

저항형 초전도 한류기 적용을 위한 다양한 고온 초전도 선재의 특성 연구

나진배\*, 장재영\*, 황영진\*, 강형구\*\*, 고태국\*  
 연세대학교\*, 국립충주대학교\*\*

Study on the High Temperature Superconductor for applying resistive Superconducting Fault Current Limiter

Jin Bae Na\*, Jae Young Jang\*, Young Jin Hwang\*, Hyoungku Kang\*\*, Tae Kuk Ko\*  
 Yonsei University\*, Chungju National University\*\*

**Abstract** - 급격한 산업 발전으로 전력계통의 수요 증가가 꾸준히 증가하고 있으며, 2007년부터 2020년까지 매년 2.2%씩 증가할 것으로 예상된다. 전력계통의 증대로 고장전류의 크기도 더불어 증가하고 있으며 이는 기존의 차단기의 부하 용량을 넘어서고 있다. 따라서 안정적이고 효율적인 고장전류 차단을 위해서 초전도 한류기의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구는 다양한 초전도 한류기 중에서 순수 저항형 초전도 한류기의 적용 가능한 2세대 고온 초전도 선재들의 특성을 파악하였다. 현재 상용화가 이루어지고 있는 2세대 고온 초전도 선재의 동작 온도에 따른 온도별 비저항, 임계전류, 교류 손실과 단위 길이당 인가 허용 전기장장을 측정하였다. 상위 과정을 통해서 측정된 각 선재별 특성을 바탕으로 초전도 저항형 한류기에 적용 가능한 선재를 제안하고자 한다.

이패스 되면서 안정화층의 비저항 등으로 인해 고장전류가 제한되는 특성을 갖는다. 따라서 저항형 초전도 한류기 설계 시, 초전도선재의 비저항 특성은 중요한 설계요소가 된다. 따라서 해당 요소를 확보하기 위해 본 연구에서는 초전도선재의 온도별 비저항을 실험을 통해서 비교 및 분석하였다.

1. 서 론

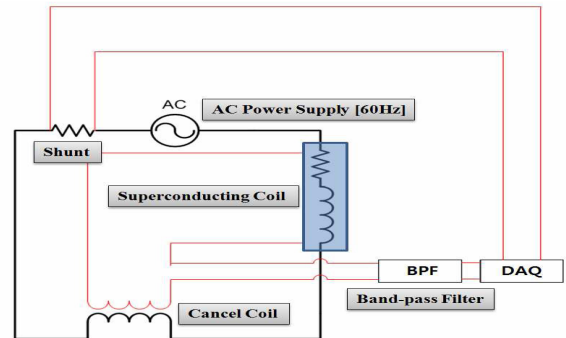
고온초전도선재를 이용한 초전도 한류기는 계통용량 증가에 따른 전력계통에서 고장전류 발생 시 대책으로 적합한 것으로 인정받고 있다. 따라서 전 세계적의 많은 연구 기관에서 송배전급 초전도 한류기를 개발하고자 많은 연구가 활발하게 진행되고 있다.

미국의 경우 송전급 한류기의 개발과 실제 전력계통 적용 측면에서 전 세계적으로 앞서 나가고 있는 추세이며, AMSC, Zenergy Power와 SuperPower 등을 중심으로 컨소시엄이 구성되어 초전도 한류기 기술 개발을 진행하고 있다. 특히 SuperPower 컨소시엄에서는 138kV/1.2kA급 저항형 초전도 한류기 모듈 개발을 위한 과제를 수행 중에 있다. 중국의 경우는 Innopower에서 2002년 자기포화형 초전도 한류기 개발을 시작으로 2007년 35kV/1.5kA급 자기포화형 초전도 한류기를 제작하여 운남성의 Puji 변전소에 운전 중에 있다 [1].

현재 전 세계적으로 개발하고 있는 초전도 한류기의 경우는 모두 2세대 고온초전도선재를 이용하여 개발하고 있다. Coated conductor(CC)라고 불리는 2세대 고온초전도선재는 1세대 초전도 선재와 비교하여 교류손실 및 외부 자장에 의한 임계전류 감쇄율 등의 특성이 우수하기 때문에 해당 선재를 적용한 송배전급 한류기 개발에 있어 많은 이점을 가지고 있다. 따라서 현재 상용화되어 판매되고 있는 2세대 고온초전도선재의 특성을 파악하여 저항형 초전도 한류기에 적용 가능성을 점검해보자 한다.

2.3 초전도선재의 교류손실 특성 연구

초전도 한류기는 교류의 전력계통에 상시 연결되어 운용되어야 하는 기능적 특성으로 인해 초전도선재가 사용 주파수의 교류전류에 상시 노출되게 된다. 초전도 선재에 교류 전류가 흐를 경우 교류손실이라는 열적 부하가 발생하게 된다. 해당 손실은 추가적인 초전도 냉각장치가 필요하게 되어서, 초전도 한류기의 운용비용에 큰 영향을 미치게 된다 [3]. 따라서 초전도 한류기의 설계 시 상용 주파수를 갖는 정상 전류에 의한 교류손실 특성이 고려되어야 한다. 초전도선재별 정상 시 교류손실을 측정하기 위해 통전법을 이용하였다. 그림1과 같이 통전법은 초전도 시편에 교류전류를 통전시켜, 이때 발생하는 전압을 측정하여 유효전력을 산출하는 방법이다.



