

154 kV/5 MVA 고온 초전도 변압기의 권선구조에 따른 교류손실

최지훈, 이승욱*, 김우석*, 박명진*, 이지광**, 최경달
한국산업기술대학교, 기초전력연구원*, 우석대학교**

AC Losses of 154 kV/5 MVA HTS Transformer by winding structures

J. Choi, S. Lee*, W. Kim*, M. Park*, J. Lee**, K. Choi

Korea Polytechnic Univ., Korea Electrical Engineering and Science Research Institute*, Woosuk Univ.**

Abstract - 초전도 변압기의 권선에서 발생하는 교류손실은 시스템의 효율과 안정성에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 고온 초전도 변압기의 권선 구조에 따른 교류손실과 % 임피던스 특성을 살펴보았다. 변압기 철심의 형태가 내철형과 외철형인 경우에 대하여 설계를 하였으며 각 형태에 따른 교류손실과 % 임피던스를 계산하였다. 154 kV/5 MVA 고온 초전도 변압기의 두 가지 철심 형태의 해석을 통해 각각의 특성을 비교하였다.

1. 서 론

고온 초전도 변압기는 효율 뿐 만 아니라 부피와 무게의 감소, 환경 친화적, 과부하내력 등의 측면에서 일반 변압기보다 좋은 특성을 가지고 있다. 고효율에 따른 에너지 절약과 운전비용의 감소가 초전도 변압기 개발 초기 단계의 큰 장점이었던 반면, 현재는 나날이 증가하는 부하에 대해 변압기의 무게와 크기를 줄일 수 있는 것을 더욱 더 큰 장점으로 잡고 있다. 기존 구리선을 이용한 변압기는 용량이 증가함에 따라 부피도 증가하게 되는데 이것은 현재 도심지에 설치 운영되고 있는 변전소를 추가적으로 물색해야 한다는 문제점을 유발시킨다[1]. 일반적으로 사용하고 있는 3상 154 kV급 변압기의 기준 용량은 60 MVA인 반면에 현재 연구가 진행되고 있는 초전도 변압기의 기준 용량은 100 MVA이다.

본 논문에서는 3상 100/120 MVA 고온 초전도 변압기의 개발에 앞서 핵심기술을 보유하기 위한 예비 연구로 2세대 선재를 사용한 154 kV/5 MVA 고온 초전도 변압기를 설계하였으며, 초전도 변압기의 권선 구조에 따른 교류손실, % 임피던스 해석을 통하여 각각의 특성을 비교하였다.

2. 본 론

2.1 154 kV/5 MVA 고온 초전도 변압기의 설계

단상 5 MVA 고온 초전도 변압기의 정격전압은 1차측 88.9 kV이고 2차측이 13.2 kV이며, 전력계통에서 사용되고 있는 배전용 변압기의 경우 단상 3대를 연결하여 사용한다. 따라서 5 MVA 초전도 변압기의 정격 전류는 상전압을 기준으로 하여 각각 56.2 A, 378.3 A이다. 설계에 사용된 선재는 2세대 초전도 선재인 YBCO Coated Conductor이며, 1차측 권선은 단일선재를 사용하여 설계

<표 1> YBCO Coated Conductor의 사양

Thickness of YBCO CC	200 μm
Width of YBCO CC	4 mm
Stabilizer	Cu, Thickness 75 μm
Thickness of YBCO layer	2 μm
Critical current	120 A @ 77 K, 0 T
	228 A @ 69 K, 0 T

<표 2> 단상 5 MVA 고온 초전도 변압기의 설계 사양

항 목	특 성
용 량	5 MVA
정 격 전 류	154/√3 kV / 22.9/√3 kV
	56.2 A / 378.3 A
권 선 선 재	YBCO Coated Conductor
	888 / 132
재 료	규소 강판
철 심 단면적	2666.5 cm ²
	최대자속밀도

하였고, 2차측 권선은 단일선재 6개를 적층한 병렬 선재를 이용하여 권선하는 형태로 설계하였다. 초전도 권선의 형태는 교호 배치 권선보다 교류 손실 측면에서 매우 효율적인 동심형 배치 구조로 하였다. 초전도 변압기의 운전 온도는 과냉각된 액체질소를 이용하여 초전도 권선을 냉각시켜 동작하며, 초전도 변압기 설계 시 권선의 온도는 교류 손실에 의한 발열을 고려하여 69 K으로 가정하고 설계하였다.

