

5kVA 초전도변압기의 동작특성

최 경달⁰, 이 상진^{*}, 김 동수^{**}, 이 지광^{**}, 김 동훈^{**}, 차 귀수^{***}, 한 송영^{***}

0; 기초전력공학공동연구소 *; 연세대학교 전기공학과 **; 서울대학교 전기공학과 ***; 순천향대학교 전기공학과

Operational Characteristics of a 5kVA Superconducting Transformer

K.D. Choi⁰, S.J. Lee^{*}, D.S. Kim^{**}, J.K. Lee^{**}, D.H. Kim^{**}, G.S. Cha^{***} and S.Y. Hahn^{***}

0; EESRC *; Yonsei Univ. **; Seonl National Univ. ***; Soonchunhyang Univ.

Abstract - For the analysis of characteristics of a superconducting transformer, we designed and fabricated a 5kVA superconducting transformer with two kinds of secondary winding. Using the results of the open and short tests, we calculated the parameters of its equivalent circuit. We designed also a 5kVA conventional transformer with the same design conditions as the superconducting one. The performances of the superconducting transformer were compared with the performances of the designed conventional transformer and another 5kVA distribution transformer.

1. 서론

1980년대에 들어서면서 교류용 초전도선이 개발됨에 따라 초전도변압기는 일반변압기보다 더 경제성이 있는 것으로 밝혀졌다.^[1] 그러나 일반적으로 단락사고가 발생하면 변압기에는 작게는 정격전류의 서너배에서 많게는 열배이상의 사고전류가 흐르게 된다. 초전도변압기를 일반변압기처럼 이 사고전류에 견딜 수 있게 설계하면 초전도체의 양이 많아져 교류손실때문에 경제성을 잃게 된다. 따라서 초전도변압기의 정격전류는 초전도선 임계전류의 1/2~1/3로 정하여 200~300%의 과부하에는 견딜 수 있게 설계한다. 그러므로 단락사고시에는 권선에 흐르는 전류가 임계전류를 넘어서서 초전도선이 켜질 수 밖에 없다. 단락사고시 변압기와 초전도권선을 보호하기 위해서는 전류가 많이 흐르는 저압측에만 보조권선을 설치하거나,^[2] 초전도사고전류 제한기를 직렬로 연결하여 초전도변압기는 사고시에도 켜지가 일어나지 않도록 할 수 있다.^[3] 보조권선이 다른 보호장치없이 초전도변압기를 설계할 수도 있으나, 이 때는 켜지후 변압기에 흐르는 전류를 작게 하기 위해 초전도선의 구리점적율을 가능한 작게 해야 한다.^[4]

본 논문에서는 초전도변압기와 일반변압기의 특성을 비교하고 초전도권선의 켜지특성을 시험하기 위하여 5kVA(220/110V) 초전도변압기를 설계·제작하였다. 실용화 할 수 있는 초전도변압기는 구조상 철심은 상온에서, 권선은 극저온에서 동작하고 1V 당 권선횟수도 일반변압기보다 많아 누설리액턴스가 크게 된다. 설계된 초전도변압기에는 두개의 2차권선(내층과 외층)을 설치하여 각각의 누설리액턴스가 차이하도록 하였다. 변압기의 정격을 구하기 위하여 NbTi의 임계특성을 이용해서 운전시의 임계전류와 정격전류를 결정하였다. 제작된 초전도변압기에 대해 각 권선별로 무부하시험과 단락시험을 시행하여 등가회로정수를 구하였으며, 또한 내층권선과 외층권선을 병렬로 연결하여 보조권선이 설치되었을 때의 특성을 시험하였다.

초전도변압기와 같은 조건으로 5kVA 220/110V 변압기를 설계하여 특성정수들을 계산하였고, 이 변압기와 5kVA 2300/230V 일반배전변압기의 성능을 초전도변압기와 비교하였다.

부하시험시 2차전류를 정격이상으로 증가시켜 초전도선의 켜지전류를 측정하였고 실험결과 설계값에 가까운 초전도선의 켜지전류를 얻을 수 있었다.

