

수직온도분포 분석을 이용한 몰드변압기 권선의 건전성 평가 연구

(A Study on the Integrity Evaluation of the Windings in Cast Resin Transformers Using Vertical Thermal Distribution Analysis)

임용배*

(Young-Bae Lim)

요 약

본 논문은 수직온도분포 분석을 이용한 몰드변압기 권선의 건전성 평가 방법을 제시하고 있다. 이 방법은 건전 시료의 온도 분포와 가속열화시험에 의해 층간 단락된 고장시료의 온도 분포 비교를 통해 얻어진 결과이다. 분석에 활용된 온도분포는 적외선 열화상 시스템에 의해 취득되었고, 가속 열화시험에는 Arrhenius 방정식이 적용되었다. 제안된 방법은 몰드변압기 고장을 검출하는데 유용할 것이다.

Abstract

This paper presents the integrity evaluation method of the windings in cast resin transformers using vertical thermal distribution analysis. The method is the result from comparing the temperature distribution in a sound condition specimen with that in the failure condition specimen layer-shortened by accelerated testing. The temperature distribution was acquired by an infrared thermography system, and the Arrhenius equation was adopted to the accelerated testing. The proposed method may be available to detect the failures in cast resin transformers.

Key Words : Infrared Thermography, Cast Resin Transformer, Arrhenius Equation, Vertical Thermal Distribution

1. 서 론

인구의 도시집중에 따른 공간적 제약과 전기설비에 대한 일반인의 혐오적 인식에 의해 중요 전기설

비들이 지하에 배치되고 있다. 그리고 지하에 대한 환경적 특수성 때문에 몰드변압기의 사용이 점차 증가하고 있다. 이는 몰드변압기가 뇌임펄스에는 취약한 전기적 특성을 가짐에도 불구하고, 절연성능 및 내열성이 우수하고 화재에 대하여 상대적으로 안전하기 때문이다.

그러나 공교롭게도 이런 우수한 절연성능 때문에 절연열화 진단 시 어려움이 발생된다. 고장 직전까지도 기존에 활용해오던 전통적인 진단방법으로는

* 주저자 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구대리
Tel : 031-580-3055, Fax : 031-580-3111

E-mail : dragonboat@empal.com
접수일자 : 2004년 12월 8일
1차심사 : 2004년 12월 10일
심사완료 : 2005년 1월 4일

열화상태를 정확히 알 수 없기 때문이다. 결국 활선 상태에서 절연상태를 확인하는 진단기술은 더욱 열악할 수밖에 없고, 유증가스분석법 등을 활용하는 유입변압기에 비해 상대적으로 분석이 어려운 실정이다.

1966년 최초의 상용화된 적외선 열화상기의 탄생과 1980년대의 초점면 배열(focal plane array) 검출소자의 개발, 1990년대의 비냉각식 마이크로볼로미터 검출기(microbolometric detector)의 출현 등으로 적외선 열화상기의 다양한 활용이 전력설비 진단분야에도 꾸준히 증가하여 왔다[1, 2].

적외선 열화상기는 결합 발생 시 일반적으로 온도 상승을 수반하는 전력설비의 진단에서, 원거리에서도 온도분포 정보를 쉽게 얻을 수 있다는 장점에 많이 사용되고 있다. 특히 몰드변압기와 같이 전기적 현상으로 고장형태 검출이 용이하지 않거나 무정전 진단이 필요할 때에 자주 활용되고 있다.

그러나 이에 대한 활용은 단자 이완이나 접촉 불량 등에 의한 발열의 정성적 분석에 중점을 두었을 뿐, 온도분포의 정량적 분석에 의한 설비상태 판단은 미흡한 실정이었다.

본 연구에서는 Arrhenius 방정식을 활용한 가속 열화실험을 통해 얻어진 고장시료와 초기상태인 건전시료의 온도분포 비교를 통해, 열화상기를 이용한 몰드변압기의 활선진단방법을 모색하였다. 또한 유전정점 측정을 통해 열화상태 비교자료로 활용하였다.

2. 본 문

2.1. 측정대상

몰드변압기는 전기적으로 안정된 절연특성을 갖는다. 특히 구조적으로 완전히 독립된 권선을 갖기 때문에 상간 또는 1, 2차간에는 거의 열화가 발생되지 않는다. 따라서 열화에 대한 고려 대상은 권선 내 층간 절연에 국한시킬 수 있다. 그리고 2차권선의 경우에는 선경이 굵고 턴수가 적기 때문에 상대적으로 1차권선에 비해 고장확률이 적다.

