

1MVA 초전도 변압기 전류 통전 시험

박정호*, 송희석*, 김우석**, 김성훈***, 이동근****, 최경달****
*효성중공업연구소, **기초전력공학공동연구소,
***서울대학교 전기·컴퓨터공학부,
****한국산업기술대학교 에너지대학원

Transportation Current Test for 1MVA HTS Transformer

Jungho Park*, Heesuck Song*, Woo-Seok Kim**, Sung-Hoon Kim***, Dong-Kun Lee****, Kyeong-Dal Choi****

*Heavy Industries R&D Center, Hyosung Corporation,

**Electrical Engineering and Science Research Center,

***School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University

****Graduate School of Energy, Korea Polytechnic University,

pjh01076@hyosung.com

Abstract - We manufactured double pancake type windings with BSCCO wire for 1MVA HTS transformer. To verify cracks of HTS wire and performance of manufactured windings, the transportation current was measured. In this paper, we present result of the transportation current test as a DC current and compare a drop of current performance of HTS wire due to tension and rounding during the manufacturing with technical data. We obtained good results and this will be useful for another manufacturing of HTS winding.

1. 서 론

고온 초전도선재의 지속적인 개발과 성능향상으로 인하여, 현재 대용량화, 경량화 및 효율상승의 등의 장점이 있는 초전도 기술을 이용한 응용 기기를 개발하기 위하여 전세계적으로 활발히 연구가 수행되고 있다. 특히, 전력 기기 부분에서 연구가 활발히 수행중이며, 초전도 변압기는 전력 기기의 핵심 기기로서, 국내에서는 현재 과학기술부가 주도하는 21C 프론티어연구개발사업의 일환으로 차세대 초전도응용기술개발사업 중 중소규모 배전용 초전도 변압기 개발이 진행중이다.

본 논문은 Bi2223 HTS 선재를 사용하여 제작된 1MVA 초전도 변압기의 권선 부분에 대하여 초전도 권선 제작 중 발생할 수 있는 초전도 선재의 손상 유무를 확인하고, 제작된 초전도 권선의 전류 통전 능력을 확인하고자 전류 통전 시험을 실시하였다.

또한, 시험 결과를 토대로 실제 부하조건에서의 전류 통전 능력을 예측하였고, 초전도 권선 제작시 장력 및 굽힘 정도에 의한 영향을 검토하였다.

제작된 초전도 권선은 철심 및 단철의 조립 후 AC Loss 시험, 변압기 특성 시험 및 절연시험을 실시할 예정이다.

2. 본 론

2.1 고온초전도 변압기의 사양

제작된 변압기는 용량은 단상 1MVA이며 전압은 고압측이 22.9kV이고 저압측이 6.6kV이다. 표 1에 설계 목표로 하는 고온초전도 변압기의 사양을 나타내었다.

Table1. Specification of the HTS transformer

Specification	Value
Phase	1
Capacity	1 [MVA]
Rated voltage	22.9/6.6 [kV]
Rated Current	44/152 [A]

이 변압기에 사용된 권선은 더블 팬케이크 형태의 권선이며, 하나의 권선 보빈내에 초전도 선재의 접합부분이 없고, 저압 권선의 전위를 쉽게 할 수 있는 특징이 있다.

고압 권선과 저압 권선은 교호배치 하였고, 그림 1에 전체 권선의 배치를 나타내었다.

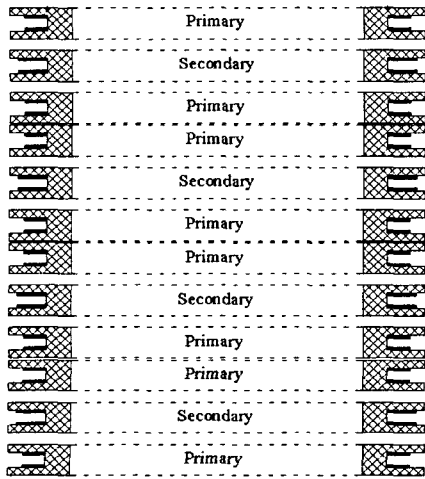


Fig. 1. Arrangement of the double pancake windings for 1MVA HTS Transformer

각 권선 보빈은 그림 1처럼 각 보빈별로 분리되어 있으며, 권선의 단락 및 절연파괴가 발생하였을 경우 전체 권선의 교체 없이 고장이 난 보빈만을 교체할 수 있는 특징이 있다.

