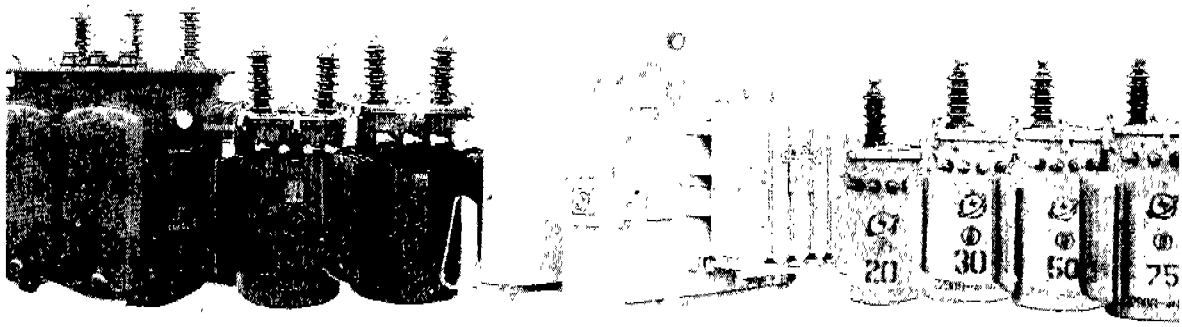
電氣設備의 故障診斷

(3)



〔絶緣診斷을 위한
새로운 試驗裝置〕

1. 머리말

電氣機器의 絶緣은 운전시의 熱的, 電氣的, 환경적, 기계적 스트레스에 의하여 劣化하여 드디어는 운전에 필요한 기능을 수행할 수 없게 된다. 일반적으로는 絶緣破壞를 수명으로 하고 있다. 따라서 절연진단을 할 때에는 이 절연열화 기구에 대하여 충분히 숙지해야 된다는 것이 중요하다. 이를 위해서는 加速劣化試驗에서의 각종 스트레스에 의한 절연파괴전압 및 비파괴 절연특성의 經時変化特性의 파악과 운전중의 실험에 대한 필드 데이터의 축적이 필요하다. 또한 절연진단 대상기의 비파괴시험 데이터를 加速劣化 데이터나 他機에서의 實 필드 데이터와의 대조에서 殘存破壞電圧을 추정하여 절연이 운전에 필요한 기능을 가지고 있는지 여부를 판정한다. 절연열화특성은 각 절연 시스템마다 특유하며 絶緣劣化 데이터는 각 절연 시스템마다 축적해야 된다. 또한 같은 절연 시스템이라도 設計치수에 따라 데이터가 달라진다. 일반적으로 온도, 습도 등은 測定時의 주위조건에 따라서도 데이터가 달라진다. 따라서 절연열화를 보다 정확하게 진단하려면 이같은 點을 고려하여 제조시부터의 계속적, 정기적인 보수 데이터는 불가결의 것이다. 또한 동시에 운전시의 劣化를 誘起하는 각종 스트레스를 연속적으로 감시한다든지 目視점검, 소리, 온도, 냄새 등 감각에 의한 진단을 병용한다든지 이른바 非破壞絶緣試驗은 1개 항목만을 실시할 것이 아니라 다각적 데이터에 의거하여 종합적으로 판정하는 것이 중요하다. 電氣機器의 절연진단을 위해서 오래전부터 많은 사람들의 노력을 해왔는데 이같은 이유에서 아직 絶緣劣化 判定을 위한 절대적 기준은 없다. 앞으로도 이같은 기준은 상대적인 영역을 벗어나지는 못할 것이다. 電氣機器 絶緣診斷에서의 문제점은 많지만 앞으로 특히 다음과 같은 과제를 해결하기 위해 注力해야 될 것이다. 즉,

(i) 局部劣化의 진단

(ii) 放電場所의 구별

(iii) 制限印加電圧 내에서의 診断精度向上
(iv) 装置의 小形化, 自動化
(v) 測定의 온라인化
(vi) 물리, 화학적 진단기술의 도입

최근 전기기기의 제조자, 사용자, 진단자에 의하여 각종 絶縁診断装置가 개발되어 자동화, 고성능화를 도모하고 있다. 여기서는 回轉機, 靜止器 등의 電力用 主機器의 절연을 주로 정지상태에서 정밀하게 진단하는 최근의 새로운 시험장치에 대하여 간단히 소개한다.

