

오일에 용존된 수분의 온도 의존성

김유희\*, 한상옥\*, 이세현\*\*  
 충남대학교\*, 한국폴리텍대학\*\*

A Distributed Characteristics of Water in Mineral Oil by Heating

Yoon Hyoung Kim\*, Sang Ok Han\*, Sei Hyun Lee\*\*  
 Chungnam National University\*, Korea Polytechnic college\*\*

**Abstract** -수분은 변압기의 절연 상태를 악화시키고 결국 변압기 고장의 주요 원인이 된다. 본 논문에서는 변압기의 절연물인 절연지와 절연유에 대해서 회복전압 측정법을 이용한 열화상태 진단에 대한 측정을 통해 변압기내에 존재하는 수분의 온도 특성을 실험했다. 실험 결과 변압기내 온도에 따른 수분은 절연유보다 절연지의 영향을 크게 받는 것으로 나타났고, 이는 변압기에 사용된 절연지인 셀룰로오스계 절연지의 수분 흡착성이 강하고, 온도가 증가함에 따라 수분을 생성하는 특성 때문인 것으로 판단되었다.

1. 서 론

변압기 사고는 계통의 사고로 이어질 수 있기 때문에 변압기의 교체시기를 적절히 판단하는 것과 사고를 유발하는 원인 분석 및 사고 예방은 굉장히 중요하다. 변압기의 안정적인 운용을 위해서 변압기 제조시 권선 내부 결함을 줄이는 설계 및 제조 기법을 연구하는 것이 중요할 뿐만 아니라 변압기 운용시 선로 관리 및 변압기 주위 환경에 각별히 관심을 가지고 관리할 필요성이 있다.

변압기 사고는 부분 방전에 의한 권선내부 단락고장을 비롯하여 여러 가지 요인에 의해 발생하는데 계절적으로 주로 여름철에 일어난다. 제조 과정에서 발생하는 결함을 제외한다면 변압기 사고의 요인으로 환경적인 요인에 대해 접근해야 하는데, 주로 변압기내 수분과 온도 메커니즘에 영향을 받는다. 실제로 변압기 사고가 온도가 높은 여름철에 많이 발생하기 때문에 변압기 내부의 절연유와 절연지의 온도에 따른 수분 메커니즘을 분석할 필요성이 있다.

이를 위해 본 논문에서는 회복전압 측정법을 사용했다. 회복전압 측정법은 수분 함유량을 검출하여 내부 절연물의 열화 상태를 진단하고 기기의 잔존 수명을 예측할 수 있고, 변압기를 해체할 필요가 없고 현장에서 결과물을 얻을 수 있기 때문에 보다 효율적이고 신속한 열화진단 및 잔존수명 예측이 가능하다. 또한 종래의 진단기법으로 얻어진 데이터에 대한 신뢰성 확보에 영향을 미칠 수 있다.

본 논문에서는 변압기 내부의 절연유와 절연지를 모의하여 온도특성에 따른 수분 메커니즘에 대해 검토해 보았다.

2. 본 론

2.1 관련이론

2.1.1 유전체 분극

유전체 양단에 직류 전압을 인가하면 유전체에는 전하가 축적된다. 유전체는 전기적으로 절연체 이지만 전계가 인가되면 물질내 분극이 발생하여 극성을 가지게 된

다. 유전체의 분극에는 전자분극, 이온분극, 쌍극자배향 분극, 공간전하분극 등 네 가지가 있다.

전기장이 없는 평형상태의 경우 원자핵과 원자핵 주위를 도는 전자는 전기적으로 중성이므로 원자핵과 전자의 양, 음 전하의 중심이 일치한다. 이 때 전기장이 인가되면 원자핵과 전자의 중심이 어긋나 +q, -q의 전하가 미소거리 d만큼 떨어지게 된다. 이를 전기쌍극자 모멘트라고 하며 이 때 생기는 분극을 전자분극이라 한다.

