

154 kV급 고온초전도 변압기의 중성선용 60 kV 부싱의 기초 절연설계

The Basic Insulation Design of 60 kV Bushing for Neutral Line of 154 kV Class HTS Transformer

최재형¹, 최진욱¹, 김상현^{2,*}Jae-Hyeong Choi¹, Jin-Wook Choi¹, Sang-Hyun Kim^{2,*}

Abstract: A common problem in many fields of cryogenic power engineering is applying high voltage to cold parts of superconducting apparatus. In many cases, a bushing provides electrical insulation for the conductor which makes the transition from ambient temperature to the cold environment. The 60 kV class cryogenic high voltage bushing for neutral line of the 154 kV / 100 MVA high temperature superconducting (HTS) transformer was described. The bushing is energized with the line-to-ground voltage between the coaxial center and outer surrounding conductors: in the axial direction, there was a temperature difference from ambient to about 77 K. For the insulation design of cryogenic bushing, electrical insulation characteristics of the GFRP were discussed in this paper.

Key Words: high temperature superconducting, insulation design, bushing, transformer.

1. 서 론

고온초전도 (high temperature superconducting: HTS) 변압기는 크기와 무게를 감소시키면서 절연수명의 손실이 없이 과부하 용량을 증가시킬 수 있고 효율의 향상, 환경오염의 감소와 공간 배치가 용이하여 전력시스템 운용 전망에 걸쳐 많은 이점을 제공한다. 따라서 HTS 변압기의 연구와 개발에 대한 연구가 세계적으로 활발히 이루어지고 있다[1-3].

HTS 변압기의 개발에 있어 해결해야 될 요소기술로서는 교류손실 저감, 도체성능 향상, 냉각 기술, 고전압 기술 및 부싱 기술 등이 있으나 그 중에서도 부싱의 개발은 변압기의 권선부에 고전압을 인가하기 위해 반드시 개발되어야 할 핵심기술이다[4]. 그러나 HTS 변압기의 고전압 권선부 및 중성선 접지 등의 전류리드를 위한 부싱의 연구 및 개발은 매우 부족한 실정이다. 특히 HTS 변압기용 부싱의 경우 상온에서부터 극저온까지 도체의 전기적인 절연을 분담해야하므로, 고전압을 인가하는 동시에 열적인 수축에 대해서도 안정

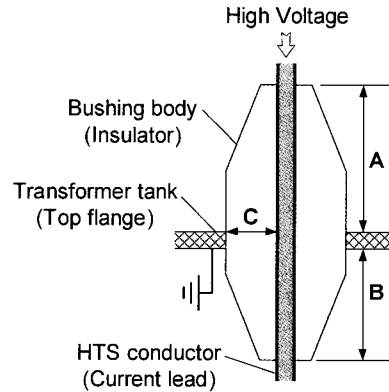


Fig. 1. Schematic of bushing for HTS transformer.

적이어야 한다[5-6]. 그러므로 HTS 변압기용 부싱은 절연 전면의 전위경도를 균일히 해야 할 뿐 아니라 열적으로 안정되어 대기와 완전히 밀봉되어야 한다[4].

그림 1은 HTS 변압기용 부싱의 개념도를 나타낸다. 주요 절연요소는 플랜지 상부의 기중 단부 절연(part A)과 플랜지 하부의 액체질소중 단부 절연(part B) 및 절연두께(part C)로 구성된다. HTS 변압기용 부싱은 급격한 온도변화에 대해 낮은 열수축률과 우수한 기계적 강도 및 전기적 절연특성을 가진 절연체료를 사용하여 전류리드인 고전압부를 절연하는 구조이다.

