

1MVA 전력용 변압기의 단락특성 해석

이벽진, 안현모, 한성진
 동아대학교 전기공학과

Analysis of Short Circuit Characteristics for 1MVA Power Transformer

Byuk-Jin Lee, Hyun-Mo Ahn, and Sung-Chin Hahn
 Dept. of Elec. Eng. Dong-A University

Abstract - 본 논문에서는 선간단락 시 단락전류에 의한 전력용 변압기의 단락특성을 해석하였다. 변압기 사양은 1[MVA], 6,600/660[V] 단상 내철형 배전용 변압기를 사용하였으며, 변압기에 유입되는 단락전류를 회로방정식을 이용해 계산하였다. 단락전류에 의해 발생하는 누설자속밀도는 유한요소법을 이용해 계산하였고, 계산된 단락전류와 누설자속밀도에 의해 권선에서 발생하는 축 방향과 반경방향 단락전자력을 계산하였다.

1. 서 론

최근 전력계통은 효율향상을 위한 송전전압과 전력기기의 용량이 증가하고 있다. 이에 따라 변압기의 고용량화 및 소형화가 이루어지고 있지만, 동일한 용량에서 사이즈가 작아지면 절연문제, 온도상승문제, 구조 문제가 발생한다. 특히, 변압기의 구조적인 문제는 단락사고 발생 시 중요하게 고려해야 한다[1].

계통에서 선간 단락사고가 발생하면 변압기에 사고전류가 유입되게 된다. 이러한 전류를 단락전류라고 하며, 정격전류 수십 배의 크기를 가진다. 단락전류가 변압기 권선에 흐르면 Lorentz's Law에 의해 단락전자력이 발생한다. 이러한 단락전자력은 축 방향과 반경방향으로 힘이 가해지며, 권선 및 구조물에 구조적인 손상을 초래한다. 이러한 단락전자력을 미리 예측하여 변압기를 설계하는 것은 변압기 내구성과 신뢰도 향상에 커다란 영향을 줄 것이다.

본 논문에서는 계통에서 단락사고 발생 시 전력용 변압기의 단락특성을 해석하고자 한다. 단락사고 시 발생하는 단락전류는 회로방정식을 이용하여 계산하였으며, 단락전류에 의한 방향별 누설자속밀도는 자체해석으로 계산하였다. 계산된 단락전류와 누설자속밀도를 이용하여 고압권선과 저압권선에서 발생하는 축 방향 전자력과 반경방향 전자력을 계산하였다.

2. 본 론

2.1 자계 지배방정식

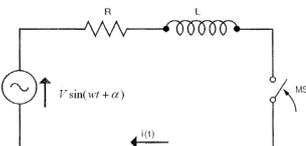
변압기 권선이 받는 과도 전자력은 단락사고 시 발생한 과도 단락전류와 단락전류에 의한 누설 자속 밀도가 중요한 요소로 작용하며, 각 권선에서 발생하는 누설자속 밀도는 다음 식 (1)의 지배방정식에서 벡터포텐셜을 구하여 계산한다[2].

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s \quad (1)$$

여기서, σ 와 μ 는 매질정수인 도전율[S/m]과 투자율[H/m]이며, \vec{A} 는 자기 벡터포텐셜[Wb/m], \vec{J}_s 는 전류밀도[A/m²]이다.

2.2 단락전류

단락사고 시 발생하는 단락전류를 계산하기 위해 <그림 1>과 같이 등가회로를 이용해 단락사고를 모의하였다. 단락사고가 발생하는 순간 등가회로의 스위치는 닫히게 되어 과도상태의 전류가 흐르게 된다. 이때, 발생하는 과도상태 전류가 단락전류이며, R과 L로부터 얻어진 시정수에 의해 단락전류의 감쇠율이 정해진다[3]. 과도상태에서의 단락전류는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.



<그림 1> 과도상태 시 단락전류의 등가회로도

$$I_{SC}(t) = I_{Smax} [\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + e^{-t/\tau}] \quad (2)$$

여기서, I_{SC} 는 시간에 따른 단락전류[A], I_{Smax} 는 최대 단락전류[A], τ 는 시정수, t 는 시간[s]이다.

2.3 단락전자력

권선에서 발생하는 전자력은 권선 주변의 자계 내에서 권선에 과도한 단락 전류가 흐를 때 발생하는 힘이며, 이는 식 (3)과 같이 Lorentz 방정식으로 표현한다[4].

