

# 전력용 변압기의 열화진단 시험기술

전 영 갑\* · 선 중 호\*\*

(\*한국전기연구소 고전압연구실 선임연구원,  
\*\*동 연구원)

## 1. 서 론

최근 경제의 고도성장으로 전기설비가 대규모화됨에 따라 운용면에서의 신뢰성 뿐만아니라, 전기설비의 정권사고로인해 파급되는 생산성 및 제품의 질적인 문제들에 많은 관심을 가지게 되었다.

전기설비의 신뢰성을 높이기 위해서 지금까지는 사후보전(Breakdown Maintenance) 측면에서 보았으나, 기기의 대용량화에 따른 보전기술의 필요성이 대두됨에 따라 예방보전(Maintenance Prevention) 내지 사전보전(Predictive Maintenance) 형태로 그 접근방법이 변하여 가고 있다. [1] 전기설비 중 중요한 부분을 점하고 있는 전력용 변압기도 그 용량이 대용량화 될 뿐아니라, 수용지점의 부하공급에 중요성이 대두됨에 따라 사전보전(Predictive Maintenance)을 위한 여러가지 연구가 진행되고 있다. 특히 전력용 변압기는 정지기(Static Equipment)의 일종으로 분류되어져, 회전기(Rotary Equipment)에 비하여 예방보전시스템의 개발이 활발하지 못하였으나, 최근 이에 관련된 각종 센서류의 개발로 연구성고가 괄목하게 발전하였다.

본고에서는 전력용 변압기의 열화요인(Factors of Degradation)을 분석한 후 변압기 절연진단시험방법 및 진단용 기기 개발현황을 간단히 설명하고자 한다.

## 2. 전력용 변압기의 열화요인 및 수명 (Life of Loss)

절연재료들은 어떤요인에 의하여 점차 열화되는데 그 원인을 살펴보면 열적(Thermal), 전기적(Electrical), 환경적(Enviromental) 또는 기계적(Mechanical) 요인의 네종류로 분류되어질 수 있다[2]. 보통 절연재료에서의 절연 열화(Insulation Degradation)는 열적 및 기계적요인의 복합요인으로 작용되어져 전기적 성질의 변화를 가져오게된다[3]. 그림 1에서와 같이 절연의 일차 변화인 열(Thermal)이 주어졌을 때 화학조성의 농도변화 및 생성물 등이 발생되고 물리적 성질 즉 절연과피강도의 변화를 가져오게됨을 알 수 있다.

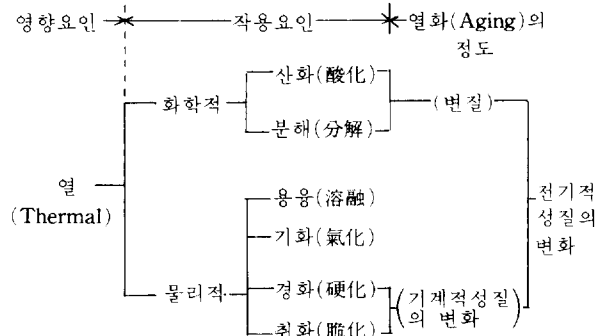


그림 1. 열적영향요인에 의한 열화과정

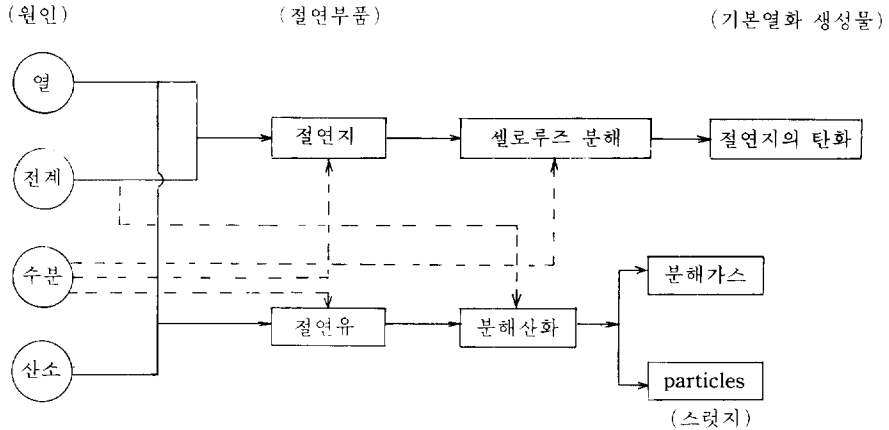


그림 2. 절연물 열화기구(Aging Mechanism)

전력용 변압기의 구성부품 중 절연을 요하는 중요한 부분으로 절연지(Insulation paper)와 절연유(Insulating oil)가 있다. 절연지 및 절연유의 열화기구(Aging Mechanism)를 나타내면 그림 2와 같다 [4]. 절연지는 열과 전계로 인하여 셀룰로즈가 분해되어 탄화되고 절연유는 열(Thermal)과 산소의 흡수로 산화(Carbonized)되어 분해가스나 스럿지(Sludge) 등이 발생되어 점차 열화(Aging)된다.

그외 전력용 변압기의 경년열화로 인해 변압기 수명에 영향을 미치는 것들의 원인을 종합적으로 살펴보면 다음과 같다[5].

- 열(Thermal)에 의한 열화
- 흡수에 의한 열화
- 산소의 흡수에 의한 열화
- 부분방전(partial Discharge)에 의한 열화.
- 기계적응력

이들의 원인은 단독으로의 경우보다 오히려 중첩에 의한 것이 많다. 이 중에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 열에 의한 열화(Aging)이고 절연물이 흡수되거나 산소가 존재하면 열열화(Thermal Aging)가 촉진된다. 절연물의 열화가 진행되는 동안 의뢰(Lightning Surge), 내부개폐서저(Switching Surge) 등의 이상전압, 외부단락등의 기계적 이상스트레스가 있는 경우 변압기가 파괴된다. 변압기 사고과정을 절연열화에 의한 사고와 단락에 의한 사고, 제작 불량에 의한 것들로 나눌 수 있다. 그림 3은 이러한 과정을 나타낸 것으로 제작 및 운용상 사고는 변압기 소손에 직접적인 영향을 미치는 반면 절연열화는

