

## 154 kV급 고온초전도 변압기의 전기절연 설계

### Electrical Insulation Design of a 154 kV Class HTS Transformer

천현권<sup>1</sup>, 광동순<sup>1</sup>, 최재형<sup>1</sup>, 김상현<sup>2,\*</sup>

H. G. Cheon<sup>1</sup>, D. S. Kwag<sup>1</sup>, J. H. Choi<sup>1</sup>, S. H. Kim<sup>2,\*</sup>

**Abstract:** In the response to the demand for electrical energy, much effort was given to develop and commercialize high temperature superconducting (HTS) power equipment has been made around the world. Especially, a HTS transformer is one of the most promising devices. Recently, Korea Polytechnic University and Gyeongsang National University are developing a power distribution and transmission class HTS transformer that is one of the 21st century superconducting frontier projects in Korea. For the development of 154 kV class HTS transformer, the cryogenic insulation technology should be established. We have been analyzed insulation composition and investigated electrical characteristics such as the breakdown of LN<sub>2</sub>, barrier, kapton films, and the surface flashover of FRP in LN<sub>2</sub>. Furthermore, we are going to compare with measured each value and apply the value to the most suitable insulating design of the HTS transformer.

**Key Words:** HTS Transformer, barrier, insulation design.

#### 1. 서 론

고온초전도(HTS) 변압기는 크기와 무게를 줄임에 따른 절연수명의 손실 없이 과부하 용량을 증가시킬 수 있고 효율의 향상, 환경오염의 감소와 공간 배치가 용이하여 전력시스템 운용 전방에 걸쳐 많은 이점을 제공한다. 따라서 HTS 변압기의 연구와 개발에 대한 연구가 세계적으로 활발히 이루어지고 있다[1-2]. 특히, 한국에서 2001년부터 시작된 21세기 프론티어 R&D 사업의 일환으로 초전도 응용 기술 개발이 진행되고 있으며 HTS 변압기의 최종 개발 목표는 100 MVA, 154 kV이다. 현재, 한국산업기술대학교에서 경상대학교와 협력연구를 통하여 HTS 변압기에 대한 개념설계가 진행 중에 있다[3]. HTS 변압기 개발연구에서 권선 배치는 교호배치와 동심배치 두 가지에 대하여 적용연구 중에 있다. 교호배치는 권선이 용이하고 구조가 간단하지만 동심배치와 비교하여 권선의 교류 손실이 크다[4]. 따라서 현재는 권선을 동심배치하여

HTS 변압기에 적용하는 연구가 활발히 진행 중이다. 기존에 설계한 Double pancake 권선을 가지는 동심배치는 권선과 권선의 접합 시 접합점이 많이 발생하여 HTS 변압기의 장점이 많이 감소하게 된다. 이런 관점에서 본 연구에서는 고전압측은 접합점을 줄일 수 있는 연속 디스크권선을 사용하고 저압측은 레이어 권선을 사용하였다. 하지만 연속디스크 권선을 HTS 변압기에 적용하기 위해서는 HTS 변압기가 운전되는 액체 질소에서 절연특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이미, 많은 연구자들이 액체 질소의 절연특성과 기포의 영향 등 액체 질소 내에서 발생하는 절연파괴 현상에 대하여 연구가 이루어져 있으며[5-6], 국내에서도 pancake 코일을 모의한 전극계를 이용한 절연파괴, 연면 방전과 기포 영향 등에 대하여 많은 연구 결과가 발표되었다[7-8].

따라서 본 연구에서는 개발 중인 154 kV급 HTS 변압기의 절연구조를 크게 4가지로 분류하였으며, 각 절연구조에 따른 실험적 결과를 토대로 극저온 절연 데이터베이스를 구축하고 이를 활용하여 154 kV급 고온 초전도 변압기의 절연설계를 수행하였다.

#### 2. 절연 구조

Fig. 1에 연속디스크 권선을 적용한 HTS 변압기의 절연구조를 나타낸다. 변압기는 cryostat, 코어, 권선 등으로 구성된다. Cryostat는 원통형의 구조로 이루어져 있으며 코어는 원통의 중심을 관통하는 레그와 원통 양측에 위치하는 레그 두 개를 합한 총 세 개의 레그 코어를 가지는 구조이다.

