

고전압 초전도 변압기용 연속 디스크 권선의 특성

황영인*, 이승욱**, 김우석**, 최경달*
 *한국산업기술대학교, **가초전력연구원

Characteristics of a Continuous Disk Winding for Large Power HTS Transformers

Young In Hwang*, Seung-Wook Lee**, Woo-Seok Kim** and Kyeong-Dal Choi*
 *Korea Polytechnic University, ** Korean Electrical Engineering and Science Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 디스크 권선과 레이어 권선의 장점을 가지는 연속디스크 권선의 변압기 적용가능성을 확인하기 위하여 전위된 병렬선재를 이용하여 연속 디스크 권선을 제작하였다. 제작된 연속 디스크 권선의 임계전류 및 교류손실 측정을 통하여 실제 변압기 권선방법으로의 적용 가능성을 확인 하였다. 또한 33 MVA 초전도 변압기의 고압측에 사용될 권선 형태를 레이어 권선, 연속 디스크 권선을 적용하였을 경우 발생하는 손실을 계산하였다.

1. 서 론

현재 국내외에서 개발되고 있는 초전도 변압기의 권선 형태는 크게 디스크 권선과 레이어 권선으로 나뉜다. 디스크 권선을 실제 변압기에 적용하면, 디스크의 접합 부분에서 발생하는 저항 손실에 의해 초전도 변압기의 성능이 저하될 뿐만 아니라 교번자계에 의한 교류손실의 크기가 다른 권선 형태에 비해 매우 크다. 이에 반해 레이어 권선을 적용하면 고전압을 인가했을 때, 전압 분배나 절연 측면에서 매우 약하지만, 교류손실이 적게 발생하기 때문에 현재 연구되어지고 있는 초전도 변압기의 권선형태로 채택되고 있다. 이 두 권선의 취약점을 보완하기 위해 제안된 연속 디스크 권선은 고온 초전도 선재를 디스크 형태로 권선하고 접합하지 않고 연속적으로 권선하는 형태로 접합에 의한 교류손실을 감소시킬 수 있으며, 레이어 권선에 비해 절연에 유리하여 고전압 변압기에 채택할 수 있고 전압 분배에 유리한 장점이 있다.

현재 개발되고 있는 고온 초전도 단일 선재의 임계전류가 약 110 A 임을 감안할 때, 대용량 초전도 변압기에 사용하기 위해서는 고온 초전도 선재를 여러 가닥 적층하여 사용하는 것이 불가피하다. 여러 가닥 적층된 고온 초전도 선재를 변압기 권선에 적용하기 위해서는 적층되어 있는 초전도 선재의 길이 차이에 따라 임피던스가 불균일하고 이에 따라서 전류 분배가 고르게 일어나지 않는 문제점을 해결해야한다. 이러한 문제점은 선재를 일정한 간격으로 전위를 시킴으로서 해결가능하다[1]. 본 논문에서는 9가닥의 고온 초전도 선재를 125 mm 간격으로 전위한 병렬선재를 이용해서 연속 디스크 권선을 제작하고, 기본적인 특성 시험을 수행함으로써 변압기 권선 적용가능성을 확인하였다. 또한 33 MVA 초전도 변압기의 권선 형태별 교류손실을 각각 비교하였다.

2. 본 론

2.1 연속 디스크 권선의 특성 해석 및 측정

33 MVA 초전도 변압기 고압측 권선에 정격 전류는 대략 371.1 A이다. 정격 전류를 흘리기 위해서는 최소한 10 가닥의 초전도 선재가 요구되어진다. 따라서 본 연구에서는 10 가닥의 고온초전도 선재를 125 mm 간격으로 전위한 병렬선재를 이용하여 연속 디스크 권선을 제작하였다. 본 논문에서 연속 디스크 권선의 제작에 사용된 선재는 Inno 파워서 제작한 Bi-2223 계열의 고온 초전도 선재를 사용하였다. 연속 디스크 권선 제작에 사용된 선재의 사양과 제작된 연속 디스크 권선의 사양은 표 1에 나타내었다. 사용된 선재의 총 길이는 10 가닥의 병렬선재를 하나의 케이블로 생각했

을 때 40 m이며, 디스크 수는 7, 각 디스크 당 턴 수는 3+1 턴이다. 여기에서 +1은 디스크와 디스크 사이에 삽입된 스페이스를 타고 감기는 턴 수를 말한다. 보빈의 내경은 190 mm, 외경은 200 mm이며, 권선의 총 높이는 146.5 mm 이다.

