

변압기내부 절연유의 전기적 등가회로 및 회복전압특성 해석

이세현^{*}, 한상옥^{**}, 박강식^{***}
 한국폴리텍^{II}대학^{*}, 충남대학교^{**}, 대덕대학^{***}

Simulation of RVM characteristics using equivalent electrical circuit of transformer Oil and Paper

Sei Hyun Lee^{*}, Sang Ok Han^{**}, Kang Sik Park^{***}
 Korea Polytechnic^{II} College^{*}, Chungnam National University^{**}, Daeduk College^{***}

Abstract -오일 변압기 내부의 절연물은 절연지, 프레스보드, 광유 또는 식물유가 주로 사용되고 있다. 사용기간과 과부하 조건에 따라 열화정도가 달라질 수 있으며, 내부 절연물의 열분해 및 가수분해로 인해 수분은 자연스럽게 생성될 수 있다. 생성된 수분은 절연을 약하게 하는 주된 요인으로 작용해 기기의 고장 또는 정전을 초래할 수도 있다.

본 논문에서는 변압기 내부 절연물의 주파수응답 특성과 절연상태 값을 바탕으로 변압기 내부를 전기적 소자로 등가화하였다. 그 후 등가화된 회로를 이용해 회복전압법의 원리에 따라 EMTP 프로그램을 활용해 분극특성을 모의하였다. 실제 측정값과의 비교를 위해 보고된 문헌의 데이터를 활용하였고, RVM을 이용한 실측값과 유사한 결과를 얻게 되었다.

따라서 본 시뮬레이션에 활용된 전기적 소자값을 변경함으로써 내부 절연물의 열화정도에 대한 기대 과형을 예측할 수 있는 유용한 도구로 활용될 수 있음을 확인하였다.

각한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 절연지는 셀룰로오스 재료로 되어 있고, 열화가 되면서 그물망 구조의 글루코스 구조사슬이 끊어져 수분이 생성되기도 하고, 끈어진 부분에 미세한 기공이 생김으로 인해 모세관 현상으로 수분을 포획하는 작용을 하게 된다.

절연을 목적으로 극간에 삽입된 절연지에 수분이 포획될 수 있는 조건이 만들어지는 것이다. 또한 열에 의해 광유에 포획된 수분은 온도가 내려가면 절연지로 흡수되고, 변압기 온도가 올라가면 내부 권선의 열로 인해 절연지로부터 광유 방향으로 흘러나오는 메커니즘을 갖고 있다.

기존의 회복전압법(RVM), 분극전류법(PDC), 유전율측정법(FDS)등이 전기적인 방법으로 내부 절연물의 분극을 이용해 측정하고 있는데 이들은 측정방법과 인가 전원이 다를 뿐이다. 따라서 변압기 내부를 전기적 소자로 등가화한 회로를 구축함으로써 각각의 시험법에 따라 원하는 특성을 예측하는 기법으로 활용될 수 있다.

1. 서론

열화 또는 변압기 외관의 기밀에 의해 생성되는 수분은 변압기 절연과피의 주원이 되고 있다. 1967년 유럽에서 제조된 3상 50 kV/10 kV and 40 MVA의 변압기 내부를 Karl Fischer titration (KFT)법으로 조사하여 수분의 정도를 표시한 그림이다.

