

Simultaneous Quench Analysis of a Three-Phase 6.6 kV Resistive SFCL Based on YBCO Thin Films

J. Sim^{*}, H. R. Kim, O. B. Hyun

Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, Korea

Received 16 August 2004

YBCO 박막을 이용한 3상 6.6 kV 저항형 초전도 한류기의 동시퀘치 분석

심정욱*, 김혜림, 현옥배

Abstract

We fabricated a resistive type superconducting fault current limiter (SFCL) of 3-phase 6.6 kV_{rms} rating, based on YBCO thin films grown on sapphire substrates with a diameter of 4 inch. Each element of the SFCL was designed to have the rated voltage of 600 V_{rms}/35 A_{rms}. The elements produced a single phase with 8×6 components connected in series and parallel. In addition, a NiCr shunt resistor of 23 Ω was connected in parallel to each of them for simultaneous quenches between the elements. Prior to investigating the performance of the 3 phase SFCL, we examined the quench characteristics for 8 elements connected in series. For all elements, simultaneous quenches and equal voltage distribution within 10% deviation from the average were obtained. Based on these results, performance of the SFCL for single line-to-ground faults was investigated. The SFCL successfully limited the fault current of 10 kA_{rms} below 816 A_{peak} within 0.12 msec right after the fault occurred. During the quench process, average temperature of all components did not exceed 250 K, and the SFCL was totally safe during the whole operation.

Keywords : YBCO thin film, fault current, SFCL, shunt resistor, simultaneous quench

I. 서론

최근 들어 다양한 종류의 초전도 전력기기 개발이 진행되고 있다. 특히 저항형 초전도 한류기의 경우는 가장 빠른 시기에 실용화가 가능할 것으로 예측되고 있다. 전력기기에서 초전도체의 응용분야는 초전도체의 저항이 0인

점이나 마이스너 효과 등의 일반적인 고유특성을 응용하는 것이 대부분이다. 하지만 초전도 한류기의 경우는 한류기 역할의 특성상 상시에는 전력계통에 없는 듯 존재하다가 사고 발생 시 초전도 한류기의 상전어로 임피던스를 발생시켜 사고전류를 제한하는 역할을 한다. 특히 저항형 초전도 한류기의 경우 무게 및 부피가 작고 시스템이 간단하며 초전도 재료선택의 유연성이 높은 관계로 많은 연구가 진행 중에 있다 [1-3].

*Corresponding author. Tel : +82 42 865 7512
e-mail : jwsim@kepri.re.kr

초전도한류기를 고전압 계통에 적용하기 위해서는 이에 알맞은 전압내력을 가져야 한다. 저항형 초전도 한류기의 전압등급을 높이는 방안으로는 크게 두 가지가 있는데 초전도 한류기를 구성하는 단위소자의 전압등급을 향상시키는 방안과, 이러한 단위소자들을 직렬결선하여 전체 시스템의 전압등급을 높이는 방안으로 구분할 수 있다. 하지만 이 경우 초전도체의 길이가 길어지게 되고 상전이시 이에 따른 동시퀀치의 문제가 심각하게 대두 된다.

본 논문에서는 3상 6.6 kV_{rms} 저항형 초전도 한류기를 제작하여 초전도 한류소자의 직렬결선에 따른 동시퀀치 여부를 확인하였고, 1선 지락시험을 통해 사고발생후 단위소자의 저항을 확인하였다.

II. 단위소자 및 동시퀀치

단위소자

본 논문의 3상 6.6 kV_{rms} 저항형 초전도 한류기의 경우 독일의 THEVA사에서 공급한 4 inch, sapphire/YBCO 300 nm/Au 140 nm 박막을 사용했지만 전압 등급과 안정성 향상을 위한 2차 가공을 하였다. Fig. 1은 3상 6.6 kV_{rms} 저항형 초전도 한류기의 YBCO 단위소자로 2차 가공이 완료된 상태이다. 그림에서 보는 바와 같이 단위소자의 구조는 bi-spiral 형태로 결정하였다. 이는 제한된 면적 내에서 line의 길이를 최대화시켜 전압등급을 높이고 급격한 굽힘으로 인한 전류밀도 집중 현상을 최소화하기 위함이다.

하지만 bi-spiral 형태의 특성상 각 전극 부위에 충분한 절연을 확보할 필요가 있다. 따라서 절연 평가 시험의 결과에 따라 안쪽에는 0.5 mm의 gap을 두고, 전극부위의 바깥쪽은 1 mm의 gap을 두어 충분한 전기절연 능력을 확보하였다.

