

### 3상 10kVA 고온초전도 변압기의 특성

이승욱, 이희준, 차귀수, 이지광\*, 류경우\*\*, 한송엽\*\*\*  
 순천향대, 우석대\*, 전남대\*\*, 서울대\*\*\*

#### Characteristics of a 10kVA three phase superconducting power transformer

S.W. Lee, H.J. Lee, G.S. Cha, J.K Lee\*, K.W. Ryu\*\*, S.Y. Hahn\*\*\*  
 Soonchunhyang Univ, Woosuk Univ\*, Chonnam National Univ\*\*, Seoul National Univ\*\*\*

**Abstract** - The high temperature super-conductor transformer gains interests from the industries.

This paper described construction and test results of a 10kVA HTS transformer. Three phase transformer with double pancake windings were constructed. BSCCO-2223 wire, silicon sheet steel core and FRP cryostats were used in that transformer. After the test of basic properties of the 3 phase HTS transformer using no load test, short circuit test and full load test, continuous operation of 100 hours with pure resistive load has been carried out. Test proved over-load capability and reliability of the HTS transformer.

#### 1. 서 론

고온초전도선재의 성능 향상으로 고온초전도선재를 이용한 변압기, 전동기, 전류제한기, 송전케이블 등의 기기 등이 개발되고 있으며, 장선이 용이한 BSCCO 선재가 주로 사용되고 있다.

이 중에서 고온초전도변압기가 갖는 장점으로는 고효율로 인한 운전비용의 감소와 에너지 절약, 무게 및 부피의 감소, 환경친화성 그리고 과부하 내력의 증가 등을 들 수 있다. 예를 들어 30MVA 고온초전도변압기의 경우 무게와 면적을 각각 최대로 2/3까지 줄일 수 있다 [1][2].

고온초전도 변압기는 기존의 변압기에 비하여 성능이 우수하고 경제성이 높기 때문에 선진외국에서는 이에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[3].

본 논문에서는 10kVA 고온초전도변압기를 제작하고 시험결과를 기술하였다. 실제 전력시스템을 고려하여 3상 고온초전도변압기를 제작하였다. 고온초전도변압기의 권선은 더블팬케이크형으로 권선 하였다[4].

3상 고온초전도변압기의 기본특성 실험인 무부하시험, 단락시험, 전부하시험 후에 순수한 저항부하를 이용하여 100시간 연속운전을 하였다. 실험결과 초전도 변압기의 과부하특성과 신뢰도를 확인 할 수 있었다.

#### 2. 3상 10kVA 고온초전도변압기 사양과 시험

고온초전도변압기의 운전특성을 시험하기 위하여 3상 10kVA 고온초전도변압기를 설계하였다.

변압기의 고압측 권선과 저압측 권선의 정격 전압은 각각 440V, 220V이고, 고압측 권선과 저압측 권선에 흐르는 전류는 각각 13.1A, 26.2A이다. 변압기의 권선

은 장선이 용이한 BSCCO-2223선재를 사용하였다.

두 가지 종류의 고온초전도 선재를 사용하여 권선 하였다. 고압측에 사용된 선재의 임계전류는 77K에서 73A이며, 선재의 단면적은  $2.9 \times 0.164 \text{mm}^2$ 이다. 저압측에 사용된 선재의 임계전류와 단면적은 각각 77K에서 100A,  $4.1 \times 0.203 \text{mm}^2$ 이다. 상당 고압측과 저압측 권선에 사용된 선재의 전체 길이는 각각 75m와 68m이다. 표 1은 고압측과 저압측권선에 사용된 초전도선재의 특성이다.

