

# 현장실무자를 위한 설비진단 테크닉

전기를 응용하는 기술의 발달에는 실로 눈부신 바가 있다.  
 전기는 깨끗하고 안전한 에너지원으로써  
 또, 컴퓨터나 통신에 이용되는 정보전송의 매체로서  
 널리 사용되어 최근에는 광이나 초음파의 분야도 포함하여  
 쉴 줄 모르는 진보를 계속하고 있다.  
 우리들은 그 전부를 볼수는 없으나, 미래기술이라는 거대한 양상에 대하여  
 비록 기술의 단편이라도 많이 모아 쌓이면 많은 참고가 될 것이다.  
 본고에서는 이를 위해 전 13장을 번역 게재할 예정이다.

글쓰는 순서

## 1장 예지보전에의 기초 기술

- 이상예지를 위한 데이터 처리
- 열화 프로세스에서의 이상예지

## 2장 운전감시로 되는 상태의 추정

- 운전상태를 아는 테크닉
- 이상발생후의 상태 진단

## 3장 기기 외부진단의 테크닉

- 기기에 따른 외부진단 기술
- 진동 측정에 의한 외부진단

## 4장 기기내부 진단의 테크닉

- 가스절연기기의 내부진단
- 물드기기의 내부진단

## 5장 리모트·센싱에 의한 설비진단

- 가시광을 사용한 리모트·센싱
- 레이저를 사용한 리모트·센싱

## 6장 전기기기의 새로운 진단테크닉

- 변압기의 예지보전
- 전동기의 자동고장진단
- 전동기의 자동감시장치
- 절연연화에 의한 대형회전기의 진단
- 대형회전기의 자동고장진단
- 발전기 컨디션·모니터와 적용

- 농형전동기의 회전자 온도감시장치
- 7장 전력케이블의 새로운 진단테크닉

- 케이블연화의 간이측정
- 케이블절연열화 판정장치와 사용법

## 8장 로울러 베어링의 새로운 진단테크닉

- 로울러 베어링의 진단테크닉
- 로울러 베어링의 모니터링시스템

## 9장 기기 수명의 예상테크닉

- 코일절연으로 수명 예측
- 유압기기의 수명 예측

## 10장 에너지 사용합리화를 위한 보수유지

- 소형화와 보수유지
- 부하변동과 냉각의 검토

## 11장 부식과 방식의 케이스스터리

- 방식의 포인트
- 전동기의 방식테크닉

## 12장 진단용 계기와 사용법

- 보전용 계기와 사용법

## 13장 새로운 센서의 성질과 활용법

- 센서에 쓰여지는 재료와  
위센서와 그 사용법

# 1. 예지보전에의 기초기술

대한전기기사협회 홍보과

## II. 열화프로세스에서의 이상예지

종래에 변압기라고 하면 그 대부분이 유입 변압기(oil filled transformer)였는데 근래에는 절연유를 전혀 사용하지 않는 건식 변압기(dry type transformer)가 출현하고 또한 최근에는 가스 변압기도 사용하게 되었다. 따라서 이러한 변압기는 그 정격 전압·용량·사용 장소 등에 따라 광범위하게 적절히 사용되고 있다.

이상과 같이 변압기에 사용되고 있는 절연 재료에는 액체, 고체, 기체가 있는데 이들의 절연 열화의 원인이나 그 진전 상황, 즉 절연 열화의 프로세스는 각각 다르므로 당연히 그것에 대한 절연 열화를 진단하는 기술도 달라지고 있다. 따라서 여러가지 원인으로 쉘기는 각종 절연 열화의 진정 정도를 정확하게 검지할 수 있는 전체적인 진단 기술은 현재까지 없다.

이것은 절연 열화의 원인이 다양한 것과 절연 열화나 절연을 파괴하는 기구(mechanism)가 학문적으로 아직 충분하게 해명되지 않고 있는 것이 원인이라고 생각한다.

그러나 에너지 절약 및 기기의 고효율 사용이 요구되고 있는 현재로 보아 기기의 절연 열화에 대한 정도를 진단해서 운전중에 절연 파괴를 미연에 방지하고 동시에 기기의 수명이 다 할때까지 사용한다는 것은 대단히 중요한 일이다.

