

A study on characteristics for a resistive SFCL with gold layer

Gold층을 가진 저항형 초전도 한류기에 대한 특성연구

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, 전력계통연구실

We investigated current limiting properties for an SFCL of YBCO thin film coated with an Au layer. The YBCO film of 1 mm wide and 400 nm thick could carry the current $9.6 A_{peak}$ without quench. The SFCL limited the fault current below $7.6 A_{peak}$, which otherwise increases above $65 A_{peak}$, and melted down at the potential fault current of about $100 A_{peak}$, which is 10 times greater than the quench current. This means that the Au layer successfully protected the superconducting film by dispersing the heat generated at hot spots and electrically shunting the YBCO film.

1. 서론

국내 전력계의 경우 고장전류는 현재 설치된 차단기의 차단 한계용량에 접근하거나 차단용량을 초과할 것으로 전망되어서 점점 더 심각한 문제점으로 부각되고 있다. 한편 기존에 사용된 과전류 차단장치에는 전력용 한류 리액터, 전력용 퓨즈 그리고 전력용 한류 와이어 등이 있고, 차단방법으로서 고임피던스 변압기 채용과 모션분리 운전등이 고려되고 있으나 어느 것도 경제성과 효율면에서 개선해야 할 점이 많다.^[1]

초전도 한류기는 초전도체가 quench 되면서 발생하는 높은 임피던스를 이용하여 사고전류를 제한하는 기기로서 별도의 부가장치가 필요하지 않다. 또한 동작이 빠르고 회복시간이 짧으며 수명이 반영구적인 점 등 다른 장치로 대체할 수 없는 초전도만의 특성 때문에 그 효용가치는 대

단히 높다. 초전도 한류기는 그 한류방식에 따라 크게 유도형과 저항형으로 나눌 수 있다. 유도형은 용량증대에 유리하여 대용량화가 용이한 반면 기본구조상 필연적으로 철심 등의 core를 사용하여야 하기 때문에 크기가 커지고 hysteresis 손실 및 eddy current 손실 등의 철손을 극복해야 하는 단점을 가지고 있다. 저항형은 구조 및 원리가 간단하고 quench 시간이 빠른 점 등 유도형과 차별화된 장점들 때문에, 독일의 Siemens AG 그룹^[2,3] 등에서 활발히 연구가 진행되고 있다. 특히 박막을 이용한 저항형 한류기는 소형화 및 적층구조를 통한 compact화가 용이하기 때문에 관심을 불러 일으키고 있다.^[4,5]

본 연구에서는 YBCO 계열 초전도 박막을 이용한 저항형 한류기를 meander 형태로 설계하고, 과도상태에서 발생하는 열을 분산시키기 위하여 박막위에 gold 층을 입힌 경우에 대하여 모의하

였다. 고장전류 발생장치를 통하여 사고발생 모의 위상각별 고장을 발생시킨 후 사고직후의 quench 및 전류제한 특성을 알아 보았다.^[6]

2. 실험 방법

사고전류를 제한하기 위하여 사용한 한류소자는 독일의 PRIMA TEC에서 제공한 YBCO 박막을 사용하였다. YBCO 박막은 열분산이 취약하고, 제조공정상 위치에 따라서 약간 불균일한데, 이러한 불균질성으로 인하여 hot spot이 생성된다. 이로 인하여 국소적으로 초전도체에 열이 발생하는데 그 정도가 심하면 초전도체가 용단될 수 있다. 이러한 끊어짐을 방지하고 hot spot의 열적 및 전기적 분포 역할을 담당하기 위하여 YBCO 박막 위에 약 4000 Å 두께의 gold를 sputtering으로 증착하였다. Gold가 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 6.3 Ω이었다. 그림 1은 측정을 위한 시험단자의 구성을 보여준다.

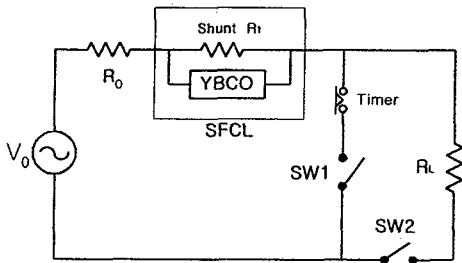


그림 1. 측정을 위한 회로 시험장치

3. 결과 및 고찰

박막을 이용한 meander 형태의 저항형 한류기에서 중요한 요소는 임계전류, quench 시간 및 전류제한 효과 등이다.

