

**배전급 초전도 한류기 개발을 위한 Bi-2212 초전도 한류소자의 사고전류 제한 특성**

심정욱\*, 김혜림\*\*, 임성우\*\*, 현옥배\*\*, 이해근\*, 박권배<sup>§</sup>, 김호민<sup>§</sup>, 이방욱<sup>§</sup>, 오일성<sup>§</sup>, Frank Breuer<sup>§§</sup>, Joachim Bock<sup>§§</sup>  
 고려대학교\*, 한전전력연구원\*\*, LS산전<sup>§</sup>, Nexans SuperConductor GmbH<sup>§§</sup>

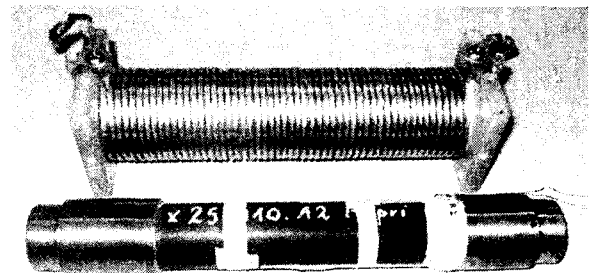
**Fault current limitation characteristics of the Bi-2212 bulk coil for distribution-class superconducting fault current limiters**

Jungwook Sim\*, Hye-Rim Kim\*\*, Seong-Woo Yim\*\*, Ok-Bae Hyun\*\*, Haigun Lee\*,  
 Kwon-Bae Park<sup>§</sup>, Ho Min Kim<sup>§</sup>, Bang-Wook Lee<sup>§</sup>, Il-Sung Oh<sup>§</sup>, Frank Breuer<sup>§§</sup> and Joachim Bock<sup>§§</sup>  
 Korea University\*, Korea Electric Power Research Institute\*\*,  
 LS Industrial Systems<sup>§</sup>, Nexans SuperConductors GmbH<sup>§§</sup>

**Abstract** - We investigated fault current limitation characteristics of the resistive superconducting fault current limiter (SFCL) which consisted of a Bi-2212 bulk coil and a shunt coil. The Bi-2212 bulk coil and the shunt coil were connected in parallel. The Bi-2212 bulk coil was placed inside the shunt coil to induce field-assisted quench. The fault test was conducted at an input voltage of 200 V<sub>rms</sub> and fault current of 12 kA<sub>rms</sub> and 25 kA<sub>rms</sub>. The fault conditions were asymmetric and symmetric, and the fault period was 5 cycles. The test results show that the SFCL successfully limited the fault current of 12 kA<sub>rms</sub> and 25 kA<sub>rms</sub> to below 5.5 ~ 6.9 kA<sub>peak</sub> within 0.64 ~ 2.17 msec after the fault occurred. Limitation was faster under symmetric fault test condition due to the larger change rate of current. We concluded that the speed of fault current limitation was determined by the speed of current rise rather than the amplitude of a short circuit current. These results show that the Bi-2212 bulk coil is suitable for distribution-class SFCLs.

〈표 1〉 Bi-2212 벌크코일의 사양

길이	210 mm	외경	25 mm
턴 수	10.5 turns	단면적	14.5×1.6 mm
임계전류(I <sub>c</sub> )	300 A	상온저항	1.1 Ω



〈그림 1〉 션트 코일(上)과 Bi-2212 벌크코일 (下)

Bi-2212 벌크 코일의 사양은 외경 25 mm, 두께 1.6 mm, 길이 170 mm 이고 구리단자를 포함한 총길이는 210 mm이다. 실험에 사용된 벌크 코일은 총 10.5 턴으로 가공되었고, 가공된 선폭은 14.5 mm이다. 션트 코일 사양은 R<sub>coil</sub> = 70 mΩ이고 X<sub>coil</sub> = 25 mΩ이다. 표 1은 실험에 사용된 Bi-2212 벌크 코일의 사양이다.

