

소형초전도변압기의 전기적 기초특성

오 봉환[○], 한 태희, 나 완수, 조 전욱, 이 언용, 류 강식
(한국전기연구소 초전도응용연구사업팀)

Fundamental characteristics of a small superconducting transformer

Bong-Hwan Oh, Tae-Hee Han, Wan-Soo Nah, Jeon-Wook Cho, Eon-Yong Lee, Kang-Sik Ryu
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

ABSTRACT To demonstrate the applicability of superconductors to electric power machines, the authors made and tested a small single-phase superconducting transformer. The aim of the study was to determine the fundamental properties of superconducting transformer. Therefore the superconducting transformer has a simple structure, i.e. the high voltage to low one ratio is 2:1 and the iron core is immersed in liquid helium. Fundamental characteristics are obtained through no-load and short-circuit tests. In this paper, the experimental results are described.

1. 서 론

초전도기술을 변압기에 적용하고자 하는 연구는 1960년대초⁽¹⁾ 부터 시작되었으나 당시의 연구 결과는 초전도화에 의해 얻어지는 이점이 작다는 결론이었다. 그러나, 1983년 프랑스에서 50/60Hz에서 사용해도 손실이 극히 적은 교류용 극세다심선재를 개발한⁽²⁾ 이후, 초전도변압기의 연구가 활발히 진행되고 있다.

초전도선의 특징은 대전류밀도와 저손실이라 해도 좋을 것이다. 동선에 비해서 초전도선은, 단면적이 같다면 전류밀도를 수십~수백배 크게할 수 있다. 즉 상전도변압기에 비해 초전도 변압기의 전류밀도를 수십~수백배로 할 수 있다. 또한, 전류 밀도가 같다면 선재의 단면적을 그만큼 작게할 수 있으므로 변압기의 중량을 대폭 가볍게할 수 있다.

본 연구의 목적은, 초전도변압기의 기초연구로서 현재 개발되어 있는 교류용 NbTi극세다심 초전도선재를 권선으로 이용한 소형 초전도변압기를 제작하여, 그의 특성을 평가함과 동시에 대용량화에서의 가능성을 검토하고자 함이다. 본 논문에서는 제작한 초전도변압기의 무부하시험과 단락시험의 결과에 대해서 기술한다.

2. 초전도선재 및 변압기 구조

2.1 권선용 초전도선재

교압축 및 저압축 권선에 이용하는 초전도선재는 일본 FURUKAWA사에서 제작한 교류용 극세다심선재로서, 교류손실을 줄이기 위해 필라멘트 직경이 1 μ m이하로 되어 있다. 또한, 캐이블은 NbTi극세다심 초전도소선(Strand) 6가닥을 중심에 위치하는 SUS(Stainless Steel)선의 주위에 동축상으로 Twist한 형태로 되어 있다. 이 SUS선은 권선시의 장력에 견딜 수 있도록 하기 위함과, 중심선에도 초전도소선을 배치하는것에 의한 교류전류열화현상을 방지하기 위한 것이다⁽³⁾. 교류용 초전도선재의 단면사진을 그림1에, 사양을 표1에 표시한다.

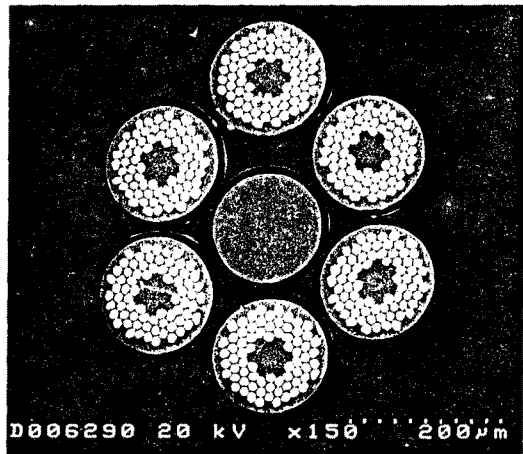


그림1. 교류용 초전도선재의 단면

표1 초전도선재의 사양

Strand	
Diameter	0.16 mm(Insulated)
Filament Diameter	0.52 μ m
NbTi/Cu/CuNi	1/0.3/2.0
Twist Pitch	1.9 mm
Insulation	0.02 mm (Polyester Vanish)
Cable	
Type	NbTi Strand \times 6+SUS Strand \times 1
Diameter	0.61 mm(Insulated)
Insulation	Polyester Braid
Critical current	at 4.2K, 10 ⁻¹¹ Ω cm
	0.5T 191A
	1.0T 119A
	1.5T 86A
	2.0T 68A

2.2 초전도변압기의 정격, 구조 및 이론적 특성

본 연구의 목적은 초전도변압기의 기초특성 연구이다. 따라서, 변압기의 정격은, 전원의 용량에 제한을 받지않기 위한 소용량으로, 주파수 60[Hz], 용량 2.5[KVA], 전압:100/50[V], 전류:25/50[A]로 권선비(전압비)를 2:1로 하였다. 철심은 단면이 직사각형인 Cut-Core로 단면적은 17[cm²]이다. 이 철심의

자속밀도는 1[T]로 하였다. 따라서, 고압측 및 저압측의 권선 수는 각각 220 및 110[Turn]이 되나, 권선시에는 권선틀에 약간의 여유가 생겨 각각 4[Turn]씩 더 감았다.

