

1MVA 고온 초전도 변압기 개념설계

김우석, 한송엽, 최경달, 주형길, 홍계원
서울대학교 전기컴퓨터 공학부, 한국산업기술대학교 에너지 대학원

Conceptual Design of 1MVA HTS Transformer

Woo-Seok Kim, Song-yop Hahn,
Kyeong-Dal Choi, Hyeong-Gil Joo and Gye-Won Hong
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University,
Graduate School of Energy, Korea Polytechnic University

ottor@chollian.net

Abstract - A conceptual design of single phase high T_c superconducting (HTS) 1MVA transformer was presented in this paper. The rated voltages of each sides of the transformer are 22.9kV /6.6kV respectively. Double pancake windings of BSCCO-2223 HTS tape and the room temperature shell type core are adopted. The HTS tapes of windings are going to be cooled down to 65K by sub-cooled liquid nitrogen. A cryostat made of nonmagnetic and nonconducting material with a bore is going to be used in order to locate the core out of the cryostat. This conceptual design will be modified and a fabrication of the machine is going to be based on the presented design in this paper.

1. 서 론

고온 초전도 현상이 1986년에 발견된 이후, 지금까지 고온 초전도 현상의 전력기기에의 응용을 위하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히, 고온 초전도체를 이용한 PIT 선재의 개발과 최근 선재 성능의 비약적인 발전에 힘입어 고온 초전도 선재를 이용한 여러 가지 전력기기의 개발에 대하여 최근 국내외에서 수많은 연구가 진행되고 있다. 그리고 현재 진행 중인 여러 가지 종류의 고온초전도 전력기기 중 가장 먼저 실용화가 가능하며 수요가 많을 것으로 기대되는 기기로 고온 초전도 변압기를 꼽고 있다.

기존의 변압기에 비하여 고온 초전도 변압기는 권선부를 극저온으로 유지시켜야 하는 어려움이 있지만, 저항이 없는 고온 초전도 권선을 사용함으로써 극저온 유지비용을 극복할 수 있는 여러 가지 장점을 가질 수 있다. 고온 초전도 변압기는 권선부에 저항이 없는 고온 초전도선을 사용하므로 같은 전류용량을 가지는 구리선보다

훨씬 적은 도체를 사용한 변압기의 제작이 가능하며, 동손이 거의 없으므로 기존변압기보다 더 동기계에 가깝게 만들 수 있어 철의 크기와 양을 줄여 전체적인 변압기의 크기와 무게 및 손실을 현격히 줄일 수 있다. 그리고 기존변압기의 수명에 절대적인 영향을 미치는 과부하 운전 시에도 고온 초전도 변압기는 수명에 영향이 없으므로 운전 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 또한 절연유를 사용하지 않으므로 안전하며 친 환경적이라는 장점도 있다[1].

고온 초전도 변압기가 가지는 이러한 장점들 중 최대 장점으로 꼽을 수 있는 것은 무게 및 부피의 감소와 운전효율의 증가라고 볼 수 있다. 세계적으로 전력 수요가 비약적으로 증가하고 있는 현재 시점에서 전력계통에 사용되는 대용량 변압기의 용량증가 및 부피의 감소, 그리고 운전효율의 증가는 절대적인 과제라 볼 수 있다. 이러한 요구에 가장 정확하게 부합될 수 있는 고온 초전도 변압기의 실용화를 위하여 현재 국내외에서 활발한 연구들이 진행되고 있다.

그 예를 보면, 다국적 기업인 ABB가 중심이 되어 630kVA 3상 고온 초전도 변압기를 1997년에 개발했고, 현재는 10MVA 고온 초전도 변압기를 개발중이다. 미국에서는 Waukesha Electric Systems의 주도로 1998년에 1MVA 단상 고온 초전도 변압기를 개발하였으며, 일본의 Kyushu 대학에서는 22.9kV급 단상 1MVA 고온 초전도 변압기를 개발하여 일부 시험을 마친 상태이다[2]. 국내에서는 기초전력공학공동연구소에서 2001년에 3상 10kVA 고온 초전도 변압기가 개발된 바 있으며[3][4], 현재 과학기술부가 주도하는 21C 프론티어연구개발사업의 일환으로 차세대 초전도응용기술개발사업 중 중 소규모 배전용 초전도 변압기의 개발이 진행 중이다.

