

자기영상법을 이용한 전력용변압기 단락기계력 및 와전류 손실 계산

¹허우행*, ¹박정호, ¹조익춘, ²이동엽, ²김규탁
¹(주)효성, ²창원대학교 전기공학과

Short Circuit Force and Eddy Current Loss Calculation using Image Method for Power Transformer

¹Woo-Heng Heo*, ¹Jung-Ho Park, ¹Ik-Choon Cho, ²Dong-Yeup Lee and ²Gyu-Tak Kim
¹Hyo-Sung and ²Dept. of Electrical Engineering Changwon National University

Abstract - 변압기에서 단락기계력에 대한 계산 분야는 수직력에 의한 Beam Bending, Tilting, 절연물 압축력과 수평력에 의한 Hoop, Compression 등이 있다. 본 논문은 전력용변압기 내부의 자계를 자기영상법을 이용하여 구하고 계산된 자계를 이용하여 단락 기계력을 구하는 방법을 제안하고자 한다. 또한 기존 FEM과 자기영상법과의 계산결과를 비교하였다.

1. 서 론

손실과 단락기계력은 변압기 용량이 증가함에 따라 중요한 설계 변수로 작용한다. 단락 기계력과 손실을 계산하기 위한 기존 방법은 FEM과 자기 영상법이 널리 사용되고 있으나 FEM법은 계산이 정확한 반면 후처리가 복잡하고 자기영상법은 경계면조건을 만족하도록 영상전류를 반복 배치함으로써 정확한 해를 구할 수 있다.

자기영상법은 1950년에 변압기에 본격적으로 사용되었으나 컴퓨터용량의 한계로 철심 창구 폭이 커서 경계조건 처리가 비교적 용이한 Shell Form 변압기에 주로 사용되었으며, 창구 폭이 작은 Core Form 변압기에서는 경계조건을 처리 하기위해 많은 영상전류를 필요로 하므로 오차가 많은 방법으로 인식되어왔다[1].

FEM방법은 1970년대 중반에 본격적으로 변압기 자체 계산에 사용되기 시작 하였고 현재에도 널리 사용되는 방법이지만 치수가 작은 권선에서는 요소수에 따라 결과가 변하는 단점이 있다.

외부단락에 의한 변압기 내부의 Failure Mode로는 수직력에 의한 Beam Bending, Spacer 압축력등이 있으며, 수평력에 의한 Free Buckling, Hoop Stress등이 있다. 이러한 힘을 크기를 결정짓는 변수로는 변압기 내부임피던스, 저항과 리액턴스비로 결정되는 비대칭 계수, System임피던스, System단락용량, 1선 지락조건에서 영상임피던스, 선간 단락, 3상 단락조건등이 있으며, 본 논문에서는 다음과 같은 가정으로 단락 기계력을 계산하였다.

- 1) 계통 임피던스는 영이다.
- 2) 최대 단락 기계력은 3상 단락조건에서 발생한다.
- 3) 계통의 단락 용량은 무한대이다.

2. 본 론

2.1 Axial Beam Bending Stress계산

변압기 권선이 R-spacer사이에 지지되고 있는 구조를 단 정보로 놓고 해석대상이 변형정도가 탄성영역에 있다고 가정하여 계산한다. 단위체적당 힘이 j 이고 사각형 두께가 t 이고 폭이 W , 길이가 l 사각보에서 단위 면적당 Bending Stress는 식 (1)과 같다.

$$P = \frac{6}{tW^2} \times \frac{fl^2}{2 \times 6} = \frac{fl^2}{2W} \quad (1)$$

