

## 자속구속형 고온초전도 전류제한기 사고전류제한 특성

### Fault Current Limiting Characteristic of Flux-Lock Type HTSC Fault Current Limiter

임성훈\*, 최명호\*\*, 박목기\*\*\*, 송지주\*\*\*\*, 박대희\*\*\*\*, 한병성\*

(Sung-Hun Lim\*, Myung-Ho Choi\*\*, Bok-Kee Park\*\*\*, Jae-Joo Song\*\*\*\*, Dae-Hee Park\*\*\*\*, Byoung-Sung Han\*)

#### Abstract

In this paper, we investigated the fault current limiting characteristic of flux-lock type High-Tc superconducting fault current limiter(HTSC-FCL), which is comprised of a flux-lock reactor and an external magnetic field coil covering the HTSC element. In this HTSC-FCL, the initial limiting current level can be controlled by adjusting the inductance of the each coil. Furthermore, the fault current limiting characteristics of HTSC-FCL can be improved by applying the external magnetic field into the HTSC element. We performed the computer simulation by numerical analysis about the flux-lock type HTSC-FCL and compared the results of experiment with simulation ones. We can obtain the same results from both the computer simulation and the experiment except for the time immediately after fault occurs.

**Key Words** : fault current limiting characteristic, flux-lock type, High-Tc superconducting fault current limiter( HTSC-FCL ), external magnetic field, numerical analysis

#### 1. 서 론

해마다 증가되는 전력수요의 증가에 따라 사고전류를 포함한 송전용량이 증가되고 있다. 특히 사고전류의 증가는 기존 차단기의 차단용량의 초과로 이에 따른 교체의 필요성과 함께 계통에 관련된 기기에 심각한 부담을 안겨주고 있다. 이를 해결할 수 있는 유일한 대안으로 고온초전도체를 이용한 사고전류제한기가 적합할 것으로 기대되고 있으며 매년 증가되고 있는 전력요구와 전력공급으로 인한 전력계통의 용량증가로 기존의 차단기

의 용량증가와 성능향상을 위해 발생하는 추가비용을 줄일 수 있다는 장점이 상용화를 위한 연구를 지속시키고 있다.

지금까지 개발된 고온초전도체를 이용한 전류제한기는 크게 고온초전도체의 대표적인 현상인 영저항(Zero Resistance)특성을 이용한 저항형 타입(Resistive Type)과 마이스너효과(Meissner Effect)를 이용한 유도형 타입(Inductive Type)으로 나눌 수 있는데 각 형태에 따라 다른 특성과 장단점이 있다.

위의 두 형태는 사고시 고온초전도체의 퀘칭을 발생시키는 퀘칭형(Quench Type)으로 정상상태에서는 제로 임피던스를 보이거나 사고가 발생되면 초전도체의 상전이를 통해 발생하는 임피던스를 이용하여 사고전류를 제한하는 형태로서 상전도상태에서의 큰 저항값이 요구된다.

\* : 전북대학교 전자정보공학부  
(전주시 덕진동 664-14, Fax: 063-277-0918  
E-mail : dolphine@shinbiro.com )  
\*\* : 광주보건대학 의료정보공학과  
\*\*\* : 호원대학교 전기공학과  
\*\*\*\* : 순천청암대학 정보통신과  
\*\*\*\*\* : 원광대학교 전기 전자 및 정보공학부

이를 극복하기 위해 자계발생 코일을 이용하여 상전도상태의 저항값을 증가시키는 방안이 연구되고 있으나 자계발생 코일로 인해 평상시에도 시스템에 영향을 주게 되며 사고전류가 직접 도통하기 때문에 용량증가시 자계발생 코일의 부피가 증가하게 되는 등의 문제점이 따르고 있다.

최근에 발표된 고온초전도체를 이용한 자속구속형 전류제한기는 사고시 별도의 전원없이 자계를 발생시켜 상전도 상태에서 저항을 크게 할 수 있는 특징이 있으며 고온초전도체가 갖는 재료적인 취약성을 극복할 수 있는 장점으로 이에 대한 관심이 고조되고 있다.

