

A Diagnostic Technique for Distribution Transformers using Top Oil Temperature

崔 度 赫* · 尹 龍 漢** · 閔 庚 溙*** · 金 載 哲§
 (Do-Hyuk Choi · Yong-Han Yoon · Kyeoung-Rae Min · Jae-Chul Kim)

Abstract - In this paper, we argued the possibility of the diagnostic technique for distribution transformers using the top oil temperature rising above the ambient temperature. The proposed diagnostic technique used the reference top oil temperature rising at rated current. We determined the emergency value of the transformer using the limitation of the top oil temperature rising and calculated the loss of life. The top oil temperature rises because of the load currents. In this point, the proposed diagnostic technique was explained. The proposed system measures the load current, top oil temperature and ambient temperature. With the diagnostic device, we tested the top oil temperature rising of two transformers. Then the loss of life was calculated by the top oil temperature.

Key Words : Diagnostic Technique, Distribution Transformers, Top Oil Temperature, Loss of Life

1. 서 론

배전용 변압기에서 사고가 발생하게 되면 전기 에너지의 수용가 측면에서 정전 피해가 발생한다. 산업용 부하인 경우에는 정전 사태에 의한 경제적 손실까지 발생할 수 있다. 특히 도로변이나 주택가에 인접하여 설치된 배전용 변압기는 폭발 사고 등에 의한 인적 피해가 발생하기도 한다. 현 배전용 변압기의 관리는 시간에 따른 점검, 수리 및 교체 작업이 이루어지고 있다. 그러나 사고를 미연에 예방하는 측면에서 배전용 변압기의 상태를 기준으로 하는 진단 기법의 적용이 필요하다. 전력용 변압기의 경우에는 사고 예방 및 수명 예측 측면에서 많은 진단 기법이 연구되거나 일부 실용화되고 있다[1]. 그러나 전력용 변압기에 적용되는 진단 기법을 배전용 변압기에 적용하기에는 설치 대수가 너무 많고, 전력용 변압기의 진단 장치가 배전용 변압기의 가격에 비해 비싸다는 문제점이 있다[2]. 그러므로 본 논문에서는 배전용 변압기의 진단에 필요한 측정 데이터를 선정하였고, 또한 위험을 쉽게 판단할 수 있는 진단 기법에 대하여 연구하였다.

본 논문의 진단 기법의 적용을 위해서 배전용 변압기의 운전 특성을 분석하였다. 일반적으로 배전용 변압기의 운전 특성은 과부하(overload) 운전을 포함하고 있다. 과부하 운전의 원인이 되는 부하 전류 및 그 결과로써 나타나는 최상

부 유온 상승(top oil temperature rising)의 제한을 통하여 위험을 판단하였다. 최상부 유온을 이용하여 변압기 운전에 따른 수명 손실(loss of life)의 계산 방법을 제시하였다. 또한, 변압기 최상부 유온 및 부하 전류를 측정하는 진단 시스템을 구성하였다. 개발된 진단 시스템의 검증 실험으로 반환 부하법(loading back method)에 의한 유온 상승 실험을 실시하였다. 유온 상승 실험은 현장에서 실측된 데이터에 대해 시간당 평균을 이용한 방식과 IEC 부하 모델링에 의한 방법의 두 가지 부하 모델을 가지고 실시하였다. 또한 현장 사용 이력이 다른 두 대의 변압기에 대하여 실험하였다.

배전용 변압기는 잦은 부하 변동과 장기간 과부하 운전의 영향 등으로 열적 특성(thermal characteristic)이 가장 잘 나타난다[3,4]. 변압기의 열적 특성은 기기의 사고 및 수명과 직접적인 관련을 가지고 있다. 특히, 열적 특성은 변압기의 유온 상승을 유발하며, 변압기의 유온 중 최상부 유온은 측정 및 측정 장비의 개발이 비교적 용이하다. 따라서 본 논문에서는 배전용 변압기의 부하 전류, 최상부 유온 및 주변 온도를 이용하여 배전용 변압기를 진단할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 배전용 변압기의 진단 방법

유입 변압기(oil immersed transformer)의 수명은 뇌 서지 및 개폐 서지 등의 이상 전압과 외부 단락 등의 전기적, 기계적 스트레스에 의한 열화로 결정되므로 변압기의 절연이 파괴하기 전에 열화 문제를 고려하는 것이 중요하다. 배전용 변압기의 경우에는 절연유와 권선 등의 열화가 중요한 문제이다[2]. 배전용 변압기의 경우에는 일정한 정격 운전보다는 부하 변동이 심하고, 과부하 운전에 의한 열적 열화가 심한 것으로 파악되고 있다. 절연 내력이 저하된 변압기는

* 正 會 員 : 韓 國 建 設 技 術 研 究 員 先 任 研 究 員
 ** 正 會 員 : 崇 實 大 生 產 技 術 研 究 所 研 究 員 · 工 博
 *** 正 會 員 : (株) 테크빌 先 任 研 究 員
 § 正 會 員 : 崇 實 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博
 接 受 日 字 : 2000 年 3 月 8 日
 最 終 完 了 : 2000 年 4 月 4 日

장시간 과부하 운전, 이상 전압이나 뇌에 의한 서지 침입시 돌발 사고를 발생시켜 사고의 예방 진단이 필요하다. 일반적으로 변압기 진단은 부분 방전에 의해 방출되는 유증 가스 분석법, 유전율의 정도를 알아내어 판별하는 유전정접법, 절연유의 최고 온도 지점을 알아내어 진단하는 최고 온점 (hot spot) 측정법이 있다. 그 외에도 변압기 운전에 의해 증가된 온도 상승의 이용으로 수명을 예측하는 기법이 있다 [5-12].

2.1 배전용 변압기의 유온 상승

주변 온도(ambient temperature)에 대한 변압기의 최상부 유온의 상승은 변압기 부하 전류의 증가가 내부의 손실을 일으켜 변압기 전체의 온도를 상승시키는데 기인한다. 시간에 대한 함수인 변압기 유온의 변화는 초기 온도 상태에서부터 최종 온도 상태까지 1차 지수 함수의 형태로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$\theta(t) = (\theta_u - \theta_a)(1 - e^{-t/T_0}) + \theta_a \quad (1)$$

식 (1)에서 초기 온도와 최종 유온은 θ_a 와 θ_u 이고, T_0 는 변압기 온도 시정수, t 는 부하 인가 시간이다. IEEE 모델에서 최종 유온은 부하에 의한 것으로 식 (2)과 같이 근사화 된다[5].

$$\theta_u = \theta_n \left(\frac{K^2 R + 1}{R + 1} \right)^n \quad (2)$$

지수 n 은 변압기의 냉각 상태에 의해 결정되는 냉각 지수이다. 자연 냉각인 경우에는 $n=8$ 을 사용하고, 강제 냉각인 경우에는 $n=9 \sim 10$ 으로 결정된다. θ_n 은 정격 부하시의 주변 온도에 대한 최종 유온으로 실험에 의해 얻을 수 있다. R 은 무부하 손실에 대한 부하 손실의 손실비이고, K 는 식 (3)과 같이 정격 부하(rated current)에 대한 현 부하의 비이다.

$$K = \frac{I}{I_{rated}} \quad (3)$$

본 논문에서는 변압기의 부하와 내부 상태에 따라 상승하는 최상부 유온을 진단 기법에 이용하였다. 즉, 최상부 유온 상승의 제한 조건을 이용하여 위험을 판단하였고, 운전에 대해서는 최상부 유온을 이용하여 수명 손실 계산을 적용하였다.

