

154 kV급 HTS 케이블의 절연설계 및 굴곡시험

Design of Insulation and Bending Test for a 154 kV Class HTS Cable

최진욱¹, 최재형¹, 임응춘², 김해종³, 조전욱³, 김상현^{1,a}

(Jin-Wook Choi¹, Jae-Hyeong Choi¹, Eung-Choon Lim², Hae-Jong Kim³, Jeon-Wook Cho³, and Sang-Hyun Kim^{1,a})

Abstract

It is important that study on cryogenic electrical insulation design to develop the cold dielectric(CD) type HTS cable because the cable is operated under the high voltage environment in cryogenic temperature. This paper proposes two types of insulation design to carry out the maximum insulation design for a 154 kV-class HTS cable. The proposed insulation design method takes into consideration AC and lightning impulse withstand voltage so as to prevent AC breakdown for power frequency operating voltage during operating the cable and breakdown for lightning impulse voltage. The final insulation thickness is determined by selecting high value out of two insulation thickness calculated through the two insulation design methods. And we researched electrical insulation characteristics of HTS cable according to bending ratio and the number of bending.

Key Words : HTS cable, Insulation, AC breakdown, Lighting impulse breakdown, Bending test

1. 서론

오늘날 지속적인 경제 성장에 따라 무공해·양질의 에너지 수요가 급격히 증가하는 추세에 있으며, 특히 에너지 중에서도 전기에너지는 다른 에너지로의 변환이 용이하고 효율적이며 미세한 제어가 가능하다는 특징 때문에 그 수요는 비약적으로 증가하고 있다. 이런 양상은 세계의 공통적 추세로써 가공선이나 유입케이블 등과 같은 기존의 송전 방식에 의한 용량은 앞으로 지속적인 기술개발이 이루어진다고 하여도 한계가 있으며 송전 회선수를 늘리거나 초고압(Ultra high voltage) 송전방식을 채용하여야 가능하다. 그러나 경제성, 기술적인 문제, 환경문제, 용지확보 등의 문제가 뒤따라 향후 급증하는 전력수요에 대비한 새로운 대전력 수송방법의 개발 필요성이 강하게 대두되고 있다. 이

문제를 해결하기 위해 송전용량, 송전거리는 물론 송전손실, 소요면적에서도 우수한 특징을 가지는 고온초전도 케이블에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 한국에서는 2001년부터 교육과학기술부가 주관하는 DAPAS(Development of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies) 프로그램의 일환으로 22.9 kV / 50 MVA 3상 고온초전도 케이블의 개발 및 장기 실증시험에 성공하였으며[1,2], 현재 154 kV / 1 GVA급 고온초전도 케이블의 개발이 진행 중에 있다.

도체부, 전기절연층, 냉각부로 구성되어진 고온초전도 케이블은 액체질소(LN₂, 77 K)에 침적 냉각하여 운전되며 초고압이 인가되기 때문에 개발에 있어서 전기절연에 관한 연구는 필수요소이다[3]. 절연방식은 절연층의 위치에 따라 상온절연(WD: warm dielectric) 방식과 저온절연(CD: cold dielectric) 방식이 있다. WD 방식은 초전도체 위에 전기절연층이 없으며, 냉각을 위한 극저온관로(cryostat) 위에 전기절연을 한 구조로 절연재료가 상온에서 사용되기 때문에 기존의 절연재료를 그대로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 WD 방식의 고온초전도 케이블은 교류자계를 차폐해 cryostat와 같은 도체 이외의 부분에 있어서의 와

- 1. 경상대학교 전기공학과
(경남 진주시 가좌동 900)
 - 2. 오산대학교 전기공학과
 - 3. 한국전기연구원 초전도기기연구그룹
- a. Corresponding Author : shkim@gsnu.ac.kr
 접수일자 : 2008. 9. 22
 1차 심사 : 2008. 10. 14
 심사완료 : 2008. 10. 22