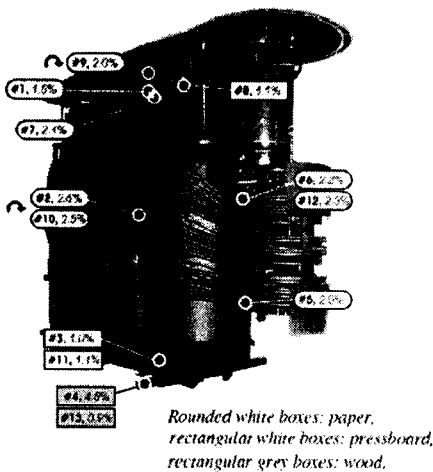


그림 1 변압기 내부 수분 함유정도 표현

절연지 및 프레스보드 그리고 나무가 사용되었는데 그 중 절연지에 가장 많은 수분이 함유되어 극간 절연에

2. 변압기 내부 등가회로

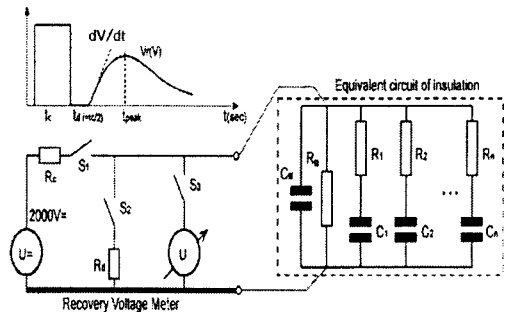


그림 2 인가전압 회로 및 변압기 내부 등가회로

$$j(t) = \sigma E(t) + \frac{dD}{dt} \text{-----(1)}$$

유전체에 전계를 가하면 분극이 발생된다. 그때의 전류밀도 $j(t)$ 는 전체의 변위전류와 전도전류를 나타내며 수식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$j(t)$: 전체 전류밀도

$\sigma E(t)$: 전도전류

$\frac{dD}{dt}$: 변위전류

σ 는 직류에서의 도전율

ϵ_0 는 공기의 투자율

ϵ_r 는 상대 투자율(절연지 4.5, 광유 2.2)

$D(t)$ 는 전기적 변위로서 식(2)로 표현할 수 있다.

$$D(t) = \epsilon E(t) + \Delta P(t) = \epsilon_0 \epsilon_r E(t) + \Delta P(t) \text{-----}(2)$$

여기서 $\Delta P(t)$ 는 (3)식에서 컨볼루션 적분으로 얻어진 응답함수 $f(t)$ 에 관련된 것이다. 만일 직류 전압이 $t=0$ 에서 인가된다면 충전되는 전류밀도는 식(3)과 같이 된다.

$$\Delta P(t) = \epsilon_0 \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \text{-----}(3)$$

$$j_{polarization} = E(\sigma + \epsilon_0 f(t))$$

변압기의 기하학적인 형상에 의해 생성되는 정전용량이 C_0 이고, 여기에 직류전압 V_0 가 인가되면 충전전류는 식(4)와 같이 된다.

$$j_{polarization} = C_0 V_0 \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0} + f(t) \right) \text{-----}(4)$$

인가전압이 만일 개방되면 그때의 방전전류는 식(5)와 같이 된다.

$$j_{depolarization} = -C_0 V_0 [f(t) - f(t+t_{charging})] \text{-----}(5)$$

충전시킨 후 개방하면 충전되는 전류는 다시 방전을 하면서 서서히 감소하게 된다. 그러나 강제적으로 충전된 유전체를 전원을 제거하고, 스스로 단락을 시키게 되면 감소되는 시간은 현저하게 줄어들게 될 것이다.

이것이 유전물질의 분극 즉, 주파수에 대한 투자율을 고려한 회복전압법이다. 먼저 시료에 인가되는 초기 전압은 V_0 , 시료양단의 전압은 V 로 정의하고 그 값의 조건은 식(6)이 된다.

$$0 \rightarrow t < 0$$

$$V(t) = V_0 \rightarrow 0 \leq t \leq t_{charging} \text{-----}(6)$$

$$0 \rightarrow t_{charging} \leq t_{discharging}$$

식 (1)에 (2)와 (3)식을 대입하면 (7)식이 유도된다.

회복전압이 측정되는 동안 즉, 개방회로이므로 전선을 통해 흐르는 전류는 "0"이 된다. 식(7)은 전류 $j(t) = 0$ 일때 해를 구할 수 있게 된다. 유전체의 응답함수, 투자율, 도전율을 알게 되면 회복전압은 구해질 수 있다.

$$j(t) = \sigma E(t) \frac{dD}{dt} = \sigma E(t) + \frac{d}{dt} (\epsilon_0 \epsilon_r E(t) + \Delta P(t))$$

$$j(t) = \sigma E(t) + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d}{dt} E(t) + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \left\{ \int_0^t f(t-\tau) E(\tau) d\tau \right\} \text{-----}(7)$$

변압기 내부의 유전물질의 등가회로 중 정전용량 C_g , 저항 R_g 는 변압기가 제조될 때 기하학적으로 구성되어 생성될 수 있는 자체 고유의 값이 된다. 충전 후 자체 방전시 서서히 이루어 지기위해서는 기하학적 정전용량과 저항은 병렬로 구성되어야 한다. 그리고 분극을 일으키는 수분 등과 같은 유전물질의 등가회로는 저항과 정전용량이 직렬로 연결된 상태로 등가화 될 수 있고, 분극저항, R_{pm} 및 분극 정전용량, C_{pm} 로 표현한다. 여기서 n 은 정수이다. 변압기 내부의 등가회로는 그림 2에 나타내었다.