2. 초전도변압기의 정격전류

초전도변압기의 1차권선, 2차내층권선, 2차외층권선은 모두 같은 초전도선을 사용하였으며, 이 초전도선은 초전도와이어(strand) 6가닥과 중심의 스텐레스스틸선 1가닥을 꼬아서 만든 케이블이다. 초전도선의 정격전류는 그림 1의 임계전류(I_c) - 임계자속밀도(B_c)특성과 부하특성으로부터 구할 수 있다. 초전도선의 임계전류(I_c)-임계자속밀도(B_c)특성은 NbTi의 임계전류밀도(J_c)-임계자속밀도(B_c)특성에 초전도선의 측정임계전류값 70A(2T에서)를 대입하여 구하였다.

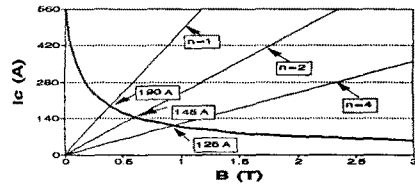


그림1 초전도선의 임계전류

Fig. 1 Critical currents of the superconducting wire

초전도변압기의 부하특성은 권선형태를 솔레노이드로 하였기 때문에 솔레노이드 마그네트의 중심자장식(1)로부터 구할 수 있다.

$$B = \mu_0 n_l I \quad [T] \quad (1)$$

여기서 B : 자속밀도

μ_0 : 투자율

n_l : 단위길이당 권선수

I : 초전도선에 흐르는 전류 [A]

직경 0.6mm의 초전도선계에 인가되는 자속밀도는 권선된 층수에 따라 근사적으로 식(2)와 같이 된다.

$$B = \frac{2.095 \times 10^{-3}}{N} \times I \times N \quad [T] \quad (2)$$

변압기 2차권선의 정격전류는 부하곡선과 임계전류-임계자속밀도곡선이 만나는 값의 1/2를 택해 100%의 여유를 갖도록 정하였다.

3. 초전도변압기의 설계 및 제한

변압기 1차전압과 2차전압은 각각 220V, 110V로 정하였으며, 1V당 권선수는 1.2로 하여 1차 264회, 2차 132회씩 감도록 설계하였다. 각 권선은 모두 층당 66회씩 감아 1차는 4층 2차는 2층씩 감긴다. 권선순서는 가장 안쪽부터 1차권선, 2차내층권선, 2차외층권선순이다. 초전도변압기 1차와 2차정격전류는 그림1로부터 구할 수 있다. 4층권선인 1차의 임계전류는 125A, 2차는 145A가 된다. 이 임계전류에서 100%의 여유를 갖는 정격전류

(실효값)는 1차 44.2A, 2차 51.3A이다. 따라서 변압기정격전류는 1차 25.5A, 2차 51A로 정하였다.

변압기철심의 단면적은 철심내 최대자속밀도(순시값)를 1.5T, 적층률을 0.9로 하여 2316mm²가 되었다. 철심의 단면은 정사각형이 되도록 했으며, 권선을 감을 권선틀은 원형으로 설계하여 권선시 예비장력을 쉽게 가할 수 있도록 하였다. 권선틀은 포베이크라이트로 제작하였다. 철심은 두께 0.3mm의 규소강판을 적층하여 만들었고 철심도 초전도권선과 함께 냉각되므로 철심의 진동을 줄이기 위해 조립후 에폭시수지로 합침시켰다. 누설리액턴스를 줄이기 위해 권선틀과 철심사이의 공간을 가능한 철심으로 채워서 제작하였다.

초전도변압기 운전중에 선재가 움직이는 것을 방지하기 위하여, 권선중에 3kgf의 예비장력을 가하였으며 권선후에는 에폭시수지로 진공합침시켜 선재고정을 강화하였다. 그리고 각 권선간의 절연과 헬륨냉각채널을 위해 매 2층씩 권선한 다음 두께 1mm의 스페이서(spacer)를 설치하였다. 이러한 스페이서와 예비장력의 영향으로 2차내측권선과 2차외측권선은 설계값보다 3회, 1회씩 권선수가 증가하였다. 표1은 제작된 초전도변압기의 제원이며, 그림2는 완성된 초전도변압기를 나타낸 것이다.

표1 초전도변압기의 제원

Table 1 Specifications of the superconducting transformer

	1차	2차	
		내측	외측
정격전압 [V]	220	110	110
정격전류 [A]	25.5	51	51
권선수	264	135	133
상온에서 권선저항 [Ω]	90.1	48.9	50.9

4. 특성실험

초전도변압기의 등가회로정수들을 구하기 위해 일반변압기와 마찬가지로 각 권선별로 무부하시험과 단락시험을 하였고, 내측 권선과 외측권선을 병렬로 연결하여 같은 시험을 반복하였다.

