

가스분석에 의한 주상변압기의 예방진단에 관한 연구 —자외-가시선 흡수분광광도법에 의한 절연유의 열화도 측정—

(A Study on Preventive Diagnosis of the Pole Transformer by Gas Analysis)
—Measurement of Aging of Insulating Oil by UV-Visible Spectrophotometric Method—

郭熙魯* · 南泳雨** · 尹英子*** · 南宮漢玉* · 李東俊**

(Hee-Rho Kwak · Young-Woo Nam · Young-Ja Yun · Mi-Ok Namgung · Dong-Zoon Lee)

요 약

자외-가시선 흡수분광광도법을 적용하여 주상변압기 절연유의 판정기준을 제시하였다. 절연유가 열화하면 절연유의 전기적 특성치가 저하할 뿐만 아니라 흡광도값도 변하게 된다. $\tan\delta$ 와 절연파괴전압과 같은 전기적 특성치를 흡광도값과 비교하여 흡광도값에 의한 절연유의 판정기준을 설정하였다. 흡광도값이 0.580 이하는 양호, 요주의는 0.580~0.900, 불량은 0.900이상이다.

자외-가시선 흡수분광광도법은 절연유의 열화분석에 적용할 수 있으며, 기존의 육안에 의한 절연유 검사 방법을 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 분광광도법을 현장에 적용하려면 저렴하고 경량화된 휴대용 분광광도계의 개발이 필요하다.

Abstract

Criteria for insulating oil condition of pole transformer were suggested by applying the UV-Visible spectrophotometric method. Aging of insulating oil caused the change in absorbances of oil as well as the deterioration of electrical properties of oil. By comparing the electrical properties such as $\tan\delta$ and dielectric breakdown voltage with the UV-Visible absorbances of oil, following criteria for absorbance values determining oil condition were established, fair condition is below 0.580, need attention is 0.580~0.900 and poor condition is above 0.900.

This UV-Visible spectrophotometric method may be applied in aging analysis of oil and expected to replace the current visual method. It is necessary to develop cheap, light and portable UV-Visible spectrophotometer in near future for field application.

*正會員：송실대학교 전기공학과 교수

**正會員：송실대학교 화학공학과 교수

***正會員：송실대학교 대학원 화학과 박사과정

*正會員：송실대학교 화학과 교수

**正會員：송실대학교 대학원 전기공학과 석사과정

接受日字：1996年 5月 15日

1. 서 론

대용량 변압기의 돌발사고시 정전구역이 광범위하고, 사고복구시 많은 시간이 걸리기 때문에 예방진단법에 관하여 오래 전부터 연구되어 왔다.^{1), 2), 8), 9), 11)} 그러나 주상변압기는 전국에 산재해 있고 또한 수량이 약 83만대(94년 12월 기준)로 막대하며 정전사고시 사회적 문제를 불러일으키고 있음에도 불구하고 예방진단법에 관한 연구는 미미한 실정이다. 현재 주상 변압기는 절연유나 절연물에 대한 특별한 진단을 하지 않고 간이수리, 중수리를 실시함으로써 주상변압기의 소손사고 방지와 주상변압기의 내구수명을 연장하고 있다. 이러한 수리점검과정은 많은 인력과 막대한 수리비용을 초래하고 있어 학술적인 연구를 통하여 예방진단에 대한 기초자료 및 예방진단기법의 제시가 필요한 실정이다.

주상변압기내에 있는 절연유는 경년열화되면 분해산물이 유중에 축적되어 절연유의 색상이 변한다는 사실에 착안하여 새로운 진단방법인 UV-Visible 흡수분광분석법을 제시하였다. UV-Visible 분광광도법을 사용하면 현장에서 직접 소량의 절연유를 채취하여 흡광도를 측정함으로써 절연유의 교체여부를 정확하고 신속하게 결정할 수 있다. 이 방법은 시료의 취급도 간편하고 정확도와 정밀도가 높은 좋은 분석 방법이라 할 수 있다. UV-Visible 분광광도법을 사용하여 흡광도 값으로부터 절연유의 열화 정도를 추정할 수 있으며, 흡광도 값에 의한 절연유의 이상 유무를 판단할 수 있는 판정기준이 설정된다면 휴대용 분광광도계를 이용하는 UV-Visible 분광법은 시간과 비용면에서 상당히 효율적인 새로운 절연유 판정 방법이 될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 주상변압기 절연유의 경년에 따른 열화가 절연유의 전기적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 경년열화유의 $\tan\delta$ 와 절연과피전압을 측정 하였으며, UV-Visible 흡수분광분석법으로 경년 열화 절연유의 흡광도를 측정하여 기존의 전기적 특성치에 의한 절연유의 판정기준과 비교 검토하여 절연유의 이상진단에 대한 UV-Visible 흡수분광분석법의 적용 가능성을 검

