

## Characteristics of a Continuous Disk Winding for High Voltage HTS Transformer

黃 英 仁\* · 李 昇 昱\*\* · 金 佑 錫\*\* · 崔 景 達†

(Young In Hwang · Seung-Wook Lee · Woo-Seok Kim · Kyeong-Dal Choi)

**Abstract** - High temperature superconducting (HTS) windings for an HTS transformer which have been developed have two kinds of type, one is the layer winding and the other is disk winding. The layer winding has adopted for an HTS power transformer so far because of the small AC losses of the HTS windings. The disk windings have advantages over the layer 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. 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 winding. This new HTS winding consists of pile of HTS disk windings. The continuous disk winding was fabricated with multi-stacked HTS wires for power HTS transformer. We can check the potential possibility from the characteristic test of the fabricated winding. The new type HTS windings can be applied to HTS power transformers, especially to the high voltage ones.

**Key Words** : 연속 디스크 권선, 100 MVA 초전도 변압기, 교류손실

### 1. 서 론

현재 국내·외에서 개발되고 있는 초전도 변압기의 권선 형태는 크게 디스크 권선과 레이어 권선으로 나뉜다. 디스크 권선은 절연과 서지 전압 분배가 용이한 면이 있지만, 디스크의 접합 부분에서 발생하는 저항 손실에 의해 초전도 변압기의 성능이 저하될 뿐만 아니라 교번자계에 의한 교류 손실의 크기가 다른 권선 형태에 비해 매우 크다. 이에 반해 레이어 권선은 고전압을 인가했을 때, 전압 분배나 절연 측면에서 매우 약하지만, 교류손실이 적게 발생하기 때문에 현재 연구되고 있는 대부분의 초전도 변압기 권선형태로 채택되고 있다. 이 두 권선의 취약점을 보완하기 위해 제안된 연속 디스크 권선은 고온 초전도 선재를 디스크 형태로 권선하되 디스크와 디스크를 접합하지 않고 연속적으로 권선하는 형태로 접합에 의한 와전류 손실이나 저항에 의한 손실을 감소시킬 수 있으며, 레이어 권선에 비해 전압 분배나 절연에 유리하여 고전압 변압기에 채택 할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 연속 디스크 권선의 구조를 정의하고 시험용 권선을 설계 및 제작하였다. 제안된 연속 디스크 권선의 변압기 적용 가능성을 확인하기 위해서 단일 선재를 사용해서 연속 디스크 권선의 프로토타입을 제작하였다. 임계전류

와 교류손실을 측정하고 계산하였다. 또한, 연속 디스크 권선을 대용량 변압기에 적용하기 위해서 다중 병렬 선재를 사용하여 연속 디스크 권선을 제작하였다. 연속 디스크 권선의 특성을 파악하기 위해서 임계전류를 측정하였고, 2차원 수치해석 방법을 사용해서 교류손실을 계산하고 측정값과 비교해 보았다.

### 2. 연속 디스크 권선

#### 2.1 연속 디스크 권선의 정의

##### 2.1.1 연속 디스크 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 제작에 사용

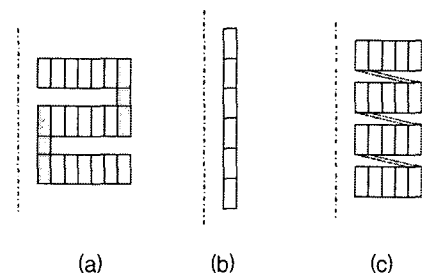


그림 1 고온 초전도 권선 개념도 (a) 디스크 권선, (b) 레이어 권선, (c) 연속 디스크 권선  
Fig. 1 Diagram of HTS winding (a) Disk winding, (b) layer winding, (c) continuous disk winding

\* 學生會員 : 韓國産業技術大學校 電機專攻 碩士課程

\*\* 正 會 員 : 基初電力研究院 研究員

† 교신저자, 正會員 : 韓國産業技術大學校 教授

E-mail : choidal@kpu.ac.kr

接受日字 : 2006年 10月 20日

最終完了 : 2006年 11月 14日

되는 권선방법이다. 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. 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.

