

유한요소법을 이용한 전력용 변압기의 와전류 손실 해석

이지연, 최길선, 한성진
 동아대학교 전기공학과

Eddy Current Loss Analysis of Power Transformer Using Finite Element Method

Ji-Yeon Lee, Kil-Sun Choi, Sung-Chin Hahn
 Dept. of Elec. Eng., Dong-A University

Abstract - 본 논문에서는 유한요소법을 이용한 전력용 변압기의 와전류 손실 해석에 대해 다루고자 한다. 와전류 손실 해석에서 사용할 전력용 변압기 설계 치수는 3D 자계 해석을 통해 검토하였다. 검토한 치수를 바탕으로 전력용 변압기를 2D 모델링하여 와전류 손실 해석을 하였으며, 2D, 3D 두 해석 결과 비교를 통해 와전류 손실에 대해 분석 및 검토하였다.

1. 서 론

최근 전력기기의 교체시기를 맞아 변압기의 수요량이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 변압기 수명 연장을 위한 고효율 변압기에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 전력용 변압기의 수명단축의 주 원인은 변압기 내 온도상승이다. 이 온도상승은 전력용 변압기의 철손, 동손에 의해 발생한다.

본 논문에서는 변압기의 손실 가운데 철심내부에 교번자속이 통과하여 발생하는 와전류 손실에 대해 다루고자 한다. 와전류 손실 연구를 위해 사용할 전력용 변압기의 형상은 내철형 변압기로 한다. 전력용 변압기의 치수는 변압기 설계의 기본적인 계산에 따라 선정된 후, 유한요소법을 이용한 3D 자계해석 결과와 비교하여 검증한다.

이 변압기 치수로 2D 모델링하여 유한요소해석을 통해 와전류 손실 해석을 하였다. 또한, 와전류 손실 해석을 위해 3D 모델에서 간단하게 모델링하였던 변압기 권선 형상을 2D 모델에서는 세밀하게 모델링하였다.

2. 본 론

2.1 전력용 변압기 모델

2.1.1 전력용 변압기 사양

자계해석과 와전류 손실 해석을 위해 사용할 전력용 변압기 사양은 표 1과 같다.

표 1. 전력용 변압기의 사양

상수	단상
구조	내철형
주파수[Hz]	60
용량[MVA]	10
1차전압/2차전압[V]	22900/3300
1차전류/2차전류[A]	43.67/303.03
1차턴수/2차턴수	1883/271
자속밀도[T]	1.75

본 논문에서 해석할 전력용 변압기 모델의 형상은 내철형 변압기로 그림 1과 같다. 해석시간을 줄이기 위해 해석결과에 큰 영향을 주지 않는 지지물 및 절연물부분의 해석부분은 생략한다.

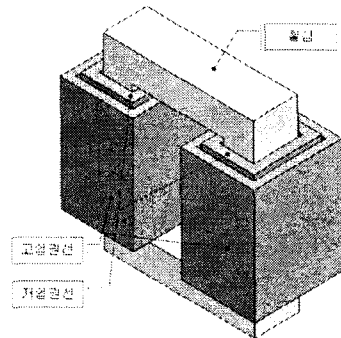


그림 1. 전력용 변압기의 형상

2.1.2 변압기의 치수 결정

앞 절에서 결정한 사양의 전력용 변압기 치수결정을 위해 변압기의 주 형상인 철심과 권선의 단면적을 구한다. 철심과 권선의 단면적 공식은 식 (1), (2)와 같다.

$$S_{iron} = \frac{\Phi}{B} = \frac{E_2}{2\pi f N_2 B} \quad (1)$$

$$S_{coil} = \frac{2PNI}{J} \quad (2)$$

이때, Φ 는 철심 내 자속이며, B 는 자속밀도, J 는 전류밀도, P 는 극수이다.

그리고, 압페이 주회 법칙에 의해 철심 자로의 길이를 결정한 후 변압기의 각 치수를 산정한다. 그림 2에서는 기본적인 계산에 따라 선정된 전력용 변압기의 치수이다.

