

YBCO film을 이용한 저항형 초전도 한류기의 전류제한 특성

최훈상, 김혜림, 황시돌, 현옥배, 김상준
한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실

Current limiting characteristics of the resistive SFCL using YBCO film

Hyo-sang CHOI, Hye-rim KIM, Si-dole HWANG, Ok-bae HYUN, Sang-joon KIM
Power System Laboratory, Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)

Abstract - We fabricated a resistive superconducting fault current limiter of two stripe meander type based on a YBCO film, and performed current limitation experiments. In order to disperse the heat generated at hot spots in the YBCO film the film was coated with a gold shunt layer. At 0° fault angle the minimum quench current was 9.6 A_{peak}(meander line cross section: $5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$) and the fast quench time was 0.63 msec. The resistance of the limiter continued to increase for three cycles due to heat generation in the gold layer and was stabilized afterwards. At 45° and 90° the fast quench time were 0.56 msec and 0.26 msec, respectively. The quench time is believed to be reduced because faults occurred when the current was increasing or was at the peak value. With the limiter we could effectively limit the fault current about 1/5 times right after the fault and about 1/8.5 times three cycles after.

2. 실험방법

2.1 시편 제작

본 실험에 사용한 초전도 한류 소자는 직경 2 inch의 LaAlO₃ 기판 위에 성장된 두께 4000 Å의 YBCO 박막을 바탕으로 하여 제작하였다. 박막은 Prima Tech에서 구입한 단면 박막을 사용하였으며 임계온도와 임계전류는 각각 약 87 K와 1.0 MA/cm²이다. YBCO 박막은 제조공정상 약간 불균일한데 불균질성(inhomogeneity)으로 인한 hot spot의 생성을 막기 위하여 YBCO 박막 위에 약 4000 Å 두께의 금을 sputtering으로 증착하였다. 금이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 폭 1 mm, 간격 0.5 mm, 그리고 길이 5 cm의 meander line 모양으로 식각하여 초전도 한류소자를 제작하였다. 상온에서의 초전도 한류소자의 저항은 약 6.3 Ω이었다. 아래 그림 1은 완성된 한류소자의 사진을 보여주고 있으며, 여러번의 실험을 위하여 3개의 section으로 구분하여 설계하였다. 그림 2는 그림 1에 표시한 부분의 시험단자 구성을 보여준다.

1. 서론

전력계통에서는 뇌격전압이나 자연재해시 수목의 접촉 등에 의한 선로고장이 빈번하게 발생한다. 송전선로의 고장은 회로에 순간적으로 매우 큰 고장전류를 발생시키는데 이러한 고장전류는 대개 차단기(CB, circuit breaker)가 제거하지만, 차단기의 동작한계시간인 3~5 cycle 동안 전력시스템에 연결되어 있는 각종 전기적 장치의 기계적, 열적 손상은 피할 수 없다. 기존에 사용된 과전류 차단장치에는 전력용 한류 리액터, 전력용 퓨즈 그리고 전력용 한류 와이어 등이 있고, 차단방법으로서 고임피던스 변압기 채용과 모션분리 운전등을 들 수 있다. 어느것도 경제성과 효율면에서 개선해야 할점이 많다.^[1]

초전도 한류기는 그 자체만의 빠른 동작 및 회복시간 그리고 수명이 반영구적인 점등 다른 장치로 대체할 수 없는 초전도만의 특성 때문에 그 효용가치는 대단히 높으며, 그 제한방식에 따라 크게 저항형과 유도형으로 나눌 수 있다. 이 중에서 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 적층구조를 포함한 compact화가 용이하기 때문에 관심을 불러 일으키고 있다.^[4-7]

본 연구에서는 YBCO 계 초전도 박막을 이용한 저항형 한류기를 2 stripe 형태로 설계하고, 전력계통에서 발생하는 사고에 대해 회로를 구성하여 모의한 후, 자체 제작한 고장전류 발생장치를 통하여 사고각별 고장을 발생시킨 후 사고직후의 quench 특성 및 전류제한 특성을 알아 보았다.

