

전기적 측정 방법을 통한 고온 초전도 Coated Conductor의 안정화재 차이에 따른 회복시간에 대한 연구

김원철, 김영재, 나진배, 장재영, 고태국
연세대학교 전기전자공학과

A Study on the Recovery of HTS Coated Conductors Due to Different Stabilizers by the Electrical Method

Won Cheol Kim, Young Jae Kim, Jin Bae Na, Jae Young Jang, Tae Kuk Ko
Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univ

Abstract - 현재 전력 계통에서 발생하는 고장 전류에 대한 해결책으로 초전도전력기기인 고온초전도 한류기가 실용화를 눈앞에 두고 있다. 그러나, 실제 계통에 적용하기에는 몇 가지의 과제들이 아직 남아있다. 그 중에서도 한류소자의 회복속도는 고장전류 발생 후 계통의 제제로와 연계되기 위한 중요한 성능 요소라고 할 수 있다. 본 논문에서는 초전도 한류 소자로 쓰일 수 있는 다양한 YBCO CC(Coated Conductor)들의 회복 시간에 대하여 실험을 통하여 연구하였다. 10 mA의 전류를 초전도 선재에 지속적으로 인가하여, 고장전류 인가 후 발생하는 저항에 의한 전압의 추이를 관찰하여 회복 시간을 예측하였다. 그 후, 예측된 회복 시간 후 전류를 재투입하여 선재의 회복을 확인하였고, 실제 회복 시간과 비교하고 분석하였다.

1. 서 론

전력 소비의 증가로 인해 전력 계통은 대형화와 복잡화가 진행되고, 이로 인하여 고장전류의 크기 또한 급격하게 증가하게 된다. 증가된 고장전류는 경제적인 피해를 일으키고, 인명을 해 할 수 있는 잠재적인 위험요소가 된다.[1] 이러한 고장전류의 위험을 피하는 예방책 중 하나로 고온초전도 한류기가 주목되고 있다. 고온초전도체의 상전도 상태로의 빠른 전이와 상전도 상태일 때의 높은 저항 때문에 고장전류 발생 후 반주기 만에 고장전류를 제한할 수 있다는 장점 때문이다. 그리고 이러한 장점으로 인하여 고온초전도 한류기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[2]

하지만, 고온초전도 한류기의 실용화를 위해 수행되어야 할 연구들이 남아있다. 그 중 하나가 회복시간이다. 현재 우리나라의 실제 배전급 전력 계통에서는 고장전류가 발생하면 차단기가 작동하여 계통에 전류 투입을 중단하고, 0.5초 후 전류를 재투입하여 고장여부를 파악하는 방식이다. 이런 방식에서 만약 고장전류가 0.5초 이내의 일시적인 것이라면 고온초전도 한류기는 고장전류 발생 후 초전도 상태로의 회복 시간이 0.5초 이내여야 할 것이다. 이로 인해, 고온초전도 한류기의 회복 시간은 실제 계통에 적용하기 위한 중요한 특성이 될 것이다. 그러므로 초전도 한류기 설계에 있어서 다양한 고온초전도 한류 소자들의 회복 시간에 대해 연구할 필요가 있다.

이를 위한, 고온 초전도 한류 소자들의 회복 시간을 결정하는 방법으로 소자의 온도를 온도 센서를 통하여 측정하는 방법이 있다. 하지만, 이 방법은 열 단열과 센서의 반응속도 등의 문제로 인하여 소자의 실질적 온도를 측정하기 어렵기 때문에 회복 시간을 결정하는데 큰 어려움이 있다. 본 논문에서는 현재 초전도 한류 소자로 이용될 수 있는 다양한 YBCO Coated Conductor (CC)들의 안정화재에 따른 회복시간을 고장전류가 발생된 마지막 시점에서부터 미세한 DC전류 인가에 의해 발생된 전압을 통하여 측정하였다. 그리고, 전압추이를 통해 측정된 회복 시간 후에 통전 전류를 재투입 하여 그 결과를 통해 초전도 선재의 회복 시간을 평가하고 분석하였다.[3]

2. 본 론

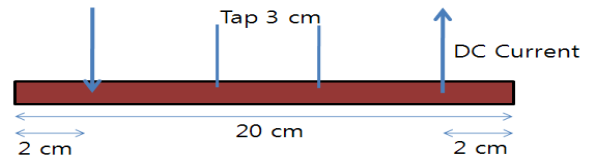
2.1 실험 과정

본 실험을 행하기 위해 <표 1>의 3종류의 YBCO CC 선재를 사용하였다. 그리고 <그림 1>과 같이 선재를 각각 20 cm의 길이로 준비한 뒤, 각 선재의 중간 부분에 3 cm 정도의 전압탭을 두고, 선재의 끝부분에서 2 cm 정도 떨어진 부분에 DC 10 mA 정도 흘릴 수 있는 전류리드선을 추가적으로 설치하였다.

