2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2009. 7. 14 - 17

유한요소법을 이용한 배전용 몰드변압기 온도상승 예측

이정근*, 김지호*, 이향범*
숭실대학교 전기공학과*

Temperature Rise Prediction of Distribution Mold Transformer using Finite Element Method

Jeong-Keun Lee*, Ji-Ho Kim*, Hyang-Beom Lee*
Department of Electrical Engineering, Soong-Sil University*

Abstract - 본 논문에서는 2[MVA]급 배전용 몰드변압기의 온도분포를 유한요소해석을 통하여 수행하였다. 몰드변압기의 온도상승한도와 허용최고온도를 전자기적 열원에 대한 분석을 통하여 계산하고 그 계산된 열원을 바탕으로 열적 해석의 열원으로 사용하여 계산하였다. 일반적으로 변압기의 수명은 내부의 전반적인 열적 특성보다는 특정 부위의 온도 분포에 의해 결정되며, 특히 변압기 내부 최고점의 온도(hot spot temperature)값이 허용치 이상으로 상승할 경우 절연내력의 저하로 인해 변압기의 수명은 급격히 감소한다. 이러한 수명개선을 위해 몰드 변압기의 철심과 고압·저압권선의 Joule's loss을 계산하여 열원을 계산하였고, 그 결과를 토대로 배전용 몰드변압기의 철심과 고압·저압권선의 온도상승 분포와 최고점의 온도분포를 예측하였다.

1. 서 론

최근 전력설비의 고압화 및 설비의 소형, 경량화가 요구되는데 이로 인해 권선의 단위 체적당 열발생률은 증가하고 있어, 냉각 설계 및 온도 특성 파악에 있어서 보다 세밀하고 정밀한 정보를 요구하고 있다. 이에 따라 배전용 몰드변압기 또한 효율의 증가와 동시에 크기와 무게가 감소하고 있는 추세이다. 이러한 배전용 몰드변압기의 개발은 변압기 효율 향상으로 인한 수요자의 직접 경제효과 이외에 제품의 신뢰성 확보 측면이 매우 중요하다.

일반적으로 변압기의 수명은 내부의 전반적인 열적 특성보다는 특정 부위의 온도 분포에 의해 결정되며, 특히 변압기 내부 최고점의 온도(hot spot temperature)값이 허용치 이상으로 상승할 경우 절연내력의 저하로 인해 변압기의 수명은 급격히 감소한다. 이를 예측하기 위해서 몰드변압기의 구조적인 측면으로 인한 온도상승 분포를 예측한다.

본 논문에서는 단순화한 2차원 배전용 몰드변압기 모델에 유한요소법을 이용한 수치 해석하였으며, 변압기의 도체의 발생되는 각 권선과 철심의 열원을 Joule's loss로 계산하였다. 계산된 열원으로 배전용 몰드변압기 철심과 각 권선의 최고점 온도(hot spot temperature) 분포예측과 열적 특성을 파악하고자 상용 CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램을 이용하여 변압기 내부의 온도상승 분포와 최고점 온도 분포를 예측하였다.

2. 본 론

2.1 변압기 온도상승

변압기를 운전하면 무부하손이나 부하손에 의하여 철심 및 권선이 발열하게 된다. 이때 발생하는 열은 유입변압기의 경우에는 절연유를, 건식인 몰드변압기는 대기 중의 공기를 매개체로 하며 방사, 대류 등에 의해서 외기 중에 방열하게 되며 발열량이 방열량보다도 큰 동안은 온도가 상승하지만 양자가 평형을 유지하게 되면 온도는 일정하게 유지된다. 이때 외기 온도와 변압기 온도와의 차이를 변압기의 온도상승이라고 한다. 이러한 한도는 각 규격에 정하고 있으며 정격에서 규격이 정하는 온도상은 한도를 벗어나서는 안된다. 따라서 유입 변압기의 경우는 규격이 정하는 절연유 및 권선의 온도상승을, 건식인 몰드 변압기는 권선의 온도 상승 한도를 우선 고려하여 제작 검토되어야 한다.

