

### 13.2kV/630A급 고온초전도 한류기의 절연설계

강형구\*, 이찬주\*, 고태국\*\*, 석복렬\*

\* 현대중공업(주) 기계전기연구소, \*\* 연세대학교 전기전자공학과

### Insulation Design for a 13.2kV/630A High-Tc Superconducting Fault Current Limiter

Hyoungku Kang\*, Chanjoo Lee\*, Tae Kuk Ko\*\*, Bok-Yeol Seok\*

\* Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.

\*\* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

**Abstract** - The superconducting fault current limiter (SFCL) consists of superconducting coil for limiting the fault current and cryogenic cooling system for keeping the coil in superconducting condition. The study on the insulation design for superconducting coil and cryogenic cooling system should be elaborately performed to develop a high voltage SFCL. In this paper, insulation design of solenoid coil for 13.2kV/630A SFCL is performed through the AC dielectric breakdown test and lightning impulse dielectric strength test. The dependence of dielectric characteristics on the magnitude of liquid nitrogen pressure is also investigated. Through the investigation, it is verified that dielectric characteristics of sub-cooled nitrogen are strongly enhanced by the pressurization. The electrical insulation design of 13.2kV/630A SFCL is performed by applying the experimental results. The successful insulation design for development of 13.2kV/630A SFCL is confirmed by AC dielectric breakdown tests.

#### 1. 서 론

산업사회의 발달과 더불어 부하의 증가로 인해 단락용량이 증가함에 따라 계통 내 사고전류의 크기도 급격하게 증가하고 있다. 현 계통에 설치되어 있는 차단기의 용량을 초과하는 사고전류는 사회적으로 심각한 경제적 피해뿐만 아니라 인명피해까지 초래할 수가 있다. 따라서 이에 대한 대책으로 여러 가지 방안이 제시되고 있는데 직렬 리액터의 삽입, 모선 분리, 퓨즈의 사용, 차단기 용량의 증대, 초전도한류기의 삽입 등이 그것이다. 이러한 여러 가지 방안들 중에서도 초전도한류기의 삽입이 실질적으로 가장 경제적이고 효과적인 대안이라는 평가가 지배적이다[1]. 저온초전도체를 중심으로 한 초전도한류기 개발에 관한 연구는 이미 1980년대부터 본격적으로 시작되었으나 경제성 및 안정성 등의 문제로 인해 연구가 일시적으로 중단되었다가 1990년대에 접어들면서 고온초전도체를 이용한 초전도한류기의 개발에 관한 연구가 다시 활발하게 진행되었으며, 2000년 이후부터는 기존의 초전도체에 비해 높은 임계전류밀도와 우수한 자장특성을 가지는 2세대 고온초전도 선재 (coated conductor: CC)가 개발됨에 따라 CC를 이용한 초전도한류기 개발에 관한 연구가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 한국에서는 2001년부터 21세기 프론티어연구개발사업의 일환으로 초전도한류기에 관한 연구가 진행되고 있으며, 현대중공업(주)과 연세대학교는 2단계 (2004.07.~2007.03.) 프론티어연구개발사업을 통해서 지난 2006년 12월에 CC를 이용한 단상 13.2kV/630A급 무유도 권선형 고온초전도 한류기 개발에 성공하였다. 또한 개발된 초전도한류기의 단락특성 실험과 절연특성 실험을 한국전기연구원 내의 대전력시험동에서 실시하여 우수한 특성을 입증하였다. 향후 대용량급의 초전도한류기를 실용화하기 위해서는 초전도코일과 냉각시스템에 대한 극저온 절연기술의 개발이 필수적이다. 본 논문에서는 단상 13.2kV/630A급 고온초전도 한류기 개발을 위한 초전도코일과 냉각시스템에 관한 극저온 절연기술 개발 연구를 수행하였다.

#### 2. 초전도한류기의 절연설계

무유도 권선형 초전도한류기는 크게 초전도코일과 냉각시스템으로 이루어져 있으므로 이에 대한 극저온 절연특성 연구가 필수적이다. 본 논문에서는 송전급 초전도한류기 개발을 위한 선행 연구로서 배전급 초전도한류기용 초전도코일과 냉각시스템의 극저온 절연설계에 대한 연구를 수행하였다.

