

**4병렬 팬케이크 권선을 사용한 1 MVA 단상 고온초전도 변압기의 설계 및 제작**

김우석<sup>1</sup>, 김성훈<sup>2</sup>, 이상진<sup>3</sup>, 최경달<sup>4</sup>, 주형길<sup>5</sup>, 홍계원<sup>6</sup>, 한진호<sup>7</sup>, 한승엽<sup>8</sup>, 송희석<sup>9</sup>, 박정호<sup>10</sup>

기초전력공학공동연구소<sup>1</sup>, 서울대학교 전기·컴퓨터공학부<sup>2</sup>,  
위덕대학교<sup>3</sup>, 한국산업기술대학교<sup>4</sup>, 호성중공업연구소<sup>5</sup>

**Design and Fabricate a 1 MVA Single Phase HTS Transformer with Four Parallel Pancake Windings**

Woo-Seok Kim<sup>1</sup>, Sung-Hoon Kim<sup>2</sup>, Sang-Jin Lee<sup>3</sup>, Kyeong-Dal Choi<sup>4</sup>, Hyeong-Gil Joo<sup>5</sup>,  
Gye-Won Hong<sup>6</sup>, Jin-Ho Han<sup>7</sup>, Song-Yop Hahn<sup>8</sup>, Jungho Park<sup>9</sup>, Heesuck Song<sup>10</sup>

Electrical Engineering and Science Research Institute<sup>1</sup>  
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University<sup>2</sup>  
Uiduk University<sup>3</sup>  
Graduate School of Energy, Korea Polytechnic University<sup>4</sup>  
Hyosung Corporation<sup>5</sup>

**Abstract** - The result of design and partial fabrication of a 1 MVA single phase high temperature superconducting(HTS) transformer for power distributions are presented in this paper. The HTS windings are wound as double pancake windings which have advantages of uniform distribution of high voltage over the windings. the rated primary and secondary voltages are 22.9 kV and 6.6 kV respectively. Four HTS tapes are wound in parallel for secondary windings considering the rated currents of the transformer. The HTS windings will be cooled down to 65 K by natural convection of sub-cooled liquid nitrogen using a single staged GM-cryocooler in order to make the stability of the HTS windings better. The iron core is designed as shell type and isolated from the liquid nitrogen by an FRP cryostat which have a room temperature bore. After the complete fabrication of the total HTS transformer system, performance test of the transformer will be carried out.

그러나 변압기의 단자전압이 높아질수록 권선에서의 전압 분배와 절연의 측면에서 솔레노이드 형태보다 팬케이크 형태의 권선이 더 유리하게 된다. 따라서 기존의 일반 변압기에서는 고전압 대용량 변압기의 경우 그 권선의 형태로서 팬케이크 형태를 취하는 것이 일반적이다. 고온초전도 변압기의 개발에 있어서도 고전압화에 따라 팬케이크 형태의 권선을 가지는 변압기의 개발이 필수적이다[4-5].

본 논문에서는 현재 과학기술부가 주도하는 21C 프론티어연구개발사업의 일환인 차세대 초전도 응용기술개발사업 중 중소규모 배전용 초전도변압기의 개발사업의 1 단계 목표로서 1 MVA 단상 고온초전도 변압기를 설계하고, 설계값에 따른 제작에 관하여 기술한다. 본 논문에서 설계한 변압기는 더블 팬케이크 형태의 교호배치된 고온초전도 권선을 가지며 증공형 FRP 냉동조를 사용하여 철심을 상온으로 분리하였으며, 초전도 권선의 안정성 증가 및 절연특성의 향상을 위하여 냉매로 사용하게 되는 액체질소의 온도를 65K로 낮추어 사용하게 된다. 전체적인 변압기 시스템의 설계 결과 및 제작의 진행 상황에 대하여 기술하고, 제작이 완료된 후 실험 시범을 포함한 특성시험을 수행할 예정이다.