**1. 서 론**

최근 들어 다양한 종류의 초전도 전력기기 개발이 진행되고 있다. 특히 초전도 한류기의 경우는 빠른 시기에 실용화가 가능할 것으로 예측되고 있다. 전력기에서 초전도체의 응용분야는 초전도체의 저항이 0인 점이나 마이스너 효과 등의 초전도 고유특성을 응용하는 것이 대부분이다. 하지만 초전도 한류기는 한류기 역할의 특성상 상시에는 전력계통에 없는 듯 존재하다가 사고 발생시 초전도 한류기의 상전이로 임피던스를 발생시켜 사고전류를 제한하는 역할을 한다. 특히 저항형 초전도 한류기의 경우 무게 및 부피가 작고 시스템이 비교적 간단하다[1]-[2].

초전도 한류기는 기존의 차단기와는 다른 개념의 동작특성을 가지고 있으며 아직까지는 실용화 되어있지 않기 때문에 특별한 기준이 정해져 있지 않다. 하지만 적용되는 계통에서 발생하는 최대 사고전류에 대해서도 충분히 신뢰할 수 있는 동작을 해야 한다. 따라서 현재 개발 중인 배전급 초전도 한류기의 경우 사고전류에 대한 내력 기준을 배전급 차단기의 사고전류 용량 기준에 준하게 정하는 것이 바람직하다. 현재 배전급 차단기의 사고전류 용량기준은 계통의 상황에 따라 크게 12.5, 25, 40 kA<sub>rms</sub>로 구분되지만 일반적으로 25 kA<sub>rms</sub>를 기준으로 하고 있다. 따라서 단락사고 시 계통 내에서 최대 전류가 유입된다는 전제 조건 하에 초전도 한류소자가 충분한 내력을 갖춰야 한다.

본 논문은 배전급 초전도 한류기 개발에 있어서 사용되는 Bi-2212 벌크 코일(bulk coil)과 션트 코일(shunt coil)을 이용한 초전도 한류소자의 사고전류 제한 특성에 관한 결과이다. Bi-2212 벌크 코일과 션트 코일은 서로 병렬로 결선되어있고, 션트 코일은 사고 발생시 Bi-2212 벌크 코일에 인가되는 사고전류를 분담하고 자장을 발생시켜 Bi-2212 벌크 코일의 균등 켄치를 유도한다[3]. 사고전류는 배전급 차단기의 사고전류 용량에 준하는 12.5 kA<sub>rms</sub> 및 25 kA<sub>rms</sub>를 인가하였고 각 경우에 대한 사고전류 제한특성을 비교하였다.

**2. 초전도 한류소자 및 단락 사고 모의 시험**

**2.1 Bi-2212 벌크 코일과 션트 코일**

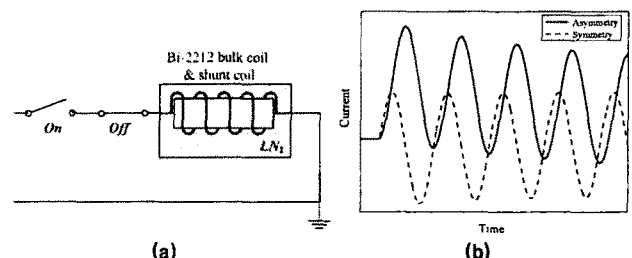
본 실험에서 사용된 초전도 한류소자는 공동 연구기관인 독일의 Nexans SuperConductors GmbH에서 공급을 받은 Bi-2212 bulk coil이다. 이 초전도체는 원심성형법으로 제작된 튜브형태의 벌크를 통전 전류 용량에 맞춰 코일 형태로 가공한 것이다. 가공된 벌크코일은 기계적 충격에 대비하여 내외측에 FRP 등으로 보강하였고 양 끝단에 전류 통전을 위한 구리단자가 부착되어있다.

그림 1의 상단 부분은 션트코일이고 하단 부분은 Bi-2212 벌크 코일이다. 최종적으로는 션트 코일 내부에 Bi-2212 벌크 코일이 위치하게 되고 병렬로 결선하여 하나의 초전도 한류소자로 구성하게 된다. 따라서 사고전류가 유입되어 Bi-2212 벌크 코일이 켄치되어 저항이 발생하면 션트 코일 으로 전류가 우회하게 된다. 이때 션트 코일에 흐르는 전류에 의해 Bi-2212 벌크 코일에 자장이 쇄가 되어 켄치를 촉진하게 된다.

