

1MVA 고온 초전도 변압기 개념 설계 및 3차원 전자장 해석

論 文
52B-1-4

Conceptual Design and 3-D Electromagnetic Analysis of 1MVA HTS Transformer

朴贊培* · 金佑錫** · 崔景達*** · 朱亨吉§ · 洪啓源§§ · 韓松曄§§§

(Chan-Bae Park · Woo-Seok Kim · Kyeong-Dal Choi · Hyeong-Gil Joo · Gye-Won Hong · Song-Yop Hahn)

Abstract - This paper presents conceptual design and 3-D electromagnetic analysis of 1MVA transformer with BSCCO-2223 High Tc Superconducting (HTS) tapes. The rated voltages of each sides of the transformer are 22.9 kV and 6.6 kV, and double pancake windings were adopted. High voltage and Low voltage sides were composed of several double pancake windings. Four HTS tapes were wound in parallel for the windings of low voltage side and were transposed in order to distribute the currents equally in each conductor. The transformer core was designed as a shell type core made of laminated silicon steel plates and the core is separated with the windings by a cryostat with fiberglass Reinforced Plastics(FRP). A sub-cooling system using LN₂ were designed to maintain the coolant temperature of 65K. Finally perpendicular components of magnetic field applied to tapes were calculated 0.24T in the rated operation using 3-D analysis. A real 1MVA HTS transformer will be manufactured in near future based on the design parameters presented in this paper.

Key Words : HTS Transformer, HTS Tape, 더블 팬케이크 권선, 수직자장

1. 서 론

고온 초전도 변압기는 같은 전류용량을 가지는 일반 변압기보다 동손이 거의 없으므로 동기계에 가깝게 만들 수 있다. 결국 철심 재료의 크기와 양을 줄여 전체적인 변압기의 크기와 무게 및 손실을 현격히 줄일 수 있는 장점이 있다. 그리고 기존변압기에 비해 수명이 길고, 절연유를 사용하지 않아 화재의 위험성이 없으며, 친환경적이라는 장점도 있다. 이런 이유로 국내외에서도 고온초전도 변압기에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있는데 그 예를 보면, 유럽의 E.ON이 중심이 되어 630kVA 3상 고온 초전도 변압기를 1997년에 개발했고, 현재는 10MVA 급 변압기를 개발중이다. 미국에서는 Waukesha Electric Systems의 주도로 1998년에 1MVA 단상 고온 초전도 변압기를 개발했으며, 일본에서는 Kyushu 대학에서는 22.9kV급 단상 1MVA 고온 초전도 변압기를 개발하여 일부하 시험을 마친 상태이다[1]. 국내에서는 기초전력공학공동연구소에서 2001년에 3상 10kVA 고온 초전도 변압기를 개발한 바 있다[2][3].

본 논문에서는 현재 국내에서 진행중인 차세대 초전도 용

용기술개발사업 중 중소규모 배전용 초전도 변압기 개발의 1단계로써 22.9kV급 1MVA 고온 초전도 변압기의 개념설계 및 3차원 전자장 해석을 통하여 선재에 걸리는 수직자장의 분포 및 인덕턴스를 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 고온 초전도 선재

표 1 ASC사에서 제조한 BSCCO-2223 고온초전도 선재의 사양

Table 1 Specification of BSCCO-2223 HTS Tape made by American Superconductor Corporation

Specification	Value
Thickness	0.203 [mm]
Width	4.1 [mm]
Critical Current	>100 [A]
Critical Current Density	>12 [kA/cm ²]
Max. Stress	85 [MPa]
Max. Strain	0.15 [%]
Min. Bending Dia.	100 [mm]

변압기에 사용될 선재는 BSCCO-2223 선재로서 임계전류는 자기자장하에서 77K에서 약 115A이다. 표1은 변압기 권선에 사용될 고온 초전도 선재의 자세한 사양을 보여주고, 그림1은 온도와 고온 초전도 선재에 수직방향으로 인가되는 자장에 의한 임계전류의 변화 추이를 보여준다. 이 선재로 더블 팬케이크 형태의 권선을 할 경우 선재에 인가되는 외부 자

