

몰드변압기용 절연재료의 열적 수명진단을 위한 평가법 연구

정재원*, 박흥태, 오일성, 서정민
LG산전 전력연구소

A Study on the Evaluation Method for Thermal Lifetime Diagnosis of Insulating Material for Mold Transformer

Jae-Weon Cheong*, Hong-Tae Park, Il-Sung Oh, Jung-Min Seo
LG Industrial Systems Electrotechnology R & D Center

Abstract - In this study, we were developed to provide a method for evaluating insulation systems for mold transformers with high-voltage ratings greater than 600V, in order to establish a uniform method for determining the temperature classification of mold transformer insulation system by testing rather than by chemical composition. Since these procedures are considered to be new, and have been tested exhaustively, further testing may prove the need for future revisions.

1. 서론

에폭시와 같은 유기고분자 절연재료는 우수한 절연성을 가지고 있기 때문에 전력계통에 사용되는 전력기기의 절연재료로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 사용시간이 경과함에 따라 기기를 구성하고 있는 재료의 특성 변화로 인하여 기기의 절연성능이 저하하여 절연사고를 유발시키므로 안정적인 기기의 성능을 유지하기 위해서는 열화진단에 관한 연구가 필수적이다. 전력기에 사용되는 절연시스템에 있어 가장 기본적인 열화요인으로는 온도와 시간으로, 이들 사이에 존재하는 선형관계는 화학반응율법칙(chemical reaction rate law)을 기초로 한 Arrhenius모델로 나타낼 수 있다. 이 모델은 정상적인 운전스트레스하에서 절연시스템의 온도범위를 추정하기 위해 사용되는 모델로 일정한 열적 스트레스하에서 절연시스템을 가속열화시켜 절연과파시험과 같은 특성시험을 통해 각 온도레벨에서 고장시간(time to failure)을 측정 한 후, 외삽법을 적용하여 실제 운전상태에서의 온도레벨을 결정하는 방법이다. 그러나 이 방법은 범용적으로 인정될 수 있는 절연시스템의 부족으로 현재로서는 Arrhenius모델을 적용하여 열적 스트레스하에서 전력기 기용 절연시스템의 열적 수명을 진단하는 것은 거의 불가능한 것으로 알려져 있다. 그러므로 본 연구에서는 전력계통에서 몰드변압기(Mold Transformer)의 절연재료

로 가장 널리 사용되고 있는 에폭시수지의 열적 수명을 진단하기 위한 평가방법에 관한 것으로 600V이상의 고전압에 사용되는 절연시스템의 온도범위 선정 및 열적 열화평가에 필요한 시험방법을 제공하고자 한다.

2. 시험절차

2-1. Arrhenius모델^[1]

Arrhenius모델은 일정한 온도하에서 시간에 따른 절연특성이 절연시스템내의 열분해와 같은 화학반응에 의존한다는 것을 가정으로 한 모델이다. 그러므로 열적 열화율은 화학반응율과 동일한 것으로 표현하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L = Ae^{b/T} \tag{1}$$

여기서, L은 고장시간, A는 수명(lifetime)을 나타내는 직선상에서 y축 절편, b는 기울기 즉, 고장시간을 나타내는 온도에서의 화학반응율 속도 그리고 T는 절대온도를 나타낸다. 열적 열화실험을 통해 A와 b가 결정되면, 식 (1)은 회귀분석법(식 2)을 사용하여 기울기가 b인 선형그래프로 나타난다.

$$T_1 = \frac{b}{\ln\left(\frac{L_1}{L_2}\right) + \ln\left(\frac{b}{T_2}\right)} \tag{2}$$

여기서, T₁은 L₁(≥40,000시간)의 고장시간이 나타날 때의 온도한계, ln은 자연대수 그리고 L₂는 시험온도 T₂에서 고장시간의 평균값을 나타낸다. 그리고 L₂는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_2 = \frac{(L_{2(1)} + L_{2(2)} + L_{2(3)} + \dots + L_{2(n)})}{n} \tag{3}$$

여기서, n은 온도 T₂에서의 샘플수를 나타낸다.

