

Resistive Superconducting Fault Current Limiters for Distribution systems using YBCO thin films

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

^a *Electrotechnology R&D center, LS Industrial Systems, Cheongju, Korea*

^b *Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, Korea*

YBCO 박막을 이용한 배전급 저항형 초전도 한류기

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

Abstract

High critical current density, high n value, multiple faults endurance, and fast recovery characteristics of YBCO thin films are very attractive characteristics for developing resistive type superconducting fault current limiters. But due to the limited current and voltage ratings of one YBCO module, it is needed to construct series and parallel module connections for high capacity electric networks.

Especially for distribution network, more than 30 units should be connected in series to meet voltage level. So in order to construct distribution-level superconducting fault current limiter, simultaneous quench in one YBCO thin films should be realized, and furthermore, quench should be occurred in all fault current limiting units equally to avoid local heating and failures.

In this paper, we proposed optimum design of YBCO thin films for fault current limiting module and technical method using shunt resistor to achieve simultaneous quench between multi current limiting units. From the analytical and the experimental results, optimal current path and thickness of shunt material was determined for YBCO thin films and shunt resistor between modules was developed. Finally, 14 kV one phase resistive fault current limiter using multi YBCO thin films was constructed and it was possible to get satisfactory test results.

Keywords : Resistive type superconducting fault current limiter, YBCO, 14 kV rating

I. 서론

기존 전력 계통에서 사용되는 차단기는 상대

적으로 긴 사고 전류 지속 시간, 높은 단락 전류 용량, 아크 발생으로 인한 전자기적, 기계적 영향 등을 회피할 수 없다. 또한 산업화의 진행 및 도시화로 인해 매년 단락 전류 크기는 지속적으로 높아지는 반면에 이에 대응하는 차단기 기술적 개발은 한계에 부딪치고 있다.

^{*}Corresponding author. Fax : +82 43 261 6630

e-mail : bwlee@lsis.biz

따라서, 계통에서 발생하는 단락 전류를 차단 시간내에 효과적으로 제어 가능한 한류 기술은 그 효과성으로 인해 주목 받고 있다. 하지만 실제적으로 계통에 적용 가능한 한류 기술의 개발은 기술적 어려움과 상업화의 난점으로 인해 지연되어 왔다.

고압이나 초고압 계통에 적용 가능한 한류 기술로는 전력변환 소자를 이용한 반도체 한류 차단 기술, 초전도 소자를 이용한 한류 기술 등이 제시되고 있다. 이 중 전력변환 소자를 적용한 반도체 한류 차단 기술은 기술적으로 성숙 단계에 있지만, 반도체 소자의 통전 손실, 고압화 대전류화를 위한 직병렬 연결 문제, 고비용 등으로 인해 그 용도가 제한되고 있다.

초전도 소자를 이용한 한류 기술의 경우, 한류 소자로서의 초전도체의 우수한 특성으로 인해 저온 초전도체 발견 이후 지속적인 관심이 있었으나 천문학적인 냉각 비용으로 인해 실용화에 어려움을 겪어 왔다. 그러나 액체 질소를 냉매로 사용 가능한 고온 초전도체가 발견되면서, 이 새로운 소자의 비선형적인 전압-전류 특성을 적용한 가격 경쟁력을 갖춘 상용화 초전도 한류기의 개발 가능성이 제시되어 현재, 세계 우수 전력 기기 메이커에서도 경쟁적으로 초전도 한류기 개발에 뛰어들고 있으며, 향후 5년 내에 전력 계통에 실적용 가능한 한류기 개발이 이루어지리라 예상하고 있다 [1,2,3]. 이에 부응하여 국내에서도 초전도 한류기 개발을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 [4,5].

LS산전과 한전전력연구원에서는 154 kV 송전급 초전도 한류기 개발을 최종 목표로 2001년 공동 프로젝트를 착수하였으며, 2004년 5월, 1단계 목표인 6.6 kV/200 A급 삼상 초전도 한류기 및 14 kV/100 A급 단상 초전도 한류기를 성공적으로 개발 완료하였으며, 현재 2단계 목표인 24 kV/630A급 초전도 한류기 개발에 매진하고 있다.

본 논문에서는 YBCO 박막 소자를 이용한 14 kV급 초전도 한류기 개발 전반에 관하여 다루고자 한다.

