

유한요소법을 이용한 전력용 변압기 기초 설계 연구

이지연 김중경 정상용 한성진
동아대학교 전기공학과

A Study for Fundamental Design of Power Transformer Using Finite Element Method

Ji-Yeon Lee, Joong-Kyoung Kim, Sang-Yong Jung, Sung-Chin Hahn
Dept. of Elec. Eng., Dong-A University

Abstract - 본 논문에서는 유한요소법을 이용한 전력용 변압기의 기초 설계에 대하여 다루고자 한다. 전력용 변압기 설계 및 해석을 위해 원하는 사양의 전력용 변압기 치수결정이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 전력용 변압기의 치수결정을 위해 장하분배법을 기반으로 하는 기초 설계 프로그램을 제작하였다. 설계 프로그램을 이용해 결정한 치수에 의해 전력용 변압기를 모델링 하였고, 유한요소법을 이용하여 자체해석을 하였다. 유한요소해석에 의한 각 사양별 전력용 변압기의 자기적 특성값과 장하분배법에 의한 기초 설계 계산값을 비교·검토하였다.

1. 서 론

전력기기 중 송배전계통에 필수적인 전력용 변압기는 전자유도작용에 의하여 1차측으로부터 유입된 전력의 전압을 변성하여 2차측으로 공급하는 기기이다[1]. 전력용 변압기는 최근 교체시기를 맞이하여 그 수요가 점차 증가하고 있다. 전력용 변압기의 최근 연구 동향은 고장진단 및 고효율, 저소음에 대한 연구가 활발히 진행중에 있으며, 그 연구의 정당성을 위해 전력용 변압기의 기초 설계에 대한 고찰이 필요하다[2].

전력용 변압기 설계시 가장 먼저 철심, 창, 권선 등의 변압기 기본 형상에 대한 치수결정 문제에 직면하게 된다. 전력용 변압기 치수결정을 위한 설계법은 장하분배법과 D^2L 법이 있다. 장하분배법이 D^2L 법보다 계산과정이 간단하며, 회전기에만 적용되는 D^2L 법과 달리 변압기에도 적용될수 있어 전력용 변압기의 치수결정에 장하분배법을 사용한다[3]. 본 논문에서는 전력용 변압기 설계의 편의성과 시간단축을 위해 치수에 관계되는 파라미터들을 입력하면 전체적인 설계치수와 효율, 손실등을 계산하는 기초설계 프로그램을 제작하였다.

설계 프로그램에 의해 결정된 전력용 변압기의 치수를 이용하여 전력용 변압기를 모델링하고, 유한요소해석을 통해 자체해석을 하였다. 본 논문에서는 여러 사양의 전력용 변압기 설계가 가능할 수 있도록 서로 용량이 다른 두 개의 20kVA, 1MVA 전력용 변압기를 설계 및 해석하였다. 각각의 기초 설계 계산값과 유한요소해석 결과값을 비교·분석하여 기초 설계 프로그램을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 장하 분배법에 의한 치수결정

전력용 변압기의 기본 형상에 대한 치수결정을 위해 장하분배법을 이용한다. 장하분배법을 이용한 설계에서 비용량은 전기장하와 자기장하에 비례하는 파라미터로서 전력용 변압기의 치수결정의 중요한 변수이다. 전력용 변압기의 설계에서 비용량은 다음과 같다.

$$S/f = 4.44A\Phi \tag{1}$$

여기서, S 는 매각의 용량, f 는 주파수, S/f 는 비용량, A 는 전기장하, Φ 는 자기장하이다.

기준 자기장하와 분배정수의 함수인 자기장하를 먼저 구하고, 전기장하하는 자기장하와 식 (1)에 의해 구해진다. 이때 변압기의 기준 자기장하정수는 0.0025-0.0035의 범위를 가지므로 그 범위 내에서 선택하며, 장하 분배정수는 변압기의 경우 항상 1로 결정한다. 전력용 변압기의 자기장하는 다음과 같다.

$$\Phi = \Phi_0 (S/f)^{r/1+r} \tag{2}$$

여기서, Φ_0 는 기준 자기장하 정수, r 는 장하 분배정수이다.

전기장하와 자기장하를 이용하여 철심 단면적의 가로/세로 비율, 창의 가로/세로 비율을 장하분배법에서 제시하는 범위안에서 설계하고, 각 권선별 높이 및 폭을 구한다.

2.2 유한요소법에 의한 자체해석

전력용 변압기의 자체해석을 위해 유한요소법을 이용한다. 유한요소해석을 이용한 자체 지배방정식은 다음과 같고, 이때 경계조건은 Neumann 경계조건을 적용한다..