3. 회복전압 측정법

유전체의 주파수 특성을 고려해 직류 전원으로 충전 후 방전을 짧은 시간 동안 주면 고주파에서도 빠르게 탈분극하는 전자, 이온분극은 탈분극이 이루어 지고, 계면 또는 공간전하는 탈분극 속도가 느리기 때문에 회복전압으로 나타나게 된다. 즉, 수분의 탈분극 속도가 전자나 이온에 비해 느리기 때문에 회복전압법은 수분의 영향을 검출하는데 용이하게 활용할 수 있다. 충전과 방전시간은 주파수특성 측정과 경험을 토대로 설정해 측정해야 한다. 먼저 측정법에 관해 4단계(충전->방전->측정->제시작)의 순서를 나타내면 다음과 같다.

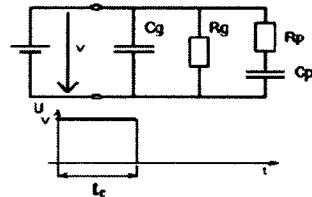


그림 3 충전구간

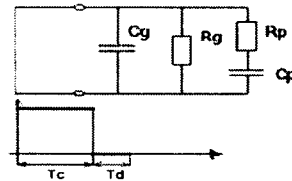


그림 4 방전구간

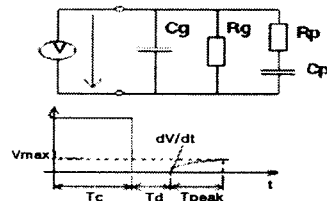


그림 5 측정구간

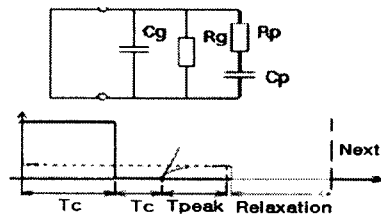


그림 6 반복시험 준비 단계

4. 회복전압 모의 결과

본 논문에서는 R_g, C_g 는 기하학적 구조와 절연물질에 의해 생성된 값으로 측정에 의해 정해졌다. 또한 수분과 같은 종류의 유전물질의 생성은 저항과 커패시터가 직렬로 연결된 Debye Model을 더욱 확장한 방식으로 서서히 움직이는 분극과정을 표현하였다.

확장된 Debye모델은 많은 양의 수분을 함유하고 있을

때 짧은 분극시정수를 갖게 되고, 적은 양의 수분을 하고 있을 때 매우 큰 분극시정수를 나타내게 된다. 수분은 오일, 절연지 및 프레스보드 속에 침투될 수 있어 분극특성은 조합될 가능성이 크다. 따라서 해석시에 고려된 조건은 R_p 와 C_p 가 직렬연결된 상태를 수분증가분으로 가정하였고, 수분이 증가할 경우, 이를 병렬로 수를 늘려 모의하였다. 모의에 사용된 등가회로 값은 그림 7에 나타내었다.

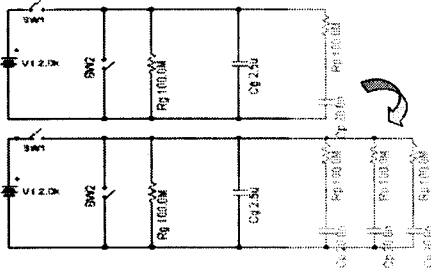


그림 7 모의에 사용된 등가회로의 값

변압기의 내부 저항은 0.1G~수백 G 오옴의 값으로 정하였다. 또한 기하학적인 커패시터는 2.5nF, 생성된 수분에 관련한 정수로 R_p 0.1G오옴, C_p 20nF으로 하여 모의한 충전시간대 회복전압파형은 그림 8에 표시하였다. 인가된 전압은 직류 2kV로 RVM시험 절차대로 모의 실험하였다. 최대값의 변화는 약 0.2초를 정점으로 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 이에 관한 최대 회복전압곡선으로 다시 나타내면 그림 9와 같이 된다.

