

Double pancake 코일 내부의 절연구성 연구
Dielectric composition of the double pancake coil interior

정종만, 백승명, 곽동순, 이정원, 김상현

Joung Jong Man, Baek Sung Myeong, Kwak Dong Sun, Lee Joung Won, Kim Sang Hyun

경상대학교 전기공학과(공학연구원 자동화 컴퓨터 연구센터)
Department of Electrical Engineering, Gyeongsang University(Automation and Computer
Research Center of Engineering Research Institute)

Abstract - For insulation design of the superconducting transformer, many types of insulation tests should be carried out. To clarify the components of insulation for superconducting transformer, there are main four parts as like that turn-to-turn interior of each primary and secondary windings, layer-to-layer between primary and secondary windings, and winding to grounded structures. The insulation components should meet the required withstand voltage of the system and enough safety factors must included. As the fundamental insulation characteristics, we tested surface flashover voltage of spacer that would place between the coils and would take the role of both cooling duct and insulator. The structure of spacer in practice vary depending on coil type, in this work we considered double pancake coil for the superconducting transformer. In this study we tested flashover voltages of several arrangement of spacer.

1. 서론

고온초전도체의 발견 이후 초전도체의 임계전류의 향상과 장치 선재의 개발과 더불어 그 응용연구가 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 이미 여러 선진 국가에서는 초전도 응용기기의 개념설계 및 상세 설계가 이루어졌으며 전력계통과의 연계를 위한 연구개발에까지 이르렀다. 국내에서는 21세기 프론티어 연구개발사업의 하나로 차세대초전도응용 기술개발 사업단이 구성되어 초전도전력응용기기의

실용화를 위한 연구 개발이 가속화 되었다.

에너지 수요 및 소비밀도의 증가, 환경 문제 등에 대처하고 효율성과 경제성을 향상시키기 위한 차세대 전력응용기기로 연구 개발되고 있는 초전도 기기에는 변압기, 케이블, 한류기 및 반도체 소자 부문 등 여러 종류의 것이 있다. 본 논문에서는 그 중 초전도 변압기 개발을 위해 극저온 및 초전도 변압기의 절연구성에 대하여 살펴보았으며 초전도 변압기의 권선 형태인 double pancake 코일내부에서의 절연특성에 대하여 논의하였다.

2. 본론

2.1 초전도기기의 절연환경

초전도응용전력기기는 고전압, 대전류의 대용량 전력수송 장비로 사고에 의한 영향범위가 넓고 크기 때문에 높은 신뢰성이 보장되어야 할 것이다. 따라서 초전도응용기기가 사용되어지는 새로운 환경에 대한 절연연구의 필요성이 강하게 대두되고 있다. 고온초전도응용기기는 일반적으로 액체질소에 침적하여 운전하거나 고온초전도체의 임계전류특성을 향상시키기 위해 액체질소 온도보다 낮게 과냉각하여 사용한다. 상용 전력기기의 절연에서는 저항손에 의한 온도상승에 따른 절연특성을 위주로 연구되어져 왔지만 초전도응용기기가 개발되기 위해서는 극저온에서의 절연특성연구가 필수적이라 하겠다.

액체질소에 침적하여 사용되어지는 초전도전력기기의 절연환경은 크게 그림 1과 같이 나눌 수 있다. 우선 액체질소에 침적되어져 있는 초전도기기 부분에서는 액체질소, 액체질소 중의 질소기포, 도체 부를 지지하는 고체절연물 등이 있으며 극저온에서 상온까지의 열 분포를 가지는 전원도입부에서

는 극저온의 질소 기체와 상온의 질소 기체로 이루어져 있다. 또한 권선 절연 테이프 및 절연 컴파운드도 포함된다[1].

