

전력용 변압기의 단락강도 해석

최영길^o
한국전기연구원^o

Computational Analysis of Short-Circuit Stresses in Power Transformer Windings

Y.K.CHOI^o
Korea Electrotechnology Research Institute^o

Abstract - This paper describes the work performed by computer simulation to achieve a satisfactory method of predicting the short circuit withstand strength of transformer which, may be too big for test due to physical or economic reasons. In fact, the windings of power transformer are subjected to extremely severe stresses under short-circuit condition. From our work, however, were computed such stresses as buckling, bending and compression occurring in transformer windings.

1. 서 론

전력용 변압기는 전력계통의 고장에 의한 기계적 강도를 견딜 수 있도록 구성되어야 한다. 이러한 요건에 대하여 설계시 다음의 두가지 1) 전자력의 계산과 측정 2) 변압기 권선간 작용하는 전자력에 대한 고려가 요구된다. 본 논문에서는 이러한 두가지 측면중 우선적으로 전자력 계산에 대하여 기술하고자 한다.

변압기내 전자력 계산은 변압기내 누설자속의 분포를 먼저 알아야 하며, 이를 위해서 2차원 축대칭 해석프로그램을 개발하였다. 결론적으로 본 논문의 모델 변압기 해석결과로서, 1) 반경방향 힘을 고려할 경우 고압권선도체는 (+)반경방향 힘의 영향에 의해 (+)반경방향으로 팽창강도(tensile stress)를 받는 반면, 음(-)의 반경방향 힘에 영향을 받는 저압권선도체는 (-)반경방향으로 압축강도(compressive stress)를 받는 것을 볼 수 있었다. 또한, 2) 축방향 힘을 고려할 경우 고압권선도체에서는 축상 양 선단에서 중심을 향하여 집중하는 압축강도가 일어나고 저압권선도체에서는 선단부에 압축강도가, 중심부에 팽창강도가 나타남을 알 수 있었다.

2. 지배방정식

그림 1에서와 같이, 변압기 해석영역에서 h전류가 흐르는 권선중 권선 S의 빗금친 부분의 직사각요소에 작용하는 힘을 구하고자 할 때, 이러한 계산을 위하여 다음과 같은 가정을 먼저 한다.

1) 축대칭 원통으로 가정한다. 따라서, Limb은 완전한 원통, 수평 Yoke는 무한길이의 평판, 그리고 자속회귀선에 대해 수직 Yoke는 내부반경 r_2 의 원통으로 표현한다

2) 철의 투장율은 무한대로 가정한다. 즉, 자기력선은 모든 점에서 철과 대기사이의 경계표면에 수직하다. 따라서, 전류밀도의 적분을 모든 권선에 걸쳐서 실시하면 영이 된다.(the sum of the ampere-turns is zero)

3) 모든 단면적은 직사각의 단면적을 가진다. 즉, 축방향에 따른 권선의 반경치수에 변화가 없다고 가정한다.

4) 매 권선에 있어 전류밀도는 반경방향으로 일정하다고 가정한다. 따라서, 매 권선의 전류밀도 $J(z)^{(s)}$ 를 반경에 무관하다고 정의할 수 있어, 해당 권선은 임의의 부분에서 계단형식의 일정한 값으로 나타낼 수 있다.

해석영역은 2차원 축대칭 원통좌표계의 형상으로 전류밀도 \vec{J} 는 ϕ 성분만을 가지며, Vector potential \vec{V} 역시 ϕ 성분만을 가진다. Maxwell방정식에서 다음의 편미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \mu_0 J$$

단, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-6} [H/m]$

Vector potential V를 알면 자속밀도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B_r = -\frac{\partial V}{\partial z}, \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rV)}{\partial r}, \quad B_\phi = 0$$

더욱이, 이 해는 가정 2에 따라 다음의 경계조건을 만족해야 하며,

$$B_r(r, 0) = B_r(r, L) = 0$$

$$B_z(r_1, z) = B_z(r_2, z) = 0$$

동시에, $V(r, z) = R(r) Z(z)$ 의 임시해를 가진다. 여기서, 보다 세부 수식전개는 참고문헌 [1]을 참조할 수 있으며,

$$F_z^{(s)} = - \int_v J(z)^{(s)} B_r(r, z) d\phi dz dr$$

3. 해석 적용

그림 2는 400kVA 6600/220V의 4권선 모델 변압기를 보여주고 있다.

