

경년 열화에 따른 변압기 절연물의 회복전압 특성

강석영*, 한상욱*, 김재훈*, 김주한*, 이세현
 충남대학교*, 대전기능대학

The Characteristics of RVM by Accelerated Aging in Insulating Materials of the Transformer

Seok Young Kang*, Sang Ok Han*, Jae Hoon Kim*, Ju Han Kim*, Sei Hyun Lee
 Chungnam National University*, Dae-jeon Polytechnic College

Abstract - In present measurement of moisture contents is used as one of method for estimating degradation of transformer. Most of people use Karl-Fischer titration method for detection moisture contents but this measurement is inconvenient method because we must analyze transformer oil-paper after dismounting transformer and sampling in field. Therefore we don't directly investigate them in field. In this paper we will introduce Recovery Voltage Method(RVM) that is new method for estimating measurement in field though dismounting facility. For measure of moisture contents using RVM in accordance with accelerated thermal aging we have made experimental test cell and aged at a temperature up to 140℃ for 300 hours. And we have been measured at intervals of 100 hours using RVM 5462 made in Tettex company.

1. 서 론

현재 산업의 고도화에 따라 전기의 수요가 늘고 있다. 이에 따라 80년 이전에는 163대에 불과했던 변압기가 2000년에 들어서면서 1000대를 넘어서 현재 1633대를 운용하고 있는 실정이다.

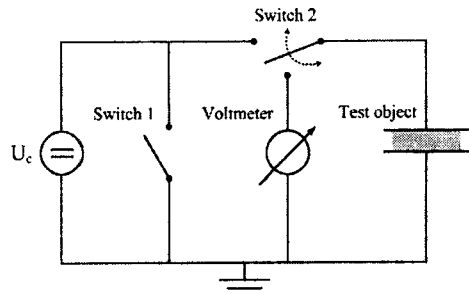
국내 배전용 변압기 운영체제는 설치에서 폐기까지 최대 26년을 사용하지만 13년이 지난 후 교체, 수리한 뒤 재설치를 하고 있다. 교체 비용이 싼품 변압기를 설치하는 비용과 비슷하기 때문에 경제적으로 손실이 많다. 변압기의 신뢰도를 향상시켜 수명을 연장하는 것은 궁극적으로 경제적 이익을 가져올 수 있기 때문에 변압기의 주기적인 상태진단이 절실히 필요하다.

변압기의 내부 절연물 열화 상태를 진단하기 위해 사용되는 parameter 중 수분을 검출하기 위한 방법으로 그동안 화학적으로 Karl-Fischer법과 물리적으로 분석하는 Dew-Point법으로 수분함유량을 검출해 왔지만 이 방법은 변압기를 해체하여 절연지, 절연유등의 절연물 샘플을 채취한 뒤, 이 시료 sample을 현장에서 분석하지 못하고 전문기관에 분석을 의뢰하여야하는 번거로움이 있다. 또한 그 데이터 역시 변압기 내부의 국부적인 부분에서 채취된 sample에 대한 정보일 뿐이다.

여기서 다음 새로운 변압기 상태진단법인 회복전압측정법은 기존 데이터를 토대로 하여 변압기의 상태를 진단하는 방법이다. 이 방법은 수분 함유량을 검출하여 내부 절연물의 열화 상태를 진단하고 기기의 잔존수명을 예측하는데 도움을 줄뿐만 아니라 종래의 진단방법으로 수행해 온 데이터에 대한 신뢰성을 더욱 확실하게 할 수 있다.

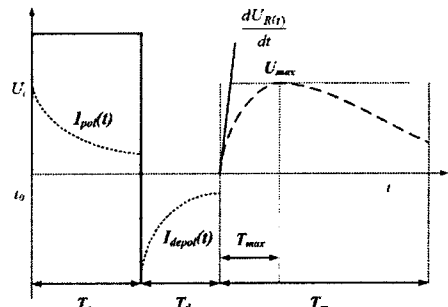
따라서, 본 보고서에서는 변압기 상태 및 잔존수명을 예측할 수 있는 방법인 회복전압측정법의 운용을 살펴보고자 한다.

2. 이론적 내용



<Figure.1 Recovery Voltage Method 원리>

Figure.1은 열화셀의 회복전압 측정(Recovery Voltage Method 이하 RVM)을 위한 원리이다. 셀에 저압 직류 500[V] - 2000[V]를 인가한다. 충전을 일정시간 동안 한다. 충전시간은 전압이 충전 될 때 까지 하고 인가 전원을 분리한 후 방전 시킨다. 방전 시간은 충전시간의 절반 정도로 한 후 회로를 개방한다. 회로를 개방한 후 시험품 양단의 전압을 측정하면 계면이나 쌍극자 배향 등 속도가 늦은 분극은 짧은 방전시간에 제자리로 돌아오지 못하고, 일정시간 이후에 돌아오게 되는데 RVM은 늦게 돌아오는 분극의 정도를 검출하는 것이 주목적이다. 늦은 방전은 기체, 액체, 고체 속에 스며든 수분 등에 의해 속도가 늦은 계면 분극, 공간전하 등을 생성하게 되는데 이 생성된 양은 수분량과 밀접한 관계를 갖게 된다.