2. 回轉機의 새로운 絶縁診断装置

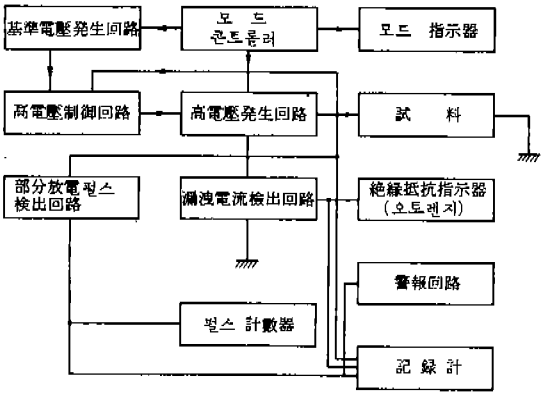
回轉機의 절연진단법으로서는 종래로부터 메가法, 직류시험법, 誘電正接시험법, 교류전류시험법, 部分放電시험법 등과 같은 비파괴 절연시험법이 알려지고 있다. 이를 위해 필요한 특수한 시험장치는 고각 絶縁抵抗計, 세링 브리지와 廣帶域 코로나측정기 정도로, 그밖에 電源과 전류계와 전압계가 있으면 측정을 할 수 있었다. 그러나 이같은 측정기기는 별개로 되어 있으면 광대한 스페이스를 필요로 하고 운반에 지장을 초래한다든지 測定이나 데이터처리에 너무 많은 시간이 소요된다든지 測定 데이터가 시험자마다 다르거나 또한 測定精度가 불충분하다는 등의 어려운 점이 있었다. 이같은 관점에서 최근 각 회사에서 새로운 비파괴절연시험기가 實用化되고 있다. 이것을 **표 1**에 들었다. 여기서는 플랜트에서의 대량적인 電動機의 절연진단을 용이하게 실시하기 위하여 개발된 簡易絶縁診断装置 TOSPID－10, PHA(波高分析計)에 의한 多機能放電計測 시스템, 分解 가스檢知에 의한 절연진단장치 및 高電圧 턴 絶縁試驗裝置에 대하여 소개한다.

〈표 1〉 새로운 絶縁診断装置

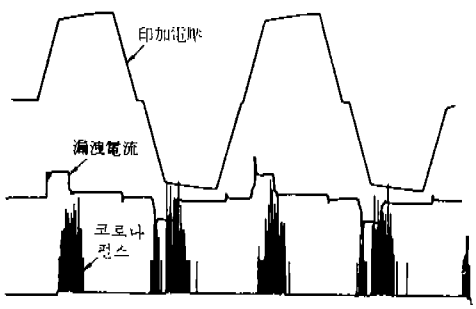
絶縁診断器名	診 断 法 原 理
Dielectric Loss Analyzer	루프트레이스에 의한 放電 에너지와 디스플레이의 패턴으로 판정한다.
自動絶縁診断器 (AIA)	新交流電流試驗法이라고 한다. 電圧－電流增加傾向比 특성에서 微分部分放電率 (γ)을 구하여 보이드 함유율을 추정하고 劣化를 판정한다. 최근 최대방전전하(Qmax)도 동시에 측정할 수 있는 AIA가 개발되었다.
EI 디텍터	廣帶域에서 高利得의 진단장치로 접지전류를 검출하여 半周期의 부분방전 펄스의 발생폭으로 진단한다.
PI－6,000	直流高圧試驗法으로 成極指數, 弱點比, 킥현상의 유무, 갭의 불평형률 등으로 판정한다.
EIC部分放電測定器	部分放電 개시전압, 부분방전 發生數, 부분방전 발생폭으로 진단한다.
絶縁체커 MCE－010形	3, 6, 11kV급 고압교류 전동기의 절연진단용, 가동중인 전동기의 접지선에 흐르는 部分放電電流를 非接触 檢出 프로브로 검출하고 常規 對地電圧에서의 부분방전의 유무를 검사한다.
自動絶縁診断裝置 MTE－030形	3, 6, 11kV급 고압교류전동기의 절연진단용, 정지중인 전동기의 권선에 商用 주파수의 교류전압을 인가하여 이때에 接地線에 흐르는 전류를 검출하고 이것을 直流成分, 低周波成分, 高周波成分으로 분리하고 여러가지 연산을 한다. 이에 의하여 部分放電, tanδ, 누전류 급증점, 누전류 중의 직류성분을 測定하여 절연진단을 한다.
電氣捲線診断裝置	전동기의 권선에 시험전류를 흐르게 하고 이에 의하여 권선의 振動을 측정하여 권선 절연물의 고갈이나 마모의 진단을 한다.