YBCO 박막으로 제조된 초전도 한류 소자는

높은 전류 밀도와 n value, 다수의 사고에 대한 내력 및 빠른 회복 특성으로 인해 저항형 초전도 한류기 소자로는 매우 우수한 특성을 가지고 있다. 하지만 단위 한류 소자의 전압, 전류 용량의 한계로 인해 배전급 초전도 한류기 개발을 위해서는 많은 수의 직렬, 병렬 연결을 통한 용량 향상이 필요하다.

본 논문에서 제시하고 있는 14 kV 단상 한류기 개발을 위해서도 24개 이상의 YBCO 박막 소자의 직렬 연결이 필요한데, 이 많은 소자가 단락 전류 유입시 동시에 반응하여 골고루 저항을 발생시켜야 만이 한류 소자의 파괴 및 열적 손상없이 한류기 성능을 발휘할 수 있게 된다.

본 논문에서는 14 kV급 단상 한류기 개발에 사용된 YBCO 박막 초전도 한류 소자 및 직렬 연결을 통한 용량 향상 방법, 그리고 단락 시험을 통한 성능 검증에 관해 집중적으로 다루고자 한다.

II. 14 kV 초전도 한류기용 YBCO 모듈 개발

YBCO 초전도 박막 소자 개발 시 가장 우선적으로 고려해야 될 점은, 단위 소자 용량 증대 방안, hot spot 발생에 의한 열적 소손 방지, 단위 한류 소자 최적 설계에 관한 것이다. 특히 단위 한류 소자 설계시 저항형 한류기에서 초전도 소자의 통전로로 사용되며 켄치시 저항 역할을 수행하는 전류 통전로 형상 결정이 가장 중요하다. 왜냐하면 전류 통전로의 길이, 두께, 형상 등에 따라 켄치시 발생하는 저항이 결정되며, 전계 및 자계의 집중을 완화하기 위한 패턴 설계를 통해 초전도 소자의 열적, 전기적, 기계적 파괴를 방지하고, 교류 손실 또한 저감할 수 있기 때문이다.

저항형 초전도 한류기에 사용되는 YBCO 박막소자의 최적 형상을 얻기 위해, 전자계 해석 연구, 고속 카메라를 이용한 켄치 특성 연구 및 수십 번의 켄치 상황에 대한 열화 방지 방안 등을 고려하여 4인치 YBCO 박막의 최적

형상을 구하였으며 이에 대한 연구 결과는 이미 발표한 바 있다 [5]. 최종 개발된 4인치 YBCO 박막의 최종 사양은 표 1과 같다.

표 1. 4인치 YBCO wafer 사양.

	4인치 YBCO wafer
Spec.	4 inch, sapphire/YBCO 300 nm/Au 140 nm, $J_c = 3 \text{ MA/cm}^2$
Nominal voltage	600 V
Nominal current	35 A
Current path pattern	Bi-spiral line (adapting bubble corner)
Safe quench temperature	< 250 K

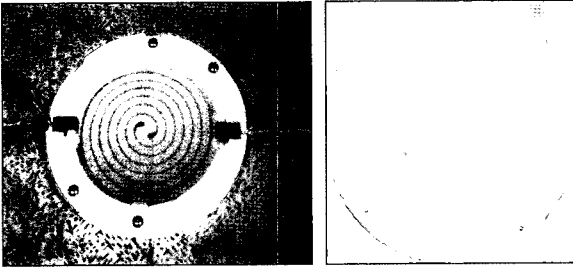


Figure 1. 4-inch YBCO current limiting device.

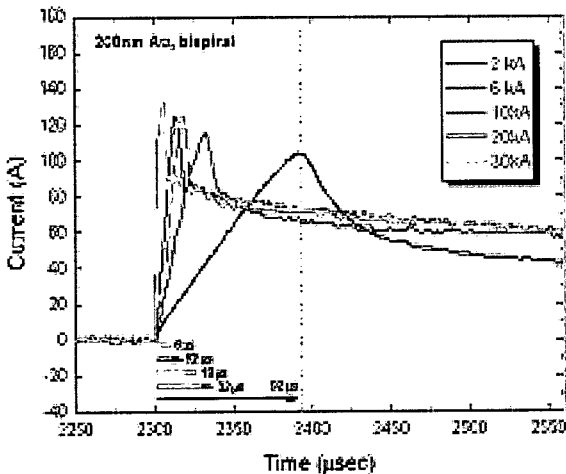


Figure 2. Short circuit test of YBCO device.

