

유침절연 변압기에서 연속적 수분제거 유효성에 관한 연구

(Study on the Effectiveness of Continuous Water Removal in Oil Immersed Transformers)

선종호* · 황돈하 · 김진수

(Jong-Ho Sun · Don-Ha Hwang · Jin-Soo Kim)

Abstract

This paper describes the effectiveness of continuous water removal in oil immersed transformers. Insulation oil in which insulation papers were immersed were prepared for tests and water concentrations in oil with heating time were measured at five oil temperatures. Also, the tests that water dissolved in 100°C oil was removed at once and continuously at 50°C and 100°C were performed for consideration of effective method for water removal. Test results indicated that the oils for water measurement have to be extracted at similar temperatures and water in oil has to be continuously removed at higher temperatures for more effective water management of transformers.

Key Words : Transformer, Water Concentration, Transformer Management, Water Removal, Insulation Paper, Insulation Oil

1. 서 론

유입변압기의 절연물은 크게 권선을 감싸고 있는 셀룰로즈 성분의 절연지와 광유계 절연유로 구성되어 있다. 수분과 열은 유입변압기의 절연물을 열화시키는 중요한 인자들이다. 변압기에서 불순물로서 작용하는 수분은 절연유나 절연지의 절연강도를 감소시키고 절연열화를 가속시켜 변압기의 수명을 현저히 저감시킨다. 또한 철심이나 외함을 침식시키고 절연유의 산화방지제와 반응하여 절연유의 산화를 촉진시킨

다[1-2].

변압기 내부의 수분은 제작 시 불완전한 건조로 인한 잔류수분, 설치나 수리 시에 직접적인 대기 노출, 실링 불량으로 대기와 외함 내부와의 압력차에 의한 수증기의 유입 등에 의하여 발생된다. 수분이 발생하면 일부는 절연유에 용존되어 있고 일부는 절연지에 흡착된다. 변압기 내에서 절연유의 수분농도는 광유계 절연유의 수분포화도에 따라 절연유와 절연지의 열평형상태에서 일정한 값을 유지하게 된다. 그러나 Piper charts에 따르면 주위온도가 변하여 새로운 열평형 상태에 도달하면 절연유의 수분농도는 온도에 비례하여 바뀌는 것으로 알려져 있다[3-5]. 일반적으로 변압기 내부의 수분은 절연유 내부의 수분농도에 의해서 관리되며, 절연유 내부의 수분농도가 관리 기준치를 넘으면 절연유를 교체하거나 절연유의 수분

* Main author : KERI, HVDC Research Division,
Principal Researcher
Tel : 055-280-1578, Fax : 055-280-1690
E-mail : jhsun@keri.re.kr
Received : 2015. 10. 1.
Accepted : 2015. 12. 29.

여과와 같은 조치를 취하게 된다. 그러나 이러한 조치가 절연지의 수분이 충분히 빠져나오지 않은 상태에서 일시적으로 취해지면 절연유 내부의 수분은 다시 높아지게 된다.

본 연구에서는 절연지가 함침된 절연유의 온도를 다섯 가지로 변화시키면서 절연유 수분농도 측정 실험을 실시하였으며, 온도에 따른 절연유와 절연지 사이에 수분의 이동특성을 고찰하였다. 또한 100°C에서 절연유 중의 수분을 충분히 용존시킨 후 50°C와 100°C의 절연유 온도에서 한 번과 연속적으로 절연유 수분 제거 실험을 실시하였으며, 그 실험결과로부터 변압기의 수분관리에 있어서 일시적 절연유 내부의 수분제거에 대한 문제점 및 연속적인 절연유의 수분제거의 유효성에 대하여 논하였다.

