

가스량, Tan δ, 수분량, 전산가에 의한 유침 전력 변압기의 열화현상에 관한 연구

○최 종갑, 한 민구, *권 태원, *윤 용범
서울 대학교 전기공학과, *한전 기술연구원

The degradation of insulation oil in power transformers by the evolution of gases, Tan δ, moisture and total acid number

○Jongkab Choi, Minkoo Han,*Taewon Kwon,*Yongbum Yun
Dept. of Elect. engineering, S.N.U., *KEPCO Reserch center, Daejeon, Korea

ABSTRACT

The various degradation phenomena, such as the evolution of gases, tan δ, moisture content and total acid number in power transformer insulation oil, have been measured and analyzed. Mineral oil has been degraded at laboratory by the forced thermal stress of 60 °C and 90 °C respectively. 'Thermal aging oil has been degraded about 17, 34, 72 days.' Also, we extracted insulation oil from working transformers. We measured gases dissolved in samples, tan δ, moisture content, total acid number. Activation energy and resistivity is calculated from them. It is found that gases and tan δ increases as partial discharge and total acid number increases and that conductivity of the sample increases as activation energy increases.

1. 서론

전력 기기의 대응량화, 초고압화에 따라 전력 기기의 돌발적 사고에 따른 경제적 손실이 막대하다. 따라서, 전력 기기의 사고를 미리 감지하여 전력의 안정적 공급과 전력기기의 수명 연장할 가능하게 하는 "예방 진단"기술의 필요성이 대두되었다. 전력 기기의 예방 진단은 변압기, 전력 케이블 차단기 등 다양한 기기에 적용되고 있으며 많은 연구들이 이루어지고 있다. 전력 기기중 널리 보급되어 있는 변압기 사고의 대부분이 절연재료의 열화에 기인하고 있다. [ref.1] 전력 변압기의 절연은 주로 절연유, 절연지, 프레스보드 등이 함침된 유침절연이 사용되고 있으며, 이 절연재료들은 장기간 가동함에 따라 변압기내 열에 의한 열열화, 국부적으로 발생한 고전계에 의한 방전열화, 산소에 의한 산화열화와 수분의 흡수에 의해 절연 특성이 저하된다. [ref.2] 열화 진단 방법으로는 유중 가스량, Tan δ, 수분량, 전산가, 부분 방전량, 내압 실험 등 여러 가지가 있다.

본 연구에서는, 유중 가스량, Tan δ, 수분량, 전산가를 측정하여 변압기내 절연재료들의 성질 및 각 Parameter 들의

상관 관계를 밝히고, 종합적인 열화 진단 가능성을 모색하여 전력 변압기내 절연재료들의 절연 특성을 정확하게 진단하고자 한다.

2. 원리 및 측정 기기

2-1) 유중 가스량

유입 변압기 등 유입 전력기기의 내부에서는, 절연파괴 현상과 Local heating, Partial discharge, 혹은 Arc discharge 에 따라 발열하게 된다. 이 때, 발열 부위에 근접한 절연유, 절연지, Pressboard, 혹은 Bakelite 등의 절연재료는 그 열에너지에 의해 반응, 분해하여 CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₈ 중 예 용해하기 때문에 변압기로부터 채유한 절연유중의 가스물 추출, 분석하여 그의 각 가스량 및 가스 Pattern (각 가스량의 조성비), 그리고 특징 가스 발생 여부로부터 변압기 내부 이상 유무 및 그 정도를 추정하는 것이 가능하다. 일반적으로 탄화수소의 열적분해는 1차, 2차분해로 나누어지는데 포화탄화수소인 알칸족(파라핀계 탄화수소)은 저온에서도 H₂, 저분자 탄화수소 가스를 방출한다. [ref.3]

가스량 측정은 시료유를 열화 조건에 따라 강제 열화시킨 후, 유중 가스 자동 분석 장치를 사용하였다.

이 기기는 extraction, analysis, data processing, control의 4가지 unit으로 구성되었다.