본 논문에서는 5 MVA 고온 초전도 변압기 철심의 형태를 내철형과 외철형으로 각각 설계하고 전자장 해석을 통한 교류 손실과 % 임피던스를 해석하여 비교하고자 한다.

2.2 초전도 변압기의 권선 구조 및 손실 해석

고온 초전도 선재로 권선을 제작하여 변압기에 설치하였을 때 초전도 권선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자장은 권선 내 각각의 테이프에 외부 인가 자장으로 작용하여 초전도 선재의 자화 손실을 발생시킨다. 이 외부 자장에 의한 손실은 초전도 선재 각각에서 발생하는 자기 손실보다 매우 크며, 권선부에서 발생하는 자장의 성분 중에서도 수평 방향의 자장에 의한 손실보다 수직 방향의 자장에 의한 손실이 매우 크다[4]. 교류손실은 변압기의 효율 감소 및 온도 상승 등으로 인해 초전도 변압기의 안정성을 저하시키는 요인으로 작용하기 때문에 초전도 권선의 교류손실 해석은 매우 중요하다. 본 논문에서는 교류손실 해석을 위해 내철형 변압기와 외철형 변압기를 설계하였다. 두 모델은 권선의 배치와 철심의 형태는 차이가 있으나, 1차 및 2차측의 권선 턴 수와 철심의 단면적, 최대 자속 밀도는 동일하다.

내철형 고온 초전도 변압기의 설계 사양을 표 3에 나타내었다. 초전도 권선에 전류가 흐를 때 권선 내의 초전도 선재에 발생하는 자장을 유한요소 프로그램으로 계산하고, 이를 이용하여 권선에서 발생하는 교류손실을 계산하였다. 그림 1 (a)는 내철형 고온 초전도 변압기의 해석 모델을 나타낸다. 해석 모델에서 1차측 권선과 2차측 권선의 내경이 다른 이유는 저압측에 3차 권선을 고려하여 설계를 하였기 때문이다. 또한 극저온 용기도 고려를 하여 설계하였는데 철심에서는 철심으로 인한 열

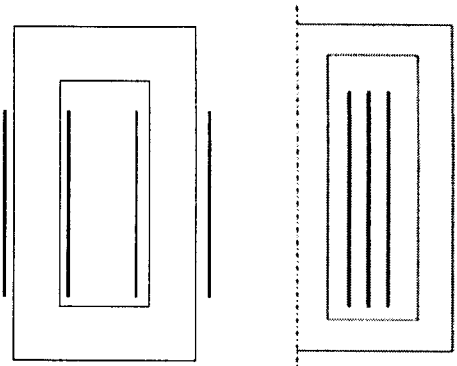
이 발생하기 때문에 냉각 효율을 높이기 위하여 철심은 상온에 위치시키고 권선만을 극저온 용기 안에 위치시키는 방법을 선택하였다.

외철형 고온 초전도 변압기의 설계 사양은 표 4와 같고, 축 대칭 해석 모델은 그림 1 (b)와 같다. 표 3과 표 4에 나타나 있는 바와 같이 각 변압기의 설계 값을 비교해보면 사용된 선재의 길이는 내철형이 4062 m, 외철형이 5971 m이며, 철심의 무게는 각각 18 ton, 14.4 ton이었다. 따라서 내철형 변압기는 외철형 변압기에 비해 코어를 구성하는 철의 양이 많이 소모되고 무게가 더 무겁다는 단점이 있지만 권선의 길이를 절약할 수 있다는 장점 또한 가지고 있다. 초전도 변압기에서 가장 많은 비용을 차지하는 것이 권선 제작에 필요한 초전도 선재임을 고려해 볼 때 초전도 변압기의 형태는 외철형보다 내철형의 구조가 경제적인 측면에서 훨씬 더 저렴한 것으로 볼 수 있다. 수치 해석 결과, 내철형, 외철형 변압기의 % 임피던스는 각각 1.45 %, 0.58 %로 계산되었으며 표 5에 나타내었다. 이 결과는 초전도 변압기의 설계 시 권선간 절연을 고려한 값이며, 국내 전력계통에서 요구하는 변압기의 % 임피던스 값 15 %보다 낮게 설계되었다. 하지만 최종 목표는 3상 100/120 MVA 고온 초전도 변압기를 개발하는 것이므로 본 논문의 5 MVA 초전도 변압기 설계에서는 고전압 절연만을 고려하였다. % 임피던스를 크게 키우기 위해서는 외철형 변압기보다 내철형 변압기가 더 유리하다는 것을 보여준다.

