

# 電氣設備의 絶緣劣化 診断技法에 關한 研究

The Diagnostic Techniques for a Insulating  
Deterioration of Electrical Equipment

(4)

田 永 國

韓國電氣研究所 電力機器研究委員

(5) 교류전류시험

절연물에 교류전압  $V$ 를 인가할 때 흐르는 전류  $I$ 는

$$I \cong WCV(1 + 1/2 \tan^2 \delta) \dots\dots\dots (4)$$

단  $C$  : 절연물의 정전용량으로 表示된다. 따라서 절연물에 흐르는 전류는 절연물의 비유전율과  $\tan \delta$  값에 따라 變化하는데 이러한 전압과 전류의 관계로부터 절연물 性狀을 조사하는 것이 교류전류시험이다.

이 시험에서는 그림 33-2와 같은 절연물의 전류-전압특성을 나타내는데, 이 특성은 전압 상승에 비례하여 전류가 增加하며 部分放電이 발생하면 전류가 급증한다.

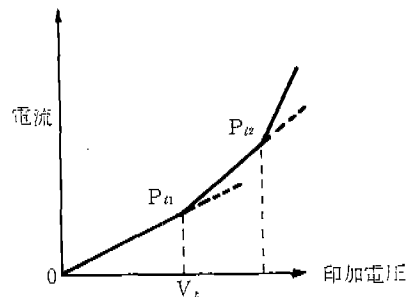
이때 전류가 급증하는 전압을 전류 급증점 전압이라 부르고 최초로 나타나는 전압을 제 1 전류급증점 전압( $P_{i1}$ ), 2 번째 나타나는 전압을 제 2 전류급증점 전압( $P_{i2}$ )이라 한다.

$P_{i1}$ 은 部分放電 개시전압  $V_i$  및  $\tan \delta$ 의 증가 개시전압과 일치하며  $P_{i2}$ 는 절연과피 전압과 상관관계가 있기 때문에 절연과피전압을 추정하는 방법으로 檢討되어 왔지만 합성수지계 절연전선에서는 명확하게 나타나지 않는 것

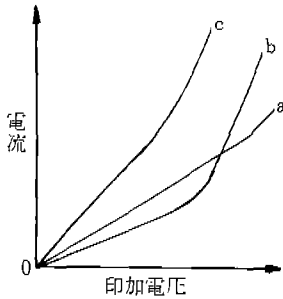
이 많다.

그림 34에서는 절연 열화에 의한 전류-전압특성 變化의 예를 들고 있다.

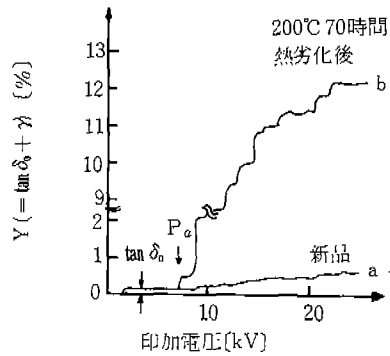
여기서 곡선 a는 절연층이 건전한 경우, 곡선 b는 절연층이 열화된 경우, 곡선 c는 열화된 절연층이 흡습된 경우를 나타낸다. 일반적으로 절연층이 건전한 경우에는 부분방전 개시전압이 높고, 부분방전 발생수도 적다. 따라서 전류 급증점 전압도 높고 전류 增加는 적다. 절연층이 열화하면 정전용량 감소로 인해 電流



〈그림 33-2〉 電流-電壓特性



〈그림 34〉 절연열화에 의한 전류-전압 특성 변화



〈그림 35〉 Y-전압특성 (발전기 코일)

는 감소하지만 전류급증점 전압이 낮아지게 되고 부분방전 개시전압보다 높은 전압에서의 電流增加가 크게 된다. 또한 열화한 절연층이 흡수되면 정전용량 증가로 인해 전류가 증가하지만 전류급증점은 명확하게 나타나지 않고, 절연층 表面이 오손 흡수된 경우도 동일한 경향이 나타난다.

(6) 新 교류전류시험법

이 시험은 교류전류시험을 自動化하여 더 한층 改良한 것으로 자동절연특성분석장치(AIA; Automatic Insulation Analyzer)를 사용해 절연물의 절연性狀을 調査하는 것이다. 이 시험에서 얻어지는 새로운 Parameter Y는  $Y = \tan \delta_0 + \gamma$ 로써 정의된다. 여기서  $\gamma$ 는 절연층에 포함되어 있는 Void중에서 방전하고 있는 Void의 体積比를 나타내고 절연물의 비유전율( $\epsilon$ )로써 나눈  $\frac{\gamma}{\epsilon}$  값을 Void 함유율이라고 말한다.