예에서 알 수 있듯이 고전압, 대용량 고온 초전도 변압기의 실용화를 위한 연구가 국내외에서 활발히 수행되고 있다. 본 논문에서는 현재 국내에서 진행중인 차세대 초전도응용기술개발사업

중 중소규모 배전용 초전도 변압기의 첫 번째 단계로써 22.9kV급 1MVA 고온 초전도 변압기의 개념설계를 수행하였다. 본 논문에서 제시한 고온 초전도 변압기는 국내에서 최초로 제시하여 개발되었던 10kVA 고온 초전도 변압기와 마찬가지로 BSCCO-2223로 제작된 고온 초전도 더블팬케이크 형태의 권선을 가지며, 상온 철심을 가지는 형태의 단상 변압기이다. 이러한 더블팬케이크 형상의 권선을 가지는 변압기는 권선 및 절연이 용이하며 사고 시 전압의 분포가 비교적 균등히 이루어진다는 장점을 지니므로, 고전압 변압기에 적합한 형태라 할 수 있다.

2. 본 론

2.1 고온 초전도 변압기의 사양

설계하고자 하는 고온 초전도 변압기의 용량은 단상 1MVA 이며 전압은 고압측이 22.9kV 이고 저압측이 6.6kV 이다. 고온 초전도 변압기의 기본 구조는 일반 변압기의 기본 구조와 크게 다르지 않다. 고온 초전도 변압기의 경우도 일반 변압기와 마찬가지로 1차권선과 2차권선 사이에 자기회로를 이루는 철심을 두고, 철심을 설계하는 기준도 일반 변압기와 같은 기준을 사용한다. 다만, 고온 초전도 변압기의 경우 권선부에 저항이 없는 고온 초전도선을 사용하여 동손이 거의 없으므로 가능한 권선부의 권회수를 늘리고 철심의 크기를 줄여서 철손도 줄이고 기계의 크기와 무게도 줄이는 2중의 효과를 보게 된다. 그러나 아직까지는 고온 초전도 선재가 매우 고가이므로 적절한 권회수를 결정하여야 한다. 표 1에 설계 목표로 하는 고온 초전도 변압기의 간단한 사양을 나타내었다.

2.2 고온 초전도 선재

권선에 사용될 고온 초전도 선재는 미국 ASC사에서 제조한 wide type BSCCO-2223 tape 선재이다. 은 합금의 모재를 사용한 고온 초전도 다심 선재로서 임계전류는 외부자장이 없는 경우 온도 77K에서 약 115A이다.

Table 1. Specification of the HTS transformer

사 양	값
상 수	1
용 량	1 [MVA]
정격 1차 전압	22900 [V]
정격 2차 전압	6600 [V]
정격 1차 전류	44 [A]
정격 2차 전류	152 [A]

이 선재를 사용하여 더블 팬케이크 형태의 권선을 할 경우 고온 초전도 선재에 인가되는 자장의 영향과 선재의 휨에 의한 영향으로 인해 임계전류가 약 60%정도로 감소할 것으로 예상된다[5]. 이러한 임계전류의 감소를 극복하기 위해 권선부의 고온 초전도 선재는 과냉각 질소를 사용하여 65K 정도로 냉각할 예정이다. 동작온도를 65K로 낮춤에 따라 고온 초전도 선재의 임계전류는 77K에서의 임계전류의 60~70%가량 상승하게 된다.

표2에 권선에 사용할 고온 초전도 선재의 자세한 사양을 나타내었고, 그림 1에 온도와 고온 초전도 선재에 수직방향으로 인가되는 자장에 의한 임계전류의 변화 추이를 나타내었다.

2.3 권선 및 철심

본 설계에 사용된 권선은 일반 고압 변압기에서도 많이 사용되는 형태인 팬케이크 권선을 고압측, 저압측 모두에 사용하며 결선의 편의를 위해 두층의 권선이 하나의 보빈에 감기게 되는 더블 팬케이크 형태의 권선을 한다. 전체 권회수 및 적절한 전압분배에 맞추어 보빈의 개수를 분할하고 각 권선의 배치는 교호배치 형태를 취하기로 하였다.