제작한 초전도변압기는 철심의 한 각에 고압측 및 저압측 권선을 동축상으로 감는 솔레노이드형으로 철심 및 권선을 동시에 액체헬륨속에 넣어 냉각시키는 간단한 구조이다. 고압측과 저압측의 권선비가 2:1이므로, 철심의 창높이를 고려하여 고압측은 2층, 저압측은 1층으로 하였다. 저압측에는 고압측에 비해 2배의 전류가 흐르므로 저압권선의 냉각효과를 높이기 위해서, 고압측 권선을 안쪽에, 저압측 권선을 바깥쪽에 배치하였다. 층간의 간격은 권선의 냉각효과, 정격전압 및 액체헬륨의 절연 파괴강도 등에 의해 정해지지만, 본 제작에 있어서는 정격전압이 작으므로 냉각효과만을 고려하여 각각의 층간에 FRP Spacer를 설치하였다. 권선시 초전도선재에 가한 장력은 2kgf이다.

이상과 같은 정격 및 구조에 있어서 사용된 초전도선재는 고압측이 59[m], 저압측이 35[m]이다.

제작한 초전도변압기의 누설리액턴스, 전압변동을 및 철손을 이론식에 의해 계산하였다. 그결과, 고압측으로 환산한 총누설리액턴스는 0.502[Ω]으로 12.55[%], 전압변동율은 역을 1일때 0.75%, 역을 0.8일때 7.83%이며, 철손은 4.3[W]이다.

3. 초전도변압기의 기초특성

3.1 권선저항

초전도변압기의 고압 및 저압측 권선의 저항을 상온(약 18°C=291K), 액체질소 온도(77K), 액체헬륨 온도(4.2K)에서 각각 측정하였다. 저항측정 방법으로는 각 권선에 1A 이하의 직류전류를 흘려, 그때의 단자간 전압강하를 이용하였다. 각 온도 영역에서의 권선의 저항값을 표2에 표시한다.

표2 각 온도에 있어서의 권선저항

온도 [K]	저항 [Ω]	
	고압권선	저압권선
상온 291[K]	63	36
액체질소 77[K]	15	8.5
액체헬륨 4.2[K]	0	0

3.2 무부하시험

무부하시험에 있어서, 고압측을 개방한 상태에서 저압측에 전압을 60V까지 10V간격으로 인가하여, 인가전압 대 전류, 저압 대 고압 및 전력을 측정하였다. 이것에 의해, 여자전류, 전압비(권선비) 및 철손을 구하였다.

