

더블팬케익 권선형 10kVA 고온초전도 변압기

이희준, 차귀수*, 이지광**, 최경달***, 류 경우*, 한송엽**
 Soonchunhyang Univ.*, Woosuk Univ.**, Korea Polytechnic Univ.***, Chonnam National Univ.†, Seoul National Univ.††

10kVA High T_c Superconducting Power Transformer
 with Double Pancake Winding

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 National Univ.††

Abstract - This paper presents the design of a double pancake winding type high T_c superconducting power transformer. In the design of the transformer, BSCCO-2223 tape was considered as the conductor. Double pancake 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. Room temperature bore type cryostat has been constructed and its heat loss was estimation.

표 1 고온초전도 선재의 사양

| 재질 | BSCCO-2223 | 모재 | Ag(Mg-Ni) |
|--------|------------|---------|-----------|
| 테이프폭 | 3.2 mm | 테이프 두께 | 0.3 mm |
| 필라멘트 폭 | 2.86 mm | 필라멘트 두께 | 0.176 mm |
| 필라멘트수 | 37 | 트위스트 | NO |

강판이고 두께는 0.3 mm이며 질량은 7.65 g/cm³ 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, σ_H는 히스테리시스 손실 계수, σ_E는 와전류손실계수, d는 규소강판의 두께, f는 주파수이다. 제작된 철심의 무게는 86.7kg이다. 제작된 철심을 손실곡선을 이용해서 구하면 60.7W인데 실험을 통해 구한 무부하 손실은 67.3W이다. 변압기의 철심은 권철심 형태의 내철형으로 제작하였다.

그림 1은 고온초전도 변압기의 단면도로서 중공형 극저온 용기에 철심이 위치하므로 철심의 크기가 커지고 철심의 폭과 적은 85 mm, 85 mm이고 단면적은 7225 mm²이다. 8개의 권선된 더블팬케이크코일이 철심 한쪽에 위치하는 구조로 되어 있다.

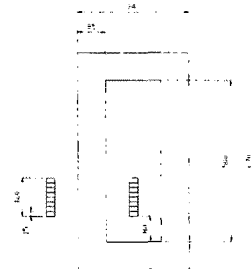


그림 1 10kVA고온초전도 변압기 단면도

1. 서 론

초전도 분야의 전문가들은 고온 초전도 전력기기가 늦어도 21세기 초에는 실용화될 것으로 예상하고 있으며, 이 중에서 가장 먼저 실용화가 가능하고 수요가 제일 많은 전력기기로 고온초전도변압기를 꼽고 있다. [1]

초전도변압기의 기본 구조는 일반 변압기의 구조와 같이 1차 권선과 2차 권선 사이에 자기 결합이 잘 되도록 철심을 두며 철심의 단면적 등을 설계하는 기준은 일반변압기와 동일한 기준을 적용한다. 열적 또는 기계적인 측면에서 초전도선을 냉각시키고 온도를 유지하기 위해 극저온 용기가 필요하다. 철심과 권선을 함께 냉각시킬 수 있지만 철심에서 발생하는 열로 냉매가 기화하면 이를 다시 액화하는 데는 25배 정도의 전력이 필요하므로 전체 효율면에서 철심을 냉각시키는 방법은 바람직하지 않다. 따라서 철심은 상온에 두고 1차, 2차 권선만 냉각시켜야 하며 가운데가 빈 저온 용기에 권선을 설치하고 철심은 저온 용기의 중심으로 통과시키는 구조를 가져야 한다. 이러한 구조를 갖는 10kVA급 고온초전도 변압기를 설계하여 유한요소방법으로 특성을 평가하였다. [2][3]

권선에는 BSCCO-2223로 제작된 고온초전도선을 사용하고 더블팬케이크형 권선을 이용하여 누설자속을 줄이도록 했다. 여러 가지의 권선 배치를 검토해서 최적의 권선 배치형상을 결정했다.

2. 변압기 설계

2.1 고온초전도선재

고온초전도선재로서는 BSCCO-2223로 제작된 테이프형태의 선재를 사용했다. 선재의 사양은 표 1과 같다. 초전도테이프의 폭과 두께는 3.2 mm, 0.3 mm 이고 필라멘트 소선의 수는 37이고 필라멘트는 트위스트 되어 있지 않으며, 테이프에서 필라멘트가 차지하는 영역은 30%이다. 이 테이프의 모재는 은합금으로 제작되었고 임계전류는 35.0A로서 이를 전류밀도로 나타내면 J_c는 6.95×10³ A/cm²이다.