2.1.2 연속 디스크 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 규격을 나타내었다. 표 1에 나타난 고온 초전도 선재를 고압 변압기에 적용하기 위하여 3중 절연하였으며, 절연된 고온초전도 선재를 사용하여 설계된 연속 디스크 권선의 설계 규격을 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 권선의 임계전류를 예측하기 위해서 정자장 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 방법은 유한 요소법을 사용한 축대칭 모델링 방법을 사용하였으며 자장 분포의 형상을 볼 때, 수직 방향 성분의 자장이 커질수록 고온 초전도 선재의 성능이 급격히 감소하며 교류 손실 역시 급격히 증가함을 알 수 있다. 그림 2는 정자장 수치해석 결과를 이용해서 연속 디스크 권선의 임계전류를 예측한 그래프이다. 초전도 선재에 수직으로 인가되는 평균 자장을 선택했을 때의 임계전류의 예상값은 112 A 이고, 최대 자장을 선택했을 때의 임계전류의 예상값은 73 A이다. 따라서 연속 디스크 권선의 임계전류는 73 A와 112 A 사이에서 측정될 것으로 추정된다.

표 1 고온 초전도 선재의 규격

Table 1 Specifications of HTS tape

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

표 2 연속 디스크 권선의 규격

Table 2 Specifications of the continuous disk winding

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

2.1.3 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 턴 사이에 노맥스 테이프 2장을 넣어서 절연을 보강을 하였다. 디스크와 디스크 사이에 존재하는 선재를 고정하기 위해 두께 5mm의 판을 사용하였다. 보빈의 재질은 모두 저온에서의 기계적인 특성과 전기 절연특성이 우수한 G-FRP를 사용하여 제작하였다. 그림 3에 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 4에 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 제작된 권선의 임계전류는 약 97 A 정도로 보인다. 이 결과는 앞에서 계산한 임계전류 예상값의 범위에 들어가며 연속 디스크 권선의 권선법이 초전도 권선으로써 변압기에 적용가능하다.

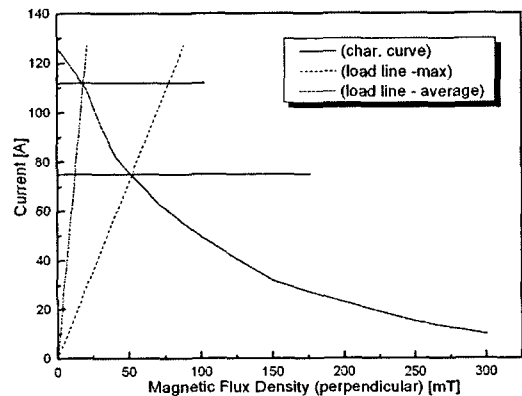


그림 2 임계전류 예측을 위한 전류-자장 관계

Fig. 2 I-B curve for estimation of critical current

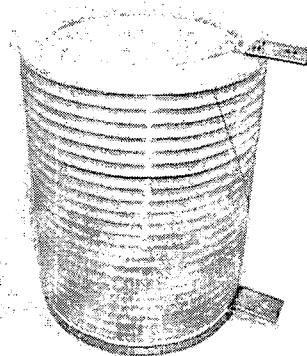


그림 3 제작된 연속 디스크 권선의 모습

Fig. 3 Continuous Disk Winding

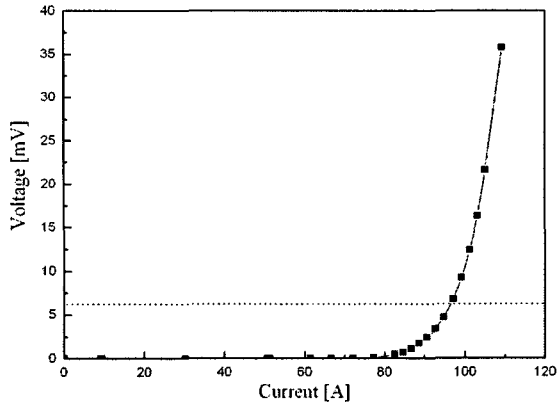


그림 4 연속디스크 권선의 임계전류 측정  
Fig. 4 Critical current of continuous disk winding

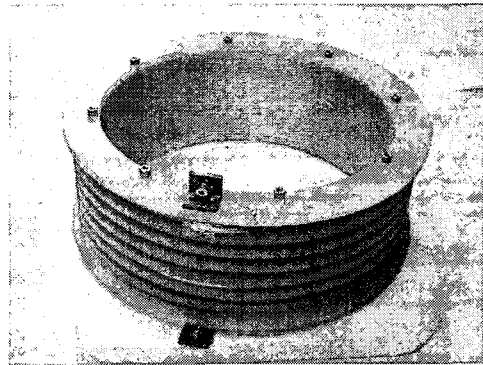


그림 5 다중 선재로 제작한 연속디스크권선  
Fig 5 Continuous disk winding with multi-stacked HTS wires

