

고온초전도변압기 개발을 위한 모델 권선의 절연 설계 및 평가

Insulation Design and Test of Model Windings for the Development of High Temperature Superconducting Transformer

정종만, 백승명, 광동순, 김상현

Jong-Man Joung, Sung-Myeong Baek, Dong-Sun Kwak and Sang-Hyun Kim

Dept. of Electrical Eng., Gyeongsang Nat'l Univ.(Engineering Research Institute)

Abstract

In the response to increasing the demands for electrical energy, much effort aimed to develop and commercialize 1MVA HTS power equipments that is supported by a grant from center for Applied Superconductivity Technology of the 21st Century Frontier R&D Program funded by the Ministry of Science and Technology is going on in Korea. For the development, the cryogenic insulation and winding insulation of it in this paper are discussed. In the first many types of dielectric insulating tests were carried out. In detail Breakdown characteristics of LN₂, FRP and turn insulating films, flashover characteristics along the FRP surface in LN₂ were verified after distinguishing insulation components in HTS windings. And then model windings were designed and insulation test was conducted. These included a AC withstand voltage test of 50kV rms and a lightning impulse test of 150kV at peak.

Key Words : HTS Transformer, Cryogenic Insulation, Liquid Nitrogen,

1. 서론

고온초전도 선재 제작 기술이 발달되어 km급의 장척 선재에서 임계전류가 100A이상이고 기계적 특성이 우수한 고온초전도 도체가 생산되고 있다. 이와 같은 초전도 기술의 발전은 에너지 소비 밀도의 증가, 환경문제에 대한 관심 확대, 전력증설을 위한 부지확보문제 등이 부각됨에 따라 고효율화, 소형화 및 대용량 에너지 전송, 변환을 가능하게 하는 초전도 응용기기의 개발연구를 더욱더 활성화시키고 있다.

네덜란드 Onnes가 1911년에 수은에 대한 온도에 따른 전기저항 측정 연구 중 발견한 초전도 현상은 수 많은 연구자들의 노력에 의해 현재에 이르러 고온초전도케이블, 고온초전도환류기, 고온초전도변압기, 고온초전도모터 등이 2011~2015년 경 실용화가 유력하다고 전망되고 있다[1].

특히 고온초전도변압기에 관한 연구 성과들이 세계적으로 다양하게 발표되고 있다. 일본에서는 류슈

대학의 주도 하에 단상 1MVA급 고온초전도 변압기가 이미 개발되었고, 현재 3상 확장 연구 중에 있다. 그리고 미국에서는 Waukesa Electric Systems사의 주축으로 5/10MVA급의 초전도변압기가 개발되어 전력계통에서의 시험 운전을 실시하였으며, 현재 30MVA급의 개념설계를 실시하였다. 또한 독일의 Siemens에서는 전력 응용을 위한 경량 고온초전도 변압기 개발에 주력하고 있다[2].

국내에서는 시험기로서 10kVA 단상 고온초전도 변압기가 순천향대학교에서 개발, 시험되었으며, 현재 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 총 3단계 연구 중 1단계 연구 목표로 단상 1MVA 22.9/6.6kV 고온초전도 변압기 개발 연구가 한국산업기술대학의 주관으로 진행 중이다.

2. 고온초전도변압기

2.1 변압기 구성

현재 개발 중인 1MVA 고온초전도변압기는 턴 당 전압이 27.5V로서 고압측 총 832회, 저압측 240회의 코일이 고압측 8개, 저압측 4개의 더블팬케이코일로 각각 구성된다.

그림 1은 고온초전도변압기 구성의 개략도를 나타낸다. 고온초전도변압기는 크게 저온용기(cryostat), 철심, 과냉각(66K<T<77K)을 위한 냉동기 그리고 권선 부로 구성되고, 저온용기는 FRP(Fiber Reinforced Plastic)로 제작되어 중간에 철심(core)가 관통할 수 있는 동축 원통 형상으로 열 절연(진공과 super-insulation)이 잘된 극저온 용기로서 철심과 권선 부간의 중요한 절연물 역할을 하게 된다. 냉동기는 탑플랜지(top flange)에 부착되어 권선 외부를 둘러싸는 원통 전도판을 통해 냉매인 액체질소를 과냉각하게 된다. 액체질소를 과냉각함으로써 도체의 임계전류 특성 향상과 더불어 액체질소의 절연특성을 향상시킬 수 있다.

