

고온초전도 한류기용 코일의 턴간 절연 특성

Turn-to-Turn Dielectric Characteristics of Coils for HTSFCL

백승명, 정종만, 이창화, 류엔반동, 김상현

Seung-Myeong Baek, Jong-Man Joung, Chang-Hwa Lee, Van Dung Nguyen and Sang-Hyun Kim

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

Abstract

Fault current limiters (FCL) are extensively needed to suppress fault currents, especially for trunk power systems heavily connected to high voltage/large current transmission lines. Due to its ideal electrical behavior, high-temperature superconductor fault current limiter (HTSFCL) becomes one of the most important developing trends of limiters in power system. This paper describes the result of an investigation of the dielectric characteristics of turn-to-turn insulation for pancake and solenoid type reactor coil in liquid nitrogen. The influence of thickness in a variety length, on AC, DC and impulse surface flashover has been investigated. Also, the relationships between the number of turn and breakdown characteristics were clarified. The information gathered in this test series should be helpful in the design of liquid nitrogen filled DC reactor type HTSFCL.

Key Words : Dielectric characteristics, turn-to-turn, HTSFCL, Insulation design, liquid nitrogen

1. 서 론

에너지 소비가 증대되면서 고온초전도체를 응용한 전력기기의 용량을 더욱 높이기 위해 대전류, 저전압에서 대전류 고전압으로 응용범위를 넓혀가고 있다. 기존의 전력기기 뿐 아니라 고온초전도 기기의 모든 요소는 사고 전류로부터 발생하는 기계적, 열적 그리고 전기적 스트레스에 견뎌야하지만 전력의 증대와 전송의 네트워크 상태가 복잡해지면서 사고 전류가 더욱 증대하고 있어 정상상태에서는 전력 시스템에 영향을 미치지 않고, 정상상태에서 사고전류를 제한 할 수 있는 한류기의 필요성이 증가되고 있다 [1].

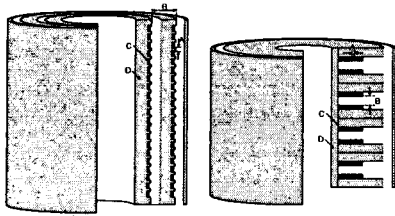
위와 같은 측면에서 고온초전도 한류기(이하 HTSFCL)는 액체헬륨에서 운전되는 저온초전도 한류기보다 냉각비용이 10배 이상 낮아 상업성을 목적으로 국내는 물론 미국, 일본 등의 국가에서 다양한 형태로 개발에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, DC 리액터형 고온초전도 한류기는 정상 상태에

서 DC 전류가 흐르므로 교류 손실이 발생하지 않으며, 사고 시 상전도 상태로 전이 없이 사고전류를 제한할 수 있는 장점이 있다. 하지만 사고전류 제한 시 코일에 고전압이 발생되어 코일을 손상시킴으로 실용화를 위해서는 극저온 환경에서 절연 연구는 필수적이다 [2,3].

본 연구에서는 액체질소(77K)를 냉매로 사용하는 HTSFCL 한류기용 DC 리액터 코일 형태 중 솔레노이드형과 팬케익형 두 가지를 모의하여 코일의 절연 구성 중에서 턴간 절연 특성에 대하여 비교, 검토하였다. AC, DC 그리고 Impulse 고전압을 인가하여 고체절연물의 두께, 길이가 연면방전에 미치는 영향을 고찰하였으며, 고분자 절연물의 절연 회수에 따른 절연 파괴 특성을 고찰하였다. 실용적인 관점에서 본 연구의 결과는 DC 리액터형 HTSFCL을 개발하기 위한 코일의 턴간 절연설계에 기초 자료로 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

2. 실험 절차 및 방법

2.1 DC reactor 코일의 구조



(a) Solenoid type (b) Double pancake type
 그림 1. HTSFCL용 DC 리액터 코일 형태.

