

AC Loss를 고려한 22.9kV급 Mini-Model 변압기의 절연 설계 및 시험

論 文

53C-8-4

Insulating Design and Test of 22.9kV Class Mini-Model Transformer Considering AC Loss

白承明* · 鄭鍾萬** · 郭東洵* · 金海鍾*** · 石福烈[§] · 金相賢^{§§}

(Seung-Myeong Baek · Jong-Man Joung · Dong-Sun Kwag · Hea-Jong Kim · Bok-Yeol Seok · Sang-Hyun Kim)

Abstract - This paper presents experimental data from model windings with different arrangement of coil in order to provide information to design a 22.9kV class HTS transformer. Before experiment, the composite insulation of two different type of HTS transformers are investigated. The first basic of investigation is a breakdown characteristic of liquid nitrogen and flashover characteristic on the GFRP surface under ac and impulse, The second investigation is insulation design, manufacture and test of model windings. These include a AC withstand voltage test of 50 kV rms and a lightning impulse test of 150 kV at peak.

Key Words : Insulation Design, HTS transformer, Breakdown, Withstand voltage

1. 서 론

에너지 소비 밀도의 증가, 환경문제에 대한 관심 확대, 전력증설을 위한 부지확보문제 등이 부각됨에 따라 고효율화, 소형화 및 대용량 에너지 전송, 변환이 가능한 초전도 응용기기의 개발연구가 활발히 진행되고 있다. 이미 급속계 초전도체를 이용한 초전도 MRI 등은 상용화되었고 임계온도 및 가장 특성이 향상된 고온초전도체를 이용한 전력기기 분야의 고온초전도 케이블, 한류기, 변압기, 모터와 발전기 등 최근 응용에 대한 연구결과가 발표되어 수 년 내에 실용화가 유력하다고 전망되고 있다[1,2].

실용화가 유력시 되는 기기 중 고온초전도 변압기에 관한 연구 성과로 일본에서는 큐슈대학 및 큐슈전력의 주도 하에 단상 1MVA급 고온초전도 변압기를 개발하고, 현재 3상 확장 연구 중에 있다. 미국에서는 Waukesa Electric Systems사가 주축으로 5/10MVA급의 초전도변압기가 개발되어 전력계통에서의 시험 운전을 실시하였고 현재 30MVA급의 개념설계를 실시하였으며, 독일의 Siemens에서는 전철 응용을 위한 경량 고온초전도변압기 개발에 주력하고 있다[3].

국내에서는 시험기로서 10 kVA 단상 고온초전도변압기가 순천향대학교에서 개발, 시험되었으며, 현재 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 총 3단계 연구 중 1단계 연구 목표로 단상

1MVA 22.9/6.6kV 고온초전도변압기 개발 연구가 한국산업기술대학의 주관으로 진행 중이다. 국내에서 개발하는 고온초전도 변압기는 더블팬케이크 코일(double pancake coil)을 교호배치 방식을 채택하여 기기의 컴팩트화 및 최적 냉각을 위한 연구하여 상용화급 모델 기기를 제작, 시험하였다[4,5]. 하지만 팬케이크의 경우 기기의 컴팩트화는 유리하지만 코일에서 발생하는 교류손실은 나선형보다 높은 것으로 보고 되었으며[6], 교호배치의 경우 팬케이크 끝단에 높은 전계가 발생하기 때문에 전계의 분산이 필요하다. 따라서 교류손실 저감과 전계분산 대책으로 더블팬케이크 코일의 동심배치에 대한 연구가 진행 중이다. 교호배치를 동심배치로 코일의 배치를 달리할 경우 약 2.7-3.2배의 교류손실이 저감될 것으로 기대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 향후 개발될 저손실 고온초전도 변압기를 위하여 교류손실과 전계분산을 고려하여 코일의 배치가 다른 변압기의 절연구성을 분석하고 절연과파 시험을 통하여 축적한 데이터를 축적하였다. 이 데이터를 이용하여 코일의 배치가 다른 22.9kV급 미니 모델 변압기를 절연설계 및 제작하여 기존의 변압기 시험방법을 적용하여 내전압 시험을 행하여 비교 분석하였다.