##### 2.1 초전도코일의 절연설계

초전도기기용 코일로는 솔레노이드코일과 팬케이크코일이 주로 사용되고 있으나 두 코일은 용도에 따라 각기 다른 특성을 가지고 있으므로

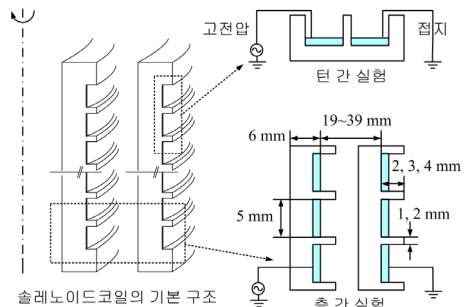
특성 실험을 통해 대용량급 초전도한류기 개발에 적합한 코일의 권선 형태를 결정해야 한다. 일반적으로 솔레노이드코일은 구조적인 특징으로 인해서 팬케이크코일에 비해 우수한 절연특성을 가지고 있기 때문에[2] 본 연구에서는 13.2kV/630A급 초전도전력기기용 코일로 솔레노이드코일을 선택하고 그에 대한 절연특성 실험을 수행하였다.

##### 2.1.1 솔레노이드코일의 절연특성

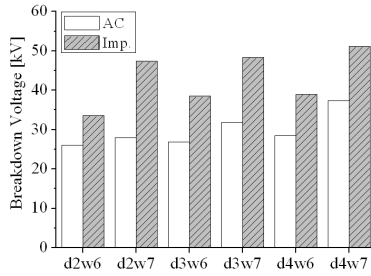
본 절연특성 실험용 권선으로는 미국 AMSC사의 BSCCO-2223 초전도선재와 사양이 동일한 너비 4.1mm, 두께 0.21mm의 stainless steel (SS) 315L을 사용하였다. AC 내전압 특성실험과 더불어 임펄스 내전압 특성실험을 수행하여 각각의 절연내력 특성을 살펴보았다. AC 내전압 특성실험에 사용된 전원공급장치의 주파수는 60Hz이며 최대 AC 200kV (60kVA)의 출력특성을 가지며, 임펄스 내전압 특성실험용 전원공급장치는 최대 240kV, 15kJ (1.2μs/50μs)의 출력특성을 가진다. AC 내전압 특성실험은 절연과피 현상이 발생하는 순간까지 전압을 초당 1kV씩 상승시켜주었다. 또한 모든 절연 특성실험은 77K의 포화액체질소 내에서 이루어졌으며 보빈의 재질은 G-10을 사용하였다. 솔레노이드코일은 팬케이크코일에 비해 부피가 크지만 순간적인 사고전류의 발생으로 인해 과도한 열상승과 렌치의 위험이 적으며 전기적 절연특성이 우수한 장점을 가지고 있다. 솔레노이드코일의 경우에는 턴 간의 절연특성뿐만 아니라 층 간의 절연특성도 매우 중요한 설계요소가 된다. 솔레노이드코일의 턴 간, 층 간 기본구조를 다음의 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 보빈의 홈 깊이는 2, 3, 4mm로, 홈의 피치 길이는 6mm와 7mm로 가공을 하고 각각의 경우에 대해 절연내력 실험을 실시하였다. 그림 2는 솔레노이드코일의 턴 간 절연특성을 나타내는데 그림에서 'd'는 홈의 깊이를 나타내며 'w'는 피치의 길이를 나타낸다. 그림 2의 결과에서 보는 바와 같이 솔레노이드코일의 턴 간 절연특성을 향상시키기 위해서는 홈의 깊이를 조절하는 것보다 피치의 길이를 조절하는 것이 보다 효과적인 것을 알 수 있다. 턴 간 절연과피 실험을 통하여 보빈은 관통되었으며 층 간 실험에서도 전자는 보빈을 관통하여 절연과피를 일으켰다. 그림 3은 솔레노이드코일의 층 간 절연특성을 나타낸다. SS 테이프의 간격은 19mm에서 34mm까지 5mm씩 조절하였으며 AC 절연과피 전압은 층 간의 간격이 증가함에 따라 포화특성을 가지며 증가한다는 것을 알 수 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 층 간의 간격이 34mm 이상이 되면 절연과피 전압값이 포화되는 것을 알 수 있다.

