

고온초전도변압기의 특성해석 및 시험

이희준, 차귀수, 이지광\*, 최경달\*\*, 류 경우\*\*\*, 한송영†  
 순천향대, 우석대\*, 한국산업대\*\*, 전남대\*\*\*, 서울대†

Test and Characteristic Analysis of an HTS Power Transformer

H.J. Lee, G.S. Cha, J.K. Lee\*, K.D. Choi\*\*, K.W. Ryu\*\*\*, S.Y. Hahn†

Soonchunhyang Univ., Woosuk Univ.\*, Korea Polytechnic Univ., Chonnam National Univ.\*\*\*, Seoul Nation Univ†

**Abstract** - This paper describes the construction and test results of a 10kVA single phase HTS transformer. Double pancake windings with BSCCO-2223 HTS tape and GFRP cryostat with room temperature bore are used in the transformer. Two double pancake windings are connected in series to provide 184 turns and two double pancake windings are connected in parallel to conduct the secondary current of 45.4A. Coefficients of the constructed transformer are obtained using the fundamental tests of the transformer. According to the test results, larger leakage reactance than expected is observed due to the bulky core which surrounded the cryostat.

**Key word** : superconducting power machine, HTS transformer, double pancake winding, AC loss

팬케이크 권선은 직렬로 연결하여 184턴을 만들었고 저압측은 두 개의 더블팬케이크를 병렬로 연결하여 정격부하전류 45.4A를 통전할 수 있도록 하였다.

표1 고온초전도선재 사양

재질	BSCCO-2223
테이프 폭	3.1 mm
테이프 두께	0.168 mm
모재	은 합금
트위스트	NO
임계전류	62A (77K, self-field)

I. 서론

기존의 변압기에 비해 고온초전도변압기가 주목을 받는 이유는 무게가 가볍고, 부피가 감소하며, 고효율이며, 환경친화적 이라는데 있다. 또 고온초전도변압기는 과부하에 의한 수명감소가 없고, 전력시스템에 고장 전류가 발생하면 고온초전도권선에 저항이 발생하여 자체 보호능력을 보유하고 있다.[1]

본 논문에서는 단상 10KVA급 고온초전도 변압기를 설계하고 제작된 고온초전도 변압기의 기본 특성 시험을 수행하였다. 설계시 권선부의 자화손실에 대해 계산 하여는데, 수평자계와 수직자계에 대한 영향을 고려하였다. 다수의 병렬도체에 전류가 균등하게 흐르기 위해 솔레노이드 권선 방법 대신 더블팬케이크권선 방법을 선택하여 설계하였다.[2]

II. 10KVA 고온초전도변압기 구조

권선에 사용한 선재는 BSCCO-2223 고온초전도 선재로서 폭은 3.1 mm, 두께는 0.168 mm이며 임계전류는 외부자장이 없는 경우 77K에서 62A이고, 선재의 전류밀도  $J_c$ 는  $1.2 \times 10^4 [A/Cm^2]$ 이다. 결합손실을 줄이기 위해 모재는 은합금을 사용하였으며, 표1은 BSCCO-2223 선재에 대한 기본 사양이다.

1차측과 2차측 모두 같은 선을 사용하여 권선하였고 1차측과 2차측의 권수비는 2:1이다. 고압측 전압은 440V이고 전류는 22.7A이며 저압측전압은 220V이고 전류는 45.4A이다. 4개의 더블팬케이크형태로 권선하였고 권선부는 액체질소에서 동작하도록 하였다. 각각의 팬케이크는 G10-FRP를 이용하여 제작하였으며 제작된 보빈에는 94턴씩 권선하였다.

4개의 더블팬케이크 권선중 고압측은 두 개의 더블

그림 1은 제작된 철심과 권선의 단면도이다. 철심설계는 상온변압기 설계와 같은 방법으로 설계하였고 사용된 철심은 방향성 구조강판으로 두께는 0.3 mm이다. 철심은 권선형으로 제작되었으며 사각형 형태로 되어있으며 철심의 단면적은  $85 \times 85 mm^2$ 이며 철심의 최대 자속밀도는 1.95T이며 동작자속밀도는 1.3T이고, 제작된 철심의 가로 세로의 길이는 670 mm, 340 mm이며 창 의 크기는 가로와 세로가 각각 500 mm 170 mm이며 무게는 86.7 kg이다.