## 2.2 적층 선재를 사용한 연속 디스크 권선

### 2.2.1 연속 디스크 권선의 특성 해석 및 측정

대용량 초전도 변압기에 흐르는 전류는 수 kA 이상이다. 이러한 대용량 초전도 변압기에 적용하기 위한 연속 디스크 권선의 특성을 파악하기 위해서 병렬 선재를 사용해서 연속 디스크 권선을 제작하였다. 병렬 선재의 특성을 고려해서 9 가닥의 고온초전도 선재를 125 mm 간격으로 전위한 병렬선재를 이용하여 연속 디스크 권선을 제작하였다. 본 논문에서 연속 디스크 권선의 제작에 사용된 선재는 이노파워(InnoPower)에서 제작한 Bi-2223 계열의 고온 초전도 선재를 사용하였다. 연속 디스크 권선 제작에 사용된 선재의 사양과 제작된 연속 디스크 권선의 사양은 표 3과 4에 나타내었다.

제작에 사용한 선재의 총 길이는 9 가닥의 병렬선재를 하나의 케이블로 생각했을 때 40 m이며, 디스크 수는 7, 각 디스크 당 턴 수는 3+1 턴이다. 여기에서 +1의 의미는 디스

표 3 고온 초전도 선재의 사양  
Table 3 Specifications of HTS tape

Specifications	Value
Width	4.21 mm
Thickness(with coating)	0.26 mm
Thickness(without coating)	0.24 mm
Critical current	65 A

표 4 연속 디스크 권선의 사양  
Table 4 Specifications of continuous disk winding

Specifications	Value
Length of HTS wire	40 m
Number of stacked wire	9
Inner Dia.	190 mm
Outer Dia.	200 mm
Height of winding	146.5 mm
No. of disks	7
No. of turns/disk	3+1 turns

크와 디스크 사이에 삽입된 스페이스를 타고 감기는 턴 수를 말한다. 보빈의 내경은 190 mm, 외경은 200 mm이며, 권선의 총 높이는 146.5 mm 이다. 그림 5는 설계값을 토대로 제작한 연속 디스크 권선이다.

제작한 연속 디스크 권선의 특성은 우선 임계전류 측정을 통해서 파악할 수 있다. 수치해석 프로그램을 통해서 연속 디스크 권선을 모델링 하여 예측한 임계전류와 측정값을 비교하여 보았다. 그림 6은 고온 초전도 선재에 가해지는 수직방향의 자속밀도에 대한 임계전류의 변화와 설계된 연속 디스크 권선의 부하곡선을 보여주고 있다. 여기에서 볼 수 있는 두 개의 직선은 선재에 수직으로 가해지는 자장의 최대값과 평균값에 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. 단일 초전도 선재에 수직으로 인가되는 평균 자장을 선택했을 때의 임계전류는 36 A 이하 일 것으로 예상했고, 실제 9 가닥의 병렬 선재로 제작한 연속 디스크 권선에서의 임계전류는 255 A이다. 그림 7은 연속 디스크 권선의 임계전류 측정 결과를 보여준다.

임계전류의 측정이 직류에서 특성을 파악하는 것이라면

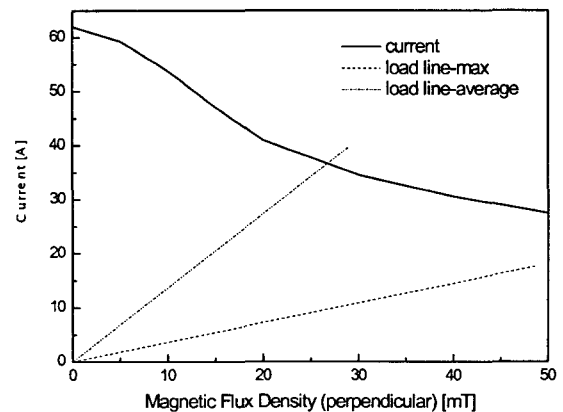


그림 6 임계전류 예측을 위한 전류-자장 관계  
Fig. 6 I-B curve of estimation of Critical current of CDW using multi-stacked HTS wire