다음은 종래부터 현재에 이르기까지 많이 사용되고 있는 유입변압기와 근래에 그 사용량이 갑자기 증대하고 있는 건식 변압기 등에 사용되고 있는 각종 절연 재료에 대해서 그 절연 열화의 프로세스와 절연 열화를 진단하는 기술에 대해서 언급한다.

### 1. 변압기의 절연열화 프로세스

#### (1) 변압기에 사용되고 있는 절연재료

유입 변압기에 사용되고 있는 주된 절연재료는 크래프트 펄프(kraft pulp)로 만든 절연지 및 프레스보드(press board) 등과 같은 셀룰로우스계의 재료(이하, 절연체라고 한다)와 액체 절연물 2호 광물유(이하, 절연유라고 한다)이다. 이밖에 절연체로서 프레스보드, 노멕스(nomex) 및 실리콘유 등을 주된 절연체로서 사용하고 있는 실리콘 유입 변압기도 있는데 이것은 가격이 비싸므로 수도 비교적 적고 또한 특수한 장소밖에 사용되고 있지 않기 때문에 여기서는 부분적으로 언급한다.

다음에 건식변압기, 즉 레진 모울드형(resin mold type)변압기에 절연 재료로서 사용되고 있는 레진(resin, 수지)은 에폭시 수지가 그 대부분이다. 이것은 에폭시 수지의 우수한 여러가지 특성이 기기의 고신뢰화 및 소형화 요구에 응하고 있기 때문이다.

(표 1) 변압기의 주된 절연열화의 요인과 열화의 형태

변압기의 종류 열화요인	유 입 변 압 기	건 식 변 압 기
전 압 이상전압(전기추리) 물 광 열	부분방전에 의한 절연체의 침식 추리발생에 의한 절연체의 급속한 침식 절연유의 절연내력저하 진동에 의한 항절연체의 탈락 과도의 온도상승에 의한 절연물 및 절연유의 절연내력의 저하	과 동 과 동 진동, 열능력에 의한 절연체중의 전열방생 옥외사용의 경우, 내후성저하에 의한 크랙의 발생
산화 또는 화학약품	산화에 의한 절연유의 열화	산, 알칼리, 유, 유기용제등에 의한 침식

**(2) 변압기의 열화 프로세스**

변압기에서 주된 절연 열화의 요인과 열화 형태의 개략을 표시한 것이 <표 1>이다. 여기서 설명한 열화의 요인은 주된 것이나 절연 열화는 이들 요인 중에서 하나만이 원인으로 되는 일은 적고 대개의 경우는 2개 이상의 요인이 중복해서 열화되는 경우가 많다.

**(a) 부분방전에 의한 열화**

부분방전에 의한 절연체의 열화는 변압기를 장기간 사용하는 데에 따라 발생하는 것이다. 유입 변압기 및 건식 변압기는 모두 절연체속이나 절연체와 도체(導體)사이에서 공극(空隙, void)이 생기면 그 보이드(void)에서 부분 방전이 발생되어 절연체가 침식되어 간다. 특히 건식 변압기의 절연 열화는 부분방전에 의한 열화가 큰 요인으로 되어 있다.

**(b) 전기트리에 의한 열화**

변압기의 도체상에 미소한 돌기(突起) 또는 손상이 있어서 이상전압(異常電壓) 등에 의해 그곳이 높은 전계(electric field)가 되면 거기서 접지 전극(금속)을 향하여 절연체속을 나무가지 모양의 방전로(放電路, 전기 트리; electric tree)로 되는 일이 있다.

이러한 전기 트리가 절연체 속을 통과하여 접지 전극에 도달했을 때에 절연 파괴가 된다.

**(c) 수분에 의한 열화**

유입 변압기 내에 수분이 침입하면 절연유의 절연 내력(耐力)은 현저하게 저하하는데 변압기 구조의 개선 및 제조기술의 진보에 따라 최근에는 거의 문제가 되지 않고 있다. 건식 변압기는 이러한 점에 대하여 염려할 필요는 없다.

