

Fabrication and Test of the 3.8 kV Resistive SFCL Based on YBCO Films

J. W. Sim^{*a}, H. R. Kim^a, O. B. Hyun^a, K. B. Park^b, B. W. Lee^b, J. S. Kang^b, I. S. Oh^b

^a Korea Electric Power Research Institute, Taejeon, Korea

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

Received 18 August 2003

3.8kV급 7직렬 저항형 고온초전도한류기의 제작 및 시험

심정욱^{*a}, 김혜림^a, 현옥배^a, 박권배^b, 이방욱^b, 강종성^b, 오일성^b

Abstract

We fabricated and tested a resistive superconducting fault current limiters (SFCL) operated at 3.8 kV based on YBCO thin films. The SFCL was composed of 7 components connected in series. Each component was designed to be capable of current limiting at 600 V, and has a SiC shunt resistor (R_S) of 40 Ω in parallel. Short circuit tests were carried out for 0 and 90 degree faults lasting for 5 cycles. The test results showed that the 7 components were quenched simultaneously under the safe quenches and evenly shared the applied voltage. The SFCL successfully suppressed the fault currents below 94A_{peak} within the quarter cycle after fault.

Keywords : superconducting fault current limiter, SFCL, SiC shunt resistor

I. 서론

저항형 한류기는 소형 경량화가 가능한 장점을 갖는 반면에 전압등급 향상을 위해 반드시 직렬 연결을 하는 문제점이 있다. 저항형 한류기를 직렬로 연결할 경우 각각의 한류소자의 특성에 약간의 차이만 있더라도 각 소자의 켄치 시작시점이 다르게 되고 해당 소자에 집중

되는 전력으로 인하여 한류소자가 소손될 가능성이 높게 되는데, 이는 한류기의 직렬연결 운전시 가장 중요한 화두로 손꼽힐 수 있다. 이에 대한 방안으로는 각 한류소자에 전압이 균일하게 인가되도록 분로저항(R_S)를 이용하는 방법이 있다[1]-[4].

본 논문에서는 직렬 연결된 2개의 초전도 한류소자에 대해 각각 SiC 분로저항을 연결하여 2직렬에 대한 동시 켄치를 구현하였고, 이를 바탕으로 3.8 kV, 7직렬 고온초전도 한류기를 제작하고 특성시험을 하였다.

*Corresponding author. Fax : +82 42 865 5997

e-mail : jwsim@kepri.re.kr

II. 고온초전도 한류기의 제작 및 실험

초전도 한류소자는 직경 4 inch의 사파이어기판에 성장된 YBCO 박막을 바탕으로 제작하였고, 켄치 시 발생하는 열을 분산시키기 위해 YBCO 박막 위에는 100 nm 두께의 금이 증착되어있다. 각 한류소자는 전압 내력이 교류 전원을 기준으로 600 V_{rms}가 되도록 5 mm 선폭의 meander line 모양으로 식각하여 7개를 제작하였다[2]. 각 초전도 박막의 평균 상전도 저항은 65.4 Ω이다. 전체 한류소자의 평균 임계전류밀도 J_c 는 2.94 MA/cm², 평균 켄치전류 I_q 는 1 mV/cm를 기준으로 52.8 A이다.

앞에서 언급한 바와 같이 초전도 한류기의 전압 등급을 높이기 위해 한류 소자들은 직렬 연결이 필요하고, 이에 따른 각 소자의 동시 켄치를 구현하기 위한 방안으로 분로저항(R_S)을 설치하였다. R_S 의 크기는 값이 작을수록 전압분배는 용이하지만 R_S 가 감당하는 전력이 커지는 단점이 있고, 반대로 클 경우 분담하는 전력의 크기는 작지만 각 한류소자에 걸리는 전압의 차이가 커져 동시 켄치를 발생시키는 것이 어렵게 된다. 따라서 적절한 크기의 R_S 를 결정하는 것이 중요하며 본 실험에서는 안정적인 동시 켄치를 유도하기 위해 R_S 의 크기를 40 Ω으로 정하였다[2].

