

대전류 인가용 고온 초전도 권선의 특성 시험

황영인\*, 이승욱\*\*, 김우석\*\*, 이지광\*\*\*, 최경달\*  
 한국산업기술대학교\*, 기초전력연구원\*\*, 우석대학교\*\*

Characteristics of an HTS Winding for a large current application

Youngin Hwang\*, Seungwook Lee\*\*, Wooseok Kim\*\*, Jikwang Lee\*\*\*, Kyeongdal Choi\*  
 Korea Polytechnic University\*, Electrical Engineering Science and Research Institute\*\*, Woosuk University\*\*\*

**Abstract** - 대용량 고온 초전도 변압기에 적용하기 위한 1,500 A 급 초전도 병렬 선재를 제작하여 특성시험을 하였다. 병렬 선재는 21가닥의 BSCCO 선재를 250 mm 간격으로 전위한 뢰벨(Roebel)바 형태로 제작하였다. 특성시험을 통해 병렬 선재 제작기술을 확보하였다. 24 가닥의 병렬 선재를 이용하여 전압 분배나 절연 특성이 좋아 고전압 변압기에 채택할 수 있는 1,000 A 급 연속 디스크 권선을 제작하였다. 전위를 고려하여 만든 병렬 선재로 제작한 1,000 A급 연속 디스크 권선의 임계전류와 교류손실을 측정하였다.

1. 서 론

최근 국·내외에서 개발되고 있는 초전도 전력기기는 그 실용화를 목표로 연구가 진행 중이다. 변압기, 한류기, 케이블, 모터 등 초전도 전력기기의 실용화를 위해서는 초전도 선재와 냉동기 가격 등의 경제성을 고려해야 한다. 특히 초전도 변압기의 가격에서 가장 많은 비중을 차지하는 냉동기 가격은 교류손실에 의해 좌우되기 때문에 교류 손실을 줄이기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 냉동기와 선재 가격 등의 경제성을 고려해 볼 때, 초전도 변압기는 정격용량이 30 MVA 이상이 되어야 비로소 일반 변압기와 경쟁할 만한 경제성을 가진다. 현재 프론티어 사업에서 초전도 변압기 개발 목표는 3상 100 MVA 154 kV/22.9 kV 이며, 정격 운전시 2차측 상전류는 약 2,500 A의 대전류가 요구된다[1]. 이는 현재까지 개발된 BSCCO 선재 한 가닥의 임계전류가 약 130 A 임을 감안할 때, 여러 가닥의 초전도 선재를 사용하는 것이 불가피 하다. 그러나 병렬선재의 수가 증가할수록 권선 제작이 어렵고, 병렬 선재간의 전류의 불균형도 발생하기 때문에 전위를 수행하게 된다. 또한 20 kV 이상의 고전압 초전도 변압기에 적용할 수 있는 권선 방법이 필요하다. 고전압용 일반 변압기에는 디스크 권선을 사용한다. 하지만 PIT 공법으로 제작된 초전도 선재를 사용한 초전도 변압기는 수직방향으로 가해지는 자장에 매우 취약하여 많은 교류 손실을 발생시키기 때문에 디스크 권선을 초전도 변압기에 적용하기 어렵지만 고전압용 변압기에는 채택해야 하는 권선이다. 이에 반해, 솔레노이드 형태인 레이어 권선은 디스크 권선에 비해 절연이 매우 어렵고 전압 분배에 불리하지만 디스크 권선에 비해서 교류손실의 크기는 작다. 따라서 본 연구는 디스크 권선의 장점과 레이어 권선의 장점을 취합한 연속 디스크 권선을 제안하였다. 대전류를 인가하기 위한 24 가닥의 선재를 전위하여 제작한 병렬 선재를 이용해서 연속 디스크 권선을 제작 하였고, 그에 대한 특성시험을 하였다.