그림 2에 최초 quench 시점의 전류 및 전압변화값을 보여준다. 고장발생후 3.2 msec 후에 quench가 발생하였으며, 저항발생 메커니즘을 살펴볼 때 meander line의 형태에 따른 부분적인

quench가 발생한 다음 시간이 지나면서 완전한 quench로 진행되는 것으로 보인다. 따라서 소비 전력도 이 시간동안에 증가하였다. 즉, 선로고장에 따른 quench 발생 후 YBCO 초전도체의 shunt 저항으로 작용하는 gold층으로 대부분의 전류가 흐르게 되고, 이로 인해 열이 발생하여 저항이 증가하였으며 이에 따른 전류감소, 전압 증가 및 소비전력증가가 발생한 것으로 생각된다. Gold층의 저항증가는 냉매로 작용하는 액체 질소에서 충분한 냉각이 이루어지지 않기 때문이며 약 3주기 이후에는 일정한 값으로 포화됨을 확인할 수 있었다.

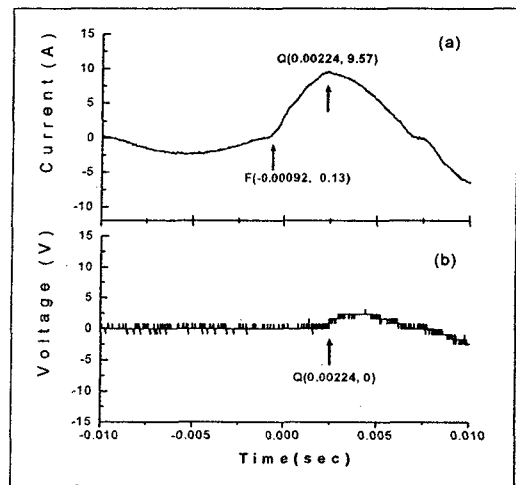


그림 2. Quench 시점의 확대파형

그림 3은 사고모의 위상각 0°에서 인가전압 $V_0 = 65 V_{peak}$ 를 가하고, 표준저항 R_0 는 1 Ω, 부하저항 R_L 을 7.7 Ω으로 하였을 때 초전도 한류기 양단에 걸리는 전기적 특성을 보여준다. 그림 3 (a)에서 사고전류값이 최고 13.0 A_{peak}까지 상승하는 과도응답을 보인 후에 효과적으로 사고전류 제한을 수행함을 볼 수 있다. 그림 3 (b), 3 (c)는 quench 발생 후 한류소자에 전압과 저항이 발생하는 메커니즘을 보여준다. Gold층의 열발생에 기인하여 사고후 점진적으로 전압과 저항값의 상승을 보이다가 일정한 값에 도달하였다. 한편 그림 8에 초전도 한류소자의 온도에 따른 전기저항 측정결과를 보여주며 전기저항값은 온도 증가 및 감소의 양방향으로 측정된 결과이다. Gold층의 저항이 상온에서 6.3 Ω인 것을 감안하면 사고발

생 후 약 11 msec 후에 상온에 도달하는 것을 확인할 수 있으며, 약 3 주기후인 54 msec되는 지점에서는 저항이 8.9Ω 이었다. 이 이후의 저항발생은 그림 3의 (d)에서와 같이 소비전력이 감소하기 때문에 더 이상의 큰 온도상승은 없을 것으로 생각되며, 또한 실제통에서는 차단기가 동작하여 회로를 개로하기 때문에 실제적인 의미는 없다.

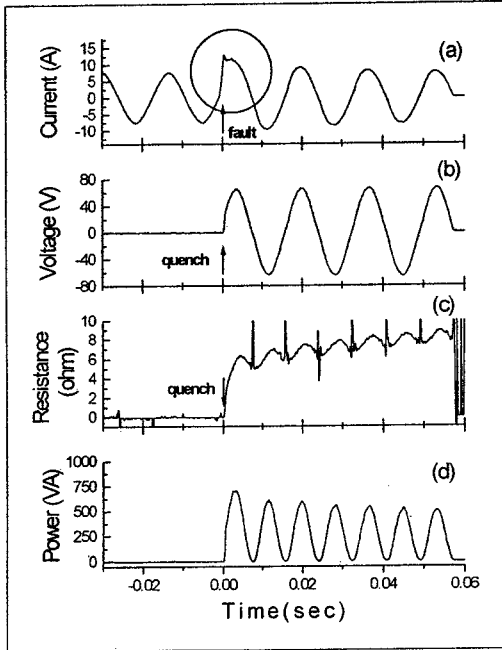


그림 3. 예상사고전류 $65 A_{peak}$ 에서의 전기적 특성

Gold 박막이 초전도 켈치에 미치는 영향을 보기 위하여 line 전체를 gold 박막으로 덮은 상태에서 부분별 용단 특성을 실험하였다.