Fig. 1. DC reactor coil type for HTSFCL.
 (A: 턴간, B: 층간, C: 고온초전도 권선, D: 보빈)

솔레노이드형과 팬케익형 DC 리액터 코일의 절연계는 턴간, 층간, 그리고 코일과 외함의 대지 절연으로 구성된다. 그림 1의 (a), (b)에 각각 솔레노이드형과 팬케익형 HTSFCL용 DC 리액터 코일 형태를 나타낸다. 솔레노이드형의 경우, 턴간 절연은 보빈의 홈에 고온초전도 선재를 감기 때문에 턴과 턴 사이의 보빈의 연면거리에 의존하며, 층간 절연은 보빈의 연면거리와 액체질소와 기포의 복합계로 구성이 된다. 더블 팬케익형의 경우, 턴간 절연은 액체질소 중 고분자나 절연지를 이용하여 고온초전도 선재를 감싸는 방식이 주로 일반적이다. 층간 절연은 코일의 지지를 위해 스페이스의 사용이 불가피하므로 턴간 절연물과 스페이스의 연면거리의 복합계로 구성된다.

2.2 전극계 구성 및 실험 방법

솔레노이드형의 턴간 절연 특성을 고찰하기 위하여 그림 1과 같이 턴간 절연구성에 따른 전극계를 구성하였다. 전극은 두께 0.2mm, 폭 5mm의 스테인레스 강(SUS 304)을 직경 56mm의 원형으로 제작하여 사용하였다. 턴간 절연물은 GFRP를 사용하였다. d 는 연면거리이고 t 는 두께를 나타낸다. 본 연구에서는 연면길이 d 와 및 두께 t 를 변화시키면서 연면방전 특성을 조사하였다.

팬케익형 턴간 절연 특성 고찰을 위해 사용한 팬케익형 턴간 절연모델과 그 단면적을 그림 3 (a)와 (b)에 각각 나타낸다.

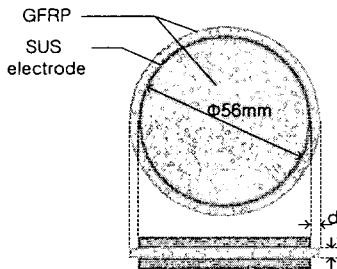
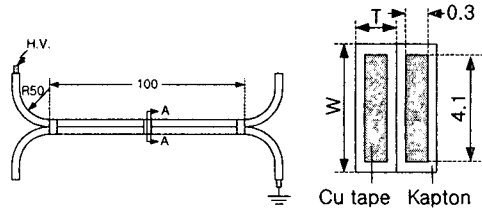


그림 2. 솔레노이드형 턴간 전극 배치.
 Fig. 2. Turn-to-turn electrode arrangement for solenoid type.



(a) Turn-to-turn insulation model (b) A-A cross section

그림 3. 더블팬케익형 턴간 절연 모델.

Fig. 3. Turn-to-turn insulation model for double pancake type.

두께 0.025mm의 Kapton tape를 이용하여 10% overlap 방식으로 고온초전도 선재와 크기가 비슷한 두께 0.3mm, 폭 4.1mm의 Cu 도체를 절연하였다. 전극의 로고스키 식에 따라 말단 부분에 집중되는 전기적 스트레스를 줄여 전극이 접한 부분에서 절연 파괴가 일어나도록 하였다. 절연한 전극의 폭과 두께는 임의의 지점을 각 10~20회 측정하였 평균값으로 나타내며, 3층을 감았을 때 $T=0.49\text{mm}$, $W=4.39\text{mm}$ 를 나타내었다. W 는 절연된 전극은 폭을 나타내고, T 는 절연된 전극의 두께를 나타낸다.

그림 2와 3에 나타난 전극계를 Cryostat에 설치한 후 AC 전압은 60Hz, 0~100kV 전원을 사용하였으며, 1kV/sec의 상승속도로 전압을 인가하여 연면방전 전압을 측정하였다. DC 전압은 0~80kV 전원을 사용하였으며 AC와 동일한 방법으로 측정하였다. 실험결과에는 평균값, 최소값과 최대값을 나타낸다. Impulse 전압은 최대 300kV, $1.2 \times 50\mu\text{s}$ 표준 Impulse 파형을 발생시키는 장치를 사용하였으며, 연면방전 및 절연 파괴 전압치는 50% 파괴확률 전압으로 나타내었다.