* 準 會 員 : 서울대학교 電氣工學部 碩士課程
 ** 正 會 員 : 基礎電力工學共同研究所 전임연구원
 *** 正 會 員 : 韓國産業技術大學校 에너지大學院 副教授
 § 正 會 員 : 韓國産業技術大學校 에너지大學院 助教授
 §§ 正 會 員 : 서울대학교 電氣工學部 教授
 接受日字 : 2002年 10月 22日
 最終完了 : 2002年 12月 2日

장과 선재의 휨에 의한 영향으로 임계전류가 약 60%정도로 감소할 것으로 예상된다[4]. 이렇게 감소된 임계전류는 과냉각 질소를 사용하여 동작온도를 65K 정도로 낮추면 77K에서의 임계전류의 60~70%가량이 회복될 것으로 예상된다.

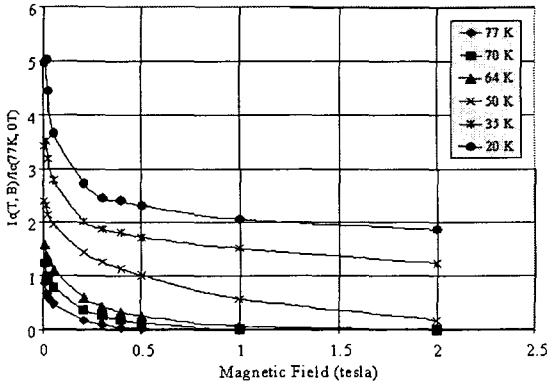


그림 1 온도에 따른 선재 표면에 수직한 자장과 임계전류와의 관계
 Fig. 1 Scaling ratios for temperature and magnetic field perpendicular to tape surface

2.2 고온 초전도 변압기의 설계 사양

본 논문에서 설계하고자 하는 고온 초전도 변압기는 단상 1MVA, 22.9kV/6.6kV 이다. 고온 초전도 변압기의 기본 구조는 일반 변압기의 기본 구조와 크게 다르지 않으며, 철심 설계 기준도 일반 변압기와 같은 기준을 사용했다. 다만, 고온 초전도 변압기의 경우 동손이 거의 없으므로 가능한 권선부의 권회수를 늘리고 철심의 크기를 줄여서 철손도 줄이고 기계의 크기와 무게도 줄이는 2중의 효과를 볼 수 있다[5]. 표2에 설계 목표에 따른 고온 초전도 변압기의 사양을 나타내었다.

표 2 고온 초전도 변압기의 사양
 Table 2 Specification of the HTS transformer

Specification	Value
Phase Number	1
Capacity	1 [MVA]
Rated Primary Voltage	22.9 [kV]
Rated Secondary Voltage	6.6 [kV]
Rated Primary Current	44 [A]
Rated Secondary Current	152 [A]

본 설계에 사용된 권선은 더블 팬케이크 형태의 권선으로서 일반 고압 변압기에서도 많이 사용되고 있는 형태이다. 그림2는 고압측과 저압측 권선을 교호배치 시킨 변압기 권선의 보빈 단면을 보여주고 있다. 본 변압기 설계에서 고압측과 저압측의 권회수를 888회/256회로 결정하였다. 또한 고압측 권선과 저압측 권선을 4개의 더블 팬케이크 권선으로 나누어 각각을 모두 직렬로 연결하는 형태를 택했으며, 저압측의 정격전류는 152A로 고온 초전도 선재의 임계전류값을 많이 초과하므로 4개의 병렬 도체를 사용하기로 하였다. 또한 2개 이상의 선재를 병렬로 권선하는 경우, 각 선재 양단에서의 임피던스 값이 달라져 전류의 불평형이 발생하게 되어 선재에서의 교류손실 증가 뿐 아니라 각 선재가 임계전류를 넘어서는 상황이 발생할