2. 고온초전도 변압기

2.1 교호배치 고온초전도 변압기

현재 개발 중인 1MVA 고온초전도 변압기는 교류손실 저감과 전계 분산을 위해 더블팬케이크 코일을 교호배치와 동심배치 두 가지를 고려하고 있다.

교호배치 고온초전도 변압기 구성은 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)이 관통할 수 있는 동 축 원통 형상의

* 正 會 員 : 慶尙大 電氣電子工學部 博士課程

** 正 會 員 : 韓國電力公社 電力研究員 配電技術그룹 研究員

*** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 超傳導應用研究그룹 先任研究員

[§] 正 會 員 : 現代重工業 機械電氣研究所 先任研究員

^{§§} 正 會 員 : 慶尙大 電氣電子工學部 教授 · 工學院 研究員

接受日子 : 2004年 4月 8日

最終完了 : 2004年 5月 10日

로 열 절연(진공과 super-insulation)이 잘된 극저온 용기로서 철심과 권선 간의 중요한 절연물 역할을 하게 된다. 냉동기는 탑 플랜지(top flange)에 부착되어 권선 외부를 둘러싸는 원통 전도 판을 통해 냉매인 액체질소를 과냉각하게 된다. 액체질소를 과냉각함으로써 도체의 임계전류 특성 향상과 더불어 액체질소의 절연특성을 향상시킬 수 있다.

턴 당 전압이 27.5V로서 고압측 총 832회, 저압측 240회의 코일이 고압측 8개, 저압측 4개의 더블팬케이크 코일로 각각 구성된다. 이 더블팬케이크 코일은 모듈(module)화 되어 고압측의 경우 8개의 더블팬케이크 코일이 직렬 접속되며, 저압측의 경우 4병렬 도체를 사용한 더블팬케이크 코일 4개가 직렬 접속하게 된다. 이때 권선의 배치는 더블팬케이크 코일 3개가 위쪽에서부터 고-저-고(H-L-H) 순서로 4회 반복되어 전체 변압기 권선을 구성하게 된다.

2.2 동심배치 고온초전도 변압기

동심배치 고온초전도 변압기 구성은 교호배치와 코일의 배치가 다른 것이 큰 차이점이다. 현재 검토 중인 1MVA 고온초전도 변압기는 고압측 총 840회, 저압측 240회의 코일이 고압측 40개, 저압측 20개의 더블팬케이크 코일로 각각 구성된다. 이 더블팬케이크 코일은 모듈(module)화 되어 고압측의 경우, 20개의 더블팬케이크 코일이 직렬 접속되어 저압측의 내측과 외측에 각각 배치된다. 저압측의 경우 4병렬 도체를 사용한 더블팬케이크 코일 20개가 직렬 접속되어 고압측 내부에 놓이게 된다. 즉, 권선의 배치는 더블팬케이크 코일 20개가 직렬로 연결된 원통이 내부에서부터 고-저-고(H-L-H) 순서로 전체 변압기 권선을 구성하게 된다. 표 1에 교호 및 동심배치 변압기 비교하여 나타낸다.

표 1 교호 및 원통배치 고온초전도 변압기 비교
Table 1 Comparison of reciprocal and concentric arrangement HTS transformer

코일 배치		교호	동심
설계 용량		1MVA	
코일 형태		Double Pancake	
보빈수	H.V	8	40
	L.V	4	20
턴수	H.V	832	840
	L.V	240	240
도체수	H.V	1	1
	L.V	4	4

2.3 절연 구조

그림 2와 3에 교호 및 원통배치 고온초전도 변압기 권선의 고-저-고 순서의 더블팬케이크 코일에 대한 절연 구조를 각각 나타낸다. 그림 2는 교호배치에서 변압기를 대칭축(axis of symmetry)에서 좌측 부만을 나타낸 것으로 고압측 코일 간의 직렬 접속된 상태를 보여주고 있다. 더블팬케이크 코일은 냉각채널(cooling channel)이 있는 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. 권선 포머 내 측을 통한 코일 내 측간의 고-저압 절연
다. 더블팬케이크 코일 내부의 층 간 절연

절연구성 '가'는 권선 포머의 표면을 따른 연면방전 특성과 액체질소의 절연특성 그리고 '나'는 층간 스페이스, 권선 포머에 대한 연면방전 특성, '다'는 층간 스페이스, 권선 포머에 대한 연면방전 특성에 FRP의 절연과피 특성에 의해 절연내력이 결정된다. 따라서 액체질소의 절연내력과 액체질소 중 FRP의 연면방전 및 FRP의 절연과피 특성이 절연설계에 중요한 요소가 된다.