변압기의 온도상승이란 변압기 각 부분의 측정 온도와 기준 냉매 온도와의 차이를 일컫는다. 기준 냉매 온도는 변압기 주위의 냉각모체, 즉 등가 주위 온도를 말하며 변압기의 온도상승을 측정할 때의 기준이 되는 냉매 온도를 기준 냉매 온도라 한다.

변압기의 온도상승은 각 규격에 의해 규정하고 있으며 이의 한도 내에서 사용하여야 한다. 온도 상승의 한도는 변압기에 사용하고 있는 절연물에 허용되는 최고 온도에 의해 결정되는데 정격 용량에서 계속 운전하는 경우, 약 30년 정도의 수명을 기대할 수 있는 것을 전제로 하여 정하고 있다.

몰드 변압기(F종)의 경우는 IEC 726기준에 의거하여 권선의 온도 상승 한도를 100[℃] 로 규정하고 있으나 실제로 온도계에 표시되는 온도(권선온도)는 주위 온도가 가산된 것이다. 즉, 주위온도가 20[℃] 일 경우 몰드변압기의 권선온도계가 지시할 수 있는 최고 허용온도는 다음과 같다.[1]

권선의 최고 허용온도 = 주위온도 + 온도상승 한도
(몰드변압기 - F종) = 20[℃] + 100[℃] = 120[℃]

2.2. 변압기의 손실해석

변압기의 구성 요소로서는 철심의 재료인 규소강판(Silicone-Iron), 절연물인 에폭시(Epoxy) 수지와 권선재료인 구리(Copper)등으로 되어 있다.

변압기 운전시 권선에는 전류가 흐르게 되고 Joule's loss에 의한 열이 발생하게 된다. 이때 발생된 열은 권선분위와 절연물의 온도를 높이게 되면, 온도가 높아질수록 절연물의 열화는 가속화되어 변압기의 수명은 짧아지게 된다. 일반적으로 변압기의 수명은 내부의 전반적인 열적 특성보다는 특정 부위의 온도 값에 의해 결정되며, 특히 최고점의 온도(hot spot temperature) 값이 허용치 이상으로 상승할 경우 절연 내력의 저하로 인해 변압기의 수명은 급격히 감소한다. 이 때 각 재질의 물성치를 해당 영역에 부여하였으며, 계산된 권선과 철심의 열량을 열원(Heat source)으로 입력하였다. 고압·저압권선 및 철심의 열원은 다음 식 (1), (2) 와 같이 계산하였다.

먼저 고압권선의 경우 전류는 87.3[A], 권선의 부피는 0.217841[㎥], 저항은 1.1897[Ω]이다.

따라서, 고압권선의 손실은 Joule's loss 법칙에 의해

$$P = I^2 \times R = 9{,}067\,[W] \tag{1}$$

이며, 단위체적당 손실[W/㎥]은 다음과 같다.

$$Heat\ source = \frac{9{,}067\,[W]}{0.217841\,[m^3]} = 39{,}704\,[W/m^3] \tag{2}$$

저압권선의 전류는 4,119[A], 권선의 부피는 0.159412[㎥], 저항은 0.000356[Ω]이다. 따라서 저압권선의 단위체적당 손실은 위 식 (1), (2)의 계산방법에 의해 29,470[W/㎥]이다.

철심의 경우 재료가 되는 규소강판의 재질 특성에서 단위 무게당 0.89[W/kg]의 손실이 발생하며 다음 식 (3)과 같이 철손을 계산할 수 있다.

$$W = k \times G \times w \tag{3}$$

여기서, k : 적층시 발생하는 철심간 공극에 관련된 계수
G : 철심중량 [kg]
w : 단위무게당 손실 [W/kg]

2.3. 변압기 모델 해석

몰드 변압기의 구조는 3상 내철형이며, 냉각방식은 건식 자냉식, 절연물은 에폭시(Epoxy) 수지를 사용하였다. 권선의 배치는 3각 철심에 저압·고압권선이 각 leg에 동심원으로 배치되어 있는 구조되어 있다. 저압권선은 Sheet 권선구조로 에폭시(Epoxy) 수지로 몰딩 되어있으며, 고압권선은 각각 86~90턴의 코일로 감겨진 11개로 구분되어있고 각 코일 주위에 절연물인 에폭시(Epoxy) 수지로 몰딩 되어있다.