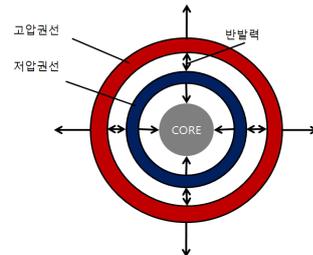
$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \quad (3)$$

여기서, \vec{F} 는 전자력[N]이고, I 는 전류[A], $d\vec{l}$ 은 전류의 미소길이, \vec{B} 는 자속밀도[T]이다.

단락 시 변압기의 권선에서 발생하는 전자력은 반경방향과 축 방향 성분으로 나타낼 수 있으며 반경 방향과 축 방향 전자력은 식 (4)에 의해 계산한다[5]. <그림 2>와 같이 저압권선의 반경방향 전자력은 철심 방향으로 발생하고, 고압권선의 반경방향 전자력은 철심의 반대방향으로 발생한다[6].

$$\vec{F} = \int_v J_\phi \hat{\phi} \times (B_r \hat{r} + B_z \hat{z}) dv = F_r \hat{r} + F_z \hat{z} \quad (4)$$

여기서, J_ϕ 는 ϕ 방향으로 흐르는 단락 전류밀도[A], B_r 과 B_z 는 반경 방향과 축방향의 누설자속밀도[T], F_r 과 F_z 는 반경방향과 축 방향의 전자력[N], dv 는 미소체적[m³]이다.



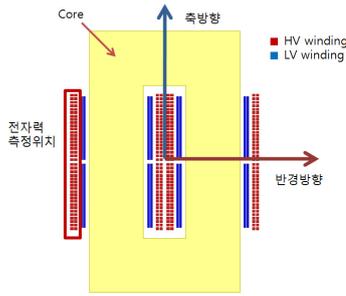
<그림 2> 권선에서 발생하는 전자력의 방향

2.4 해석모델

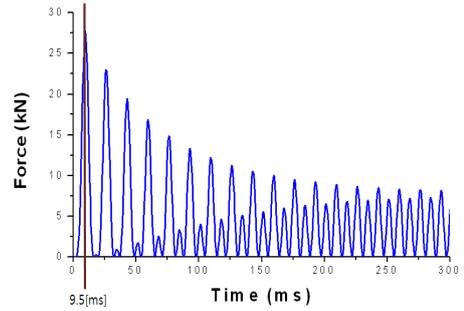
변압기의 단락특성을 해석하기 위한 해석 모델은 1[MVA]급 단상 내철형 변압기로 사양은 <표 1>에 나타내고 있다. 해석 모델의 형상은 <그림 3>에 나타내었으며, 해석의 정확성을 향상시키기 위해 권선의 형상을 실제와 유사하게 모델링 하였다.

<표 1> 전력용 변압기 사양

분 류	사 양
용 량	1[MVA]
주 파 수	60[Hz]
전 압	6,600/660[V]
상 수	단상



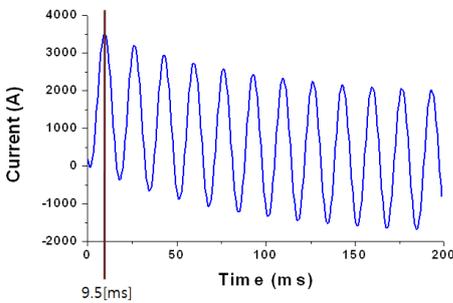
<그림 3> 변압기 해석 모델



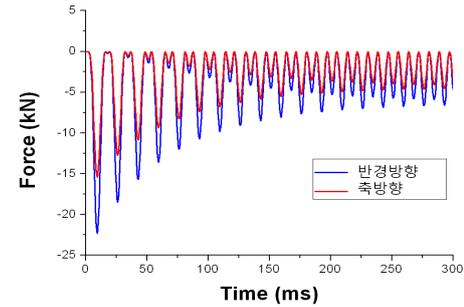
<그림 6> 1차측 권선의 방향 전자력

2.5 단락특성 해석
2.5.1 단락전류 계산

단락사고 시 발생하는 단락전류는 식 (2)에 의해 계산하였으며, 계산된 최대단락전류는 9.5[ms]에서 3,516[A]이다. 단락전류의 파형은 <그림 4>에 나타내었으며, 파형은 직류성분과 교류성분을 포함하고 있으며, 감쇠율에 의해 전류의 크기가 일정한 진폭으로 줄어들어 결국 정현파의 형태를 갖게 된다.



