

## 154kV급 고온초전도 변압기용 부싱의 절연설계에 관한 연구

곽동순, 천현권, 최재형, 김해중\*, 윤문수\*, 김영석\*\*, 김상현  
 경상대학교, \*한국전기연구원, \*\*한국전기안전공사

### Research on Insulation Design of the Bushing for a 154kV Class HTS Transformer

D. S. Kwag, H. G. Cheon, J. H. Choi, H. J. Kim\*, M. S. Yun\*, Y. S. Kim\*\*, S. H. Kim  
 Gyeongsang Univ. \*KERI, \*\*KESCO

**Abstract** : A common problem in many fields of cryogenic power engineering is to apply high voltage to cold parts of superconducting equipment. In many of these cases a bushing provides electrical insulation for the conductor which makes the transition from ambient temperature to the cold environment. The cryogenic high voltage bushing for the 154kV, 100MVA high temperature superconducting(HTS) transformer is described. The bushing is energized with the line-to-ground voltage between the coaxial center and outer surrounding conductors, in the axial direction there is a temperature difference from ambient to about 77 K. For the insulation design of cryogenic bushing, the arrangement of condenser cone and electrical insulation characteristics of GFRP, Air, LN<sub>2</sub> and GN<sub>2</sub> were discussed in this paper.

**Key Words** : HTS transformer, Cryogenics, Insulation design, Bushing

### 1. 서론

고온초전도 변압기의 부싱은 상온에서부터 저온 환경에까지 걸쳐있는 도체의 전기적인 절연을 제공하므로, 이러한 상황은 고전압을 인가하는 동시에 공기 중으로부터 극저온 장치까지 대전류를 흘리는데 많은 어려움이 있다. 즉, 전기절연뿐만 아니라 열적인 수축에 대해서도 견뎌야 한다[1]. 또한 고온초전도 변압기 부싱의 절연설계에 있어서는 condenser형 부싱 구조가 대두되었으며, 절연구조는 기존의 상전도 절연기술의 적용이 가능한 공기중 연면방전 거리(air-clearance), 실험을 통한 액체질소 중 연면방전 거리(LN<sub>2</sub>-end clearance), 절연물의 절연두께(radial diameters), condenser cone의 설계 등 4부분으로 나뉘질 수 있다.

또한 초전도 변압기의 부싱 절연재료는 내부 전류리드 재료의 수축팽창 특성에 견뎌야하고 접촉부분에 crack 등이 발생하여 기밀이 실패할 가능성을 최소화하기 위하여 grass fabric의 함량을 조절함으로써 수축팽창 특성을 제어하기 쉽고 기계적 및 전기적으로 극저온에서 우수한 특성을 지닌 GFRP를 사용한 몰드절연 방식이 대두되었다.

### 2. 변압기 부싱의 기초 절연설계

154kV급 고온초전도 변압기 부싱의 절연설계를 위하여 절연재료로써 GFRP를 사용하고 금속박을 이용하여 전위 분포를 균일하게 할 수 있는 condenser형의 부싱의 개발이 제안되었다. 또한 154kV급 전력기기의 절연설계는 AC 내전압 보다 임펄스 내전압이 더 악조건에서 운전되므로, 임펄스 내전압(750kV)을 기준으로 설계하였다.

그림 1은 변압기 부싱의 단면 구성을 나타낸다. 부싱의 cone 외경의 결정은 중심 원통의 전계 계산에 의해 결정되어진다. 절연두께는 다음 식 (1)과 같이 계산되어지며, 일반적으로  $T_e$  값을 등가 절연두께라고 부르고 있다. 위

의 계산과정에 따라 부싱 cone의 외경을 계산할 수 있다.

$$E_{in\max} = \frac{V}{r_c \ln \frac{R_0}{r_c}} = \frac{V}{T_e}, \quad \text{단, } T_e = r_c \ln \frac{R_0}{r_c} \quad (1)$$

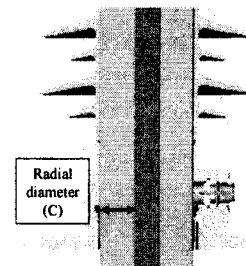


그림 1. 변압기 부싱의 단면 구성도.

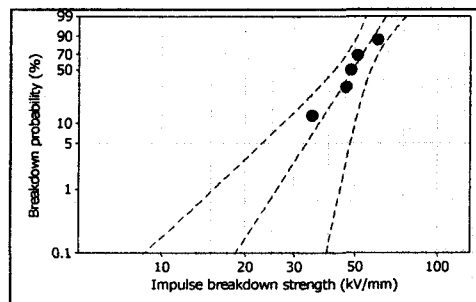


그림 2. 액체질소 중 GFRP의 연면방전 전계.

그림 2는 GFRP의 임펄스 절연파괴 전계를 Weibull 분포로 나타낸다. 최대파괴전계( $E_{max}$ )는 Weibull 분포 0.1%의 절연파괴 전계값을 취하며, 본 그림에서 GFRP의 0.1% Weibull 분포의 전계값은 18kV/mm로 조사되었다. 고체절연물의 절연내력은 전극의 형상이나 두께, 면적 등에 의해 영향을 받기 때문에 부싱 cone의 외경 설계 시의 최대 파괴 전계값은 약 10kV/mm로 결정하였다. 따라서 부싱

cone의 외경은 약 100mm로 계산되어진다.

부상의 상부 공기 중 연연방전 거리는 기존 상전도 시스템의 데이터를 활용할 수 있다. 상전도 시스템의 절연 데이터를 인용하면(IEC 62271-137, 233), creepage distance는 AC 1kV당 25mm가 필요하며, 따라서 154kV의 최고전압인 170kV를 곱하면 4,250mm로 계산되어진다. 또한 부상 애관의 주름을 고려하면 실제 부상의 상부 길이는 1cm당 임펄스 5.5kV가 필요하며, 임펄스 내전압 750kV를 5.5kV로 나누어 137mm로 계산된다.

