

° 황보 승, 한 민구, 과 의로, 김 재철 °  
서울대학교 전기공학과, ° 숭실대학교 전기공학과

Study on Diagnosis for Transformers by Tan δ and Moisture of  
Insulation Oil According to Thermal Aging

Seung Hwangbo, Minkoo Han, ° Heero Kwak, ° Jaechul Kim  
Dept. of Electrical Engineering, Seoul Nat. Univ., ° Sung Sil Univ.

ABSTRACT

This paper reports the experiments regarding to diagnosis techniques for power transformers by measuring dissipation factor and moisture contents of mineral oils. Thermal aging environments of mineral oils were varied by the specially desined systems. Thermal aging of elevated temperature of 90 °C was performed for about 240 and 460 hours, respectively. Dissipation factor, permittivity, and water content were measured. Our test samples were not exposed to air. Dissipation factor increased while permittivity did not change. The level of dissipation factor determining the insulating quality of mineral oil was compared with the previous results of resistivity and several correction factor.

1. 서론

유침절연은 변압기, 전력케이블, 콘덴서등의 전력기에 많이 사용되는 신뢰성이 높은 전기절연 형태이다. 경제의 고도성장과 더불어 전력계통의 초고압화와 대용량화, compact화가 추진되고 있으며 이에 따른 전력기기의 돌발적인 사고는 전력계통의 운영상 막대한 손실을 초래하고 있다. 이어따라 전력기기의 돌발적인 사고를 미연에 방지하는 고장발견방법, 판정방법의 예방진단의 개념이 도입되었으며, 이러한 예방진단기법을 활용하여 사고방지는 물론 수명의 연장이 가능하게 되었다.

전력기기의 사고의 원인의 대부분은 절연체로의 열화에 의한 절연파괴에 기인하고 있으며, 따라서 전력기기의

예방진단방법은 여러가지가 있으나 절연체로의 열화 현상과 열화정도를 분석하는 방법이 널리 사용되고 있다. 대용량 전력기기의 절연은 절연유( 풍유, 합성유), 절연지, press board등이 합침된 유침절연이 주로 사용되고 있으며, 이러한 전력기기는 온도의 상승에 의한 열화와 부분방전에 의한 방전열화에 의하여 절연특성이 저하되며 이에따라 tan δ, 수분의 증가, 산가의 증가, 이상 gas의 증가가 생기게 된다.

본 연구에서는 이등 tan δ 와 수분에 의한 열화 특성을 파악하여 전력기기내의 열화상태를 파악하여 이에따른 전력기기의 예방진단의 기초연구를 제시하고자 하였다.

2. 절연유의 역할 및 수분 측정

유침절연에 사용되는 절연유, 절연지, press-board등은 경년 열화를 일으키며 이에 따라 절연유의 역할 또는 tan δ 는 증가하고, 또 수분의 양도 증가하게 된다. 이와같은 변화를 bridge 회로를 이용하여 측정, 분석하여 변압기등의 전력기기의 이상여부등을 결정하게 된다.

a. tan δ (역률 or Dissipation Factor, 유전정접)

절연유에 전압이 인가되면 절연유의 등가회로는 capacitance(정전 용량) 과 resistance(저항) 성분으로 볼 수 있다. 이때 절연유의 저항성분에 의한 손실(in-phase loss or dielectric loss), 즉 유전손과 역률을 측정하면 절연유의 열화상태를 알 수 있고 이를 바탕으로 변압기등의 경년열화를 파악하여 절연유의 교체여부를 판별할 수 있다.

유침절연에서 절연유의 등가회로는 Fig 1. 에서처럼 병렬회로와 직렬회로로 나타낼 수 있다. 이것을 vacuum 상태의 capacitor Co와 유전체로 채워진 C로 구별하여

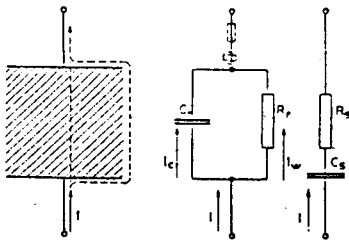


Fig. 1. Parallel and Series equivalent circuits of a dielectric with loss.

나타낸 것이 Fig. 2. 이다.