그림 35는 AIA에 의한 절연물의 Y-電壓특성의 예인데 여기서 部分放電을 일으키지 않는 電壓에서의  $\tan \delta_0$ , 부분방전 개시전압( $V_i$ )을 알 수 있다.

인가전압이 상승함에 따라 절연층에 포함된多數의 Void 중에서 가장 낮은 電壓에서 放電하는 Void로부터 順次的으로 部分放電이 발생해 방전전류가 增加하기 때문에 Y값은 크게 되며 Y의 증가분은 그 전압에서 방전하는 Void의 体積比와 관계가 있다.

그림 35에서 절연층이 전진한 경우는 곡선 a

와 같이 Y값이 적고 절연층이 열화하면 부분방전 발생이 增加하기 때문에 곡선 b와 같은 특성을 나타낸다.

$\gamma$ 값과 절연과피 전압 사이의 상관관계는 그림 36 과 같고  $\gamma$ 값이 커지게 되면 과피 전압이 저하하기 때문에  $\gamma$ 값에서 과피전압 추정이 可能하다.

전기적 비과피 절연시험은 모두 전압이 높을 수록 이에 결부된 情報를 얻기 쉽기 때문에 許容되는 범위 내에서 可能的 높은 전압으로 시험을 하는 것이 바람직스럽다. 특히 新 교류전압 시험법은 測定에 걸리는 시간이 극히 짧기 때문에 높은 電壓에서의 시험도 可能하다. 따라서 각종 절연열화진단시험 중에서도 유망한 시험중 하나로 될 것이다.

5) 劣化判定基準

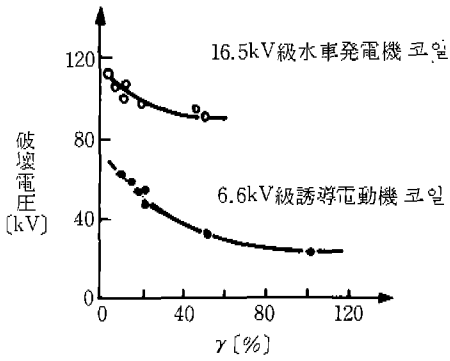
가) 성극지수 (PI)

성극지수에 의해 Coil 절연의 흡수상태를 판단하는 데에는 표 23과 같은 값이 標準으로 사용되고 있다. PI값이 1.5 이하인 경우에는 흡수으로 判定되기 때문에 以後 시험은 전조 처리를 행한 후에 실시 可能하다.

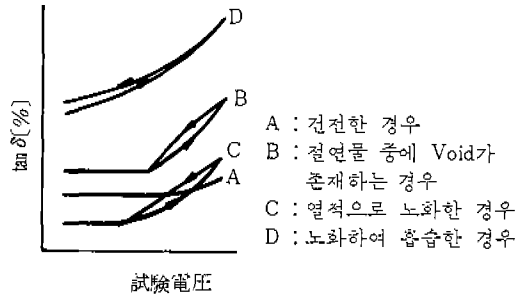
나)  $\Delta \tan \delta$ ,  $\Delta I$ ,  $q_{max}$

일반적으로 절연물이 열화되면  $P_{i1}$ ,  $P_{i2}$ 는 저하하고  $\Delta I$ 는 증대한다. 여기서  $\Delta I$ 는 그림 37에서

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100 (\%) \text{로 정의한다.}$$



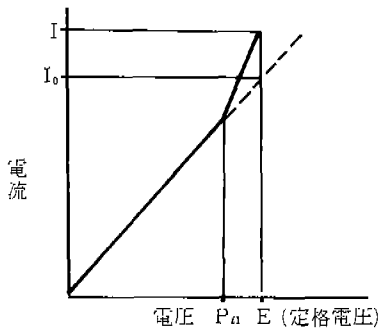
〈그림 36〉  $\gamma$ -破壞電壓 關係



〈그림 38〉 代表的인  $\tan \delta$ -電壓特性

〈표 23〉 성극지수에 의한 판정기준

건 조 정 도	성극지수 (PI)
건 조	2.5이상
보 통	1.5~2.5
흙 습	1.5이하



〈그림 37〉 電流-電壓特性

절연물이 상당히 열화한 경우에는  $P_{i2}$ 가 정격전압 이하에서 나타나는 일도 있고 열 열화가 생기면 Coil 절연의 유기재료는 硬化와 열 분해에 의해 Void가 생성되기 때문에 절연물의  $\tan \delta$ 는 초기값 보다 약간 적어지는 것이 보통이지만 오손 등의 이유로 역으로 크게 되는 경우도 있다.

