

3상 10kVA 더블 팬케익 코일형 고온초전도 변압기 특성시험 결과

論 文
52B-3-2

Test Results of a Three Phase 10kVA HTS Transformer With Double Pan Cake Coils

李昇昱* · 李喜俊** · 車貴守** · 李志光*** · 崔景達[§] · 柳昊佑^{§§} · 韓松曄^{§§§}
(S.W. Lee · H.J. Lee · G.S. Cha · J.K. Lee · K.D. Choi · K.W. Ryu · S.Y. Hahn)

Abstract - The high temperature superconductor transformers gain interests from the industries. This paper described construction and test results of 10kVA HTS transformer. Three phase transformer with double pancake windings were constructed. To reduce the leakage magnetic field, secondary coil were placed between the two primary coils. BSCCO-2223 wire, silicon sheet steel core and FRP cryostats were used to construct the transformer. Three coils were stacked in one cryostat. Two double pancake coils were connected in series for the primary coil and one double pancake coil was used for the secondary coil. Total number of turns of the primary winding and the secondary winding were 112turns and 98turns, respectively. The rated voltages of each winding were 440/220V. The rated currents of each winding were 13.1/26.2A. After the tests of basic properties of the three 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 results proved over-load capability and reliability of the HTS transformer.

Key Words : HTS transformer, double pancake winding, Continuous operation, liquid nitrogen auto filling.

1. 서 론

고온초전도선재의 성능 향상으로 고온초전도선재를 이용한 변압기, 전동기, 전류제한기, 송전케이블 등의 기기 등이 개발되고 있으며, 장선화가 용이한 BSCCO계열의 선재가 주로 사용되고 있다. 이 중에서 고온초전도변압기가 갖는 장점으로 는 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 부피를 각각 1/2, 2/3으로 줄일 수 있다[1][2].

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

본 논문에서는 3상 10kVA 고온초전도변압기를 제작하고 시험한 결과를 기술하였다. 설계 시 권선부의 자화손실에 대해 수평 자계와 수직자계에 대한 영향을 고려하여 설계하였다. 다수의 병렬도체에 전류가 균등하게 흐르기 위해 솔레노이드 권선 방법 대신 더블팬케이크 권선 방법을 선택하여 설계하였다[4][5].

이드 권선 방법 대신 더블팬케이크 권선 방법을 선택하여 설계하였다[4][5].

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

2. 고온초전도 선재 사양 및 특성

고온초전도변압기의 운전특성을 시험하기 위하여 3상 10kVA 고온초전도변압기를 설계하였다. 변압기의 고압측 권선과 저압측 권선의 정격 전압은 각각 440/220V이고, 고압측 권선과 저압측 권선에 흐르는 전류는 각각 13.1/26.2A이다. 변압기의 권선은 장선화가 용이한 BSCCO-2223선재를 사용하였다.

더블 팬케이크 형태로 제작된 초전도 변압기의 권선부에 전류를 흘리면 자계가 발생하며 이 자계는 권선부를 구성하는 각각의 초전도테이프에 대해서 마치 외부에서 인가되는 자계처럼 생각할 수 있다. 또한, 이 자계들은 권선된 테이프 선재의 위치에 따라 각각 가해지는 방향이 다르게 된다. 테이프 형상의 고온 초전도 선재에 가해지는 외부자계의 크기 및 방향에 따라 선재의 임계전류가 크게 영향을 받게 되고 이는 초전도 변압기의 고압측 권선과 저압측 권선에 흘릴 수 있는 전류 용량과 관계되므로 인가 자계에 의한 임계전류 감소 영향을 살펴보았다.