전류손을 억제하기 위한 고온초전도 쉴드(shield)층을 설치할 수 없기 때문에 극저온 관로의 와전류손에 의한 온도 상승으로 시스템의 손실이 증가하여 대용량의 시스템에 적용이 곤란하다. 반면 CD 방식은 전기절연층이 cryostat 내에 있는 구조로 고온초전도 도체위에 전기절연층을 놓고 그 위에 다시 고온초전도 쉴드층을 설치한 케이블 코어(core)를 cryostat 내에 설치하는 방식으로 고온초전도 shield층의 적용이 가능하여 cryostat의 와전류 발생을 억제 할 수 있다. 특히 배전급에서는 하나의 cryostat에 3상 core를 모두 설치할 수 있어 각 상마다 cryostat를 설치하는 WD 방식과 비교하여 열절연층의 표면적이 작기 때문에 외부로부터 열침입이 적고 소형이라는 장점이 있다.

절연재료로 WD 방식에서는 PE(polyethylene)와 XLPE(cross linked-polyethylene)를 사용하고 CD 방식에서는 크라프트지(Kraft paper) 두 장 사이에 폴리프로필렌(polypropylene) 필름을 넣고 열 압착 공정을 통해 만들어 유전상수 및 손실인자가 작고 절연강도가 높아 현재 유입케이블의 절연재료로도 사용되고 있는 LPP(Laminated Polypropylene Paper)를 사용한다.

고온초전도 케이블 절연설계 방법에는 너임펄스 절연과피 전계를 이용하여 설계하는 방법, 부분방전 개시 전계와 V-t 특성을 이용하여 설계하는 방법, AC 절연과피 전계를 이용하여 설계하는 방법이 있다[5].

본 연구에서는 미니모델 케이블을 제작하고 압력을 가한 LN₂에 침적하여 AC 절연과피 실험과 너임펄스 절연과피 실험을 통해 각각 절연설계를 하였다. 그리고 곡률반경과 굴곡 횟수에 따라 절연 특성의 변화를 조사하였다.

2. 미니모델 제작과 실험장치 및 방법

2.1.1 AC 및 Impulse 절연과피용 미니모델 제작

154 kV급 고온초전도 케이블의 절연두께 설계를 위한 기초 특성 실험은 그림 1과 같이 미니모델 케이블을 제작하여 실시하였다. 미니모델 케이블은 직경 27 mm의 스테인리스강 포머 위에 전계 집중을 완화시키기 위하여 두께 130 μm, 폭 25 mm로 절단된 carbon paper 2장을 butt-gap 1 mm를 두고 상하층 50%의 중첩으로 감고, 그 위에 동일한 폭으로 절단된 LPP를 butt-gap 1 mm로 상하층간에 약 30%씩의 중첩으로 6 장을 감는다. 그리고 케이블 단부의 전계 집중을 완화시키기 위하여 동일 절연지료로 보강절연을 하고, 외부 반도체층

은 내부 반도체층과 동일한 방법으로 carbon paper 2 장을 LPP 6 장 위에 감았다. 그림 1은 AC 및 Impulse 절연과피용으로 제작된 미니모델의 개략도로 전체길이는 400 mm이며 유효길이는 50 mm이다. 실험에 사용된 LPP는 건조기에 넣은 후 약 105 °C에서 4 시간 동안 건조하여 절연지의 수분을 완전히 제거하였다.

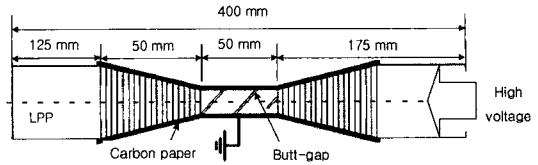


그림 1. AC 및 너임펄스 절연과피용 미니모델의 개략도.

Fig. 1. Schematic of mini model for AC and Impulse breakdown.