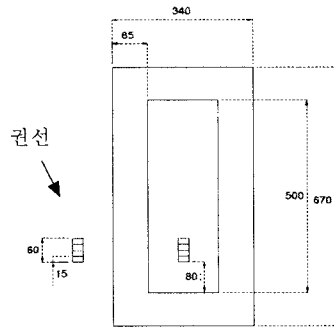


그림1 철심과 권선의 단면도

표2 는 고온초전도 변압기의 주요 사양이다. 그림 2는 10kVA고온초전도 변압기의 단면도이다. 저온용기와 지지대는 GFRP와 부도체를 이용하여 누설 자속에 의한 와전류손이 발생하지 않게 제작하였다. 중공형 형태로 제작하여 가운데로 철심이 지나갈 수 있게 하여 상온에 철심이 위치 할 수 있게 하였으며, 제작된 저온용기의 안지름과 바깥지름은 130 mm, 405 mm, 높이는 470 mm이다. 액체질소용기 안과 바깥 부분에는 진공층을 두어 외부로부터의 열손실 침투를 방지하였다.

### III. 수직 수평자계에 의한 자화손실

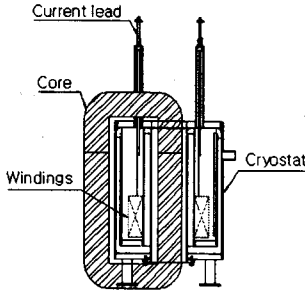


그림 2 초전도변압기 단면도

표2 고온초전도변압기의 사양

정격	
용량	단상 10kVA
전압	1차/2차 440/220V
전류	1차/2차 22.7/45.4A
권선	
턴수	1차/2차 188/94
선 길이	1차/2차 133/133m
안쪽/바깥쪽 지름	202/242 mm
높이	60 mm
철심	
재질	방향성 규소강판
높이/너비	670/340 mm
단면적	85×85 mm <sup>2</sup>
무게	86.7kg
손실	84.8W, 1.3T
최대자속밀도	1.92T
동작자속밀도	1.3T
저온용기	
재질	GFRP
안쪽/바깥쪽 지름	130/405 mm
높이	470 mm

고온초전도선재에 외부로부터의 자계가 공급되면 교류손실이 발생하는데 교류손실은 수직자계  $B_z$ , 수평자계  $B_y$  와 같이 자계의 방향에 의해 많은 차이가 발생한다. 고온초전도선재의 넓은 표면에 인가되는 자계를  $B_z$  로한다. 권선부에 대한 외부로부터의 수직 수평자계는 유효요소법을 이용하여 계산하였고 구하여진  $B_z$ ,  $B_y$  을 이용하여 교류손실을 식(1)을 이용하여 계산하였다. [3]

$$Q_x = \frac{2B_z^2}{\mu_0} \left( \frac{1}{\beta_1} - \frac{2}{3\beta_1^3} \right) + \frac{2B_y^2}{\mu_0} \left( \frac{1}{\beta_1} - \frac{2}{3\beta_1^3} \right) \quad (1)$$

위 식에서  $\beta$ 는 자속의 침투 정도를 나타내는 계수로서  $\beta = B_m/B_p$ ,  $B_p$ 는 자속이 초전도체의 중심에 도달하는 자속밀도로  $B_p = \mu_0 J_c a$  이다. 여기서는  $B_m$  대신에  $B_z$  와  $B_y$  를 사용하였다.

그림 3.a)은 변압기의 철심과 권선 부근에서의 자속 분포를 나타내고 있으며 그림 3.b)는 권선부분을 확대한 것이다. 그림 3.b)에서 볼 수 있듯이 고압측 권선기

리 자로가 형성되고 저압측 권선기리 자로가 형성되어 고압측과 저압측이 만나는 지점에서 수직 자속이 집중되는 것을 알 수 있다.