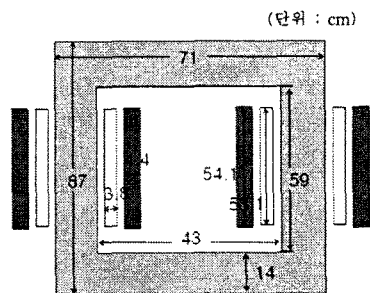


그림 2. 전력용 변압기 치수

2.2 해석방법

2.2.1 유한요소해석을 위한 지배방정식

본 논문에서 사용할 변압기 치수의 검증을 위해 유한요소법을 적용한 상용 프로그램 Maxwell 3D로, 전력용 변압기 모델에 대해 자체해석을 한다.

전력용 변압기 모델의 경계조건은 자기 벡터 포텐셜 \vec{A} 를 변수로 사용하는 식 (3)으로 한다.

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (4)$$

Maxwell 방정식으로부터 전력용 변압기 모델의 자체 해석에 필요한 정자계 지배방정식을 식 (4)와 같이 나타내었다.

또한, 와전류 손실해석을 위한 지배방정식은 정자계 지배방정식을 수정하여 유도한다. 정자계 지배방정식의 전류밀도 \vec{J} 를 전원전류밀도 \vec{J}_s 와 와전류밀도 \vec{J}_e 로 바꾸어 표현하면 식 (5)와 같다. 이때, 변위전류밀도는 무시한다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s + \vec{J}_e = \vec{J}_s - \sigma (\nabla \phi + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) \quad (5)$$

이때, μ 와 σ 는 철심의 투자율과 도전율을 나타낸다.

2.2.2 와전류 손실

전력용 변압기의 철심 내 시간에 따라 변하는 자계가 통하게 되면, 패러데이 법칙에 의해 역기전력이 발생하고, 철심 내 전압 차이로 인하여 와전류가 발생한다. 와전류 손실에 대한 공식은 식 (6)과 같다.

$$W_e = I_e^2 \times R \quad (6)$$

이때, I_e 는 와전류이며, R 은 철심의 저항이다. 식 (7)은 와전류 손실을 구하는 또다른 공식으로써, 와전류의 측정이 어려워 와전류손 계수를 사용하여 구하는 공식이다.

$$W_e = kf^2 B_m^2 \quad (7)$$

이때, k 는 와전류손 계수이며, B_m 은 철심 내 자속밀도이다.

2.3 해석결과

2.3.1 3D 자체해석

본 논문에서는 변압기 치수 검증을 위해 전력용 변압기를 간단하게 모델링하여 3D 자체해석을 하였다. 그림 3과 4는 자체 해석의 결과로 변압기 내 자속의 흐름과 권선간, 철심과 권선사이의 누설자속의 형태를 나타낸다.

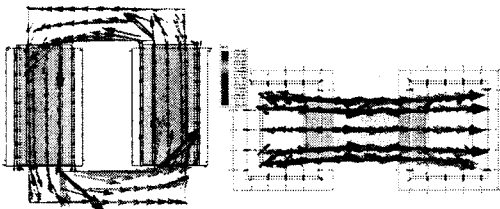


그림 3. 철심 내 자속밀도분포

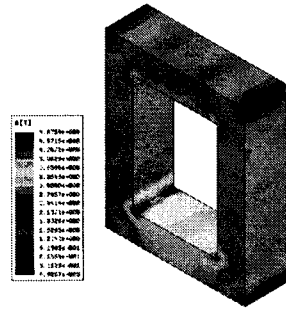


그림 4. 철심 내 자속밀도분포

표 2에서는 변압기 치수의 검증을 위해 철심 내 자속밀도의 이론값과 해석값을 비교하였다. 권선과 권선사이, 철심과 권선사이에 발생하는 누설자속과 3D 해석 모델링시 1, 2차측의 권선 모델링의 단순화의 원인으로 결과에서 다소 차이를 보였다.

표 2. 철심 내 평균자속밀도

자속밀도[T]	이론값	해석값
	1.75	1.52

2.3.2 2D 와전류 손실 해석

전력용 변압기의 와전류 손실 해석을 위해 3D 모델에서 간단하게 표현되었던 1차, 2차 권선의 형상을 그림 5와 같이 2D 모델에서는 자세히 표현하였다.