2.2 제안된 배전용 변압기 진단 기법

2.2.1 배전용 변압기의 부하 특성 분석

일반적인 전기 기기의 경우 정격 운전시 수명이 30년이라고 한다. 그러나 배전용 변압기의 경우 부하의 형태 및 변동이 심하여 그 기기의 수명을 다하지 못하고, 수리되거나 교체된다. 배전용 변압기의 상태를 평가하기 위해서는 고유의 이력에 의한 관리가 필요하며, 부하의 특성을 파악할

필요가 있다. 변압기의 일반적인 부하 특성은 순환적인 형태를 띄고 일, 주 및 년의 주기로 반복적인 모습을 보인다 [4,5]. 이러한 부하 특성 때문에 발생하는 열화는 각 주기에 대한 평균적인 양으로 고려되는 것이 일반적이다. 그러나 평균적인 양은 오차가 발생하여 기기 상태에 대한 정확한 평가가 곤란하다. 다음 그림 1, 그림 2, 그림 3은 1998년 7~8월에 서울 상업 지역에서 측정된 월 부하 곡선이다. 그림 1은 정격 부하 이하에서 운전되는 경우로 기기 제작 초기에 추정된 수명 이상으로 운전이 가능한 경우다[6,7]. 특히 예방 진단의 관점에서 본다면 사고의 위험성은 낮으며, 진단 기법의 적용 대상에서 제외될 수 있다.

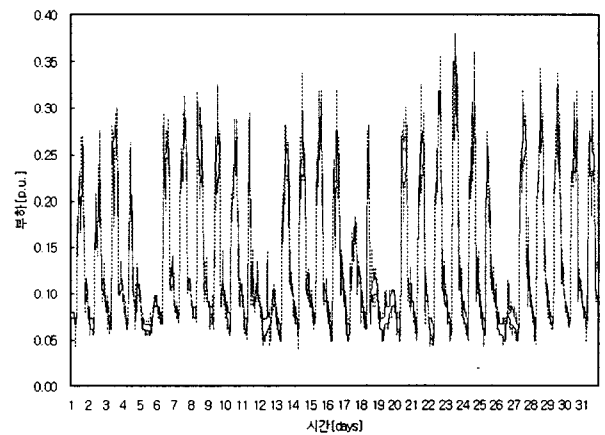


그림 1 상업 지역 75[kVA] 변압기의 7월 부하 곡선
Fig. 1 Load curve of 75[kVA] transformer on commercial area in July

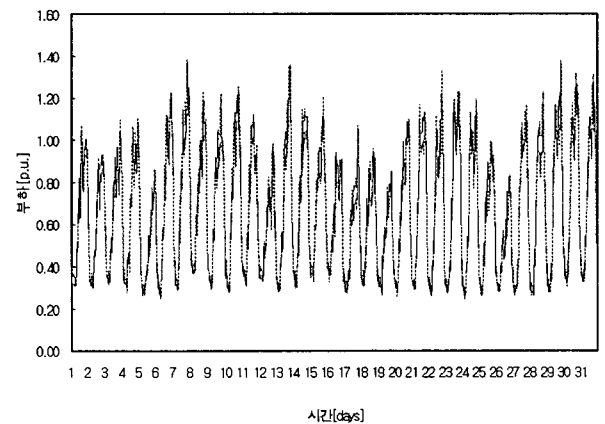


그림 2 상업 지역 100[kVA] 변압기의 7월 부하 곡선
Fig. 2 Load curve of 100[kVA] transformer on commercial area in July

그림 2는 배전용 변압기의 부하 순환 형태를 나타내는 일반적인 월 부하 곡선이다. 이러한 형태의 부하는 순환되는 시간에는 부분적으로 과부하가 발생될 수 있다.[4,5] 이러한 현상은 배전용 변압기의 일반적인 특성이다. 즉, 하루 동안에 발생하는 손실의 평균은 일정한 수명 손실률을 가지게

된다. 그러나 배전 시스템의 사고나 수용가의 증가에 의해 변압기의 부하 분담이 증가되어 과부하의 기간 또는 그 크기가 증가할 수 있다. 이러한 부하의 증가는 변압기 자체의 수명 손실률을 증가시킬 뿐 아니라 수명을 단축시키게 된다. 따라서 변압기의 상태를 지속적으로 측정하여 사고에 대한 예방을 할 필요가 있다.

그림 3은 위험 과부하(emergency overload)를 포함하는 월 부하 곡선이다. 부하 크기 2.0[p.u.]를 넘는 위험 과부하가 한 달에 두 번 정도 나타난 것을 알 수 있고, 주중의 최대 부하 크기가 2.0[p.u.]에 가깝게 발생하였다. 일반적으로 위험 과부하는 변압기 내부 권선의 최고 온점을 변압기 폭발 사고나 소손 사고의 원인이 될 수 있는 영역까지 상승시킬 수 있다. 이러한 사고를 피하기 위해서는 변압기의 운전 에 따라 발생하는 내부 온도에 종속되는 변압기 온도 시정수(thermal time constant)이내에서 위험 과부하가 판단되는 변압기를 배전 시스템에서 차단시켜야 한다. 왜냐하면 변압기의 유온 상승이 발생되기 전에 부하의 크기에 의해서 사고가 발생할 수 있기 때문이다. 이러한 위험 과부하의 영역은 2.0[p.u.]로 설정되어지고, 그 부하의 제한 시간은 일반적으로 30분으로 정해진다[4]. 따라서 본 논문에서는 변압기의 진단 기법에 부하 크기를 이용하여 위험을 판단하였다.

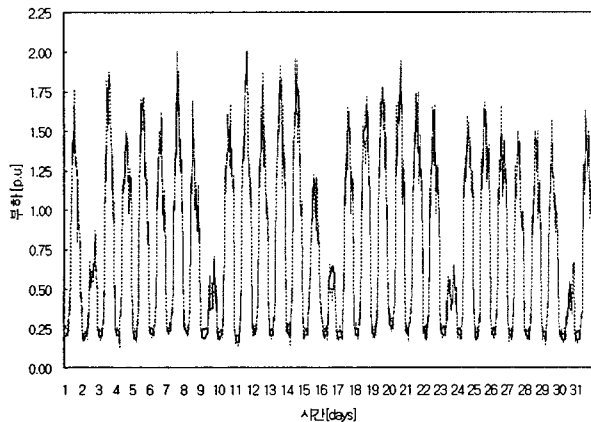


그림 3 상업지역 50[kVA] 변압기의 8월 부하 곡선
Fig. 3 Load curve of 50[kVA] transformer on commercial in August

2.2.2 운전 제한 조건을 이용한 유온 상승비

전기 기기의 정격 용량은 대부분 그 기기에 사용되는 절연물의 허용 최고 온도에 의해 결정된다. 변압기의 온도 상승 한도는 허용되는 최고 온도와 각 규격이 적용되는 장소의 냉매 온도(주변 온도)에 기초한다. 배전용 변압기가 정격 용량으로 연속 운전된 경우 30년 정도의 수명을 전제로 하고 있다[12]. 변압기 운전 에 대한 유온 상승 한도는 다음의 표 1, 표 2에 나타내었다. 표 1은 국내 적용 기준인 3[MVA] 이하 배전용 변압기의 경우로 외기와 직접 접촉하는 방식이므로 유온 상승 한도가 50[K]가 적용된다. 표 2는 각 규격의 유입 변압기에 대한 유온 상승 한도이다[12].

