

송·배전급 저항형 초전도 한류기 설계 요소 검출을 위한 고온 초전도 선재의 특성 연구

Experimental Study on the High Temperature Superconductor for Investigated Design Factors of Distribution and Transmission Level Resistive Type Superconductor Fault Current Limiter

나진배¹, 장재영¹, 조현철¹, 황영진¹, 고태국^{2*}

Jin Bae Na¹, Jae Young Jang¹, Hyoun Chul Jo¹, Young Jin Hwang¹, Tae Kuk Ko^{2*}

Abstract: The power demand is steadily increasing due to rapidly develop of industrial field. The ratio of prospected increment of power consumption is over 2.2 % per year from 2007 to 2020 year. The superconducting fault current limiters(SFCLs) should be suggested to be one of promising machines to protect power grid. Four basis tests such as resistivity, short-circuit tests, ac losses and recovery time were investigated according to various reached maximum temperature, operating temperature. This paper deals with investigation of the various commercial high temperature superconductor for applying resistive type SFCLs.

Key Words: AC losses, high temperature superconductor, recovery time, short-circuit test

1. 서 론

고온 초전도 선재를 이용한 초전도 한류기는 전력 계통의 용량 증가에 따른 고장전류 발생 시, 제한 대책으로 적용 가능한 전력기기로 예상되고 있다. 따라서 전 세계적으로 많은 연구 기관에서 송·배전급 초전도 한류기의 개발을 위해서 많은 연구를 활발하게 진행하고 있다. 미국의 경우 송전급 한류기의 개발과 실제 전력계통 적용 측면에서 전 세계적으로 앞서 나가고 있는 추세이며, American Superconductor Corporation (AMSC), Zenergy Power와 SuperPower 등을 중심으로 컨소시엄이 구성되어 초전도 한류기 기술 개발을 진행하고 있다. 특히 SuperPower사의 컨소시엄에서는 138kV/1.2kA급 저항형 초전도 한류기 모듈 개발을 위한 과제를 수행 중에 있다. 중국의 경우는 Innopower사에서 2002년 자기포화형 초전도 한류기 개발을 시작으로 2007년 35kV/1.5kA급 자기포화형 초전도 한류기를 제작하여 운남성의 Puji 변전소에서 운전 중에 있다[1].

현재 전 세계적으로 개발하고 있는 초전도 한류기의

경우는 모두 2세대 고온 초전도 선재를 이용하여 개발하고 있다. Coated conductor(CC)라 불리는 2세대고온 초전도 선재는 저온 초전도 선재와 비교하여 교류 손실 및 외부 자장에 의한 임계전류 감쇄율 등의 우수한 특성을 보여주고 있다. 따라서 송·배전급 초전도 한류기 개발에 있어서 많은 이점을 가지고 있다. 본 논문은 현재 상업화된 다양한 고온 초전도 선재의 특성을 파악하여 송·배전급 저항형 초전도 한류기 설계 요소를 제공하고자 한다.

2. 고온 초전도 선재의 기초 특성 연구 소개

2.1. 동작 온도에 따른 비저항 특성 연구

저항형 초전도 한류기는 전력계통에서 고장전류 발생 시, 초전도 선재의 퀘칭로 인하여 발생하는 저항 성분을 이용하여 고장전류의 컷오프부터 제한한다. 따라서 저항형 초전도 한류기의 설계 시, 초전도 선재의 온도별 비저항 특성은 중요한 설계 요소가 된다. 그림 1은 초전도 선재의 비저항을 측정하기 위한 cryo-cooler system(CCS)을 보여주고 있다. 고온 초전도 선재의 경우는 여러 층의 레이어 구조로 되어 있어서 퀘칭 시 각 층의 온도별 저항을 직접적으로 측정하기가 어렵다. 따라서 CCS실험을 통하여 역으로 각 온도별 비저항을 측정하였다. 해당 실험을 통해서 산출된 결과를 토대로 초전도 선재의 단락 실험 시, 최대 도달 온도를 계산 할 수 있다.