**(d) 기계력에 의한 열화**

유입 변압기의 셀룰로우스계(系) 재료에 의한 권선 절연체는 장기간의 진동에 의하여 도체에서 탈락하는 일이 있다. 이것은 절연체가 열(熱) 열화를 하고 있는 경우에 많이 볼 수 있는 현상이다. 건식 변압기에서는 일반적으로 절연체의 레진과 도체 등이 금속매설물(金屬埋設物)의 선폽창 계수가 다르기 때문에 레진이 경화한 후의 냉각 과정 및 온도가 다른 통전(通電)과정에서 레진내에 응력이 발생하게 된다.

이러한 응열력에 따라 절연체 안에 균열이 발생하는 일이 있다. 또한 이 균열은 장기간에 걸친 기계적인 진동에 의하여 발생하는 경우도 있다. 앞에서 말한 레진과 금속 매설물의 선폽창 계수가 다른 것으로 보아 장기간에 이르는 히트 사이클(heat cycle)의 반복에 의하여 레진과 금속 매설물 사이가 어긋나고 머지 않아 공극이 발생하는 것도 생각할 수 있다.

**(e) 빛에 의한 열화**

일반적으로 건식 변압기는 옥내에서 사용되는 일

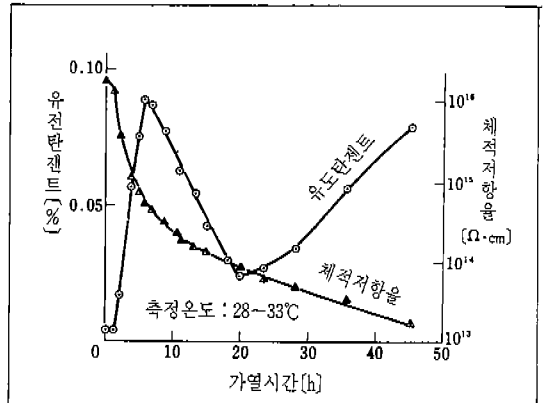
이 많으나 장기간 옥외에서 사용될 경우에는 내후성(耐候性)이 저하되어 절연체가 균열(crack)되는 일이 있다.

**(f) 열에 의한 열화**

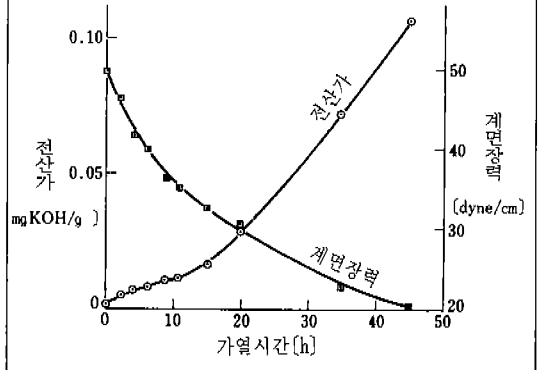
유입 변압기가 장기간동안 비교적 높은 온도로 운전됨에 따라 생기는 것이 열 열화이며 이러한 열 열화로 인하여 유입 변압기의 절연체 및 절연유의 절연 내력(耐力)이 저하한다. 특히 과도한 온도 상승에 의한 열 열화로 인하여 셀룰로우스 재료의 절연체는 기계적인 강도가 저하하여 약해지고 절연유는 전기적인 특성이 나빠져서 변색한다.

**(g) 산화열화 및 화학약품에 의한 열화**

일반적으로 油中に 동(銅)이 존재하면 이것이 산화와 열화의 촉매(觸媒)가 된다. 운전중인 유입 변압기는 절연유속에 도체의 동 및 잔류 산소가 공존하고 있는 외에 비교적 유온(油溫)도 높으므로 절연유는 열화하기 쉬운 조건이 된다. 그러나 현재의 유입 변압기는 절연유의 산화 열화에 대해서 충분한 대책이 세워져 있으므로 변압기의 절연유는 초기적인 열화 밖에 생기지 않는다. 건식 변압기인 경우에는 산(acid), 알칼리, 기름, 유기용제(有機溶劑)등에 따라 절연체가 침식되는 일이 있다.



