

# 히스테리시스 특성을 고려한 자속구속형 고온초전도 사고전류 제한기의 사고전류 제한특성 분석

(Analysis on Fault Current Limiting Characteristics of a Flux-Lock Type HTSC Fault Current Limiter with Hysteresis Characteristic)

임성훈\* · 최명호

(Sung-Hun Lim · Myoung-Ho Choi)

## 요 약

자속구속형 초전도 사고전류 제한기는 평상시 자기적인 결합에 의해 철심의 히스테리시스 손실이 발생하지 않는 특징이 있다. 그러나 사고시에는 사고전류증가로 인해 고온초전도 소자의 저항발생과 함께 철심의 포화가 발생할 경우 제한기의 사고전류제한 특성을 저하시키는 현상이 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이를 분석하고 억제 하기 위한 설계방안을 도출하기 위해 자속구속형 고온초전도 사고전류 제한기의 구성요소인 자속구속 리액터의 히스테리시스 특성을 고려한 사고전류 제한특성을 분석하였다. 이를 위해 제한기의 등가회로와 사고전류 제한실험으로부터 히스테리시스 곡선을 도출하였다. 1, 2차권선의 인덕턴스 비에 따른 히스테리시스 곡선으로부터 인덕턴스비가 증가함에 따라 제한되는 사고전류크기는 증가한 반면 사고시 자속구속형 사고전류제한기의 구성요소인 철심의 포화가 억제됨을 확인할 수 있었다.

## Abstract

The fault current limiting characteristics of a flux-lock type superconducting fault current limiter (SFCL) considering hysteresis characteristics of a flux-lock reactor, which is an essential component of the flux-lock type SFCL, were investigated. In the normal state, the hysteresis loss of iron core in the flux-lock type SFCL does not happen due to its winding's structure. From the equivalent circuit for the flux-lock type SFCL and the fault current limiting experiments, the hysteresis curves could be drawn. Through the hysteresis curves together with the fault current level due to the inductance ratio between the primary and the secondary windings, the increase of the number of turns in the secondary winding of the flux-lock type SFCL made the fault current level increase. On the other hand, the saturation of iron core was prevented.

Key Words : Fault current limiting characteristics of flux-lock type SFCL, Hysteresis characteristics, Saturation of iron core

\* 주저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수

Tel : 02-828-7268, Fax : 02-817-7961

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr

접수일자 : 2006년 12월 18일

1차심사 : 2006년 12월 26일, 2차심사 : 2007년 1월 17일

심사완료 : 2007년 1월 26일

## 1. 서 론

지금까지 개발된 고온초전도 전류제한기 중에서 자속구속형 고온초전도 전류제한기는 단위소자가 갖는 통전용량을 증가시킬 수 있을 뿐 아니라 사고 초기에 제한되는 전류크기를, 구성하고 있는 코일의 인덕턴스를 조절하여 설정할 수 있으며 자계인가코일을 이용하여 별도의 전원없이 한류동작시에만 자계가 고온초전도 소자에 가해짐으로서 사고시 소자의 저항을 증가시킬 수 있는 특징이 있다[1-3].

본 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한기를 구성하는 자속구속 리액터의 히스테리시스 특성을 조사하였다. 이를 위해 자속구속 리액터를 설계, 제작하였으며 사고시 각 코일에 유기되는 전압과 흐르는 전류를 측정하였다. 자속구속형 고온초전도 전류제한기에 대한 등가회로와 측정된 각 코일에 유기된 전압과 흐르는 전류로부터 히스테리시스 곡선을 도출하였다. 설계파라미터로서 1, 2차 권선의 인덕턴스 비를 증가시킬 경우 사고시 자속구속 리액터의 히스테리시스 동작영역이 비포화영역에 머물게 됨으로써 보다 향상된 히스테리시스 특성을 얻을 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 자속구속형 사고전류제한기의 등가회로

제작한 자속구속 리액터의 구조는 그림 1과 같이 1, 2차 권선간의 누설인덕턴스를 최소화하기 위해 적층된 형태로 제작하였으며 설계사양은 참고문헌과 같다[3]. 그림 2는 철심의 히스테리시스특성을 고려한 자속구속형 고온초전도 사고전류제한기의 등가회로를 보여준다.

