

수치해석을 이용한 22.9kV급 Cable 권선형 변압기의 진동모드 분석

하정우¹, 우성현¹, 신판석¹, 이진희²
¹홍익대학교 전기공학과, ²기계정보공학과

A Vibration Mode Analysis of the Cable-Type Winding of 22.9kV Power Transformer by Using A Numerical Method

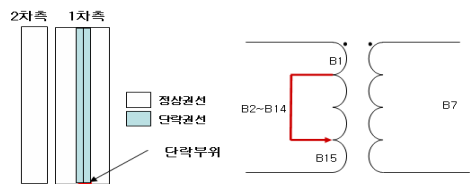
Jung-Woo Ha, Sung-Hyun Woo, Pan-Seok Shin, jin-Hee Lee
 Hongik University, Jochiwon, Chungnam 339-701, Korea

Abstract - 본 연구에서는 전력계통에서 발생하는 surge나 고장전류에 의해서 변압기의 고압측 코일에 유도되는 전자력의 크기를 유한요소 전자해석 프로그램(FLUX2D)의 축대칭FEM을 이용하여 해석하였다. 1MVA, 22900/220(V) 단상 외철형 Cable형 변압기의 권선의 각방향의 전자력을 분석하고, 변압기 권선의 고유진동mode를 Transfer Matrix Method를 이용하여 Cable형권선의 고유진동주파수를 파악하고 ANSYS와 비교하였다. 변압기 권선의 전자력과 진동mode 분석결과는 변압기의 절연설계 및 단락기계력에 대한 프레임 구조 설계를 위한 자료로 활용될 수 있다.

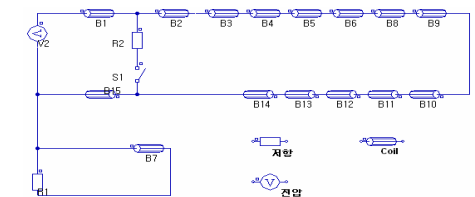
선에서 자속밀도가 크게 증가하여 권선에서의 누설이 많이 발생함을 알 수 있다. 자속밀도와 전류밀도로 인하여 axial방향과 radial방향으로 힘이 발생하게 된다. 그림(5)와 (6)은 단락권선의 가장 아래쪽 코일로서 axial방향 전자력과 radial방향 전자력은 단락전에 비하여 매우 크게 발생되었다.

1. 개요

초고압 변압기의 고장 발생시 수용가 측의 피해와 변압기 폭발시 인명 피해를 방지하기위해 변압기의 내부고장의 정확한 해석이 필요하다. 본 연구에서는 단상 변압기를 유한요소 전자해석 프로그램(FLUX2D)을 이용하여 변압기 권선의 고장전류 유입시의 권선간의 전자력특성을 해석하기 위하여 1MVA, 22900/220(V) 단상 내철형 Cable형 변압기를 모의해석 하여 고장전류시 권선간의 힘의 분포와 전자력을 통해 변압기에 미치는 영향을 계산하였다. 나선형 Cable 변압기의 권선에 대한 진동 계산은 Transfer Matrix Method를 이용하여 계산하였고, 이 결과는 기계 구조해석 프로그램(ANSYS)를 이용하여 비교 분석하였다.



〈그림 2〉 1차측 권선단락 회로도



〈그림 3〉 1차측 권선단락 모의 회로도(110턴 단락시)

2. 본 론

2.1 1MVA 변압기 모의 해석

변압기의 권선의 고장을 모의하기 위한 Model로 표(1)과 같이 1MVA, 22900/220(V) 외철형 변압기를 설정 하였다. 변압기의 도면은 그림(1)과 같이 표현하였으며, 권선의 형태는 원통형으로 고압측은 Cable형 권선으로 저압측은 몰드형태로 되어있다. 고압측 코일간의 힘의 분포를 알아보기 위하여 고압측의 권선중 221th ~ 330th 권선의 단락을 모의하였다.

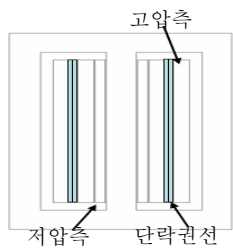


표 1 변압기 사양

분류	설 명
정격 용량	1MVA, 60Hz
코어형태	외철형
정격 전압	22900 / 220 (V)
정격 전류	44 / 4545 (A)
상수	단상
코어재질	$B_s=1.9T$
권선비	104:1