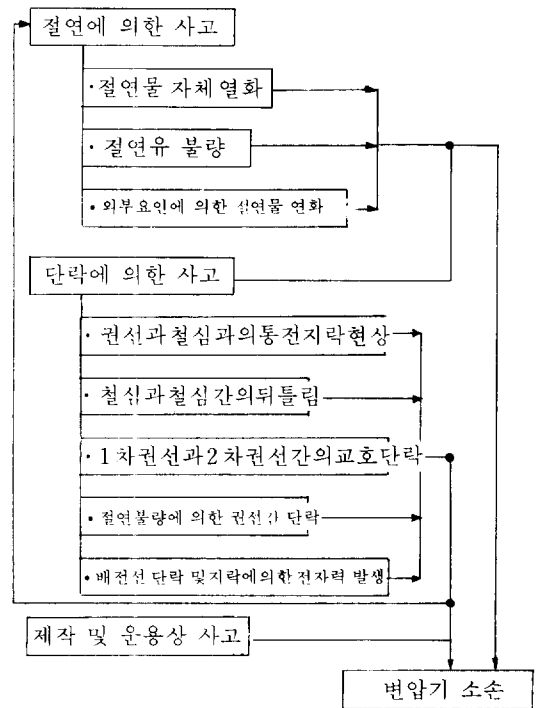


그림 3. 변압기 사고요인

단락에 의한 사고와 상호연관이 있음을 알 수 있다. 따라서 전력용 변압기의 열화(劣化) 진단은 절연물 열화 뿐만 아니라 단락에 의한 기계적 요인도 검토되어야 할 것이다. 그리고 절연물 열화의 주 원인이 열(熱)로 인한 것으로 볼때 그 수명을 식으로 계산할 수 있다.

변압기 절연물의 최고온도와 수명간의 관계를 나

타내는 것으로 Arrhenius식이 있다. 그 관계식과 온도-수명곡선은 다음과 같다[5].

절연물의 수명(Life of Loss)은 그 최고점 온도에 의하여 가장 큰 영향을 받으므로 다음과 같은 일반식을 가정한다.

$$Y = ae^{-bQ} \quad (1)$$

Y : 절연물 수명 (년)

a, b : 정수

$Q_H$  : 최고점온도 =  $Q_a + Q_m$

$Q_a$  : 냉매온도

$Q_m$  : 최고점 온도 상승

즉 온도가 높게되면 될수록 수명은 지수함수적으로 짧게되는 것을 알 수 있다. 보통 유입변압기에서는 수명이 반감되는 온도차를 6°C ( $b=0.1155$ )로 보고 있다. 또한 JEC-204-1978에 있어서 주위온도가 최고 40°C, 일간평균 35°C, 연간평균 20°C를 기준으로 하여, 최고점 온도가 95°C에서 연속운전된 것으로 등가계산하여, 정규수명  $Y_0$ 에 대한 최고 점온도가 어떤 값( $\theta$ )에 있어 연속운전한 경우의 수명을 Y라하면

$$\frac{Y}{Y_0} = e^{-b(Q-\theta)} = e^{-0.1155(Q-95)} = 2^{-\left(\frac{Q-95}{6}\right)} \quad (2)$$

가 얻어진다. 이것을 그래프로 그려보면 그림4의 온도-수명 곡선이 된다.

### 3. 변압기 절연진단 시험 [6]

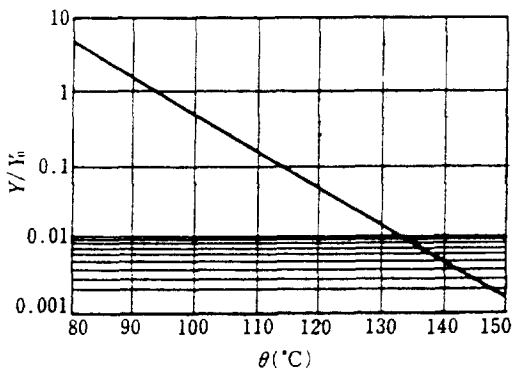


그림 4. 절연물의 온도 - 수명곡선

변압기 절연시스템의 열화상태를 파악하기 위한 진단시험은 표1과 같은 전기적 특성을 측정하기 위한 진단시험과 기타 진단시험이 있다.

#### 3.1 절연저항시험

변압기의 권선과 접지간, 혹은 두 권선사이와 같은 주절연시스템의 상태를 파악하기 위하여 시험을 실시한다. 측정기기로는 Megger Ohm Meter를 사용하며 DC 500, 1000, 2500V급 Megger를 이용하여 절연저항을 직독한다. 절연체의 정격전압이 시험전압 이상일 때 절연체에 두가지 시험전압을 인가하여 측정된 결과치의 차가 25% 이상이라면 절연시스템이 흡습될 가능성이 있다. 변압기에서는 전압인가 1분후의 최소절연저항기준치를 다음식에 의해 결정할 수 있다.

$$R = CE / \sqrt{KVA} \quad (3)$$

R : 절연저항 [MΩ]

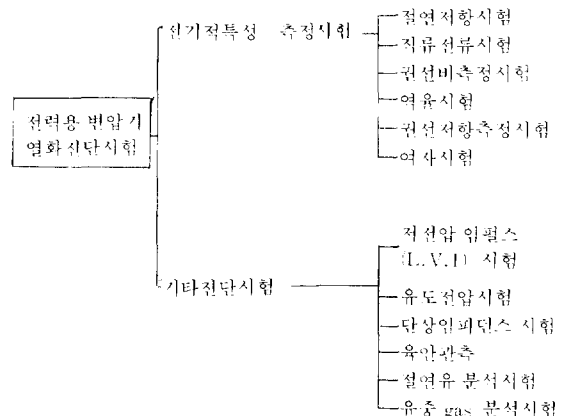
C : 0.8~1.6

E : 1상권선의 정격전압 [KV]

KVA : 변압기 용량

절연저항치가 최소절연저항 기준치보다 낮을 경우 절연파괴현상이 생긴것으로 분석되며, 측정치가 영이나 매우 낮은 값을 나타낼 경우 심한 탄화 tracking이나 권선의 접지, 권선간의 단락현상이 발

표 1. 변압기 절연열화 진단시험



생한 것으로 판단한다.

### 3.2 직류전류시험(PI시험)

직류전류시험은 변압기 권선에 직류전압을 인가할 때 흐르는 전류를 측정하여 전류-시간특성(흡수특성)에 의해 절연부의 상태를 판정하는 것이다. 측정장치는 직류고전압전원과 미소 전류계를 조합하여 사용한다. 일반적인 지표로써 초기의 전류치와 누설전류치에 근사한 측정 종료시의 전류치를 사용한 성극지수(P.I : Polarization Index)를 사용한다. 실제로 성극지수는 전압인가 후 1분에서의 전류치를 10분후의 전류치로 나누값이 사용되는데 표 2와 같이 그 절연상태를 평가할 수 있다.

