

과부하에 따른 배전용 변압기의 절연유 열화검출

(Analysis of Transformer Fluid Aging from Overload Operation)

정종만 · 이병성 · 김주용 · 송일근 · 김병숙

(Jong-man Joung · Byung-sung Lee · Ju-yong Kim · Il-Kun Song · Byung-suk Kim)
(Korea Electric Power Research Institute of KEPCO)

Abstract

In this paper the thermal aging characteristics of transformer fluid were considered. First, the temperature rise characteristic in transformer winding was discussed. The temperatures were rapidly increased immediately with applying load and then the temperature was followed the exponential temperature rise model. Next, Capacitance and leakage current characteristics of the transformer fluid were measured during the over-loading operation. The capacitance of vegetable fluid and leakage current were evidently increased with aging time. So the simple methods could be applied to diagnosis of the transformer aging

1. 서론

에너지 소비 밀도가 높아져 변압기뿐만 아니라 전력설비의 용량증대가 불가피해지고 있으며, 설비의 용량이 증대됨에 따라 정전으로 인한 과급효과가 커지게 되었다. 또한 고객의 서비스 기대심리 또한 높아져 설비의 운영에 대한 질적 향상이 요구되고 있다. 이에 따라 전력설비의 신뢰성 향상이 무엇보다 필요하며, 특히 변압기의 경우 배전 기자재 중 하자발생의 상당부분을 차지하고 있어 품질 개선 및 관리 노력이 필요한 실정이다[1~4].

또한 전력시장의 개방·경쟁체제 하에서는 설비를 더욱 효율적으로 운용할 필요가 있으므로, 설비 투자의 억제와 함께 기설 설비 수명연장이 더욱 중요 시 되어 지고 있다. 이와 같은 상황에서 변압기가 정격이상의 부하에서 운전되는 불가피한, 과부하운전이 이루어질 가능성이 높다. 절연지의 열 열화에 의한 기계력 감소로 변압기의 수명이 정해지고 있어 변압기 권선내부의 온도상승에 대한 면밀한 분석과 변압기의 성능에 주는 영향에 대한 평가가 필요하다. 이러한 특성평가를 통한 설비의 단기·장기 신뢰성 분석[5~6]을 확보하는 것이 무엇보다 중요할 것이다. 그리고 용량의 증대에 따른 변압기의 소형화와 신뢰성 향상과 더불어 친환경 재료의 도입이 큰 이슈가 되고 있다. 따라서 과부하 내량을 증가시키고 경제적인 효과를 최대한 향상시킬 수 있는 새로운 절연시스템의 도입과 그에 따른 변압기 특성 연구 및 도입방안이 필요한 실

정이다.

한편, IT(Information Technology) 기술의 발전과 더불어 다양한 산업에서 IT 기술 기반을 적용하고 있다. 전력부분에서도 시장의 경쟁심화와 효율적인 운영을 위해 IT 기술의 집목을 시도하고 있다. 성공적인 전력 IT기술의 확립 및 적용을 위해서는 설비의 계측 및 진단기술의 확립이 선행되어야 할 것이다. 특히 배전용 변압기의 경우 전력용 변압기에 비해 수량이 많고, 단가가 저렴하여 집목기술의 범위가 매우 제한적인 특징이 있다. 따라서 보다 진단개념이 간단하고 현장 수행 방법이 단순한 기술의 확보가 필요하다[7~9].

이러한 관점에서 배전용 변압기 2대를 시작품으로 제작하고 과부하운전에 따른 절연유의 열화특성을 측정하였다. 시작품 변압기는 표준형 지상변압기와 광유를 대신한 식물유 변압기 각 1대씩을 제작하였다. 이때 전계, 열, 수분, 진동 등 다양한 인자들이 변압기의 열화에 영향을 미치게 되지만, 설계오류나 제조불량 등 변압기 자체 결함이 없는 경우로 정상적인 변압기가 과부하운전을 하였을 경우 기대되는 변압기의 특성을 평가[10,11]하고자 하였다. 또한 정확한 열열화 분석을 위해 열특성을 살펴보았다.