$\Delta \tan \delta$ 는 열화가 進行됨에 따라 그 값이 커지기 때문에 절연열화 판정상 중요한 情報이다. 일반적으로 열화상태에서의  $\tan \delta$ -電壓特性은 그림 38과 같은 모양이 된다.

절연물에 균열등과 같은 국소적인 결점이 있을 경우에는 정상 권선에 비해 현저하게 部分放電 pulse 파고치가 커지고 발생빈도 또한 增大한다.

$\Delta \tan \delta$ 가 비교적 작은데 비해서  $q_{max}$ 가 異常하게 큰 경우는 국소적인 결점이 絶緣物 내부에 존재하고 있다고 생각할 수 있다. 이들 판정 방법에 대해서는 回轉機의 種類, 절연방식마다 약간씩 그 실정이 틀리기 때문에 國際적으로 공인된 基準은 정해져 있지 않지만 일본에서는 3.3kV 이상의 Asphalt compound 절연 Coil을 대상으로 표 24와 같은 「발전기권선 절연열화 판정기준」이 운용되고 있다. 여기서는  $P_{i2}$ 가 명확하게 정격전압 이내로 확인된 경우,  $P_{i2}$ 가 확인되지 않지만  $\Delta I$ ,  $\Delta \tan \delta$  및  $q_{max}$  값중 2項目 이상이 표 24의 값보다 큰 경우에는 그 피시플 권선에 필요한 절연내력 ( $2E + 1kV$ )을 가지고 있지 않은 것으로 판정한다.

#### 다. 遮斷器

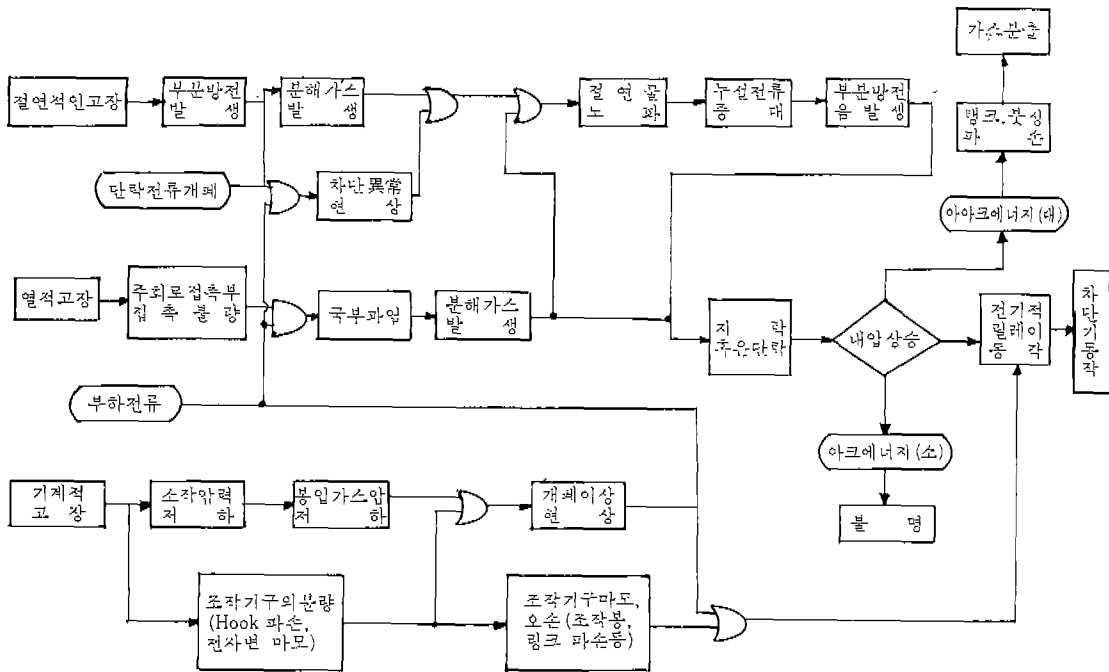
##### 1) 故障原因

遮斷器類의 故障은 일반적으로 絶緣의 劣化 및 파괴, 通電時의 과열現象 및 機械的인 故障으로 分類하며 대체적으로 이들 故障의 進展 상태는 그림 39와 같다.