### 2.2 사고전류제한 특성

자속구속 리액터의 히스테리시스 특성을 분석하기 위해 먼저, 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 사고전류제한 특성을 실험하였으며 각 코일에

흐르는 전류와 고온초전도 소자양단전압을 포함한 각 코일의 유기전압을 측정하였다. 그림 3은 실험회

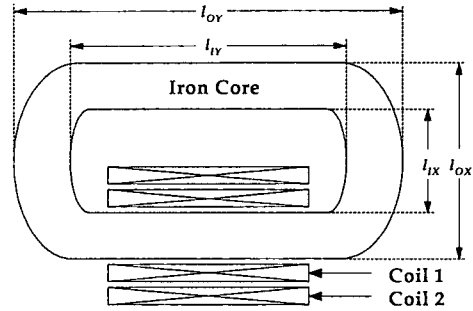


그림 1. 자속구속 리액터 구조  
Fig. 1. Structure of a flux-lock reactor

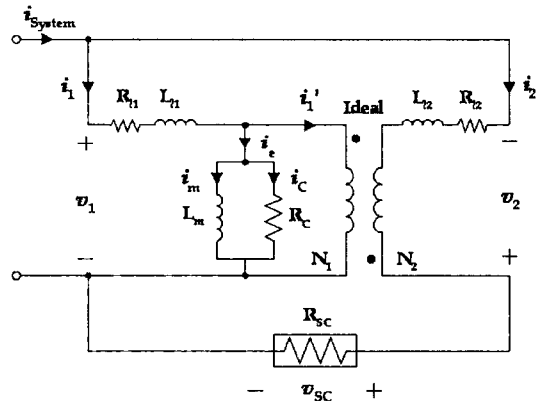


그림 2. 철심의 히스테리시스특성을 고려한 자속 구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of flux-lock type HTSC FCL considering hysteresis characteristic of an iron core

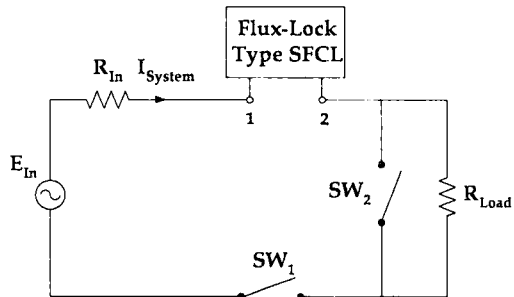


그림 3. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 실험 회로도  
Fig. 3. Experimental circuit of flux-lock type HTSC FCL

로 구성도를 보여주며, 전원저항(RIn)과 부하저항(RLoad)은 각각 1[Ω], 50[Ω]으로 설정하였으며, 전원 전압(EIn)은 50[Vrms]를 인가하였다.

그림 4는 1차 권선과 2차 권선의 인덕턴스 비 ( $L_2/L_1$ )를 0.0388(=1.63[mH]/42[mH])로 감극결선한 경우, 사고시 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 선로전류 및 1, 2차 코일에 흐르는 전류파형을 보여 준다. 사고발생후 코일 1에 흐르는 전류파형이 왜곡되어 나타나는 것을 볼 수 있으며 사고주기가 증가

함에 따라 점차 왜곡현상이 사라지는 것을 볼 수 있다. 이는 사고발생후 초전도 소자의 켈치발생으로 초기에 여자가지로 흐르는 전류가 크게 증가하였지만 고온초전도 소자의 켈치에 의한 저항이 증가함에 따라 점차 그 크기가 감소되어 나타난 결과이다.

그림 5는 사고전후 각 코일에 유기되는 전압과 고온초전도 소자양단 전압을 보여주며 감극결선할 경우, 그림 2의 등가회로에서 보는 바와 같이 코일 1과 코일 2에 유기되는 전압의 합이 고온초전도 소자 양

