

고온초전도변압기 절연설계를 위한 격벽효과와 수명특성

정종만, 백승명, 김영석, 곽동순, 김상현*

경상대학교 전기공학과 및 공학연구원

V-t and Barrier Characteristics for HTS Transformer Insulation Design

Jong-Man Joung, Sung-Myeong Baek, Young-Seok Kim, Dong-Soon Kwak Sang-Hyun Kim

Department of Electrical Engineering & Engineering Research Institute, Gyeongsang National University

Abstract

In the response to an increasing demand for electrical energy, much effort aimed to develop and commercialise HTS power equipments is going on around the world. For the development, it is necessary to establish the dielectric technology in LN₂. Hence many types of dielectric tests should be carried out to understand the dielectric phenomena at cryogenic temperature and to gather various dielectric data. Among the many types dielectric tests, the barrier effect were conducted with the simulated electrode after analysing the insulating configuration of the pancake coil type HTS transformer. The influence of a barrier on the dielectric strength was measured according to the size and the position of the barrier. It was shown that the effectiveness, the ratio of the breakdown voltage in presence of barrier to the voltage without barrier, is highest when the barrier is placed at the needle electrode side. And the barrier effect was not depend on the electrode array. The life time to breakdown with decreasing the applied voltage was increased remarkably having wide error band but the shape parameter in Weibull distribution was almost constant.

Key Words : liquid nitrogen, cryogenic insulation, barrier effect, HTS transformer

1. 서 론

최근 에너지 소비의 증가와 에너지 소비 밀도가 높아짐에 따라 고온초전도 변압기, 케이블, 한류기 등 고온 초전도 응용연구가 활발하게 이루어지고 있다. 고온 초전도 응용기기는 액체 헬륨(He, 4.2K)에 비해 취급이 용이한 액체 질소(N₂, 77K)를 냉매로 사용하고 있다.

액체질소는 비등 점이 낮으며, 또한 증발잠열이 작아 열 침입, 손실 등에 의해 기포가 쉽게 발생하여 절연성능도 크게 저하된다. 따라서 지금까지의 연구에서는 액체질소 중에서 열 기포에 대한 절연 성능 및 절연파괴기구에 대한 연구[1]가 많이 이루어지고 있으나 초전도응용기기의 절연설계를 위한 액체-고체의 복합계 절연연구는 여전히 미흡한 실

정이다.

초전도 변압기의 경우는 서울산업기술대학교 주관으로 더블팬케이크 코일을 권선으로 사용하여 단상, 22.9 (kV), 1 (MVA) 급이 개발되고 있다. 구조적인 절연구성을 살펴보면 크게 고압-저압 권선 부의 주 절연, 권선의 턴간 및 층간 절연, 권선 부와 접지 부와의 절연 환경이 있다[6]. 특히 주 절연부인 고압-저압 권선 간은 전계가 가장 강하게 작용하는 곳이다. 그리고 고압 및 저압 권선은 각각 8개, 4개의 더블팬케이크 코일로 나뉘어 직렬 연결되고 8개의 주 절연 부를 가지게 된다. 따라서 고온초전도변압기의 소형화, 경제성 등을 위하여 권선 간 절연의 효율적인 설계가 요구된다. 권선 간의 절연은 권선 부를 지지하여 충분한 이격거리

를 유지하기 위한 스페이스를 사용하는 방법과 권선 간에 얇은 절연물을 배치하는 방법이 있다. 권선 사이에 스페이스를 두게 되면 절연물이 없을 경우보다 연면방전에 의해 절연내력이 크게 저하되지만 얇은 절연물인 배리어를 배치하게 되면 절연내력을 향상시킬 수 있다[2].

따라서 본 논문은 이와 같은 관점에서 변압기 권선 부의 형태를 모의한 전극계를 이용하여 액체질소 중 배리어의 위치, 컬러 길이, 전극간 거리에 따른 절연 특성 및 v-t 특성에 대하여 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험 장치는 크게 저온 용기, 고전압 발생장치, 전극계, 디지털 카메라 등으로 구성되어 있다. 저온 용기는 내조와 외조의 이중 구조로 구성되어 있다. 각 내·외조의 용기는 진공 층을 두어 열침입을 최소화 하였으며, 또한 저온용기에는 관측 창을 두어 방전 현상 및 액체 질소의 거동을 육안으로 관찰할 수 있게 했다.