2-2. 시험모델

산업적으로 사용되고 있는 몰드변압기의 절연시스템 코

일을 시험샘플로 사용하는 경우, 시험에 많은 비용과 제조시간이 소요되기 때문에 이를 단순화해서 사용할 필요가 있다. 그림 1은 본 연구를 통해 고안된 시험샘플을 나타내고 있다. 이 시험용 샘플은 시험에 소요되는 비용이 적고, 절연시스템에 대한 평가자료가 없는 경우에 경제적인 열화시험이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 변압기의 절연수명에 대한 열적 열화의 영향을 정확하게 파악하기 위해서 시험용 샘플로 사용되는 코일형상은 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

- 열적 열화에 의해 변압기 권선의 전기적 성능을 저하시킬 수 있는 입계 절연시스템
- 열적 열화과정 후, 권선 절연시스템의 기능적 수명을 결정하기 위해 임펄스 또는 저주파에서 실제적인 전압스트레스의 모의가 가능

이 모델을 사용하여 열적 열화시험을 하는 경우 12개의 시험용 샘플과 하나의 제어용 샘플이 필요하며, 온도조건은 세가지의 다른 조건에서 실험을 행한다.

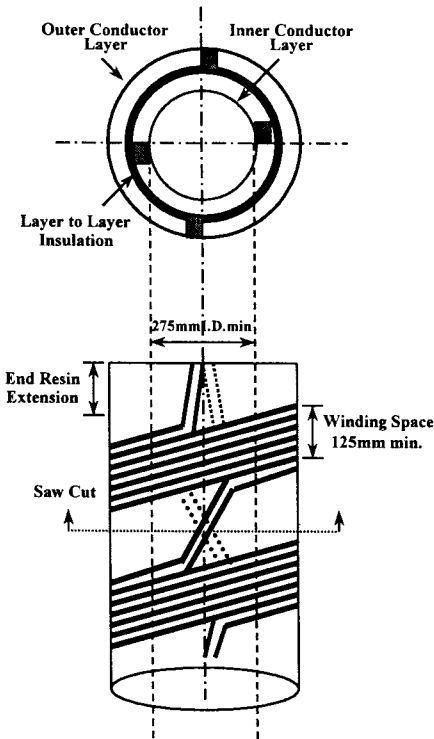


그림 1. 시험용 샘플의 코일형상

2-3. 스크리닝(Screening)

모든 시료는 열적 스트레스에 노출시키기 전 그리고 습윤챔버(humidification chamber)에서 꺼낸 후 2시간 이

내에 절연 스크리닝시험을 실시해야 한다. 그러나 초기 스크리닝은 절연 스크리닝시험 전에 냉각충격 및 습기에 노출시켜야 한다.

3-4. 시험사이클(Test Cycles)^[2]

초기 스크리닝 실험에 따라 반복적으로 실시하며, 각 사이클은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- 열적 열화
- 냉각충격(cold shock)
- 습윤(humidification)
- 습기가 존재하는 상태에서의 절연시험

최초 사이클에서 주어진 온도에 도달하면 (b)-(d)까지 전체 스크리닝 실험을 사이클당 3회 실시한다.

2-5. 열적 열화^[3]

시험모델의 열적 열화는 오븐(Oven), 시험샘플의 권선내의 전류를 순환시키는 방법 또는 이들을 조합한 방법을 사용하여 원하는 온도를 설정한다. 본 연구에서 제시된 시험모델의 경우 오븐을 사용하는 것이 일반적이다.

2-5-1. 오븐에 의한 열화

시험모델의 열적 열화는 적정한 온도하에서 안정화된 오븐내에서 그룹별로 이루어진다. 오븐내에는 하나의 제어용 샘플에 열전대(thermocouple)를 장착하여 오븐내의 모든 시험샘플의 온도를 결정하는데 사용된다. 오븐내부의 온도분포는 균일해야 하며, 모니터는 ASTM D-5374에 따르는 것을 기본으로 한다. 온도가 300℃ 이상인 경우 ±3℃, 이하인 경우 ±2℃로 관리해야 하고, 열화사이클은 제어용 샘플이 설정된 열화온도에 도달했을 때 시작하고, 완료는 그 시간이 지나고 제어용 샘플의 온도가 열화온도 보다 3℃이하인 시점에서 완료한다.

2-5-2. 열화온도와 열화사이클

열화방법에 관계없이, 표 1과 같은 온도 및 시간에서 열적 열화실험을 행한다. 표 1과 같은 온도와 시간으로 모든 절연시스템에서 동일한 입계점을 기대할 수 없지만, 몰드변압기에 사용되는 절연시스템의 경우 온도와 시간에 대한 기본적인 실험방법을 제공할 수 있다. 시험온도의 상한치는 규정되어 있지 않으나 과도하게 온도를 상승시키면 원하는 열적 수명곡선을 얻을 수 없으므로 가

능한 최소온도로 유지한다. 만약, 7사이클 후 절연파괴가 발생하지 않는 경우 주어진 열화사이클 시간을 2배 이상으로 연장한다. 열화사이클에 사용되는 평균온도가 주기적으로 기록하고, 각 온도사이클에서 온도와 시간은 5-10사이클로 선정한다. 각 샘플이 다른 온도에서 시험 시 각 그룹간의 시험사이클 시간은 동일한 파괴횟수가 되도록 적절히 선정한다.