<그림 1> 통전법을 통한 교류손실 측정 방법

2. 초전도선재의 기초 특성 연구 소개

2.1 단위 길이 당 허용 인가 전압 특성 연구

저항형 초전도 한류기의 경우, 송배전급 전력계통에 적용하기 위해서는 계통에서 요구하는 전압 용량에 맞게 설계가 이루어져야 한다. 따라서 다양한 초전도 선재의 단위 길이 당 허용 인가전압 특성을 분석해야 한다. 최종적으로 단위 길이 당 허용 전압을 구하기 위해서 식 (1)을 도출하였다 [2]

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

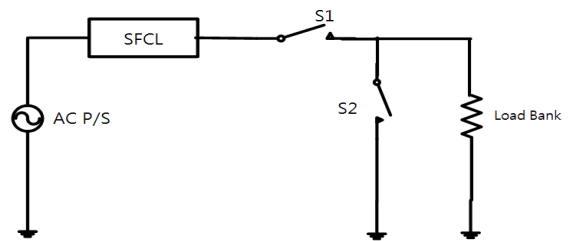
저항형 초전도 한류기 설계 시, 초전도 선재의 단위 길이 당 허용 전압을 계산하면 특정 전압 용량에서 필요한 선재의 길이를 산출할 수 있으며, 해당 전압값이 클수록 용량을 건디기 위해 필요한 선재의 소요량은 감소한다. 본 연구에서는 해석 및 실험적 접근을 통하여 각 선재별 허용 인가 전압을 산출하였으며, 이를 통해 각 초전도선재별 소요 길이를 예측할 수 있는 데이터를 산출하였다.

2.2 동작 온도에 따른 비저항 특성 연구

저항형 초전도 한류기는 전력계통의 고장전류가 유입될 경우 초전도 선재의 퀘치가 발생하여, 고장전류가 초전도선재의 안정화층 등으로 바

2.4 초전도선재별 회복 특성 연구

저항형 초전도 한류기는 전력계통에 투입하여 운전 중, 고장전류에 의한 퀘치가 발생할 경우 초전도선재의 온도가 급격히 상승하여 초전도성을 잃어버리게 된다. 따라서 송배전 전력계통의 체제로 조건을 충족시키기 위해서는 가능한 빨리 초전도 선재가 초전도 상태로 회복되어야 한다. 본 연구에서는 이를 위해 초전도선재별 회복 특성을 비교 및 분석하였다.



<그림 2> 회복 시간 측정을 위한 단락 회로도

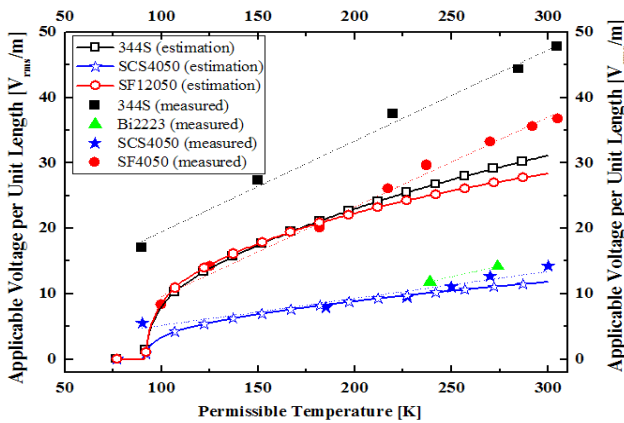
초전도선재의 회복 특성을 측정하기 위해서는 그림 2과 같은 회로도를 구성하여 특성 실험을 아래와 같은 순서와 같이 진행하였다.

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 open하여 정상전류 통전시키면서 SFCL의 전압 발생 여부 점검하여 회복 여부 판단

### 3. 초전도선재의 특성 실험 결과

#### 3.1 단위 길이 당 허용 인가 전압 특성 연구 결과

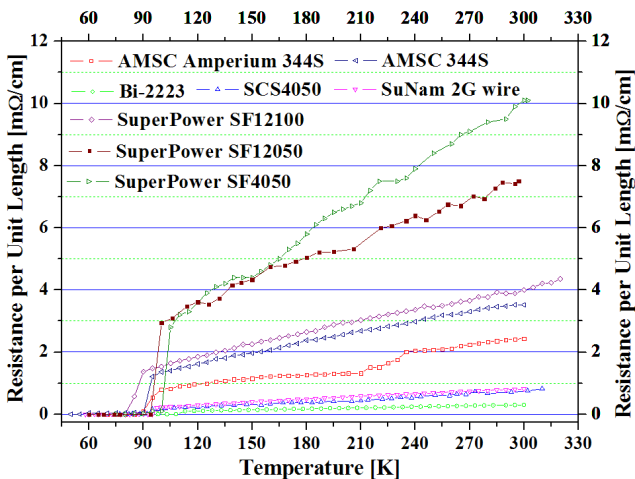
그림 3은 초전도선배열 단위 길이당 허용 인가 전압의 해석 및 측정 결과를 보여주고 있다. 결과를 살펴보면 AMSC의 344S 선재의 단위 길이 당 허용 인가 전압 값이 가장 크며, SuperPower의 SCS4050 선재의 단위 길이 당 허용 인가 전압이 가장 작은 것으로 해석 및 측정 되었다.



