

대전류용 고온초전도 변압기의 설계 및 제작

김영일*, 이세연*, 박상호*, 함일규*, 이지광**, 한승엽***, 최경달*
한국산업기술대학교*, 우석대학교**, 서울대학교***

Design and fabrication for large current capacity of high temperature superconducting transformer

Yungil Kim*, Seyeon Lee*, Sang Ho Park*, Il Kyu Ham*, Ji-Kwang Lee**, Song Yop Hahn***, Kyeongdal Choi*
Korea Polytechnic University*, Woosuk University**, Seoul National University***

Abstract - 본 논문은 2세대 고온 초전도 선재를 이용한 대전류용 고온 초전도 변압기의 설계 및 제작에 관한 연구결과이다. 대전류용 변압기는 154 kV, 단상 33 MVA를 기준으로 기 설계된 초전도 변압기의 요소 기술 평가를 위한 것으로 초전도 변압기의 제작의 중요 요소기술 중 하나인 저압권선용 초전도 선재의 대전류 통전 특성평가와 초전도 권선의 교류손실 저감효과에 관한 검증을 위해 설계 및 제작 되었다. 이러한 대전류용 변압기의 설계와 초전도 권선의 제작, 시험을 통해 실제 100 MVA 초전도 변압기 설계의 신뢰성과 대전류 통전용 초전도 선재의 성능평가를 확인하였다.

1. 서 론

2009년 이후 2세대 고온초전도 선재인 YBCO CC의 생산이 본격적으로 시작되면서 최근까지 이를 이용한 다양한 연구가 진행되고 있다. 그 중 초전도 전력기는 최근의 전력산업이 요구하고 있는 친환경, 고효율에 적합한 기기로 각광 받으며 국내외에서 폭넓은 연구가 진행되고 있다. 대표적으로 초전도 케이블과 초전도 모터의 경우 이미 연구개발을 마무리한 상태로 상용화를 위한 실증시험을 실시하고 있다[1]-[3]. 초전도 변압기의 경우 국내에서는 프론티어 사업을 통해 154kV, 100 MVA급 초전도 변압기의 개발을 목표로 지속적인 연구를 수행해왔고, 외국의 경우 한동안 중단 되었던 초전도 변압기 연구가 2009년 이후 다시 시작되고 있는 상황이다. 초전도 변압기의 개발을 위한 여러 요소기술 중 대전류 통전 및 저손실 선재의 개발은 극저온 절연기술과 더불어 가장 중요한 요소 기술 중 하나이다. 초전도 선재는 교류운전 조건에서는 초전도체 고유의 자화손실이 발생하기 때문에 변압기의 효율을 높이고 상용화를 위한 경쟁력을 얻기 위해서는 반드시 저손실 선재의 개발이 선행되어야 한다. 또한 저압 권선에 사용이 가능한 높은 통전용량을 가지는 초전도 선재의 개발 또한 초전도 변압기의 개발을 위해 선행되어야 하는 기술이다. 따라서 본 논문에서는 100 MVA 변압기의 제작을 위해 개발된 저손실, 대전류 통전용 초전도 연속전위도체(Continuously Transposed Coated Conductors, CTCC)를 적용한 대전류용 변압기를 설계하고 제작하여 100 MVA 초전도 변압기 설계의 타당성과 초전도 연속전위도체의 성능평가를 진행하였다.

2. 본 론

2.1 대전류용 변압기의 설계 목표

대전류용 초전도 변압기는 기존에 설계된 154kV, 100 MVA 초전도 변압기의 권선과 동일한 CTCC를 사용하여 설계하고, 변압기 권선에 의해 CTCC에 인가되는 최대 수직방향 자속밀도와 동일한 자장 환경을 가지도록 설계되었다. 154 kV, 100 MVA 초전도 변압기의 제원을 표 1에 나타내었다.[4] 154 kV, 100 MVA 초전도 변압기의 경우 초전도 권선부에 인가되는 최대 수직방향 자속밀도의 크기는 0.28 T 이다. 대전류용 변압기의 2차 전압은 실험실에서의 실험을 기준으로 220 V로 결정하였고 2차 전류는 2522 A이다. 1차 전압은 1,330 V, 1차 전류는 417 A이다.