〈그림 1〉 절연유의 열열화 특성(1)



〈그림 2〉 절연유의 열열화특성(2)

**2. 열화에 의한 절연특성의 변화**

**(1) 절연유**

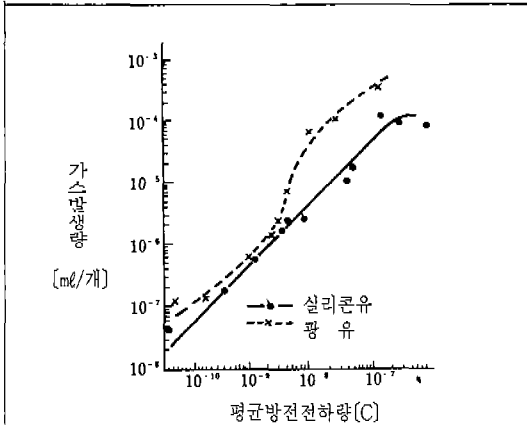
절연유(광물유)를 산화 열화시키면 체적 저항률  $\rho$ , 유전 탄젠트  $\tan \delta$ , 계면장력(界面場力) 및 전체 산가(酸價)가 나빠지며 다시 열화가 되면 슬러지(Sludge)라고 하는 진흙 모양의 물질이 생성한다.

한가지 예로서 〈그림 1〉에 절연유에 산소를 공급하면서 95℃로 가열 열화시켰을때의 가열 시간과  $\rho$  및  $\tan \delta$ 의 관계를 나타내고 〈그림 2〉에는 동일하게 가열시간과 계면장력 및 전체 산가의 관계를 나타낸다.

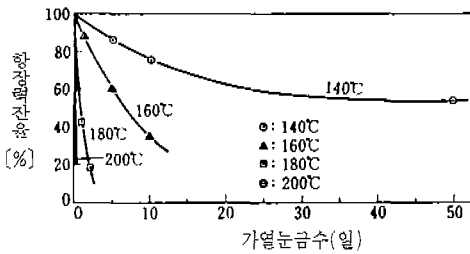
가열 시간이 길어 짐에 따라  $\rho$ 와 계면장력은 저

하하고  $\tan \delta$ 와 전체 산가는 증대하는 것을 알 수 있다. 단, 열화 초기에서  $\tan \delta$ 가 이상 상승(異常上昇)하는 것을 볼 수 있는데 이러한 영역(領域)에서는 유중 정전기(油中 靜電氣) 현상이 발생하기 쉽고 또한 품질 관리상으로 보아도 문제가 있다.

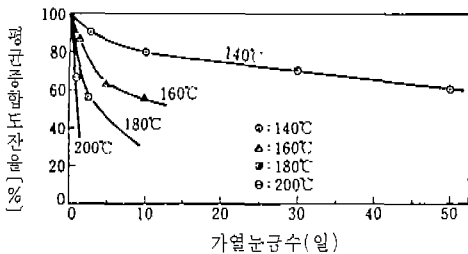
다음에 〈그림 3〉은 광물유(광유, 鑛油) 및 실리콘 오일의 부분 방전 펄스 1개당의 평균 방전 전하량과 가스 발생량과의 관계를 표시한 것이다. 실리콘 오일은 방전 전하량이 커짐에 따라 가스 발생량은 직선적으로 증가하고 있다. 이에 대해 광유에서는 방전 전하량이 작은 범위에서는 거의 실리콘 오일과 같은 값으로 증가하는 경향을 나타내고 있는데 어떤 값 이상이 되면 가스 발생량은 실리콘 오일보다 한층 커지고 있다.