그림 1은 4인치 YBCO 박막의 전류 통전 path 형상과 한류동작시 발생하는 버블 패턴을 보여 주고 있다. 박막 전영역에서 골고루 버블이 발생하는 것으로 미루어보아 동시퀘치가 이상적으로 이루어짐을 알 수 있다.

그림 2는 상기 개발된 YBCO 박막형 초전도 한류 소자를 2 kA~30 kA까지의 사고 전류 인가 시 동작 특성을 보여 주고 있으며, 1/2 cycle 이내 한류 동작을 완료하는 우수한 특성을 확인할 수 있다.

III. 14 kV급 단상 초전도 한류모듈 제작

14 kV급 초전도 한류 모듈 개발을 위해서는 우선적으로 600 V급의 절연 내력을 갖는 상기 소자의 직렬 연결이 반드시 필요하다. 초전도 소자의 직렬 연결을 통한 전압 용량 향상의 가장 큰 난제는 소자간 동시 퀘칭 및 전압 배분 문제이다. 이를 해결하기 위해 션트 저항, 션트 코일, 외부 도체 증착, 자기장 인가 등 여러 가지 방식이 제안되고 있다.

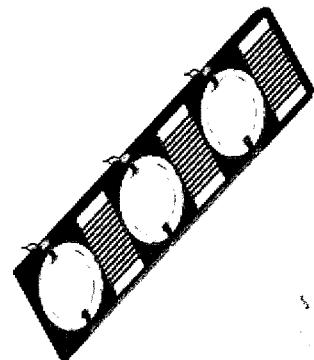
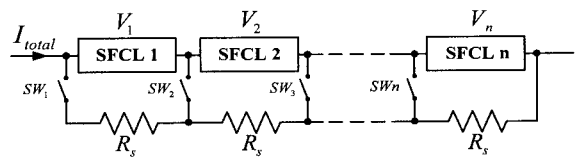


Figure 3. Current limiting modules with YBCO (a) SFCL and shunt resistor connection (b) Configurations of modules.

본 연구에서는 각 소자에 병렬로 동일한 크기의 션트 저항을 취부하는 방식을 개발하여 제작하였다(그림 3 (a)). 동일한 션트 저항의 크기는 YBCO 박막 모듈의 특성을 고려하여 산정되었으며, 션트 저항으로는 Ni/Cr 테이프를 이용하여 23 Ω 의 저항 소자를 제작하였다. 상기 저항 소자는 77 K 사용시 온도에 따른 저항 변화가 없으며 충분한 열 용량을 확보할 수 있도록 설계하였다. 모듈 구성도는 그림 3 (b)에 나타나 있다. 상기 션트 저항을 연결하여 다수의 YBCO 소자를 직렬 연결하여 시험을 실시하였으며, 그 결과 직렬 연결시 동시 켄치 및 전압 분배가 원활히 일어남을 확인하였다.

표 2. 14 kV/100 A급 초전도 한류기 사양.

Ratings.	14 kV/100 A SCFCL
Structure	24 YBCO wafers in series 3 YBCO wafers in parallel Total 72 YBCO wafers
Shunt resistor	Ni/Cr tape, 24 Ω ,
Min. fault current	100 A _{rms}
Limitation time	5 cycles (=80 ms)

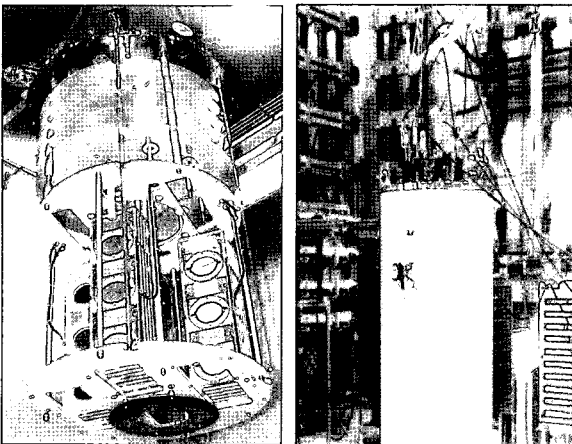


Figure 4. 14 kV/100 A resistive superconducting fault current limiters
(a) Configurations
(b) Ready for test.