Fig. 1은 3.8 kV 한류기 시험에 앞서서 시험에 사용되는 초전도 박막 2개를 직렬 연결하여 40 Ω의 분로저항 R_S 를 설치하고 1.2 kV 단락사고 발생시 각 한류소자의 동시 켄치 여부를 시험한 회로이다. 여기서 사용되는 R_S 의 재질은 SiC이며 실험에 사용되는 각 R_S 의 상온 저항은 평균 25 Ω이고, 77 K에서는 평균 40 Ω이다.

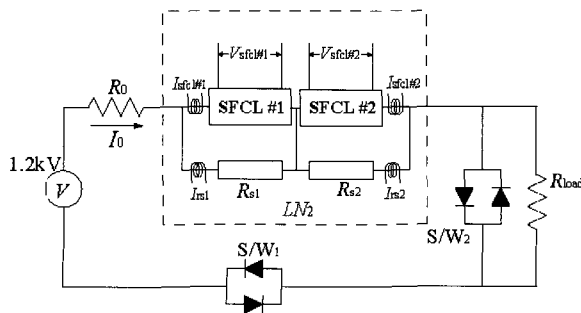


Fig. 1. Experimental circuit of 1.2 kV 2-series SFCL

측정은 입력전압 1.2 kV에 대해 단락 사고가 발생할 경우, 한류소자와 R_S 로 분류되는 전류의 크기를 측정하여 에너지가 적절히 분배되는 여부와 두 한류 소자에 동시 켄치가 발생하는지를 확인하였다.

Fig. 2는 1.2kV 2직렬 시험에 대한 결과이다. 결과를 보면 $V_{sfcl\#1}$ 과 $V_{sfcl\#2}$ 의 첫 주기에서 최대 전압의 크기가 각각 797 V_{peak}와 841 V_{peak}로 각 한류기의 평균전압 819 V_{peak}에 대해 2.7%의 전압 차이를 나타내므로 각 소자의 전압분배가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 2의 하단에 초전도 박막에서 발생하는 저항 $R_{sfcl\#1}$ 의 크기와 R_{S1} 의 크기를 비교해 볼 때 사고발생 후 첫 반주기 이후 각 저항의 크기가 35 Ω으로 동일한 크기가 되어 적절한 에너지의 분배가 이루어짐을 알 수 있다.