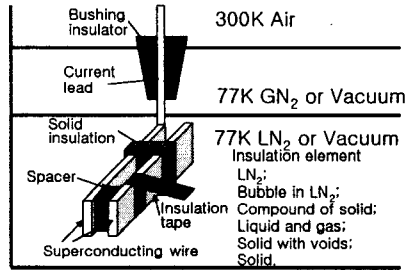


그림 1 침적형 고온초전도기기의 절연환경

현재 개발되어지고 있는 고온초전도변압기는 22.9kV, 1MVA 용량으로 중소규모 배전용 변압기이다. Double pancake 코일 형태의 권선을 가지며 상온 철심을 가지는 단상 변압기이다. 따라서 극저온 용기로 격리되어 상온 부에 설치될 철심을 제외하게 되면 초전도변압기의 구조에 따른 기본적인 절연구성은 그림 2와 같다. 크게 4가지로 나눌 수 있으며 그 구성요소는 A) 극저온과 상온을 연결하는 전원도입부 B) 절연과 코일의 턴간 절연, C) double pancake 코일간인 layer간 절연 그리고 D) 도체 부와 극저온 용기간의 절연이다[2].

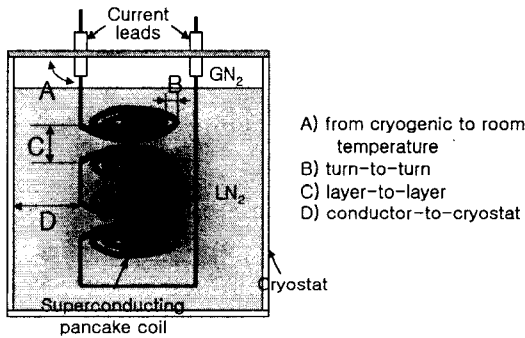


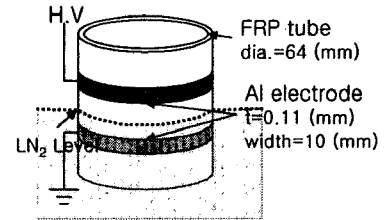
그림 2 초전도변압기의 절연구성

특히 권선시 C) 부의 layer간에는 코일의 지지와 초전도체의 냉매를 위하여 스페이서를 사용하게 되는데 이 스페이서는 상하부의 도체를 연결하여 연면방전을 유도할 수 있다. 이러한 연면방전은 고체 절연물이나 액체질소의 절연파괴 전압보다 낮아 큰 문제가 된다. 또한 연면방전은 고체절연물의 형상, 전극 표면의 상태, 절연물의 재료, 인가되는 전압의 형태 등에 의하여 다양한 특성을 나타낸다[3].

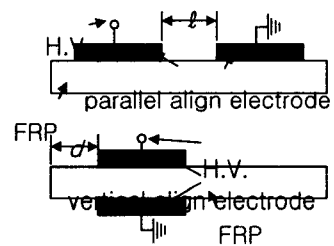
2.2 실험 장치 및 방법

Double pancake 코일의 layer간 절연구성은 하나의 double pancake 코일, 한 section 내에서는 코일의 원주를 따른 가장자리가 고전압 부가되며 double pancake 코일간의 직렬접속에서는 코일권선의 former에 접한 내측이 고전압 부가된다. 따라서 본 실험에서는 double pancake 코일의 내측 및 권선의 외측에서의 연면방전의 영향을 살펴보기 위해 그림 3의 실험 개념도와 같이 전극계를 구성하였다. 또한 절연구성도 그림 3 A)와 같이 부분침적에 의한 연면방전의 영향도 살펴보았다.

권선 외측에 있어서는 layer간에 원판의 스페이서를 넣을 경우 그림 3 (b)에서 d의 길이에 따른 연면특성을 나타내게 될 것이다. 이때 d의 길이를 collar라고 정의하였으며 l의 길이를 연면거리로 나타내었다.



(a)



(b)

그림 3 실험 개략도, (a) 권선 내측, (b) 권선 외측에 대한 연면방전 실험

구성된 전극계는 아세톤으로 초음파 세척을 한 후 그림 4와 같은 극저온 용기에 질소를 담아 침적하였다. 극저온 용기는 pyrex 유리로 제작되었으며 각 진공 층을 가진 저온용기(cryostat)로 두 개로 구성되었으며 내, 외조를 이루고 있다. 또한 각 cryostat는 내벽에 열복사를 차단하기 위해 은으로 도금을 하였으며 20mm폭의 관측창을 두어 방전 시 현상을 관측할 수 있게 하였다. cryostat의 외조는

내조에 채워진 액체질소의 안정을 위해 액체질소로 채워 실험을 하였다.

