

154 kV급 5 MVA 고온초전도 변압기의 교류손실

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

Analysis of AC Losses in 154 kV Class 5 MVA HTS Transformer

Jeehoon Choi, Seungwook Lee*, Wooseok Kim*, Jikwang Lee**, Kyeongdal Choi, Songyeop Hahn*
 Korea Polytechnic University, Korea Electrical Engineering and Science Research Institute*, Woosuk University**

Abstract - 초전도체는 일반도체와 달리 직류 전류 인가 시에 저항이 발생하지 않지만 교류 전류 인가 시에는 히스테리시스에 의한 교류 손실이 발생한다. 이러한 초전도 선재를 이용하여 제작한 초전도 변압기에서 발생하는 교류손실은 변압기의 효율 감소 및 온도 상승으로 인해 초전도 변압기의 안정성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 본 논문에서는 외철형의 구조를 갖는 154 kV급 5 MVA 고온 초전도 변압기를 YBCO CC 선재를 사용하여 설계하였다. 또한 2차원 수치해석을 통해 YBCO CC 선재의 자화 손실을 계산하고, 이를 154 kV급 5 MVA 고온 초전도 변압기의 권선부에서 발생하는 수직 방향의 자장에 적용하여 변압기의 교류손실을 계산하고 그 결과를 나타내었다.

1. 서 론

고온 초전도 변압기는 일반 변압기에 비해 부피와 무게의 감소, 고효율, 환경 친화적, 과부하내력 등의 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 국내의 경우 고온초전도 변압기에 대한 연구가 이루어지고 있다. 2001년 1 MVA, 22.9 /6.6 kV 단상 초전도 변압기의 기술 개발을 착수하여 2003년 제작하였으며, 2004년부터 154 kV급 초전도 변압기를 상용화하기 위한 절연, 권선, 냉각 등의 요소 기술을 개발하였다. 현재 3상 100 MVA, 154 /22.9 kV 초전도 변압기 개발을 위한 기술적 토대를 마련하기 위한 예비 연구 단계로 단상 154 kV급 5 MVA 고온 초전도 변압기 개발에 착수하였다. 단상 5 MVA, 154 /22.9 kV 고온 초전도 변압기는 100 MVA, 154 /22.9 kV 초전도 변압기와 비교하여 전류 용량만 다르게 고려하여 설계하였다.

테이프 형상의 초전도 선재에 교류 전류가 흐르게 되면 선재에 교류 손실이 발생하게 된다. 교류손실은 초전도 변압기 시스템의 설계와 제작에 중요한 요소로 작용하므로 초전도 변압기 설계에 앞서 교류손실의 해석이 필요하다[1]. 따라서 본 논문에서는 단상 154 kV급 5 MVA 고온 초전도 변압기를 개념적으로 설계한 내용을 바탕으로 5 MVA 고온 초전도 변압기 권선에 인가되는 누설자장에 의해 발생하는 교류손실을 해석하였다.

2. 본 론

2.1 154 kV/22.9 kV 고온 초전도 변압기의 설계

현재 국내 전력계통에서 사용되고 있는 배전용 변압기는 단상 변압기 3대를 결선하여 사용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 3상 154 /22.9 kV 고온 초전도 변압기를 제작하기에 앞서 단상 154 kV급 5 MVA 고온 초전도 변압기를 설계하였다.

초전도 변압기의 설계를 위해서는 자장과 온도에 따른 2세대 초전도 선재의 임계전류를 아는 것은 중요하다. 선재 개발 추이를 고려한 2세대 초전도 선재의 제원을 표 1에 나타내었으며, 이를 고려하여 초전도 변압기를 설계하였다. 1차측 권선은 단일선재, 2차측 권선은 단일선재 6개를 적용한 병렬 선재를 이용하여 설계하였다. 초전도 권선의 형태는 교호 배치 권선보다 수직 누설자장의 크기와 교류 손실 측면에서 효율적인 동심형 배치 구조로 하였다. 교호 배치 권선은 철심 축 방향으로 더블 팬케이크 형태의 고압권선과 저압권선이 서로 샌드위치와 같이 배열되어 있는 형태의 권선을 말하며, 동심 배치 권선은 더블 팬케이크 권선을

