

누설자속에 의한 대용량 변압기의 권선지지구조 및 외함의 와전류손실 계산에 관한 연구

허우행, 이동업, 김규탁
(주)효성중공업, 창원대학교 전기공학과

The Loss Calculation of Eddy Current of the Tank and Winding Supports in Transformers by the Leakage Flux

Woo-Heng Heo, Dong-Yeup Lee and Gyu-Tak Kim
Hyo-Sung Power & Industrial'and Dept. of Electrical Engineering Changwon National University

Abstract - This paper compared the test data with the loss when a conductor is exposed to the magnetic field of reactors after generating external magnetic field in specimen by means of an air core reactor model and the calculation of loss came from applying the combination of FEM and integral method. It was applied to the loss measurement of transformers due to leakage flux.

1. 서 론

전력 기기의 용량이 증가함에 따라 전기적인 절연문제 뿐만 아니라 누설자속에 의한 손실 및 온도 상승이 큰 문제로 대두되었다. 특히, 전력용 리액터, 변압기, IPB와 같은 전기기기에서의 누설 자속에 의한 손실은 국부파열로 인한 열화에 의하여 기기의 수명에 큰 영향을 미친다[1].

누설자속에 의한 권선 지지구조 및 외함의 손실 특성은 지지물의 재질특성에 따라 크게 변하게 되며, 손실 계산에 FEM이 널리 사용되고 있다. 변압기의 권선지지구조 및 외함은 비대칭구조를 가짐은 물론 재질의 불연속성으로 인하여 2차원 해석이 불가능하여 3차원 해석을 수행하여야 한다. 이와 같이 3차원 해석을 시행하는 경우 전력용 변압기에서는 해석대상의 크기가 매우 크게 됨은 물론 면방향 표피효과로 인하여 해석 영역의 요소수는 기하급수적으로 증가하게 된다. 즉, 상용주파수에서 권선 지지물인 철과 자기차폐를 위한 구리, 알루미늄 등과 같은 도체의 침투깊이는 수mm이하이므로 이를 정확하게 고려하기 위하여 해석 영역을 세분하여야 되므로 막대한 계산량과 시간이 필요하다. 또한, 같은 해석 모델인 경우에도 요소 분할 정도에 따라 계산결과에 큰 오차가 발생하는 문제점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 먼저 변압기의 전류 영역과 공기영역을 2차원 축 대칭 유한요소법을 적용하고, 외함의 3차원구조를 고려하기 위해 외함의 거리에 따른 자계 계산을 실시하여 거리별로 계산된 magnetic field를 계산하여 권선 지지구조 및 외함 표면에서의 자계를 계산한 후 적분법을 이용하여 구조물에서의 누설자속에 의한 손실을 계산하였다.

2. 본 론

2.1 손실 계산

그림 1은 요소 크기에 따른 유한요소법에 의한 손실 계산치이다. 재질이 동인 경우 상용주파수에서의 침투깊이는 8.53mm이다. 이때 메쉬의 크기를 5mm로 한 경우 1mm로 한 경우의 손실밀도를 나타낸 것이다. 그림 1에서 알 수 있는바와 같이 메쉬의 크기에 따라 그 값이 크게 달라지게 된다. 따라서 메쉬의 크기가 손

실 계산에 큰 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 권선부와 공기영역을 FEM으로 계산하여 철지지 구조 및 외함 표면의 자계를 구하여 이 값을 적분법에 적용하였다.

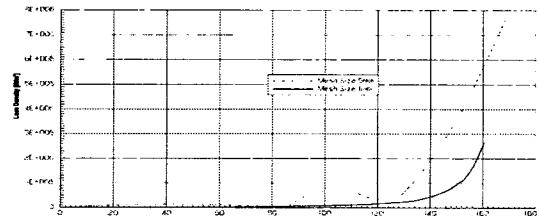


그림 1 요소 길이에 따른 손실 밀도분포

FEM방법에 다음과 같은 가정을 적용하였다

- 재질은 동방성이이며, 재질면에 입사하는 자속은 면에 수직이다.
- 해석 대상의 도전율이며, 비투자율은 공기와 같다.
- 적분법에 대한 가정은 적용하였다
- 자속방향의 와전류성분은 0이며 와전류는 자속방향에 수직인 성분만 존재한다.

