2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2009. 7. 14 - 17

유한요소법을 이용한 전력용변압기의 온도분포해석

안현모, 한성진
동아대학교 전기공학과

Finite Element Analysis of Temperature Distribution for Power Transformer

Hyun-Mo Ahn, Sung-Chin Hahn
Dept. of Elec. Eng. Dong-A University

Abstract - 본 논문에서는 온도상승의 열원이 되는 권선과 철심의 전력손실을 유한요소법을 이용한 전자계해석과 스타인메츠실험식으로 산정하였다. 온도에 대한 자연대류 열전달계수를 산정하여 경계면에서의 경계조건으로 적용하였다. 열전달 해석을 위해 전력용변압기를 3차원 형상으로 모델링한 후 유한요소법을 이용해 권선과 철심에서의 온도분포를 해석하였다.

1. 서 론

최근 산업사회의 급속한 발달로 인하여 증가하고 있는 전력사용량을 감당하기 위해 전력기기의 대용량화가 진행되고 있으며, 비용의 절감, 설치면적, 운송문제 등의 이유로 사이즈는 소형화 되고 있다. 이러한 추세로 전력용변압기도 용량은 커져가고 있는 동시에 크기와 무게는 감소하고 있다. 하지만 동일한 용량에서 크기가 작아지게 되면 많은 열이 발생 하게 되어 변압기의 온도가 높아지게 된다. 온도가 높을수록 절연물의 열화는 가속화되어 변압기의 수명을 감소시킬 뿐만 아니라 변압기의 설계와 크기, 부하 용량, 동작 성능에 커다란 영향을 준다. 그러므로 변압기의 온도분포와 최고점 온도를 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다.

변압기의 온도분포를 해석하는 방법으로는 유체역학적인 열유동 해석법과 다른 두 영역에서의 열에너지 이동을 이용하는 열전달 해석법이 있다. 열유동 해석법은 열유동 현상을 파악하기 위한 방법으로 유체역학의 지배방정식인 연속 방정식, 운동 방정식, 에너지 방정식을 동시에 고려해야 한다.[1] 열유동 해석법은 많은 요소들을 고려해야 하므로 매우 복잡하며 수학적인 어려움을 줄이기 위해 근사계산을 하고 있다. 열전달 해석법은 전도, 대류, 복사에 의해 이루어진 지배방정식을 고려해야 한다.[2] 열전달 해석법은 열유동 해석법 보다 정확도는 떨어지지만 연산시간을 단축시킬 수 있는 이점을 가진다.

본 논문에서는 전력용변압기의 온도분포를 해석하기 위해 열전달 해석법을 수행하였으며, 이를 위해 열전달 지배 방정식을 정식화 하였으며, 해석 시간의 단축을 위해 전력용변압기의 형상을 단순화하여 모델링하였다. 온도상승을 일으키는 열원인 전력손실은 유한요소법을 이용한 전자계해석을 통해 산정하였으며, 계산된 손실은 열전달 해석을 위한 열원으로 사용되어 변압기의 권선과 철심에서의 온도분포 해석에 이용하였다.

2. 본 론

2.1 전자계 해석

2.1.1 지배방정식

권선에 교류전류가 흐를 때 맥스웰 방정식으로부터 자기 벡터 포텐셜을 나타낼 수 있으며, 도체에서 유기되는 와전류를 고려할 때 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla\times\frac{1}{\mu}(\nabla\times\vec{A})=\vec{J_s}-\sigma\left(\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}+\nabla\phi\right) \tag{1}$$

여기서, μ는 투자율(H/m), σ는 도전율(S/m), $\vec{A}$는 자기 벡터 포텐셜, $\vec{J_s}$는 전원 전류밀도(A/m^3), ϕ는 전계 스칼라 포텐셜이다.

2.1.2 전력 손실

전력용 변압기에서 발생하는 전력손실은 부하손, 무부하손으로 나누어진다. 부하손은 권선에서 발생하는 전력손실이며, 유한요소법을 이용한 자계해석을 통해 해석할 수 있다. 권선에서 발생되는 Joule's loss는 식(2)와 같다. 무부하손은 철심에서 발생하는 전력손실로써 스타인메츠 실험식을 통해 손실의 개략값을 계산할 수 있다. 스타인메츠 실험식은 식(3)과 같다.

$$P_w=\int\frac{J_s^2}{\sigma}dv \tag{2}$$

$$P_c=k\,G\,w \tag{3}$$

여기서, P_w는 권선의 손실(W/m^3), P_c는 철심의 손실(W/m^3), G는 철심 중량(kg), w는 단위무게당 손실(W/kg), k는 적층 시 발생하는 철심간 공극에 관련된 계수이다.

