

배전용 변압기의 부하운전에 의한 온도 및 유전특성 분석

(Temperature Rise and Dielectric Characteristics of Distribution Transformers with Over-Loading Operation)

김병숙* · 정종만** · 이병성 · 송일근 · 한병성

(Byung-Sook Kim · Jong-Man Joung · Byung-Sung Lee · Il-Keun Song · Byoung-Sung Han)

요 약

본 논문은 권선내부에 온도계가 설치된 지상변압기를 제작하여 부하운전에 따른 배전용 변압기의 온도상승 특성과 절연유의 유전특성 변화를 관찰하였다. 관찰결과 배전용변압기의 경우 과열점은 세 권선 중 두개의 권선이 접하고 권선의 약 2/3 높이에 위치하고 있으며, 과열점과 절연유 상부 간에 약 17[°C]의 일정한 온도차를 확인할 수 있었다. 또한 절연유의 정전용량특성은 온도와 선형적인 관계로 감소하는 특성을 보이며, 그 기울기는 열화율과 무관하게 -0.0106의 일정한 값을 관찰할 수 있었다. 이 결과는 수명손실의 정확한 계산과 열화진단을 위한 기구로 활용할 수 있을 것이다.

Abstract

Temperature rise characteristics of medium voltage class transformers and dielectric characteristics of its insulation oil according to the loading rate were investigated using the transformer that has thermocouples embedded in the windings. The hottest-spot of the transformer locates at about 2/3 height of the windings where they adjoin each other among the 3 phase windings. The temperature difference between the hottest-spot and top-oil is about 17[°C] and the value keeps uniformly in short time after changing the loading rate. Capacitance of the oil varies in inverse proportion to temperature and the inclination rate is about -0.0106 that is not dependent on the aging rate. On the other hand the capacitance is increased depending on the aging rate, so the capacitance characteristics of the oil could be applied to the diagnostic technique.

Key Words : Distribution Transformers, Temperature Rise, Hottest-Spot, Thermal Aging, Dielectric Characteristics

1. 서 론

에너지 소비밀도가 증가하여 배전용 변압기의 사고로 인한 파급 범위가 더욱더 확대되고 있으며, 이로 인한 경제적 손실도 매우 커지게 되었다. 더욱이 제조물 책임법 및 교토의정서의 발효, 윤리경영 등의 확대에 의해 사고파급은 경제적 손실 이상으로

* 주저자 : 한전전력연구원 배전연구소

** 교신저자 : 한전전력연구원 배전연구소

Tel : 042-865-5915, Fax : 042-865-5904

E-mail : kbsook@kepeco.co.kr

접수일자 : 2006년 8월 30일

1차심사 : 2006년 9월 5일, 2차심사 : 2006년 11월 6일

심사완료 : 2006년 11월 30일

증가하는 추세이다.

현재 배전용 변압기의 경우 160만대(2005.12 기준) 이상이 운영되고 있으며, 13년을 주기로 중수리가 이루어져 매년 10만대 가량이 추가 신설되고 있다. 따라서 정확한 수명평가를 통해 기설 변압기의 수명을 1년만 연장하더라도 상당한 경제적 이익을 추구하고 할 수 있다.

변압기의 수명은 절연지의 기계력(인장강도)이 일정 수준으로 감소되는 시점을 기준으로 정하고 있다 [1-2]. 변압기의 수명을 절연지의 인장강도로 결정짓는 이유는 단락사고 등 이상전류 유입에 의해 발생된 과도한 전자기력으로 인해 절연지가 기계적으로 손상되어 절연과피에 이른다는데 것이 변압기 열화 고장의 일반적인 메카니즘이기 때문이다. 따라서 변압기의 수명을 정확하게 평가하기 위해서는 변압기의 부하운전에 의해 발생하는 열 특성을 먼저 정확하게 분석하고, 열화에 의한 각종 절연물의 특성변화를 이해하는 것이 중요하다.

변압기의 수명을 평가하기 위해서는 절연지의 기계적 특성을 직접 분석하는 것이 가장 정확한 방법이다. 하지만 절연지를 직접분석하는 것은 불가능한 실정이므로 절연유 특성 분석을 통해 절연지의 수명을 간접적으로 평가하는 기술[3-8]연구가 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다.