### 3.3 변압기 권선비 측정

권선비 측정목적은 기본적으로 권선에서의 Turn 간, Section간의 절연상태를 진단하는 것이나, 이 시험을 통하여 내부권선의 단락발생 여부나 Tap Changer배열에 대한 문제점을 발견할 수 있으며, 동시에 여자전류를 측정할 수 있고 도체의 불완전한 연결이나 접지로 인해 나타나는 높은 권선저항과 같

표 2. 성극지수에 의한 절연 상태 판정

성극지수	절연상태
1 이하	매우 위험
1.0~1.1	위험
1.1~1.25	요주의
1.25~2.0	양호
2.0 이상	매우 양호

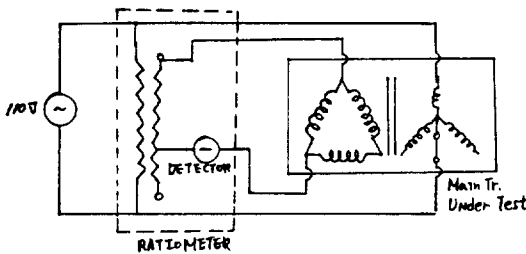


그림 5. 권선비 측정회로

은 결함들을 검출할 수 있다. 현장시험에 적합한 권선비 측정기는 hand crank전원장치가 내장되어 있으며 8~10V의 아주 낮은 전압을 50~60Hz 범위에서 발생시킨다. 그림 5는 권선비를 측정하기 위한 Ratio Bridge의 기본회로도이다. 그림 5의 회로도에 서처럼 변압기의 한상에 대해 두개의 고, 저합권선을 계측기에 연결하고 검류기의 평형을 맞춘다. 이때 측정되는

변압비는  $R/R_1$ 으로 나타난다. 이때 측정된 권선비는 계산치의 0.5%이내의 범위에 있어야 하며, 권선 Turn간에 단락이 있을 경우 이는 권선비 측정결과에 영향을 미친다. 즉 측정된 권선비가 허용범위에서 벗어날 경우 특히 높은 여자전류가 흐르다면 Turn간 단락을 의심해볼 필요가 있다.

### 3.4 절연체 역율시험

역율시험은 교류전압을 정격치까지 인가하여 그때의 전압과 전류의 위상치를 측정하는 시험이다. 어떤 절연시스템은 정전용량과 저항이 병렬로 연결된 등가회로를 구성한다. 역율은 이 등가회로의 저항성분에 흐르는 전류를 측정하여 구할 수 있으며, 누설전류가 작을수록 역율도 작고 절연상태는 더욱 좋아진다. 최근 추세를 보면 신형 변압기에 있어서 각 권선과 접지에 대한 역율이나 권선간의 역율이 0.5%를 초과하지 않는 경향이 있다. 최초의 시험으로 얻어진 값은 그 후의 시험에 의한 절연열화정도를 결정하는 데 기준으로 사용되고 있으며, 역율은 현장시험시 이런 초기 측정치들과 비교함으로써 절연상태를 분석하기에 적합하다. 또한 시험결과를 다른 유사한 변압기와 비교하여 권선의 절연열화상태의 결정도 가능하다.

### 3.5 권선저항 측정시험

권선저항측정은 권선의 연결상태를 파악하거나 권선이 병렬로 되어있는 경우회로의 개방이나 연결점의 고점측저항 여부를 검출하기 위하여 시행한다. 권선의 재료인 동은 온도에 따라 그 저항이 변하기 때문에 정확한 측정결과를 얻기 위해서는 측정결과를 기준온도의 값으로 환산해야 한다. 일반적으로 사용되는 기준온도는 75°C를 사용하고 있으며 측정

결과를 기준온도인 75°C로 환산하는 식은 다음과 같다.

$$R_{75} = R \times (234.5 + 75) / (234.5 + \text{측정시 권선온도}) \quad (4)$$

일반적으로 현장에서는 정확한 온도를 측정하기가 곤란하므로 현장측정 결과와 제작소 측정결과와의 예상측정오차는 5%정도로 생각할 수 있다.

### 3.6 여자전류 측정시험

이 시험은 특히 권선내의 국부적인 파괴현상이나 자기회로가 존재할 경우 변압기의 상태를 평가하는데 매우 유용한 방법이다. 변압기를 운전하기 위한 확인시험으로 이용되며, 나중의 변압기 분석을 위하여 이 시험에 사용된 장치, 연결방법, 온도 및 시험 전압등을 기록 유지할 필요가 있다. 시험전압은 정격전압의 10% 이상이어서는 안되며 시험조건에 영향을 미칠 수 있는 정도의 유도전압발생을 방지하기 위하여 일반적으로 고압권선에 전압을 인가하는 것이 바람직하다. 단상변압기에서는 여자전류의 극성을 교체하면서 전류계로 측정하며 그 결과가 비슷한 기기와 비교할 때 10%이상 차이가 나서는 안되며 또한 똑같은 조건으로 이전에 실시한 시험의 결과와 비교할 때 5%이상 벗어나서도 안된다. 삼상변압기에서는 각 상에 대한 측정결과를 비교할 수도 있다. 여자전류값은 철심장류계에 의해 영향을 받을 수 있다. 만약 권선비, 권선저항, 임피던스시험 등이 정상인대도 여자전류가 그 허용한계를 초과한다면 이는 장류자계의 존재를 의심할 필요가 있다. 이때 분압기를 통하여 권선에 직류전압을 인가하므로써 장류자계를 감소시키거나 제거할 수 있다.

### 3.7 저전압임펄스시험(L.V.I. Test)

단락전류의 유입 또는 운반시의 기계적 충격등으로 인하여 변압기 권선에 기계적인 변형이 발생하였을 경우 그 변형을 찾아내기 위하여 저전압 임펄스 시험을 시행한다. 이 시험은 휴대용 임펄스 발생장치 및 오실로스코프를 이용하여 저전압 임펄스를 변압기 권선에 인가하고 그 결과로 얻어진 전압파형을 기록 분석하며, 주로 변압기 운반이나 운전 전후의

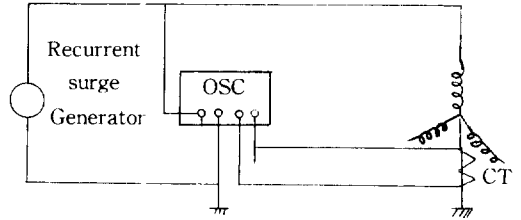


그림 6. LVI 시험회로

측정결과를 비교함으로써 변압기의 기계적인 변형상태를 해석한다. 그림 6은 LVI(Low Voltage Impulse) 시험회로를 나타낸다.

이 시험의 현장적용은 ANSI C57-98-1986에 따른 공장시험방법과 유사하며 추가로 많은 현장경험을 필요로 한다. 기본적으로 동일한 시험대상 변압기에 대해 이전에 측정된 결과와 시험대상기간 이후에 얻어진 시험결과 파형을 비교분석한다. 측정결과 위상의 변동은 축방향 이동에 관련되고, 크기의 변화는 권선의 반경방향 이동에 관련된다.