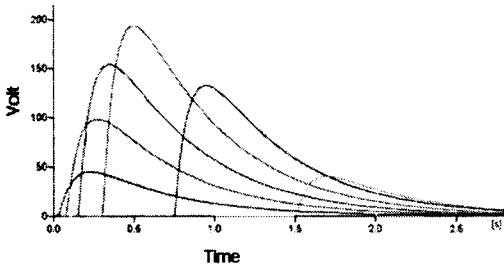


그림 8 충전시간에 대한 회복전압 곡선

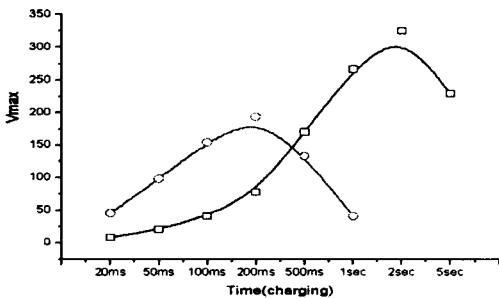


그림 9 충전시간에 대한 최대회복전압 값

그림 9에 나타난 두개의 그래프 중 정점이 우측으로

이동된 그래프의 경우 초기 상태에서 R_p 는 변화없고, 오직 C_p 가 200nF로 변화되었을 경우를 모의한 것이다.

또한 최대회복전압이 될 때 까지 걸린 시간을 분모로 하여 계산하게 되면 회복전압의 기울기가 얻어지게 된다. 기울기가 급할수록 수분량에 많은 영향을 받고 있음을 나타내게 된다.

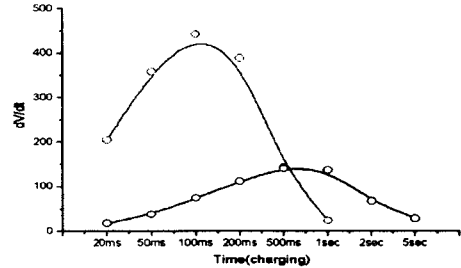


그림 10 충전시간에 대한 회복전압의 기울기

5. 결 론

확장된 Debye모델을 이용하여 변압기 내부 절연물의 전기적 등가회로를 구성하여 모의실험에 활용하였다. 모의 실험에 이용된 R_g , C_g , R_p , C_p 는 문헌에서 제공한 실측데이터로서 수분의 포함에 의해 최대 회복전압곡선의 정점은 좌측으로 또는 우측으로 이동하여 현장에서 측정시 수분량을 즉시 정량적으로 검출 할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 4단계의 RVM시험법으로 간략하게 모의 할 수 있도록 EMTP로 회로를 구성해 모의에 이용하였고, 일부 회로의 소자값을 변형함으로써 실측데이터와의 비교를 통해 수분의 함량에 따라 RVM곡선의 경향을 유추하는데 활용 할 수 있도록 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Tapan Kumar Saha. "Review of Time-Domain Polarization Measurements for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 18, No.4, 2003
- [2] H. Yoshida, Y. Ishioka, T. Suzuki, T. Yanari and T. Teranishi, "Degradation of Insulation Materials of Transformers", IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1987.
- [3] S. Itahashi, H. Mitsui, T. Sato and M. Sone, "Analysis of Water in Oil Impregnated Kraft Paper and its Effect on Conductivity", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2, No.6, pp.1111-1116, 1995
- [4] Gusztáv Csépes, István Hámos, Roger Brooks, Volker Karius, "Practical Foundations of the RVM (Recovery Voltage Method for Oil/Paper Insulation Diagnosis)", Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Vol.1, pp.345-355, 1998
- [5] P. R. S. Jota, S. M. Islam, F. G. Jota, "Modeling the Polarization Spectrum in Composite Oil/Paper Insulation Systems", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.6, No.2, pp.145-151, 1999