2.2 전류 통전 시험 준비

제작된 초전도 권선은 원형이며, 전자 기계력을 견디기 위하여, 초전도 선재에 장력을 주어 권선하였다. 이러한, 제작 방법은 초전도 선재의 굽힘과 장력이 주어지게 되어 초전도 선재의 성능에 영향을 미치게 된다.

따라서, 초전도 권선의 성능을 확인하고, 제작상의 실수로 인하여 초전도 선재의 파손 유무를 확인하기 위하여 전류 통전 시험을 실시하였으며, 그림 2에 시험 장치도를 보인다.

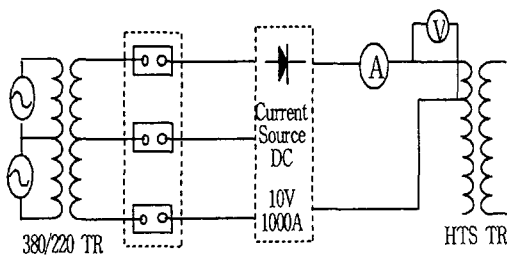


Fig. 2. Electric circuit for the transportation current test of the HTS transformer

인가 전류원은 DC Current Source를 이용하였으며, 통전 능력을 확인하기 위해 초전도 선재에 극저온용 신호선을 Supersolder를 이용하여 용접 하였다.

고압 권선은 권선 보빈별로 총 8번 시험하였으며, 저압 권선의 경우는 4가닥의 초전도 선재가 권선간에 서로 전위되어 있으므로, 초전도 선재 1가닥씩 4개 보빈을 한번에 시험하였다.

그림 3에 저압 권선의 시험 결선도를 보인다.

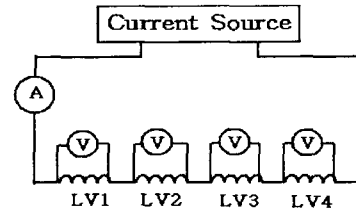


Fig. 3. Electric circuit for the LV winding test

2.3 전류 통전 시험 결과

액체질소를 극저온용기에 투입한 후 전류 통전 시험을 실시하였다. 임계 전류 기준치는 저온 초전도 선재의 경우와 동일하게 $1[\mu\text{V}/\text{cm}]$ 으로 하였으며, 고압 권선은 보빈별 전압이 $17.4[\text{mV}]$ 이상, 저압 권선은 보빈별 전압이 $10[\text{mV}]$ 이상으로 하였다.

고압 권선의 임계전류는 8개 보빈 중 7개가 $83.7[\text{A}]$ 이상이었으며, 저압 권선의 임계전류는 $100[\text{A}]$ 이상이었다. 그러나, 상부 첫 번째 고압 권선은 신호선 전압이 DC전류가 $120[\text{A}]$ 이상 흘러도 나타나지 않았으며, 추후 변압비 시험을 통하여 원인을 분석할 예정이다. 시험은 DC전류를 $5[\text{A}]$ 씩 단계적으로 인가하였으며, $60[\text{A}]$ 이상에서부터 $0.1[\text{mV}]$ 의 전압이 표시되기 시작하였다.

Table.2. Result of the HV winding test

H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	
[A]	[mV]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	
120↑	0.3	89.6	86.3	93.7	93.7	84.1	88.7	83.7

저압권선도 고압권선과 동일하게 DC전류를 $5[\text{A}]$ 씩 단계적으로 인가하였으며, 4개의 저압 권선 보빈은 전류가 단계적으로 변화될 때마다 권선 부위의 진동현상이 발생하였다. 이는 R이 존재하지 않고 L만 존재하는 회로이고, $v = -d\phi/dt$ 의 전압이 발생하였기 때문이다.