(1) TOSPID－10

機器 설치장소에서의 簡易診断을 첫째 임무로 하고 직류고전압 시험장치가 가진 소형, 경량의 특질을 도입하여 본질적으로는 直流高電圧 發生裝置로 하였다. 주요 대상 기종은 6.6kV급 이하의 回轉機이다. 치수는 약 높이 36cm×폭 45cm, 길이 20cm이며, 중량은 약 15kg이므로 성인이 혼자서 쉽게 운반할 수 있다. 絶縁抵抗 외에 交流部分放電의 유익성을 고려하여 部分放電 측정을 할 수 있게 되어 있다. 印加電圧을 상승, 하



〈그림 1〉 TOSPID－10의 블록圖

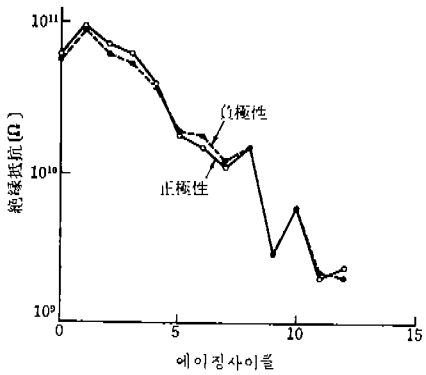


〈그림 2〉 TOSPID－10의 出力例

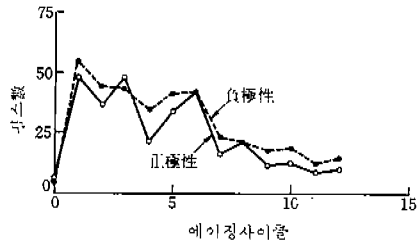
강시켜도 單極性의 직류전압으로는 공간전하의 퇴적으로 점차로 放電은 발생이 어렵게 되므로 부분방전 발생의 불균형을 보기 위해 極性反轉이 되도록 했다. 이 경우 電圧上昇時에는 放電이 빈발하여 부분방전 펄스의 分解記錄을 곤란하게 하므로 전압상승 속도를 일정하게 하고 적어도 分解能의 外因的 축소를 피했다. 試料에의 結線作業 이외는 모두 자동측정으로 되어 있다. 그림 1에 이 診斷器의 주요 블록圖를 들었다. 모드콘트롤러에 의하여 0.5kV～10kV의 측정전압 지정, 반복 인가회수(최대 10회) 지정, 승압 속도의 완급지정, 定電圧 印加維持時間(최대 12분)지정을 할 수 있다. 작동상태의 확인은 표시램프로 한다. 모드 지정을 받아 기준 전압이 발생하고 出力高電圧과의 비교로 고전압 제어회로의 出力 펄스 直流 레벨이 가감된다. 승압 트랜스, 倍電圧 整流回路에 의하여 臺形狀 直流高電圧이 발생된다. 모드콘트롤러의 지시에 의하여 定電圧, 定時間 維持後 강압되어 極性이 반전되어 負極性 昇圧의 시퀀스로 들어간다. 이 동안에 흐르는 누설전류는 전압이 변환, 증폭되어 1 V/0.5mA 感度로 기록계에 出力된다. 또한 저항은 $1\times10^{6}\Omega$～$1\times10^{11}\Omega$의 오트레이지로 미터 表示가 된다. 試料에 생기는 코로나 放電은 廣帶域法으로 검출되며 波形整形回路를 경유하여 計數되는 동시에 발생시기가 기록계 출력으로서 표시되므로 電圧印加 모드와의 대응을 알 수 있다. 그림 2는 3.3kV급 전동기 固定子捲線에 7kV를 印加한 경우의 기록계의 出力例이다.