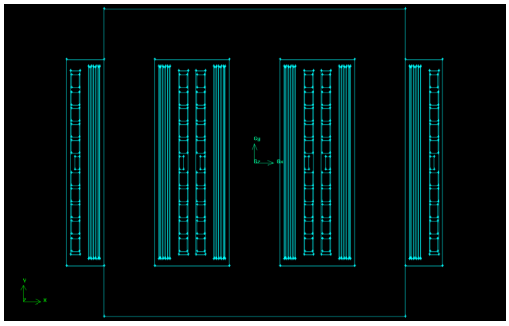
<표 1>은 해석하는 모델 변압기의 정격 사양을 나타내며, 이때 해석하게 되는 몰드 변압기의 해석모델을 단순화하기 위해 다음 <그림 1>과 같이 2차원 모델링으로 나타내었다.

<표 1> 모델 변압기의 정격 사양

항목	모델 변압기
정격용량	2 MVA
1차 정격전압	22.9 kV
2차 정격전압	380/220 V
1차 정격전류	87.3 A
2차 정격전류	4,119 A
상수	3 상
절연종	F 종

해석 모델의 해석은 상용 CFD 프로그램을 이용하여 해석모델의 구성 영역들을 각각의 구성 재료인 철심(규소강판), 저·고압권선, 에폭시(Epoxy) 수지 등에 대해 밀도, 비열, 열전도도 등의 열적 파라미터들을 선정하여 해석하였다. 또한, 해석 모델의 주요 재질에 대한 물질값을 다음 <표 2>에 나타내었다.

Joule's loss로 계산된 권선과 철심에서의 손실은 변압기 내부의 온도 상승을 일으키는 열원으로 변압기의 손실에 따라 각 부분의 온도가 결정된다. 변압기 내부에서 발생한 열원은 대기와 접해있는 본체를 통하여 외부 대기로 방출된다. 해석시 본체 내부의 권선부와 절연물, 덕트, 지지대등을 동시에 해석하는 것이 바람직하나 요소수의 증가, 계산시간 및 수렴성에 큰 영향을 미치기 때문에 해석 모델을 단순화하여 해석한다. 또한 변압기 모델은 실내에 설치되는 것으로 가정으로 태양열에 의한 복사열은 무시한다. 또한 외부 온도는 20[℃]로 설정한다.

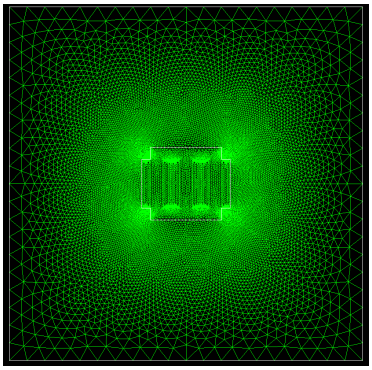


<그림 1> 해석 모델링 - 2차원

<표 2> 주요 재질의 물질값

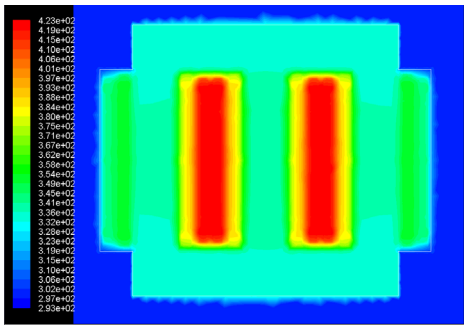
항목	철심	코일	절연물
재질	Silicone-Iron	Copper	Epoxy
밀도[kg/㎥]	7870	8933	1900
비열값[J/kg · K]	447	385	795
열전도도[W/m · K]	80.2	401	0.17

<그림 2>는 유한요소 해석을 위해 CFD 프로그램으로 모델링한 후, 요소분할을 한 그림이며, 이때 변압기의 구조는 철심, 저·고압권선, 에폭시(Epoxy) 수지, 외부 공기층으로 구성하여 해석하였고, 해석시 사면체 요소망을 사용하였으며, 요소망을 구성하는 절점의 수는 18,846개이며, 사면체 요소수는 32,674개다.