표 1. 고온초전도변압기에 사용된 초전도선재의 특성  
 Table 1. Specifications of the HTS Wires

	고압측	저압측
초전도체	BSCCO-2223	BSCCO-2223
필라멘트 수	55	61
면적	$2.9 \times 0.164 \text{mm}^2$	$4.2 \times 0.203 \text{mm}^2$
임계전류	73A, 77K	100A, 77K
모재	Ag	Ag alloy
상당 전체 길이	75m	68m

한 상에 3개의 더블팬케이크형 권선을 쌓고 고압측은 56턴으로 감은 2개의 더블팬케이크형 권선을 직렬연결하고, 저압측은 98턴으로 감은 1개의 더블팬케이크 형태로 고압측과 저압측 상당 전체 권선수는 고압측 112턴과 저압측 98턴이다. 변압기는 내철형으로 되어있으며, 고압측과 저압측의 권선은 Y-Δ로 결선했다.

철심은 재질은 0.23mm 두께의 방향성 규소강판을 적층하여 사용하였으며, 단면적은  $80 \times 80 \text{mm}^2$ , 철손은 0.98W/kg이다. 철심의 무게는 155kg이며, 전체 변압기 무게의 57%를 차지한다.

저온용기의 자장에 의한 와전류발생을 줄이기 위하여 GFRP로 만들어졌다. 저온용기의 안쪽과 바깥쪽의 지름은 각각 180mm, 380mm이며, 높이는 470mm, 무게는 33kg이다.

표 2는 3상 10kVA 고온초전도변압기의 특성을 보여 주며, 그림 1은 고온초전도변압기의 전체 단면도를 보여 준다. 전체 전류 도입선은 한 상에 4개씩 나오며 전체 12개로 구성되어져 있다.

표 2. 고온초전도변압기의 사양

Table 2. Specifications of the 10kVA Transformer

정격	전압	440/220V
	전류	13.1/26.A
	용량	10kVA, 3상
권선	턴 수	112/98
	V/T	2.27V
	결선	Y-Δ
철심	무게	155kg
	철심 단면적	80×80mm <sup>2</sup>
	최대 자속밀도	1.8T
	손실	0.98W/kg
	재료	G10 FRP
저온용기	안쪽 지름	180mm
	바깥 지름	380mm
	높이	470mm
	LN <sub>2</sub> 용량	23 l
	무게	33kg

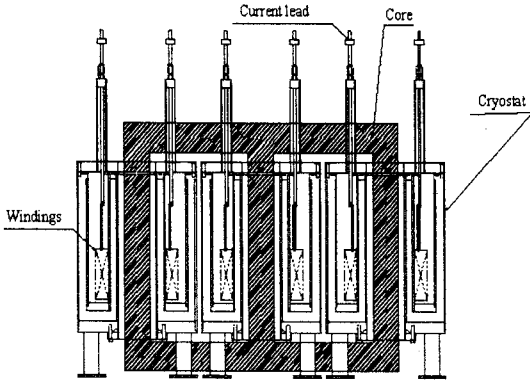


그림 1. 고온초전도변압기의 단면도  
Fig 1. Sectional diagram of the HTS transformer

제작된 3상 10kVA 초전도변압기는 그림2와 같은 회로를 구성하여 시험하였다. 변압기의 기본시험인 단락시험, 무부하시험, 부하시험, 과부하시험을 하였으며, 전압조정기를 사용하여 변압기의 고압측 정격인 440V를 인가하였다. 변압기의 부하는 순수저항부하만을 사용하였으며, 과부하 시험을 실시하여 고온초전도변압기의 안정성을 확인하여 보았다. 액체질소를 트랜스라인을 사용하여 액체질소용기에서 저온용기로 공급하였으며, 액체질소 자동 공급장치를 사용하여 전 부하상태에서 100시간 연속운전을 실시하였다.

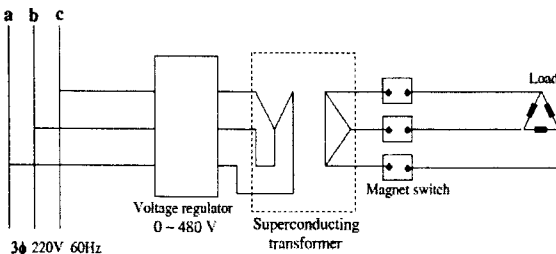


그림2. 고온초전도변압기 시험 회로도  
Fig 2. Circuit of the HTS transformer test

### 3. 실험 결과

그림 5는 무부하시험시 1차측전류와 단락시험시 시험 자화 임피던스에 대한 결과이다. 무부하시험 시 고압측 전압을 정격전압의 10%에서부터 100%까지 증가시키며 고압측 전류와 전력, 역률을 측정하였다. 정격전압을 440V까지 증가 시 정격전류의 7%인 0.956A의 전류가 흘렀으며, 무부하 손실은 250W이고, 역률은 0.369 이때의 자화리액턴스는 467Ω이다.

