

초전도 변압기의 절연기반 연구

천현권*, 곽동순*, 윤문수**, 김상현*

경상대학교 및 공학연구원*, 한국전기연구원**

A Study on the Insulation Basis of Hts Transformer

Hyeon-Gweon Cheon*, Dong-soon Kwag*, Mun-soo Yun**, Sang-Hyun Kim*

Department of Electrical Engineering, Gyeongsang National University and Automation and Computer Research

Centre of Engineering Research Institute*, Korea Electrotechnology Research**

Abstract : HTS Transformer developing is developing a power distribution and transmission class HTS transformer that is one of the 21st century superconducting frontier projects. Therefore, we prepared the model, that is Z continuous winding from Kapton insulated Cu tape for a small simulated the HTS transformer. For the development of electrical insulation design of a HTS transformer with Z continuous winding, we have been discussed insulation composition and investigated breakdown characteristics such as breakdown of liquid N₂(LN₂), polymer and surface flashover on FRP and breakdown-surface combination in LN₂. Also we have been designed and manufactured a bobbin that has spiral slot for the Z continuous winding. The Z continuous winding mini-model from Kapton film insulated Cu tape for simulated 22.9kV class HTS transformer has been constructed using 0.1% breakdown strength obtained by Weibull distribution. The winding model was measured their insulation characteristics such as ac (50kV, 1min) and impulse (154kV, 1.2×50μs full wave, 3 times) withstand test and its excellent performance was confirmed.

Key Words : Hts Transformer, Z continuous winding, Insulation composition

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 전망에 걸쳐 많은 이점을 제공한다. 따라서 HTS 변압기의 연구와 개발에 대한 연구가 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 특히, 한국에서 2001년부터 시작된 21세기 프론티어 R&D 사업의 일환으로 초전도 응용 기술 개발이 진행되고 있으며 HTS 변압기의 최종 개발 목표는 60~120 MVA, 154 kV이다. 현재, 한국산업기술대학교에서 경상대학 협력연구를 통하여 HTS 변압기에 대한 개념설계가 진행 중에 있다.[1-3] HTS 변압기 개발연구에서 권선 배치는 교호배치와 동심배치 두 가지에 대하여 적용연구 중에 있다.

교호배치는 권선이 용이하고 구조가 간단하지만 동심배치와 비교하여 권선의 교류손실이 크다.[4] 따라서 현재는 권선을 동심배치하여 HTS 변압기에 적용하는 연구가 활발히 진행 중이다. 한국산업기술대에서 설계한 Double pancake 권선을 가지는 동심배치는 권선과 권선의 접합시 접합점이 많이 발생하여 HTS 변압기의 장점이 많이 감소하게 된다. 이런 관점에서 본 연구에서는 먼저 접합점을 줄일 수 있는 Z 연속 권선용 보빈을 개발하였다. 하지만 Z 연속 권선을 HTS 변압기에 적용하기 위해서는 HTS 변압기가 운전되는 액체 질소에서 절연특성에 대한 연구가 선행되어야 한다.

이미, 많은 연구자들의 액체질소의 절연특성과 기포의 영향 등 액체질소 내에서 발생하는 절연파괴 현상에 대하여 많은 연구가 이루어져 있으며[5-7] 본 연구실에서도 pancake

코일을 모의한 전극계를 이용한 절연파괴, 연면방전과 기포 영향 등에 대하여 많은 연구 결과가 발표되었다.[8]

따라서, 본 연구에서는 HTS 변압기의 절연구성을 분석하여 이에 따라 액체질소 중에서 다양한 절연파괴 특성에 대하여 고찰하여 절연 데이터 베이스를 구축하였다. 그리고 Z 연속 권선을 위한 보빈 구조를 개발하였으며, 22.9kV급 HTS 변압기에 적용을 위해 절연데이터 베이스를 이용하여 미니 모델의 Z 연속 권선 모델을 제작하였다. 제작된 미니 모델을 교류 및 충격파 내전압 시험을 행하였다.

2. Z 연속 권선 적용 고온초전도 변압기

2.1 Z 연속 권선

Z연속권은 더블팬케익 코일이나 슬레로이드 권선에 비하여 접속부위를 줄일수 있고 저항 및 낮은 전계 등 많은 이점을 줄 수 있다. 그러나 아직까지 Z연속권을 권선할 유용한 자료들이 연구되어져 있지 않다. Z연속권을 적용하기 위하여 우선 보빈을 설계하고 제작하였다.보빈은 원통형으로 나선모양의 홈이 파여져 있는 스페이서로 구성되어 있다. 나선모양의 홈은 고온초전도 변압기 층-층 권선의 연속된 권선을 할 수 있게 한다. 보빈은 일체형으로 만들어져 있기 때문에 전기적 기계적 특성은 증가하였다. 그림 1은 Z연속권의 권선 방법과 보빈의 모양을 나타낸다. Z연속권의 권선 방법은 아주 쉽다. 첫 번째로 초전도선을 안쪽에서 바깥쪽으로 권선을 하며 다음 층으로 들어갈 때 다시 안쪽에서부터 권선하는 방법으로 권선한다.