표 1 유온 상승 한도(KSC 3[MVA] 이하 배전용 변압기 : 1999)

Table 1 Limitation of oil temperature rising(KSC Distribution transformers not more than 3MVA for 22.9[kV] : 1999)

변압기의 부분	온도 측정 방법	온도 상승 한도[K]
권선	저항법	55
절연유	외기와 직접 접촉 ○	50
	외기와 직접 접촉 ×	55

표 2 각 규격의 변압기 유온 상승 한도의 비교

Table 2 Limitation of oil temperature rising for transformer on each standards

변압기의 부분	온도 측정 방법	냉각 방식	JEC-204 [K]	ANSI C57.12 [K]	IEC 76 BS 171 [K]
권선	저항법 (유입)	오일 자연 순환	55	65	65
		오일 강제 순환	60	65	65(70)
절연유	온도계법	외기와 직접 접촉 ○	50	65	60
		외기와 직접 접촉 ×	55	65	55

본 논문에서는 일정 기간 수명의 기준이 되는 온도 상승 한도를 변압기의 유온 상승비 기준으로 설정하였다. 예를 들어 유입 변압기이며 오일의 자연 순환에 의한 냉각 방식을 가지고 외기와 직접 접촉이 있는 배전용 변압기의 경우에는 한국 공업 규격이 제정한 온도 상승 한도인 50[K]가 기준값이 될 수 있으며, 일반적인 유온 상승비 RTO는 다음 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$RTO = \frac{\theta_T - \theta_a}{\theta_r} = \frac{\Delta \theta_T}{\theta_r} \tag{4}$$

$\Delta \theta_T$ 는 주변 온도에 대한 최상부 유온 상승이고, θ_r 는 유온 상승 제한이다. 유온 상승비가 1 이상이면 최상부 유온 상승이 유온 상승 제한을 넘어서므로 위험 운전영역에 들어서게 되고, 변압기의 수명을 단축시키는 요인이 된다. 본 논문에서는 배전용 변압기의 유온 상승의 위험 판별을 위하여 유온 상승비를 사용하였다. 이 후 온도의 단위를 본 논문에서는 [°C]로 사용하였다.

2.2.3 최상부 유온을 이용한 수명 손실 계산

유온 상승비에 의해서도 변압기의 위험을 판별할 수 있으나, 보다 효율적인 진단을 위해서는 변압기 이력에 포함될

진단 방법이 필요하다. 변압기 수명을 평가하는 방법은 수학적 모델에 의한 분석적인 방법으로 이루어진다. 이것은 변압기의 운전에 따른 결과로써 절연유 및 권선의 소손 상태 등의 종합적인 평가로써 표현된다[1]. 이러한 평가 방법으로 변압기에 대한 수명 예측 방법을 이용하고 있다. 변압기의 수명은 절연 재료의 열적 열화에 의한 절연 저하에 좌우되며, 절연 재료의 수명은 변압기의 최고 온점 온도(hot spot temperature)가 80~140[°C]의 범위에서 Arrhenius의 수식이나 Monstinger의 법칙에 의해 설명된다. 이것을 기준 온도 98[°C] 대한 상대적인 수명 손실비(relative ageing rate) V는 식 (5)와 같이 나타낸다[4].

$$V = \frac{\text{ageing rate at } \theta_h}{\text{ageing rate at } 98^\circ\text{C}} = 2^{(\theta_h - 98)/6} \quad (5)$$

θ_h 는 최고 온점 온도이고, 정격 운전에서의 최고 온점 온도 98[°C]을 기준으로 설정하였다. 변압기의 수명 손실에 의한 수명 계산 방법은 배전용 변압기에 대한 열적 특성을 이용하는 방법이다. 그러나 최고 온점에 대한 정확한 측정을 하기에는 대단히 어려운 작업이고, 측정 센서를 배전용 변압기에 적용하기에는 경제적 부담이 있다. 따라서 보다 측정이 용이한 수명 손실 계산이 필요하다. 정격 부하에 대한 최고 온점 온도는 자연 냉각 방식의 배전용 변압기의 경우에 다음과 식 (6)과 같이 표현된다[4].

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_T \left[\frac{1 + RK^2}{1 + R} \right]^x + Hg_r K^y \quad (6)$$

식 (6)에서 x는 오일 지수(oil exponent), y는 권선 지수(winding exponent)이고, Hg_r 는 최고 온점에서 최상부 유온으로 열이 전달되는 동안에 발생하는 열 발산(hot spot to top oil gradient)을 의미한다. 배전용 변압기에 대한 지수 및 상수의 값은 표 3과 같다. 오일과 권선 지수의 값은 자연 순환 냉각에 의한 지수 값이며, 최상부 유온 상승 55[°C]는 상대적 수명 손실률의 기준 온도가 되는 98[°C]에서 설정된 주변 온도 20[°C]에 대한 온도 상승 값이다.

표 3 배전용 변압기의 열적 특성
Table 3 Thermal characteristic of distribution transformer

파라미터	배전용 변압기
x	0.8
y	1.6
$\Delta\theta_T$	55[°C]
θ_a	20[°C]
Hg_r	23

최고 온점 온도는 최상부 유온으로부터 추정될 수 있으며, 배전용 변압기의 경우 다음 식 (7)과 같이 예측될 수 있다[8].

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_T + Hg_r K^{1.6} \quad (7)$$

식 (7)은 정격 부하시의 최고 온점 온도의 예측 식인 식 (6)에서 최고 온점 온도와 최상부 유온의 차인 $Hg_r K^y$ 을 이용하였다. 식 (5)의 지수 부분에 θ_h 대신 식 (7)를 대입하면 새로운 수명 손실비 V' 를 계산할 수 있다.

$$V' = 2^{[\theta_a + \Delta\theta_T + Hg_r K^{1.6} - 98]/6} \quad (8)$$

결국, 식 (8)은 최고 온점을 이용한 상대적 수명 손실비를 최상부 유온을 이용하여 다시 표현한 식이다. $\Delta\theta_T$ 는 최상부 유온 상승이 된다. 즉, 본 논문에서는 변압기의 일정 주기 동안의 수명 손실의 기준을 최상부 유온을 이용하여 설정하였다. 일정 기간 동안에 사용된 최상부 유온을 이용한 변압기의 수명 손실 L은 식 (9)와 같이 표현된다[4].

$$L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_n' \quad (9)$$

식 (9)은 부하의 주기 동안에 계산된 수명 손실 값으로 이용될 수 있으며, 측정 시간 동안의 평가 지수가 된다. N은 주기 안의 총 측정 샘플수가 되며, V_n' 은 n번째 측정된 최상부 유온을 이용한 수명 손실비이다. 본 논문에서는 배전용 변압기의 수명 손실 계산을 위하여 위 수식을 사용하였으며, 유온 상승 실험을 통하여 실제 변압기 상태 평가의 정량적인 지수로 이용할 수 있는 가능성을 검증하였다.