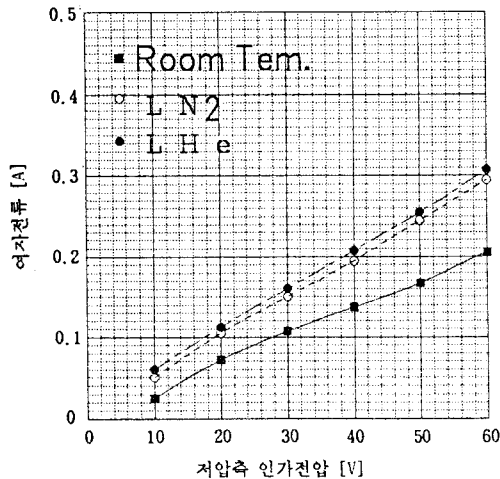


그림2. 저압측 인가전압과 여자전류

무부하시험 결과를 그림2~그림4에 표시한다. 그림2는, 상온, 액체질소 및 액체헬륨의 각 온도에서 실험한 저압측 인가전압에 대한 저압측전류(여자전류)의 값이다. 이 그림으로 부터, 철심이 놓여있는 주위의 온도가 낮을수록 즉 철심이 냉각될수록, 동일전압에서 큰 여자전류가 흐르고 있음을 알 수 있다. 이것은 철심의 온도가 낮을수록 저항이 작아지기 때문이다. 또한 이것으로 부터 상온 및 액체질소 온도에서의 철손보다도 액체헬륨에서의 철손이 증가하리라는 것을 추측할 수 있다. 이 철심의 냉각에 의한 철손의 증가를 방지하기 위해서 권선부만을 액체헬륨으로 냉각하고, 철심은 상온공간에 두어 냉각하지 않는 형태의 초전도변압기도 연구되고 있다. 그러나, 이 형태의 변압기는 냉각장치의 구조가 복잡해지는 단점이 있다. 그림3은 저압측 인가전압과 고압측 출력전압과의 관계이다. 이 관계로 부터, 설계한 권선비 고압:저압=2:1의 관계에 의해 전압이 출력되고 있음을 알 수 있다. 그림4는 저압측 인가전압에 대한 무부하손실의 값이다. 그림2으로 부터 온도가 낮을수록 여자전류가 많이 흐르므로 손실이 많아지리라 생각할 수 있다. 측정결과에 있어서도 전반적으로 같은 경향을 표시하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 60V에서는 액체질소에서의 손실이 액체헬륨보다도 크게 나타났다. 이것은 측정시에 있어서 전력계의 교

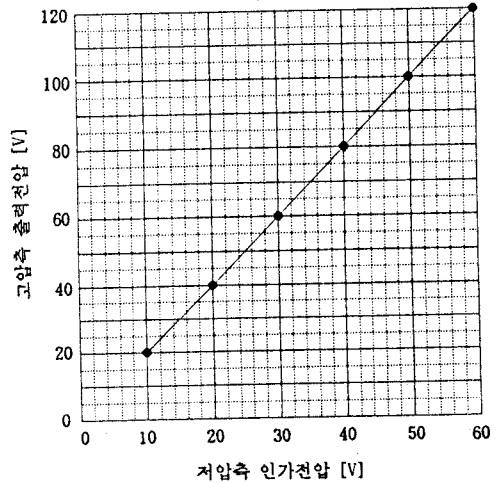


그림3. 저압측 인가전압과 고압측 출력전압

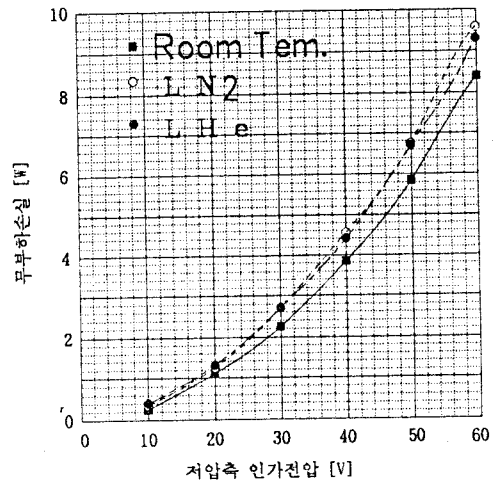


그림4. 무부하손실

체로 인한 오차가 원인으로 생각된다. 정격전압 50V일때의 무부하손실은 6.7W로 이론치 4.3W보다 2.4W다. 이것은 전류도입선에 의한 손실 및 철심의 냉각에 의한 와전류손실이 증가했기 때문인 것으로 생각된다.

3.3 단락시험

단락시험에 있어서는, 저입측을 단락한 상태에서 고입측단에 유도전압조정기를 이용해 전압을 서서히 증가시키면서, 인가전압에 대한 전류를 측정하였다. 이 시험에 의해 누설리액턴스를 구하였다. 시험결과를 그림5 및 그림6에 표시한다.

그림5는 고입측 인력전압 11[V](실효치), 전류 25[A](실효치) 일때의 파형이다. 이 파형으로부터, 전압과 전류의 위상이 90° 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 변압기의 권선인 초전도선재가 액체헬륨에 냉각되므로서 권선의 저항성분이 영이 되어 인덕턴스성분만에 의한 파형이기 때문이다. 이러한 위상차는 상전도변압기에서는 생기지 않는 초전도변압기만의 고유현상이다. 그림6은, 입력전압과 단락전류와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림의 기울기로 부터 제작한 초전도변압기의 누설리액턴스는 0.443Ω임을 알 수 있다. 이 값은 이론식에 의해 구한 값 0.502Ω과 잘 일치하고 있다.