Table 2. Specification of BSCCO-2223 HTS Tape

사 양	값
두께	0.203 [mm]
폭	4.1 [mm]
임계 전류	>100 [A]
임계전류밀도	>12 [kA/cm ²]
최대 Stress	85 [MPa]
최대 Strain	0.15 [%]
최소 Bending Dia.	100 [mm]

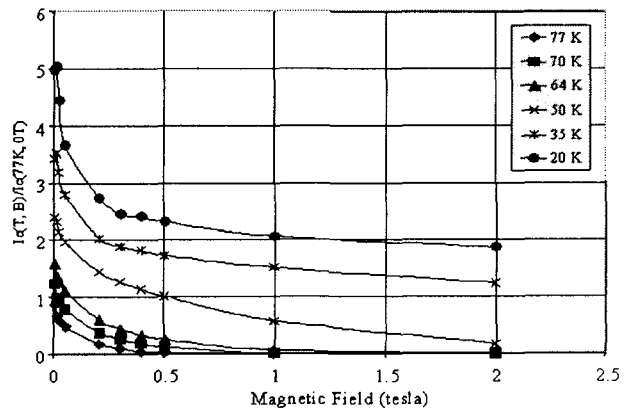


Fig. 1. Scaling ratios for temperature and magnetic field perpendicular to tape surface

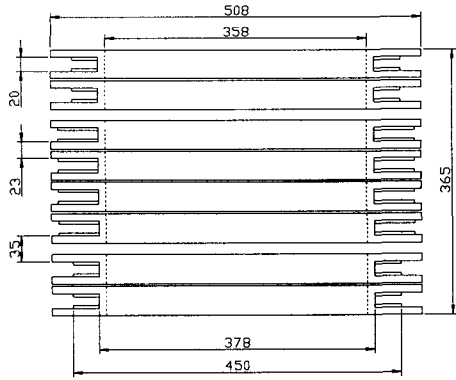


Fig. 2. Dimension and arrangement of the double pancake windings

위 사양의 고온 초전도 선재를 사용하여 정격 전압의 권선에 대한 분배와 적절한 자기장하 및 선재의 길이를 고려하여 권회수를 결정한다. 전압비에 맞게 결정된 권회수는 고압측이 888회, 저압측이 256회로 결정되었다. 고압측 권선은 222회의 권회수를 가지는 4개의 더블 팬케이크 권선으로 나누고, 저압측 권선은 63회의 권회수를 가지는 4개의 더블 팬케이크 권선으로 나누어 각각을 모두 직렬 연결하는 형태를 취한다. 고압측 정격전류는 44A이므로 본 설계에 사용될 고온 초전도 선재를 사용하면 전류용량이 충분할 것으로 예상되나, 저압측의 경우에는 정격전류가 152A로, 권선을 한 경우의 고온 초전도 선재의 임계전류값을 많이 초과하므로 저압측의 경우에는 4개의 고온 초전도 선재를 병렬로 권선하여 사용한다.

2개 이상의 선재를 병렬로 권선하는 경우, 각 선재의 양단에서의 임피던스 값이 달라지므로 전류의 불평형이 발생하게 된다. 일반 변압기의 경우에도 이러한 경우에 임피던스를 같게 해 주기 위하여 일반적으로 전위를 하게 된다. 고온 초전도 선재의 경우에는 저항이 없으므로 적은 인덕턴스 차이에 의해서도 심한 전류 불평형이 일어날 가능성이 있고, 전류의 불평형이 발생하는 경우 선재에서의 교류손실의 증가 뿐 아니라 각 선재의 임계전류를 넘어서는 상황이 발생할 가능성이 있으므로 반드시 전위를 하여 임피던스

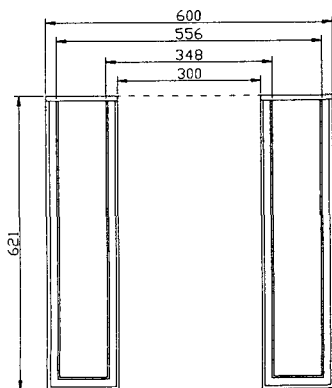


Fig. 3. Dimension of the cyostat with a

room temperature bore

의 균형을 맞추어야 한다.

본 설계에서는 저압측에 4개의 고온 초전도 선재를 병렬 권선하므로 저압측을 4개의 더블 팬케이크 권선으로 나누어 직렬 연결 시 3회 전위를 하여 각 선재의 임피던스를 맞추어 주기로 한다. 전체적인 권선의 배치를 그림 2에 나타내었고 배치 순서는 위에서부터 저압측 권선 2개, 고압측 권선 4개, 저압측 권선 2개의 순서로 배열하였다.