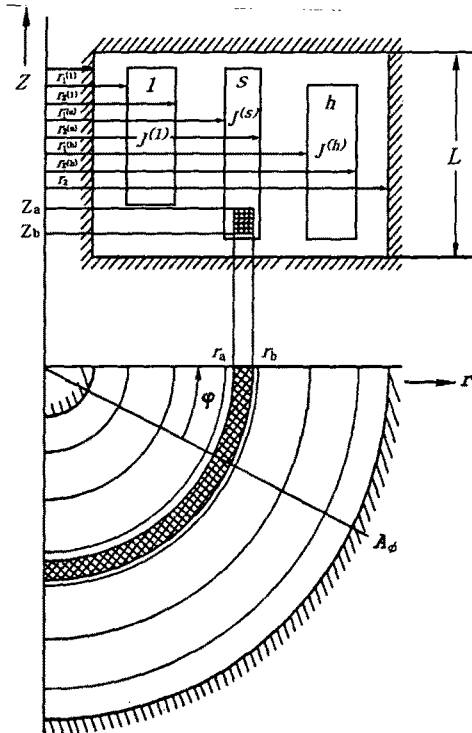


Fig 1. Cross-section of the window of a transformer with h windings.

r, z, ϕ = Cylindrical coordinates

r_1 = External radius of the limb

r_2 = Internal radius of the shell for the return flux path

$r_1^{(s)}$ = Internal radius of the s-th winding

$r_2^{(s)}$ = External radius of the s-th winding

$s = 1$ to h = Numerical notation of the windings

L = Height of transformer window

$J^{(s)}$ = Current density in the s-th winding

r_a, r_b, z_a, z_b = Limits of the part of the winding for which the force is to be calculated.

A_ϕ = Reference axis for ϕ

최종으로는 직사각 요소에 작용하는 힘을 다음에 의해 구할 수 있다.

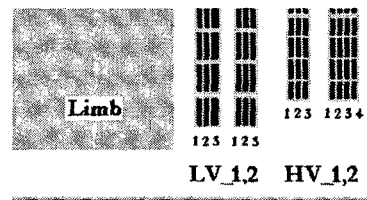
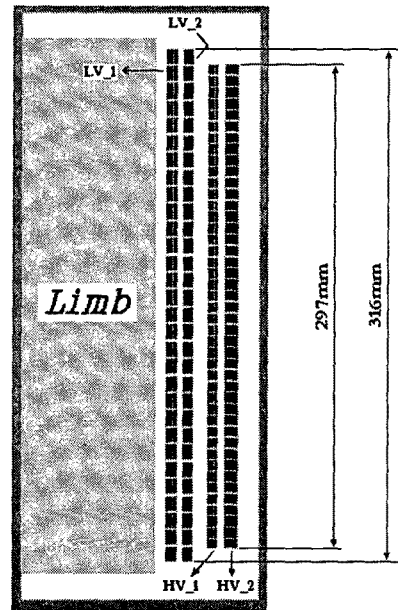


그림 2. 400kVA 6600/220V의 4권선 모델 변압기의 해석영역

전자력의 반경방향 성분에 의해 발생하는 단락강도와 축에 평행하게 작용하는 강도는 서로 다르다. 따라서, 단락강도를 반경방향 성분과 축방향 성분으로 나누어 그 특성을 파악하는 것이 편리하다. 즉, 두 성분은 단락강도 계산시 서로 다른 형태의 강도를 나타내기 때문에 독립적으로 간주한다.