그러므로 본 연구에서는 몰드변압기 전체에 대한

실제 샘플을 활용하지 않고, 그림 1과 같이 고장확률이 가장 높은 고압권선부인 1차권선 시료를 이용한 실험을 실시하였다. 제작된 시료는 22,900[V]용으로, 직경 0.85[mm]의 동선을 3,922회 감은 것이다.

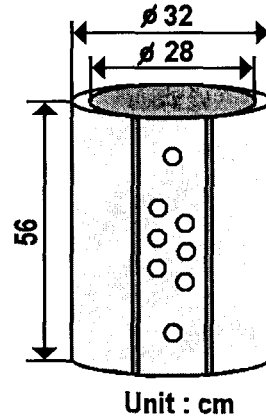


그림 1. 실험시료의 형상
Fig. 1. Appearance of specimen

2.2. 실험

본 열화실험의 절차에 대한 이론적 기반은 Arrhenius 식인 가속열화시간과 온도에 대한 수명 관계식으로 다음과 같다.

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

여기서 T_R 은 기준온도로서 428[K]이고, T_A 는 열화시험 설정온도이다. b 는 절연 체계와 관련된 인수로 본 연구에서는 2.2×10^4 을 사용하였다. 그리고 L_R 은 기준온도에서의 기준수명으로 IEEE Std C 57.12.60의 40,000시간을 기준으로 하였으며, L_A 는 시험온도에서의 추정수명이다[3].

그림 2와 같이 가속열화 시험 시 온도는 적외선 열화상기를 이용하여 최고점 온도 등을 컴퓨터를 통해 온라인으로 관찰하였고, 권선의 온도를 시험온도까지 상승시키기 위해 인가하는 전원은 변압기 권선의 인덕턴스(2.7H)에 의한 전류흐름의 제한을 완화하기 위해 정류기에 의해 정류된 직류를 사용하였다.

수직온도분포 분석을 이용한 몰드변압기 권선의 견전성 평가 연구

이 전류는 최고점 온도를 시험온도로 유지시키기 위해 컴퓨터에 의해 제어되었다.

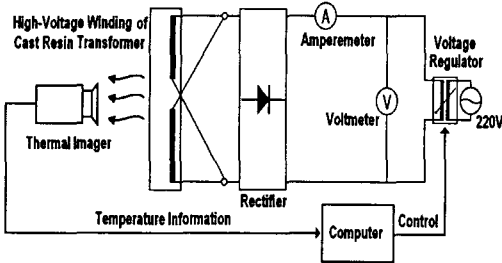


그림 2. 열화실험설비 구성도
Fig. 2. Schematic diagram of aging test system

측정에 사용된 적외선 열화상기는 Nippon Avionics사의 TVS-8502로 온도분해능은 0.025[°C]이고, 열화상은 이 장비로부터 IEEE 1394 port를 통하여, 그림 3의 자체적으로 제작된 프로그램에 의해 수신·분석되었다.

이 프로그램은 기준상태에 대한 열화상과 고장상태의 열화상에 대한 차분분석이 가능하도록 제작되었으며, 점(point), 선(line), 영역(area) 등으로 분석 영역에 대한 설정방법을 다양하게 활용할 수 있게 하였다.

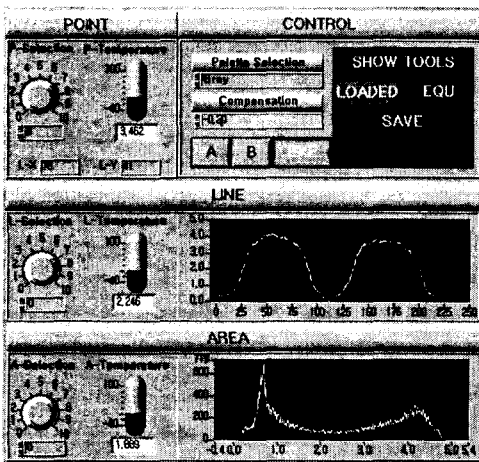


그림 3. 분석 프로그램
Fig. 3. Analysis program

몰드변압기 고압권선의 열화과정에 대한 관찰을 위해 기준온도를 기준으로 환산할 경우 약 3,000시

간 간격으로 그림 4와 같이 Tettex사의 2818/5283을 이용하여 유전정접을 측정하였다. 이때 절연체의 유전특성을 정확하게 파악하기 위해 중간 탭 단자를 분리하고 실온에서 충분히 냉각시킨 후 측정하였다.