3. 실험결과 및 검토

그림 4에 액체질소에서 AC 고전압을 인가하고, GFRP 두께 t 및 길이 d 의 연면방전 전압 의존성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 두께 t 가 증가함에 따라 연면방전 전압은 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 길이 d 의 증가에 따라 연면방전 전압은 상승하나 그 증가폭은 매우 작았다. 따라서 연면방전 전압에 미치는 영향은 d 보다 t 가 더 큼을 알 수 있다.

그림 5에 동일한 전극계에서 두께 t 및 길이 d 의 DC 연면방전 전압 의존성을 나타낸다. DC 연면방전 전압은 AC와 유사한 경향을 나타내지만 연면길이 d 가 0mm에서 2.5mm로 증가시킨 경우 연면방전 전압이 급격히 상승함을 알 수 있다. 하지만 d 를

2.5mm 이상으로 증가시켜도 연면방전 전압은 포화하는 경향을 나타내었다.

그림 6에 동일한 전극계에서 두께 t 및 길이 d 의 Impulse 연면방전 전압 의존성을 나타낸다. 임펄스 전압을 인가한 경우 AC, DC와 마찬가지로 두께 t 가 증가함에 따라 연면방전 전압은 증가하는 경향을 나타내지만 $d=0\text{mm}$ 인 경우 AC, DC의 경우와 다르게 두께 t 가 증가함에 따라 연면방전 전압이 급격히 상승한 후 포화하는 경향을 나타내었다. 또한, 연면길이 d 를 0mm 에서 2.5mm 로 증가한 경우 연면방전 전압은 급격히 상승하는 경향을 나타내지만 2.5mm 이상으로 증가하는 경우 증가폭이 작게 나타났다.

그림 7에 $t=1\text{mm}$ 인 경우의 연면길이 d 에 따른 연면방전 전압을 나타낸다. 연면길이 d 가 증가함에 따라 AC의 경우 직선적으로 증가하지만, 증가폭은 매우 작으며, DC와 Impulse의 경우 급격하게 증가한 후 포화하는 경향을 나타낸다.

그림 4~7에서 알 수 있듯이 AC 고전압 하에서는 연면방전 전압에 연면거리 d 보다 두께 t 의 효과가 크게 나타났으며 DC와 Impulse에서는 두께 t 뿐 아니라 연면길이 d 의 효과도 크게 나타남을 알 수 있었다. 따라서, 실용상 기기의 최적 절연설계를 위해서는 절연물의 두께와 길이가 적절히 고려되어야 할 것이다.

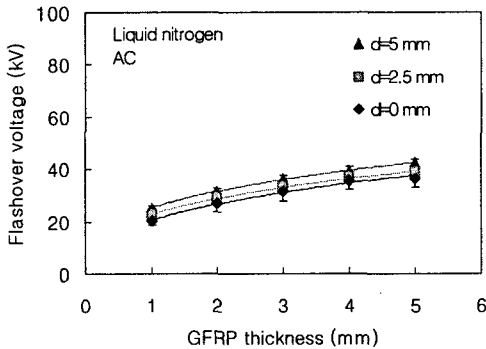


그림 4. AC 연면방전 전압에 미치는 두께의 영향
Fig. 4. Effect of thickness on AC flashover voltage.

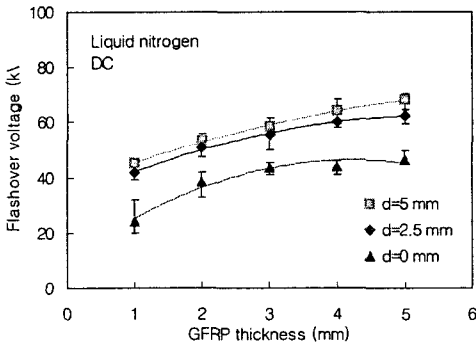


그림 5. DC 연면방전 전압에 미치는 두께의 영향
Fig. 5. Effect of thickness on DC flashover voltage.

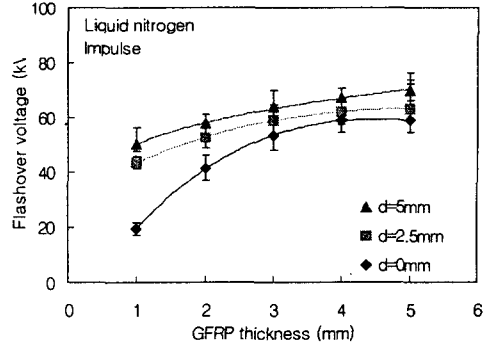


그림 6. Impulse 연면방전 전압에 미치는 두께의 영향.