그림 3은 동심배치에서 변압기를 대칭축(axis of symmetry)에서 좌측 부만을 나타낸 것으로 고압측과 저압측의 코일간의 직렬 접속된 상태를 보여주고 있다. 절연 구성은 교호배치에서 본 것과 같이 가, 나와 다르 부분으로 절연 구성을 구분할 수 있다.

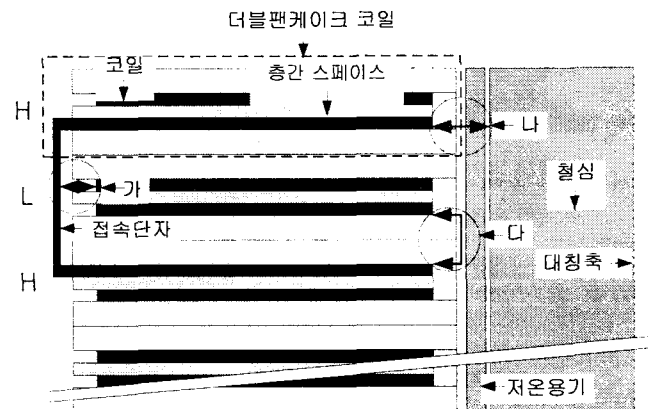


그림 2 교호배치 고온초전도 변압기의 절연 구조
Fig. 2 Insulation components of reciprocal arrangement HTS transformer

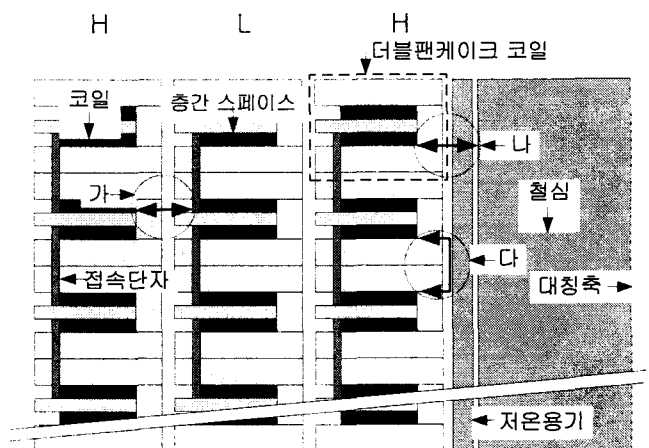


그림 3 동심배치 고온초전도 변압기의 절연 구조
Fig. 3 Insulation components of concentric arrangement HTS transformer

3. 변압기 권선 모델 설계 및 제작

3.1 절연 설계 기초 실험

22.9kV급 고온초전도 변압기의 요구되는 절연강도는 impulse 150kV BIL, AC 50kV이다. 따라서 각 절연구성에서는 이에 준한 절연성능을 가져야 할 것이다.

그림 4는 impulse 및 AC전압 하에서 액체질소의 절연파괴 특성을 나타낸다. 기기 제작에 사용될 것으로 기대되는 고온 초전도 테이프는 모서리 부분이 날카로운 부분을 있으므로 액체질소의 절연특성 고찰을 위해 침-평판 전극계를 이용하였다. 침의 선단 반경은 25 μm이고, 선단각은 24 °이다. 평판 전극의 직경은 60 mm이고 침, 평판 모두 SUS 304로 제작된 것이다. 그림 4에서 나타나듯이 전극간격이 증가함에 따라 절연파괴 전압은 증가하고 전극간격 20 mm에서 impulse 절연파괴 전압이 AC 절연파괴전압의 두 배 정도로 나타났다.