단위소자의 선폭은 박막의 면적 및 전압 등급을 고려하여 5 mm로 결정하였다. 이 경우 77 K에서 임계전류 $I_c = 48 A$ 혹은 $34 A_{rms}$ 를 갖게 되고, 상온 저항은 평균 46 Ω이 된다. 사고 발생시 초전도 단위소자의 국부적 온도상승이 퀀치 전 과정에 걸쳐 250 K을 넘지 않도록 하는 전압을 정격 기준으로 정하였다 [4].

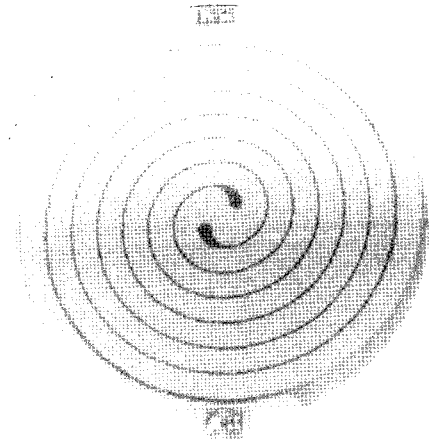


Fig. 1. A current limiting element based on YBCO thin film.

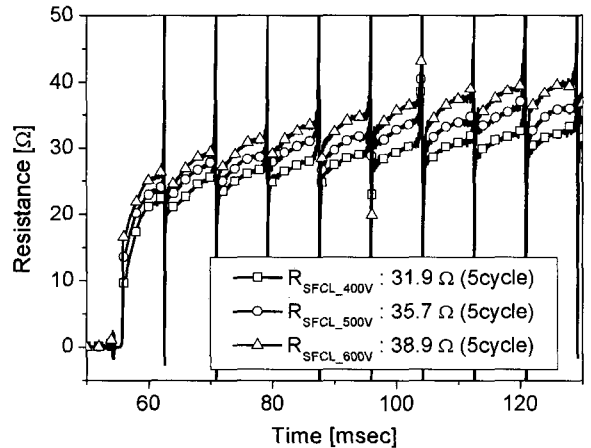


Fig. 2. Resistance increase of an SFCL with applied 400~600 V_{rms}.

Fig. 2는 인가전압에 따른 초전도 박막의 저항곡선이다. 입력전압은 400, 500, 600 V_{rms}이고 주파수는 60 Hz이며, 사고각 0°에서 5 주기를 인가하였다. 여기서 입력전압이 600 V_{rms}인 경우를 보면 5주기 후의 저항은 38.9 Ω으로 상온 저항 46 Ω과 비교해볼 때 박막의 온도가 250 K 이하이므로 600 V_{rms}를 정격전압으로 결정하였다 [4].

동시퀀치

저항형 초전도 한류기의 전압등급을 높이기 위한 직렬 결선은 필수적인 방안이다. 하지만

이로 인하여 직렬 결선되는 초전도 박막들의 동시 켜치가 가장 큰 문제로 대두된다. 특히 YBCO소자의 경우는 켜치속도가 대단히 빠르다. 따라서 YBCO 초전도 박막을 단순 직렬 연결할 경우 초전도 박막 간의 켜치 발생 전류 I_q 의 차이가 매우 작더라도 박막 간의 심한 파워불균형에 의한 켜치 시점의 상이를 가져온다. 따라서 사고 발생시 I_q 가 낮은 초전도 박막이 우선적으로 켜치가 되며, 이로 인한 전류 제한으로 다른 초전도 박막이 켜치 되지 않을 수 있다. 이 경우 먼저 켜치된 박막에 에너지가 집중하게 되고 박막이 소손될 가능성이 커진다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로 직렬 결선된 초전도 박막마다 병렬로 분로저항 (R_s)을 연결하는 방법이 있으며 이를 통해 동시 켜치를 구현하였다. 이 R_s 의 크기는 제조공정의 단순화를 고려하여 동일한 크기로 결정되며 각 소자에 유입되는 에너지가 적절히 분배되는 역할을 해준다 [5].