Fig. 6. Effect of thickness on impulse flashover voltage.

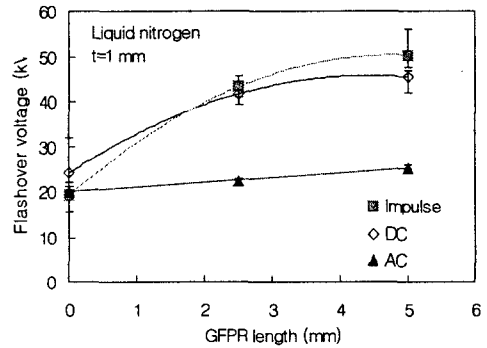


그림 7. 연면방전 전압에 미치는 길이의 영향.

Fig. 7. Effect of surface length on flashover voltage.

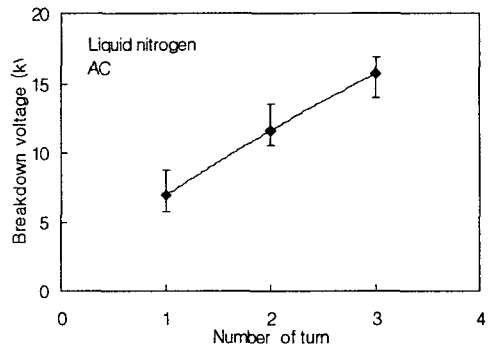


그림 8. 턴 수에 따른 절연파괴 전압.

Fig. 8. Effect of number of turn on breakdown voltage.

그림 8에 그림 3의 전극계를 사용하여 AC 전압을 인가한 경우의 절연파괴 전압을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 턴 수 증가에 따라 절연파괴 전압은 선형적으로 증가하였다. 특히, 1회 절연한 경우 절연물이 접치는 곳에서 절연파괴가 발생하였으

며 이것은 절연물이 겹치면서 발생한 미소 갭에서 방전이 발생되어 절연파괴로 이어지는 것으로 사료된다. 하지만 2회 이상 절연한 경우 미소 갭의 영향을 받지 않고 방전이 발생하였다. 따라서, Kapton을 사용하여 틈간 절연하는 경우 2회 이상 절연하여야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 다음과 같은 결론을 얻었다.

솔레노이드형 전극계에서 연면길이, 두께가 증가함에 따라 연면방전 전압은 증가하였으며 특히, AC 고전압에서는 연면거리보다 두께의 영향이 크게 나타났다. DC와 임펄스 전압에서는 두께 뿐 아니라 거리의 영향도 크게 나타났다. 따라서 절연설계 목표전압에 따라 연면길이와 두께를 적절히 고려되어야 할 것으로 사료된다. 팬케익형 전극계에서 AC 절연 파괴전압은 턴 수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 턴 수가 작을수록 방전 흔적이 크게 나타났다. 턴 수가 1회 일 때 절연 파괴는 전극 내부 Kapton 절연물이 겹쳐진 부분에서 발생하였다. 하지만 턴 수가 증가함에 따라 절연파괴는 전극 모서리 부분에서 발생하였다. 따라서 HTSFCL용 코일의 틈간 절연에 Kapton 필름을 이용하는 경우 2회 이상 절연하는 것이 기기의 절연 특성 향상에 유리할 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] D. Ito, K. Tsurunaga, E.S. Yoneda, Y. Sugiyama, T. Hara, K. Okaniwa, H. Hoshino and T. Yamamoto, "Superconducting Fault Current Limiter Development", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 2, pp. 2345-2348, March 1991.
- [2] T. Nomura, M. Yamaguchi, S. Fukui, K. Yokoyama, T. Sato and K. Usui, "Single DC Reactor Type Fault Current Limiter for 6.6kV Power System", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, 2001.
- [3] 백승명, 정종만, 이현수, 한철수, 김상현, "Double Pancake Coil형 고온초전도 변압기의 전기적 절연 특성", 한국전기전자재료학회 논문지, Vol. 16, No. 2, pp. 151-156, 2003.