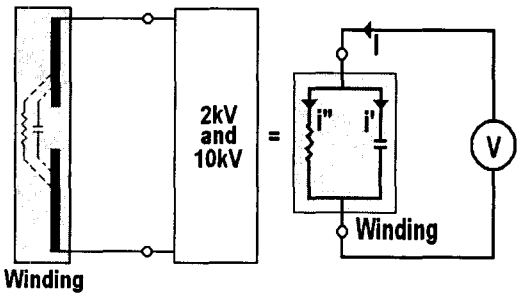


그림 4. 유전정접 측정회로
Fig. 4. Circuit for determining dielectric loss tangent

2.3. 실험결과

각 열화 단계별로 비교 기준으로 측정된 유전정접 값이 초기상태에 비해서는 두드러진 증가를 보이지 않았다. 그러나 시간이 경과함에 따라 값이 서서히 감소하여 안정된 후 일정시점에서 급격히 증가하였다. 이렇게 증가된 지점은 기준온도에 대한 시간으로 환산할 경우 40,000시간 부근이었고, 45,000시간이 경과되었을 때는 권선에 층간단락이 발생되었다. 이들 시료에 대하여 열화상 분석을 실시하였으며, 이들 시료 각각에 대하여 정격전류의 40[%]를 인가하여 측정된 결과는 그림 5, 6과 같다.

그림 5는 초기상태에 대한 몰드변압기 고압권선의 열화상(상) 및 이에 대한 수직온도분포(하)를 나타낸 것으로서, 그래프에서의 x축은 열화상 내의 수직선에서 최상단부로부터 최하단부까지의 위치를 나타낸 것이고, y축은 x축 위치에 대한 온도를 나타낸 것이다. 최고온부와 최저온부를 비교할 때, 약 2[°C]의 온도차가 발생됨을 알 수 있다. 이는 권선이 있는 부분과 절연체로만 이루어진 부분 사이의 표면에서의 온도차이다. 그리고 여기서 상반부가 하반부보다 약 1[°C]정도 높은 온도를 보여주고 있다. 이것은 높은 온도를 가진 공기의 대류현상에 의한 것으로 판단된다.

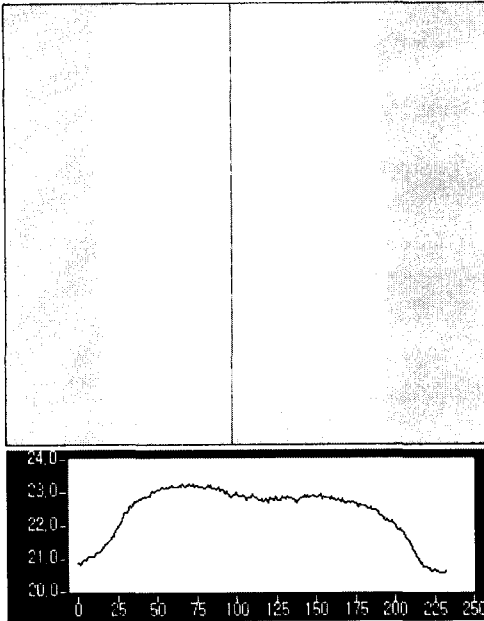


그림 5. 건전시료의 수직온도분포
Fig. 5. Vertical distribution of temperature in the sound specimen

의 표면온도가 상당히 상승한 것을 알 수 있다. 이는 권선 사이의 층간단락으로 전류를 제한하는 임피던스가 저하되었기 때문에, 도통전류의 증가로 줄(Joule)열의 상승에 의한 결과이다.