2-2) 저항 손실에 의한 Tan δ, 저항률, Activation Energy

절연유에 전압이 인가되면 변압기 절연유의 등가회로는 정전용량 과 저항성분으로 볼 수 있으며, 절연유의 저항성분에 의한 손실을 측정하여 절연유의 열화 상태를 알 수 있고, 이를 바탕으로 변압기 절연유의 경년열화를 파악하여 절연유의 교체 여부를 판별하는 방법이다. [ref.4]

직렬회로일 경우, $\tan \delta = \text{저항성분 전압/용량성분 전압} = \omega R C$
 병렬회로일 경우, $\tan \delta = \text{저항성분 전류/용량성분 전류} = 1/\omega R C$
 병렬 회로의 직렬 회로의 관계는 다음과 같다.

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

저항을 구하는 방법은 2가지로서 다음과 같다.

1) $\sigma = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta$, $\rho = 1 / (2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \tan \delta)$

11) $R = \rho \cdot \frac{d}{S}$, $\rho = R \cdot \frac{S}{d} = R \cdot K$ (K: cell constant)

Activation Energy 를 구해보면, Arrhenius' Law로부터

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(-E_a / RT) \quad \text{--- (1)} \quad , \quad \sigma_0 = a \cdot \exp(b \cdot E_a) \quad \text{--- (2)}$$

(R : 1.987 cal/mol.K, T : 절대온도, a, b: 상수

σ_0 : 빈도 인자, E_a : Activation Energy)

$$(2) \text{ --- (1)} \quad E_a = \ln(\sigma/a) / (b - 0.503 / T)$$

따라서, $\sigma = a \cdot \exp((b - 0.503 / T) E_a)$

식(1)의 양변에 로그를 취하면, $\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_a \cdot 1000}{1987 T}$

$\ln \sigma$ (측정값) 과 $1000/T$ 와의 관계를 도시하면 그림(1)과 같은데 여기서 절편이 $\ln \sigma_0$ 이고, 기울기는 $-E_a / 1987$ 이다.

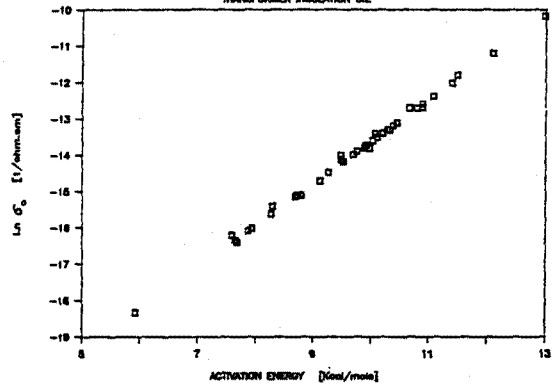
또한, 식(2)의 양변에 로그를 취하면, $\ln \sigma_0 = \ln a + b \cdot E_a$

그림(1)에서 구한 $\ln \sigma_0$ 와 E_a 값으로, 같은 방법으로 a, b 값을 구할 수 있다. [ref. 4], 그림(2)

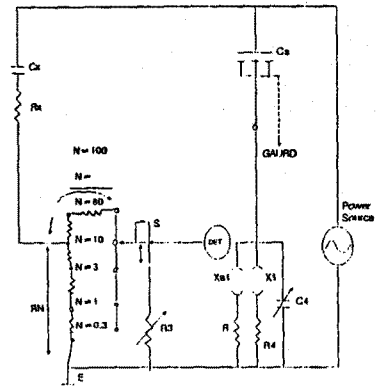
본 연구에서 구한 a, b 값은 다음과 같다.