2.2 열전달 해석

2.2.1 지배방정식

열은 일반적으로 전도, 대류, 복사의 방식 중 하나 또는 둘 이상의 방식으로 전달된다. 변압기 내부에서 열전달은 냉각매질의 순환에 의한 대류와 고온에서 저온으로 전달되는 열전도방식으로 이루어진다. 전력용변압기의 열전달 지배방정식은 열전도 방정식과 뉴턴의 냉각법칙, 스테판 볼츠만의 법칙은 각각 식(4), (5), (6)과 같으며, 에너지 평형방정식은 식(7)에 나타내었다.

$$\ddot{q}_{cond}=-k\,\nabla T \tag{4}$$

$$\ddot{q}_{conv}=h\,(T_w-T_\infty) \tag{5}$$

$$\ddot{q}_{radi}=\varepsilon\,\sigma\,(T_w^4-T_\infty^4) \tag{6}$$

$$-\nabla\cdot(k\,\nabla T)=Q-\rho\,c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{7}$$

여기서, k는 열전도도(W/m·℃), T는 온도(℃), $\ddot{q}$는 열속(W/m^2), h는 대류 열전달계수(W/m^2·℃), T_w는 표면온도(℃), T_∞는 외부온도(℃), ε는 복사율, σ는 스테판볼츠만 상수(W/m^2·℃^{4}), ρ는 밀도(kg/m^3), c_p는 정압비열(kJ/kg·℃), Q는 단위체적당 외부에서 공급되는 열량(W/m^3)이다.

2.2.2 경계조건

온도분포를 해석하기 위해서는 각각의 경계면에 적절한 경계조건을 부여해 주어야한다. 전력용변압기의 온도분포를 해석하기 위해 온도에 대한 열전달계수를 산정해 경계면의 경계조건으로 적용하였다. 이러한 열전달계수를 산정하기 위해서는 먼저 자계해석을 통해 전력손실을 구해야 한다. 해석된 전력손실은 자연대류 열전달계수 산정을 위한 열원으로 사용되며 권선과 철심에서의 열전도도와 오일의 물질값, 대기온도와 같은 사항도 고려해야 한다. 이 입력값으로 Rayleigh number를 계산하여 수직평판에 대한 Nusselt number 실험식인 식(8)을 이용해 Nusselt number를 산정할 수 있다.[3] 자연대류 열전달계수는 식(9)와 같이 나타내며, 변압기의 바닥은 단열조건을 취하였고, 외부 대기 온도는 23 [℃]로 정하였다.

$$Nu=0.68+\frac{0.67Ra^{1/4}}{\left[1+(0.492/\mathrm{Pr})^{4/9}\right]^{4/9}}\quad(Ra<10^9) \tag{8}$$

$$h=\frac{k}{l}Nu \tag{9}$$

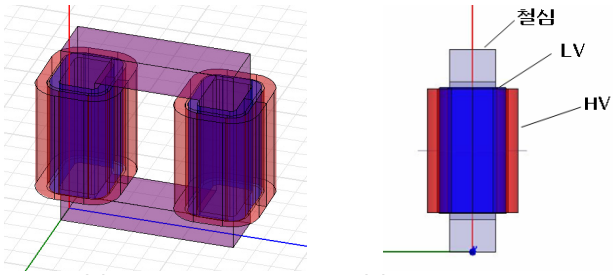
여기서, Nu는 수직평판에 대한 Nusselt number, R_a는 Rayleigh number, Pr은 Prandtl number, h는 대류 열전달계수(W/m^2·℃), l은 길이(m)이다.

2.3 변압기 해석 모델

변압기는 매우 복잡한 구조를 가지고 있어 모델링하기 어려우며 요소분할에 있어서도 어려움을 가진다. 이러한 문제점을 고려하여 계산시간을 줄이며 해의 수렴성을 높이기 위해 각종 지지물과 절연물을 생략하여 변압기의 형상을 단순화시켰다. 본 논문의 대상 변압기 모델의 사양은 그림 1과 표 1에서 나타내고 있다. 변압기의 구조는 단상 내철형 변압기이며 고압측 권선과 저압측 권선 그리고 철심으로 구성되어 있다. 권선과 철심에서 발생되는 열을 순환시키기 위해 냉각 매질인 광유를 사용하였다.

〈표 1〉 변압기 모델의 사양

구 분	사 양
정 격 용 량	1 [MVA]
정 격 전 압	22.9/3.3 [kV]
정 격 전 류	43.67/303.03 [A]
권 선 수	1884/272 [Turn]
주 파 수	60 [Hz]



(a) 변압기 형상 (b) 변압기 측면의 형상

〈그림 1〉 전력용 변압기 해석모델

2.4 해석 결과

2.4.1 전력손실

온도상승을 일으키는 열원으로는 변압기의 부하손실인 동손과 무부하손실인 철손이 있다. 권선에서 발생되는 동손은 고압측 권선과 저압측 권선의 손실로 나눌 수 있으며 유한요소법을 이용한 전자계해석으로 각각의 권선에 발생하는 손실과 철심에서의 자속밀도를 해석하였다. 철심 내부에 교번자속이 지나가게 되면 와전류손실과 히스테리시스손실이 발생하게 되는데 철심 내에서 발생하는 손실은 스타인메츠의 실험식인 식(10)에 의해 단위무게당 손실을 산정할 수 있다. 이때에 필요한 히스테리시스 손실계수K_h와 와전류 손실계수K_c는 철심의 B-P커브 특성에 의해 얻을 수 있다. 전력용변압기의 권선과 철심에서 발생된 전력손실밀도는 표 2와 같으며, 발생된 전력밀도는 열전달해석의 열원으로 사용된다.

$$w = K_h B^2 f + K_c (B d f)^2 \quad (10)$$

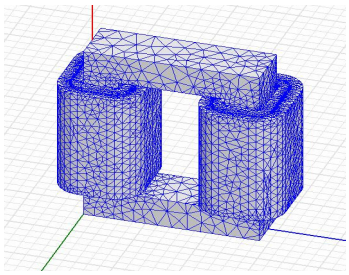
여기서, f는 주파수(Hz), B는 자속밀도(T), d는 강판의 두께(m)이다.