〈표 24〉 발전기 권선 절연열화 판정기준

시험전압 (kV)	특성치	정격전압 (kV)		
		3.3	6.6	11
E (정격전압)	$\Delta I$ (%)	4.0	8.5	12.0
	$\Delta \tan \delta$ (%)	0.7	6.5	6.5
인가전압 (kV)	$q_{max}$ (C)	$5 \times 10^{-9}$ (3*3)	$5 \times 10^{-9}$ (4*5)	$1 \times 10^{-8}$ (6*35)

\*인가전압 (kV)



〈그림 39〉 고장진전상태 (Fault Tree Analysis)

## 2) 異常診斷

遮斷器의 故障事故를 미연에 防止하고 壽命을 연장시키기 위해서는 故障原因을 早期에 발견하여 豫防하는 것이 대단히 중요하며 異常診斷技術은 이러한 故障原因을 事前에 診斷하는 방법으로 표 25와 같이 絶緣性能診斷, 通電性能診斷 및 開閉性能 診斷技術로 大別할 수 있다.

이중 一般的으로 가스차단기(GCB 및 GIS)에 적용되고 있는 異常診斷技術중 중요한 항목에 대하여 考察하여 보면 표25와 같다.

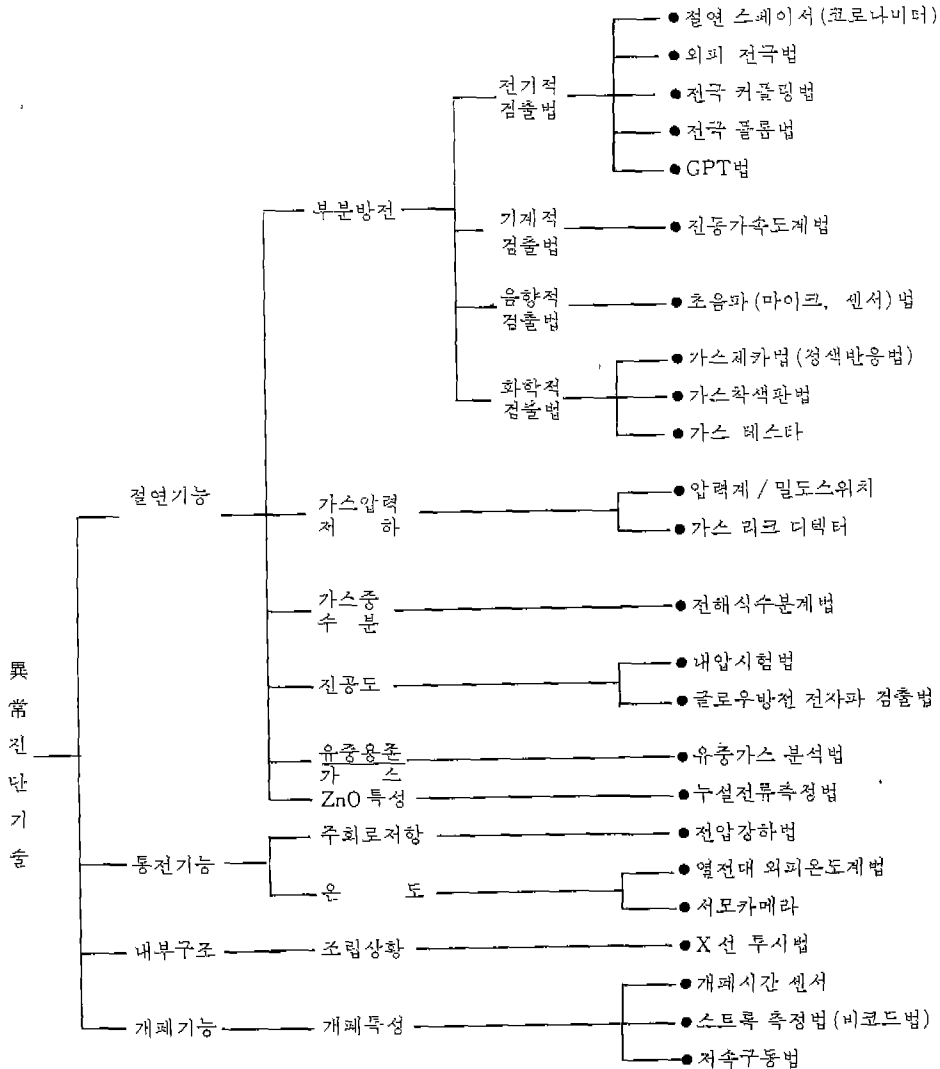
### 가) 絶緣性能 診斷技術

(1) 化學的檢出法 (呈色反應法)