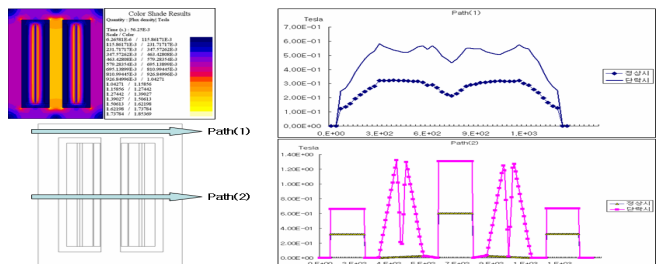
〈그림 2〉 변압기 해석 모델

2.2 1차측 권선 단락시 모의 해석

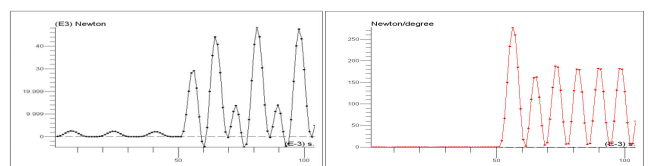
변압기의 권선단락(turn-to-turn)을 모의하기 위하여 그림(2)와 같이 단락부위를 선정하여 그림(3)과 같이 회로도를 구성하였다. 권선간의 전자력계산과 힘의 분포를 알아보기 위하여 고압측의 권선중 일부인 221th ~ 330th 권선 단락을 스위치(s/w)의 스위칭 시간을 조절하여 모의 하였다.

그림(8)과 같이 1차측 전류는 정격전류 54(A)에서 6.5(kA)로 증가하였고, 2차측 전류는 5.9(kA)에서 8.9(kA)로 증가하였다. 단락권선의 전류는 단락 전에 비해 54(A)에서 25.6(kA)로 증가하였다. 그림(5)는 단락시 자속밀도로 정상시에 비하여 단락시 자속밀도가 증가하였고, 특히 단락 권

〈그림 4〉 권선 단락시 단락권선의 힘 벡터도

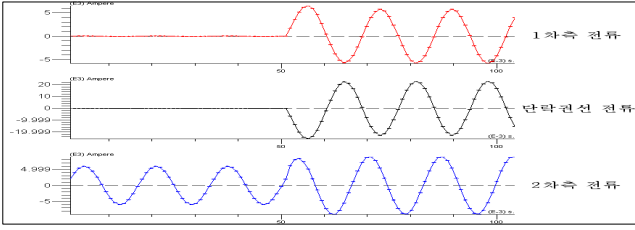


〈그림 5〉 단락시 자속밀도



〈그림 6〉 단락권선 axial방향 전자력

〈그림 7〉 단락권선 radial방향 전자력



〈그림 8〉 정상시와 단락시 권선의 전류

3. 권선의 진동 mode 해석

3.1 권선의 진동 mode의 운동방정식

변압기 권선단락시 권선에서 발생하는 전자력으로 인해 권선의 진동은 더욱 커지게 된다. 이와같이 권선의 진동은 변압기내부에 많은 영향을 주어 변압기 고장의 원인이 될 수 있다. 권선의 종류에는 여러 종류가 있다. 그중 1MVA Cable 변압기에 사용된 권선은 나선형으로 나선형 권선의 진동은 기계적 운동방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

식 (8)부터 권선 진동의 요소를 계산하여 아래 식(9)부터 (14)의 행렬식을 이용하여 권선의 진동 mode를 계산할 수 있다.

$$\{S^*\} = [T]\{S\} \quad (8)$$

$$\frac{d\{S\}}{d\phi} = [D]\{S\} \quad (9)$$

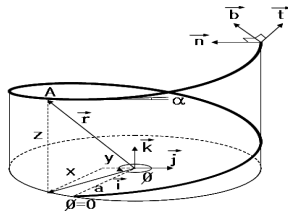
$$\frac{d([T]\{S^*\})}{d\phi} = [T][D]\{S\} = [T][D][T]^{-1}\{S^*\} \quad (10)$$

$$\frac{d\{S^*\}}{d\phi} = [T][D][T]^{-1}\{S^*\} = [D^*]\{S^*\} \quad (11)$$

$$[D^*] = \begin{bmatrix} [0] & [D_2] \\ [D_3] & [0] \end{bmatrix}_{12 \times 12} \quad (12)$$

자유진동에 의한 고주파시 상태벡터는 다음 식(13)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\{S^v(s, t)\} = \{S(s)\} \sin(\omega t) \quad (13)$$



〈그림 9〉 나선형 권선의 수학적 해석 모델

그림 (9)와 같이 나선식 원통형 권선의 자유진동은 아래식과 같이 나타낸다.

$$\bar{T}_i = \frac{c^2}{E L_n} T_i, \bar{M}_i = \frac{c}{E L_n} M_i, \bar{\Omega}_i = \Omega_i, \bar{U}_i = \frac{c^2}{E L_n} U_i, (i = t, n, b) \quad (14)$$