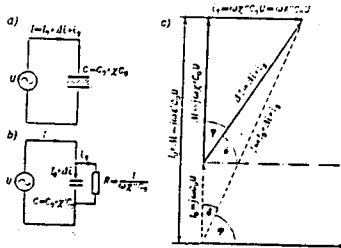


Fig. 2. (a) Capacitor filled with a lossy dielectric; (b) equivalent circuit; (c) relation between voltage and currents in a capacitor filled with a lossy dielectric.

Fig 2.의 c)에서 역률(power Factor)은  $\cos \phi$  이고 Dissipation Factor는  $\tan \delta$ 이다. 일반적으로  $\tan \delta$ 는 dielectric loss를 나타내고, 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\tan \delta = I / (I_0 + I) = I_w / I_c \quad \text{식(2-1)}$$

유전체 손실은 volume loss와 surface loss로 구별되며 이것의 등가회로는 병렬회로와 직렬회로로 나타낼 수 있으며,  $\tan \delta$ 를 구하는 방법이 다르다.

Fig 1.의 병렬회로에서  $\tan \delta$ 는 다음과 같다.

$$\tan \delta = I_w / I_c = R_p / \omega C_p R_p = 1 / \omega C_p R_p \quad \text{식(2-2)}$$

Fig 1.의 직렬회로에서  $\tan \delta$ 는 다음과 같다.

$$\tan \delta = R_s / (1 / \omega C_s) = \omega R_s C_s \quad \text{식(2-3)}$$

병렬회로와 직렬회로의 관계는 다음과 같다.

$$C_p = C_s / (1 + \tan^2 \delta),$$

$$R_p = R_s (1 + 1 / \tan^2 \delta)$$

그리고 유전체내에서 열로 바뀌는 전기에너지(유전손)은 다음과 같다.

$$P = V \times I_w = V^2 \times \omega C_s \times \tan \delta / (1 + \tan^2 \delta) \\ = V^2 \times \omega C_s \times \tan \delta \quad (\tan \delta < 1 \text{ 일때}) \quad \text{식(2-4)}$$

일반적으로 loss angle  $\delta$ 는 매우작은 값을 갖는다. loss angle 이  $5.7^\circ$  이하 또는  $\tan \delta$  가 0.10 이하 일때는 1% relative error이하로 power factor(CF)와 dissipation factor(DF)가 같으므로 loss measurement

에 역률이 사용된다. 이들의 관계는 다음과 같다.

$$PF = DF / \sqrt{1 + DF^2}, \quad DF = PF / \sqrt{1 + PF^2} \quad \text{식(2-5)}$$

$\tan \delta$ 의 측정에는 여러가지 bridge 회로가 사용되고 있으나 그 중 고압 schering bridge (Fig.3)가 주로 사용되고 있으며 측정하고자 하는  $R_x, C_x$ (직렬회로)를 Fig 3.의 bridge 회로로 balancing 시켜 구하고, 이값을 식(2-3)에 대입하여  $\tan \delta$ 를 구한다.

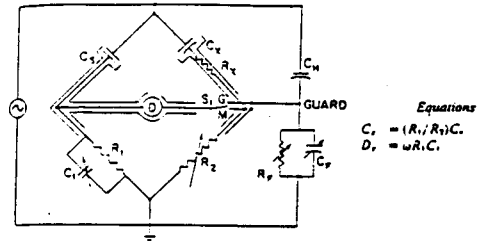


Fig 3. high voltage Schering Bridge

절연유는 온도의 상승에 따라 그 유전상수, viscosity,  $\tan \delta$ , 파괴전압등이 변하므로 위에서 구한  $\tan \delta$ 는 대개  $20^\circ C$ 를 기준으로 다음과 같이 보상된다.

$$\tan \delta \text{ (at } 20^\circ C) = \tan' \delta \text{ (at } T^\circ C) / k \\ = \tan' \delta \text{ (at } T^\circ C) \times h$$

이와같은 보상계수는 모든 절연유에 공통적으로 적용되는 것이 아니라 각 절연유종류와 변압기의 형태와 종류 및 사용장소, 절연지, press-board, 사용 환경, 측정방법등의 따라 차이가 있으므로 확립적으로 위의 보상계수를 적용하는데 문제점이 존재하고 있다.