본 연구에서는 권선내부에 온도센서를 설치한 배전용변압기를 사용하여 부하시험을 실시하였다. 먼저 부하운전에 따른 권선의 온도특성을 분석하였으며, 취득된 과열점(hot-spot)온도 데이터를 이용하여 수명손실을 계산하고 수명손실에 따른 절연유의 유전특성 변화를 살펴보았다.

2. 시료 및 시험장치

2.1 시 료

시험용 변압기는 22.9[kV]/380[V], 3상 150[kVA]급 지상설치형 변압기로 한전 구매사양[9]에 따라 제작하였다. 변압기 내부에는 권선의 온도를 측정하기 위한 온도센서를 설치하였다. 온도센서(Ttype thermo-couple)은 1차권선 내에 총 14개를 설치하였으며, 3상의 1차권선 중 절연거리 확보 및 리드 인출이 용이한 H3상에 설치하였다. 그리고 누설자속으로 인한 유도전압 발생을 억제하기 위해 센서의 리드를 코일과 수직이 되도록 하였다.

그림 1의 (a)와 (b)는 온도센서의 설치위치를 나타내고 있다. 그림은 센서의 설치위치를 자세히 보여주기 위해 3상의 권선 중 2상의 일부만을 나타내었다. 센서 위치는 권선의 상부로부터 각각 40[mm], 80[mm] 되는 곳 그리고 1차권선의 3층, 7층, 11층에 각각 설치하였다.

2.2 가속열화 설비

기밀시스템이 적용된 변압기에서 절연지의 열화는 전기적 스트레스, 열, 산소, 수분 등 다양한 열화 인자 중 발생하는 열에 지배적이다[10]. 따라서 2차 단락법에 의한 과부하시험법으로 가속열화설비를 구축하였다. 가속열화시험장치는 시험전압을 조정

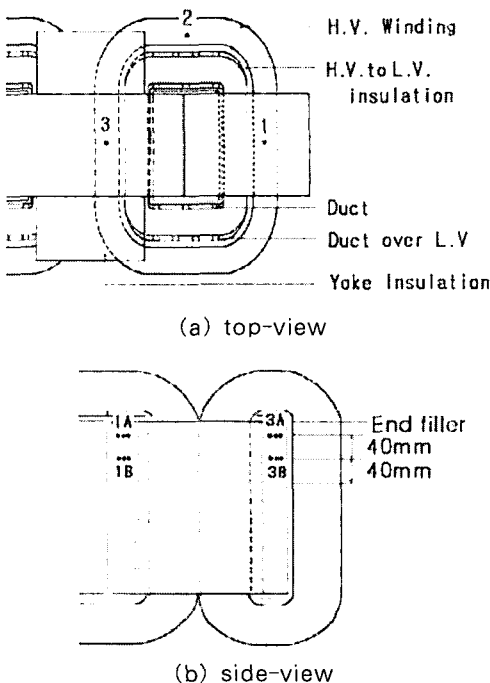


그림 1. 시험용 변압기의 온도센서 설치 위치
Fig. 1. Thermocouple locations installed in test transformer

배전용변압기의 부하운전에 의한 온도 및 유전특성 분석

하기 위한 전압조정기, 출력 전압을 시험전압만큼 상승시켜주기 위한 보조변압기 및 시험변압기로 구성되었다.

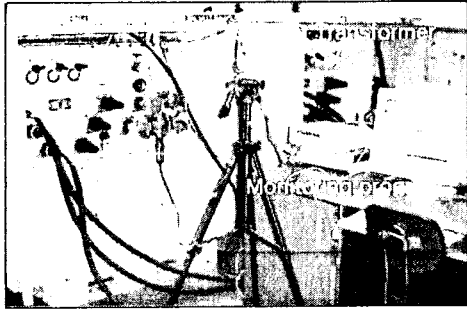


그림 2. 측정시스템 구성
Fig. 2. Measurement system

2.3 측정 시스템 구성

그림 2는 측정 시스템의 구성을 나타내고 있다. 측정데이터는 부하전류, 권선 및 절연유 상부 온도, 정전용량, 누설전류이며, 1분 간격으로 취득하였다. 측정시스템의 구성과 주요 사양을 표 1에 정리하였다.

