

고온초전도 케이블의 절연설계를 위한 적층효과에 관한 연구

곽동순, 김해중, 조전욱, 김해준, 김재호, 천현권*, 김상현*
한국전기연구원, 경상대학교*

Research on Multi-layered Effect for the Insulation Design of a HTS Cable

Dong-Soon Kwag, Hae-Jong Kim, Jeon-Wook Cho, Hae-Joon Kim, Jae-Ho Kim, Hyeon-Gweon Cheon*, Sang-Hyun Kim*
KERI, Gyeongsang Natl. Univ.*

Abstract : For the insulation design of a HTS cable, the withstand voltage of three kinds were proposed. One of them is the AC design withstand voltage, another is the impulse design withstand voltage, and the other is the partial discharge inception stress. However, the multi-layered effect was not considered on insulation design of a HTS cable at existent design process. Therefore in this paper, the electrical breakdown characteristics by multi-layered effect of LPP insulation paper were investigated. Based on these results, the insulation thickness of 22.9 kV class HTS cable was designed, and compared with existent design process.

Key Words : HTS cable, Insulation design, Multi-layered effect, Electrical breakdown

1. 서 론

국내에서 개발 중인 고온초전도 케이블의 절연재료로서는 LPP(laminated polypropylene paper)를 사용하고 있으며, 고온초전도 케이블의 절연두께 설계는 이미 여러 학술지를 통해 보고 된바 있다^[1]. 그러나 기존의 설계방식에서는 3매의 LPP sheet 시료의 AC 및 임펄스 절연파괴 전계와 부분방전 개시전계 등의 세 가지 방식을 통한 절연설계가 이루어 졌거나 AC 및 임펄스 전원을 통한 절연설계 값은 부분방전 개시전계를 이용한 절연두께에 비해 오차가 너무 커서 케이블 적용에 있어서 다소 무리가 있었으며 실제 케이블 제작 시에는 부분방전에 의한 설계 값만이 반영되었다. 이러한 결과는 절연지의 적층에 따른 두께효과가 고려되지 않았기 때문에 보고, LPP의 적층에 따른 절연파괴 특성을 연구하게 되었으며 적층효과를 고려한 새로운 방식의 절연설계를 행하게 되었다.

2. 실험

LPP sheet 시료의 크기는 연면에 의한 방전을 막기 위해 200×200 mm 이상으로 하였다. 적층된 시료에는 3장마다 중앙에 인위적으로 6 mmφ의 구멍을 만들어 실제 지(紙)절연 케이블의 butt-gap 형상을 모의하여 제작하였다.

LPP sheet 시료의 적층효과에 따른 절연파괴 특성을 조사하기 위하여 그림 1과 같이 구 전극 사이에 LPP를 적층하여 삽입하였다. 전극의 단부효과를 제거하기 위하여 에폭시 수지로 몰딩 하였다.

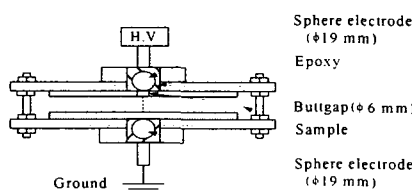


그림 1. 시료 및 전극계 구성.

실험은 LPP sheet 시료를 적층한 전극계와 미니모델 케이블을 cryostat의 고전압 인가부에 연결한 후 액체질소가 들어있는 내조에 넣어 절연파괴 전압을 각 10회씩 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 LPP sheet 시료의 AC 및 임펄스 절연파괴전압의 적층 수 의존성을 나타낸다. 그림에서 LPP의 적층 수가 증가함에 따라 절연파괴전압이 상승함을 알 수 있다. 특히 3-9장까지의 적층에서는 급격하게 상승하였으며, 9장 이상의 적층에서는 다소 소폭의 증가를 확인할 수 있다. 일반적으로 초전도 케이블의 절연설계에 있어서는 2-3장의 절연지의 최소절연파괴전계에 의한 값을 기초로 하여 설계를 하고 있다^[2,3]. 그러나 본 실험결과로부터 3장의 경우보다는 상승폭이 완만한 9장 이상의 경우에서 최저파괴전계 값을 취하는 것이 보다 설계오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

그림 3은 미니모델 케이블의 구성도를 나타낸다. 고전압 인가를 위하여 직경 28 mmφ의 SUS 파이프 포머를 사용하였으며, 내·외부 반도체층으로 두께 0.13 mm의 카본지 2매를 감았다. 반도체층 사이의 절연층은 LPP로 3, 6, 9장씩 감아 절연하였으며, 절연지 사이에는 1 mm의 butt-gap을 두면서 각 층마다 30 %씩 중첩하여 감았다.

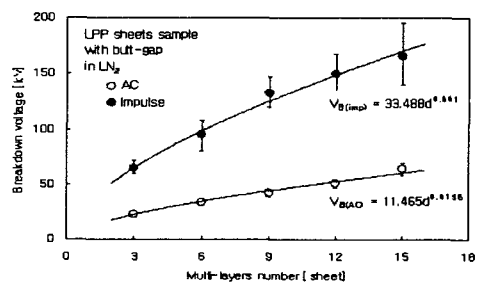


그림 2. 적층수에 따른 절연파괴 특성.

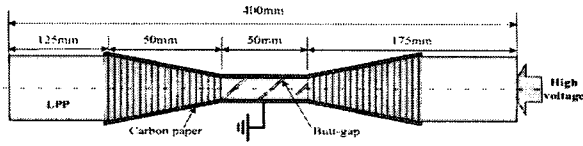


그림 3. 절연파괴 시험용 미니모델 케이블의 구성도.