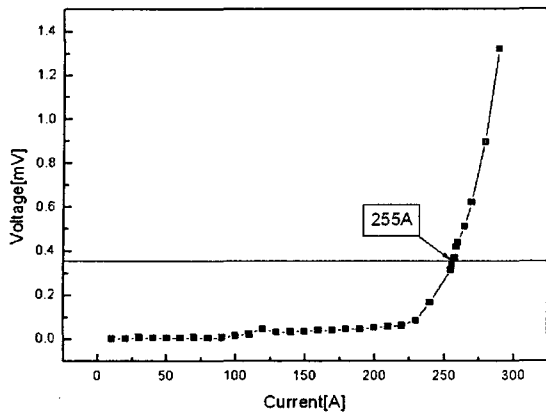


그림 7 연속 디스크 권선의 임계전류 측정 결과  
Fig. 7 Critical current of continuous disk winding

교류손실의 측정은 교류에서 연속 디스크 권선의 특성을 파악하는 것이다. 초전도 선재를 사용하는 전력기에서 교류손실을 감당하기 위한 냉각장치 비용이 전체 전력기 제작 비용의 50% 이상을 차지하기 때문에 교류손실은 전력기 상용화에 있어서 매우 중요한 쟁점이 되고 있다.

교류손실은 크게 전송전류에 의한 전송전류 손실과 외부 자장에 의한 자화손실로 표현할 수 있다. 전송전류 손실은 일반적으로 노리스 식을 이용하여 계산되어지며, 자화손실은 초전도 선재에 가해지는 자장의 방향에 따라 손실 값이 크게 달라지므로 초전도 선재에 가해지는 자장을 초전도 선재의 좁은 면으로 가해지는 수평방향 자장과 초전도 선재의 넓은 면으로 가해지는 수직방향 자장으로 나누어 슬랩(slab) 모델과 스트립(strip) 모델을 이용하여 자화손실을 계산한다 [1,2].

본 논문에서는 초전도 권선에 통전 전류가 흐를 때 초전도 선재에 인가되는 자장을 유한요소 프로그램을 이용하여 수평성분과 수직성분으로 나누어 교류손실을 계산하였다. 수평방향 자장에 의해서 발생하는 단위길이 당의 손실은 완전침투가 발생하지 않는 경우(1)와 완전침투가 발생하는 경우(2)로 나누어 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{||} = \frac{2fCAB_p^2}{3\mu_0} \beta_{||}^3 \quad B < B_p \quad (1)$$

$$P_{||} = \frac{2fCAB_p^2}{\mu_0} \left( \beta_{||} - \frac{2}{3} \right) \quad B > B_p \quad (2)$$

위 식에서  $f$ 는 외부자장의 주파수,  $B_p$ 는 완전침투 자속밀도이고  $\beta_{||} = B_{||}/B_p$ ,  $CA$ 는 초전도선의 유효 단면적이다. 수직방향 자장에 의한 손실은 브란트(Brandt)가 제안한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{\perp} = \frac{4\pi a^2 f}{\mu_0} B_c B \left[ \frac{2}{\beta_{\perp}} \ln(\cosh \beta_{\perp}) - \tanh \beta_{\perp} \right] \quad (3)$$

여기서  $B_c$ 는 임계자속밀도,  $\beta_{\perp} = B_{\perp}/B_c$ 이다. 임계전류 이하의 전송전류가 흐르는 경우 임의의 방향으로 가해지는 자

장에 의해 권선에서 발생하는 교류손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = P_{||} \cos^2 \varphi + P_{\perp} \sin^2 \varphi \quad B < B_p \quad (4)$$

$$P = P_{||} \cos \varphi + P_{\perp} \sin \varphi \quad B > B_p \quad (5)$$

위 식들로부터 초전도 권선에서 발생하는 교류손실은 다음과 같이 계산된다.  $l$ 은 초전도 권선의 길이이며, 수직자장의 경우 점적율을 고려하여 계산한다.

$$W = l \cdot P \quad [W] \quad (6)$$

연속 디스크 권선에서 발생하는 교류 손실을 측정하기 위한 실험 장치의 구성은 그림 8과 같다. 교류손실 측정을 위해 전류 파형과 전압 파형은 각각 후크미터와 저항 디바이더를 사용하며, 측정된 전류파형과 전압 파형은 절연 증폭기를 통해 락인앰프(Lock-in Amp)를 사용하여 교류손실을 측정하였다. 연속 디스크 권선에서 발생하는 교류손실의 계산값과 측정값은 그림 9에서 보여준다. 150 Arms 이하에서는 측정값이 계산값 보다 작지만, 150 Arms 이상에서는 측정값이 계산값 보다 크다는 것을 볼 수 있다. 이는 통전 전류의 크기가 연속 디스크 권선의 임계전류인 255 A로 다가가면서 부분적인 켄치가 발생됨으로서 교류손실이 급격하게 증가 때문으로 볼 수 있다.