2. 본론

2.1. 시험장치 및 구성

변압기는 철손 및 동손에 의해 열이 발생하고 이 열에 의해 절연지가 열화 된다. 따라서 철손과

동손을 동시에 공급해 줄 수 있고 전기적스트레스도 인가할 수 있는 반환부하법을 많이 사용되고 있지만, 절연지의 경우 열열화에 의한 전기적 특성 변화가 거의 없는 것으로 알려져 주로 열열화에 의한 기계적 특성을 평가하고 있다. 따라서 부하율과 온도만을 고려해 2차 단락법으로 실시하였다.

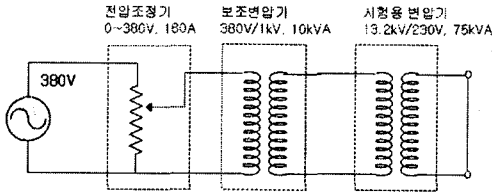


그림 1. 변압기 과부하시험 구성도.
Fig. 1. Line-up for transformer overload test.

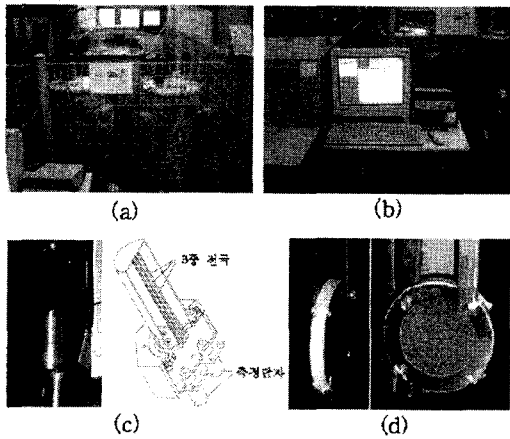


그림 2. (a) 시험용 변압기, (b) 측정부, (c) 절연유 정전용량 측정용 전극, (d) 절연유 누설전류 측정용 센서
Fig. 2. (a) test transformers, (b) measurement system, (c) electrode for capacitance measurement of fluid, (d) porous cell for leakage current measurement of fluid.

그림 1은 가속열화 시험을 위해 구성된 2차 단락법의 시험장치 구성도를 나타낸다. 전원부는 시험전압을 조정하기 위한 전압조정기, 출력 전압을 시험전압만큼 상승시켜주기 위한 보조변압기 그리고 시험변압기로 구성 된다. 그리고 측정부는 부하전류 측정(CT), 권선온도 측정, 절연유 온도 측정부로 나눌수 있고, 권선내부 온도계 13개와 절연유 상부 온도, 대기온도를 측정하였다. 절연유 특성은 정전용량과 누설전류를 측정하였다.

시험용 변압기는 150kVA의 지상변압기 2대로 1대는 광유대신 식물유를 절연유로 대체하여 제작하였다.

2.2. 시험기준

변압기의 수명은 열열화에 의한 절연지의 기계적 특성저하로 나타내고 있으며, 열화율은 아레니우스의 반응식으로 표현된다. 따라서 수명(life)과 열화가속계수(F_{AA})는 다음 식 1), 2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Life = A \cdot EXP\left(\frac{B}{T_H + 273}\right) \quad \text{----- 식1)}$$

$$F_{AA} = EXP\left(\frac{15,000}{110 + 273} - \frac{15,000}{T_H + 273}\right) \quad \text{식2)}$$

(단, T_H : 권선의 hot-spot 온도(K)
 A, B : 실험정수)

ANSI[12] 표준에서는 변압기의 수명을 180,000 시간으로 약 20.5년 정도로 산정하고 있다. 따라서 100% 부하전류를 지속적으로 20.5년 동안 흘렸을 경우 절연시스템의 기계적 강도가 50%가량 저하됨을 나타낸다. 변압기를 과부하 운전하여 과열전(hot-spot) 온도가 110°C 이상이 되면 절연지의 열화가 가속되어 수명이 줄어들게 되는데 이때 가속되는 비율은 식 2)로부터 그림 3과 같은 경향을 가지게 된다.