* 正 會 員 : 順天鄉大學 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 順天鄉大學 電氣工學科 教授 · 工博
*** 正 會 員 : 又石大學 電氣工學科 助教授 · 工博
§ 正 會 員 : 韓國産業技術大 電氣電子工學科 教授 · 工博
§§ 正 會 員 : 全南大 電氣工學科 教授 · 工博
§§§ 正 會 員 : 서울大學 電氣工學部 教授 · 工博
接受日字 : 2002年 4月 2日
最終完了 : 2003年 1月 8日

표 1은 고압측과 저압측권선에 사용된 초전도선재의 사양이다. 두 가지 종류의 고온초전도 선재를 사용하여 변압기의 권선을 제작했다. 고압측에 사용된 선재의 임계전류는 77K에서 73A이며, 선재의 단면적은 $2.9 \times 0.164 \text{mm}^2$ 이고 저압측에 사용된 선재의 임계전류와 단면적은 각각 77K에서 100A, $4.1 \times 0.203 \text{mm}^2$ 이다. 고압측과 저압측권선에 사용된 선재의 은비는 각각 0.31과 0.33이다.

외부 자계 인가용 마그네트의 공극 중앙부분에 10cm 고온초전도 테이프 시편을 위치시키고 외부 자계를 테이프 선재의 넓은 면에 수평 ($\theta = 0^\circ$) 으로부터 수직 ($\theta = 90^\circ$) 까지 15° 각도의 간격으로 외부자장을 인가시키면서 임계전류를 측정하였다. 그림 1과 그림 2는 고온초전도 변압기의 고압측 권선과 저압측 권선에 사용된 초전도 테이프에 외부자장을 각도에 따라 인가하였을 때 임계전류의 변화를 측정한 결과이다.

두 결과로부터 공통적으로 $\theta = 0^\circ \sim 45^\circ$ 에서 임계전류가 급격히 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 $\theta = 0^\circ \sim 15^\circ$ 에서 임계전류의 감소가 가장 심하다는 것을 알 수 있다. 즉, 테이프 넓은 면에 수직인 방향성분의 자계가 조금만 증가된다 할지라도 이는 임계전류를 감소시키는 큰 요인으로 작용한다는 것을 의미하므로 변압기 권선 시 초전도 테이프에 가해지는 자장의 수직성분을 최소화시킬 수 있도록 제작되어야 한다.

표 1 고온초전도변압기에 사용된 초전도선재의 사양

Table 1 Specifications of HTS Wires

| | 고압측 | 저압측 |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|
| 초전도체 | BSCCO-2223 | BSCCO-2223 |
| 필라멘트 수 | 55 | 61 |
| 트위스트 | No | No |
| 면적 | $2.9 \times 0.164 \text{mm}^2$ | $4.1 \times 0.203 \text{mm}^2$ |
| 임계전류 | 73A, 77K | 100A, 77K |
| 모 재 | Ag | Ag alloy |
| 은 비 | 0.31 | 0.33 |

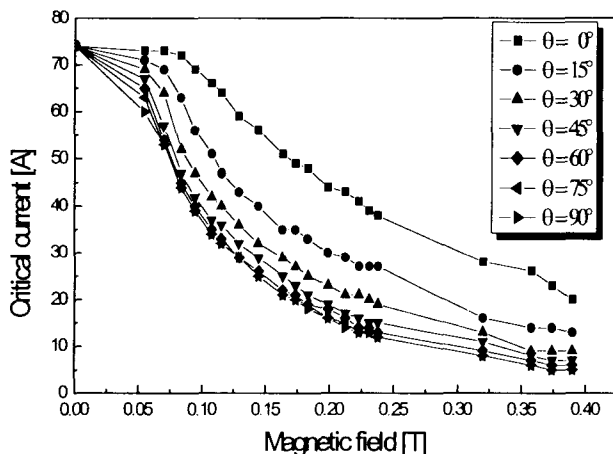


그림 1 고압측 권선에 사용된 테이프 선재의 B-Ic 측정결과
Fig. 1 Critical current of the HTS wire used for the primary winding.

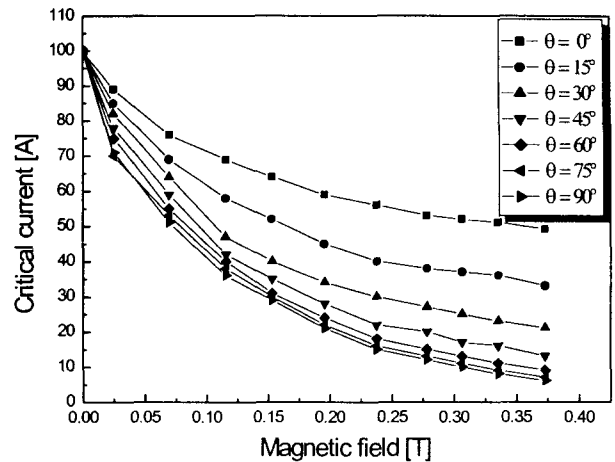


그림 2 저압측 권선에 사용된 테이프 선재의 B-Ic 측정결과
Fig. 2 Critical current of the HTS wire used for the secondary winding.