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \tag{3}$$

$$\vec{A} = 0 \tag{4}$$

여기서, μ 는 철심 투자율, \vec{A} 는 벡터 포텐셜, \vec{J} 는 전류밀도이다. 맥스웰 방정식으로부터 자속밀도 \vec{B} 는 벡터 포텐셜 \vec{A} 를 이용해 다음과 같다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{5}$$

또한, 철심 내 자속 Φ , 인덕턴스 L 는 다음과 같다.

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} \tag{6}$$

$$L = N\Phi/I \tag{7}$$

여기서, s 는 철심 내 단면적, N 는 턴수이다.

2.3 전력용 변압기 기초 설계

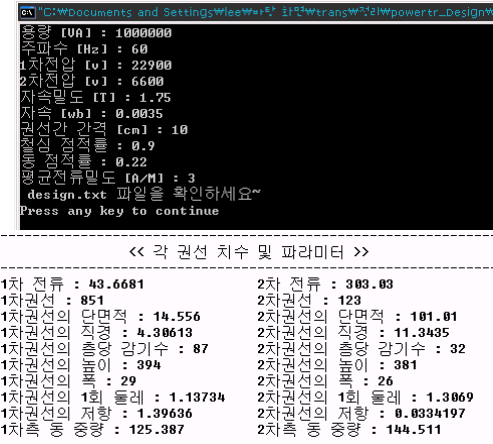
전력용 변압기의 내부는 철심과 권선, 절연물질, 각종 지지물로 구성되어 있다. 기초 해석을 위해 변압기 내부의 권선을 코일과 철심으로 단순화하고, 자속에 큰 영향이 없는 절연물 및 기타 지지물에 대한 설계부분은 해석에서 생략한다. 변압기의 철심과 코일, 각 권선의 높이 및 폭 등의 치수는 앞절에서 제시한 장하분배법을 이용해 제작한 기초 설계 프로그램으로 산출한다.

<표 1> 전력용 변압기 기초 설계 사양

구분	20kVA	1MVA
주파수 [Hz]	50	60
1차전압/2차전압 [V]	6600/210	22900/3300
1차턴수/2차턴수 [turns]	1899/60	850/122
권선의 평균전류밀도 [A/mm^2]	2.6	3
평균 절연거리 [cm]	0.8	1
자계 [A/M]/자속밀도 [T]	125/1.6	300/1.75

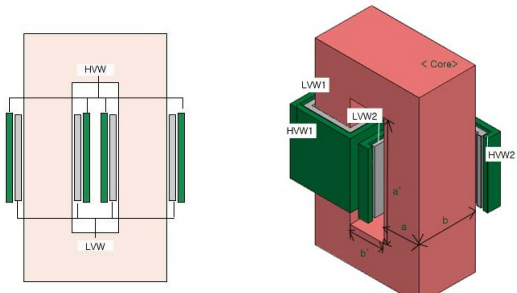
표 1은 본 논문에서 다루고자 하는 20kVA, 1MVA 전력용 변압기의 기초 설계 사양을 나타내고 있다. 장하분배법에서는 각 용량별로 자계의 범위를 지정하였다. 설계치수를 구하기 위해 자계 범위안에 들수 있도록 각 변압기의 자속밀도 B 를 20kVA 변압기는 1.6[T]로, 1MVA 변압기는 1.75[T]로 선택하였다. 두 변압기 모델을 비교하기 위해 단상 내철형의 철심, 권선간 구조, 철의 점적률 및 동의 점적률을 공통된 조건으로 제한하여 설계하였다.

기초 설계 프로그램을 이용하여 본 논문에서 설계하고자 하는 20kVA, 1MV 전력용 변압기의 자세한 치수를 얻었다. 그림 1은 장하분배법을 이용해 1MVA 전력용 변압기 모델을 설계한 프로그램의 입출력을 나타내고 있다.



<그림 1> 기초 설계 프로그램의 입력창 및 출력창

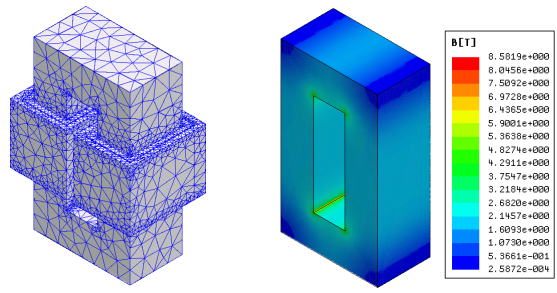
그림 2는 기초 설계 프로그램에 의해 구한 치수를 이용해 모델링한 두 전력용 변압기의 단면도 및 모형도이다. 장하분배법에 의해 창 의 가로/세로와 철심 단면적의 가로/세로의 치수를 설계하였다.



