

고온초전도변압기 특성시험

이희준*, 차귀수*, 김우석**, 한송엽**, 류경우***, 최경달*
 순천향대학교*, 서울대**, 전남대***, 한국산업대*

Test of a High Temperature Superconducting Power Transformer

H.J. Lee*, G.S. Cha*, W.S. Kim**, S.Y. Hahn**, K.W. Ryu***, K.D. Choi*
 Soonchunhyang Univ.*, Seoul National Univ.**, Chonnam National Univ.***, Korea Polytechnic Univ.*

Abstract - This paper describes the test results of the single phase 3kVA high temperature superconducting power transformer. The tapes are made with Bi-2223 and have silver alloy as the matrix. Four double pancake windings are used in total. Among them two double pancake windings are connected in series for high voltage winding and two double pancake windings are connected in parallel for low voltage winding. The rated voltages of each winding are 220/110 V. Fundamental characteristics are obtained through short circuit and no load tests. The over load capability and characteristics are investigated.

표1은 고온초전도선재에 대한 사양이다. 필라멘트 영역이 전 영역에서 차지하는 면적은 51.7%이다. 고온초전도테이프의 모재는 은합금으로 제작되었고 임계전류는 40.0A로서 이를 전류밀도로 나타내면 J_c 는 8.74×10^3 [A/cm²]이다.

권선은 더블팬케이크형태로 권선하였는데 각각 30턴씩 원형으로 권선하여 모두 60턴을 권선하였다. 권선된 내측 반지름이 62.5mm이며 한 개의 더블팬케이크 권선시 사용한 선재의 길이는 30.2m이다.

표 2 고온초전도선재 사양

재질	BSCCO-2223
모재	은합금
테이프 폭	3.54mm
테이프 두께	0.25mm
필라멘트 영역 폭	2.615mm
필라멘트 영역 두께	0.175mm
트위스트	NO
필라멘트수	37
임계전류	40A(1 μ V/cm criterion)

1. 서 론

초전도를 이용한 전력 시스템 기기중에서 고온초전도 변압기는 매우 중요한 기기중의 하나로서 실용화 가능성이 많은 전력기기이다.

초전도변압기가 갖는 장점으로는 효율이 높고, 무계 및 부피가 감소하며, 절연유를 사용하지 않으므로서 안전하고 환경친화적이며, 과부하내력이 증가하는 것 등이다. 저온초전도변압기에 비해 고온초전도 변압기는 저온 용기의 구성이 간단하고 과부하에 대해 상대적으로 안정적이며, 냉매가 매우 경제적이다.[1][2]

본 연구에서는 고온초전도변압기에서 권선시 더블팬케이크 형상을 채택하여 더블팬케이크로 권선하였고, 권선된 더블팬케이크권선에 대해 특성을 시험하였다. 권선에 사용한 선재는 Bi-2223테이프이고 변압기 철심과 함께 액체 질소로 냉각시켰었다. 고온초전도변압기의 1차와 2차의 정격전압은 각각 220V와 110V이고 권선된 턴수는 120턴과 60턴이다. 4개의 더블팬케이크를 제작하여 변압기 철심의 같은 축에 위치시켰었다. 제작된 더블팬케이크는 같은 치수와 같은 턴수로 권선하였다. 철심의 같은 축에 위치한 4개의 더블팬케이크에서 안쪽 두 개의 더블팬케이크는 직렬로 연결하고, 바깥쪽 두 개의 더블팬케이크는 병렬로 연결하였다.

개방회로시험과 단락시험을 하여 변압기의 등가회로 상수를 구하였다. 단락회로시험에서 전류를 임계전류상태까지 흘려 발생하는 여러 현상에 대해 알아보았다.

2. 변압기 설계

그림 1은 Bi-2223 고온초전도 선재의 횡단면과 종단면도이다.

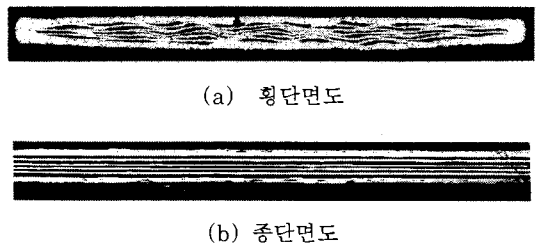


그림 1. 고온초전도선재의 종단면도

그림 2는 권선된 더블팬케이크에 대해 임계전류를 1 μ V/cm을 기준을 적용해서 측정한 결과인데 각각 22, 23, 23, 26A이었다. 1차 정격전류는 13.7A이므로 약 40%여유를 두었는데 그 이유는 임계전류이상에서는 저항성분이 발생하기 때문이다.