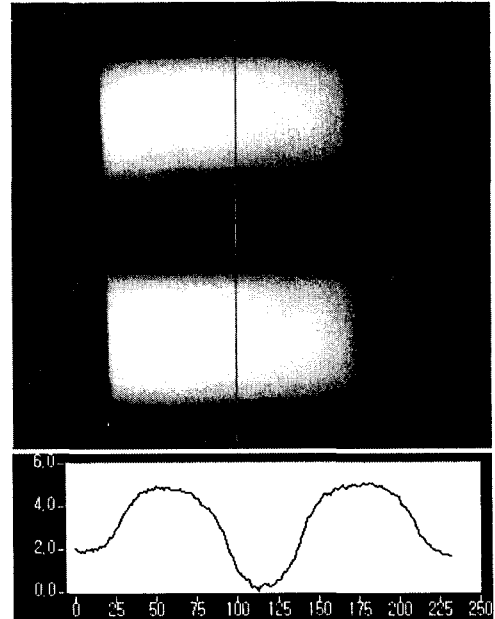


그림 7. 건전시료 대 고장시료에 대한 차분화상에서의 수직온도분포
Fig. 7. Vertical distribution of temperature in the differential image for the sound specimen vs the faulted specimen

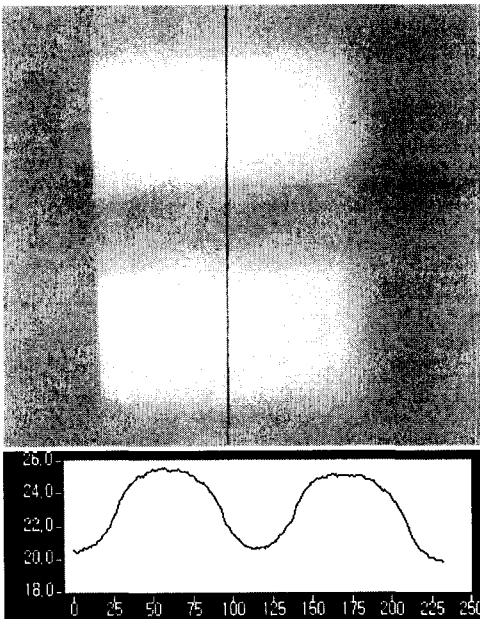


그림 6. 고장시료의 수직온도분포
Fig. 6. Vertical distribution of temperature in the faulted specimen

그림 6은 고장상태 시료의 열화상과 이에 대한 수직온도분포를 나타낸 것으로 권선부가 위치한 부분

그림 7은 고장상태에서 초기상태의 열화상을 차분 분석한 것으로 약 5[°C]의 최저온도와 최고온도 사이의 온도차가 있는 것을 알 수 있다. 이 온도분포 곡선은 초기상태의 정상시료에 대한 온도분포와 상반부에 층간단락이 발생된 고장시료에 대한 온도분포의 차를 의미하는 것이다.

그림 8은 부하전류의 변화에 대한 온도분포 변화 양상을 분석하기 위해 부하전류를 100[%] 증가시켜 정격전류의 80[%] 부하상태에서 측정한 것으로서, 온도분포 변화 패턴이 고장에 의한 것인지 부하전류 변화에 의한 것인지를 판단하는 기초 자료로 활용하기 위한 실험이다.

그림 8이 그림 5에 비하여 상대적으로 온도는 높지만, 그림 6에서의 고장시료에 대한 온도분포와 비교해볼 때 확연히 구분되는 다른 온도분포 패턴을

형성함을 알 수 있다.

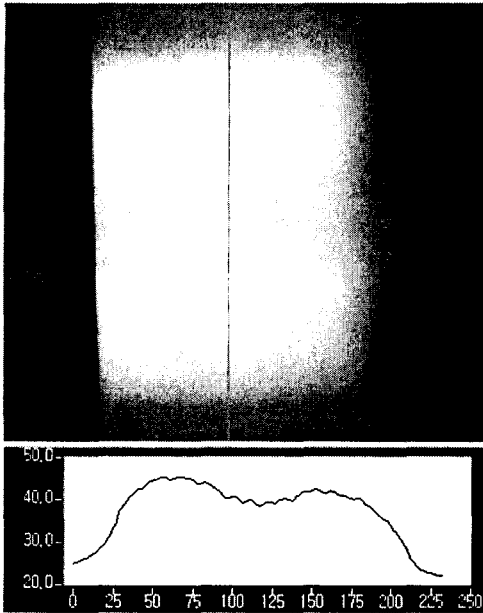


그림 8. 건전시료의 부하증가 시 수직온도분포
Fig. 8. At increased load, vertical distribution of temperature in the sound specimen

