

이방성을 고려한 삼상변압기의 특성해석

*이 창환, 김홍규, 정현교
서울대학교 전기공학부 전기역학연구실

홍선기
호서대학교 전기전자제어공학부

Analysis of the 3-Phase Transformer Considering the Anisotropic Property

*C.H. Lee, H.K. Kim, H.K. Jung
School of Electrical Engineering,
Seoul National University

S.K. Hong
School of Electrical Engineering,
Hoseo University

Abstract - 유한요소법에 의해 자계를 계산할 경우에 일정한 투자율을 두고 선형 해석을 하거나 비선형을 고려할 때에는 하나의 자화곡선을 이용한 뉴튼랩슨법이 많이 사용된다. 그러나 최근 자계의 세기와 자속밀도간의 위상차를 고려할 수 있는 계산법에 대한 연구가 늘어나면서 여러 가지 방법들이 제시되고 있다. 본 논문에서는 간단한 실험데이터를 이용하여 정확히 자계의 세기와 자속밀도간의 비선형성을 고려하면서 특히, 이방성이 강한 재료를 사용하는 전기기기의 해석에 적합한 방법을 제안하며, 이 방법에 의해 삼상 변압기의 코어에서의 자계를 계산하며, 계산 결과에서 기존의 방법으로는 어려운 이방성 영향을 정확히 고려할 수 있음을 실험에 의하여 검증하였다.

1. 서 론

변압기는 자계의 세기와 그 손실계산의 정확성에 있어서 고려해야 할 사항이 많다. 특히, 중·대형 삼상변압기를 해석할 경우에는 그 제작방법과 특성상 고려해야 할 사항들이 몇 가지 있다. 첫째, 중·대형 삼상변압기는 적층된 코아를 사용한다. 와류에 의한 손실을 막아서 변압기의 효율을 높이고자 코아를 적층하여 사용한다. 그러나 변압기에서 적층을 하는 직접적인 이유는 효율의 증대가 아니다. 효율 증대에 의한 전력손실을 줄인다는 목적으로 와류손에 의한 온도상승과 그에 따른 변압기의 유지·관리상의 문제 때문이다. 둘째, 중·대형 삼상변압기의 코아는 적층을 하되 겹치는 부분, 즉, 오버랩 부분을 둔다. 따라서 적층되었다 할지라도 자속은 한 층에 구속되어 순환하는 것이 아니라 여러 층을 오가며 순환하는 패턴을 가지게 된다. 셋째, 중·대형 삼상변압기는 그레인 오리엔티드 물질(Grain Oriented Material)을 사용한다. 그레인 오리엔티드 물질이란 상당히 큰 이

방성을 가지는 물질로 방향에 따라 자화가 잘되는 자화용이축(Easy Axis)과 자화가 잘 되지 않는 자화난이축(Hard Axis)의 뚜렷하고 큰 구별이 있는 물질이다. 넷째, 중·대형 삼상변압기의 일부분에서는 회전자계에 의해 회전이력현상이 발생한다. 회전이력현상이란 회전자속밀도와 회전자계의 세기간의 위상차가 생기는 것을 말하는데, 그 결과 교번 이력 현상에 의한 손실보다 2배에서 4배에 가까운 손실이 발생된다. 이 중 적층과 오버랩의 영향은 2차원에서는 고려가 불가능한 것으로 3차원 계산에서나 고려되어 질성격이다. 그리고 나머지 두 사항은 서로 그 관계가 얹혀있는 것으로 이를 정확하게 고려하기 위해서는 회전자속밀도와 회전자계의 세기간의 위상차를 고려해야 하며, 이를 위한 노력이 많이 행해지고 있다. 그 예로서 첫째, 벡터 히스테리시스 모델링과 둘째, 투자율 텐서와 유한 요소법의 결합이 있는데, 벡터 히스테리시스 모델링의 경우에는 이방성을 고려할 수 있는 알고리즘의 확립이 부족하여 삼상변압기에는 부적합한 것으로 생각된다. 투자율 텐서를 사용하는 방법은 계산시간과 계산량이 크지 않으며 매우 정확한 특성해석이 가능한 반면 계산을 위한 실험데이터를 얻는 데 많은 노력이 필요한 단점이 있다. 본 논문에서는 계산량과 계산시간이 많이 들지 않고 간단한 실험에 의한 데이터만으로도 정확한 이방성의 특성과 회전자속밀도와 회전자계의 세기간의 위상차를 고려할 수 있는 방법으로 삼상 변압기의 무부하 특성을 해석하였으며, 실험에 의해 제안된 방법의 타당성을 확인했다.