<표 1> 3상 154 kV 100 MVA 송전급 초전도 변압기의 제원

General property		Capacity	Value
Winding	Primary	Voltage/current Winding type	154 kV/0.37 kA Continuous disk type
	Secondary	Voltage/current Winding type	22.9 kV/2.5 kA Layer type
	Tertiary	Voltage/current Winding type	6.6 kV/1.6 kA Layer type
	Core	Magnetic field	1.4 T

<표 2> 대전류용 고온초전도 변압기의 정격 제원

1차측 전압	1,330 V _{rms}
1차측 전류	417 A _{rms}
2차측 전압	220 V _{rms}
2차측 전류	2522 A _{rms}
변압기 용량	555 kVA

대전류용 변압기의 경우 CTCC의 전류 통전 시험을 목표로 한 단상 변압기이므로 3차 권선은 고려하지 않고, 1차 권선의 Tap권선 없이 설계되었다. 철심의 자속밀도는 1.6 T로 설계하였고, 초전도 선재에 인가되는 최대 수직방향 자속밀도의 크기는 154 kV 100 MVA 변압기와 동일한 수준인 0.28 T가 되도록 설계를 진행하였다. 고, 저압측 권선에 사용된 CTCC의 이용률을 70 % 이하가 되도록 설계를 진행하였다. 설계 목표 정격 사항은 표 2에 나타내었다.

2.2 대전류용 변압기의 전기 설계

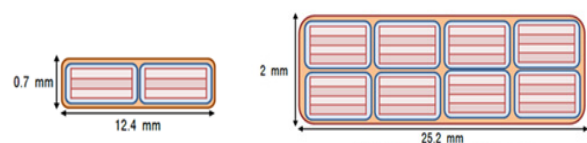
변압기 설계는 2차 권회수의 경우 턴 간 전압을 가정한 후 2차 권회수를 가정해 최종 턴 간 전압을 결정한 후 다시 1차 권회수를 결정하여 전압 오차율을 확인하는 순서로 설계를 진행하였다. 실제 실험을 위한 실험실 환경과 목표하는 2차 전류가 정해져있기 때문에 이를 감안한 변압기의 변압비를 결정하여 설계를 진행하였다. 2차측 턴 간 전압을 19 V/T로 가정하면 2차 권회수는 220 / 19 = 11.58 회로 계산된다. 따라서 2차측 권회수는 12 회로 결정하고 턴 간 전압은 19 V/T로 확정하였다. 1차 권회수의 경우 1330 / 19 = 70 회로 결정하였다. 대전류용 변압기의 경우 1차측이 개통과 무관하고 변압기의 목적이 일반 변압기와 다르기 때문에 전압 오차율은 고려하지 않고 설계하였다.

2.3 대전류 변압기용 CTCC 설계

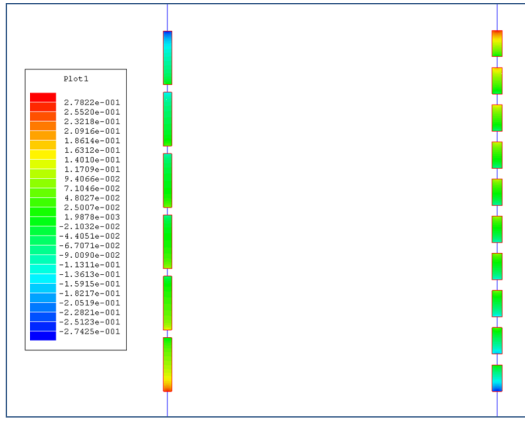
대전류용 변압기의 1차 정격전류는 420 Arms(594 Apeak) 이고, 2차측 정격 전류는 2522 Arms(3567 Apeak) 이다. 변압기 권선에 사용될 CTCC의 경우 설계목표에 따라 선재 이용률은 70 % 이하가 되도록 설계 하였다. 현재 판매되고 있는 일반적인 2세대 고온초전도 선재의 경우 77 K 온도와 자기 자기장 환경에서 약 250 A/cm 내외의 임계전류를 가진다. 철심이 있는 154 kV 초전도 변압기의 권선에 인가되는 최대 수직방향 자속밀도의 크기는 0.28 T 이고, 운전온도를 높은 전류 통전 효율을 가지도록 69 K로 가정하면 초전도 선재의 임계전류는 500 A/cm 이다. 따라서 CTCC 소선의 경우 폭이 5.3 mm이므로 각 소선 당 185.5 A의 임계전류를 가진다. 따라서 1차 권선용 CTCC의 소선 개수는 안정적 운전을 위한 전류 통전의 여유분을 고려해 6개로 결정하였고, 2차 권선용 CTCC의 소선 개수는 마찬가지로 통전 여유를 고려해 32 개로 결정하였다. 1차, 2차 권선에 사용될 CTCC의 단면도를 그림 1에 나타내었다.

