

OLTC를 고려한 33 MVA 초전도 변압기 설계

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

Design of a 33 MVA HTS Transformer with OLTC

J.H. Choi*, S.W. Lee**, M.J. Park**, W.S. Kim**, K.D. Choi*
*Korea Polytechnic University, **Electrical Engineering and Science Research Institute

Abstract - We have proposed a 100 MVA, 3 phases, 154 kV class HTS transformer which will substitute for 60 MVA conventional transformer.

In this paper, we designed conceptually the structure of the superconducting windings of a single phase 33 MVA transformer. The power transformer of 154 kV class has a tertiary winding besides primary and secondary windings. So the HTS transformer should have the 3rd superconducting winding, it makes the cost of the HTS transformer high and the efficiency low. Further more we considered On Load Tap Changer (OLTC) in HTS power transformer. OLTC equipment is required for fitting to a power transformer by which the voltage ratio between the windings can be varied while the transformer is on load. We analyzed the electrical characteristics of the HTS transformer such as magnetic stress and AC loss.

1. 서 론

고온초전도체가 발견된 이후 저항손실이 없는 초전도 전력기기 개발에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 초전도 선재를 사용한 변압기, 한류기, 케이블, 모터 등은 이제 연구 단계를 지나 실용화와 상용화 단계로 들어가고 있다. 특히 초전도 변압기는 일반 변압기와 비교하여 기본적인 구조가 크게 차이나지 않으면서 구리를 사용한 일반 변압기와 비교하여 효율 상승, 무게 및 부피의 감소, 절연유를 사용하지 않기 때문에 화재에 대하여 안전하고 환경 친화적이며, 과부하 내력의 증가 등의 많은 장점을 가진다. 현재 초전도 변압기의 상용화를 위한 연구가 국내·외에서 활발히 수행되고 있으며 점차 고전압화, 대전류화가 되고 있는 추세이다[1][2].

현재 연구되어지고 있는 초전도 변압기의 경우 BSCCO 계열의 선재를 사용하고 있으며, 이 선재의 자장에 대한 이방성 특성 때문에 교류손실이 큰 문제로 대두되고 있다. 초전도 변압기에서 발생하는 교류손실 자체의 크기는 일반 변압기의 동손과 비교하여 크기는 작지만 저온에서 사용되기 때문에 초전도 선재에서 발생하는 손실은 냉매의 온도를 올리는 역할을 하게 되므로 온도를 낮추기 위한 추가적인 에너지가 소비된다. 또한 저온냉각 장치의 비용이 전체 초전도 변압기 제작비용의 50%를 차지하기 때문에 교류손실이 매우 중요하다. 하지만 초전도 선재에서 발생하는 교류손실의 경우 개발 중에 있는 2세대 초전도 선재가 다심형태와 트위스트 되어서 나오게 된다면 초전도 선재에서 발생하는 교류손실을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

이상적인 변압기에서는 2차 전압(부하 전압 또는 저압)이 규정된 정격전압으로 유지되나, 실제 변압기는 설치되는 장소마다 1차 전압(수전 전압)이 일정하지 않고, 부하 전류의 크기 및 역률에 따라 변압기의 내부 전압 강하도 계속 변화므로 2차측 출력 전압 역시 변동되는 문제가 발생한다. 따라서 변동되는 부하에 대하여 2차 전압을 정격 전압에 가깝게 조정할 수 있도록 변압기 권선 비를 바꾸어야 하며, 부하 시 변압기의 전압을 바꾸게 만드는 장치가 OLTC(On Load Tap Changer)이다. OLTC는 현재 우리나라에서 사용되고 있는 대용량 변압기에 적용이 되어 사용되고 있으며, 초전도 변압기의 상용화를 위해서는 반드시 고려되어야 될 사항이다.

본 논문에서는 대용량 고온 초전도 변압기의 상용화를 위한 기술적 토대를 마련하기 위하여 33 MVA, 154 kV급 초전도 변압기에 OLTC를 적용한 변압기를 설계하였으며, OLTC를 적용한 초전도 변압기의 특성 해석하였다.