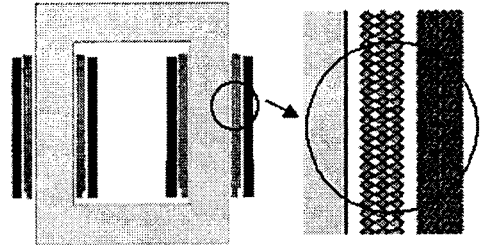


그림 5. 전력용 변압기 2D 모델의 권선 형상

그림 6는 와전류 손실해석을 위한 전력용 변압기 모델의 요소분할도를 나타낸다.

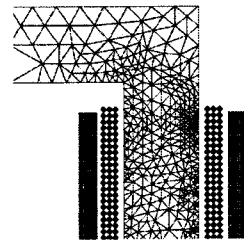


그림 6. 2D 요소분할도

2D 와전류 손실 해석을 통해 변압기 내 자속선도와 철심에서의 와전류, 손실 등의 분포를 확인하였다. calculator 기능을 이용하여 변압기 철심내 자속밀도와 와전류손, 철손의 해석치를 구한다.

그림 7는 변압기 철심의 상위부분에 대한 자속선도이다.

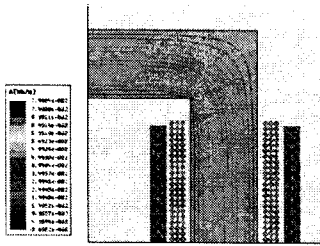


그림 7. 철심 내 자속손도

표 3에서는 2D 와전류 손실 해석의 해석값과 이론값을 정리하였다.

표 3. 해석 결과 비교

	이론값	해석값
자속밀도[T]	1.75	1.62
와전류손실	610.495	558.030
철손실	1065.208	920

1차, 2차 권선의 표현을 3D해석 보다 정확하게 표현하였기 때문에 해석결과가 이론값에 가까운 해석치를 얻었다. 해석값과 이론값의 오차는 전체적으로 10%이내의 오차율을 보였으며, 각각의 오차율은 자속밀도는 3D해석보다 낮은 7.428%, 와전류 손실은 8.594%, 철손은 5.377%이다.

3. 결 론

본 논문에서는 전력용 변압기의 온도상승의 원인 중 와전류 손실에 대하여 논하였다. 기본적인 계산방법에 따라 전력용 변압기의 치수를 선정하여 3D 해석을 통한 자속밀도 분포 결과를 비교하여 변압기 치수를 검증하였다. 와전류 손실해석을 위해 2D 해석에서 권선의 형상을 자세히 모델링 하였다. 1차 권선과 2차 권선에 대한 자세한 모델링으로 인해 3D 자체해석 시간보다 더 많은 연산시간이 소요됐다. 2D 해석을 통해 변압기 내 와전류 손실과 전체 코어손실을 확인한 결과 자체해석, 와전류 손실해석 결과에 대한 평균 10%이내의 오차를 보였다.

향후 전력용 변압기의 온도상승과 3D 해석에 대한 연구를 계획하고 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Viviane Cristine Silva, Gerard Meunier, Albert Foggia, "A 3-D Finite-Element Computation of Eddy Currents and Losses in Laminated Iron Cores Allowing for Electric and Magnetic Anisotropy", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 3, 2139-2141, 1995
- [2] John J. Winders, Jr., "Power Transformers Principles and Applications", Marcel Dekker, USA, 2002
- [3] Xie Dexin, Tang Yunqiu, Xu Zihong, "FEM Analysis of 3D Eddy Current Field in Power Transformer", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 23, No. 5, 3786-3788, 1995
- [4] S.V.Kulkarni, S.A.Khparde, "Transformer Engineering Design and Practice", Marcel Dekker, USA, 2004
- [5] S.Isaka, T.Tokumaru, K.Kondo, "Finite Element Analysis of Eddy Currents in Transformer Parallel Conductors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 10, 2731-2737, 1985

본 연구는 산업 자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2007-2-060)주관으로 수행된 과제임