두 경우의 교류 손실 해석 결과, 외철형은 200 W, 내철형은 273 W로 계산되었다. 내철형의 교류손실이 외철

<표 5> 내철형과 외철형 고온 초전도 변압기의 해석결과

	내철형	외철형
% 임피던스 [%]	1.45	0.58
교류 손실 [W]	273	200



<그림 1> 고온 초전도 변압기의 해석 모델
(a) 내철형, (b) 외철형

형의 교류손실보다 크게 계산되었지만 내철형의 % 임피던스가 외철형보다 크다는 점을 고려하면 외철형보다 내철형 변압기가 효율적이다. 일반적으로 % 임피던스를 키우기 위해서는 권선 간 간격을 넓혀야 하기 때문에 철심의 크기, 저온 용기의 크기, 사용선재의 길이 등이 늘어나고 교류손실도 많아지기 때문이다.

3. 결 론

3상 154 kV/22.9 kV 고온 초전도 변압기를 제작하기에 앞서 단상 154 kV/5 MVA 고온 초전도 변압기를 내철형과 외철형 두 가지로 나누어 설계하였다.

내철형은 외철형보다 철의 양은 많았지만, 권선에 필요한 초전도 선재의 양이 적어 고온 초전도 변압기 제작에 필요한 총 비용 등의 측면에서 유리하였다. 또한 내철형과 외철형의 구조에 따른 교류손실과 % 임피던스 해석을 수행하였는데, % 임피던스 측면에서는 내철형이 유리하였고, 교류손실 측면에서는 외철형 변압기가 유리하였다.

본 논문의 권선 구조에 따른 결과 비교는 고온 초전도 변압기 설계에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 예상되며, 이에 대한 연구를 추가적으로 진행 중이다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용 기술 개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.W. Lee, W.S. Kim, S.Y. Han, Y.I. Hwang, K. D. Choi, "Conceptual Design of a Single Phase 3 MVA HTS Transformer with a Tertiary Winding", The Korean Superconductivity Society, vol. 7, No. 2, pp 162-166., 2006.
- [2] 중소규모 배전용 초전도 변압기 개발, 과학기술부, 2004.

<표 3> 내철형 고온 초전도 변압기의 설계 사양

		1차 권선	2차 권선
Winding	Number of layers	178	132
	Conductor	1	6
	Number of Turns	6	1
	Length [m]	2018.3	2043.4
	Total Length [m]	4061.7	
Strand Cross Section		YBCO tape 5 mm × 0.31 mm (with insulation)	
Core	Height/Width	3,230 mm / 1,550 mm	
	Dimension [m ²]	4.41	
	Volume [m ³]	2.29	
	Weight [ton]	18	

<표 4> 외철형 고온 초전도 변압기의 설계 사양

		1차 권선	2차 권선
Winding	Number of layers	148	132
	Conductor	1	6
	Number of Turns	3	1
	Length [m]	3155.9	2814.7
	Total Length [m]	5970.5	
Strand Cross Section		YBCO tape 5 mm × 0.31 mm (with insulation)	
Core	Height/Width	2,700 mm / 2,440 mm	
	Dimension [m ²]	3.536	
	Volume [m ³]	1.839	
	Weight [ton]	14.4	