TOSPID－10에 의한 測定例

(a) 모터레트 試驗試料 그림 3 및 그림4는 3.3kV급 F종 플리프레그 절연을 한 모터레트 시험시료의 에이징사이클(2g로 加振시키면서 220℃ 加熱 1일, 100% RH에서 흡습 2일, 7.5kV 10분간 耐圧을 1사이클로 한다)에 대한 인가전압 7kV의 경우의 절연저항 및 正負部分放電 펄스(500pC이상)의 카운트 數를 표시하고 있다. 劣化가 진행됨에 따라 절연저항이 저하하



〈그림 3〉 모터레트 試料의 絶緣抵抗의 經時変化



〈그림 4〉 모터로기트 試料의 펄스카운트의 經時変化

고 펄스의 카운트는 초기에는 크게 증가하는데, 그 후 서서이 감소하여 일정한 값으로 안정되는 경향에 있다. 이것은 劣化에 의하여 생긴 보이드의 벽면저항이 내려가는 것을 反映한 결과이다.

(b) 電動機 固定子捲線 實機 A, B는 모두 6.6 kV−3,000kW급의 전동기이며, 對地 캐패시턴스는 대체로 0.14μF이다. 實機 A는 8년간 운전 후의 플리프레그 절연, 實機 B는 제조 직후의 全含浸絶緣이다. 표2는 인가전압 10kV인 경우의 部分放電 펄스의 카운트이다. 實機 B는 1,000pC 이상의 部分放電 펄스가 카운트되지 않는데 대하여 實機 A에서는 正負 모두 200개 이상 카운트되고 있으며, 8년간의 운전에 의하여 보이드가 生成된 것으로 본다.

TOSPID−10은 전동기의 간이절연진단기로서 개발되었는데 몰드 機器, 電力用 콘덴서 등의 부분방전 측정기로서도 유효하다는 것을 확인하고 있다.

(2) 部分放電 計測裝置

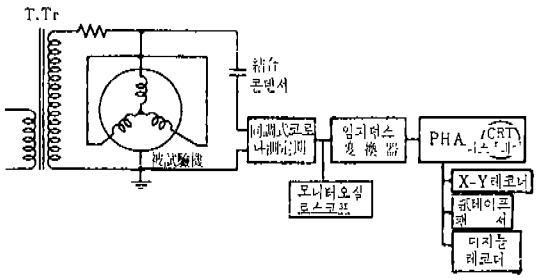
절연물에 전압을 인가했을 때 발생하는 部分放電을 전기적으로 계측하는 수단으로서 종래 어떤 레벨 이상의 부분방전 펄스 數를 카운터로 계수하는 부분방전시험기가 사용되어 왔다. 그러나 최근 部分放電 펄스의 分布까지 정확히 계측하여 절연상태를 보다 정확하게 파악할 목적으로 종래의 시험기와 PHA를 함께 구성한 放電計測 시스템이 시도되고 있다. 臺車 中段 왼쪽의 장치가 PHA이다. 그림5에 이것을 사용한 부분방전 펄스 測定回路를 들었다. 모의 보이드를 설치한 에폭시 樹脂注型 바 코일의 측정결과를 X−Y 코더에 출력시킨 예를 그림6에 들었다. 보드가 金屬電極에 접하고 있는지 (그림 (a)), 절연물 내에 존재하는지 (그림 (b))에 따라 正펄스, 負펄스의 分布 패턴이 달라진다는 것을 알 수 있다. 이밖에 이 PHA를 사용하면, 일정한 시간의 간격마다 入射 펄스數를 계측하여 기억하는 기능(MCS)이 있으며, 이에 의하여 放電發生 位相分布 등을 구할 수가 있다. 또한 계측결과를 종이 테이프펀처에 출력시켜 후에 컴퓨터에 판독시켜 여러가지 처리를 할 수도 있다. 또한 PHA를 미니컴에 직접 접속하여 온라인으로 데이터 처리를 하는 것도 가능하다. 이와 같이 PHA를 사용함으로써 종래의 部分放電 測定器로는 불가능했던 정보를 얻을 수가 있고 보다 정확한 판단을 내리는 데 도움이 되고 있다.