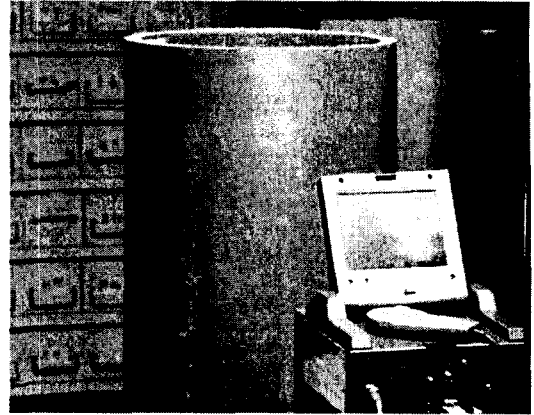


그림 10. 실측 사진
Fig. 10. The picture on the spot

그리고 그림 8과 그림 5와의 차분화상은 그림 9와 같고 이는 그림 7과 완전히 다른 패턴을 형성함을 확인할 수 있다.

결과적으로 부하전류가 증가하여 발생하는 온도 상승과 고장상태에 의해 증가되는 온도상승은 패턴에서 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 따라서 적외선 열화상기를 이용한 온도분포 분석은 정전 진단이 어려운 설비에 대하여 직관적이면서도 정량적 판단과 분석이 가능한 진단방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

그림 10은 측정대상인 몰드변압기 고압권선 시료와 측정에 사용된 적외선 열화상기의 사진이다.

3. 결 론

고장시료와 건전시료의 온도패턴 비교 및 부하전류 변화에 따른 온도패턴 비교·분석 결과 수직온도분포에서 서로 다른 양상을 나타냄을 알 수 있었다. 특히 건전상태의 온도분포에서 자체 제작된 프로그램을 이용한 차분분석을 통해 얻어진 결과는 충분히 직관적으로 구분 가능한 정량적인 분석결과를 보여주었다. 또한 유전점정의 변화가 크지 않아 고장상태로 분석하기 어려운 상태를, 시각적으로 확연히 구분되는 결과를 얻을 수 있었다.

따라서 이 진단법을 활용할 경우 활선 상태에서 몰드변압기 고압권선 내에서 발생한 층간단락 등의 고장상태를 확인할 수 있을 것으로 사료된다.

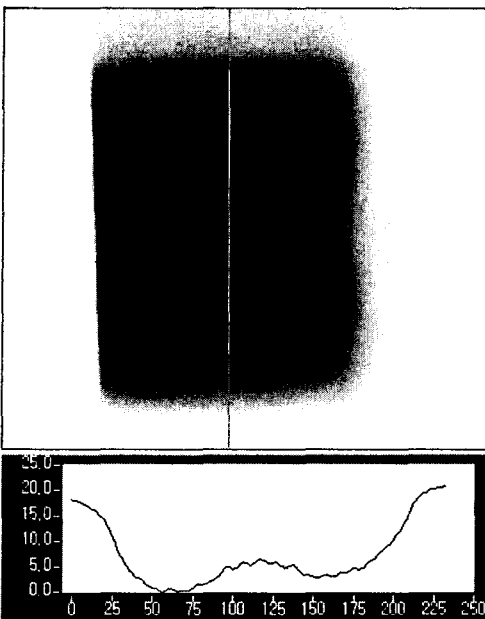


그림 9. 정격의 40(%)부하 대 80(%)부하 상태에 대한 차분화상에서의 수직온도분포
Fig. 9. Vertical distribution of temperature in the differential image for the 40(%) load condition of the rating vs the 80(%)

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금 전력연구개발 사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Xavier P. V. Maldague, *Nondestructive Testing Handbook Volume 3, Infrared and Thermal Testing*, American Society for Nondestructive Testing, Inc., pp. 21~22, 2001.
- [2] Peter Capper and C. T. Elliott, *Infrared Detectors and Emitters: Materials and Devices*, Kluwer Academic Publishers, pp. 1~4, 2001.
- [3] IEEE Std C57.12.60, *Solid-Cast and Resin-Encapsulated Power and Distribution Transformers*, pp. 2~4, 1998.

◇ 저자소개 ◇

임용배 (林庸培)

1967년 11월 16일생. 1994년 원광대학교 전기공학과 졸업. 1998년 홍익대학교 전기제어공학과 졸업(석사). 현재 홍익대학교 전기정보제어공학과 박사과정 수료. 1994~1996년 (주)오리엔텍 부설연구소 근무. 1996년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 설비진단 그룹 연구대리.