표 2는 YBCO 초전도 한류 소자의 직,병렬 연결에 의해 구성된 14 kV/100 A 초전도 한류기의 사양을 나타내고 있다.

그림 4는 최종 제작된 14 kV/100 A급 초전도 한류기의 형상을 보여 주고 있다.

IV. 단락 시험 및 한류 특성 분석

최종 설계 및 제작 완료된 14 kV/100 A급 초전도 한류기를 대상으로 LS산전 PT&T 공인 시험 센터에서 단락 성능 시험을 실시하였다. 시험은 단락 전류 1 kA_{rms}~10 kA_{rms} 영역에서 반복 성능 시험을 실시했고, 최종적으로 10 kA_{rms} 3회 시험을 실시하였다. 시험 회로의 구성도는 그림 5에 표시되어 있으며, 모듈1, 모듈2, 모듈3로 계측 요소를 분리하여 각 모듈간 동시 켄치 여부를 관측하였으며, 전체적인 한류성능을 측정하였다.

단락 전류 10 kA 인가시 각 모듈별 켄치시 발생하는 전압을 측정한 결과는 그림 6에 나타나 있다. 각 모듈의 전압 peak치는 모듈별 거의 일정하게 나타났고 그 값은 6.8 kV_{peak}로 측정되었다.

즉 각 모듈에서 켄치시 초전도가 상전도로 전이시 발생하는 저항이 일정하게 생성되어, 각 모듈이 감당하는 전압도 균일하게 배분되었음을 확인할 수 있다.

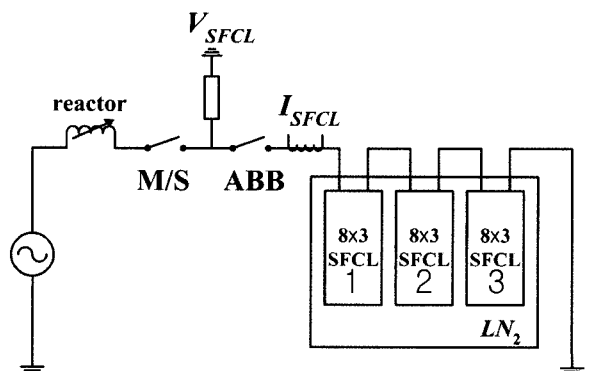


Figure 5. Test circuit for 14 kV/100 A SCFCL.

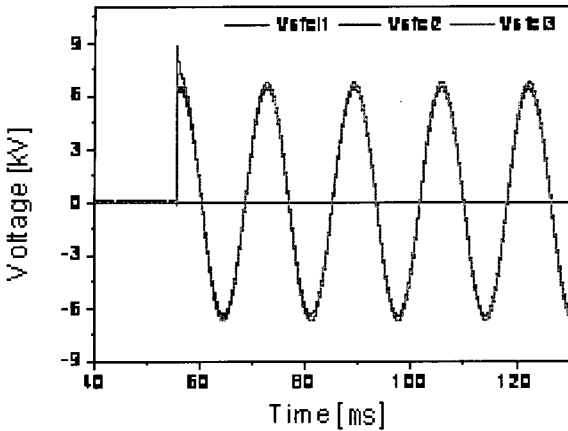


Figure 6. Voltage distribution between modules.

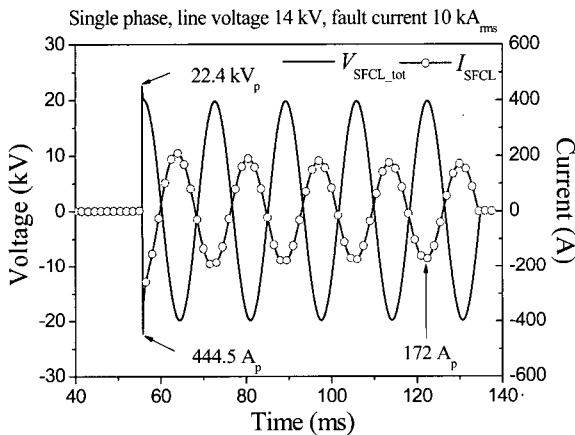


Figure 7. 10kA current limiting test of SCFCL.