2. 본 론

2.1 대전류 인가용 병렬 선재

대전류를 인가하기 위해 고온 초전도 선재를 병렬로 사용하는 경우, 각 선재간의 인덕턴스 차이에 의해 전류가 균일하게 흐르지 않는 문제점이 발생한다. 이는 병렬 선재에 흘릴 수 있는 전류 용량을 크게 줄이고 교류 손실도 많이 발생시킨다[2]. 이러한 문제점을 해결하는 방법으로서 각 선재의 위치를 바꾸어 주어 각 선재의 인덕턴스를 균일하게 맞추주는 뢰벨바 형태의 전위를 수행하였다[3].

1,500 A 급 병렬 선재 제작에 사용된 선재는 AMSC사의 BSCCO-2223를 사용하였고, 표 1에서는 초전도 테이프와 병렬 선재의 사양을 나타내었다. 그림 1은 21가닥의 초전도 선재를 사용하여 제작된 1,500 A 급 병렬 선재를 보여준다. 선재의 길이는 10 m이고, 21가닥의 선재는 2열로 10층, 11층으로 적층되어 250 mm 간격으로 전위되었다. 초전도 선재 한 가닥에 인가할 수 있는 전류가 약 130 A 이지만, 인접 선재의 전류에 의한 자장의 영향 및 권선 시에 전류 용량의 감소를 고려하여 21가닥의 초전도 선재를 사용하는 것으로 결정되었다. 그림 2는 1,500 A급 병렬 선재의 I-V 특성이다. 임계전류 값은 1,650 A이다.

2.2 1,000 A 급 연속 디스크 권선

그림 3은 제작된 1,000 A급 연속 디스크 권선의 모습  
 표 1. 고온 초전도 선재와 병렬선재의 사양

	Specification	Value
초전도 테이프	Thickness	0.21 mm
	Width	4.1 mm
	Critical current	126 A
	Max. stress	75 MPa
	Min. bending Dia.	100 mm
병렬선재	테이프 갯수	21가닥
	전위 간격	250 mm
	배열	2열

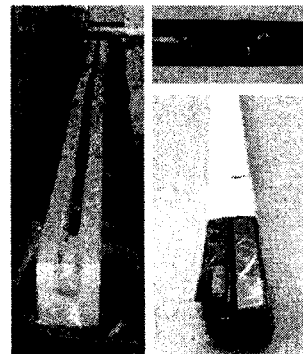


그림 1. 1,500 A 급 병렬선재

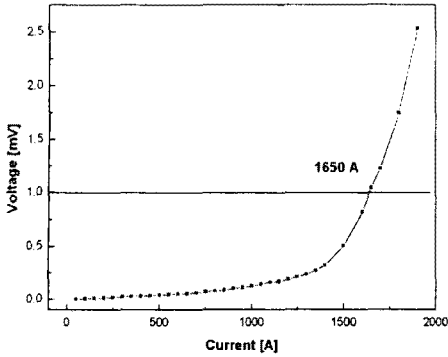


그림 2. 1,500 A 급 병렬 선재의 임계전류

을 나타내었다. 표 2에서 나타낸 바와 같이 1,000 A급 연속 디스크 권선은 24가닥의 초전도 선재를 2열로 적층하여 250 mm 간격으로 권취하였다. 권취된 24 가닥의 선재를 하나의 케이블로 생각했을 때, 케이블의 길이는 40 m, 내경은 190 mm, 권선의 높이는 160 mm이다. 총 7개의 디스크로 이루어진 연속 디스크 권선은 각 디스크 당 턴 수는 3+1 턴이다. '+'은 디스크와 디스크 사이에 보빈을 타고 올라가는 턴 수를 의미한다.

그림 4에서는 1,000 A 급 연속 디스크 권선의 임계전류 측정 결과를 나타내었다. 정자장 수치해석을 통해서 예측한 임계전류는 권선에 가해지는 수직방향 최대자장을 고려할 때 912 A, 평균 자장을 고려할 때는 1,536 A이다. 실제 연속 디스크 권선의 임계전류는 이 사이에 있을 것으로 예측하였다. 임계전류를 측정된 결과 1,260 A로 예측한 범위안에 들어가는 것을 보여준다. 그림 5는 교류 손실의 측정과 계산 결과를 나타낸다. 초전도 권선에 통전 전류가 인가될 때 초전도 선재에서 발생하는 수평 방향 및 수직방향 자장을 수치해석 프로그램을 이용하여 구하였고, 각 자장값에 대하여 slab 모델과 strip 모델 식을 이용하여 교류손실을 계산하였다.

