

표면온도분포 분석을 이용한 몰드 변압기 진단

임용배, 천종철
한국전기안전공사

Diagnosis of Cast Resin Transformer Using Analysis of Surface Temperature Distribution

Lim Yong-Bae and Chun Jong-Chul
KESCO

Abstract

All objects with some temperature above absolute zero radiate in the infrared. The intensity of the infrared radiated from a object depends on the condition and temperature on the surface of the one. The present, these techniques are frequently adopted into diagnosis for electricity equipments. Simply, however, the applied techniques are passive thermal testing for the detection of loosened terminals and overcurrent. In this paper, a infrared thermal imager was applied to high voltage windings of cast resin transformers, and the accumulated value of the result temperatures was used for evaluating remained lifetime of them. At each aging level, dielectric loss tangent test was carried out. The results offered capabilities for deciding the condition of the transformers suffering difficulties to diagnose.

Key Words : Infrared, Thermal image, Cast resin transformer, Deterioration, Dielectric loss tangent

1. 서 론

William Herschel이 적외선 복사 스펙트럼의 존재를 밝힌 이후^[1], 적외선을 이용한 많은 열관련 기술들이 개발되어 왔다. 그 중에서도 온도 계측 분야는, 2차 세계대전을 겪으며, 적외선을 이용한 온도 분포 계측 기술 활용의 유용성과 잠재력이 증명되었고, 적외선 열화상기 개발에 대한 연구에 활력이 되었다^[2]. 따라서 초기에 적외선 열화상기의 적용은 군사 분야에 집중되었다. 그러나 1966년 최초의 상용화된 제품이 탄생되고, 1980년대대의 초점면 배열(focal plane array ; FPA) 검출 소자의 개발과 1990년대 중반 비냉각식 마이크로볼로미터 검출기(microbolometric detector)의 개발로 열화상기가 민간의 진단 장비로 자리잡게 되었다.

적외선 열화상기는, 결함 발생 시 일반적으로 온도 상승을 수반하는 전력설비의 진단에서, 원거리에서도 온도 분포 정보를 쉽게 얻을 수 있다는 장점 때문에 많이 사용되고 있다. 그러나 현재 이들 분야의 적용은 단순한 온도 분포의 확인을 통

한 단자 이완이나, 접촉 및 접속 불량과 과전류에 의한 발열 등에 대한 확인에 치중될 뿐 정량적 분석에 활용되고 있지 않다. 이유는 대상체의 표면 상태와 주위 환경에 따라 왜곡된 정보를 보여주기 때문에 정량적으로 나타내는데는 한계가 있기 때문이다.

몰드 변압기를 비롯한 전력설비의 절연 성능은 최고점 온도(hot spot)에 따라 지수적으로 감소한다^[3]. 그러나 실험 중 관리할 수 있는 온도 측정의 공간적 한계로 열화상기를 이용하지 않고는 특정 지점의 측정된 온도에만 의존하게 된다. 결국 불확실성이 항상 내재되게 된다.

본 연구에서는 기존에 정성적 분석에 의존하던 적외선 열화상을 몰드 변압기 고압 권선의 열열화 실험에 활용하여, 몰드 변압기의 누적 온도에 따른 잔여 수명 평가에 활용하여 보았다. 그리고 각 열화 단계마다 유전정접 시험을 병행하여, 몰드 변압기 잔여 수명과 유전정접 등의 상대 평가 인수를 확보함으로써 몰드 변압기 상태 진단에 활용하고

자 하였다. 또한 열화 실험 과정에서 얻어진 층간 단락된 몰드 변압기 시료와 건전 시료와의 열화상 비교를 통해 적외선 열화상을 활용한 원격 감시의 활용성을 확인하여 보았다.

2. 실험

2.1 실험 개요

몰드 변압기의 주된 열화 인수는 온도와 시간이다. 그러나 주요 열화 인수가 온도와 시간일지라도 이들 절연 체계의 고장은 내전압 또는 부분 방전이나 유전점점의 변화로 추정한다.

이는 열화의 주된 요인이 열입에도 불구하고 절연 시스템은 절연 파괴에 의해 수명이 끝나기 때문이다. 전력용 몰드 변압기는 고전압 환경 속에서 사용된다. 즉 수전 전압이 22,900V일 경우에는 최소한 이에 대한 절연 내력이 있어야 한다.