고전압 발생은 최대 출력 전압이 교류 100 (kV) 인 전압원(BAUR사)을 사용하였으며 전압인가는 전극계에 고전압을 인가하여 1 (kV/s)의 속도로 절연파괴가 일어날 때까지 상승시켰다. 20회 이상의 실험을 통해 데이터를 취득하였고 각 특성 그래프에는 평균값, 최대값, 그리고 최소값을 나타내었다.

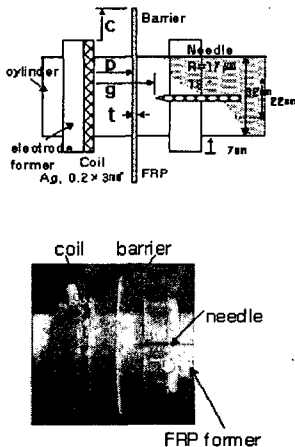


그림 1. 전극계의 개략적인 구성도와 전극계 사진.

전극계의 개략적인 구성과 구성된 전극계의 모습

을 그림 1에 나타낸다. 전극계는 크게 코일(coil), 침 전극 그리고 배리어(barrier)로 구성되어졌다. 전극포머(electrode former)는 내경 32 (mm), 외경 46 (mm)의 FRP(Fiber Reinforced Plastic)로 제작하였고 전극포머 위에 코일 및 침 전극을 부착하였다. 전극은 또다시 원통에 위에 설치하였다. 그림에서 p는 배리어의 위치, g는 전극간 거리, c는 컬러길이를 나타낸다.

이때 코일전극은 고온초전도선재와 유사한 형상으로 제작한 것으로 두께 0.2mm, 폭 3mm이며 가장자리의 곡률 반경이 약 33.2 μ m인 Ag 테이프를 1회 권선한 것이다. 또한 침전극은 선단반경 17 μ m, 선단각도 18°로 선단가공이 정교한 오쿠라 전극을 사용하여 전계 집중 부를 모의하였다.

배리어는 두께 1 (mm)의 FRP이며, 원통에 에폭시를 이용하여 고정시켰다. 이때 배리어가 코일보다 큰 반경을 컬러(collar) 길이라고 정의하고 길이를 다르게 하여 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 컬러길이가 2.5 (mm)일 때 전극간 거리에 따른 배리어 특성을 나타낸다. 배리어의 위치는 전체 전극간 거리에 대한 배리어 위치를 백분율로 나타내었다. p=100 (%)인 경우는 배리어가 코일 전극에 밀착되어 있을 경우이고, p=0 (%) 일 경우는 코일 전극에 밀착되어 있을 경우를 나타낸다.

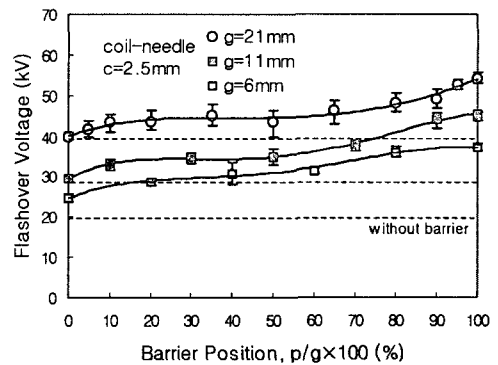


그림 2. 전극간 거리에 따른 배리어 특성.

그림을 살펴보면 전극간 거리가 다르더라도 배리어의 위치가 일정하면 절연파괴 특성이 일정하

게 나타남을 볼 수 있다. 또한 배리어의 위치에 따른 절연파괴전압을 그림과 같이 크게 세 영역으로 나누어짐을 알 수 있다. 첫째 절연파괴전압이 최소값에서 증가하는 영역, 둘째 절연파괴전압이 일정한 영역, 마지막으로 절연파괴전압이 증가하여 최고 값을 나타내는 영역이다.