$$a : 1.189E-11 [1/\Omega \cdot cm] \quad , \quad b : 1.153 E-3 [mole/cal]$$

Ln σ₀ VS. ACTIVATION ENERGY
 TRANSFORMER INSULATION OIL

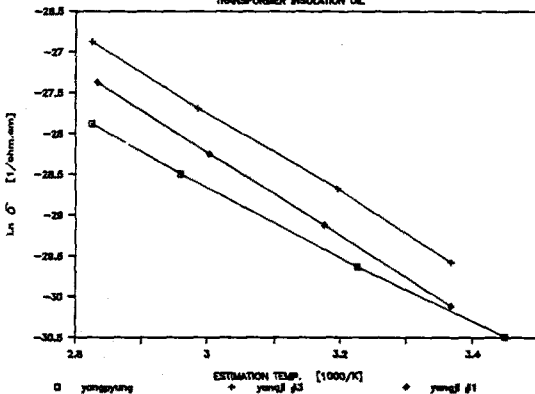


그림(2) 활성화 에너지와 Ln σ₀



그림(3) Schering Bridge 의 내부 결선도

Ln σ VS. TEMPERATURE
 TRANSFORMER INSULATION OIL

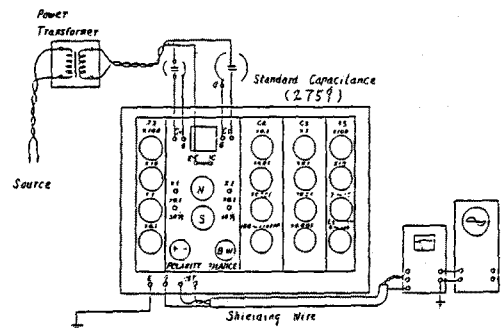


그림(1) 온도와 Ln σ

측정 기기로는,

Schering Bridge(type 2759)의 직렬 저항법을 사용하였다.

아래 그림(3)과 그림(4)는 측정 기기의 내외부 결선도이다.



그림(4) Schering Bridge 의 외부 결선도

2-3) 수분량

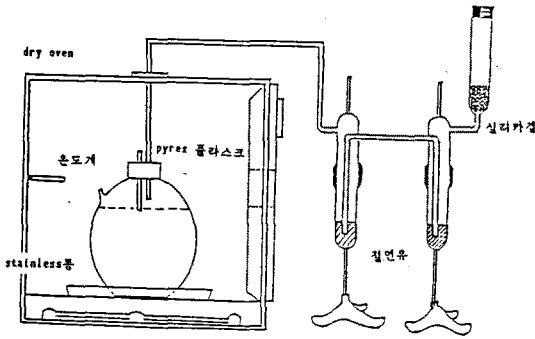
액체 절연체는 다른 절연체에 비해 물순물의 혼입이 비교적 쉽다. 그 중 수분이 혼입되었을 경우, 절연 내력이나 체적저항률과 같은 액체 절연체의 성질에 영향을 미치게 된다. 따라서 변압기절연유의 수분을 측정함으로써 현재 상태 변압기 절연유의 절연능력을 알 수 있게 된다. 측정은 Karl Fisher 방법으로 하였다.

2-4) 전산가 (Total Acid Number)

일반적으로 사용중인 변압기 절연유는 공기중의 산소로 인한 산화와 외부로부터의 첨가물, 자외선, 열열화에 의해 절연유의 주성분인 탄화 수소 에리에 의한 산화로 전산가가 증가하며 절연내력이 감소한다. 이러한 특성을 이용하여 절연유의 이상 유무를 판별할 수 있다. 이것은 산용액(시료유)에 염기용액을 가하여 중화하는 점을 결정하는 중화 적정법을 사용하였다.

3. 실험 및 측정

실험은 크게 2가지로 하였는데 첫째, 실험실 내에서 열화 장치 (그림(5))를 이용한 열화유 실험과 둘째, 현재 가동중인 국내 변압기 절연유를 채취하여 시료로한 실변압기 절연유 실험이다.



그림(5) 열화 장치

가) 1차 열화 실험

시료유 : 플라스틱봉에 보관된 광유, 드림봉에 보관된 광유
플라스틱봉에 보관된 합성유

열화온도 : 60 °C, 90 °C

용량 : 1.8 liter

열화기간 : 17일, 44일, 74일

나) 2차 열화 실험

시료유 : 광유+절연지, 광유+프래스보드

용량 : 절연유: 1.7 liter, 절연지: CP 4235 CS (270 g)
프래스보드: 4265ET 1.6T(160g), 4252AT 0.8T(70g)
KT 0.38T (15g)

열화기간 : 32일, 72일

다) 실변압기 절연유 실험

장소 : 6개 변전소 (노량진, 양지, 남동, 양평, 송현, 반월)

종류 : 가동중 실변압기 절연유 (광유) 7개(양지 2개)

시기 : 1989년 2월부터 7월까지 매달 25일 (총 6 차례)