토하였다.

2. 실 험

실변압기에서 절연유가 경년에 따라 절연유 성질이 어떻게 변화하는지를 알아보기 위하여 실변압기에서 경년 열화된(신유, 8년, 10년, 13년) 절연유를 채유하여 분석하였다. 또한, 실변압기에서의 경년열화와 가속열화방법에 의한 열화를 비교분석하기 위하여 가속열화장치로 절연유를 열화시켜 절연유의 성질이 어떻게 변화하는지를 알아보았다. 열화 실험용 반응기에는 주상변압기에 들어가는 절연재료들을 중량비 {oil : core : coil : paper = 1.35(g) : 800(g) : 778(g) : 40.5(g)}에 따라 투입하였으며 200(°C)와 250(°C)에서 절연유를 열화시켰다. 각각의 온도에서 실제변압기의 경년열화에 따른 값들과 유사해질 때까지 열화를 시켰으며, 가속열화시키는 동안에 소량의 절연유 시료를 채취하여 $\tan\delta$ 와 절연과피전압, UV-Visible 흡수분광분석법으로 흡광도를 측정하였다. 그림 1은 가속열화에 사용된 실험장치의 개략도이다. 반응기는 절연유의 증기압을 견딜 수 있도록 스테인레스강(stainless steel)으로 제작 하였으며, 반지름 4.9(cm) 높이 27.8(cm)로 반응기 전체 용량이 약 2(ℓ)가 되도록 제작하였다. 반응기에는 안전밸브(safety valve)를 설치하여 폭발에 대비 하였으며 온도조절기를 이용하여 절연유의 온도를 $\pm 2(^{\circ}\text{C})$ 이하로 조절하였다.

절연과피전압 측정시험은 KS 시험법에 의하여 전극의 직경이 12.5(mm)인 구전극으로 하고 전극간의 거리를 2.5(mm)로 유지한 다음 전압상승율을 3(kV/sec)로 하여 측정하였다.³⁾ 대표값으로는 KS 규격에 의하여 각시료당 5번의 측정을 하여 첫번째 측정값을 제외한 나머지 4개값의 평균으로 하였고, $\tan\delta$ 분석은 상용주파수에서 측정하였다.⁴⁾

UV/Visible 흡수분광분석실험에 사용된 기기는 SHIMAZDU사의 UV-3101PC이며 시료는 시료 : hexane = 0.5 : 9.5(ml)로 희석하여 사용하였고 흡수파장은 최대의 흡광도를 나타내는 380(nm)를 선택하여 실온에서 측정하였다.

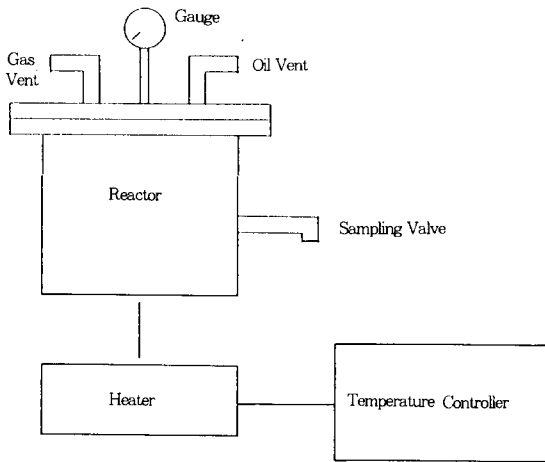


그림 1. 가속열화 실험장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of accelerated ageing test apparatus

