

단상 1MVA 고온초전도 변압기의 누설임피던스 3차원 해석 및 시험

김성훈*, 김우석**, 이상진***, 최경달****, 주형길****, 홍계원****, 한진호****, 한승엽*, 송희석****, 박정호****
 *서울대학교, **기초전력공학공동연구소, ***위덕대학교, ****한국산업기술대학교 에너지대학원, *****효성중공업 연구소

Test and Analysis of 3-D of Leakage Impedances in a Single-Phase 1MVA HTS Transformer

Sung-Hoon Kim*, Woo-Seok Kim**, Sang-Jin Lee***, Kyeong-Dal Choi****, Hyeong-Gil Joo****, Gye-Won Hong****, Jin-Ho Han****, Song-yop Hahn*, Hee Suck Song**** and Jung Ho Park****

*Seoul National University, **Electrical Engineering and Science Research Institute, ***Uiduk University, ****Graduate School of Energy, Korea Polytechnic University and *****Hyosung Corporation.

Abstract - In this paper, 3-D nonlinear electromagnetic analysis of a single phase 1MVA 22.9 kV/6.6 kV high temperature superconducting(HTS) transformer with double pancake windings was accomplished. The characteristics of 1MVA HTS transformer such as The efficiency, voltage regulation and % impedance voltage drop were obtained by the 3-D non-linear electromagnetic analysis. And in order to verify the 3-D non-linear electromagnetic analysis of a single phase 1MVA HTS transformer, a 1MVA test transformer with windings made of copper tapes with the same size as BSCCO-2223 HTS tape was manufactured. The energy conservation method to perform the analysis of leakage impedances of both a 1MVA HTS transformer and test transformer was used. The characteristic analysis such as efficiency, voltage regulation and % impedance voltage drop of transformer was performed. And the obtained values of both 1MVA HTS transformer and test transformer were compared.

와 같은 크기를 가지는 구리선재를 제작, 이용하여 1MVA 고온초전도 변압기의 권선부와 같은 형태를 가지는 시험용 1MVA 변압기를 제작하였으며, 상온 및 LN₂(77K)상에서 실험하여 얻어진 변압기의 특성값들과 비교하였다.

2. 본 론

2.1 단상 1MVA 고온초전도 변압기 모델

더블 팬케이크형 권선부 가지는 단상 1MVA 22.9 kV/6.6 kV 고온초전도 변압기 제작 모델을 그림 1에 보였으며 제작 사양을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Specification of a 1MVA HTS transformer model

Specification		Value
Rating	Capacity	1 MVA
	Voltage	22.9kV/6.6kV
	Current	44A/152A
Windings	Material	Bi-2223 HTS tape
	No. of turns	832/240
	No. of bobbins	8/4
Core	Material	Silicon steel plate
	Height/Width	1,580mm/1,340mm
	Cross Section area	715.16cm ²
	Max. B	1.488T

1. 서 론

고전압, 대용량 고온초전도 변압기의 연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다[1]. 그러나 지금까지 국내·외에서 개발되어진 고온초전도 변압기는 국내에서 개발된 3상 10kVA 고온초전도 변압기를 제외하고는 권선부의 형태가 솔레노이드 형태를 취하고 있으며[4], 이런 솔레노이드 형태의 권선은 초고압 변압기로 올라갈수록 지금의 테이프 형태의 고온초전도 선재를 이용하여 변압기의 권선부를 제작하는데 많은 어려움이 있으며 그리고 여러 가지 문제점들이 수반되어진다. 이에 본 중·소규모 배전용 고온초전도 변압기 개발 연구팀에서는 제작상의 용이, 크기의 감소 그리고 기타 여러 이점을 가지는 더블팬케이크 형태의 권선부를 가지는 단상 1MVA 고온초전도 변압기 개발을 연구하고 있다[5]. 그러나 이런 더블 팬케이크 형태의 권선은 권선부에 수직방향으로 인가되는 누설 자기장(B_s) 성분으로 인해서 권선부에 사용되어지는 고온초전도 선재의 임계전류에 큰 영향을 미친다[6][7].

따라서 본 논문에서는 더블 팬케이크 형태를 취하고 있는 단상 1MVA 고온초전도 변압기의 3차원 비선형 전자기장 해석을 수행하여 권선부에 수직으로 인가되어지는 누설 자기장을 해석하였으며 1MVA 고온초전도 변압기의 특성해석을 수행하였다. 그리고 해석결과 값의 타당성을 검증하기 위해서 BSCCO-2223 고온초전도 선재

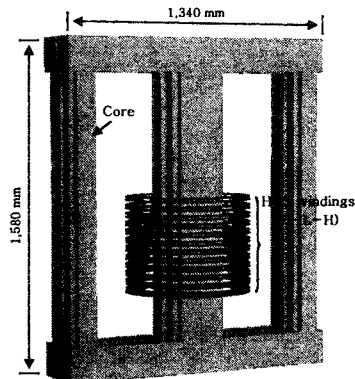


Fig.1. Design of a single phase 1MVA HTS transformer with double pancake windings

고온초전도 변압기의 권선부에 인가되는 누설 자기장의 수직 성분의 영향을 줄이기 위한 방법의 일환으로 고압측 권선과 저압측 권선을 분할하여 고압-저압-고압 형태인 교호배치 권선 형태를 1MVA 고온초전도 변압기에 적용하였다.

