

## Electrical properties of a resistive SFCL with shunt resistor

### 분로저항을 가진 저항형 초전도 한류기의 전기적 특성

Hyo-sang CHOI, Ok-bae HYUN, Hye-rim KIM,

Si-dole HWANG, Sang-joon KIM

최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준

103-16 Munji-dong, Yusong-ku, Taejon, Korea 305-380,  
Power System Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

대전광역시 유성구 문지동 103-16, 한전 전력연구원, 전력계통연구소

We fabricated a resistive SFCL having a shunt resistor parallel to it in order to bifurcate the transient current at faults. The SFCL consists of a YBCO film coated with an Au layer ( $10 \Omega$  at room temperature), which is to disperse the heat generated at hot spots in the YBCO film, and the  $5 \Omega$  shunt resistor. The minimum quench current of the SFCL was found to be  $12.2 A_{peak}$ . This SFCL successfully controlled the fault current below  $23 A_{peak}$ , which is otherwise to increase up to  $113 A_{peak}$ . Bifurcation of the current resulted in the temperature rise of the YBCO/Au film 3 times slower than without the shunt, protecting the SFCL at high currents.

#### 1. 서론

전력계통에서 사고는 주로 뇌격전압이나 자연 재해시 수목의 접촉등에 의하여 발생하는데, 최근들어 고장용량이 점점 더 증대하고 있으며 차단기의 한계용량을 초과하는 곳도 일부 발생하고 있는 실정이다.<sup>[1-2]</sup> 이처럼 고장전류가 커지면 고장전류를 안전하게 차단할 수 없게 되어 차단실패, 차단기 소손 및 인접 전력설비의 사고파급등이 발생하게 된다. 고장전류를 억제하기 위한 방법으로는 모선분리나 한류 리액터 삽입등의 방법이 있으나 모선분리는 전력공급에 지장을 초래하여 현실적으로 어려움이 있다. 한류리액터에 대한 연구는 일본등에서 연구된 바가 있으나 고장감지기와 전류통전요소, 분로요소, 한류요소등을 필요로 하여 구조가 복잡하고 정상상태에서

약간의 임피던스를 갖는등 구조적인 한계가 있다.<sup>[3]</sup> 이에 비하여 초전도 한류기는 초전도체가 quench되었을 때 발생하는 임피던스를 이용하여 전류제한을 수행하는 기기로서, 다른 부가장치가 필요하지 않으며 그 자체만의 빠른 동작 및 회복 시간 그리고 수명이 반영구적인 점등 다른 장치로 대체할 수 없는 초전도만의 특성 때문에 그 효율가치는 대단히 높으며, 그 제한방식에 따라 크게 유도형과 저항형으로 나눌 수 있다. 유도형은 용량증대에 유리하여 대용량화가 용이한 반면 기본구조상 필연적으로 철심등의 core를 사용하여야 하기 때문에 크기가 커지고 hysteresis 손실 및 eddy current 손실등의 철손을 극복해야 하는 단점을 가지고 있다. 저항형은 구조 및 원리가 간단하고 quench 시간이 빠른점 등 유도형과 차별화된 장점들 때문에, 독일의 Siemens AG 그룹

[2-3] 등에서 활발히 연구가 진행되고 있다. 특히 박막을 이용한 저항형 한류기는 소형화 및 적층 구조를 통한 compact화가 용이하기 때문에 관심을 불러 일으키고 있다.<sup>14-18)</sup>

본 연구에서는 YBCO 계 초전도 박막을 이용한 저항형 한류기를 meander 형태로 설계하고, 과도상태의 침투값과 소비전력을 분담하기 위하여 분로저항을 연결한 경우 전력계통에서 발생하는 사고에 대해 회로를 구성하여 모의하였으며, 자체 제작한 고장전류 발생장치를 통하여 사고모의 위상각별 고장을 발생시킨 후 사고직후의 quench 특성 및 전류제한 특성을 알아 보았다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 시편 제작

초전도 한류소자는 직경 2 인치의 LaAlO<sub>3</sub> 기판 위에 성장된 두께 0.4 μm의 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO) 박막을 바탕으로 제작하였으며 박막은 독일 Prima Tech 사에서 구입하였다. YBCO 박막은 제조공정 특성상 불균일한데 불균일성으로 인하여 생기는 hot spot에서 발생하는 열을 분산하기 위하여 YBCO 박막 위에 0.4 μm 두께의 gold를 증착하였다. Gold 박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에 (약 100분의 1) quench된 한류소자에 흐르는 전류를 우회시킴으로써 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열의 양을 줄여 준다. 이외에 gold 박막층은 YBCO 박막의 표면을 주변으로부터 보호하는 역할도 한다. YBCO는 공기 중의 수분과 반응하여 비초전도체를 형성하기 때문에 YBCO의 표면을 공기로부터 차단시켜 보호하여야 한다. Gold가 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 폭 1 mm의 meander line 모양으로 식각하여 한류소자를 제작하였다.