2.2 절연 구성

그림 1은 Z 연속권을 적용한 HTS 변압기를 나타낸다.

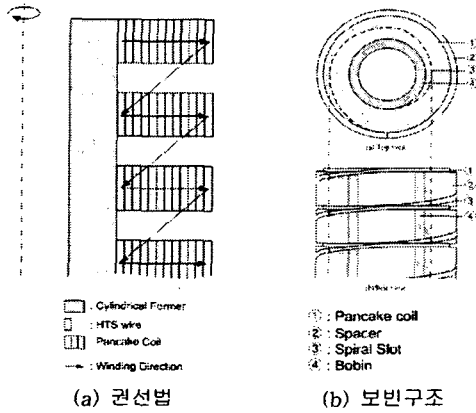


그림 1. Z 연속 권선 방법.

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. Z 연속권은 원통 중심에서부터 H1-L-H2로 배치되는 동심배치구조이다. 22.9kV/6.6kV의 경우 고압 권선은 840턴과 저압 240턴으로 각각 구성된다.

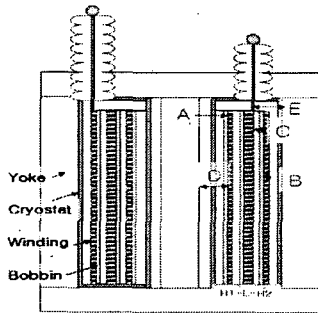


그림 2. Z 연속 권선 적용 고온초전도 변압기 A:턴간, B:층간, C:메인 절연, D:보빈, E:리드-접지부 절연

그림 2는 초전도 변압기의 절연구성을 나타낸다. 절연 구성은 turn-to-turn (part A), layer-to-layer (part B), main insulation (part C), coil-to-ground (part D) and lead-to-ground (part E)로 이루어져 있다. Part A의 절연 내력은 턴간 절연에 사용되는 Kapton film의 두께와 절연 방법에 의존한다. Part B의 절연내력은 FRP의 연면 방전 내력에 의존한다. Part C는 FRP 보빈의 관통과 연면 절연내력의 조합에 의존하게 된다. H 또는 L와 접지부와 절연인 Part D는 액체질소와 FRP의 관통 절연내력에 의존한다. Part E는 리드부와 접지부의 절연으로 액체질소의 절연내력에 의존하게 된다. 여기서 유의할 것은 권선의 배치에 따라서 절연의 구성이 달라지게 되는 것이다. Z 연속권을 적용한 변압기의 경우 턴간에는 Kapton

film을 사용하고 층간에는 FRP 보빈과 스페이스를 사용한다. 그리고 주 절연과 권선-접지부 절연은 액체질소와 FRP 보빈을 사용한다. 따라서 FRP, Kapton film 그리고 액체질소의 절연파괴특성, FRP의연면방전 특성과 액체질소 중 액체의 절연파괴와 FRP의 연면방전 조합특성을 알면 변압기의 절연설계가 가능하게 된다.

3. Z연속권선모델연구

3.1 Z 연속 권선 미니모델 절연설계

권선의 전기적 절연설계를 위하여 각 절연 구성별 모의 전극계를 이용하여 절연파괴 전압을 측정하고 이 전압과 전압을 와이브 분포를 이용하여 0.1%절연파괴 전계 값을 획득하였다.

그림 3은 FRP의 두께에 따른 절연파괴 전압값을 나타낸다. FRP는 권선의 보빈과 층간 스페이스로 사용되기 때문에 코일과 접지, 층간 절연의 설계를 위해서 관통 특성이 필요하다. 절연파괴 전압은 AC와 Impulse 모두 두께가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었지만 와이브 분포를 통하여 구한 0.1% 전계값에서는 AC는 두께 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내지만 Impulse는 증가하는 경향을 나타내었다

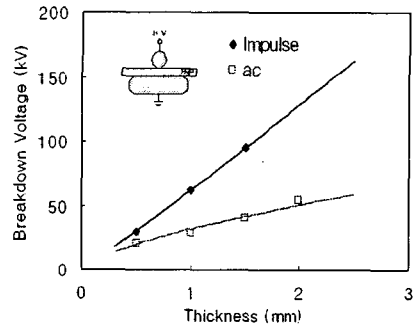


그림3.FRP의 두께에 따른 절연파괴 전압.