**2.2 단락 사고 모의 시험**

단락 사고 모의 시험은 공동연구기관인 LS 산전 전력기술시험센터에서 진행하였다. 그림 2 (a)에서 나타난 바와 같이 두 개의 on/off 스위치를 통하여 단락사고가 통제된다. 실제 실험에 앞서서 입력전압 및 정확한 사고전류를 조절하기 위해 초전도 한류소자가 회로에 없는 상태에서 단락전류를 투입하여 교정작업을 수행하였고, 이후 초전도 한류소자를 직렬로 결선하여 소자 양단전압(V<sub>test</sub>)과 전류(I<sub>test</sub>)를 측정하였다. 초전도 한류소자는 극저온 용기 내부에 설치하였고 LN<sub>2</sub>를 주입하여 초전도상태로 유지하였다.

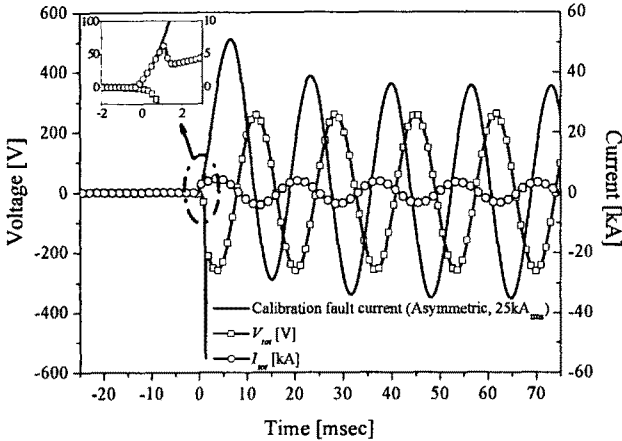
초전도 한류소자의 시험전압은 200 V<sub>rms</sub>, 사고주기는 5 주기로 정하였다. 사고전류의 크기는 일반적인 배전급 차단기의 차단용량기준에 준하는 12.5 kA<sub>rms</sub> 및 25 kA<sub>rms</sub>로 정하였다. 또한 각 사고 전류에 대해 사고 투입 시점 및 계통의 상황을 고려하여 대칭사고와 비대칭 사고로 구분하여 수행하였다. 비대칭사고와 비대칭 사고는 전류가 0인 점을 기준으로 파형이 대칭인 경우와 비대칭인 경우로 구분한다. 그림 2(b)에서와 같이 대칭사고는 사고전류에 DC 성분이 추가되는 것으로 초기상승전류의 크기가 큰 특징이 있다. DC 성분은 시간이 지남에 따라 수 주기 후 감소된다. 이와 달리 대칭사고의 경우는 DC 성분이 추가되지 않아 초기 상승 전류가 비대칭의 경우보다 크지는 않지만 초기 전류의 상승속도(di/dt)가 비대칭사고에 비해 매우 빠른 특징이 있다.



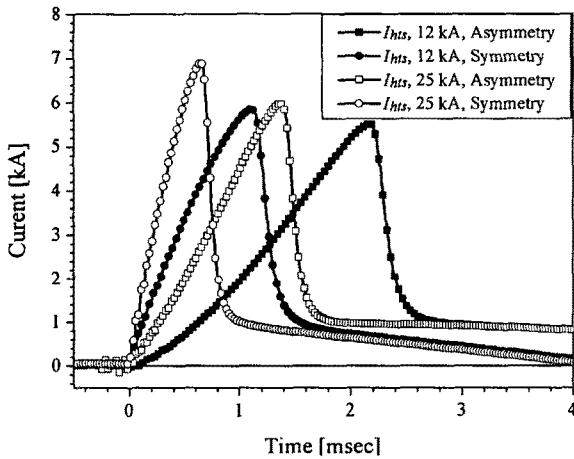
〈그림 2〉 (a) 초전도 한류소자의 단락시험회로 (b) 비대칭사고 및 대칭사고 전류 비교

