

배전용 주상 몰드변압기의 온도분포 및 열응력 해석

이운용*, 조한구*, 김석수*, 박영두**

*한국전기연구소, **동미전기공업(주)

The temperature distribution and thermal stress analysis of mold transformer for power distribution system

U.Y. LEE, H.G. CHO, S.S. KIM, Y.D. PARK
KERI, DONG MI ELECTRIC IND Co. LTD.

Abstract - In this paper, the temperature distribution and thermal stress analysis of mold transformer for power distribution system is investigated by FEM. Filler type epoxy is applied for good cooling effect in mold transformer.

방열이 어려워지기 때문에 권선의 온도상승을 어떻게 억제하는가가 중요한 문제로 된다. 폭 냉각면적의 감소를 보충하기 위해 발생손실의 저감과 효율적인 냉각구조를 연구할 필요가 있다.

1. 서론

몰드변압기는 유입변압기와는 달리, 난연성이 우수하고 소형화가 가능하며, 또한 최근 예폭시 수지의 발달로 인해 옥외용 몰드변압기로의 적용도 가능해졌다[1]. 일반적으로 사용되고 있는 몰드변압기는 고압코일과 저압코일 사이에 냉각덕트를 만들어 각각 분리되어 있는 구조를 가지고 있지만, 변압기 전체의 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체주형방식의 몰드변압기도 개발되고 있다. 하지만, 일체주형방식의 몰드변압기는 1차권선과 2차권선 사이에서의 방열이 어렵기 때문에 방열면적을 확대하기 위한 효과적인 냉각구조가 필요하다[2].

최근 변압기 최적설계를 위해 수치해석을 이용하여 많은 연구가 되고 있는데, 해석사례로는 전계해석, 자계해석, 전위전동해석, 온도분포 해석, 응력해석 등이 있다. 특히 변압기 운전시 발생하는 열은 절연물의 열화를 초래하여 변압기의 성능저하 및 수명을 단축시키기 때문에, 권선의 온도상승은 허용온도를 넘지 않도록 설계하는 것이 중요하다. 따라서 설계 변압기의 권선온도 상승이 얼마나 되는지, 미리 온도분포 해석을 함에 따라 설계비용 및 설계시간을 감소시킬 수 있다[3].

본 논문에서는 일체주형방식의 몰드변압기를 개발하기 위해 설계모델에 대한 권선온도상승을 열해석 프로그램을 이용하여 해석하고 냉각구조의 개선을 연구하였다. 또한 가속열화시험의 하나인 냉열시험을 모의하여 열응력을 분석하여 열화시 최대열응력 발생위치를 분석하였다.

2. 몰드변압기의 열해석

2.1 몰드변압기의 동형

일반적으로 몰드변압기는 고압권선과 저압권선을 분리하여 예폭시 수지로 몰딩하고 철심을 중심으로 동심배치된다. 고압권선과 저압권선 사이의 갭이 절연 및 냉각용 덕트역할을 하게된다. 하지만 전체적인 크기가 커지게 되어 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체주형방식의 몰드변압기가 개발되고 있다. 그림 1에 기존 방식과 일체주형방식의 권선구조를 나타낸다. 일체주형방식으로 제조할 경우, 1차권선과 2차권선 사이에서의

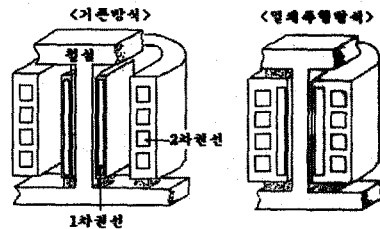


그림 1. 권선구조의 비교

주상용 변압기로는 유입변압기가 주로 사용되고 있으나, 국외에서는 옥외용 예폭시 수지를 개발하여 몰드변압기도 쓰이고 있다. 주상용 유입변압기의 절연종류는 일반적으로 A종으로 온도상승 한도는 50~60deg이며 허용최고온도는 105℃이다. 주상용 몰드변압기의 경우 절연종류로 B, F, H종이 제조되고 있으며 F종의 경우 온도상승한도는 95deg, 허용최고온도는 155℃이다. 냉각방식은 유입변압기는 유입자냉식이며, 몰드변압기는 건식자냉식이 쓰이고 있다[4].

2.2 변압기의 열전달 이론[5]

변압기의 수명을 오래 유지하기 위해서는 코일을 허용온도 이상으로 하지 않는 것이 중요하다. 온도상승은 정확하게 설계치수에서 알아내기 힘들므로 온도상승 시험이 중요하다. 또 일정의 손실에 대해 온도상승을 제한하여 출력을 증가시키려면 냉각방식을 잘 고려해야 한다.

열전달에는 전도, 방사, 대류의 세가지가 있다.