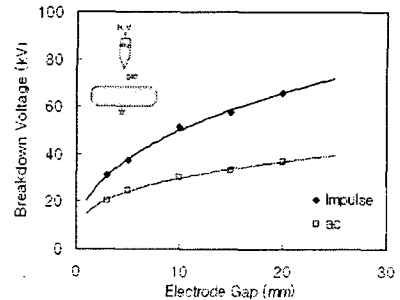


그림4.액체질소의 전극간 거리에 따른 절연파괴 전압.

그림 4는 액체질소의 전극간 거리에 따른 절연파괴 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 부분에

서도 부분방전에 의해 기포가 발생된다. 액체질소의 절연 파괴 전압은 간격이 증가함에 따라 증가하지만 0.1% 전계값은 간격이 증가함에 따라 AC와 Impulse 모두 감소하는 경향을 나타낸다.

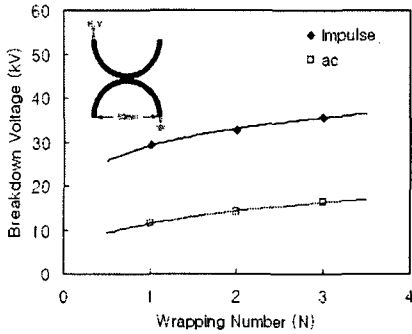


그림5.턴간 전극계에서 도체 절연회수에 따른 절연파괴 전압.

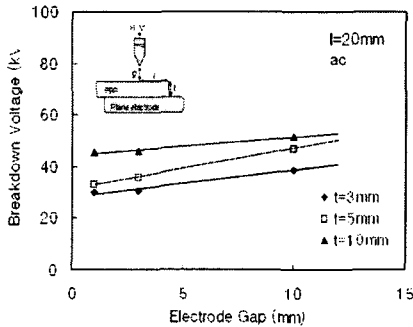


그림6. FRP 두께에 따른 절연파괴 전압.

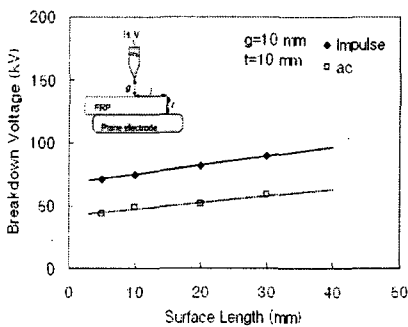


그림7. FRP 길이에 따른 절연파괴 전압.

그림 5는 턴간 전극계에서 도체 절연회수에 따른 절연 파괴 전압값을 나타낸다. 와이블 분포를 한 결과 절연회수가 3회 일 때 AC는 약 50kV/mm, Impulse는 약 100kV/mm의 0.1% 전계값을 나타내었다.

그림 6과 7은 액체질소의 관통과 FRP 연면 방전 특성이 복합적으로 존재할 때 절연파괴 전압값을 나타낸다. 전극간격이 일정할 때 연면거리의 증가에 따라 절연파괴 전압은 직선적으로 증가하는 경향을 나타내지만 0.1% 전계값은 전극간격이 증가함에 따라 지속적으로 감소하다 포화하는 경향을 나타내었다.

Z 연속권 모델 변압기 절연설계를 위하여 그림 3~7의

데이터를 이용한다. 미니 모델 Z연속권의 AC 및 임펄스 절연길이는 각각 3mm와 13mm이다.

3.2 미니모델 제작

표준설계에 따라서 상기 실험은 BIL 150kV급 권선 모델을 제작하였다. 중요시되는 결과로는 FRP, Kapton, 질소에 관한 것이다. 주 절연을 위하여 연면 길이를 20mm를 유지하였고, 내전압 절연 파괴를 위해 두께 또한 3mm로 하였다. 사이 층에는 3mm 보다 더 스페이서를 두었고 보호차원에서 Kapton 테이프로 2번 이상 감아 주었다. 그림 8은 Z 연속 권선의 고·전압 권선 배치를 보여준다. 표 1은 보빈과 Z 연속 권선 모델 사양을 요약해서 정리한 것이다. 보빈은 10mm 두께로 스페이서는 15mm 두께로 하였다. 권선은 보빈에 구리 테이프를 HT스테이프 모양과 유사하게 감았으며 절연을 위해 Kapton 테이프로 3번 감았다.



그림8. Z 연속 권선 미니 모델.

표1.Z 연속 권선 미니 모델의 사양.