고온초전도 변압기의 V/T는 식(1)에 의해 결정할

수 있다. 여기에서 R 은 단상인 경우 0.7이고, P 는 변압기의 용량을 나타낸 것이며, f 는 주파수, Q 는 단상일 경우 1이다. 계산된 V/T 는 1.8이다.

$$V/T = R \times \left[\frac{P}{(\%IZ/5)^{1/2}} \right]^{1/2} \times \left(\frac{f}{60} \right)^{0.376} \times Q \quad (1)$$

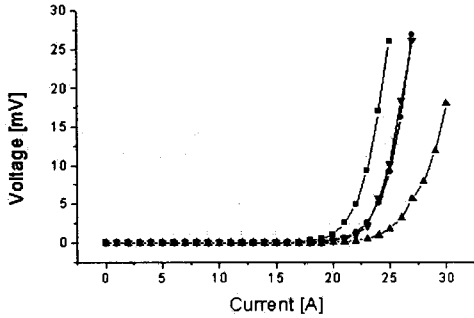


그림 2. 각 변압기 권선에 대한 임계전류 측정
표 2는 제작된 고온초전도변압기의 사양이다.

표 2 고온초전도변압기 사양

정 격	전압	220/110 V
	전류	13.7/27.3 A
	용량	3kVA
권 선	턴수	60/120
	길이	120.8m
	V/T	1.8
철 심	무게	34.6kg
	창 치수	60×133 mm ²
	철심 단면적	85×86 mm ²
	최대 자속밀도	1.92T

4개의 더블팬케이크권선은 같은 치수로 제작되었는데, 누설리액턴스와 자화리액턴스는 권선의 위치에 따라 차이가 있다. 권선배치는 유한요소방법을 사용하여 최적형상을 찾아 저압-고압-고압-저압으로 배치하였다. 고압측에 2개, 저압측에 2개 총 4개의 더블팬케이크 권선을 사용하는데 고압측에 사용된 더블팬케이크 두개는 직렬로 연결하고 저압측에 사용된 더블팬케이크 두개는 병렬로 권선하였다.[3]

그림 3은 제작한 단상 3kVA 고온초전도변압기이다. 극저온 용기는 FRP를 사용하여 누설자속에 의해 용기의 내벽에 와전류가 발생하는 것을 방지하도록 하였다. 또한 변압기의 지지 및 고정에 사용된 구조재도 가능한 FRP로 제작된 것을 사용해서 와전류손을 줄이도록 하였다.

3. 손실

최대 자속밀도는 식(2)을 이용해서 계산할 수 있는

데 철심의 점적을 sf 가 0.95에서 최대 자속밀도는 0.93T이다. 제작한 고온초전도변압기 철심은 34.6kg이며 손실곡선을 사용하여 철손을 구하면 16.6W이다.

$$B_m = \frac{V/T \times 10^6}{4.44 \times f \times A_c \times sf} \quad (2)$$

여기서 A_c 는 철심의 단면적이다.



그림 3. 단상 3kVA 고온초전도변압기

고온초전도테이프에 시변자계가 인가 될 때에 발생하는 자화손실은 초전도테이프 영역에 가해지는 자속밀도 B_m 의 평균치를 0.01T로 잡으면 전체 손실은 0.214W이다. 고온초전도선재에서 통전전류에 의해서 발생하는 자기자계손실은 0.114W이다. 자화손실이 자기자계 손실보다 큰 것을 알 수 있다. 이 결과로 볼 때에 기화된 가스를 다시 액체로 만드는 데에 소용되는 전력의 비율인 COP를 25로 잡으면 교류손실은 8.21W가 되어 초전도변압기에서 발생하는 손실은 철손이 약 2배가 되는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 극저온용기에서 발생하는 손실은 고려하지 않았다.

4. 변압기 시험

무부하 시험시 1차 전압을 10%에서 100%까지 증가시키며 1차 전류와, 역률을 측정하였다. 그림 4는 무부하 시험 결과를 나타낸 것이다. 1차측 전압이 증가하면 여자전류와 자화리액턴스가 증가하는 것을 알 수 있다. 1차측 전압이 214V일 때 여자전류는 1.5A이므로 이로부터 자화리액턴스를 구하면 143Ω이다.

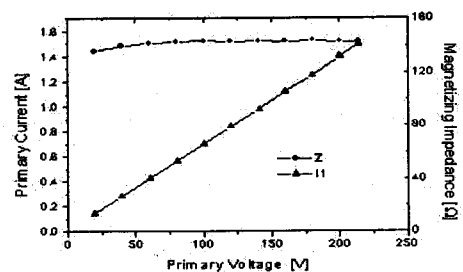


그림 4. 무부하시험시 1차전압 변화에 따른 1차전류 및 자화임피던스

단락시험시 변압기의 2차 정격전류까지 단락 전류를 증가시키었다. 그림 5는 단락회로시험 결과로서 1차 전압 변화에 따른 단락 전류의 변화와 내부 임피던스의 변화를 나타낸 것이다. 내부임피던스는 정격전류에서 1Ω으로, 0.069pu이다. 단락회로에서 1차 전압을 증가시키어 켄치를 발생시키어 보았다.