본 연구에서는 부싱의 재료로 GFRP를 선택하였으며, GFRP의 액체질소 중에서의 연면방전 및 관통과피 특성에 대해 조사하였다. 또한 154kV급 HTS 변압기용 부싱 개발의 전단계로서 중성선 접지를 위한 60kV급 부싱의 기초절연설계를 행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

HTS 변압기용 부싱의 절연체료는 극저온에서 기계적 특성이 뛰어나고 전기절연 성능이 우수한 GFRP를 사용하였으며, 액체질소 중에서의 연면방전 특성 및 관통과피 특성을 실험하였다.

실험에 사용된 전원장치는 파두장 1.2 μ s, 파미장 50 μ s의 표준 뇌임펄스 전압발생기이며, 최대전압 400 kV, 저장에너지 15 kJ이다. GFRP의 연면방전 특성은 시료의 표면에 삼각-평판 전극을 부착하여 실험하였다. 삼각전극에 고전압을 인가하였으며 단부의 예각은 60°, 곡률반경은 25 μ m이다. 평판 전극의 길이는 30 mm이고 전계집중을 완화하기 위하여 단부를 곡률반경 10 mm의 곡선으로 제작하였다. GFRP의 관통과피 특성은 반경 15 mm의 구리봉에 GFRP를 감고 고온

¹학생회원 : 경상대학교 전기공학과

²정 회원 : 경상대학교 전기공학과

*교신저자 : shkim@gsnu.ac.kr

원고접수 : 2008년 08월 13일

심사완료 : 2008년 09월 16일

게재확정 : 2008년 09월 16일

및 진공 분위기에서 경화시킨 미니모델 부싱의 구리봉에 고전압을 인가하고 GFRP 표면에 스테인리스 타이프로 접지전극을 부착하여 액체질소 중에서 절연파괴 특성을 조사하였다.

표준 뇌임펄스 시험 방법은 step-up 방식으로 전압을 상승시켰으며, 절연파괴 전압의 약 70 %의 초기 충격전압을 가한 후 절연파괴가 일어날 때까지 4 kV씩 단계적으로 전압을 상승시켰다. 극저온 환경을 위해 액체질소 중에 시료 및 전극계를 침적시킨 후 안정화된 후 시험하였다. 액체질소 중에서의 연면방전시험은 전극간 거리를 100~300 mm 변화시키며 측정하였고, 관통파괴 실험은 3.5 mm의 두께에 대해 시험하였다. 각 실험은 10회 실시하였으며 Minitab 프로그램을 이용하여 와이블 확률 통계처리를 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

절연체의 연면방전 특성은 절연재료의 종류, 절연물의 형상, 전극의 표면처리, 인가전압의 형태 등에 의해 다양한 특성을 나타낸다.

그림 2는 액체질소 중에서의 GFRP의 연면방전 와이블 확률 분포 곡선을 나타낸다. 그림에서 실선 주위에 분포한 각 점들은 연면거리에 따른 연면방전전압을 나타낸다. 위상단과 좌하단의 점은 각각 최대값과 최소값을 의미하며, y-축의 50%가 평균값을 나타낸다. 따라서 각 점의 분포범위를 통해 실험 오차를 구할 수

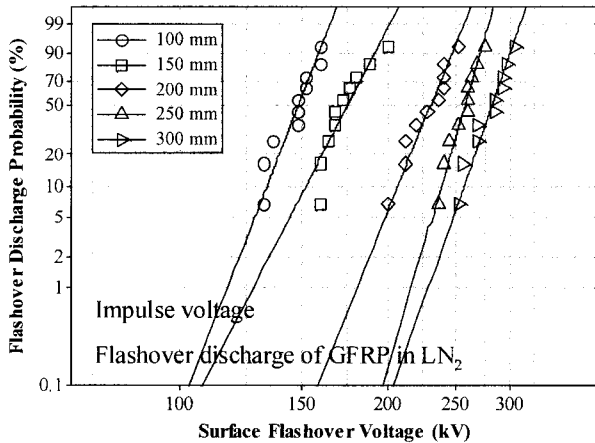


Fig. 2. Weibull probability distribution curve of flashover discharge of GFRP.

