

Current and voltage loading tests of a resistive SFCL

Hyo-Sang Choi^{*,a}, Ok-Bae Hyun^a, Hye-Rim Kim^a, Si-Dole Hwang^a and Kwon-Bae Park^b

^a Korea Electric Power Research Institute, Taejon, Korea

^b LG Industrial Systems, Electrotechnology R&D Center, Cheongju, Korea

Received 15 August 2001

저항형 초전도 한류기의 통과전 특성시험

최효상^{*,a}, 현옥배^a, 김혜림^a, 황시돌^a, 박권배^b

Abstract

We have performed the current and voltage loading tests of resistive superconducting fault current limiters (SFCLs) based on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) films with the diameter of 2 inch. The SFCL consists of meander-type YBCO stripes covered with 200 nm Au layer grown in situ for current shunt and heat dispersion at hot spots. The minimum quench current of an SFCL unit was about $25 A_{\text{peak}}$. Seven SFCL units were connected in parallel for the current loading tests at power source of $100 V_{\text{rms}}/2,000 A_{\text{rms}}$. This SFCL units had maximum limiting current of $170 A_{\text{peak}}$ during the fault instant and then successfully controlled the fault current below $100 A_{\text{peak}}$ within 1~2 msec after short circuit. Increased short current also reduced the quench completion time with little change of current limiting characterization. We connected six SFCL units in series for the voltage loading tests at power source of $1,200 V_{\text{rms}}/170 A_{\text{rms}}$ at this time. The shunt resistors were inserted into each SFCL unit to eliminate power imbalance originated from serial connection of SFCL units. Each SFCL unit was quenched simultaneously during the fault condition. The current increased up to $40 A_{\text{peak}}$ and decreased to $14 A_{\text{peak}}$ after 3 cycles. Quench was completed within 1 msec after the fault. We confirmed operating characteristics of 140 kVA ($120 A_{\text{rms}} \times 1,200 V_{\text{rms}}$) SFCL and presented the manufacturing possibility of 3.3 kV SFCL using 4 inch YBCO films.

Keywords : resistive superconducting fault current limiter, current and voltage loading tests, quench

I. 서 론

경제성장과 함께 전력수요는 꾸준히 증가하고 있다. 또한, 현재의 전력계통망은 공급신뢰도와 안정성을 확보하기 위하여 환상망으로 연결되고 있기 때문에 고장전류는 점점 증대하여 차단기의 차단능력을 초과하는 수준에 까지 도달

해 있는 상태이다[1]. 전력계통의 고장전류를 통제하는 방법은 차단기의 교체, 고임피던스 변압기나 직렬리액터의 채용, 모선분리 및 퓨즈의 사용등과 같은 여러가지 방법이 있으나 손실 발생과 계통의 유연성 저하등의 문제점을 안고 있다[2]. 한편, 고온 초전도 한류기는 정상상태에서 임피던스가 제로이고 사고시 순간 감지 및 원하는 크기의 임피던스 발생이 용이하기 때문에 세계적으로 널리 연구되고 있다[3-6]. 고온 초전도 한류기는 크게 저항형과 유

*Corresponding author. Fax : +82 42 865 5804

e-mail : hschoi@kepri.re.kr

도형으로 나눌 수 있는 바 이중 저항형은 구조가 간단하고 크기가 작기 때문에 실용화하기가 용이할 것으로 보이며, 본 연구에서는 박막을 이용한 저항형 한류기를 제작하고 통·과전특성 시험을 통하여 초전도 한류기의 전류제한 특성을 살펴보았다. 한편, 사고각별 전류제한 특성은 사고직후에만 약간의 영향을 줄뿐 3주기 이후의 전류제한 특성에는 영향을 주지 않기 때문에 여기서는 사고각 0° 에 대해서만 실험을 수행하였다.