2.2 철심

사용된 철심은 30PH139로서 저손실 방향성 규소

2.3 사양

위와 같은 고온초전도테이프와 철심을 사용해서 단상 10kVA 변압기를 설계한 결과는 표 2와 같다. 고압측에 흐르는 전류는 22.73A 이고 저압측에 흐르는 전류는 45.46A 이다. 고온초전도선재를 구부릴 경우 전류밀

도가 감소하므로 고온초전도선재의 구부림을 최소화 하기 위해서 권선을 원형형태의 보빈에 감아야 하고, 그 때문에 철심의 가로와 세로의 길이를 같도록 했다.

권선을 용이하게 하기 위해서 고압측과 저압측 권선을 더블 팬케이크 형태로 권선했다. 고압측에는 188턴, 저압측에는 94턴이 감겨 있으며 사용된 선재의 총 길이는 532.8m이다. 또한 고압측은 더블팬케이크권선 두 개를 병렬로 연결하였고 네 개의 더블팬케이크를 사용하였으며 저압측에는 네 개의 더블팬케이크를 병렬로 사용하여 과도상태 시에 변압기에 흐르는 큰 전류에 의해서 변압기가 열화되는 것을 방지하도록 했다.

그림 2은 설계된 변압기의 지지구조물의 단면도로서 초전도권선, 철심 및 제작된 초전도변압기를 액체질소를 담은 극저온 용기의 상부플랜지에 고정시킬 수 있는 지지물이 표시되어 있다. 더블팬케이크 보빈은 GFRP 가공하고, 지지물은 스테인레스 스틸로 가공하여 손실을 최소화한다.

표 2 고온초전도변압기의 사양

| 용량 | 단상, 10kVA | 전압 | 440/220V |
|-------|-----------------------|-------|----------|
| 전류 | 22.73/45.46A | 권선 형태 | 더블 팬케이크 |
| 권선수 | 188/94 | 권선 길이 | 532.8 m |
| 철심단면적 | 85×85 mm ² | 철심 무게 | 86.7kg |

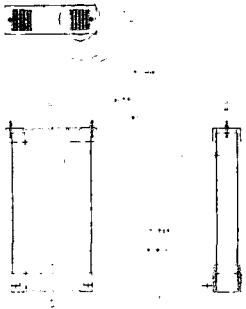


그림 2 고온초전도변압기의 지지구조물 구조도

2.4 극저온용기

고온 초전도 변압기에 있어 권선부의 제작에는 고온 초전도 테이프가 사용된다. 그런데, 이 고온초전도 테이프를 대략 77K의 낮은 온도로 유지시키기 위해 냉매인 액체질소가 필요하게 되고, 이러한 냉매를 보관할 용기 즉 극저온용기가 필요하므로 냉동조를 설계 및 제작하였다. 설계한 고온초전도 변압기의 극저온용기에 대해 외부에서의 침입열에 대한 열해석을 하였다.

그림 3은 극저온용기 설계도이다. 증폭형 형태로 제작되었으며 지름은 405 mm이며 증폭형의 내측 지름은 180 mm, 높이는 560 mm이고 재질은 GFRP로 제작하여 교류 인가시 와전류가 발생하는 것을 방지하였다. 진공층과 super insulation을 두어 복사열 침입을 차단하였으며 플랜지로부터의 열침을 방지하기 위해 방열판을 설치하였다.

제작된 극저온용기에 대한 외부에서의 침입열에 대한 열해석을 하였는데 전도열은 식(2)을 이용하여 계산할

수 있다.

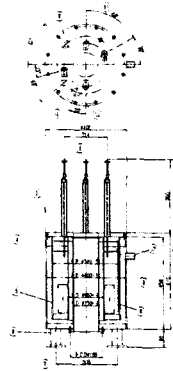


그림 3 극저온용기 단면도와 플랜지

$$Q_c = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda dT \quad (2)$$

$$= \frac{A}{L} \left[\int_{T=4.2K}^{293K} \lambda dT - \int_{T=4.2K}^{\pi K} \lambda dT \right]$$

여기서 A는 물체의 단면적, λ는 물체의 열전도를 나타내고, GFRP 구조재의 두께는 5 mm 길이 L은 170 mm이다. 여기서 주어진 값들을 이용해서 외부와 내부에서 침입해 들어오는 각각의 전도열을 구해보면 전도열 Q_c는 1.34 W/m이다.

