

절연유 열화센서를 이용한 절연유 열화상태 측정연구

전 영 갑* 권 동 진 조 국 희
(한국전기연구소) (한전 전력연구원) (한국전기연구소)

A study of measuring the insulation oil condition by using degradation oil sensor

Young Kap Chon Dong Jin Keun Kook Hee Cho
(KERI) (KEPRI) (KERI)

Abstract - 본 연구에서 사용된 절연유 열화센서는 주 매질이 기공 세라믹(Porous Ceramic)으로 구성되어 있어 열화생성된 유불용성분(油不溶成分)이 일정 크기의 기공 속을 통과할 때 절연유의 열화정도에 따라 인위적인 도전 통로가 형성되는 데, 이러한 회로를 이용하여 전기적인 분석으로 측정된 센서의 누설전류치와 기존 실시되고 있는 절연유 분석법인 전산가, 내압치와 상호 비교 분석한 결과, 지금까지 샘플링에 의한 화학적인 분석법에 앞서 전기적인 분석법으로 절연유 열화 상태를 간단하게 분석할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

1. 서 론

절연유는 변압기의 전기적 절연과 냉각작용에 중요한 역할을 담당하고 있으나 사용 중 온도, 수분, 산소등의 영향을 받아 열화(劣化)하여 절연능력 및 냉각능력이 저하하게 되므로 변압기 소손의 원인이 된다.

현재는 절연유 열화 방지 대책으로는 보수 점검시 일정 년수를 경과한 변압기의 절연유만 채취하여 절연파괴 전압을 실시 후, 그 결과에 따라 교체 또는 여과하고 있다. 그리고 절연유의 화학분석을 조사한 결과, 절연유 열화는 2가 이상의 원자가를 가지는 철(2價, 3價), 동(1價, 2價) 등이 열화 촉진성이 있다는 것을 많은 연구자들이 연

구한 바 있다.⁽¹⁾ 이와 같은 현상은 광유가 산화할 때 반응되는 생성물로 자촉작용(自觸作用: Auto-Catalysis)에 의하여 발생되며 미량의 수분에 의해서도 산화반응이 발생된다. 위와 같이 열화생성물이 생성되면 전산가를 증가시키고, 열화로 인해 생성된 스렛지(Sludge)성 산화 생성물은 절연유의 점도 및 비중을 증가시켜 열확산을 저해하여 부분과열을 일으켜 변압기 소손의 원인이 되며, 유용성(油溶性) 산화생성물 중 Ester, 금속비누 등과 같은 친수성(親水性) 산화 생성물을 생성하여 절연파괴전압을 저하시키고 가스상 산화 생성물이 발생되어 변압기 소손 및 폭발의 원인이 된다. 절연유의 불순물 생성과정을 파악하는 데 있어 열화생성물이 생겨나는 초기에 절연유의 열화상태를 파악할 수 있도록 절연유 열화센서를 유중에 내장시켜 흡착되는 불순물 도전입자의 전자적 전도현상 원리에 의하여 외부에서 그 도전도를 측정하여 절연유의 "양" "불량"을 측정한다. 이와같은 방식은 기존의 측정방법인 절연유 내압, 산가, tan δ 시험들이 전부 불순물 입자에 의한 단위체적당 걸리는 전기적인 현상을 측정한다는 면에서 그 대상물이나 측정원리가 비슷하다.

(센서원리)

절연유 열화로 인해 발생되는 특성물질 :
H⁺, Moisture, Sludge 중 Carbon(도전성물질)