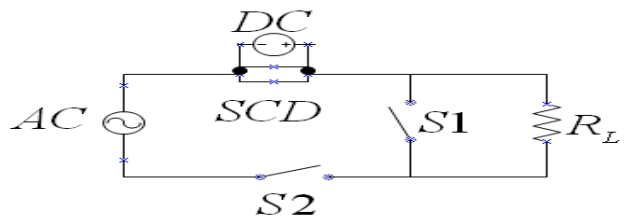
고장전류를 인가하기 위한 회로는 <그림 2>와 같이 AC 전압원, 스위치 S1, S2, 부하저항 R_L 과 초전도 선재로 구성되어 있다. 그리고 10 mA의 DC전류를 초전도 선재에 지속적으로 흘려준다.

<표 1> 사용된 선재의 사양

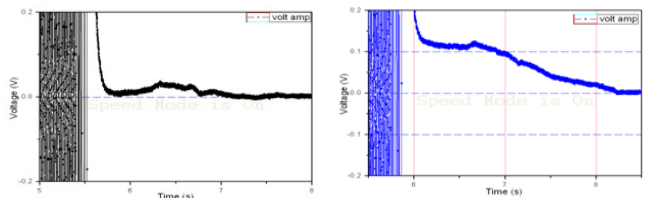
	344S	SCS4050	SF12050
Manufacturer	AMSC	SuperPower	SuperPower
Ic	98A	112A	260A
Width	4.4mm	4mm	12mm
Stabilizer material	Stainless steel	Cu	Free
Structure of stabilizer	Both-sides (25+25 μ m)	Surround (20+20 μ m)	Free
Resistance @300K	3.5m Ω /cm	1.2m Ω /cm	5.5m Ω /cm



<그림 1> 시편의 준비



<그림 2> 고장실험의 회로도

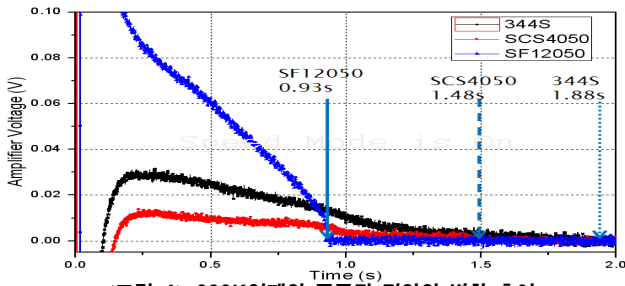


(a)

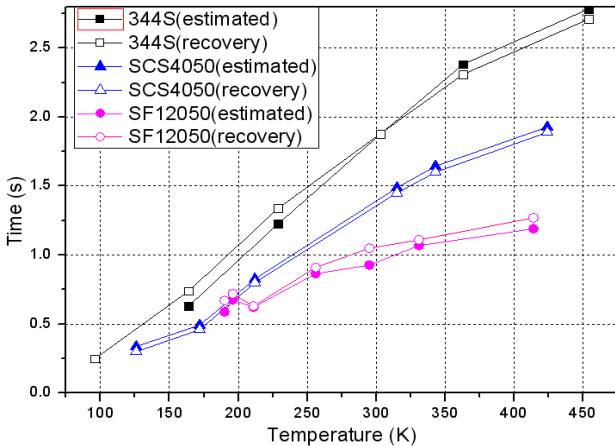
(b)