〈그림 3〉 부분방전에 의한 평균방전 전하량과 가스발생량



〈그림 4〉 절연지의 항장력진율과 가열일수의 관계



〈그림 5〉 절연지의 평균중합도진율과 가열일수의 관계

## (2) 절연지

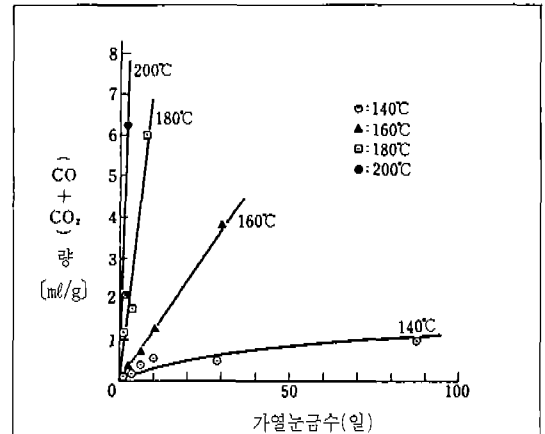
절연지를 산화 열화시키면 항장력(抗場力) 및 평균 중합도(重合度)가 저하하고 CO 및 CO<sub>2</sub> 등과 같은 가연성(可燃性) 가스를 발생하게 된다. 〈그림 4〉와 〈그림 5〉 및 〈그림 6〉은 절연지와 2호 광물유를 밀폐 탱크내에서 유면상(油面上)을 N<sub>2</sub> 가스로 채워 두고 140~200°C의 온도를 가열 열화시켰을때의 가

열 시간과 절연지의 항장력, 평균 중합도 및 CO+CO<sub>2</sub> 발생량과의 관계를 가열 온도를 파라미터(parameter)로 하여 각각 그림으로 나타낸 것이다.

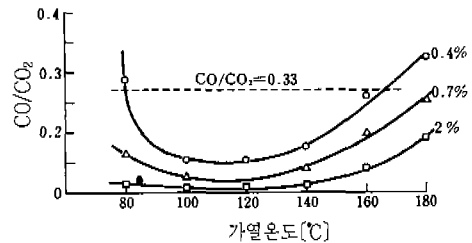
가열 시간이 길어짐에 따라 항장력과 평균 중합도는 감소하고 CO+CO<sub>2</sub>의 발생량은 증가하는 것을 알 수 있다.

다음에 〈그림 7〉은 절연지를 가열 열화시켰을 때에 생기는 CO+CO<sub>2</sub>의 비율과 온도와의 관계를 총이속에 함유되어 있는 수분량을 파라미터로 하여 표시한 것이다. CO/CO<sub>2</sub>의 값은 온도가 높아지면 커지는데 수분량에 따라서도 변하는 것을 알 수 있다.

또한 운전중인 대형 변압기를 해체수리(overhaul)하거나 내부 점검하는 기회를 이용해서 유입 변압기의 운전연수(年數)와 절연지의 인장 강도 및 평균 중합도와 절연 파괴 강도와의 관계를 각각 〈그림 8~10〉까지 나타내고 있다.



〈그림 6〉 그래프지의 (CO+CO<sub>2</sub>) 발생량



〈그림 7〉 CO/CO<sub>2</sub>의 값과 가열온도의 관계

(3) 에폭시 樹脂모울드

공시품(供試品 test piece)은 3mil의 PET 필름을 끼워서 포몰(formal) 절연 전선을 감고 전체를 충전체가 들어 있는 비스페놀형 에폭시 수지(bisphenol type epoxy resin)로 주형(注型) 경화한 것이며 주형할때의 조건으로 대기압에 가까운 곳에서 주형한 A 모델과 진공에서 주형한 B 모델이 있다. 이 중에서 대기압에 가까운 압력으로 주형한 A 모델은 사용한 에폭시 수지의 점도가 높기 때문에 소선(素線)과 필름 사이에 수지는 합침되지 않고 따라서 경화한 뒤에는 소선 근처에 보이드가 남아 있다고 추정되는 것이다.