2.2. 단위 길이 당 허용 인가 전압 특성 연구

저항형 초전도 한류기 개발 시, 송·배전급 전력계통

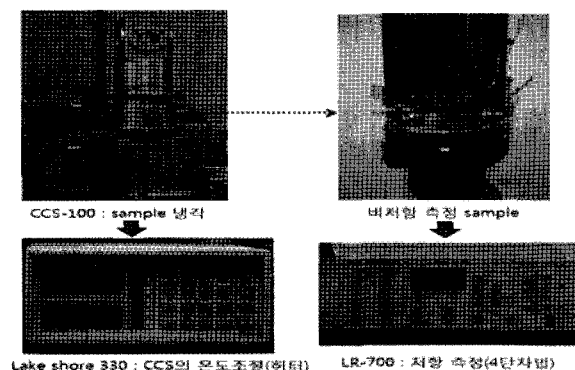


Fig. 1. Measurement of resistivity according to various temperature.

¹학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학과 박사과정

²정 회원 : 연세대 전기전자공학과 교수

*교신저자 : tkko@yonsei.ac.kr

원고접수 : 2011년 08월 31일

심사완료 : 2011년 09월 24일

게재확정 : 2011년 09월 26일

에서 요구하는 전압 용량에 맞게 설계가 이루어져야 한다. 따라서 최대 도달 온도를 결정하고 단락 실험을 통해서 초전도 선재의 단위 길이 당 인가 허용 전압을 산출 할 수 있다. 초전도 선재의 단위 길이 당 허용 인가 전압을 계산하기 위해서 식(1)을 이용하였다[2].

$$E = \frac{V_s}{\ell} = \sqrt{\frac{C_v(T) \cdot \rho(T) \cdot \Delta T}{\Delta t}} \quad (\text{V/m}) \quad (1)$$

$E(\text{V/m})$ 는 한류기의 단위 길이 당 인가 전압 이며, $\rho(\Omega/\text{cm})$ 는 안정화재의 비저항이다. 일반적으로 고장전류 통전 시간 (Δt)은 차단기가 동작하기 전 0.1초를 최대로 고정할 수 있으며, C_v 와 ρ 는 안정화재에 사용되는 물질의 고유 물성치값을 해상한다. 따라서 식(1)에서 최대도달 온도가 결정된다면 ΔT 를 계산할 수 있으며, 최종적으로 단위 길이 당 인가 허용 전압의 크기를 계산할 수 있다. 또한 최대 도달 온도가 증가 하면 E 값의 크기도 증가시킬 수 있다. 해당 결과를 통해서 저항형 초전도 한류기 설계 시, 초전도 선재의 단위 길이 당 허용 전압을 계산하면 특정 전압 용량에서 필요한 초전도 선재의 직렬 길이를 산출 할 수 있다. 따라서 단위 길이 당 허용 인가 전압의 크기가 클 수록 설계 시 필요한 초전도 선재의 소요량을 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 해석 및 실험적 접근을 통해서 각 선재별 허용 인가 전압을 산출 하였다.

2.3. 초전도 선재의 교류 손실 특성 연구

초전도 한류기, 변압기와 케이블과 같은 전력기기는 교류의 전력계통에서 상시 연결되어 운용되어야 하는 운전 특성으로 인해 초전도 선재는 계통에서 60[Hz]의 상용 주파수를 가지는 교류전류에 상시 노출되게 된다. 초전도 선재에 교류 전류가 통전 시, 교류손실이라는 열적 부하가 발생하게 된다. 해당 손실로 인하여 추가적인 냉각장치가 필요하게 되어서, 초전도 전력기기의 운용비용 증가에 큰 영향을 준다 [3]. 따라서 초전도 한류기의 설계 시 상용 주파수를 갖는 정상 전류에 의한 교류손실 특성이 고려되어야 한다. 각 초전도 선재별 정상 시, 교류손실을 측정하기 위하여 통전법을 이용하였다. 그림 2과 같은 회로를 구성하여 초전도 시편에 교류 전류를 통전시켜, 이때 발생하는 전압을 측정하여 유효전력을 산출하는 방법이다.

2.4. 초전도 선재의 회복 특성 연구

저항형 초전도 한류기는 전력계통에 투입하여 운전 중, 고장전류를 경험하게 되면 초전도 선재에서 켄치가 발생하면 임피던스가 발생하면서 온도가 급격히 상승한다. 따라서 송·배전 전력계통의 재폐로 조건을 충족시키기 위해서는 초전도 선재가 가능한 빠르게 초전도 상태로 회복되어야 한다. 본 연구에서는 단락 실험 후, 각 초전도 선재별 최대 도달 온도에 따른 회복 시간을 측정하였다.

초전도 선재의 회복 특성을 측정하기 위해서는 그림 3과 같은 회로도들을 구성하고 아래와 같은 순서로 진행 하였다.

