

YBCO film을 이용한 저항형 한류기의 안정적인 동작 조건

최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준
한전 전력연구원 전력계통연구실

Stabilized operating condition of resistive superconducting fault current limiter using YBCO film

Hyo-Sang Choi, Ok-Bae Hyun, Hye-Rim Kim, Si-Dole Hwang, Sang-Joon Kim
Power System Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

hschoi@kepri.re.kr

Abstract - We fabricated resistive superconducting fault current limiters (SFCL) based on YBCO thin films grown on a 2" diameter Al_2O_3 substrate. The minimum quench current of the current limiting element was about $8 A_{peak}$. This SFCL successfully controlled the fault current below $14.3 A_{peak}$ at the voltage of $100 V_{rms}$, which is otherwise to increase up to $141 A_{peak}$, and the quench completion time is less than 3 msec. The temperature of the current limiting element rose to about 200 K in 3 cycles after fault. The SFCL showed reproducible characteristics during hundreds times of repeated experiments.

2. 실험 구성

사고전류를 제한하기 위하여 사용된 한류소자는 독일의 THEVA사에서 제공한 직경 2 inch의 박막을 이용하였다. YBCO film은 Al_2O_3 기판위에 증착되었으며 두께는 300 nm이고 quench 시 발생하는 hot spot을 방지하기 위하여 200 nm의 금을 in situ로 입혔다. 시편은 직·병렬을 통한 용량증대 및 quench특성을 조사하기 위하여 그림 1과 같이 정확히 두 부분으로 나누어 제작하였으며 각각 독립된 한류소자로 구성하였다. 이때 각 한류소자의 길이는 26 cm, 폭 1 mm이고 그림처럼 meander 형태로 이루어져 있으며 상온에서 저항값은 43 Ω 이었다.

1. 서 론

전력계통에서 한류기의 역할은 사고가 발생했을 때 고장전류의 증대를 억제하고 모선, 절연체 및 차단기가 감당하는 기계적, 열적 부하를 분담하는 것이다. 고온 초전도 한류기는 이러한 역할을 충실히 수행할 뿐만 아니라 평상시 저항이 영이고 구조가 간단한 잇점을 지니는 등 장점 때문에 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1-4] 고온 초전도 한류기에 대한 연구는 크게 저항형과 유도형으로 나눌 수 있는데, 박막형으로 대표되는 저항형은 배전급의 응용에 쓰여질 전망이고 자기차폐형등의 유도형은 송전급의 실계통에 적용될 것으로 예상되고 있다.

본 논문에서는 YBCO 박막을 이용한 소용량의 초전도 한류기를 제작하고 고장전류 발생장치를 통하여 위상각별 고장을 발생시킨 후 사고직후의 quench 및 전류제한 특성을 살펴보았다. 또한 초전도 한류기의 안정적인 동작조건을 찾기 위하여 특성저하 없이 단위소자가 감당할 수 있는 용량을 산출함으로써 향후 배전급 적용을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

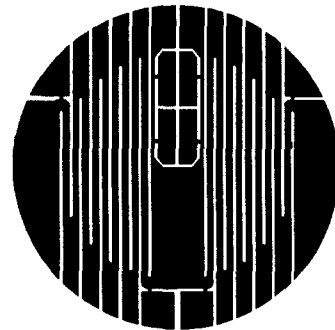


Fig. 1. The pattern shape of SFCL

그림 2는 실험 및 측정을 위한 구성회로를 보여주며 여기서 V_0 는 전원전압, R_0 는 전체전류 측정을 위한 표준저항, R_F 는 사고전류를 제어하기 위한 조정저항, 그리고 R_L 은 부하저항을 각각 나타낸다. SFCL은 초전도 한류기를 나타내며 상시 액체질소 용기에 담겨진 채로 실험하였다.

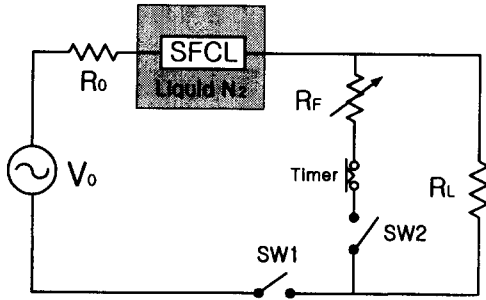


Fig. 2. Circuit diagram for the experi

3. 결과 및 고찰

앞에서도 언급한 바와 같이 박막형 고온 초전도 한류기는 한류소자가 갖는 특성으로 인하여 향후 배전급의 실계통에 적용될 것으로 생각되며, 이때 고려하여야 할 중요한 요소는 계통 고장시 한류소자에 필연적으로 수반되는 열발생에 대한 안정적인 운전조건 도출과 크기의 최소화를 고려한 용량 증대방안이다.