본 논문에서 제작된 3상 6.6 kV_{rms} 초전도 한류기의 구조는 전압의 여유분을 고려하여 8 개의 초전도 박막을 직렬결선하고, 동시 켜치 구현을 위해서 23 Ω의 R_s 를 각 초전도 박막 소자마다 병렬로 결선된 구조로 되어있다. 이렇게 제작된 8직렬 초전도 한류기는 통전 전류용량을 증가시키기 위해 다시 6 개씩 병렬 결선되어 단상 모듈을 구성하게 된다. 따라서 8 직렬 6 병렬 (8×6) 구조의 단상 모듈을 각 상에 배치하면 3상 초전도 한류기가 된다.

Fig. 3은 3상 6.6 kV_{rms} 저항형 초전도 한류기 중 R상 초전도 모듈의 동시켄치시험을 위한 결선도이다. 그림을 보면 각 단위소자마다 R_s 가 병렬 결선된 것을 알 수 있다. 6개의 8 직렬 한류기는 각 열의 초전도 단위소자에 대해 1 ~ 8까지 번호를 부여하였고, 6개의 열로 이루어진 직렬 한류기는 A ~ F열로 구분을 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 6 개의 8 직렬 초전도 한류기의 한 끝은 공통으로 접합하여 저온용기의 LN₂ 내에 위치하도록 하였다. 또한 각 한류기의 나머지 다른 끝은 개별 직렬 시험을 용이하게 하기위해 저온용기 외부에서 결선할 수 있게 하였다.

이렇게 R_s 까지 고려된 개별 직렬 초전도 한류기의 상온저항은 121.1 ~ 122.3 Ω에 평균

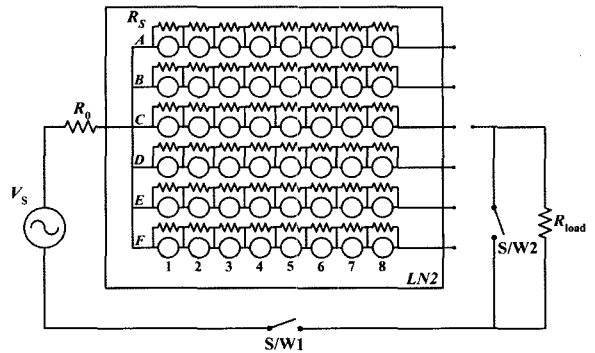


Fig. 3. Electrical circuit for the SFCL, phase R.

121.8 Ω이고 6 병렬로 구성된 전체 단상 초전도 한류기의 상온저항은 20.3 Ω이다. Fig. 3의 R_0 는 사고모의 시 사고 전류의 크기를 제한하기 위한 저항으로 크기는 1 Ω이다. 또한 정상상태의 전류를 가정하기 위해 부하로 R_{load} 를 설치하였다. 여기서 R_{load} 의 크기는 100 Ω이다. 실험방식은 6 개의 8 직렬 초전도 한류기 A ~ F 순으로 각각 결선하여 1.2 kV_{rms}와 4.4 kV_{rms}에서의 각 직렬 초전도 한류기 별 동시켄치 경향을 살펴보는 것이다. 실험은 최초 S/W1이 닫히면 전류의 흐름은 $R_0 \leftrightarrow SFCL \leftrightarrow R_{load}$ 으로 정상상태의 전류가 통전된다. 이후 사고상태를 모의하기 위해 S/W2가 닫히면 $R_0 \leftrightarrow SFCL$ 로 통전되어 단락사고가 발생하게 된다. 각 스위치는 위상제어를 통해 사고각 및 사고주기가 제어된다. 사고주기는 사고가 발생할 경우 차단기의 일반적인 동작시간을 고려하여 5 주기로 정하였다.

Fig. 4는 R상 초전도 한류기 C열에 대하여 입력전압(V_s)이 1.2 kV_{rms}, 사고각 0도, 사고주기 5 주기인 사고실험에서 각 단위소자의 전압이다. 그림에서 나타나듯이 사고 발생순간 8 개의 직렬결선된 단위소자들은 동시에 켜치 되었지만, 첫 반주기의 피크전압이 160 ~ 256.7 V_{peak}에 걸쳐 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig 5는 위 실험에 대해 R상 초전도 한류기의 A~F 열의 첫 반주기 피크값을 나타낸다. 그림에서 보듯이 전체 단위소자에 걸리는 평균피크전압은 212 V_{peak}인데 비해 전체적으로 전압분포가 고르지 못함을 알 수 있고, 심지어 켜치가 안되는 소자들도 볼 수 있다. 입력전압이 한류기의 전압용량에 비해 매우 낮아 한류소자들로

동시퀀치시키는데 충분한 에너지가 공급되지 않기 때문으로 보인다. 따라서 일부소자들이 퀀치가 안되기도 하고 각 단위소자들의 전압분배도 균등하지 못함을 알 수 있다. 그럼에도 모든 소자의 전압은 정격전압 이하로서 한류동작에는 아무 문제가 없다.