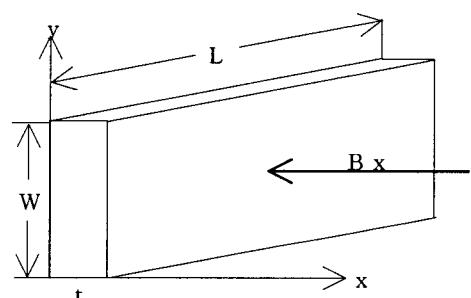


그림 2 계산 모델

2.1.1 도체의 두께방향 전류변화를 무시한 경우
자속의 시간적 변화에 따른 와전류는 다음과 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{J}{\sigma} \right) = \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times A = B \quad (2)$$

$$J = -ju\sigma A \quad (3)$$

그림2와 같은 구조에서 자속과 벡터 포텐셜의 관계는 다음과 같다

$$B_x = \frac{dA_z}{dy} \quad (4)$$

(4)식을 양변을 0~y까지 적분하면

$$B_X y = A_Z(y) - A_Z(0) \quad (5)$$

양변에 $jw\sigma$ 를 곱하면

$$J_{Z(y)} = -jw\sigma B_X y + J(0) \quad (6)$$

$$P = \int_r \frac{J_z^2(y)}{2\sigma} \quad (7)$$

자속 방향 B_X 에 대해 와전류는 서로 대칭이므로 $J(0) = 0$ 인 조건을 갖으며, 손실 식 (7)에 대입하여 폭 W 인 도체에서 발생하는 단위 체적당 손실은 다음과 같다.

$$P = \frac{1}{24} w^2 \sigma B_X^2 W^2 [W/vol] \quad (8)$$

2.1.2 도체의 두께 및 폭 방향 전류변화를 고려한 경우
도체의 와전류 문제에서 벡터 포텐셜 A 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A = A_o + A_i \quad (9)$$

여기서

A_o = 도체 외부자장에 의한 벡터 포텐셜

A_i = 도체 내부자장에 의한 벡터 포텐셜

식(9)은 외부 자장이 도체에 입사할 때 외부 자장이 와전류를 만들고 와전류에 의해 발생하는 내부자장에 의한 벡터 포텐셜을 표현하고 있다.

위와 같은 문제를 실제 유한 길이 도체에 적용하기 위해 식(9)를 식(3)에 대입하고 Biot-Savart법칙을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$J + j\frac{w\mu\sigma}{4\pi} \int_r \frac{J}{r-r'} dv = jw\sigma A_o \quad (10)$$

그림(2)와 같은 계산 모델에서 x,y방향에 대해 N개의 미소영역으로 분할하는 경우, 미소영역내에서는 균일한 전류분포를 갖는다고 가정할 수 있으며 이때의 N개의 Segment로 나눈 임의의 점(x, y)에서의 와전류 밀도에 대한 식은 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} J(x, y) - j\frac{w\sigma\mu}{4\pi} \sum_{n=1}^N J(x_n, y_n) \cdot F(x-x_n, y-y_n) \\ = -jw\sigma A_o(x, y) \end{aligned} \quad (11)$$

단, A_0 는 권선 전류에 의한 도체 표면에서의 자기벡터 포텐셜이며 F 는 다음과 같다

$$\begin{aligned} F(x-x_n, y-y_n) \\ = \int_{y_n-\frac{\Delta y}{2}}^{y_n+\frac{\Delta y}{2}} \int_{x_n-\frac{\Delta x}{2}}^{x_n+\frac{\Delta x}{2}} \ln[(x-x')^2 + (y-y')^2] dx' dy' \end{aligned} \quad (12)$$

전체 해석영역에 대한 Segment를 조합하여 matrix로 표현하면 식 (13)과 같다.

$$[U]\{J\} - j\frac{w\sigma\mu}{4\pi} [F]\{J\} = -jw\sigma[A_o] \quad (13)$$

여기서 $[U]$ 는 Identity Matrix이다.