(가) 檢出原理 및 裝置

Gas 開閉裝置의 内部에서 部分放電이 발생하면 SF<sub>6</sub> Gas가 導體나 금속용기등의 금속재

〈표 25〉 異常診斷技術

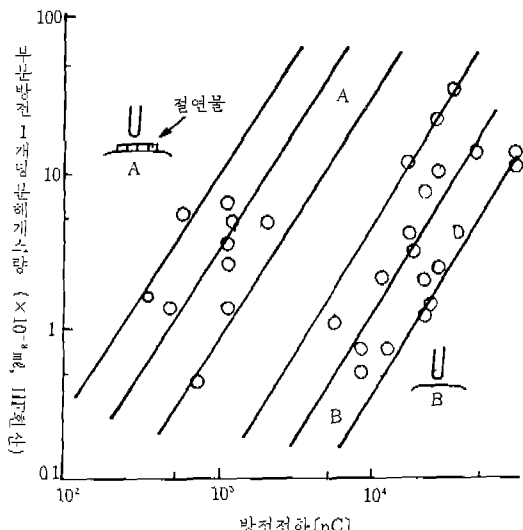


료와 反應하여 미량의 SF<sub>4</sub> Gas를 발생하며 SF<sub>4</sub> Gas는 活性이 매우 좋으므로 금속용기내에 存在하는 水分과 반응 SOF<sub>2</sub>, HF, SO<sub>2</sub> 등의 酸性 活性인 분해Gas를 생성한다. 部分放電電荷와 分解Gas量과의 관계는 그림 40과 같으며 이러한 分解Gas는 Gas Chromatograph, Gas Checker 등의 方法에 의하여 檢出된다.

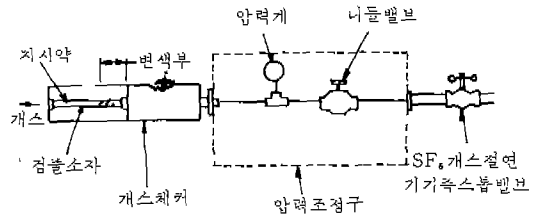
Gas chromatograph는 試料Gas를 공장으로 運搬하여 精密測定裝置를 利用, 測定하여야 하며 고도속련의 測定技術을 필요로 하는 등 現

地에서 측정하기 어려운 점이 많다.

Gas checker는 酸性 活性 分解Gas에 의해 呈色反應試藥을 應用한 檢出裝置로 少形, 輕量 이어서 取扱하기가 편리하며 檢出裝置의 構造는 그림 41과 같이 本体와 檢出素子로 構成되어 있으며 檢出素子は 呈色反應試藥을 부착시킨 알루미나 분말이 Glass管에 봉입되어 있고 本体는 Gas開閉裝置取附部, 流量調整部, 檢出素子 및 色變化를 觀測할 수 있는 아크릴제 투시판으로 되어 있다.



〈그림 40〉 부분방전전하의 분해가스량



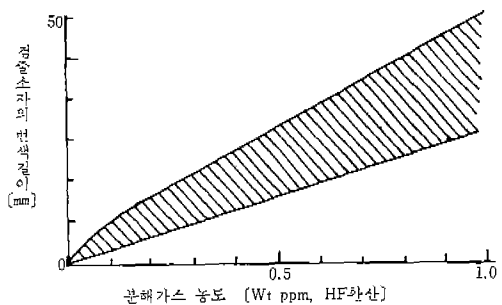
〈그림 41〉 정색반응법

(나) 測定方法

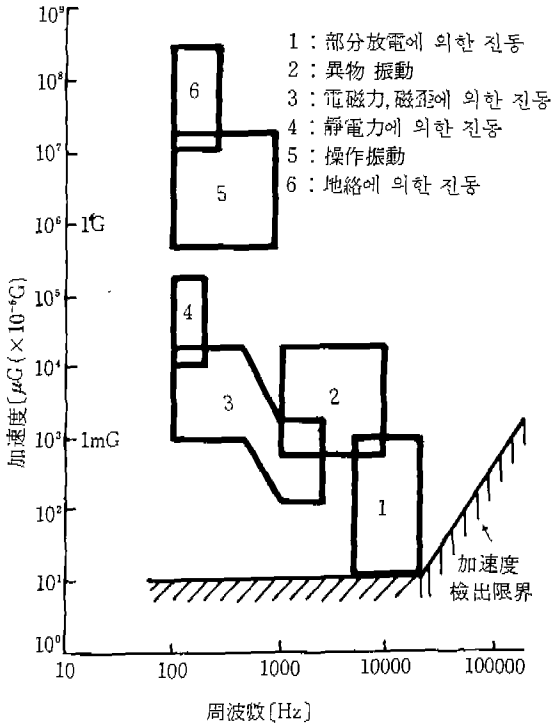
檢出裝置 本体에 檢出素子를 組立, Gas개폐 장치의 配管口에 取附하고 배관구 및 檢出裝置 本体의 流量調整器 Valve를 열어 檢出素子에 試料Gas를 流量 5 l / 분(대기압력 환산) 으로 6 분동안 총 30l 를 흘린다. 이때 試料Gas 중 에 酸性活性 SF<sub>6</sub> 분해Gas가 存在하면 試料Gas 流入側에서 부터 檢出素子が 서서히 變色한다. 이 變色된 檢出素子の 길이로 그림 42(분해 Gas농도 - 검출소자의 변색길이 특성) 에서 분해Gas濃도를 測定한다.