##### 2.1.2 초전도코일의 절연설계값

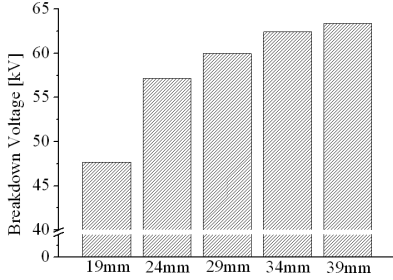
본 연구에서는 솔레노이드코일의 극저온 절연특성을 AC 내전압 절연내력 실험과 임펄스 내전압 절연내력 실험을 통해 알아보았다. 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 13.2kV/630A급 초전도한류기용 솔레노이드코일의 절연설계를 하였으며, 그 결과를 다음의 표 1에 정리하였다.



<그림 1> 솔레노이드코일의 절연특성 실험



〈그림 2〉 솔레노이드코일의 턴 간 절연특성 실험 결과



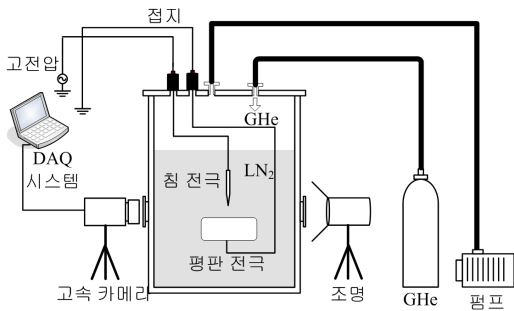
〈그림 3〉 솔레노이드코일의 층 간 절연특성 실험 결과

〈표 1〉 13.2kV/630A급 초전도한류기용 솔레노이드코일의 설계값

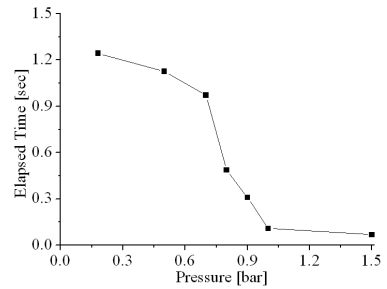
항 목	값
층의 깊이	4mm
층 간 거리	2mm
층 간 거리	35mm
보빈과 cryostat 간의 거리	100mm

## 2.2 냉각시스템의 절연설계

초전도한류기와 같이 사고전류에 의한 온도상승이 급격하게 발생하는 전력기기용 냉각시스템으로는 과냉질소 냉각시스템이 가장 적합하다고 알려져 있다[3]. 과냉질소 냉각시스템에서는 포화 액체질소 냉각시스템에 비해 초전도선재의 임계전류값과 열전도도가 높고 절연내력 특성이 우수한 장점이 있다. 일반적으로 과냉질소 냉각시스템의 압력은 비응축 기체인 기체헬륨을 사용하여 조절한다[3]. 따라서 주입되는 기체헬륨의 압력에 따라 액체질소의 절연내력 특성이 변화하기 때문에 본 실험에서는 77K의 포화 액체질소를 65K까지 냉각시킨 후에 기체헬륨을 사용하여 시스템의 압력을 0.1기압에서부터 1.5기압까지 변화시키면서 절연과 후 발생하는 기포의 소멸시간을 측정하였다. 기포의 소멸시간은 절연내력의 크기와 반비례하며, 기포가 빨리 소멸될수록 절연내력이 높다는 것을 의미한다. 본 실험에서 시험전극은 침 대 평판 전극을 사용했으며 일정한 크기의 절연과피 에너지를 기준으로 절연특성을 비교하기 위해서 모든 실험에서 35kV의 임펄스 전압을 인가하여 절연과피 현상을 유도하였다. 그림 4에는 기포 소멸시간을 측정하기 위한 실험 구성도를 간략하게 나타내었으며 그림 5에는 압력의 크기에 따른 기포 소멸시간의 변화를 나타내었다. 그림 5에서 보는 바와 같이 65K, 0.1기압의 포화 액체질소 상태에서 절연과피에 의해 발생된 기포는 1.2초가 지난 후에 완전히 소멸되었지만 1기압 이상의 압력 하에서는 기포 소멸시간이 급격히 단축되어 절연과피 현상이 발생한 후 약 0.1초 이내에 기포가 모두 소멸되는 것을 알 수 있다. 이 실험을 통해서 65K의 초전도한류기용 과냉질소 냉각시스템은 1기압 이상의 압력일 때 절연내력 특성이 현저하