가능성이 있으므로 반드시 전위를 하여 임피던스의 균형을 맞추어야 한다. 따라서 본 변압기 권선에서는 저압측 4개의 더블 팬케이크 권선을 직렬 연결 시 3회 전위를 하여 각 선재의 임피던스를 맞추어 주는 방법을 채택하였다. 또한 철심의 재료는 방향성 규소강대를 사용하여 최대 자속밀도를 약 1.7T가 되도록 결정하였으며, 철심의 형태는 3단 내접 다각형 단면을 가지는 단상 외철형 적철심 구조로 설계하였다. 철심에서는 철손으로 인한 열이 발생하기 때문에 극저온용기의 냉각효율을 높이기 위하여 철심은 상온에 위치시키고 권선만을 극저온용기 안에 위치시키는 방법을 선택하였다. 그림3은 극저온용기와 철심의 형상을 보여준다. 변압기의 결과적인 전체 형상을 그림4에 나타내었으며, 전체적인 설계결과를 표3에 정리하였다

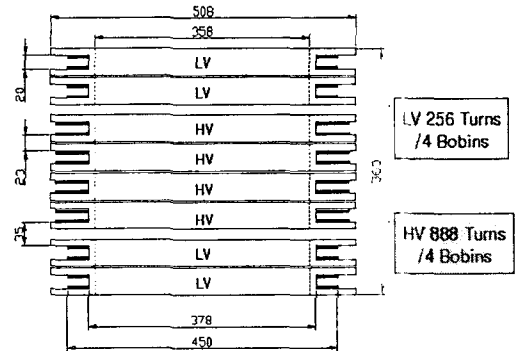


그림 2 더블 팬케이크 권선의 치수와 배열
 Fig. 2 Dimension and arrangement of the double pancake windings

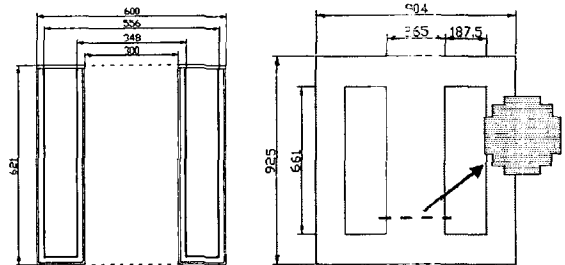


그림 3 냉동조와 외철형 철심의 치수
 Fig. 3 Dimension of the cryostat and the shell type core

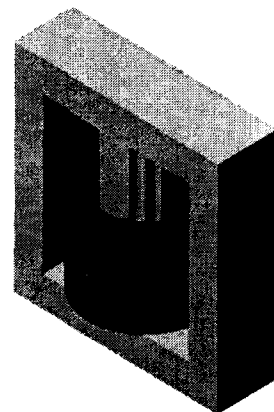


그림 4 1MVA 고온 초전도 변압기의 권선 드립 모델
 Fig. 4 Total arrangement of the 1MVA HTS transformer

표 3 1MVA 고온 초전도 변압기의 개념적 설계표
Table 3 Conceptual design values of 1MVA HTS transformer

Winding	Turns	888 / 256
	V/T	25.8 V/T
	Tape Length	1212 / 1332 m
	Bobin Number	4/4
	Outer Dia.	450 / 489 mm
Core	Inner Dia.	378 / 378 mm
	Material	Non-Grain Oriented Silicon Steel
	Height/Width	0.928 m / 0.904 m
	Cross-Section area	570 cm ²
Cryostat	Max. Flux density	1.7 T
	Material	FRP
	Outer Dia./Inner Dia.	0.3 / 0.6 m
	Height	0.621 m