(3) 發生 가스에 의한 絶緣診斷

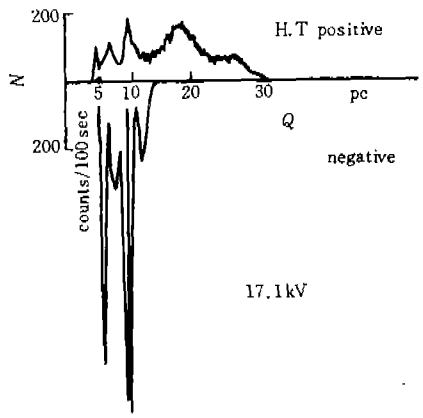
機器 내의 절연물이 高温 속에 있으면 熱分解

〈표 2〉 電動機에서의 部分放電 펄스 數

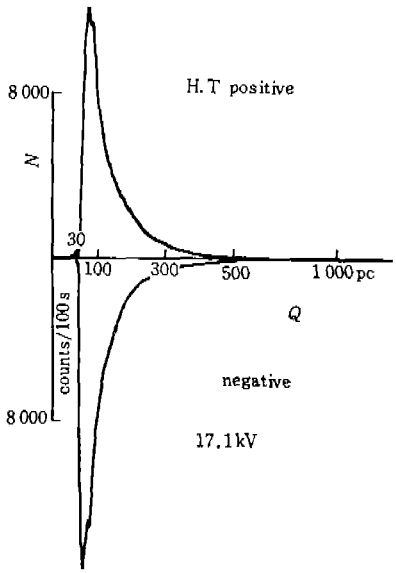
供試機	電動機A		電動機B	
極性	+	−	+	−
500pC 이상	−	−	1	2
1,000pC 이상	−	−	0	0
2,500pC 이상	208	209	0	0



〈그림 5〉 PHA를 사용한 部分放電 計測回路



(a) 金屬電極隣接小 보이드의 頻度分布

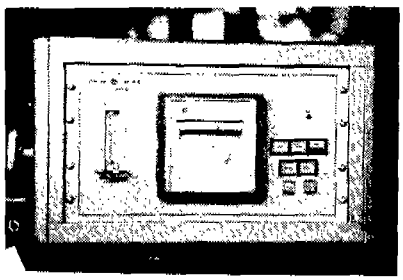


(b) 中間大 보이드의 頻度分布

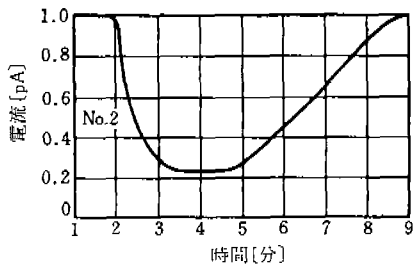
〈그림 6〉 模擬 보이드를 가지고 있는 바코일의 部分放電 電荷量의 分布

에 의하여 분해 가스가 발생한다. 터빈 발전기와 같이 密閉構造의 乾式絶緣인 경우에는 큰 사고를 미연에 방지할 수가 있다.