식(13)의 해는 식(14)와 같이 복소수형태로 표현되며, 복소해를 풀면 유한 도체의 와전류 분포를 외부자기장의 벡터 포텐셜 함수로 근사화시켜 계산 할 수 있다.

$$\{J\} = [B] E]^T + [B] [X] E^R \quad (14)$$

$$\text{여기서, } [X] = \frac{jw\sigma\mu}{4\pi} [F],$$

$$[B] = [U + X \cdot X]^T$$

$$[E] = w\sigma[A_o]^T - jw\sigma[A_o]^R$$

식(14)식을 이용하여 구한 전류밀도 분포의 실수부와 허수부를 그림 (3)~(6)에 나타내었으며, 두께와 폭의 비가 클수록 전류밀도의 분포가 왜곡됨을 알 수 있다.

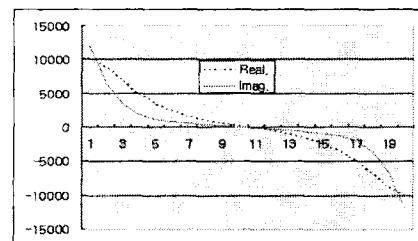


그림 3 도체 표면 전류밀도($t/W = 0.25$)

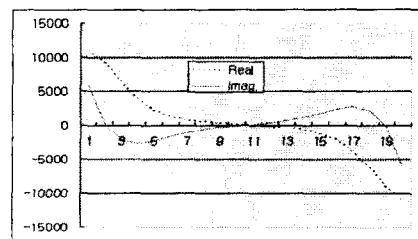


그림 4 도체 중앙부 전류밀도($t/W = 0.25$)

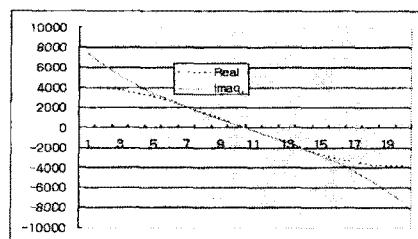


그림 5 도체 표면 전류밀도($t/W = 4$)

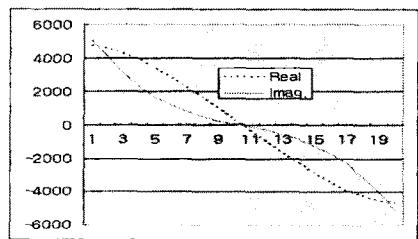


그림 6 도체 중앙부 전류밀도($t/W = 4$)

식(14)를 이용여 각각의 도체의 와전류 손실은 각각의 Segment에 대한 손실밀도 P 만 있으면 계산이 가능하며 다음과 같이 주어진다.

$$P = \frac{|J(x, y)|^2}{2\sigma} \left[\frac{\text{watts}}{m^3} \right] \quad (15)$$

2.2 결과 고찰

식(8)은 변압기 권선과 같이 두께와 폭이 동의 침투깊이 보다 작은 경우 와전류 손실은 한방향 전류만 고려하여 계산 가능하나, 변압기 권선 및 철심의 지지구조와 같이 구조물은 침투깊이보다 폭과 두께가 크므로 식(8)을 적용할 수 없으며 식(14)를 적용해야 한다.

식(14)에 의한 계산 결과의 타당성을 검증하기 위해 그림 7와 같은 Air Core리액터에 전류를 인가하고 시편도체가 리액터 내부에 있을 때와 없을 때의 손실을 측정하고 권선손실을 제거하여 시편만의 손실을 측정하였다.

본 논문에서 제작한 시험기는 축대칭 해석이 가능하도록 그림 7와 같이 원형으로 제작하였으며, 시험은 시편의 손실을 분리하기 위해 다음과 같은 순서로 실험하였다.