Fig. 6은 동일한 실험조건에 V_S 가 4.4 kV_{rms}인 경우 C열의 각 단위소자의 전압이다. 그림에서 보듯이 8개의 단위소자들이 동시퀀치가 되었고 첫 피크전압 역시 724~821 V_{peak}로 고르게 분포되어 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 7의 단위소자별 첫 반주기 전압피크를 보더라도 전체 단위소자의 평균전압 758 V_{peak}에 대해 최대 10% 이내에 분포하고 있어 매우 고른 양상을 나타내고 있다. 이는 입력전압이 한류기의 용량에

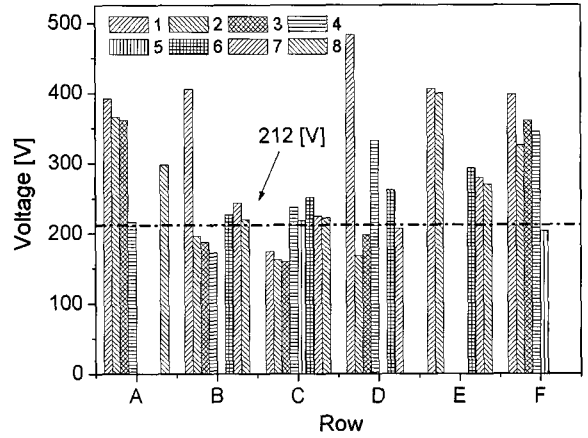


Fig. 5. Comparison of V_{peak} s at the first half cycle for the phase R (input voltage : 1.2 kV_{rms}).

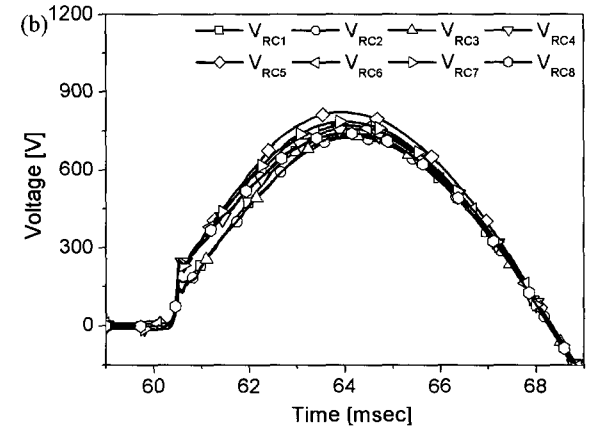
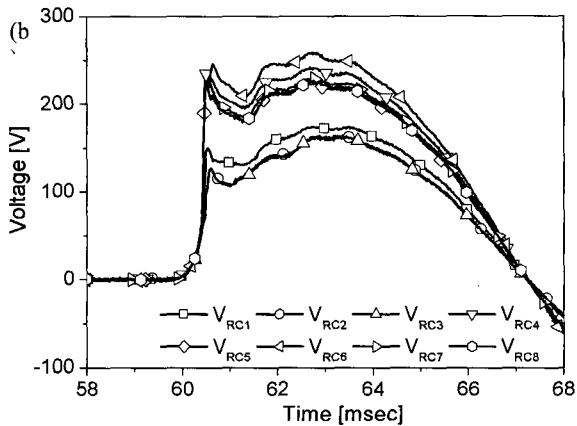
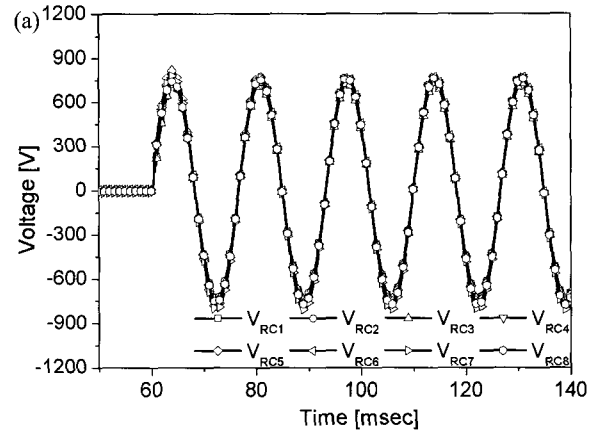
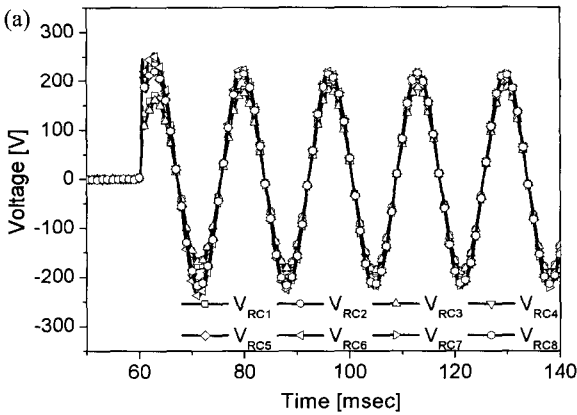