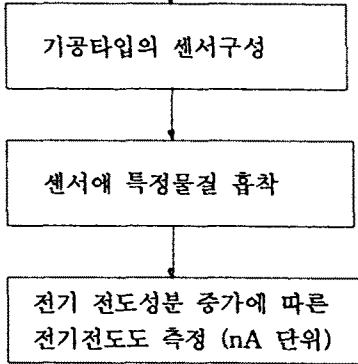


그림 1 절연유 열화센서 원리

절연유 열화센서⁽²⁾⁽³⁾는 변압기 유중에 설치하기 때문에 내산성(耐酸性) 및 내구성(耐久性)이 좋아야 한다. 상기 센서 동작원리는 불순물 도전입자가 절연유 열화센서의 Porous 재질부에 흡착-통과될때 전기적회로를 구성시킨다. 즉 절연유 열화측정 센서의 원형 전극에 일정한 직류전압을 가하였을 때 전류계의 전류변화치를 측정하므로써 발생하는 전기량으로 절연유의 경년변화를 알 수 있다. 즉 절연유 도전성 불순물 입자가 일정크기로 성장될 때 미소 입자를 흡수하여 도전성회로를 구성시킨다. 이때 전기적인 신호(DC 2KV)를 인가하여 본 센서의 누설전류치를 측정하면 절연유 열화정도를 추정할 수 있다. 측정방법은 그림 1에서 고압의 직류를 변압기 절연유 열화센서에 연결하여 절연유 열화정도 및 온도변화에 따른 전류변화를 측정한다. 이때 설정된 전압의 출력 레벨을 표시하기 위하여 직류 고압 발생부 양단에 3¹/₂ Digit의 Digital식 전압 표시장치를 연결하여 전압을 표시한다. 이를 위해 변압기 절연유에 온도센서인 Thermocouple을 함께 넣어서 온도를 측정한다. 전류와 온도를 Digital 값으로 변환하여 표시하며, 직류고압 발생장치, 전압 표시장치, 센서전류 측정장치, 온도 측정장치 입력 및 데이터 표시장치로 구성되어 있다.

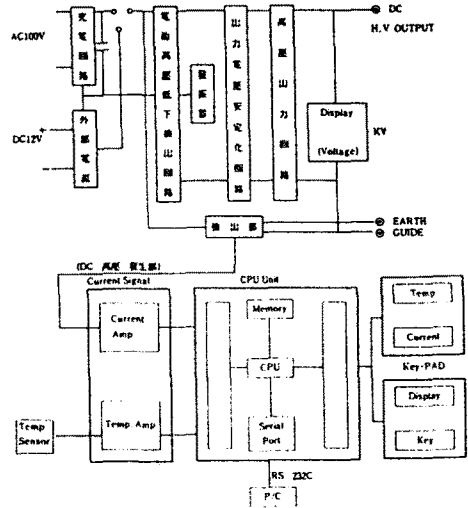


그림 1 절연유 열화 측정시스템 Block도

2. 절연유 센서 특성실험

절연유 센서에 의한 특성실험을 실시하기 위하여 (1) 신유와 열화유에 대한 실험 (2) 절연유 열화센서 재사용 시험 (3)현장 실험 등을 실시하였다.

2.1. 신유와 열화유의 일반 특성치 변화

표 1은 신유와 열화유의 특성치를 비교한 것으로 특성치에 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 특성변화에 따른 절연유 열화센서의 누설전류치를 그림 2에 나타낸다. 그림에서 알 수 있다시피 신유에서의 누설전류 변화 추이와 열화유에서의 누설전류 변화추이가 나타내고 있으나 온도가 상승함에 따라 열화유에서의 누설전류가 신유에 비해 상당히 큼을 알 수 있다. 따라서 신유와 열화유에 대한 비교 분석으로도 절연유 열화센서의 신뢰성을 간접 확인할 수 있다.

* 시험조건

- (1) 5 (Litter) 비이커 1개
- (2) 절연유 : 신유 및 열화유
- (3) 온도가열방법 : Stirrer 1대
- (4) 절연유 온도 : 10 ~ 90 (°C)
- (5) 가스분석 : 휴대용 가스분석(6성분)
- (6) 전류측정 : Analog식 절연저항 측정기
- (7) 절연유 열화센서(신품) : 1개

표 1 신유와 열화유의 일반특성치 비교

시험항목	신유	열화유
절연내력(KV)	60	46
산가(mg-KOH/g)	0.01	0.03
가스분석(ppm)		
H ₂	0	11
CO	0	35
CH ₄	0	0
C ₂ H ₄	0	20

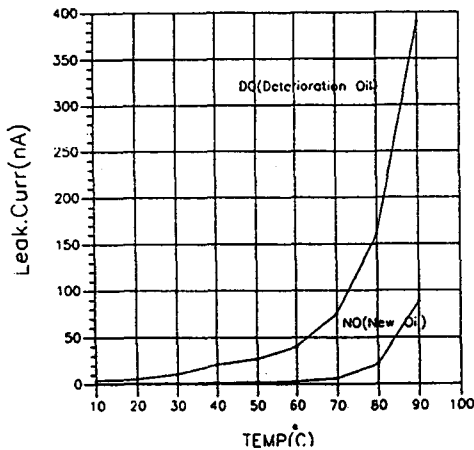


그림 2 신유와 열화유의 누설전류치 비교

2.2 절연유 열화센서 재사용 시험

절연유 열화 센서의 재사용 시험 조건 및 회로도는 그림 3과 같다.