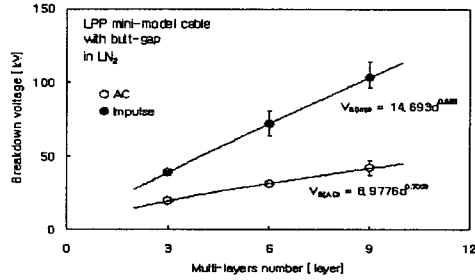


그림 4. 미니모델 케이블의 절연파괴 특성.

그림 4는 3, 6, 9장의 LPP로 절연된 미니모델 케이블의 액체질소 중 AC 및 임펄스 절연파괴 전압을 나타낸다. 미니모델 케이블의 경우 전극면적이 sheet 시료의 전극 면적에 비해 상대적으로 크기 때문에 좀더 낮은 절연파괴 전압 값을 보인 것으로 사료된다.

이상의 실험 결과들로부터 22.9 kV급 고온초전도 케이블의 절연두께 설계를 행하였다. 절연설계에 사용된 데이터로는 LPP 9장으로 절연한 미니모델 케이블의 AC 및 임펄스 절연파괴 전계값을 이용하였으며, 그림 5에 절연파괴 전계에 대한 절연파괴 확률을 와이블 분포도로 나타내었다. 절연파괴 확률이 0.1 %인 지점의 절연파괴 전계값을 최저파괴전계(E_{max})라고 케이블의 절연두께를 결정하기 위한 실험치로 사용하였다. 그림에서 AC 및 임펄스 전원의 최저파괴전계는 각각 27 kV/mm와 46 kV/mm의 값을 얻었다.

한편, 국내에서 22.9 kV급 전력케이블의 절연시험 기준은 AC 내전압은 80 kV이고 임펄스 내전압은 BIL 150 kV이다^[4]. AC 및 임펄스 절연 설계 법에서 절연두께는 목표파괴전압에 실험을 통해 구해진 시료의 최저파괴전계를 나누어 구할 수 있다.

첫 번째, AC 목표파괴 전압은 식 (1)에 의해 계산되어진다. AC 내전압 V 는 80 kV이며, 열화계수 K_1 는 '1.59', 온도계수 K_2 는 '1.0', 설계마진 K_3 는 '1.1'의 값을 가진다. 그리고 '1.32'의 여유치 M 을 두었다.

$$V_{AC} = \frac{V}{\sqrt{3}} \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times M \quad (1)$$

두 번째, 임펄스 목표파괴 전압은 식 (2)에 의해 계산되어진다. 임펄스 내전압 BIL(basic insulation level)은 150 kV이며, '1.32'의 여유치 M 을 두었다.

$$V_{imp} = BIL \times M \quad (2)$$

위의 식 (1)과 식 (2)에 의해 22.9 kV급 고온초전도 케이블의 절연 설계치를 표 1에 나타내었다. 표에는 이미 보고 된바 있는 기존의 3장 LPP sheet 시료의 데이터로

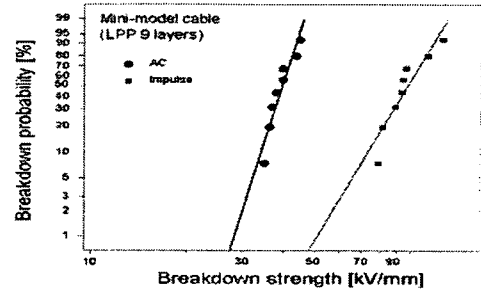


그림 5. 절연파괴전계에 대한 와이블 분포도.

표 1. 22.9 kV급 고온초전도 케이블의 절연 설계.

| | Existent insulation design | Insulation design by mini-model cable |
|---------|----------------------------|---------------------------------------|
| AC | 2.1 mm | 4.0 mm |
| Impulse | 2.7 mm | 4.4 mm |
| PD | 4.5 mm | - |

부터 구한 절연두께^[1]와 본 논문의 실험결과에 의해 구해진 고온초전도 케이블의 절연두께를 비교하여 보여준다.

4. 결론

기존의 절연 설계법에서 AC와 임펄스 전원에 의해 구해진 고온초전도 케이블의 절연두께는 부분방전에 의해 구한 절연두께에 비해 매우 낮은 값을 보였으며, 이는 케이블의 절연두께 설계에 반영하기에는 다소 무리가 있었다. 그러나 적층효과를 고려하여 본 논문에서 계산되어진 AC와 임펄스 전원에 의한 절연두께는 기존의 부분방전에 의해 구해진 절연두께와 거의 유사한 값을 가지며, 추후에 고온초전도 케이블의 절연설계에 있어서 충분히 적용 가능성이 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] Y. S. Kim, D. S. Kwag, H. J. Kim, J. W. Cho, K. C. Seong and S. H. Kim, "Research on Insulation Design of 22.9-kV High-Tc Superconducting Cable in Korea", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 554, 2005.
- [2] K. Miyoshi et al, "Design and Production of High-Tc Superconducting Power Transmission Cable". IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, No. 1, pp. 2363, 2001.
- [3] Eric B. Forsyth, "The Dielectric Insulation of Superconducting Power Cables", Proceeding of the IEEE, Vol. 79, No. 1, pp. 31, 1991.
- [4] 한전표준구매시방서, "22.9 kV 동심중성선 전력케이블 (ES126-650-664)". 2001.11.09 개정.