2. 본 론

2.1 실험

2.1.1 시료준비

절연유온도에 대한 절연유와 절연지 사이에서 수분의 이동 특성을 살펴보기 위하여 와이드만사의 22HCC 두께 0.075mm 절연지와 광유 1종 2호의 절연유 그리고 절연유와 절연지를 담은 밀폐형 유리용기, 유리용기 내부의 절연유 온도를 조절할 수 있는 전기 오븐을 준비하였다. 변압기 제작시 고체절연물을 포함하고 있는 변압기 권선은 진공 가열되어 수분이 충분히 제거되지만 그렇지 않은 경우도 있으므로 실험은 절연지의 수분이 제거된 경우와 제거되지 않은 두 가지 경우를 모의하여 실시하였다. 절연지를 대기 중에 방치하면 수분을 흡습하게 되고 이를 가열하면 절연지의 수분이 제거된다. 그림 1은 가열 전 초기 무게가 다른 대기 중에 방치되어 있는 절연지를 100°C로 가열했을 때 가열시간과 무게 변화를 보여주고 있다. 그림 1에서와 같이 절연지의 무게는 약 30분 가열 후 초기치의 0.6~1%가 감소되어 일정한 무게가 유지되는 것으로 나타났다. 이는 100°C에서 30분 이상 가열하면 절연지 수분이 제거됨을 의미한다. 본 연구에서는 대기 중에 방치된 절연지를 100°C에서 1시간 가열

하여 절연지 수분을 제거하였다.



Fig. 1. Insulation paper weights according heating time

일반적으로 변압기 절연지 무게는 절연유의 약 5% 이하로서 변압기 용량이 클수록 그 비도 작아지는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 절연유를 담기위한 용기로서 부피 1l의 유리용기를 사용하였으며 수분이 제거된 절연지의 무게는 절연유 대비 약 3.2%이고, 대기 중에 노출되어 있는 절연지는 건조 절연지와 부피는 같지만 무게는 절연유 대비 약 3.5%로서 절연유 무게 대비 0.3%의 습기가 절연지에 포함되어 있음을 알 수 있다. 또한 상온에서 절연지를 담그지 않은 상태에서의 절연유의 초기 수분은 약 36~39ppm 사이에 존재하였다. 그림 2는 절연유와 절연지가 담긴 유리병과 절연유 수분농도를 측정하는 칼피셔법 수분 측정장치를 보여주고 있다.



Fig. 2. Preparation of samples and Karl-Fischer water meter

시료가 담긴 유리병을 전기로에 설치하여 온도를 조절하였으며 절연지의 열적 등급은 A종으로서 105°C 이고[6] 열적 등급온도를 감안하여 실험 온도는 5°C, 30°C, 70°C, 110°C, 130°C로 하였으며 일정 시간마다 유리용기에서 절연유를 추출하여 수분을 측정하였다. 한 온도에서 실험이 종료되면 절연유와 시료를 교체하여 다른 온도에서 실험을 실시하였다.