3.1 힘의 반경방향 성분

누설자속은 대개 축방향으로 전개되기 때문에 힘은 기본적으로 반경방향으로 나타난다. 해석결과인 그림 3의

(a)와 (b)에서, 먼저 저압권선 도체는 내부쪽(LV_1, No.1)으로 갈수록 선형적으로 영이 되고, 고압권선 도체는 외부쪽(HV_2, No.4)으로 갈수록 선형적으로 영 또는 일부 (-)방향으로 줄어들고 있다.

즉, 주 Duct에 가까운 권선 도체(LV_2, No.3 또는 HV_1, No.1)는 그렇지 않은 위치에 있는 권선 도체(LV_1, No.1 또는 HV_2, No.3·4)에 비해 보다 큰 힘을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서, 저압권선의 도체는 안쪽으로 향하는 힘(inward force)을 견뎌야 하며, 고압권선의 도체는 바깥쪽으로 향하는 힘(outward force)을 견뎌야 한다.

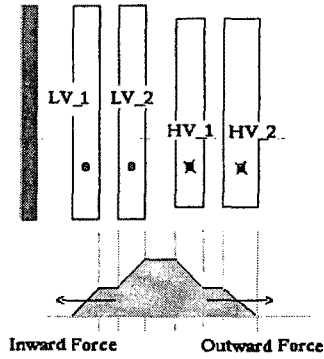
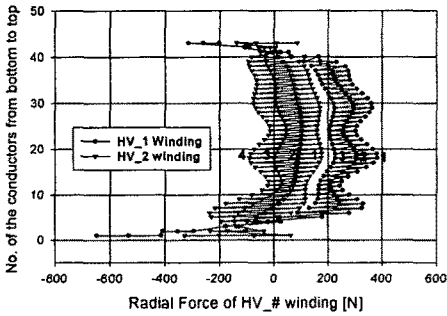
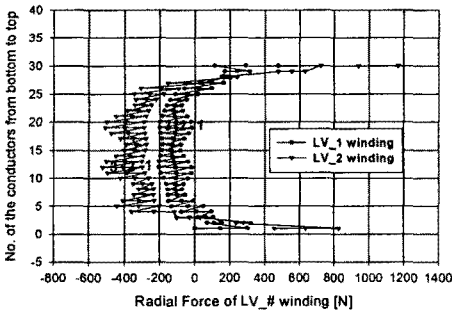


그림 4. 모델 변압기의 기자력 Diagram



(a) 고압권선의 각 도체에 작용하는 반경방향 힘



(a) 저압권선의 각 도체에 작용하는 반경방향 힘

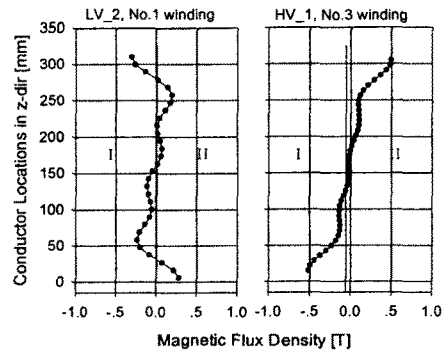
그림 3. 각 권선의 도체에 작용하는 반경방향 힘

이상의 사실을 통해 그림 4와 같이 사다리꼴의 기자력 Diagram을 그릴 수 있으며, 그림을 바탕으로 힘의 양상을 살펴보면, 부하가 가장 많이 걸리는 쪽에서 적게 걸리는 쪽으로 전달되고 있다. 실제 변압기내에서는 도체간 부하공유를 위해서 Disk형식등으로 서로 묶고 있다.