2.4 대전류용 변압기의 권선 구성

설계된 대전류용 변압기의 1차 권선의 권회수는 70 회이고, 2차 권선



<그림 1> 대전류용 변압기 권선용 CTCC의 단면도



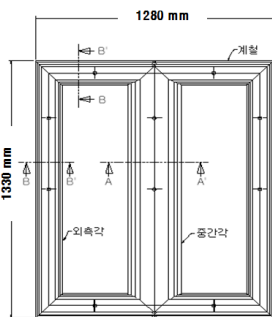
〈그림 2〉 대전류용 변압기의 2 차원 자장해석결과

은 12 회이다. 변압기 권선의 높이는 cryostat의 형태와 철심의 형태를 감안하여 1, 2차 축이 동일한 높이가 되도록 배치하였고, 선체에 인가되는 수직방향 자속밀도의 크기가 154 kV 변압기와 동일할 수 있도록 권선사이의 거리를 검토하여 결정하였다. 본 변압기의 경우 턴 간, 권선 간 접압이 높지 않기 때문에 권선사이의 거리나 변압기 턴 간 거리가 절연에 중요한 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다. 권선을 구성하는 CTCC의 경우 CTCC 소선들이 모두 각각 절연되고, CTCC 외부 또한 절연되어 있기 때문에 극저온 절연 부분은 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단하고 권선의 구성을 진행하였다. 권선 구성 결과 1차 권선의 경우 내측 지름이 764 mm이고, 층 간 5 mm의 간격을 두고 10 층, 7 턴으로 권회수는 70 회이다. 2차 권선의 경우 내측 지름이 444 mm이고, 층 간 3.5 mm의 간격을 두고 6 층 2 턴으로 구성되어 권회수는 12 회이다.

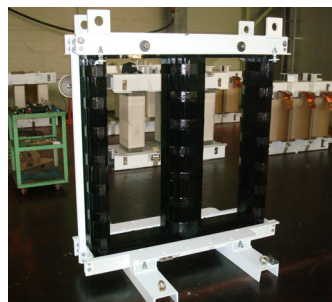
각 권선별 초전도 선체의 사용량은 CTCC 소선 기준으로 1차 권선의 경우 약 170 m의 CTCC 소선 6 가닥이 소요되고, 2차 권선의 경우 약 17 m의 CTCC 소선 32 가닥이 소요된다. 그림 2에 수치해석을 통한 권선에 인가되는 자속밀도 분포를 나타내었다. CTCC 권선부에 인가되는 최대 수직방향 자속밀도는 약 0.278 T로 설계 조건을 만족하는 것을 확인하였다. 제작된 권선의 모습을 그림 4에 나타내었다.

2.5 철심과 극저온 용기의 제작

대전류용 변압기의 철심은 권선부가 철심의 안쪽에 위치한 단상 3각 구조의 외철형 형태로 설계되었다. 설계된 철심의 주요 제원과 제작된 철심의 형태를 표 3과 그림 3에 각각 나타내었다. 대전류용 초전도 변압기를 냉각하는데 사용될 극저온용기는 초전도 권선의 안정적인 시험을 위한 열설계 및 냉각계통 설계와 진공계통 설계, 장비 안정성을 유지할 수 있는 구조를 기준으로 설계되었으며, 사용온도는 66-88 K, 용기 진공도는 5×10^{-5} [Torr]이다.