절연유가 열화될 때 생성되는 불순물들이 흡광도에 영향을 미칠 것으로 생각되어 변압기 재료로부터 생성될 가능성이 있는 금속 성분 중 Cu, Fe의 농도를 ICP(inductively coupled plasma)를 이용하여 분석하였다. 기기는 호주 GBC사의 Integra XMP를 사용하였다. 시료는 ASTM D2608-70법에 의한 산처리방법으로 전처리하여 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절연유의 전기적 특성

$\tan\delta$ 측정값은 절연유의 열화정도를 측정하는 주요한 지표²⁾중의 하나이다. 그림 2에 실변압기에서 경년에 따라 채유한 절연유의 $\tan\delta$ 값을 나타내었다. 그림에서 보인 바와 같이 $\tan\delta$ 값들은 신유는 0.1(%), 8년된 절연유는 4.0(%), 10년된 절연유는 4.5(%), 그리고 13년된 절연유는 6.8(%)이며 그 값은 경년에 따라 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. $\tan\delta$ 가 2~5(%)일때 요주의로 판정되는 기준¹²⁾에 의하면 대략 8년정도 경과한 변압기유가 이 범위에 속하는 것으로 생각된다.

그림 3은 실변압기에서 채유한 절연유의 절연 파괴전압을 나타낸 것이다. 그림 3에서 보듯이

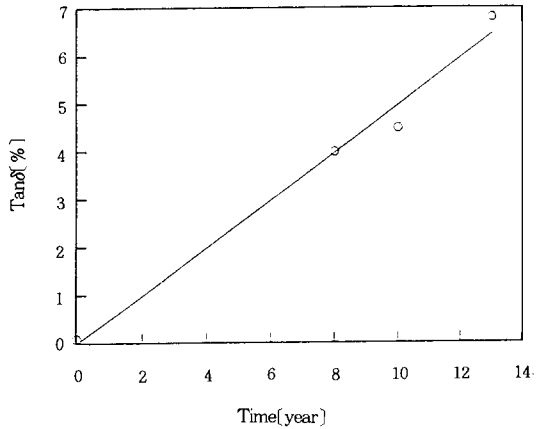


그림 2. 실변압기 절연유의 경년에 따른 $\tan\delta$ 변화량
Fig. 2. Variation of $\tan\delta$ values with time in real transformer

기간이 경과함에 따라 절연파괴전압이 저하하고 있음을 알 수 있다. 절연파괴전압은 절연유 중의 수분, 불순물 등에 의하여 저하하게 되는데⁹⁾ 기간이 경과함에 따라 수분이나 불순물 등이 변압기내에서 생성되거나 외부로부터 유입되고 있음을 알 수 있다. 절연파괴전압이 30(kV) 이상으로 유지되는 약 6년까지는 절연유가 양호한 상태에 있으나 대략 6~8년 경과 절연유는 요주의 상태에 있고 약 10년 이상 경과한 절연유는 절연파괴전압이 25(kV) 이하로 불량한 상태에 있음을 알 수 있다. $\tan\delta$ 측정치와 절연파괴 전압 측정치를

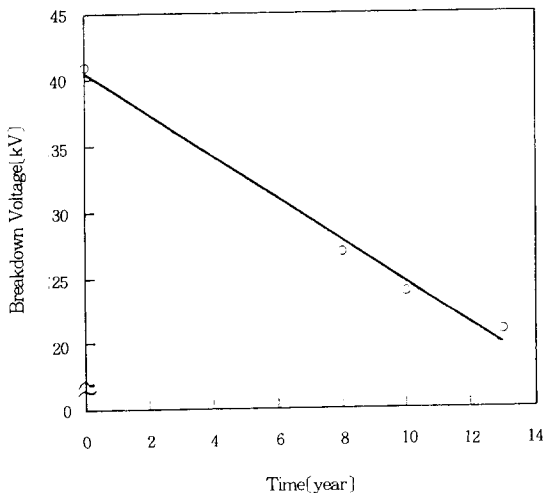


그림 3. 실변압기에서의 경년에 따른 절연파괴전압
Fig. 3. Breakdown voltages with time in real transformer

동시에 감안하면 약 6년까지는 절연유가 양호한 상태에 있으며 6~8년 경과시 절연유의 전기적 특성치가 저하하기 시작하여 요주의 상태로 진입한다. 변압기는 대부분 10년이 경과하면 요주의 -불량 판정 수준에 도달하는 것으로 생각된다.