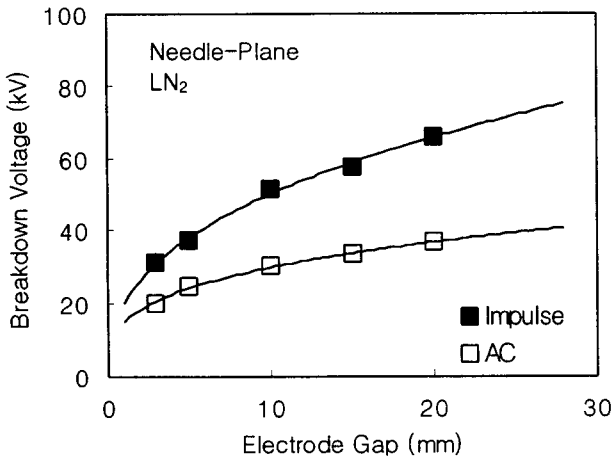


그림 4 FRP의 액체질소 중 절연파괴 특성
Fig. 4 Breakdown voltage as a function of electrode gap in liquid nitrogen

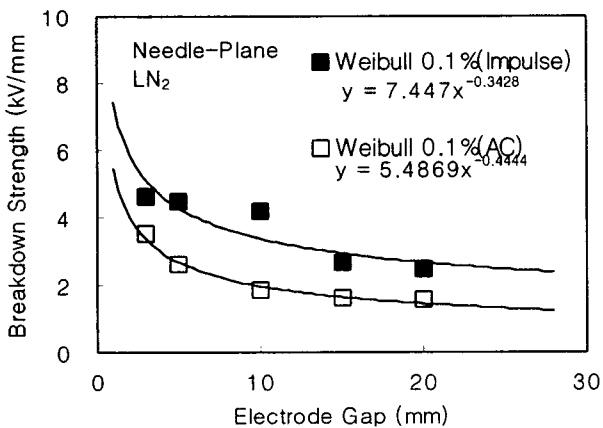


그림 5 전극 간격에 따른 0.1% 절연파괴강도
Fig. 5 0.1% breakdown strength as a function of electrode gap

그림 5에 0.1% 절연파괴 강도를 나타낸다. 그림 4에서 구한 절연파괴 전압을 와이블 분포해석을 통하여 절연설계에 사용할 절연파괴 강도를 구하였다.

본 연구에서는 그림 5에 나타냈듯이 액체질소의 절연파괴 강도는 impulse 절연파괴 전압에서 구한 식 (1)을 이용하여 절연설계를 하였다.

$$E = 7.447g^{-0.3428} (kV/mm) \quad (1)$$

그림 6은 FRP 절연 판의 두께에 따른 절연파괴 특성을 나타낸다. 극저온에서 기계적 특성 및 전기적 절연 특성이 우수하여 극저온 구조물로서 널리 사용되고 있는 FRP의 절연 판을 두께 0.5, 1, 2mm로 각 선택하였으며, SUS 304 재질인 구(지름 7mm)-평판 전극을 이용하여 AC 및 impulse 절연파괴 시험을 하였다.

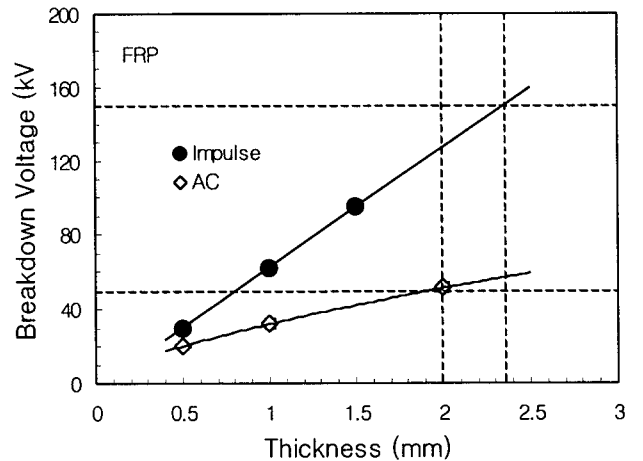


그림 6 액체질소 중 절연파괴 전압의 FRP두께 의존성
Fig. 6 Dependence of breakdown voltage on FRP thickness in liquid nitrogen