복사열은 식(3)을 이용해서 계산 할 수 있다.

$$Q_R = \sigma A_L \epsilon (T_H^4 - T_L^4) \quad (3)$$

여기서 σ는 스테판볼츠만 상수이고 A_L은 복사열을 받는 면의 표면이고 T_H는 복사열을 내는 면의 온도, T_L은 복사열을 받는 면의 온도이고, ε = 0.8은 실험적으로 얻어진 실효방사율이다.

각 부분으로 침입하는 복사열은, 동체로부터 극저온용기에 침입하는 복사열 Q_{R1}와 탑 플랜지로부터 극저온용기에 침입하는 복사열 Q_{R2}를 나누어 계산하였는데 액체 질소 극저온용기 동체로부터의 침입열량 Q_{R1}는 71.62W, 탑 플랜지로부터의 침입열량 Q_{R2}는 19.99W로서 극저온용기에 침입한 총 복사열은 91.61W이다. Super insulation층이 설치되어 있어 침입한 복사열을 0.2배로 정도 감소하여 복사열은 34.31W이다. 총 침입 열량 Q_T는 전도열 Q_c와 복사열 Q_R의 합이므로 구해보면 35.65W 이다. 총 침입 열량을 액체질소 증발량으로 환산하면 0.78 l/h이다. 제작된 극저온용기에 대한 증발량 실험을 실시하였는데 시간당 평균 증발량은 0.45 l/h이고 평균손실은 20.45W이다.

2.5 권선배치

권선을 더블 팬케이크로 배치할 경우는 1차 권선과 2차 권선의 배치를 조절할 수 있다. 본 연구에서는 더블 팬케이크 하나 당 94회를 권선해서 고압측에 4개, 저압측에 4개 총 8개의 더블 팬케이크 권선을 사용한다. 고압측에 두 개의 더블팬케이크를 병렬로 권선하여 병렬로 권선된 두 개를 직렬로 연결하고 저압측에는 더블팬케이크 네 개를 병렬로 권선한다.

이 경우 여러 배치가 가능하나 3가지 경우에 대해서 확인하였다. 첫 번째 경우는 고압-고압-고압-고압-저압-저압-저압(HHHLLLLL), 저압-저압-고압-고압-

고압-고압-저압-저압(LLHHHLL), 저압-저압-고압-고압-고압-저압-저압(LLHHHLL) 순으로 배치한 것이다. 3가지 경우에 대한 자화리액턴스 X_m 과 누설리액턴스 X_l 을 유한요소방법을 이용하여 계산하여 권선배치를 결정한다.

그림 4는 각 권선 배치별 자화리액턴스와 누설리액턴스에 관한 것 HLLHLLH를 기준으로 하여 나타낸 것이다. HHHLLLL형태는 누설리액턴스가 많이 발생하고, LLHHHLL형태는 저압측에서 고압측으로 전류의 방향이 바뀌는 부분이 두 부분으로 초전도선의 수직 방향의 자계를 줄일 수 있는 형태의 결선이지만 해석해 본 결과 저압 측의 전류 불균형이 약 4배 정도의 차이가 발생하여 한쪽 저압측에 너무 많은 전류가 흘러 초전도성질을 잃을 수 있다. 그래서 전류의 방향이 바뀌는 부분이 많지만 저압측의 전류 불균형이 최소로 해소되는 배치인 HLLHLLH로 변압기의 권선배치를 결정하였다.