(a) 20kVA 변압기의 단면도 (b) 1MVA의 변압기의 모형도
<그림 2> 전력용 변압기 모델

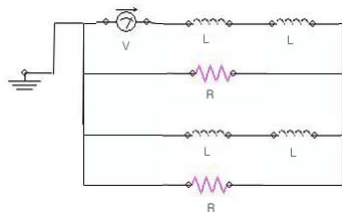
2.4 유효요소해석 결과

앞절에서 모델링한 두 개의 전력용 변압기 모델을 유효요소해석을 이용해 자체해석하였다. 그림 3(a)는 유효요소해석을 위한 20kVA 전력용 변압기 모델의 격자생성도이며, 그림 3(b)는 해석된 모델의 철심 내 자속분포를 나타내고 있다. 그림 3(b)에서 보듯이 1MVA 전력용 변압기의 철심 내 자속분포는 창을 중심으로 철심 외곽 가장자리로 갈수록 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

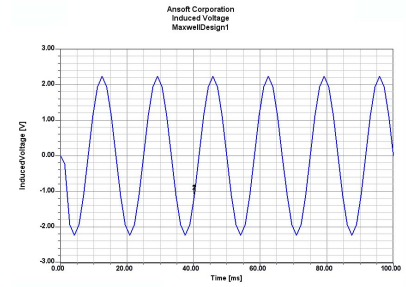


(a) 격자생성도 (b) 철심 내 자계분포
<그림 3> 1MVA 전력용 변압기

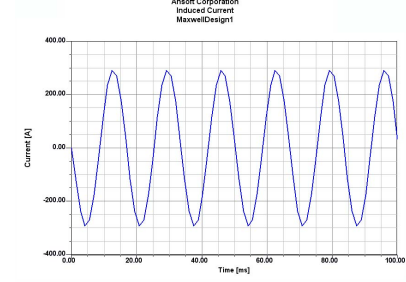
그림 4는 전력용 변압기 2차측 권선에 유기되는 전압과 전류를 구하기 위해 자체해석시 추가되는 변압기 외부회로도이다.



<그림 4> 변압기 외부회로도



(a) 2차측 전압



(b) 2차측 전류

<그림 5> 1MVA 전력용 변압기의 2차측 전압과 전류

그림 5는 1MVA 전력용 변압기의 2차측 권선에 유기되는 전압과 전류의 파형이다. 표 2에서는 20kVA, 1MVA의 각 파라미터 별로 기초 설계 프로그램에 의한 계산값과 유효요소해석에 의한 해석값을 비교하였다. 자속밀도는 20kVA와 1MVA 전력용 변압기 각각 20%, 5.2%의 오차를 가졌고, 2차전압은 4.7%, 3%, 2차전류는 두 사양 모두 0.9%의 오차를 가졌다.

<표 2> 용량별 설계 값과 해석 값 비교

분류	20kVA		1MVA	
	설계	해석	설계	해석
자속밀도 [T]	1.58	1.25	1.73	1.64
2차 전압 [kV]	0.21	0.2	1.65	1.6
2차 전류 [A]	3.03	3	303.03	300

3. 결 론

본 논문에서는 다양한 사양의 전력용 변압기의 기초 설계를 위해 장하분배법을 이용하여 철심, 창, 권선 등의 기본 형상 치수를 설계할 수 있는 프로그램을 제작하였다. 설계된 두 개의 20kVA, 1MVA 전력용 변압기 모델을 유효요소법을 이용해 자기적 특성을 해석하였고, 기초 설계 계산값과 비교·검증하였다.

향후 전력용 변압기의 설계시 장하분배법을 이용한 기초 설계 프로그램으로 기본 형상 치수를 결정하고, 유효요소해석을 통해 얻은 전력손실을 바탕으로 전력용 변압기의 온도분포 예측을 활용하고자 한다.

[참 고 문 헌]

[1] Toshitaro Takeuchi, "전기설계학", 동일출판사, 1979.
 [2] J. A. Rojas, and J. R. Varela, "Numeric Simulation of the Magnetic Flux in a Power Transformer", Transmission & Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES, pp.1-6, Aug 2006.
 [3] S. J. Salon, "Finite Element analysis of electrical machines", Kluwer Academic Publishers, 1995.
 [4] 任達鎬, "電氣系的 有限要素法", 東明社, 1986.
 [5] John. J. Winders. Jr., "Power Transformers principles and applications", Marcel Dekker Inc, 2002.
 [6] H. Wang, "Finite Element Analysis of Internal Winding Faults in Distribution Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, pp.422-428, Vol. 16. No. 3, Jul 2001.

본 연구는 산업 자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2007-2-060)주관으로 수행된 과제임