그림 3에 초전도 한류소자가 quench되는 시점의 전압발생곡선 및 전체전류 변화값을 보여준다. 이때 인가전압 V_0 는 $20 V_{rms}$ 이고 부하저항 $R_L=5 \Omega$, 조정저항 $R_F=4.1 \Omega$ 이었다. 고장전류 $8 A_{peak}$ 에서 한류소자에 약간의 전압값이 발생하는 것으로 보아 최초로 quench가 발생하는 것을 알 수 있다.

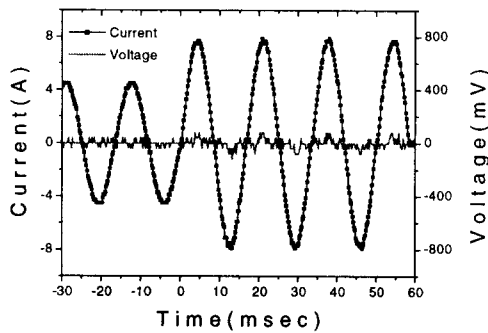


Fig. 3. The waveform at the minimum current quench

그림 4는 사고모의 위상각 0° 에서 인가전압 $V_0=30 V_{rms}$ 를 가하고 부하저항 $R_L=7.1 \Omega$, 저항 $R_F=3.1 \Omega$ 으로 하였을 때 전류 및 전압발 특성을 보여준다. 초전도 한류소자가 최초로 quench되는 시점인 $8 A_{peak}$ 부근(그림에서 \pm 모 양으로 표시한 부분)에서 전압이 발생하고 약 1 주기에 걸쳐 일시적으로 회복되었으나 발생된 열에 의하여 점진적으로 quench가 확산되는 모습을 관찰할 수 있다. 이때 예상 사고전류는 약 $10.3 A_{peak}$ 이었다.

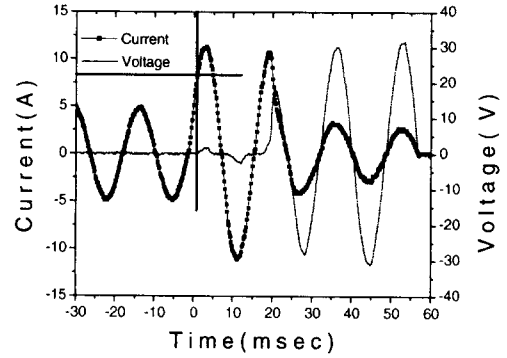


Fig. 4. Current & voltage waveforms at $30 V_{rms}$

그림 4의 그래프에 대한 저항발생 및 소비전력을 그림 5에 나타내었다. 사고직후 1주기 동안에는 저항이 발생하였다가 사라지고 소비전력도 상대적으로 적었으나 점차 저항발생이 두드러지는 모습을 관찰 할 수 있다. 즉, 인가전압이 아직 시편 전 영역에서 동시에 quench가 발생할 만큼 충분치 않았음을 알 수 있다. 또한 그림에서 3주기 이후의 저항값은 약 12Ω 정도이다. 한류소자의 저항값이 $90 K$ 에서 약 17Ω 임을 감안하면 아직 완전한 quench가 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

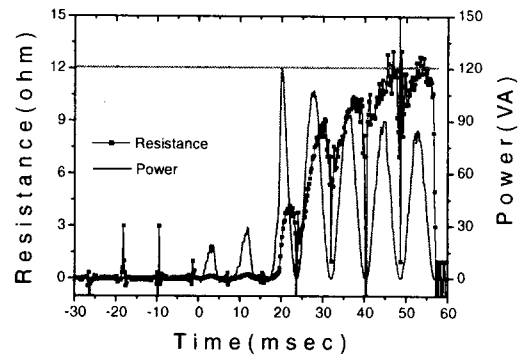


Fig. 5. Resistance & power waveforms at $30 V_{rms}$

그림 6은 사고모의 위상각 0° 에서 인가전압 $V_0=100 V_{rms}$, 부하저항 $R_L=27 \Omega$, 조정저항 $R_F=0 \Omega$ 으로 하였을 때 전체전류 및 한류소자의 전압발생 곡선이다.(예상 사고전류값 : $141 A_{peak}$) 사고발생 후 약 3 msec만에 quench가 완료되었으며, 전류가 최고 $14.5 A_{peak}$ 까지 상승하였다가 약 3주기 후에는 약 $5 A_{peak}$ 까지 감소하는 것을 볼 수 있다.

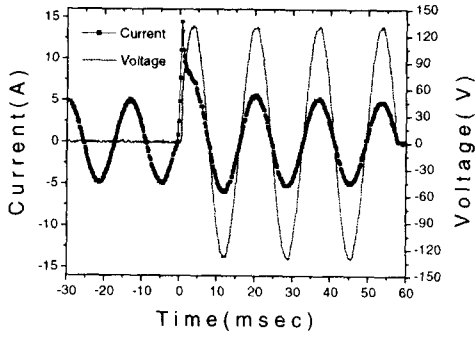


Fig. 6. Current & voltage waveforms at 100 V_{rms}

그림 7은 그림 6의 시편에 대한 저항발생 및 소비전력 특성곡선이다.