이러한 문제점을 보완하기 위하여 Arrhenius Law를 사용하여 activation energy를 구하여  $\tan \delta$ , viscosity, conductivity 등의 값을 온도에 따라 구한다. 일반적으로 Arrhenius Law는

$$M = M_0 \times \exp [- E / RT] \quad \text{식(2-6)}$$

여기서  $M_0$ : 빈도 인자,  $T$ : 절대온도

$E$ : 활성화 에너지(activation energy)

$R$ : 기체 상수 (= 1.987 cal/mole deg)

로 표시할 수 있다.  $M_0$ 와  $E$ 와의 관계는 경험식에 의하여 식(2-7)과 같이 표시할 수 있다.

$$M_0 = a \times \exp [ bE ] \quad \text{식(2-7)}$$

식(2-6)과 식(2-7)에서 activation energy를 구하면 다음과 같이 된다.

$$M = a \times \exp [ bE ] \times \exp [- E / RT] \\ = a \times \exp [ (b - 1 / RT) E ]$$

$$E = \frac{\ln(M/a)}{b - 0.503/T}$$

값 E 를 식(2-7)에 대입하면

$$M_0 = a \times \exp \left[ \frac{b \times \ln(M/a)}{b - 0.503/T} \right]$$

여기서 임의의 T1에서 M1의 값을 구하여 다른 임의의 온도 T에서의 M의 값을 구한것이 식(2-8)이다.

$$M = a \exp \left[ \frac{b - 0.503/T}{b - 0.503/T_1} \right] \times \ln(M_1/a) \text{ 식(2-8)}$$

위의 식에서 E, a, b를 구하여 임의의 온도 T에서의 점도, 이동도, 확산 계수, 저항률, Tan δ를 구하는 식이 된다.

일반적으로 유전체(dielectric fluid)에서 ion과 electron의 ohmic conduction 전도에 의한 electrical conductivity는 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = w \times e' \quad (1/\Omega \cdot \text{cm})$$

$$\sigma = w e' = 2\pi f \times \frac{e'}{e'} \times e' = 2\pi f \times \text{Tan } \delta \times e'$$

$$= \frac{2\pi f \times \epsilon_0 \times \epsilon_r \times \text{Tan } \delta (\%) }{100} \text{ 식(2-9)}$$

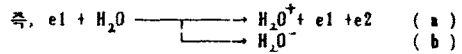
일반적으로 식(2-9)은 유동점 부근에서 나타나는 이상분산의 영향이 없게되는 0°C 이상의 고온에 서만 성립하는 식이 된다. 식(2-8)으로 저항율을 구한 후, 식(2-9)에 대입하여 구한 a, b는 각각 11.333, 0.001이다. [ref.5] 즉, 임의의 온도 T1에서 Tan δ1의 값을 구하여 임의의 다른 온도 T에서의 Tan δ, 저항율, 전도도를 알 수 있는 방법이 된다. 이때 각 나라마다 절연유와 사용환경, 절연지, press-board등이 다르므로 보상효과의 정수 a, b가 각각 다르다. 따라서 정확한 보상효과의 상수 a, b를 구하는 것이 중요하다.

**b. 수 분.**

일반적으로 액체 유전체중의 수분은 KF(Carl Fischer)법으로 측정하는 것이 보편이지만 최근의 보고에 의하면 KF법은 수분의 극히 일부분에 측정할수 없는 것으로 알려져 있다. 물의 용존 상태에는 자유수, 수소결합수, crystal수의 3상태가 있고 KF법은 이중, 자유수의 측정만 행할 정도이다. 그러나 그 자유수는 물의 혼입이 쉬운 액체에도 혼입수 전체의 17% 정도이고 나머지 물은 다른 형태를 이룬다고 나타나

있다. [ref.4] KF 법 이외에도 절연유내의 수분의 양을 측정하는 방법에는 여러가지가 있으며, [ref.6]은 물과 LiAlH4의 반응에 의하여 수분의 양을 구하였다.

일반적으로 절연유내의 방향족 화합물과 알과 파라핀 원료유, 산화, 불순물이 물의 용해도를 증가시키는 것으로 알려져 있으며 절연유의 절연내력은 전극거리, 전계에 따라 다르지만 20 - 30 ppm 이상 존재하는 수분에 의해서 크게 떨어지고 어느정도 이상에서는 서서히 떨어진다. 그리고 절연유내에 존재하는 수분은 절연유내의 이온의 발생의 원인이 되며 이는 자유수에 전자가 증돌, 부착에 의하여 생긴다.



