

초고압 초전도 변압기용 연속 디스크 권선

황영인*, 김우석**, 이승욱**, 장데레사*, 한진호*, 주형길*, 최경달*, 한송업**

*한국산업기술대학교, **기초전력연구원

Continuous Disk Winding for High Voltage Superconducting Transformer

Y.I. Hwang*, W.S. Kim**, S. Lee**, T. Chang*, J.H. Hahn*, H.G. Joo*, K.D. Choi*, and S. Hahn**

*Korea Polytechnic University, **Electrical Engineering and Science Research Institute

Abstract – High temperature superconducting (HTS) windings for an HTS transformer which have been developed have two kinds of type, one is the layer type and the other is disk type. The disk type windings have advantages over the layer type ones for a power transformer such as good insulation and limit of voltage stress. But this kind of HTS winding generates excessive AC losses caused by strong magnetic field component perpendicular to the surface of the HTS wire. Nevertheless, the layer type windings have adopted for an HTS power transformer so far because of the small AC losses of the HTS windings. We propose a new winding method for a high voltage HTS transformer which has advantages of both type of HTS windings, and we call it continuous disk type HTS winding. This new type of HTS winding consists of pile of lots of HTS disk windings which have no resistive joint between them. A prototype of an HTS winding was fabricated by the new winding method we proposed and characteristic test was carried out. The test result shows that the new type HTS windings can be applied to HTS power transformers, especially to the high voltage ones.

1. 서 론

현재 개발되고 있는 고온 초전도 전력기기 중에서 변압기는 가장 먼저 실용화 될 수 있는 분야로 손꼽히고 있으며, 최근 국내외에서 연구 개발되고 있는 고온 초전도 변압기는 대부분 고전압, 대용량화를 목표로 연구되고 있다. 이러한 고온 초전도 변압기를 구성하는 고온 초전도 권선은 그 권선 형태에 따라 크게 레이어 권선과 디스크 권선으로 나눌 수 있다. 현재 세계적으로 개발되고 있는 고온 초전도 변압기의 권선 형태를 보면 대부분 레이어 권선임에 비하여 디스크 권선을 개발하는 곳은 그리 많지 않다. 이는 같은 용량의 고온 초전도 변압기 권선을 디스크 형태로 권선 했을 때보다 레이어 형태로 권선 했을 때 일반적으로 교류 손실이 더 적게 발생하기 때문이다. 현재 고온 초전도 전력기기의 개발에 주로 사용되고 있는 고온 초전도 선재인 BSCCO 계열의 선재는 교번자계에 의해 발생하는 교류손실의 크기가 매우 클뿐더러 선재의 면에 수직으로 가해지는 자기장에 매우 취약하기 때문에 레이어 형태의 고온 초전도 권선을 채택하여 손실을 줄이고 성능 저하를 막고자 하는 것이 일반적인 경향이다.

그러나 일반적으로 변압기의 단자전압이 높아질수록 권선에서의 전압분배나 절연층면에서 디스크 권선이 레이어 권선보다 더 유리하게 된다. 따라서 송전급 변압기

의 경우와 같이 초고압이 인가되는 변압기의 경우에는 대체로 디스크형 권선을 채택하는 것이 일반적이다.[1] 하지만, 디스크형 권선을 고온 초전도 변압기에 적용하는 경우에는 각 디스크 사이의 전기적인 접합을 하여야 하며, 이 접합에서 많은 손실이 발생하므로 초전도 권선의 안정성이 떨어지게 될 뿐더러 냉각에 많은 비용이 들게 된다. 하지만 이러한 단점들에도 불구하고 최근 고온 초전도 전력기기 개발의 추세인 고전압화를 고려해 볼 때, 고온 초전도 변압기의 권선으로 디스크형태를 채택하지 않을 수 없는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 레이어 권선의 장점과 디스크 권선의 장점을 조합하여 제작할 수 있는 방법으로 연속 디스크 권선을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 권선 방법은 전압분배 및 절연에 유리한 디스크 권선의 형태를 가지고 있으면서 레이어 권선의 장점인 무접합, 저손실의 특징을 가지는 권선형태이다. 본 논문에서는 연속 디스크 권선의 구조를 정의하고 시험용 권선을 설계 및 제작하여 특성시험을 통하여 실제 초고압 고온 초전도 변압기의 권선으로 채택할 수 있는 가능성을 검토하였다. 이러한 연속 디스크 권선은 접합에 어려움이 많은 2세대 고온 초전도 선재를 미래에 사용하게 되는 경우에 특히 강점을 가질 수 있을 것이다.