표 1. 열화온도 및 시간

| 시험시간 | | | 시험온도(°C) | | | | | |
|------|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| - | 표준 | + | 105 | 130 | 150 | 185 | 220 | 250 |
| 150 | 300 | 600 | 135 | 165 | 195 | 225 | 275 | 310 |
| 50 | 100 | 200 | 150 | 180 | 215 | 245 | 300 | 340 |
| 18 | 35 | 70 | 165 | 200 | 235 | 270 | 325 | 375 |

2-6. 냉각충격(Cold Shock)

열적 열화 후, 시험샘플을 상온으로 냉각한 다음 적절한 용기속에서 -30°C로 될 때까지 보관한 후 다시 상온으로 승온한 다음 습윤사이클을 준비한다. 시험모델의 경우 열전대에 의해 측정된 제어용 샘플의 온도는 시험모델로 사용된 12개 시험모델내의 온도를 결정하기 위해 사용된다. 그러므로 제어용 샘플은 시험모델로 동일한 조건하에서 계속적으로 시험모델내의 온도를 모니터링해야 한다.

2-7. 습도조절(Humidity Conditioning)^[4]

시험용 샘플이 완전히 냉각된 후, 다음과 같은 조건에서 습기에 노출시킨다.

- 습윤에 앞서 샘플의 온도는 상온에 도달해야 한다.
- 습기노출시간은 최소 48시간이다.
- 시험모델은 상대습도(relative humidity)가 90%이상으로 유지되어야 한다.
- 내부온도는 25~40°C로 일정하게 유지해야 한다.

2-8. 절연시험^{[5][6]}

절연시험은 시험용 샘플을 습윤챔버에서 꺼낸 후 2시간 이내에 실시해야 하고, 그 시험항목은 다음과 같다.

- Turn-to-Turn Insulation
- Winding-to-Winding/Winding-to-Ground
- Layer-to-Layer Insulation

초기성능, 스크리닝 및 주기적인 입계시험이 60Hz에서 행해질 때, 시험전압은 반드시 정현파를 사용해야 한다.

스크리닝과 주기적 입계시험의 전압은 2초의 지연시간을 가지고 인가시켜야 한다. 시험은 500VA 또는 출력파형이 교류인 대형 변압기를 사용해야 한다. 작은 용량의 변압기는 직접 또는 PT 및 용량성 분압기를 사용하여 시험용 변압기의 출력을 측정할 수 있는 경우에만 사용할 수 있다. 시험전압은 최종적으로 인가되는 전압의 1/4 또는 그 이하에서 시작하여 15초내에 최종적인 시험전압에 도달해야 한다. 시험을 완료하는 시점에서의 전압은 최종 시험전압의 1/4 또는 그 이하로 내려야 한다. 특정전압의 10% 또는 그 이하의 전압에서 설정된 갭(gap)은 60Hz동안에 연결될 수 있다. 시험용 샘플의 임펄스전압은 상업용 변압기의 권선설계시에 사용되는 최대임펄스의 75%(정극성 1.2×50us)의 충격전압에 견디어야 한다.

3. 결론

몰드변압기용 절연시스템의 열적 수명진단을 위한 평가 방법에 관한 연구를 통해 상용제품을 대표할 수 있는 시험용 샘플의 설계법과 절연시스템의 온도범위를 선정할 수 있는 시험방법을 제시하였으며, 이는 몰드변압기용 절연시스템 외에 600V이상의 고압에 사용되는 절연시스템 및 Resin-Encapsulated Power의 열적 수명진단을 위한 평가방법으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Guide for the Statistical Analysis Thermal Life Test Data, IEEE Std-1987
- [2] IEEE Standard Test Code for Dry-type Distribution and Power Transformers, IEEE C57.12.91-1995
- [3] IEEE Standard General Principles for Temperature Limits in the Rating of Electric Equipment and for the Evaluation of Electrical Insulation, IEEE Std-1986
- [4] Practice for Monitoring Consistent Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions, ASTM E104-1985
- [5] IEEE Standard Techniques for High Voltage Testing (ANSI), IEEE Std-1995
- [6] IEEE Guide for Conducting a Transient Voltage Analysis of Dry-type Transformer, IEEE C57.12.58-1991