II. 실험

저항형 초전도 한류소자는 참고문헌에 표시한 바와 같이 직경 2 inch의 사파이어 기판위에 성장된 두께 $0.4 \mu\text{m}$ 의 YBCO 박막을 바탕으로 제작하였다[7-8]. YBCO 박막은 독일의 THEVA사에서 구입하였으며 임계온도(T_c)는 87 K이고, 임계전류밀도(J_c)는 77 K에서 3 MA/cm^2 , 임계전류밀도(J_c)의 지역별 분포는 최고 약 10%의 차이를 보인다. 박막을 포함하여 초전도체는 재료의 불균일성 (inhomogeneity)으로 인하여 국부적으로 임계전류가 다를 수 있어 고전류 통전시 국소적으로 hot spot이 발생한다. 이러한 hot spot에서 발생하는 열을 분산시키기 위하여 YBCO 박막위에 $0.2 \mu\text{m}$ 두께의 금을 in-situ로 증착하였다. 금 박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에 (약 100분의 1) quench된 hot spot으로부터 전류를 우회시켜서 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 줄여준다. 이외에 금 박막층은 YBCO 박막의 표면을 주변으로부터 보호하는 역할도 한다.

여기서 시편의 가장자리는 임계전류밀도(J_c)가 약간 불균일하여 사용하지 않고 전류공급을 위한 전류단자나 특성 측정을 위한 전압단자로 활용하였다. 직렬연결시의 단위소자는 stripe 길이 42 cm, 폭 2 mm이고 상온에서 저항값은 34Ω 이었다.

Fig. 1은 실험에 사용한 측정회로도의 한 예를 보여주고 있다. 여기서 V_0 는 전원전압, R_0 의 경우 과전실험에서는 전체전류 측정을 위한 표준저항으로써 통전실험에서는 통전전류 조절을 위한 가변저항으로써 사용되었으며, R_L 은 부하

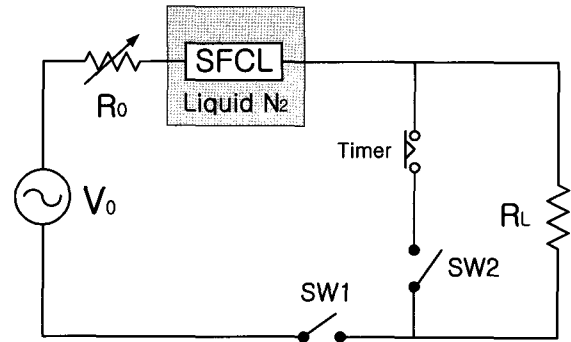


Fig. 1. Test circuit (current limiting elements are connected in series or parallel according to the experimental purpose)

저항($=144 \Omega$)을 각각 나타낸다. SFCL은 통·과전 특성시험을 위하여 연결된 초전도 한류소자를 대표적으로 표현하였으며, 최대 인가전압에 대한 특성시험을 위하여 직렬로 연결하거나 최대 인가전류에 대한 특성시험을 위하여 병렬로 연결된다. 초전도 한류기의 시험에서 일반적으로 부딪히는 문제는 전원의 용량 한계이다. 전원 용량이 충분하지 않으면 사고직후 인가전압의 전압강하가 생겨 불안정하거나 전류상승의 구배가 충분하지 못할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 한류소자의 병렬연결을 통한 통전시험을 통하여 전원에 대한 저전압/고전류 환경에서 초전도 한류소자의 전류특성을 조사하였으며, 직렬연결을 통한 과전시험에서는 고전압/저전류 조건을 통하여 전압특성을 고찰하였다. 특히, 직렬연결시는 동시퀀치 문제와 관련하여 특정 소자에 선티저항을 연결할 수도 있다. 정상상태 운전시 한류소자를 초전도 상태로 유지하기 위하여 액체질소 용기 내에 수직으로 설치된 채로 실험하였다.

실험과정을 보면, SW1을 닫아 정상상태 회로를 형성한 다음 SW2를 닫아 사고를 모의한다. 일정 시간 (주로 3 ~ 7주기) 후의 전류값이 zero 점을 통과할 때 SW2를 열어주고 이어 SW1을 열어 한 과정을 끝낸다. 각 부분에서의 신호는 다중 채널 digitizer를 통해 기록되고 분석된다.