(2) 機械的檢出法(振動, 加速度法)

Gas絶緣機器는 操作時를 除外하고는 振動이 發生하지 않는 機器로 생각되나 실지로 感度



〈그림 42〉 정색반응법 검출소자의 검출감도

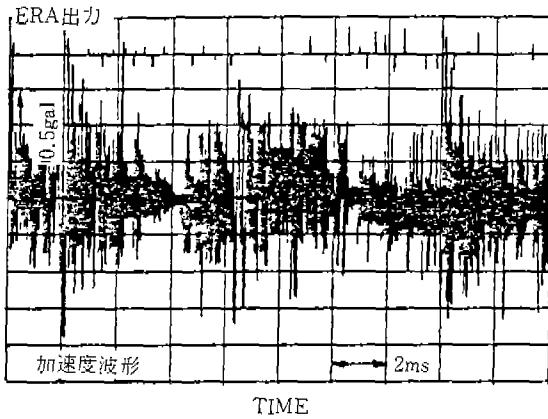


〈그림 43〉 GIS진동의 분류

가 좋은 振動測定器로 測定하면 각종 진동이 測定된다.

이러한 振動에는 주위機器 또는 環境에서 傳達되는 振動도 있지만 地絡事故時에 發生되는 진동은 대단히 크다.

그림 43은 一般的으로 測定되는 振動의 크기와 周波数영역 範圍를 나타낸 것이다.



〈그림 44〉 부분 방전에 의한 가속도 파형

(가) 振動의 要因

(a) 機器内部의 部分放電

機器内部에 部分放電이 發生하면 衝擊的인 振動이 생겨 용기 외벽으로 傳達된다. 이러한 衝擊的인 振動은 수 kHz~수백 kHz까지의 높은 周波數 成分을 가지고 있으며 GIS의 경우에는 振動 傳達 特性을 고려 5~20 kHz 범위에서 最高 高感度로 測定할 수 있다.

測定波形的 例는 그림 44와 같고 振動 發生은 電源周波數에 대해 거의 周期的이며 部分放電 發生場所, 발생 Mechanism에 따라 진동의 크기도 틀린다.

振動測定 限界近處에서는 수 PC~수십 PC의 部分放電을 測定할 수 있다.

(b) 機器内部 異物의 靜電力

機器内部에 混入된 異物質이 靜電力에 의하여 용기벽과 衝突하면 振動이 發生하는데 이 진동의 周波數 成分은 5 kHz 전후의 衝擊振動과 靜電力에 의한 部品이나 용기의 진동성분으로 구분한다.

異物質의 振動 有無에 따른 Power Spectrum을 比較한 그림 45에서 異物質에 의한 振動이 4~5 kHz에서 現저함을 알 수 있다.

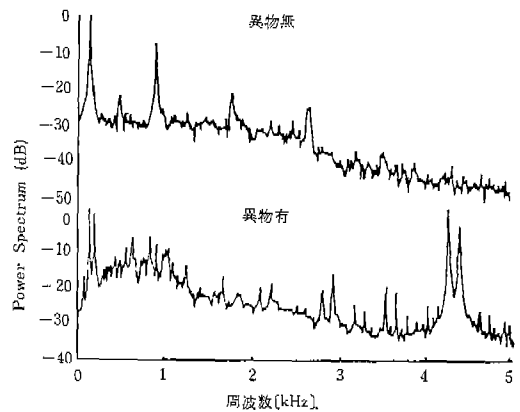
일반적으로 異物質에 의한 振動의 발생은 時間에 따라 불규칙하나 1~10 kHz의 周波數 範圍에 많다.

(c) 電磁力 및 磁歪

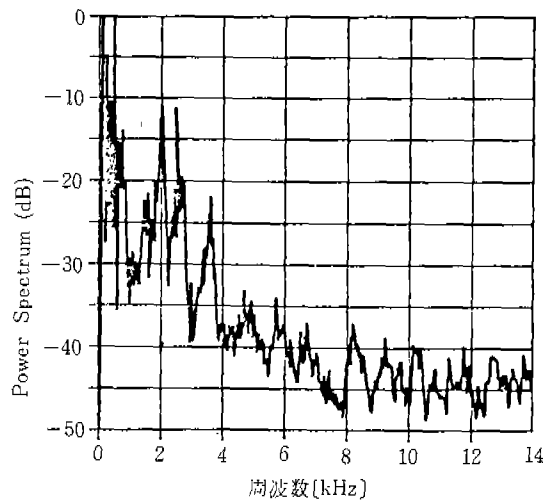
大電流에 의하여 發生되는 電磁力으로 部品이나 용기의 振動 및 鐵心을 지닌 計器用變壓器(P.T)의 磁歪 振動이 發生한다.