### 2.2. 시험 시스템 장치

Quench 및 전류제한특성 측정을 위한 시험 장치를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 V<sub>0</sub>는 전원 전압이고, 직렬저항 R<sub>0</sub>은 전압변화를 측정하기 위한 표준저항이며, 한시동작 점점(timer)은 과전류에 의한 박막의 소손을 방지하기 위한 개폐기이다. SFCL은 저항형 초전도 한류기를 나타내며 shunt R<sub>1</sub>은 초전도체가 quench시 발생하는 과도

전류를 억제하고 전류의 흐름을 우회시키기 위하여 병렬 연결한 저항이다. 또한 gold layer R<sub>2</sub>는 gold층에 나타나는 저항을 모의한 것이다. 한편 R<sub>L</sub>은 선로에 취부되어 있는 부하를 나타내며, SW<sub>1</sub>은 선로에 사고가 발생한 경우와 같은 계통 고장시험을 수행하기 위한 스위치이다. 시험 시스템에 대한 회로방정식은 다음과 같다. 식 (1)은 SFCL이 초전도 상태일 때를 나타내고, 식 (2)는 SFCL이 quench 되었을 때를 표시하며, 식 (3)은 인가전압이다.

$$V_0 = (R_0 + R_L) i \quad (1)$$

$$V_0 = (R_0 + R_1 \parallel R_2 \parallel R_{SFCL}) i \quad (2)$$

$$V_0 = V_m \sin \omega t \quad (3)$$

회로소자 값은 박막 film의 임계전류 및 한류 특성을 고려하고 최초 quench 조건 및 최종 한류 조건을 감안하여 적절한 값으로 결정하였다. 시스템의 정격전압 V<sub>0</sub>는 1~80 V<sub>rms</sub>/60Hz까지 변화하면서 가해 주었고, 측정을 위한 표준저항 R<sub>0</sub>은 1 Ω, 분로저항 R<sub>2</sub>는 5 Ω, 부하저항 R<sub>L</sub>은 7.7 Ω을 연결하였다.

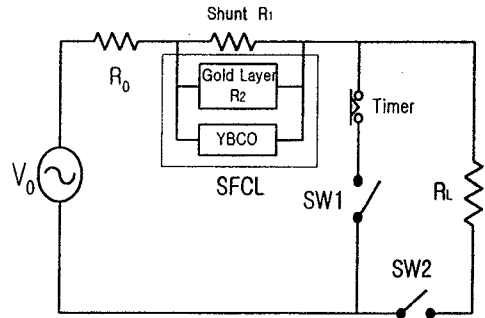


그림 1. 측정을 위한 회로 시험장치

## 3. 결과 및 고찰

전력계통에서 사고가 발생한 경우 고장발생 초기에는 시간변화에 대한 전류변화율이 크기 때문에 높은 과도응답을 보여준다. 과도응답에 의한 침투전류는 선로의 주변에 있는 전력기기에 부담을 주기 때문에 가능하면 이의 발생을 억제해야 한다. 또한 설치공간의 제약이 점점 증대하는 점을 감안하면 전력기기의 크기를 줄이면서 용량을

높이는 것이 중요하다. 이러한 목적을 수행하기 위하여 본 연구에서는 초전도 한류소자에 병렬로 shunt 저항을 연결하고 meander 형태의 저항형 한류기에서 중요한 요소인 전류제한 효과, 저항 변화, 그리고 소비전력등의 실험을 수행하였다.