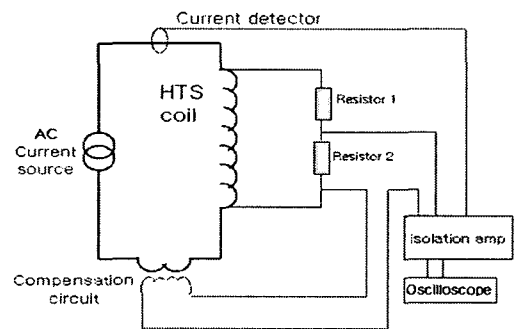


그림 8 교류손실 측정 구성도  
Fig. 8 Schematic drawing of the measurement circuit using electrical method

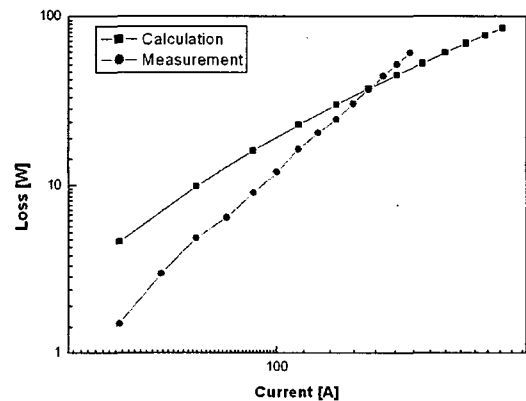


그림 9 교류손실 측정 구성도  
Fig. 9 Measurement and calculation of AC losses

**2.2.2 연속 디스크 권선을 이용한 100 MVA 초전도 변압기 해석**

현재 설계되고 있는 3상 100 MVA의 사양을 표 5에 나타내었다. 3상 100 MVA 고온 초전도 변압기의 1차측 전압은 88.9 kV, 2차측 전압은 13.2 kV로 하고 정격 전류는 1차측과 2차측이 각각 37 A, 2500 A이다. 동심형으로 배치된 100 MVA 초전도 변압기는 1차-2차-1차-3차의 권선 형태를 가진다. 고온 초전도 변압기의 운전온도는 65 K의 과냉각된 액체질소를 이용하여 초전도 권선을 냉각시켜 동작하며 초전도 변압기 설계시 권선의 온도는 교류 손실에 의한 발열을 고려하여 69 K으로 가정하고 설계하였다. 초전도 변압기의 개념 설계에서는 69 K에서 228 A의 임계전류를 가지는 2세대 초전도 선재를 사용하였다. 저온용기 제작 및 가격의 문제를 고려하여 권선의 높이를 1.5 m로 제한하여 철심에서 가까운 1차측 권선을 연속 디스크 권선과 디스크 권선, 레이어 권선으로 설계 해 각각의 교류손실을 비교해 보았다. 초전도 선재 한 가닥으로 100 MVA 초전도 변압기의 정격 전류를 감당하지 못하기 때문에 초전도 선재 여러가닥을 병렬로 적층하여 사용해야 한다. 1차측의 정격 전류가 371 A 임을 감안하여 초전도 선재 5가닥을 병렬로 적층하였다. 선재 한가닥의 두께는 0.78 mm, 넓이는 10 mm이다[3].

3상 100 MVA 초전도 변압기의 고압측에 레이어 권선과 연속 디스크 권선을 적용하기 위한 사양을 표 6에 나타내었다. 레이어 권선의 경우 표 6에서 나타난 것과 같은 사양으로 전자장 수치해석 프로그램을 이용하여 해석을 한 결과 300 A에서 수직 방향의 최대 자장이 113 mT, 평균 자장은

**표 5** 100 MVA 초전도 변압기의 설계사양  
**Table 5** Specification of 100 MVA HTS transformer

Specifications	Value	Unit
Capacity	100	MVA
Rated voltage(rms)	154/22.9/6.6	kV
Phase voltage(rms)	88.9/13.2/6.6	kV
Rated current (rms)	0.37/2.5/1.6	kV
Connection type	Y-Y-Δ	