절연유의 열화를 촉진시키기 위하여 실변압기의 가동온도보다 고온인 200[°C]와 250[°C]에서 열화반응을 수행하고, 200[°C] 및 250[°C]에서 가속열화시킨 경우의 $\tan\delta$ 와 250[°C]에서 가속열화시킨 경우의 절연파괴전압을 측정하여 그림 4와 5에 각각 수록하였다. 그림 4에서 250[°C]로 열화시킨 경우에는 $\tan\delta$ 값이 2일 경과된 열화유

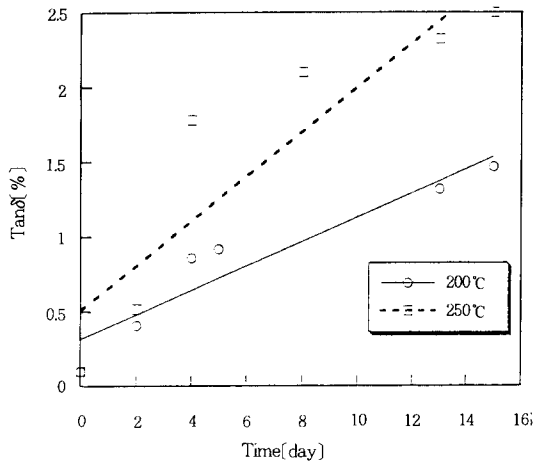


그림 4. 가속열화에 따른 절연유의 $\tan\delta$ 값의 변화
Fig. 4. Variation of $\tan\delta$ values of oil by accelerating degradation

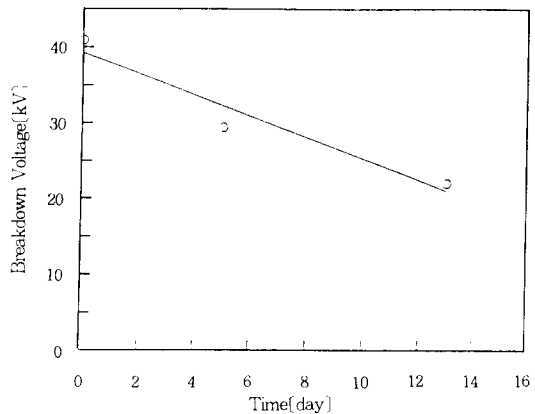


그림 5. 가속열화에 따른 절연유의 절연파괴전압 [250[°C]]
Fig. 5. Breakdown voltages of oil by accelerating degradation

는 약 0.5[%], 4일은 1.8[%], 8일은 2.1[%], 그리고 13일된 열화유는 2.3[%]를 나타내면서 증가하는 경향을 보여주고 있다. 가속열화장치에서 15일 경과한 절연유의 $\tan\delta$ 값이 대략 실변압기에서 5년 경과한 절연유와 비슷한 값을 보여주고 있으며 이는 고온이 절연유의 물성치 저하에 크게 기여함을 보여주는 결과이다. 그림 5에서도 시간이 경과함에 따라 절연파괴전압값이 실변압기에서처럼 감소하고 있음이 관찰된다.

3.2 절연유의 흡광도

신유와 실주상변압기에서 채유한 절연유들의 경년에 따른 흡광도값의 변화를 그림 6에 도시하였다. 주상변압기 사용기간에 따라 절연유의 흡광도값이 증가하는 것이 관찰된다. 앞의 그림에서도 $\tan\delta$ 값이 변압기 사용기간에 따라서 변화하였으며 이 두가지 경우를 같이 감안하면 절연유의 물성변화는 장기간 사용시 급격한 변화를 보이지 않고 서서히 물성치 저하가 진행됨을 알 수 있다. 200[°C]에서 가속열화시킨 절연유 시료의 흡광도 변화를 그림 7에 도시하였다. 가속열화기간이 경과함에 따라 흡광도가 증가하는 경향이 관찰된다. 57일 경과 시료의 흡광도가 실변압기의 8년 경과 절연유와 비슷한 흡광도를 보여 주었다.