1) 전도 : 전도에 의한 열의 전달은 온도차에 비례되고 열저항에 역비례된다. 온도차 θ 는 다음식으로 표시된다.

$$\theta = \frac{l}{\lambda A} W [^{\circ}C] \quad (1)$$

여기서, λ : 열전달률 [W/m²C]

l : 열이 전달되는 거리 [m]

A : 열이 전달되는 면적 [m²]

W : 통과열 손실 [W]

열전달을 λ 의 크기는 물질에 따라 대단히 큰 차가 있고 동, 알루미늄, 철 등의 금속류는 큰 값이나, 기름, 종이, 프레스보드 등은 금속류에 비해 대단히 작고 공기같은 것은 기름의 1/10이 된다. 규소강판의 경우, 성층절연에 평행한 방향에는 열전도가 좋으나, 이것과 직각의 방향, 즉 성층절연을 지나는 방향의 열전도는 전자의 1/10 정도이다.

2) 방사 : 모든 물질은 그 온도가 주위의 온도보다 높은 경우에는 전자파(적외선)의 형태로 열을 그 주위에 향하여 방사한다. 이 경우 방사를 하는 실효표면적은 그 물체가 어떠한 형이라도 그 표면의 외부 포락면이다.

주위온도가 0~50℃의 범위내에서 온도상승이 75℃ 이하의 경우에는 실효단위 표면적당의 방열량 W_r 은 다음과 같은 근사식으로 나타낸다.

$$W_r = 2.85 \theta^{1.19} E \left(1 + \frac{1.1 \theta_a}{100}\right) [W/m^2] \quad (2)$$

여기서 E : 표면의 비방사율, 흑체의 경우 1이고 일반 페인트 표면에서는 0.9~0.95의 값을 취한다.

θ : 온도상승 [deg] θ_a : 주위의 온도 [℃]

일례로서 주위온도 25℃, 온도상승 50deg의 경우에 대해 계산하면 E=0.95인 경우

$$W_r = 2.85 \times 50^{1.19} \times 0.95 \left(1 + \frac{1.1 \times 25}{100}\right) = 360 [W/m^2] \quad (3)$$

이 되고, 열전달율은 7.2[W/m℃]이다. 또 열방사의 경우에는 공기밀도는 이것에 관계하지 않는다.

3) 대류 : 유체중에 발열고체가 있는 경우, 그 물체표면에 접하고 있는 유체는 열전도에 의해 따뜻하고 비중이 가벼워지므로 온도가 상승함에 따라 주위의 찬 유체가 교류하여 그 표면에 유입한다. 이와같이 하여 유체의 대류가 생기는 것을 잘 알고 있다.

유체가 공기의 경우, 자연대류에 의해 방열량과 온도상승과의 관계는 근사적으로 다음 식으로 표시된다.

$$W_c = 2.42 \theta^{1.25} [W/m^2] \quad (4)$$

여기서 W_c : 대류에 의한 방열량 [W/m²]

θ : 온도상승 [deg]

일례로서 온도상승 50deg의 경우 방열량을 계산하면

$$W_c = 2.42 \times 50^{1.25} = 320 [W/m^2] \quad (5)$$

이다. 즉 열전도율은 6.4이다. 식(4)는 표준공기밀도의 경우에 성립되는 관계이고, 밀도가 낮으면 방열량은 감소한다. 동일온도상승에 대한 방열량은 거의 공기의 밀도의 평방근에 비례하여 변한다고 생각하면 된다. 또 방열관이 밀접하게 여러개 배치된 경우와 같이 공기의 유동이 좋지않은 경우에는 방열량은 식(4)의 값의 80% 정도까지 저하한다.

2.3 몰드변압기의 온도분포 해석

본 논문에서는 MSC/Nastran for Windows를 사용하여 개발 몰드변압기의 온도분포를 해석하였다. 해석순서를 그림 2와 같다.

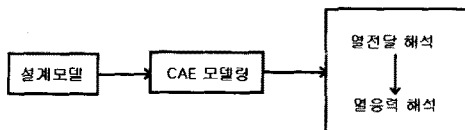


그림 2. 해석절차

위와같은 CAE의 적용은 설계변경과 설계대환의 타당성을 검증에 소요되는 시간을 획기적으로 단축할 수 있

어서 많은 업체와 연구기관에서 많이 시도되고 있으며, 이는 그림 3과 같은 기존의 방식에 비해서 확실한 장점이 있다.

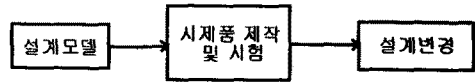


그림 3. 해석장점

본 논문에서는 일체주형방식으로 제조된 1차 proto type과 2차 proto type에 대한 온도분포를 해석하였다. 각 모델은 외형이며 권철심 구조이며, 1차 proto type은 주절연을 unfiller type의 에폭시로 채운 것이며, 2차 proto type은 방열면적을 확대시키기 위해 unfiller type보다 열전도율이 좋은 filler type의 에폭시로 외부를 채웠다. 전자를 model 1, 후자를 model 2-1으로 해석하였으며, 또한 2차 proto type 주절연 물정부까지 filler type의 에폭시로 채운 model 2-2를 해석하였다.

몰드변압기의 주절연부와 권선구조는 그림 4와같이, 저압코일, 고압코일, Glass fiber, 에폭시 등으로 이루어져 있다. 변압기 전체를 해석하는 데는 무리가 있어, 그림 5와 같이 점선부분만(전체모델의 10%부분)을 모델링하여 해석하였다.

