

고온초전도변압기의 특성해석

이희준\*, 차귀수\*, 이응욱\*\*, 한송엽\*\*  
 순천향대학교\*, 서울대학교\*\*

The Characteristics Analysis of a HTS Transformer

Hee-Joon Lee\*, Guee-Soo Cha\*, Yong-Wook Lee\*\*, Song-Yop Hahn\*\*  
 Soonchunhyang University\*, Seoul National University\*\*

**Abstract** - This paper presents the design of a small scale High Tc superconducting power transformer. In the design of the transformer, BSCCO-2223 tape was considered as the conductor. Double pan cake winding was adopted in order to easy the construction of the winding and to lessen the leakage reactance of the transformer. Numerical calculation was used to decide the arrangement of the double pan cake winding. Estimation of the AC loss, magnetizing loss and self field loss, in the superconducting winding and the iron loss in the core were given.

를 전류밀도로 나타내면  $J_c$ 는  $4.52 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$  이다.

표 1 고온초전도 선재의 사양

| 재질     | BSCCO-2223 | 모재        | 은합금     |
|--------|------------|-----------|---------|
| 테이프폭   | 3.54mm     | 필라멘트 영역 폭 | 2.615mm |
| 테이프 두께 | 0.25mm     | 필라멘트 영역두께 | 0.175mm |
| 트위스트   | NO         | 필라멘트수     | 37      |

1. 서 론

초전도변압기는 동손을 없앨 수 있기 때문에 기존의 변압기에 비해 효율이 높다. 또한 권선 및 철심의 부피와 무게가 감소하기 때문에 부피가 1/3까지 줄어든다. 상온변압기의 권선에서 발생하는 열의 방열과 전기적인 절연을 위해서 사용되는 절연유를 사용할 필요가 없기 때문에 폭발의 위험이 없고 환경친화적인 변압기이다. 이와같은 장점 때문에 현재 개발이 활발히 진행 중이다.

고온초전도선재의 성능이 향상됨에 따라 최근에는 고온초전도변압기를 제작되고 있다. 1998년에 다국적기업인 ABB를 중심으로 해서 3상 630kVA 초전도변압기를 개발했고 1999년에는 미국의 Waukesha에서 단상 1MVA 초전도변압기를 개발했다. 국내에서도 1998년에 3상 100kVA 저온초전도변압기를 개발한 이후에 고온초전도변압기를 개발하기 위한 연구를 진행 중이다. 본 연구에서는 본격적인 고온초전도변압기 개발의 앞 단계를 위해서 진행하고 있는 실험실 규모의 고온초전도변압기를 설계한 결과를 제시한다.

권선에는 BSCCO-2223로 제작된 고온초전도선을 사용했고 더블팬케이크 권선을 이용해서 누설자속을 줄이도록 했다.

변압기에 외부 시변자계가 인가될 때에는 발생하는 자화손실, 자기자계손실의 교류손실과 철손을 계산했다.

2. 변압기 설계

2.1 고온초전도선재

고온초전도선재로서는 BSCCO-2223로 제작된 테이프 형태의 선재를 사용했다. 선재의 사양은 표 1과 같다. 초전도테이프의 폭과 두께는 3.54mm, 0.25mm 이고 테이프에서 필라멘트가 배치된 필라멘트 영역의 두께는 각각 2.615mm, 0.175mm로서 필라멘트 영역이 전 영역에서 차지하는 비율은 51.7%이다. 이 테이프의 모재는 은합금으로 제작되었고 임계전류는 40.0A로서 이

2.2 철심

사용된 철심은 30PH139로서 저손실 방향성 규소강판이고 두께는 0.3mm이며 철심의 점적율은 95.5%이다. 철손은 손실곡선에서 직접 구하거나 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$P_c = B^2 \left[ \sigma_H \left( \frac{f}{100} \right) + \sigma_E d^2 \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \text{ W/kg} \quad (1)$$

위 식에서 B는 인가자장의 최대치,  $\sigma_H$ 는 히스테리시스 손실 계수,  $\sigma_E$ 는 와전류손실계수, d는 규소강판의 두께, f는 주파수이다.

