하저항( $R_{load}$ )은 각각  $1\Omega, 50\Omega$ 로 설정하였다.

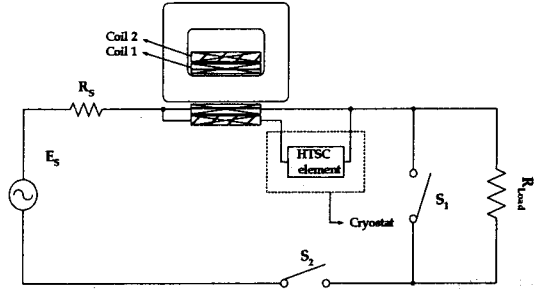


그림 4. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 실험 회로도

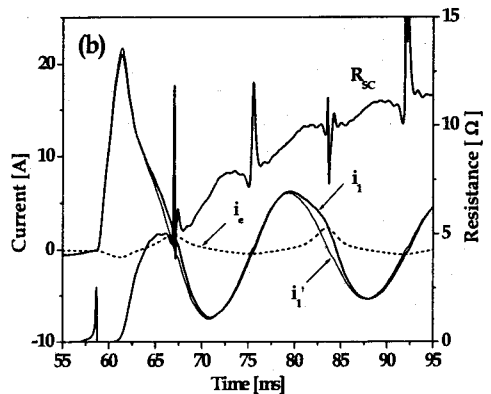
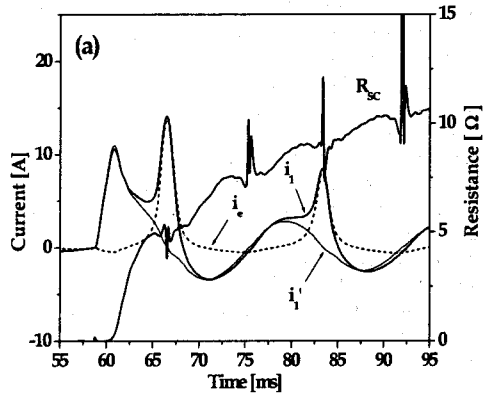


그림 5. 사고시 1차, 2차 코일 및 여자가지에 흐르는 전류 및 소자저항 곡선  
(a)  $N_1 = 42, N_2 = 14$   
(b)  $N_1 = 42, N_2 = 28$

그림 5는 1차 권선수를 42턴으로 하고 2차 권선수를 14턴, 28턴으로 설계한 경우의 사고시 소자저항을 포함한 각 권선에 흐르는 전류 및 여자전류 파형을 보여준다.

2차 권선수가 14턴인 경우에는 2차 권선수가 28일 경우에 비해 사고직후 1, 2차 권선에 흐르는 전류크기가 작게 나타난 반면 각 권선에 흐르는 전류사이의 위상차가 발생되는 것을 볼 수 있다. 사고시 1, 2차 권선에 흐르는 전류의 위상차는 그림에서 비교할 수 있는 것처럼 자속구속 리액터를 구성하는 철심의 여자가지에 흐르는 전류크기를 증가시키게 되며 이는 사고시 1차 권선에 흐르는 전류의 왜곡과 철심의 포화를 야기하게 된다. 그러나 사고주기가 증가함에 따라 여자전류의 크기는 점차 감소되는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 분석은 그림 6의 페이지저도로부터 설명할 수 있다. 또한 2차 권선수에 따른 저항 변화에서는 2차 권선수가 증가함에 따라 고온초전도 소자의 저항이 더욱 증가됨을 비교할 수 있으며 이는 사고시 소자에 유기되는 전압이 1, 2차 권선에 유기되는 전압의 합으로 나타난 것에 기인함을 분석할 수 있다.

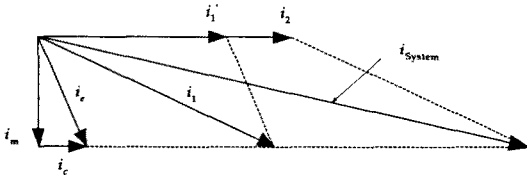


그림 6. 자속구속 리액터에 흐르는 전류들의 페이지도

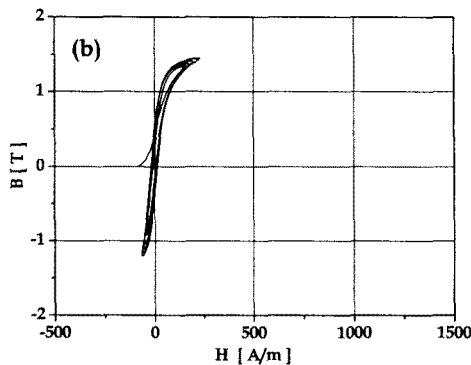
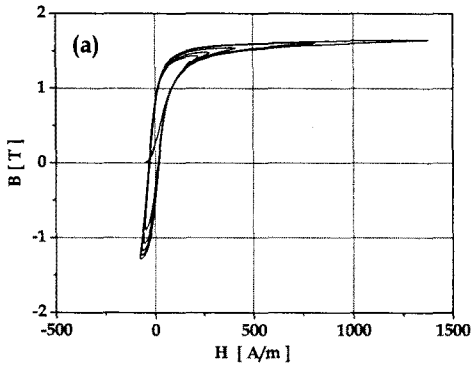


그림 7. 사고시 자속구속 리액터의 히스테리시스 특성 곡선

- (a)  $N_1 = 42, N_2 = 14$
- (b)  $N_1 = 42, N_2 = 28$

그림 7은 2차 권선수가 14에서 28로 증가되었을 경우, 계산한 자속구속 리액터의 히스테리시스 곡선을 보여준다. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 2차 권선의 권선수가 증가함에 따라 초기 사고전류 크기가 증가한 반면 자속구속 리액터의 히스테리시스 동작영역은 비포화 영역에 머물게 됨을 확인할 수 있으며 포화영역에서 동작하는 경우에도 사고주기가 진행됨에 따라 점차 비포화영역으로 되돌아 오게 됨을 그림으로부터 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한기를 구성하는 자속구속 리액터의 1, 2차 권선의 권선수에 따른 히스테리시스 특성을 조사하였다. 이를 위해 자속구속 리액터를 설계, 제작하였으며 사고시 각 코일에 흐르는 전류를 측정하였다. 자속구속형 고온초전도 전류제한기에 대한 등가회로와 측정된 각 코일에 흐르는 전류로부터 히스테리시스 곡선을 도출하였다.

자속구속 리액터의 2차 권선의 권선수의 증가는 사고시 고온초전도 소자의 켄치진행을 빠르게 진행시켜 자속구속 리액터의 히스테리시스 동작영역을 비포화영역에 머물게 함을 실험을 통해 분석할 수 있었다.

### 감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라인구축 지원사업으로 수행된 논문입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] V. D. Pham, Y. Laumoud, T. Verhaege, Fevrier, M. Collet, M. Bekhaled, "Towards The Superconducting Fault Current Limiter, IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 6, pp.801-808 April 1991.
- [2] Lin Ye, LiangZhen Lin, Klaus-Peter Juengst, "Application Studies of superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Systems", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 12, No. 1, pp.900-903, Mar., 2002.
- [3] Sung-Hun Lim et al., "Current limiting characteristics of flux-lock type High-Tc superconducting fault current limiter with control circuit for magnetic field", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 13, No. 2, pp.2056-2059, June, 2003.
- [4] Sung-Hun Lim et al., "Analysis for Variation of Limiting Current at Initial Fault Time in Flux-Lock Type SFCL", proceeding of the KIEE summer annual conference 2003.