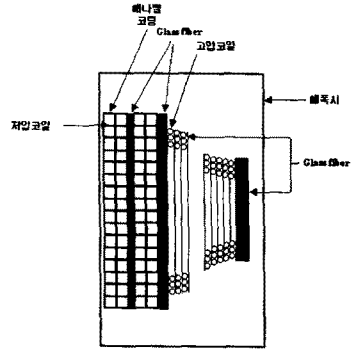


그림 4. 몰드변압기의 구조

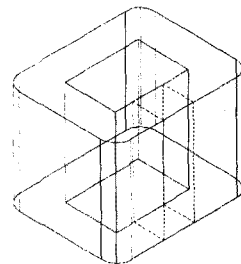


그림 5. 열해석 모델링 부분

각 재료들의 물성값은 열전도율, 열팽창계수, 비열 등의 열파라미터들과 열응력해석을 위한 탄성계수, 프라송비 등의 기계적 파라미터들을 설정하였다. 해석방법은 저압코일과 고압코일 각각의 방열량을 지정하고 주위표면온도를 변압기 최고주위온도 40℃로 가정하였다. 해석결과를 보면 그림 6과 같이 Model 1은 hot spot 온도가 185.4℃, 온도상승값은 145.4deg로 나왔다. 또한 Model 2-1은 hot spot 온도가 236℃, 온도상승값이

196deg, Model 2-2는 hot spot 온도가 131.1, 온도상승값이 91.1 deg로 나왔다. 표 1에 그 결과를 정리하였다.



(a)



(b) 온도분포 결과

그림 6. Model 1의 온도분포 해석결과

표 1. 각 모델들의 해석내용 정리

모델	Hot spot temp. (°C)	온도상승값 (°C)	허용온도상승값(°C)	95
Model 1	185.4	145.4	부적합	
Model 2-1	236	196	부적합	
Model 2-2	131.1	91.1	적합	

위 해석결과는 신뢰성을 얻기위해 실제 몰드변압기의 온도상승시험을 통해 얻어진 데이터 값과 비교하여야 하지만 위 결과로 볼 때, Model 2-2 즉, 주절연 몰딩부까지 filler type의 에폭시로 채운 것이 온도상승값이 가장 낮았다. 따라서 이 방법이 방열개선 방법으로 고려될 수 있으며, 다른 방법으로는 권선구조의 변화에 따른 발생손실을 저감하는 것이다.

2.4 몰드변압기의 열응력 해석

일차권선과 2차권선이 일체로 몰드몸에 따라 수지에 발생하는 열응력이 증대될 것으로 예상된다. 일반적으로 몰드변압기의 내크랙성을 검증하기 위해 냉열시험(heat cycle test)을 시행한다. 본 논문에서는 시험시간에 따른 열응력 분포를 분석하기 이전에 먼저 실온에서의 열응력분포를 해석하였다. 시험시간에 따른 열응력 분포는 차후 연구보고할 예정이다.

앞에서의 온도분포 결과를 바탕으로 열응력을 해석한 결과, 그림 7과 같이 Von Mises Stress가 집중되는 곳

은 유리섬유와 다른 물질들의 계면에서 발생하였으며, 이리인해 이 부분에서 내부크랙이 발생할 것으로 생각된다.



그림 7. 열응력 분포도

3. 결 론

소형화 및 저손실화를 목적으로한 일체주형방식의 몰드변압기를 수치해석을 통해 열해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Model 1, Model 2-1의 경우는 온도상승값이 145.4, 196°C로 허용온도상승값을 벗어나 부적합한 것으로 판단되었다.
2. Model 2-2의 경우, 즉 주절연 몰딩부를 filler type의 에폭시로 설정한 경우는 온도상승값이 91.1°C로 적합한 것으로 결과가 나왔다. 이는 unfiller type의 에폭시보다 filler type의 에폭시가 열전도율이 보다 우수하기 때문인 것으로 생각된다.

위 결과로 볼 때, 일체주형 방식의 몰드변압기의 권선의 온도상승을 막는 방법은 주절연 몰딩부를 filler type 에폭시로 교체하면 개선될 것으로 생각되며, 앞으로는 열해석을 통해 얻어진 데이터와 실제 온도측정을 통해 얻어진 데이터를 비교하여 보다 정확한 온도상승을 검토할 예정이며, 또한 시험시간에 따른 열응력 분포를 검토하기 위해 냉열시험을 모의할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Takashi Hasegawa, "Application Technology of Molded Products in the Field", Takaoka Review, Vol.43, No.4, 1996
- [2] 前田孝夫, "일체주형방식에 따른 몰드변압기", 일본전기학회 동년연구회, SA-91-70
- [3] Linden W. Pierce, "Specifying and Loading Cast-Resin Transformers", IEEE Trans. Industry Appl., Vol.29, No.3, May/June 1993
- [4] 일본공업표준조사회, "배전용 6kV 몰드변압기", JIS 4306
- [5] 박민호, "유도기기", 동명사, 1977