두 결과로부터 공통적으로 $\theta = 0^\circ \sim 45^\circ$ 에서 임계전류가 급격히 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 $\theta = 0^\circ \sim 15^\circ$ 에서 임계전류의 감소가 가장 심하다는 것을 알 수 있다. 즉, 테이프 넓은 면에 수직인 방향성분의 자계가 조금만 증가된다 할지라도 이는 임계전류를 감소시키는 큰 요인으로 작용한다는 것을 의미하므로 변압기 권선 시 초전도 테이프에 가해지는 자장의 수직성분을 최소화시킬 수 있도록 제작되어야 한다.

3. 고온초전도 변압기 사양

고온초전도 변압기의 고압측과 저압측의 권선수는 한 상에 3개의 더블팬케이크형 권선을 쌓고 고압측은 56턴으로 감은 2개의 더블팬케이크형 권선을 직렬로 연결하고, 저압측은 98턴으로 감은 1개의 더블팬케이크 형태로 제작하였다. 고압측과 저압측 상당 전체 권선수는 고압측 112턴과 저압측 98턴이다. 이때 권선된 선재의 길이는 고압측이 75m이고, 저압측은 34m이다. 변압기는 내철형으로 되어있으며, 고압측과 저압측의 권선은 Y- Δ 로 결선했다.

표 2는 제작된 더블팬케이크의 사양이다. 고온초전도 변압기 권선에 사용된 선재의 길이는 고압측에 225m, 저압측에 204m가 사용되어 총 선재의 길이는 429m이다.

보빈에 권선한 권선의 상온에서의 평균 저항은 2.5 Ω 이고, 권선의 인덕턴스는 0.35mH이었다. 그림 2는 보빈에 권선된 고온초전도 선재의 임계전류를 측정한 결과로 고압측 각 더

표 2 권선된 더블팬케이크 사양

Table 2 Specifications of the double pancake windings

| | 고압측 | 저압측 |
|-----------|-----------|----------|
| 권선 턴 수 | 112 Turns | 98 Turns |
| 선재의 길이 | 75 m | 34 m |
| 더블 팬케이크 수 | 3 개 | 6 개 |
| 상당 길이 | 75m | 68m |
| 전체 길이 | 225 m | 204 m |

플랜케익의 임계전류는 41A, 41A, 42A, 42A, 43A, 44A이고, 저압측 더블플랜케익의 임계전류는 60A, 63A, 63A로서 큰 차이는 없었다.

더블플랜케익 권선의 배치는 유한요소방법을 사용하여 변압기 권선 시 초전도 테이프에 가해지는 자장의 수직성분을 최소화시킬 수 있는 고압-저압-고압 순으로 배치한다.

고온초전도 변압기 구조는 내철형이고 철심으로는 방향성 규소강판을 사용하여 손실을 최소화하였다. 사용된 철심은 23ZH100인 저 손실 방향성 규소강판으로서 두께는 0.23mm이다. 표 3은 고온초전도 변압기에 사용된 23ZH100 철심의 특성으로 손실은 0.98W/kg이다.

표 4는 제작된 3상 10kVA 고온초전도변압기의 사양을 보여주며, 철심 창의 가로와 세로의 길이는 315mm, 520mm이고 적철심 형태로 제작하여 철심을 겹치게 쌓아 제작한다.