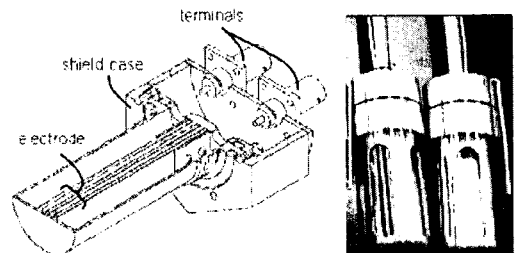
표 1. 측정시스템 구성 목록
Table 1. Measurement system and specification

측정항목	사용기기		비 고
부하전류	CT	Fluke사, i1000S	Range : 1~1000[A] 변환비 : 1[mV/A]
온 도	데이터 취득기	Agilent사 34970A	S/R : 1[s/sec] Mode : ACV/DCV
정전용량	LCR 메타	Agilent사 C37901	시험전원 : 1[V], 1[kHz] 정밀도 : 10^{-4} [pC] 인터페이스 : GPIB
누설전류	상용품	TOID system	PSD tech(주) 인터페이스 : Serial

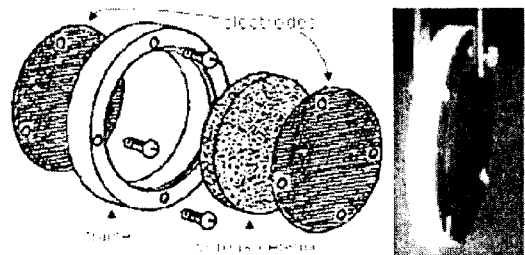
절연유의 정전용량과 누설전류 측정을 위한 센서의 구성을 그림 3에 나타내었다. 그림 3 (a) 정전용량 센서의 구성을 나타내고 있다. 전극의 면적을 크게하고 절연유의 유동이 용이하도록 3중 평판으로 하였으며, 케이스는 접지되어 노이즈를 차폐할 수 있도록 하였다. 최종 제작된 센서의 진공 중 정전용

량은 9.394[pF]이다.

절연유의 누설전류를 측정하기 위해 사용한 TOID 시스템을 사용하였다. TOID 시스템은 PCS (Porous Ceramic Sensor) 센서를 사용하고 있는데 구조와 구성을 그림 3 (b)에 나타내었다. PCS는 전극 사이에 다공질의 세라믹을 삽입하여 연면누설전류의 병렬성분을 많게 하여 도전성 열화생성물에 의한 미세한 누설전류 값을 증가시킨 구조[11]이다. 시험에 사용된 센서의 기공 크기는 약 200~300 [um]크기이며, 신유 절연유에 대한 누설전류는 약 5 [nA]의 크기를 나타낸다.



(a) capacitance sensor



(b) PCS

그림 3. 센서의 구조 및 외관
Fig. 3. Structure and appearance of the sensors

3. 시험결과 및 분석

3.1 온도특성 분석

그림 4는 변압기 권선내부의 온도분포를 나타낸다. 측정결과에 의하면 과열점은 14개의 온도센서 (T01~T14)중에서 T12에 의해 측정되는 위치임을 알 수 있다. T12의 위치는 그림 1 (a)의 3번으로 3상의 세 권선 중 두개 권선이 접하는 부분이며 권선 하

부에서 약2/3 정도의 높이에 위치하고 있다. 이는 해당위치에서는 열이 양측에서 전도되고 냉각이 어려우며, 가열된 절연유가 대류에 의해 부상되기 때문이다. 반면 권선의 최상부는 절연유에 의해 냉각되어 낮은 온도를 나타낸다.

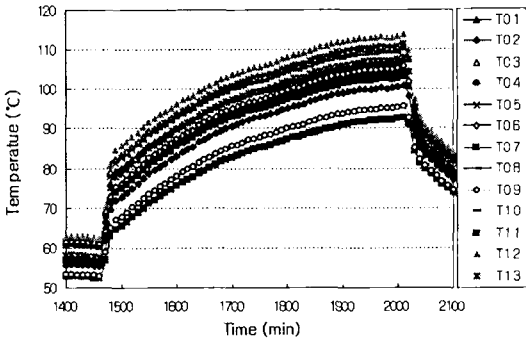


그림 4. 권선 내부의 온도분포
Fig. 4. Temperature distribution in the winding

부하율에 따른 변압기 내부의 온도 차이를 측정하였다. 먼저 무부하이던 변압기에 100[%]의 정격전류를 인가하고 절연유 상부와 과열점의 온도가 포화될 때까지 유지하였다. 그리고 부하전류를 10[%]씩 증가시켜 최종 140[%]까지 상승시켰다. 측정된 과열점의 온도와 절연유 상부온도, 그리고 두 온도간의 차이를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 HO는 Hot-spot, TO는 Top-oil, dT는 온도차를 각각 나타낸다. 그리고 시점 1, 2, 3, 4는 110[%]에서 140[%]까지 10[%]씩 부하율을 증가시킨 것을 나타내며 시점 5는 전원을 off한 시점이다.