2. 연속디스크 권선

2.1 연속디스크 권선의 구조

그림 1에 고온 초전도 선재를 사용하는 권선의 종류를 나타내었다. 그림 1의 (a)는 더블 팬케이크형 권선으로 일반적으로 테이프 형태의 고온 초전도 선재를 사용하는 권선으로 많이 채택되는 형상이며 변압기의 디스크 권선 제작시 사용되는 권선법이다. 그림 1의 (b)는 솔레노이드형 권선으로 변압기 레이어 권선의 형태로 사용되는 형태이며, 이 두 가지의 권선 형태를 조합한 형태가 본 논문에서 제안하는 연속 디스크 권선이며 그림 1의 (c)에 나타내었다.

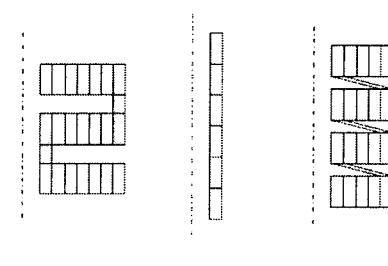


그림 1. 고온 초전도 권선 개념도 (a) 디스크 권선, (b) 레이어 권선, (c) 연속 디스크 권선

표 1. 고온 초전도 선재의 사양

Specification	Value
Thickness	0.5 mm
Width	5 mm
Critical Tensile Stress	265 MPa
Min. Bending Dia.	50 mm
Critical Current	126 A

연속 디스크 권선은 고온 초전도 선재를 디스크 형태로 권선하되, 접합하지 않고 계속적으로 권선하는 형태로 접합에 의한 선재 성능 저하와 손실을 감소시킬 수 있으며, 레이어 권선에 비해 절연에 유리하여 고전압 변압기에 채택할 수 있고 전압 스트레스를 억제하는데 유리하다.

2.2 연속디스크 권선의 설계 및 해석

본 논문에서 연속 디스크 권선의 설계 및 제작에 사용된 선재는 현재 상용화되어 일반적으로 가장 많이 사용되는 고온 초전도 선재인 BSCCO-2223계열의 선재를 사용하였으며, 표 1에 사용된 선재의 사양을 나타내었다. 표 1에 나타낸 고온 초전도 선재를 고압 변압기에 적용하기 위하여 그림 2에 나타낸 것과 같은 방법으로 3중 절연하였으며, 절연된 고온초전도 선재를 사용하여 설계된 연속 디스크 권선의 설계 사양을 표 2에 나타내었다. 사용되는 고온 초전도 선재의 총 길이는 약 61 m이며 권회수는 115 턴, 권선의 외경 및 높이는 각각 180 mm, 225 mm이다.

표 2의 설계값을 토대로 연속 디스크 권선 및 같은 권회수를 갖는 일반 디스크 권선을 각각 모델링하여 정자장 해석 결과를 비교하였다. 해석에 사용된 방법은 유한 요소법을 사용한 축대칭 모델링 방법을 사용하였으며 그림 3에 해석결과로 나타난 자장의 분포를 비교하였다. 자장 분포의 형상을 비교해 볼 때, 일반 디스크 권선의 경우 고온 초전도 선재의 표면에 수직으로 인가되는 자장의 성분이 연속 디스크 권선의 경우에 비하여 커짐을 알 수 있다. 수직 성분의 자장이 커질수록 고온 초전도 선재의 성능이 급격히 감소하며 교류손실 역시 급격히 증가하므로, 연속 디스크 권선의 형태가 더 나은 형태임을 알 수 있다. 코일에 흐르는 전류를 70 A로 했을 때, 연속 디스크 권선 최대 자장값은 70 mT, 수직 방향 최대 자장값은 68.5 mT이고, 디스크 권선의 최대 자장값은 221 mT, 수직 방향 최대 자장값은 130 mT로 계산되었다. 이 결과는 디스크 권선에 수직으로 인가되는 자장이 커짐으로써 임계전류는 급격히 감소하고, 교류 손실은 급격히 증가하는 결과를 가져온다.