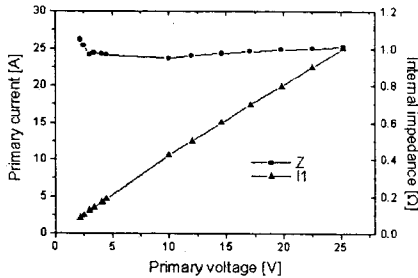


그림 5. 단락회로시험시 1차전압대 1차전류 및 내부임피던스

그림 6은 단락회로 시험시 1차 전류를 임계전류까지 증가시킨 것이다. 전압의 역률은 감소되고 1차의 전류는 증가하였다. 그러나 1차 전류가 임계전류까지 증가하면 역률이 다시 증가하는데 그 이유는 고온초전도 선재에서 저항이 발생되기 때문이다.

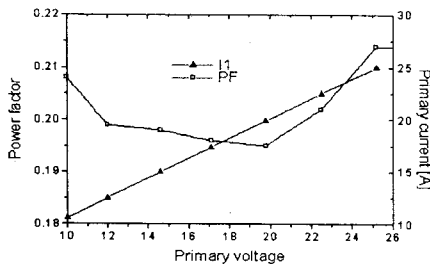


그림 6. 단락회로시험시 1차전압대 1차전류와 역률

그림 7은 부하를 일정비율로 증가시키어 부하전류를 증가시키면서 2차 전압과 역률의 변화를 나타낸 것이다. 부하가 증가되면 2차 전압은 감소되고 역률은 증가하였다. 제작된 고온초전도변압기의 전압 변동율은 2.61%이다.

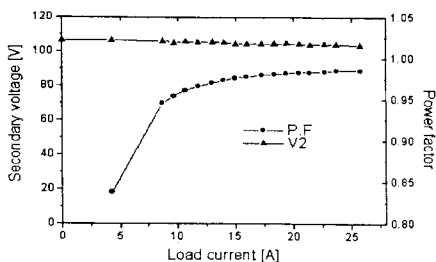


그림 7. 부하전류 증가에 따른 2차전압과 역률

그림 8은 전원 투입시 돌입전류에 대한 여러 시험

파형 중의 하나이다. 고온초전도 선재는 저온초전도체에 비해 임계온도가 높아서 실제 사용되는 동작 온도도 매우 높고, 초전도 자체의 비열과 열 전도도 역시 매우 커서 켄치가 발생되기 위한 최소 교란에너지도 매우 크므로 안정성 측면에서 유리하여 돌입전류에 대해서는 큰 문제가 되지 않았다.

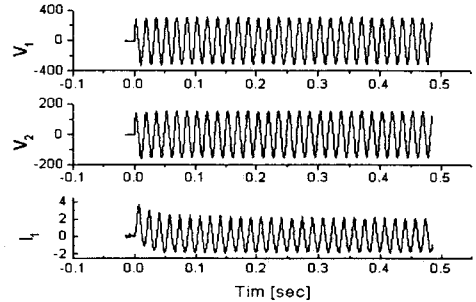


그림 8. 전원 투입시 1차·2차전압과 1차전류

5. 결론

고온초전도변압기를 개발하고 여러 경우에 대해 시험을 하였다. 4개의 더블팬케이크를 만들었으며 Bi-2223 선재를 사용하여 권선하였다.

고압측에 2개, 저압측에 2개 총 4개의 더블팬케이크 권선을 사용하였는데 고압측 2개는 직렬로 연결하고 저압측에 사용된 2개는 병렬로 권선하였다. 병렬권선시 순환전류가 발생하지 않게 동수의 턴수로 권선하여 임피던스가 같게 하였다.

철손과 초전도테이프에서 발생하는 손실을 비교해본 결과 철손이 초전도테이프에서 발생하는 손실 보다 많았다.

고온초전도변압기에 과부하를 긴 시간에 거쳐 인가하였을 경우, 같은 조건에서의 저온초전도변압기에 비해 거의 손상이 없었으며, 전원 투입시 돌입전류의 영향이 큰 문제가 되지 않음을 알 수 있었다.

[참고문헌]

- [1] Sam P. Mehta, Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming transformers," IEEE Spectrum, Vol.34, No.7, pp. 43-49, July 1997
- [2] S.W.Schwenrerly, et al., "Performance of a 1-MVA Demonstration Transformer," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.680-684, 1999
- [3] G.S.Cha, et al., "Performance Evaluation of a HTS Transformer by using Finite Element Method," Magnet Technology 16, USA, 1999

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었습니다.