<표 1> YBCO Coated Conductor의 제원

| | |
|-------|--------------------------|
| 두께 | 200 μ m |
| 너비 | 4 mm |
| 안정화층 | Cu, Thickness 75 μ m |
| 임계 전류 | 120 A @ 77 K, 0 T |
| | 228 A @ 69 K, 0 T |

<표 2> 단상 5 MVA 고온 초전도 변압기의 설계 제원

| | | | |
|-------|--------------|---|----------|
| 정 격 | 용 량 | 5 MVA | |
| | 전 압 | 89.1 kV / 13.2 kV | |
| | 전 류 | 56.2 A / 378.3 A | |
| 권 선 | 선 재 | YBCO Coated Conductor 5 mm x 0.31 mm (with insulation) | |
| | 턴 수 | 888 / 132 | |
| | | 1차 권선 | 2차 권선 |
| | 디스크 수 | 296 | 132 |
| | 디스크 당 턴 수 | 3 | 1 |
| | 1턴 당 사용 도체 수 | 1 | 6 |
| | 선재의 길이 | 3156 [m] | 2815 [m] |
| 철 심 | 총 길이 | 5971 [m] | |
| | 재 료 | 규소 강판 | |
| | 단면적 | 2666.5 [cm ²] | |
| | 높이 / 너비 / 폭 | 2,700 / 2,440 / 520 [mm] | |
| | 무 게 | 14.4 [ton] | |
| 변 압 기 | 최대자속밀도 | 1.48 [T] | |
| | 형 태 | 외철형 | |
| | 바닥 면적 | 3.27 [m ²] | |
| | 부피 | 1.8 [m ³] | |

사용하여 고압측 권선과 저압측 권선이 철심을 중심으로 방사 방향으로 배치되는 형태의 권선을 말한다[2]. 단상 154 kV급 5 MVA 고온 초전도 변압기의 정격전압은 1차측이 88.9 kV이고 2차측이 13.2 kV이며, 정격전류는 상전압을 기준으로 하여 1차측, 2차측이 각각 56.2 A, 378.3 A이다. 초전도 변압기는 과냉각된 액체질소를 이용하여 초전도 권선을 냉각시켜 운전하며, 초전도 변압기 설계 시 권선의 온도는 교류 손실에 의한 발열을 고려하여 69 K으로 설정하고 설계하였다.

일반적으로 변압기의 구조는 철심의 형태에 따라 크게 외철형과 내철형으로 구분한다. 본 연구에 앞서 외철형과 내철형 구조를 갖는 단상 154 kV급 5 MVA 고온 초전도 변압기를 설계하였다. 두 변압기의 비교 결과, 외철형 변압기가 내철형 변압기에 비해 변압기의 부피가 작고, 철심에 필요한 철의 양이 적어 무게의 측면에서 유리하였기 때문에 본 논문에서는 철심의 형태로 외철형을 채택하였다. 외철형 고온 초전도 변압기의 설계 제원은 표 2와 같다. 본 초전도 변압기의 % 임피던스는 0.58 %로 계산되었으며, 이는 국내 전력계통에서 요구하는 변압기의 % 임피던스 값인 15 %인 것에 비해 매우 낮다. % 임피던스를 키우기 위해서는 권선 간의 간격을 넓혀야 하며, 그에 따라 철심의 크기, 저온 용기의 크기, 사용선재의 길이 등이 늘어나게 된다. 따라서 초전도 변압기의 설계 시 이와 같은 변수들을 고려하여 설계하여야 한다[3].

2.2 수직방향 외부자장에 의한 YBCO CC의 자화손실

고온 초전도 선재를 이용하여 제작한 권선을 변압기에 설치하였을 때 초전도 권선에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자장은 권선 내 각각의 선재에 외부 인가 자장으로 작용하여 초전도 선재의 자화 손실을 발생시킨다. 이 외부 자장에 의한 손실은 초전도 선재 각각에서 발생하는 자기 자계 손실보다 크며, 권선부에서 발생하는 자장의 성분 중에서도 수평 방향의 자장에 의한 손실보다 수직 방향의 자장에 의한 손실이 크다.