위 권회수에 맞게 철심을 설계하기 위하여 철심에서의 최대 자속밀도를 약 1.7T로 하면 철심의 단면적은 약 570cm^2 이 된다. 철심의 재료는 방향성 규소강대를 사용하고 철심의 형태는 단상 외철형 적철심 구조를 선택하였으며 철심의 점적률을 고려하여 철심의 단면 형상을 3단 내접 다각형 구조로 설계하였다. 철심에서는 철손이 발생하므로 극저온용기의 냉각효율을 높이기 위하여 철심은 상온에 위치시키고 권선만을 극저온용기 안에 위치시켰다. 위에 설계한 권선과 권선을 냉각하기 위한 극저온용기의 대략적인 설계값과 철심의 형상을 그림 3, 그림 4에 나타내었고 결과적인 전체 형상을 그림 5에 나타내었으며, 전체적인 설계결과를 표 3에 정리하였다.

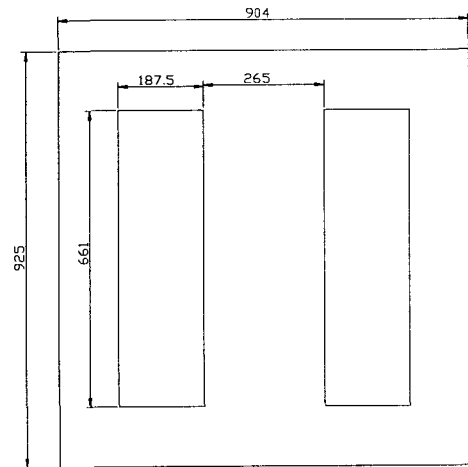


Fig. 4. Dimension of the shell type core

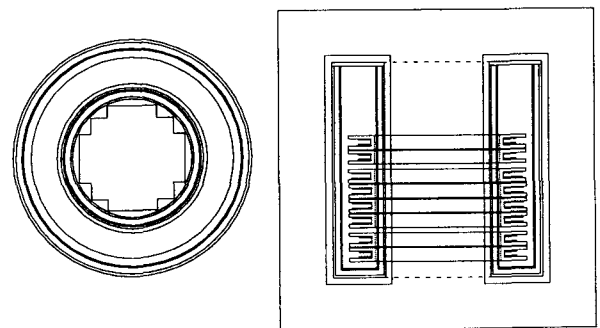


Fig. 5. Total arrangement of the 1MVA HTS transformer

Table 3. Conceptual design values of 1MVA HTS transformer

정 격	용량	1 MVA
	전압	22.9kV/6.6kV
	전류	44A/152A
권 선	턴수	888/256 회
	V/T	25.8 V/T
	선길이	1212/1332 m
	보빈수	4/4 개
	외경	450/489 mm
	내경	378/378 mm
철 심	재질	방향성규소강대
	높이	0.928 m
	너비	0.904 m
	단면적	570 cm ²
	최대자속밀도	1.7 T
극저온용기	재질	FRP
	내경/외경	0.3/0.6 m
	높이	0.621 m

3. 결 론

본 논문에서는 단상 22.9kV 급 1MVA 고온 초전도 변압기의 개념설계를 수행하였다. 고전압 변압기에 유리한 더블 팬케이크 형상의 권선을 채택하여 권선의 권회수, 형상 및 배치를 설계하였고, 철심의 형상 및 철심을 상온에 위치시키기 위한 중공형 극저온 용기의 개략적인 설계를 수행하였다. 고전압 및 사고전압 또는 사고전류등을 고려한 상세한 절연 시스템이나 과냉각 시스템, 전류도입부, 극저온용기의 상세 설계 등은 앞으로 계속 진행될 예정이며 본 논문의 결과는 후에 실제로 제작될 변압기 설계의 기본 모델로 사용될 수 있을 것이다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] Sam P. Mehta, Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming transformers," IEEE Spectrum, Vol.34, No.7, pp.43-49, July, 1997
- [2] Masataka Iwakuma, Kazuo Funaki, et al., "Ac Loss Properties of a 1MVA Single-Phase HTS Power Transformer," IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp. 1482-1485, March, 2001
- [3] 이희준, 차귀수, 이지광, 최경달, 류경우, 한송엽, "10kVA고온초전도변압기의 특성해석 및 제작," 한국초전도·저온공학회논문지 제2권, 제2호, pp.37-43, 2000
- [4] H. J. Lee, G. Cha, J. K. Lee, K. D. Choi, K. W. Ryu, S. Y. Hahn, "Test and Characteristic Analysis of an HTS Power Transformer," IEEE, Transaction on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.1486-1489, 2001
- [5] 이희준, 차귀수, 이지광, 한송엽, 류경우, 최경달, "더블팬케이크 권선형 10kVA 고온초전도변압기," 대한전기학회 논문지, 제50B권, 제2호, pp.65-72, 2001