### 2.3 단락시험 결과

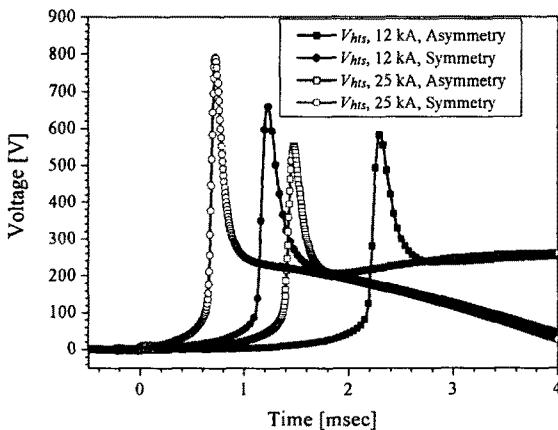
그림 3은 입력전압 200 V<sub>rms</sub>, 비대칭 25 kA<sub>rms</sub> 사고전류의 교정파형(실선)과 동일한 조건에서 초전도 한류소자의 양단전압 V<sub>tor</sub>(□)와 초전도 한류소자에 의해 한류가 되는 사고전류 I<sub>tor</sub>(○)이다. 초전도 한류소자가 없을 경우 초기 상승전류의 크기는 DC성분이 추가되어 52 kA<sub>peak</sub>로 25 kA<sub>rms</sub> 단락전류의 2 배임을 알 수 있다. V<sub>tor</sub>와 I<sub>tor</sub>를 보면 초전도 한류소자의 양단전압은 280 V<sub>peak</sub>이고 사고전류는 3.2 kA<sub>peak</sub> 수준으로 한류가 되었음을 알 수 있다. 그림 좌측 상단의 사고 직후 사고전류의 변화를 보면 t=0에서 발생한 사고전류는 교정파형과 동일하게 진행하다가 6 kA<sub>peak</sub>까지 상승한 후 전류가 제한되었다. 또한 비대칭에 의한 DC 성분이 급격히 감소되는데 이것은 초전도 한류소자에서 발생한 저항성분에 의해 시정수가 감소되기 때문이다. 전체적으로 12.5 kA<sub>rms</sub>와 25 kA<sub>rms</sub>의 비대칭 및 대칭사고 조건에 대한 초전도 한류소자의 V<sub>tor</sub>와 I<sub>tor</sub>에 대한 결과는 사고발생 직후의 초기 상승분을 제외하고 나머지 주기에 대하여 그림 3의 결과와 동일하게 나타났다.



〈그림 3〉 비대칭사고전류(25 kA<sub>rms</sub>)와 초전도 한류소자 양단 전압 및 전류



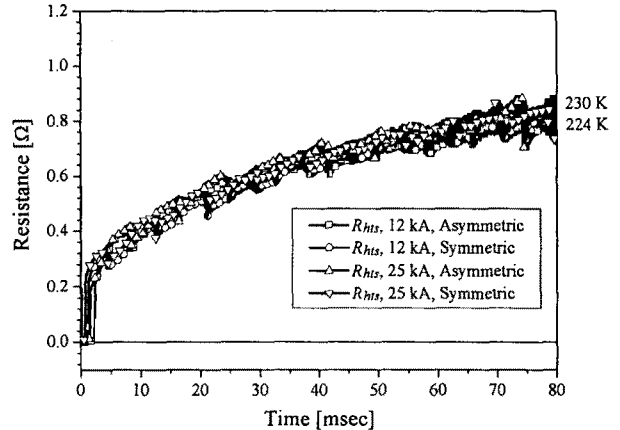
〈그림 4〉 각 사고조건에 따른 초기 상승 전류



〈그림 5〉 각 사고조건에 따른 초기 상승 전압

〈표 2〉 각 사고조건에 따른 초기 상승전류 및 시간

조건	초기상승전류 [kA <sub>peak</sub> ]	시간 [msec]
12.5 kA <sub>rms</sub> , 비대칭	5.5	2.17
12.5 kA <sub>rms</sub> , 대칭	5.8	1.1
25 kA <sub>rms</sub> , 비대칭	6	1.37
25 kA <sub>rms</sub> , 대칭	6.9	0.64