또 다른 이유는 정보의 유추 가능성 문제이다. 변압기 절연 열화의 1차적 원인이 사용 온도에 있다고 할지라도 그 대상 변압기의 온도를 측정할 당시의 온도를 가지고는 변압기의 절연 상태를 알 수 없기 때문이다. 즉 현재의 운전 상태를 알 수 있지만, 얼마만큼의 절연 열화가 진행되었는지는 현재의 온도 정보만으로는 유추할 수 없기 때문이다.

또한 진단자가 측정할 수 있는 측정 범위의 공간적 한계에도 있다. 최고 온도를 임의의 측정점을 통해서 정확히 알 수 없기 때문이다.

따라서 주된 변압기 절연 열화의 원인이 열입에도 불구하고 절연 내력이나 유전점점 등으로 상태를 예측하는 것이다. 온도 측정을 통한 상태 점검은 적외선 열화상기를 이용해 상시 감시할 경우에는 정확한 열화 진행을 추정할 수도 있을 것이다. 하지만 열화상 장비는 고가이며, 표시되는 온도도 절대적인 값을 갖지 못하고 대상체의 표면 상태와 주위 환경에 따라 온도가 다르게 나타난다는 단점이 있다.

2.2 모의 실험

본 연구의 시험 절차에 대한 이론적 기반은 Arrhenius 식인 가속 열화 시간과 온도에 대한 수명 관계식이며, 적용된 식은 다음과 같다.

$$T_R = \frac{b}{\ln\left(\frac{L_R}{L_A}\right) + \left(\frac{b}{T_A}\right)} \quad (1)$$

여기서, T_R 은 기준 온도로 428K이고, T_A 는 열화 시험 온도이다. b 는 절연 체계와 관련된 인수로 여기서는 22,000을 사용하였다. 그리고 L_R 은 기준 온도에서의 수명으로 IEEE PC 57.12.60의 40,000시간을 기준으로 하였으며, L_A 는 시험 온도에서의 수명이다^[3]. 그러나 이 식을 이용하는데 유의하여야 할 사항은, 이렇게 가속 열화 시험에 대한 관계식으로는 적당하나, 상온과 같은 저온으로 운전되는 정상 설비에 대해서는 추정된 수명이 부정확하다는 것이다.

몰드 변압기는 사실상 층간을 제외하고는 구조적으로 독립된 권선을 갖기 때문에 열화가 발생되지 않고, 결과적으로 열화에 대한 고려 대상은 권선 내 층간 절연에 국한시킬 수 있다. 따라서 이번 연구에 고압 권선부를 대상으로 열 가속 열화 실험을 실시하였다.

제작된 몰드 변압기 고압권선 시료는 22,900V용 (3,922turns)으로 제작되었고, 도체는 직경 0.85mm의 동선을 사용하였다. 형상은 그림 1과 같다.

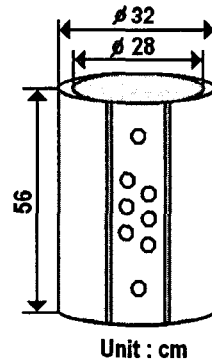


그림 1. 실험 시료의 형상.

Fig. 1. Appearance of specimen.

가열은 외부 환경 온도를 높여 열을 인가하는 방법과 변압기 권선에 과전류를 흐르게 하여 권선에 주울열을 발생시킴으로써 절연체의 온도를 상승시키는 두 가지 방법이 있다.

본 연구에서는 주울열을 이용하여 시료를 가열하였다. 이 방법은 정격 전류보다 높은 전류를 권선에 흐르게 하여 권선에서 발생하는 동손에 의한 열로 절연체를 가열하는 방법이다. 그리고 $\pm 2^\circ\text{C}$ 범위의 일정한 온도 유지는 적외선 열화상기로부터 획득한 최고점 표면 온도를 분석하여 컴퓨터를 통해 이루어졌다(그림 2).