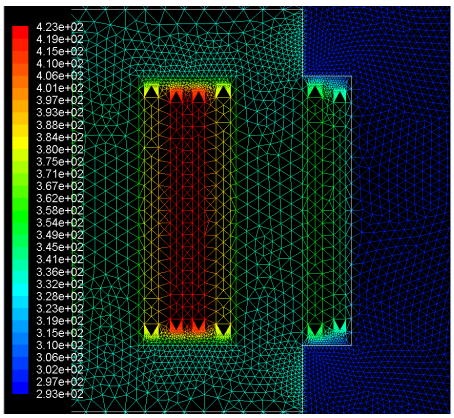


<그림 2> 해석 모델 요소망

<그림 3>은 단순화한 배전용 몰드 변압기 해석 영역에서의 온도분포를 나타내었으며, 저압·고압권선과 철심에서 계산된 손실을 계산하였다. 배전용 몰드변압기 저압·고압권선 영역에서의 온도분포 해석은 <그림 4>에 나타내었다. 철심에서의 온도분포는 약 90~100[℃]로 온도가 상승하였고 고압권선에서의 온도분포는 130~150[℃]이고, 저압권선에의 온도분포는 100~120[℃]이다. <그림 4>에서 보듯이 고압권선에서 온도분포가 집중되는 것을 알 수 있었고, 온도가 가장 높은 최고점 온도(hot spot temperature) 지점이므로 변압기의 수명과 직결된 영역임을 알 수가 있다. 주위온도가 20[℃]임을 감안할 때 온도상승이 약 130[℃]가 되지만 규격에 정한 최고허용온도 155[℃]이내이므로 절연물의 열화에는 영향을 미치지는 않게 되어 변압기의 수명에 큰 영향을 미치지는 않음을 알 수 있다.



<그림 3> 해석 영역에서의 온도분포



<그림 4> 권선 영역에서의 온도분포

3. 결 론

본 논문에서는 배전용 몰드변압기의 온도상승 분포를 해석하기 위하여 수치해석적인 방법을 적용하였다. 특히, 복잡한 변압기 모델을 단순화 시킨 후 해석하였으며, 저압·고압권선과 철심에서의 Joule's loss를 계산하여 전자기적 열원에 대해 분석할 수 있었다.

또한, 열계 해석시 각 권선과 철심의 열원으로 모델의 물질 상수와 모델의 형상을 고려하여 해석하였고, 상용 CFD 프로그램을 이용하여 비교적 정확한 몰드변압기의 온도상승 분포를 예측할 수 있었으며, 그리고 배전용 몰드변압기 설계시 저압·고압권선과 철심의 효율적인 최적설계가 가능하다. 향후, 2차원 모델링에서 생략한 지지물, 덕트 구조 등을 고려한 3차원 모델 해석을 통하여 배전용 몰드변압기의 더 정확한 온도상승 분포를 예측하고자 한다.

[참 고 문 헌]

[1] 에너지설비관리 2007, "변압기 온도상승 및 냉각방식", Pp. 186~191, 2007

[2] 이현진 외 3, "50kVA 몰드변압기 권선부의 열전달 특성해석",Journal of the Korean institute of Illuminating and electronic engineers, Vol. 16, No. 3, Pp.47~54, 2002

[3] 오연호 외 2, "변압기의 3차원 온도분포 해석", Journal of the Korean institute of electrical and electronic engineers, Vol. 52B, No. 9, Pp.434~441, 2003

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(08524) 주관으로 수행된 과제임.