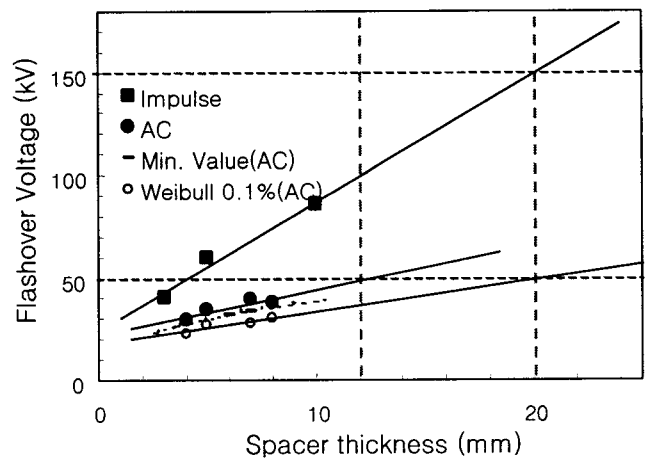


그림 7 액체질소 중 연면방전 전압의 spacer 두께 의존성
Fig. 7 Dependence of flashover voltage on spacer thickness in liquid nitrogen

FRP 두께 2mm의 경우 AC 절연파괴 전압은 약 50kV이며 impulse의 경우는 약 120kV로 2.4배 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 기준 시 FRP 절연판은 약 2.4mm 이상이 되어야 할 것이다.

그림 7은 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 와이블 (weibull) 분포해석을 하였을 경우 누적파괴확률 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 하여야 할 것이다. Impulse 150kV 절연시험을 기준 시 스페이스 두께는 약 20mm 이상이 되어야 할 것이다. 그리고 더블팬케이크 내부의 층간 스페이스는 고압의 경우 8단으로 전압이 분담되므로 1/8 수준으로도 적당할 것이다.

또한 그림 7에서 나타내는 바와 같이 impulse 파괴치는 AC 와이블 분포해석에 의한 누적확률분포 0.1%의 파괴치에 비해 3배정도로 나타나고 있어(연면거리 20mm에서 누적확률분포 0.1%의 절연 파괴치는 50kV, impulse 파괴치는 150kV) 액체질소의 AC 절연파괴시험을 통해 impulse 절연내력을 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

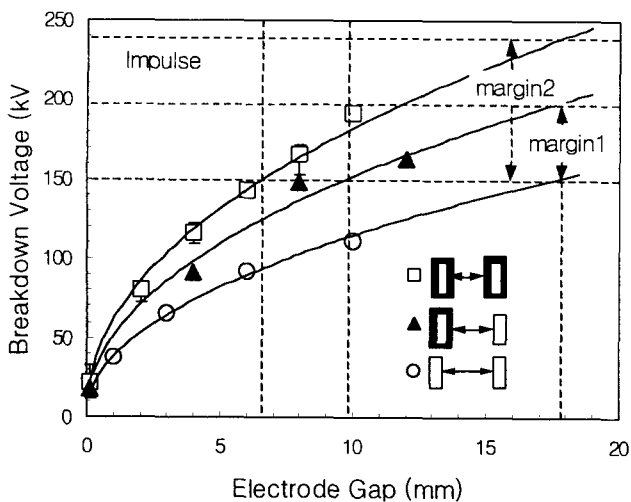


그림 8 절연 도체의 절연파괴 특성
Fig. 8 Breakdown characteristics of insulated conductor

그림 8은 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 전

극으로 사용하였다.

절연내력 150kV를 기준으로 하였을 경우 두 전극 중 한 전극만을 절연하였을 경우 두 전극 모두 나 도체일 경우에 비해 약 50kV가 크게 나타나 약1.3배, 두 도체 모두 절연되었을 경우는 약1.6배의 절연여유가 생길 것으로 사료된다.

