

고온초전도 변압기 및 부싱의 절연설계

The Insulation Design of HTS Transformer and Bushing

천현권¹, 최재형¹, 방만식¹, 김상현^{2*}

H. G. Cheon¹, J. H. Choi¹, M. S. Pang¹, S. H. Kim^{2*}

Abstract: Important key technologies of high- T_c superconducting (HTS) transformer may include the HTS wire technology, bushing technology, cooling technology, AC loss, reduction technology, large current technology, and cryogenic temperature insulation technology. From among others, the cryogenic temperature insulation technology may be specifically a core technology for ensuring reliability for the smaller size, stability, economic efficiency, and power supply of a transformer. Therefore, the electric insulation technology of a superconducting transformer should be prerequisite. Such relevant studies are ongoing, but still, they are very insufficient for establishing the cryogenic insulation technology as of yet.

Therefore, this paper simulated HTS transformer applied with continuous transposed conductor (CTC), which has been studied as a way of reducing AC loss. Also, the paper analyzed the insulation configuration of HTS transformer and bushing, and, accordingly, reviewed various characteristics of insulation breakdown out of liquid nitrogen. Thus, the paper constituted insulation database, and it is going to design the insulation of a transmission class HTS transformer and bushing.

Key Words: Bushing, HTS Transformer, insulation design.

1. 서 론

고온초전도 (HTS) 변압기는 크기와 무게를 줄임에 따른 절연수명의 손실 없이 과부하 용량을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라, 효율의 향상, 환경오염의 감소 및 공간 배치의 용이 등 전력시스템 운용 전반에 걸쳐 많은 이점을 제공할 수 있다. 이에 따라 고온초전도 변압기의 연구와 개발이 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다[1-3].

고온초전도 변압기의 상용화를 위해서는 임계자장, 임계온도 및 임계전류밀도가 향상된 선재의 개발, 극저온 고전압에서의 전기절연 기술 및 고효율 냉각방식

의 개발이 필요하다. 그 중에서도 극저온 고전압 절연 기술은 많은 연구자에 의해 액체질소 (77K)의 절연특성과 기포의 영향 등 액체질소 내에서 발생하는 절연 파괴 현상에 대하여 연구가 이루어져 있으며[4-5], 국내에서도 팬케이크 코일을 모의한 전극계를 이용한 절연파괴, 연면방전과 기포 영향 등에 대하여 많은 연구 결과가 발표되고 있으나 아직 고온초전도 변압기의 실용화 및 상용화를 위해서는 극저온 고전압 절연기술은 매우 미비한 상태이다.

그림 1은 고온초전도 변압기 및 부싱을 나타낸다. 고온초전도 변압기는 권선 뿐만 아니라 권선에 고전압을 인가하기 위한 극저온용 부싱도 필요하다. 또한 154 kV급 고온초전도 변압기에는 여러 개의 부싱이 설치되며 부싱과 권선간의 공간이 제한적이기 때문에 소형화된 부싱이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 교류손실 저감 방법 중 하나로 연구되는 연속전위도체 (CTC) 도체를 적용한 변압기 및 중성점용 60 kV급 부싱의 절연구성을 분류하였으며, 각 절연구성에 따른 모의 실험 결과를 토대로 극저온 절연 데이터베이스를 구축하고 이를 활용하여 154 kV급 고온초전도 변압기 및 60 kV급 고온초전도 변압기용 부싱의 절연설계를 수행하였다.

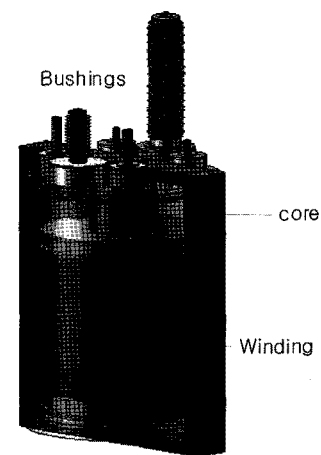


Fig. 1. Schematic drawing of 154 kV class HTS transformer.

