

분로저항이 초전도 한류기의 전류제한 효과에 미치는 영향

Effects of a shunt resistor on current limitation performance of an SFCL

최효상*, 현옥배**, 김혜림***, 김상준**, 한병성#

Hyo-Sang Choi*, Ok-Bae Hyun**, Hye-Rim Kim***, Sang-Joon Kim**, Byoung-Sung Han#

Abstract: We fabricated a resistive superconducting fault current limiter (SFCL) with a shunt resistor in order to bypass the transient current at faults. The SFCL consists of a YBCO film coated with an Au layer (10 Ω at room temperature), which is to disperse the heat generated at hot spots in the YBCO film, and a 5 Ω shunt resistor. The minimum quench current of the SFCL was found to be 12.2 A_{peak} . This SFCL successfully controlled the fault current to below 23 A_{peak} , which is otherwise to increase up to 103 A_{peak} . With the shunt resistor, the temperature of the SFCL rose three times slower than without the shunt, whereby the SFCL is protected at high currents.

Key Words: superconducting fault current limiter (SFCL), YBCO film, shunt resistor

1. 서 론

전력계통에서 사고는 주로 뇌적전압이나 자연재해시 수목의 접촉등에 의하여 발생하는데, 최근들어 고장용량이 점점 더 증대하고 있으며 차단기의 한계용량을 초과하는 곳도 일부 발생하고 있는 실정이다.^[1-2] 이처럼 고장전류가 커지면 고장전류를 안전하게 차단할 수 없게 되어 차단실패, 차단기 소손 및 인접 전력설비의 사고과급등이 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 갖는 등 구조적인 한계가 있다.^[3] 이에 비하여 초전도 한류기는 초전도체가 켄치되었을 때 발생하는 임피던스를 이용하여 전류제한을 수행하는 기기로서, 다른 부가장치가 필요하지 않으며 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 유도형과 저항형으로 나눌 수 있다. 유도형은 용량증대에 유리하여 대용량화가 용이한 반면 기본구조상 필연적으로 철심등의 코어를 사용하여야 하기 때문에 크기가 커지고 히스테리시스 손실 및 와전류 손실등의 철손을 극복해야 하는 단점을 가지고 있다. 저항형은 구조 및 원리가 간단하고 켄치 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 통한 밀집화가 용이하기 때문에 관심을 불러 일으키고 있다.^[4-8]

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

2. 실험 방법

2.1 시편 제작

초전도 한류소자는 직경 2 인치의 LaAlO₃ 기판 위에 성장된 두께 0.4 μm 의 YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) 박막을 바탕으로 제작하였으며 박막은 독일 Prima Tech사에서 구입하였다. YBCO 박막은 제조공정 특성상 불균일한데 불균일성으로 인하여 생기는 hot spot에서 발생하는 열을 분산하기 위하여 YBCO 박막 위에 0.4 μm 두께의 금(gold)을 증착하였다. 금(gold) 박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에 (약 100분의 1) 켄치된 한류소자에 흐르는 전류를 우회시킴으로써 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열의 양을 줄여 준다. 이외에 금(gold) 박막층은 YBCO 박막의 표면을 주변으로부터 보호하는 역할도 한다. YBCO는 공기 중의 수분과 반응하여 비초전도체를 형성하기 때문에 YBCO의 표면을 공기로부터 차단시켜 보호하여야 한다. 금(gold)이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 폭 1 mm의 meander line 모양으로 식각하여 한류소자를 제작하였다(그림 1). 박막 위에 감광제(photoresist)를 spin coating하고 soft bake한 후 contact aligner로 mask를 박막에 정렬하고 노광하였다. 노광된 감광제를 현상한 다음 노출된 금(gold) 박막과 그 아래에 있는 YBCO 박막의 일부를 ion milling으로 제거하고 나머지 YBCO 박막을 습식식각으로 제거하여 아

* 정 회 원 : 전력연구원 전력계통연구실 선임보원연구원

** 정 회 원 : 전력연구원 전력계통연구실 책임연구원

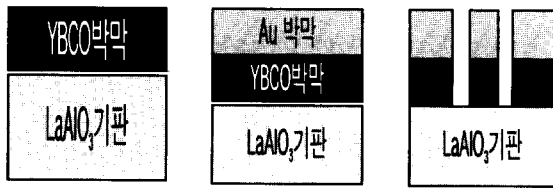
*** 정 회 원 : 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

정 회 원 : 전북대학교 전기공학과 교수

원고접수 : 1999년 9월 04일

심사완료 : 1999년 10월 02일

래 그림 2와 같은 한류 소자를 제작하였다.