2.1.2 굴곡실험용 미니모델 제작

그림 2는 굴곡실험용 미니모델의 제작 과정으로 포머는 스테인레스강으로 외경 25.5 mm, 내경 23.5 mm, 두께 0.75 mm의 휠 수 있는 주름판이다. 주름부분의 전계집중을 완화시키기 위하여 carbon paper를 5 장 감고, 그 위에 LPP를 AC 절연과피용 미니모델과 같은 방법으로 감았다. 포머의 총 길이는 1 m로 충분히 길게 하여 잘 휠 수 있도록 했으면 carbon paper와 LPP는 중앙의 400 mm만 감았다. 케이블 반경 r과 곡률반경 R을 이용하여 케이블의 곡률반경 배수(R/r)와 굴곡 횟수에 대하여 한전구매시방서의 굴곡시험 방법에 준하여 곡률반경에 맞는 원통 외주에 서서히 180도 구부린

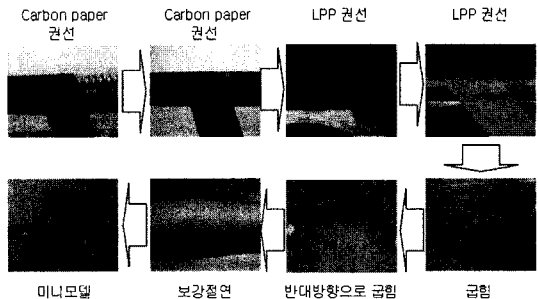


그림 2. 굴곡 실험용 미니모델의 제작과정.

Fig. 2. Manufacturing process for bending test.

후 원위치로 복귀시키고 다시 반대방향으로 180도 구부린 후 직선으로 복귀시킨다[6]. 이 조작을 2회 반복하고 보강절연을 한 후 carbon paper로 외부 반도전층으로 carbon paper 2장을 감았다. 그리고 carbon paper와 LPP를 감은 굴곡 중앙부 400 mm를 절단하여 AC 절연파괴용 미니모델과 똑같은 길이로 만들었다.

2.2 실험장치 및 방법

그림 3은 실험장치의 개략도로 cryostat의 재질은 스테인리스강이며 사이에 진공층이 있는 이중 구조로 열침입을 줄여 LN₂에 안정을 줄 수 있게 되어있다. FRP로 제작된 상부 플랜지와 cryostat는 기밀을 유지할 수 있는 구조로 안전을 고려할 때 최대 0.5 MPa 내에서 실험을 할 수 있다. 하지만 기존의 보고에서 0.3 MPa 이상의 압력에서 절연파괴 전압이 포화되는 것으로 보고되어 이번 실험에서는 0.3 MPa에서 모든 절연파괴 실험을 하였다[7]. 제작된 미니모델 케이블은 고전압이 인가되는 부상의 하부에 고정하여 LN₂에 완전히 잠기게 한다. 모든 실험에서 미니모델 케이블은 LN₂ 내에서 충분히 냉각시켰고, LN₂의 자연 기화를 통해 cryostat 내부에 압력이 가해지도록 하였다. AC 전원은 최대 100 kV로 1 kV/sec의 속도로 전압을 상승시켰다.

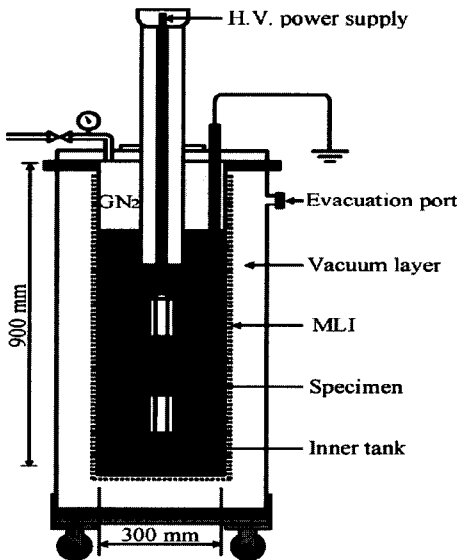


그림 3. 실험장치의 개략도.
Fig. 3. Schematic of experiment apparatus.