표 2. 연속 디스크 권선의 사양

Specification	Value
Length of HTS wire	61.78 m
Inner Dia.	170 mm
Outer Dia.	180 mm
Height of winding	225 mm
No. of disks	23
No. of turns	115 turn



그림 2. 고온 초전도 선재의 절연 방법

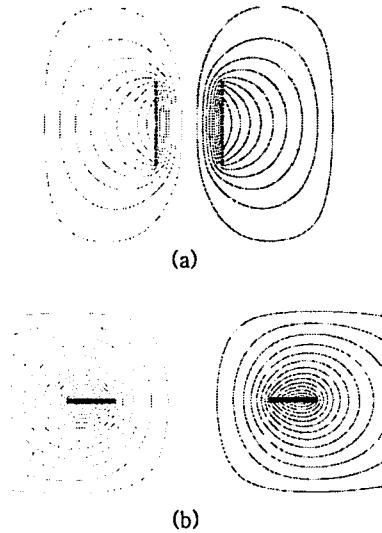


그림 3. 권선 형태별 자장 분포 비교 (a) 연속 디스크 권선, (b) 일반 디스크 권선

정자장 해석결과를 토대로 설계된 연속 디스크 권선의 임계전류를 예측할 수 있다. 그림 4는 고온 초전도 선재에 가해지는 수직방향의 자속밀도에 대한 임계전류의 변화와 설계된 연속 디스크 권선의 부하곡선을 보여주고 있다. 그림 4에서 보여지는 두 개의 직선은 초전도 선재에 수직으로 인가되는 최대 자속밀도와 평균 자속밀도에 의한 부하곡선이다. 고온 초전도 선재의 영역에서 최대 수직자장이 인가되는 부분은 극히 일부이기 때문에 실제 권선의 임계전류는 부하곡선들에 의해 추정되는 두 가지의 임계전류의 사이에 존재할 것이라 예상된다. 초전도 선재에 수직으로 인가되는 평균 자장을 선택했을 때의 임계전류의 예상값은 112 A이고, 최대 자장을 선택했을 때의 임계전류의 예상값은 73 A이므로 실제 권선에서는 73 A와 112 A 사이에서 임계전류가 측정될 것으로 추정된다.[2-4]

그림 3과 같은 두 가지 형태의 고온 초전도 권선에서 인가전류에 따라 발생하는 교류손실을 계산하여 그림 5에 비교 결과를 나타내었다. 계산된 교류손실은 운전온도 77 K에서 주파수 60 Hz의 교류전류가 인가되는 경우 인가 전류에 따른 자화손실을 비교 계산한 것으로, 연속 디스크 권선의 경우가 같은 권회수를 가지는 일반 디스크 권선에 비하여 훨씬 적은 교류손실을 발생시킨다는 것을 알 수 있다. 비교대상으로 설계한 일반 디스크

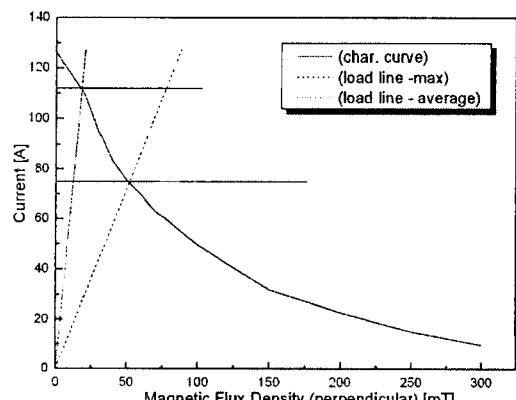


그림 4. 임계전류 예측을 위한 전류-자장 관계

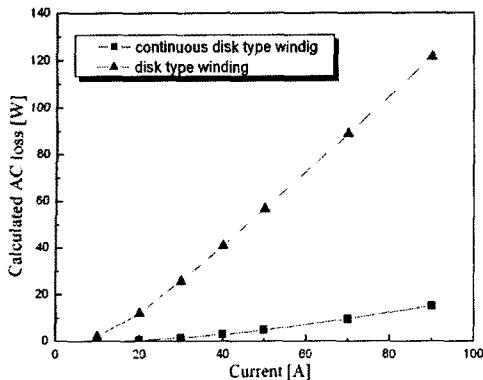


그림 5. 연속디스크권선의 교류손실과 일반디스크권선의 교류손실 비교

권선은 한 개의 디스크로 설계한 결과이지만 만일 이를 여러 개의 디스크 권선으로 설계하게 되면 접합부에서 발생하는 저항손실 역시 추가되어 더 많은 손실을 발생하게 될 것이라 예상할 수 있다.