그림7은 鐵心의 가열에 의한 分解 가스를 검지할 목적으로 개발된 장치의 일례이다. 그 원리는 기기내에서 검출용 챔버에 넣은 기체에 放射線을 조사하여 기체를 이온化하여 챔버 내에 설치한 電極間에 전압을 가하고 거기에 흐르는 전류의 변화를 검출하는 것이며, 分解 가스가 발생하면 전류가 감소된다. 리본히터에 의한 모의 시험의 측정례를 **그림8**에 들었다. 또한 다른 원리를 사용한 방법도 개발되어 있다. 早期檢知를 위해 일정한 온도 이상에서는 有機 가스가 발생하는 塗膜을 機器 내의 필요한 장소에 도포하는 것도 시도되고 있다.



〈그림 7〉 熱分解 가스 檢出裝置



〈그림 8〉 檢出器에 흐르는 電流의 熱分解 가스에 의한 変化

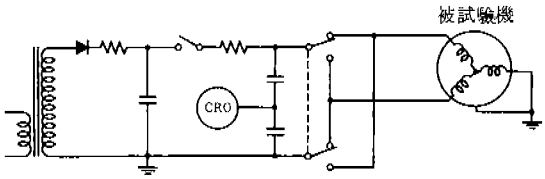
(4) 高電圧 턴 絶緣試驗裝置

말티턴코일을 가진 기기의 정격운전시에는 코일턴間에 발생하는 전압은 일반적으로 공기의 破壞電圧보다 낮으며 기계적으로 素線導体가 서

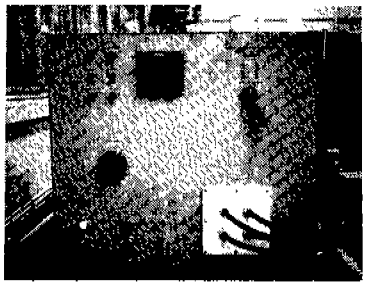
로 접촉하지 않는 한 리어쇼트하지 않는다. 그러나 外雷, 차단기의 개폐기에 따른 서지 등이 기기의 권선에 침입한 경우 線路側코일의 턴間에는 높은 전압이 分擔되어 레어쇼트 사고로 연결된다. 따라서 턴間 절연을 檢證하는 것은 중요한데 현상으로는 비파괴시험은 할 수 없으며, 모두가 耐圧試驗을 하고 있다. 回轉機에 로터를 넣은 상태로 시험할 경우 또는 변압기의 경우에는 기기의 단자를 통해서만 시험을 할 수 있는데 로터를 제거한 후에 시험을 할 경우에는 電磁誘導를 사용한 다른 방법을 사용할 수도 있다. 여기서는 前者의 방법을 사용하는 시험장치에 대하여 설명하기로 한다.

1코일의 1턴이 短絡된 효과는 1턴만 턴 數가 적어지는데 그치지 않고 그 턴에 鎖交되는 磁束을 거의 短絡電流가 없이 하기 때문에 코일 1개 이상이 적어진 것과 같은 효과가 있다. 그러나 極數 및 코일 數가 많은 회전기 등에는 端子에서 본 1코일의 레어쇼트의 효과는 극히 작게 된다. 따라서 보통 2개의 同一定數回路(3相의 기기인 경우에는 各相)에 교대로 또는 電流波形을 비교 또는 그 差分波形의 변화에서 良否을 판정하는 방법을 채용한다. 시험기는 임펄스 電圧發生部와 波形檢出用 오실로스코프를 세트로 한 것이다. 그 回路에 교대로 전압을 인가하는 방식의 기본회로와 시험기의 일례를 **그림 9**와 **그림 10**(발생전압 40kV)에 들었고 또한 誘導電動機의 1코일(U相 제3코일)을 고의로 레어쇼트시킨 경우의 인가전압 파형을 **그림 11**에 들었다. 電圧 또는 전류의 差分波形을 사용하는 방식은 여러가지가 있는데 그 기본 회로예와 시험기를 **그림 12**와 **그림 13**(발생전압 60kV)에 들었다.