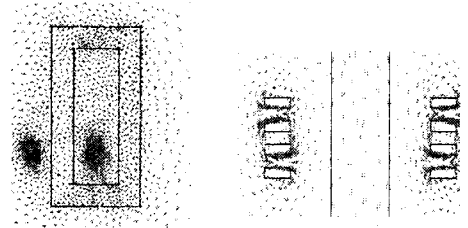


그림 3 변압기내의 자속분포  
a) 전체영역 b) 권선부분확대

그림 4는 수직방향의 자계  $B_z$  가 외부에서 권선면으로 인가시의 교류손실밀도이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 고압측 권선과 저압측 권선의 사이에서는 자장이 초전도선에 수직 방향으로 가해지는 것을 알 수가 있고 이는 고압측 권선과 저압측 권선에 흐르는 전류의 방향이 다르기 때문이다. 전류가 바뀌는 부분에서 자장이 초전도선의  $B_z$  방향으로 가해지는 것을 알 수가 있다. 고온초전도선에 수직성분으로 자장이 가해지면 수평방향의 자장이 인가될 때에 비해서 입계전류의 감소폭이 커지고 손실도 커지게 된다. 저압측 권선과 고압측 권선이 마주보는 부분이 자장의 세기도 셀 뿐만 아니라 자장의 방향도 초전도선에 수직방향이기 때문에 변압기의 권선에서 발생하는 손실의 대부분은 고압측 권선과 저압측 권선이 마주보는 부분에서 발생하게 된다. 이때의 손실은 3.24W이다.

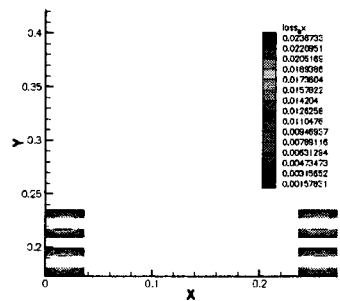


그림 4 권선면적의 손실밀도

### IV. 고온초전도변압기 실험 결과

제작된 단상 10kVA 초전도 변압기는 그림 5와 같은 회로로 시험하였는데, 변압기의 기본 시험인 단락시험 무부하시험 부하시험등을 하였다. 유도전압조정기를 사용하여 제작된 고온초전도 변압기에 전압을 인가하여 무부하시험과 단락 시험을 실시하였다. 변압기 2차측이 병렬로 연결되어 있으므로 두 개의 팬케이크 권선의 임피던스가 다르면 순환 전류가 발생하므로 로고스키 코일을 두 팬케이크 권선에 삽입하여 순환전류 발생 유무를 측정하였다.

그림 6은 무부하 시험에 대한 결과이다. 무부하시험 시 1차 전압을 440V까지 증가시키었는데 정격 전압시 정격전류의 5%인 1.13A의 전류가 흘렀으며, 무부하손실은 84.8W 이고 역률은 0.174이었다. 1차측 전압이 440V일 때 여자전류는 1.13A 이므로 자화리액턴스는 389Ω이다. 고온초전도 변압기에서는 동손이 발생

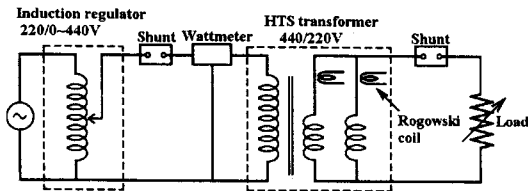


그림 5 변압기 시험 회로도

하지 않으므로 대부분의 손실은 철손이다. 그림 7에서 정격전압 440V까지 증가시 1차 전류가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 1차측 전류의 제곱으로 전력손실이 발생하는 것을 알 수 있다.