무부하시험시에는 1차전압 V_1 와 여자전류인 1차전류 I_1 , 여자전력 P_0 를 측정하여 식(3)로부터 어드미턴스(admittance) Y_0 , 콘덕턴스(conductance) g_0 , 서셉턴스(susceptance) b_0 를 구하였다.

$$Y_0 = \frac{I_1}{V_1} \quad [\text{S}]$$

$$g_0 = \frac{P_0}{V_1^2} \quad [\text{S}] \quad (3)$$

$$b_0 = \sqrt{\left(\frac{I_1}{V_1}\right)^2 - \left(\frac{P_0}{V_1^2}\right)^2} \quad [\text{S}]$$

식(4)의 1차와 2차의 교류저항 r_1+r_2' 과 누설리액턴스(leakage reactance) x_1+x_2' 는 단락시험시 측정된 1차전압 V_1 , 1차전류 I_1 , 1차전력 P_0 로부터 구하였다. 단락시험에는 220V 단

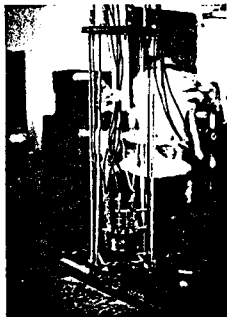


그림2 완성된 초전도변압기

Fig. 2 Finished superconducting transformer

상 슬라이타스를 사용하였다. 표2는 각 권선별로 측정된 등가회로정수이다.

$$r_1+r_2' = \frac{P_0}{I_1} \quad [\Omega] \quad (4)$$

$$x_1+x_2' = \sqrt{\left(\frac{V_1}{I_1}\right)^2 - \left(\frac{P_0}{I_1^2}\right)^2} \quad [\Omega]$$

2차 내측권선과 외측권선을 병렬로 연결하여 무부하시험을 했을 때, 각 권선의 유기기전력의 차이때문에 2차전류 i_2 는 영(0)이었지만 그림3과 같이 2차내측권선전류 i_1 와 2차외측권선전류 i_0 가 흐르는 것이 확인되었다. 실효값으로 11.4A인 이 전류들은 위상이 정확히 180도가 나고 크기가 같아 1차측이나 철심에는 영향이 없지만, 무부하상태에서 이런 전류가 계속 흐르면 2차측에서는 계속 교류손실이 발생하여 변압기효율을 떨어뜨리게 된다. i_0 는 부하가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

표2 초전도변압기 등가회로정수

Table 2 Parameters of the equivalent circuit of the superconducting transformer

	측정값 및 정수	내측운전	외측운전	병렬운전
무부하 시험	1차전압 [V]	220	221.7	221.7
	1차전류 [A]	1.5	1.8	1.6
	1차전력 [W]	55.1	57.6	58.9
	어드미턴스 [mS]	6.82	8.12	7.22
	콘덕턴스 [mS]	1.14	1.17	1.2
단락 시험	서셉턴스 [mS]	6.72	8.04	7.12
	1차전압 [V]	9.9	18.2	12.6
	1차전류 [A]	27.1	26.7	33.3
	1차전력 [W]	52.7	65.6	87.0
	교류저항 [Ω]	0.072	0.092	0.08
	누설리액턴스 [Ω]	0.324	0.678	0.37
	내부임피던스 [%]	3.8	7.9	4.4

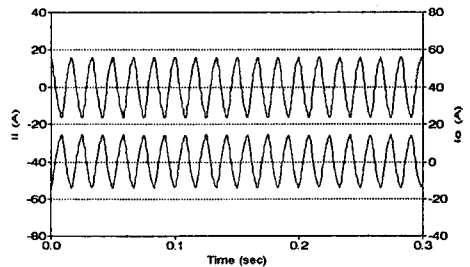


그림3 2차내측권선(위) 및 2차외측권선(아래) 전류

Fig. 3 Currents in inner and outer secondary windings

표3은 1V당 권선수를 0.8로 하여 초전도변압기와 같은 조건으로 설계된 일반변압기의 제원을 나타낸 것이며, 표4에서는 이 변압기와 5kVA 2300/230-115V 일반배전변압기^[6], 초전도변압기의 성능을 비교하였다. 설계된 변압기들의 특성은 아래의 상수들을 이용하여 계산하였다.