몰드 변압기의 고압 권선은 인덕턴스가 높기 때문에, 60Hz의 교류 전원으로는 고전압 전원이 아니면 원하는 전류까지 흐르게 할 수 없다. 따라서 전압 조정기 2차측에 정류기를 설치하여 직류로 변환한 후 인가하였고, 고압 권선을 탭 부위에서 병렬로 전원을 연결하여 제한된 전원 전압으로 더 넓은 범위의 전류를 제어할 수 있게 하였다. 유전정접($VI \tan \delta$)은 시료의 열화 단계별로 그림 3과 같이 측정하였다.

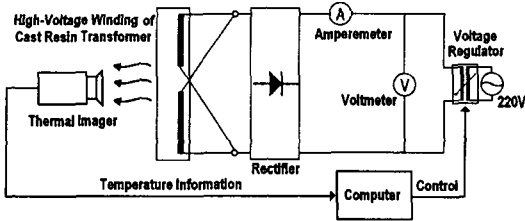


그림 2. 가속 열열화 실험설비 구성도.

Fig. 2. Block diagram of accelerated thermal aging test system.

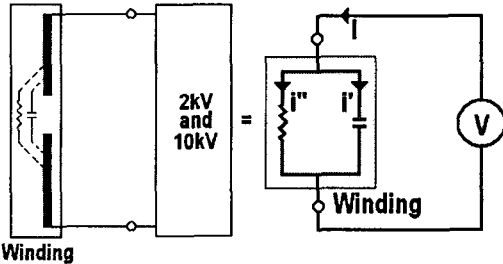


그림 3. 유전정접 측정 회로.

Fig. 3. Circuit for determining dielectric loss tangent.

3. 결과 및 고찰

각 열화 단계별로 측정된 유전정접은 그림 4에 기준 수명으로 환산된 열화 시간에 대한 크기 변화로 표현되었다. 그리고 그림 5는 10kV로 측정된 유전정접과 2kV로 측정된 유전정접 사이의 차를 나타낸 것이다.

열화 단계별로 측정된 유전정접은 가열되지 않은 초기 상태에서는 상대적으로 높은 값을 가졌다. 그러나 열화가 진행됨에 따라 처음에는 값이 저하되다가 기준 온도 환산 시간으로 17,000시간 부근에서 증가하기 시작하였고, 기준 온도에서의 수명

인 40,000시간 부근에서는 급격한 상승이 있었다. 그리고 기준 수명을 초과한 45,000시간에서는 권선에 층간 단락이 발생되었다.

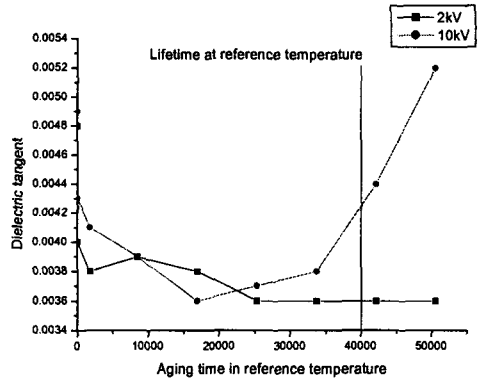


그림 4. 기준 온도에서 열화 시간에 따른 유전정접.

Fig. 4. Dielectric loss tangent versus aging time at reference temperature.

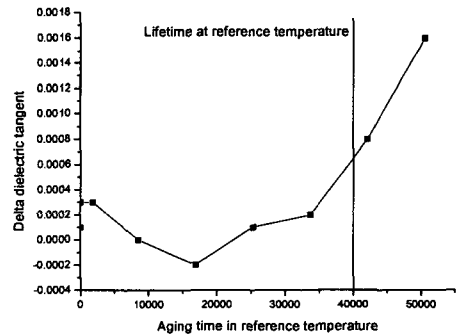


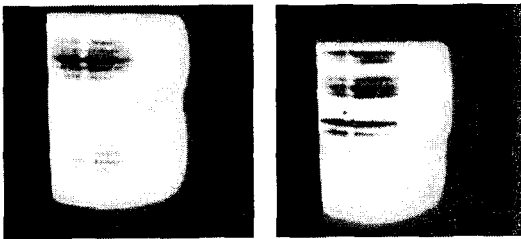
그림 5. 기준 온도에서 열화 시간에 따른 10kV 유전정접과 2kV 유전정접 사이의 차.

Fig. 5. Difference between 10kV and 2kV dielectric loss tangent versus aging time at reference temperature.