**2. 본 론**

**1. 서 론**

변압기는 전력계통에서 가장 기본적이고 중요한 요소이자 고온초전도의 전기기기예의 응용에 있어서 가장 먼저 실용화 될 수 있는 분야로 손꼽히고 있다. 지금까지 세계적으로 고온초전도 변압기에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔으며, 현재는 고온초전도 변압기의 고전압, 대용량화를 목표로 국내외에서 다양한 연구가 진행 중이다[1-2].

이러한 고온초전도 변압기는 그 권선의 형태에 따라서 크게 솔레노이드 형태와 팬케이크 형태로 나뉘어 질 수 있다. 최근에 개발되고 있는 고온초전도 변압기가 대부분 솔레노이드 형태임에 비하여 팬케이크 형태의 고온초전도 변압기의 연구가 진행되고 있는 곳은 그리 많지 않다. 이는 고온초전도 선재의 특성으로 인하여 팬케이크 형태의 권선에서는 선재의 성능 저하 및 교류손실의 증가가 같은 용량의 솔레노이드 권선과 비교해 볼 때, 상대적으로 커지므로 결과적으로 부피의 증가와 효율의 감소를 가져오기 때문이다[3].

**2.1 고온초전도 변압기의 사양**

설계 목표로 하는 변압기의 용량은 단상 1 MVA이며 전압은 고압측이 22.9 kV이고 저압측이 6.6 kV이다. 권선에 사용된 선재는 BSCCO-2223 고온초전도 선재를 사용하였으며 설계에 사용된 고온초전도 선재의 사양과 변압기의 사양을 표 1 및 표 2에 나타내었다.

표 1. 고온초전도 변압기의 사양

사양	값
상수	단상
용량	1 MVA
정격전압	22.9 kV / 6.6 kV
정격전류	44 A / 152 A

표 2. 고온초전도 선재의 사양

사양	값
Thickness	0.3 mm
Width	4.1 mm
Critical Tensile Stress	265 MPa
Critical Bending Dia	50 mm
Critical Current	> 115

2.2 권선 설계 및 제작

본 변압기에 사용될 권선은 일반 고압 변압기에서도 많이 사용되는 팬케이크 형태의 권선을 고압측과 저압측 모두에 사용하며 결선의 편의를 위해 두층의 권선이 하나의 보빈에 감기는 더블팬케이크 형태의 권선을 한다. 전체 권회수 및 적절한 전압분배와 고온초전도 선재에 인가되는 자장의 크기를 고려하여 보빈의 개수를 분할하고 각 권선의 배치는 교호배치 형태를 취한다. 권선의 배치도를 그림 1에 나타내었다. 표 1에서 나타난 바와 같이 저압측의 전류가 152 A이므로 사용할 고온초전도 선재의 임계전류값을 넘는다. 뿐만 아니라 선재에 가해질게 되는 자장이 최대 0.12 T정도이므로[6] 고온초전도 선재의 특성을 고려하여 저압측에 4개의 고온초전도 선재를 사용하여 병렬로 권선한다. 병렬 권선시 선재간 불평형 전류를 방지하기 위해 전위를 하여 임피던스의 균형을 맞추어야 한다. 본 설계에서는 저압측 4개의 팬케이크 권선의 연결시에 3회 전위를 하여 임피던스의 균형을 맞추었다. 표 4에 각 보빈의 선재당 권회수를 나타내었다.

각 보빈은 GFRP로 제작되었으며 보빈의 고정 및 상부플랜지와 연결을 위하여 GFRP로 제작된 봉과 너트를 사용하였다. 제작된 권선부 및 상부플랜지의 모습을 그림 2에 나타내었다.

2.3 철심 구조

본 변압기의 철심은 단상 외철형으로 설계되었으며 단면이 4단 구조를 가지도록 적층된 PG-10 규소강판을 사용하였다. 철심의 단면적은 715.16 cm<sup>2</sup> 이며 극저온 용기의 크기를 고려하여 철심의 높이를 1,580 mm로 설계하였다.