2. 본 론

2.1 OLTC의 원리

전압 탭 변환장치는 부하의 변동에도 일정한 전압 공급을 위하여 변압기가 가압된 상태에서 권선의 탭 접속을 변경하기 위한 장치로 부하 시 탭 절환장치(OLTC)와 무 부하 탭 절환장치(NLTC)가 있다. 이들 중 OLTC는 NLTC에 비해 고가이고 기구가 복잡하며 탭 선택기, 절환 스위치, 선택 스위치, 절환 선택기, 구동 장치 등으로 구성되어 있다[3]. 하지만 부하의 변화에 대하여 즉시 응답을 할 수 있어 변압기에 가격이 싼 NLTC보다 OLTC를 사용한다. OLTC의 전압 조정 범위는 일반적으로 정격 전압의 $\pm 10\%$ 이고 정격 전압을 기준으로 조정 가능한 범위 내에서 정격 전압에 대한 5/4%의 탭 간격을 가져야한다[4].

OLTC의 탭 선택기와 변압기의 탭 권선의 결선은 OLTC가 부하 시에 변압기의 전압 비 조정에 도움을 준다. 먼저 구동 장치에 의해 탭 선택기가

다음 탭의 위치로 옮겨가고, 탭 선택기는 선택된 동작 탭의 위치를 절환 스위치의 접점에 연결시켜주는데 일시적으로 한 단계의 탭을 단락시킨다. 절환 스위치는 선택된 탭에 동작 전류를 전달시켜주며, 탭 절환기가 조정 범위의 중간 부분을 지날 때는 전위 절환 선택기가 과인 탭 선택기와 함께 동작하고, 선택기 두 개의 가동 부분은 동작 시에 무 부하 상태가 된다. 절환 스위치는 부하상태에 있는 탭에서 선택된 탭으로 동작전류를 옮겨 주어 정격전압을 유지시킨다[5].

2.2 OLTC를 고려한 초전도 변압기 설계

대도시 빌딩의 지하에 설치되어 있는 60 MVA 일반 변압기를 대체할 수 있는 100 MVA, 154 / 22.9 kV 초전도 변압기를 OLTC를 적용하여 개념 설계를 하였다. 일반적으로 사용되고 있는 3상 60 MVA, 154 kV/22.9 kV 변압기는 변압기의 무게와 부피 때문에 수송의 어려움이 있어 단상 변압기 3개를 연결한 상 분리형을 사용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 단상 33 MVA 변압기에 대한 내용을 기술하였다.

상 분리형 변압기는 3차 고조파와 2차측 부하의 불평형을 막기 위하여 3차 권선을 제작하고 결선을 하여 운전용 해야 하므로 OLTC와 함께 3차 권선을 고려한 33 MVA 단상변압기를 2세대 초전도 선재를 사용하여 개념 설계하였다. 33 MVA, 154 kV/22.9 kV 초전도 변압기의 설계사양은 표 1에 나타내었다. 변압기 결선은 Y-Y- Δ 이며, 변압기 1차측 권선 전압은 88.91 kV($= 154/\sqrt{3}$)이고 2차측 전압은 13.22 kV이며, 1차측 전류와 2차측 전류는 각각 371.2 A와 2496.9 A이다.

초전도 변압기의 철심은 외철형이며, 초전도 변압기의 권선 배치는 교류손실을 줄이기 위하여 동심축 형태로 배치하였다. 초전도 변압기의 냉매는 액체질소를 사용한다. 초전도 선재의 온도가 낮아지면 초전도 선재의 임계 전류는 증가하게 된다. 따라서 초전도 선재의 전류용량을 늘리기 위하여 초전도 변압기의 동작온도를 65 K로 설정하였다. 하지만 초전도 선재에서 발생하는 열로 인하여 권선 부분의 온도는 동작온도보다 높을 것이다. 따라서 변압기 설계에서 초전도 선재의 임계전류는 69 K로 설정하였다.