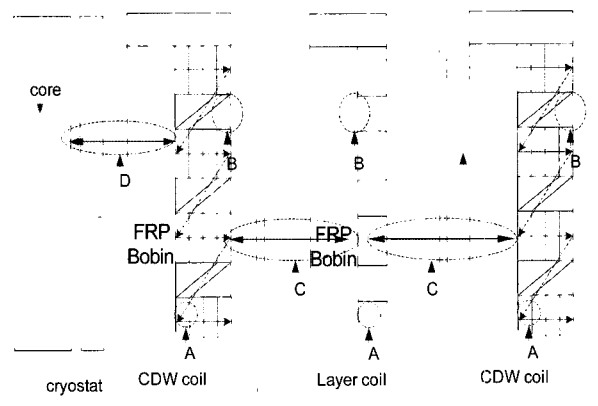


Fig. 1. Insulation construction of HTS transformer.

<sup>1</sup>학생회원 : 경상대 대학원 전기공학과

<sup>2</sup>정 회원 : 경상대 전기공학과

\*교신저자 : shkim@gsnu.ac.kr

원고접수 : 2007년 1월 4일

심사완료 : 2007년 2월 26일

연속디스크 권선은 원통 중심에서부터 H1-L-H2로 배치되는 동심배치구조이다. 절연은 turn-to-turn (part A), layer-to-layer (part B), main insulation (part C), coil-to-ground (part D)의 구조로 각각 구성되어진다. Part A의 절연내력은 턴간 절연에 사용되는 kapton 필름의 절연두께와 지권방법에 의존한다. Part B의 절연내력은 FRP의 연면방전 내력에 의존한다. Part C의 절연내력은 액체질소와 배리어(barrier)에 의존하게 된다. 고압(H) 및 저압(L) 권선부와 접지부 사이의 절연인 Part D는 액체질소와 FRP의 관통 절연 내력에 의존한다. 여기서 유의할 것은 권선의 배치에 따라서 절연의 구성이 달라진다는 것이다. 연속디스크 권선을 적용한 변압기의 경우 턴간 절연에는 kapton 필름을, 층간 절연에는 FRP 보빈과 스페이스를, 주 절연부와 권선-접지부 절연은 액체질소와 FRP 배리어를 사용하여 절연하게 되며, 이들의 절연 특성 분석을 통해 연속디스크 권선형 154 kV급 고온초전도 변압기의 절연설계가 가능하게 된다.

### 3. 실험결과 및 고찰

154 kV급 고온초전도 변압기의 전기적 절연설계를 위하여 각 절연구조별 모의 전극계를 이용하여 절연과괴 전압을 측정후 이 전압과괴 전압을 와이블 (weibull) 통계 처리를 통해 0.1% 절연과괴 전압 값을 획득하였다.

턴간 절연 시험용 모델은 고온초전도 도체를 모의하여 제작한 구리 도체에 kapton 필름을 butt-gap 방식으로 절연하여 제작하였다. 구리 도체의 두께는 0.5 mm, 폭은 4.5 mm이며, 앞선 턴간 절연특성을 토대로 두께 0.025 mm, 폭 10 mm의 kapton 필름을 상·하층 간에 10%씩 중첩하여 3층으로 지권하였다. 각 층의 절연은 절연지 폭의 10%가 겹치도록 하고, 2층의 절연지는 1층 절연지 폭의 중간에서 같은 방향으로 10% 중첩하여 지권하였다. 그리고 3층의 절연지는 1, 2층의 절연지와 반대 방향으로 지권하여 기계적 약점을 보완하였다. 이러한 코일 절연방식은 절연지 상·하층간의 중첩을 통해 butt-gap이라는 절연상의 약점을 보완해 줄 수 있으며, 3층의 절연지를 반대 방향으로 지권해 줌으로써 절연지의 풀림을 최소화 시켜줄 수 있는 장점을 가지고 있다. 턴간 절연모델은 직경 (d) 60 mm인 FRP 원형 포머(former) 한 쌍에 위의 방식으로 절연된 구리 도체를 각 1회씩 감아 고전압과괴 접지 전극으로 사용하였다.

Fig. 2에 턴간 모델에서 ac 및 impulse 시험 결과를 나타낸다. 그림에서 점들은 절연층수에 따른 평균과괴 전압을 나타낸다. impulse의 경우 ac에 비해 약 2~3 배 정도 높은 전압을 나타내고 있으며, 두 경우 모두 턴간 절연회수의 증가에 따라 점차 포화하는 형태를 보여주고 있다. 절연층수가 3층일 경우 절연과괴 전압의 와이블 통계처리를 통한 0.1% 절연과괴 전계는 ac가 약 50 kV/mm, impulse가 약 100 kV/mm로 조사되었다.