3.2 변압기 권선 모델

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

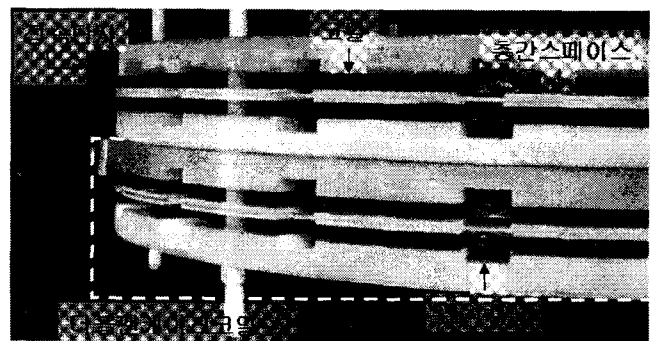


그림 9 교호배치 변압기 모델 권선
Fig. 9 Model winding of reciprocal arrangement transformer

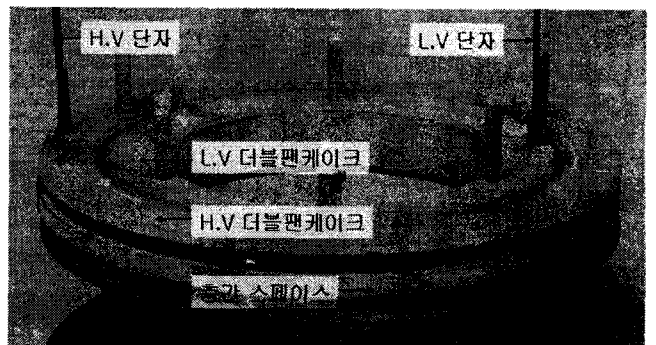


그림 10 동심배치 변압기 모델 권선
Fig. 10 Model winding of concentric arrangement transformer

그림 9는 최종적으로 제작된 교호배치 변압기 모델 권선을 보여주고 그림 10은 동심배치 변압기 모델 권선을 보여준다. 그림 9와 10에 나타난 더블팬케이크 코일은 Kapton 절연지를 이용하여 10% overlap 권선법에 따라 고온초전도 도체와 유사하게 모의 제작된 동 테이프에 3중으로 절연한 도체를 사용하여 4~5kg의 범위에서 인장력을 주어 권선하였으며, 그림 9에 100m×2(더블)의 150turns×2(더블)의 교호배치 코일을 나타내고 그림 10에 7turns×2(더블)의 동심배치 권선을 나타낸다.

3.3 절연 평가

고온초전도 응용기기는 초전도 특성을 응용한 새로운 전력 기기로써 절연특성을 더불어 기기 성능을 검증하기 위한 시험 방법이 아직 세계적으로 확립되어 있지 않다. 따라서 구조가 유사한 유입 변압기의 절연 시험 방법에 준하여 절연 시험을 행하고 있다. 본 연구에서 설계 제작된 변압기 모델 권선은 변압기 유도 전압 시험 방법(ANSI C57. 12.00)과 변압기 충격 전압 시험 방법(JEC-176, IEC76, KS C 0902)을 이용하여 표 2와 같은 내전압 시험을 행하여 시험결과를 표 3에 나타낸다. 교호배치 모델 변압기 권선은 절연내력시험만 행하였지만 동심배치 모델 변압기 권선은 절연내력시험 후 절연파괴 전압까지 구하였다.

표 2 22.9kV급 변압기 내전압 시험 규정
Table 2 Rules of withstand test for a 22.9kV class transformer

항목	기준
유도	45.8kV 1분간
상용주파	50kV 1분간
뇌임펄스	150kV(1.2×50μs) 3회
부분방전	50pC

표 3 변압기 모델 권선 내전압 시험 결과
Table 3 Withstand test results of Model windings of transformer

시험 \ 배치	교호	동심
유도	pass	-
상용주파	pass	pass (BDV=92.3kV)
임펄스	pass	pass (BDV=164kV)
부분방전	-	pass (50pC at 49kV)

동심배치에서 상용주파 전압을 인가한 경우 92.3kV에서 절연파괴가 발생하였고, 고압부 코일과 저압부 리드에서 절연 파괴가 발생하였다. 뇌임펄스 전압을 인가한 경우 164kV에서 절연파괴가 발생하였고, 고압부 코일과 저압부 코일에서 절연 파괴가 발생하였다.