변압기의 철심은 외철형으로 제작하였다.

2.3 사양

위와 같은 고온초전도테이프와 철심을 사용해서 단상 1kVA 변압기를 설계한 결과는 표 2와 같다. 고압측에 흐르는 전류는 4.55A 이고 저압측에 흐르는 전류는 9.1A 이다. 고온초전도선재를 구부릴 경우 전류밀도가 감소하므로 고온초전도선재의 구부림을 최소로 하기 위해서 권선을 원형형태의 보빈에 감아야 하고, 그 때문에 철심의 가로와 세로를 같도록 했다. 철심의 단면적은 적과 폭이 86 mm, 85mm이고 철심의 무게는 34.6kg 이다.

권선을 용이하게 하기 위해서 고압측과 저압측 권선을 더블 팬케이크 형태로 권선했다. 고압측에는 120턴, 저압측에는 60턴이 감겨 있으며 사용된 선재의 총 길이는 120m이다. 또한 저압측에는 2가닥을 병렬로 사용해서 과도상태 시에 변압기에 흐르는 큰 전류에 의해서 변압기가 열화되는 것을 방지하도록 했다. 그림 1은 설계된 변압기의 단면도로서 초전도권선, 철심 및 제작된 초전도변압기를 액체질소를 담은 극저온 용기의 상부를 랜지에 고정시킬 수 있는 지지물이 표시되어 있다. 더블 팬케이크 보빈은 배어크라이드로 가공하고, 지지물은 스테인레스 스틸로 가공 하였다.

표 2 고온초전도변압기의 사양

|       |                      |       |          |
|-------|----------------------|-------|----------|
| 용량    | 단상, 1kVA             | 전압    | 220/110V |
| 전류    | 4.55/9.1A            | 권선 형태 | 더블 팬케이크  |
| 권선수   | 120/60               | 권선 길이 | 120mm    |
| 철심단면적 | 85×86mm <sup>2</sup> | 철심 무게 | 34.6Kg   |

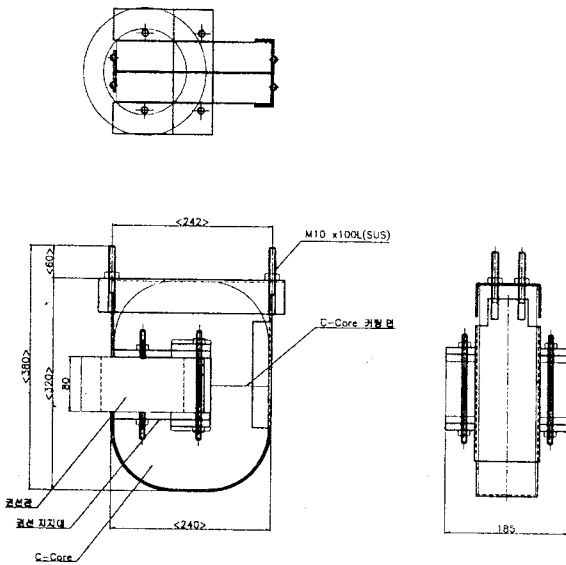


그림 1 고온초전도변압기의 단면도

#### 2.4 권선배치

권선을 더블 팬케이크로 배치할 경우는 1차 권선과 2차 권선의 배치를 조절할 수 있다. 본 연구에서는 더블 팬케이크 하나 당 60회를 권선해서 고압측에 2개, 저압측에 2개 총 4개의 더블 팬케이크 권선을 사용한다. 저압측에 사용된 2개는 병렬로 권선한다.