3. 절연파괴 실험결과 및 절연설계

고온초전도 케이블의 절연두께는 식 (1)에 의해 구해진다.

$$t = r_c \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{(AC, Imp)}}{E_{max(AC, Imp)} \cdot r_c} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 r_c 는 포머, 초전도 선재, 내부 반도전층까지의 내도체 반경으로 15.2 mm이다. V 는 AC 및 뇌임펄스 절연설계에 있어서 목표 내전압이고 E_{max} 는 AC 및 뇌임펄스 절연파괴 실험을 통하여 얻은 결과로 weibull 확률분포 곡선을 그렸을 때 절연파괴 확률이 0.1 %인 전계 값으로 최대설계기준전계이다.

3.1 AC 절연파괴 실험결과 및 절연설계

LPP 6장으로 제작된 미니모델 케이블의 평균 절연파괴 전계는 62 kV이며 그림 4는 AC 절연파괴 전계에 대한 weibull 확률분포 곡선으로 E_{max} 는 48.6 kV/mm로 나왔다. V_{AC} 는 상용주파 AC 내전압 시험 전압으로 초전도 케이블에 대한 내전압 시험 규정이 없으므로 고온초전도 케이블과 같은 절연치를 사용하며 유사한 절연구조를 가지고 있는 유입케이블의 AC 내전압 시험 전압에 절연체의 두께 및 체적, 전극의 형상 등과 같은 불확정 요소들에 대한 여유치를 주어 360 kV로 결정하였다.

이 값들을 식 (1)에 넣어 계산하면 절연두께는 9.5 mm로 나온다.

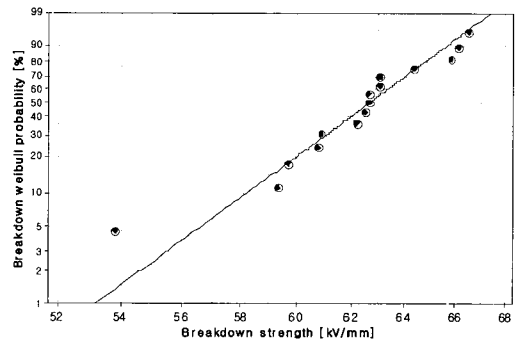


그림 4. AC 절연파괴 전계에 대한 weibull 확률분포 곡선.
Fig. 4. Breakdown weibull probability for AC breakdown strength.

3.2 뇌임펄스 절연파괴 실험결과 및 절연설계

그림 8은 LPP 6장을 감아 제작된 미니모델 케이블의 뇌임펄스 절연파괴 전계를 weibull 확률분포곡선으로 나타낸 것이다. 정극성, 부극성의 평균 절연파괴 전계는 각각 132 kV/mm, 111 kV/mm로 나왔고, Weibull 확률분포 곡선에서 절연파괴 확률 0.1 %의 전계는 각각 94.8 kV/mm와 93.0 kV/mm로 나왔다. 절연설계는 두 가지를 다 견딜 수 있는 값으로 해야 됨으로 E_{max} 를 부극성 전계 93.0 kV/mm로 하였다. V_{imp} 는 뇌임펄스 내전압 값에 온도계수, 열화계수, 여유치를 포함해서 곱했다. 보통 뇌임펄스 내전압은 154 kV의 기준충격절연강도(BIL) 전압인 750 kV를 적용한다. 열화계수는 H. Suzuki의 논문에서도 보고된 바와 같이 반복적인 충격에 영향이 없으므로 1로 정하였다[8]. 온도계수는 LN₂에 침적하여 운전되는 초전도 케이블이므로 1로 정하고 여유치를 주어 900 kV로 정하였다. 이 값들을 식 (1)에 넣고 계산하면 절연두께는 13.5 mm로 나온다.

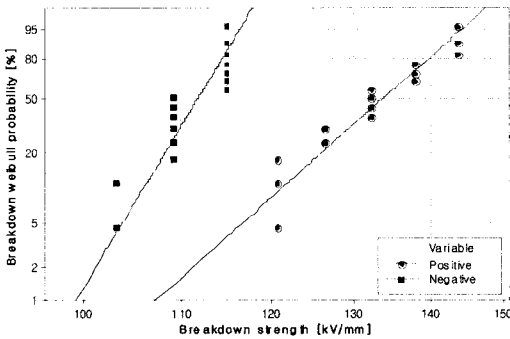


그림 5. 뇌임펄스 절연파괴 전계에 대한 weibull 확률분포 곡선.