3.2 힘의 반경방향 성분

그림 5는 a) 자속밀도 분포, b) 각 권선에서의 축방향 힘의 분포, 그리고 c) 축방향 힘에 의한 기자력 Diagram을 보여주고 있다. 그림 5(a)에서, 저압권선의 자속밀도(LV_2, No.1)는 축방향으로 II(+)-I(-)-II(+)-I(-) 순서의 분포를 가진다. 반면, 고압권선의 자속밀도 분포는 단지 I(-)-II(+)) 순서이다. 이것은 그림 2의 모델변압기내 권선의 고압측과 저압측의 길이를 다시 살펴보면, 저압측 권선의 길이가 더 길기 때문이다. 이러한 권선 배치는, 그림 5(a)와 (b)에서 알 수 있듯이, 저압권에서는 권선길이의 중간지점을 기준으로 상·하부분 모두 각 부분에서 서로 다른 반대부호(±)를 동시에 갖도록 한다.

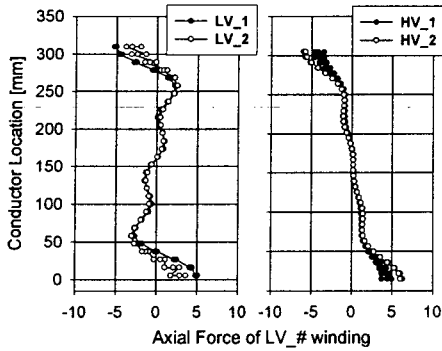
또, 고압권선측은 권선의 양끝단에서 권선 중심(축방향)으로 힘이 작용하게 된다. 즉, 고압측은 권선의 중앙부에서 가장 높은 압축력이 작용한다. 이러한 결과에 대한 내용은 그림 5(c)를 통해 보다 쉽게 이해할 수 있다.



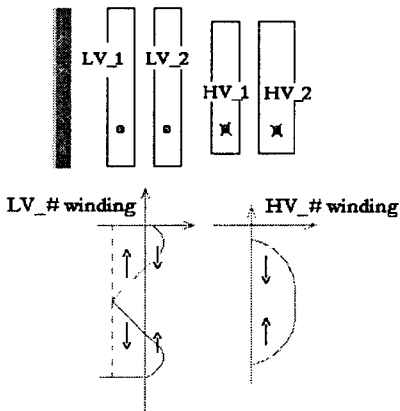
(a) 고압권선의 반경방향 자속밀도 분포

5. REFERENCES

- [1] The Brown Boveri Review, Calculation of short-circuit stresses in transformer windings with the aid of digital computers, Vol.47, No.5/6, pp321-328, 1960.
- [2] Giorgio Bertagnolli, Short-circuit duty of power transformers, The ABB Approach, Second Revised Edition, 1996.
- [3] Calculation of short-circuit forces in transformers Electra No.67, pp29-75, 1979.
- [4] K.D.Song, K.Y.Park, Y.H.Oh, W.Y.Lee, S.C.Kim, Application and numerical method of the short circuit stresses in transformer windings, 3rd National symposium on electric power apparatus, materials and their applications, Vol. 3, pp123-126, 1999.
- [5] 최영길, 송기동, 이우영, 박경엽, "Calculation of short-circuit stresses in transformer windings", 대한전기학회 춘계학술대회 전기기기부문 International Session, pp27-30, 2001



(b) 고압권선의 축방향 힘 분포



(c) 고압권선의 축방향 기자력 Diagram

그림 5. 고압권선의 자속밀도, 축방향 힘 그리고 기자력

4. 결 론

전력용 변압기에서의 단락강도를 계산할 수 있는 해석 프로그램을 개발하여, 400kVA 6600/220V 모델변압기에 적용하였다. 이상의 내용과 같이 변압기내 힘의 분포와 기자력의 형태를 가시적으로 이해할 수 있어, 변압기 설계시 유용할 것으로 여겨진다.

또한, 본 논문의 해석결과가 선진국에서 기시행한 결과와 그 형식면에서 유사한 결과를 얻었으며, 제 특성(자속밀도, 전자력, 기자력분포등)에 있어서도 잘 일치하는 것으로 판단된다.