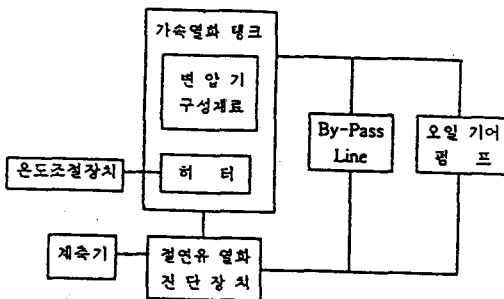


그림 3 절연유 열화센서 재사용 회로도

절연유 열화센서의 재사용 시험에 관련하여 일반 특성 분석 실험인 산가와 절연유 내압치와 절연유 열화센서의 누설전류와 비교 분석하였다. 처음 절연유를 교체하여

약 3개월간 절연유 온도 130(°C)를 가한 상태에서 1일 약 0.25(m²)의 산소량을 투입하여 가속 열화시켰다. 절연유가 열화된 상태에서 절연유 열화센서는 재사용하고 절연유만 신유로 교체하여 다시 열화시키면서 센서의 누설전류를 측정하고 결과 센서의 누설전류는 신유의 적은 누설전류를 나타낸 후 열화에 따라 다시 원 상태로 상승함을 알 수 있었다. (측정시 절연유 온도 100°C) 본 실험을 통하여 절연유 열화센서에 대한 재현성을 알 수 있을 뿐만아니라 절연유 열화센서의 특성을 실증할 수 있었다. 그림 4는 절연유 열화센서의 재사용에 대한 그래프이다.

변압기 절연유는 사용 조건 및 부하인가 조건에 따라 점점 열화되어간다. 현장에서 그 열화정도를 도출하는 데는 장기간의 시간이 걸리므로 실험실에서 그 열화정도를 파악하여 그 판단 기준을 설정할 필요가 있다. 절연유 열화센서의 재사용 실험장치를 이용하여 절연유를 가속 열화시킨 후 절연유 일반 특성과 센서의 누설전류를 온도별로 구하여 그 특성곡선 식을 이용하여 절연유 판정 기준치가 결정된다. 그림 5는 절연유를 가속 열화시킨 후 절연유 산가 및 내압치가 불량 레벨인 절연유 내압 18 (KV), 산가 0.485(mg-KOH/g)일 때의 온도별 누설전류치를 나타낸다. 그림 5에 의거 절연유 온도에 따른 누설전류치 곡선으로 그 특성식은 다음과 같다.

$$Y = 0.00185062X^3 - 0.15486X^2 + 5.16483X - 40.5667$$

절연유 산가가 0.2108-0.2684-0.325 (mg-KOH/g)로 변화함에 따라 절연유 내압크기는 35.6-25.3-26.8 (KV) 등으로 변화된다. 그리고 절연유 온도 100(°C)에서 센서의 열화유 온도 특성식에 의거 60 (°C)로 환산하면 51.2-75.6-96.3 (nA)로 변화됨을 알 수 있었다. 그림 4는 절연유 온도 60(°C)를 기준으로 한 누설전류 그래프이다. 그림에서 알 수 있다시피 센서의 누설전류가 51.2 (nA)일 때 산가는 0.21 (mg-KOH/g)을 나

타내고, 내압은 35.6(KV)를 나타낸다. 그리고 센서의 누설전류치가 116.2 (nA)일 때, 산가는 0.485(mg-KOH/g), 내압은 18(KV)임을 알 수 있다. 따라서 절연유 온도 60(°C)를 기준으로 센서의 누설전류가 60(nA)이하일 때 절연유는 “양호”한 상태이고, 센서의 누설전류가 120(nA) 이상일 때 “불량”한 상태로 판정할 수 있다. 따라서 “요주의” 판정은 60(nA)~ 120(nA)사이임을 알 수 있다. 신유교환은 3회에 걸쳐 실시되었는데, 절연유 열화센서는 재사용하고 절연유만 교체하였을 때 2-3일 내에 누설전류가 원상회복 됨을 알 수 있었다. 그림 6은 센서의 누설전류 변화 추이를 산가와 비교 분석하였고, 그림 7은 절연유 내압치와 상호 비교한 결과, 절연유 내압치는 센서의 누설전류치와 반비례하여 감소되며, 산가는 비례적으로 증가되는 현상을 나타낸다.