3. 배전용 변압기 진단 장치 및 진단 알고리즘

그림 4와 같이 진단 장치를 위한 소프트웨어의 구성은 크게 진단 장치에 들어가는 프로그램과 진단용 PC에 들어가는 프로그램으로 나누어진다. 측정 프로그램은 센서로부터 취득한 변압기 상태 데이터와 부하 데이터와 함께 메모리에 저장한다. 데이터 베이스는 각 변압기의 이력에 따라 관리하여 과거의 상태 정보와 현재의 상태 정보의 비교 분석을 통해 변압기의 사고 예방을 가능하게 된다.

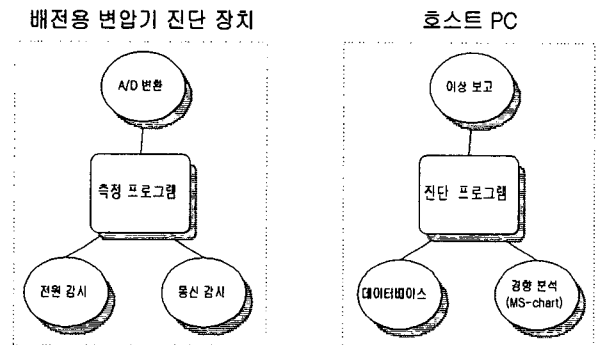


그림 4 진단 장치를 위한 소프트웨어의 구성
Fig. 4 Software configuration of diagnosis device

진단용 PC에 적용된 알고리즘은 그림 5와 같다. n은 변압기에서 n번째 측정된 데이터를 의미하고, N은 변압기의 평가 주기에 측정되는 총 샘플 수를 의미한다. 데이터의 입력은 온도 센서가 설치된 최상부 유온과 주변 온도 및

CT(current transformer)로부터 읽어 들인 부하 전류 값이다. 먼저 전류비 계산을 통하여 부하의 크기에 대한 변압기의 위험 판단을 하였다. 다음 단계에서는 유온 상승비 계산을 통하여 유온 상승 위험 판단을 하였다. 마지막으로 주어진 변압기 평가 기간 동안의 수명 손실을 계산하였다. 즉, 변압기 운전 상태에 대해서는 정해진 평가 주기에 대한 수명 손실을 계산하여 운전에 따른 손실 정도를 파악하게 하였다.

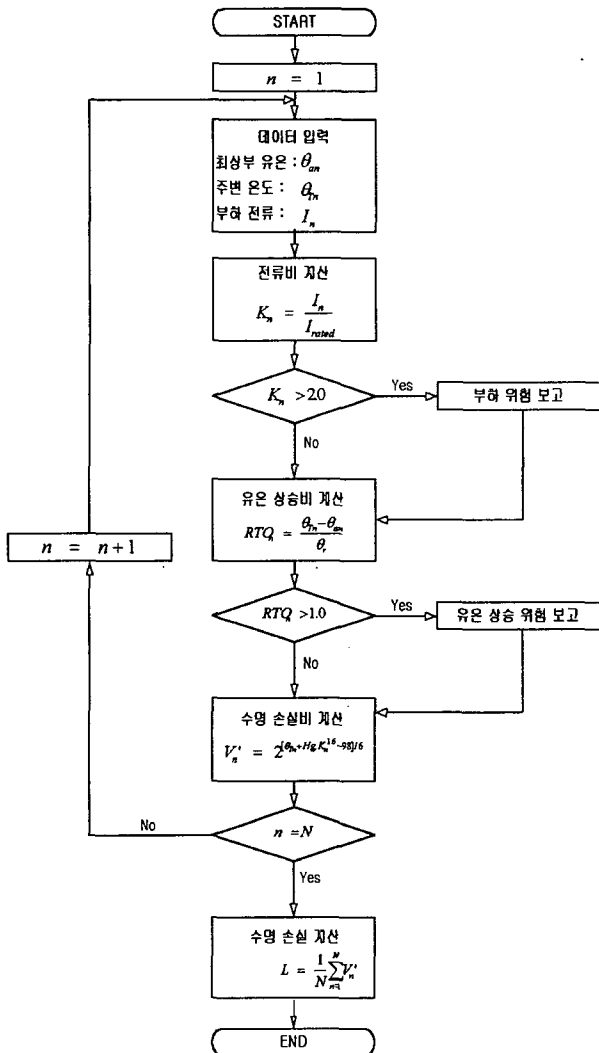


그림 5 진단 프로그램 알고리즘
Fig. 5 Algorithm of diagnostic program

4. 진단 장치에 의한 유온 상승 실험

제안된 진단 기법 및 장치의 검증을 위해 변압기 유온 상승 실험을 실시하였다. IEEE에서 제시한 변압기 유온 상승 실험인 반환 부하법(loading back method) 시뮬레이션을 하였다[9,11]. 실험용 변압기는 사용 이력이 틀린 30[kVA] 변압기 두 대를 대상으로 실험하였다. 유온 상승을 위하여 변압기에 인가된 부하는 현장에서 실측된 부하 데이터에 의한 부하 모델을 사용하였다. 부하 모델은 시간당 평균치를 이

용하는 모델과 IEC의 부하 등가 모델로 이루어졌다[4]. 온도 상승의 측정은 부하 모델의 과부하 영역을 위주로 측정하였으며, 측정된 최상부 유온을 이용하여 수명 손실을 계산하였다. 수명 손실에 대한 계산은 기준이 되는 최상부 유온 상승 55[°C]이상에 대하여 계산하였다.

4.1 반환 부하법 실험 장치의 구성

본 논문에서는 반환 부하법에 의한 유온 상승 실험을 실시하였다. 반환 부하법은 그림 6과 같이 동일 정격의 두 대 변압기를 병렬로써 고압, 저압 권선을 결선하였다. 저압측 결선에 정격 주파수의 정격 전압을 인가하여 철손에 해당하는 전압을 인가하여 생성된 부하 전류에 의해 동손이 공급된다. 유온 상승 실험을 위해 구성된 반환 부하 실험 장치의 구성은 그림 7과 같다. 반환 부하법 실험 장치는 부하의 크기에 대하여 30[kVA] 변압기를 기준으로 0~1.5[p.u.]로 가변되어 진다. 실험용 유입 변압기는 간이 수리용 30[kVA] 주상 변압기로 설정하였으며, 이는 경년이 진행된 변압기에 대하여 유온 상승 실험을 하기 위해서다.