제작된 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 1은 고온 초전도 선재에 가해지는 수직방향의 자속밀도에 대한 임계전류의 변화와 설계된 연속 디스크 권선의 부하곡선을 보여주고 있다. 여기에서 볼 수 있는 두 개의 직선은 선재의 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 10 가닥의 병렬 선재로 제작한 연속 디스크 권선에서의 임계전류는 255 A이다. 그림 2는 연속 디스크 권선의 임계전류 측정 결과를 보여준다.

임계전류의 측정이 적류에서 특성을 파악하는 것이라면 교류손실의 측정은 교류에서 연속 디스크 권선의 특성을 파악하는 것으로 볼 수 있다. 초전도 선재를 사용하는 전력기기에서 교류손실을 감당하기 위한 냉각장치 비용이 전체 전력기기 제작비용의 50% 이상을 차지하기 때문에 교류손실은 전력기기 사용화에 있어서 매우 중요한 쟁점이 되고 있다

교류손실은 크게 전송전류에 의한 전송전류 손실과 외부자장에 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 slab모델과 strip모델을 이용하여 자화손실을 계산한다.

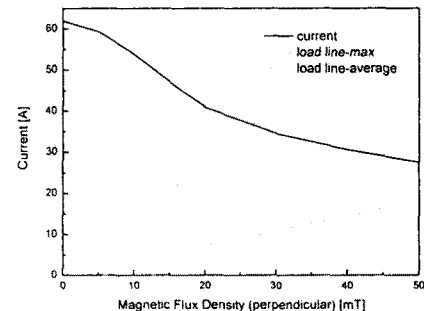
본 논문에서는 초전도 권선에 통전 전류가 흐를 때 초전도 선재에 인가되는 자장을 유한요소 프로그램을 이용하여 수평성분과 수직성분으로 나누어 교류손실을 계산하였다. 수평방향 자장에 의해서 발생하는 단위길이 당의 손실은 완전침투가 발생하지 않는 경우(1)와 완전침투가 발생하는 경우(2)로 나누어 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{11} = \frac{2fCAB_p^2}{3\mu_0} \beta_{j1}^3 \quad B < B_p \quad (1)$$

$$P_{11} = \frac{2fCAB_p^2}{\mu_0} \left(\beta_{j1} - \frac{2}{3} \right) \quad B > B_p \quad (2)$$

위 식에서 f 는 외부자장의 주파수, B_p 는 완전침투 자속밀도이고 $\beta_{j1} = B_{j1}/B_p$, CA 는 초전도선의 유효 단면적이다. 수직방향 자장에 의한 손실은 Brandt가 제안한 식으로 나타내면 다음과 같다.

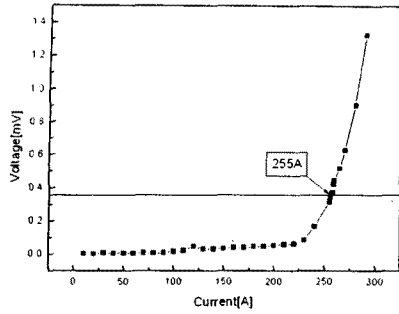
$$P_1 = \frac{4\pi n^2 f}{\mu_0} B_p B \left[\frac{2}{\beta_1} \ln(\cosh \beta_1) - \tanh \beta_1 \right] \quad (3)$$



〈그림 1〉 임계전류 예측을 위한 전류-자장 관계

〈표 1〉 고온 초전도 선재 및 연속 디스크 권선의 사양

Specifications of HTS wire	Value
width	4.21 mm
thickness(with coating)	0.26 mm
thickness(without coating)	0.24 mm
critical current	65 A
Specification of Continuous Disk Winding	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



〈그림 2〉 연속디스크권선의 임계전류 시험결과

여기서 B_c 는 임계자속밀도, $\beta_{\perp} = B_{\perp} / B_c$ 이다. 임계전류 이하의 전송전류가 흐르는 경우 임의의 방향으로 가해지는 자장에 의해 권선에서 발생하는 교류손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

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

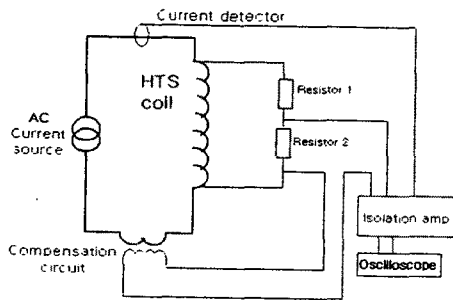
$$W = l \cdot P [W] \quad (6)$$

연속 디스크 권선에서 발생하는 교류 손실을 측정하기 위한 실험 장치의 구성은 그림 3과 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 계산 값과 측정값은 그림 4에서 보여준다. 150 A_{rms}를 기준으로 150 A_{rms} 이하에서는 측정값이 계산값 보다 작지만, 150 A_{rms} 이상에서는 측정값이 계산값 보다 크다는 것을 볼 수 있다. 이는 통전 전류의 크기가 연속 디스크 권선의 임계전류인 225 A로 다가서면서 부분적인 퀸치가 발생됨으로서 교류손실이 급격하게 증가하므로 볼 수 있다.