나선식 원통형 권선일때의 상태벡터(S)는 transfer matrix와 $\phi=0$ 일때의 관계로 다음과 같이 나타낸다.

$$\{S(\phi)\} = [F(\phi, \omega)]\{S(0)\} \quad (15)$$

transfer matrix는 다음 식에 의하여 표현된다.

$$[F] = e^{\phi[D]} = [I] + \phi[D] + \frac{\phi^2[D]^2}{2!} + \frac{\phi^3[D]^3}{3!} + \dots \quad (16)$$

$$[F] = \Phi_1(\phi)[I] + \sum_{i=1}^{11} \Phi_{i+1}(\phi)[D]^i \quad (17)$$

3.2 권선의 진동 mode 계산(예)

Transfer Matrix Method를 이용한 변압기 권선의 진동모드 계산을 위하여 표 2의 1MVA 나선형 권선을 선정하여 고유 진동주파수를 구하고, 다양한 조건하에서의 고유 진동주파수를 ANSYS 프로그램과 비교하였다. 표 3은 Single-turn일시 고유 진동주파수로서 초기 10개의 고유 진동주파수를 비교한 결과 두 결과가 아주 잘 일치 하였다.

그림 (10)은 권선이 20Turn일때 권선의 고유진동주파수로 Transfer

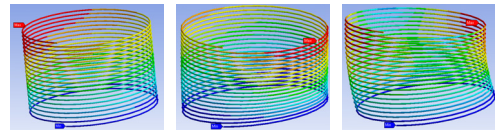
Matrix Method는 120개의 요소로 계산한 값과 ANSYS는 8000개의 요소로 계산했을시 값이 거의 일치함을 보여 TMM을 이용하였을시 적은 요소로 훨씬 빠른 시간에 계산할 수 있음을 확인하였다.

표 2 Cable형 권선 사양

분 류	설 명
Coil pitch	1°
Poisson's ratio	0.33
Young's modulus	1.24 × 10 ¹¹ (N/m ²)
도체 밀도	0.749(kg/cm)

표 3 고유진동주파수 계산결과와의 비교(SingleTurn, Hz)

Transfer Matrix Method	ANSYS
3.20(Hz)	3.19(Hz)
4.50(Hz)	4.48(Hz)
7.35(Hz)	7.36(Hz)
12.64(Hz)	12.62(Hz)
16.48(Hz)	16.56(Hz)
26.79(Hz)	26.78(Hz)
30.67(Hz)	30.83(Hz)
45.50(Hz)	45.53(Hz)
49.40(Hz)	49.64(Hz)
68.63(Hz)	68.75(Hz)



1st frequency 3rd frequency 5st frequency

〈그림 10〉 20 Turn의 권선model

4. 결 론

변압기의 권선단락에 의한 전자력의 크기와 방향을 계산하고 분석하기 위하여 유한요소 프로그램을 이용하였으며, 변압기 권선의 진동mode 계산은 기계적인 운동방정식을 이용하여 분석하였다.

1차측 고장시 전자력의 증가는 다른 권선의 전자력 증가를 일으켜 변압기 특성의 변화를 가져오며, 전자력의 방향은 단락권선의 양끝 쪽에서 가운데로 힘이 모이는 형상을 나타내어 단락권선이 압축 팽창을 반복하게 된다. 이는 권선의 진동에 많은 영향을 주고 변압기 내부의 기계적 강도에 영향을 주게 되어 변압기 사고를 유발하는 원인이 되는 것이다. 권선의 진동mode 해석은 기계적인 운동방정식을 근사화[Transfer Matrix Method]하여 계산하였으며, 권선의 진동mode 해석결과 0.15~0.45Hz로서 간단한 개략식으로 계산한 고유진동수의 범위로 Ansys 계산결과와 근사함을 보였다. 향후 이 algorithm을 이용하면 전자력에 의한 권선의 강제 진동 mode해석도 가능하게 되며, 진동에 의한 가진력의 크기도 계산이 가능해진다.

본 논문은 산업자원부에서 지원한 대학전력 연구센터 (과제번호2006-0273)의 사업으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 산업자원부, "지중배전용 변압기 신뢰도 향상에 관한 연구", 중간보고서, 2004년 3월
- [2] H. Wang, K. L. Butler, "Finite Element Analysis of Internal Winding Faults in Distribution Transformer", power delivery, IEEE Transactions, VOL. 16, NO. 3, JULY 2001
- [3] M.Waters, "The Short-Circuit Strength of Power Transformers"
- [4] Vebil Yildirim, "Investigation of parameters affecting free vibration frequency of helical springs", International journal for numerical methods in engineering, VOL. 39, 99-114(1996)