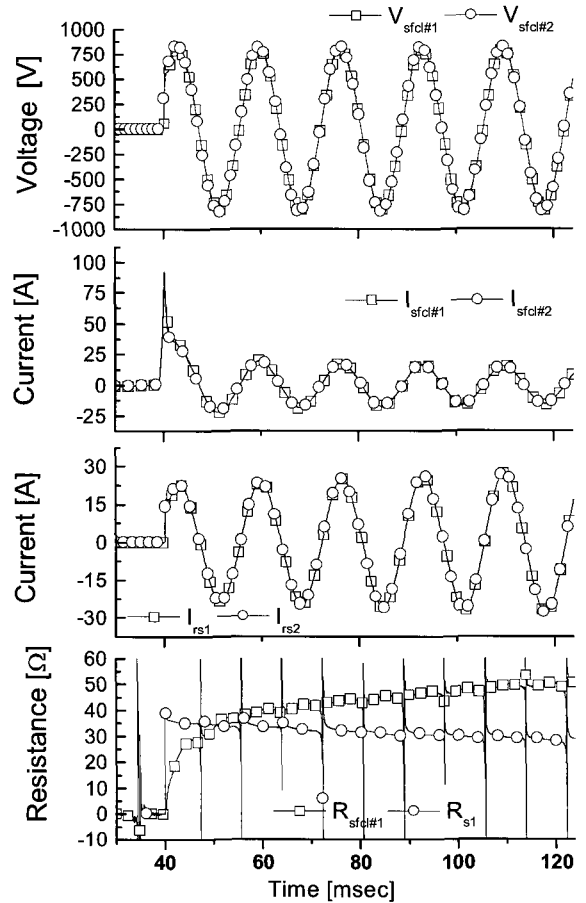


Fig. 2. Test results of 1.2kV 2-series SFCL

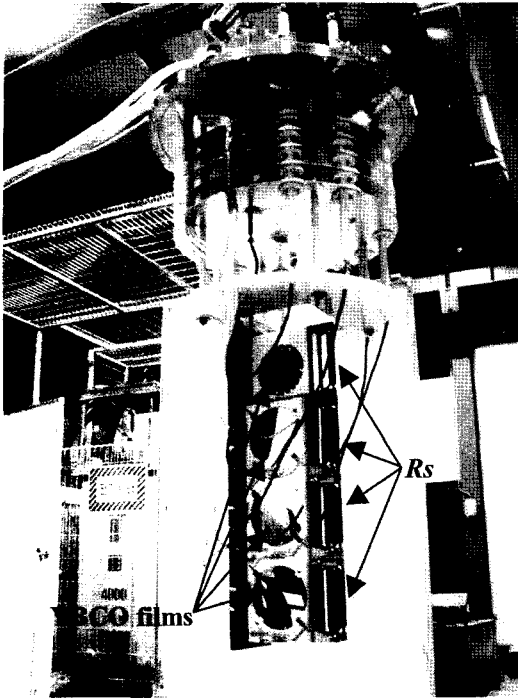


Fig. 3. 3.8 kV SFCL module

Fig. 3은 저온용기의 상부 플랜지와 결합한 단상 3.8 kV 초전도 한류기의 그림이다. 직렬로 결선된 각 한류소자에는 SiC 분로저항 R_s 가 병렬로 각각 연결되어있고 공간을 줄이기 위해 3장과 4장으로 배치하여 직렬 연결을 하였다. 실험의 용이성에 맞춰 수직형태의 배열을 하였고 박막간 절연 간격을 30 mm로 유지하였다.

Fig. 4는 단상 3.8 kV 초전도한류기의 단락시험을 위한 결선도이다. 입력전압은 3.8 kV이고 사고 발생시 시스템의 보호를 위해 1Ω 크기의 R_0 를 한류기와 직렬로 연결하였다. 부하저항 R_{load} 는 200Ω 으로 입력전압 3.8 kV일 경우 전체 전류 I_0 는 19 A, 단락 사고 발생시 전류는 이상적으로는 3.8 kA이나 전원 내부 임피던스와 선로저항 등으로 인하여 이보다 작게 된다.

단락 사고의 모의는 S/W2를 통해 발생되고, 위상제어기를 사용하여 입력 전압을 기준으로 0° 와 90° 에서의 사고를 모의하였다.

측정은 7직렬 연결된 한류기 양단전압 V_{tot} 와 각 한류소자의 양단전압 $V_{sfcl\#1} \sim V_{sfcl\#7}$ 을 측정하였고, current probe를 이용하여 전체전류 I_0 를 측정하였다.