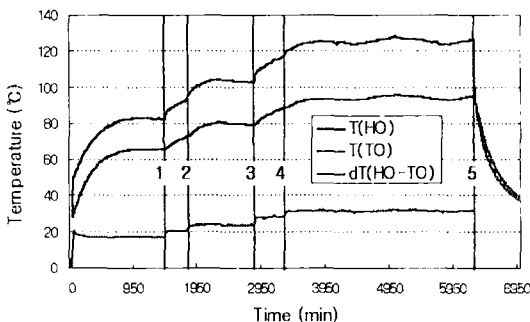


그림 5. 과열점과 절연유 상부의 온도상승 특성
Fig. 5. Temperature rise characteristics of the hot-spot and the top-oil

그림 5의 세 곡선 중에서 $dT(HO-TO)$ 의 경향을 살펴보면 과도구간에서도 일정한 값을 나타내고 있다. 이때 과도구간이란 일정한 부하가 인가되어 온도가 포화되기 전 단계를 말한다. 단 전원을 최초로 인가하는 순간에는 $dT(HO-TO)$ 그래프가 초기에 over shoot된 후 일정한 값으로 포화하고 있다. 이는 변압기 내부 구성물이 부하운전 이전에는 외부온도에 열평형을 유지한 상태에서 부하운전으로 인해 열원인 권선온도에 열평형을 이루려고 한다. 이때 권선에서 발생된 추가 열량이 절연유까지 전달되는 전도시간이 지연되어 절연유 온도상승이 늦어지기 때문이다. 이러한 현상은 무부하상태에서 부하운전을 하게되면 크게 나타나므로 변압기 절연유의 온도시정수 산정시 오차를 발생시킬 수 있다.

그림 6은 부하율에 따른 $dT(HO-TO)$ 값의 증가 경향을 나타내고 있다. 100[%] 부하율에서 과열점과 절연유 상부 간의 온도차는 약 17[°C] 정도의 값을 가지고 있으며, 부하율이 증가할수록 부하율 1.8승에 비례하여 증가하고 있다. 이는 권선에서 발생하는 열량은 증가하지만 절연물의 열 용량은 고정되어 있기 때문이다.

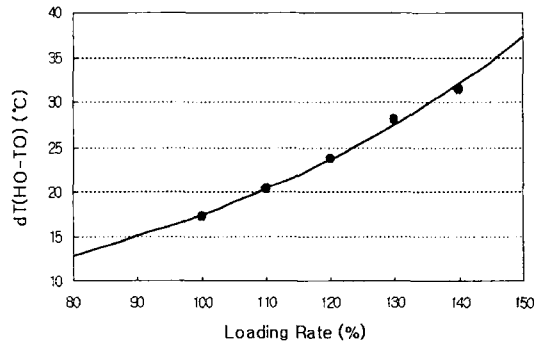


그림 6. 부하율에 따른 $dT(HO-TO)$
Fig. 6. $dT(HO-TO)$ value with the loading rate

그림 7은 각 부하 변동 구간에서 $dT(HO-TO)$ 값이 일정한 값으로 수렴하기까지의 과도상태를 나타내고 있다. 그래프 1->2와 3->4는 이전 부하에서 온도가 포화된 상태에서 부하변동이 있었으며, 2->3과 4->5는 이전 부하에서 온도가 포화되기 전에 부하변동이 있는 경우이다. 이때 $dT(HO-TO)$ 의 값이 일정

배전용변압기의 부하운전에 의한 온도 및 유전특성 분석

하다는 것은 열이 과열점과 절연유 상부 사이의 열용량만큼 발생된 후 일정한 전도율로 전달되고 있음을 나타낸다. 그림에서는 각 부하운전 유형마다 수렴속도가 다르게 나타나고 있다. 이는 물체의 전도도가 온도에 따라 다른 값을 나타내고 절연유의 점도변화에 의한 복잡한 대류작용이 가장 큰 원인이라 생각된다. 하지만 15분 주기 이상의 부하변동을 고려하면 일정한 $dT(HO-TO)$ 의 값을 이용할 수 있을 것이다.