2.2 단상 1MVA 고온초전도 변압기 3차원 비선형 전자장 해석

단상 1MVA 고온초전도 변압기의 3차원 비선형 전자장 해석을 OPREA 3D를 이용하여 수행하였다. 그림 2는 단상 1MVA 고온초전도 변압기의 모델의 1/4 해석모델을 나타내고 있으며, 전자장 해석시 사용되어진 요소는 사면체 요소이며 해석모델의 요소수와 노드수는 각각 1,615,523 개와 274,449 개이다.

그림 3은 1MVA 고온초전도 변압기의 최대 정격전류 인가시 철심에서의 자속밀도 분포를 보여주고 있으며 이때 철심에서의 최대 자속 밀도는 0.377 T 이다.

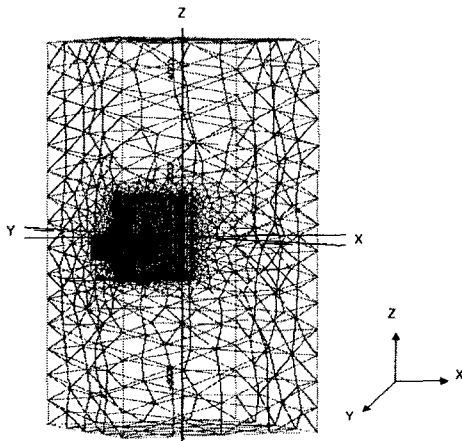


Fig. 2. Analysis model of a quarter of a 1MVA HTS transformer. The number of element is 1,615,523 and the number of node is 274,449.

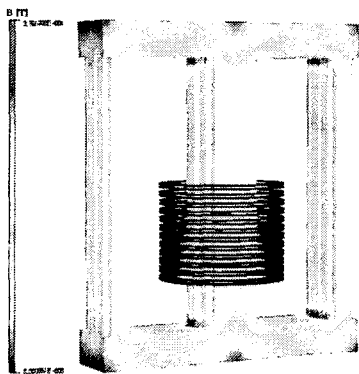


Fig. 3. Distribution of magnetic flux density of a 1MVA HTS transformer.

최대 정격전류가 권선부에 인가될 때, 고압측 권선(High 2)과 저압측 권선(Low 1)사이에서 방사상 방향으로의 누설 자기장의 세기를 그림 3에 나타내었다. 그리고 권선부의 안쪽(A)에서 바깥쪽(B)까지 수직으로 인

가되는 수직 자기장(B_r)의 크기를 그림 4에 보였으며 이때 권선부에 인가되는 최대 수직 자기장은 0.112 T 이다.

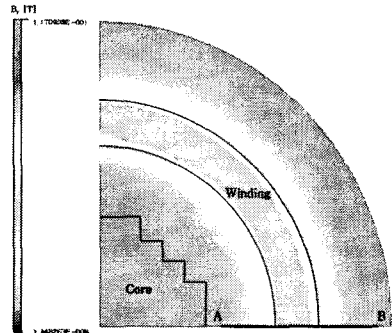


Fig. 3. Distribution of leakage magnetic flux density on between high winding(H2)and low(L1) winding.

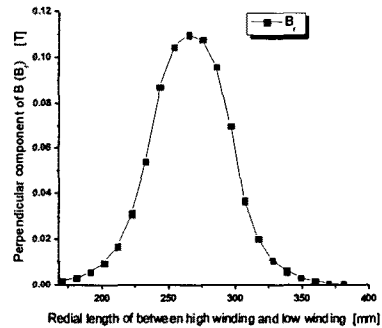


Fig. 4. Distribution of B_r from A to B on between high winding(H2)and low(L1) winding.

2.3 단상 1MVA 시험용 변압기 제작 및 시험

단상 1MVA 고온초전도 변압기의 누설 임피던스 해석의 검증용을 위해서 고온초전도 선재와 같은 형상의 크기를 가지는 구리선재를 제작, 이용하여 1MVA 시험용 구리 권선부 및 철심을 제작하였으며 상온 및 극저온(77K) 상태에서 실험을 하였다. 제작되어진 시험용 변압기의 그림을 그림 5에 나타내었으며, 상온 및 극저온 상태에서의 특성시험을 그림 6에서 보여주고 있다.

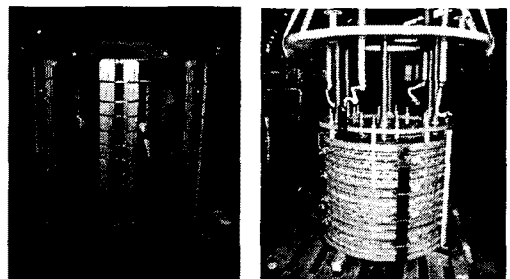
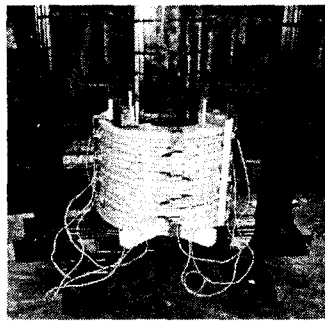


Fig. 5. (a)Manufactured shell type core and (b)copper windings of 1MVA test transformer.