그림 2에 초전도 한류소자의 임계온도를 나타내며 hysteresis 현상이 발생하는지 확인하기 위하여 온도상승과 하강의 양쪽으로 측정하였다. 그림에서와 같이 양방향의 저항값이 거의 일치하였으며 임계온도는 약 87 K이었다. 그림 5에 인가전압  $V_0$ 를  $16.5 V_{peak}$ 로 가하고 표준저항  $R_0$ 는  $1 \Omega$ , 부하저항  $R_L$ 을  $7.7 \Omega$ 으로 하고 shunt 저항을  $5 \Omega$ 으로 하였을 때, 사고각  $0^\circ$ 에서 초전도 체에서 quench가 겨우 발생할 정도의 인가전류에 대하여 인가 시간에 대한 전류 변화 파형을 나타내었다. 이때 실선으로 표시한 그래프는 초전도 한류기를 적용한 때이며 점선은 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우이다. 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우의 최대 사고전류값은 약  $16.5 A_{peak}$ 이었으며 초전도 한류기를 적용한 경우는 최대 한류전류값이 약  $9 A_{peak}$  값을 보였다가 서서히 감소하여 약 4 주기 이후에는  $5.8 A_{peak}$  값을 나타내었다.

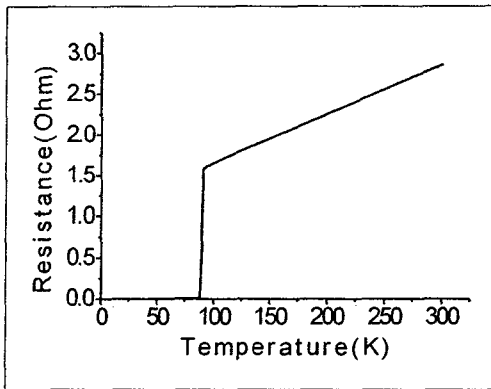


그림 2. 초전도 한류소자와 같은 시편의 R(T) 특성

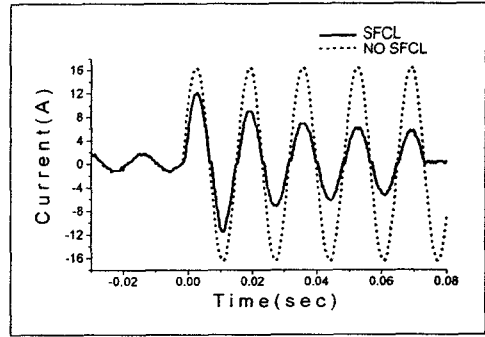


그림 3. 고장발생시 사고전류 및 한류파형

그림 4에 사고각  $0^\circ$ 에서 인가전압  $V_0 = 113 V_{peak}$ 를 가하고, 표준저항  $R_0$ 는  $1 \Omega$ , 부하저항  $R_L$ 을  $7.7 \Omega$ 으로 하고 shunt 저항  $R_1$ 을  $5 \Omega$ 으로 하였을 때 초전도 한류기 양단에 걸리는 전기적 특성을 보여준다. 그림 4 (a)에서 사고전류값이 최고  $23.0 A_{peak}$ 까지 상승하고 이후 일정한 값을 유지하였다. 일반적으로 사고 발생 직후에는 전류변화에 의하여 전류값의 급격한 상승을 보이지만 여기서는 shunt 저항  $R_1$ 에 의하여 신속하게 전류 분류가 일어났기 때문에 침투전류는 발생하지 않았으며 안정적으로 전류제한을 수행하였다. 그림 4 (b), 4 (c)는 quench 발생 후 한류소자에 전압과 저항이 발생하는 메카니즘을 보여준다. Gold층의 열발생에 기인하여 사고후 점진적으로 전압과 저항값의 상승을 보이지만 shunt 저항  $R_1$ 으로의 전류분류에 기인하여 완만한 상승을 보여주고 있다. 또한 상온의 gold층의 저항이  $10.0 \Omega$ 인 것을 감안하면 사고발생 후 약 36 msec 후에 상온에 도달하는 것을 확인할 수 있으며 같은 조건에서 shunt 저항이 없는 경우에 비하여 상온 도달 시간은 약 3배이상 길어졌다.<sup>[9]</sup> 약 4 주기후인 70 msec되는 지점에서는 저항이 약  $12.4 \Omega$ 이었으며 그림 4의 온도별 저항곡선에서 환산해 보면 약  $99^\circ C$  정도이어서 온도상승이 완만하게 진행됨을 알 수 있다.