Fig. 4. Voltage properties of the row RC composed of 8 elements connected in series (phase R, row C, input voltage : 1.2 kV_{rms}).

Fig. 6. Voltage properties of SFLC composed of 8 elements connected in series (phase R, row C, input voltage : 4.4 kV_{rms}).

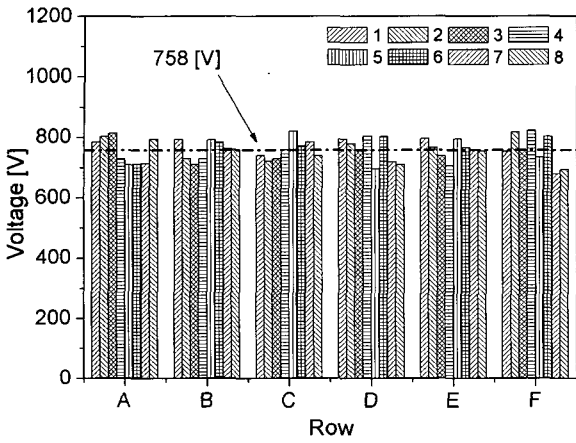


Fig. 7. Comparison of V_{peak} s at the first half cycle for the phase R (input voltage : 4.4 kV_{rms}).

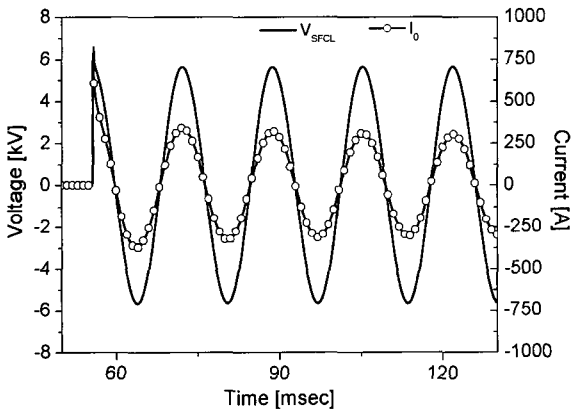


Fig. 8. Voltage and current variation when single line-to-ground faults occur (fault current : 10 kA_{rms}).

맞게 되어 충분한 에너지가 공급되기 때문이고 R_S 를 통해 단위소자별 에너지가 고르게 분배되기 때문이다.

Fig. 8은 3상 6.6 kV_{rms} 저항형 초전도 한류기의 1선 지락 시험결과이다. 이 때 사고가 발생하는 상은 R상이며, 사고각은 90°, 사고주기는 5 주기, 그리고 발생하는 사고전류의 크기는 10 kA_{rms}이다. 1선 지락사고인 관계로 사고 발생 시 초전도 한류기 양단에 걸리는 전압은 상전압인 3.8 kV_{rms}가 된다. 그림을 보면 사고발생시 한류기 양단에는 5.4 kV_{peak}로 상전압인 3.8 kV_{rms}가 인가되었음을 알 수 있다. 이 때의 사고전류는 사고발생 직후 0.12 msec만에 816 A_{peak} 수준으로 한류하였고 5 주기 후 303 A_{peak}

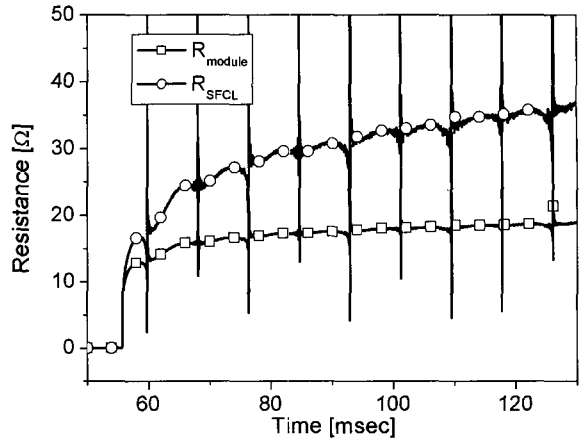


Fig. 9. Resistance increase of the SFCL module and element due to a single line-to-ground fault.