표 1과 같은 사양을 만들기 위해 설계를 하였더니 권선의 정격 턴 수는 1차에 891턴, 2차에 132턴이고, 권선의 배치는 PSPT(Primary-Secondary-Primary-Tertiary) 형태를 사용하여 1차, 2차, 1차, 3차의 순서로 배열되어 있다. 이 권선들의 형상은 1차측은 연속 디스크 권선의 형태이고, 2차와 3차 측은 레이어 권선의 형태이다. 초전도 권선에서 발생하는 자장성분은 교류손실을 발생시키고, 이 교류손실이 초전도 변압기의 효율과 고가의 냉각 시스템의 용량을 결정한다. 그러므로 이 교류손실을 감소시키기 위해 고압 축과 저압축 3차 권선의 배치를 동심 배치형태로 구성하였다[6][7]. 각 권선의 배치를 고려하기 위해 철심의 단면적을 560 mm로 설계하였고, P-S-P-T 순의 권선들의 반경은 차례로 400, 450, 605, 760 mm가 되며, 초전도 선재에 전류를 흘려주기 위해 1차에는 5개, 2차에는 30개, 3차에는 20개의 선재를 적용시켜 주었다.

2.3 OLTC 적용 변압기 설계

변압기에 필요한 조건을 만족시키는 OLTC를 선정하는 것은 매우 중요한 일이다. OLTC의 선정에 앞서 변압기 권선에 대한 제반 성질인 정격 용량, 결선 방식, 정격 전압과 전압 조정 범위 등을 우선적으로 조사하였다. 그 중 한국 산업 규격의 변압기 권선 전압의 지정된 전압 조정 범위 규격에 따르면 부하 시 탭 절환 장치는 정격전압을 기준으로 지정된 범위에서 정격전압에 대한 5/4%의 탭 간격을 가져야 하며, 탭 전압을 설치하는 경우 탭의 수는 중앙 탭을 포함하여 최소 표 3과 같은 수를 가져야 한다. 이 전압 조정 범위를 참고하여 OLTC 설치를 위한 탭을 내야 할 권선의

<표 1> 33 MVA, 154 kV/22.9 kV 초전도 변압기의 설계 사양

General Property		Capacity	33 MVA
Winding	Primary	Voltage/Current	154 kV/0.37 kA
		Winding type	Continuous type
Winding	Secondary	Voltage/Current	22.9 kV/2.5 kA
		Winding type	layer type
Winding	Tertiary	Voltage/Current	6.6 kV/1.6 kA
		Winding type	layer type
Core		Magnetic field	1.4 T

〈표 2〉 초전도 변압기의 권선부의 설계

Primary	권선 반경 [mm]	400	
	적층 턴 수	5	
Secondary	권선 반경 [mm]	450	
	적층 턴 수	30	
Winding	Primary	권선 반경 [mm]	605
		적층 턴 수	5
Tertiary	권선 반경 [mm]	760	
	적층 턴 수	20	
Core	단면적 [mm]	560	

턴 수를 결정하였으며, 1차 권선에서 탭을 설치하였다. 이는 변압기의 1차 전압이 정격 전압 이상의 과전압이 될 경우에도 철심이 과포화 되는 것을 막을 수 있으며, 1차 권선에 흐르는 전류가 적은 만큼 탭 및 탭 인출 리드 등의 단면적도 작게 할 수 있어 경제적인 제작이 가능하기 때문이다. 여기서 이 탭과 접촉하는 탭 선택기만 액체 질소 내로 설치가 되고 OLTC의 나머지 구동 장치들은 상온에 설치되어 일반 변압기의 OLTC부와 같다.

본 논문에서는 여러 가지 변압기 설계 값들 중 100 V/T, 2차 권선의 수는 132턴으로 선정된 후 1차측 권선 수를 계산하였다. 승압과 강압의 탭 수가 각각 8개씩이므로 8등분을 한 후의 권선의 턴 수를 계산 하였다. 계산된 턴 수는 정수가 아니기 때문에 권선의 턴 수가 정수가 되도록 수정하였다. 권선의 턴 수를 정수로 하는 과정에서 전압이 설계 값과 차이가 발생할 수 있으므로 출력 전압 오차(ε)가 0.5 %를 넘어서지 않으면 범위에서 정수화시켰다. 계산된 결과를 표 4에서 보여준다. 다음 식은 출력 전압 오차(ε)를 구하는 식이다[8].