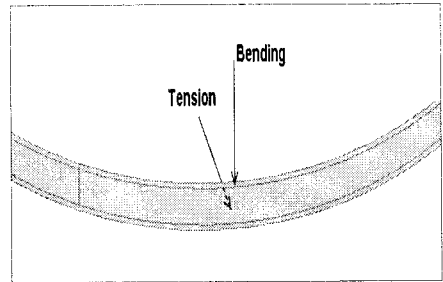


그림 1 합성력의 작용 방향

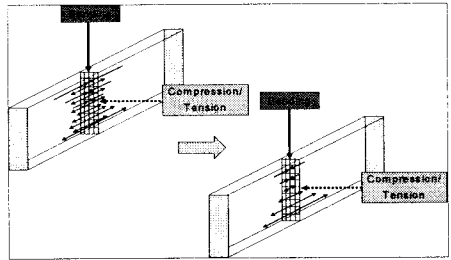


그림 2 도체내부에서 합성력의 분포

R-spacer로 지지된 권선에 수직력과 수평력이 도체에 동시에 작용할 때 도체단면에서의 힘은 그림 1과 같이 작용한다. 이때 도체단면에 걸리는 힘은 도체 단면에 수직이며 두 힘의 합성력은 그림 2와 같이 된다. 실제의 경우 Bending과 Compression/Tension Force는 같은 방향(감긴 방향)으로 동시에 작용하므로 Bending에서는 두 가지 힘의 합성력을 계산해야한다. Combined force를 구하기 위해 Radial Force를 계산해야 하며 이때 Combined Force는 Compression이 가장 작은 곳에서 가장 크게 발생하므로 이때의 Radial Force를 계산해 주면 된다.

2.2 Forced Bulking내력 계산

Spacer가 지지되는 구조에서 반경방향 힘에 의한 Buckling이 일어나지 않을 조건 지지점의 갯수는 Timoshenko의 Buckling 공식을 이용하여 계산 한다. Timoshenko의 Buckling 공식에 의하면 길이가 L 인 Bar(도체)에 압력 P 가 작용할 때 도체의 굽힘에 대한 Critical Force P_{cr} 은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI_c}{l^2} \quad (2)$$

여기서, E = 영탄성 계수, I_c = 관성모멘트, l = 도체 길이이다.

따라서, 지지점의 Critical 길이는 식 (3)과 같다

$$l = \sqrt{\frac{(2\pi)^2 EI_z}{P_{cr}}} \quad (3)$$

n개의 Spacer에 의한 길이는 $nl = 2\pi r$ 이 된다.

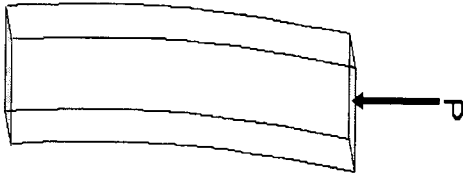


그림 3 Forced Buckling 모델

2.3 반경방향 기계력 계산

그림 4와 같이 반경 방향 힘이 작용하고 있는 권선에 단위 면적당 힘을 알고 있을 경우 실제 단면에 걸리는 F를 계산하기 위해 힘의 성분을 F_x, F_y 로 분리하면 단면에 걸리는 F_x 성분은 영(Zero)이 되고 F_y 성분만 계산하면 된다.

$$F_y = PH \frac{D}{2} \int_0^\pi \sin\theta d\theta = PH_t L$$

한쪽 단면에 걸리는 힘은 1/2이므로 식 (4)와 같다[2].

$$F_y = PH_t \frac{D}{2} \quad (4)$$

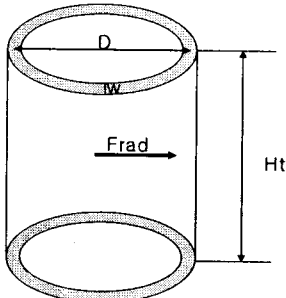


그림 4 반경방향 힘 계산 모델

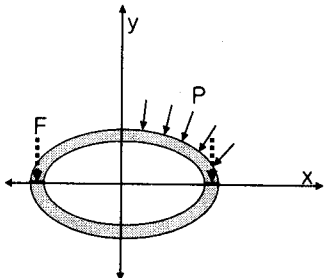


그림 5 도체의 좌굴력 작용 모델

2.4 R-Spacer에 작용하는 힘

그림6과 같이 수직력이 수직방향에 대해 작용하고 있을 때, 같은 방향으로 작용하는 높이를 구분하기 위해 Segment로 나누면 권선의 R-spacer에 작용하는 힘은 각 Segment 내의 수직력을 누적하여 더하면 된다. 스페이서 갯수 n, 폭이 W, 도체두께가 t, Radial 방향 갯수가 N_r 인 구조에서 스페이서에서 힘이 받는 단면적은 다음과 같다.