Arrangement	Concentric
Turn No.	5turns/pancake ×2(layers)
Conductor	Cu (0.5×4.5mm ²)
Conductor Length	5.3m(L.V.)/6.8m(H.V)
Turn Insulator	Kapton(0.024×710mm ²)
Inner/Outer Dia. of Winding	140mm/150mm(L.V. Winding) 190mm/180mm(H.V. Winding)
Width of Spiral Slot	5mm
Thick of bobbin	10mm
Thick of Layer Spacer	15mm
Thick of Top/Bottom Plate	21mm/34mm
Height of Bobbin	80mm

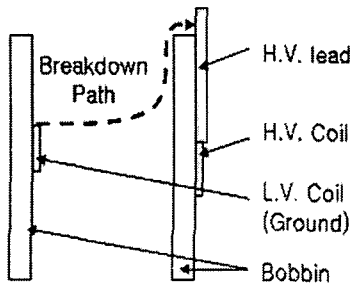
3.3 절연성능 평가

22.9kV 급 변압기에 대해 절연 내력 시험법으로 사용주파 내전압 시험법과 충격시험법이 있다. 첫 단계로 50kV까지 1초에 1kV씩 올리고 50kV에서 1분간 그 다음 다시 1초에 1kV씩 내린 것이다. 마지막 단계로 규격 전압 시

험 방법(KS C0902)에 따라서 상용주파수에서 50kV는 1분간인가하고 상용주파수 impulse 150kV, 1.2×50μs에서 3회를 시험을 하였다. 표 2에서 보여 주는 것은 Z 연속 권선의 미니모델의 결과이다. Z 연속 권선은 ac와 impulse 내전압 시험에서 만족할 만한 결과로 통과하였다. ac와 impulse 절연파괴 전압이 각각 98.2kV와 212kV로 이다. 그리고 나중에는 부분방전 시험인 (PD)도 측정도 해야할 것이다. 그림 10에서는 권선된 부분에 따라 발생한 절연 파괴 경로와 코일과 리드부에 발생한 절연파괴 흔적이다.

표2. 내전압시험 결과.

Insulation test	Impulse (3 times at 150kV full wave)	ac (1min. at 60Hz, 50kV)	PD (50pC at 22.9kV)
Results	Pass (BDV=212kV)	Pass (BDV=98.4kV)	Planning



(a) 절연파괴 경로



(b) ac 절연파괴 흔적

그림10. ac 절연파괴 경로 및 흔적

4. 결론

기존에 연구되어진 FRP, LN2, Kapton, FRP의 연연방전, 그리고 액체질소 중에서의 절연파괴와 연연방전의 복합적인 기초절연파괴 특성을 와이블 분포에 의하여 구해진 0.1% 절연파괴 확률을 가지는 절연파괴 전계를 이용하여 Z연속권 고온초전도 변압기를 위한 전기절연 설계 및 제작을 하였다. 결과를 다음과 같이 요약하였다.

Z연속권 미니모델 변압기의 ac 및 impulse 절연설계를 위한 절연파괴 길이는 각각 3mm와 13mm이다. 우리는 원통형 포머에 스페이서와 나선형 흡을 판 개선된 일체형 보빈을 사용하여 전기적이나 기계적으로 특성을 발전시켰다. 절연 특성 시험 결과 Z연속권의 ac 및 impulse의 절연파괴 전압은 각각 98.2kV, 212kV에서 발생하였다. 우리는 22.9kV급

Z연속권 미니모델 변압기의 전기절연 설계 및 제작, 절연파괴 시험에 성공하였으며, 이 결과는 송전급 고온초전도 변압기를 위한 전기절연 설계에 기초정보로 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도 응용기술개발 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] S.W. Schwenterly and S.P. Mehta, M.S. Walker, R.H. Jones, "Development of HTS Power Transformers for the 21st Century: Waukesa Electric Systems/IGC-SuperPower/RG&E/ORNL SPI collaboration," Physica C:Superconductivity, Vol.382, pp.1-6, 2002.
- [2] L.Masur et al, "Long length manufacturing of high performance BSCCO-2223 tapefor the Detroit Edison Power Cable Project," IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol. 11, pp. 3256-3260, 2001.
- [3] Woo-Seok Kim and Song-Yop Hahn, Kyeong-Dal Choi, Hyeong-Gil Joo, and Kye-Won Hong, "Design of a 1MVA high Tc superconducting transformer," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.13, No. 2, pp.2291-2293, 2003.
- [4] Jong-Tae Kim, Woo-Seok Kim, Sung-Hoon Kim, Kyeong-Dal Choi, Gye-Won Hong, Hyeong-Gil Joo, and Song-Yop 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.
- [5] 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.
- [6] H.Craig Miller, "Surface Flashover of Insulations," IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol.24, No.5, pp.765-786, 1989.
- [7] J.Gerhold, "Properties of cryogenic insulants," Cryogenics 38, pp.1063-1081, 1998.
- [8] Sang-Hyun Kim, Seung-Myeong Baek, Young-Seok Kim, Soon-Yong Chun, Jong-Man Joung, "Surface flashover characteristics in liquid nitrogen for application of superconducting pancake coils," Cryogenics 42, pp. 415-418, 200297.