제작된 철심의 크기는 680×870×80 mm³ 이고 중량은 155kg이다. 각 철심의 다리에 보빈과 단자가 연결된 더블플

표 3 23ZH100 철심의 특성

Table 3 Specifications of the 23ZH100 core

| | |
|----------|--------------------------------|
| 두께 | 0.23 mm |
| 고유 저항 | 50 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ |
| 밀도 | 7.65 g/cm ³ |
| 철손 | 0.98 W/kg |
| 최대 자속 밀도 | 1.8 T |
| 점적율 | 94.5 % |

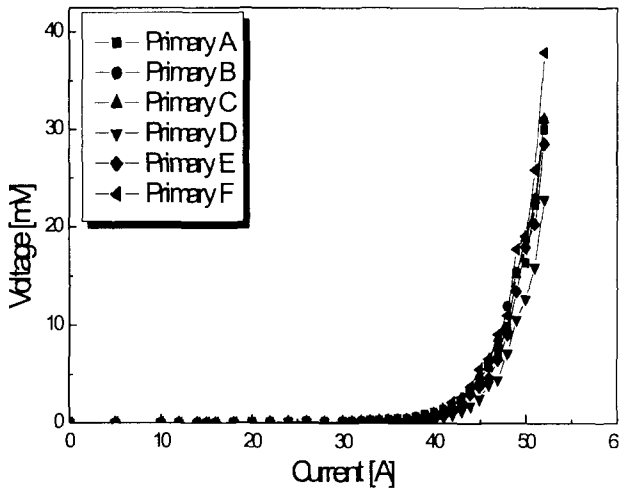
케이크 3개씩을 삽입한다. 액체질소를 저장할 저온용기는 자장에 의한 와전류발생을 줄이기 위하여 GFRP로 제작 하였으며, 중앙에 철심이 위치 할 수 있도록 중공형으로 만들었다. 저온용기의 안쪽과 바깥쪽의 지름은 각각 180mm, 380mm이며, 높이는 470mm, 무게는 33kg이다.

그림 3은 3상 10kVA 고온초전도변압기의 전체 단면도이다. 전체 전류 도입선은 한 상에 4개씩 나오며 전체 12개로 구성되었다.

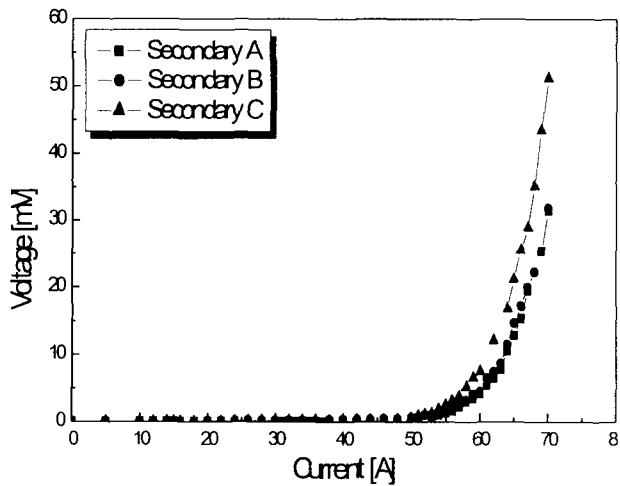
표 4 고온초전도변압기의 사양

Table 4 Specifications of the 10kAV transformer

| | | |
|------|---------|----------------------|
| 정격 | 전압 | 440/220V |
| | 전류 | 13.1/26.2V |
| | 용량 | 10kVA, 3상 |
| 권선 | 턴 수 | 112/98 |
| | V/T | 2.27 |
| | 결선 | Y- Δ |
| 철심 | 무게 | 155kg |
| | 철심 단면적 | 80×80mm ² |
| | 최대 자속밀도 | 1.8T |
| | 손실 | 0.98W/kg |
| 저온용기 | 재료 | G10 FRP |
| | 안쪽 지름 | 180mm |
| | 바깥 지름 | 380mm |
| | 높이 | 470mm |
| | LN2 용량 | 23 l |
| | 무게 | 33kg |