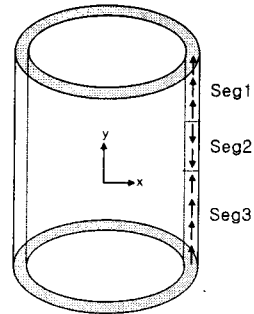


그림 6 누적힘 계산 모델

$$Area = n \times t \times W \times N_r$$

따라서 스페이서에 작용하는 힘은 다음과 같다

$$F_{SP} = \frac{F_{누적}}{Area} \quad (5)$$

2.5 Pressure Ring(또는 단철)에 작용하는 수직력

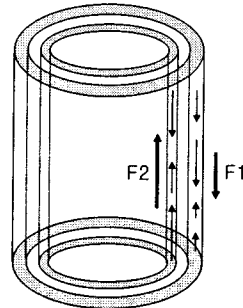


그림 7 총 수직력 계산 모델

그림 7과 같이 Layer1,2권선에 작용하는 Total 수직력이 각각 F1, F2일 때 Pressure Ring에 작용하는 힘은 상부 단철에 작용하는 힘(F2)과 하부 단철에 작용하는 힘(F1)이 되며 N개의 Layer가 존재할 경우 상하부 단철(Pressure Ring)에 작용하는 힘은 각각 식 (6)과 (7)로 표현된다.

$$\text{상부 단철} : \sum_{i=1}^n (F1 + F2 + F3 \dots F_n) \text{ 단 } F_n > 0 \quad (6)$$

$$\text{하부 단철} : \sum_{i=1}^n (F1 + F2 + F3 \dots F_n) \text{ 단 } F_n < 0 \quad (7)$$

2.6 권선 손실 계산

두께가 t, 폭이 W인 도체에 주파수가 f인 누설 자속이 r, z 방향으로 입사할 때 도체의 손실은 다음과 같이 계산 된다.

$$P = 2 \times \left(\int \frac{(B_r \cdot 2\pi f t)^2}{24\sigma} dV + \int \frac{(B_z \cdot 2\pi f W)^2}{24\sigma} dV \right)$$

2.7 영상법에 의한 자계 계산 및 기계력 계산

그림 8과 같이 폭과 두께가 각각 w, t인 도체가 전류 I가 흐르는 경우 해석영역에서 임의의 지점에서 자계계산은 임의의 지점에서 미소 전류소에 의한 자계를 적분하여 계산한다. 면적이 W×T인 전류 Source의 미소 전류소는 다음과 같다.

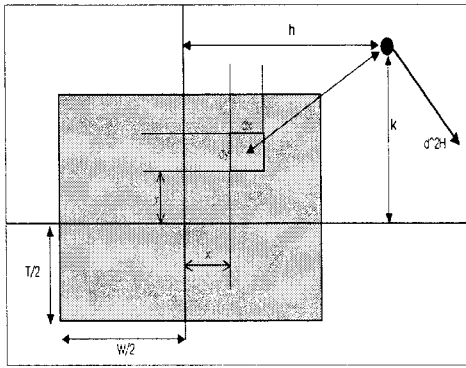


그림 8 임의의 지점에서 자계계산을 위한 모델

$$i = \frac{I}{WT} \quad (8)$$

미소전류소에 의한 자계의 X방향 및 Y방향은 식(9), (10)과 같다.

$$d^2 H_x = d^2 H \sin \theta = \frac{i (k-y) dx dy}{r^2} \quad (9)$$

$$d^2 H_y = d^2 H \cos \theta = \frac{i (h-x) dx dy}{r^2} \quad (10)$$

따라서 자계는 식 (11), (12)을 적분하여 계산하면 된다.

$$H_x = \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-w/2}^{w/2} \frac{i (k-y) dx dy}{r^2} \quad (11)$$

$$H_y = \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-w/2}^{w/2} \frac{i (h-x) dx dy}{r^2} \quad (12)$$

일반적으로 그림 9과같이 다수의 도체가 배열한 경우, 경계면의 조건에 따라 다음과 같은 절차에 의해 해석영역의 자계를 계산한다.