Fig. 5. Breakdown weibull probability for lighting impulse breakdown strength.

4. 곡률반경 배수 및 굴곡횟수에 따른 절연특성

횃 수 있는 주름판으로 굴곡시험용 미니모델을 제작하였고, 3 bar의 압력이 가해진 LN₂에 침적하여 1 kV/sec의 전압상승 속도로 AC 전압을 인가하여 절연파괴 전압을 측정하였다. 그림 6은 R/r이 점점 작아짐에 따라 절연파괴 전압의 특성을 나타낸다. 굽히지 않은 미니모델과 R/r = 25인 미니모델은 오차 범위에서 유사한 전압이 나타났고, R/r = 10-20 범위

에서는 굽히지 않은 미니모델의 약 80 %정도의 비슷한 절연파괴 전압이 나타났다. 이 결과로 볼 때 고온초전도 케이블의 운반을 위한 보빈은 R/r = 25 이상 되어야 절연내력을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

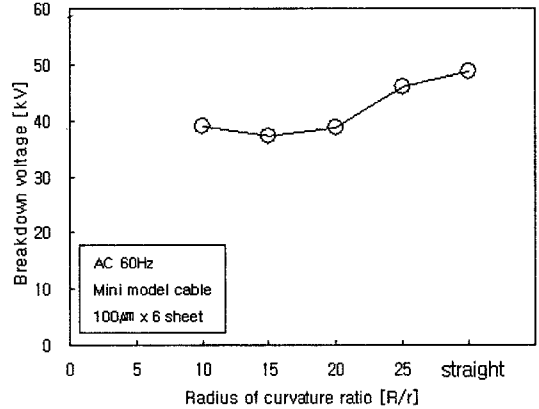


그림 6. 곡률반경배수에 따른 절연파괴 전압.

Fig. 6. Breakdown voltage according to radius of curvature ratio.

그림 7은 2회, 4회, 8회, 16회 반복하여 굴곡 시킨 미니모델의 절연파괴 전압을 나타낸다. 굽힘 반복 횟수가 4회까지는 굽힘 횟수가 증가함에 따라 절연파괴 전압이 감소하다가 4회를 넘어가면 굽히지 않은 미니모델의 70 %정도의 절연파괴 전압이 나타났다. 고온초전도 케이블 운반 및 시공 과정에서 굴곡이 없을 수는 없다. 따라서 굽힘에 따른 절연내력 감소를 고려하여 절연두께를 결정하여야 할 것이다.

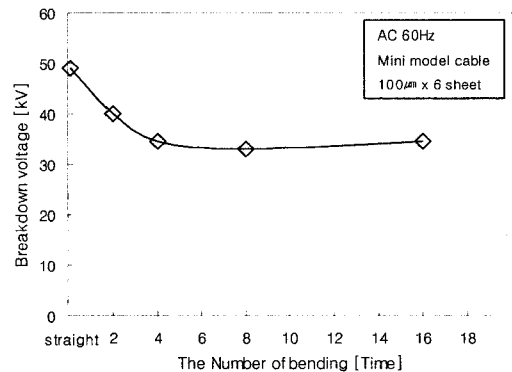


그림 7. 굴곡 횟수에 따른 절연파괴 전압.

Fig. 7. Breakdown voltage according to the number of bending.

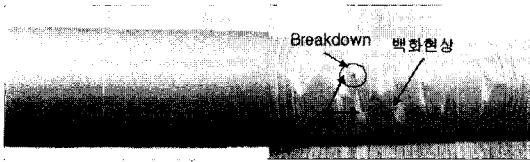


그림 8. 굽힘 전과 굽곡 후 절연파괴 사진.
 Fig. 8. Photograph before bending and breakdown after bending.