본 논문에서는 자속구속형 고온초전도 전류제한기에 대한 동작을 수치해석을 이용한 시뮬레이션과 실험을 통해 비교 분석하였으며 이를 바탕으로 구성요소의 설계 파라미터에 따른 동작특성을 분석하기 위한 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 구성 및 동작원리

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 구성은 철심코어를 매개로 코일 1, 2는 병렬로 연결되고 코일 2에 고온초전도 박막시편이 연결된다. 또한 코일 3에는 사고시 고온초전도 시편에 자계를 인가하기 위한 자계인가 코일이 연결된다.

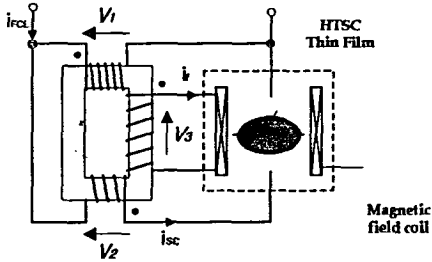


그림 1. 자속구속형 고온초전도 전류제한기 구조

사고가 발생되면 임계전류를 넘는 전류가 고온초전도박막시편 소자에 흐르게 되면 쇄교자속에 시간변화가 생겨 각각의 코일에 전압이 유기되고 이와 동시에 코일 3에 전류가 흐르게 되어 고온초전도소자에 교류자계가 인가된다. 이때 인가된 교류자계로 인해 고온초전도체의 상전도 저항은 증가하게 된다.

### 2.2 수치해석을 이용한 특성 시뮬레이션

자속구속형 고온초전도 전류제한기의 물리적인 동작특성을 고려하여 그림 2의 등가회로를 구성할

수 있으며 이 등가회로부터 전개한 미분방정식에 FDM(Finite Difference Method) 수치해석을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 사고시 선로전류( $I_{FCL}$ ), 임피던스( $Z_{FCL}$ ), 소자에 흐르는 전류( $I_{sc}$ )를 아래와 같이 유도할 수 있다.

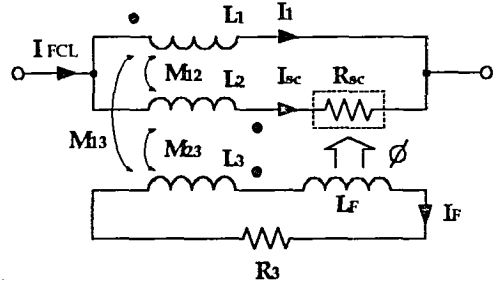


그림 2. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 등가회로

$$Z_{FCL} = \frac{R_{sc}L_1(-\omega^2 L_f + j\omega R_3)}{X}$$

$$I_{sc} = \frac{(-\omega^2 \sqrt{L_1} L_f L + j\omega \sqrt{L_1} L R_3) \cdot I_{FCL}}{X}$$

$$I_f = \frac{j\omega \sqrt{L_1 L_3} R_{sc} \cdot I_{FCL}}{X}$$

$$X = R_3 R_{sc} - \omega^2 L_f L^2 + j\omega(L^2 R_3 + L_f R_{sc} + L_3 R_{sc})$$

여기서  $L_1, L_2, L_3$ 은 각 코일의 인덕턴스이며  $R_3$ 은 자계인가 회로의 저항성분,  $L_f$ 는 자계인가 회로의 인덕턴스,  $I_{FCL}$ 은 선로에서 한류기쪽으로 유입되는 전류를 나타낸다. 위 식에서  $L$ 은  $L = \sqrt{L_1} \pm \sqrt{L_2}$ 으로 표현되며  $\pm$ 의 부호는 1,2차 권선에 의한 자속의 증감방향에 따라 결정된다.

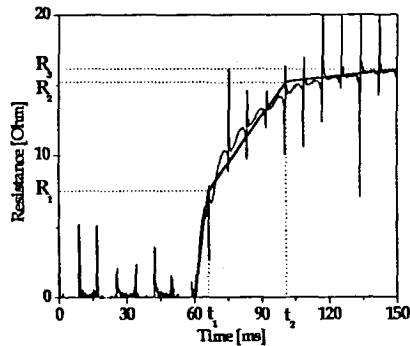
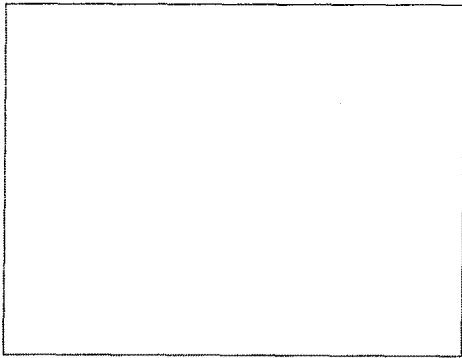