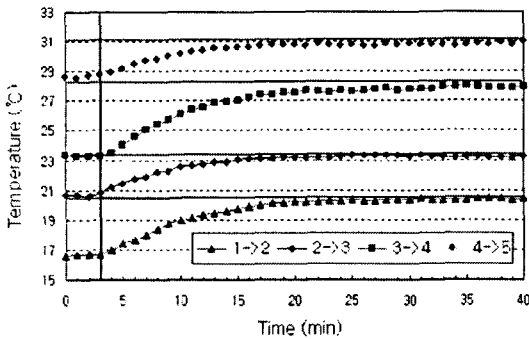


그림 7. $dT(HO-TO)$ 의 과도구간
Fig. 7. $dT(HO-TO)$ value with the loading time

현재 IEEE, IEC 표준과 외국 전력회사에 의하면 부하이력과 대기온도 두 가지 데이터를 이용하여 과열점 온도를 계산하고 있는데, 정확도 향상과 계산과정의 단순화를 위한 연구가 많이 이루어지고 있다. 따라서 본 실험결과인 절연유 상부온도와 과열점의 상관관계를 이용하면 계산과정이 단순화될 뿐만 아니라 실험데이터를 사용함으로써 변압기에 따른 절연시스템의 열특성을 직접 고려할 수 있을 것이다.

3.2 유전특성 분석

절연유의 정전용량 및 누설전류는 열화상태를 진단할 수 있는 중요한 정보이다. 절연지 및 절연유의 열화에 의해 생성되는 열화 부산물이 절연유 속에 생성되어 절연유의 절연내력 저하, $\tan\delta$ 증가 등의 특성[12]을 나타내는 것으로 알려져 있기 때문이다. 따라서 부하운전에 따른 절연유의 유전특성을 분석하기 위해 부하율 100[%], 130[%], 150[%] 등으로 1년 이상 부하운전을 실시하였다.

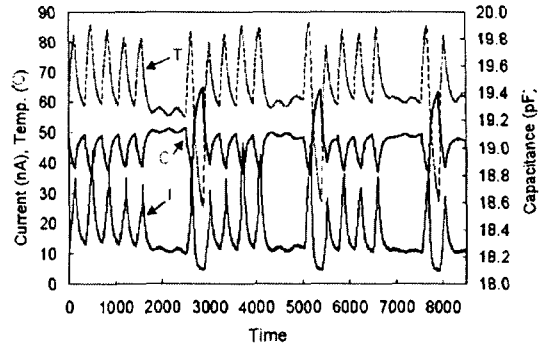


그림 8. 부하운전에 따른 절연유 상부온도(T) 및 정전용량(C), 누설전류(I)의 변화
Fig. 8. Top-oil temperature, oil capacitance, oil leakage current varying with loading

그림 8는 부하운전에 따른 절연유상부 온도(T), 절연유의 정전용량(C) 그리고 누설전류(I)의 경향을 나타내고 있다. 절연유의 정전용량 및 누설전류는 [nA], [pF] 단위의 작은 값을 나타내지만 계측기의 정밀도가 높고 센서가 개발되어 재현성이 충분한 상태이다. 하지만 두 특성치 모두가 온도에 따라 변하고 있어 임의 온도에서 측정하더라도 특정온도의 값으로 보정할 수 있는 온도 보정함수가 정의되어야 할 것이다.

정전용량의 경향을 자세히 살펴보기 위해 그림 9에 절연유 온도에 따른 변화를 나타내었다. 두 곡선의 부하운전시간 차는 3개월이다. 그림을 살펴보면 정전용량은 절연유온도에 반비례하는 특성을 보이고 있으며, 기울기는 -0.0106 으로 측정시기에 상관없이 일정하게 나타나고 있다.

부하운전 기간동안 취득된 정전용량을 그림 10에 나타내었다. 그림에 나타낸 데이터는 절연유 온도가 $50[^\circ\text{C}]$ 일 경우이며 부하운전이 길어질수록 정전용량이 확연히 증가하고 있다. 따라서 절연유의 정전용량을 변압기 열화진단에 활용할 수 있을 것이다.