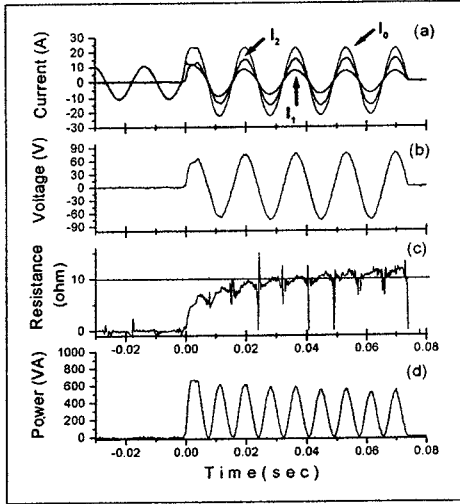


그림 4. 예상 사고전류 113 A<sub>peak</sub>에서의 전기적 특성(사고각 0°)

이 이후의 저항발생은 그림 4의 (d)에서와 같이 발생 주울열이 점차 감소하기 때문에 더 이상의 큰 온도상승은 없을 것으로 생각되며, 또한 실계통에서는 차단기가 동작하여 회로를 개로하기 때문에 더 이상의 실제적인 의미는 없다.

그림 5는 그림 4의 사고발생 조건에서 초전도 한류기를 취부한 경우와 취부하지 않았을 때의 전류파형을 나타낸다. 초전도 한류기를 취부하지 않은 경우 사고발생 후 최고 113 A<sub>peak</sub>의 전류값을 보여주어 초전도 한류기를 적용한 경우의 최대값인 23.0 A<sub>peak</sub>와 4주기후의 안정된 전류값인 22.3 A<sub>peak</sub>에 비하여 약 5배의 상승값을 나타내었다.

같은 조건하에서 사고각별 과도응답을 살펴보기 위하여 사고각 45°와 90°인 경우를 그림 6과 7에 나타내었다. 전체적인 전기적 특성은 사고각 0°인 경우와 유사하였으나, 정상상태에서 초전도체에 흐르는 전류가 약간 발생하는 모습을 볼 수 있다. 이러한 현상은 사고각 90°에서 약간 더 심하였으며 반복실험에 의한 시편의 특성 저하(degradation)에 의하여 발생한 것으로 생각된다. 고장조건이 여러번 반복되더라도 일정한 특성을 보여주는 신뢰성이 중요한 요소로 작용하는 실계통 운전에서는 시편의 특성저하에 의한 quench 전류의 감소를 감안하여 설계시 이를 고려하여 적절한 운전조건을 설정하여야 할 것이다.

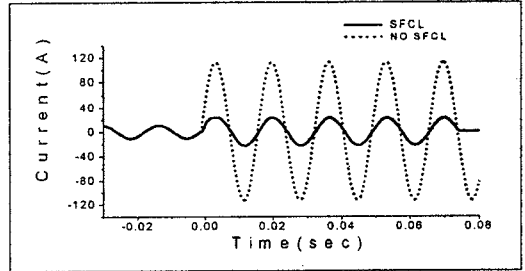


그림 5. 고장발생시 사고전류 및 전류제한파형

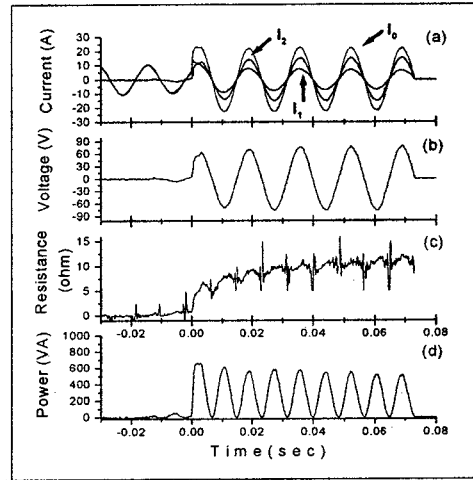


그림 6. 예상 사고전류 113 A<sub>peak</sub>에서의 전기적 특성(사고각 45°)

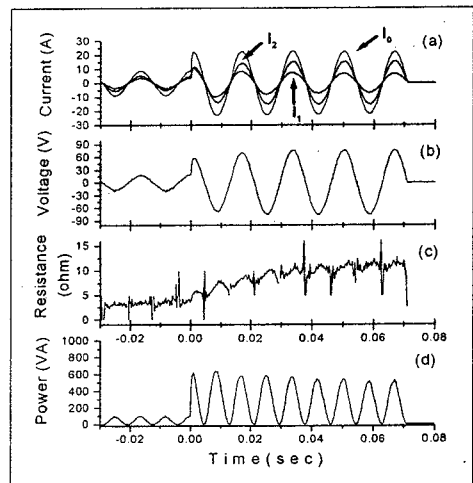


그림 7. 예상 사고전류 113 A<sub>peak</sub>에서의 전기적 특성(사고각 90°)

### 3. 요약

YBCO film을 이용한 meander 형태의 저항형 한류기에서 고장이 발생하였을 때 초기의 과도상태에서 볼수 있는 침두전류를 억제하기 위하여 shunt 저항을 병렬로 취부한 경우의 전기적특성을 살펴보았다.