Fig. 3은 FRP의 연면길이에 따른 절연과괴 전압과 와이블 분포를 통한 0.1% 전압값을 나타낸다. FRP는 권선의 보빈과 층간 스페이스로 사용이 되기 때문에 층간 절연의 설계를 위해서 연면방전 특성이 필요하다. 연면방전 전압은 ac와 impulse 모두 연면길이가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 4는 FRP의 두께에 따른 절연과괴 전압과 와이블 분포를 통한 0.1% 전압값을 나타낸다. FRP는 권선의 보빈과 층간 스페이스로 사용이 되기 때문에 코일과 접지, 층간 절연의 설계를 위해서 관통 특성이 필요하다. 절연과괴 전압은 ac와 impulse 모두 두께가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었지만 와이블 분포를 통하여 구한 0.1% 전계값에서는 ac는 두께증가에 따라 감소하는 경향을 나타내지만 impulse는 증가하는 경향을 나타내었다.

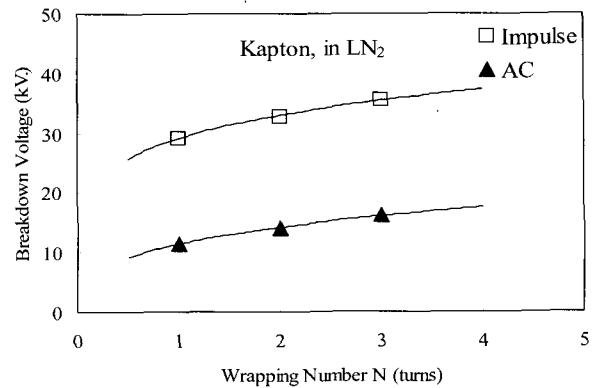


Fig. 2. Breakdown voltage of turn-to-turn insulation model depending on wrapping number.

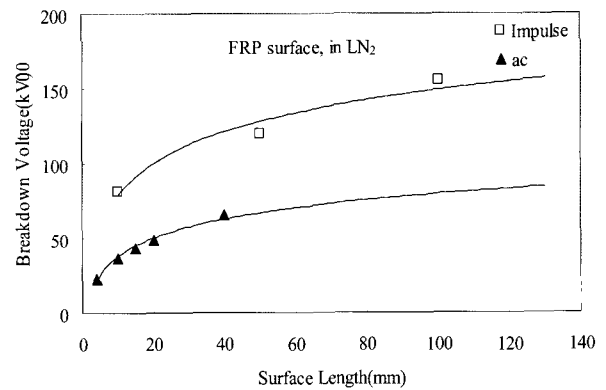


Fig. 3. Flashover voltage of FRP depending on surface length.

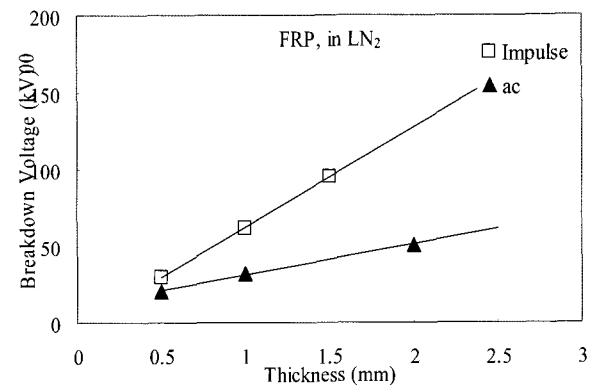


Fig. 4. Breakdown voltage of FRP depending on thickness.

