

3상 고온초전도 변압기의 특성해석

이승욱, 이희준, 차귀수, 이지광*, 최경달**, 류경우***, 한송엽*
 Soonchunhyang Univ, Woosuk Univ*, Korea Polytechnic Univ**, Chonnam National Univ***, Seoul National Univ[†]

Characteristic Analysis of a Three phase HTS Transformer

S.W. Lee, H.J. Lee, G.S. Cha, J.K. Lee*, K.D. Choi**, K.W. Ryu***, S.Y. Hahn[†]
 Soonchunhyang Univ, Woosuk Univ*, Korea Polytechnic Univ**, Chonnam National Univ***, Seoul National Univ[†]

Abstract - The high temperature superconductor transformer gains interests from the industries.

This paper examined characteristics of the laboratory scale three phase HTS transformer and Brandt equation is used to calculate the loss by perpendicular magnetic field in transformer winding.

To estimate the performance of the three phase HTS transformer, no load characteristics, short circuit characteristics are calculated by using finite element method. Transient characteristics of sudden short circuit during full load operation have been examined. Effect of the resistance growth in the HTS wire from the quench of the wire is included in the calculation.

1. 서 론

고온 초전도체는 저온 초전도체보다 비열이 높아 안정도가 향상되었고 액체질소(77K)를 냉매로 사용하기 때문에 냉각소요비용의 감소 등으로 고온초전도체를 이용한 전력기기의 응용에 관심이 높아지고 있다. 고온초전도 전력기기는 늦어도 21세기 초에는 실용화될 것으로 예상하고 있으며, 이 중에서 가장 먼저 실용화가 가능하고 수요가 제일 많은 전력기기로 고온초전도변압기를 꼽고 있다.[1]

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 더블 팬케이크 권선 형태의 3상 10kVA 고온초전도변압기에 대하여 무부하 특성과 단락 특성을 계산하여 자화리액턴스와 누설리액턴스를 계산하였다. 고온초전도선에 교류자장이 인가되면 이 자장에 의하여 초전도선의 임계전류가 감소하게되므로 고온초전도선을 사용한 전력용용기기를 설계함에 있어서 중요한 변수가 된다. 따라서 외부자장에 의하여 생기는 손실을 초전도선에 수평성분으로 가해지는 자장과 수직성분으로 가해지는 자장으로 나누어 Brandt식을 사용하여 손실을 계산하였다.

단락사고시 과도상태 해석은 정상상태를 유지하다가 어느 순간 3상 단락사고를 발생시켜 단락사고 전류에 의하여 초전도권선이 켄치를 일으키고 이때 초전도변압기의 단락사고 전류가 어떻게 변화하는지를 해석하였다.

2. 해석모델

해석에 사용한 3상 10kVA 고온초전도변압기의 사양은 표1과 같다. 3상 고온초전도변압기의 고압측과 저압측의 정격전압은 440V와 220V이다. 고압측에 흐르는 전류는 13.12A이고 저압측에 흐르는 전류는 26.24A이 정격 부하저항은 14.52Ω이다.

표 1. 고온초전도변압기의 사양

정 격	전압	440/220 V
	전류	13.12/26.24 A
	용량	3상, 10kVA
권 선	턴수	112/98 turn
	길이	75.2/68.4 m
	V/T	2.27
철 심	무게	155.3 kg
	철심 단면적	80×80 mm ²
	최대 자속밀도	1.8 T

고온초전도선재로서는 BSCCO-2223로 제작된 2종류 테이프형태의 선재를 사용하였고 선재의 사양은 표 2와 같다. 권선은 더블팬케이크형태로 하였으며 상당 권선된 턴수는 고압측 112턴과 저압측 98턴이다.

3개의 더블팬케이크형 권선을 고압측은 56턴으로 더블 팬케이크 권선 두 개를 직렬로 연결하고, 저압측은 98턴으로 하나의 더블팬케이크 형태로 권선 하였다.

고압측에 사용된 초전도권선은 모재가 Ag이고, 저압측에 사용된 초전도권선은 모재가 AgMgNi이다.