$$k_{h+c} = 1.279 \quad [\text{W/kg}] \quad ; \quad \text{core loss factor}^{[6]}$$

$$d_{cu} = 7.63 \quad [\text{g/cm}^3] \quad ; \quad \text{core material density}^{[7]}$$

$$\rho_{cu} = 1.57 \times 10^{-8} \quad [\Omega\text{m}] \quad ; \quad \text{copper resistivity}$$

표4의 초전도변압기 철손은 위의 상수들로 계산한 값이고, 동손은 단락시험시 측정된 초전도권선과 전류도입선의 교류저항으로부터 구한 것이다. 배전변압기와 비교하였을 때 철손은 77%, 동손은 50% 감소하였으며 설계변압기의 경우에는 60%의 철손과 70%의 동손이 감소하여 99%의 높은 효율을 갖는 것으로 나타났다. 이 초전도변압기는 소형이고 철심도 함께 냉각되었기 때문에 효율과 손실을 계산할 때 저온용기의 냉각손실은 포함시키지

않았으나 대용량초전도변압기에서는 냉각손실을 포함시켜도 일반변압기보다 높은 효율을 얻을 수 있다.

표3 초전도변압기의 같은 조건으로 설계된 일반변압기의 제원

Table 3 Specifications of the conventional transformer with equivalent design conditions of the superconducting transformer

	1차	2차
정격전압 [V]	220	110
정격전류 [A]	25.5	51
권선수	176	88
권선길이 [m]	69.7	34.9
권선단면적 [mm ²]	12.75	25.5
철심부피 [cm ³]	2.53 x 103	
철심중량 [kg]	19.3	

표4 초전도변압기와 일반변압기의 특성

Table 5 Characteristics of the superconducting and conventional transformers

		일반변압기		초전도변압기		
		배전 변압기	설계 변압기	내측 운전	외측 운전	병렬 운전
용량 [kVA]		5.0	5.6	5.6	5.6	5.6
철손 [W]		44	24.7	10.0	10.0	10.0
동손 [W]		99	138	46.8	59.8	52.0
전부하시 효율 [%]		97.2	97.2	99.0	98.8	98.9
전압 변동률	역률 0.8	2.8	·	2.96	5.73	3.4
	역률 1	2.1	·	0.91	1.36	1.02

전압변동률은 역률 0.8(지상)일 때와 1일 때의 값을 배전변압기와 비교하였는데 초전도변압기의 누설임피던스는 일반변압기보다 더 크지만, 권선저항에 의한 전압강하성분이 작아 역률 1일 경우의 전압변동률은 배전변압기보다 더 낮게 나타났다.

단락시험후에는 각 권선별로 부하를 연결하여 정격까지 견딜 수 있는지를 확인하였다. 부하로는 히터(heater)를 사용하였고 2차내측권선 단독운전, 2차외측권선 단독운전, 병렬운전 세 경우 모두 정격2차전류인 51A까지 흘려줄 수 있었다. 병렬운전시 2차전류는 2차내측권선전류 i_1 와 2차외측권선전류 i_2 의 합이 되며 i_2 는 부하가 증가함에 따라 크기가 감소하고 위상도 i_1 에 가까워지는 것으로 측정되었다.

각 권선의 퀘칭전류는 부하전류를 단계적으로 증가시키면서 측정하였다. 이를 위해 부하로 10kVA, 110V단상 슬라이닥스를 연결하고 슬라이닥스의 2차측을 단락시킨 다음 슬라이닥스의 전압을 단계적으로 증가시켰다. 그림4는 2차내측권선 단독운전시 퀘칭이 발생하였을 때 2차전압과 2차전류의 파형을 측정된 것이다. 2차내측권선의 퀘칭전류는 129.5A로써 임계전류 145A의 89.3%에 해당한다. 2차외측권선은 이보다 작은 105A에서 퀘칭이 발생하였다. 그림5는 2차 내측권선과 외측권선을 병렬로 연결한 조건에서 퀘칭발생시 내측권선과 외측권선에 흐르던 전류의 파형을 나타낸 것이다. 퀘칭전에는 부하전류가 거의 대부분 내측권선을 통해 흐르며 퀘칭전 각 전류의 최대값은 다음과 같다.