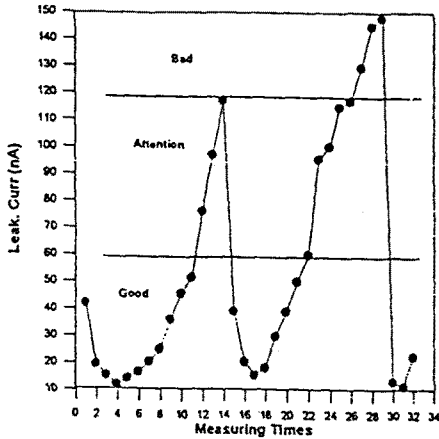


그림 4. 절연유 재사용시 누설전류

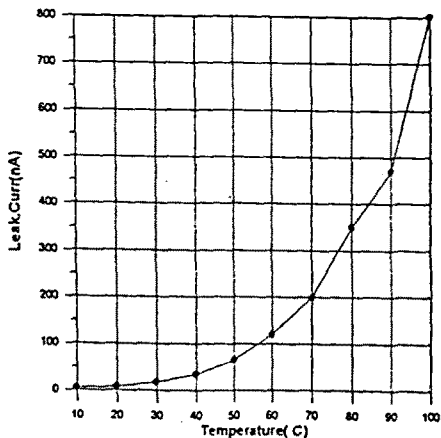


그림 5 절연유 열화 특성곡선 (열화유)

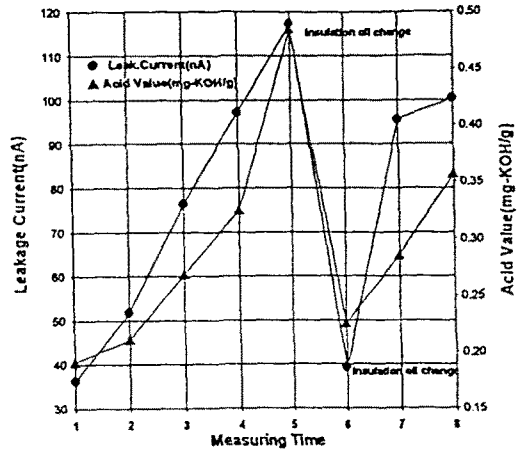


그림 6 센서누설전류-산가치 관계

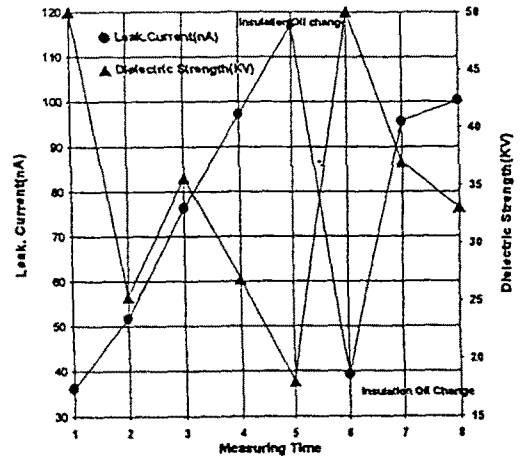
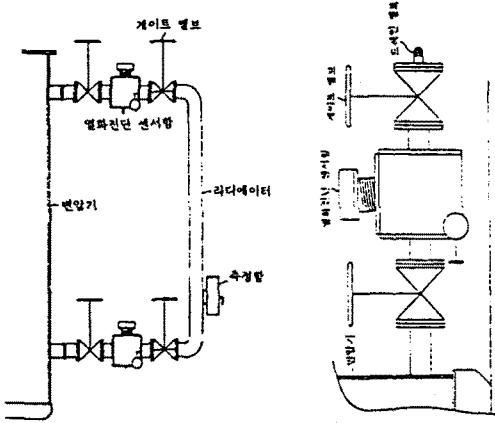


그림 7 센서누설전류-내압치관계

2.3 현장 시험예⁽⁴⁾

본 연구실험에서는 그림 8과 같이 현장에서 운전 중인 변압기에 변압기 라디에타와 절연유 드레인 밸브에 절연유 열화센서를 설치하여 시험하였다. 그림 8(a)는 라디에타 상부 위치(#1)와 라디에타 하부 위치(#2)에 열화센서를 취부한 것은 절연유온도가 변화됨에 따라 누설전류의 크기가 변화됨으로 절연유 온도와 센서의 누설전류치 크기를 상호 비교하기 위해서이다. 그림 8(b)는 변압기 드레인 밸브 부분(#3)에 설치하여 절연유의 자연대류외에 절연유가 정체되어있는 부분에 설치하여 센서의 누설전류를 측정하기 위해서이다. 본 연구에

서는 그림 4.23의 방법으로 절연유 열화센서를 154 (KV), 3상 45/60 (MVA)의 옥외 변압기 (A 변전소)와 옥내 변압기 (B 변전소)각 1대에 설치하였다.