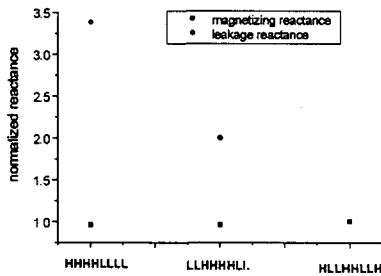


그림 4 각 권선 배치별 자화리액턴스, 누설리액턴스

2.6. 손실

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

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

위 식에서 β 는 자속의 침투 정도를 나타내는 계수로 $\beta = B_m/B_p$, B_p 는 자속이 초전도체의 중심에 도달하는 자속밀도로 $B_p = \mu_0 J_c a$ 이다. 필라멘트 영역의 두께 $2a$ 는 0.176 mm , 필라멘트 영역의 임계전류밀도 J_c 는 $6.95 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 이다. 초전도테이프 영역에 가해지는 자속밀도 B_m 의 평균치를 20 mT 로 잡으면 초전도테이프에서 발생하는 한 주기당의 자화 손실은 $220.7 \text{ J/m}^3/cycle$ 이고 이로부터 전체 손실을 계산하면 3.55 W 이다. (4) (5)

그림 5는 고온초전도 권선이 HLLHLLH상태로 배치된 경우 전부하시 코일에 걸리는 자화손실 밀도를 나타낸 것으로 권선 부분만을 확대한 그림이다. 고압과 저압 권선이 만나는 부분에서 손실이 큰 것을 알 수 있는데 세 번째 권선과 네 번째 권선사이 그리고 다섯 번째 권선과 여섯 번째 권선사이에서 자장의 세기가 강할 뿐만 아니라 이 부분에서는 초전도 테이프에 인가되는 자장의 방향도 초전도 테이프에 거의 수직 방향이기 때문에 손실이 많이 발생한다. 권선에서의 최대자속밀도는 43.26 mT 이고, 평균 자속 밀도는 20 mT 이다.

통전전류에 의해서 발생하는 자기자계손실은 다음과 같은 Norris식을 이용해서 구할 수 있다. (6)

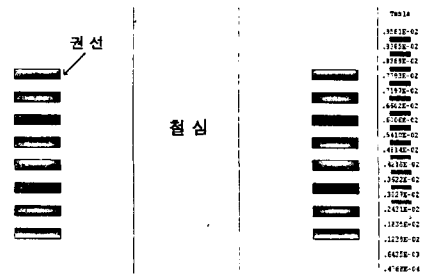


그림 5 HTS코일의 손실밀도

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

위 식에서 I_c 는 임계전류이고 i_p 는 통전전류의 최대치이므로 한 주기당의 자기자계손실은 $0.14 \times 10^{-3} \text{ J/m/cycle}$ 이고 이로부터 구한 전체 자기자계 손실은 4.58 W 이다. 자화손실과 자기자계손실을 합한 총 손실은 8.13 W 이다. 이 결과를 기화된 가스를 다시 액체로 만드는 데에 사용되는 전력의 비율인 COP를 25로 잡으면 교류손실은 203.25 W 이다.

3. 결 론

본 연구에서는 10 kVA 고온초전도변압기를 설계하고 이 변압기의 성능을 유한요소방법을 이용하여 계산했다. 권선배치는 누설리액턴스와 순환전류를 고려했을 때에 고압-저압-저압-고압-고압-저압-저압-고압순으로 배치하는 것이 최적의 배치이며, 설계된 냉동조에 대한 침입열량손실을 계산하고, 제작된 냉동조에 대한 열용량손실을 측정하였다. 고온초전도권선에서의 COP를 고려한 교류손실은 203.25 W 로서 손실이 많은데 이것은 임계전류밀도가 큰 고온초전도선재가 개발되면 교류손실이 작아질 것으로 기대된다.

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.W.Schwenrerly, et al., "Performance of a 1-MVA Demonstration Transformer," IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.680-684, 1999
- [2] Sam P. Mehta, Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming transformers," IEEE Spectrum, Vol.34, No.7, pp. 43-49, July 1997
- [3] J.K.Sykulski, et al., "Design and Construction of a high Temperature Superconducting Transformer," ICEM'98, Istanbul, Turkey, pp.971-975, Sept., 1998
- [4] 차귀수 등, "고온초전도선재의 자화손실 측정," 대한전기학회 논문지, 제48권 (B), 제4호, pp.182-186, 1999
- [5] Martin N. Wilson Clarendon Press "Superconducting Magnetic" pp.159-199, 1983
- [6] W.T.Norris, "Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors carrying AC: isolated conductors and edges of thin sheets," Jour. of Physics. D, vol.3, pp.489-507, 1970