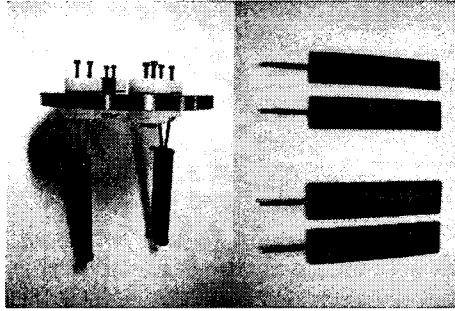
<Figure.2 Recovery Voltage 특성 곡선>

Figure.2는 회복전압 특성 곡선을 나타낸 것으로 parameter는 회복전압의 최대값(U_{max}), 회복전압의 상승률($\frac{dU_{R(t)}}{dt}$), 회복전압값이 최대가 될 때까지의 시간(T_{max}), 충전시간(T_c)이 된다. 이와 같은 시험은 장시간

동안 반복시험을 통해 통계적으로 처리한 후 이들의 값들로부터 수분량을 검출하게 되고 이를 이용해 기기의 절연진단 내지는 수명을 예측하는 수단으로 활용할 수 있다.

3. 시험 과정 및 고찰

3.1 시험 준비



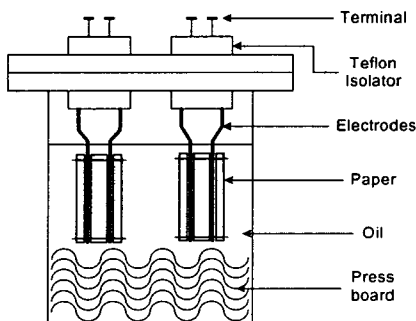
<Figure.3 시험용 셀 Cover와 전극>

RVM 시험을 하기 위해 전극을 2cm × 9.2cm로 고안하여 8개를 제작하였다. 절연지는 주상변압기에서 많이 사용되고 있는 셀룰로오스 절연지를 30cm × 9.2cm로 자른 후 각각의 전극에 감았다. 전극을 두 개씩 네 쌍을 밀착 고정한 후 네 쌍의 전극을 Vacuum Oven에서 105℃로 24시간 건조시켰다. 건조된 전극 쌍을 셀 cover의 외부 terminal에 연결된 teflon 마개에 고정하였다. 따라서 셀 cover를 개방하지 않은 상태로 셀 내부의 수분함유량을 측정할 수 있도록 하였다. 전극 사이의 Gap은 2mm로 절연지가 그 사이를 메우고 있다.

내용물	Core	Oil	Coil	Paper	etc.
비율(%)	51.6	28.6	17.4	2.3	0.1

<Table.1 변압기 내의 구성품 중량비>

하부 셀은 열화를 잘 견디고 Oil Bath에서 균일한 열전달 및 장시간 실험을 위해 황동 재질로 제작하였으며 외기의 유입에 따른 절연유의 산화를 방지하기 위해 기밀구조로 제작되었다. 기밀을 완전하게 이루어져야 하기 때문에 Viton O링을 teflon 마개 상,하부, 셀 Cover에 삽입하였다.



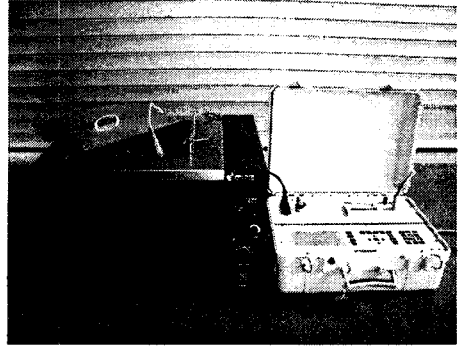
<Figure.4 RVM 시험용 셀의 구성>

하부 셀에 넣은 절연유(광유 1종 2호)는 진공펌프를 통해 내부의 공기를 제거하였다. 하부 셀에는 표.1과 같이 일정 비율로 Core(규소강판), Oil(절연유), Coil(에나멜

동선 PEW), Paper(셀룰로오스 절연지)를 넣어야 하지만 이번 시험에서는 절연유와 절연지의 관계를 알아보기 위해 Core와 Coil은 제외하였다. 부족한 절연지의 중량은 Press Board를 첨가하여 중량비를 맞추었다.