前者의 振動은 電流가 작을 경우에는 전혀 문제가 되지 않으며 P.T振動은 電壓에 의해 發生되며 용기内에는 이외에 항상 진동을 發生하는 振動源이 없기 때문에 顯著하게 測定되는 경우도 있다.

그림 46은 77 kV GIS의 P.T振動 Power Spectrum 例며 振動周波數成分은 電源周波數의 整數倍에 한정되어 일정하며 각 주파수 성



〈그림 45〉 용기内 異物 振動의 Power Spectrum



〈그림 46〉 GIS内 PT진동의 Power Spectrum

분의 크기에變化가 있는 경우는 内部部品 또는 P.T등의 複合상태에 變化가 생긴 것으로 推定된다.

(d) 機器의 靜電力

G.I.S의 부품이나 용기는 靜電力에 의해 振動하고 이러한 振動은 대단히 작으나 機器의 固有振動數가 靜電力周波數와 일치하는 경우에는 外部에서 소리로 들리는 경우도 있다. 振動周波數 성분은 電源周波數의 2倍인 100, 120 Hz가 主成分이며, 振動의 크기도 共振등이 發生할 경우에는 0.1G 정도로 되기도 한다.

(e) 遮斷器 및 斷路器動作

지금까지 說明한 振動은 通電中에 連續적으로 發生하는 것이나 操作振動은 操作時에만 發生하며 크기는 다른 振動보다 월등히 크다.

操作振動은 機件, 接觸部가 기계적으로 충돌할 때 가장 크고, 이러한 衝擊에 의해 각 부품 및 용기도 진동한다.

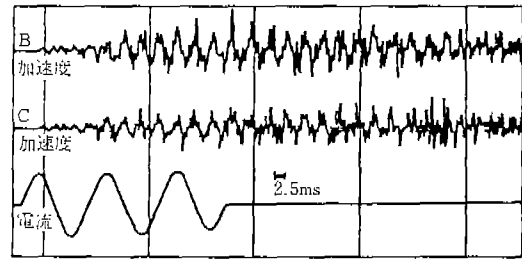
그림 47은 G.I.S操作時 發生되는 振動의 波形이며 振動의 크기는 5~20G이고 용기진동의 주파수 성분은 100Hz~1Hz이고 부ଳ 진동의 주파수 성분은 1~10Hz이다.

(f) 短絡 또는 地絡

G.I.S에서 發生하는 振動중에서 가장 큰 振動은 短絡 또는 地絡에 의한 振動이다. 地絡時 發生하는 振動은 그림 48에 나타난 것 같이 100~300Hz가 主成分이고 크기는 最大 수백G에 이른다.

(g) 其他

G.I.S 内部에서 發生하는 振動이 아니고 周邊機器나 環境에서 發生되는 振動으로는 다음과 같은 것이 있다.



〈그림 48〉 지락時 용기의 진동 파형

- 周邊機器(變壓器)의 運轉에 의한 振動
- 空氣壓縮機, 油壓 pump 등의 運轉에 의한 振動
- 架空線 corona 放電
- 周邊의 作業이나 交通에 의한 振動
- 配管中의 Gas의 흐름, 水路의 물 흐름에 의한 振動
- 바람, 비등의 振動
- 동물이나 벌레의 소리에 의한 振動

(나) 振動波形 分析과 診斷

(a) Noise 除去

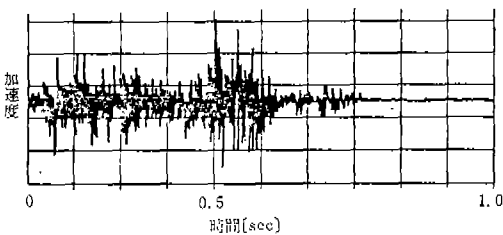
雜音(Noise)은 測定하고자 하는 振動이외의 것으로 測定對象에 따라 변하며 振動周波數範圍 및 振動Level範圍가 넓어 모든 것을 測定하기는 곤란하다. 여기에서는 部分放電 檢出時의 Noise 除去法에 대하여 알아 본다.