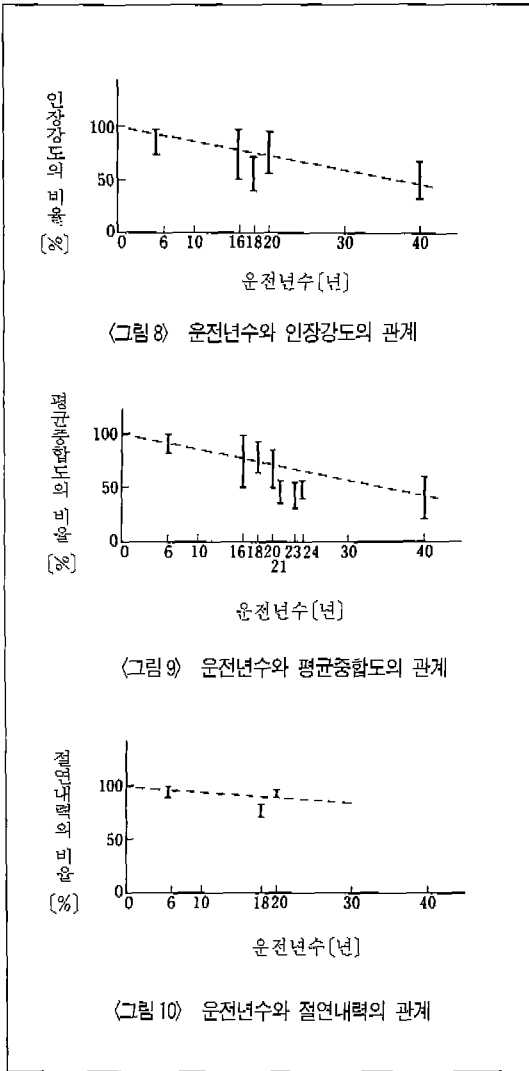
이들 A 및 B 모델에 대한  $V-t$  특성의 한가지 예에 대해서 비교한 것이 (그림 11)이며 (그림 12)에서는 이 두가지에 대한 최대 방전 전하량  $Q_{max}$ 와 부분 방전개시 전압 CSV를 비교하였다.

(그림 11)에서는 A 모델의 경우, 인가 스트레스(impressed stress)의 크기에 따라  $V-t$  특성은 구부러진 선이 되고 그 경사를 표시하는 n의 값은 높은 스트레스와 중간 스트레스 및 낮은 스트레스의 각 영역에서 각각 5.4, 1.5 및 4.5로 되어 있다.

또한 과전(課電) 열화 특성에서 A 모델은 B 모델에 비해 동일한 스트레스로 수명이 짧아지고 있다.

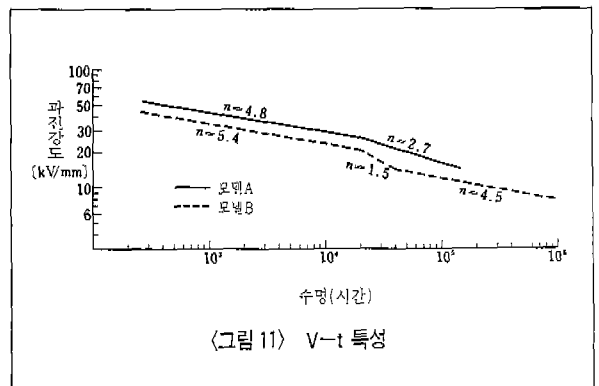
이것은 A 모델에서는 보이드에 다량의 공기(산소)가 존재하고 방전에 따르는 현저한 산소 열화에 의해 수명이 짧아진 것이다.