본 논문에서는 초전도 선재의 표면에 수직으로 인가되는 자장 하의 자화 손실 값을 계산하기 위해 초전도 변압기의 설계에 사용한 YBCO CC 선재의 자화손실을 2차원으로 수치해석 하였다. 자화 손실의 해석적인 계산을 위한 식은 아래와 같이 맥스웰 방정식으로부터 나타낼 수 있다.

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \Phi \quad (1)$$

여기서 \vec{E} 는 전계, $\partial \vec{A}$ 는 자기벡터 포텐셜, $\nabla \Phi$ 는 스칼라 포텐셜을 나타낸다. 또한 초전도 선재 내부에서의 전류밀도 \vec{J}_{SC} 는 Bean의 임계 상태 모델에 기초하여 $|E|$ 가 0일 때와 0이 아닐 때로 나누어 식 (2)와 식 (3)과 같이 결정되어진다.

$$\vec{J}_{SC} = J_C \frac{\vec{E}}{|E|}, \text{ if } |E| \neq 0 \quad (2)$$

여기서 J_C 는 초전도 선재의 임계 전류 밀도이다.

$$\frac{\partial \vec{J}_{SC}}{\partial t} = 0, \text{ if } |E|=0 \quad (3)$$

식 (1)~ 식 (3)으로부터 계산된 전계 \vec{E} 와 전류밀도 \vec{J}_{SC} 로부터 해석 영역에서 각 요소의 자화손실은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{m,e} = \int_0^T \int_v \vec{J}_{SC,e} \cdot \vec{E}_e \, dv dt \quad (4)$$

따라서 전체 자화손실 Q_m 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_m = \frac{1}{V} \sum_{e=1}^n Q_{m,e} \quad (5)$$

여기서 V 는 YBCO CC의 체적이다[4]. 외부 수직 인가 자장에 의한 YBCO CC의 자화손실 해석 결과를 그림 1에 나타내었으며, 이를 이용하여 교류손실을 구하기 위해 2 구간으로 나누어 함수화 하였다.

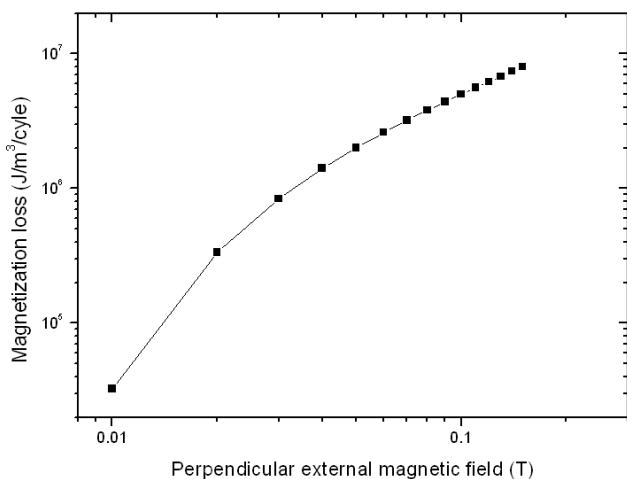
$$Q_m(B_{\perp}) = 3.23972B_{\perp} \times 10^6 \quad (0 \leq B_{\perp} \leq 0.01) \quad (6)$$

$$Q_m(B_{\perp}) = -2.47B_{\perp}^5 \times 10^{11} + 1.14B_{\perp}^4 \times 10^{11} - 2B_{\perp}^3 \times 10^{10} + 1.66B_{\perp}^2 \times 10^9 - 3.87B_{\perp} \times 10^6 - 85755.76464 \quad (0.01 < B_{\perp} \leq 0.16) \quad (7)$$

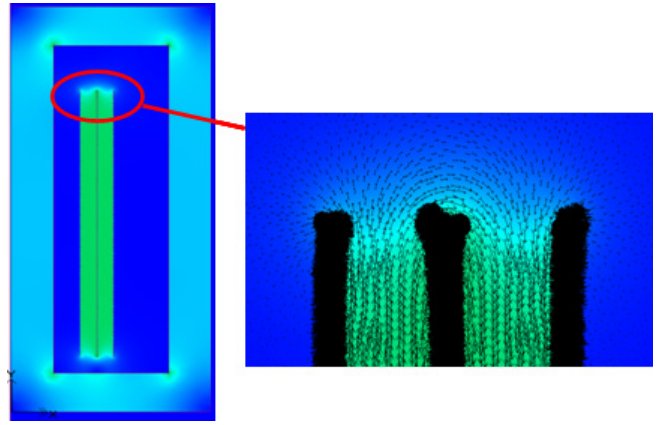
여기서, Q_m 는 수직 자화 손실 [J/m³/cycle]이고, B_{\perp} 는 외부 수직 자장 [T]을 나타낸다.