누설전류의 온도에 대한 특성은 그림 11에 나타내었으며 지수적인 증가경향을 보이고 있다. 하지만 한달 기간을 차이로 측정된 두 곡선을 비교하면 일정한 온도보정함수를 정의하기가 어렵다. 그리고 부하운전 기간에 취득된 누설전류 값 중에서 절연유 온도 $50[^\circ\text{C}]$ 일 경우의 값만을 정리한 그림 12를 살펴보면 경향성 또한 낮게 나타나고 있다. 따라서 PCS

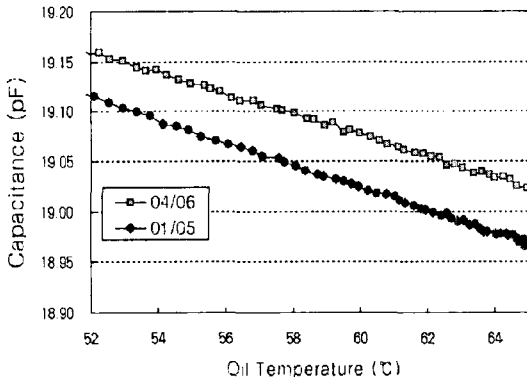


그림 9. 온도에 따른 절연유의 정전용량 특성

Fig. 9. Oil capacitance depending on the temperature

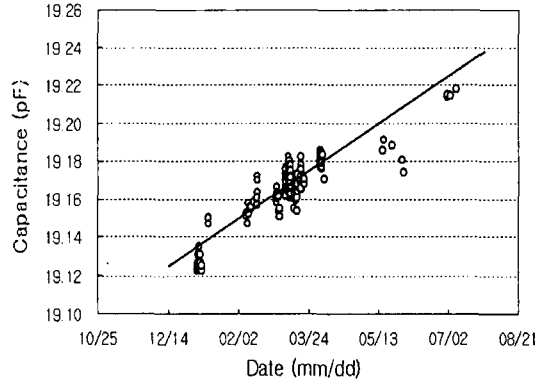


그림 10. 부하운전에 따른 정전용량 변화

Fig. 10. Oil capacitance variation with the loading time

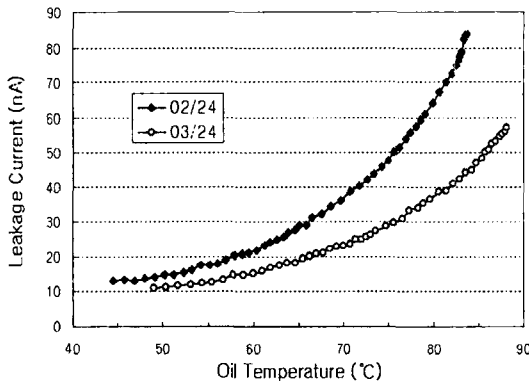


그림 11. 온도에 따른 절연유의 누설전류 특성

Fig. 11. Leakage current of the oil depending on the temperature

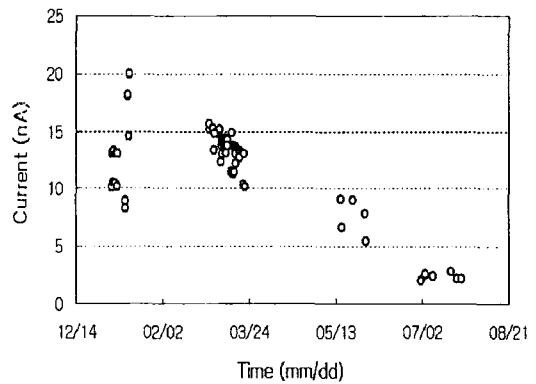


그림 12. 부하운전에 따른 누설전류의 변화

Fig. 12. Leakage current variation of the oil with loading time

의 경우 국내 변전소의 MTR에 설치되어 고장진단 장비로 많이 활용하고 있으나 열화진단에서는 정전용량보다 민감도가 낮은 것으로 나타났다. 그러나 누설전류 수백 [nA]를 고장 기준으로 사용하고 있어 열화가 심한 경우의 진단특성은 추가 연구가 필요할 것으로 생각되며, 열화부산물의 크기가 약 50[μ m]로 알려져 있어[11] 센서의 기공 크기를 작게하면 감도가 개선될 것으로 생각된다.

4. 결 론

변압기의 열화진단을 위해 시험용 변압기에 대한

가속열화시험을 실시하고 변압기 권선 내부의 온도 상승 특성과 절연유의 유전특성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

시험변압기의 과열점은 권선의 약 2/3 높이 그리고 두 개의 권선이 접하는 곳에 위치하였으며, 과열점과 절연유 상부 간의 온도차는 부하율 100[%]에서 약 17[$^{\circ}$ C]로 측정되었다. 이때 부하에 따른 온도차의 증가경향은 부하율 1.8승에 비례하였다.