(a) 박막증착 공정 (b) 금 코팅공정 (c) 식각공정

그림 1. 초전도 한류소자 제작공정

Fig. 1. Manufacturing diagram of current limiting element

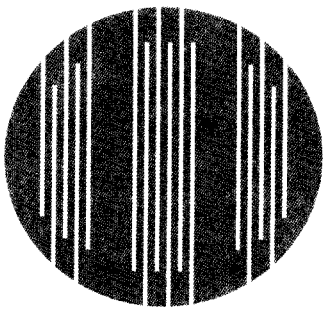


그림 2. 완성된 초전도 한류 소자

Fig. 2. Completed current limiting element

2.2 시험 회로 구성

켄치 및 전류제한특성 측정을 위한 시험 장치를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 V_0 는 전원전압이고, 직렬저항 R_0 은 전류변화를 측정하기 위한 표준 저항이며, 한시동작 접점(timer)은 과전류에 의한 박막의 소손을 방지하기 위한 개폐기이다. SFCL은 저항형 초전도 한류기를 나타내며 분로저항 R_2 은 초전도체가 켄치시 발생하는 과도전류를 억제하고 전류의 흐름을 우회시키기 위하여 병렬 연결한 저항이다. 또한 금 코팅층인 R_1 는 금(gold)층에 나타나는 저항을 모의한 것이다. 한편 R_L 은 선로에 취부되어 있는 부하를 나타내며, SW_1 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 켄치 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 한류특성을 고려하고 최초 켄치 조건 및 최종 한류 조건을 감안하여 적절한 값으로 결정하였다. 시스템의 정격 전압 V_0 는 1~80 $V_{rms}/60Hz$ 까지 변화하면서 가해 주었고, 측정을 위한 표준저항 R_0 은 1 Ω , 분로 저항 R_2 는 5 Ω , 부하저항 R_L 은 7.7 Ω 을 연결하였다.

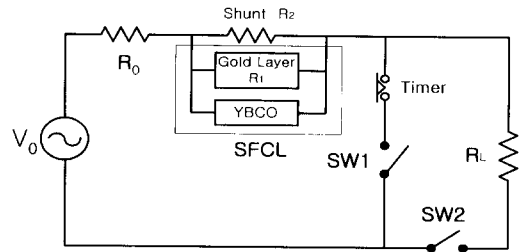


그림 3. 측정을 위한 회로 시험장치

Fig. 3. A current limitation experiment circuit with an SFCL

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 분로 저항을 연결하고 meander 형태의 저항형 한류기에서 중요한 요소인 전류제한 효과, 저항변화, 그리고 소비전력등의 실험을 수행하였다.