2.2 33 MVA 초전도 변압기 적용

현재 설계되고 있는 33 MVA 154 kV/22.9 kV 고온 초전도 변압기의 1차측 전압은 88 kV, 2차측 전압은 13 kV로 하고 정격 전류는 1차측과 2차측이 각각 371 A, 2500 A이다. 동심형으로 배치된 33 MVA 초전도 변압기는 1차-2차-1차-3차의 권선 형태를 가진다. 고온 초전도 변압기의 개념 설계에서는 69 K에서 228 A의 임계전류를 가지는 2세대 초전도 선재를 사용하였다. 표 2에서는 33 MVA 초전도 변압기 고압측에서의 설계 사양을 나타내었다. 저온용기 제작 및 가격의 문제를 고려하여 권선의 높이를 15 mm로 제한하여 철심에서 가까운 1차측 권선을 연속 디스크 권선과 디스크 권선, 레이어 권선으로 설계 해 각각의 교류손실을 비교해 보았다. 1차측의 정격 전류가 371 A 임을 감안하여 초전도 선재 5가닥을 전위시켰다. 선재 한가닥의 두께는 0.78 mm, 넓이는 10 mm이다.

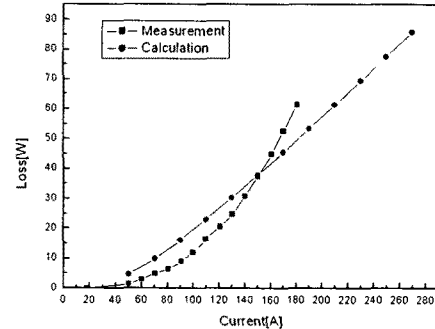
레이어 권선의 경우 표 2에서 나타난 것과 같은 사양으로 전자장 수치해석 프로그램을 이용하여 해석을 한 결과 300 A_{rms}에서 수직 방향의 최대 자장이 113 mT, 평균 자장은 17 mT로 이 때의 손실은 1004 W로 계산되



〈그림 3〉 교류손실 측정 구성도

〈표 2〉 33 MVA 초전도 변압기 고압측 적용 조건

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



〈그림 4〉 교류손실의 측정값과 계산값 비교

었다. 연속 디스크 권선으로 설계한 33 MVA 초전도 변압기의 1차측은 총 74개의 디스크 사이에 10.41 mm 두께의 스페이스를 삽입해서 +1턴이 감기도록 설계하였다. 수치해석 프로그램을 이용하여 300 A_{rms}에서 수직 방향 최대 자장이 205 mT, 수직 방향 평균 자장이 47 mT 로, 이 때의 손실은 4616 W로 예측되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 디스크 권선과 레이어 권선의 문제점을 보완한 연속 디스크 권선을 실제 초전도 변압기에 적용했을 때의 특성을 파악하기 위해 10 가닥의 전위된 고온 초전도 선재를 사용하여 연속 디스크 권선을 제작하였다. 임계전류 시험과 교류손실 측정을 통해 연속 디스크 권선의 대용량 변압기 적용 가능성을 확인 하였다. 또한 33 MVA 초전도 변압기의 권선 형태별 교류손실을 각각 비교하였다. 철심에서 가까운 고압측 레이어 권선, 연속 디스크 권선으로 했을 때의 손실을 계산해 보면, 300 Arms에서 레이어 권선에서의 손실은 1004 W 이고, 연속 디스크 권선에서의 손실은 4616 W이다. 계산된 손실은 2세대 초전도 선재의 슬릿 또는 트윅스트를 고려하면 1/8 정도로 감소 될 것으로 예상된다. 실제로 계통에서는 초전도 변압기의 % 임피던스를 10% 이상으로 요구하고 있기 때문에 레이어 권선에서 계산된 손실은 오히려 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.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 김우석, 이승욱, 황영인, 장대래사, 이희균, 홍계원, 최경달, 현송엽, "대용량 초전도 변압기 권선용 다중선재의 특성", 대한전기학회논문집, B권, p1216-1218, 2005
- [2] 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, p162-166, 2