III. 통·과전 특성 시험

(1) 통전 시험

우선 실험에 사용한 시편의 개별 I-V 특성곡선을 Fig. 2에 나타내었다.

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 2인치 박막형 한류소자 7개를 병렬로 연결하여 통전 시험을 수행하였다. 개별한류소자의 켈치전류값의 경우 가장 높은 시편과 가장 낮은 시편과의 편차는 11 % 범위 내에서 분포하였다. 이때 켈치전류는 1 mV/cm의 기준에 의하여 산정되었다. 통상 고온 초전도체의 켈치전류는 1 μ V/cm의 기준전압을 사용하나, 여기서는 켈치전류의 상대적인 차이값만이 중요할 뿐 절대값은 큰 의미가 없고 1 mV/cm의 기준이 측정하기가 용이하기 때문에 채택하였다.

초전도 한류기에 흘릴 수 있는 정격전류값을 높이기 위한 통전시험에서 이와 같은 켈치전류값의 상이는 사실 큰 문제가 되지 않는다. 왜냐하면 Fig. 3에서 초전도 한류소자가 켈치된 이후 A시편과 B시편의 전류거동을 확대한 부분을 보면 전류가 병렬연결된 한류소자 사이를 이동하면서 새로운 상전도 영역을 만들어 나감으로써 켈치진행 속도를 증가시키고 이로 인해 켈치 시작 시점의 불균형을 해소하기 때문이다. 두 전류곡선의 편차를 보여주는 B-A곡선을 보면 약 4번 정도의 변곡점을 보여주고 있는데, 한류소자의 켈치시 발생하는 저항에 의하여 전류재분배가 발생하여 편차를 줄이는 방향으로 수렴하는 과정임을 알 수 있다. 이때 인가전압

은 63 V_{rms}를 가했으며, 이는 각 한류소자의 전류분류를 잘 볼 수 있었기 때문이다. 70 V_{rms} 이상의 인가전압에서는 전류분류가 신속하게 발생하여 각 한류소자에 흐르는 전류파형과 크기가 동일하였다.

병렬연결시 통전시험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 교류 전류원은 100 V_{rms}를 인가하였을 때 2,000 A_{rms}까지 무리없이 흘릴 수 있는 전원을 사용하였으며 정상상태에서 선로저항 R₀를 1~0 Ω 까지 줄여가면서 실험하였다. 사고가 발생한 직후 최대한류전류값(170 A_{peak})을 보인 후 1~2 msec이내에 100 A_{peak}이하로 사고전류를 제한함으로써 효과적으로 전류제한을 수행함을 확인할 수 있다. 계통사고 이후 한류소자