그림 4에 초전도 한류소자의 임계온도를 나타내며 히스테리시스 현상이 발생하는지 확인하기 위하여 온도상승과 하강의 양쪽으로 측정하였다. 그림에서와 같이 양방향의 저항값이 거의 일치하였다. 임계온도에서 저항이 급격하게 감소하는 것으로 보아 epitaxial 성장을 하고 비교적 양호하게 단상으로 이루어진 단결정임을 알 수 있으며 임계온도는 약 87 K이었다. 그림 5에 인가전압 V_0 를 16.5 V_{peak} 로 가하고 표준저항 R_0 는 1 Ω , 부하저항 R_L 을 7.7 Ω 으로 하고 분로 저항을 5 Ω 으로 하였을 때, 사고각 0°에서 초전도체에서 켄치가 겨우 발생할 정도의 인가전류에 대하여 인가 시간에 대한 전기적 특성 파형을 나타내었다. 그림 5 (a)에서 사고가 발생한 후 켄치가 아주 서서히 진행되는 것을 볼 수 있다. 이때 사고가 발생하기 전 정상전류값은 약 1.8 A_{peak} 를 나타내었으며 선로고장을 발생시켰을 때 약 12.2 A_{peak} 의 전류값에서 최초로 켄치가 발생하였다. 그림 5 (b), (c)에서 볼 수 있듯이 켄치 된 부분에서 발생한 열의 전파에 의하여 초전도 한류소자의 양단에 전압과 저항이 서서히 발생하는 것을 볼 수 있다. 한류소자의 열발생은 냉매로 작용하는 액체질소에서 충분한 냉각이 이루어지지 않기 때문이며 약 3주기 이후에는 일정한 값으로 포화됨을 확인할 수 있다. 그림 5 (a)에서 주목되는 점은 초전도 한류소자에 켄치 발생으로 인한 저항이 발생함과 동시에 I_1 으로 흐르던 사고전류의 일부가 분로 저항이 있는 I_2 로 서서히 분로하는 것을 알 수 있다. 이처럼 I_2 는 사고전류의 일부를 분담함으로써 한류소자의 한류용량 증대효과와 한류소자에서 발생하는 열을 감소시켜 그림 5 (d)에서와 같이 소비전력의 상승을 둔화시키는 역할을 수행함을 알 수 있다. 그림 6에 그림 3의 실험한 회로에서 초전도 한류기를 적용하지 않았을 때와 초전도 한류기를 적용한 경우에 대하여 비교 파형을 나타내었다. 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우 최

대 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.

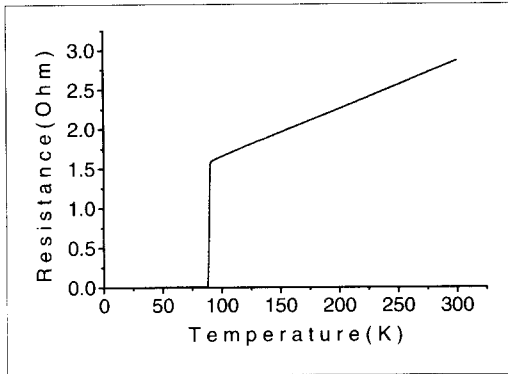


그림 4. 초전도 한류소자의 임계온도 곡선
Fig. 4. Critical temperature of superconducting current limiting element

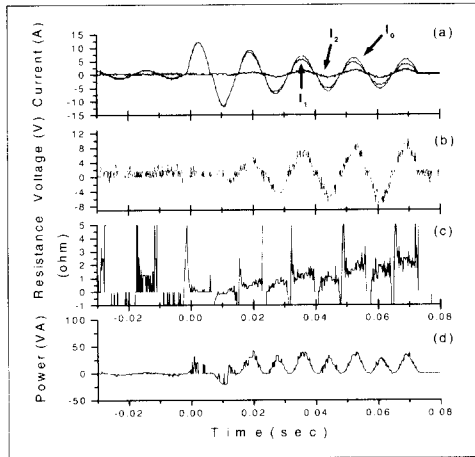


그림 5. 퀘치 시점의 전기적 특성
Fig. 5. Electrical properties at quench point

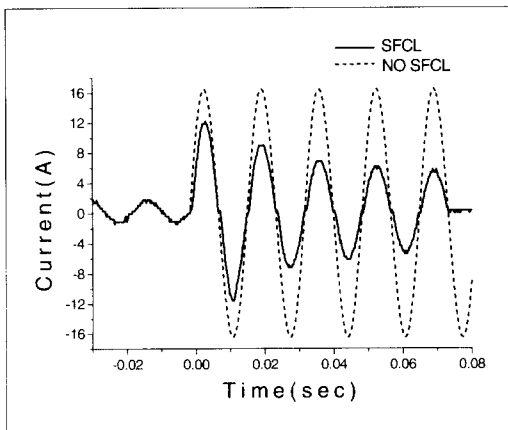


그림 6. 퀘치시점의 사고전류 및 한류과정
Fig. 6. Fault current and limited current waveforms at fault point