( e1 : 1 차 전자, e2 : 2 차 전자 )

이밖에도 변압기 절연물(유전상수 2-7정도)에 용존되어 있는 물(유전상수 81)은 극부적인 charge의 불균형을 초래하고, conductivity와 전계의 증가를 가져오게 되고, 이와같은 전계에 의하여 불순물들이 전계가 큰 부분으로 모이는 경향이 생겨 전류는 더욱 증가하여 방전부위에 원인이 되기도 한다. 일단 방전이 생기면 방전에 의한 electron emission 등에 의하여 탄화 수소의 해리, 산화등을 일으키게 된다. 방전에서는 방전의 수보다 방전의 크기에 의하여 절연유는 열화가 심해지고 sludge와 침전물등을 생성하여 절연유의 냉각기능과 절연기능을 감소 시킨다. 또한 유중의 수분은 성유질의 먼지와 같이 존재하면 열화기능은 더욱 커진다.

**3. 실험장치**

본 연구에서는 절연유의 tan δ와 수분의 양을 측정하기 위하여 다음의 1), 7) 측정기와 열화장치, Test Chamber를 사용하였다.

**1) Schering Bridge (type 2753) : Tan δ의 측정.**

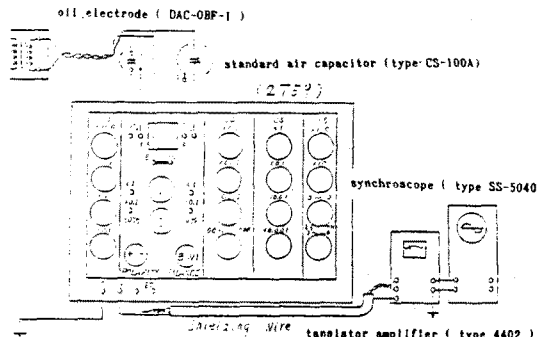


Fig.4 equipment layout and connection

- 2) equipment layout and connection ( Fig.4 )
- 3) Test voltage : 600 - 1200 ( V/mm ), 60 Hz
- 4) Test temperature : 10 - 90 °C
- 5) test chamber

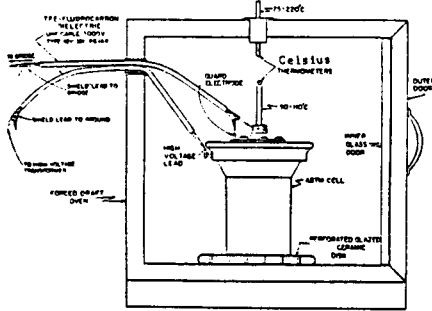


Fig.5 Test Chamber

6) 열화 장치

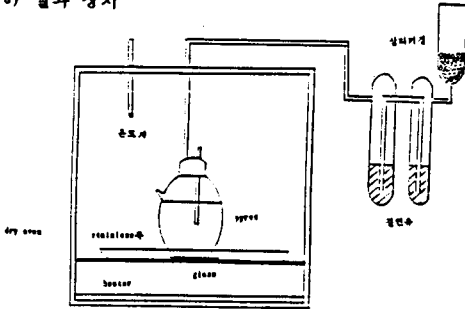


Fig.6 열화 장치

7)Moisture & Power Factor meter(type H-3,H-3S)

4. 실험 결과 및 고찰

1) tan δ

본 실험에서는 여러가지 절연유에 대하여 온도와 전압에 따른 tan δ, permittivity 의 변화를 측정하여 온도와 전압이 tan δ와 permittivity에 미치는 영향을 측정하고, tan δ 측정값으로부터 각각의 절연유의 열화 상태를 파악하고자 하였다.

Fig.7은 신유인 광유(1종 2호)에 있어서의 온도와 전압의 변화에 따른 tan δ와 permittivity 의 값이고 Fig.8은 열화유(19 days, 90 °C)의 tan δ, permittivity 의 값이다. tan δ의 값은 열화유에서가 신유의 경우보다 낮은 온도에서 차이가 심하였고 tan δ의 값도 크다. 이것은 열화유가 어느정도 열화가 되고 낮은 온도에서도 전계의 영향을 많이 받는것을 나타낸다.