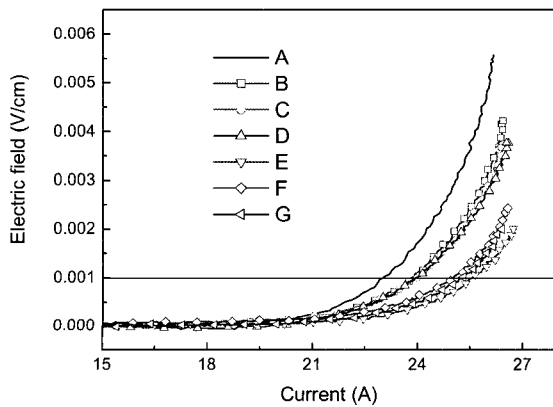


Fig. 2. I-V curves of individual SFCL units

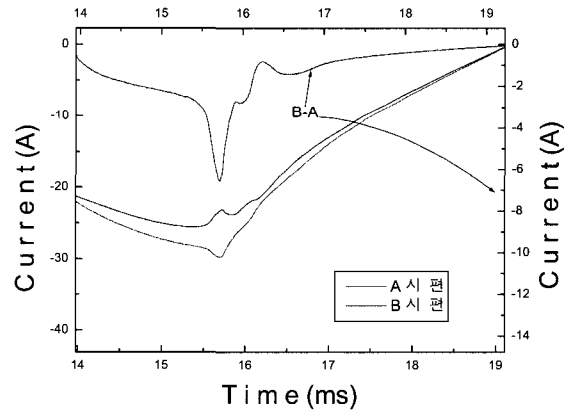


Fig. 3. Current redistribution behavior in parallel connection

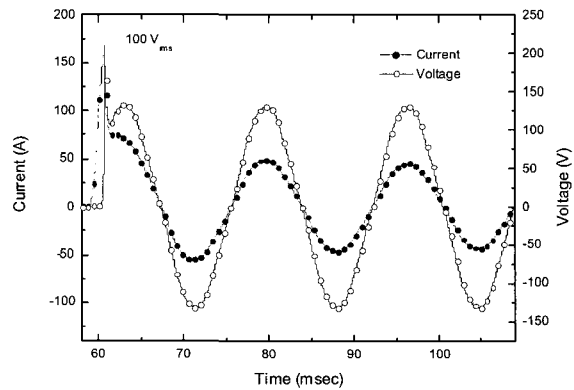


Fig. 4. Current-voltage characteristics in a short circuit (R₀=0, R_L=144 Ω)

가 켄치되면서 발생하는 전압특성도 순간적인 초기과도특성을 보인 후 이내 안정된 특성을 보여주었다.

한편, 선로저항(Fig. 1의 R_0 값)별 한류특성을 Fig. 5에 나타내었다. 선로저항(Fig. 1의 R_0 값)이 감소함에 따라 한류전류의 di/dt 가 상승함으로써 최대 한류전류값에서 전류제한에 이르는 동작시간이 감소하는 특성을 보여준다. 이때 최대한류전류값의 크기는 거의 같음을 확인할 수 있다. 즉, 초전도 한류기의 경우 한류소자에 통전되는 전류의 크기(사고전류의 크기)에는 별 상관없이 오히려 $R_0=0$ 에 가까울수록(사고전류값이 클수록) 전류제한의 완료시간이 단

축되는 긍정적인 효과를 가져오는 것을 확인할 수 있다. 이는 한류소자의 어느 한 부분에서 hot spot에 의해 발생된 켄치가 사고전류값이 클수록 주변으로 전파하는 속도가 증가하기 때문으로 생각된다.

켄치 후 한류소자에 발생하는 저항의 변화 추이를 Fig. 6에서 보여준다. 초기 저항발생은 $R_0=0$ 에 근접함에 따라 다소 증가하나 3주기 이후에는 거의 같아지는 특성을 보여준다. 한류소자의 통전특성에서 전류제한값은 통전전류의 크기에는 크게 영향을 받지 않음이 저항변화 특성에서도 확인된 셈이다.

(2) 과전 시험

통전시험을 행한 한류소자중 특성차이가 큰 A시편을 제외한 6개 시편을 직렬로 연결하여 과전시험을 수행하였다. 각 한류소자가 갖는 켄치전류의 상이에서 오는 파워불균형을 해소하고자 가장 특성차이가 큰 E소자를 뺀 나머지 5개의 한류소자에 셉트저항을 병렬로 연결하여 동시켄치를 유도하였다. 1,200 V_{rms}, 170 A_{rms}의 교류 전압원을 사용하여 과전특성 시험을 수행하였으며 셉트저항값(SFCL1~SFCL5)은 개별소자의 켄치특성에 따라 110 Ω ~ 200 Ω까지 가변하여 최적조건을 구하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 이때 최적의 셉트저항값은 켄치시작 시점이 동일하고, 사고발생한 후 3주기 되는 지점에서 초전도 한류소자에 발생하는 저항이 동일하게 되는 값을 선정하였다.