표 2. 권선에 사용된 초전도 테이프의 사양

모 재	면적 (mm ²)	은 비	필라멘트 구조	임계 전류 [A]
Ag	2.9×0.164	0.31	다심	74
AgMgNi	4.2×0.2	0.25	다심	105

그림 1은 해석에 사용한 3상 10kVA 고온초전도변압기의 단면도이다. 변압기는 내철형 구조로 되어 있고 고압측과 저압측의 권선은 Y-Δ로 결선했다.

여러 가지 권선배치방식을 검토한 결과 전류의 불균형이 최소가 되는 고압-저압-고압의 순서로 권선을 배치하였다.

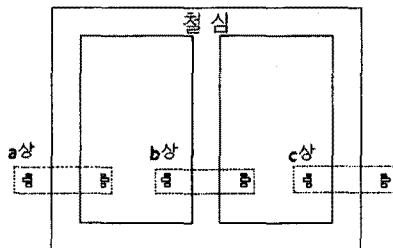


그림 1. 고온 초전도변압기의 단면

3 해석 결과

3.1 무부하 특성 계산 및 단락 특성 계산

초전도변압기의 특성을 해석하기 위하여 무부하 특성과 단락 특성을 계산하였다.

그림 2는 무부하시 고압측 전압과 전류 파형이다. 고압측 전압은 440V로 인가하여 정상상태까지 계산한 결과 무부하전류는 5.96A이다.

그림 3은 단락시험시 고압측 전압과 저압측 전류파형이다. 저압측에 정격전류 26.24A가 흐르도록 고압측의 전압을 5V로 인가하여 정상상태까지 계산한 결과 고압측의 전압이 5V일 때 저압측의 전류는 26.29A이다.

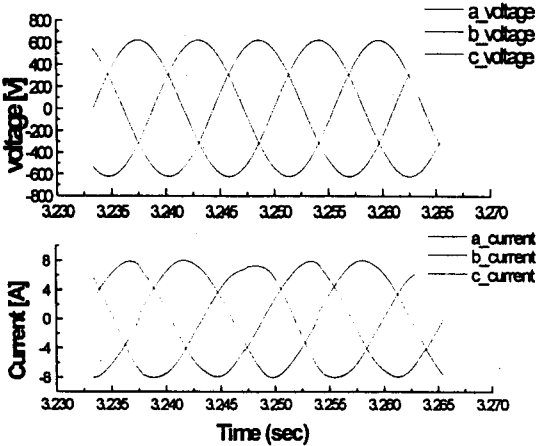


그림 2. 무부하 특성 해석 결과
a) 1차측 전압 b) 1차측 전류

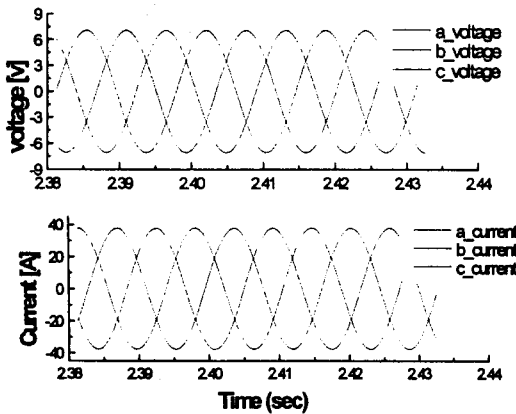


그림 3. 단락특성 해석 결과
a) 1차측 전압 b) 2차측 전류

표 3은 개방특성과 단락특성을 수치적으로 계산된 전압과 전류이며, 이들로부터 계산된 한 상당의 자화리액턴스는 42.62Ω이고 누설리액턴스는 0.189Ω이다.

표 3. 한 상당 개방회로 특성 및 단락회로 특성

개방 시험			단락 시험		
전압 [V]	전류 [A]	자화 리액턴스[Ω]	전압 [V]	전류 [A]	누설 리액턴스[Ω]
254.03	5.96	42.62	2.88	15.17	0.189

3.2 선간 단락사고시 권선에 의한 과도상태 해석

단락 사고가 발생하면 최대 정격전류의 수십배에 이르는 사고전류가 흐르게 되어 고온초전도변압기 권선에 임계전류이상으로 전류가 흐르게 되어 권치가 발생된다.

이때의 특성을 알아보기 위하여 초전도변압기의 정상상태 운전 중 단락사고가 발생했을 때 초전도변압기의 전류 변화를 계산하였다.