2.3 154 kV급 5 MVA 고온초전도 변압기의 교류손실

설계한 154 kV급 5 MVA 고온 초전도 변압기의 전자장 해석을 통하



<그림 1> 외부 수직 인가 자장에 의한 YBCO CC의 자화손실



<그림 2> 초전도 변압기의 자장 분포

여 고온 초전도 선재에 걸리는 수직자장을 계산하였다. 그림 2는 변압기의 정격 운전 시 철심 및 초전도 권선에 걸리는 자장 분포와 권선부에서 자장의 방향을 나타내었다. 그림 2에서 권선은 철심과 가까운 부분부터 1차 권선-2차 권선-1차 권선으로 배치되어 있다. 1차 권선과 2차 권선의 동심형 배치로 인해 두 권선이 서로 이웃하는 부분에서 누설 자속이 집중되는 것을 볼 수 있는데 이는 1차 권선과 2차 권선에 흐르는 전류의 방향이 다르기 때문이다.

변압기 전체에서 발생하는 자장 중 권선부에서 발생하는 외부 수직 자장을 요소 별로 해석하여 위의 식 (6)과 식 (7)에 대입하여 교류 손실을 계산하였다. 각 코일 당 요소를 여덟 개로 분할하여 측정된 수직 자장이 0.01 T 이하일 경우에는 식 (6)을 사용하였으며, 0.01 T를 초과할 경우에는 식 (7)을 사용하였다. 교류손실은 내측 1차 권선에서 55 W, 2차 권선에서 46 W, 외측 1차 권선에서 84 W로 계산되어 154 kV급 5 MVA 고온 초전도 변압기의 정격운전 시 교류손실은 185 W로 계산되었다.

3. 결 론

154 kV급 5 MVA 고온초전도 변압기를 설계한 후 설계된 초전도 변압기의 계원에 대하여 초전도 권선부에서의 자화손실을 계산하였다. 수직방향으로 인가되는 외부자계에 의한 고온초전도 선재의 자화손실을 계산하는 방법 중에서 교류손실 계산식에 의한 손실 계산법을 사용하지 않고, 수치해석을 이용하여 계산하였다. 선재 개발 추이를 고려한 2세대 초전도 선재에 대하여 Bean의 임계상태 모델을 이용한 FEM 2차원 수치해석을 통해 외부자장에 의한 교류손실을 예상하고, 이 결과에 154 kV급 5 MVA 고온 초전도 변압기의 권선부에서 발생하는 수직방향의 자장을 적용하여 변압기의 교류손실을 계산하였다. 154 kV급 5 MVA 고온초전도 변압기의 교류손실은 총 185 W로 계산되었다. 국내 전력계통에서 요구하는 % 임피던스에 맞추기 위해 향후 초전도 변압기의 권선 간격과 철심의 높이, 권선의 배치 등의 변화에 따른 교류손실을 계산하고 비교할 예정이다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 김중태, 김우석, 김성훈, 최경달, 주형길, 홍계원, 한진호, 이희균, "초전도 변압기 교류 손실 해석," 대한전기학회 논문지, 전기기기 및 에너지변환시스템부분B, 제54권1호, pp.17-21, 2005.
- [2] 김성훈, "대전력 고온초전도 변압기의 권선구조에 관한 연구," 박사학위논문, 서울대학교, 2004.
- [3] 최지훈, 이승욱, 김우석, 박명진, 이지광, 최경달, "154 kV/5 MVA 고온 초전도 변압기의 권선구조에 따른 교류손실," 대한전기학회 춘계학술대회논문집, pp.41-42, 2007.
- [4] 이광연, 박명진, 차귀수, 이지광, "YBCO CC의 slit 개수에 따른 자화손실 저감 특성 해석," 대한전기학회 하계학술대회논문집 B권, pp.1249-1251, 2005.