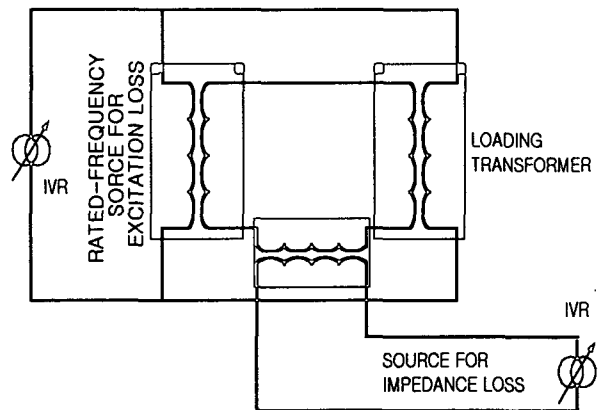


그림 6 반환 부하법 결선도
Fig. 6 Loading back method connections

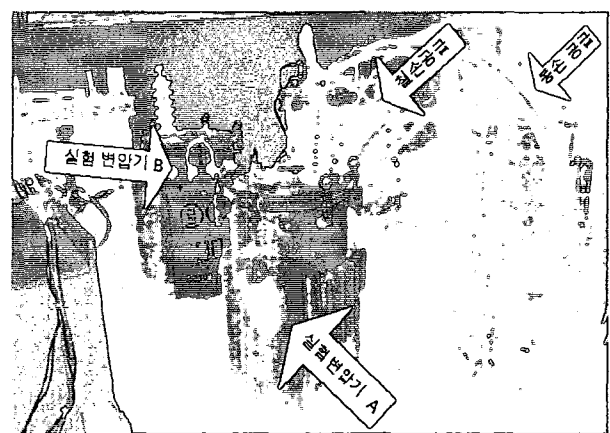


그림 7 유온 상승 실험 장치의 구성
Fig. 7 Configuration of oil temperature rising test device

두 대의 실험용 변압기의 시방은 다음 표 4와 같다. 변압기의 제조 년월과 수리 년월을 보면 각 변압기의 노후한 정도를 알 수 있다. 주변 온도에 대한 측정은 10~20[°C]을 유지하였으며, 경우에 따라 0~10[°C]에서 측정된 사례도 있다. 최상부 유온 상승은 최상부 유온과 주변 온도의 차로써 최종 온도 상승의 결정은 온도 상승이 2.5[%] 또는 시간당 온도 변화율이 1[°C] 이상 변화하지 않은 때로 결정하였다.[10] 유온의 측정은 유면으로 부터 50[mm] 정도에 담가진 PT100 센서에 의하여 측정되었다[10].

표 4 실험용 변압기 이력
Table 4 Test transformers's profile

실험 변압기 A				
권철심형 변압기(일단 접지)				
용량	30 [kVA]	주파수	60[Hz]	옥외용
정격	1차측		2차측	
	22900 Grd Y/12600[V]		115/230[V]	
	2.4[A]		730/260[A]	
%임피던스		3.7[%] at 75[°C]		
BIL 125[kV]		감극성		
온도 상승	유		50[°C]	
	권선		55[°C]	
제조 년월		1971. 12.		
105[V] 지역 표준 13800[V]				
230[V] 지역 표준 12600[V]				
간이 수리품				
수리 년월		1989. 4.		

실험 변압기 B				
단상 변압기(일단접지)				
용량	30 [kVA]	주파수	60[Hz]	옥외용
정격	1차측		2차측	
	12600[V]		115/260[V]	
	2.38[A]		730.4/ 260.6[A]	
%임피던스		3.3[%] at 75[°C]		
온도 상승	유		50[°C]	
	권선		55[°C]	
제조년월		1977. 12.		
105[V] 지역 표준 13800[V]				
230[V] 지역 표준 12600[V]				
간이 수리품				
수리년월		1993. 7.		

4.2 변압기 유온 상승 실험 결과 분석

개발된 진단 장치의 검증을 위하여 실험 변압기 별로 유온 상승 실험을 실시하였다. 유온 상승 실험은 부하에 따른 최상부 유온 상승 실험, 각 실험 변압기의 열적 특성을 파악하기 위한 정격 부하에서의 최상부 유온 상승 실험을 실시하였다. 또한 부하 모델을 통해 과부하에 의한 유온 상승 실험을 실시하였다. 일 부하 모델은 현장에서 측정된 부하 데이터를 이용하였다.

4.2.1 정격 운전에 대한 유온 상승 실험

실험 변압기 A, B를 대상으로 정격 부하에 대한 유온 상승 실험을 실시하였다. 변압기의 열적 특성은 정격 부하에 대한 측정이 기준으로 사용된다. 그림 8은 각 실험 변압기의 최상부 유온 상승을 나타낸 그래프이고, 표 5에는 실험 변압기의 정격 부하에 대한 최상부 유온 상승 실험에 대한 환경 및 결과값을 나타내고 있다. 정격 운전에 대한 유온 상승 실험은 변압기에 대해서 총 손실을 인가하였다.

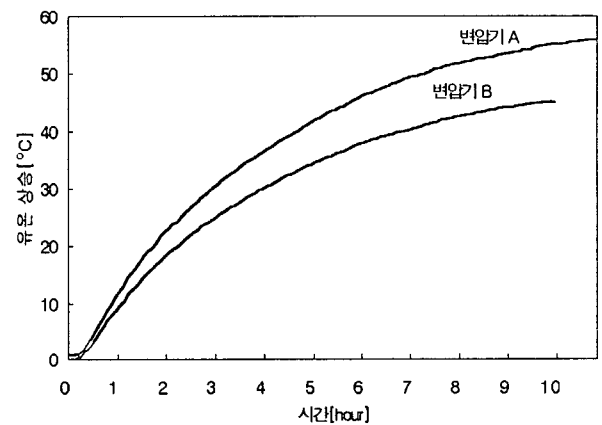


그림 8 실험 변압기 A, B의 정격 부하시의 최상부 유온 상승

Fig. 8 Top oil temperature of rated load current about test transformer A, B

표 5 실험 변압기들의 유온 상승 비교

Table 5 Comparison of top oil temperature of test transformers

실험 변압기	주변 온도 변화[°C]	최상부 유온 상승[°C]	최상부 유온 상승 시간[hour]	유온 상승비 (RTO)
A	16.6~17.7	56.0	10.75	1.12
B	12.9~14.9	45.1	9.92	0.90

실험 변압기 A의 경우 온도 상승 시간은 약 11시간 정도 걸렸으며, 주변 온도에 대한 최상부 유온 상승은 56.0[°C]이 측정되었다. 실험 변압기 B의 경우 주변 온도에 대한 최상부 유온의 상승은 약 10시간 정도 걸렸으며, 최상부 유온 상승은 45.1[°C]로 기록되었다. 각 실험 변압기의 유온 상승비 계산은 실험 변압기 A의 경우 1.12로 계산되어 변압기의

정격 운전에 대하여 유온 상승 위험 판정이 된다. 실험 변압기 B의 경우 0.90으로 계산되어 정격 운전에 대하여 유온 상승 정상 판정이 된다. 따라서 실험 변압기 B의 경우는 정격 부하 이하의 운전에 대해서는 아직은 더 운전을 지속할 수가 있다.

4.2.2 부하 모델에 의한 유온 상승 실험

최상부 유온에 의한 수명 손실을 계산하기 위해서 부하 모델을 통한 유온 상승 실험을 실시하였다. 부하 모델을 현장에서 실측한 데이터를 이용하여 시간당 평균 부하 모델과 IEC의 등가 부하 모델을 만들었다. 시간당 평균 부하 모델에 대해서는 실험 변압기 A에 대해서 실험하였고, IEC 등가 부하 모델에 대해서는 실험 변압기 A, B를 통하여 실험하였다.