절연유에 함유되어 흡광도에 영향을 미칠 수 있는 불순물로는 절연유 열분해 반응에 의하여

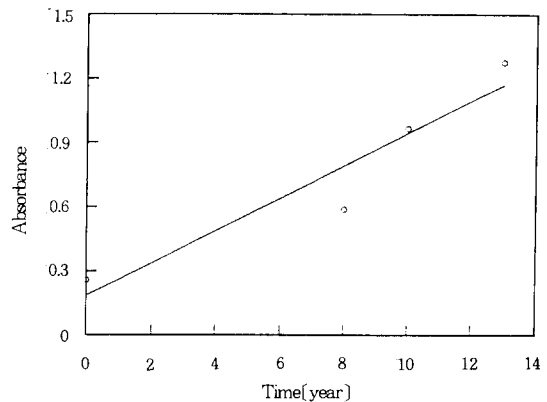


그림 6. 실변압기 절연유들의 경년에 따른 흡광도 변화 [380[nm], sample : hexane=0.5[mL] : 9.5[mL]]
Fig. 6. Variation of absorbances with time in working transformer

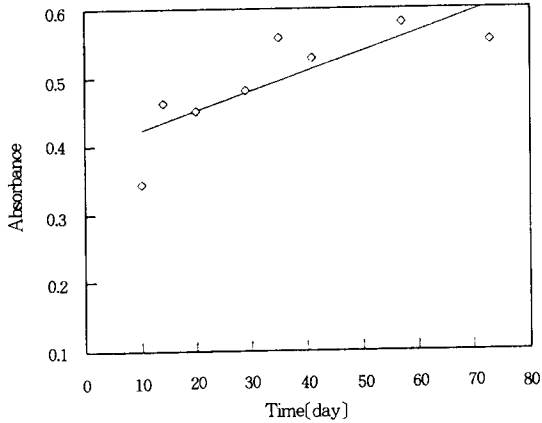


그림 7. 가속열화에 따른 흡광도 변화{200(°C)} {380(nm), sample : hexane=0.5(ml) : 9.5(ml)}
 Fig. 7. Absorbance of oil by accelerating degraion

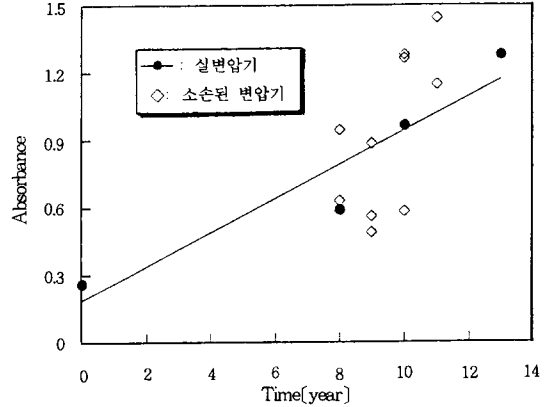


그림 8. 소손된 변압기 절연유의 흡광도 분포
 Fig. 8. Distribution of absorbances in broken transformers

생성되는 탄소성분과, 절연재료중 철심과 동코일에서 용출될 수 있는 철과 구리 이온들이 있다. 변압기구성재료에서 용출될 수 있는 철과 구리이온이 흡광도에 미치는 영향이 클 것으로 생각되어 ICP로 이들 금속이온의 농도를 측정하여 표 1에 수록하였다. 분석한 시료의 수가 많지 않았기 때문에 정확한 결과라고는 할 수 없지만 대체로 경년 열화유의 금속이온 농도는 시간이 경과할수록 증가하는 경향을 보여주고 있다. 신유인 경우 철이온의 농도가 비교적 높은 것은 철제 드럼통에 보관되어 있던 절연유를 분석에 사용했기 때문인 것으로 생각된다.