셀 Cover와 하부 셀을 조립하여 시험용 셀을 완성하였다. 실온에서 10시간 가량을 방치한 뒤 시험을 시작하였다.

3.2 시험 과정



<Figure.5 항온조와 Tettex사의 RVM 장비>

RVM측정은 Tettex사에서 제작 판매하는 RVM Type 5462를 사용하였다. 측정 온도 범위는 5℃에서 100℃까지 가능하다. 측정방법은 측정 cable을 시료와 연결한 뒤 접지 cable은 접지와 연결하고, RVM측정을 시작한다. 먼저 noise 측정 결과가 양호하면, 0.02초에서 2000초까지 측정하게 된다. Data output은 자체 print도 되지만 직렬 Interface RS232를 통해 컴퓨터로 직접 받았다. RVM 장비 특성상 측정시 주변환경의 영향을 받으므로 측정시에는 사람의 접근을 금지 시켰다.

측정시 셀 내부의 온도를 일정하게 유지하기 위해 Oil Bath로 실리콘 유중에서 가열하는 중탕법으로 열화를 시켰다. 절연유의 내열온도를 고려하여 열화 온도는 140℃ 하였다. 시간은 100시간 단위로 실험, 100시간, 200시간, 300시간씩 각각 1번전극, 3번전극 총 8번을 측정하였다.

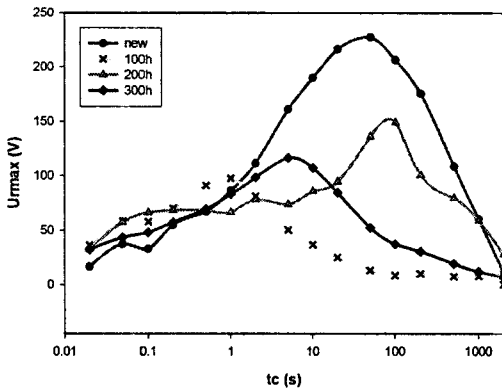
열화전의 신품 절연지가 담긴 셀을 RVM으로 두 번 측정하였다. 측정시에는 Oil Bath를 25℃로 유지시킨 뒤 셀을 Oil Bath에 넣고 셀의 내부온도가 25℃가 될 때까지 3시간을 방치하였다. 셀 내부온도가 25℃ 되었을 때 측정을 시작하였다. 측정시 걸리는 시간은 약 4시간 가량 걸린다. 두 번의 측정이 끝나면 Oil Bath를 140℃로 올린 뒤 셀을 100시간 열화를 시켰다. 100시간 열화가 끝나면 셀을 꺼내서 실온으로 24시간 정도를 두었다. 100시간 열화 셀을 신품셀과 동일한 방법으로 Oil Bath를 25℃로 맞추고 셀을 담근 뒤 3시간 후 2번 측정하였다. 200시간 열화셀, 300시간 열화셀도 동일한 방법으로 측정하였다.

2.3 실험 데이터

RVM 장비 측정 결과를 앞서 말한바와 같이 Interface RS232로 컴퓨터로 받았다. 실험 data는 $t_p(s)$, $U_{max}(V)$,

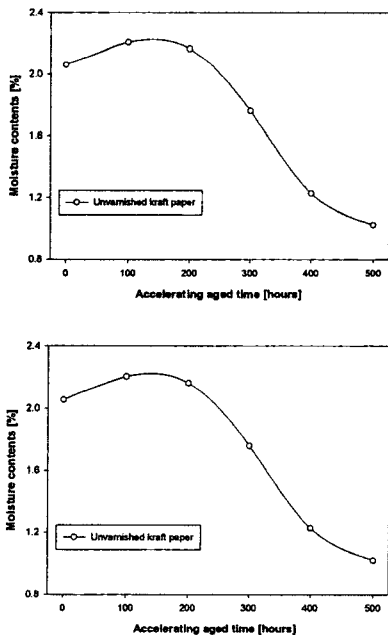
$t_{peak}(s)$, $\frac{dU}{dt}$, Time이 나온다. 차례대로 충전시간, 회복전압의 최대값, 회복전압이 최대가 될 때까지의 시간, 회복전압의 상승률, 측정시간을 뜻한다. 여기서 비교해볼 데이터는 U_{max} 즉 회복전압의 최대값이다. 절연유의 열화가 회복전압의 최대값에 미치는 영향을 비교하였다.

3.4 실험 결과 및 고찰



<Figure.6 열화로 인한 tc에 대한 Umax 그래프>

Figure.6은 회복전압이 최대가 될 때까지의 시간과 U_{max} 값의 관계를 나타낸 그래프로서 내부 절연지 수분 함유량이 증가할수록 최대회복전압의 최대치가 우측에서 좌측으로 이동하고 U_{max} 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그래프에서 T_{max} (U_{max} 가 될 때까지의 시간)의 값이 200시간에서 최대이고 100시간에서 최저를 보였다. 이것은 100시간에서 수분함유량이 급격히 증가했다가 200시간에서 최소로 감소하고 서서히 수분함유량이 증가한다는 것을 뜻한다.