- 가. S1은 closed, S2는 open 상태에서 정상전류 통전 나. S1은 closed, S2는 closed 고장전류 발생 (고장 주기 : 6주기)
- 다. 6주기의 고장전류 통전 후, S1을 open하여 회로도 open
- 라. S1 open 일정 시간 후, S1 closed하고 S2는 open 하여 정상전류 통전시키면서 한류기의 전압 발생 여부 점검하여 회복 여부 판단

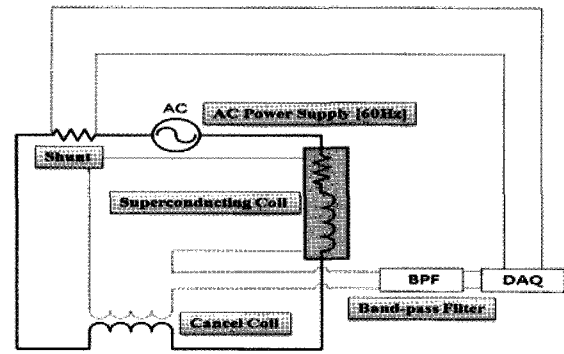


Fig. 2. Schematic diagram of measurement of ac losses using electrical method.

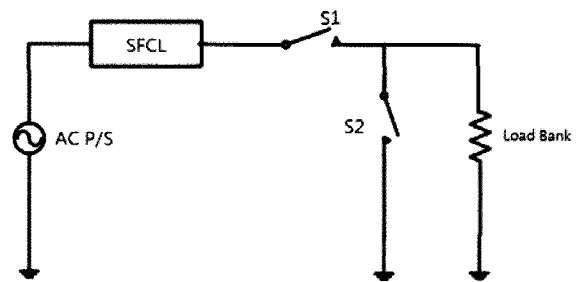


Fig. 3. Circuit diagram of short-circuit test for measured recovery time.

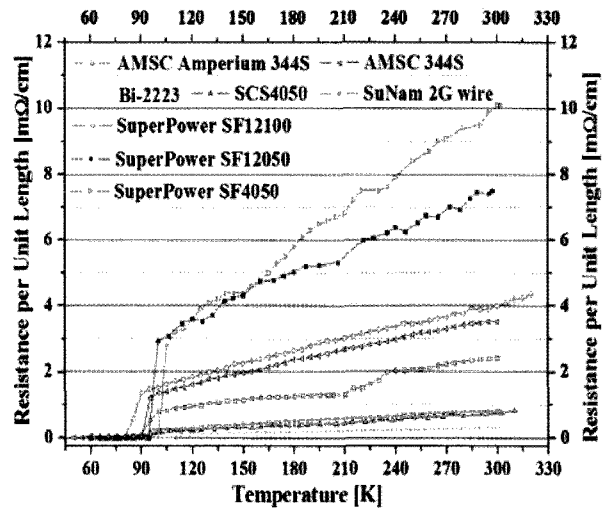


Fig. 4. Test results for measurement of resistivity according to various operating temperature.

3. 초전도 선재의 특성 실험 결과

3.1. 동작 온도에 따른 비저항 특성 연구 결과

그림 4는 고온 초전도 선재별 온도별 비저항을 실험한 결과이다. 해당 결과를 통해서 안정화층이 없는 SuperPower사의 Stabilizer Free(SF) 계열의 고온 초전도 선재의 비저항이 가장 큰 것으로 나타났다.

3.2. 단위 길이 당 허용 인가 전압 특성 연구 결과

그림 5는 초전도선재별 단위 길이당 허용 인가 전압의 해석 및 측정 결과를 보여주고 있다. 결과를 살펴 보면 AMSC사의 344S 선재의 단위 길이 당 허용 인가

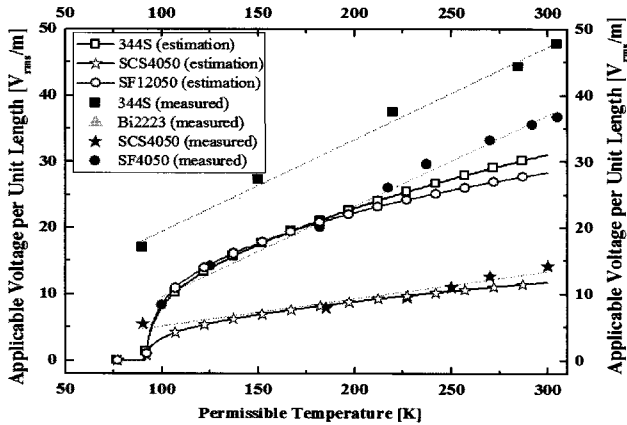


Fig. 5. Test results for measurement of applicable voltage per unit length according to various reached maximum temperature.