사용기간 8년에서 11년 사이에 과부하로 인하여 고장난 주상변압기에서 채유한 절연유의 흡광도를 그림 8에 표시하였다. 그림 8에서 원과 직선은 고장나지 않은 실변압기의 경년 열화 절연유의 흡광도이다. 사용기간 8~9년 후 소손된 변압기 절연유의 흡광도는 경년열화 절연유와의 흡

광도값 보다 적거나 큰 것이 있으므로 대체로 비슷한 값을 나타낸 반면, 10년 이상 사용후 소손된 변압기 절연유의 흡광도는 대부분 경년열화 절연유의 흡광도보다는 크게 나타났다. 따라서 흡광도법에 의한 절연유의 이상진단이 변압기 사고의 예방진단법으로 사용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

3.3 UV-Visible 흡수분광광도법에 의한 절연유의 판정기준

UV-Visible 흡수분광광도법에 의한 변압기 절연유의 이상진단이 주상변압기 예방진단에 사용될 수 있는 가능성을 확인하였기 때문에 이 방법의 실용화를 위하여 UV-Visible 흡수분광광도법에 의한 절연유 판정기준을 제시하고자 한다. 현재 주상변압기 이상진단 판정기준이 마련되어 있지 않으므로 대용량 변압기에 사용하는 전기적 특성($\tan\delta$, 절연파괴 전압⁴⁾)을 흡광도법과 연계하여 기준을 설정하고자 한다.

주상변압기에서 채유한 경년열화 절연유의 절연파괴전압과 $\tan\delta$ 값을 흡광도와 비교하여 표 2에 표기하였다. 표 3에 수록한 기존의 대용량 변압기 절연유 판정기준을 이용하여 UV-Visible 흡수분광광도법에 의한 절연유 판정기준을 설정하였다. 표 2와 3에서 보듯이 절연파괴전압은 25~30(kV)가 되면 요주의로 판정되는데 10년 사용된 절연유들이 이 값에 해당되고, $\tan\delta$ 값은 2~5

표 1. 절연유 ICP 실험
 Table 1. ICP test of the transformer oil

sample	Cu(ppm)	Fe(ppm)
Blank	0.01	0.03
신유	0.04	1.58
8년	0.63	1.91
10년	0.40	2.57
13년	2.19	1.38

표 2. 실변압기에서 채유한 절연유들의 절연파괴전압, $\tan\delta$ 와 흡광도값

Table 2. Breakdown voltage, $\tan\delta$ and absorbance of the transformer oil.

sample	절연파괴전압(kV)	$\tan\delta$ [%]	흡광도※
신유	41	0.1	0.261
8년	27	4.0	0.589
10년	24	4.5	0.965
13년	21	6.8	1.279

※ 시료 : hexane=0.5[mℓ] : 9.5[mℓ]

표 3. 절연유의 판정기준

Table 3. A criterion of the transformer oil.

판정	절연파괴전압(kV)	$\tan\delta$ [%]	흡광도※
양호	30이상	2이하	0.580이하
요주의	25~30	2~5	0.580~0.900
불량	25미만	5이상	0.900이상

※ 시료 : hexane=0.5[mℓ] : 9.5[mℓ]

[%]면 요주의로 판정되는데 8년 사용된 절연유들이 이 값에 해당된다. 그래서 흡광도 값을 이 판정기준과 비교할 때 8년 사용된 절연유들의 흡광도값이 요주의에 해당된다고 할 수 있다. 그러므로 흡광도 값의 요주의, 불량 수준은 지금까지의 판단기준이었던 절연파괴전압과 $\tan\delta$ 값을 비교해보면 흡광도 값이 0.580이상이 되는 8년이상 사용된 절연유들을 요주의로 볼 수 있고 흡광도 값이 0.900이상이 되는 10년이상 사용한 절연유들을 불량으로 볼 수 있다.

본 연구에서 제시한 UV-Visible 분광광도법을 사용하는 흡광도값에 의한 주상변압기 절연유의 판정법은 육안에 의한 절연유 이상여부의 판단방법을 과학화 시킬 수 있는 방법이다. 현재 간이형 UV-Visible 분광광도계(Spectronic 20)가 시판되고 있으나 배터리를 사용하는 휴대용 기기는 아니다. 따라서 본 연구에서 제시한 분광광도법을 현장에 적용하려면 저렴한 가격에 경량화된 분광광도계의 개발이 앞으로 필요할 것이다.