표 3. 고온초전도 더블팬케이크 권선의 설계값

사양	값
권회수	832 / 240
V/T	27.5 V
선재 총 길이	1400 m / 1616 m
보빈 수	8 개 / 4 개
보빈의 외경	658 mm
보빈의 내경	412 mm
권선의 전체 높이	480 mm

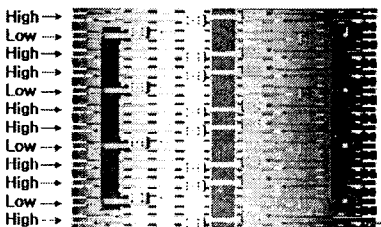


그림 1. 단상 IMVA 고온초전도 변압기 권선의 배치

표 4. 각 보빈의 선재당 권회수

	tape 1	tape 2	tape 3	tape 4
bobbin 1	60.75	60.25	59.75	59.25
bobbin 2	60.25	59.75	59.25	60.75
bobbin 3	59.75	59.25	60.75	60.25
bobbin 4	59.25	60.75	60.25	59.75
total	240	240	240	240

철심 자속밀도는 1.488 T 이며, 철손에 의한 냉각효율의 감소를 막기 위하여 중공형 극저온용기를 사용하여 상온에 철심을 위치시켰다. 설계 치수에 따라 제작된 철심 및 철심 고정물의 구조를 그림 3에 나타내었다.

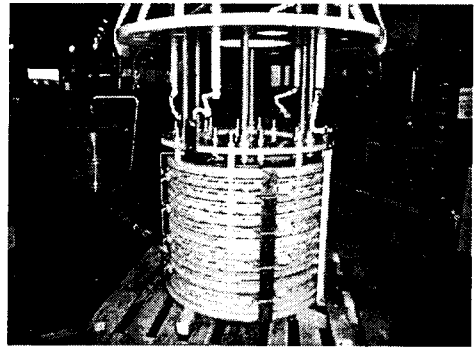


그림 2. 제작된 권선부 및 상부 플랜지

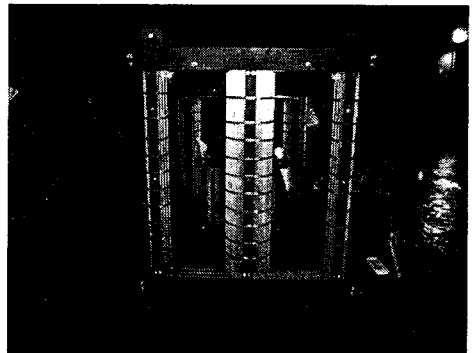


그림 3. 제작된 철심 및 철심 고정부

2.4 냉각 시스템

본 고온초전도 변압기의 권선은 BSCCO 선재의 성능을 높여서 안정성을 확보하기 위하여 65 K의 과냉각 액체질소를 사용하여 냉각한다. 65 K의 과냉각 냉매를 사용하면 고온초전도 선재의 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 액체질소의 비등점인 77 K에서와 같은 기포가 발생하지 않기 때문에 절연 특성이 향상되어 특히 고전압시에 유리하게 된다[7].

본 설계에서는 300W급 1단 GM 냉동기를 사용하여 액체질소를 65 K으로 과냉각할 수 있도록 하였다. 냉동기는 상부 플랜지에 부착되며 냉동기의 cold head로부터 극저온용기의 하부까지 연결되어 있는 구리판을 통하여 극저온용기 내의 액체질소를 전체적으로 과냉각할 수 있도록 하였다. 열전도에 의하여 외부로부터 침입하는 열과 고온초전도 권선부에서 발생하는 교류손실은 권선부와 냉각용 구리판의 온도 차이에 의하여 발생하는 냉매의 자연대류를 통하여 냉각용 구리판을 거쳐서 냉동기

를 통해 외부로 나가게 된다. 액체질소의 자연대류 및 구리판의 전도냉각의 해석을 통하여 냉각용 구리판을 설계하였으며 그 구조를 그림 4에 나타내었다. 구리 상판의 두께는 30 mm이며, 극저온 용기의 하부까지 내려가는 두께는 10 mm, 폭 40 mm, 길이 669 mm의 수직 구리판 30개가 권선의 외부에 위치하여 액체질소의 과냉각을 위한 열통로 역할을 하게 된다. 구리 상판은 철심 자속에 의해 유도되는 전류를 방지하기 위하여 중간에 한번 끊어 줌으로써 폐회로를 구성하지 않게 하며 냉동기의 cold head에 역시 구리로 제작된 flexible rope를 통하여 열적으로 접합된다.

