

유한요소법을 이용한 변압기 여자전류 계산

김지현, 김영만
(주)효성 중공업연구소

Calculation of Transformer Exciting Current by Finite Element Method

Kim Ji-Hyun, Kim Young-Man
Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung Corporation

Abstract - This paper describes an exciting current calculation method for transformers by finite element method.

In case of a special case such as air-gap presence, one can not calculate exciting current accurately using exciting power curves due to fringing effect, magnetic saturation and so on.

Transient analysis with external circuit is performed with a 2D model and compared to a test result.

1. 서 론

컨버터(converter)용 변압기에서는 직류성분이 변압기로 유입하여 철심을 포화시켜 변압기 철심과 권선의 온도 상승 및 기타 철 구조물의 온도상승을 유발할 수 있다[1].

컨버터 변압기 설계를 위해서 적절한 자속밀도 선정 및 DC를 고려한 정확한 여자전류 계산이 필요하다. 기존의 여자전류를 계산하는 방법으로는 철강 제조사의 exciting power 그래프를 이용하는 방법과, 등가 자기회로법을 이용하는 방법이 있는데, 전자는 철심에 공극이 있을 경우 적용할 수 없으며, 후자는 자속의 프링징 효과(fringing effect) 및 철심의 포화를 고려하기 곤란하므로 계산치가 실제 시험 결과와 다소 차이가 발생한다.

본 논문에서 유한요소법(Finite Element Method: FEM)을 이용하여 공극이 있는 변압기의 여자전류를 계산하여 등가 자기회로법으로 계산한 값과 실제 시험값을 계산하여 본 논문의 타당성을 제시하였다.

변압기 해석을 위해 상용 전자장 해석 소프트웨어인 Maxwell 2D(V10)를 이용하였고, 해석의 편의성을 위해 2차원으로 모델링 하였고, 철심의 비선형성을 고려해 비선형 해석을 실시하였고, 변압기 권선을 고려한 외부회로(external circuit)를 연결하여 전압원 해석을 실시하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

본 연구에 사용되는 모델 변압기의 외형 및 제원은 각각 그림 1 및 표 1과 같다. 모델 변압기는 3상 3각 변압기로 공극의 길이는 2mm이다.

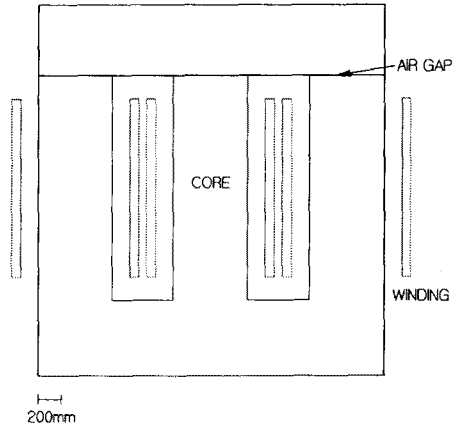


그림 1. 모델 변압기의 외형도

표 1. 모델 변압기의 특성

주파수	60Hz
결선	Y-Δ
턴수(HV/LV)	868/145
권선저항(HV/LV)	12/10mΩ
자속밀도	1.36T
철심재질	30PG185

2.2 등가 자기회로법에 의한 여자전류 계산

이 연구에 사용되는 변압기는 철심의 비투자율이 공기에 비해 매우 높으므로 철심에 의한 자계의 기자력 성분을 무시하면 3상 변압기의 자계의 식은 다음과 같다.

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 + N_3 I_3 = \frac{l_{air}}{\mu_0} (B_2 + B_3) \quad (1)$$

여기서,

- $N_1 = N_2 = N_3$: 권선수[턴]
- l_{air} : 공극의 길이[m]
- μ_0 : 공기의 비투자율
- B_2, B_3 : 철심 자속밀도[T]

여기서 B_1 는

$$B_1 = B_2 + B_3 \quad (2)$$

가 된다.

이때, 여자전류 I 은 식 3과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$I = \frac{\frac{l}{\mu_0 \mu_r} \times B \times A}{N} = \frac{l}{\mu_0} \times B \quad (3)$$

여기서 자속밀도 B 는 일반적으로 설계 자속밀도를 의미하며 따라서 최대치 기준으로 바꾸고, 이에 따라 여자전류 I 도 함께 최대치 기준으로 바뀐다.