분자를 이루고 있는 각 원자는 상호간에 힘이 작용하여 평형상태를 유지하고 있다. 이 때 외부 전기장이 인가되면 각각의 이온은 변위를 일으켜 새로운 위치에서 안정된 상태가 된다. 이 때 생기는 분극을 이온분극이라 한다.

양전하와 음전하의 중심이 일치하지 않는 물질은 영구 전기 쌍극자 모멘트를 가지고 있다. 이런 물질은 극성 분자라고 하며 대표적으로 H<sub>2</sub>O가 있다. 극성분자는 외부 전기장이 없을 때 전체적으로는 평형상태를 유지하지만, 외부 전기장이 인가되면 각각의 쌍극자가 전기장 방향으로 배열하여 분극이 일어나게 된다. 이를 쌍극자배향분극이라 한다.

전하 운반자가 전하의 이동을 금지하는 물리적 장벽에 의해 방해받았을 때 분극이 발생하고, 종류가 다른 유전체가 혼재해 있는 경우 그들의 계면에 전하가 흘러들어 분극이 발생하게 되는데 이를 공간전하 분극이라 한다. 이러한 분극들은 주파수에 따라 생성과 소멸 특성이 달라지는 특징이 있다.

2.1.2 회복 전압 측정법

유전체 양단에 직류전압을 인가하면 유전체내에 분극으로 인한 전계가 형성된다. 회복전압 측정법에서 이를 충전(Charge)시간 이라고 하고 그 시간을 T<sub>c</sub>로 정의 한다. 충전 후, 양단을 단락시키면 방전(Discharge)이 일어나게 되는데 그 시간을 T<sub>d</sub>로 정의한다. 회복전압 측정법에서 방전 시간은 충전시간의 1/2로 정해진다.

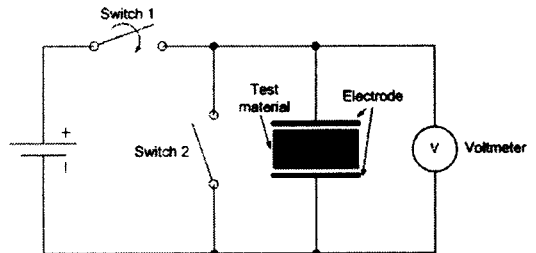


그림 1 회복전압 측정 회로

방전시간이 충전시간보다 짧기 때문에 유전체는 완전

방전되지 못하고 전류전하에 의한 전압이 남아있게 된다. 이 때의 전압을 회복전압이라 한다.

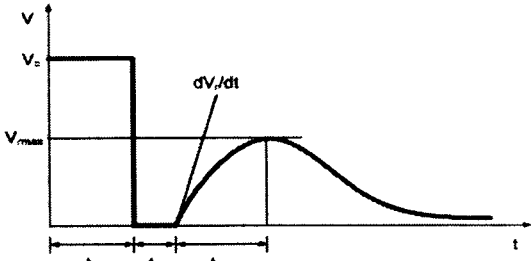


그림 2 회복 전압의 기본 특성

회복 전압측정시 나오는 파라미터는 다음과 같다.

- V<sub>c</sub>: 충전전압
- V<sub>r</sub>: 회복전압
- V<sub>max</sub>: 최대회복전압
- dV<sub>r</sub>/dt: 회복전압 초기 기울기
- t<sub>c</sub>: 충전시간
- t<sub>d</sub>: 방전시간
- t<sub>peak</sub>: 최대회복전압에 도달하는 시간

변압기의 열화정도는 변압기 내부의 절연물인 절연유와 절연지의 열화정도에 큰 영향을 받게 된다. 이 열화의 주 원인은 수분이다. 절연유와 절연지는 극성재료가 아니기 때문에 분극의 영향에 민감한 반응이 나타나지 않는다. 하지만 변압기 내에 수분이 존재하게 되면 극성 결합으로 인해 생긴 쌍극자 배향분극이 형성된다. 이로 인해 충전시간보다 짧은 방전시간 동안 완전히 탈분극 되지 못하게 된다.