- 1) 해석영역의 자계를 식(11),(12)를 이용하여 계산한다.
- 2) 4개의 경계면에 경계면 사방에 영상 전류를 배치한다.
- 3) 영상전류의 영향이 무시될 때까지 영상전류를 반복 배치한다.
- 4) Open 경계의 영상전류는 0으로 계산한다.
- 5) 식(13)과 같이 Source에 의한 자계와 영상전류에 의한 자계의 합을 구하여 계산한다.

$$H = H_{A1} + H_{A2} + H_{A3} \dots + H_{D1} + H_{D2} + H_{D3} + \dots H_{KN} \quad (13)$$

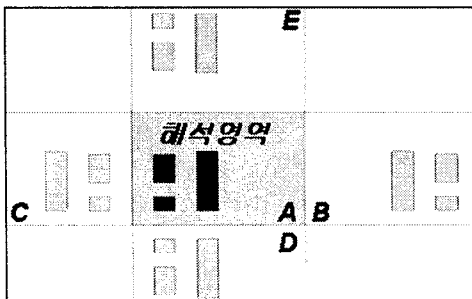


그림 9 영상전류 배치도

계산 방법의 타당성을 검증하기 위해 그림 10과 같이 누설 임피던스가 2.5%이고 NI가 66666.6A인 변압기를 모델링하여 자기 영상법과 FEM법으로 계산된 자계에 의한 단락기 계력을 비교하였다. FEM의 요소분할은 4[mm]로 균등분할하여 약 80,000개로 분할하였으며, 자기영상법에서 영상 전류는 총 7개를 배치하고 적분구간용 Grid는 권선당 200개를 분할하여 약 4200개의 구간 적분을 실시하였다. 두 방법에서 계산된 힘은 표 1과 같으며, 최대 오차는 약 6%로 서로 잘 일치함을 알 수 있었으며, 손실의 오차는 약 3%로 두 방법이 매우 근접한 결과를 갖는다.

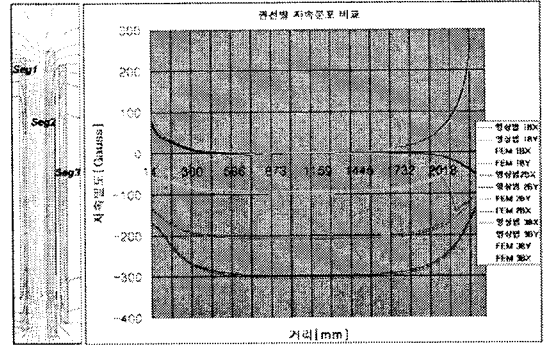


그림 10 권선 배치 구조 및 계산 결과

표 1 FEM과 영상법의 힘의 비교([단위%])

권선No.	계산법	총 수직력	총 수직력	누적 수직력	합성력	손실
SEG1	FEM	100	100	100	100	100
	영상법	96.6	97.2	94.2	99.5	97.2
SEG2	FEM	100	100	100	100	100
	영상법	98.5	99.3	97.1	98.4	98.8
SEG3	FEM	100	100	100	100	100
	영상법	97.3	98.2	98.2	98.1	96.6

3. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석과 자기영상법으로 변압기 단락기 계력과 손실을 계산 하는 방법을 비교하였으며, 계산 결과 최대 6%의 오차를 갖음을 알 수 있었다.

변압기 특성 해석시 많이 이용되는 유한요소법은 모델링 등과 같은 전처리과정과 후처리 과정이 꼭 필요하며 계산 시간 또한 많이 소요된다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 자기 영상법을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 자기 영상법을 이용하여 특성해석을 한 결과 그 결과에 오차는 최대 6%미만이었으며, 계산 시간 또한 1/10정도로 단축할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] L. W. Bewley, Two-Dimensional Fields in Electrical Engineering, Macmillan 1948, pp 151~157
- [2] M.Waters, The Short-Circuit Strength of Power Transformers, Macdonald, 1966, pp 101~103