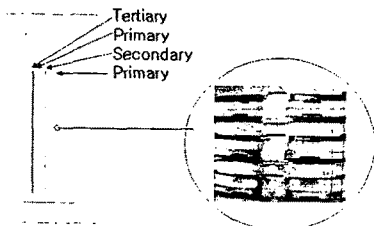
$$\epsilon = \frac{N_1 \times (V/T) - V_1}{V_1} \times 100 [\%]$$

여기서, N_1 은 1차 권선의 턴 수이며, V_1 과 V/T 는 각각 1차 전압과 턴당 가해지는 전압이다. 표 4에서와 같이 1차 권선의 다른 탭을 선택하게 되면 그 탭의 권선 수에 따라 2차 전압이 바뀌게 될 것이다.

초전도 선재는 일반 변압기에 사용되는 구리선과 비교하여 기계적 강도 및 전기적 특성이 다르기 때문에 권선 중간에 전류를 인가할 수 있는 탭을 뽑아내는 것이 어렵다. 본 논문에서는 1차 권선을 연속 디스크 권선과 디스크 권선 형태로 나누어 배치함으로써 초전도 권선의 탭을 인출하는 문제를 해결하였다. 그림 1은 설계된 변압기의 형상과 탭의 형태를 나타내는 개념도이다.

초전도 변압기에 탭을 내고 OLTC의 탭 선택기 공간을 확보하기 위하여 앞서 설계된 변압기의 권선 위치를 TPSP로 바뀌었으며, 1차측 턴 수가 891턴에서 979턴으로 수정 되었다. 표 5는 OLTC한 33 MVA 초전도 변압기의 권선사양이다. 권선의 반경은 3차 권선이 철심에 가까이 위치하며, 레이어 권선으로 반경이 400 mm, 철심과 가까운 1차 권선은 연속 디스크 권선으로 반경이 450 mm, 2차 권선은 레이어 권선으로 반경이 605 mm, OLTC 적용을 위한 바깥쪽 1차권선의 형태는 연속 디스크 권선과 팬케이크 권선으로 구성되며, 반지름은 760 mm이다. 1차 권선은 489.5턴으로 정수가 아닌 턴으로 나누어진다. 이는 OLTC를 적용하기 위한 탭을 내기 위하여 탭 간격을 11 턴으로 고정하여 설계했기 때문에 정수 턴으로 설계되지 않았다. 일반적인 권선 방식이라면 정수배로 수정하여 설계하여야 하나 연속 디스크 권선 방식으로 권선하게 되면 정수 배의 턴 수가 아니어도 제작 가능하기 때문에 1차측 전체 권선 수를 979턴으로 설계하였다. 설계된 33 MVA 초전도 변압기에 제작에 필요한 YBCO 선재의 전체 길이는 42 km이며, 이는 OLTC를 적용하지 않은 변압기에 비해 7 km의 선재가 더 소요된다.

설계된 33 MVA 초전도 변압기의 전기적 특성을 확인하기 위하여 유한 요소법을 이용하여 교류손실 및 권선에 가해지는 스트레스를 계산하였다. 초전도 권선에서 발생하는 교류손실을 계산하기 위해 수치해석 방법을 이



〈그림 1〉 TPSP 권선 형태와 바깥 쪽 1차 권선의 전압 탭

〈표 3〉 OLTC에서 탭 전압 설치 시 적용할 탭 수

조정범위 (정격전압에 대한 %)		탭 수		
승압	강압	승압	강압	총 탭 수 (중앙 탭 포함)
10	10	8	8	17

〈표 4〉 OLTC에서 탭 전압 설치 시 적용할 탭 수

	1차 권선의 턴 수 (N)	2차 전압 (kV)
승압	803	25.32
	814	24.97
	825	24.64
	836	24.32
	847	24.0
	858	23.69
	869	23.39
	880	23.1
2차 기준전압	891	22.81
강압	902	22.54
	913	22.27
	924	22.0
	935	21.74
	946	21.49
	957	21.24
	968	21.0
	979	20.76