<Figure.7 광유 함침 절연지 절연유의 수분함유량>

Figure.7은 RVM과 동일한 방법으로 준비된 열화셀로 열열화가속시험을 한 뒤 Karl-Fischer 방법으로 절연지와 절연유의 수분함유량을 측정된 data다. 신유에서 100시간까지만 봤을때 절연지, 절연유 모두 수분함유량이 증가한다. 그렇기 때문에 100시간에서 수분함유량이 급격히 증가한다. 100시간을 지남에 따라 절연지는 수분함유량이 줄어들고, 절연유는 여전히 수분함유량이 증가한다. 열 열화시간이 증가할수록 절연지의 수분이 감소하

는 경향을 보이고 있다. 이는 가열시간이 증가함에 따라 절연지의 내부 수분이 유증에 흡수되었거나 증발했을 것으로 판단된다. 수분함유량은 절연유에 비해 절연지가 더 많이 가지고 있다. 절연지에서 수분이 절연유로 이동한다. 또 100시간까지 절연지의 수분이 증가하면서 절연지는 급격히 열화되고 이 열화로 인해 화학반응이 일어나 수분이 생성된다. 가속열열화에 의해 셀룰로오스의 hydrocarbon chain이 파괴되고 분자들의 chain도 감소한다. 끊어진 chain은 수소와 산소 원자와 결합해 H2O를 생성한다.

수분함유량이 증가할수록 변압기 내부 절연물의 충전 전압 최대값까지 도달할 때까지의 시정수가 감소하게 된다. 따라서 수분의 증가로 인해 회복전압값은 좌측으로 이동하여 매우 짧은 시간에 최대값에 도달하게 되며, 수분함유량이 많을수록 최대회복전압에 도달할때까지 걸리는 시간(t_c)이 짧은 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

RVM방법으로 가속열화와 절연지, 절연유의 수분함유량 관계를 알 수 있었다.

시험 셀의 가속 열화가 이루어질수록 셀 내부의 수분 함유량이 증가하는 경향을 보였다. 처음 100시간까지는 수분 함유량이 급격히 증가하는데, 이는 절연지 절연유 사이의 수분유동이 안정화를 이루지 못했고, 절연지가 급격히 열화가 되면서 수분이 많이 흡수되었다. 또 절연유도 역시 수분을 흡수하기 시작했다기 때문이다. 다음 100시간까지 수분함유량이 감소하는 것은 수분의 유동이 안정화를 이루면서 절연지의 수분함유량이 급격히 감소했기 때문이다. 절연유에 비해 절연지의 수분함유량이 훨씬 크기 때문에 초반 수분 함유량은 절연지에 의해 결정된다. 200시간 이후 부터는 수분 함유량이 꾸준히 증가한다. 이것은 절연지가 가속열화 되면서 셀룰로오스가 파괴되면서 화학반응을 일으켜 수분이 생성되고 절연지에서 더 이상 수분 유동이 없기 때문이다. 절연지의 수분 유동이 없다면 절연유의 수분 증가가 시험 셀 전체의 수분 함유량에 관계하기 때문이다.

결론적으로 RVM 장비는 변압기 내의 수분함유량을 측정하여 변압기 상태를 진단하여 예상 수명을 알 수 있다. 변압기 내의 수분이 증가한다는 것은 변압기의 절연물에 열화가 되었다는 것이고 이것은 상태를 진단했을 때 예상 수명이 줄었다는 것이다. 변압기의 상태를 확실히 진단하여 신뢰도를 높여 주기적으로 교체되는 변압기를 줄여 경제적 이익을 추구하여야겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] Cséepes, Háamos, Kispáal, Dr Osváath, Schmidt, "General State Diagnostics for Transformer and Cable Isolations." 1994
- [2] 이병성, 송일근, 이재봉, 한상욱, "The Evaluation of Thermal Aging Characteristics in insulating Materials of the Pole Transformers", 전기전자재료학회논문지, Vol.16, No.12, 2003
- [3] Gusztav CsCpes, Istvan Hamos, Roger Brooks, Volker Karius' "Practical Foundations of the RVM", IEEE, 1998
- [4] Michael Webb, "Transformer condition assessment with the Tettex Recovery Voltage Method", IEE, 1996
- [5] 이병성, "배전용 변압기 품질 신뢰도 향상 방안", 한국전력 연구원, 2005

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성지원사업에 의해 작성되었습니다.