### 3.8 유도전압시험

A.C유도전압시험은 변압기 권선의 Turn 간, Layer 간, Section 간의 절연상태를 확인하기 위하여 시행한다. 그러나 유도전압시험은 시험장비의 크기와 비용 때문에 그 사용범위가 매우 제한되어있다. 일반적으로 최초 제작시 시험전압의 85%수준에서 시험하나, 부분방전검출장치를 연결하여 시험할 때 나쁜 결과가 나올 때 더 낮은 전압에서 시험하는 것이 바람직하다. 시험중에 흐르는 전류가 예상되는 여자전류를 초과하지 않고 소음, 연기, 절연유의 기포, 기준이상의 부분방전 같은 결함이 나타나지 않는다면 이 유도시험에 의한 변압기 상태는 양호한 것으로 생각할 수 있다. 유도전압시험에 의한 절연 특성을 검출한 방법으로는 부분방전시험이 가장 효과적이라 할 수 있다. 현장에서 사용할 수 있는 부분방전 검출방법으로는 다음과 같은 두가지의 기본적인 방법이 있다.

#### 가) Radio Influence Voltage Method(RIV)

일반적으로 이 시험을 현장에서 실시할 경우, 매우 변동이 심하고 대기중의 RIV의 간섭을 받는 경우가 많아 변압기 사용년한에 따라 결정된 시험전압에서 30~60분간의 장기간 시험을 행한다. 진단을

위한 시험전압은 통상적으로 운전전압의 100~125% 범위에서 채택한다. 일반적으로 현장시험에서의 허용RIV한계치는 500 $\mu$ V이하이다. 또한 연속 1분간 가했을 때 앞의 기준치를 25%이상 초과하면 안된다. 전체적인 경향은 일정하게 유지하거나 감소되어야 한다.

나) Acoustic Emission Method(AE)

이 방법은 특별히 유입식 변압기의 현장시험용으로 개발된 것으로 ANSI C57. 127에 상세히 기술되어 있다. 유도전압시험을 실시하는 동안 검출된 pulse Count rate가 초당 10,000회 이상인 경우에는 더욱 정밀한 점검을 실시할 필요가 있다.

3.9 단상임피던스측정시험

임피던스시험을 수행하기 위하여 변압기의 한 권선에 전압을 인가하는 동안 같은 철심각에 있는 다른 권선은 저임피던스 도체로 단락시켜야만 한다. 대부분의 경우에 정확한 결과를 얻기 위하여 권선에 2A의 전류가 흐르기에 충분한 단상전압을 인가한다. 다음 식을 사용하면 단상변압기의 %임피던스를 계산할 수 있다.

$$\%Z = 1/10 \times \text{측정전압} / \text{측정전류} \times \text{단상용량 (KVA)} / \{\text{단자전압(KV)}\}^2 \quad (5)$$

3상 변압기의 %Z는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\%Z = 1/60 \times \sum \text{측정전압} / \text{측정전류} \times 3\text{상용량 [KVA]} / \{\text{단자전압(KV)}\}^2 \quad (6)$$

이 시험항목은 코일 이동이 없는 한 제작사의 시험결과와 같은 측정치를 보일 것이다. 이 시험에 있어서  $\pm 2\%$  이내의 편차는 일반적으로 무시한다.

3.10 유중 GAS분석시험

변압기 내부에서 국부적인 가열, 방전등에 의하여 절연유, 절연지 및 기타 절연체가 열분해될 경우, 발생된 분해 Gas는 절연유 속으로 용해한다. 유중 Gas분석은 유중의 용해가스를 추출하여 용해가스양 및 구성비로 부터 변압기 내부이상유무를 진단하기

표 3. 이상의 종류에 의한 Gas 발생성분

이상의 종류	주 발생 Gas
절연유의 과열	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
유침고체절연체의 과열	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
절연유중의 방전	H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
유침고체절연체의 방전	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>

위한 시험으로서 그 유용성이 널리 인정되어 왔다.

절연유 및 절연체가 열분해할 경우 gas분석에 의하여 검출되는 gas는 20종류정도 이지만 이 가운데 변압기의 내부이상을 진단하는 데 필요한 gas는 H<sub>2</sub>(수소), O<sub>2</sub>(산소), N<sub>2</sub>(질소), CO(일산화탄소), CO<sub>2</sub>(이산화탄소), CH<sub>4</sub>(메탄), C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(에탄), C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>(에틸렌), C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>(아세틸렌), C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>(프로판), C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>(프로필렌), C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(부탄) 등 12종류이다. 표 3은 한국전력공사의 Gas분석판정기준으로 각 이상(異常)별 발생 Gas종류를 나타낸다. 또한 gas 조성비에 의한 내부 이상개속검출 및 이상 현상의 종류를 추정할 수 있는 방법으로는 L.C.I.E, Rogers, IEC, Dornenberg, gas Pattern, Davies, Duval, PEM 비율법 등이 있으며 이 가운데 Rogers, IEC 및 Dornenberg법에 의한 방법도 있으나 보고에서는 지면관계상 생략한다.

이상 여러방법을 이용하여 전력용 변압기 열화(劣化)상태를 판정하는 방법이 있으나, 상시점검이 불가능하여 판정기준을 정하는 데 문제점이 있다. 따라서 현재 우리나라의 현장에서는 유중개스분석시험과 산가 및 절연유의 절연내력시험 Main Tank의 외부 점검으로만 변압기의 열화정도를 추정하고 있는 실정이다. 산가 및 절연유의 저항 및 절연파괴치는 다음과 같다.

- 산가 (단위 : mg-KOH/g)
  - 0.2미만 : 양호
  - 0.2~0.3 : 재생요
  - 0.3이상 : 불량
- 저항율( $\Omega$ -cm)
  - 1~10<sup>12</sup> $\Omega$ ·cm 초과 : 양호

$1 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  : 요주의

$1 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  : 불량

○ 절연유파괴전압

JIS전극 2.5mm로 하여 절연파괴전압 30KV 이상이 필요하다. 절연유는 변압기에서 주요절연을 구성하므로, 이 절연파괴전압의 저하는 직접 변압기의 절연과 파괴로 나타나므로 충분한 관리가 필요하다.

4. 열화진단기기 개발현황

지금까지는 변압기 절연물이 열화될 때 그 정도를 측정하기 위하여 전력용 변압기를 계통에서 분리시킨 후 시험 측정하여왔으나, 최근 외국에서 개발되어 실용화된 것을 보면 센서(Sensor)를 이용한 외부진단기법이 통용되고있다. 이와 같은 방식은 변압기 운전시에도 상시감시할 수 있어 사전보전의 진단기술로 상당히 효과적이다. 최근의 동향으로 보아 대용량 중전기 제품들의 진단기술을 상시감시체제로 전환하고 있음을 알 수 있고, 이에 관련된 센서류의 개발도 활발하므로 이러한 진단기법을 도입하는 것이 시급한 실정이다[7].