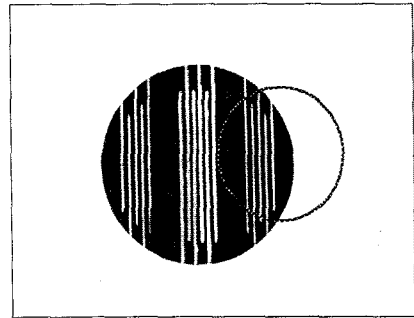


그림 1. 완성된 한류소자의 사진

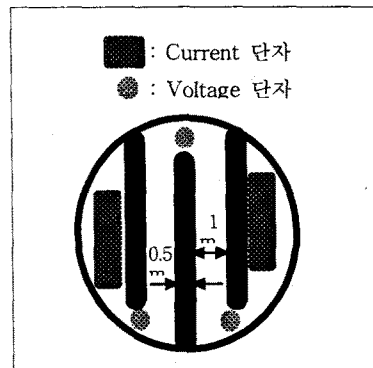


그림 2. 초전도 한류기의 설계패턴

2.2 시험 시스템 장치

quench 및 전류제한특성 측정을 위한 시험 장치를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 V_0 는 전원전압이고, 직렬 저항 R_0 은 전압변화를 측정하기 위한 표준저항이며 한시 동작 접점(timer)은 과전류에 의한 박막 film의 소손을 방지하기 위한 개폐기이다. SFCL은 저항형 초전도 한류기를 나타내며 분로저항 R_L 은 초전도체의 quench시 열 발생에 의해 gold층에 나타나는 저항을 모의한 것이다. path에 정상전류가 흐르다가 고장발생에 의하여 시편에 hot spot이 발생하면, 초전도체에 열이 발생하는데 이로 인하여 초전도체가 용단될 수 있다. 이러한 끊어짐을 방지하기 위하여 시편 상층에 gold coating을 하였다. 이의 목적은 gold 층이 hot spot의 열적 및 전기적 분로 역할을 담당하기 위함이다. 따라서 본 연구에서는 초전도체와 coating된 gold와의 접촉을 최소화하는 공정을 통하여 한류소자를 제작하였다. 한편 R_L 은 선로에 취부되어 있는 부하를 나타내며 SW1은 1선지락과 같은 계통 고장 시험을 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.

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

$$V_0 = \left(R_0 + \frac{R_L R_{SFCL}}{R_L + R_{SFCL}} \right) i \quad (2)$$

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

회로소자 값은 박막 film의 임계전류 및 한류특성을 고려하고 최초 quench 조건 및 최종 한류 조건을 감안하여 적절한 값으로 결정하였다. 시스템의 정격전압 V_0 는 1~65 V_{rms}/60Hz까지 변화하면서 가해 주었고, 측정을 위한 표준저항 R_0 은 1 Ω, 부하저항 R_L 은 3.8 Ω과 가혹한 조건의 시험시 7.7 Ω을 연결하였다.

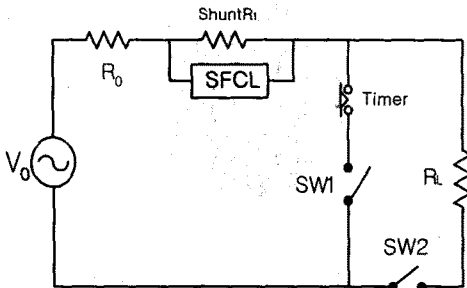


그림 3. 측정을 위한 회로 시험장치

3. 결과 및 고찰

전력계통에서 외부요인에 의한 계통 사고시 사고전류가 차단기의 차단내력을 초과할 때, 초전도 한류기의 1차적인 역할은 사고전류의 빠른 차단과 초전도성 회복이다. 이중 초전도성 회복은 차단기의 재투입시는 고려할 필요가 없고 차단후에는 복구하는데 소요되는 시간이 초전도성 회복시간보다 훨씬 크기 때문에 역시 염두에 둘 필요가 없다. 따라서 meander 형태의 저항형 한류기에서 중요한 요소는 임계전류, quench 시간 및 전류제한 효과 등이다.

그림 4에 인가전압 V_0 를 11 V_{peak}로 가하고 표준저항 R_0 는 1 Ω, 부하저항 R_L 을 3.8 Ω으로 하였을 때, 사고각 0°에서 초전도체에 최초로 quench가 발생한 경우에 대