전반적으로 인가전압이 증가할수록 개별 한류소자의 셉트저항 의존도는 낮아졌으며 셉트저항이 선로에 미치는 영향이 줄어들게 됨을 확인할 수 있다. 즉, 인가전압이 높아질수록 적정 셉트저항값이 높아짐으로써 사고시 셉트저항으로 분류하는 전류값이 줄어들었다. 또한, 한류소자간 셉트저항의 편차도 인가전압의 증

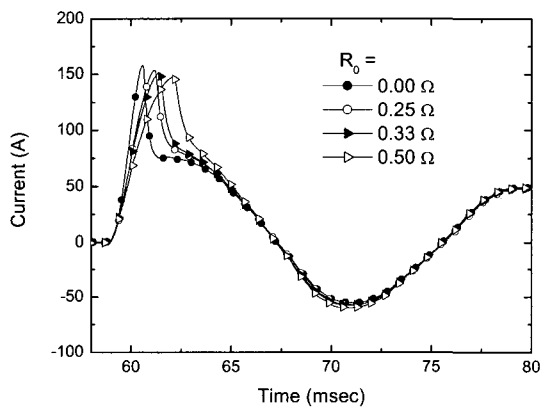


Fig. 5. Current waveforms according to line resistance R_0 ($R_L=144 \Omega$)

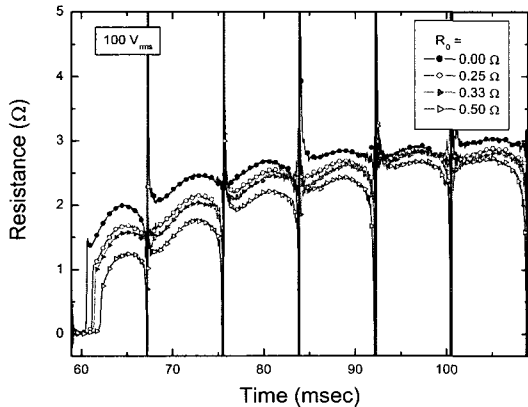


Fig. 6. Resistance waveforms according to line resistance R_0

Table 1. Optimal shunt resistance at various applied voltages

구 분	SFCL1 (Ω)	SFCL2 (Ω)	SFCL3 (Ω)	SFCL4 (Ω)	SFCL5 (Ω)
1000 V	80	80	200	100	150
1100 V	90	90	200	100	150
1200 V	110	110	200	110	150

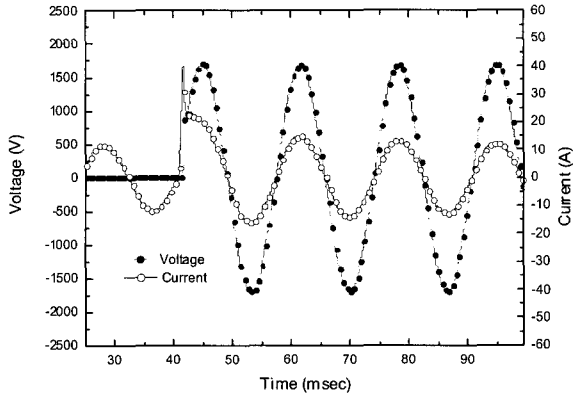


Fig. 7. Voltage and current waveforms of the 1.2 kV class SFCL

가와 함께 오히려 줄어들어 시스템이 안정됨을 알 수 있다. 한편, 정상상태에서는 한류소자가 초전도상태를 유지하고 있기 때문에 셉트 저항이 선로에 영향을 주지 않으며, 계통사고시 지속시간은 짧기 때문에(약 3~5주기) 셉트 저항이 가져오는 손실은 무시할 수 있을 정도이었다.

Fig. 7에 1.2 kV급 한류기의 과전특성을 보여준다. 사고발생 직후 40 A_{peak}의 최종한류전류값을 보인 후 1 msec 이내에 한류동작을 완료하였으며 3 주기 이후 개별한류소자의 발생저항값은 약 27 Ω (340 K에 해당)으로 상온저항값(34 Ω)보다 낮기 때문에 안전함을 알 수 있다. 일반적으로 박막형 초전도 한류소자의 저항이 상온값보다 높아지면 열에 의한 용단이나 특성저하가 우려된다. 과전시험을 통하여 1.2 kV급 초전도 한류기의 안정적인 동작특성을 확인하였으며, 4 inch 박막을 통한 3.3 kV급 한류기의 제작능력을 확보하였다.