(a) 고압측 고온초전도 권선의 임계전류
(a) The critical current of the primary windings



(b) 저압측 고온초전도 권선의 임계전류
(b) The critical current of the secondary windings

그림 2 보빈에 권선된 권선의 임계전류
Fig. 2 The critical of the transformer windings

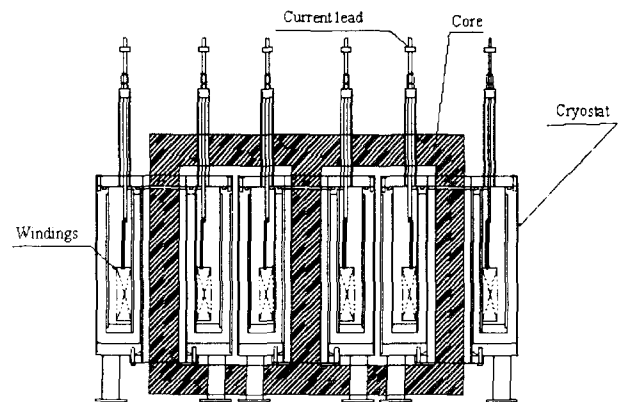


그림 3 고온초전도변압기의 단면도
Fig. 3 Sectional diagram of the HTS transformer

4. 실험 결과

제작된 3상 10kVA 초전도변압기는 그림 4와 같은 회로를 구성하여 시험하였다. 변압기의 기본시험인 단락시험, 무부하 시험, 부하시험과 과부하시험을 실시하여 고온초전도 변압기의 안정성을 확인하였다.

인가 전압은 전압조정기를 사용하여 고온초전도 변압기의 고압측 정격인 440V를 인가하였다. 변압기의 부하는 순수저항부하만을 사용하였다. 액체질소 자동 공급장치를 사용하여 100시간 연속운전을 실시하였다.

그림 5는 저항부하 10kW인가 시의 고온초전도 변압기의 고압측 3상 전압, 전류 및 저압측 3상 전압, 전류 파형이다. 2차측은 저항부하를 사용하였기 때문에 전압, 전류의 위상이 동상임을 알 수 있다.

그림 6은 무부하시험과 단락시험에 대한 결과이다. 무부하 시험 시 고압측 전압을 정격전압의 10%에서부터 100%까지 증가시키며 고압측 전류를 측정하였다. 정격전압을 440V까지 증가 시 정격전류의 7%인 0.96A의 전류가 흘렀으며, 무부하 손실은 250W이고, 역률은 0.37 이 때의 자화리액턴스는 467Ω 이다.

단락시험 시 저압측을 단락 시키고 고압측에 정격 전류의 3배가 흐를 때까지 고압측 전압을 증가시켜 시험을 하였다. 1차측 전압이 23V에서 고압측에 정격전류가 흘렀으며, 이때 내부 퍼센트 임피던스가 5.2%이었다.