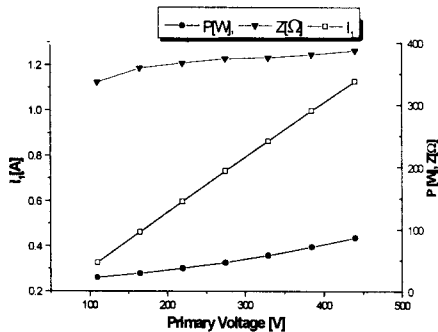


그림 6 무부하시험

그림 7은 단락시험결과로 1차측 전압과 1차측 전류의 변화관계를 나타내고, 퍼센트 임피던스와의 관계를 나타내고 있다. 1차측 전압이 47.4V에서 2차측이 정격전류가 흘렀다. 이때 내부 퍼센트 임피던스가 10.7%이 있는데 이와 같이 내부 임피던스가 높은 이유로는 중공형 저온용기에 철심이 지나가는 구조로 철심과 권선사이의 공극이 많이 증가하였으며, 권선과 권선사이의 길이가 커 누설자속이 많았으며, 저온용기의 크기가 커짐으로 철심의 길이가 증가한데 원인이 있는 것으로 판단된다.

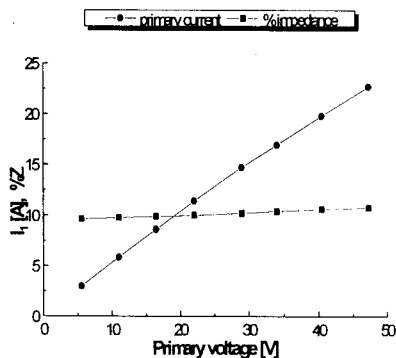


그림 7 단락시험결과

그림 8은 부하시험 결과이다. 전부하시 2차측전압이 220V에서 216.8V로 변화하므로 제작된 고온초전도 변압기의 전압변동율은 2.4%이다.

측정결과에 의해 병렬로 연결된 2차측의 두 개의 더블팬케이크 권선에서의 순환전류가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 두 개의 더블팬케이크의 권선의 리액턴스차이가 없음을 알 수 있었다. 표 3은 시험 결과를 정리한 것이다.

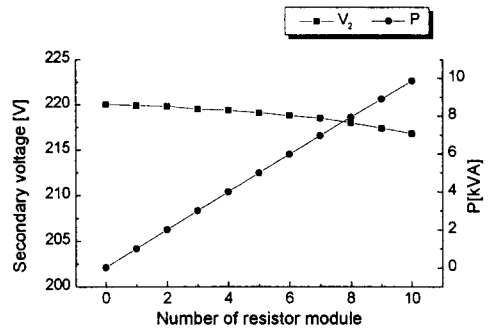


그림 7 부하시험결과

표 3 시험 결과

무부하시험	
여자전압	440V
여자전류	1.13A
무부하손	84.8W
단락시험	
전압	47.4V
전류	22.7A
%임피던스	10.7%

## V. 결론

단상 10kVA 고온초전도 변압기의 제작과 시험 결과를 기술하였다. 4개의 더블팬케이크권선을 사용하였는데 더블팬케이크 권선방법은 고전압 변압기에서 솔레노이드권선 방법보다 많이 사용되는 방식이다.

제작된 변압기의 특성시험을 통해 고온초전도변압기의 기본 계수들을 구할 수 있었으며 시험 결과 누설 리액턴스가 다른 고온초전도 변압기에 비해 컸는데 그 이유는 권선부와 철심사이의 공극 길이가 크기 때문이다.

본 연구를 통해 얻어진 더블팬케이크형 권선제작, 중공형 극저온용기 제작, 고온초전도변압기의 기본 특성에 관한 자료는 향후 대형 초전도 변압기의 설계 및 제작시에 기초 자료로 활용 될 수 있다.

본 연구는 산업자원부의 지원으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- [1] P. Mehta, Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming Transformers," IEEE Spectrum, Vol.34, No.7, pp.43-49, 1997
- [2] K. Funaki et al., "Preliminary Tests of A 500kV A-Class Oxide Superconducting Transformer Cooled by Subcooled Nitrogen," Trans. on IEEE Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, pp. 824-827, 1997
- [3] C. P. Bean, "Magnetization of Hard Superconductor," Physical Review Letters, Vol.8, No.6, pp.250-253, 1962