2. 유한요소 정식화

그레인 오리엔티드 물질은 자화용이축과 난이축으로 전체의 특성을 정확하게 나타낼 수 있다는 가정에서 출발하여 이를 정확한 비선형 특성해석 알고리즘인 뉴튼랩슨방법을 이용하여 구현하였다. 즉, 기존

의 뉴튼 랩슨 방법은 하나의 초기자화곡선을 이용하는데, 본 논문에서는 자화용이축과 난이축의 두 방향으로의 자화곡선을 실험에 의해서 구한 후 함께 뉴튼 랩슨 방법에 적용시켰다. 또한 실험에 의해 구해진 자화곡선들은 삼상 변압기에서 사용하는 60[Hz]의 환경하에서 구해진 자화곡선이므로 와류에 의한 영향이 그 데이터내에 충분히 고려되어 있다. 아래는 기존의 뉴튼 랩슨식을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \chi^{(e)}}{\partial A_{ie} \partial A_{je}} &= \int_S^e [\nu \left(\frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} + \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial \nu}{\partial B^2} \frac{\partial B^2}{\partial A_{je}} \sum \left(\frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{ke}}{\partial x} + \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{ke}}{\partial y} \right) A_{ke}] (1) \\ &- \frac{\partial}{\partial A_{je}} (J_0 N_{ie})] dx dy \quad (i, j = 1, 2, 3) \end{aligned}$$

제안된 방법을 구현하기 위해서는 뉴튼 랩슨식을 두 방향으로 분리해서 유도해 내야 하는데, 그 중 중요부분인 식(1)이 바뀐 식이 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \chi^{(e)}}{\partial A_{ie} \partial A_{je}} &= \int_S^e [\nu_x \frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} + \nu_y \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \\ &+ \frac{\partial \nu_x}{\partial B_x^2} \frac{\partial B_x^2}{\partial A_{je}} \sum \left(\frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{ke}}{\partial y} \right) A_{ke}] (2) \\ &+ \frac{\partial \nu_y}{\partial B_y^2} \frac{\partial B_y^2}{\partial A_{je}} \sum \left(\frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{ke}}{\partial x} \right) A_{ke} \\ &- \frac{\partial}{\partial A_{je}} (J_0 N_{ie})] dx dy \quad (i, j = 1, 2, 3) \end{aligned}$$

위 식을 포함한 지배식은 갤러킨법(Galerkin's method)에 의해 정식화된다. 그런데, 변압기의 경우에 대부분이 정전압원을 사용하므로 정확한 계산을 위해서는 정전압원 문제를 풀어야하나 실험에 의하면 자계의 세기가 낮을 경우 전류에 포함되는 고조파 성분의 크기가 매우 작으므로 이런 경우 회전자계의 비교는 정전류원을 사용하더라도 충분히 타당하며 무부하인 경우에 입력 전력은 입력 전류와 전압의 상호관계에 의해 계산되어지므로 전체적인 손실의 계산에 있어서도 정전류원 문제로 해석해도 큰 오차는 없을 것으로 보아 본 논문에서는 정전류 문제로 변압기를 해석하였다. 코아 내에서 계산된 자속밀도와 자계의 세기에 의한 총 손실은 식(3)으로 계산되어지며 회전이력에 의한 손실은 식(4)에 의해 계산되어진다.

$$P_t = \frac{1}{\rho T^2} \int_0^T (H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt}) dt \quad (W/Kg) \quad (3)$$

$$P_r = \frac{2\pi}{\rho T^2} \int_0^T |\vec{H} \times \vec{B}| dt \quad (W/Kg) \quad (4)$$

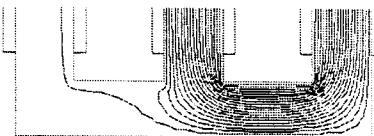
3. 유한요소 해석

유한요소해석을 위한 2차원 모델은 가로 30 [Cm], 세로 25 [Cm], 높이 3 [Cm]이며 60[Hz]의 주파수를 가지는 삼상 전류가 흐르는 삼상변압기이다. 사용된 이방성 재료는 G10으로 이방성이 매우 강한 그레이인 오리엔티드 물질이며 이를 높이 3 [Cm]로 적층하여 제작하였다. 실험 모델은 직접 제작하여 T-joint 부분에서의 회전자계의 모양을 실험으로 얻어냈다. 계산에 사용된 두 개의 자화곡선인 60[Hz]하에서 구해진 AC 자화곡선은 자속밀도의 최대치와 자계의 세기의 최대치를 이용하여 만들었다. 전체 손실은 식(3)에 의해서 계산되어지는 철손과 공기 중의 손실(leakage)의 합으로 구하였다. 그러나 공기 중의 손실은 철손에 비해서 무시할 정도로 작으므로 실제로는 전체손실에 고려되지 않는다. 그리고 식(4)에 의해서 회전이력에 의한 손실과의 비교를 하며 이것은 전체 요소에 대한 계산이 아니라 몇 개의 요소를 선택하여 선택 요소에 한해 한 주기 동안의 요소에서의 전체 손실과 회전이력에 의한 손실을 비교함으로 회전자계가 발생되는 부분에서 회전이력에 의한 손실이 얼마나 큰 비율을 차지하는지를 알아보았다. 삼상변압기에서 회전자계가 부분적으로 특히, T-Joint 부분에서 생기는 점 때문에 T-Joint부근의 요소에서 전체손실과 회전이력손실을 계산한 것이다. 또한 실험적으로 알려진 바에 의하면, 이방성이 강한 물질에서는 일반적인 성질과는 상반적으로, 타원형 회전이력손실이 전체손실보다 크다[1][2]는 보고가 본 연구의 시뮬레이션 결과에서도 나타나는가를 확인하여 보았다.