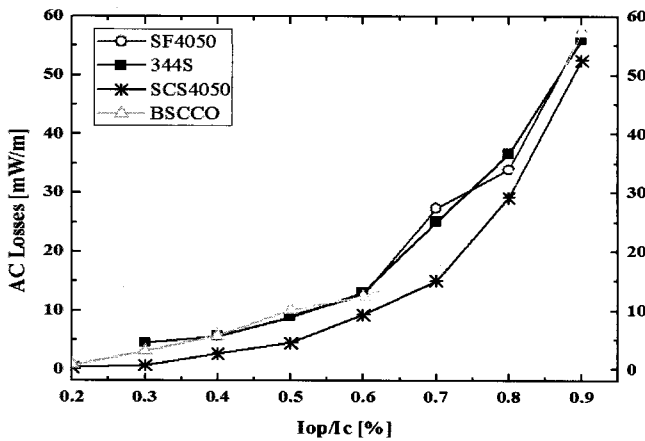


Fig. 6. Test results of measured ac losses.

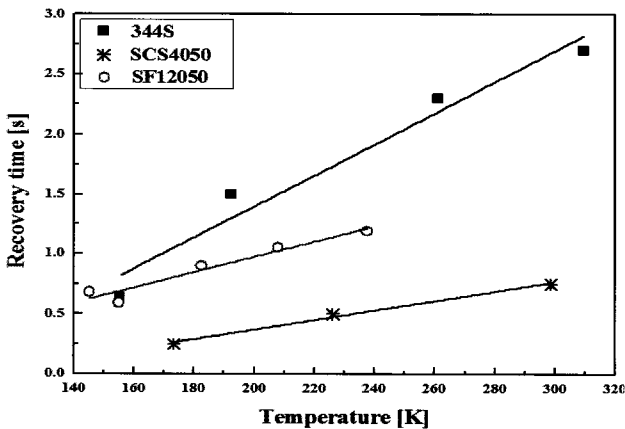


Fig. 7. Test results for measured recovery time according to various reached maximum temperature.

전압 값이 가장 크며, SuperPower의 SCS4050 선재가 가장 작은 것으로 해석 및 측정 되었다[4]. 상위에서도 출된 결과는 유한요소법 [Finite Element Method] 해석과 실험을 비교 분석한 결과이다.

3.3. 고온 초전도 선재별 교류손실 특성 연구 결과

그림 6는 초전도선재별 정상 시 교류손실 측정 결과를 보여주고 있다. 실험 결과를 통해서 초전도 선재의

단위 길이 당 교류손실은 SuperPower사의 SCS4050 선재가 가장 작은 반면, AMSC사의 344S 선재가 가장 크게 나타나고 있다. 하지만 동일한 용량의 초전도 한류기 제작 시 AMSC사의 344S가 단위 길이 당 인가 허용 전압의 크기가 SuperPower사의 SCS4050에 비해서 우수한 특성이 보이므로 장선의 초전도 선재가 적용되는 저항형 초전도 한류기의 경우는 총 교류손실 측면에서는 344S 선재가 유리할 것으로 판단된다.

3.4. 고온 초전도 선재별 회복 특성 연구 결과

단락 실험을 통해서 고장전류를 6주기 동안 초전도 선재에 통전 후, 초전도 선재의 최대 도달 온도에 따른 선재별 회복시간을 측정된 결과를 그림 6에서 보여 주고 있다. 해당 실험을 통해서 측정된 고온 초전도 선재별 회복시간은 344S, SF12050, SCS4050 순으로 빠르게 나타나고 있으며, 결과적으로 회복 특성 측면에서는 SCS4050 선재가 한류기 적용을 위한 선재로서 적합하다.

3.5. 고온 초전도 선재별 특성 연구 정리

비저항이 큰 AMSC사의 344S와 SuperPower사의 SF계열의 선재의 경우는 선재 소모량이 줄일 수 있어 저항형 초전도 한류기 제작 시 경제적인 부담을 줄일 수 있다. 또한 높은 비저항 특성을 이용하여 고장전류 발생 시 컷오프부터 효율적으로 제한이 가능하다.