〈그림 6〉 각 사고조건에 따른 Bi-2212 벌크코일의 온도변화

그림 4와 그림 5는 12.5 kA<sub>rms</sub>와 25 kA<sub>rms</sub>의 비대칭, 대칭 사고일 경우에 대한 초기 상승전류 및 전압이다. 그림 4에서 각 사고조건에 대한 사고전류의 제한속도를 보면 대칭사고가 비대칭사고의 경우 보다 좀 더 빠른 것을 알 수 있다. 특히 25 kA<sub>rms</sub>의 경우 비대칭사고의 경우 1.37 msec만에 6 kA<sub>peak</sub>에서 한류되지만 대칭사고의 경우는 0.65 msec, 6.9 kA<sub>peak</sub>에서 한류되었다. 그림 2(b)에서 알 수 있듯이 비대칭사고는 DC 성분이 포함되어 초기 상승전류가 크지만 대칭사고에 비하여 초기 상승속도는 느리다. 초전도 한류기는 임계전류보다 더 큰 전류가 통전될 경우 flux flow 저항이 발생하고 이로 인한 Joule로 인해 초전도체의 온도가 임계온도를 넘게 되면서 상전도로 전이되는 특징을 가지고 있다. 따라서 사고전류의 크기보다는 초기에 인입되는 사고전류의 상승속도(di/dt)에 따라서 초전도 한류기의 초기 한류속도가 결정됨을 알 수 있다. 또한 그림 5의 초기 전압특성에서도 나타난 바와 같이 대칭사고가 비대칭 사고에 비해 빠른 전압상승을 나타내었음을 알 수 있다. 표 2는 각 사고전류에 대한 초기 상승전류의 피크값과 이때의 시간이다.

그림 6은 각 사고조건에 따른 Bi-2212 벌크 코일의 저항변화이다. 벌크 코일의 저항변화는 초전도 한류소자의 양단전압과 초전도 벌크코일에 흐르는 전류를 이용하여 계산하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 사고발생 후 5 주기 이후에 해당하는 80 msec에서의 Bi-2212 벌크 코일의 저항을 보면 0.8~0.85 Ω에 걸쳐서 분포하고 있다. 이 저항값을 Bi-2212 bulk coil의 저항에 따른 온도값으로 환산하면 224~230 K으로 전체적으로 250 K이하의 온도분포를 나타내고 있어 배전 용량의 사고전류에도 안정적인 온도상승 조건을 가지고 있다.

### 3. 결 론

이상과 같이 Bi-2212 벌크 코일과 셉트 코일이 병렬로 결선된 초전도 한류소자를 이용하여 배전급 단락사고인 12.5 kA<sub>rms</sub>와 25 kA<sub>rms</sub>에 대한 단락 사고시험을 하였다. 실험결과 초전도 한류소자는 배전급 차단기의 차단 용량에 준하는 사고전류에 대하여 우수한 한류특성을 나타내었다. 전반적으로 한류시점은 di/dt가 큰 대칭사고에서 빨리 나타났으며, 사고전류의 크기보다는 전류상승 속도에 따라 한류속도가 결정됨을 알았다. 또한 각 사고에 대하여 초전도 한류소자에서 발생하는 온도는 230 K 미만으로 배전급 용량의 사고전류가 유입되더라도 충분히 안정적인 온도를 확인하였다.

#### 감사의 글

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

#### [참 고 문 헌]

- J. Bock et al., "Development and successful testing of MCP BSCCO-2212 components for a 10 MVA resistive superconducting fault current limiter," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 122-126, 2004.
- Ok-Bae Hyun et al., "6.6 kV Resistive Superconducting Fault Current Limiter Based on YBCO Films," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 15, No. 2, pp.2027-2030, 2005
- 심정욱 외 4 명, "shunt coil에 따른 Bi-2212 monofilar coil의 쉐트 특성", 2005 초전도저온공학회 학술대회 논문집, pp.131-134, 2005