2.3 1MVA 고온 초전도 변압기의 3차원 해석

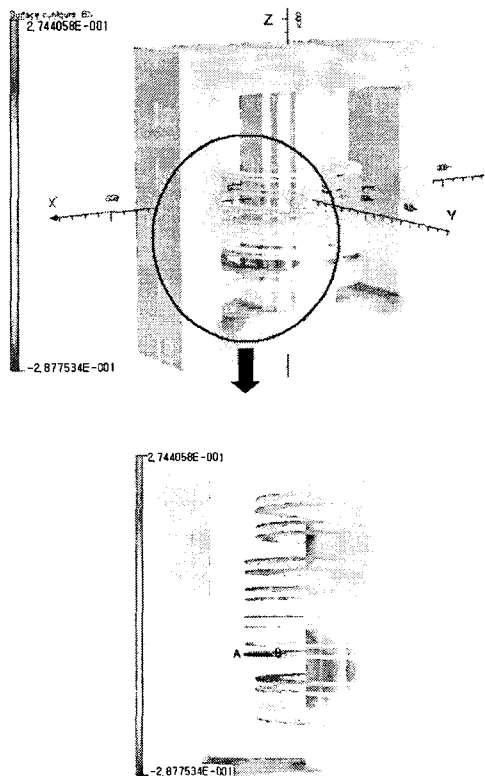


그림 5 1MVA 고온 초전도 변압기 권선에서의 B_x 분포
Fig. 5 B_x distribution of 1MVA HTS transformer

본 논문에서 설계한 22.9kV 급 1MVA 고온초전도 변압기의 3차원 전자장 해석을 통하여 고온 초전도 선재에 걸리는 수직자장 및 인덕턴스를 계산하였다. 그림5은 변압기의 정격 동작 시 철심 및 고온 초전도 선재에 걸리는 수직자장의 분포를 보여주며, 그림6은 변압기에 정격전류를 흘렸을 때 고압측 선재에 걸리는 수직자장의 분포를 보여준다. 저압측 권선과 고압측 권선의 교호 배치로 인해 두 권선이 서로 이웃하는 부분에서 누설 자속이 집중되는 것을 볼 수 있다. 이는 고압측 권선과 저압측 권선에 흐르는 전류의 방향이 다르기 때문이며, 그 값은 약 0.24T에 이른다. 이 값은

상당히 큰 자장 값으로 고온초전도 선재의 임계전류를 제한하는 요인이 될 것이다. 따라서 선재에 걸리는 수직 자장을 줄이기 위해 고압측과 저압측 권선이 만나는 부분에 고온초전도체를 이용하여 수직자장에 대한 차폐효과를 연구중에 있으며, 그밖에 다양한 방법도 모색하고 있다. 표4 는 본 논문에서 설계한 고온초전도 변압기의 3차원 인덕턴스 계산 결과를 보여준다. 인덕턴스 계산 방법은 Energy Method를 사용하였다[6].

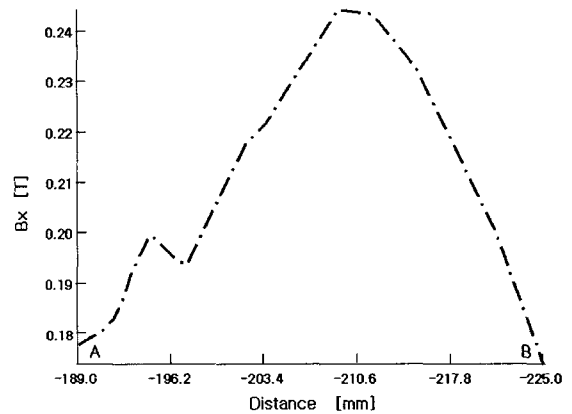


그림 6 고압 권선에서의 수직자장의 분포
Fig. 6 Distribution of perpendicular B on the high voltage winding

표 4 인덕턴스 계산 결과
Table 4 Inductance calculation results

Self inductance	Prim.	48.33 [H]
	Second.	4.00 [H]
Mutual inductance		13.86 [H]
Leakage inductance	Prim.	0.253 [H]
	Second.	0.053 [H]