하여 인가 시간에 대한 전기적 특성 파형을 나타내었다. 그림에서 고장점에는 fault, quench 시작점에는 quench 라고 색인하였다. 그림 (a)에서 사고가 발생하기 전인 정상전류값은 약 2.3 A_{peak}를 나타내었으며 선로고장을 발생시켰을 때 약 9.6 A_{peak}의 전류값에서 최초로 quench가 발생한 후 점차 그 값이 감소함을 볼 수 있다. 그림 (b)에서는 초전도체 양단에 quench에 따른 전압이 발생하여 서서히 증가하는 상태를 보여주고 있다. 한편 그림 (c), (d)에는 그림 (a) 및 그림 (b)로부터 초전도체 양단에 발생하는 저항 및 소비전력을 계산하여 나타내었다. 저항값과 소비전력 파형은 인가한 시간이 증가함에 따라 서서히 증가함을 볼 수 있다. 그림 5에 최초 quench 시점의 전류 및 저항변화값을 확대하여 보여준다. 고장발생후 약 3.2 msec후에 quench가 발생하였으며, 저항발생 메카니즘을 살펴볼 때 meander line의 형태에 따른 부분적인 quench가 발생한 다음 시간이 지나면서 완전한 quench로 진행된 것으로 보인다. 따라서 소비전력도 이 기간동안에 증가하였다. 그림 4와 5를 종합해 볼 때 선로고장에 따른 quench 발생 후 YBCO 초전도체의 shunt 저항으로 작용하는 gold층에서 열이 발생하여 저항이 증가하고 이에 따른 전류감소, 전압증가 및 소비전력증가가 발생한 것으로 생각된다. gold층의 열발생은 냉매로 작용하는 LN₂에서 충분한 냉각이 이루어지지 않기 때문이며 약 3주기 이후에는 일정한 값으로 포화됨을 확인할 수 있었다. 그림 6은 그림 3의 실험한 회로에서 초전도체 한류기를 적용하지 않았을 때와 초전도 한류기를 적용한 경우에 대하여 비교 파형을 나타내었다. 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우 최대 사고전류값은 약 11 A_{peak}이었으며 초전도 한류기를 적용한 경우는 최대 한류전류값이 약 9.6 A_{peak} 값을 보였다가 서서히 감소함을 볼 수 있다.

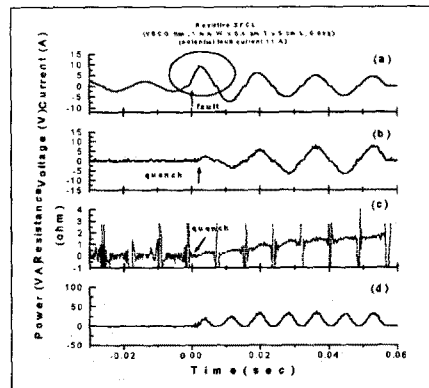


그림 4. 최초 quench 시점의 전기적 특성

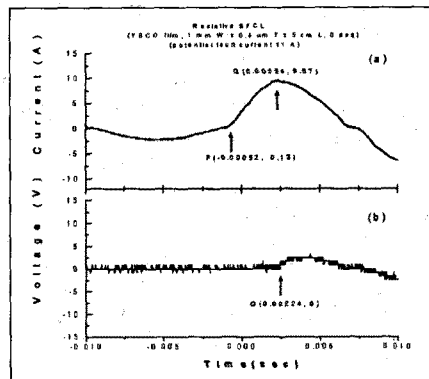


그림 5. 최초 quench 시점의 확대파형

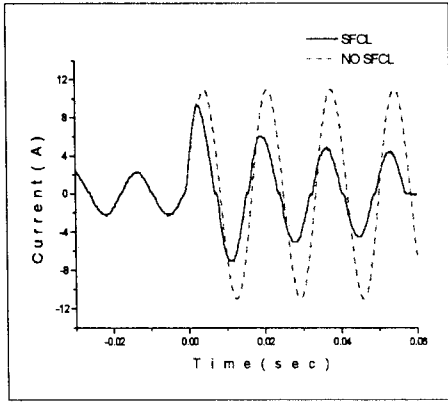


그림 6. 고장발생시 사고전류 및 한류파형

그림 7에 사고각 0° 에서 인가전압 V_0 를 $65 V_{peak}$ 를 가하고 표준저항 R_0 는 1Ω , 부하저항 R_L 을 7.7Ω 으로 하였을 때 초전도 한류기 양단에 걸리는 전기적 특성을 보여준다. 그림 (a)에서 사고전류값이 최고 13.02 A까지 상승하는 과도응답을 보인 후에 효과적으로 사고전류제한을 수행함을 볼 수 있다. 그림 (b), (c)는 quench 발생 후 한류소자에 전압과 저항이 발생하는 메카니즘을 보여준다. gold층의 열발생에 기인하여 사고후 점진적으로 전압과 저항값의 상승을 보이다가 일정한 값에 도달하였다. 상온의 gold층의 저항이 6.3Ω 인 것을 감안하면 사고발생 후 약 11 msec 후에 상온에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 소비전력을 나타내는 그림 (d)는 그림 (b), (c)의 상호 메카니즘에 의하여 상용주파수의 2배주기 간격으로 점진적으로 감소하다가 일정한 값을 보여 주었다.