중대사고를 미연에 방지하기 위한 변압기 진단기술로써, 부분방전측정, 유중가상분석등이 이미 개발된 방식이며, 이러한 진단은 실운전중에 이상검출이 가능하기 때문에 보수의 면에서나 정전예방의 면에서 많은 이점이 있다. 그외 국내외에서 이와 유사한 몇가지 방식이 개발되어 실용화 단계에 있으므로 이를 소개하고자한다.

4.1 부분방전 자동감시장치 [ 8 ]

변압기 내부의 부분방전(Partial Discharge)은 절연파괴의 전구현상(前驅現象)으로 발생하는 경우가 많으므로, 부분방전의 감시는 절연파괴사고를 미연에 방지할 수 있는 유력한 방식이다. 부분방전의 검출은 변압기 탱크에 취부된 초음파(Ultrasound)센서로 음향펄스를 검출하거나 방전에 의하여 발생하는 전류펄스를 검출하는 두가지 방식이 있다. 운전중의 변압기에는 송전선에서 침입하는 외부전기펄스 및 음향노이즈들이 많기 때문에 위에 서술한 두가지 방법을 서로 보완하여 복합적으로 이용된다. 즉 운전

중인 변압기의 내부에서 발생하는 부분방전(Partial Discharge)를 감시하기 위해서는 전류펄스와 음향펄스를 동시에 판단하는 기능이 필요하다. 그림 7은 이 장치의 구체적인 구성예를 나타낸 것으로 변압기 외함에 취부된 초음파센서로 부분방전에 의한 음향펄스를 검출함과 동시에 변압기 중성점에 취부된 로고스키(Rogoski)코일 및 1차측 붓싱탭에서 발생하는 방전전류펄스를 검출한 후 각각의 신호를 연산 출력부에서 판정한다. 변압기 내부의 부분방전에 의해서 발생하는 충격과는 그 주파수 범위가 광범위하므로 먼저 충격과의 고체전파음을 검출, 필터로 제거한 후 펄스변환기에 의한 펄스의 발생회수를 검출하여 연산처리에 의하여 설정치와 비교, 이상유무를 판정한다.

4.2 유중수소개스 자동감시 장치 [ 9 ]

변압기 이상시(부분방전, 국부과열) 발생하는 열에 의해 절연재료가 열분해된 후 개스가 발생된다. 이러한 개스는 유중에 용해되기 때문에 유중개스분석으로 내부이상을 검출할 수 있다. (TCG 개스측정 방식) 유중개스분석은 변압기 이상진단에 유력한 방식이나, 가연성(可燃性) 개스성분을 연속 자동감시하기 위해서는 장치가 복잡하고 많은 비용이 든다. 내부에서 발생하는 개스의 종류는 여러가지가 있으나 그 중 수소개스가 주성분을 이루기 때문에, 유중수소개스 농도를 감시하여 내부의 이상유무를 판정하여 장치를 간략하게 만들 수 있다.

그림 8과 같이 변압기 본체의 유중수소개스를 반투막(半透膜)의 막(膜)을 통하여 수소센서에 흡입되도록 한 후 수소개스의 농도를 전기적 저항회로를 이용하여 측정한다. 유중의 수소개스는 투과막(透過膜)을 통하여 자유롭게 통과되도록 한 후 상시에는 수소개스 농도를 평형상태에서 측정하고, 운전중에 발생된 수소개스농도는 마이콤으로 계산 그 출력을 얻는다.

4.3 TMS(Transformer Monitoring System) 및 MTAS (Micro - processor based Transformer Analysis System)

TMS방식은 변압기 상태를 종합적으로 감시할 수

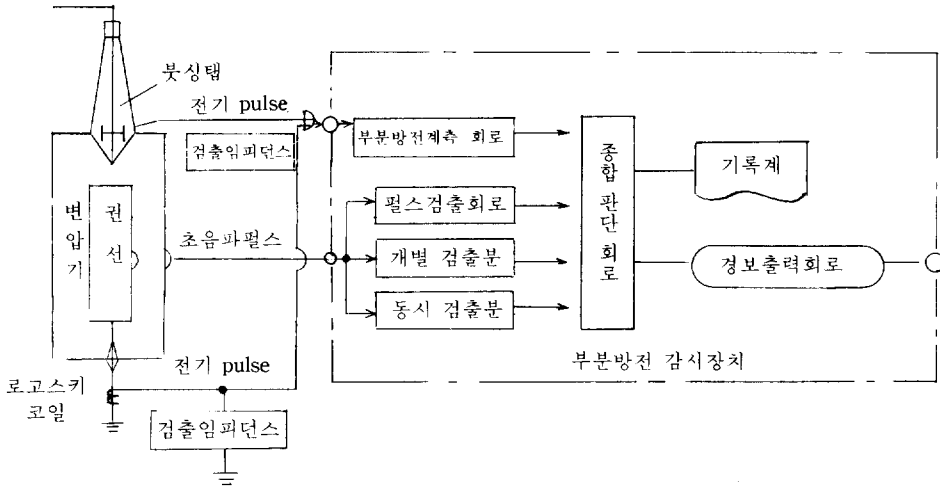


그림 7. 부분방전 감시장치 시스템 구성도

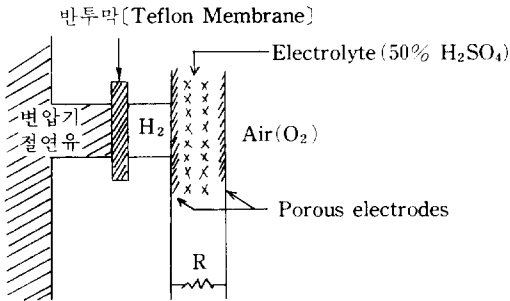


그림 8. 변압기유 수소가스 분석원리

있는 방식으로 미국의 웨스팅하우스(Westinghouse)에서 개발되었다. 변압기의 운전상태 중 발생하는 변화량을 초기상태에서부터 그 데이터를 수집하여 처리하는 시스템으로 원격에서 조정 및 수집이 가능하다. TMS의 기능을 요약하면 다음과 같다.

- 유최고온도-RTD(Resistance Temperature Detector :  $100\Omega \times 2EA$ )를 사용하여 변압기유의 최고온도를 측정한다.

- 권선전류측정-측정용 CT(Current Transformer)를 이용하여 CT2차측 단자에서 8채널까지 측정가능하다.

- 코로나측정-음향 Detector를 이용하여 코로나를 측정한다. 출력 0~10V DC로 16채널까지 측정할 수 있다.

- 유중가스측정-절연유의 열화(劣化) 정도를 수소가스 발생량으로 측정한다.