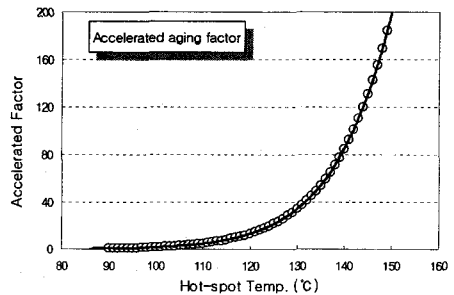


그림 3. Hot-spot온도에 따른 가속열화 계수 (FAA)
Fig. 3. Accelerating aging factor depending on the hot-spot temperature

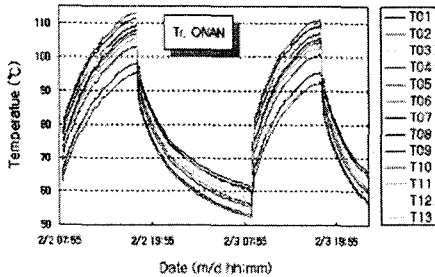
따라서 변압기를 일정비율로 과부하 운전을 실시하고 변압기 내부에 설치된 온도계를 기록하였다. 먼저, 변압기의 열화가속계수가 변압기의 온도에 의존하므로 변압기의 온도특성을 분석하였으며, 온도에 따른 열화가속계수를 통해 변압기의 열화율을 계산하였다. 그리고 측정된 절연유의 정전용량과 누설전류특성을 평가하였다.

2.3. 측정결과 및 토의

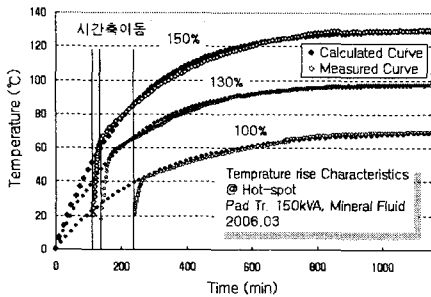
2.3.1 변압기 온도상승특성

그림 4는 지상변압기(150kVA)에서 권선내부에 온도계를 부착하고 100% 부하운전 중에 150%로 부하를 상승하였을 경우의 실측한 온도 상승특성을 나타내었다. 온도 특성은 외부온도까지 포함된 곡선으로 측정시기는 2월 초순으로 온도상승이 크게 일어나지 않은 상태이다.

그림을 살펴보면 부하가 상승되는 순간 매우 짧은 시간에 온도상승이 급하게 이루어졌다가 다소 상승 추세가 늦추어지는 경향을 보이고 있다.



(a)



(b)

그림 4. 권선내부의 온도상승 특성;(a) 권선 내부 온도 전체, (b) hot-spot 온도
Fig. 4. Temperature rise characteristics ;(a) all of the inside 1st winding, (b) hot-spot temperature.

각 부하별(100%, 130%, 150%) 온도상승특성을 자세하게 살펴보면 그림 5와 같이 나타난다. 부하가 가해지는 초기에 권선내부의 온도가 크게 상승되는데 이는 변압기의 온도상승특성을 하나의 온도 모델로 나타내기 어려울 정도로 매우 복잡한 메카니즘을 가지고 있기 때문이며, 여기에서는 부하증가로 인해 도체에서 발생한 순간적 열량이 충분히 절연유에 전달되어 유동이 원활하게 이루어 지는데까지 시간이 소요되는 것으로 생각되어진다.