### 3. 결 론

최근 고전압, 대용량화 되어 가고 있는 고온 초전도 전력기기의 개발에 따라 고전압 환경에 유리하면서 대용

표 2. 1,000 A 급 연속 디스크 권선의 사양

Specification	Value
Length of stacked HTS tape	40m
No. of stacked tape	24
Inner Dia.	190 mm
Height of winding	160 mm
No. of disk	7
No. of turns/disk	3+1 turns

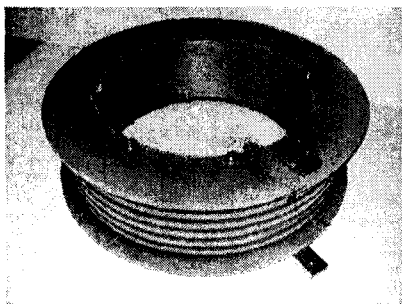


그림 3. 1,000 A 급 연속 디스크 권선

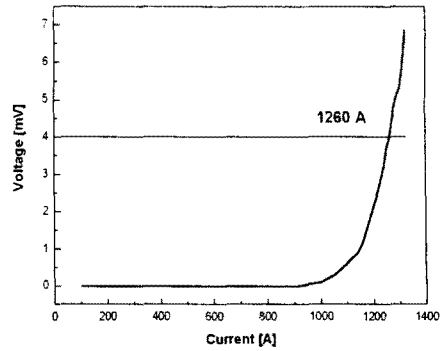


그림 4. 1,000 A급 연속 디스크 권선의 임계전류

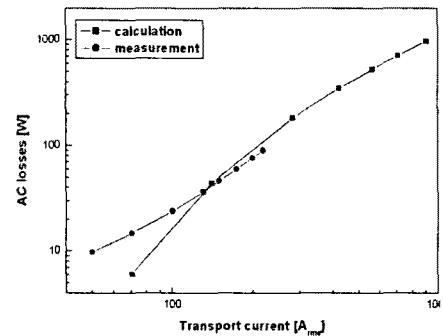


그림 5. 1,000 A 급 연속 디스크 권선의 교류 손실

량의 전류를 인가할 수 있는 권선 개발의 필요성이 증대되고 있다. 특히, 고전압, 대전류의 가혹한 조건을 견뎌야 하는 초전도 변압기의 경우, 안정적으로 대전류를 인가시킬 수 있는 권선의 개발이 시급하다. 본 논문에서는 고온 초전도 변압기 권선에 사용할 수 있는 대전류 인가용 고온 초전도 권선을 제작하기 이전에 수십 가닥의 고온 초전도 선재를 이용하여 권선 제작의 가능성을 확인하기 위해 21가닥의 초전도 선재를 사용한 1,500 A 급 병렬 선재를 제작하였고, 특성시험을 하였다. 이를 통해 제작 기술을 확보하고, 고전압 환경에 유리한 1,000 A 연속 디스크 권선을 제작하였고 임계 전류 및 교류 손실 등의 특성시험을 하였다. 초전도 변압기의 상용화를 위해서는 2,000 A 급 이상의 대전류를 안정적으로 통전시켜야 하므로 이에 필요한 병렬 선재의 개발과 교류손실이 작은 권선 기술 개발이 필요하다.

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

### [참 고 문 헌]

- [1] S. W. Lee, W. S. Kim, S. Hahn, Y. I. Hwang, K. D. Choi, "Conceptual Design of a Single Phase 33 MVA HTS TRansformer with a Tertiary Winding", Progress in Superconductivity, Vol. 7, No. 2, pp.162-166, 2006
- [2] 변상범, 이승욱, 황영인, 장대래사, 최경달, "다중 적층 초전도 선재의 전류분포가 교류손실에 미치는 영향", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B, pp. 1279-1280, 2006
- [3] 김우석, 이승욱, 황영인, 장대래사, 이희균, 홍계원, 최경달, 한송엽, "대용량 초전도 변압기 권선용 다중선재의 특성", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B, pp. 1216-1218, 2005