Fig. 5는 액체질소의 전극간 거리에 따른 절연파괴 전압과 와이블 분포를 통한 0.1% 전압값을 나타낸다. 액체질소는 변압기의 냉매뿐 아니라 절연물로도 사용된다. 액체질소는 안정된 상태에서 높은 절연내력을 나타내지만 비등이 쉽게 발생하고 비등시 발생한 기체는 액체에서 기포형상으로 존재하게 된다. 이 기포를 포함한 액체질소는 매우 낮은 절연내력을 나타낸다. 기포는 여러 가지 요인에 의해서 발생하고 고전계 부분에서도 부분방전에 의해 기포가 발생된다. 액체질소의 절연파괴 전압은 간격이 증가함에 따라 증가하지만 0.1% 전계값은 간격이 증가함에 따라 ac와 impulse 모두 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig. 6은 전극간 거리  $G=10$  mm, 컬러의 길이  $H=30$  mm로 일정히 하고 두께가 0.5 mm인 경우 배리어 위치에 따른 ac 절연파괴 특성 곡선을 나타낸다. 배리어가 없는 경우인 액체질소만의 절연파괴 전압 값은 그림 중에서 실제로 나타낸다. 그림에서 배리어가 평판전극 쪽에 가까이 위치할 경우는 배리어가 없는 경우와 유사한 절연파괴 값을 나타내나, 배리어가 침전극 쪽으로 접근 할수록 절연파괴 전압은 급격히 상승하고 있음을 알 수 있다. 배리어가 침전극 쪽에 아주 근접한 위치(침전극 쪽에서의 약 10% 지점)인 경우는 배리어가 없는 경우의 절연파괴 전압의 약 2배 가량 증가하였다. 그러나 배리어가 침전극에 밀착한 경우의 절연파괴 전압은 다소 감소하였다. 따라서 최적의 배리어 삽입 위치는 고전압측 10% 지점인 것으로 사료된다.

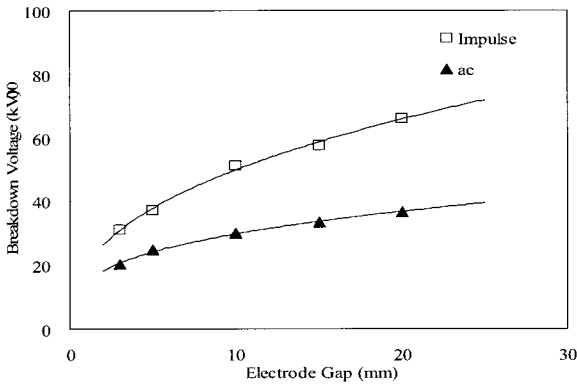


Fig. 5. Breakdown voltage of LN<sub>2</sub> depending on electrode gap.

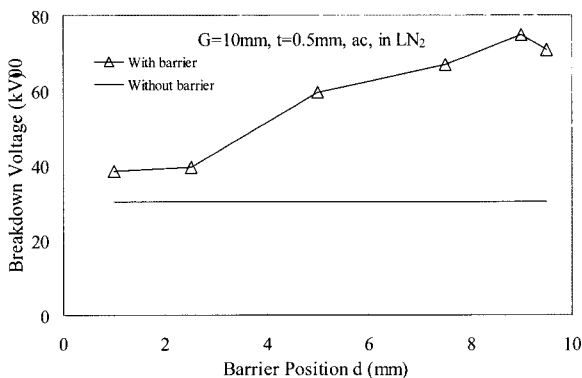


Fig. 6. Ac breakdown voltage of barrier depending on barrier position.

이와 같은 경향은 절연파괴 전압값의 차이는 있으나 정극성의 임펄스 전압을 인가한 경우(Fig. 7 참조)에도 유사한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 8은 전극간 거리  $G$ 에 따른 절연파괴 특성을 나타낸다. 두께  $t=0.5$  mm인 배리어 한 개를 침전극 쪽 10%인 지점에 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 위치 변화에 따라 방전 경로가 길어져서 절연파괴 전압이 상승한 것으로 판단된다.

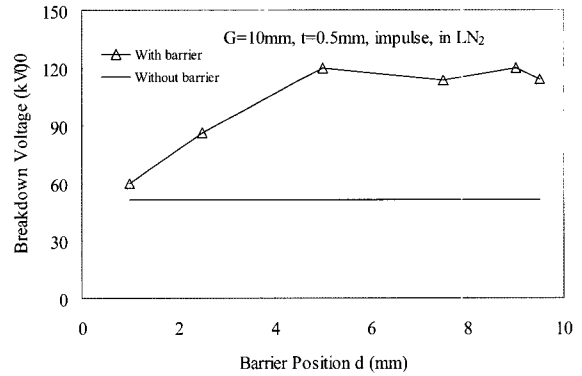


Fig. 7. Impulse breakdown voltage of barrier depending on barrier position.