Table 3. Result of the LV winding test

		초전도 선재			
		#1 [A]	#2 [A]	#3 [A]	#4 [A]
권선	LV1	103.6	110.0	109.7	104.3
	LV2	112.9	112.5	104.3	112.6
	LV3	108.7	115.0	117.4	117.8
	LV4	95.5	106.5	108.0	99.9

저압 권선은 자장의 영향으로 4개의 저압보빈 임계전류가 다르게 나타났으며, 임계전류는 LV4 → LV1 → LV3 → LV2의 순서로 측정하였다.

2.4 초전도 권선 제작상의 영향 검토

초전도 권선 제작에 따른 초전도 선재 성능에의 영향을 검토하기 위하여, 시험시 통전된 DC 전류를 이용하여 자장을 해석하였다. 또한 A사의 자장-임계전류 특성곡선과의 비교를 통하여 임계전류에 미치는 영향을 분석하였다.

자장 해석시 DC 전류원은 고압권선은 83.7[A], 저압권선은 100[A]로 하였으며, 해석 결과를 그림 4에 보인다.

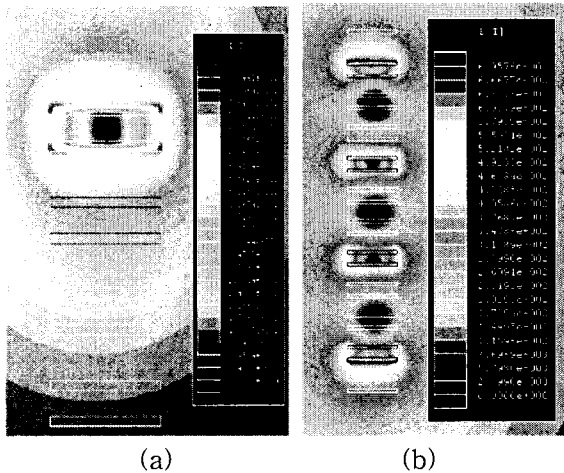


Fig. 4. Calculated magnetic field in the transportation current. (a) HV winding and (b) LV winding.

임계전류에 영향을 크게 미치는 것은 초전도 선재로 투입되는 수직자장이다. 해석된 영역에서 최대수직자장은 고압권선이 710[G], 저압권선은 660[G]이다.

초전도선재가 수직자장에서 임계전류 감소정도는 A사의 그래프를 이용하여 계산하였으며, 표 4에 계산된 결과를 보인다.

Table 4. Measured I_c and calculating I_c in perpendicular magnetic field at the transportation current test condition

권선	전류 구분	수직 자장	임계전류 (77K)
고압	측정된 임계 전류	710[G]	83.7[A]
	계산된 임계 전류(115A)	710[G]	69[A]
	계산된 임계 전류(125A)	710[G]	75[A]
저압	측정된 임계 전류	660[G]	100[A]
	계산된 임계 전류(115A)	660[G]	74.75[A]
	계산된 임계 전류(125A)	660[G]	81.25[A]

표 4에서 알 수 있듯이, 측정된 임계전류가 계산된 임계전류보다 높음을 알 수 있다. 이는, A사의 그래프가 임계전류의 최소값을 기준한 것이고, 임계전류의 감소율 또한 최악의 조건을 고려하였기 때문으로 측정된 임계전류가 계산치 보

다 많다고 판단된다. 또한, 실제 제작에 사용된 초전도 선재의 평균 임계전류는 125[A]이상이고, 최대 140[A]도 흐를 수 있기 때문에 측정된 임계전류와 직접적으로 비교할 때 그 값은 차이가 난다.

고압권선보다 저압권선이 실제 측정된 임계전류가 계산된 임계전류보다 여유율이 높는데, 이는 저압권선은 4개의 초전도 선재가 병렬로 구성되고 있어, 전류 통전 시험시, 측정되는 선재 이외의 3개의 선재들에 의한 자기 차폐 효과가 나타나기 때문으로 판단된다.

시험결과를 비교 분석한 결과, 초전도 권선 제작과정에서 발생한 굽힘과, 장력인가로 인한 초전도 선재의 성능저하는 없는 것으로 판단되며, 이는 향후 초전도 권선 제작시 제작조건을 결정하는데 유용한 정보를 제공한다.