- 기타-주탱크의 유레벨(油 level), 유냉각계통의

유속 및 유펌프의 동작상태 등 32채널까지 측정할 수 있다.

그림 9는 TMS 구성의 블럭도로써 변압기에서 발생하는 각종 자료를 종합적으로 수집할 수 있다. 본 장치는 변압기 운전중 연속적으로 측정이 가능하므로 그 효율성이 매우 클 것으로 본다.

MTAS방식은[11] TMS방식에서 수명진단장치가 부가된 것으로 전력용 변압기에 가해지는 단락전류의 크기와 그 지속시간을 측정할 수 있다. 전력용 변압기에 가해지는 단락전류의 크기와 그 지속시간은 변압기 수명에 많은 영향을 미치므로 그 전류의 크기와 지속시간을 마이크로 프로세서(Microprocessor)에 의거 부하이력사항과 함께 비교 검토하여 변압기 수명을 예측할 수 있는데 그 기능은 다음과 같다. (그림 10)

- 단락전류 크기 및 지속시간측정 :

배전계통에서 단락사고가 발생되었을 때 단락전류로 인하여 변압기 내부권선에 기계적인 응력이 작용되어 변압기 열화(劣化)의 원인이 될 수 있다. 단락전류의 크기와 발생된 회수 및 지속 시간을 기록하여 변압기 보수 및 수명 예측을 할 수 있다.

- 온도-변압기 최대온도, 유온도, 냉각계통의 온도 및 주위온도를 측정한다.

- 가스함유량-변압기내의 가스함유량을 측정하여 기준치와 비교검토할 수 있다.

- 유(油)상태-절연유의 절연내력, 수분함유량 등을 측정하여 절연유의 상태를 본다.



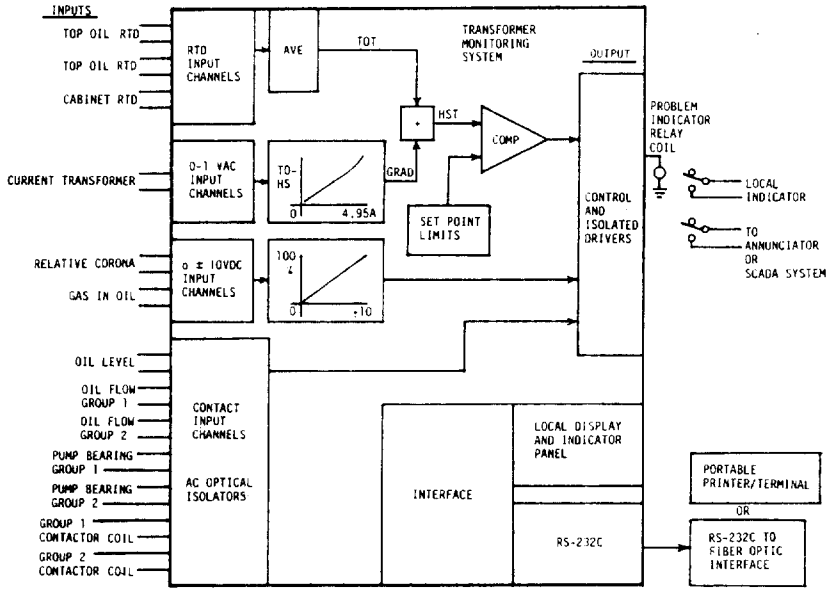


그림 9. TMS 구성블럭도

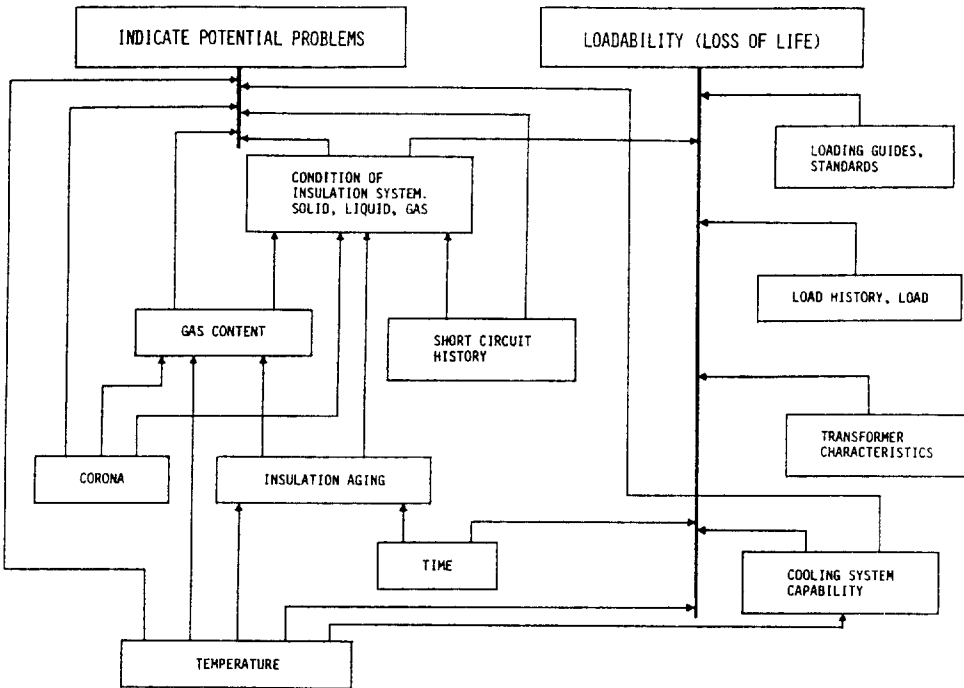


그림 10. MTMS 구성 블럭도

· 코로나(PD) 검출-변압기 내부에서 발생되는 부분방전(Partial Discharge)의 크기와 발생위치 등을 검출하여 열화(劣化) 정도 및 절연유 수명예측을 할

수 있다.

이 방식을 도입하였을 때 그 비용은 변압기 가격의 10%정도이며 이 비용 중 2/3는 센서 및 신호처

리 분야의 비용이고 나머지 1/3은 마이크로 프로세스 제작비용이 된다.

#### 4.4 절연유 열화센서에 의한 방법

본 방식은 [12, 13] 최근 한국전기연구소(KERI)에서 실험적으로 개발된 것으로 센서를 이용하여 경년열화(經年劣化)중인 변압기 절연유의 열화정도를 측정하는 것으로 개략적인 내용은 다음과 같다.