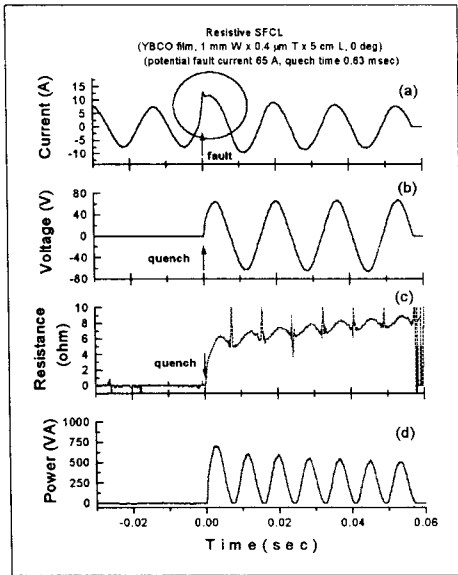


그림 7. 최종 quench 시점의 전기적 특성

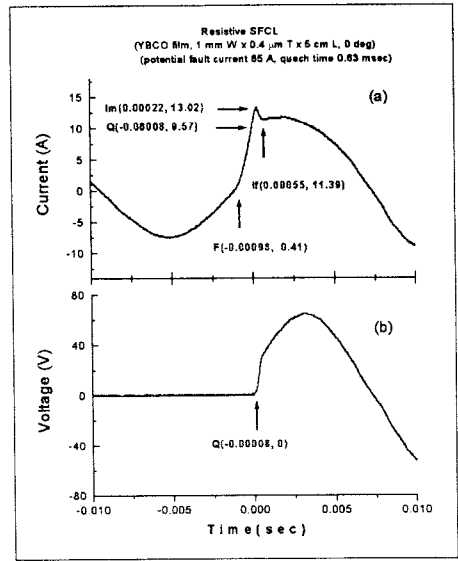


그림 8. 최종 quench 시점의 확대파형

한편 그림 7의 전류 전압 파형을 확대한 그림 8의 (a)를 보면 사고각 0° 에서 최종 사고가 발생(F지점)한 후 약 0.9 msec후에 Q 지점 (전류값 $9.6 A_{peak}$)에서 quench가 발생하는 것을 보여준다. 이후 사고전류의 급격한 상승에 따라 인가전류는 최고 $13.02 A_{peak}$ 값(최대 한류전류값, I_m 지점)을 보였다가 quench 종결지점인 If에서 $11.39 A_{peak}$ 를 나타내었다. 이때 fast quench 시간은 약 0.63 msec 이었다. 그림 (b)에서 fast quench가 진행되는 동안의 급격한 전압상승을 관찰할 수 있으며, 이후 한류소자의 열발생에 따라 파형이 점진적으로 변화하는 모습을 볼 수 있다. 그림 9는 그림 7의 사고발생 조건에서 초전도 한류기를 부착한 경우와 부착하지 않았을 때의 전류파형을 나타낸다. 초전도 한류기를 부착하지 않은 경우 사고발생 후 최고 $65 A_{peak}$ 의 전류값을 보여주어 초전도 한류기를 적용한 경우의 최대값인 $13.02 A_{peak}$ 에 비하여 약 5배, 3주기후의 안정된 전류값인 $7.56 A_{peak}$ 에 대하여 약 8.5배의 상승값을 나타내었다.