충전, 방전이 끝나고 유전체 양단에 전압계를 연결해 회복전압을 측정할 수 있다. 이 회복전압은 유전체의 분극에서 공간전하분극, 쌍극자배향분극 등 탈분극속도가 늦은 분극에 의해서 나타나는 전압으로 탈분극 되지 못한 분극에 의한 전압이 검출 되는 것이다.

회복전압 측정법에서 중요한 파라미터는 최대회복전압, 회복전압 초기 기울기, 최대회복전압에 도달하는 시간이다.

각 충전시간에 따른 회복전압은 열화정도가 클수록 최대회복전압이 낮은 충전시간 쪽으로 이동한다. 이는 수분에 의해 발생하는 분극저항과 분극커패시턴스가 증가하면서 회로에 병렬로 연결되는 형태가 되기 때문에 시정수가 감소하기 때문이다.

## 2.2 실험방법

그림 3은 회복전압 측정법으로 변압기 열화진단을 하기 위한 모의 셀과 전극이다. 셀은 본체, 덮개 모두 균일한 열전달 및 장시간 실험을 위해 황동 재질로 제작되었으며, 덮개부분에는 내부에 들어갈 전극과 외부의 커넥터의 연결을 위한 부분이 2쌍(+단자, -단자) 4조가 있다. 연결부는 외기 유입에 의한 절연물의 산화방지를 위해 테프론 마개로 막았다. 셀 본체와 덮개사이에는 고내온성의 Viton O-ring를 넣어 외기 유입 및 누유를 방지하였다.

시험용 전극은 두 가지로 하나는 전극만을 사용한 것이고, 다른 하나는 전극에 셀물로오스계 절연지를 감싸 제작 하였다. 셀물로오스계 절연지는 대부분의 변압기에 사용되고 있는 것으로 전극에 감싼후 전극과 함께 진공 건조기에서 건조시켜 수분과 공기를 제거하였다. 전극은 가로 92mm, 세로 20mm, 두께 1.5mm의 copper로 제작되었다. 전극사이에는 20mm\*10mm의 크기로 고분자 절

연물인 알루미늄을 5mm 두께로 전극 상부와 하부에 설치하여 전극간격을 유지시켰다.

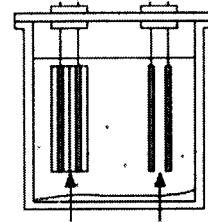


그림 3 실험용 모의 셀과 전극

시험용 셀에는 전극만을 사용한 것과 전극에 절연지를 감싼 것 두 가지 전극을 설치하였으며 앞에서 설명한 바와 같이 5mm 두께의 알루미늄을 스페이서로 사용해서 두 전극의 전극간 간격은 서로 똑같이 유지시켰다.

변압기는 내부 절연물로 절연유와 절연지를 사용하게 되는데 이중 절연유는 전극간 절연유지 뿐만 아니라 운전 중에 발생하는 열을 발산시키는 역할을 한다. 배전급에 사용되는 변압기에는 냉각을 위해 광유계 절연유가 사용되고 있고, 본 실험에서 사용한 절연유 역시 광유계 절연유로 변압기 제조시에 실제로 변압기에 주입되는 광유 1중 2호 절연유이다.

실험은 온도에 따른 변압기 오일의 수분 특성을 실험하기 위해 온도를 상온(25도), 50도, 70도로 변화시키면서 회복전압을 측정하였다. 또한 변압기 열화에 절연지가 미치는 영향을 비교 측정하기 위해 전극만 있을 때와 전극에 절연지를 감싸서 만든 전극에 각각 회복전압 측정을 실시하였다.