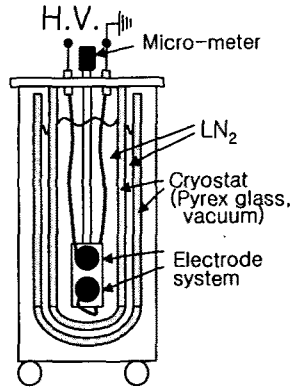


그림 4 극저온 용기

액체질소에 침적된 전극에는 90 (kV), 300 (VA) 용량의 BAUR DTS AC 전원 장치를 이용하여 1 (kV/s)의 속도로 방전이 일어날 때까지 전압을 상승시켰다. 매회 10회 측정하여 그 평균치를 그림에 표시하였으며 최대치와 최소치도 나타내었다.

실험에 사용된 재료는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)이다. GFRP는 극저온에서 열변형이 적고 기계적으로 안정하여 초전도전력기의 구조물 및 절연재료로 현재 널리 사용되고 있다 [4].

3. 실험결과 및 고찰

그림 5는 액체질소의 액면에 따른 연면방전 특성을 나타낸 그림이다. 액체에 침적하여 사용하는 모든 전력기기는 액면을 가지게 되며 액면의 변화에 따라 연면방전 전압의 차이를 나타내게 된다[5]. 액면이 점점 떨어짐에 따라 연면방전 전압은 저하되는데 특히 50%의 액체질소 액면을 전후로 큰 차이를 나타내고 있다.

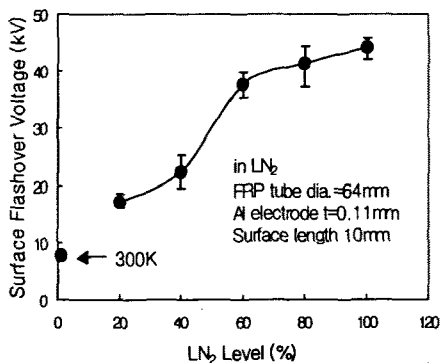


그림 5 액체질소의 침적높이에 따른 연면방전 특성

이러한 액면에 따른 특성은 특히 한류기에서는 사고전류를 제한할 때 냉매의 급격한 비등으로 인해 액체질소의 유실이 생기게 되어 그림과 같은 과도 상태를 겪게 될 것이다.

그림 6은 실험 개념도 (b)에서 전극의 수직배치에 대한 연면방전 특성을 나타낸다. 각각의 FRP 두께에 대하여 collar 길이에 따른 연면방전 특성은 크게 증가하지 못하고 포화하게된다[6].

연면방전전압 V_s 를 collar길이 d 에 대한 실험식을 다음과 같이 나타낼 수 있는데 $V_s = kd^m$ (d : collar 길이, k , m 은 정수) 그림과 같은 추세선으로부터 m 값을 구하게 되면 m 값은 $t=1, 2, 5$ (mm) 일 때 각각 $m=0.22, 0.27, 0.33$ 으로 두께의 증가와 더불어 증가하고 있다. 이는 따라서 collar에 따른 연면방전 전압은 collar 길이보다 스페이스의 두께에 더 크게 의존함을 알 수 있다.

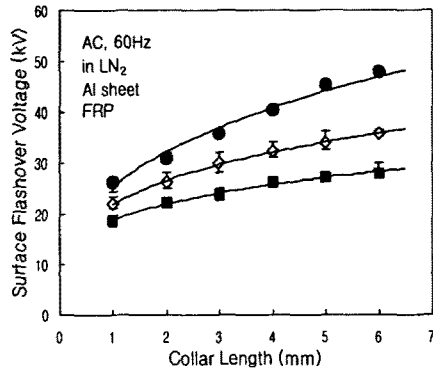


그림 6 collar 길이에 따른 연면방전 특성

그림 7은 그림 3의 실험개념도 (b)에서 전극의 수평배치에 대한 연면방전 전압 특성을 나타내고 있다. 실험식을 나타내면 $V_s = 12.801 l^{0.4}$ 로 나타내어진다.