2. 고온초전도 변압기의 전기절연설계

고온초전도 변압기는 극저온용기, 철심, 권선 등으로 구성된다. 극저온용기는 원통형의 구조로 이루어져 있으며 철심은 원통의 중심을 관통하는 레그와 원통 양측에 위치하는 레그 두 개를 합한 총 세 개의 레그 철심을 가지는 구조이다. 권선은 원통의 중심에서부터

¹학생회원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 박사과정

²정 회 원 : 경상대학교 전기공학과 및 ERI 교수

*교신저자 : shkim@gsnu.ac.kr

원고접수 : 2009년 09월 24일

심사완료 : 2010년 07월 10일

게재확정 : 2010년 07월 10일

3차-2차-1차 권선으로 배치되는 동심배치구조이다. 절연은 턴간, 층간, 권선간, 대지간 구조로 각각 구성되어진다. 턴간 절연내력은 절연에 사용되는 nomex 절연지의 두께와 지권방법에 의존한다. 층간 절연내력은 보빈과 스페이스의 재료로 사용되는 유리섬유강화플라스틱 (GFRP)의 연면방전 특성에 의존한다. 권선간 및 대지간 절연내력은 액체질소와 배리어(barrier)의 복합절연특성에 의존하게 된다. 이상의 절연 특성 분석을 통해 154 kV급 고온초전도 변압기의 절연설계가 가능하게 된다.

154 kV급 고온초전도 변압기의 전기적 절연설계를 위하여 각 절연구조별 모의 전극계를 이용하여 절연파괴 전압을 측정하고 후 Weibull 통계 처리를 통해 0.1% 절연파괴 전압 값을 구하였다.

턴간 절연 시험용 모델은 12 mm 폭의 알루미늄 선재 10가닥을 서로 연속전위시킨 CTC 소선으로 제작하였다. 턴간 절연은 nomex 절연지를 40%의 중첩율로 지권하였으며, 절연지의 풀림을 방지하기 위하여 1, 2층과 3층의 지권방향을 다르게 제작하였다.

그림 2는 액체질소 중에서의 nomex 절연지 3겹의 극성에 따른 임펄스 (impulse) 절연파괴 결과를 Weibull 확률분포로 나타낸다. 그림에서 실선 주위에 분포한 각 점들은 nomex 절연지의 관통파괴 전압을 나타낸다. 우상단과 좌하단의 점은 각각 최대값과 최소값을 의미하며, y-축의 50%가 평균값을 나타낸다. nomex 절연지의 정극성 및 부극성의 0.1% 절연파괴 확률 전압은 각각 10 kV, 15.5 kV이다.

그림 3은 액체질소 중에서의 GFRP판의 연면방전 결과를 Weibull 확률 분포로 나타낸다. GFRP는 권선의 보빈과 층간 스페이스로 사용이 되기 때문에 층간 절연의 설계를 위해서 연면방전 특성이 필요하다. GFRP 연면방전 길이가 10, 50, 100 mm로 길어짐에 따라 연면방전 확률이 0.1%인 전압은 59.4, 93.6, 128.3 kV로 나타난다.

그림 4는 액체질소 중에서의 전극간 거리 $G=10$ mm, 배리어 크기 90 mm, 두께가 0.5 mm인 경우 배리어 위치에 따른 임펄스 절연파괴 특성 곡선을 나타낸다. 시험용 전극계는 평판전극, 침전극, 전극홀더 및 배리어로 구성된다. 평판전극은 직경 30 mm의 SUS 전극을 사용하였으며, 전계 집중부를 모의하기 위하여 선단반경 $17 \mu\text{m}$, 선단각도 18° 인 침전극인 불평등 전계시스템을 사용하였다. 평판전극과 침전극은 전극홀더에 부착하였고, 전극홀더는 GFRP로 제작하였다. 주 절연부인 고압-저압 권선 간은 전계가 가장 강하게 작용하는 곳으로 권선 부를 지지하여 충분한 이격 거리를 유지하기 위한 권선 간에 얇은 절연물인