회복전압 측정용 장비는 Tettex 사에서 제조된 RVM5462와 자체 제작된 RVM METER로 각각 실시하였다. RVM METER는 전원부, 콘트롤부, 고정밀 METER 로 구성되었고 National Instrument에서 제작된 컴퓨터와 연결되어있어서 LabVIEW 프로그램을 통해 실시간으로 데이터를 분석할 수 있다.

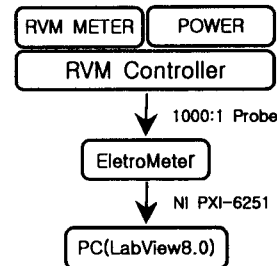


그림 4 RVM METER 시스템 구성도

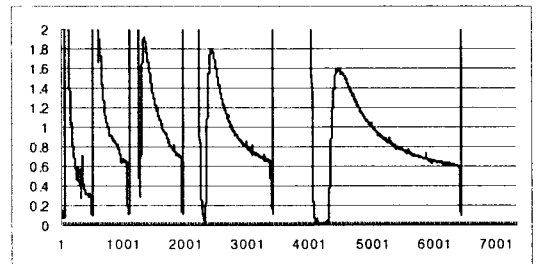


그림 5 LabVIEW 8.0으로 수집한 데이터 예시

그림 4, 그림 5는 RVM METER의 시스템 구성도와 이

를 통해 데이터가 실시간으로 LabVIEW 8.0으로 출력되는 모습이다.

### 2.3 실험결과

#### 2.3.1 Oil-Paper 절연

첫 번째 실험 결과는 절연지와 전극을 변압기 절연물로 사용했을 때를 모의한 시험으로 결과는 그림6, 그림7과 같다.

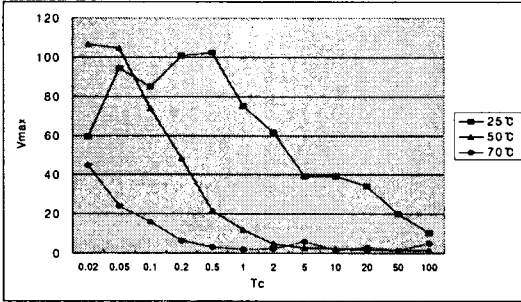


그림 6 Oil-Paper 절연 모의실험(Tettex RVM5462)

그림 6은 Tettex RVM5462로 측정된 충전시간에 따른 회복전압 값이다. 상온에서는 최대회복전압이 0.5초의 충전시간에 나타났으나 온도가 올라가면서 최대회복전압이 좌측으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 온도가 올라감에 따라 절연지에서 빠져나온 수분이 절연유중에 포함되었고, 또한 셀 하부에 모여 있던 수분이 대류현상에 의해 셀 상부로 올라갔음을 보여준다.

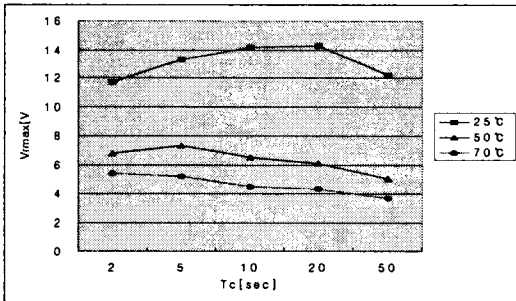


그림 7 Oil-Paper 절연 모의실험(RVM METER)

RVM METER로 측정된 결과도 마찬가지로 상온에서는 20초의 충전시간에 최대회복전압이 나타났으나 온도가 올라가면서 최대회복전압이 나타나는 시간이 좌측으로 이동했다. 특히 70도에서는 최대회복전압을 알 수 없는데 이는 더 짧은 시간에 최대회복전압이 위치하고 있음을 의미한다.

#### 2.3.1 Paper 절연

두 번째 실험 결과는 변압기 절연물로 Oil만을 사용했을 때를 모의한 시험으로 결과는 그림8, 그림9와 같다.