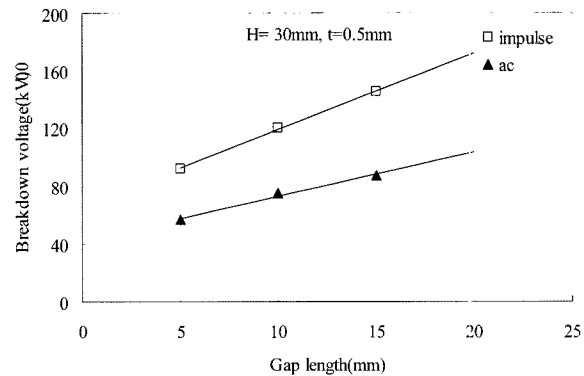


Fig. 8. Breakdown voltage of barrier depending on electrode gap length.

#### 4. 미니모델 변압기의 절연설계

실험에 의하여 구해진 액체질소의 절연파괴 및 액체질소 중에서의 kapton 필름, FRP, 배리어 등의 절연파괴와 연면방전의 복합적인 기초절연파괴 특성을 이용하여 BIL 750 kV를 만족하는 사양으로 154 kV HTS 변압기의 권선 절연설계를 수행하였다.

절연설계는 구해진 실험적 결과의 와이블 통계처리를 통해 0.1%의 절연파괴 전압을 계산하고 목표전압인 BIL 750 kV을 만족하는 절연두께 및 이격거리를 계산하는 방식으로 이루어졌다. 154 kV급 미니모델 변압기의 절연을 위한 턴간 절연은 kapton 필름 3층으로 하며, 층간은 FRP 연면길이 3 mm, 고-저압간 절연 이격거리는 100 mm로 설계되었다. Table 1에 제작할 보빈과 고온초전도 미니모델 변압기의 사양을 요약해서 정리하였다.

Table 1. Specification of the mini-model HTS transformer.

Arrangement	Concentric(H1-L-H2)
Turn No.	4 turns/pancake × 4 layers
Conductor	Cu 0.5 mm × 4.5 mm
Turn insulator	Kapton 0.024 mm × 710 mm
Inner/outer diameter of winding	140 mm/160 mm(H1 Winding) 360 mm/380 mm(L Winding) 580 mm/600 mm(H2 Winding)
Thickness of winding former	10 mm
Thickness of layer spacer	3 mm
Diameter of barrier	180 mm, 560 mm, 620 mm
Thickness of barrier	0.5 mm

### 5. 결 론

액체질소 및 액체질소 중에서 kapton 필름과 배리어의 절연과피와 연면방전의 복합적인 기초절연과피 특성을 와이블 분포에 의하여 구해진 0.1% 절연과피 확률을 가지는 절연과피 전계를 이용하여 154 kV급 고온초전도 변압기를 위한 전기절연 설계를 하였다. 154 kV급 미니모델 변압기의 절연설계를 위한 턴간 절연은 kapton 필름 3층으로 절연하며, 층간은 FRP 연면길이 3 mm이며, 고-저압간 절연과피 길이는 100 mm이다.

향후 과제으로써 154 kV급 미니모델 변압기를 제작하여 절연과피 시험을 할 계획이며, 이 결과는 154 kV급 고온초전도 변압기를 위한 전기절연 설계의 기초정보로 활용할 것이다.

### 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, pp. 7-11, June 2000.  
 [2] 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.  
 [3] T. Kim, W. S. Kim, S. H. Kim, K. D. Choi, G. W. Hong, H. G. Joo, and S. Y. Hahn, "AC Loss Effects on the Design of HTS Windings for 1 MVA Power Transformer," Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and

Cryogenics, Vol. 6, No. 4, pp. 32-36, 2004.  
 [4] S. M. Baek, J. M. Joung, and S. H. Kim, "Breakdown Properties of Coolant for HTS Apparatus Operating at Cryogenic Temperature," Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 5, No. 1, pp. 52-55, 2003.  
 [5] H. Craig Miller, "Surface Flashover of Insulations," IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp. 765-786, 1989.  
 [6] J. Gerhold, "Properties of cryogenic insulants," Cryogenics, Vol. 38, No. 11, pp. 1063-1081, Nov. 1998.  
 [7] 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.  
 [8] 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.

### 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.



**곽동순(郭東洵)**  
 1975년 9월 3일생, 2002년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



**최재형(崔在亨)**  
 1979년 6월 3일생, 2005년 경상대 공대 전기공학과 졸업, 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.



**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.