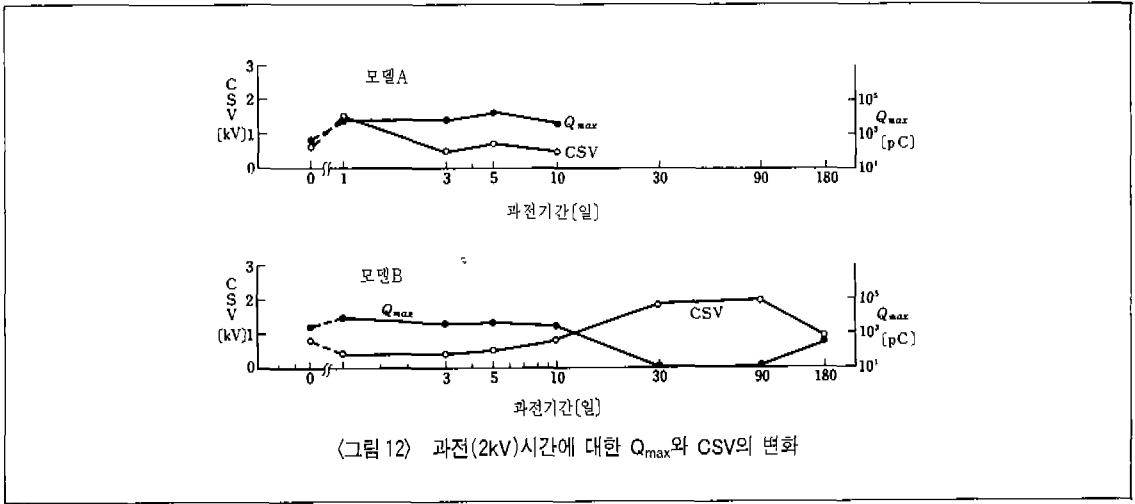
(그림 12)는 A 및 B의 각 모델에 대한 부분 방전



여기에 나타낸 실제 기기에 의하여 측정된 결과의 불균형은 각각 테스트하는 변압기의 운전 조건이나 조립할때에 처리하는 조건의 차이에 의한 것이다.

40년 동안에 실제 기기의 재료와 여러가지 기술의 진보를 생각하지 않고 이러한 결과에서 단순히 판단하면 인장 강도나 평균 중합도는 평균적으로 40년 사이에 약 50%가 저하하는 것이 되는데 절연 내력(耐力)은 데이터가 얼마 안되지만 약 10°C밖에 저하하지 않은 것을 알 수 있다.





특성의 한가지 예인데 이 두가지 모두가 초기에는 거의 같은 특성을 나타내고 있다. 부분 방전 특성은 보이드 내의 압력이나 열화 생성물 등에 따라 변동하는데 A모델에서는 초기의 최대 방전 전하량이 수십 pC라도 초과된 예가 있으며 품질 관리상 건식 변압기에서 부분 방전 특성은 특히 중요하다.

### 3. 절연열화 진단방법

이상과 같이 유입 변압기 및 건식 변압기에 대한 각종의 열화 요인 및 이들의 열화 요인이 원인이 되어서 생기는 전기적인 절연 특성과 기계적인 특성과 물리화학적인 특성의 변화에 대해서 언급하였다. 절연 열화 진단을 실시하는데는 이러한 절연 열화의 각종 요인 및 각종 특성의 열화에 의한 변화를 충분히 파악할 필요가 있고 또한 절연 열화 진단 방법으로는 각종 특성 변화중에서 가장 유효하게 절연 열화를 진단할 수 있는 방법을 채용해야 한다.

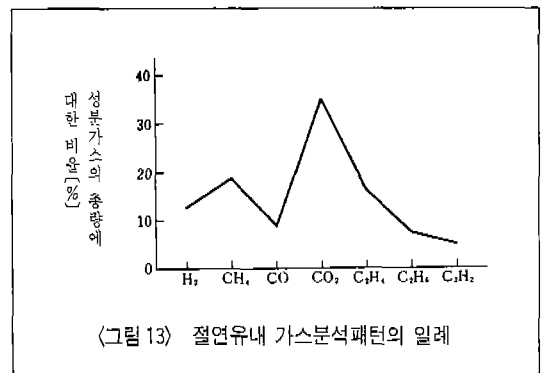
절연 열화 진단 및 수명 측정에 대해서는 현재 실시되고 있는 절연 열화 진단 방법에 대해서 설명하기로 한다.

#### (1) 유입 변압기

대용량 유입 변압기의 절연 열화 진단방법으로

오일 속의 가스를 분석하는 일이 최근에 많이 채용되고 있다. 가스분석 방법으로는 절연유 및 절연지 등과 같은 절연 재료가 과열되었을 때에 생기는 가스의 종류를 고려해서 일반적으로는 가스크로마토그래프(gas chromatograph)가 사용되고 있다.

분석결과를 보는 방법으로서 보통 가연성가스 총량을 주목하는 방식과 개개의 성분 가스와 그 양을 주목하는 방식이 있다. 앞에 말한 것에서는 오일 속의 가스 분석에 의한 유입기기(油入機器)의 보수관리에 대한 지침이 있으며 뒤에 말한 것에서는 〈그림 13〉과 같이 가로축에 각 성분 가스를 배열하고 세로축에는 성분 가스의 총량에 대한 백분율로 표시하는 이른바 성분 패턴 작성 방법을 취하는 것이 있다.