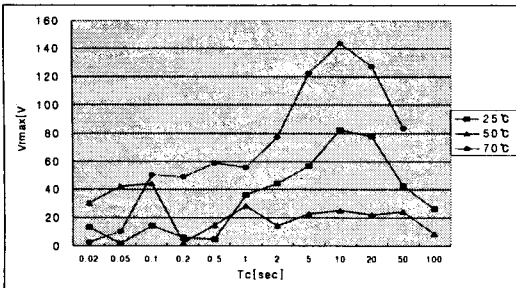


그림 8 Oil 절연 모의실험(Tettex RVM5462)

온도 변화에 대한 절연지의 영향을 알아보기 위해 절연지가 없는 전극에 대해 회복전압 측정을 실행한 결과는 그림 8과 같다. 이 그래프는 절연지가 있을 때와 전혀 다른 경향으로 나타나고 있는데, 전극사이의 오일내에 존재하는 수분량 보다 절연지가 흡수하고 있는 수분의 양이 더 많다는 것으로 판단할 수 있다.

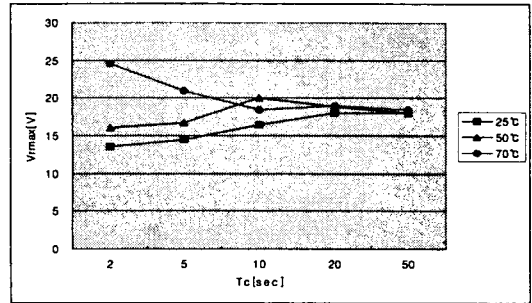


그림 9 Oil 절연 모의실험(RVM METER)

그림 9는 절연지가 없을 때 RVM METER로 측정된 결과값이다. 이 또한 절연지가 있을 때와는 다른 경향을 보여주고 있다. 온도가 증가함에 따라 최대회복전압이 좌측으로 이동하는 경향이 절연지가 있을 때보다는 확연히 드러나지 않는다.

### 3. 결 론

변압기 내부 절연물을 모의한 본 실험에서 절연유와 절연지에 포함된 수분의 온도특성을 확인해 보았다. 온도가 올라감에 따라 최대회복전압이 좌측으로 이동했다. 이는 온도 증가로 인한 변압기의 자유 수분의 증가를 보여주는 것이다. 상온에서 변압기 하부에 가라앉아있는 수분은 온도가 증가함에 따라 대류에 의해 자유수분이 되어 절연유 중에 수분이 많아지게 되고, 또한 절연지에 흡착된 수분이 절연지에서 이탈하여 유중으로 흘러나온다. 이 때문에 전극간 수분의 증가로 절연성능이 저하되었다.

Oil-Paper와 Oil 절연 모의 실험 결과는 오일 내에 존재하는 수분량은 절연지내에 함유된 수분의 영향이 큰 것으로 판단할 수 있는데, 절연지에 흡착된 수분이 온도가 증가하면서 자유수분이 되는 양이 셀 하부에서 온도 상승에 의해 대류하는 수분양보다 많기 때문에 판단할 수 있다. 또한 셀룰로오스계 절연지는 온도가 증가하면 화학적인 반응에 의해 수분을 발생시키는 것으로 알려져 있다. 열화된 절연지는 오히려 자유 수분을 절연유내로 공급하게 되는 상황이 되어 오히려 변압기 사고율을 높일 수 있다는 것도 확인할 수 이었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Cséepes , Háamos , Kispáal , Dr Osváath , Schmidt. "General State Diagnostics for Transformer and Cable Isolations."
- [2] Gusztav CsCpes, Istvan Hamos, Roger Brooks, Volker Karius, "Prectiac Foundations of the RVM", 1998 IEEE, pp.345~355
- [3] Ashwin Prasad, "Diagnostics of Oil-Paper Insulation using Voltage Response Method", The University of Queensland 2000