일반적으로 변압기의 온도상승특성은 다음 식 3)과 같이 지수적인 변화를 하는 것으로 나타내고 있다. 따라서 그림 4의 초기부분과 포화부분 둘로 나누어 구간별 시정수를 정리하면 표 1과 같다.

$$T(t) = T_a + \Delta T_u (1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{--- 식 3)}$$

(t : 경과시간 [min], τ : 시정수 [min])
 T_u, T_a : 주위온도, 최종온도 [°C],
 ΔT_u : 최종 온도상승 [°C])

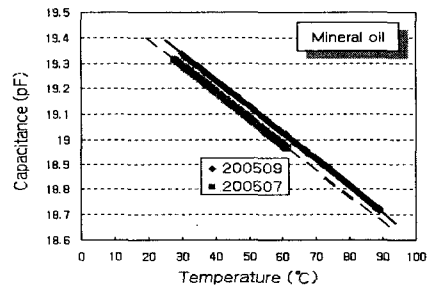
표 1. 부하율에 따른 온도상승 시정수

Table 1. Time constant τ

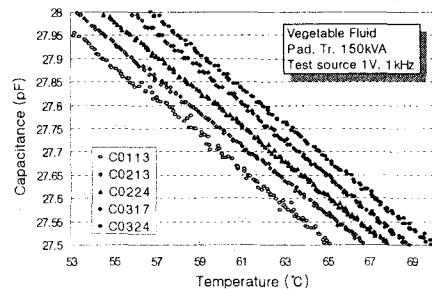
부하율(%)	최대온도 T_u (°C)	시정수 τ (min)	
		초기영역	포화영역
100	70	38	285.7
130	97	40	208.3
150	130	38	222.2

2.3.2 절연유의 정전용량 특성

정전용량 센서는 수명열화에 따라 나타나는 절연유의 미소한 정전용량값의 변화를 측정하는 것이다. 변압기의 부하율에 의해 유중온도가 상시적으로 변하는 것을 감안하여 센서의 온도보상을 정확히 하여야 하며, 과부하에 의한 전자계 간섭을 최대한 줄일 수 있어야 한다. 따라서 시험 전원을 인가하는 전극의 배면에도 쉴드 전극을 적용하여 가드 전극과 쉴드 전극의 이중 정전설드를 구성하였다. 그림 2의 (c)에 정전용량 전극의 사진을 나타내었다.



(a)



(b)

그림 5. 과부하운전 시간에 따른 정전용량 변화;(a) 광유, (b) 식물유.

Fig. 5. Capacitance variations according to loading time; (a) mineral oil, (b) vegetable oil

변압기 가속열화에 따른 절연유의 특성 변화를 분석하기 위해 2005년 6월부터 현재(2006년 3월)까지 과부하 운전을 실시하고 있다. 그림 5는 광유와 식물유에 대한 정전용량변화를 나타내고 있으며, 과부하 운전 중 일정기간마다 정전용량의 변화를 측정하였다.

그림 5 (a)에서 점선과 실선은 각 측정 데이터에 대한 추세선을 나타내고 있다. 그리고 그림에서 온도에 따른 정전용량 특성을 살펴보면 거의 같은 기울기를 가지며 부하운전 시간이 지날수록 y 절편이 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 액체의 정전용량 특성은 일반적으로 온도가 높아질수록 부피가 팽창해 분자밀도의 감소로 정전용량이 줄어들게 된다. 그리고 과부하운전을 할수록 절연시스템의 열화물체에 의해 정전용량이 증가하는 것으로 여겨지며, 본 논문의 후반에서 토의될 누설전류 측정에서 센서에 탄화물이 집진되는 것을 관찰할 수 있었다. 이때 열화에 따른 정전용량의 변화 폭은 $\times 10^{-2}$ pF 범위에서 일어나고 있다.