절연유 정전용량은 온도에 대하여 선형적인 특성을 보이며, 기울기는 -0.0106으로 열화에 상관없이 일정하게 나타났다. 그리고 변압기가 열화됨에 따라 절연유의 정전용량이 증가하였다. 따라서 절연유 정전용량 특성을 변압기 열화진단을 위한 기구에 활용

배전용변압기의 부아온전에 의한 온도 및 유전특성 분석

될 수 있음을 확인하였다.

절연유의 누설전류특성은 변압기 고장진단에 일부 활용하고 있으나 정전용량에 의한 열화진단보다 감도가 낮은 것으로 나타났다. 하지만 센서의 기공 크기를 최적화하면 감도가 개선될 것으로 분석되었다.

References

- [1] IEEE std C57.101-1987, "The Statistical analysis of thermal life test data".
- [2] IEEE std C57.91-1995, "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers".
- [3] Tapan K. Saha, "Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers," IEEE trans on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 5, pp. 903-917, October 2003.
- [4] Walter S.Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part 1: Theoretical Considerations", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 19, No. 5, pp. 5-19, Sept/Oct 2003.
- [5] R.M.Morais, W.A.Mannheimer, M.Carballeira, J.C.Noualha-guet, "Furfural Analysis for Assessing Degradation of Thermally Upgraded Papers in Transformer Insulation", IEEE Trans. Dielec. and Elect. Insul., Vol. 6, No. 2, pp. 159-163, April 1999.
- [6] M.Ali, C.Eley, A.M.Emsley, R.Heywood, and X.Xaio, "Measuring and Understanding the Ageing of Kraft Insulating Paper in Power Transformers", IEEE Elect. Insul. Magazine, pp. 28-34, 1996.
- [7] R.Batruni, R.C.Degeneff, M.A.Lebow, "Determining the Effect of Thermal on the Remaining Useful Life of A Power Transformer from Its Impedance Versus Frequency Characteristic", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 11, No. 3, pp. 1385-1390, July 1996.
- [8] A.M.Emsley and G.C.Stevens, "Review of Chemical Indicators of Degradation of Cellulosic Electrical Paper Insulation in Oil-filled Transformers", IEE Proc. Sci. Meas. Tech., Vol. 141, pp.324-334, 1994.
- [9] 한진구매시방서 RS 147-170~190, "표준형 지상변압기", 2005. 11.
- [10] T.S.R Murthy, U.Yugandhar, S.C.Gupta, A.Bhoomaiah & J.S.Kuntia, "Study on the Effect of Impulse Voltage Withstandability on the Thermally-aged Transformer Paper", Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, pp.38-41, 19-22 September 2004.

- [11] "변압기 절연유 열화센서 진단용 계측기 개발연구" 최종보고서, 과학기술처, 1994.
- [12] C.T.Dervos, C.D.Paraskevas, P.Skafidas, "Dielectric Characterization of Power Transformer Oils as a Diagnostic Life Prediction Method," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, No. 1, pp. 11-19, Jan/Feb 2005.

◆ 저자소개 ◆

김병숙 (金柄執)

1958년 3월 15일생. 1980년 전북대 전기공학과 졸업. 1983년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 필란드 헬싱키 경영대학원 졸업(석사). 2005년~현재 전력연구원 배전연구소장.

정종만 (鄭鍾萬)

1971년 9월 16일생. 1997년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(박사). 2004년~현재 배전연구소 배전설비그룹 선임연구원. 관심분야 : 배전설비 열화 진단.

이병성 (李丙成)

1968년 8월 17일생. 1993년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 배전연구소 배전설비그룹 선임연구원.

송일근 (宋一根)

1961년 3월 3일생. 1984년 숭실대 전기공학과 졸업. 1986년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년~현재 전력연구원 배전연구소 배전설비그룹장.

한병성 (韓秉誠)

1951년 12월 22일생. 1975년 전북대 전기공학과 졸업. 1981년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 프랑스 루이파스퇴르대학 졸업(박사). 1988년 프랑스 CNRS(프랑스국립과학연구소) 연구원. 2002~2004년 전북대 공대 학장. 현재 전북대학교 전자정보공학부 교수.