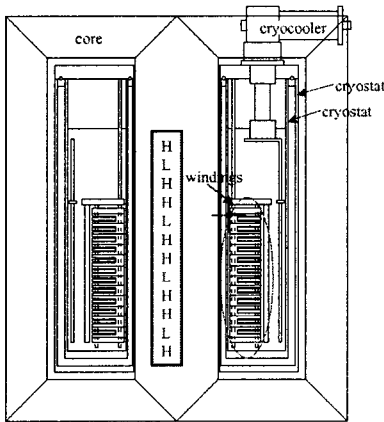


그림 1. 고온초전도변압기 구성

변압기 권선은 일정한 형태의 더블팬케이코일(double pancake coil)로 모듈(module)화 되어 고압측의 경우 8개의 더블팬케이코일이 직렬 접속되며, 저압측의 경우 4병렬 도체를 사용한 더블팬케이코일 4개가 직렬 접속하게 된다. 이때 권선의 배치는 더블팬케이코일 3개가 고-저-고(H-L-H) 순서로 4회 반복되어 전체 변압기 권선을 구성하게 된다.

2.2 절연 구조

그림2는 고온초전도변압기 권선의 고-저-고 순서의 더블팬케이코일에 대한 절연 구조를 나타낸다. 더블팬케이코일의 대칭축(axis of symmetry)에서 좌측 부만을 나타낸 것으로 고압측 코일간의 직렬 접속된 상태를 보여주고 있다. 더블팬케이코일은 냉각채널(cooling channel)이 설치된 권선 보빈(bobbin)과 코일 부, 층간절연용 스페이스(spacer)로 이루어져

있고, 그림에 표시된 가, 나, 다 부분으로 절연 구성을 구분할 수 있다.

가. 코일 외측과 직렬접속 단자 간의 고-저압 간 절연

나. 더블팬케이코일 내부의 층 간 절연

다. 권선 포머 내 측을 통한 코일 내 측간의 고-저압 절연

절연구성 '가'는 권선 포머의 표면을 따른 연면방전 특성과 액체질소의 절연특성 그리고 '나'와 '다'는 층간 스페이스, 권선 포머에 대한 연면방전 특성에 의하여 절연내력이 결정된다.

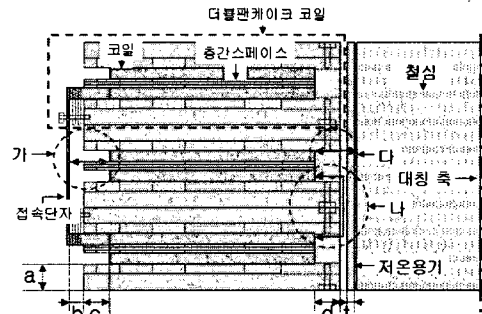


그림 2. 고온초전도변압기의 절연 구조

3. 변압기 권선 모델 설계 및 제작

3.1 절연 설계 기초 실험

22.9kV급의 고온초전도변압기의 BIL(basic insulation level)은 Impulse 150kV, AC 50kV이다. 따라서 각 절연구성에서는 이에 준한 절연 성능을 가져야 할 것이다.

그림 3은 FRP 절연판의 두께에 따른 절연파괴 특성을 나타낸다. 극저온에서 기계적 특성 및 전기적 절연 특성이 우수하여 극저온 구조물로서 널리 사용되고 있는 FRP의 절연두께를 0.5, 1, 2mm로 하였을 경우 구(지름 7mm)-평판 전극을 이용하여 AC 및 Impulse 절연 파괴 시험을 하였다.