〈표 5〉 OLTC를 적용하기 위한 권선 설계 사양

	3차 권선	1차 권선	2차 권선	1차 권선
권선 반경[mm]	400	450	605	760
적층 개수	20	5	30	5
Section당 권선 수	1	5.5	1	5.5
Section 수	165	89	132	89
총 권선 수	165	489.5	132	489.5
Section당 길이[mm]	2515.22	15585.93	3803.27	26298.75
총 길이[km]	8.3	6.9	15	11.7

용하였으며 초전도 코일에서 발생하는 자장을 수평성분과 수직성분의 크기를 strip과 slab모형을 이용한 식을 사용하여 초전도 변압기 권선에서 발생하는 교류손실을 계산하였다. 초전도 권선에서 발생하는 교류손실 해석은 고압측과 저압측에 변압기 정격 전류가 흐르고 3차 권선에는 전류가 흐르지 않는다고 가정하고 계산을 하였다. 해석 결과 설계된 초전도 변압기의 교류손실은 135 kW이다. 이 손실 값은 향후 교류용 2세대 초전도 선재가 개발되면 1/8이상 줄어들 수 있을 것이다. 또한 권선에서 계산된 힘은 1차 권선 영역에서는 수평 방향 및 수직방향으로 각각 -34 N, 11.4 N의 힘이 작용하며, 2차권선 영역에서는 수평 방향으로 30 N, 축 방향으로는 -45 N의 힘이 작용하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 초전도 변압기에 대한 많은 연구가 이루어짐에 따라 일반 변압기보다 많은 장점을 가진 초전도 변압기를 상용화시키기 위해 OLTC를 적용한 33 MVA, 154 kV/229 kV 초전도 변압기를 개념 설계하였다. 일반 변압기의 구리선과는 다른 초전도 선재의 특성을 고려하였으며, 100 V/T을 이용하여 33 MVA 초전도 변압기의 탭을 내야 할 권선의 턴 수와 초전도 변압기에 적용시키기 위한 사항들을 고려하였다. 교류손실을 감소시키기 위해 권선의 배치를 TPSP로 하였으며, 권선 중간에 전류 인가가 가능한 탭을 내는 문제를 1차 권선을 연속 디스크 권선과 디스크 권선 형태로 나누어 배치함으로써 해결하였다. 이 초전도 변압기의 OLTC와 일반 변압기의 OLTC와 다른 점은 탭 선택기가 액체 질소 내에 설치된다는 것이다. 앞으로 OLTC에 관한 연구를 더 진행할 예정에 있으며 이러한 사항들을 이용하여 초전도 변압기의 상용화를 실현시킬 수 있을 것으로 보인다.

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

〈참고 문헌〉

- [1] 김재근, 김병주, 박진아, 임선원, 홍계원, 이희균, 김호진, 최경달, 김우석, 이승욱, 고태국, "coated conductor의 접합 및 특성 평가방법", 대한전기학회 하계학술대회 논문 B권, pp1285-1287, 2005
- [2] 이승욱, 김우석, 최경달, "2G Wire를 사용한 33 MVA 초전도변압기 설계", 한국초전도저온공학회, 2005
- [3] KS C IEC 60214-1, 한국 표준 협회
- [4] "3 MVA 이상 전력용 변압기" 한전 표준 구매 시방서, 한국 전력 공사
- [5] "초고압 수·변전 설비 기술안내서", 주식회사 효성
- [6] S. W. Lee, W. S. Kim, S. Y. Hahn, Y. I. Hwang, K. D. Choi, "Conceptual Design of a Single Phase 33 MVA HTS Transformer with a Tertiary Winding", Progress in Superconductivity, Vol.7 No.2, pp162-166, 2006
- [7] 황영인, 김우석, 이승욱, 장태라, 한진호, 주형길, 최경달, 한승엽, "초고압 초전도 변압기용 연속 디스크 권선", 대한전기학회 하계학술대회 논문 B권, pp1234-1236, 2005
- [8] 이승욱, "적층시편에서 측정된 손실을 이용한 고온초전도 코일에서 발생하는 교류손실 산정 및 측정", 순천향대학교, 2004