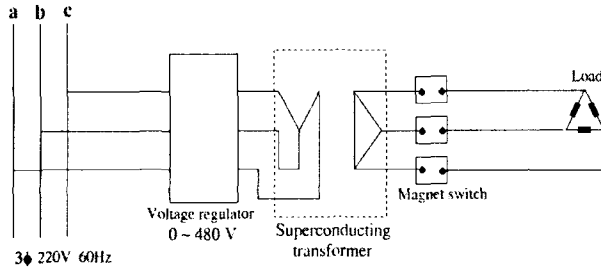


그림 4 고온초전도변압기 시험 회로도
Fig. 4 Circuit of the HTS transformer test

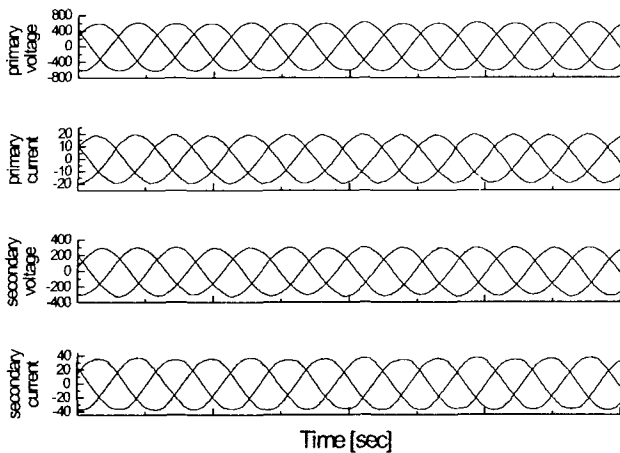
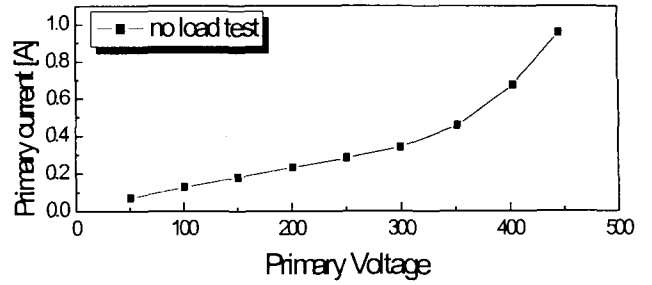
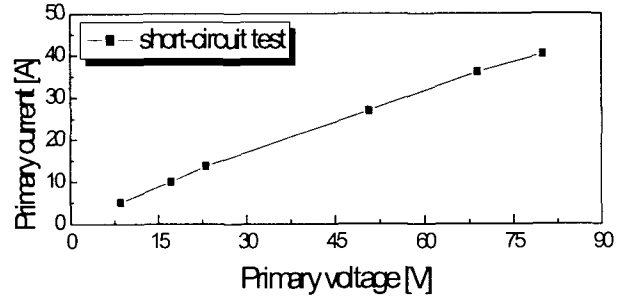


그림 5 정격 부하인가 시 전압과 전류
Fig. 5 Voltage and current at full load test



(a) 무부하 시험 결과

(a) No-load test (primary)



(b) 단락시험 결과

(b) Short circuit test

그림 6 무부하시험과 단락시험 결과

Fig. 6 Results of no load test and short circuit test

부하시험은 10kW 저항부하모듈을 사용하여 저항부하를 1kW씩 변화시키어 가며 부하시험을 실시하였다. 전부하 투입 시 고온초전도 변압기에서의 전압 변동율은 2.2%이다.

그림 7는 무부하 상태에서 정격 부하10kW를 갑자기 투입 한 경우의 저압측 전압과 고압측 전류에 대한 파형이다.

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 8은 무부하 상태에서 정격전압이 인가 시의 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.

고온초전도 변압기의 장점 중 하나는 과부하 특성이다. 고온초전도 변압기는 과부하에 의한 수명감소가 없고, 전력시스템에 고장전류가 발생하면 고온초전도 권선에 저항이 발생하여 자체보호능력을 보유하고 있다. 과부하 특성실험은 변압기의 정격 부하 10kW에서 운전 중 10kW부하를 더 인가하여 전체 20kW의 부하를 인가하였다. 이때, 고온초전도 선재에서의 온도 변화를 측정하기 위하여 열전대를 부착하였으며, 고온초전도선재에서 온도 변화가 없었다.

그림 9는 과부하 시험 결과로 저압측 전압과 전류의 파형으로 고압측 전류는 25.8A에서 46.6A로 변화하였다.

마지막으로 초전도변압기의 2차측을 단락시키고 전압조정기를 사용하여 정격전류의 3배에 해당하는 전류를 흘렸다. 그림 10에서 볼 수 있는 바와 같이 정격전류의 3배에 해당하는 78A의 전류가 흘러도 초전도변압기는 무리 없이 동작하는 것을 확인하였다.

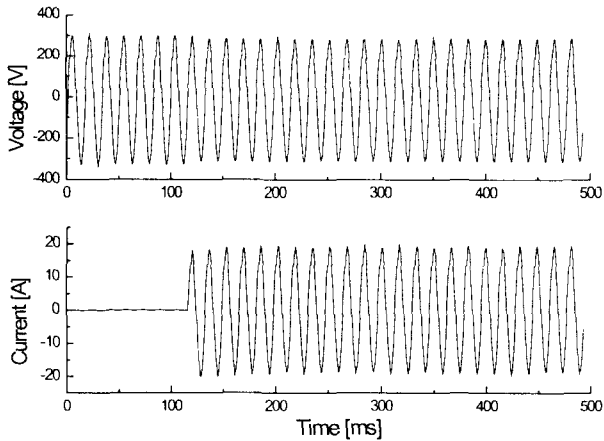


그림 7 전부하 투입 시험(저압측 전압과 고압측 전류)
 Fig. 7 Full load switching upper : secondary voltage, lower : primary current