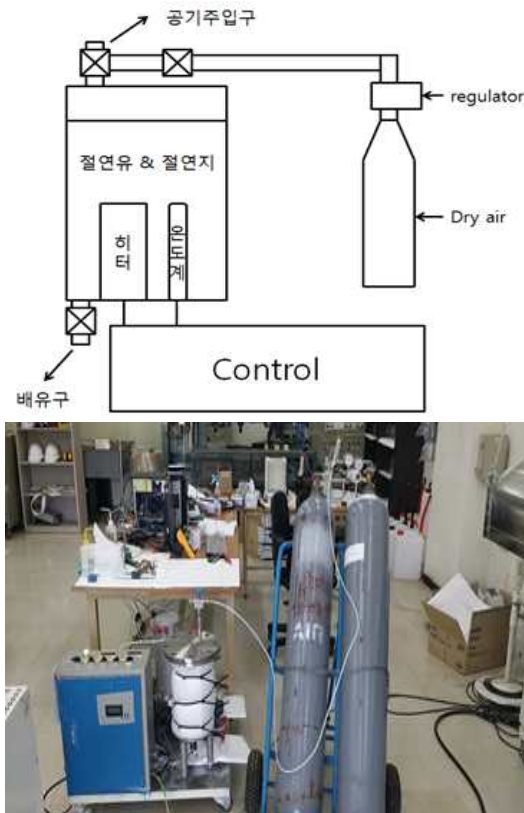


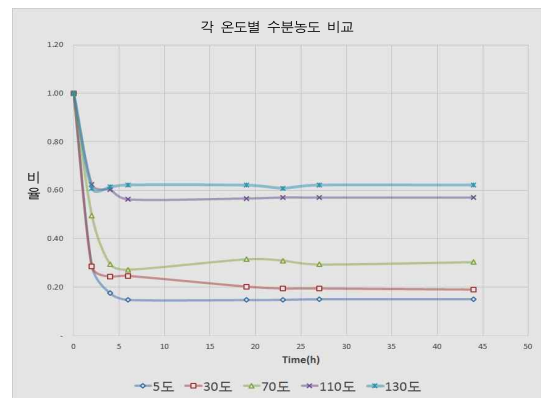
Fig. 3. Test setup for continuous temperature changes

또한 절연유와 절연지의 수분이 일정한 상태에서 연속적으로 절연유 온도를 변화시켰을 때 수분농도의 변화를 고찰하기 위한 실험을 실시하였다. 그림 3은 연속 온도변환 실험 장비를 보여주고 있으며, 절연유와 절연지를 담기 위하여 스테인레스 챔버를 제작하였고 실험 온도는 30°C, 70°C, 110°C이며, 한 온도에서 절연유 수분농도가 일정해지면 그 상태에서 연속적으로 절연유의 온도를 변화시켰다. 절연유 무게에서

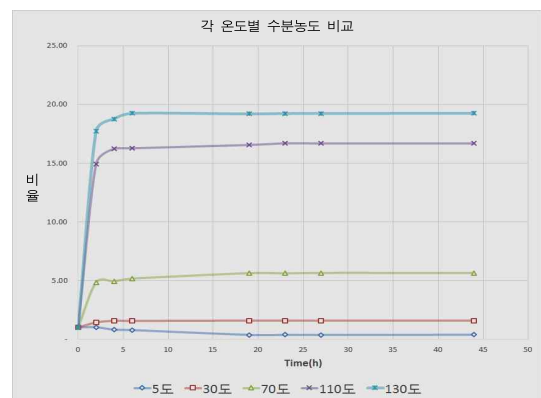
약 10% 정도의 절연지를 100°C에서 1시간 건조시켜 사용하였다. 또한 절연유 수분측정을 위하여 일정시간마다 절연유를 챔버 하부 배유구에서 추출하였으며 추출 시 공기의 유입을 차단하여 공기 중의 습기가 챔버 내부로 침입하지 못하도록 드라이 에어를 주입하였다.

2.1.2 실험 결과

그림 4는 전기로를 이용하여 유리용기 내 절연유 온도를 조절한 실험 결과로서 절연지를 건조하지 않은 경우와 건조한 경우에 대한 온도별 절연유 내부의 수분 농도 특성을 보여주고 있다. 가로축은 가열시간, 세로축은 초기 절연유 수분농도에 대한 측정치의 비를 나타내고 있다.