〈그림 4〉 기포 소멸시간 측정을 위한 실험 구성도



〈그림 5〉 액체질소의 압력에 따른 기포 소멸시간의 변화



〈그림 6〉 AC 내전압 절연내력 실험 장면

게 상승된다는 것을 알 수 있다. 따라서 시스템 내에서 발생한 기포의 원활한 소멸을 위해서 13.2kV/630A급 초전도한류기의 적정 압력을 1기압 이상으로 결정하였다.

## 3. 초전도한류기의 절연내력 실험

앞서 기술한 바와 같이 절연내력 특성실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 13.2kV/630A급 무유도 권선형 고온초전도 한류기의 절연설계를 하고 제작하였으며, 지난 2006년 12월에는 한국전기연구원 내 대전력시험동에서 초전도한류기에 대한 AC 내전압 절연특성 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 AC 143kV의 절연내력 특성을 얻을 수 있었으며 이 값은 IEC 60694를 기준으로 약 72.5kV급 교류차단기의 절연내력 시험기준과 동일한 값으로써 배전급 차단기의 절연내력 시험기준의 약 3배에 달하는 우수한 결과이다. 또한 이 실험결과를 현재까지 개발된 초전도한류기의 절연특성 중 가장 우수한 결과로써 큰 의미를 가진다. 그림 6에는 초전도한류기의 절연특성 실험 장면을 나타내었다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 13.2kV/630A급 초전도한류기용 설계 파라미터를 도출하기 위해서 솔레노이드코일과 과냉질소 냉각시스템의 절연특성을 연구하였다. AC 내전압과 임펄스 내전압 절연내력 특성실험을 통해서 턴 간 거리 및 층 간 거리 등 초전도한류기용 솔레노이드코일의 설계사양을 결정하였다. 또한 절연과피 실험에 의해 발생된 기포의 소멸시간을 측정함으로써 초전도한류기와 같이 순간적으로 막대한 에너지가 발생하는 전력기기용 냉각시스템의 운전조건을 도출할 수 있었다. 이러한 설계 파라미터를 이용하여 제작한 13.2kV/630A급 초전도한류기는 72.5kV급 차단기의 AC 내전압 절연내력 시험기준을 상회하였으며, 현재까지 개발된 초전도한류기 중에서 가장 우수한 절연내력 특성을 확인하였다. 본 연구결과는 향후 배전급 이상의 상용화급 초전도한류기를 개발하기 위한 절연설계 기초데이터로 활용될 수 있을 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] M. Noe and B. R. Oswald, "Technical and Economical Benefits of Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2, pp. 1347-1350, June 1999.
- [2] Hyoungku Kang, Chanjoo Lee, Seong Eun Yang, Tae Kuk Ko, and Bok-Yeol Seok, "Dielectric Tests of Superconducting Coils for Development of High Voltage Superconducting Machines," Applied Superconductivity Conference 2006, poster no. 3LF01, Sept. 2006.
- [3] Hyoungku Kang, Hyung Jin Kim, Duck Kweon Bae, Min Cheol Ahn, Ho-Myung Chang, and Tae Kuk Ko, "Sub-cooled Nitrogen Cryogenic Cooling System for Superconducting Fault Current Limiter by Uing GM-cryocooler," Cryogenics, vol. 45, pp. 65-69, 2005.