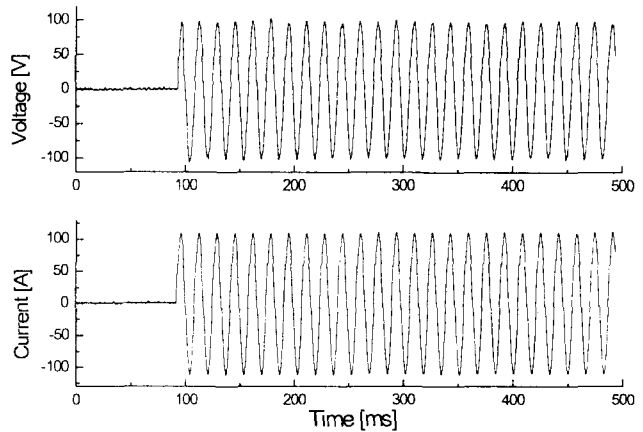


그림 10 3배의 과전류 통전 시험 (고압측 전압과 저압측 전류)
 Fig. 10 Over current of three times of the rated current upper : primary voltage, lower : secondary current

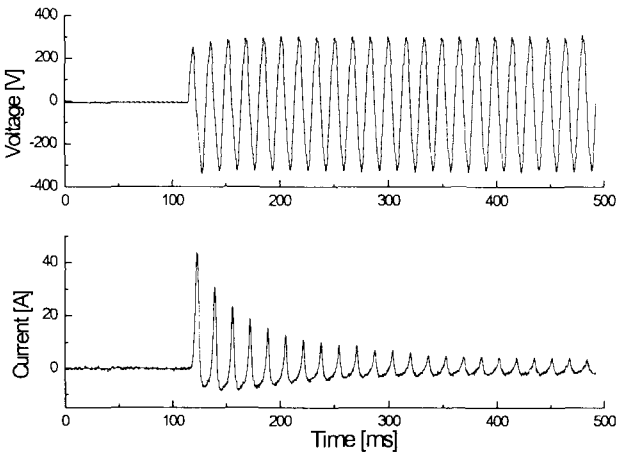


그림 8 돌입전류 시험 (저압측 전압과 고압측 전류)
 Fig. 8 Inrush current during the switching of the transformer upper : secondary voltage, lower : primary current

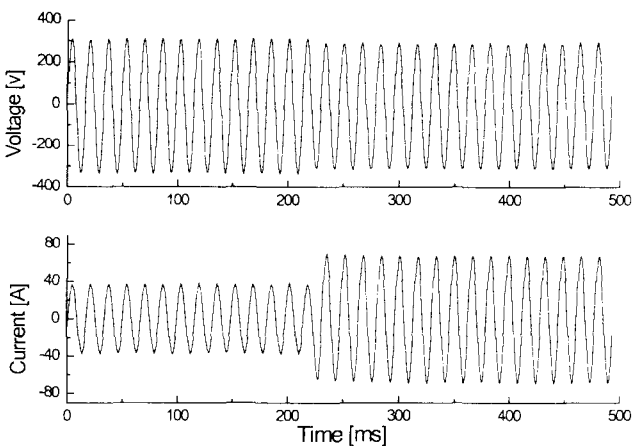


그림 9 과부하 시험 (저압측 전압과 전류)
 Fig. 9 Over-load operation upper : secondary voltage, lower : secondary current

표 5는 3상 10kVA 고온초전도변압기의 시험 결과를 정리한 것이다.

저항 부하를 인가한 상태에서 100시간 동안 연속 운전을 수행하였다. 연속운전을 수행한 이후에 권선의 임계전류를 측정된 결과 각 권선의 임계전류의 변화가 없었다. 연속운전을 수행하는 동안에는 액체질소 자동공급 장치를 사용하였으며 자동공급 장치는 대략 2시간마다 동작하였다.

그림 11은 3상 10kVA 고온초전도변압기의 100시간 연속운전을 수행하는 모습으로 액체질소를 자동으로 공급되고 있는 모습이다.