인가전압을  $16.5 V_{peak}$ 로 가하고  $R_0$ 는  $1 \Omega$ ,  $R_L$ 을  $7.7 \Omega$ 으로 하고 shunt 저항을  $5 \Omega$ 으로 하였을 때 약  $12.2 A_{peak}$ 의 전류값에서 최초 quench가 발생하였으며 초전도 한류소자에 quench 발생으로 인한 저항이 발생함과 동시에  $I_1$ 으로 흐르던 사고전류의 일부가 shunt 저항이 있는  $I_2$ 으로 서서히 분로하여 침두전류가 거의 발생하지 않았다. 이때 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우 최대 사고전류는 약  $16.5 A_{peak}$ 이었으며 초전도 한류기를 적용한 경우는 최대 한류전류값이  $9 A_{peak}$ 에서 4주기후에는  $5.8 A_{peak}$ 이었다.

인가전압  $V_0=113 V_{peak}$ 이고 표준저항  $R_0$ 는  $1 \Omega$ , 그리고  $R_L$ 을  $7.7 \Omega$ 으로 하고 shunt 저항을  $5 \Omega$ 으로 하였을 때 사고각  $0^\circ$ 에서 사고전류값이 최고  $23.0 A_{peak}$ 까지 상승하고 이후 일정한 값을 유지하였다. 일반적으로 사고발생 직후에는 전류 변화율에 의하여 전류값의 급격한 상승을 보이지만 shunt 저항이 전류분류의 역할을 수행하여 침두전류는 거의 발생하지 않았다. 또한 상온의 gold층의 저항을 감안했을 때 사고발생후 약 36 msec 후에 상온에 도달하였으며 shunt 저항이 없는 경우의 11 msec에 비하여 약 3배이상 길어졌다.<sup>[9]</sup>

사고각  $45^\circ$ 와  $90^\circ$ 인 경우는 반복실험에 의한 시편의 특성저하(degradation)에 의하여 정상 상태에서 초전도체에 흐르는 전류가 약간 발생하였다. 계통의 신뢰성이 중요한 요소로 작용하는 실제운전에서는 시편의 특성저하에 의한 quench 전류의 감소를 감안하여 적절한 운전조건을 도출하여야 한다.

이상에서 앞으로는 장기간의 실제운전 조건을 고려하여 시편의 특성저하(degradation)와 가혹조건에 대한 전기적 특성에 대한 연구를 병행하고자 한다.

또한, 본 연구가 진행되는 동안 YBCO 박막 식각에 도움을 준 표준과학연구원의 김인선, 임해용 연구원께 감사드립니다.

본 연구의 일부분은 과학기술부 중점연구 개발 사업으로부터 연구비 지원을 받아 수행되었음.

### 참고문헌

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통 고장전류 증대와 대응방안", 전기저널, Vol. 5, pp. 24-31, 1998.
- [2] Eddie Leung, "Surge protection for power grids", IEEE Spectrum, Vol. 34, No. 7, pp. 26-30, 1997.
- [3] M. Okazaki, et al., "Development of a new multi-divided type of commutating elements for fault current limiters on distribution lines",
- [4] G. Ries, et al., "Development of resistive HTSC fault current limiters", Inst. Phys. Conf. Ser. No. 148, pp. 635-638, 1995.
- [5] B. C. Min, et al., "Double-sided  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  thin films on 2-inch  $LaAlO_3$  wafers by pulsed laser deposition", KCMAS '97, Vol. VII, pp. 233-236, 1997.
- [6] Thomas P. Sheahen, "Introduction to high-temperature superconductivity", Plenum Press, pp. 349-372, 1994.
- [7] B. Gromoll, et al., "Resistive current limiters with YBCO films", IEEE Trans. on App. Supercon., Vol. 7, No. 2, pp. 828-831, 1997.
- [8] T. Kiss, et al., "Quench characteristics in HTSC devices", presented at ASC'98, Palm Desert, CA, USA, Sep. 14-18, 1998.
- [9] Hyo-sang CHOI, et al., "Current limiting characteristics of the resistive SFCL using YBCO film", KIEE summer annual conference '99, Vol. A, pp. 277-280, 1999.