<그림 3> (a) 증폭되지 않은 고장 (b) 증폭된 고장 후 전압신호 후 전압신호

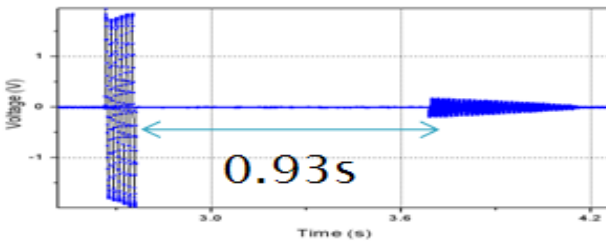
정상 상태에서는 S2는 닫혀 있고, S1은 열려 있어 50 A_{Peak}의 전류가 통전한다. 고장상황을 재현하기 위해, S1이 닫히면 고장전류가 흐르게 되고, 이 때 초전도 선재가 상전도 상태로 변화되어, 저항이 발생한다. 그리고 이를 통해 고장전류를 제한시킨다. 고장전류는 0.1초 동안 통전 시키고, 그 이후에는 S1과 S2가 열려 회로가 개방된다. 이는 계통에



〈그림 4〉 300K일때의 증폭된 전압의 변화 추이



〈그림 5〉 온도에 따른 선재의 회복 특성



〈그림 6〉 300K일때의 예측 회복 시간 후 전압 추이

설치되어 있는 차단기의 작동까지 걸리는 시간을 반영한 것이다. 이때 지속적으로 인가되는 10 mA의 DC 전류로 인해 발생하는 전압 신호를 측정하는데, 발생하는 전압의 크기가 매우 작기 때문에 이 전압 신호를 증폭시켜 선재의 회복 여부를 확인한다. 〈그림 3〉은 DC 전류로 인한 전압이 증폭되었을 때와 증폭되지 않았을 때를 비교한 것이다. 증폭된 전압 신호를 통해 증폭되지 않은 전압신호 보다 더욱 뚜렷하게 선재가 회복되는 과정을 볼 수 있어, 회복 여부를 판단할 수 있는 기준이 된다. 회복시간은 고장전류의 마지막 주기가 끝나는 시점으로부터 DC 전류에 의하여 측정된 전압이 0이 될 때까지의 시간을 측정함으로써 예측할 수 있다. 그 후 예측된 회복 시간이 실제 회복시간과 연관성이 있는지 확인하기 위해서 고장전류 발생 후 다시 S2를 닫는데 걸리는 시간을 예측된 회복 시간과 동일하게 설정하여 다시 전류를 통전시키는 확인 실험도 수행하였다.

2.2 실험 결과

2.2.1 회복 시간 측정

10 mA에 대한 증폭된 전압을 통해 회복 시간을 측정하였고, 증폭된 전압이 0이 되었을 때, YBCO CC가 모두 회복되었다고 가정하였다. 〈그림 4〉은 세가지 초전도 선재의 온도가 고장전류 인가 후 300 K까지 온도가 상승한 경우의 전압신호를 측정된 것이다. 측정된 결과를 보면 세가지의 경우 중 SF12050의 경우가 가장 빠른 시간인 약 0.93초 정도에 회복되었음을 확인하였고, 344S의 경우 가장 느린 시간 약 1.88초 정도에 회복되었음을 알 수 있었다.

이러한 측정을 통하여 각각의 선재에 대하여 다양한 온도에 대한 회복 시간을 조사하여 〈그림 5〉에 정리하였다. 참고로 온도를 측정하는 방법은 온도와 각각의 선재의 비저항 관계를 통해 계산하였다. 〈그림 5〉에서 보는 바와 같이 각각의 선재에 대해 예상된 회복 시간은 200 K 이하에서는 비교적 큰 차이가 없으나, 그 이상에서는 온도가 올라갈수록

점점 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 이러한 차이는 선재의 안정화 층을 이루는 물질이나 구조의 차이에 의한 것으로 볼 수 있다. 특히, SF12050의 경우에는 구조상 안정화층이 존재하지 않기 때문에, 다른 CC들보다 초전도에 축적된 열에너지가 액체 질소로 열전달이 빠르게 진행되었다고 볼 수 있다. 그리고, 안정화층이 존재하는 CC의 경우에는 SCS4050의 안정화층인 Cu가 344S의 안정화층인 Stainless steel보다 열전도도가 좋기 때문에 SCS4050의 회복 속도가 0.4초정도 빠르게 나타났다고 할 수 있다.