이 경우에 4가지의 서로 다른 권선배치가 가능하다. 4가지 권선배치는 첫 번째가 고압-저압-저압-고압(HLLH) 순서로 권선을 배치하는 것이고, 저압-고압-고압-저압(LHHL), 고압-저압-고압-저압(HLHL), 고압-고압-저압-저압(HHLL) 순서로 배치하는 것이다.

그림 2는 각 경우의 자화리액턴스와 누설리액턴스를 LHLL의 경우를 1로 해서 표시한 것으로 자화리액턴스는 네가지 경우 모두 큰 차이는 없으나 HLLH 경우가 약간 적은 것을 볼 수 있다. 그러나 누설리액턴스는 HLHL의 경우가 적고 HHLL의 경우가 상당히 크다. 이는 HLHL의 경우가 고압권선과 저압권선이 교차해서 배치되기 때문에 자속결합이 잘 이루어지고 HHLL의 경우는 고압권선과 저압권선이 분리되어 있기 때문에 자속결합이 잘 이루어지지 않기 때문이다.

변압기에서는 여자전류가 적고 전압변동율이 낮은 것이 우수한 특성으로 평가 되기 때문에 이 결과만으로 보면 HLHL 배치가 성능이 우수하나 HLHL 배치에서는 두 저압권선을 통과하는 자속이 다르기 때문에 병렬로 연결된 두 저압권선에서 발생하는 전압이 달라지고 이에 따라 상당히 큰 순환전류가 발생하기 때문에 바람직하지

않다. 본 변압기의 경우는 저압이기 때문에 전기적인 절연이 문제가 되지 않으나 고압변압기에서는 철심과 권선과의 전기적인 절연이 문제가 되므로 철심에서 가까운 쪽에 고압권선을 배치하는 것이 바람직하다. 이들을 종합적으로 고려해서 변압기의 권선배치는 LHHL로 한다.

그림 3은 전부하가 인가된 경우 LHHL로 배치된 권선부분에서의 자속분포로서 최대자속밀도는 0.01T이다.

그림 4는 전부하할때 철심과 코일에 대한 자속 밀도 분포에 대한 것이다. 철심에서의 최대 자속밀도는 0.93T이다.