그림 7에 사고각 0°에서 인가전압 $V_0 = 103 V_{peak}$ 를 가하고, 표준저항 R_0 는 1 Ω, 부하저항 R_L 을 7.7 Ω으로 하고 분로 저항 R_1 을 5 Ω으로 하였을 때 초전도 한류기 양단에 걸리는 전기적 특성을 보여준다. 그림 7 (a)에서 사고전류값이 최고 23.0 A_{peak}까지 상승하고 이후 일정한 값을 유지하였다. 일반적으로 사고 발생 직후에는 전류변화율에 의하여 전류값의 급격한 상승을 보이지만 여기서는 분로 저항 R_1 에 의하여 신속하게 전류 분류가 일어났기 때문에 침투전류는 발생하지 않았으며 안정적으로 전류제한을 수행하였다. 그림 7 (b), 7 (c)는 퀘치 발생 후 한류소자에 전압과 저항이 발생하는 메카니즘을 보여준다. 금(gold)층의 열발생에 기인하여 사고후 점진적으로 전압과 저항값의 상승을 보이지만 분로 저항 R_1 으로의 전류분류에 기인하여 완만한 상승을 보여주고 있다. 또한 상온의 금(gold)층의 저항이 10.0 Ω인 것을 감안하면 사고발생 후 약 36 msec 후에 상온에 도달하는 것을 확인할 수 있으며 같은 조건에서 분로 저항이 없는 경우에 비하여 상온도달 시간은 약 3배이상 길어졌다.⁽⁹⁾ 약 4 주기후인 70 msec되는 지점에서는 저항이 약 12.4 Ω 이었으며 그림 4의 온도별 저항곡선에서 환산해 보면 약 99 °C 정도이어서 온도상승이 완만하게 진행됨을 알 수 있다. 이 이후의 저항발생은 그림 7의 (d)에서와 같이 발생 주열이 점차 감소하기 때문에 더 이상의 큰 온도상승은 없을 것으로 생각되며, 또한 실제통에서는 차단기가 동작하여 회로를 개로하기 때문에 더 이상의 실제적인 의미는 없다. 한편 그림 8의 전류-전압 확대과정에서 한류소자에 흐르는 전류 I_1 과 분로 저항에 흐르는 전류 I_2 를 비교하여 보면 사고전류에 의한 퀘치가 발생하자마자 약간의 시차를 두고 I_1 의 전류가 I_2 로 분류되면서 전체전류 I_0 에서 침투전류가 사라지는 것을 확인할 수 있다.

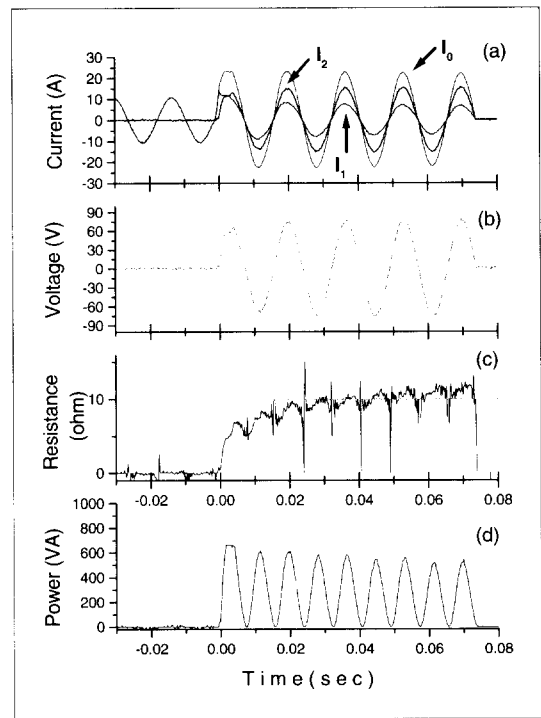


그림 7. 사고각 0°에서의 전기적 특성 (인가전압 103 V_{peak})
Fig. 7. Electrical properties at the fault angle 0° (applied voltage 103 V_{peak})