(a) Room temperature



(b) Cryogenic state (77 K)

Fig. 6. Characteristics test of 1MVA test transformer. (a) is room temperature state and (b) is cryogenic state (77K)

2.4 단상 1MVA 고온초전도 변압기 와 시험용 변압기의 누설임피던스 해석.

1MVA 고온초전도 변압기의 3차원 비선형 전자장 해석을 통하여 얻어진 1MVA 고온초전도 변압기의 누설임피던스 해석값들 과 시험용 변압기의 실험을 통해서 얻어진 값들을 비교하여 표 2에 나타내었다.

Table 2. Characteristic values of both a 1MVA HTS transformer and test transformer.

Contents		HTS Tr.			Test Tr.		
		LN ₂ (77K)	Room Tem. (22 °C)	LN ₂ (77K)	LN ₂ (77K)	Room Tem. (22 °C)	LN ₂ (77K)
L(self)	1st	35.41 H	35.41 H	35.41 H	35.41 H	35.41 H	
	2nd	2.95 H	2.95 H	2.95 H	2.95 H	2.95 H	
M(mutual)		10.21 H	10.21 H	10.21 H	10.21 H	10.21 H	
Resistance	1st	0 Ω	20.64 Ω	3.10 Ω	3.10 Ω	3.10 Ω	
	2nd	0 Ω	1.48 Ω	0.22 Ω	0.22 Ω	0.22 Ω	
Leakage	1st	4.24 Ω	4.24 Ω	4.24 Ω	4.24 Ω	4.24 Ω	
Reactance	2nd	1.37 Ω	1.37 Ω	1.37 Ω	1.37 Ω	1.37 Ω	
% I _z		3.95 %	8.70 %	4.70 %	4.70 %	4.70 %	
Voltage Regulation		0.0782 %	7.4121 %	1.1742 %	1.1742 %	1.1742 %	
Efficiency		99.67 %	92.91 %	98.62 %	98.62 %	98.62 %	

본 논문에서는 1MVA 고온초전도 변압기의 자기 인덕턴스(self inductance), 상호 인덕턴스(mutual inductance) 그리고 누설 인덕턴스(leakage inductance)의 값들은 energy conservation method 를 이용하여 구하였다. 그리고 이렇게 구해진 변압기의 파라미터를 이용하여 1MVA 고온초전도 변압기 와 시험용 변압기의 효율, 전압 변동률 그리고 %I_z 등의 특성값들을 구하였다.

3. 결 론

단상 1MVA 고온초전도 변압기의 실제 제작에 앞서서 이 모델의 3차원 비선형 전자장 해석을 수행하였다. 고온초전도 선체를 사용하는 권선부에 방사상(수직)방향으로 인가되는 수직 누설 자기장의 크기를 확인 하였으며, 3차원 비선형 전자장 해석을 통해서 얻어진 값들을 이용하여 1MVA 고온초전도 변압기의 누설 임피던스 해석을 수행하였다. 또 고온초전도 선체와 같은 형상을 가지는 구리선체를 이용하여 시험용 변압기 변압기를 제작, 실험하여 수치해석상으로 구하여진 1MVA 고온초전도 변압기의 누설 임피던스 값들과 비교, 검증하였다. 본 논문은 단상 1MVA, 22.9 kV/6.6 kV 고온초전도 변압기의 제작에 도움이 될 것으로 사료된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] S.P. Metha, N.Aversa, and M.S. Walker, "Transforming Transformer," *IEEE Spectrum*, pp. 43-49, July 1997.
 [2] H.Zueger, et al., "630kVA High Temperature Superconducting Transformer," *Cryogenics*, vol. 38, pp.1169-1172, 1998.
 [3] K. Funaki, et al., "Development of a 22kV/6.9kV Single phase Model for a 3MVA HTS Power Transformer," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, no. 1, pp.1578-1581, March, 2001.
 [4] 이희준, 차귀수, 이지광, 한송엽, 류경우, 최경달, "더블 팬케이크 권선형 10kVA 고온초전도변압기," 대한전기학회 논문지, 제50B권, 제2호, pp.65-72, 2001.
 [5] Woo Seok Kim, et al., "Design of a 1MVA High Tc Superconducting Transformer," *Applied Superconductivity Conference 2002*, August, 2002.
 [6] Chan Bae Park, et al., "Magnetic Field Analysis of 1MVA HTS Transformer Windings," *Korea Japan Joint Workshop 2002 on Applied Superconductivity and Cryogenics*, 2002.
 [7] Sung Hoon Kim, et al., "3-D Analysis of Leakage Impedances in a 1MVA HTS Transformer," *KIASC Conference 2003*.