임계전류를 넘어 초전도선에 권치가 발생한 경우 초전도선에 흐르는 전류는 모두 모재를 통하여 흐르며, 단락사고시 초전도변압기의 모든 초전도권선 부분에서 권치가 발생한다고 가정했을 때 초전도변압기의 상당 최대 발생하는 저항은 다음 식으로 계산한다.

$$R_{Total}(t) = \rho(t) \left[\frac{l_{Tape}}{A_{Ag}} \right] \quad (1)$$

여기서 $\rho(t)$ 는 모재의 비저항값이며, l_{Tape} 는 초전도선의 길이, A_{Ag} 는 통전전류가 흐르는 면적이다.

위 식으로 계산하면 초전도선에 권치가 발생했을 때에 한 상의 최대 저항은 7.24Ω이다. 그림 4는 단락사고시의 초전도권선 모재부분의 저항변화를 시간에 따라 나타낸 그래프이다.

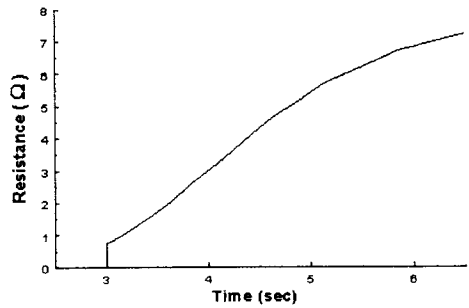


그림 4. 단락사고시 권선 모재 부분의 저항 성장

그림 5은 단락사고시의 과도상태 해석을 수행한 결과 저압측 전류의 감쇄 곡선이다.

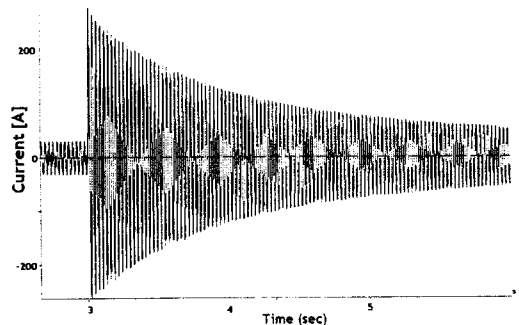


그림 5. 단락사고시 2차측 전류의 감쇄

3.3 외부 자계 손실

테이프 형상의 고온초전도선재에서의 교류손실은 외부 자기장의 방향에 따라 크게 영향을 받게되므로 고온초전도선재를 사용한 전력용용장치 설계에서 자장의 방향을 고려하여 손실을 계산하여야한다.

본 논문에서는 고온초전도선에 가해지는 자장을 초전도선재의 좁은 면으로 가해지는 수평방향 자장과 초전도선재의 넓은 면으로 가해지는 수직방향 자장으로 나누어서 자화손실을 계산하였다.

수평방향 자장에 의해서 발생하는 손실은 완전침투가 발생하지 않는 경우와 완전침투가 발생하는 경우로 나누어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{\Delta //} = \frac{2fB_{\Delta p}^2}{3\mu_0} \beta_{\Delta //}^3 B_{\Delta} < B_{\Delta p} \quad [Wm^3] \quad (2)$$

$$P_{\Delta //} = \frac{2fB_{\Delta p}^2}{\mu_0} (\beta_{\Delta //} - \frac{2}{3}) B_{\Delta} > B_{\Delta p} \quad [Wm^3] \quad (3)$$

위 식에서 f 는 외부자장의 주파수, $B_{\Delta p}$ 는 요소에서의 완전침투 자속밀도, $\beta_{\Delta //} = B_{\Delta //} / B_{\Delta p}$ 이다.

수직방향 자장에 의해서 발생하는 손실을 Brandt가 제안한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{\Delta \perp} = \frac{1}{S} \frac{4\pi a^2 f}{\mu_0} B_{\Delta c} B_{\Delta m} \times \left[\frac{2}{\beta_{\Delta \perp}} \ln(\cosh \beta_{\Delta \perp}) - \tanh \beta_{\Delta \perp} \right] \quad [Wm^3] \quad (4)$$

S 는 초전도선의 단면적이며, $2a$ 는 초전도선의 폭, $B_{\Delta c}$ 는 요소의 임계 침투 자속밀도, $B_{\Delta m}$ 는 요소에서의 자속밀도, $\beta_{\Delta \perp} = B_{\Delta \perp} / B_{\Delta c}$ 이다.