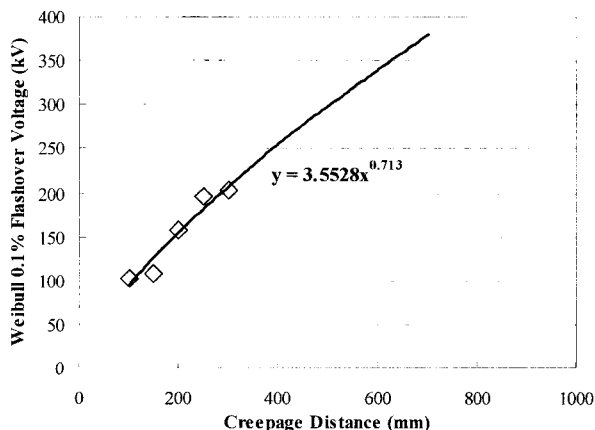


Fig. 3. Functional formula and curve of Weibull 0.1% voltage-creepage distance of GFRP.

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 mm일 때의 50% 평균 전압은 약 148 kV이나 0.1%의 파괴확률전압은 103 kV로 계산되었다. 전극간 거리가 300 mm일 때의 0.1% 파괴확률전압은 205 kV로 계산되었다. 이를 연면방전거리에 대한 전계로 환산하면 100 mm 일때 1 kV/mm이고 300 mm에서는 0.6 kV/mm로 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 GFRP 표면의 액체질소의 비등으로 인해 기체질소가 발생하고 이로 인해 유전율 차이에 의한 전계집중 때문인 것으로 사료된다. 즉, 방전거리가 길어질수록 질소 기포가 존재할 확률이 높아지고 이로 인해 연면방전 전계가 감소하는 것이다.

그림 3은 액체질소 중에서의 GFRP의 Weibull 0.1% 파괴전압과 연면방전거리에 대한 함수를 나타내며 식 (1)과 같다.

$$V = 3.5528 \times d^{0.713} \quad (1)$$

식에서 V 는 weibull 0.1% 파괴전압이며, d 는 연면방전 거리이다. 위에서 설명한 바와 같이 방전거리가 증가함에 따라 절연파괴 전압이 증가하지만, 연면길이가 증가함에 따라 포화하는 경향을 나타낸다. 그림에 나타난 전압-거리의 함수로부터 60 kV 부싱의 기준충격 절연강도(Basic Impulse Insulation Level: BIL)에 대한 연면절연거리를 구할 수 있다.

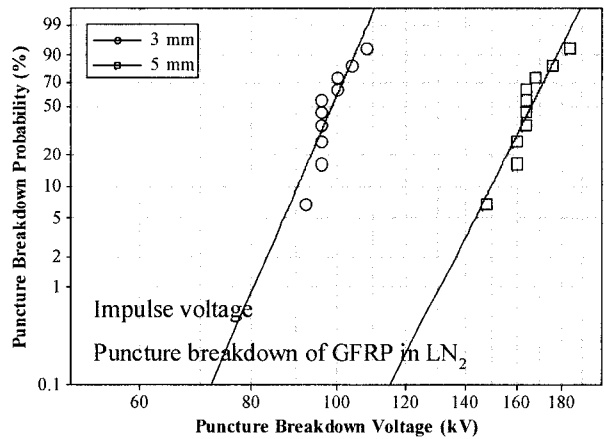


Fig. 4. Weibull probability distribution curve of puncture breakdown of GFRP.

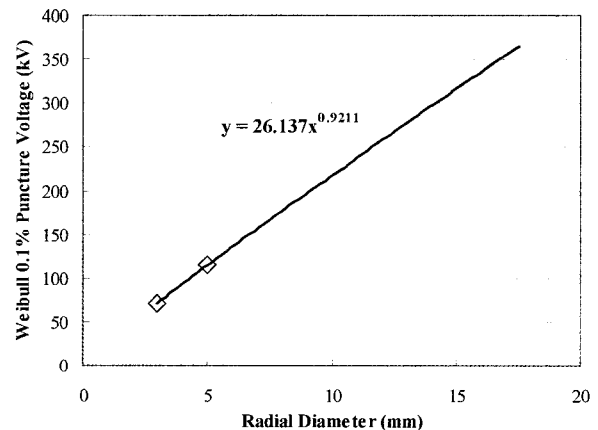


Fig. 5. Functional formula and curve of Weibull 0.1% voltage-radial diameter of GFRP.