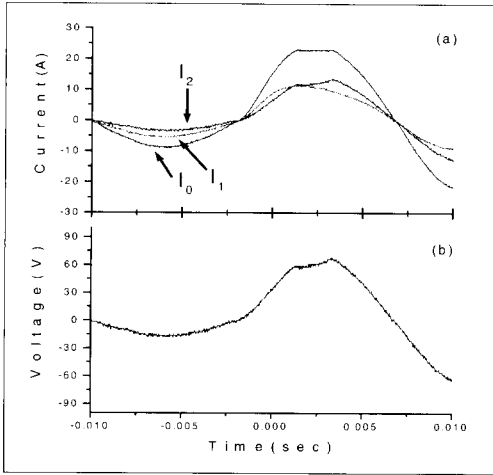


그림 8. 켄치 시점의 확대파형
Fig. 8. Waveforms at the quench point

그림 9는 그림 7의 사고발생 조건에서 초전도 한류기를 취부한 경우와 취부하지 않았을 때의 전류파형을 나타낸다. 초전도 한류기를 취부하지 않은 경우 사고 발생 후 최고 103 A_{peak}의 전류값을 보여주어 초전도 한류기를 적용한 경우의 최대값인 23.0 A_{peak}와 4주기후의 안정된 전류값인 22.3 A_{peak}에 비하여 약 5배의 상승값을 나타내었다.

같은 조건하에서 사고각별 과도응답을 살펴보기 위하여 사고각 45°와 90°인 경우를 그림 10과 11에 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 특성저하(degradation)에 의하여 발생한 것으로 생각된다. 고장조건이 여러번 반복되더라도 일정한 특성을 보여주는 신뢰성이 중요한 요소로 작용하는 실계통 운전에서는 시편의 특성저하에 의한 켄치 전류의 감소를 감안하여 설계시 이를 고려하여 적절한 운전조건을 설정하여야 할 것이다.

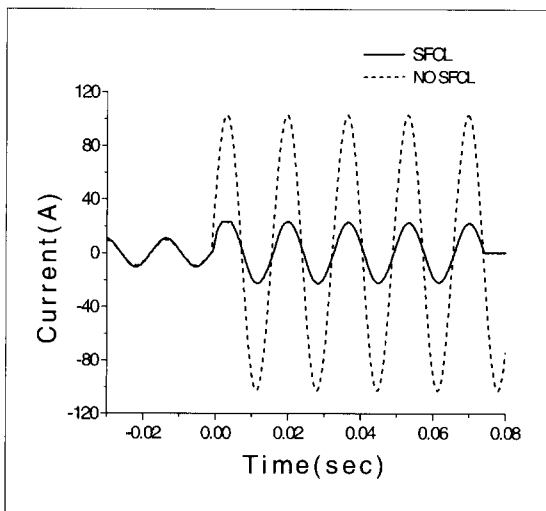


그림 9. 인가전압 103 V_{peak}일 때 사고전류 및 확대파형
Fig. 9. Fault current and limited current waveforms at fault

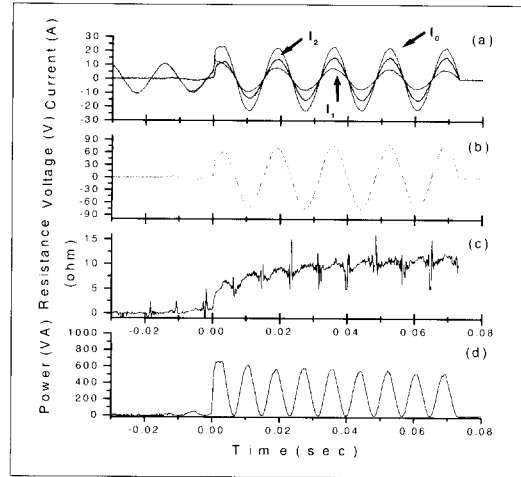


그림 10. 사고각 45°에서의 전기적 특성 (인가전압 103 V_{peak})
Fig. 10. Electrical properties at the fault angle 45° (applied voltage 103 V_{peak})

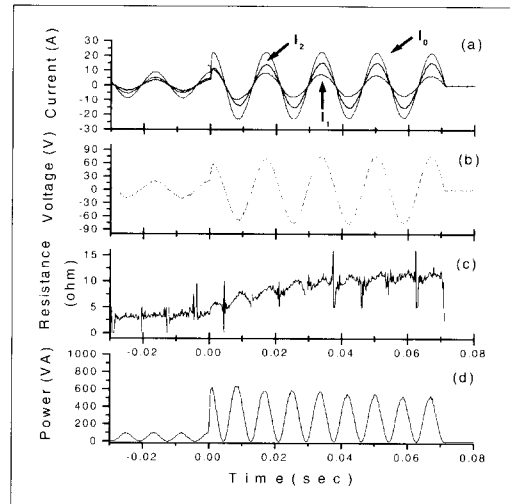


그림 11. 사고각 90°에서의 전기적특성 (인가전압 103 V_{peak})
Fig. 11. Electrical properties at the fault angle 90° (applied voltage 103 V_{peak})