그림 7은 14 kV, 10 kA 인가시 초전도 한류기에 의해 제한된 한류 파형을 보여 주고 있다. 초전도 한류기는 단상 14 kV/100 A 정격으로, 10 kA 단락 전류 인가시, 0.1 ms 이내에 한류 동작이 완료되어 한류 동작 개시 시 사고 전류는 최대 500 A 미만으로 계속되었다. 즉 단락 전류의 90% 이상이 효과적으로 제어된 것이다.

그림 8은 각각 2 kA, 6 kA, 10 kA 단락 전류 인가시, 초전도 한류기의 동작 성능을 비교한 것이다. 시험 결과 각각의 단락 전류에 대해 초전도 한류기의 동작 성능은 유사하였으며, 단락 전류 인가치가 클수록 동작 시간은 더 빨라지며, 제한 전류의 peak치는 약간씩 올라가는 경향을 보여 주고 있다.

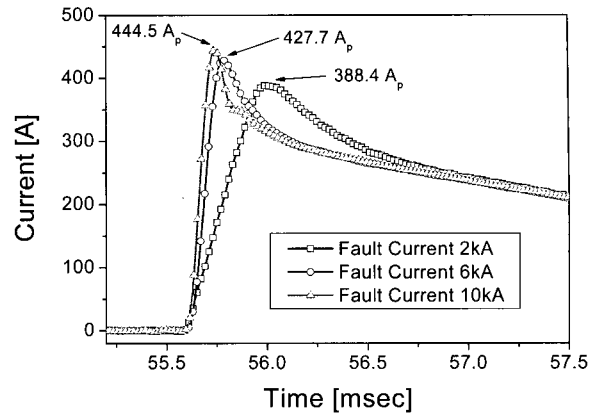


Figure 8. Characteristics of SCFCL according to different fault currents.

이러한 결과는 초전도 한류기의 YBCO 박막의 반응 시간이 단락 전류가 커짐에 따라 더 빨리 반응하여 더 큰 저항을 발생함에 따라 이루어지는 것으로, 초전도 한류기의 특성상 단락 전류의 크기에 상관없이 전체적으로 초전도 한류기가 단락 전류 발생시 감당하는 에너지는 일정하게 유지될 수 있음을 알 수 있다. 즉 이러한 특성으로 말미암아 초전도 한류기는 단락 전류의 크기에 상관없이 계통의 전압, 전류 정격만 맞추어 주면 사용할 수 있는 효과적인 단락 전류 제한기의 역할을 수행할 수 있다는 것을 보여 주는 것이다.

이러한 초전도 한류기가 배전급 및 향후 송전급 계통에 적용된다면, 실제 계통의 단락 전류는 빠른 시간 내에 효과적으로 제한 가능하므로, 기존 노후된 차단기의 교체 주기 증가 및 단락 사고시 인접 선로의 파급 효과 축소, 정전 범위 축소 등 많은 장점을 제공할 것으로 사료된다.

V. 결론

본 논문에서는 4인치 YBCO 박막을 이용하여 직렬 및 병렬 연결을 통하여 구성된 14 kV/100 A급의 초전도 한류기 개발에 관하여 소개하였다. 14 kV급 초전도 한류기는 삼상으로

구성시 우리나라의 24 kV급 배전 계통에 투입될 수 있는 용량을 갖춘 것으로, 향후 변압기 보호용, bus-tie 연결용, 분산 전원 보호용 및 선박 등의 단독 전원 보호용으로 효과적으로 적용될 수 있으리라 예상된다. 초전도 한류기의 실용화를 앞당기기 위해서는 경제성 및 장기 신뢰성 확보, 고압 절연 성능 확보를 위한 지속적 연구가 이루어져야 할 것이다.

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

References

- [1] T. Verhaege et al., "Investigations of HV and EHV superconducting fault current limiters," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.5, No. 2, pp 1063~1066, 1995.
- [2] B. Gromoll et al., "Resistive current limiters with YBCO films," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.7, No. 2, pp 828~831, 1997.
- [3] H. Kubota et al., "A new model of fault current limiter using YBCO thin film," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.9, No. 2, pp 1365~1368, 1999.
- [4] J. W. Sim, H.R. Kim et al., "Fabrication and test of the 3.8 kV resistive SFCL based on YBCO films," Prog. Supercond., Vol.5, No.2, pp 136~140, 2004.
- [5] B. W. Lee, J. S. Kang et al., "Development of new current path pattern of YBCO thin films for superconducting fault current limiters," Prog. Supercond., Vol.6, No.2, pp 113~117, 2005.