4.2.3.1 시간당 평균 부하 모델에 의한 유온 상승 실험

유온 상승 실험에 적용된 일 부하 모델은 그림 9, 그림 10과 같이 현장에서 실측된 상업 지역과 주거 지역의 일 부하 곡선을 이용하여 만들었다. 부하 모델은 일 부하의 매시간 평균치가 적용되었다.

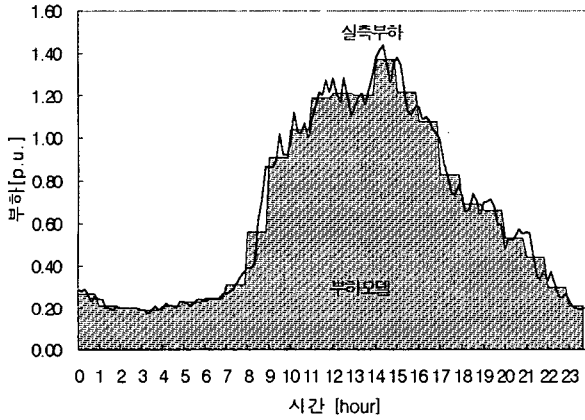


그림 9 시간당 평균을 적용한 상업 지역 일 부하 모델
Fig. 9 Daily commercial load model using average by an hour

표 6에서는 각 실측 부하와 시간당 평균을 적용한 부하 모델간의 비교를 나타내었다. n은 측정 횟수이며, K_n 은 n번째 샘플에 대한 전류비이다. N은 일 주기에 대한 샘플 수이므로 실측된 데이터의 경우 10분 간격으로 $N=144$ 이다. 즉, $(\sum K_n)/N$ 는 전류비에 대한 평균치가 되며, $(\sum K_n^2)/N$ 은 전류비의 제곱에 대한 평균치가 된다. 특히 전류비의 제곱에 의한 비교는 유온 상승의 원인이 되는 변압기 내부 손실이 부하 전류의 제곱과 관련 있기 때문이다[9]. 상업 지역에 대한 전류비의 제곱에 대한 평균치만 약간의 차이가 있을 뿐 부하 모델과 실측 부하가 거의 같음을 알 수 있다.

시간당 평균을 적용한 부하 모델의 유온 상승 실험의 경우는 과부하 영역의 1시간 전부터 부하를 인가하였으며, 실험의 종료 시점을 과부하 이후의 유온 상승 값이 55[K] 이내 측정되었을 때로 결정하였다. 그림 11은 상업 지역 부하 모델에 대하여 측정된 유온 및 주변 온도의 그래프이다. 주변 온도는 15~15.9[°C]를 유지하였으며, 최상부 유온 상승의 최대 값은 65.2[°C]를 기록하였다.

실험의 종료 시점을 과부하 이후의 유온 상승 값이 55[K] 이내 측정되었을 때로 결정하였다. 그림 11은 상업 지역 부하 모델에 대하여 측정된 유온 및 주변 온도의 그래프이다. 주변 온도는 15~15.9[°C]를 유지하였으며, 최상부 유온 상승의 최대 값은 65.2[°C]를 기록하였다.

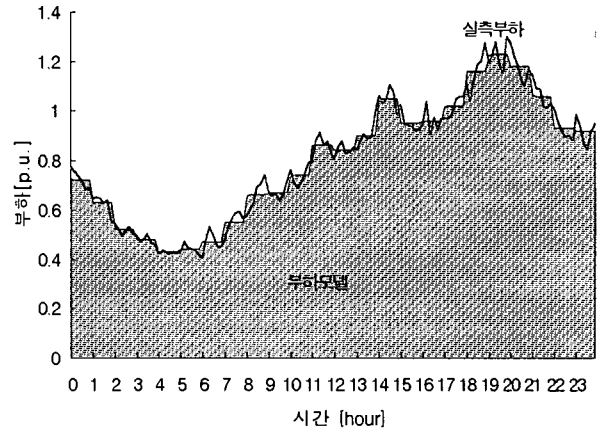


그림 10 시간당 평균을 적용한 주거 지역 일 부하 모델
Fig. 10 Daily residential load model using average by an hour

표 6 실측 부하와 시간당 평균을 적용한 부하 모델의 비교

Table 6 Comparison real measured load with load mode using average by an hour

부하		상업 지역	주거 지역
실측 부하	$(\sum K_n)/N$	0.64	0.81
	$(\sum K_n^2)/N$	0.58	0.71
부하 모델	$(\sum K_n)/N$	0.64	0.81
	$(\sum K_n^2)/N$	0.57	0.71

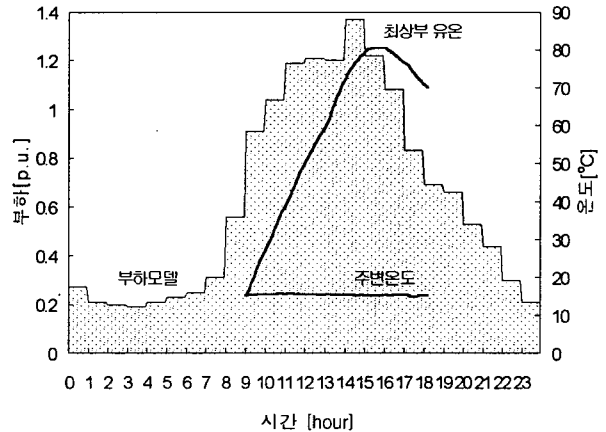


그림 11 시간당 평균을 적용한 상업 지역 부하 모델에 대한 최상부 유온 상승
Fig. 11 Top oil temperature rising of daily commercial load model using average by an hour

주거 지역 부하에 대하여 실시된 온도 상승 실험의 결과는 그림 12와 같다. 주거 지역 모델의 경우, 그래프의 오른쪽에 유온이 연속되는 것으로 보이는데, 이는 일 부하 모델이 하루를 주기로 순환된다고 보고 전날 유온 하강 곡선으로 표현한 것이다. 주변 온도는 13.4~13.9[°C]를 유지하였으며, 최대 유온 상승은 61.9[°C]를 기록하였다. 표 7는 시간당 평균을 적용한 부하 모델의 실험 환경과 유온 상승비 및 온도 상승에 대한 수명 손실을 계산하였다. 상업 지역과 주거 지역 모두 최대 유온 상승비가 기준값 1.0을 넘어서 각 실험 변압기의 과부하 운전에 대하여 위험 판정을 내렸다. 수명 손실의 계산은 최상부 유온 상승을 이용한 수명 손실비 V'을 이용하여 계산하였다. 상업 부하 모델의 경우 실험 변압기 사용 시간, 과부하 시간 7[hour]에 대하여 3.38[day]의 수명 손실이 계산되었으며, 주거 지역 부하 모델의 경우 6[hour]에 대하여 1.00[day]가 계산되었다.