IV. 결 론

단위 초전도 한류소자를 직·병렬 조합하여 통·과전 특성시험을 행하였다. 통전시험을 통하여 전류의 이동에 의하여 상전도 영역이 전파됨으로써 켄치시작 시점의 불균형을 해소하는 전류 재분배 메커니즘을 확인하였다. 통전시험에서는 선로에 흐르는 전류의 크기에는 크게 영향을 받지 않음을 실험으로 규명하였고 오히려

통전전류값이 높을수록(즉, 사고전류가 커질수록) 켄치 완료시간이 단축되어 초전도 한류기의 전류제한 특성이 향상되는 효과를 가져옴을 확인하였다. 한류소자의 직렬연결을 통하여 1.2 kV급 한류기의 과전시험을 수행하였으며 개별 한류소자의 켄치전류값(임계전류값)의 상이에서 오는 파워불균형을 해소하고자 셉트 저항을 통한 동시켄치를 유도하였다. 인가전압이 증가하면서 사고전류값이 증가하기 때문에 셉트저항의 영향이 줄어들었으며 사고 직후 1 msec이내에 한류동작을 성공적으로 완료하였다. 과전 특성 시험을 통하여 1.2 kV급 저항형 한류기의 전류제한 특성을 살펴보았으며, 4 inch 박막을 이용한 3.3 kV급 한류기의 제작능력을 확보하였다. 향후 초전도 한류기를 전력계통에 적용하기 위해서는 용량증대를 하여야 한다. 통전 및 제한전류의 증가를 위해서는 한류소자간 병렬연결을, 인가전압의 증대를 위해서는 직렬연결을 적절히 조합하여야 한다. 이때 반드시 고려하여야 할 필수사항은 차단기 및 계전기를 포함한 보호협조 기기를 고려하여 직·병렬 조합이 이루어져야 한다.

박막형 초전도 한류기는 구조가 간단하면서 냉각특성이 우수하기 때문에 배전급 한류기에 우선 적용될 것으로 전망되고 있으며, 현재 초전도 박막의 비싼 가격이 경제성 측면에서 문제가 될 수 있으나 수요증가 및 박막 제조 기술의 발달에 따라 꾸준히 가격이 하락하고 있는 추세에 있다. 또한, 세계적으로 직경 8 inch 크기의 초전도 박막이 이미 개발중에 있으며 양산에 들어간다면 송전급 초전도 한류기의 개발도 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

References

- [1] Joon-Hwan Kim, Kang-Wan Lee, "Fault current increasing and solving methods in the power system",

- Electrical Journal, vol. 5, pp. 24-31, 1998.
- [2] Nell E. Reimann, et al., "Simulation of the transient response of a high-T_c superconducting current limiter inserted in an electrical distribution system", IEEE Trans. on App. Supercon., vol. 7, no. 2, pp. 836-839, June, 1997.
- [3] L. S. Fleischman and Y. A. Bashkurov, "Design considerations for an inductive high T_c superconducting fault current limiter", IEEE Trans. on App. Supercon., vol. 3, pp. 570-573, 1993.
- [4] Hyo-Sang Choi, Ok-Bae Hyun, Hye-Rim Kim, "Quench characteristics of resistive superconducting fault current limiters based on YBCO films", Physica C, vol. 351, pp. 415-420, 2001.
- [5] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim and Ok-Bae Hyun, "Initial quench development in uniform Au/Y-Ba-Cu-O thin films", IEEE Trans. on App. Supercon., vol. 11, no. 1, pp. 2414-2417, March, 2001.
- [6] Hyo-Sang Choi, Hye-Rim Kim, Ok-Bae Hyun, "Operating properties of superconducting fault current limiters based on YBCO thin films", Cryogenics, vol. 41, no. 3, pp. 163-167, 2001.
- [7] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim and Ok-Bae Hyun, "Quench distribution in superconducting fault current limiters at various voltages", Cryogenics, vol. 41, no. 4, pp. 275-280, 2001.
- [8] Hyo-Sang Choi, Hye-Rim Kim, Ok-Bae Hyun and Sang-Joon Kim, "Quench properties of Y-Ba-Cu-O films after overpowering quenches", IEEE Trans. On App. Supercon., vol. 11, no. 1, pp. 2418-2421, March, 2001.