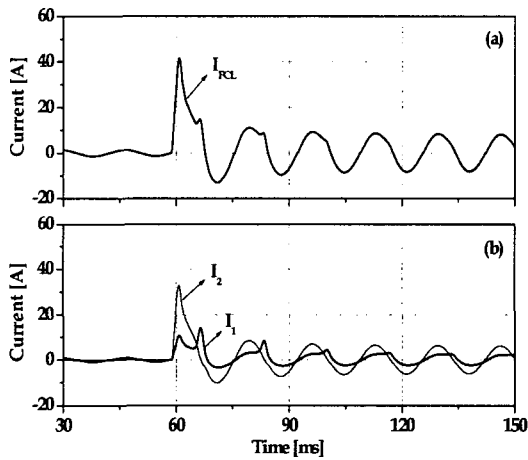


그림 4. 사고시 선로 및 각 코일에 흐르는 전류파형  
Fig. 4. Current waveforms of line and each coil

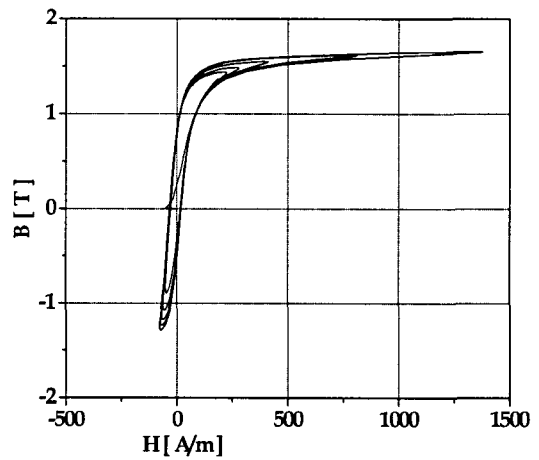


그림 6. 자속구속리액터의 히스테리시스 곡선  
Fig. 6. Hysteresis curve of a flux-lock reactor

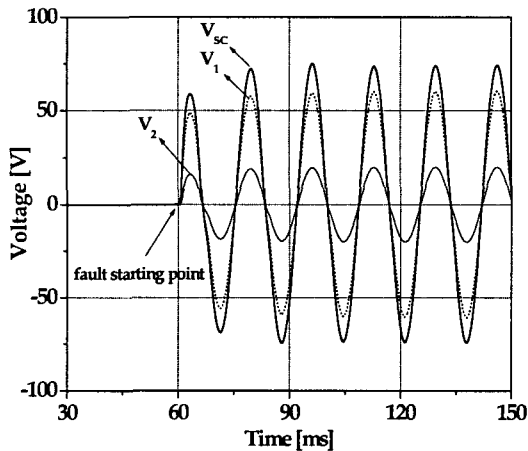


그림 5. 사고시 각 코일과 고온초전도 소자에 유기되는 전압파형  
Fig. 5. Voltage waveforms induced in each coil and HTSC element

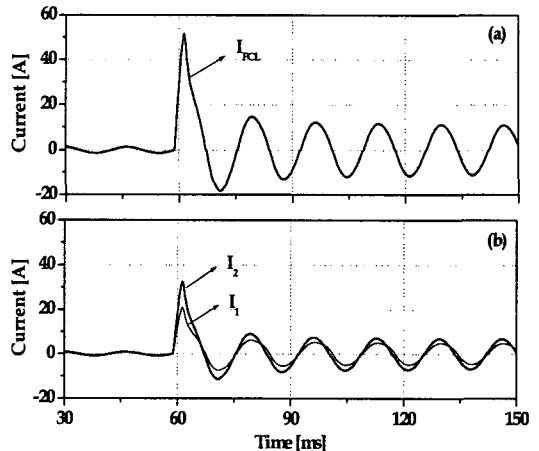


그림 7. 사고시 선로 및 각 코일에 흐르는 전류파형  
Fig. 7. Current waveforms of line and each coil

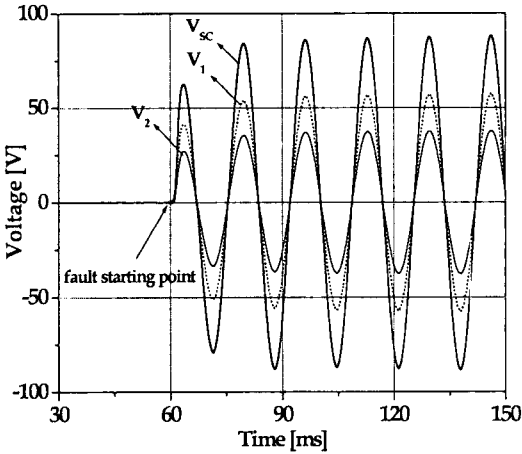


그림 8. 사고시 1차코일, 2차코일 및 고온초전도 소자에 유기되는 전압파형  
 Fig. 8. Voltage waveforms induced in each coil and HTSC element