- 1) 리액터 모델만을 이용하여 손실측정
- 2) 리액터에 시편이 있을 때 손실측정

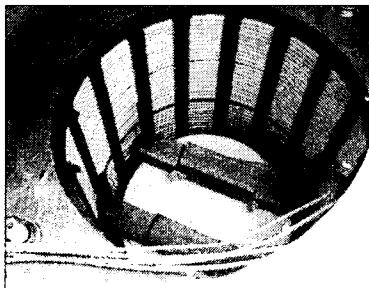


그림 7 시험기

표 1 적분법과 FEM의 손실 비교

제질	두께 [mm]	측정치 [W]	적분법 [W]	FEM [W]	오차 [%]
SS400	9	3106	3048	3090	1.4
SS400	22	4484	4335	4375	0.9
SS400	32	5487	5326	5442	2.1
Cu	3	8741	8640	8457	-2.2
Cu	6	6299	6283	6212	-1.1
Cu	12	4191	4147	4389	5.5
AL	6	10235	9994	10186	1.9
AL	8	9532	9649	9441	-2.2
AL	10	8528	9099	8759	3.9
SUS304	9	2631	2734	2866	4.6
SUS304	22	6481	6563	6759	2.9
SUS304	32	9385	9364	9046	3.5

표 1에서 보는바와 같이 실험치와 이론치가 일치하고 있음을 알 수 있다.

위의 계산 방법을 실제 변압기에 적용하기 위해 그림 8과 같이 권선과 철심의 지지구조 및 외함으로 구성된 변압기 모델에 대해, 자계 계산시간을 단축하기 위해 그림 9와 같이 철심중심에서 일정한 각도로 분할하여 계산하였다. 이때 손실은 각각의 분할된 영역에서 FEM을 이용하여 자속밀도를 구한후 식(6)의 적분법을 적용하여 계산하였다.

계산 결과의 타당성을 검증하기위해 총 16대의 전력용 변압기에 대해 Stray Loss 측정치와 비교한 결과 표2와 같이 최대 5%정도의 오차를 나타내 만족스러운

결과를 얻었다.

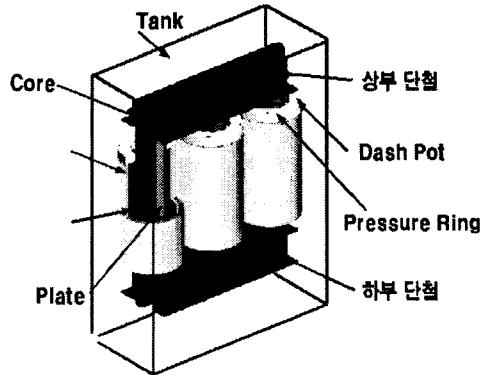


그림 8 변압기의 구조

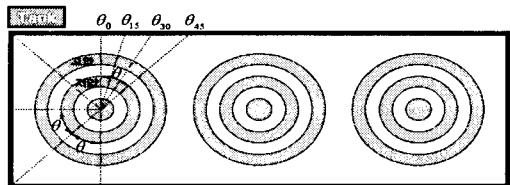


그림 9 변압기 외함의 준 3D 구조

표 2 계산 결과 비교

Proposed Method [W]	Test Data [W]	Error [%]
26168	24762	5.67
30579	30602	-0.07
27683	27952	0.96
31502	31754	0.79
61037	61844	1.30
77350	73090	5.82
95053	93131	2.06
156397	154864	0.99
156923	167092	6.08
106557	108036	-1.36
120703	116893	3.25
134081	135339	0.93
161600	156622	3.17
180140	181900	0.96
180908	189090	-4.32
221321	216441	2.25
208424	200713	3.84
206698	201832	2.41

3. 결 론

본 논문에서는 FEM과 적분법을 결합한 해석 방법을 적용하여 누설자속에 의한 변압기의 권선지지 구조 및 외함의 손실 계산을 수행하였다.

본 연구에서 제안한 방법은 권선 도체의 와전류손실에 적용이 가능하며, 변압기 외함과 같은 3차원 구조에 대한 축대칭 정자계 FEM모델링 방법, 정자계 FEM을 계산 결과에 의한 외부 자장 결과를 이용한 적분법에 의한 손실 계산 방법을 제시함으로서 계산 시간의 단축과 FEM 적용시의 문제점인 Mesh size에 따른 손실 계산 오차를 대폭 감소시킬 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.H.Whirter "Eddy Current Losses in Conductor Slab", IEEE, 1971