시편의 meander line에 임계전류 이상의 전류를 통전하였을 때에 용단되지 않았으며, 켈치된 상태에서 3 사이클 이상 유지하였다. 과도한 전류(예상 고장전류 약 $65 A_{rms}$)가 흘렀을 때에야 용단되었고 이 때에도 용단되기 전에 3 사이클 가량 켈치상태를 유지하였다. 그림 4는 용단이 일어나기 전후의 용단된 부분의 사진이다. 두 사진을 비교하면 gold 박막이 가장 적게 덮여 있는 곳에서 용단되었음을 확인할 수 있다. 따라서 YBCO 한류소자위에 증착한 gold 층이, 고장전류의 발생에 의하여 초전도체가 quench 되었을 때,

전기적으로 shunt 회로역할을 수행하고 있음을 알 수 있다.

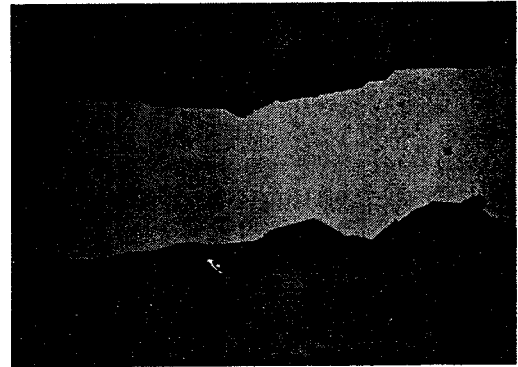
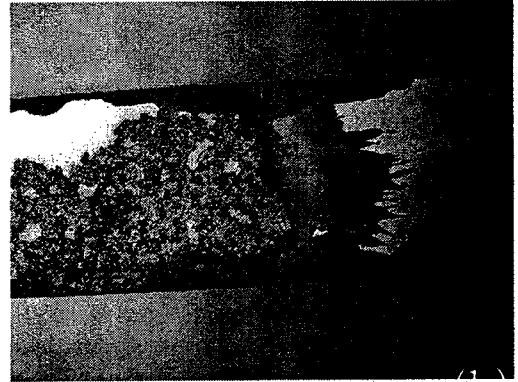


그림 4. 전 구간에 gold 박막이 덮힌 meander line에서 용단된 부분의 사진

a) 용단된 후 b) 용단되기 전

3. 요약

Gold 층을 입힌 저항형 초전도 한류기의 전류 제한 특성을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 고장발생후 3.2 msec 후에 quench가 발생하였으며, 부분적인 quench가 발생한 다음 시간이 지나면서 완전한 quench로 진행되었다. 즉, 선로고장에 따른 quench 발생 후 YBCO 초전도체의 gold 층으로 대부분의 전류가 흐르게 되고, quench 되면서 발생하는 열도 대부분 gold층에서 흡수하여 저항이 증가하였으며 이에 따른 전류감소, 전압

증가 및 소비전력증가가 발생하였다.

인가전압 $V_0=65 V_{peak}$ 이고 R_0 는 1Ω , 그리고 R_L 을 7.7Ω 으로 하였을 때 사고모의 위상각 0° 에서 고장발생후 0.9 msec 후인 $9.6 A_{peak}$ 되는 지점에서 quench가 발생하여 $13.0 A_{peak}$ 의 최대한류전류값을 보인후 $11.4 A_{peak}$ 의 전류값에서 fast quench가 완료되었다. 이때 quench 시간은 0.63 msec 이었다. 저항값은 gold층에서 발생한 열때문에 점진적인 상승을 보이다가 약 3주기후에 일정한 값에 도달하였다. 한류소자의 온도는 약 11 msec 후에 상온에 도달하였으며, 3 주기후인 54 msec 에는 150°C 까지 상승하였다.

gold 박막을 입힌 meander line은 임계전류 이상의 전류를 통전하였을 때에 용단되지 않았으며 켄치된 상태에서 3 사이클 이상 유지하였다. 약 $65 A_{rms}$ 가 흘렀을 때에야 켄치후 3 사이클 지나 용단되었다. 이러한 YBCO/gold에 의한 초전도 한류기의 용량은 gold에 발생하는 열을 gold가 감당할 수 있는 전류의 크기와 관련이 있으며, gold층이 YBCO 한류소자가 quench되었을 때 발생하는 열을 효과적으로 분산시킬 뿐만 아니라 전기적으로 shunt 회로 역할을 하고 있음을 확인할 수 있다.

이에 더하여 앞으로 quench 후 한류소자에서 발생할 수 있는 인덕턴스의 저감방안에 대한 설계 및 모델 탐구를 통하여 좀더 효율적인 한류소자 구성에 대한 연구를 병행하고자 한다.

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] Hyo Sang Choi, et al., "The characteristics of a superconducting fault current limiter with YBCO films", KCMAS '98, Vol. 8, pp. 291-295, 1998.