2.5 초전도 변압기 운전조건에서의 전류 통전 능력 예측

철심이 조립되고 AC 전류가 인가되었을 경우 제작된 초전도 권선의 전류 통전능력을 예측하였다. 초전도 변압기의 실제 냉각조건은 과냉각 방식으로 65[K]으로 운전할 예정이어서, 전류 통전 능력이 77[K]으로 예측할 때 보다 좋을 것으로 판단되나, 극저온 시스템에서 액체질소의 온도가 상승할 경우, 초전도 권선의 전류 통전 능력을 확인함으로써 안전성을 판단할 수 있다.

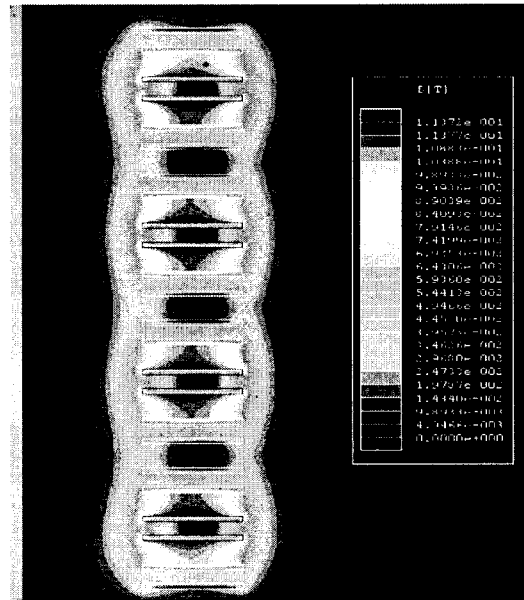


Fig. 5. Calculated magnetic field in real load

정격전류가 인가되었을 경우 자장해석은 그림 5와 같다. 최대 수직자장은 고저압 사이에 존재하며, 1,185[G]정도이다. 77[K]에서 초전도 권선의 임계 전류는 초전도 선재의 성능이 115[A](at Self Field)일 경우 46[A]이상으로 예측되며, 125[A](at Self Field)에서는 50[A]이상으로 예상된다.

이는 설계된 초전도 변압기의 고압 정격전류

44[A], 저압 정격전류 38[A]이상으로써, 77[K]으로 운전할 경우에도 변압기의 운전이 가능함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 초전도 권선의 제작 후 초전도 선재의 성능변화 및 초전도 권선의 파손유무를 전류 통전 시험을 통하여 확인하였다.

전류 통전 시험 결과, 제작된 초전도 권선은 제작과정에서 파손이 없으며, 만족할 만한 성능을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이를 통하여, 초전도 선재의 제작방법이 적절하였음을 확인하였으며, 향후 초전도 권선 작업시 활용될 수 있을 것이다. 초전도 변압기의 운전온도가 65[K]가 아닌 77[K]으로 운전될 경우에 대해서도 초전도 변압기의 성능이 유지될 수 있음을 확인하였다.

향후, 제작된 초전도 권선은 4가닥 도체를 사용한 저압권선의 전류 분배시험을 실시할 예정이며, AC Loss시험, 변압기 특성 시험 및 절연시험을 실시할 예정이다.

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 transformer," IEEE Spectrum, Vol. 34, No. 7, pp.43-49, July, 1997
- [2] Kaxuo Funaki, Masataka, Kazuhiro Kajikwa, "Development of a 22kV/6.9kV Single-Phase Model for a 3MVA HTS Power Transformer", IEEE Transactions on Applied superconductivity Vol. 11, No. 1, March 2001
- [3] K Funaki and M Iwakuma, "Recent activities for applications to HTS Transformers in Japan", Supercond. Sci. Technol. 13(2000), pp 60-67
- [4] 이희준, 차귀수, 이지광, 최경달, 류경우, 한송엽, "10kVA 고온초전도변압기의 특성해석 및 제작," 한국 초전도·저온공학회논문지 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] 김우석, 한송엽, 최경달, 주형길, 홍계원, "1MVA 고온초전도 변압기 개념설계," KIASC Conference 2002, pp.233-236, 2002
- [7] "Bi-2223 High Reinforced Wire Fact Sheet", AMSC