탄화수소계(炭化水素系)의 모든 절연유는 온도 및 금속등과의 자촉작용(自觸作用)에 의하여 여러가지 불순물 입자로 분해되어 오염된다. 이러한 불순물 입자들은 절연유의 절연과 파괴전압(Breakdown Voltage)와 밀접한 관계가 있다. 이러한 불순물 입자들 중 도전성(盜電性)이 있는 입자들을 검출한 결과 불순물 입자 크기가 100~150[ $\mu\text{m}$ ]사이에서 대부분 분포되고 열화(劣化)에 따라 그 크기와 양이 증가되는 것으로 판명되었다. 이와같은 결과는 GPC(Gel Permeation Chromatography) 및 PSA(Particle Size Analyzer)로 입증되었으며 이를 근거로 그림 11과 같은 형태의 센서를 개발하였다.

본 연구에서 제작된 세가지 종류(Molecular Sieve 중 Ball 및 Pellet형, Porous Glass)의 센서들은 모두 미세한 입자들을 흡착하여 도전통로를 구성할 수 있는 것이며 장기간 시험에서 화학적 물리적 변화가 없어야 한다. 이들 센서중 다공질(多孔質)Glass센서가 절연유에 대하여 화학적, 물리적인 특성이 좋을 뿐만 아니라, 센서의 전류치 변화율과 산가, 내압치와 상호 관련성이 있음을 모의 시험을 통하여 알 수 있었다. 그림 12는 실험결과와 측정치를 그래프로

나타낸 것으로 센서에서 측정된 누설전류치의 변화율과 절연유의 산가-내압치 변화율이 상호 유사함을 알 수 있다.

센서를 변압기 절연유에 넣은 상태에서 운전하면 센서의 기공(氣孔) 속으로 도전입자(導電粒子)들이 시간에 따라 누적되어 간다. 그 변화율이 절연유 산가치(Acid value)와 절연내압(Breakdown voltage)와 근사되어, 다음 식과 같이 산가는 증가되는 방향으로 비례하고, 절연내압치는 감소되는 방향으로 비례한다.

$$d(\mu\text{A})/dt(\text{센서}) \propto d(\text{A.V})/dt(\text{절연유}) \quad (7)$$

$$d(\mu\text{A})/dt(\text{센서}) \propto -d(\text{D.S})/dt(\text{절연유}) \quad (8)$$

- A.V : 절연유 산가(Acid value)
- D.S : 절연유 절연내압치(Breakdown Voltage)
- $\mu\text{.A}$  : 센서의 누설 전류치

따라서 지금까지 절연유를 채취하여 산가나 내압치를 측정하는 방식대신에 본 방식을 이용하면, 현장에서 직접 절연유의 열화정도를 측정할 수 있을 뿐만 아니라 그 출력이 전기량이기 때문에 마이크로 프로세스를 이용한 원격 온라인 측정도 가능하다.

#### 4.5 센서기술

변전설비의 일종인 전력용 변압기의 자동진단(自動診斷)을 신뢰성이 높고 효과적으로 하기 위해서는 이상(異常)의 징후로 나타나는 각종 물리, 화학적

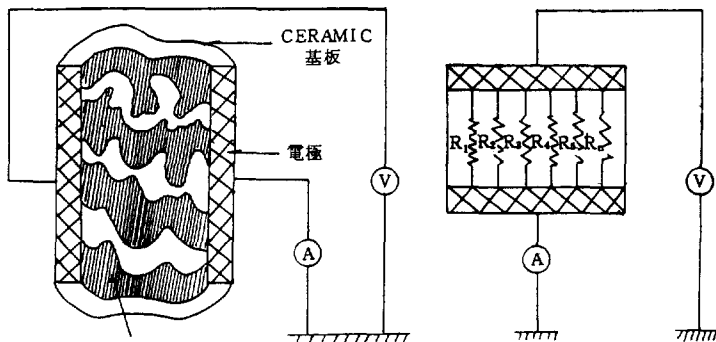


그림 11. 열화(劣化)센서의 구조도

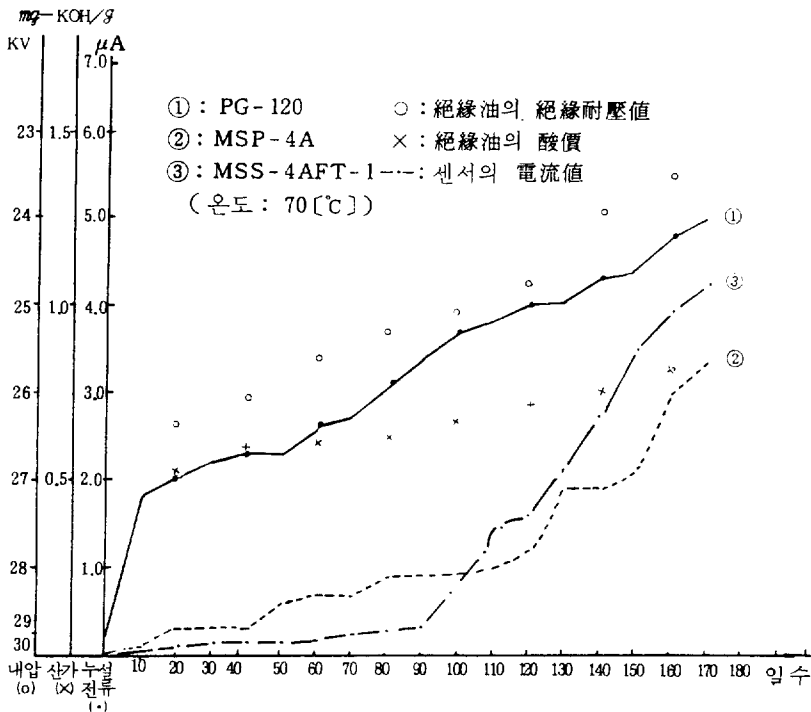


그림 12. 센서전류-내압-산가 곡선

표 4. 변압기용 센서 및 기능

기 기	검출항목	센서 종류	센서원리 및 방식
전력용 변압기	유증개스량	· 개스 검출기 · 고분자 투과막+가스크로마토 그래프	· 개스발생량 검출 · 투과된 개스의 성분 검출
	부분 방전	· 부분 방전 · 초음파 센서	· 중성점에 흐르는 전류 펄스 검출 · 방출음의 검출
	누설지속	· 서치 코일	· 서치코일의 출력 변화
	절연유 불 순물 입자	· 열화 센서	· 센서에 흡착된 불순물의 도전량 측정

현상을 정량적(定量的)으로 검출할 수 있도록 센서 기술이 선행되어야 한다. 센서는 대상물의 상대과약을 물리적인 현상 및 효과, 화학반응등의 수단을 통하여 그 기능을 수행할 수 있다. 변압기 이상진단에 사용되는 센서로는 표4와 같이 몇가지가 현재 개발되었거나 개발 중에 있다. [13,14]

최근 마이크로 일렉트로닉스기술, 광(光) 기술, 신재료등의 개발로 다양한 종류의 센서가 개발되어 실용화 되고있다. 센서의 선정은 검출감도(Sensitivity),

신뢰도(Reliability), 경제성, 취부의 용이성, 기기에 미치는 제반 영향을 종합적으로 검토할 필요가 있다. 그리고 이상(異常)상태량의 검출에 따른 레벨판정 및 그 처리장치가 필요하며, 검출감도가 예민하고 외부노이즈(Noise)와 판별처리도 고려되어야 한다.