(a) 절연지 수분 제거 후



(b) 절연지 수분제거 전

Fig. 4. Water concentrations in oil at constant oil temperatures

먼저 그림 3 (a)에서 절연지의 수분이 제거된 경우 전 온도 범위에서 가열시간에 따라 수분농도는 감소하면서 가열 약 5시간 후 온도별로 절연유의 수분농도가 일정하게 유지되고 있으며, 유리용기내 전체 절연유 양은 동일한 상태에서 5°C에 비하여 130°C에서의 절연유의 수분농도비는 약 5.3배 정도임을 알 수 있다. 다음 그림 3 (b)에서와 같이 절연지 수분 제거전은 5°C를 제외한 온도 범위에서 가열시간에 따라 절연지의 수분이 절연유로 이동하여 절연유 중의 수분은 초기 값보다 증가하여 평형을 유지하고 있고 5°C의 경우는 오히려 미세하게 감소하여 평형을 유지하고 있으며 5°C에 비하여 130°C에서의 절연유의 수분농도비는 약 19배 정도임을 알 수 있다. 두 실험 결과로부터 유리 용기내의 전체 수분양이 많을수록 온도에 따른 절연유 수분농도비는 더욱 증가함을 알 수 있다. 결국 변압기내의 수분양은 일정하더라도 온도에 따라 수분은 절연유 및 절연지의 수분양과 온도에 따라 두 물질 사이를 이동하고 결과적으로 변압기내 절연유 중의 수분농도는 주위 조건에 따라 변한다는 사실을 알 수 있다.

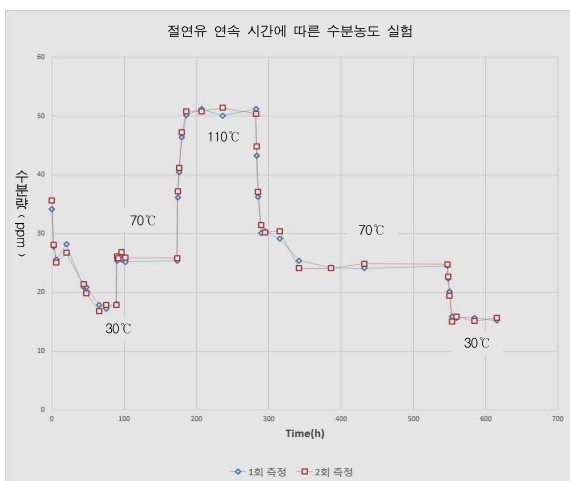


Fig. 5. Water concentrations in oil according to continuous temperature changes

그림 5는 온도를 연속적으로 변화시켰을 때의 절연유 내부 수분측정 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서와 같이 용기내의 절연유 내부 수분농도는 온도가 상승할 때와 하강할 때 동일한 온도에서 유사한 유증수

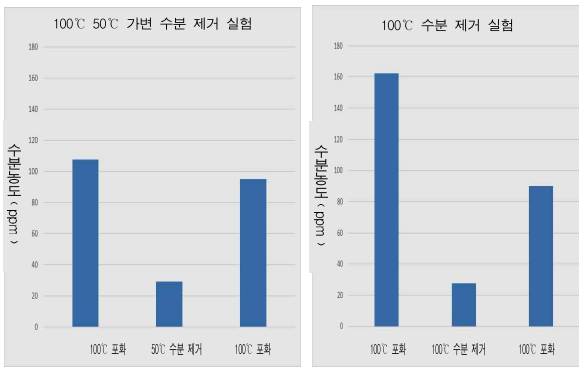
분 농도 값을 나타내고 있다. 이러한 관계로부터 변압기의 부하율이 하루 중 일정 패턴으로 변하면 부하율에 따른 온도변화로 인하여 절연유 내부의 수분도 동일한 패턴으로 변할 것으로 생각된다. 그러므로 하루 중 부하율이 크게 변하는 변압기에서는 동일한 부하율에서 절연유를 채취하여 수분을 측정하거나 실시간으로 수분을 관리하는 것이 바람직하다 할 수 있다.