FRP 두께 2mm의 경우 AC 절연파괴 전압은 약 50kV이며 Impulse의 경우는 약 120kV로 24배 정도의 비를 나타낸다. 따라서 FRP의 절연파괴 특성은 impulse 절연 특성이 더욱 열악하게 나타나므로 절연설계 시 impulse 절연파괴 결과를 기준으로 하여야 할 것이다. Impulse 150kV 절연시험을 기준시 FRP 절연판은 약 24mm 이상이 되어야 할 것이다.

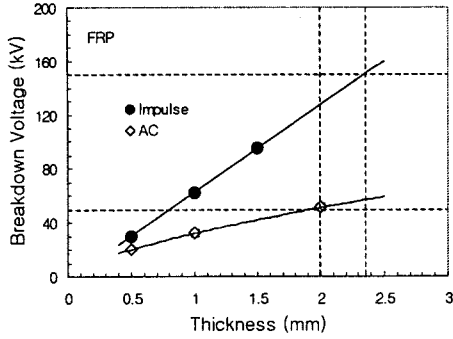


그림 3. FRP의 액체질소 중 절연과파 특성

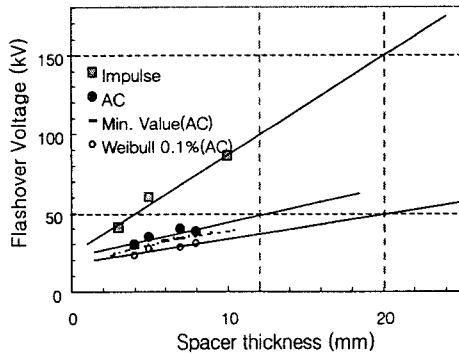


그림 4. 액체질소 중 FRP의 연면방전 특성

그림 4는 액체질소 중 FRP 연면방전의 AC 및 impulse 특성을 비교한 그림이다. 고온초전도 도체와 유사하게 모의 제작된 Ag 테이프(0.25mm×3mm)를 사용하여 1회 권선된 코일 두 개를 상, 하부로 배치하고 그 사이에 FRP 막대형 스페이스를 두었을 경우 연면방전 시험을 하였다. 스페이스 두께로서 연면거리를 조절하였다. AC 연면방전의 경우 20회 이상의 시험 데이터를 이용하여 평균값, 최소값 그리고 와이불(weibull) 분포해석을 하였을 경우 누적과파확률 0.1%의 값을 나타낸다.

스페이스 두께 약 5mm일 경우 AC 방전 전압은 약 35kV이고 impulse 방전전압은 약 60kV로서 약 1.7배 정도의 비를 가진다. 따라서 연면방전 역시 impulse 환경이 더욱더 열악하게 나타나므로 절연설계시 impulse 절연특성을 기준으로 하여야할 것이다. Impulse 150kV 절연시험을 기준시 스페이스 두께는 약 20mm 이상이 되어야 할 것이다. 그리고 더블팬케이크 내부의 층간 스페이스는 고압의 경우 8단으로 전압이 분담되므로 1/8 수준으로도 적당할 것이다.

또한 그림에서 나타내는 바와 같이 impulse 150kV의 BIL에 있어서 AC 와이불 분포 해석에 의한 누적확률분포 0.1%의 절연 설계치가 impulse 설계치와 유사하게 나타나고 있어 액체질소의 AC 절연과파 시험을 통해 impulse 절연내력을 추정할 수

있을 것으로 사료된다.

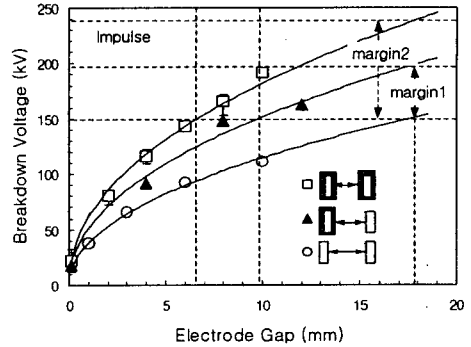


그림 7. 도체 절연특성

그림 7은 도체 절연특성을 나타낸다. 고온초전도 도체와 유사하게 모의 제작된 동 테이프(0.3mm×4mm)를 전극으로 사용하거나, Kapton 절연지(0.075mm×10mm)를 이용하여 10% overlap 권선법에 따라 3중으로 절연한 동 테이프를 전극으로 사용하였다.