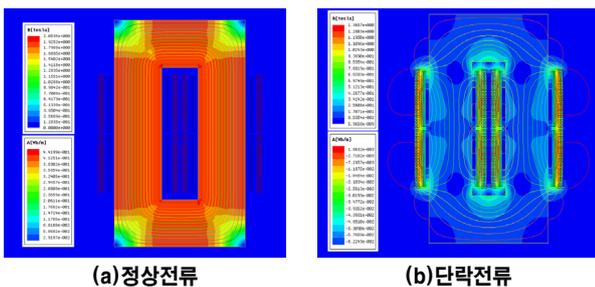
<그림 4> 단락전류



<그림 7> 1차측 권선의 방향별 전자력

2.5.2 자속밀도분포

철심의 자속 밀도는 유한요소법을 이용한 자체해석으로 <그림 5>와 같이 나타내었다. <그림 5(a)>는 정상상태에서의 자속밀도 분포이며, <그림 5(b)>는 단락사고 시 자속밀도분포이다. 정상전류에 의한 자속밀도 분포는 철심 내에 균일하게 분포하지만 단락사고 시 자속밀도는 철심 바깥으로 누설되어 분포하는 결과를 얻었다. 이러한 누설자속은 단락 전자력에 큰 영향을 미치는 요인으로 작용한다[7].



<그림 5> 변압기의 자속밀도와 자속선 분포

2.5.3 단락전자력 계산

변압기 권선의 시간에 따른 전자력 크기는 <그림 6>과 같은 파형이 나온다. 단락 전자력의 크기는 전류가 가장 큰 9.5[ms]일 때 가장 크게 나타났으며, 단락전자력의 값은 27.75[kN]이다. 이때의 전자력은 권선에 작용하는 힘의 스칼라 값이며, 실제 권선에 작용하는 방향별 힘의 크기를 알기 위하여 반경방향과 축 방향의 힘과 축 방향으로 작용하는 힘으로 나누어 계산하였다. <그림 7>은 반경방향과 축 방향에 발생하는 전자력을 나타낸다. 전자력의 '-값은 전자력 측정위치에서 변압기 바깥쪽을 향하는 방향이며, 축 방향에서는 변압기를 위에서 아래로 향하는 방향이다. 축 방향과 반경방향의 전자력의 크기는 각각 22.35[kN]과 15.43[kN]이다. 이 결과를 통해 축 방향보다 반경방향의 전자력이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 변압기 단락사고 시 권선에서 발생하는 전자력을 계산하였다. 결과로 단락전류의 최대 값은 3,516[A]로 계산되었다. 단락전류에 의해 발생하는 누설자속밀도 분포를 구하여 정상전류에 의한 자속밀도 분포와 비교하였다. Lorentz 방정으로부터 구한 단락전자력의 최대 값은 27.75[kN]이었으며, 반경방향과 축 방향의 전자력 비교를 통하여 반경방향의 힘이 더 큰 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 변압기의 절연 설계와 기계적 구조설계 시에 반영하면 신뢰도가 향상된 변압기를 설계를 기대할 수 있다.

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP) (No. 2009H100100164)과 한국전기연구원(KERI)의 지원을 받아 기본연구사업으로 수행한 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

[1] 안현모, 이지연, 오연호, 한성진, "3차원 유한요소법을 이용한 전력용 변압기의 전자력 해석", 대한전기학회 부산지회, 2009.
 [2] 안현모, 한성진 "전자계-기계계 결합해석에 의한 권식 변압기의 단락강도 예측", 전기학회논문지 60권 2호, 2011.
 [3] S. Jamali, M. Ardebili, K. Abbaszadh, "Calculation of Short Circuit Reactance and Electromagnetic Forces in Three Phase Transformer by Finite Element Method", International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol. 3, pp.1725-1730, 2005.
 [4] S.V. Kulkarni, S. A. Khaparde, "Transformer Engineering", Marcel Dekker, 2004.
 [5] 신관석, 하정우, 정희준, "수치해석을 이용한 배정용 변압기 권선 고장시의 전자력 계산방법 연구", 전기학회논문지 21권 5호, 2007.
 [6] M.Waters, The Short-Circuit Strength of Power Transformers, Macdonaid, 1966.
 [7] G.B. Kumbhar, S.V. Kulkarni, "Analysis of Short-Circuit Performance of Split-Winding Transformer Using Coupled Field-Circuit Approach" IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, 2007.