—센서의 특성파악

센서로써 이상징후(異常徵候)를 파악하기위하여 과거의 점검자료, 모의시험을 통한 데이터분석, 기

표 5. 발생 서어지 대책

서어지 및 노이즈원인	주요한 서어지	대 책
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 뇌 서어지</li> <li>• 개폐 서어지</li> <li>• 지락단락사고</li> <li>• 정전기대전</li> <li>• 광, 열, 자기</li> <li>• 전파장해</li> </ul>	• 유도 서어지	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 電磁, 靜電 Shield</li> <li>• 접지방식, 접지저항</li> <li>• 과전압 보호소자</li> </ul>
	• 전원 침입 서어지	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 저감 필터</li> <li>• 靜電 shield부 절연 Tr</li> <li>• 과전압 보호소자</li> </ul>
	• 전자파 노이즈	• 다중 Shield의 이용
	• 회로 결합노이즈	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 광사이리스트</li> <li>• 배선 접지선의 인덕턴스 감소</li> <li>• Cable의 整舍</li> </ul>

기구조등을 고려한 각종자료들을 수집하여야 한다. 센서의 감도(感度), 정도(精度)등은 운전조건이나 환경조건이 변화되어도 그 특성이 일정하여야 하며, 자체 열화특성(劣化特性)도 파악할 필요가 있다.

—센서위치 및 취부방법

센서의 취부위치는 기기에 미치는 영향, 내후성(耐候性), 보수 및 취부의 용이함 등을 고려하여 선정한다. 센서취부개소는 사고점과 이상개소(異常個所)를 예측하여 결정하고 노이즈(Noise) 및 신뢰성 등을 충분히 고려하여야 한다.

—내(耐)서어지, 노이즈대처

센서 및 데이터처리장치(PC)는 고전압회로기에 직접 근접하여 취부되므로 전력계통에서 발생하는 서어지(Surge)의 영향을 받기 쉽다. 예로서 개폐장치(開閉裝置)의 제어회로에 침입하는 개폐서어지(開閉 Surge) 전압은 수 KV에 달한다.

—내후성(耐候性)

사용환경이 옥외인 경우가 많기 때문에 온도, 습도, 내후성 등을 충분히 고려하여야 한다.

표5는 감시시스템에 침입가능한 서어지 종류와 그 대책을 예시하여 놓았다.

5. 향후과제 및 결론

변전기기의 일종인 전력용 변압기의 예방보전 시스템은 현재 우리나라에서는 거의 적용하지 않고 있으나, 가까운 일본이나 미국등에서는 이 분야에 대해서 이미 실용화되어 있다. 일본의 일부 전력회사에서는 변전소 전체 감시 시스템을 구성하여 현재 운전 중이며, 미국 웨스팅하우스에서도 이와 유사한 시스템을 제작하여 시판하고 있다.

변전소의 주요기기들이 전력용 변압기 GIS(Gas Insulation Switch), 피뢰기 등으로 볼 때 전력용 변압기외의 타기기에 대해서도 이러한 예방진단시스템을 구성시킬 수 있다. 이러한 예방진단시스템을 본격적으로 적용시킬려면 향후과제로써 다음과 같은 몇가지 문제점을 예시한다.

—기기의 이상징후(異常徵候), 열화특성(劣化特性), 사고상황을 정량적으로 파악하기 위하여 사고시 점검자료는 물론센서에 대한 기초적 실험데이터가 축적되어 있어야 한다.

—시스템의 고도화(高度化)

센서수명이 길고 내후성(耐候性)이 있어야하며 시스템의 고신뢰를 자기점검기능과 함께 다중화(多重化)되어야한다.

—시스템의 경제성향상

센서신호처리를 온라인화하여 그 진단장치와 조합하여 효과적인 진단방법을 확립할 필요가 있다.

—제어, 보호 및 설비관리등을 서로 연계시킬 수 있어야 한다.

이상 변전기기의 일종인 전력용 변압기의 열화요인과 함께 기본적인 예방진단시스템을 서술하였는 바, 우리나라에서도 이러한 시스템의 적용연구가 수행되면, 전력용 변압기의 열화(劣化)진단기법은 보다 향상될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] 倉持龍- “電氣機器の豫防保全技術の現状と動向,” 電氣學會雜誌 104卷1號, 昭59-1, pp 25~31.  
 [2] IEC 505 “Guide for the evaluation and identification of insulation system of electrical equipment, 1975.  
 [3] IEC 792-1 “The multifactor functional testing of electrical insulation systems, 1985.  
 [4] “配電機材劣化診斷技術,” 電機協同研究, 第43卷 2號, pp 74~77 昭和62年10月

- [5] 電機學會技術報告 “工場電機設備の壽命豫和技術(= 關する調査報告,” 電氣學會, 昭和 61年10月, pp. 3~11
- [6] IEEE Transformers Committee “Guide for failure investigation, Documentation, and Analysis for power transformers and shunt Reactors,” Working Group on Transformer Failure Analysis Performance Characteristics Subcommittee, December 15, 1988.
- [7] 井關昇 “絶縁劣化と診断オートメーション,” 電氣書院, 昭和61年2月, pp 9~16,
- [8] 和田 昱二 “豫知保全と診断オートメーション,” 電氣書院, 昭和 61年2月, pp. 1~8
- [9] G. Belanger and M. Duval “Monitor for Hydrogen Dissolved in transformer oil,” IEEE Electrical Insulations EI-12, No. 5, oct. 1977.
- [10] D.A. Yannucci, J.B. Templeton, B.N. Lenderking. “On-line Monitoring of Power transformers” IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS 104, No. 1, January, 1985.
- [11] T.D. Poyser, “An on-line Microprocessor Based Transformer Analysis system to improve the availability and utilization of power transformers,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, no.4 April 1983.
- [12] Jin-Ho Bae, Young-kap Chon, Young-Goo Kang, “A New Method of Measuring the degradation level of the transformer insulating oil in use,” Journal of KIEE. Vol. 1, No. 2, PP. 118~125, 1988.
- [13] 全 永甲, “變壓器 絶縁油의 劣化檢出에 관한 研究,” 博士學位論文, 1988年 7月.
- [14] 花村 信 “變電設備自動診斷システムを作り上げる,” 設備診断オートメーション, 電氣書院刊, 昭和 61年2月, pp. 185~189.