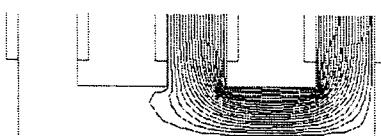
4. 결 과

그림1.에서 (a)는 일정한 투자율을 주고 선형적으로 해석했을 때의 자속의 흐름도, (b)는 하나의 자화곡선을 이용하여 계산하는 기존의 뉴튼랩슨법이며 (c)는 본 논문에서 사용한 두 개의 자화곡선을 이용한 뉴튼랩슨법에 의해 계산된 결과이다. 결과에서 보듯 본 논문에서 제안된 방법에 의하여 이방성이 강한 물질의 특성을 잘 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 그림2.에서 (a)는 선형적으로 해석했을 경우에 T-joint의 한 부분에서의 자속밀도의 과형과 회전자계의 세기를, (b)는 하나의 자화곡선을 이용하여 계산했을 경우에 T-joint의 한 부분에서의 자속밀도의 과형과 회전자계의 세기를, (c)는 본 논문에서 사용한 두 개의 자화곡선을 이용한 뉴튼랩슨법에 의해 계산했을 경우를 나타내며 그림3.은 실험으로 측정된 과형이다. 이를 통해 기존의 방법으로는 이방성이 강한 물질로 만들어진 시스템을 정확하게 해석할 수 없으며, 제안된 방법에 의해 정확히 해석할 수 있음을 알 수

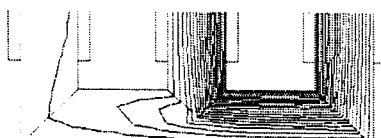
있다. 그림 2. (c)의 경우에 회전이력에 의한 손실은 0.95(W/Kg)이며 전체손실은 0.92(W/Kg)으로 계산되어서 실험적으로 알려져 왔던 것을 본 방법에 의하면 시뮬레이션상에서도 계산이 가능함을 확인하였다.



(a) 선형 계산의 경우

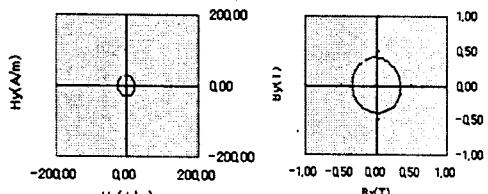


(b) 하나의 자화곡선을 비선형 해석한 경우

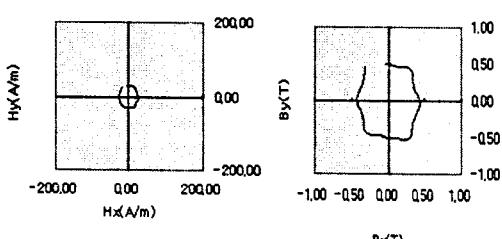


(c) 제안된 방법을 사용한 경우

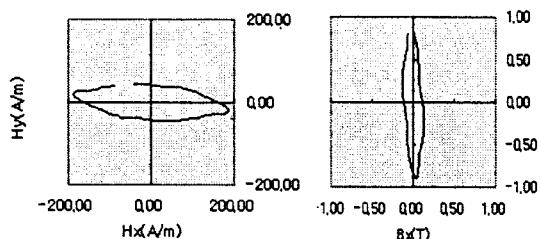
그림 1. 자속의 흐름도



(a) 선형 계산을 했을 경우



(b) 하나의 자화곡선을 이용한 경우



(c) 두 개의 자화곡선을 이용한 경우

그림 2. T-joint에서의 회전자계의 세기와 회전자속밀도의 과정비교

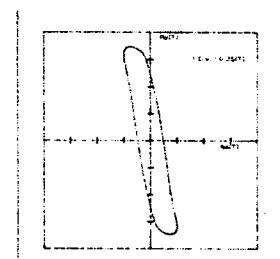


그림 3. 측정된 T-joint에서의 회전자속밀도과정

5. 결 론

기존의 방법인 선형계산과 하나의 자화곡선을 사용하는 뉴튼랩슨법보다 더 정확하고, 투자율 텐서의 전 요소를 다 사용하는 방법보다 훨씬 간단한 실험데이터와 뉴튼랩슨법을 사용하여 이방성이 강한 물질의 경우에 두 방향의 곡선으로도 그 특성을 충분히 나타낼 수 있음을 보였다.

본 연구는 서울대학교 기초전력공학연구소의 지원으로 이루어진 것입니다.

- 참고문헌 -

- [1] M. Enokizono, T. Suzuki, J. Sievert and J. Xu
"Rotational Power Loss of Silicon Steel Sheet" IEEE Trans. on Mag. Vol. 26, NO. 5 .
- [2] Jian Guo Zhu and Victor Stuart Ramsden
"Two Dimensional Measurement of Magnetic Field and Core Loss Using a Square Specimen Tester"
IEEE Trans. on Mag. Vol. 29, NO. 6