**표 6** 100 MVA 초전도 변압기의 고압측 적용조건  
**Table 6** Specification of secondary winding of 100 MVA HTS transformer

레이어 권선	레이어 수	3개
	각 레이어 당 권선 수	148 턴
	턴 당 간격	0.14 mm
	레이어 당 간격	20 mm
디스크 권선	디스크 수	74개
	디스크 당 권선수	5+1 턴
	보빈 당 간격	10.41 mm

17 mT로 이 때의 손실은 1004 W로 계산되었다. 연속디스크 권선으로 설계한 3상 100 MVA 초전도 변압기의 1차측은 총 74개의 디스크 사이에 10.41 mm 두께의 스페이스를 삽입해서 +1턴이 감기도록 설계하였다. 수치해석 프로그램

을 이용하여 300 Arms에서 수직 방향 최대 자장이 205 mT, 수직 방향 평균 자장이 47 mT 로, 이 때의 손실은 4.6 kW로 예측되었다.

**3. 결 론**

본 논문에서는 디스크 권선과 레이어 권선의 단점을 보완하고 장점만을 결합한 연속 디스크 권선에 대해 기술하였다. 단일 선재를 사용한 연속 디스크 권선과 실제 변압기에 적용하기 위해서 다중 적층 선재를 사용한 연속 디스크 권선의 각각을 프로토타입으로 제작하여 임계전류와 교류손실을 계산하고 측정해보았다. 또한 연속 디스크 권선을 33 MVA 초전도 변압기에 적용을 했을 때의 손실을 레이어 권선과 비교하여 보았다. 초전도 선재를 2세대 초전도 선재로 제작하게 되면 연속 디스크 권선의 손실은 약 1/8 정도로 감소할 것으로 예상된다. 실제로 계통에서는 초전도 변압기의 % 임피던스를 10 % 이상으로 요구하고 있기 때문에 레이어 권선에서 계산된 손실은 현재보다 오히려 더 커질 수 있다. 비록 레이어 권선이 연속 디스크 권선보다 손실이 작더라도, 레이어 권선은 선재간의 닿는 면적이 적고 선재 간 거리도 멀기 때문에 커패시턴스가 작아, 사고 전압 발생시에 초전도 변압기가 매우 불안정해 질 수 있다. 따라서 고전압 변압기의 권선 형태는 비록 손실이 많이 발생한다 하더라도 변압기의 안정성을 위해서 연속 디스크 형태를 사용해야 한다. 연속 디스크 권선을 초전도 변압기에 효율적으로 적용하기 위한 많은 연구와 개발이 진행중에 있으며 이러한 특성을 이용하여 효율적인 초전도 변압기의 상용화가 가능할 것으로 보인다.

**감사의 글**

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

**참 고 문 헌**

[1] E. H. Brandt and M. Indenbom, "Type II superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field", Physical Review B, Vol. 48, pp.12893-12906, November 1993

[2] M. Wilson, Superconducting Magnet, Clarendon Press, Now York, 1983

[3] S. W. Lee, W. S. Kim, S. Y. 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 pp162-166, April 2006

저 자 소 개



**황 영 인 (黃 英 仁)**

1983년 11월 6일생.  
2006년 2월 한국산업기술대학교 전자공학과 공학사.  
2006년 12월 현재 동대학원 전기공학과 석사과정  
E-mail : byuli@kpu.ac.kr



**이 승 옥 (李 昇 昱)**

1973년 12월 23일생.  
1999년 순천향대학교 공과대학 전기공학과 공학사  
2004년 동대학원 전기공학과 졸업(박사)  
2004년 현재 기초전력연구원  
E-mail : leeso23@kpu.ac.kr



**김 우 석 (金 佑 錫)**

1970년 6월 12일생.  
1996년 서울대학교 공과대학 전기공학과 공학사  
1998년 서울대학교 공과대학 대학원 공학석사  
2002년 서울대학교 공과대학 대학원 공학박사  
2002-현재 기초전력연구원 전임연구원  
2005-현재 MIT/FBML Researcher  
E-mail : ottor@snu.ac.kr



**최 경 달 (崔 景 達)**

1962년 2월 12일생.  
1984년 서울대학교 공과대학 전자공학과 공학사  
1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 공학석사  
1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 공학박사  
1993년-1997년 기초전력공학공동연구소 전임연구원  
1998년-현재 한국산업기술대학교 에너지대학원 교수  
E-mail : choidal@kpu.ac.kr