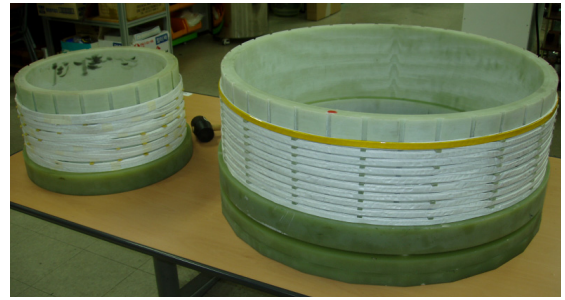


〈그림 3〉 대전류용 변압기 철심

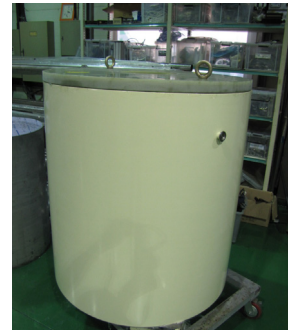
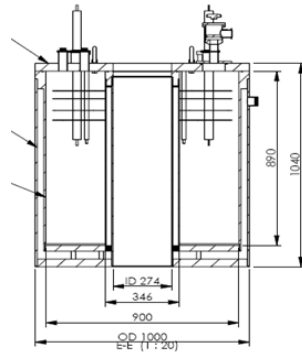


〈표 3〉 대전류용 변압기 철심 제원

철심 형태	외철형 단상 3 각 구조
철심 단면적	503.04 cm ²
철심 자속밀도	1.6 T
철심 재료	PG-10 규소강판 (Thickness : 0.3 mm)
적층 방식	Symmetric-D
철심 단수	5 단



〈그림 4〉 대전류 변압기용 권선부



〈그림 5〉 대전류 변압기용 극저온 용기

3. 결 론

본 논문에서는 대전류용 초전도 변압기의 설계를 진행하고, 설계된 변압기 주요 부품의 제작을 진행하였다. 대전류용 변압기는 154 kV, 100 MVA 초전도 변압기의 제작에 앞서 설계에 적용된 대전류 통전 기술을 검증하고, 교류손실 저감효과의 확인을 목표로 설계, 제작되었다. 아직까지는 설계 및 제작을 진행하는 단계로 변압기의 특성에 관한 실험은 진행하지 못 하였으나, 초전도 변압기를 구성하는 주요 요소인 초전도 권선부와 극저온 용기 그리고 철심의 설계 및 제작을 완료하였다. 추후 결함을 완료한 후 대전류 통전 시험 및 교류손실 측정을 실시하여 기 설계된 154 kV, 100 MVA 변압기의 설계를 검증하고 초전도 변압기의 설계 및 제작을 위한 자료로 활용할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] Woo-Seok Kim, Song-yop Hahn, Kyeong-Dal Choi, Hyeong-Gil Joo and Gey-won Hong "1MVA 고온 초전도 변압기 개념설계", 한국 초전도학회, 4권 1호, 86-89, 2002
 [2] 이승욱, 김우석, 한송엽, 황영인, 최경달 "3차 권선을 고려한 단상 33 MVA 고온초전도 변압기의 개념설계", 한국초전도학회, 7권 2호, 162-166, 2006
 [3] J.H. Choi, S.W. Lee, M.J. Park, H.G. Joo, J.H. Han, K.D. Choi, S.Y. Hahn "Design of 154 kV class 100 MVA 3 phase HTS transformer on a common magnetic core", Physica C, 463-465, 1223-1228, 2007
 [4] M. Wilson, Superconducting Magnet, Clarendon Press, New York, 1983.
 [5] E.H. Brandt and M. Indenborn, "Type-II super-conducto strip with current in a perpendicular magnetic field," Physical Review B, Vol. 48, pp. 12893-12906, November, 1993.
 [6] S.H. Kim, et al., "Characteristic Test of a 1MVA Single Phase HTS Transformer with Concentricallly Arranged Windings", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, vol, 13, No. 2, pp. 2214-2217, 2005.
 [7] Woo-seok Kim, et al., "design of 1MVA HTS transformer with natural convention cooling system," EUCAS 2003, September, 2003.