HTS 변압기용 부싱은 과냉각된 액체질소의 온도인 77 K에서부터 상온인 300 K에 이르기까지 급격한 온도차가 발생한다. 이에 본 연구에서는 극저온에서 기계적 특성과 수축률이 작고 전기절연 특성이 우수한 GFRP의 관통파괴 특성에 대해 조사하고 그 결과를 부싱의 절연두께의 설계에 적용하였다.

그림 4는 GFRP의 관통파괴 와이블 확률 분포 곡선을 나타낸다. 3 mm와 5 mm 두께에 대한 50% 평균전압은 각각 99 kV, 166 kV이고, 0.1%의 파괴확률전압은 72 kV와 115 kV로 계산되었다. 절연설계를 위한 전계로 환산하면 3 mm일 때 24 kV/mm이고 5 mm에서는 23 kV/mm이다.

그림 5는 GFRP의 임펄스 0.1% 최대파괴전압과 절연두께에 대한 함수를 나타낸다. 본 논문의 모델이 되는 60 kV급 부싱의 BIL에 대한 절연두께는 15.5 mm로 계산되었으며, 전계는 21 kV/mm가 된다. 절연설계에 사용된 전계는 여유치를 고려하여 20 kV/mm를 적용하였다.

4. 기초 절연 설계

본 연구의 모델이 되는 중성선용 60kV 부싱은 급격한 온도변화에 따른 전류리드의 수축팽창으로부터 기밀을 유지하기위하여 몰드절연 방식을 사용하였다. 이때 부싱의 공기 중 절연(part A)은 기존 상전도 부싱의 절연 데이터를 활용하여 설계하였다. 공기 중 절연은 총 누설 거리(creepage distance)와 부싱바디의 길이(body length)로 나뉜다. 참고문헌[7-8]에 따르면 공기 중에서 총 누설 거리는 다음 식에 의해 결정된다.

$$\text{creepage distance} = d_{cs} \times U_m \times k_d \quad (2)$$

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 1cm당 2.8 kV, 임펄스의 경우는 5.5 kV의 전압을 분담하도록 설계된다[9]. 따라서 식 (2)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.

부싱 하부의 액체질소중 절연(part B)은 식 (1)을 연면방전거리에 관해 정리한 식 (3)에 의해 설계하였다.

$$d = \exp\left(\frac{\ln(BIL) - \ln 3.5528}{0.713}\right) \quad (3)$$

위 식으로부터 BIL인 325 kV에 대해 564 mm가 계산되었으며 여유치를 적용하여 600 mm로 설계하였다.

부싱바디의 절연두께(part C)는 동축원통의 전계계산 방법으로 구하였으며 다음 식에 의해 계산된다.

$$E_{\max} = \frac{V}{r_c \cdot \ln \frac{R_0}{r_c}} \quad (4)$$

여기서, E_{\max} 는 설계기준전계이고, V 는 BIL이고, r_c 는 도체 반경, R_0 는 절연체 반경이다. 절연두께를 구하기 위해 R_0 에 관해 정리하면 식 (5)와 같다.

Table 1. Basic insulation design of 60 kV bushing for HTS transformer.