2.2.2 예측된 회복 시간에 대한 평가

예측된 회복시간에 다시 정상전류를 통전시켜 예측결과를 평가하였다. 〈그림 5〉는 예측 회복시간과 실제 회복시간을 온도별로 나타낸 것이다. 위의 예측결과와 마찬가지로 SF12050의 회복 시간이 나머지 다른 두 YBCO CC보다 더 빨랐고, 344S가 가장 느렸다. 하지만, 모든 선재에서 회복된 실제 시간과 예측한 회복 시간 간의 0.12초 이내의 작은 차이가 존재하였지만, 비교적 예측 결과와 일치함을 확인하였다. 344S의 경우에는 300 K 이전에는 예측한 회복 시간이 실제 회복 시간보다 0.11초 정도 빨랐으나, 그 이후에는 실제 회복 시간이 예측한 시간보다 0.07초 정도 더 빨라졌다. SCS4050의 경우에는 실제 회복 시간이 0.03초정도 더 짧았지만, SF12050은 SCS4050과는 다르게 예측 회복 시간이 실제 회복 시간보다 길게는 0.13초정도 짧았다.

이러한 실제 회복 시간과 예측한 회복 시간 간의 차이는 DC전류에 따른 전압 신호의 증폭으로 인한 노이즈의 증가로 0이 되는 정확한 시점을 찾아내기 어렵기 때문이다. 또한, 예측된 회복 시점은 시점의 온도가 YBCO의 임계 온도인 95 K일 때의 시점이지만, 통전을 통해 확인한 선재의 회복 시점은 50 A의 임계전류에 해당하는 온도인 95 K과 77 K 사이의 온도의 시점이라는 점이 다른 원인이 된다.

그러나, 예측 회복 시간이 실제 회복 시간보다 짧아 작은 전압이 발생하는 경우에도 점차 회복되어 가고 있는 경향을 보였다. 예를 들어 SF12050은 300 K에서 측정 회복 시간은 0.93초정도였으나 실제 회복 시간은 1.05초정도 다른 모든 경우 보다 가장 큰 차이를 보인다. 이런 경우에도 〈그림 6〉에서와 같이 전압이 점차 줄어드는 것을 볼 수 있고, 이를 통해 선재가 회복되어 가고 있음을 확인할 수 있다. 이는 넓은 범주로 볼 때, 예측된 시간 역시 회복이 가능한 시간임을 알 수 있다.

3. 결 론

배전급 고온초전도 한류기의 개발에 있어서 한류소자의 회복 특성에 대한 연구는 매우 중요하다. 이를 위해 본 논문에서는 미세한 전류 인가를 통해 안정화층이 다른 3가지의 YBCO CC선재의 회복 특성을 살펴 보았다. 이를 통해 선재의 회복 시간을 대략적으로 예측할 수 있었고, 선재의 회복에 있어서 안정화층의 열전달 특성과 구조적 특성이 회복에 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 그 결과, 선재의 실제 회복 시간과 예측 회복 시간 간의 0.1초 정도의 차이가 있었으나, 비교적 일치함을 확인하였다. 또한, 각각의 CC에 대하여 0.5초 이내의 회복이 가능한 온도는 344S의 경우에는 150 K이하, SCS4050은 175 K이하, SF12050은 196 K이하의 온도라는 것을 확인하였고, 고온초전도 한류기의 회복시간을 고려하면, SF12050이 적절한 한류 소자임을 알 수 있었다.

배전급 고온초전도 한류기의 개발을 위해, 앞으로 고장 전류 후 초전도 소자의 회복 시간을 예측하고, 측정할 수 있는 정확한 방법과, CC의 회복 속도를 빠르게 할 수 있는 방법들이 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대 초전도응용기술 개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] 이찬주, 남관우, 강형구, 고대국, 석복렬, "YBCO Coated Conductor의 과전류 특성해석", 2006년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 693-694, 2006
 [2] Hye-Rim Kim, Seong-Woo Yim, Sung-Yong Oh, and Ok-Bae Hyun, "Recovery in Superconducting Fault Current Limiters at Low Applied Voltage", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.18 No.2, pp.656-659, June 2008
 [3] Seong Eun Yang, Min Cheol Ahn, Dong Keun Park, Ki Sung Chang, Bok-Yeol Seok, Ho-Myung Chang, Jung-Wook Park, and Tae Kuk Ko, "Experimental Method for Determining the Recovery of Superconducting Fault Current Limiter Using Coated Conductor in a Power System", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.18 No.2, 652-655, June 2008