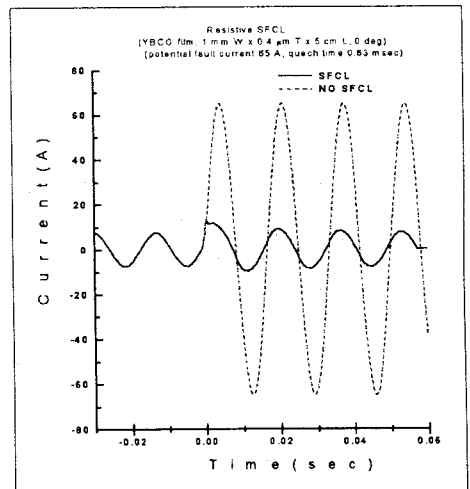


그림 9. 고장발생시 사고전류 및 한류파형

한편 같은 조건하에서 사고각 45° 와 90° 인 경우를 그림 9에 보여준다. 사고각 45° 와 90° 에서는 전류값이 상승도중 혹은 최고값에서 사고가 발생하기 때문에 최대

전류값이 $14.03 A_{peak}$ 와 $15.29 A_{peak}$ 를 나타내었으며 quench 시간도 0.56 msec와 0.26 msec를 각각 보여주었다.

(참 고 문 헌)

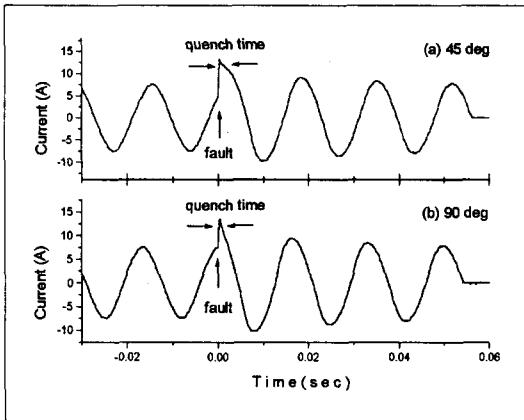


그림 10. 사고각별 전류제한 파형(사고각 45°, 90°)

- [1] Eddie Leung, "Surge protection for power grids," IEEE Spectrum, July, pp. 26-30, 1997.
- [2] W Schmidt, *et al.*, "Preparation of YBCO thick films by pulsed laser deposition for a superconducting fault current limiter," Inst. Phys. Conf. Ser. No. 148, pp. 631-634, 1995.
- [3] B. Gromoll, *et al.*, "Resistive fault current limiters with YBCO films," paper LJA01 presented at ASC '98, Palm desert, CA, USA
- [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 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 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.

4. 결 론

전력계통에서 빈번하게 발생하는 사고전류의 억제방안으로서 제시되고 있는 초전도 한류기중에서 YBCO film을 이용한 meander 형태의 저항형 한류기를 설계하고 quench 특성 및 전류제한 특성을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

인가전압이 11 V_{peak} 이고 R_0 는 1 Ω , R_L 을 3.8 Ω 으로 하였을 때 정상전류는 약 2.3 A_{peak} 이었으며 고장발생후 약 3.2 msec 후에 9.56 A_{peak} 의 전류값에서 최초 quench가 발생하였다.

인가전압 V_0 가 65 V_{peak} 이고 R_0 는 1 Ω , 그리고 R_L 을 7.7 Ω 으로 하였을 때 사고각 0°에서 고장발생후 약 0.9 msec 후인 9.6 A_{peak} 되는 지점에서 quench가 발생하여 13.02 A_{peak} 의 최대 한류전류값을 보인후 11.39 A_{peak} 의 전류값에서 fast quench가 완료되었다. 이때 quench 시간은 약 0.63 msec 이었다. 저항발생은 gold층의 열발생 때문에 점진적인 상승을 보이다가 약 3주기후에 일정한 값에 도달하였다. 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우 사고전류는 최고 65 A_{peak} 까지 상승하였고 초전도 한류기를 적용했을 때 최대 한류전류값 13.02 A_{peak} 에 비해 약 5배, 3주기후의 안정된 전류값인 7.56 A_{peak} 에 대해 약 8.5배의 상승값을 나타내었다. 사고각 45°와 90°인 경우는 전류값이 상승도중 혹은 최고점에서 사고가 발생하기 때문에 최대 한류전류값이 각각 14.03 A_{peak} , 15.29 A_{peak} 을 보였으며 quench 시간은 각각 0.56 msec와 0.26 msec를 나타내었다.

이상의 결론에서 앞으로 quench 후 저항발생 메커니즘에 관한 연구와 저항발생 data를 활용하여 배전 및 송전급 계통에 대한 simulation을 통하여 실계통 한류특성에 대한 연구를 병행하고자 한다.

또한, 본 연구가 진행되는 동안 YBCO 박막지원 및 식각에 도움을 준 LG 중앙연구소 및 표준과학연구원에 감사드립니다.

본 연구의 일부분은 과학기술부 중점연구개발 사업으로부터 연구비 지원을 받아 수행되었음.