○Filtering

測定하고자 하는 진동주파수 領域이 5~20 kHz이면, High-pass filter를 使用하여 5 kHz 以下の 靜電力이나 電磁力에 의한 振動을 除去하고, 20 kHz以上은 主로 電氣的인 Noise로 low-pass filter를 使用하여 除去한다. 그림 49는 部分放電 檢出裝置에 使用하고 있는 filter의 遮斷特性的 例로, filter의 遮斷特性에 따라 Noise의 영향도 변하기 때문에 Noise가 클 경우는 Active filter 등 遮斷特性이 좋은 것을 使用할 必要가 있다.

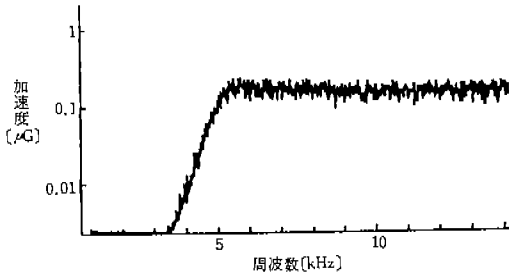
○平均化

波形이나 周波數 Spectrum에 포함된 不規則 pulse를 除去하기 위해서는 反復하여 測定



〈그림 47〉 GIS조작時의 진동파형





〈그림 49〉 High-Pass Filter의 차단특성

하고 어떤 周期性 Pulse 신호를 강조하기 위해서는 周期的으로 Sampling하여 平均化한다.

○過大人力除去

部分放電과 같은 微細한 振動을 測定하는 경우 주위 Noise의 영향이 크다.

따라서 測定 data의 크기를 判別하여 정상적으로 발생하고 있는 진동에 비해 突發적으로 流入되는 큰 振動을 識別하여 그 data를 버린다. 그림 50은 平均化 및 Sampling方法을 나타낸 것으로 이러한 技法에 의하여 주위 Noise가 큰 現場에서도 有效한 data를 얻을 수 있다.

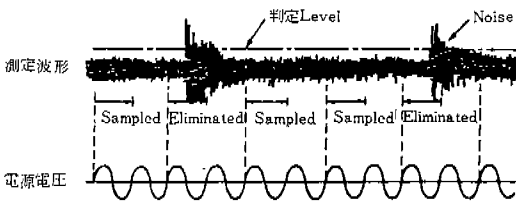
(b) 振動의 分析方法

○振動波形

振動測定에서 얻은 波形을 적당히 filtering한 것을 波形形態 및 크기로 比較分析한다.

○周波數 分析

振動波形의 fourier Spectrum 또는 Power Spectrum을 周波數 領域의 振動波形과 比較하여 分析한다. 이 경우 時間領域의 data는 平均化되어 있다.



〈그림 50〉 Data Sampling과 Noise 제거

○ 3차원 Spectrum

周波數 領域과 時間 領域을 알기 위해 3차원 Spectrum이 사용된다.

이와 같은 分析을 실시하기 위하여는 Computer使用이 필수적이며 振動 Pattern을 分析하는 수법으로는 波高值分析, 相關分析등이 있다.

(c) 異常判定

異常判定을 할 때는 正常狀態와의 比較가 必要하며 정상시 보다 소리가 크든가 音質이 틀리는 것 등에 의한 判定은 正常狀態에서의 經驗을 토대로 가능하다.

外部診斷法에서는 가능한 定量的인 異常을 判定하는 것이 要望되며 GIS등은 信賴度가 높고 異常現象의 實現이 어려운 判定法의 確立이 상당히 어렵다.

여기서는 一般的인 判定法을 종합해 본다.

○Level에 의한 判定

振動의 크기, 特定周波數 成分의 크기, 平均值의 크기를 正常值의 分布, 同一機種간의 比較를 통해 일정이상 크기가 되면 異常으로 判定한다.

部分放電 또는 異物의 振動等으로 振動이 클 경우는 level로서 충분히 判定이 가능하며, 内部部品の 異常으로 固有振動數가 變하여 共振이 발생한 경우 역시 異常으로 判定할 수 있다.

○周波數成分의 比較

正常時에 포함되지 않은 周波數成分의 出現 또는 消滅등을 조사한다.

異常振動의 有無, 變化되는 周波數成分등에 의해 어느정도 어떤 部品에 관련되는가, 異物인가, 部分放電인가의 判定도 보다 精確도가 향상된다.

○Pattern 比較

客觀的 正量的 判定은 어렵지만 가장 有效한 方法이다. 3차원 Spectrum에 의하면 各周波數成分 發生의 時間的 變動을 알 수 있어 振動源의 추정이 용이하며, 작은 部分放電이나 異物質의 振動의 判定, 操作機具를 움직일 때 各部의 振動에 의한 이완등의 判定을 하려면 이와같은 分析이 必要하게 된다. 이때에 正常時의 Pattern에 對해서도 충분한 data가 필요하다.