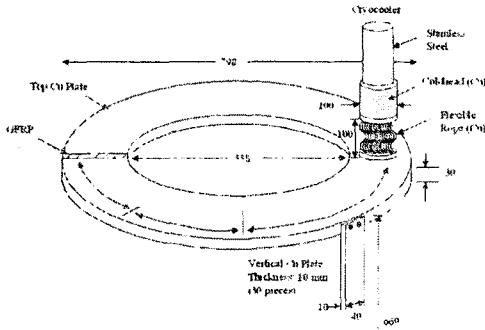


그림 4. 냉각용 구리판의 구조

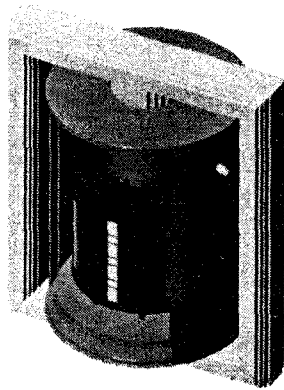


그림 5. 단상 1 MVA 고온초전도변압기의 구조

### 3. 결 론

본 논문에서는 팬케이크 형태의 권선을 가지는 단상 1 MVA 고온초전도 변압기 시스템을 설계하고 부분적인 제작 과정에 대하여 기술하였다. 저압측의 정격전류를 고려하여 4개의 고온초전도 선재를 사용하여 병렬 권선하였으며 전류의 고른 분배를 위한 전위방법을 제안하고 제작하였다. 권선의 안정성 증가 및 절연특성의 향상을 위하여 65 K로 권선을 냉각할 수 있는 시스템을 설계하였다. 그림 5에 본 변압기의 구조를 나타내었으며 제작 및 조립이 완료되면 전체 고온초전도 변압기 시스템의 특성시험이 수행될 예정이다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] S.W. Schwenterly, B.W. McConnell et al., "Performance of a 1 MVA Demonstration Transformer," IEEE Trans. on ASC, Vol. 9, No. 2, pp.680-684, June, 1999
- [2] K. Funaki, et al., "Development of a 22kV/6.9kV Single phase Model for a 3MVA HTS Power Transformer," IEEE Trans. on ASC, Vol. 11, No. 1, pp.1578-1581, March, 2001
- [3] Sam P. Mehta, Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming transformer," IEEE Spectrum, Vol. 34, No. 7, pp.43-49, July, 1997
- [4] 이희준, 차귀수, 이지광, 최경달, 류경우, 한송엽, "10kVA 고온초전도변압기의 특성해석 및 제작," 한국 초전도·저온공학회는 문지 제2권, 제2호, pp.37-43, 2000
- [5] 이희준, 차귀수, 이지광, 한송엽, 류경우, 최경달, "더블팬케이크 권선형 10kVA 고온초전도 변압기," 대한전기학회 논문지, 제50B권, 제2호, pp.65-72, 2001
- [6] Sung Hoon Kim, Woo Seok Kim, Chan Bae Park, Song yop Hahn, Kyeng Dal Choi, Hyeong Gil Joo and Gye Won Hong, "Design of a 1 MVA Single Phase HTS Power Transformer," Progress in Superconductivity Vol. 4, No. 1, pp.86-89, October 2002
- [7] Ho Myung Chang, Yeonsuck Choi, Steven W. Van Sciver and T.L. Baldwin, "Cryogenic Cooling Temperature of HTS Transformers for Compactness and Efficiency," ASC Conference, 2002