〈표 2〉 권선과 철심의 전력손실밀도

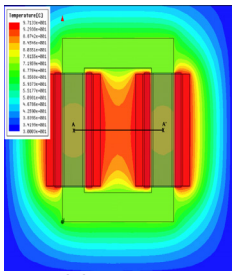
구 분		전력손실밀도 [W/m^3]
권 선	고압측 권선	51004.6 [W/m^3]
	저압측 권선	69214.85 [W/m^3]
철 심		11059.65 [W/m^3]

2.4.2 열전달 해석

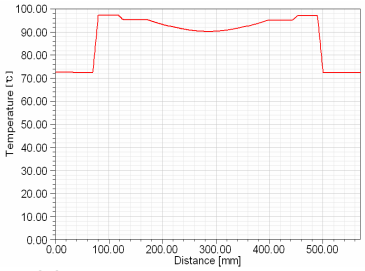
열전달 해석 대상인 전력용변압기를 3차원으로 모델링하였으며 그림 2는 대상 모델의 요소분할도를 나타내고 있다. 열전달 해석의 열원인 권선과 철심에서 발생되는 전력손실밀도는 표 2의 값을 적용하였고 이때의 대류 열전달계수는 5.0[W/m^2·℃]를 사용하였다. 해석된 전력용변압기의 온도분포는 그림 3에 나타내었으며 그림 3(a),(b)는 Y-Z평면에서의 권선과 철심의 온도분포를 나타내고 있으며, 그림 3(c),(d)는 X-Y평면에서의 권선과 철심의 온도분포를 나타내고 있다.



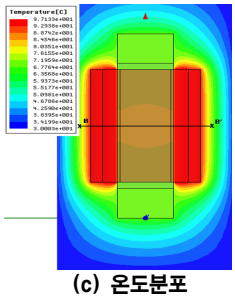
〈그림 2〉 전력용변압기의 요소분할도



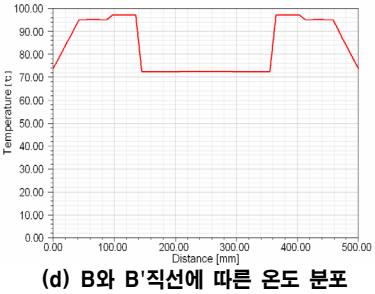
(a) 온도분포



(b) A와 A'직선에 따른 온도 분포



(c) 온도분포



(d) B와 B'직선에 따른 온도 분포

〈그림 3〉 전력용변압기의 온도 분포

그림 3에서와 같이 철심에 약 70 [℃]의 평균온도가 분포되어 있으며, 고압측 권선에 약 95 [℃], 저압측 권선에 약 97 [℃]의 평균온도가 분포됨을 확인하였다. 최고점 온도지점은 저압측 권선에서 발생하였고 외부 대기 온도가 23 [℃] 임을 감안할 때 74 [℃]의 온도상승이 일어남을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 전력용변압기의 온도분포를 해석하기 위해 유한요소법을 이용한 전자계해석과 스타인메츠의 실험식을 이용해 권선과 철심에서의 전력손실을 해석하였다. 이렇게 얻어진 전력손실은 열전달 해석의 입력값인 열원으로 사용되며 전자계-열계 결합 방정식을 통해 온도분포를 해석하였다. 이를 통해 전력용변압기의 권선과 철심에서의 온도분포를 예측하여 높은 온도분포를 가지는 부분에 알맞은 절연물의 선택하여 열화를 감소시킬 수 있다. 향후에는 전력용변압기의 모델링을 구체화 하기위해 기존에 생략되었던 지지물, 덕트 등의 구조를 고려해 모델링하여 정밀한 열전달해석을 하고자 한다.

[참 고 문 헌]

[1] Andreas Alexandrou, “Principles of Fluid Mechanics”, Prentice Hall, 2001.

[2] 이형직, “유한요소법에 의한 유체역학·열전도 해석 입문”, Perason Education Korea, 2000.

[3] C.C. Hwang, P.H. Tang, Y.H. Jiang, “Thermal analysis of high-frequency transformers using finite elements coupled with temperature rise method”, Electric power applications IEE Proceedingl, Vol 152, pp.832-836, 2005.

[4] 오연호, 송기동, 선종호, “변압기의 3차원 온도분포 해석”, Trans KIEE, Vol 52B, pp.434-441, 2003.