4. 결론

1MVA, 22.9/6.6kV 고온초전도변압기를 개발하기 위하여 교호 및 동심배치 변압기 모델 권선의 절연을 설계, 제작하여

동일 절연레벨인 유입변압기의 절연시험기준을 적용하여 절연내력을 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

개념 설계된 권선의 배치가 다른 두 변압기의 구조를 분석하여 절연구성을 명확히 구분하였다. 그리고 절연구성에 따른 액체질소의 절연특성, FRP의 연면특성 및 관통과피특성 등 절연설계에 필요한 기초절연실험을 통하여 절연데이터를 확보하였다. 이 데이터를 이용하여 22.9kV급 교호 및 동심배치 미니 모델 변압기를 절연설계 및 제작하여 의 절연거리를 계산하여 각 변압기 모델 권선을 제작하였다. 각 변압기 모델 내전압 시험을 행한 결과 내전압 시험 기준을 통과하였다. 본 연구를 통하여 22.9kV급 고온초전도 변압기의 절연설계 기초를 확립하였다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 현대중공업 산학협동 연구지원비의 지원으로 연구되었음.

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] B.W McConnell, "Transformers - A successful Application of High Temperature Superconductors" IEEE Transation on Applied Superconductivity, Vol. 10, No. 1, pp. 716-720, 2000.
- [3] 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.
- [4] S. H. Kim, W. S. Kim, J. T. Kim, K. D. Choi, H. G. Joo, G. W. Hong, J. H. Han, S. J. Lee, and S. Hahn, "Assembling and Insulation Test of 1MVA Single Phase HTS Transformer for Power Distribution", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 5, No. 3, pp. 30-33, 2003.
- [5] Ho-Myung Chang, Yeon Suk Choi, Steven W. Van Sciver, and Thomas L. Baldwin, "Cryogenic Cooling Temperature of HTS Transformers for Compactness and Efficiency", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 1478-1481, 2003.
- [6] M. Polak, P. Usak, J. Pitel, L. Jansak, Z. Timoransky, F. Zizdl, H. Piel "Comparison of Solenoidal and Pancake Model Windings for a Superconducting Transformer", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 1478-1481, 2001.

저 자 소 개



백 승 명 (白 承 明)

1973년 3월 10일생. 1998년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 055-751-5345, Fax : 055-761-8820
E-mail : trebari@hanmail.net



정 중 만 (鄭 鍾 萬)

1971년 9월 16일생. 1997년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국전력공사 전력연구원 배전기술그룹 연구원.

Tel : 042-865-5915 Fax : 042-865-5804
E-mail : jjmany@keri.re.kr



곽 동 순 (郭 東 洵)

1975년 9월 8일생. 2002년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 055-751-5345, Fax : 055-761-8820
E-mail : kds3868@empal.com



김 해 중 (金 海 鍾)

1965년 11월 25일생, 1993년 경상대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1995년~1996년 (주)현대정공 근무, 1996년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원.

Tel : 055-280-1658, Fax : 055-280-1696
E-mail : hjkim@keri.re.kr



석 복 렬 (石 福 烈)

1971년 2월 16일생, 1994년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 3월 일본 큐슈대학 시스템정보과학연구과 졸업(공박). 2000년 4월~2001년 3월 일본 통산성 공업기술원 특별연구원(AIST fellow). 현재 현대중공업주식회사 기계전기연구소 선임연구원.

Tel : 031-289-5070, Fax : 031-289-5050
E-mail : bokyeol@hhi.co.kr



김 상 현 (金 相 賢)

1950년 2월 7일생. 1974년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 일본 오사카대학 전기공학과 졸업(공박). 1986년~1989년 한국전기연구원(KERI) 초전도응용연구그룹 실장. 1999년~2001년 경상대학교 공과대학 학장. 2001년~2003년 한국초전도·저온공학회 회장. 현재 경상대 공대 전기전자공학부 교수.

Tel : 055-751-5345, Fax : 055-761-8820
E-mail : shkim@gsnu.ac.kr