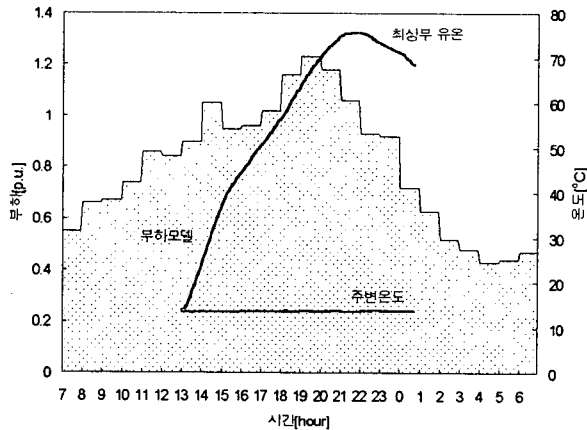


그림 12 시간 평균을 적용한 변화가 부하 모델에 대한 과부하 유온 상승

Fig. 12 Top oil temperature rising of daily residential load model using average by time

표 7 시간 평균치에 부하 모델 실험 결과

Table 7 Test results of daily load model using average by hour

시간당 평균 부하 모델	과부하 시간 [hour]	주변 온도 변화[°C]	최대 유온 상승비 (RTO)	수명 손실 계산값 [day]
상업 지역	7	15.0~15.9	1.30	3.38
주거 지역	6	13.4~13.9	1.23	1.00

4.2.3.2 IEC 방식에 의한 부하 모델의 유온 상승 실험

IEC의 부하 모델 방식에 의해 그림 13, 그림 14와 같이 부하 모델을 만들었다. 상업 지역 부하 모델이 주거 지역 부하 모델에 비해 기본 부하의 크기는 작으나 과부하의 크기와 시간이 더 크다. 부하 모델과 실제 부하의 평가는 표 8과 같다. 전류비의 평균치는 차이가 없으나 전류비의 제곱

에 대한 평가는 부하 모델이 더 크게 나타났다. 부하 모델에 의한 유온 상승이 실제 부하보다는 더 높게 기록될 수 있음을 의미한다.

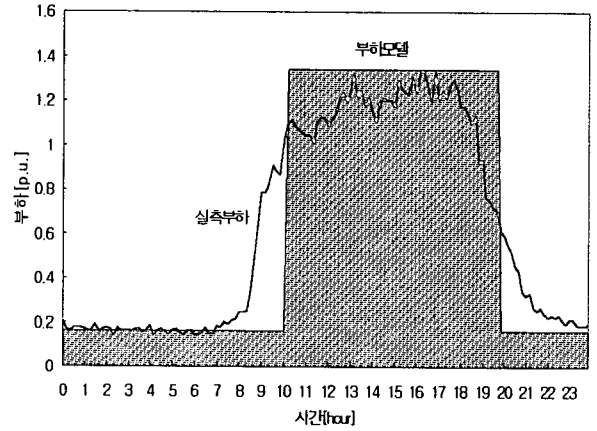


그림 13 IEC 방식에 의한 상업 지역 부하 모델
Fig. 13 Daily commercial load model by the IEC method

IEC 방식을 이용한 부하 모델에 대한 유온 상승 실험은 각 실험 변압기에 대하여 실시하였으며, 그림 15는 상업 지역 부하 모델에 대한 유온 상승 실험의 결과 그래프이고, 그림 16은 주거 지역 부하 모델인 실험 변압기 B에 대한 유온 상승 실험의 결과 그래프이다. 실험의 시작은 과부하 이전의 일반적인 변압기 온도 시정수인 2시간 반 이전에 부하를 인가하였으며, 실험의 종료는 1시간 평균치를 적용한 부하 모델 실험과 마찬가지로 최상부 유온 상승이 55[°C] 이내에 들어서는 시점에서 종료하였다. 각 실험 변압기에 대하여 과부하 유온 상승의 측정 시간은 상업 지역의 경우 약 14시간, 주거 지역의 경우 약 13시간 정도 걸렸다. 주변 온도 변화는 실험 변압기 A의 경우 13~14.9 [°C] 이내에서 측정되었으며, 실험 변압기의 B의 경우 실험 변압기 A보다는 낮은 주변 온도에서 측정되었다.

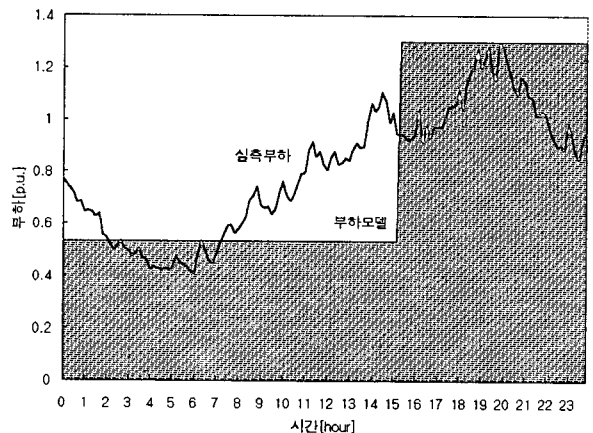


그림 14 IEC 방식에 의한 주거 지역 부하 모델
Fig. 14 Daily residential load model by the IEC method

표 8 실측 부하와 IEC 부하 모델의 비교
Table 8 Comparison real measured load with load model by the IEC method

부하		상업 지역	주거 지역
실측 부하	$(\sum K_n)/N$	0.63	0.81
	$(\sum K_n^2)/N$	0.61	0.71
부하 모델	$(\sum K_n)/N$	0.64	0.81
	$(\sum K_n^2)/N$	0.74	0.79

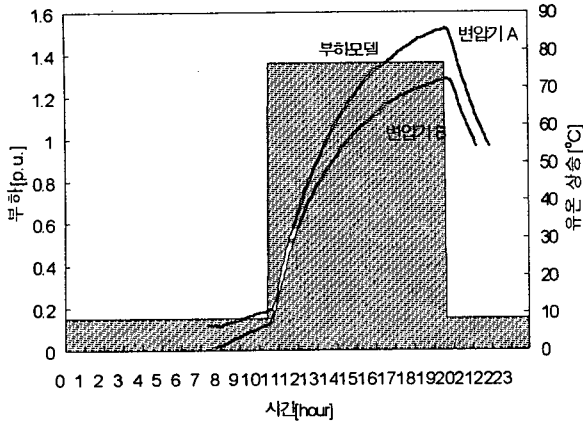


그림 15 IEC 방식에 의한 상업 지역 부하 모델의 변압기 A 최상부 유온 상승 실험

Fig. 15 Transformer A's the top oil temperature rising test of daily commercial load model by the IEC method

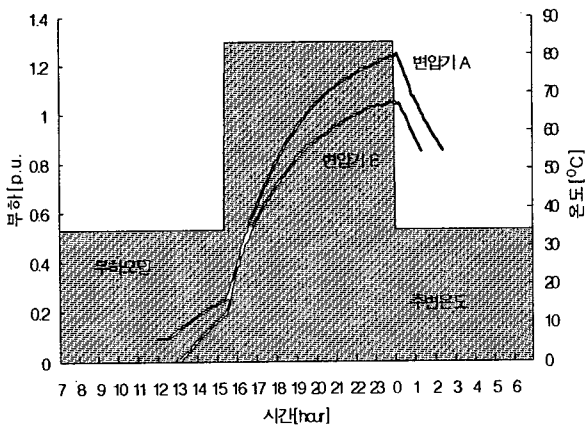


그림 16 IEC 방식에 의한 주거 지역 부하 모델의 변압기 A 최상부 유온 상승 실험

Fig. 16 Transformer A's the top oil temperature rising test of daily residential load model by the IEC method