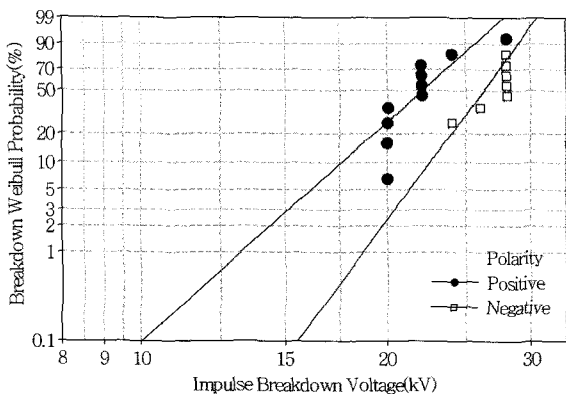


Fig. 2. Weibull probability distribution curve of impulse breakdown of nomex paper.

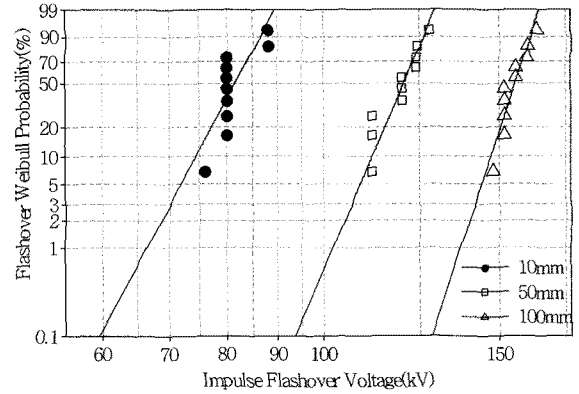


Fig. 3. Weibull probability distribution curve of impulse flashover of GFRP plate.

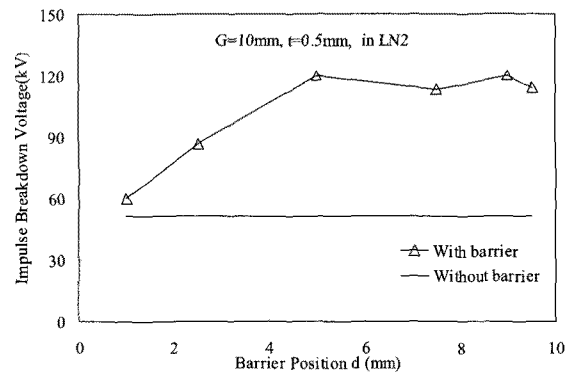


Fig. 4. Impulse breakdown voltage of barrier depending on barrier position.

배리어로 구성하는 절연방식이 유력하며 배리어의 효율적인 사용은 기기의 소형화와 직접적인 관련이 있다. 배리어가 없는 경우인 액체질소만의 절연파괴 전압 값은 그림 중에서 실선으로 나타낸다. 그림에서 배리어가 평판전극 쪽에 가까이 위치할 경우는 배리어가 없는 경우와 유사한 절연파괴 값을 나타내나, 배리어가 평판 전극쪽보다 침전극 쪽에 위치할 경우 절연파괴 전압은 급격히 상승하고 있음을 알 수 있다. 그러나 배리어가 침전극에 밀착한 경우의 절연파괴 전압은 다소 감소하였다.

그림 5는 액체질소 중에서의 전극간 거리 G 에 따른 절연파괴 특성을 나타낸다. 배리어 한 개를 침전극 쪽에 고정시킨 후 침전극과 평판전극사이의 간격을 변화시키면서 절연파괴 전압을 측정하였다. 전극간 거리 G 가 커짐에 따라 절연파괴 전압은 증가한다. 이상의 사실로부터 전극간 거리 G 및 배리어 위치변화에 따라 방전 경로가 길어져서 절연파괴 전압이 상승한 것으로 판단된다.