고온초전도변압기에 사용하는 경우 배리어 효과는 전계가 낮은 곳에서 높은 곳으로 배리어의 위치를 옮김에 따라 절연파괴 전압을 상승시킬 수 있다. 그러나 전계가 집중된 침 끝으로 이동함에 따라서 지속적인 증가가 이루어지지 않고 배리어가 전극의 중간영역에서 포화하는 경향을 나타낸다. 이것은 배리어가 침 전극과 가까운 위치에 있는 경우는 부분방전으로 인해 발생한 공간 전하의 존재로 인해 전계의 분포를 균일하게 하는 효과가 크게 작용하고 있으나 배리어가 침전극과 멀어짐에 따라 기체의 부유 및 액체의 대류에 의해 공간 전하의 축적이 어려워져 방전 스트리머의 진전을 방해하는 효과가 크게 작용하는 것으로 사료된다.

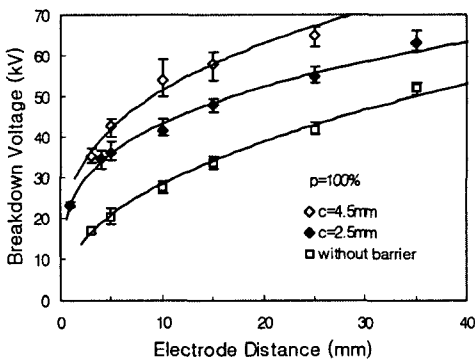


그림 3. 배리어의 위치가 침 단 부에 있을 시 $c=2.5, 4.5\text{mm}$ 및 배리어가 없을 경우의 전극간 거리에 따른 절연파괴 특성.

그림 3은 배리어의 위치가 침 단 부에 있을 시 $c=2.5, 4.5$ 및 배리어가 없을 경우의 전극간 거리에 따른 절연파괴 특성을 나타낸다. 그림과 같이 전극간격이 작을 경우에는 배리어 효과가 작게 나타나고 컬러 길이 c 가 2.5mm 일 경우 전극간 거리가 5mm 부근에서 배리어 효과가 크게 상승하고 점차 포화되고 있다. 그리고 c 가 4.5mm 일 경우에는 포화가 시작되는 지점이 약간 증가하고 있음을 알

수 있다. 이는 전극간 거리가 커짐에 따라 배리어의 컬러길이는 상대적으로 작게되므로 방전경로의 왜곡이 완화되어 배리어 효과가 감소하는 것으로 사료된다. 따라서 적절한 컬러의 설정으로 배리어 효과를 최대화 할 수 있을 것이다.

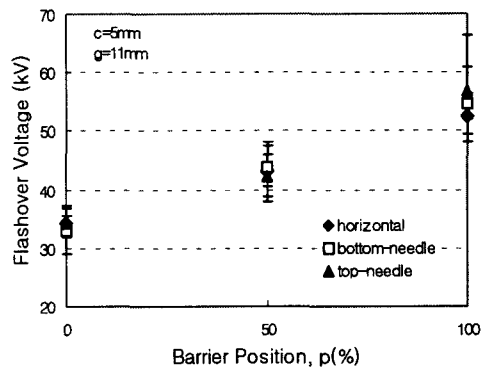


그림 4. 전극의 배치에 따른 배리어 특성.

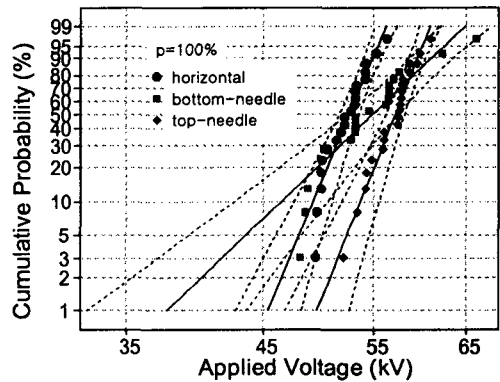


그림 5. 배리어 위치 p 가 100% 시 전극배치에 따른 절연파괴 전압에 대한 와이블 분포

그림 4는 전극계의 배치에 따른 배리어 특성을 나타낸다. 코일-침 전극을 수평(horizontal)으로 배치하였을 경우와 코일-침 전극을 수직으로 배치하고 침 전극이 아래(bottom-needle) 또는 위(top-needle)에 두었을 경우를 비교하였다. 배리어의 위치에 따른 절연파괴 특성은 세 가지의 전극 배치 모두 배리어가 침 전극에 밀착시켰을 경우 절연파괴 전압이 가장 높게 나타나 이전과 같은 경향을 보이고 있다. 그러나 전극 배치에 따른 특성을 살펴보면 침 전극에 가까이 갈수록 배치에

따라 약간의 차이를 보이지만 큰 차이 없음을 알 수 있다.