절연 요소	절연설계 결과
(A) 부싱상부 공기중 절연	누설거리: 1450 mm 부싱길이: 600 mm
(B) 부싱하부 액체질소중 절연	연면길이: 600 mm
(C) 부싱바디 절연두께	절연두께 : 30 mm

$$R_0 = \exp\left(\frac{V}{E_{\max} \cdot r_c} + \ln r_c\right) \quad (5)$$

본 논문의 모델이 되는 60 kV 부싱의 BIL은 325 kV이고, 설계기준전계는 그림 4와 5에서 구한 20 kV/mm를 적용하였으며, 도체반경은 15 mm를 적용하였다. 식 (5)에 의하면 R_0 는 45 mm 이고 도체 반경을 제외한 부싱의 절연두께는 30 mm가 된다.

이상의 결과들을 종합하여 HTS 변압기용 60 kV 부싱의 기초절연설계를 표 1에 나타냈다. 극저온용기 외부의 공기중 절연은 1450 mm의 총 누설거리와 600 mm의 부싱 길이를 가지며, 극저온용기 내부의 액체질소중 절연은 BIL인 325 kV에 대하여 600 mm의 연면 절연거리를 가진다. 부싱바디의 절연두께는 30 mm로 설계되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 154 kV급 HTS 변압기의 중성선 접지를 위한 60 kV 부싱의 절연설계를 위하여 액체질소 중에서의 절연특성을 모의한 전극계를 제작하여 임펄스 절연특성을 조사하였다. 절연재료는 극저온에서 기계적 특성이 뛰어나고 전기절연 성능이 우수한 GFRP를 사용하였다.

공기중 절연거리는 상전도 부싱 기술을 적용하여 총 누설거리는 1450 mm이고, 부싱길이는 600 mm로 설계하였다. 액체질소 중에서의 연면절연거리와 부싱바디의 절연두께는 실험결과를 바탕으로 각각 600 mm와 30 mm로 설계하였다.

이상의 결과들은 HTS 변압기용 부싱뿐만 아니라 여러 가지 초전도 기기의 전류리드 절연의 기초절연설계를 위한 데이터로써 응용이 가능할 것으로 기대된다. 그러나 절연신뢰성 향상을 위한 수명특성 및 광범위한 절연파괴 데이터 확보의 추가연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

향후 모델 부싱의 제작 및 시험을 통해 본 절연설계에 대한 평가 및 검증을 계획 중이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 천현권, 광동순, 최재형, 김상현, "154kV급 고온초전도 변압기의 전기절연 설계," 한국초전도저온공

- 학회논문지, 9권 1호, pp. 53-56. 2007.
- [2] B. W. McConnell, S. P. Mehta, and M. S. Walker, "HTS Transformers," IEEE Power Engineering Review, pp. 7-11, June 2000.
- [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] 광동순, 천현권, 최재형, 김해중, 조전욱, 김상현, "154kV급 고온초전도 케이블 및 단말의 전기절연 설계," 한국초전도저온공학회논문지, 9권 1호, pp. 61-66. 2007.
- [5] D. S. Kwag, H. G. Cheon, J. H. Choi, S. H. Kim, "Research on the electrical insulation design of a bushing for a 154kV class HTS transformer." Physica C, Vol. 463-465, pp. 1213-1217, 2007.
- [6] V. A. Glukhikh, S. A. Egorfv, O. G. Filntov, V. B. Korsnnsky, E. A. Lrunzin, and S. E. Sychevsky, "30 kV, 40 kA Cryogenic Current Leads and High Voltage Insulation Breaks for Helium Lines of Superconducting Mngncts," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 10, No. 1, pp. 1477-1480, 2000.
- [7] KS C IEC 60137, "1000 V 이상의 교류 전압을 위한 절연 부싱," 한국표준협회, 2005.
- [8] IEC/TR 60815 Ed. 1.0 b, "Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions." IEC, 1986.
- [9] L. L. Alston, *High-voltage technology*, Oxford University Press, London, 1968, pp. 243-245.

저 자 소 개



최재형(崔在亨)

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



최진욱(金海鍾)

1982년 12월 29일생, 2007년 경상대학교 전기공학과 졸업, 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



김상현(金相賢)

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