실험에 의하여 구해진 액체질소 중에서의 nomex 절연지, GFRP, 배리어 등의 절연파괴와 연면방전의 복합적인 기초절연파괴 특성을 이용하여 basic insulation level (BIL) 750 kV를 만족하는 154 kV급 고온초전도 변압기의 권선 절연설계를 수행하였다. 절연설계는 구해진 실험적 결과의 Weibull 통계 처리를 통해 0.1%의 절연파괴 전압을 계산하고 목표 전압인 BIL 750 kV를 만족하는 절연두께 및 이격거리를 계산하는 방식으로 이루어졌다. 154 kV급 변압기의 절연을 위한 턴간 절연은 nomex 절연지 3층으로 하며, 층간은 GFRP 연면길이 3 mm 이상, 1-2

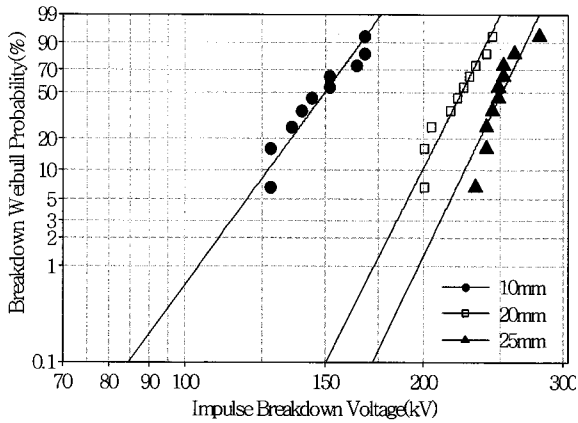


Fig. 5. Weibull probability distribution curve of impulse breakdown of electrode gap.

차 권선간 절연 이격거리는 160 mm 이상, 2-3차 권선간 절연 이격거리는 21 mm 이상으로 설계되었다.

3. 고온초전도 변압기용 부싱의 절연설계

고온초전도 변압기용 부싱의 주요 절연요소는 플랜지 상부의 기중 단부 절연과 절연두께 및 플랜지 하부의 액체질소 중 단부 절연으로 구성된다. 고온초전도 변압기용 부싱은 급격한 온도변화에 대해 낮은 열수축률과 우수한 기계적 강도 및 전기적 절연특성을 가진 절연재료를 사용하여 고전압부인 전류리드를 절연하는 구조이다. 절연체의 연면방전 특성은 절연재료의 종류, 절연물의 형상, 전극의 표면처리, 인가전압의 형태 등에 의해 다양한 특성을 나타낸다.

그림 6은 액체질소 중에서의 GFRP 미니모델의 연면방전 Weibull 확률 분포 곡선을 나타낸다. 미니모델은 반경 15 mm 구리 봉에 GFRP 두께 15 mm 제작하였다. 구리 도체에 고전압을 인가하였고 GFRP 표면에 스테인레스강 재질의 테이프로 접지전극을 연결했다. 각 점의 분포범위를 통해 실험 오차를 구할 수 있으며, 각 연면거리에 대한 10회의 실험 결과들은 약 20~30 kV의 오차 범위를 가지는 것을 알 수 있다. 전극간 거리가 길어짐에 따라 연면방전전압이 나란하게 상승하였다. 전극간 거리가 100 mm 일 때 연면방전이 발생할 확률 0.1%인 전압이 77.6 kV 이고, 전극간 거리가 200, 400, 600 mm일 때는 107.6, 154.4,

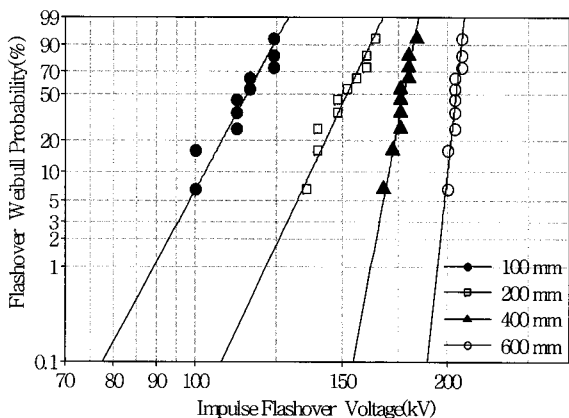


Fig. 6. Weibull probability distribution curve of impulse flashover of GFRP rod.