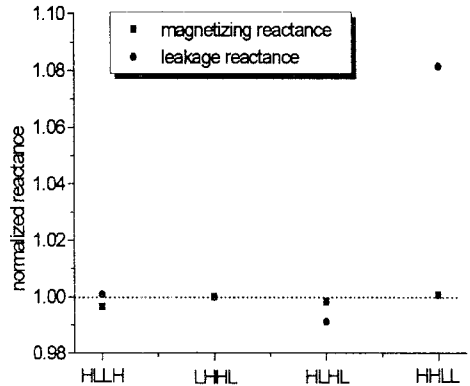


그림 2 각 권선배치별 자화리액턴스, 누설리액턴스

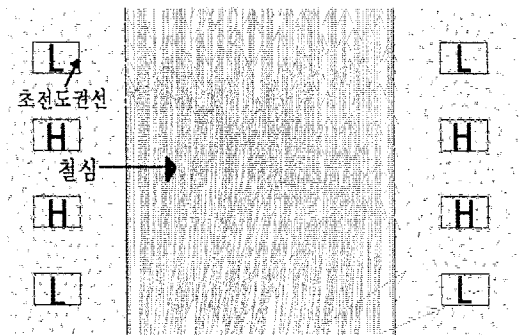


그림 3 권선부분에서의 자속분포

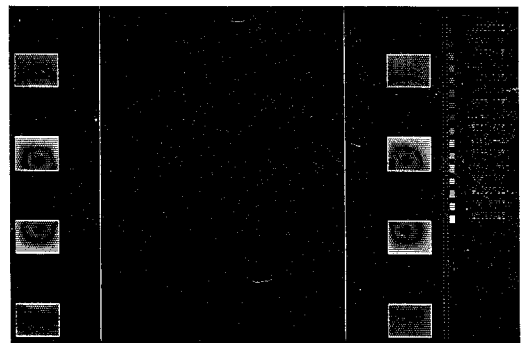


그림 4 자속밀도 분포도

### 2.5. 손실

고온초전도테이프에 시변자계가 인가 될 때에 발생하는 교류손실 중에서 자화손실은 초전도테이프 전영역에서 완전침투가 발생한다고 가정하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{2B_m^2}{\mu_0} \left( \frac{1}{\beta} - \frac{2}{3\beta^3} \right) \text{ J/m}^3/\text{cycle}, \quad \beta \gg 1 \quad (2)$$

위 식에서  $\beta$ 는 자속의 침투 정도를 나타내는 계수로써  $\beta = B_m/B_p$ ,  $B_p$ 는 자속이 초전도체의 중심에 도달하는 자속밀도로  $B_p = \mu_0 J_c a$  이다. 필라멘트 영역의 두께  $2a$ 는 0.175mm, 필라멘트 영역의 임계전류밀도  $J_c$ 는  $8.74 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 이다. 초전도테이프 영역에 가해지는 자속밀도  $B_m$ 의 평균치를 0.01T로 잡으면 초전도테이프에서 발생하는 한 주기당의 자화 손실은 58.8  $\text{J/m}^3/\text{cycle}$ 이고 이로부터 전체 손실을 계산하면 0.194 W이다.

통전전류에 의해서 발생하는 자기자계손실은 다음과 같은 Norris식을 이용해서 구할 수 있다.

$$Q = \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} \left[ \left(1 - \frac{i_p}{I_c}\right) \ln\left(1 - \frac{i_p}{I_c}\right) + \left(2 - \frac{i_p}{I_c}\right) \frac{i_p}{2I_c} \right] \text{ J/m/cycle} \quad (3)$$

위 식에서  $I_c$ 는 임계전류이고  $i_p$ 는 통전전류의 최대치이므로 한주기당의 자기자계손실은  $4.83 \times 10^{-7} \text{ J/m/cycle}$ 이고 이로부터 구한 전체 자기자계 손실은 3.48mW로서 무시할 만한 수준이다. 자화손실과 자기자계손실이 적은 이유는 초전도 권선 부분에 인가되는 자장의 평균치가 0.01T로 적고 권선에 흐르는 전류가 4.5A로 비교적 적은 수준이기 때문이다. 변압기 철심의 무게가 34.6kg이므로 철손은 16.6W로서 손실의 대부분을 차지하고 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 고온초전도변압기를 설계하고 이 변압기의 특성을 계산했다. 권선배치는 누설리액턴스와 순환전류를 고려했을 때에 저압권선 사이에 고압권선을 배치하는 것이 가장 바람직한 것으로 밝혀졌다. 초전도테이프에 흐르는 전류가 적기 때문에 초전도권선에서 발생하는 교류손실은 절대값도 적을 뿐 아니라 기화된 액체질을 다시 액체 질소로 만드는데 소비되는 전력의 비를 나타내는 COP를 고려해도 철손에 비해서 상당히 적었다.

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] S.W.Schwenrerly, B.W.McConnell, J.A.demko, A. Fadnek, J.Hsu, and F.A.List "Performance of a 1\_MVA Demonstration Transformer", Applied Superconducting Conference, USA, Sept., 1998
- [2] J.K.Lee, W.S.Choi, K.D.Cha, S.Y.Han, S.C. Chang "Development of a Three Phase 100kVA Superconducting Power Transformer with Amorphous Core", Applied Superconducting Conference, USA, Sept., 1998
- [3] 심정옥 등, "고온초전도선재의 자화손실 측정," 대한전기학회 논문지, 제48권, 제4호, pp182-186, 1999
- [4] W.T.Norris, "Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors carrying AC," Jour. of Physics . vol.3, pp.489-507, 1970