이들로부터 임의의 방향으로 가해지는 자장에 의한 요소에서의 교류손실 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{\Delta} = P_{\Delta //} \cos^2 \theta_{\Delta} + P_{\Delta \perp} \sin^2 \theta_{\Delta} \quad [Wm^3] \quad (5)$$

θ_{Δ} 는 요소에 대하여 임의의 방향으로 가해지는 자장의 방향이다.

위 식들로부터 초전도 변압기의 더블켄케이크 권선에서 발생하는 전체 자화손실은 다음과 같다.

$$P_{total} = \nu \cdot \lambda \cdot \sum_{\Delta=1}^N P_{\Delta} \quad [W] \quad (6)$$

여기서, ν 는 권선부의 체적, λ 는 초전도체의 점적을 N 은 권선에서의 요소 수이다.

고온초전도변압기의 한 상당 외부자장에 의하여 발생하는 최대 교류손실을 계산하면 고압측 권선과 저압측 권선에서의 손실은 각각 6.22W, 11.02W이며 초전도압기에서 수평방향 자장에 의한 전체 손실은 0.523W 이고 수직방향 자장에 의한 전체 손실은 16.72W이다.

그림 6은 부하가 변할 때 고온초전도변압기의 한 상당 교류손실 계산 결과이다.

부하가 정격부하의 3/4부하인 경우의 손실은 11.685W이고 정격부하의 1/2부하, 1/4부하인 경우에 손실은 각각 5.74W, 0.92W이다.

부하가 줄어들수록 전체적인 손실은 감소하며, 특히 수직성분의 자장에 의한 손실이 적어지는 것을 확인할 수 있다.

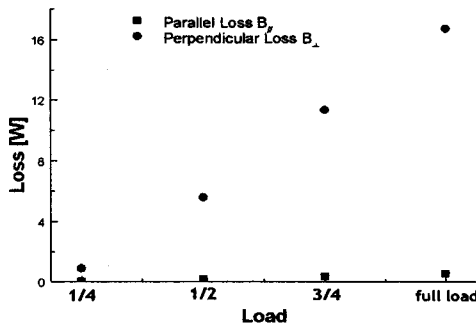


그림 6. 부하에 따른 한 상당 수평, 수직 손실

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 3상 10kVA 고온초전도변압기에 대한 특성계산과 고온초전도변압기의 단락 사고가 발생했을 때의 특성을 해석하였으며, 외부자장에 의한 초전도권선의 손실을 계산하였다.

외부자장에 의해서 발생하는 자화손실 계산 결과에 의하면 초전도선에 수직으로 가해지는 외부자장에 의한 손실이 수평으로 가해지는 외부자장에 의한 손실보다 대략 30배정도 크게 계산되었다. 따라서 권선에서 발생하는 손실을 줄이기 위해서는 초전도선에 수직방향으로 인가되는 자장을 감소시키는 권선배치가 중요하다는 것을 알 수 있었다.

단락사고시 초전도변압기의 과도상태 해석을 수행하여 이를 바탕으로 초전도변압기의 사고 전류제한 특성을 볼 수 있었다.

이러한 고온초전도변압기 제작에 사용된 고온초전도선재는 다른 고온초전도 전력 기기에서도 활용될 수 있기 때문에 여기서 제안된 고온초전도변압기의 과도상태 해석 방법은 고온초전도선재가 사용되는 다른 전력기기에도 응용될 수 있을 것이라고 본다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의해 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.W.Schwenrerly, et al., "Performance of a 1-MVA Demonstration Transformer", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.680-684, 1999
- [2] C.P. Bean, "Magnetization of Hard Superconductor," Physical Review Letters, Vol.8, No.6, pp.250-253, 1962
- [3] E.H. Brandt and M. Indenbom, "Type-II superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field," Phys. Rev.B, vol.48, pp.12893- 12906, Nov., 1993.
- [4] M. Wilson, Superconducting magnet, Clarendon Press, New York, 1983
- [5] W.T. Norris, "Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors Carrying AC: Isolated Conductors and Edges of thin Sheets," Journal of Phys. D: Applied Phys., Vol.3, pp.489-507, 1970.