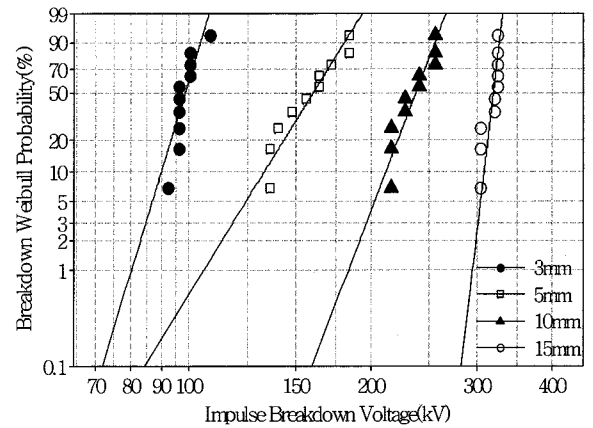


Fig. 7. Weibull probability distribution curve of impulse breakdown of GFRP.

189.3 kV로 조사됐다.

그림 7은 액체질소 중에서의 GFRP 미니모델의 관통파괴 Weibull 확률 분포 곡선을 나타낸다. GFRP 두께가 3, 5, 10, 15 mm로 늘어날 때 관통파괴 확률이 0.1%인 전압은 71.7, 84.2, 159.6, 282.5 kV로 나타났다. 본 연구의 모델이 되는 중성선용 60 kV 부싱은 급격한 온도변화에 따른 전류리드의 수축팽창으로부터 기밀을 유지하기 위하여 몰드절연 방식을 사용하였다. 이때 부싱의 공기 중 절연은 기존 상전도 부싱의 절연 데이터를 활용하여 설계하였다. 공기 중 절연은 총 누설 거리 (creepage distance)와 부싱바디의 길이 (body length)로 나뉜다. 참고문헌[6-7]에 따르면 공기 중에서 총 누설 거리는 다음 식에 의해 결정된다.

$$Creepage\ distance = d_{cs} \times U_m \times k_d \quad (1)$$

여기에서 d_{cs} 는 최소명목최단거리이고, 오염등급에 따라 결정된다. 본 논문에서는 옥내용 부싱으로서 중간 등급인 20 mm/kV로 설정하였다. U_m 은 계통최고전압이며, k_d 는 부싱의 평균지름에 따른 수정요소로서 지름이 300 mm 이하의 경우는 1이다.

또한 부싱바디의 길이는 상용주파전압의 경우는 1 cm당 2.8 kV, 임펄스의 경우는 5.5 kV의 전압을 분담하도록 설계된다[8]. 따라서 식 (1)에 의한 총 누설 거리는 $20\text{ mm/kV} \times 72.5\text{ kV} \times 1 = 1450\text{ mm}$ 이고, 부싱바디의 길이는 상용주파전압과 임펄스에 대해 각각 260 mm와 600 mm이며 큰 값을 선택하였다.

하부 단부와 절연두께 절연설계는 구해진 실험적 결과의 Weibull 통계처리를 통해 0.1%의 절연파괴 전압을 계산하고 목표전압인 BIL 325 kV를 만족하는 절연두께 및 이격거리를 계산하는 방식으로 이루어졌다. 부싱 하부의 액체질소중 절연은 연면방전 0.1% 전압의 결과를 바탕으로 60 kV급 부싱의 하부 길이를 구하기 위해 추세선의 수식으로부터 BIL인 325 kV에 대해 여유치를 적용하여 1800 mm 이상이며, 절연두께는 GFRP 관통파괴 0.1% 전압의 결과를 바탕으로 21 mm 이상이다.