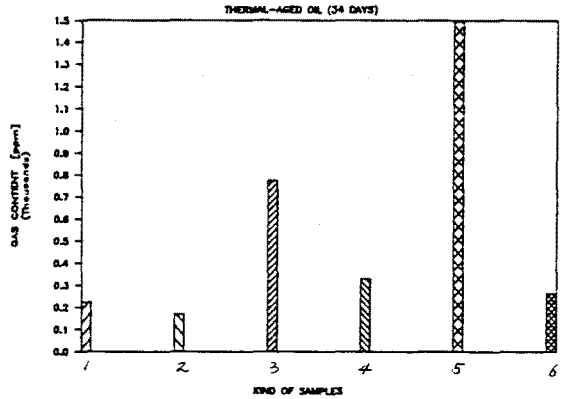
4. 결과

4-1) 유종 가스량

열화 실험에서 전체적으로 CO, CO2 gas량을 제외한 다른 가스량은 거의 검출되지 않았는데 이것은 온도에 의한 열열화 보다는 대기중 산소에 의한 산화열화가 지배적인 열화 Process 였기 때문이다. 기간에 따라 가스량은 증가하였다.

그림(6)은 광유, 광유+절연지, 광유+프래스보드의 CO+CO2 가스량을 비교한 것이다. 광유는 탄화 수소계 결합이고 절연지와 프래스보드는 셀룰로오스이므로 광유만의 열화에 비해 더 큰 값을 나타내었다. 즉, 변압기에서, CO, CO2가스의 발생은 거의 절연지와 프래스보드의 산화로 발생함을 알 수 있다.

CO+CO2 GAS CONTENT COMPARISON

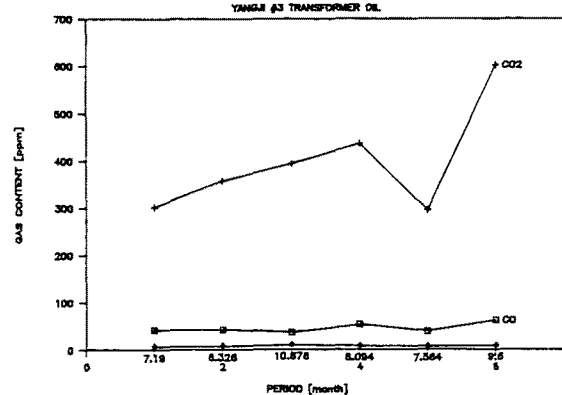


1 광유+프래스보드 (90 °C) 5 광유+절연지 (90 °C)
4 광유+프래스보드 (60 °C) 6 광유+절연지 (60 °C)
3 광유 (90 °C) 2 광유 (60 °C)

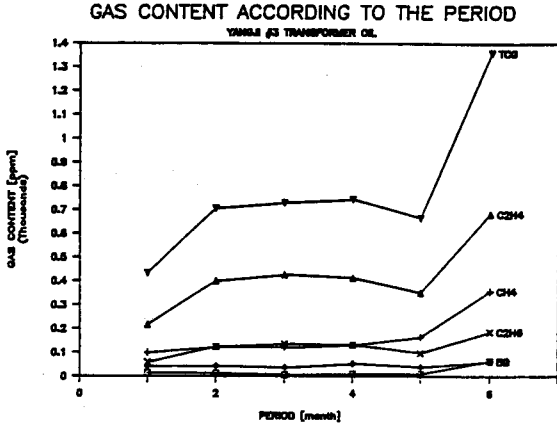
그림(6) 각 절연재료에 따른 CO+CO2 gas량 비교

실변압기 절연유의 경우에도, 그림(7)과 그림(8)에서 보면, 기간에따라 가스량이 증가하였다.

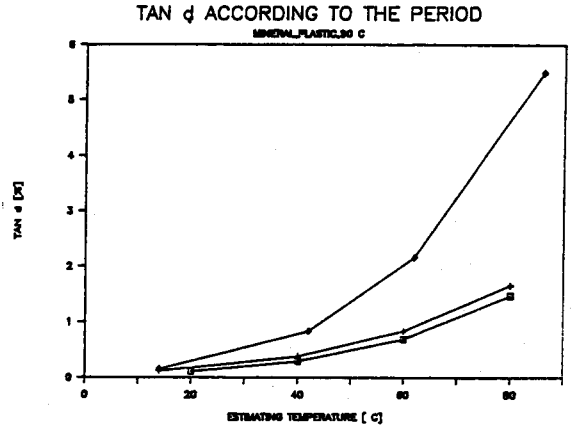
GAS CONTENT ACCORDING TO THE PERIOD



그림(7) 양지 #3 변압기의 가스량 변화 추이 (CO2, CO, CO2/CO)