(a) (b)

그림 8 실 변압기 열화센서 장치도

그림 9는 A 변전소에 설치한 절연유 열화센서의 누설전류치 변화상태를 측정하고, 그림 10은 B 변전소에 설치한 절연유 열화센서의 누설전류치를 나타낸 것이다. 절연유 열화센서의 누설전류는 1개월 단위로 현장에서 직접 측정하였으며, 절연유 전산가 및 절연파괴전압은 샘플을 채취하여 실험실에서 측정하여 누설전류와 비교하였다. 본 연구에서는 실험실에서 측정된 온도 보상 곡선의 특성식에 따라 10~100 (°C) 범위에서 누설전류의 온도보상치를 구하여 현장 측정치를 60(°C)로 온도 보상한 값이다. 그림 9에서 #1 및 #3 센서는 상당한 안정적인 추세로 변화되고 있는 반면, #2 센서는 1회, 5회, 6회에서 상당한 큰 값을 나타내고 있는 데 이와 같은 현상은 휴대용 계측기의 케이블 접촉저항에 의한 측정 에러로 보여진다. 그림 10의 누설전류는 그림 9의 누설전류와 거의 같은 양으로 안정적인 변화를 보이고 있다. 현장에 설치된 절연유 열화센서의 누설전류치는 10~20 (nA)의 범위로 상당한 미소전류를 나타내고 있음을 알 수 있는데 그 이유는 본 센서를 설치하기는 절연유 필터링 작업을 실시하였기 때문에 절연유 상태는 비교적 양

호한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

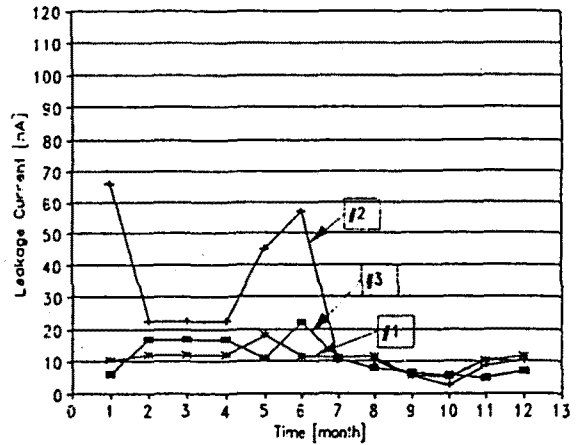


그림 9 'A' 변전소 센서누설전류치

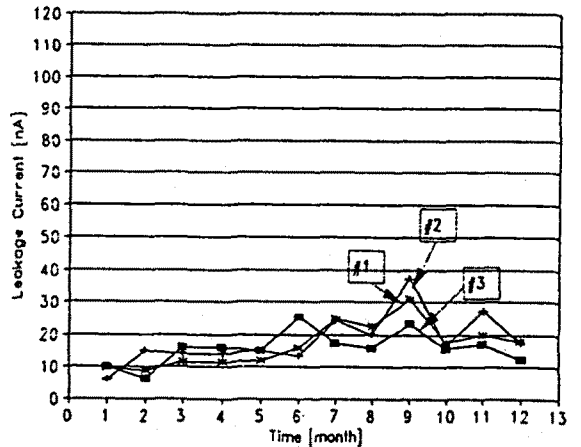


그림 10 'B' 변전소 센서누설전류치

그림 11은 현장에 설치된 두 변전소의 전산가 변화 추이도이다. 전산가의 요주의 레벨은 0.2~0.5 (mg-KOH/g)이나 그림 11의 변화추이는 0.005~ 0.02 (mg-KOH/g)으로 그림 9, 10의 누설전류치와 같이 상당히 안정적인 상태를 나타내고 있다.

그림 12는 현장에 설치된 두 변전소의 절연유 내압치의 변화상태를 나타낸 것이다. 절연유 파괴전압의 요주의 레벨은 25~30 (KV)이나, 그림 12에서의 절연파괴전압은 약 40~50 (KV)의 범위로써 상당히 안정적인 상태를 나타내고 있다.