Fig.9는 실험실에서 plastic 봉에 각각 1, 6 month 보관한 광유의 tan δ값으로 보관시간에 따라 절연유의 특성이 나빠짐을 알 수 있다. Fig.10 은 각각 신유와

열화광유에 있어서의 Schering Bridge (type 2759)와 doble사의 'moisture and power-factor meter'로 측정한 tan δ값으로 차이가 큼을 알 수 있다. 즉 측정기기에 따라 tan δ의 변화가 생김을 알 수 있다. 이러한 측정값의 차이에 있어서 식(2-9)을 기존의 [ref.16] 보상효과에 의한 정수 a,b를 대입하여 구한 값과 비교한 것으로 doble사의 제품이 잘 일치함을 알 수 있으나 이는 정수 a, b의 값에 의한 것으로 Schering Bridge에서는 새로운 정수 a,b를 필요로 할 뿐, 기기의 정확도와는 무관하다.

또한 절연유를 표1. 조건으로 10 일동안 Test Chamber( 90 °C )에서 열화시켜 각각에 있어서의 tan δ를 측정하여 절연유의 열화에 미치는 요인을 분석하였다.( Fig.11 ) 절연유의 열화는 광유만 존재할 때가 가장 열화가 심하였고 온도에 따른 변화도 상당히 컸다. 의외로 절연지와 press board가 있을때는 오히려 신유보다 절연특성이 좋아 컸다.( Fig.12 )

용기	내 용	용량
A	C. A paper 42345 EX(4/100")	40 g
	CREPE Paper 42335 CM(0.26")	40 g
	KRAFT CREPE Paper 42335(2/1000")	40 g
	CREPE Paper 42335 CL	40 g
	절연 oil	1755g
B	SPALDING TK-2.125" 42352 AD : 얇은 것	20 g
	부꺼운 것	55 g
	42365 AE	70 g
	절연 oil	25 g
		1680
C	절연 oil	1100

표 1. 열화 조건

Fig.13 은 표.2 의 변압기 저항율의 기준치로부터 식(2-9)을 사용하여 tan δ를 구한 후, 식(2-8)과 기존의 보상효과에 의한 정수 a,b를 대입하여 구한 값과 [ref.7], doble 사의 보상값으로 구한 대략적인 절연유의 양, 요구의를 판정할 수 있는 tan δ 값이다.

10 ohm cm 이상	양 호
10 - 10 ohm cm	요 구 의
10 dhm cm 이하	불 량

표.2 변압기 절연유의 저항율의 기준 ( 50 °C )

5. 결론

- a)  $\tan \delta$ 는 온도에 따라 지수함수적으로 변하며 열화를 일으키나 절연지나 press board는 오히려 절연유의 열을 분산시켜 열화를 낮추어 주었다.
- b)  $\tan \delta$ 는 측정기기에 따라 측정값에 차이가 있으며 열화유입수목 인가전압에 따라 차이가 많이 발생하였다.
- c) 절연유내에서의 정확한 수분의 측정은 어려우나 대개 30 ppm 이상에서부터 절연유의 절연내력을 크게 저하시키고 +, - carrier의 증가와 전계의 불균형의 원인이 된다.
- d) 기존의 저항율과 보상효과의 정수로부터 대략적인  $\tan \delta$ 의 기준치를 정할 수 있었다.