4. 결 론

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

인가전압을 16.5 V_{peak}로 가하고 R₀는 1 Ω, R₁을 7.7 Ω으로 하고 분로 저항을 5 Ω으로 하였을 때 약 12.2 A_{peak}의 전류값에서 최초 켄치가 발생하였으며 초전도 한류소자에 켄치 발생으로 인한 저항이 발생함과 동시에 I₁으로 흐르던 사고전류의 일부가 분로 저항이 있는 I₂으로 서서히 분로하여 침투전류가 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 $V_0 = 103 V_{peak}$ 이고 표준저항 R_0 는 1Ω , 그리고 R_1 을 7.7Ω 으로 하고 분로 저항을 5Ω 으로 하였을 때 사고각 0° 에서 사고전류값이 최고 $23.0 A_{peak}$ 까지 상승하고 이후 일정한 값을 유지하였다. 일반적으로 사고발생 직후에는 전류변화율에 의하여 전류값의 급격한 상승을 보이지만 분로 저항이 전류분류의 역할을 수행하여 침투전류는 거의 발생하지 않았다. 또한 상온의 금(gold)층의 저항을 감안했을 때 사고발생후 약 36 msec 후에 상온에 도달하였고 분로 저항이 없는 경우의 11 msec에 비하여 약 3 배이상 길어졌으며 높은 전류에서 초전도 한류기를 보호하는 역할도 일부 수행하였다.^[9]

사고각 45° 와 90° 인 경우는 반복실험에 의한 시편의 특성저하(degradation)에 의하여 정상상태에서 초전도체에 흐르는 전류가 약간 발생하였다. 실제 운전에서는 시편의 특성저하에 의한 퀘칭 전류의 감소를 감안하여 적절한 운전조건을 도출하여야 한다.

따라서 앞으로는 장기간의 실제 운전 조건을 고려하여 시편의 특성저하(degradation)와 가혹조건에 대한 계속적인 연구가 필요하다.

본 연구의 일부분은 과학기술부 중점연구개발 사업으로부터 연구비 지원을 받아 수행되었음.

감사의 글

본 연구가 진행되는 동안 YBCO 박막 식각에 도움을 준 김인선, 임해용(표준과학연구원)께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 김준환, 이강완, "전력계통 고장전류 증대와 대방안", 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",
- [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", presented at ASC '98, Palm desert, CA, USA, Sep. 14-18, 1998.
- [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 YBa2Cu3O7- δ thin films on 2-inch LaAlO3 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.

저자 소개

최효상(崔孝祥)



1966년 02월 21일 생, 1989년 전북대 공대 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 근무

현옥배(玄鉦培)



1953년 02월 11일 생, 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 Iowa State Univ. 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 근무

김혜림(金蕙林)



1957년 3월 15일 생, 1979년 서울대학교 물리학과 졸업(이학사), 1981년 미 아이오와 주립대학교 대학원 물리학과 졸업(석사), 1991년 미 코넬대학교 대학원 물리학과 졸업(박사), 현재한전 전력연구원 선임연구원, 관심분야 : 초전도 전력응용.

김상준(金相俊)



1951년 2월 7일생, 1986년 서울산업대 전기공학과 졸업, 1987년 발송배전 기술사, 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1993년 장영실상 수상, 현재 한전전력연구원 전기이용기술그룹장, 주관심분야 : 전력케이블, 전기재료, 설비진단, 고전압

한병성(韓秉誠)



1951년 12월 22일생, 1975년 전북대 전기공학과 졸업, 1981년 동 대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1988년 프랑스 루이파스퇴르 대학(공학박사), 1988년 프랑스 CNRS연구원, 1996년 현재 전북대학교 전기전자제어 공학부 교수