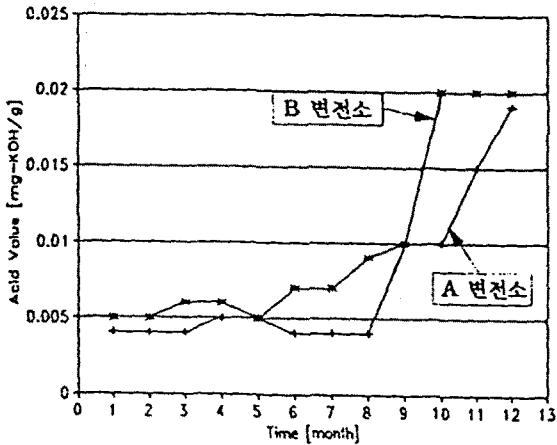


그림 11 전산가 변화 추이도

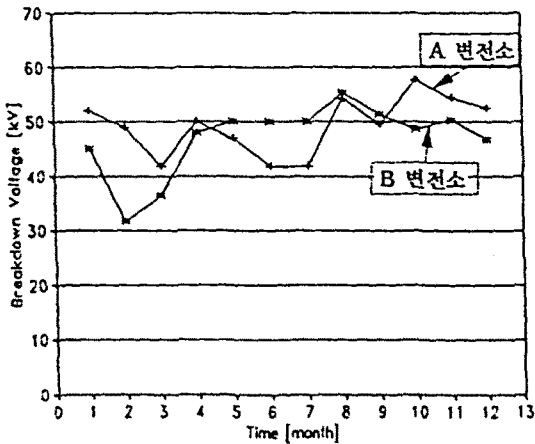


그림 12 절연유 내압치 변화 추이도

이와 같은 결과로부터 절연유 열화센서의 위치는 변압기 제조 과정 중 라디에타 부위에 설치하거나, 운전 중인 변압기에 대하여 드레인 밸브 측에 설치하거나 관제가 없으나 그 설치 비용 및 용이성, 데이터의 안정적인 취득을 위해 변압기 드레인 밸브 측에 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3. 결론

이상과 같은 절연유 열화센서에 대한 제반 특성을 비교 실험하여 본 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 실험실 비이커에 신유와 열화유를 교체하면서 센서의 누설전류를 측정하고 결과

절연유 일반 특성과 비슷한 추이로 센서의 누설전류가 분명히 차이남을 알 수 있었다.

(2) 절연유 열화센서의 재사용 실험 결과 절연유 열화에 따라 누설전류치가 매우 민감하게 변화됨을 알 수 있었다.

(3) 절연유 열화센서 재사용 실험시 절연유 일반 특성실험치와 비교 분석한 결과 절연유 열화정도를 센서의 누설전류치에 의한 판단 기준(안)을 제시한다.(60°C 기준)

양호 : 60 (nA) 이하

요주의 : 60~120 (nA)

불량 : 120 (nA) 이상

(4) 154(KV) 급 전력용 변압기 2대에 대한 현장실험 결과 센서를 라디에타 상하부와 드레인 밸브에 설치된 절연유 열화센서의 라디에타 상하부와 드레인 밸브에서 측정된 누설전류치는 절연유 내압, 산가와 거의 같은 추세로 안정적인 누설전류치 (10~20 nA)로 변화되고 있음을 알 수 있었다.

앞으로 절연유 열화센서에 대한 현장 적용연구는 운전 중인 변압기에서 급속하게 변화되지 않으므로 장기간에 걸친 누설전류 측정 및 절연유 특성분석이 수행되어 절연유 열화센서에 의한 예방진단의 신뢰성이 확보되어야 할 것이며, 센서의 누설전류치에 의한 열화판정기준이 보완되어야 할 것이다.

(본 연구는 한국전력공사 전력연구원 자금 지원으로 연구 되었음을 밝혀 둡니다)

참고문헌

- [1] 河村英雄, 山田静吉 “新電氣 絶縁油” 日書
- [2] 전영갑 외 9인 “ 변압기 절연유 열화 센서 진단용 계측기 개발연구” 1993년 과기처 보고서
- [3] 전영갑 외 9인 “ 변압기 절연유 열화 센서를 이용한 진단기법 개발” 1996년 과기처 보고서
- [4] 전영갑, 권동진 “ 변전설비 진단기술 개발연구” 전력연구원, p 263 1996.12