수준으로 유지되었다.

Fig. 9는 Fig. 8의 1선 지락시의 R상 초전도 한류기와 단위소자의 저항이다. 여기서 R_{module} 은 R상 초전도 한류기의 저항이고 R_{SFCL} 은 R_{module} 에서 계산한 단위소자의 저항이다. 제작된 초전도 한류기의 경우 내부의 결선이 8×6 형태의 직병렬로 구성되어있고 소자의 수가 많은 관계로 각 단위소자의 상황을 알 수 없다. 하지만 Fig. 7의 결과를 비춰볼 때 모든 소자가 동시철편치가 되고 전압이 균등하게 분포되었다고 가정을 하면 단위소자의 저항 변화를 유추할 수 있다. 따라서 8×6으로 구성된 초전도 한류기의 단위소자와 각 단위소자와 병렬로 결선된 23 Ω의 R_S 를 이용하여 단위소자의 5 주기후 저항 R_{SFCL} 을 계산하면 35.5 Ω이다. Fig. 9를 보면 단위소자의 상온저항은 평균 46 Ω인데 비해 1선 지락사고의 5주기후 저항 R_{SFCL} 을 보면 35.5 Ω으로 초전도 박막의 온도는 아직 상온 이하임을 알 수 있다. 사고 발생 후 단상 초전도 한류기에 걸리는 전압이 3.8 kV_{rms}이므로 전압이 균등하게 분배되었다면 각 단위소자에는 475 V_{rms}가 인가된다. 따라서 Fig. 2의 입력전압 400 V_{rms}와 500 V_{rms}의 단위소자 저항곡선과 비교해 볼 때 결과가 거의 일치 한다고 볼 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 3상 6.6 kV_{rms} 저항형 초전도

한류기 시험에 앞서서 한류기의 동시퀀치를 평가하였다. 한류기 제작에 사용된 YBCO박막은 2차 가공을 통해 정격전압은 600 V_{rms}, 과전압 내력은 1.2 kV_{rms}로 제작하였다. 아울러 동일 선트저항 방식으로 각 단위소자마다 23 Ω의 R_S를 설치하여 초전도 한류기의 동시퀀치를 유도하였다. 8×6 구조의 단상 초전도 모듈을 평가하기 위해 각 8개의 단위소자로 구성된 개별 직렬 결선의 동시퀀치 및 균등전압 분배를 확인하였다. 실험 결과 입력전압 4.4 kV_{rms}에서 동시퀀치되었고 전압분배의 차이가 10 %이내로 단위소자 마다 균등하게 분배됨을 확인하였다. 이를 바탕으로 사고전류 10 kA의 1선 지락시험을 통해 사고전류를 0.12 msec만에 816 A_{peak}이하로 한류함을 확인하였으며, 단위소자의 온도가 250 K이하임을 확인하여 초전도 한류기의 안정성을 입증하였다.

Acknowledgments

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

References

- [1] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt et al., "Resistive fault current limiters with YBCO films-100kV functional model", *IEEE Trans, Appl. Supercond.*, 9, 656-659 (1999).
- [2] J. Noudem, J. M. Barbut, O. Belmont et al., "Current limitation at 1080 A under 1100 V with bulk Bi-2223", *IEEE Trans, Appl. Supercond.*, 9, 664-667 (1999).
- [3] S. Elschner, F. Breuer, M. Noe et al., "Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter", *IEEE Trans, Appl. Supercond.*, 13, 1980-1983 (2003).
- [4] 최효상, 김혜림, 현옥배, "YBCO 박막을 이용한 초전도 한류기의 안정적인 동작조건", *전기학회 논문지*, 49B, 9, 584-590 (2000).
- [5] O. B. Hyun, S. D. Cha, H. R. Kim et al., "Shunt-Assisted Simultaneous Quenches in Series-Connected Resistive SFCL Components", *IEEE Trans, Appl. Supercond.*, 13, 2060-2063 (2000).