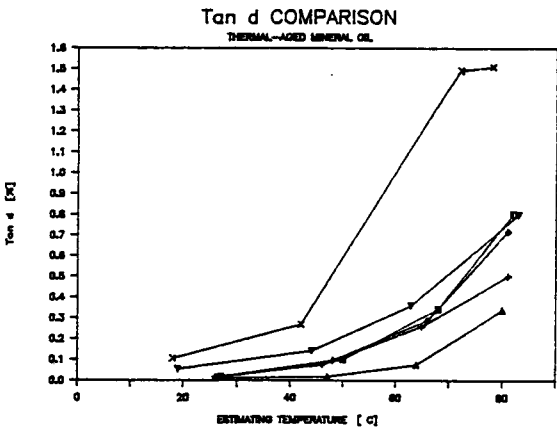
그림(8) 양지 #3 변압기의 가스량 변화 추이 (TCG, C2H4, C2H6, CO, H2)



그림(10) 광유의 열화 기간에 따른 Tan δ 변화

4-2) Tan δ

그림(9)는 측정 온도에 따라 각 시료유의 Tan δ 경향을 도시한 것이다.



□ 광유+프레스보드 (90°C) + 광유+절연지 (90°C)
 ◇ 광유+프레스보드 (60°C) △ 광유+절연지 (60°C)
 X 광유 (90°C) ▽ 광유 (60°C)

그림(9) 각 열화 시료유의 Tan δ 비교

이 그림에서 보면, 같은 시료일지라도 열화온도가 높으면 값이 큼을 알 수 있다. 시료에 따라서는 광유+절연지가 가장 작았다. 그리고, 기간에 따라서도 그림(10)에서 보면 경년열화에 따라 값이 증가하였다. 실변압기 절연유에서도 같은 결과를 보았다.

4-3) 저항률과 Activation Energy

표(1)은 실변압기 절연유 Tan δ 측정 Data로부터의 저항률과 Activation Energy 이다.

4-4) 수분량과 전산가

표(2)는 수분량과 전산가를 보여준다.

(단위, 저항률:ohm.cm, 활성화 에너지:Kcal/mole)

	노량진	양정	양지#3	송현	반월
저	3월 7.7E11	2.0E12	8.0E11	1.2E12	1.1E12
항	4월 8.9E11	2.3E12	9.1E11	2.2E12	1.3E12
물	6월 7.5E11	2.6E12	9.3E11	2.1E12	1.4E12
	7월 7.2E11	7.5E11	9.3E11	1.8E12	1.3E12
활성화	3월 9.476	10.67	10.104	7.686	9.695
	4월 12.981	8.274	9.921	9.875	10.072
에너지	6월 10.9	10.209	10.8	10.45	10.33
	7월 10.895	9.895	11.493	11.076	9.482

표(1) 실 변압기 절연유들의 저항률과 활성화 에너지

(단위, 수분량:ppm, 전산가:mg.KOH/g)

		A 시료유		B 시료유		C 시료유	
		60 C	90 C	60 C	90 C	60 C	90 C
수분량	1차	33.8	33.6	33.46	32.04	41.31	45.28
	2차	21.99	29.74	39.57	30.41	31.1	37.45
전산가	1차	0.012	0.044	0.029	0.041	0.031	0.03
	2차	0.016	0.037	0.014	0.023	0.017	0.023

(단, A 시료유 : 광유, B 시료유 : 광유+절연지
 C 시료유 : 광유+프레스보드
 1차 : 34일, 2차 : 74일)