단락시험 시 고압측은 여자 시키고 저압측은 단락시켜 저압측이 정격 전류가 흐를 때까지 단락 시험을 하였다. 1차측 전압이 23V에서 저압측에 정격전류가 흘렀으며, 이때 내부 퍼센트 임피던스가 5.2%이었다.

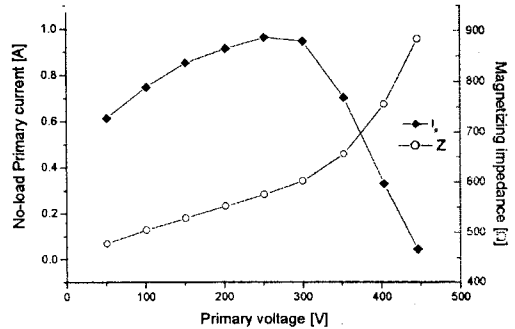


그림5 무부하시험 단락시험 결과  
Fig 5. Results of no load test and short test

부하시험은 10kW 저항부하모듈을 사용하여 저항부하를 1kW씩 변화시키어 가며 부하시험을 실시하였다. 전부하시 2차측전압이 223V에서 210V로 변화하므로 이 시스템의 전압변동율은 5.83%이다. 그중 가변 전원에 발생하는 전압 변동율이 3.63%를 차지하고 고온초전도 변압기에서의 전압 변동율은 2.2%이다.

그림 6은 무부하 상태에서 정격 부하10kW를 갑자기 투입한 경우의 저압측 전압과 고압측 전류에 대한 파형이다.

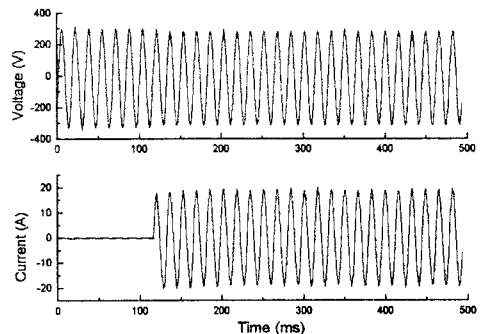


그림 6. 전부하 투입 시험 위 : 저압측 전압, 아래 : 고압측 전류  
Fig 6. Full load switching, upper : secondary voltage, lower : primary current

변압기에 전원이 투입 될 때에 변압기의 철심에 존재하는 잔류 자기에 의해서 큰 돌입 전류가 발생 할 수 있고 돌입 전류의 크기는 인가되는 전원의 위상에 따라 결정된다. 그림 7은 무부하 상태에서 정격전압이 인가 시

의 고압측 전류 파형으로서 최대치가 43.9A로 정격전류의 2배정도 되는 것을 볼 수 있다. 정격전류의 2배에 해당하는 전류가 갑자기 흘러도 변압기에 손상이 발생하지 않고 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다.

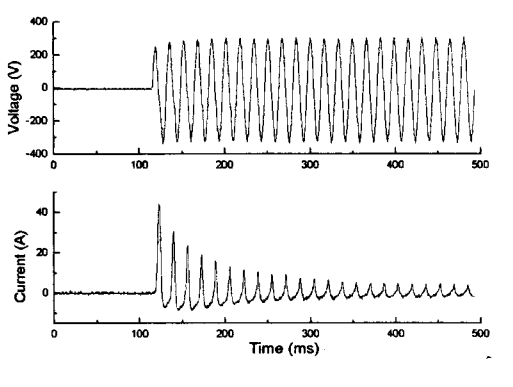


그림 7. 돌입전류 시험 위 : 저압측 전압, 아래 : 고압측 전류

Fig 7. Inrush current during the switching of the transformer, upper : secondary voltage, lower : primary current

고온초전도 변압기의 장점 중 하나는 과부하 특성이 다. 과부하 특성실험은 변압기의 정격 부하 10kW에서 운전 중 10kW 부하를 더 인가하여 전체 20kW의 부하를 인가해 보았다. 이때, 고온초전도 선재에서의 온도 변화를 측정하기 위하여 열전대를 부착하였으며, 고온초전도 선재에서의 온도 변화가 없었다.