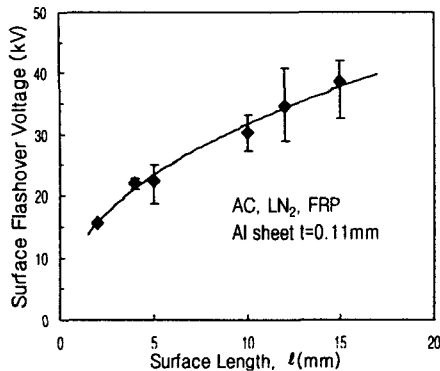


그림 7 연면거리에 따른 연면방전 특성
 그림 8은 그림 6과 그림 7의 특성을 같이 나타내었다. 그림 6의 collar길이를 총연면길이로 환산 (collar길이×2+두께)하여 평행한 전극배치의 연면방전 특성과 비교하였는데 이때 수평배치의 특성이 t=2mm인 수직배치의 연면방전 특성과 거의 같은 경향을 보이고 있다. t=2mm 이상의 수직배치에 대한 연면방전 특성에서 충분한 연면방전에 대한 두께 효과를 얻을 수 있음을 나타낸다.

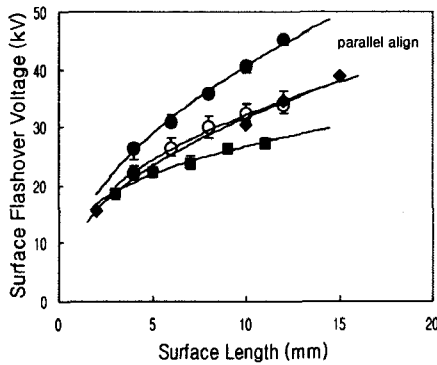


그림 8 평행전극 배치와 수직 전극배치의 연면방전특성의 비교

4. 결론

본 연구에서는 초전도응용기기의 절연구성을 살펴보고 있으며 초전도 변압기의 권선구조에 따른 절연 특성을 살펴보았다.

전극에 액체질소에 부분만 침적되었을 경우 액면 높이가 전극간 거리의 50%를 전후하여 연면방전 전압의 변화가 크게 발생하였으며, 수직배치의 전극 구조에서는 연면방전은 collar길이 보다 스페이스의 두께에 더 크게 의존하였으며 수평배치의 연면방전 전압과 비교했을 때 t=2mm 이상에서 두께 효과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] J.Gerhold, "Cryogenic Liquids - A Prospective Insulation Basic for Future Power Equipment," IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.9, No.1, February 2002
- [2] H.Okubo, M.Hikita, H.Goshima, H.Sakakibara, N.Hayakawa, "High Voltage Insulating Performance of Cryogenic Liquids for Superconducting Power Apparatus," IEEE/PES Winter Meeting, 1996
- [3] Craig Miller, "Surface Flashover of Insulations," IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.24, No.5, pp.765-786, 1989
- [4] S.Usami, T.Suzuki, H.Ejima, K.Asano, "Thermo-mechanical properties of epoxy GFRPs used in superconducting magnet winding," Cryogenics 39, pp.905-914, 1999
- [5] 김영석, 이병성, 백승명, 정종만, 정순용, 김상현, "액체질소 중에서 spacer의 부분적 침적에 대한 연면방전 특성," 전기전자재료학회 논문지, Vol.13, No.2, pp. 177-182, 2000
- [6] Tanzo Nitta, Masakuni Chiba, Hisashi Uemtsu, "Characteristic of AC Surface Spark Voltage in LN₂ and LHe," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.10, No.1, March 2000