표 2. 열화에 따른 정전용량 특성
Table 2. Capacitance trends with aging time

측정일(년/월)	기울기(A)	y절편 B (pF)
2005. 07	-0.0105	19.607
2005. 08	-0.0109	19.669
2005. 09	-0.0105	19.658
2005. 11	-0.0105	19.663
2005. 12	-0.0107	19.659
2006. 01	-0.0106	19.652
2006. 02	-0.0105	19.679

표 2는 광유에서의 정전용량 변화를 식 4)와 같이 1차함수로 나타내었을 경우 과부하운전 시간에 따른 정수를 정리하였다.

$$C = AT + B \text{ ----- 식4)}$$

(C : capacitance (F), T : temperature (°C)
A : 기울기, B : y절편)

기울기는 0.01에서 거의 일정한 값을 가지며, y 절편은 절연유의 열화에 크게 증가할 것으로 기대되나 본 실험에서는 열화율이 작아 크게 증가하지 않은 것으로 생각되나 내부의 과도한 열에 의한 열화는 검출 할 것으로 기대하고, 앞으로 수명종기 시점의 절연유에 대한 평가를 통해 타당성의 재평가가 이루어져야 할 것으로 기대된다.

2.3.3 절연유의 누설전류 특성

진단을 위해 적용된 누설전류 센서는 국내 전력 설비 진단 업체에서 개발하여 전력용 변압기에서 적용되고 있는 것으로 PCS(Porous ceramic sensor)센서로 다공질의 세라믹을 이용해 절연유 내부에 녹아있는 절연 열화물을 집진하여 누설전류 양을 평가하는 센서이다. 다공질의 센서 양단에 전극을 부착하고 2 [kV]의 전압을 인가하여 전류를 측정하게 된다.

그림 2의 d)는 누설전류 센서를 보여주고 있다. 변압기 절연유의 상부에 부착되며, 일반적으로 액체의 저항율은 온도가 높아질수록 대체로 낮아지는 특성으로 온도에 의존하게 된다.

그림 6은 변압기의 과부하 운전 기간중 측정된 변압기 상부 절연유에 대한 누설전류 온도특성을 나타내고 있다. 가는 점선은 추세선을 나타내고 굵은 점은 실측치를 나타내고 있다. 누설전류의 온도 특성은 온도에 대해 지수함수적으로 상승하여 나타나고 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$LC = A \cdot \text{EXP}(B \cdot T) \text{ ----- 식 5)}$$

(LC : Leakage current, A, B : constants)

표 3에 열화기간 중 측정된 누설전류의 온도특성에서 각 정수들을 정리하였다. 표에 의하면 정수 A의 값이 시간에 따라 일정한 증가추세를 나타내고 있어 절연체의 열화 생성물이 지속적으로 발생한다고 할 수 있을 것이다. 하지만 정수 B의 경우 대체로 0.05값을 보이고 있으나 값이 변화하고 있다. 이는 누설전류 셀의 경우 시험전원이 직류로서 열화생성물이 집적되어 과부하 운전을 할 수록 누적된 특성을 나타내어 일정하지 않은 값을 나타내는 것으로 여겨진다. 따라서 본 실험에서는 5분마다 측정을 실시하여 측정회수가 많은편으로 여겨지며 현장 적용을 위해서는 측정간격을 최적화할 필요가 있을 것이다.

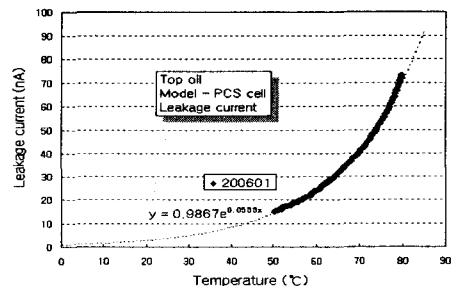


그림 6. 절연유 상부의 누설전류 변화
Fig. 6. Leakage current variation at transformer top-oil

표 3. 열화에 따른 누설전류 특성

Table 4. Leakage current trends with aging time

측정일(년. 월)	A (nA)	B
2005. 09	0.0045	0.0979
2005. 11	0.2441	0.0740
2005. 12	0.7088	0.0585
2006. 01	0.9867	0.0533
2006. 02	1.0422	0.0516