2.3 유한요소법에 의한 여자전류 계산

2.3.1 지배방정식

자기벡터 포텐셜 \vec{A} 를 계변수로 하는 지배 방정식은 맥스웰 방정식으로부터 식 4와 같이 유도된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mu &: \text{투자율} \\ \vec{J}_0 &: \text{전류밀도} [A/m^2] \end{aligned}$$

변압기 권선 및 저항 R 을 고려한 인가전압이 V 일 때 회로 방정식은 식 5와 같다.

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (5)$$

2.3.2 변압기 무부하 등가회로

변압기 2차측 권선이 개방되어 있는 상태에서는 변압기가 고 투자율을 갖는 인덕터로 작용을 하게 되어 높은 인덕턴스 L_c 에 의해 비교적 작은 여자전류가 흐르게 된다. 이때 비교적 낮은 주파수에서 커패시터 성분을 무시할 수 있고, 권선 저항 R 에 의한 여자전류에 의한 손실도 부하 전류에 비해 매우 작으므로 무시할 수 있다. 변압기 철심의 철손 성분을 고려한 철손 저항 R_c 에 의한 등가회로는 그림 2와 같다[2].

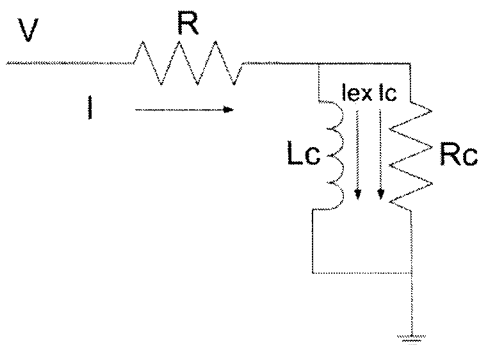


그림 2. 무부하 등가회로

2.3.3 해석 방법 및 결과

본 연구에서 해석 시간 단축 및 용이성을 고려해 2차원

X-Y 평면에서 모델링 하였으며, 다음과 같은 사항을 가정하였다.

- 1) 해석평면은 Z축에 대해 대칭이다.
- 2) 권선 및 철심의 와전류손을 무시한다.
- 3) 변위전류에 의한 영향은 고려하지 않는다.
- 4) 자기 비선형성을 고려하여 비선형 해석을 실시한다.
- 5) 철심의 over lap 효과는 무시한다.

변압기 전압원 해석을 위해 그림 3과 같이 외부회로를 구성하였으며 비선형 해석 시 오차를 0.001%로 설정하고 고 time stepping transient solver를 사용해 1주기 (0.016667sec)까지 계산하였다.

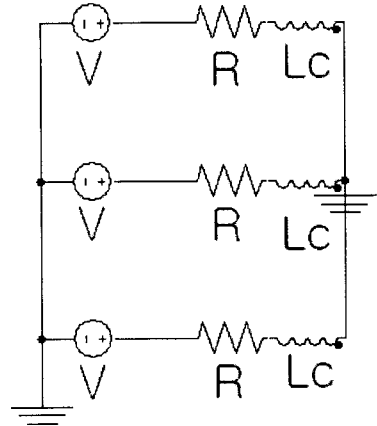


그림 3 변압기 외부회로도

여기서 L_c 는 유한요소 영역에서 계산되는 권선의 인덕턴스를 의미하며, V , R 은 각각 권선인가 전압원 및 저항을 의미한다.

이때, 대용량 변압기에서의 철손 전류는 전체 여자전류에 비해 매우 작으므로 회로에 반영하지 않았다.

철심의 비선형성을 고려해 그림 4와 같이 방향성 규소강판인 30PG185(POSCO사) B-H 재질 값을 정의하였다.

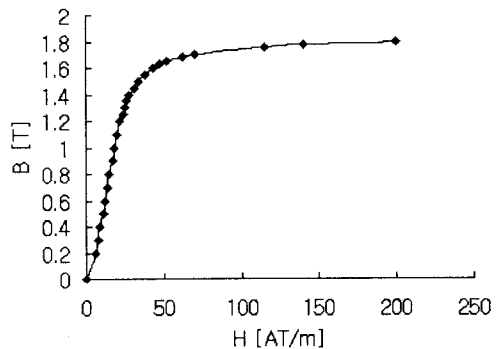


그림 4. 30PG185의 B-H 곡선

공극의 크기를 고려하여 그림 5와 같이 공극 주변의 요소의 크기를 2mm이하로 하여 총 13500개의 요소를 생성하였다.