2.2 결과 고찰

변압기의 수명은 절연물의 열화와 직접적인 관계가 있다. 유입변압기에서 절연물은 절연유와 절연지로 구성되어 있다. 절연유속에 포화된 수분의 증가는 절연유의 전도성을 높이며 절연내력을 감소시킨다. 또한 절연지의 수분 양이 증가하면 절연지의 가수분해를 촉진하여 절연지의 조직을 약화시킨다. 조직의 약화는 고분자도가 감소함을 의미하며, 고분자도의 감소로부터 변압기에 작은 전자력이 발생해도 절연지가 손상되어 쉽게 변압기의 절연고장을 일으킬 수 있다 [7]. 변압기의 수분에 의한 열화를 방지하기 위하여 변압기내의 수분은 일정량 이하로 관리되어야 한다. 변압기의 수분관리를 위하여 실험결과에서도 알 수 있듯이 온도에 따라 수분이 절연유와 절연지 사이를 이동하므로 절연유뿐만 아니라 절연지의 수분도 충분히 제거되어야 한다. 일반적으로 변압기 수분제거는 절연유 내부의 수분농도가 일정크기 이상일 때 변압기 정지 후 수분을 여과하는 방식을 주로 사용한다. 앞의 실험 결과에서도 알 수 있듯이 특히 변압기의 온도가 낮을 때 정지 중 수분여과를 실시하면 수분이 권선의 절연지에 흡착되어 있으므로 변압기의 수분을 충분히 제거할 수 없게 된다. 이러한 관계를 고찰하기 위하여 그림 3의 실험장치를 사용하여 변압기 수분제거방법의 유효성에 관한 실험을 실시하였다. 건조되지 않은 절연지를 챔버내의 절연유에 삽입 후 100°C로 가열하여 100ppm이상의 절연유 중 수분을 얻었고, 수분제거는 챔버내의 절연유중에 질소가스를 불어 넣으면 거품발생과 함께 수분이 제거되며, 목표 수분농도로 감소할 때까지 질소가스를 주입하는 방식을 사용하였다. 그림 6은 실험 결과를 보여주고 있다. 그림 6 (a)는

100℃로 운전 중인 변압기를 정지해서 50℃로 냉각한 후 일반적인 변압기 수분 관리치[8]인 30ppm 이하로 수분을 1회 제거한 후 다시 100℃로 운전할 때의 수분 농도변화를 모의 시험한 결과이고, (b)는 100℃에서 운전하는 변압기의 수분을 운전 중인 100℃에서 30ppm 이하로 제거한 후 계속 100℃로 운전할 때의 포화된 수분농도를 보여주고 있다. 이 그림에서 처럼 두 경우 모두 수분을 1회 30ppm 이하로 제거 했음에도 불구하고 다시 운전을 개시하면 수분은 다시 상승하며 그 상승크기는 50℃에서 제거한 경우 100℃ 초기치 대비 0.86배로 상승하고 100℃에서는 초기치 대비

0.55로서 50℃가 100℃보다 수분제거 후 다시 온도를 상승했을 때의 값이 더 많이 상승함을 알 수 있다. 이와 같이 1회의 수분 제거 결과로부터 더 높은 온도에서 수분을 제거하는 것이 효과적이지만 변압기의 전체 수분 양을 기준치 이하로 낮출 수 없음을 알 수 있다. 그림 7은 운전 중 연속 수분제거를 모의하기 위하여 100℃에서 연속으로 수회에 걸쳐 수분을 제거한 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서처럼 초기 162ppm의 수분은 4회의 수분제거 후 38ppm으로 수분이 유지됨을 알 수 있다. 이상에서 변압기의 수분 제거는 가능하면 높은 온도에서 운전 중 연속적으로 제거하는 것이 효과적임을 알 수 있다.