〈표 2〉 변압기 절연유의 허용값

항목	전산값 [mgKOH/g]	계면장력 [dyn/cm]	tanδ [%]	체적저항 [Ω·cm]
허용량	< 0.5	> 15	< 20 [90°C]	> 10 <sup>9</sup> [90°C]

다음에 비교적 소용량의 유입 변압기에 대한 절연열화 진단방법으로는 절연유가 그 대상이 되며 절연지는 거의 문제가 되는 일은 적다. 즉, 정기적으로 절연유는 전체산가, 계면 장력, tan δ 및 체적 저항 등을 측정하고 이들의 결과에서 절연유를 새로운 오일 또는 재생유(再生油)로 교체하는 것이다. 〈표 2〉는 교환을 위한 참고로서 IEC의 허용값을 표시한 것이다.

### (2) 건식변압기

모우드 절연에서는 부분방전이 생기면 그것은 열화의 큰 원인이 되기 때문에 부분방전 발생의 유무를 검증하는 것이 건식 변압기의 신뢰성을 평가하는데 가장 중요한 기술이다. 그런데 모우드 절연에서 대상으로 하는 부분 방전의 크기는 다른 절연 방식, 예를들면 마이카(mica)절연 등에 비해 작고 시험할 때에 노이즈(noise)대책이 중요한 문제이었다.

그러나 근래에 와서 부분 방전에 관한 여러가지 연구에 의하여 측정기 및 시험 기술이 상당히 진보하고 이러한 결과로 실험실이나 연구실 뿐만 아니라 공장 등과 같은 현장에서도 비교적 쉽게 부분 방전시험을 실시하게 되었다.

### (3) 수명추정

기기의 절연 수명을 추정하는 것은 서론에서 언급한 바와 같이 현재로는 매우 곤란한 일이지만 일반적으로 수명을 추정하는 데는 V-T 특성을 이용하는 경우가 많다. 그러나 과전(課電), 반복 임펄스(impulse), 자외선 등 개개의 열화에 의한 V-T 특성은 어느 정도 있으나 이들의 복합 열화에 의한 V-T 특성은 적으며 더구나 실제로 사용하는 상태에

서 V-T 특성은 극히 적다.

이것은 V-t 특성을 구하는 데는 많은 시료(sample)와 상당한 시간을 필요로 하며 더우기 개개에 대한 절연재료의 V-t 특성이 다르다는 것에 기인하는 것이다.

따라서 만약 인장 강도나 평균 중합도 또는 절연 내력 등을 측정할 수 있다면 〈그림 8~10〉을 이용하여 여기에서 잔존수명(殘存壽命)을 추정하는 것도 한가지 방법이 된다. 수명을 추정하는데는 적절한 데이터를 축적할 필요가 있다.

### 맺음말

유입 변압기 및 건식 변압기의 절연 열화를 진단하는 데는 절연 열화의 프로세스를 충분히 파악함과 동시에 각 특성의 열화에 따르는 변화의 데이터가 필요하며 또한 수명을 추정하는 데는 그것에 관한 적절한 데이터를 축적할 필요가 있다는 것은 이미 언급한 바와 같다.

이들의 데이터를 얻기 위한 측정기 및 측정기술의 진보는 현저한데 특히 최근에는 측정 및 데이터 처리의 간편과 정확성이라는 점에서 미니 컴퓨터를 이용하는 경향이 많아지고 있다. 이 방법은 미니 컴퓨터의 기억, 연산, 판단 기능을 충분히 활용하고 특히 부분 방전에서 방전전하와 같은 펄스의 집합체 및 파형의 계측과 연산을 하고 데이터의 입력 및 데이터의 처리도 거의 소프트웨어(software)로 하는 등, 앞으로 크게 기대되는 수법이다.

끝으로 이제까지 언급한 여러가지 절연 열화 진단방법에 더한층 중요한 것은 눈에 의한 이상 상태, 귀에 의한 이상음(異常音) 코에 의한 이상한 냄새 등을 검지하는 것이다. 이것은 측정기가 전혀 필요 없으며 누구든지 언제 어떤 경우에도 간단하게 실시할 수 있다는 점에서 우수하다. 따라서 눈이나 귀 또는 코에 의하여 이상 상태를 검지하는 것은 모든 절연열화를 진단하는 방법에 앞서서 먼저 실시할 필요가 있다고 본다. ☹

〈다음호 계속...〉