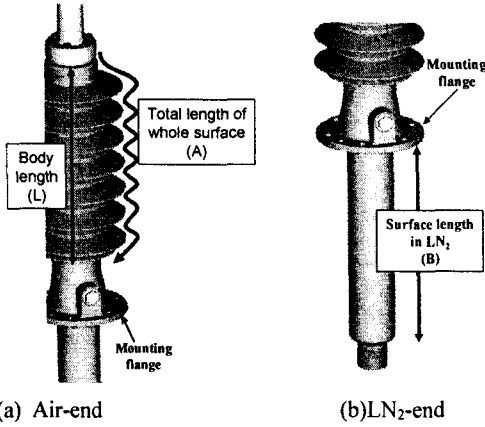


그림 3. Air-end 및 LN<sub>2</sub>-end clearance.

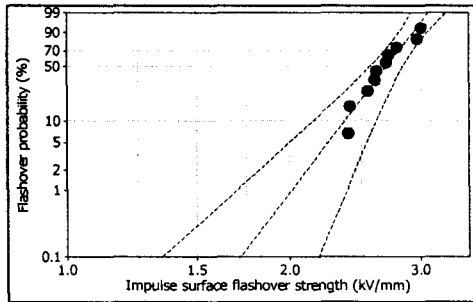


그림 4. 액체질소 중 GFRP의 연연방전 전계.

부상의 하부인 액체질소 중 연연방전 거리는 실험을 통해 구해지며, 그림 4에 액체질소 중 GFRP의 연연방전 전계에 대한 Weibull 분포를 나타낸다. GFRP의 액체질소 중 연연방전 최대전계 값은 약 1.7kV/mm로 조사되었으며, 여유치를 고려하여 설계 시에는 1kV/mm를 적용하였다. 그러므로 액체질소 중에 위치하는 부상 하부의 연연방전 거리는 750mm로 설계되어진다.

일반적으로 콘덴서형 부상에서 각 금속박간의 등전위 분포를 위하여 약 10-20개 정도의 콘덴서를 삽입하며, 본 154kV급 고온초전도 변압기 부상 설계에 있어서는 GFRP로 제작 시 작업공정상의 어려움을 감안하여 기본적으로 10개의 콘덴서를 삽입하는 것으로 설계하였다. 차후 연구를 통하여 콘덴서 콘의 수는 가감될 수 있다.

154kV급 콘덴서형 부상에서 콘덴서박을 10개 삽입하였을 경우 각 콘덴서의 분당 전압은 750kV에서 10개를 나누어 75kV로 결정된다. 또한 각 콘덴서 간의 절연거리를 동일하게 한다면, 앞에서 구한 cone의 외경인 100mm에 10개

를 나누어 각 10mm로 계산되어진다.

다음으로 콘덴서 폭의 결정은 전체 부상의 길이 범위 내에서 결정되어야 하며, 각 콘덴서 간의 커패시턴스를 동일하게 한다는 조건하에 구해질 수 있다. 각 콘덴서의 커패시턴스 및 콘덴서의 폭은 식 (2)에 의해 구해진다.

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon l_n}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}, \quad L_n = \frac{L_{n-1}}{\ln \frac{r_{n-1}}{r_{n-2}}} \times \ln \left( \frac{r_n}{r_{n-1}} \right) \quad (2)$$

그림 5에 설계된 콘덴서형 154kV급 고온초전도 변압기 부상의 각 콘덴서 반경(r)과 폭(L)을 나타낸다. 내도체 튜브의 반경(r<sub>0</sub>)은 23mmφ이며, 첫 번째 콘덴서(L<sub>1</sub>)의 폭은 전체 부상의 길이를 고려하여 1,800mm로 하였다.

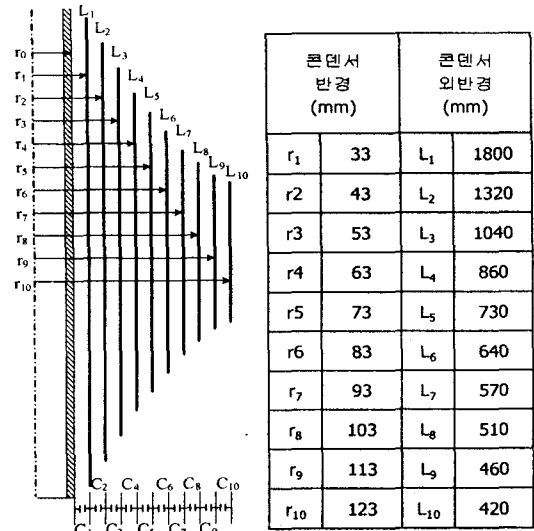


그림 5. 콘덴서형 154kV급 부상의 콘덴서 구조.

### 3. 결론

154kV급 고온초전도 변압기 부상의 절연설계를 위한 연구로써, 절연재료는 GFRP를 사용하였다. 또한 condenser형 구조를 채택하여 전계집중 문제를 해결할 수 있다. 부상의 기중 누설거리는 4,250mm로 설계되며, 애관 적용 시 약 137mm로 제작될 수 있다. 부상의 하부인 액체질소 중 연연방전 거리는 실험을 통해 750mm로 설계되어지며, 부상 body의 절연두께는 약 100mm로 계산되어졌다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

- [1] F. Schauer, "A capacitance-graded cryogenic high voltage bushing for vertical or horizontal mounting", Cryogenics, Vol. 24, Issue 2, p. 90, 1984.
- [2] E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel, "High Voltage Engineering: Fundamentals", Newnes, p.235, 2001.