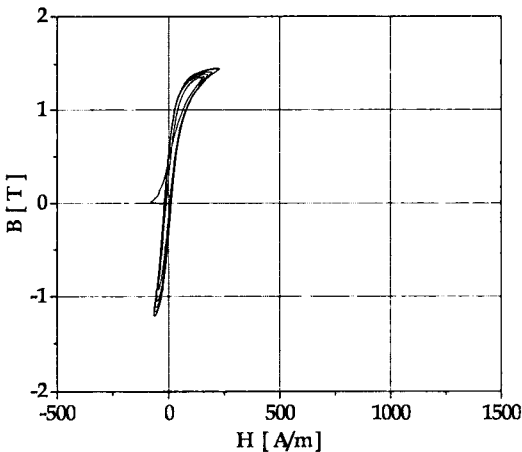


그림 9. 자속구속 리액터의 히스테리시스 곡선  
 Fig. 9. Hysteresis curve of flux-lock reactor

단에 나타남을 확인할 수 있다.

그림 6은 앞에서 측정된 전압( $V_1$ )과 전류( $I_1$ ,  $I_2$ )를 이용하여 구한 자속구속 리액터의 히스테리시스 곡선을 보여준다. 사고초기에 비포화영역을 벗어나 포화영역에서 동작함을 확인할 수 있으며 사고주기가 증가함에 따라 비포화영역으로 천이됨을 볼 수 있다.

1, 2차 권선의 인덕턴스 비에 따른 사고전류제한 특성과 히스테리시스 곡선을 분석하기 위해 1, 2차 권선의 인덕턴스 비( $L_2/L_1$ )를 0.0905(=3.8[mH]/42[mH])로

증가한 경우, 선로전류와 각 코일에 흐르는 전류 파형을 그림 7에 나타내었다.

인덕턴스의 비( $L_2/L_1$ )가 증가함에 따라 코일 2( $I_2$ )의 전류가 증가하게 되어 사고직후 사고전류( $IFCL=I_1+I_2$ )는 증가함을 그림 4와 비교할 수 있으며 반면에 여자가지에 흐르는 전류( $I_0$ )는 그림 2의 등가회로에서 보는 바와 같이 더욱 감소되어 코일 1에 흐르는 전류파형의 왜곡이 사라졌음을 그림 7로부터 확인할 수 있다. 또한 코일 1, 2의 인덕턴스 비( $L_2/L_1$ )가 증가함에 따라 사고시 고온초전도 소자에 인가되는 전압크기가 증가됨을 그림 8과 그림 5로부터 분석할 수 있다.

그림 9는 1, 2차 권선의 인덕턴스 비가 0.0905로 증가되었을 경우, 계산한 자속구속 리액터의 히스테리시스 곡선을 보여주며 앞의 결과로부터 예상할 수 있었던 것처럼, 사고후 히스테리시스 동작영역이 비포화영역에서 진행되고 있음을 확인할 수 있다.

위의 결과로부터 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 1, 2차 권선의 인덕턴스 비가 증가함에 따라 초기 사고전류 크기가 증가한 반면 자속구속 리액터의 히스테리시스 동작영역은 비포화영역에 머물게 됨을 실험과 유도한 등가회로로부터 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

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

자속구속 리액터의 1, 2차 권선의 인덕턴스 비의 증가는 사고시 고온초전도 소자의 켈친행동을 빠르게 진행시켜 자속구속 리액터의 히스테리시스 동작영역을 비포화영역에 머물게 함을 실험을 통해 분석할 수 있었다.

따라서 사고시 철심의 포화로 인한 사고전류제한 특성저하를 방지하기 위해서는 두 코일의 인덕턴스 비를 증가시키는 것이 바람직함을 본 논문을 통해 확인할 수 있었다.

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

### References

- [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.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 임성훈 (林成勳)

1973년 11월 1일생. 1996년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004~2005년 전북대학교 공업기술연구소 연구원. 2006년 3월~현재 숭실대학교 전기공학부 전임강사.

Tel : (02)828-7268

Fax : (02)817-7961

E-mail : superlsh73@ssu.ac.kr

#### 최명호 (崔明鎬)

1965년 6월 8일생. 1992년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년 3월~현재 광주보건대학 의료공학과 조교수.

Tel : (062)958-7772

Fax : (062)958-7526

E-mail : mhchoi@ghc.ac.kr