4. 결 론

1. UV-Visible 분광광도계를 사용하여 측정된 경년열화 절연유의 흡광도는 사용기간에 비례하

여 증가하였다.

2. 절연유의 흡광도를 측정함으로써 절연유의 이상여부를 판단할 수 있으며 대용량 변압기에 적용되는 절연파괴전압과 $\tan\delta$ 의 판정기준을 이용하여 설정한 흡광도법에 의한 주상변압기 절연유의 판정기준은 다음과 같다.

- 흡광도 0.580이하 : 양호
- 0.580~0.900 : 요주의
- 0.900이상 : 불량

3. 흡광도법에 의한 주상변압기 절연유의 판정법은 기존의 육안에 의한 방법을 과학화시킨 방법이며, 현 단계에서도 실용화가 가능하나 전국에 산재한 수많은 주상변압기의 실태를 감안하면 많은 수의 휴대용 측정기기가 필요하므로 더욱 저렴하고 경량화된 분광광도계의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 한국학술진흥재단의 대학부설 연구소 연구과제 연구비 지원에 의하여 이루어졌으므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 권동진, 광희로, "초음파 경향분석에 의한 전력용 변압기의 예방진단에 관한 연구" pp.5~11, 1995. 박사학위논문.
- 2) 광희로 등, "전력용 변압기 절연유의 비파괴진단 시험법 비교연구" 대한전기학회지, 제40권, 제8호, pp.799~807, 1991.
- 3) R. Musil et. al, "Testing Practices for the AC Breakdown Voltage Testing of Insulation Liquids," IEEE, Vol.11, pp.21~26, 1995.
- 4) "발전기 및 변압기 절연진단 시험 교육 교재" 한국전기 연구소.
- 5) "電気絶縁油ハンドブック", 日本石油學會, pp.1~48, 1987.
- 6) Andrzej B.S, "Characterization and Pretreatment of New Transformer Oils," IEEE, Vol.11, pp.8~20, 1995.
- 7) "部分放電劣化", 日本電氣學會 技術報告, pp.1~82, 1984.
- 8) "변압기 유중 가스감시 시스템의 운용연구", 연구보고서, 전력연구원, pp.1~78, 1994.
- 9) "전력기기 예방진단 기술연구", 한국전력공사 기술연구원(1987).

- 10) "재생 절연유 경년 열화 연구", 한국전력공사 기술연구원(1987).
 11) "변압기 절연유 열화센서 진단용 계측기 개발연구",

- 한국전력 연구소(1994.12)
 12) 月岡淑郎外, "絶縁油の劣化と壽命" 日本 電氣評論, pp. 18~21, 1978.

◇ 著者紹介 ◇



곽희로(郭熙魯)

1942年 3月 1日生. 1967年 서울工大 電氣工學科 卒. 1978年 호주 New South Wales 大學院 電氣工學科 卒(碩士). 1986年 中央大 大學院 電氣工學科 卒(博士). 1967年 韓電勤務. 1986年 美國 M.I.T Visiting Scientist. 現在, 崇實大 教務處長, 電氣工學科 教授, 當學會 副會長.



남영우(南泳雨)

1953年 6月 21日生. 1975年 서울工大 化學工學科 卒. 1977年 同 大學院 化學工學科 卒(碩士). 1984年 同 大學院 化學工學科 卒(博士). 現在 崇實大學校 化學工學科 教授.



윤영자(尹英子)

1939年 7月 22日生. 1963年 梨花女大 化學科 卒. 1974年 誠信女大 大學院 家庭科 卒(碩士). 1975年 高麗大 大學院 化學科 卒(博士). 現在 崇實大學校 化學工學科 教授.



남궁미옥(南宮漢玉)

1963年 8月 14日生. 1991年 崇實大 大學院 化學工學科 卒(碩士). 現在 同 大學院 化學工學科 博士課程.



이동준(李東俊)

1971年 12月 27日生. 1995年 崇實大 工大 電氣工學科 卒. 現在 同 大學院 電氣工學科 碩士課程.