그림 3. 고온초전도시편의 저항발생곡선

그림 3은 실험으로부터 얻은 고온초전도체의 저항특성과 이의 동작특성을 시뮬레이션하기 위한 저항특성곡선을 보여주며 굵은 선은 실험으로부터 얻은 저항곡선을, 가는 선은 실험곡선을 시뮬레이션에 도입하기 위해 근사화시킨 곡선을 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

등가회로부터 유도한 미분방정식으로부터 수치해석을 적용하여 시뮬레이션한 결과를 그림 4에 보여주었으며 사고전에는 코일 3 즉, 자계인가 코일에는 전류가 흐르지 않지만 사고가 발생한 시점에서부터 전류가 도통되기 시작함을 확인할 수 있다. 이는 자속구속형 고온초전도 전류제한기가 갖는 특징이며 자계인가 코일에 사고와 동시에 전류



가 도통되므로써 사고시 고온초전도 시편의 저항을 증가시킬 수 있게 된다.

그림 4. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 시뮬레이션 파형

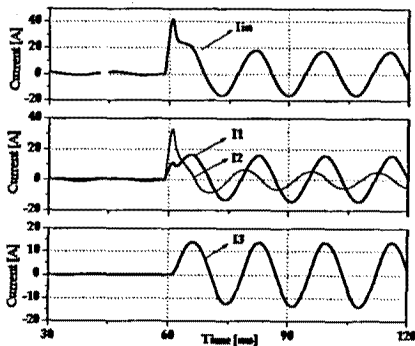


그림 5. 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 실험파형

그림 5는 사고발생장치를 이용하여 전원전압 50 V<sub>rms</sub>, 전원단 저항 1Ω, 부하저항 50Ω에서 실험한

결과를 보여주며 사고발생 직후를 제외한 구간에서 시뮬레이션한 전류파형(그림 4)과 유사한 결과를 확인할 수 있다. 사고발생 직후 다소 실험결과에서 벗어나는 시뮬레이션결과는 차후 시뮬레이션시 고온초전도 시편의 열적인 특성과 철심의 자화특성을 고려하여 수행할 경우 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 고온초전도체를 이용하여 한류기에 적용시 고온초전도체 제작에 따른 재료적인 제약으로 인한 문제점을 해결할 수 있는 자속구속형 고온초전도 전류제한기의 동작원리와 시뮬레이션 및 실험결과를 비교 분석하였다. 사고직후 발생된 오차는 고온초전도 시편의 열적인 특성과 철심의 자화특성을 반영하여 시뮬레이션함으로써 실험결과와 일치되는 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각되며 차후 기존의 저항형 고온초전도 사고전류제한기의 문제점인 동시센치 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고 문헌

- [1] R. K. Smith, P. G. Slade, M. Sarkozi, E. J. Stacey, "SOLID STATE DISTRIBUTION CURRENT LIMITER AND CIRCUIT BREAKER:APPLICATION REQUIREMENTS AND CONTROL STRATEGIES", IEEE Trans. on Power Del., Vol. 8, pp.1155-1164, Jul., 1993.
- [2] V. D. Pham, Y. Laumoud, T. Verhaege, A. Fevrier, M. Collet, M. Bekhaled, "Towards The Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 6, pp. 801-808 April 1991.
- [3] Min seok Joo and Tae Kuk Ko, "The Analysis of the Fault Currents According to Core Saturation and Fault Angles in an Inductive High-Tc superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 6, pp. 62-67, June, 1996.
- [4] B. Gronoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H.-W. Newmuller, Siemens AG, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO films - 100kVA Functional Model", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 9, pp. 656-659, June, 1999.
- [5] H. Kado and M. Ichikawa, "Performance of A High-Tc Superconducting Fault Current

Limiter-Design of A 6.6kV Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp.993-996, June, 1997.

- [6] C. A. Falcone, J. E. Beehler, W. E. Mekolites and J. Grazen, "Current Limiting Device - A Utility's Need", IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, pp.1768-1775, Nov.,1974.