3. 결론

배전용 변압기의 과부하 운전에 의한 열화를 진단하기 위해 변압기의 온도상승특성과 절연유의 정전용량 및 누설전류 특성을 고찰하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

변압기 권선의 온도상승 특성에서 부하가 가해지는 초기에 권선내부의 온도가 급하게 상승된 후 서서히 포화되는 특성을 나타내었다. 이는 변압기의 온도상승특성이 매우 복잡한 메카니즘을 가지고 있기 때문이며 부하증가로 인해 도체에서 발생한 순간적 열량이 충분히 절연유에 전달되어 유동이 원활하게 이루어지는데까지 시간이 소요되기 때문에 여겨진다. 정확한 열열화를 평가하기 위해서는 이러한 온도상승특성이 추후 고려되어야 할 것이다.

절연유의 정전용량 특성은 과부하 운전 시간에 따라 광유 및 식물유 모두 증가하는 경향을 나타내며, 특히 식물유의 경우 경향이 보다 더 뚜렷하게 나타나고 있어 열화진단 시 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 부하운전이력 계산을 통해 열화율과의 관계를 정립하는 것이 필요하다.

절연유의 누설전류 특성도 과부하 운전에 따라 증가하는 특성을 나타내고 있어 열화진단에 활용할 수 있을 것으로 기대되나 측정빈도에 따라 그 경향을 다르게 나타내므로 적용하고자 하는 설비에 대한 최적화가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Walter S.Zaengl, "Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part 1: Theoretical Considerations", IEEE Elec. Insul. Magazine, Vol. 19, No. 5, pp. 5-19, Sept/Oct 2003
- [2] V.Aschenbrenner and T.Ucik, "Using of Parameters of RVM Measurement for Qualitive Appreciation of Power Transformers Insulation State", pp. 1829-1833
- [3] R.M.Morais, W.A.Mannheimer, M.Carballeira, J.C.Noualhaguet, "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
- [4] A.J.Kachler, "On-Site Diagnosis of Power and Special Transformers", Confence Record of the 2000 IEEE Inter. Symp. on Elect. Insul., Anaheim, CA USA, pp.362-367, April 2-5 2000
- [5] M.Ali, C.Eley, A.M.Emsley, R.Heywood, and X.Xiao, "Measuring and Understanding the Ageing of Kraft Insulating Paper in Power Transformers", IEEE Elect. Insul. Magazine, pp. 28-34, 1996
- [6] Jin Zhijian, Zhu Minglin, Zhu Zishu, "Fault Location of Transformer Winding Deformation Using Frequency Response Analysis",
- [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] IEEE std C57.91-1981, "Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Ppad-Mounted Distribution Transformers Rated 500kVA and Less with 6 5°C or 55°C Average Winding Rise"
- [9] A.M.Emsley and G.C.Stevens, "Review of Chemical Indications of Degradation of Cellulosic Electrical Paper Insulation in Oil-filled Transformers", IEE Proc. Sci. Measur. Techn., Vol. 141, pp.324-334, 1994.
- [10] P.J.Burton, M.Carballeira, M.Duval, C.W.Fuller, J.Graham, A.DePablo, J.Samat, and E.Spicar, "Application of Liquid Chromatography to the Analysis of Electrical Insulating Materials", CIGRE, Inten. Conf. Large High Voltage Electric Systems, Paris, France, Paper No. 12-12, 1988.
- [11] J.Unworth and F.Mitchell, "Degradation of Electrical Insulating Paper Monitered with High Performance Liquid Chromatography", IEEE Trans, Electr. Insul., Vol. 25, pp. 737-746, 1990.
- [12] IEEE std C57.91-1995, " IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers"