

절연유와 절연지의 수분에 대한 용존 및 흡착 메커니즘 특성

한상길*, 한상옥*, 이세현**
 충남대학교*, 한국폴리텍II대학**

a disolved and adsorptive Mechanism of water at Oil and Paper

Sang Gil Han*, Sang Ok Han*, Sei Hyun Lee**
 Chungnam National University*, Korea PolytechnicII college**

Abstract - 수분은 변압기 내부의 절연물의 절연내력에 악영향을 끼치므로, 변압기 열화진단의 중요한 요소이다. 이러한 수분을 검출하기 위한 여러 가지 방법들(Karl-Fischer법, Dew-Point법, RVM 등)이 개발되어졌고, 현재도 많은 연구가 진행되어 지고 있다. 본 논문에서는 회복전압측정법(RVM : Return Voltage Measurements)과 FDS(Frequency Domain Spectrum)를 이용하여 변압기의 여러 구성물(절연지, 전극, 절연유 등)들과 수분과의 반응 메커니즘을 분석하였다. 눈으로 확인할 수 없는 부분을 규명함으로써 앞으로 변압기 열화진단법들의 개발에 기여하고자 하였다.

1. 서 론

전력기기 중 변압기의 경우 잔존수명을 예측하여 교체 및 유지보수 시기를 적절히 조절하지 못할 경우 고장으로 이어져 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있다. 변압기의 수명은 20~30여년 정도이며 노후된 변압기의 경우 사고 이전에 보수 및 교체가 요구된다. 따라서 변압기에 대한 주기적인 상태진단과 보수를 통해 변압기의 수명을 연장시키고 전력계통의 안전성과 신뢰성을 향상시키는 노력이 필요하다. 그 중 변압기의 열화메커니즘에 대한 연구는 그 종류가 매우 다양하고 중요성이 높아지고 있다. 변압기 중 대부분을 차지하는 유입식 변압기의 절연 재료인 절연유와 절연지는 과부하에 의한 열적열화와 수분침투에 의한 산화 등으로 인해 열화가 진행된다. 이러한 열화현상은 변압기의 절연내력을 저하시켜 변압기의 사고의 원인이 되고 있다. 특히 수분은 절연지의 열화과정에서 생성되거나 외기로부터 유입되며 절연유의 수분 오염을 일으키고 이 수분오염은 첨가제 침전과 오일산화와 같은 유체열화를 일으키며, 유막두께가 감소하고, 기기 내부 금속표면의 부식을 야기하는 등 변압기 열화의 중요한 요인이 되고 있다. 이처럼 변압기 내부의 수분의 함유는 변압기의 수명에 악영향을 끼치므로, 열화진단에 있어 중요한 파라미터라 할 수 있다. 현재 수분의 검출법으로는 Karl-Fischer법, RVM (Return Voltage Measurement), Dew-Point법 등이 있다. 이러한 수분검출법들을 이용하여 수분함유량을 측정하기 위해서는 변압기 절연유와 절연지의 수분에 대한 용존 및 흡착 메커니즘에 대한 이해가 선행되어야 할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 FDS, 회복전압법을 이용하여 수분에 대한 절연유와 절연지의 용존 및 흡착 메커니즘에 대해 알아보려 한다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

2.1.1 유전상수

유전상수란 외부에서 가해진 전기장 하에서 전기에너지를 축적할 수 있는 물질의 능력을 나타내는 값으로서

정전용량(capacitance)으로부터 구할 수 있다. 정전용량은 두 전극사이에 가해진 전압 V에 대하여 두 전극이 충전할 수 있는 전하량 Q로 정의된다. 즉, 진공상태의 평행판의 면적이 A이고 두 전극사이의 거리가 d인 평행판에서 두 판 사이에 정전용량 C₀는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_0 = \frac{Q}{V} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \tag{1}$$

여기서 ε₀를 진공 유전율이라 한다.

만약 유전율이 ε인 물질이 극판 사이에 채워진다면 정전용량 C는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} = C_0 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = C_0 \epsilon_r \tag{2}$$

여기서 ε_r를 비유전상수라 하고 다시 나타내면 식(3)과 같다.

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \tag{3}$$

즉, 유전상수 ε_r은 진공의 유전율에 대한 유전체의 유전율로 정의되며, 물질의 고유한 특징이다.

이러한 물질 고유의 특징인 유전상수의 특성을 이용하여 수분함유량에 따른 절연유와 절연지의 정전용량의 변화를 측정함으로써 수분함유량의 변화를 확인 할 수가 있다. 즉, 식(2)와 식(3)에서 전극간의 거리 d와 전극의 면적 A은 일정하므로 정전용량 C가 변화한다는 것은 유전상수의 변화가 있었다는 것이고, 이것은 두 전극사이의 물질에 변화가 있었다는 것을 의미한다. 즉, 절연유에 포함된 수분의 양이 변함으로 인해 유전상수가 변화하게 되고, 따라서 FDS로 측정되는 정전용량의 값이 변화하게 되는 것이다.

2.1.2 분극현상

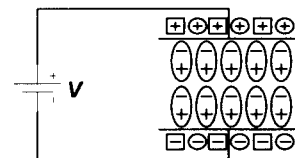


그림 2-1 분극현상

그림 2-1과 같이 외부에서 가해진 전기장에 대하여 물질 내 전하들이 재배열하는 것을 분극(Polarization)이라고 하며, 분극의 종류로는 전자분극, 이온분극, 배향분극, 공간전하분극 등이 있다. 이러한 분극현상들은 외부로부터 가해지는 교류전기장에 대하여 반응하는 시간이 각각 다르기 때문에 분극현상은 주파수에 의존하게 된다. 그림 2-2와 같이 전자분극이나 이온분극은 반응시간이 빠르기 때문에 고주파와 저주파 영역 모두에서 나

타나지만, 배향분극이나 공간전하분극은 반응시간이 느리게 나타나므로 고주파 영역에서는 나타날 수가 없다. 이러한 원리를 이용한 것이 RVM 측정법이라 할 수 있다. 즉, H₂O는 수소와 산소의 대칭적인 분자형태에 의해 분자를 기준으로 104.5°귀인 결합을 하게 되고, 이 때문에 극성결합으로 생긴 극성이 상쇄되지 않고 배향분극을 형성하게 된다. 이러한 배향분극은 반응시간이 느리게 나타나므로, 충전시간보다 방전시간을 짧게 함으로서 천천히 일어나는 배향분극의 탈분극 전압을 측정할 수 있는 것이다.

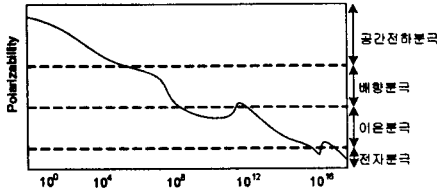


그림 2-2 주파수에 따른 분극의 분포

2.1.3 RVM 기본원리

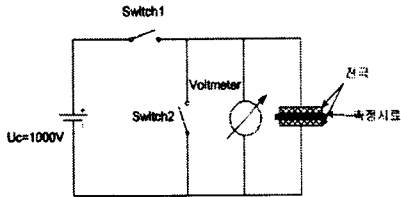


그림 2-3 equivalent circuit

RVM은 그림 2-3과 같이 Switch1을 닫아 일정시간(Tc) 동안 충전을 하고, Switch1을 열고 Switch2를 닫아 일정시간(Td) 동안 방전을 한다. 이때 충전시간과 방전시간의 비율(Tc/Td)을 2로 한다. 그리고 Switch2를 개방하면 방전시간 동안 탈분극되지 못한 계면분극, 공간전하분극, 쌍극자분극 배향분극 등 늦은 분극들에 의한 전압이 검출되게 된다.

2.2 실험방법

우선 가로 20㎜, 세로 92㎜, 두께 1.5㎜인 전극 네 개와 실험용 셀을 준비하여, 전극 중 두 개는 각각 1㎜의 두께로 절연지를 감아 주었다. 준비된 네 개의 전극을 진공 오븐에 넣어 100℃의 온도로 12시간 건조하였다. 절연지를 감은 전극 두 개를 서로 밀착 고정하여 주었고, 나머지 두 개의 전극은 2㎜의 간격을 두고 실험용 셀에 설치하였다. 즉, 두 전극 사이를 한쪽은 절연지로 채웠고, 다른 쪽은 절연유에 직접 노출함으로써 차별성을 두었다. 실험에 사용된 절연유는 광유 1종 2호로서 1200㎫를 사용하였다.

실험용 셀에 전극을 설치하고 진공펌프를 이용하여 절연지를 충분히 탈기시킴으로서 습기를 제거하고 절연유가 절연지에 잘 스며들도록 하였다. 또한 실험용 셀을 완전히 밀봉하여 외기의 유입을 막아주고 이러한 상태에서 Oil Bath의 온도를 45℃로 유지하고 실험용 셀을 3시간 정도 가열하여 셀 바닥의 수분을 고루 섞일 수 있도록 하였다. 그 후 두 개의 전극을 RVM 측정법과 FDS를 이용하여 최대회복전압 곡선과 정전용량을 각각 구하였다. RVM 장치는 충전시간을 0.02~100초까지 설정하였고, 방전시간은 충전시간의 반으로 하였으며, 충전전압은 1000V를 인가하였다.

그 후 Oil Bath의 온도를 45℃로 유지한 상태에서 수분 1㎖를 주입하였고, 3시간을 방치하여 수분이 고루 섞일 수 있도록 하였다. 이러한 과정을 2㎖, 3㎖에서도 똑같이 실시하였다.

또한 각각의 과정에서 FDS를 이용하여 정전용량을 측정함으로써 비유전율을 식 (4)에 의해 구해주었다.

$$\epsilon_r = \frac{C d}{\epsilon_0 A} \quad (4)$$

2.3 실험결과

2.3.1 RVM 측정 결과

수분 주입전 oil와 oil-paper 전극의 최대회복전압 곡선은 그림 2-4와 같이 oil-paper 전극의 최대회복전압 곡선의 최대값이 oil 전극보다 더 왼쪽에 나타남을 알 수 있다. 이를 통해 절연지에 흡수된 수분의 양이 절연유의 수분함유량 보다 많음을 알 수가 있었다.

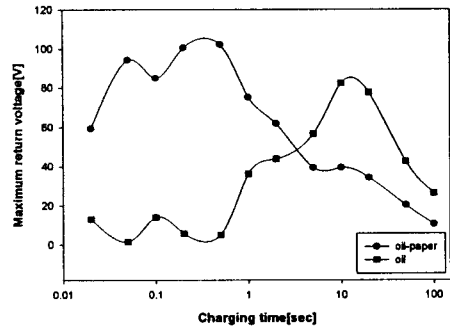


그림 2-4 신품 절연유의 paper-oil RVM 특성곡선

수분 주입후 oil과 oil-paper 전극의 최대회복전압 곡선을 그려보면 그림 2-5, 그림 2-6과 같이 oil-paper 전극은 수분의 주입량이 증가할수록 최대회복전압 곡선의 최대값이 왼쪽으로 이동하는 것으로 나타났으나, oil 전극은 변화가 일어나긴 했지만 미소한 차이만을 보였다.

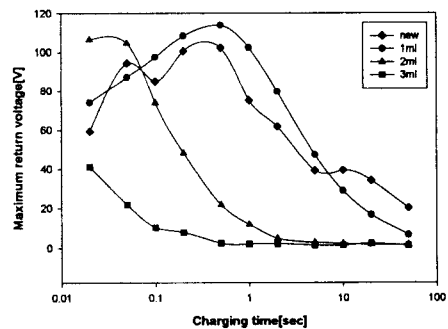


그림 2-5 수분량에 따른 oil-paper 전극의 RVM 곡선

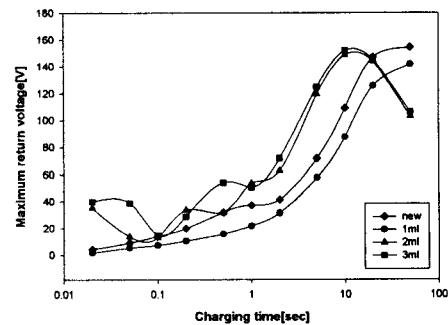


그림 2-6 수분량에 따른 oil 전극의 RVM 곡선

2.3.2 FDS 측정 결과

FDS를 이용하여 구한 oil과 oil-paper 전극의 초기 비유전율은 수분에 의하지 않고도 절연지와 절연유등의 혼합에 의해 정전용량 값이 다르게 나올 수가 있기 때문에 비교가 무의미 하다. 따라서 신품 절연유의 비유전율을 기준으로 하고 1ml, 2ml, 3ml의 수분을 주입하였을 때의 비유전율의 변화를 그림 2-7, 그림 2-8에 각각 나타내었다. 그림과 같이 oil-paper 전극의 비유전율은 수분의 양이 증가함에 따라 꾸준히 증가하였으나 oil 전극의 경우는 다소의 변화만을 확인할 수 있었다.

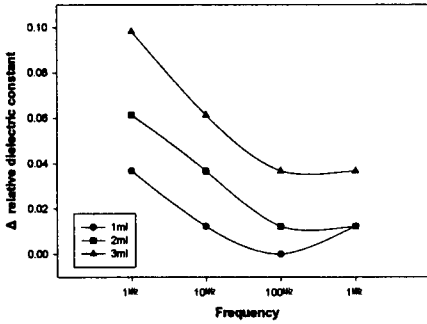


그림 2-7 주입 수분량에 따른 oil-paper의 비유전율 변화

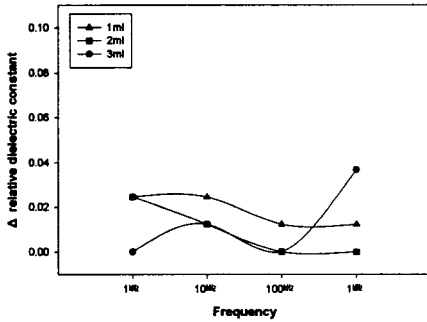


그림 2-8 주입 수분량에 따른 oil의 비유전율 변화

2.3.3 실험 분석

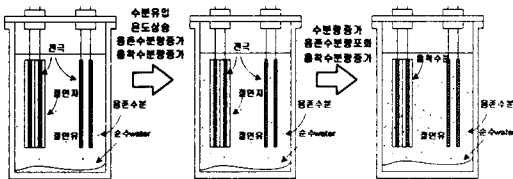


그림 29 절연유와 절연지의 수분에 대한 응축 및 흡착 메커니즘

두 가지 측정방법의 결과로 보아 실험용 셀 내 절연지의 수분 흡착력은 절연유에 비해 매우 큼을 알 수가 있었다.

따라서 변압기 내부에 수분이 유입되면, 온도가 낮을 때는 변압기의 바닥면에 분포되어 있다가 온도가 상승하면 절연유내 용존 수분량이 증가하게 되고 떠돌던 수분은 절연지와 접촉하여 흡착되게 된다. 이때 용존되어 지는 수분의 양은 절연유의 수분포화량에 한정되어 지고, 절연유의 수분포화 상태에서는 절연지의 수분 흡착만이 이루어짐을 알 수 있다.

즉, 유입된 수분은 어느 정도의 온도 이상에서 절연유에 용존되어지고, 용존된 수분은 절연지를 만나 절연지

에 쉽게 흡착되어 진다. 이 때 용존수분량에 비해 흡착 수분량이 훨씬 크며, 따라서 어느 정도의 열화가 진행된 경우 절연지로 과도한 수분이 흡착되게 된다.

3. 결 론

최대회복전압 곡선의 분석과 FDS로 측정된 정전용량을 이용하여 수분에 따른 절연유와 절연지의 특성을 비교해서 살펴보았다. 두 실험을 통해 수분의 유입은 절연유의 용존수분량과 절연지의 흡착수분량을 증가시키고, 이때 흡착수분량이 용존수분량에 비해 훨씬 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서 어느 정도의 열화가 진행된 경우 절연지에는 과도한 수분이 흡착되게 되고 절연지의 절연 내력을 급격히 저하시켜 사고의 원인이 될 수 있다고 생각되어 진다.

여러 가지 수분에 대한 측정법들이 현존하고 있고 개발되어 지고 있지만, 그 전에 절연지, 절연유, 권선 등 변압기 내부의 구성 물질들이 수분, 온도, 습도, 불순물, 시간 등의 요소들에 대해 어떠한 특성을 보이는 지를 연구해볼 필요가 있다. 이 논문에서는 수분에 대한 절연지와 절연유의 특성만을 비교 설명하였지만, 앞으로 수분, 온도, 습도, 열화시간 등의 여러 요소들에 대해 포괄적인 연구가 진행된다면 변압기 열화의 진단기술 발전에 크게 기여할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] "Measurement of moisture contents of oil-paper in transformer with RVM", 대한전기학회 제36회 하계학술대회, 전기설비, P75-77, 2005
- [2] Cséepes 외, "A diagnostic method, developed in hungary, for gathering information on the general state of oil-paper insulation systems.", General State Diagnostics for Transformer and Cable Isolations. 1994
- [3] Omar Hassan, Hossein Borsi, Ernst Gockenbach, E. M. Aboelzahab, M. I. Gilany, "Diagnostic of insulation condition of oil impregnated paper insulation system with return voltage measurements", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. pp153-156, 2003
- [4] Cséepes G, "The application of the return voltage method in the isolation techniques", Villamosság, 34. 1986, pp.33-74
- [5] Giuseppe M. Urbani, Roger S. Brooks, "Using The Recovery Voltage Method to Evaluate Aging in Oil-Paper Insulation", 1998 IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics 1998, pp. 93-97
- [6] V. Aschenbrenner, T. Ueik, " Using of Parameters of RVM Measurement for qualitative Appreciation of Power Transformers Insulation State", 2002 IEEE, pp. 1829-1833