3. 결 론

본 논문에서는 단상 22.9kV급 1MVA 고온 초전도 변압기의 개념설계와 3차원 전자장 해석을 수행하였다. 더블 팬케이크 형태의 권선을 채택하여 권선의 권회수, 형상 및 배치를 설계하였고, 철심의 형상 및 철심을 상온에 위치시키기 위한 증공형 극저온 용기의 개략적인 설계를 수행하였다. 그리고 본 논문에서 설계한 고온초전도 변압기의 3차원 전자장 해석을 통해 선재에 걸리는 수직 자장의 분포를 살펴보고, 변압기 권선의 인덕턴스를 계산해 보았다. 고온초전도 선재에 걸리는 수직 자장은 고압측과 저압측 권선이 인접한 부분에서 최고 0.24T정도였으며, 이를 줄이기 위한 다양한 방법을 연구 중에 있다.

앞으로 고전압 및 사고전압 또는 사고 전류 등을 고려한 상세한 절연 시스템이나 과냉각 시스템, 전류도입부, 극저온 용기의 상세 설계 등을 계속해서 수행할 예정이며, 이에 맞추어 선재에 걸리는 수직 자장을 줄이기 위한 더블 팬케이크 권선 배치의 최적화 및 전압원을 이용한 모델 해석도 같이 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Masataka Iwakuma, Kazuo Funaki, et al., "Ac Loss Properties of a 1MVA Single-Phase HTS Power Transformer," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol.11, No.1, pp.1482-1485, March 2001.
- [2] 이회준, 차귀수, 이지광, 최경달, 류경우, 한송엽, "10kVA고온 초전도 변압기의 특성해석 및 제작," 한국초전도·저온공학회 논문지 제2권, 제2호, pp.37-43, 2000.
- [3] 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, Trans. Appl. Supercond., Vol.11, No.1, pp.1486-1489, 2001.
- [4] 이회준, 차귀수, 이지광, 한송엽, 류 경우, 최경달, "더블 팬케이크 권선형 10kVA 고온초전도변압기," 대한전기학회 논문지, 제50B권, 제2호, pp.65-72, 2001.
- [5] Sam P. Mehta, Nicola Aversa, and Michael S. Walker, "Transforming transformers," IEEE Spectrum, Vol.34, No.7, pp.43-49, July, 1997.
- [6] 박찬배, 김우석, 한송엽, 최경달, 주형길, 홍계원, "변압기용 권선의 전자장 해석," 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp.225-227, 2002

저자 소개



박찬배 (朴贊培)

1975년 10월 23일생. 2001년 충남대 전기공학과 졸업. 2001년~현재 서울대 대학원 전기공학부 석사과정
Tel : 02-880-7993, Fax : 02-883-0827
E-mail : coolship1975@yahoo.co.kr



김우석 (金佑錫)

1970년 6월 12일생. 1996년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학석사). 2002년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박사). 현재 기초전력공학공동연구소 전임연구원.
Tel : 02-880-7993, Fax : 02-883-0827
E-mail : ottor@eesri.snu.ac.kr



최경달 (崔景達)

1962년 2월 12일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국산업기술대 에너지대학원 부교수.
Tel : 031-496-8263, Fax : 031-496-8279
E-mail : choidal@kpu.ac.kr



주형길 (朱亨吉)

1964년 10월 08일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 한국과학기술원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국산업기술대 에너지대학원 조교수.
Tel : 031-496-8249, Fax : 031-496-8259
E-mail : hgjoo@kpu.ac.kr



홍계원 (洪啓源)

1956년 4월 3일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 한국과학기술원 전기공학과 졸업(공학석사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국산업기술대 에너지대학원 조교수.
Tel : 031-496-8270, Fax : 031-496-8279
E-mail : gwhong@kpu.ac.kr



한송엽 (韓松暉)

1939년 3월 14일생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1967년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1979년 불란서 로렌 공과대학원 졸업(공학박사). 현재 서울대 전기공학부 교수.
Tel : 02-880-7241, Fax : 02-883-0827
E-mail : syhahn@plaza.snu.ac.kr