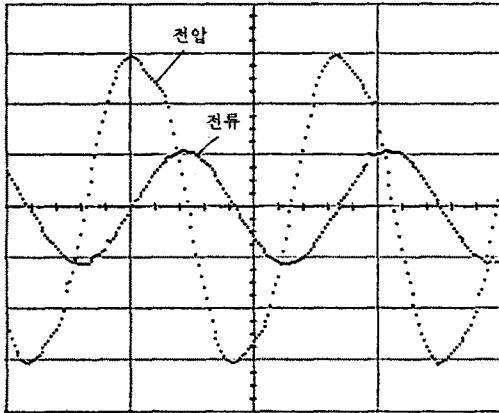


그림5. 단락시험시의 전압·전류 파형
(전압:5V/div, 전류:35A/div, 시간:10ms/div)

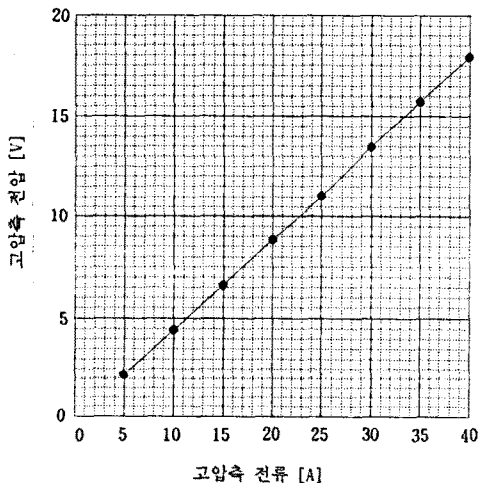


그림6. 단락시험시의 전압·전류 관계

4. 고찰

이상의 무부하시험 및 단락시험을 통해 얻은 제작한 초전도 변압기의 전기적 기초특성을 표3에 표시한다.

표3 초전도변압기의 기초특성

용량	2.5 kVA
상수	단상
주파수	60 Hz
권선비	228/114 Turn
전압	100/50 V
전류	25/50 A
무부하전류	0.51 %
무부하손실	6.7 W
*리액턴스	11.0 %

초전도변압기의 전기적 특성을 얻기위한 시험으로서, 상기 이외에, 부하시험 및 팬치시험이 있다. 부하시험에 의해 부하손실 및 전압변동율을 측정하여 변압기의 효율을 산출하여야 한다. 또한 초전도권선의 팬치시험을 통해, 초전도선재를 권선화하였을때의 팬치전류치를 측정하여야 한다. 일반적으로 초전도선재를 권선화하였을 경우의 팬치전류치는 단락선재의 팬치전류치보다도 작게되는 현상이 나타난다⁽⁴⁾.

이상과 같은 시험과 그를 통한 이론적 검토를 통해서 초전도 변압기의 권선구조 및 냉각시스템등의 최적화에 대해서 고찰하여야 한다. 이를 통해서 변압기의 손실저감, 고효율 운전 및 초전도선재의 성능을 최대로 이용할 수 있는 기술적인 면을 고찰하여야 한다.

5. 결론

초전도기술을 장래 도래하리라 예상되는 초전도기간중전시스템에 적용하기 위해서는, 먼저 송전시스템을 구성하는 전력기기 각각을 초전도화하여야 한다. 이를 위해서는 각각의 전력기기를 제작하여, 초전도화하는데 따르는 기술적인 면을 고찰한후, 시스템으로서의 운용상의 기술등에 대해서 검토하여야 한다. 이를 위해 소형 초전도변압기를 제작하여, 무부하시험 및 단락시험을 통해서 제작한 초전도변압기의 전기적 기초특성을 구했다. 그결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

무부하시험을 통해서, 고입측과 저입측과의 전압변환이 설계한 권선비에 의해 변환되고 있음을 확인하였다. 또한, 철심을 냉각하므로서 철심을 통해 흐르는 와전류가 증가하여 철손이 증가할 수 있음이 시사되었다. 단락시험으로부터, 고입측 저입측 권선인 초전도선재가 액체헬륨으로 냉각되므로서 전기적인 저항이 영이되어 전압과 전류의 위상차가 90°로 되는 초전도 고유의 현상이 확인되었다. 전압변동율에 영향을 미치는 누설리액턴스는 시험에 의해 구한 값과 이론식에 의한 값이 잘 일치하고 있음을 알았다. 이상을 통해서, 제작한 변압기가 초전도 변압기로서 동작하고 있음을 확인하였다.

[참고문헌]

- (1) R. Mcfee : "Superconducting Power Transformer - a Feasibility Study", Electrical Engineering, Vol.80, pp.745-760 (1961)
- (2) P. Dubots, A. Fevrier, J.C. Renard, J.P. Tavergnier : "NbTi Wires with Ultra-fine Filaments for 50-60 Hz Use : Influence of the Filament Diameter upon Losses", IEEE Trans. MAG-21, pp.177-180 (1985)
- (3) 吳鳳煥, 石川和明, 早川直樹, 大久保仁, 鬼頭幸生 : 「交流用超電導より線間におけるクエンチ前後の電流分派」, 日本電氣學會論文誌, Vol.113-B, No.3, pp.246-251 (1993)
- (4) Y. Kito, H. Okubo, N. Hayakawa, Y. Mita, M. Masanori : "Development of a 6600V/210V, 100kVA Hybrid-Type Superconducting Transformer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.6, NO.2, pp.816-823 (1991)