그림 8은 과부하 시험 결과로 저압측 전압과 전류의 파형이다. 고압측 전류는 25.8A에서 46.6A로 변화하였다.

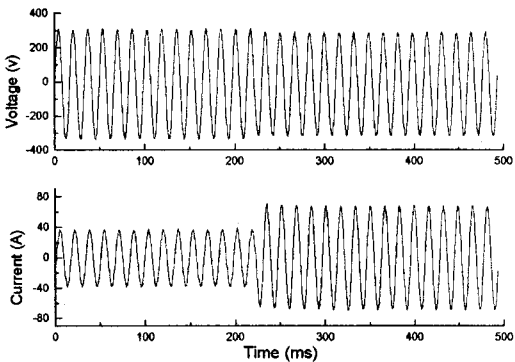


그림 8. 과부하 시험 위 : 저압측 전압, 아래 : 저압측 전류

Fig 8. over-load operation, upper : secondary voltage, lower : secondary current

마지막으로 초전도변압기의 2차측을 단락시키고 전압조정기를 사용하여 정격전류의 3배에 해당하는 전류를 흘렸다. 그림 9에서 볼 수 있는 파와 같이 정격전류의 3배에 해당하는 78A의 전류가 흘러도 초전도변압기는 무리 없이 동작하는 것을 확인하였다.

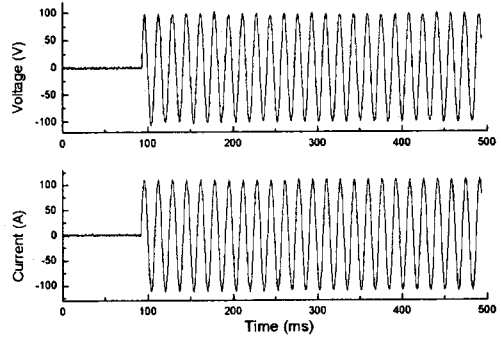


그림 9. 3배의 과전류 통전 시험 위 : 고압측 전압, 아래 : 저압측 전류

Fig 9. Over current of three times of the rated current, upper : primary voltage, lower : secondary current

#### 4. 결 론

10kVA 고온초전도변압기를 제작하고 실험하였다. 전력시스템내의 용량이 큰 변압기의 대부분이 3상 변압기를 사용하므로 3상으로 변압기를 제작하였으며, 권선은 더블팬케이크형으로 권선 하였다.

무부하 시험, 단락시험 부하시험과 같은 기본시험 후에 전부하 상태에서 100시간 연속운전 시험을 하였다.

최종적으로 과부하특성을 관찰하였다. 정격부하전류의 3배의 전류를 고온초전도변압기의 선재에 흘렸으나 권선에서의 온도변화는 없었다. 이 실험의 결과로 고온초전도 변압기는 과부하가 인가되어도 정상적으로 동작하는 것을 확인했다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] S.P.Metha, N.Aversa and M.S.Walker, "Transforming Transformers," IEEE Spectrum, 43-49, July 1997
- [2] S.W.Schwenterly, et al., "Performance of a 1-MVA HTS Demonstration Transformer," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.680-684, June, 1999
- [3] K.Funaki, et al., "Development of a 22kV/6.9kV Single-Phase Model for a 3MVA HTS Power Transformer," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.1578-1581, March, 2001
- [4] M.Polak, et al., "Comparison of Solenoidal and Pancake Model Windings for a Superconducting Transformer," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.1478-1481, March 2001