절연내력 150kV를 기준으로 하였을 경우 두 전극 중 한 전극만을 절연하였을 경우 두 전극 모두 나도체일 경우에 비해 약 50kV가 크게 나타나 약 1.3배, 두 도체 모두 절연되었을 경우는 약 1.6배의 절연 여유가 생길 것으로 사료된다.

3.2 변압기 권선 모델

절연설계를 위한 기초 실험을 통해 impulse 150kV의 BIL 기준에 대한 표 1과 같은 절연거리 계산 실험식을 구하였다. 실험식을 기준으로 앞서 구분한 절연구성에 대한 절연거리를 계산하고 그림 5와 같이 더블팬케이크 코일을 권선하기 위한 보빈을 설계하였다. 절연물 및 구조물은 모두 극저온 중 절연특성 및 기계적 특성이 우수한 FRP를 사용하였다.

표 1. 절연거리 계산 실험식

액체질소	FRP 연면방전
$V_{BD}=38.036d^{0.4/80}$	$V_{SF}=20.873L^{0.6/41}$

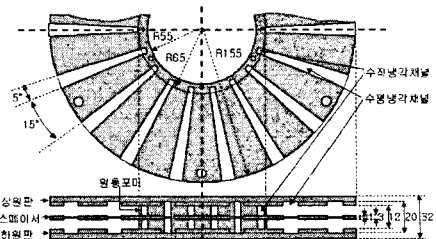


그림 5. 더블팬케이크 코일 보빈 설계도

더블팬케이프 코일은 Kapton 절연지를 이용하여 10% overlap 권선법에 따라 고온초전도 도체와 유사하게 모의 제작된 동 테이프에 3중으로 절연한 도체를 사용하였다. 4~5kg의 범위에서 인장력을 주어 100m×2(더블)의 150turns×2(더블)의 코일을 권선하였다. 그림 6은 최종적으로 제작된 변압기 모델 권선을 보여준다.

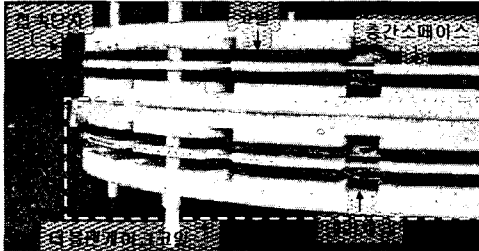


그림 6. 변압기 모델 권선

3.2 절연 평가

고온초전도 응용기기는 초전도 특성을 응용한 새로운 전력기기로서 절연특성을 더불어 기기 성능을 검증하기 위한 시험 방법이 아직 세계적으로 확립되어 있지 않다. 따라서 구조가 유사한 유입 변압기의 절연시험 방법에 준하여 절연 시험을 행하고 있다. 본 연구에서 설계 제작된 변압기 모델 권선은 표 3과 같은 내전압 시험을 행하여 충분한 절연특성을 얻을 수 있었다.

표 3. 변압기 모델 권선 내전압 시험

유 도	상용주파	임 펄 스
2.9kV 1분간	50kV 1분간	150kV(1.2×50μs) 3회

4. 결 론

1MVA, 22.9/6.6kV 고온초전도변압기를 개발하기 위하여 변압기 모델 권선의 절연설계, 제작 및 절연 평가하였다.

우선, 개념 설계된 변압기의 구성을 분석하고 절연구성을 구분하였다. 그리고 액체질소 중에서 절연 구성에 따른 기초절연실험을 통하여 절연데이터를 확보하고 모델 변압기의 절연거리를 계산하였으며, 각종 내전압 시험을 만족할 수 있는 변압기 모델 권선을 제작할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대

초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Osami Tsukamoto, et al, "Overview of R&D activities on application of superconductivity to power apparatus in Japan", Cryogenics 42, pp. 337-344, 2002.
- [2] S.W.Schwenterly, et al, "Development of HTS power transformers for the 21st century: Waukesha Electric Systems/IGC-SuperPower/RG&E/ORNL SPI collaboration", Physica C 382, pp. 1-6, 2002.