(a) 50℃에서 수분제거 (b) 100℃에서 수분제거

Fig. 6. Water concentration by one water removal

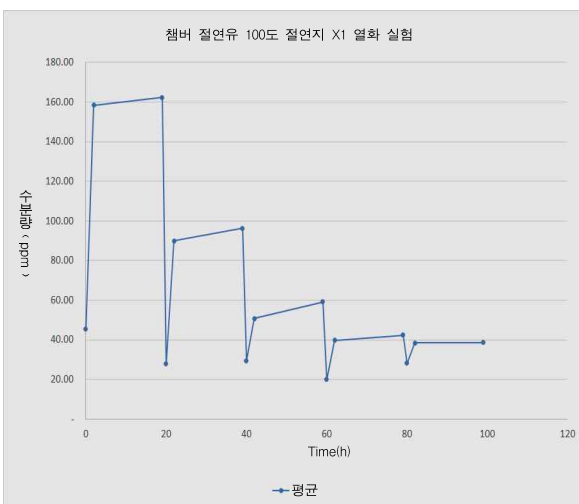


Fig. 7. Water concentrations by continuous water removal

3. 결 론

이상의 연구결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 일정한 온도를 유지할 때 온도가 높을수록 절연지로부터 절연유로 더 많은 수분이 이동되어 절연유의 수분농도가 증가하는 특성을 보였고, 절연유와 절연지의 수분을 포함하는 전체 수분량이 많을수록 낮은 온도에 대한 높은 온도에서의 절연유중 수분농도 비는 더 큰 것으로 나타났다.
- (2) 연속으로 절연유의 온도를 변화시켰을 때 절연유 내부의 수분농도도 온도에 비례하여 연속적으로 변하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 수분제거 실험으로부터 한번만 절연유의 수분을 제거한 경우 다시 실험온도를 유지하였을 때 초기치 보다는 적지만 수분제거 직후 보다 수분농도가 크게 증가하였으며 연속적으로 수분을 제거하면 제거 직후 수분농도인 30ppm부근으로 절연유 내부의 수분이 유지되었다.
- (4) 상기의 실험결과들로부터 하루 중 부하율 및 주위온도 변화로 내부 온도가 변하는 변압기에서는 동일한 온도에서 절연유를 채취하여 수분을 측정하고 또한 높은 온도에서 연속적으로 절연의 수분을 제거하는 것이 변압기의 수분관리에 효과적이라 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 '중소기업청 융복합기술개발사업-센터연계형' 사업으로 수행되었으며 중소기업청의 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Muhammad Arshad, Syed M. Islam and Abdul Khaliq, "Power Transformer Aging and Life Extension", SL International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, Ames, Iowa September 12-16.2004.
- [2] Junichi Wada, Genyo Ueta, Shigemitsu Okabe, "Method to Evaluate the Degradation Condition of Transformer Insulating Oil- Experimental Study on the Hydrophilic and Dissociative Properties of Degradation Products", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 21, No. 2, April 2014.
- [3] PankajShukla1, Y.R. Sood2, R.K. Jarial3, "Experimental Evaluation of Water Content In Transformer Oil", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Vol. 2, Issue 1, January 2013.
- [4] Lance R. Lewand and David Koehler, "Water Distribution and Migration in Transformer Insulation Systems and Assessment of Paper Water Content" The Premier Electrical Maintenance and Safety Event.
- [5] Brian Sparling, Jacques Aubin, "Assessing Water Content in Insulating Paper of Power Transformers", Electric energy T&D July/August 2007.
- [6] IEC Publication 85 (1957): Recommendations for classification of materials for the insulation of electrical machinery and apparatus in relation to their thermal stability in service.
- [7] Maik Koch, "Improved Determination of Moisture in Oil-Paper-Insulations by Specialised Moisture Equilibrium Charts", Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, S. 508, Beijing, China, 2005.
- [8] KEPCO, "Preventive Diagnosis Criteria of Power Equipment", 2011.11.

◇ 저자소개 ◇



선중호(宣鍾好)

1962년 10월 10일생. 1986년 부산대 전기공학과 졸업. 1988년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989년~현재 한국전기연구원 HVDC 연구본부 책임연구원.



황돈하(黃敦夏)

1991년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년~현재 한국전기연구원 HVDC 연구본부 전력기기연구센터 책임연구원.



김진수(金辰洙)

1968년 11월 10일생. 1990년 경원대 전기공학과 졸업. 2005년~현재 GH Asset(주) 대표이사. 2008년~현재 유림티에스(주) 대표이사.