그림 8은 굽곡을 하기전과 굽곡 후 절연파괴 실험까지 한 미니모델의 사진이다. 미니모델 케이블을 굽히게 되면 안쪽 butt-gap은 좁혀지고 바깥쪽 벌어진다. 이것을 반대 방향으로 반복하게 되면 butt-gap 부분의 절연지 단부에서 백화현상 및 crack이 발생하게 되고 결국 이 점에서 절연파괴가 발생함을 알 수 있다. 백화현상과 crack은 $R/r = 25$ 에서는 미세하게 나타나지만 $R/r = 20$ 이하에서부터 뚜렷하게 나타났다. 그리고 이런 현상들은 굽곡 반복 횟수가 증가함에 따라 많이 나타났으며 4회를 반복하면 대부분의 butt-gap에서 발생하게 되어 그 이상 반복해도 절연파괴 전압에 영향을 주지 않았다.

5. 결론

한국에서 21세기 프론티어 연구개발 사업의 일환으로 개발 중인 154 kV / 1 GVA급 고온초전도 케이블은 전 세계적으로 가장 높은 전압 레벨을 가지고 있으며, 케이블 코어에 관한 연구만큼이나 케이블 절연에 관한 연구도 중요하다.

본 논문에서는 AC 및 뇌임펄스 절연파괴 실험을 통해 각각의 절연두께를 설계하였다. AC 절연 설계 및 뇌임펄스 절연설계 값은 각각 9.5 mm, 13.5 mm로 나왔다. 고온초전도 케이블은 AC 내전압 및 뇌임펄스 모두에 견딜 수 있어야 함으로 최종 절연두께는 약 14 mm 로 설계되었다. 그리고 곡률반경에 따른 절연파괴 전압은 $R/r = 25$ 이하에서부터 절연파괴 전압이 감소함을 알았으며 굽곡 횟수가 4회 반복까지 절연파괴 전압이 떨어지고 그 이상에서는 변화 없음을 알았다. 이것으로 고온초전도 케이블이 운반 및 시공에 있어서 보빈의 반경과 케이블 반경의 배수가 25이상 이어야 하고 굽곡이 반복 되면 절연내력이 떨어짐을 고려하여 절연두께를 결정해야 함을 알았다. 향후 고온초전도 케이블의 생산, 운반, 시공 시 있을 수 있는 굽곡과 응력 등을 고려한 절연설계에 관한 연구를 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] H. J. Kim, D. S. Kwag, S. H. Kim, J. W. Cho, and K. C. Seong, "Electrical insulation design and experimental results of a high-temperature superconducting cable", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, p. 1743, 2007.
- [2] 김영석, 광동순, 한철수, 김해중, 김동욱, 김상현, "Mini-model 초전도 케이블의 유전손실 특성", 전기전자재료학회논문지, 16권, 10호, p. 946, 2003.
- [3] D. S. Kwag, H. G. Choen, J. H. Choi, H. J. Kim, J. W. Cho, and S. H. Kim, "Electrical insulation design of a 154 kV class HTS cable and termination", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 9, No. 1, p. 61, 2007.
- [4] H. Suzuki, T. Takahashi, T. Okamoto, and S. Akita, "Electrical insulation characteristics of cold dielectric high temperature superconducting cable", IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 6, p. 441, 2002.
- [5] J. W. Cho, H. J. Kim, K. C. Seong, H. M. Jang, D. W. Kim, and S. H. Kim, "Insulation test for the 22.9 kV class HTS power transmission cable", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 5, No. 3, p. 48, 2003.
- [6] 한국전력공사 송변전건설처 지중선팀, "154 kV 알루미늄피 유입케이블 및 부속재", 한전구매시방서, p. 10, 2002.
- [7] 광동순, 천현권, 김해중, 조전욱, 정순용, 김상현, "고온초전도 케이블의 절연설계를 위한 적층효과", 전기전자재료학회논문지, 18권, 10호, p. 950, 2005.
- [8] H. Suzuki, T. Takahashi, T. Okamoto, N. Ishii, S.-I. Mukoyama, and A. Kimura, "Verification tests and insulation design method of cold dielectric superconducting cable", IEEJ Trans. PE, Vol. 126, No. 4, p. 441, 2006.