계통사고가 발생하였을 때 저항형 초전도 한류기의 안정적인 운전을 위해서는 한류소자가 초전도-상전도 전이를 여러번 수행하더라도 특성의 변화가 발생하지 않아야 한다. 이를 실현하기 위한 핵심적인 요소는 초전도 한류소자의 상전이시 최고온도가 일정온도를 넘지 않는 범위에서 운전하면 된다. YBCO 초전도체는 약 100 °C (= 400 K) 이내에서 성질이 변하지 않는다고 알려져 있다. 그러나 quench에 의한 급격한 온도변화에 의해 기계적 스트레스가 가해지기 때문에 그보다 낮은 온도까지만 허용될 필요가 있다. 현재 가장 적절한 최고온도는 충분히 연구되지는 않았으나 위의 문제점을 고려하면 박막온도 상승이 평균 200 K까지는 안전하다고 보인다.

한류소자의 저항값이 90 K에서 약 17 Ω, 300 K에서 43 Ω임을 감안하면 200 K은 약 30 Ω이 된다. 그림 1의 voltage 탭 양단의 각 meander 선에 대한 국부적인 온도는 약 ±2.5 Ω의 차이가 발생하기 때문에 그림 7과 같이 27.5 Ω을 기준으로 error bar 형태로 표시하였으며, 이에 대한 해석은 quench 전파에 관한 다른 논문에서 상세하게 다룰 것이다. 실제로 시편의 특성저하를 확인하기 위하여 같은 조건에서 사고발생을 약 100회 이상 실시하였으나, 한류소자의 특성저하는 발생하지 않았다.

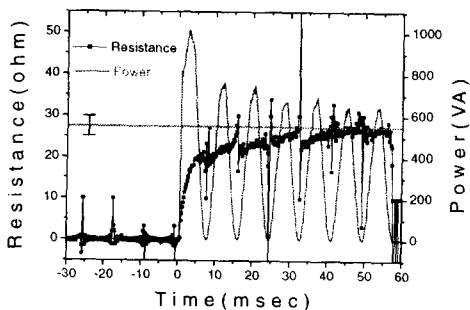


Fig. 7. Resistance & power waveforms at 100 V_{rms}

이로써, 2 inch 박막을 이용하여 두 부분으로 나누어 제작한 초전도 한류기는 한쪽 영역이 약 100 V_{rms}까지는 안정적으로 전류제한을 감당할 수 있음을 확인할 수 있다. 아울러 그림 1에서 가운데 전극 부분을 meander 선으로 구성하고 박막 전 부분을 하나의 한류소자로 제작한다면, 2 inch 박막 한 장이 약 250 V_{rms}까지는 감당할 수 있을 것으로 생각된다.

3. 결 론

YBCO film의 두께가 300 nm이고 금층의 두께가 200 nm인 박막형 한류기를 제작하고 그 전류제한 특성 및 적정용량을 산출함으로써 안정적인 동작조건을 아래와 같이 제시하였다.

한류소자의 최초 quench는 약 8 A_{peak}의 전류값에서 발생하였으며, 예상사고전류 10.3 A_{peak}를 인가하였을 때에는 한류소자의 전류제한이 점진적으로 이루어졌다. 최종적으로 인가전압 100 V_{rms}, 예상 사고전류 141 A_{peak}에서는 약 3 msec만에 전역에서 quench가 완료되었고 사고직후 약 14.5 A_{peak}까지 효과적으로 사고전류를 제한하였다.

이때 한류소자의 온도는 약 200K까지 상승하였으며 이 조건에서 100회 이상 반복실험을 하였지만 특성저하가 전혀 이루어지지 않고 안정적인 특성을 보여주었다. 따라서 2 inch 박막 한 장으로 약 250 V_{rms}까지는 안정적으로 전류제한을 수행할 수 있음을 확인하였다.

향후에는 직·병렬을 통한 용량증대 방안과 한류소자의 온도발생을 저감하는 방법에 대한 연구를 지속적으로 수행하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. Gromoll, *et al.*, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO Films - 100 kVA Functional Model", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 9, No. 2, pp. 656-659, June, 1999.
- [2] B. Gromoll, *et al.*, "Resistive current limiters with YBCO films", IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol. 7, No. 2, pp. 828-831, 1997.
- [3] 최효상 외, "분로저항이 초전도 한류기의 전류제한 효과에 미치는 영향", 한국초전도·저온 공학회논문지, 1권, 2호, pp. 49-53, 1999.
- [4] 최효상 외, "YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작 특성", 전기학회논문지, 48B 권, 10호, pp. 537-543, 1999.