그림 5는 배리어 위치 p 가 100%시 전극배치에 따른 절연파괴 전압에 대한 와이블 분포를 나타낸다. 침 하부의 수직배치인 경우 형상계수가 11로 수평배치, 침 상부 각각의 형상계수 28, 29에 비해 상당히 낮은 값을 가지고 있다. 이는 그림 4의 침 하 수직 배치인 경우 절연파괴 전압의 평균값은 큰 차이를 보이지 않지만 비교적 우발적인 절연파괴가 심하다는 것을 나타낸다. 이는 부분방전에 의해 하부의 침과 배리어 사이에서 발생하는 기포가 배리어 면에서 흐름을 방해받기 때문으로 생각되며 기포 배출을 위한 냉각채널의 영향 크게 작용함을 나타낸다.

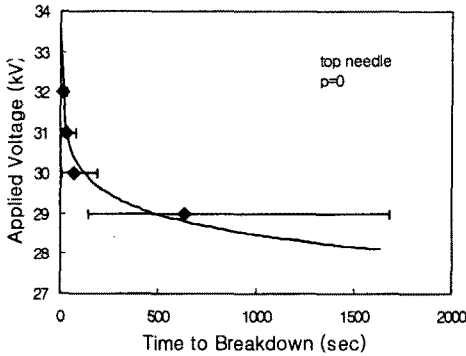


그림 6. 배리어의 위치 $p=0$ 일 경우 수명특성.

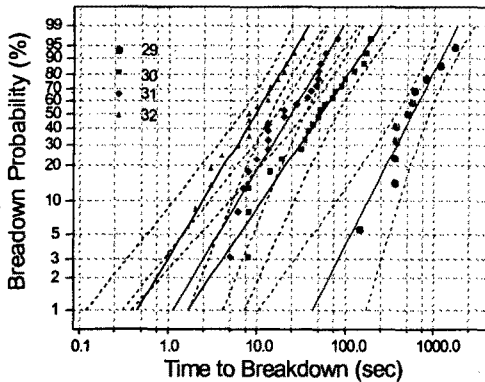


그림 7. 수명특성에 대한 와이블 분포.

그림 6은 $c=5$ (mm), $g=11$ (mm), $p=0$ 일 경우의 수명 특성을 나타낸다. 인가전압을 32, 31, 30, 29

(kV)를 각각 인가했을 경우 절연파괴가 일어나기까지의 시간을 나타낸다. 인가 전압이 낮아짐에 따라 평균수명이 크게 증가하지만 에러바의 범위가 굉장히 넓게 분포하고 있다. 하지만 그림 7은 수명 특성에 대한 와이블 분포를 나타낸 그림으로 각각의 형상계수를 살펴보면 1.2~1.4 범위에서 거의 일정한 값을 나타내고 있어 일정한 절연파괴 기구가 작용하고 있다고 사료된다.

4. 결론

이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 배리어 위치에 따른 절연파괴 특성은 코일 전극에서 침 전극 쪽으로 이동함에 따라 절연파괴전압이 지속적으로 증가하지 않고 배리어 위치 50% 부근에서 포화된 후 최대 값을 나타내었다.
- (2) 전극간 거리에 따른 배리어 효과는 전극간 거리가 작은 경우에는 켈러길이의 영향이 적게 나타났으며 점점 더 전극간 거리가 커짐에 따라 최대값을 가지고 다시 감소하는 특성을 나타낸다.
- (3) 코일-침전극의 수평배치 및 침 상부, 침 하부의 수직배치에 따른 배리어 효과는 배치와 무관하게 배리어가 침 단에 가까울수록 절연파괴전압이 상승하였다.
- (4) 배리어 효과의 수명특성은 인가전압이 낮아짐에 수명에 대한 에러바의 범위가 커지게 나타났다. 하지만 형상계수는 일정하게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] M.Hara, J.Gerhold, "Electrical insulation specification and design method for superconducting power equipment", Cryogenics, Vol.38, No.11, pp.103-1061, 1998
- [2] Y.Yamano, Y.Takahashi, S.Kobayashi, "Improving insulator reliability with insulating barriers," IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.25, No.6, 1990.