표 9는 IEC 부하 모델을 이용한 각 유온 상승 실험에 대한 결과를 나타내고 있다. 과부하의 유온 상승에 대한 최대 유온 상승비는 실험 변압기 A의 경우 상업 지역이 1.71, 주

거 지역이 1.60이 계산되었고, 실험 변압기 B의 경우 상업 지역이 1.45, 주거 지역이 1.35로 계산되었다. 최대 유온 상승비는 각 변압기에 대하여 상업 지역 및 주거 지역이 위험 판정이 나왔다. 최상부 유온을 이용한 수명 손실비 V'를 가지고 측정 시간, 즉 변압기 사용 시간에 대한 수명 손실을 계산하였다. 실험 변압기 A가 실험 변압기 A보다는 높은 수명 손실이 계산되었고, 상업 지역이 주거 지역 보다 더 높은 수명 손실이 계산되었다. 이는 실험 변압기 A가 실험 변압기에 대하여 더 같은 부하에 대하여 더 심각한 수명 손실을 가지고 있는 것으로 평가된다. 상업 지역의 경우 주거 지역보다 과부하 크기, 과부하 시간이 더 크기 때문이다. 특히 변압기 A의 상업 지역인 경우 과부하 9.67시간에 대한 수명 손실이 27.59[day]로 계산되었다.

표 9 IEC 방식에 의한 부하 모델 실험 결과
Table 9 Test results of daily load model by the IEC method

부하 모델		과부하 시간 [hour]	주변 온도 변화[°C]	최대 유온 상승비 (RTO)	수명 손실 계산값 [day]
실험 변압기 A	상업 지역	9.67	14.0~14.9	1.71	27.59
	주거 지역	8.83	13.0~13.2	1.60	8.61
실험 변압기 B	상업 지역	9.67	3.8~6.7	1.45	3.42
	주거 지역	8.83	8.9~11.1	1.35	2.12

5. 결 론

본 논문에서는 배전용 변압기의 진단 기법에 대하여 연구 하였다. 배전용 변압기의 수명은 부하의 변동, 과부하의 영향 등에 의한 열적인 특성에 크게 영향을 받는다. 변압기 열적 특성 중의 유온 상승을 이용한 변압기의 진단 기법을 제시하였다. 유온 상승은 변압기의 부하 전류에 의한 손실에 직접적인 관련이 있으므로 유온 상승의 측정을 통해 변압기의 손실 정도를 알 수 있다. 서울 지역에서 직접 측정된 부하 곡선을 분석한 결과 정격 이하의 운전, 부분적인 과부하 운전, 위험 과부하 운전 등으로 분류가 되었다. 부분적인 과부하 운전이나 위험 과부하 운전에 대해서는 진단 기법을 적용하였다. 위험 과부하 운전에 대해서는 유중 온도 상승 제한과 부하 전류의 크기 제한을 이용한 위험 진단을 사용하였다. 그리고 일반적인 과부하 운전에 대해서는 최상부 유온을 이용한 수명 손실을 계산하는 기법을 사용하였다. 배전용 변압기 진단 장치의 검증을 위하여 실험실에서 반환 부하법을 이용하여 유온 상승 실험을 실시하였다. 유온 상승 실험을 위한 부하 모델은 현장에서 취득된 데이터를 가지고 IEC의 부하 모델 방식과 시간당 평균을 이용한 방식을 이용하여 구성하였다. 실험에 사용된 변압기는 경년에서 차이가 있는 주상 변압기로 실시하였다. 그리고 각 부

하 모델과 변압기에 의해 측정된 유온 상승에 대해서 최상부 유온을 이용한 수명 손실을 계산하였다.

감사의 글

“이 논문은 (1998)년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음”

참 고 문 헌

[1] D. Allan et al., “Transformer Insulation Condition Monitoring, Life Assessment and Life Extension Technique in Australia,” *CIGRE paper 12-101*, 1992. 8.

[2] 김재철 외, “무선데이터 통신을 이용한 주상 및 지상 변압기 진단에 관한 연구”, ‘1999 대한전기학회 하계학술대회 논문집(C권)’, pp. 1431-1433, 1999. 7.

[3] F. Cosaert et al., “Dynamic Analysis of Thermal Behaviour of Transformers using Optical Fiber Measurements,” *CIGRE paper 12-305*, 1992. 8.

[4] IEC Publication 354, Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers, 1991.

[5] B.C. Leisuture et al., “An Improved Transformer Top Oil Temperature Model for Use in An On-Line Monitoring and Diagnostic System,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, pp. 249-256, 1997. 1.

[6] J.A. Jardini et al., “Distribution Transformer Loading Evaluation Based on Load Profiles Measurements,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 12, No. 4, pp. 1766-1770, 1997. 10.

[7] M. LeHuy et al. “Methodologies for Lifetime Predictions of Rubber using Arrhenius and WLF models,” *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, pp. 135-141, 1998. 10.

[8] M.V. Thaden et al., “Temperature Rise Tests on a Forced-Oil-Air(FOA) Cooled Core-Form Transformer, Including Loading Beyond Nameplate.” *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, pp. 913-924, 1997. 4.

[9] A.W. Galli et al., “Temperature Rise of Small Oil-filled Distribution Transformers Supplying Nonsinusoidal Load Currents,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 283-291, 1996. 1.

[10] IEEE Std C57.12.90-1993, IEEE Standard Test Code for Liquid Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit testing of Distribution and Power transformers

[11] IEEE Std C57.12.100-1992, IEEE Standard Test Procedure for Thermal Evaluation of Oil-Immersed Distribution Transformers

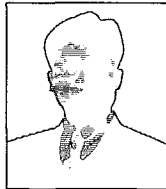
[12] 박광현, 정해상 편저, 변압기 기술 백과, 승지사, 1992.

제 자 소 개



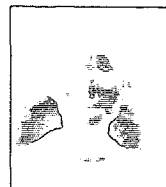
최도혁 (崔度赫)

1962년 3월 9일 생. 1988년 2월 숭실대 전기공학과 졸업. 1991년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 9월~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1990년 12월~현재 한국건설기술연구원 선임연구원
E-mail : dhchoi@kict.re.kr



윤용한 (尹龍漢)

1967년 10월 1일 생. 1990년 2월 숭실대 전기공학과 졸업. 1992년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 3월~현재 숭실대 생산기술연구소 연구원
E-mail : nofate@ee.ssu.ac.kr



민경래 (閔庚洙)

1971년 11월 8일 생. 1998년 2월 숭실대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 3월~현재 (주)테크빌 선임연구원
E-mail : micmac@techvill.co.kr



김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일 생. 1979년 2월 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 8월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988년 3월~현재 숭실대 전기공학과 교수
E-mail : jckim@ee.ssu.ac.kr