2.3 연속 디스크 권선의 제작 및 시험

설계를 토대로 제작한 연속 디스크 권선은 한 디스크 당 5회, 총 23개의 디스크를 연속적으로 권선하였으며, 권선에 사용된 고온 초전도 선재의 총 길이는 약 61 m이다. 고온 초전도 선재는 미리 3중 절연 처리를 하여 사용하였으나, 추후 고전압 변압기로의 적용가능성을 검토하기 위한 절연시험에 대비하여 턴과 턴사이에 노맥스 테이프 2장을 넣어서 절연에 보강을 하였다. 디스크와 디스크 사이에 존재하는 선재를 고정하기 위해 두께 5mm의 판을 사용하였다. 보빈의 재질은 모두 저온에서의 기계적인 특성과 전기 절연특성이 우수한 GFRP를 사용하여 제작하였다. 그림 6에 실제로 제작된 시험용 연속 디스크 권선의 모습을 나타내었다. 임계전류 측정 및 교류손실 측정을 위하여 양쪽 터미널 부근에 두 개의 전압탭을 구성하였다.

임계전류 시험의 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 알 수 있듯이 제작된 권선의 임계전류는 약 97 A 정도로 보여진다. 이 결과는 앞에서 계산한 임계전류 측정값의 범위에 들어가며 연속 디스크 권선의 권선법이 초전도 권선으로써 변압기에 적용될 가능성이 있음을 보여준다.

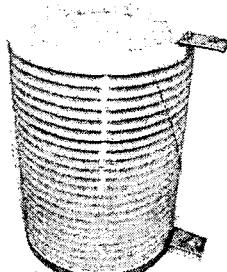


그림 6. 제작된 연속 디스크 권선의 모습

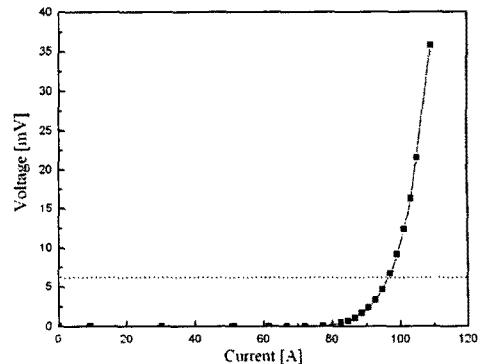


그림 7. 연속디스크권선의 임계전류 측정 시험결과

3. 결 론

본 논문에서는 디스크 권선과 레이어 권선의 단점을 보완하고 장점만을 결합한 연속 디스크 권선에 대해 기술하였다. 이는 최근 고온 초전도 전력기기들의 공통적인 해결 과제인 고전압, 대용량화를 위한 새로운 권선 방법으로써, 특히 고압 고온 초전도 변압기의 권선에 적용할 경우 매우 유용할 것으로 판단된다. 고압 변압기로의 적용 가능성을 검토하기 위하여 시험용 권선을 제작하였으며, 임계전류 특성 시험이 수치해석을 통한 예측값의 범위에 잘 들어갔음을 보였다. 변압기 권선으로써의 적용 가능성을 보다 확실하게 높이기 위하여 추후 교류손실 시험 및 고압 절연 시험을 수행할 예정이다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 김우석, 김성훈, 이상진, 최경달, 주형길, 홍계원, 한진호, 한송엽, 송희석, 박정호, “4별렬 팬케이크 권선을 사용한 1MVA 단상 고온초전도 변압기의 설계 및 제작”, 대한전기학회논문집 B권, pp1015-1017, 2003
- [2] 이승우, 김용섭, 이희준, 차귀수, 이지팡, “고온초전도 적층 선재의 손실과 적층선재로 제작한 팬케이크 권선의 손실”, 대한전기학회논문집 B권, pp776-778, 2004
- [3] 이광연, 임형우, 이희준, 차귀수, 이지팡, “고온초전도선재의 과전류 통전특성 측정”, 초전도저온공학회 논문집, pp263-266, 2002
- [4] 한형주, 김현준, 류경우, 최병주, 최세용, 나완수, “자장방향이 Bi-2223테이프의 자화손실에 미치는 영향”, 초전도저온공학회 논문집, pp271-273, 2002