$$i_1 = 66 [A], i_2 = 130 [A]$$

$$i_i = 128 [A], i_o = 96 [A]$$

2차권선이 퀘칭된 후 부하전류는 2차외측권선으로 전이되었지만, 2차외측권선도 두주기후 퀘칭되었다. 그러므로 보조권선용 초전도선은 주권선보다 임계전류값이 더 크고 안정화를 위해 모재에 구리함유량이 더 높은 것을 선택해야 할 뿐만 아니라, 보조권선의 누설임피던스도 큰 값이 되도록 설계해야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 초전도변압기의 특성을 분석하고 일반변압기와 그 특성을 비교하기 위하여 5kVA 초전도변압기를 설계·제작하였다. 초전도변압기의 구조는 일반변압기와 유사하며 2차권선은 내측권선과 외측권선 두개를 설치하여 각각 다른 누설임피던스

를 갖도록 설계하였다. 각 권선별로 무부하시험과 단락시험을 하였고, 내측과 외측 두 권선을 병렬로 연결하여 보조권선이 있을 때의 특성도 실험하였다. 내측권선만으로 운전하였을 때는 3.8%의 내부임피던스를 갖는 것으로 나타났으며 외측권선 운전시는 7.9%, 병렬운전시는 4.4%의 내부임피던스가 측정되었다.

그리고 내측과 외측권선을 병렬로 연결했을 때는 각 권선의 유기전력간 차이로 2차측만을 순환하는 전류가 흐르는 것을 알 수 있었다. 이 전류는 부하가 증가하면 점차 감소하지만 무부하상태에서는 정격의 22.4%에 해당하는 전류가 흘러 교류손실을 발생시키므로 이에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

특성비교를 위하여 초전도변압기와 같은 조건으로 일반변압기를 설계하였고 이 변압기와 5kVA 2300/230-115V 배전변압기의 성능을 초전도변압기와 비교하였을 때 동손은 70%와 50%, 철손은 60%와 77%정도 감소하는 것으로 나타났다. 전부하시 효율은 99%로 일반변압기보다 2%정도 더 높았으며 전압변동률은 0.8의 지상역률일 경우 더 높게 나타났으나 역률 1인 경우에는 오히려 더 낮게 나타났다.

초전도선의 퀘칭전류는 2차내측권선 129.5A, 2차외측권선 105A로써 임계전류값의 89.3%와 72.4%에 달하는 측정값을 얻을 수 있었고 병렬운전중 퀘칭되었을 때는 내측권선을 통해 흐르던 전류가 외측권선으로 전이되는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- H. Rimersma et al., "Application of Superconducting Technology to Power Transformers," IEEE Trans. on PAS, Vol PAS-100, No. 7, July 1981, pp3398-3405.
- T. Ishigohka et al., "Superconducting Power Transformer with an Auxiliary winding only in Low Voltage Side and its Behavior at Line Faults," Trans. IEE of Japan, Vol. 108-D, No 11, Nov. 1988, pp984-989.
- 최경달 외, "전류제한기능을 갖는 초전도 변압기의 단락특성 해석," 대한전기학회 논문지, 제42권, 제3호, 1993년 3월, pp 1-6.
- E. S. Yoneda, I. Tashiro, M. Morohoshi and D. Ito, "Tests on a 30 KVA Class Superconducting Transformer," Cryogenics, Vol. 31, July 1991, pp655-659.
- 박민호, "유도기기," 동명사, 1981, p74.
- William M. Flanagan, "Handbook of Transformer Applications," McGraw-Hill, 1986, section 6.12.
- Colonel Wm. T. McLyman, "Transformer and Inductor Design Handbook," Marcel Dekker Inc., 1988, p109.

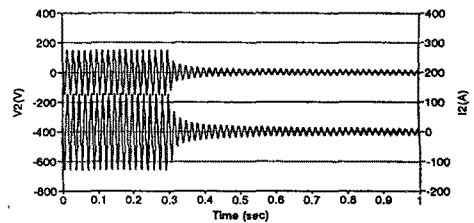


그림4 2차내측권선의 퀘칭전류
Fig. 4 Quench current of inner secondary winding

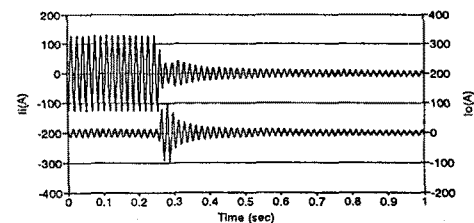


그림5 병렬운전중 퀘칭전류
Fig. 5 Quench currents during parallel operation