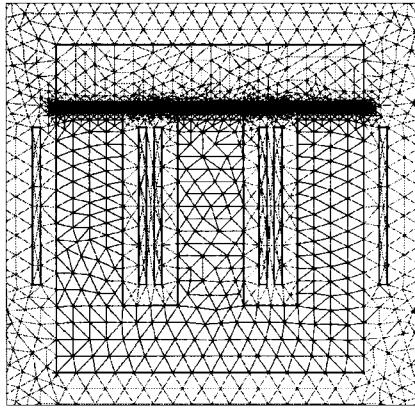


그림 5. 해석모델의 요소분할도

B상 자속이 가장 큰 시점 ($t=0.0063\text{sec}$)에서의 등자속선도는 그림 6과 같다.

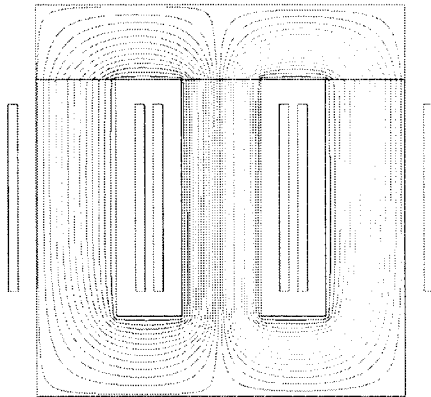


그림 6. 해석모델의 등자속선도

그림 7에서 유한요소법으로 계산된 여자전류 파형을 제시하였다. 일반적으로 변압기의 여자전류는 고조파를 함유하는 비정현적 특성을 가지지만 해석모델의 변압기는 포화영역 이하로 설계가 되어 선형영역에서 동작하도록 되어있고, B-H 곡선이 잔류 자속을 반영하지 않았으므로 정현적 특성을 가진다.

실제적으로 계산된 전류값에는 편측 offset이 발생하게 되는데, 이는 초기 전류값의 결정에 따라 틀려지게 되며, 본 해석시에는 초기 전류값의 결정을 위해 여자전류의 최저값과 최대값의 절대값은 같다고 가정을 하였다.

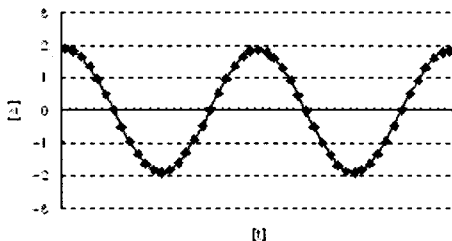


그림 7. 계산된 여자전류 파형(고압측, A상)

상기 기술한 방법으로 계산한 여자전류 값과 시험값을 표 2에서 비교하였다.

표 2 계산값 및 시험값 비교

	여자전류 (peak)	오차
등가자기회로법	14.90A	3.25%
유한요소법	14.75A	2.22%
시험결과	14.43A	-

3. 결 론

본 연구에서 유한요소법을 이용하여 공극이 있는 변압기의 여자전류를 계산하여 시험 값과 비교하였다. 등가 자기회로법과 유한요소법을 이용한 여자전류 계산이 시험값과 유사하나 복잡한 공극형상 및 포화가 예상되는 변압기 철심구조에서 유한요소법이 비교적 높은 정밀도를 가질 것으로 예상된다.

유한요소법을 이용한 여자전류 계산값과 시험값에는 다소의 오차가 존재하는데 이는 X-Y 2차원 평면에서 실제 변압기의 3차원 원통형 철심을 정확히 모델링 하지 못한 점 및 철심간 overlap 및 자기 이방성 재질의 효과를 고려하지 않은 점에 기인한 것으로 추정된다.

향후 외부회로에서 고려되지 않았던 철손저항의 산정을 위한 유한요소법을 이용한 철손 해석 및 DC편자를 고려한 철심의 dynamic B-H 히스테리시스 loop를 반영하는 전자장 해석을 추가적으로 진행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] N Takasu, et al., "An Experimental Analysis of DC Excitation of Transformers by Geomagnetically Induced Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994
- [2] Robert M. et al., "Transformer Design Principles", Gordon and Breach Science Publishers, p68, 2001