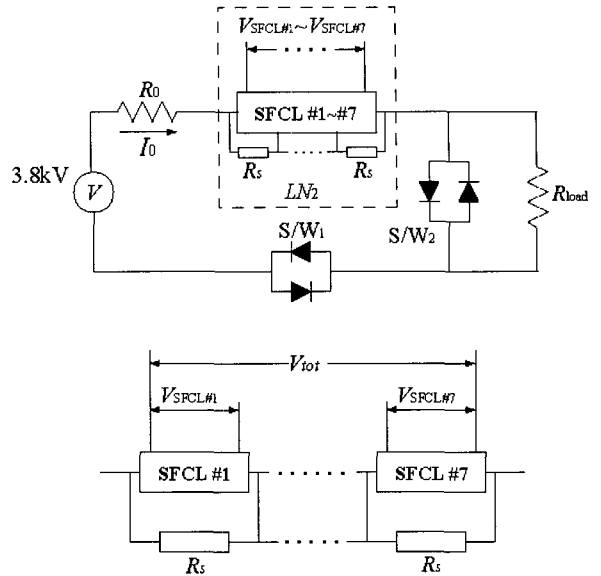


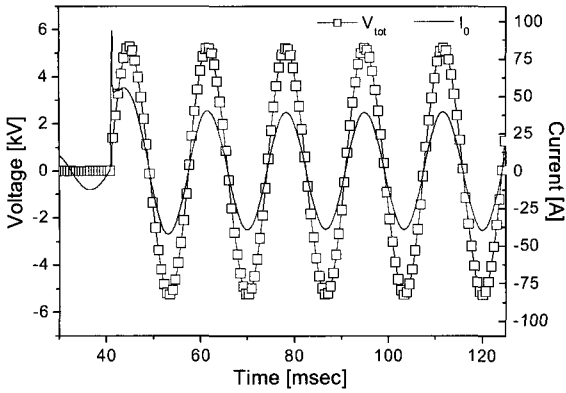
Fig. 4. Experimental circuit of 3.8 kV, 7-series SFCL

III. 실험결과

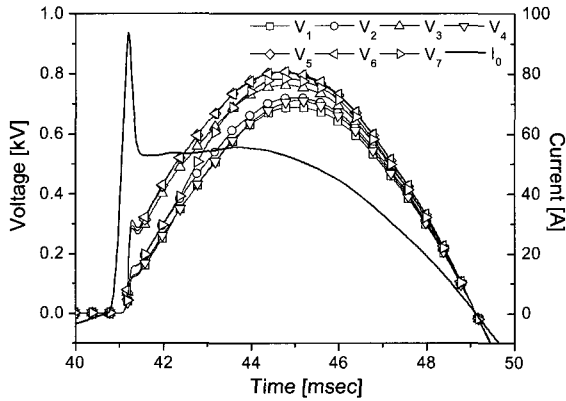
Fig. 5(a)는 입력 전압 3.8 kV, 사고 모의 위상각 0° , 사고 주기가 5주기 일 경우의 실험 결과이고, (b)는 각 한류소자에서 발생하는 전압파형의 첫 반주기를 확대한 그림이다. Fig. 5(a)를 보면 3.8 kV, 0° 사고 발생 시 무리 없이 한류가 됨을 알 수 있다. 사고 전류 I_0 는 최초 사고발생 후 0.4 msec동안 93.7 A까지 상승하였다가 0.3 msec만에 53 A수준으로 한류가 되었다.

Fig. 5의 (b)를 보면 첫 반주기에 대해서 7개의 한류 소자들 모두 동시에 켜치가 발생 했음을 알 수 있다. 각 소자의 최대 상승전압은 692~806 V_{peak}사이이고 개별소자의 전압 내력 조건에 충분히 부합되는 크기이다. 이것은 각 소자에 병렬로 연결된 분로 저항 R_s 에 의하여 전압분배가 적절히 이루어지기 때문이다.

Fig. 6(a)는 동일한 인가전압 조건에서 사고 모의 위상각을 90° 로 바꾸어 실험한 결과이고 (b)는 각 한류 소자의 전압파형의 첫 반주기를 확대한 그림이다. 그림을 보면 3.8 kV, 90° 에서도 충분히 한류가 되며 7개의 한류소자들이 모두 동시에 켜치가 발생 하였다. 각 소자의 최대 상승전압은 694~916 V_{peak}이고 사고 전