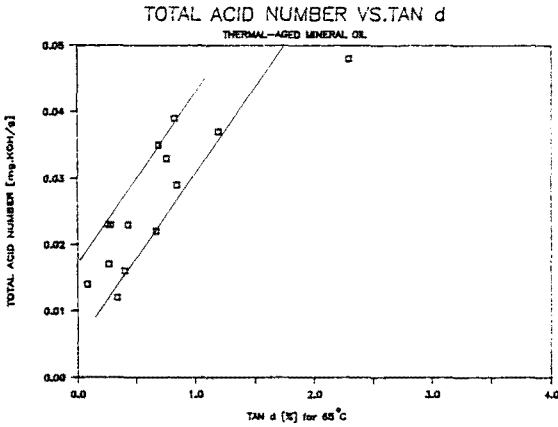
표(2) 열화 시료유들의 수분량과 전산가

4-5) 상관 관계

가스량과 Tan δ와는 직접적인 관계가 없다. 가스량과 부분방전과는 관계를 추정할 수 있었는데, 부분 방전에 의해

국부적으로 고 Energy 가 절연재료에 가해져서 본 실험에서 확인한 바와 같이 열화 온도가 높으면 가스량 방출이 많았던 결과와 일치하였다.

Tan δ와 전산가와는 그림(11)에서 보면 서로 비례관계가 성립하였다. 전산가가 높다는 건, Acid Radical의 증가를 의미하고 이것은 ion carrier 의 증가에 의해 Conductivity 가 증가하고 그것에 의해 Tan δ 값이 증가하게 된다.



그림(11) 전산가와 Tan δ

수분과 Tan δ 와는 이론적으로 물의 전도성에 의해 Tan δ 값의 증가가 기대되었지만 본 실험에서는 특별한 관계가 확인되지 않았다. 본 실험에서 구한 Activation Energy 와 Conductivity 를 비교한 결과 서로 반비례함을 보았다. 일반적으로, 전자의 Conductivity 는 $\sigma = q \mu n$ 인데, Activation Energy 가 크면 free electron density 가 상대적으로 작으며, electron mobility μ 도 작다.

따라서, 전체적으로 Conductivity 가 감소하게 된다.

5. 결론

산화 열화에 의해 CO, CO2 gas가 많이 발생하였고, 특히 절연유보다 절연지와 프레스보드에서 많았다. 또한 열화온도에 따라 Tan δ 값이 큰 영향을 받았고, 같은 온도일지라도 절연지를 넣었을 때 값이 매우 작았다. Tan δ와 전산가는 서로 비례 관계가 있음을 보았으며 Activation Energy 가 크면 Conductivity 가 상대적으로 감소함을 확인하였다.

액체 절연 재료의 경우 고체나 기체 절연 재료와는 달리 불순물의 혼입이 쉽기 때문에 액체 절연재료 열화에 영향을 미치는 원인을 한 가지 Factor 로 단정지을 수 없다. 따라서,

여러 열화 원인을 가지고 있는 액체 절연재료를 몇 개의 Parameter로 측정하여 각 Data들의 상호 비교 및 보완으로만이 종합적인 열화 진단이 가능하리라고 본다.

본 연구에 협조해주신 한국 전력 기술 연구원 여러분들께 감사드립니다.

6. 참고 문헌

- 1) 황보 승, "절연유 열열화에 따른 Tan δ와 수분의 변화에 의한 변압기 예방진단 연구"
- 2) "전력기기 예방 진단 기술 연구", 한국 전력 공사 기술 연구원, KRC-84S-J03
- 3) M. Sirai, T. Ishii, and Y. Makino, "Evolution of hydrogen from insulating oil in transformers", IEEE Trans. Elect. Insul, Vol EI-12 NO 4, August 1977, pp 266-271
- 4) S. RENE, "Capacitance and dissipation factor measurements", IEEE Elect. Insul Magazine VOL.2, NO.1, January 1986
- 5) "절연유의 수송현상", ED-87-141, EIM-87-122, P. 107, 1987
- 6) H. Tsukioka, and K. Sugawara, "New apparatus for detecting H2, CO, and CH4 dissolved in transformer oil", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-18 NO.4, August 1983, pp 409-419
- 7) Y. Kawata, "Diagnostic methods for power transformer insulation", IEEE Trans. Electr. Insul, Vol EI-21 NO.6, December 1986, pp 1045-1048
- 8) T. Kawamura, M. Yamaoka, H. Kawada, K. Ando, T. Maeda, and T. Takatsu, "Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers", CIGRE 12-05, 1986 Session-27th August-4th September, pp 1-5