표 5 시험 결과
 Table 5 Summary of test result

| | | |
|-------|---------|---------|
| 무부하시험 | 여자전압 | 440 V |
| | 여자전류 | 0.956 A |
| | 무부하손 | 250 W |
| 단락시험 | 전압(1차측) | 23 V |
| | 전류(1차측) | 13.1 A |
| | %임피던스 | 10.7 % |
| 부하시험 | 최대 전력 | 10 kVA |
| | 전압(2차측) | 210 V |
| | 전류(1차측) | 12.8 A |

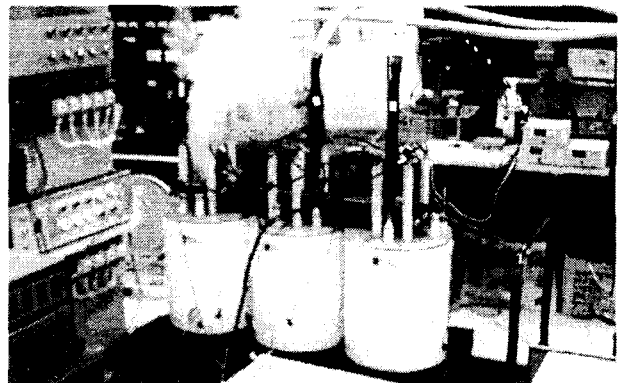


그림 11 고온초전도변압기의 연속운전
 Fig. 11 Continuous operation of the HTS transformer

5. 결 론

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

무부하 시험, 단락시험 부하시험과 같은 기본시험 후에 전 부하 상태에서 100시간 연속운전 시험을 하였으며, 최종적으로 과부하특성을 관찰하였다. 정격부하전류의 3배의 전류를 고온초전도변압기의 선재에 흘렸으나 권선에서의 온도변화는 없었다. 이 실험의 결과로 고온초전도 변압기는 정격부하에서는 물론이고 과부하 상태에서도 신뢰성 있게 동작하는 것을 확인했다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S.P.Metha, N.Aversa and M.S.Walker, "Transforming Transformers," IEEE Spectrum, Vol.34, No.7, pp.43-49, July, 1997.
- [2] S.W.Schwenterly, et al., "Performance of a 1-MVA HTS Demonstration Transformer," IEEE Trans. on AS, 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. on AS, Vol.11, No.1, pp.1578-1581, March, 2001.
- [4] J.K.Lee, et al., "Development of a Three Phase 100kVA Superconducting Power Transformer with Amorphous Core," IEEE Trans. on AS, Vol.9, No.2, pp.1293-1296, March, 1999.
- [5] 이희준 등, "더블팬케이크 권선형 10kVA 고온초전도 변압기," 대한전기학회논문지, 제 50권(B), 제 2호, pp. 65-71, 2001.

저 자 소 개



이 승 욱(李昇勳)

1973년 12월 23일생. 1999년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정



이 희 준(李喜俊)

1969년 5월 15일 생. 1994년 순천향대 공대 전기공학과 졸업 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사), 동 대학원 전기공학과 졸업(공박), 현재 순천향대학교 계약교수



차 귀 수(車貴守)

1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년 순천향대 조교수. 1991년 영국 Bath대학 방문교수 현재 순천향대 공대 전기공학과 교수



이 지 광(李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 우식대 전기공학과 조교수



최 경 달(崔景達)

1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 졸업(공학석사). 1993년 동 대학원 공학박사. 현 한국산업기술대학교 전기전자공학과 부교수



류 경 우(柳炘佑)

1962년 2월 10일 생. 1983년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1985년 서울대학교 전기공학과 대학원 졸업. 1995년 요코하마 대학원 전자정보공학과 졸업(공박). 현 전남대학교 전기공학과 교수



한 송 엽(韓松曄)

1939년 3월 14일생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1968년 서울대 전기공학과 전임강사. 1979년 프랑스 로렌공과대학 대학원 졸업(공박) 1995년 당 학회 회장. 1995년~1996년 서울대 공과대학 학장. 현재 서울대 공과대학 전기공학부 교수