이상의 결과들을 종합하여 고온초전도 변압기용 60 kV 부싱의 기초절연설계는 극저온용기 외부의 공기중 절연은 1450 mm의 총 누설거리와 600 mm의 부싱 길이를 가지며, 극저온용기 내부의 액체질소중 절연은 BIL인 325 kV에 만족하기 위하여 GFRP 연면절연 거리는 1800 mm 이상이며 부싱바디의 절연두께는 21 mm 이상으로 설계되었다.

4. 결 론

액체질소 중에서 nomex 절연지, GFRP, 배리어의 절연파괴와 연면방전의 복합적인 기초절연파괴 특성을 Weibull 분포에 의하여 구해진 0.1% 절연파괴 확률을 가지는 절연파괴 전압을 이용하여 154 kV급 고온초전도 변압기 및 중성선용 부싱을 위한 전기절연 설계를 하였다. 154 kV급 고온초저도 변압기의 절연설계를 위한 턴간 절연은 nomex 절연지 3층으로 절연하며, 층간은 GFRP 연면길이 3 mm이며 이상, 1-2차 권선간 절연이격거리는 160mm 이상, 2-3차 권선간 절연이격거리는 21mm 이상이다. 고온초전도 변압기용 부싱의 절연설계를 위한 공기중 절연거리는 상전도 부싱 기술을 적용하여 총 누설거리는 1450 mm이고, 부싱길이는 600 mm로 설계하였다. 액체질소 중에서의 연면 절연거리와 부싱바디의 절연두께는 실험결과를 바탕으로 각각 1800 mm와 21 mm 이상으로 설계하였다.

이상의 결과들은 고온초전도 변압기 및 부싱뿐 아니라 여러 가지 초전도 기기 절연의 기초절연설계를 위한 데이터로써 응용이 가능할 것으로 기대된다. 그러나 절연신뢰성 향상을 위한 수명특성 및 광범위한 절연파괴 데이터 확보의 추가연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] B. W. McConnell, S. P. Mehta, and M. S. Walker, "HTS Transformers," *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 20, pp. 7-11, June 2000.
 [2] 천현권, 박동순, 최재형, 김상현, "154kV급 고온초전도 변압기의 전기절연 설계," *한국초전도저온공학회논문지*, 9권 1호, pp. 53-56, 2007.
 [3] W. S. Kim, S. Y. Hahn, K. D. Choi, H. G. Joo, and K. W. Hong, "Design of a 1 MVA High Tc Superconducting Transformer," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 13, No. 2, pp. 2291-2293, JUNE 2003.
 [4] S. M. Baek, J. M. Joung, J. H. Lee, and S. H. Kim, "Electrical Breakdown Properties of Liquid Nitrogen for Electrical Insulation Design of Pancake Coil Type HTS Transformer," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 13, No. 2, pp. 2317-2320, June 2003.

[5] S. H. Kim, S. M. Baek, Y. S. Kim, S. Y. Chung, and J. M. Joung, "Surface flashover characteristics in liquid nitrogen for application of superconducting pancake coils," *Cryogenics*, Vol. 42, No. 6-7, pp. 415-418, 2002.
 [6] KS C IEC 60137, "1000 V 이상의 교류 전압을 위한 절연 부싱," 한국표준협회, 2005.
 [7] IEC/TR 60815 Ed. 1.0 b, "Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions," IEC, 1986.
 [8] L. L. Alston, *High-voltage technology*, Oxford University Press, London, 1968, pp. 243-245.

저 자 소 개



천현권(千賢權)

1978년 6월 2일생, 2004년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



최재형(崔在亨)

1979년 6월 3일생, 2005년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



방만식(龐萬植)

1968년 10월 1일생, 1990년 경상대 공대 전자공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



김상현(金相賢)

1950년 2월 7일생, 1974년 인하대 공대 전기공학과 졸업, 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1986년 일본 오사카대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1986년~1989년 한국전기연구원 초전도연구실 실장, 1999년~2001년 경상대학교 공과대학 학장, 2000년~2002년 한국초전도·저온공학회 회장, 1989년~현재 경상대 공대 전기공학과 교수.