회복 속도의 관점에서 각 고온 초전도 선재의 특성을 비교해 보면 SF 계열의 선재가 344S보다 더 빨리 회복되는 것을 볼 수 있다.

교류 손실의 경우는 344S가 SF계열의 선재보다는 크지만, 동일 전압용량의 저항형 초전도 한류기 제작 시 각 선재별 총 소요량의 차이를 고려한다면 총 교류손실량은 344S가 더 작을 것이다. 또한 344S는 SUS 안정화재를 사용하여 퀘치 시 고장전류를 바이패스 시켜서 초전도층을 보호 할 수 있어서 안정성이 보장되며 SUS로 인하여 기계적 강도도 증가 시킨다. 따라서 회복속도는 무유도 솔레노이드 권선 방법을 적용하면 빠른 회복 특성을 보여줌으로 기계적과 열적인 안정성과 교류 손실 측면이 더욱 중요한 설계 요소라고 할 수 있다. 최종적으로 전체 결과를 표1과 같이 정리하였다. 송·배전급 저항형 초전도 한류기의 경우 344S가 적용 가능한 고온 초전도 선재로 예상된다.

Table 1. Summary of tests result for each HTS wire.

HTS wires	SCS4050	SF series	344S
고장 전류 제한	나쁨	매우 좋음	좋음
상전이 특성 (S-N ransition)	빠름	빠름	빠름
단위 길이 당 허용 인가 전압	낮음	높음	매우 높음
회복 특성 (단일선재)	매우 빠름	빠름	느림
교류 손실	매우 낮음	높음	매우 높음
낮은 고장 전류에서 선재 파손 여부	낮음	매우 높음	낮음
기계적 강도	사용 가능	매우 약함 취급주의 요망	매우 강함

4. 결 론

실험 결과를 통해서 상용화된 다양한 초전도 선재의 특성 연구를 진행하였다. 총 4가지 특성 실험을 통해서, 각 초전도 선재별 장·단점이 존재하는 것을 파악하였다. 해당 결과를 통해서 송·배전급 저항형 초전도 한류기의 경우는 AMSC사의 344S와 SuperPower사 SF 계열의 선재가 적용 가능한 것을 파악했다. 하지만 송·배전급 저항형 초전도 한류기의 경우는 다량의 초전도 선재가 필요하고, 추가적으로 해당 초전도선재의 높은 기계적 강도와 열적 우수성을 요구한다. 따라서 안정화층이 있는 AMSC사의 344S가 초전도 코일 권선 시 SuperPower사의 SF계열의 선재보다 안정적인 것으로 예상된다.

추가 연구로는 과냉의 냉각 조건에서 각 고온 초전도 선재별 안정화 여부를 점검하는 실험과 해석이 필요하다. 또한 초전도 코일의 권선법에 따른 선재별 특성 실험이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국채 연구 사업임(No. 2011 - 0018747)

참 고 문 헌

- [1] S.Eckroad, "Superconducting Fault Current Limiters", EPRI Report, 2009
- [2] M. C. Ahn, D. K. Park, S. E. Yang, M. J. Kim, H. Kang, K. Nam, B.-Y. Seok, J.-W. Park, and T. K. Ko, 'A study on the design of the stabilizer of CC for Applying to SFCL', IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 17, No. 2, pp. 1855-1858, 2007
- [3] Kazuhiro KAJIKAWA, 'The Basics of AC Losses in Superconductors', Journal of the Cryogenic Society of Japan, Vol. xx, No. xx, pp. xxx, 2009
- [4] D. K. Park, S. E. Yang, Y. J. Kim, K. S. Chang, T. K. Ko, M. C. Ahn, Y. S. Yoon, 'Experimental and Numerical Analysis of High Resistive Coated Conductor for Conceptual Design of Fault Current Limiter", Fourth Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics, vol 49, No. 6, pp. 249-253, 2009



장재영(張宰榮)

1982년 11월 8일생, 2007년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



조현철(趙賢哲)

1979년 11월 30일생, 2007년 동국대 공대 전기공학과 졸업, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



황영진(黃英珍)

1980년 3월 31일생, 2007년 연세대 공대 전기전자공학부 졸업, 2010년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(M.Sc), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph.D). 1986년~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 2008년~2010년 한국초전도·저온공학회 회장, 현재 한국초전도·저온공학회 명예회장, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수.

저 자 소 개



나진배(羅鎭培)

1976년 09월 19일생, 2008년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2008년 동 대학원 전기전자공학과 입학(공학박사과정)