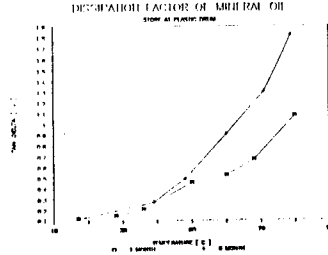


Fig.9 보관상태에 따른  $\tan \delta$ 의 변화

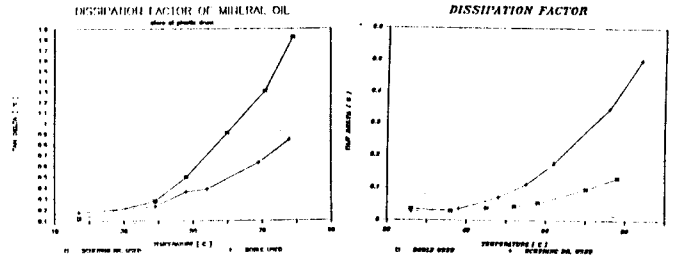


Fig.10 Schering Br.와 Doble사도 측정한  $\tan \delta$

6. 참고 문헌

- 1) W.F. Schmidt, "Elementary Process in The Development of The Electrical Breakdown of liquids", IEEE Trans. Elec. Insul., Vol.EI-17 No.6 p.478, 1982.
- 2) D.R. Jonston, N.V.Gjaja, "Hazards of Interpretation of dissipation factor Tip-Up Determination", IEEE Trans.Elec. Insul., Vol.EI-13 No.1, p.9, 1978.
- 3) "공장전기설비의 수명예지기술에 관한 조사보고" 전기학의 기술보고(일본), No.230(2부)(1986).
- 4) "액체 유전체주의 전기전도에 미치는 수분의 영향", ED-87-138, EIM-87-199, p.77, 1987.
- 5) "宮本 亮 男", "절연유의 수송현상", ED-87-141, EIM-87-122, p.107, 1987.
- 6) L.Szepes, K.Tokos, R.Dobo, "A New Analytical Method for The Determination of The Water Content of Transformer Oils", IEEE Trans.Elec. Insul., Vol.EI-17 No.4, p.345, 1982.
- 7) R.Seeberger, "Capacitance and dissipation factor measurements" IEEE Electric. Insl. Magazine Vol.2, No.1, January 1986.

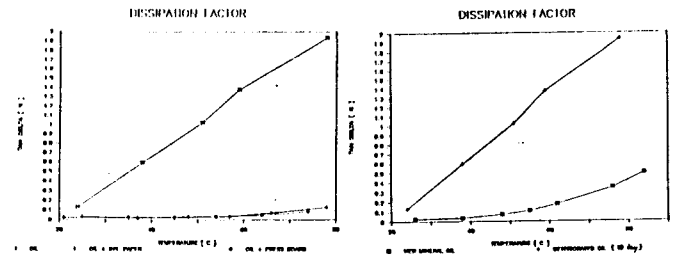


Fig.11 표1에 따른  $\tan \delta$  Fig.12 열화유와 신유의  $\tan \delta$

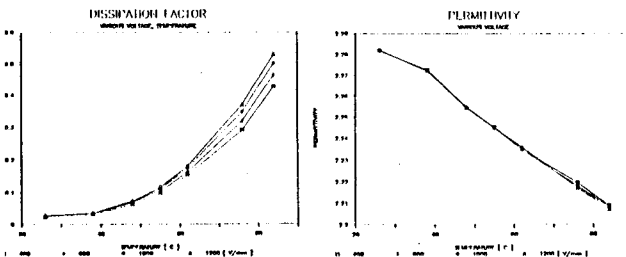


Fig.7 신유의  $\tan \delta$ 와 permittivity

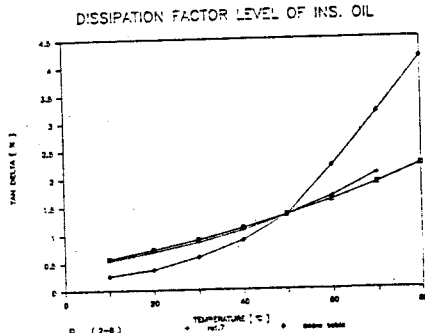


Fig.13 보상정수와 표2.의 저항율에 의한  $\tan \delta$

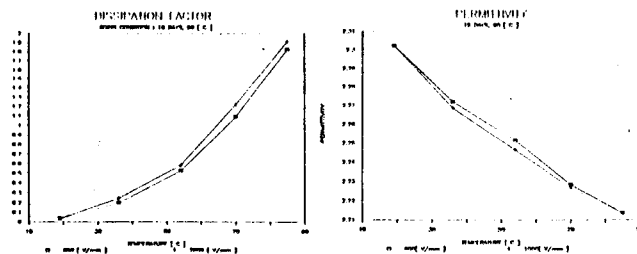


Fig.8 열화유(18days, 90°C)의  $\tan \delta$ 와 permittivity