<그림 3> 선재별 단위 길이당 허용 인가 전압 측정 및 해석 결과

#### 3.2 동작 온도에 따른 비저항 특성 연구 결과

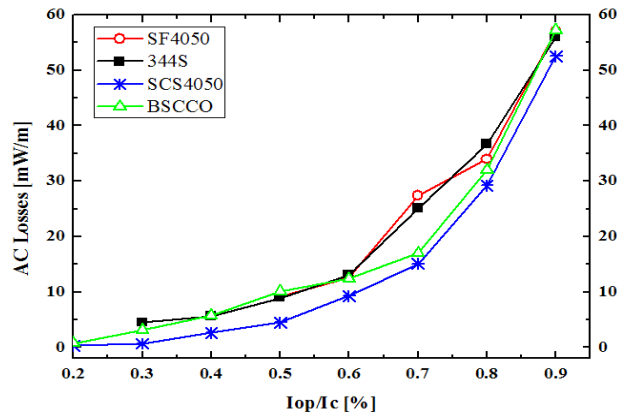
그림 4는 초전도선재별 온도별 비저항을 실험한 결과이다. 해당 결과를 통해서 안정화층이 없는 SuperPower의 SF계열의 초전도선재의 비저항이 가장 큰 것으로 나타났다.



<그림 4> 선재별 온도에 따른 비저항 측정 결과

#### 3.3 초전도선재별 교류손실 특성 연구 결과

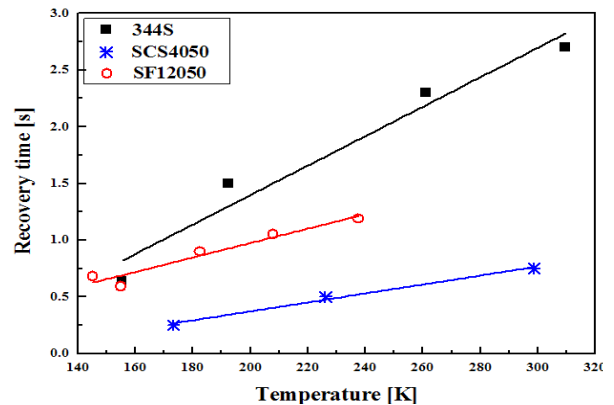
그림 5는 초전도선재별 정상 시 교류손실 측정 결과를 보여주고 있다. 실험 결과를 통해서 초전도 선재의 단위 길이 당 교류손실은 SuperPower의 SCS4050 선재가 가장 작은 반면, AMSC의 344S 선재가 가장 크게 나타나고 있다. 하지만 동일한 용량의 한류기 제작 시 344S 선재의 소모량이 가장 작다는 것을 고려할 경우 총 교류손실 측면에서는 344S 선재를 적용한 한류기가 가장 유리할 것으로 판단된다.



<그림 5> 통전법을 이용한 선재별 교류손실 측정 결과

#### 3.4 초전도선재별 회복 특성 연구

고장전류가 6주기동안 통전 후, 초전도선재의 최대도달온도에 따른 선재별 회복시간을 측정된 결과를 그림 6에서 보여주고 있다.



<그림 6> 초전도선배열 회복 시간

상위 결과를 통해서 초전도선재의 회복시간은 344S, SF12050, SCS4050 순으로 짧게 나타나고 있으며, 결과적으로 회복 특성 측면에서는 SCS4050 선재가 한류기 적용을 위한 선재로서 적합하다.

### 4. 결 론

상용화된 다양한 초전도선재의 특성을 연구하였다. 상위 결과를 통해서 각 연구 분야별 우수성을 보여주는 초전도선재가 다름을 알 수 있다. 단위 길이 당 인가 전압과 동작 온도에 따른 비저항 특성의 결과의 경우는 초전도선재의 권선법에 따라 크게 달라지지 않는 것을 추가 연구를 통해서 확인하였다. 하지만, 회복 특성과 교류손실은 권선법에 따라 영향을 받을 수 있다. 따라서 상위 결과를 조합한다면 AMSC의 344S와 SuperPower의 SF계열의 선재가 저형형 한류기에 적용 가능하다.

추가 연구로는 과냉의 냉각 조건에서 각 초전도선재별 안정화 여부를 점검하는 실험과 해석이 필요하다.

### [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, 2007, pp.1855-1858.  
 [3] Kazuhiro KAJIKAWA, 'The Basics of AC Losses in Superconductors', *Journal of the Cryogenic Society of Japan*, 2009