10kV로 유전정접 측정 시 실험 과정에서 열화된 절연체 내부에서 부분방전이 발생되어 2kV로 측정된 유전정접과 차이가 발생되었다. 특히 기준 온도의 수명인 40,000시간 부근에서 차이가 급격히 증가하였다.

그림 6은 가속 열열화 시험 시 건전 상태 시료

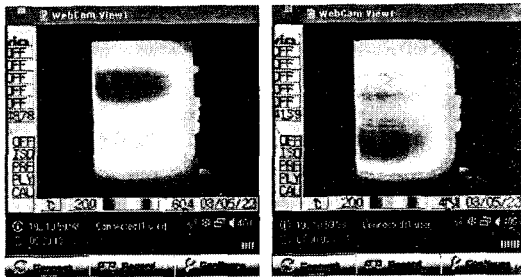
의 열화상과 충전 단락 후 변화된 열화상을 나타낸 것으로 상반부에 충전 단락이 발생된 것을 추정할 수 있다. 그리고, 실험 시 발생한 고장 시료를 Web을 이용해 원격 감시한 결과 열화상은 그림 7과 같다. 그림 7에서 (a), (b)는 각각 건전 시료와 고장 시료에 정격 전류를 인가했을 때의 열화상을 MPEG4로 압축 전송하여 원격지에서 수신한 것이다. 건전 시료는 시료 상반부에 고온이 분포하고, 상반부에 충전 단락이 발생된 고장 시료는 하반부에 고온이 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 몰드 변압기 고장 상태의 시각적 감시가 원격에서도 가능함을 보여주는 것이다.



(a) 건전 상태 (a) Sound state
(b) 고장 상태 (b) Failure state

그림 6. 열화상 비교.

Fig. 6. Comparison between thermal images.



(a) 건전 시료 (a) Sound specimen
(b) 고장 시료 (b) Failure specimen

그림 7. 원격 감시된 열화상.

Fig. 7. Telemonitored thermal images.

기준에 몰드 변압기에 대한 열화 상태 진단은 각 상별 및 1·2차 권선 사이에서만 이루어졌기 때문에, 고압 권선 내에서 발생하는 충전 열화에 대해서는 정확한 진단 결과가 나오지 않았다. 그러나 본 연구에서는 고압 권선 내 탭을 분리한 후

그림 3과 같이 측정하여, 충전에서 진행되는 열화를 분석할 수 있었다.

이번 연구 결과는 제한된 조건, 즉 고압 권선에만 적용된 것으로 실제 완전한 변압기에 대해서는 결과에 대한 신뢰성을 확인하지 못하였다. 하지만 변압기 구조상 각 상별, 1·2차 권선 사이에는 거의 경년 열화가 발생되지 않기 때문에 이에 대한 적극적 검토는 배제하였다. 그러나 현장 적용을 위해서는 반복적인 다양한 현장 실측을 통한 결과의 분석이 필요할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 적외선 열화상을 이용하여, 몰드 변압기에 대한 가속 열열화 시험 시 잔여 수명 예측과 상태 판단에 적용하였다. 그리고 기존 온도로 환산된 수명 단계별 유전정접 측정값으로 몰드 변압기 절연체 열화에 따른 변화 추이를 분석하였으며, 변압기 충전 단락 전에 측정값의 뚜렷한 변화를 확인하였다. 또한 건전 시료와 고장 시료의 열화상을 비교하여 Web을 통한 열화상 원격 감시에 대한 가능성을 확인하였다.

그러나 이들 결과는 실험실에서 몰드 변압기의 고압 권선만을 대상으로 실시하였기 때문에, 현장 적용을 위해서는 현장 실측을 통한 결과의 분석이 선행되어야 할 것이다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Gerald C. Holst, "Common Sense Approach to Thermal Imaging", JCD Publishing, p. 15, 2000.
- [2] Xavier P.V. Maldague, "Nondestructive Testing Handbook-Volume 3, Infrared and Thermal Testing", American Society for Nondestructive Testing, Inc., p. 21~22.
- [3] IEEE, "Draft Guide for Test Procedures for Thermal Evaluation of Insulation Systems for Solid-Cast and Resin-Encapsulated Power and Distribution Transformers", PC57.12.60-1998.