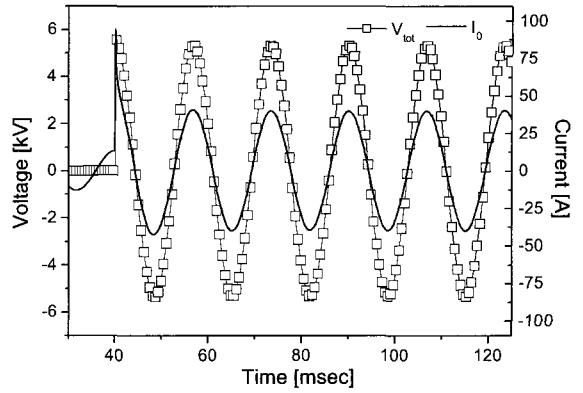
(a)



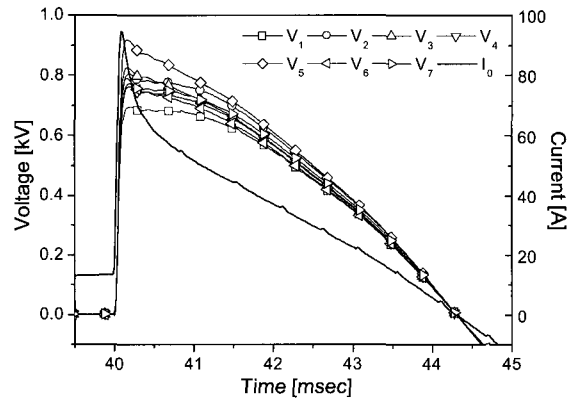
(b)

Fig. 5. Voltage and current characteristic (3.8kV, 5 cycle, fault angle 0°)

- (a) Total voltage V_{tot} and fault current I_0
- (b) Each SFCL component voltage and fault current I_0



(a)



(b)

Fig. 6. Voltage and current characteristic (3.8kV, 5 cycle, fault angle 90°)

- (a) Total voltage V_{tot} and fault current I_0
- (b) Each SFCL component voltage and fault current I_0

류 I_0 의 최대 크기는 $94.6 A_{peak}$ 이다. 사고전류 I_0 의 상승속도는 0.1 msec 로 0° 사고의 사고전류 상승속도 보다 4배 정도 빠른 속도로 상승하지만 이 경우에도 무리 없이 한류가 됨을 알 수 있다. Fig. 6(b)의 V_5 의 경우 사고 전압이 $916 V_{peak}$ 로 전압내력기준인 $600 V_{rms}$ 보다 8%높게 측정되었다. 이것은 해당 한류 소자의 특성의 차이가 다른 소자에 비하여 크기 때문이고, 이 경우 R_s 를 40Ω 보다 낮은 값으로 산정할 필요가 있다[2][3].

IV. 결론

600 V 전압 등급을 갖는 YBCO 박막형 개별 소자 7개를 직렬 연결하여 3.8 kV급 한류 모듈을 제작하고, 3.8 kV에서 0° 및 90° 사고 시험을 하였다. 시험결과 0° 및 90° 사고에 대해 각각 2 msec 이내에 한류가 완료되고 침투전류 $94.6 A_{peak}$ 이내로 유지됨을 확인하였다.

Acknowledgments

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] 현옥배, 최효상, 김혜림, 임해룡, 김인선, “직렬연결된 초전도 한류기의 분로저항에 의한 동작특성”, 대한전기학회, 49B, 11, 737-740 (2000).
- [2] 최효상, 김혜림, 현옥배, “YBCO 박막을 이용한 초전도 한류기의 안정적인 동작조건”, 대한전기학회, 49B, 9, 584-589 (2000).
- [3] 차상도, 김혜림, 심정욱, 한용희, 현옥배, “동일 병렬 저항을 이용한 초전도 저항형 한류소자 직렬 연결방안 및 전압용량 증대”, 대한전기학회, 52B, 7, 327-334 (2003).
- [4] O.-B Hyun, S.-D Cha, H.-R Kim, H.-S Choi and S.-D Hwang, “Shunt-Assisted Simultaneous Quenches in Series-Connected Resistive SFCL Components”, IEEE Trans. Applied Supercond. 13, 2060-2063 (2003).