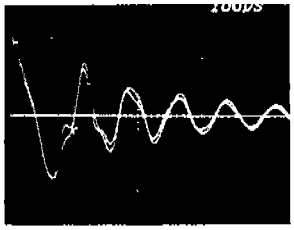
3. 靜止器에서의 새로운 絶緣診斷裝置



〈그림 9〉 交代印加方式의 페어 絶緣試驗器 基本回路

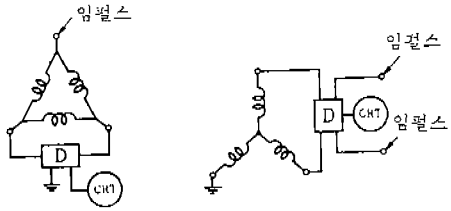


〈그림 10〉 電圧의 交代印加方式 턴 絶緣試驗器



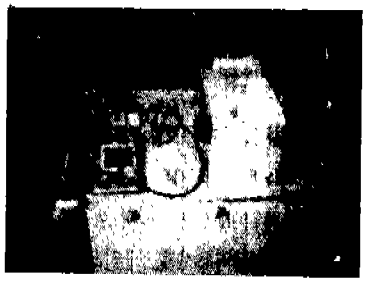
被試驗機 : 誘導電動機 2 P-355kV-3300V
縱軸 : 2 kV/div, 橫軸 : 100 μs/div

〈그림 11〉 U, V相에 교대로 印加한 電圧波形 (U相 제3코일이 레어쇼트)



D : 差分을 취하는 回路

〈그림 12〉 對稱 2回路의 電圧 또는 電流의 差分波形을 이용하는 방법



〈그림 13〉 差分波形을 이용하는 턴 絶緣試驗器

변압기의 절연진단방법으로서는 종래의 절연저항, 誘電正接, 吸收電流特性 및 절연유의 여러가지 특성의 측정에 의한 방법 이외에 최근에는 부분방전 검출이나 油中溶存 가스 分析이 不可缺의 것으로 되어 있다.

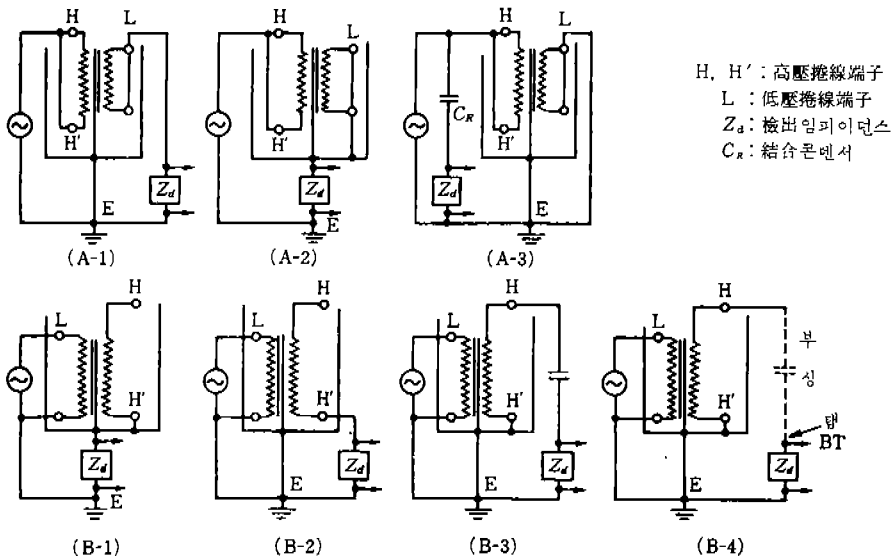
한편 SF_6가스 절연밀폐형 개폐 장치, 이른바 GIS에서도 부분방전 검출은 유력한 절연진단법으로 되어 있다. 여기서 변압기와 GIS에 대하여 최신의 부분방전 검출법을 설명한다. 油中 가스 分析에 대해서는 생략한다.

(1) 変圧器의 部分放電 検出法

변압기에서는 절연파괴에 이르는 앞의 단계에서 部分放電이 발생하는 수가 많으므로 부분방전을 검출함으로써 절연파괴사고를 미연에 방지할 수가 있다. 변압기의 부분방전 측정에는 전기적 방법과 음향적 방법이 있다. 前者에는 작은 부분방전까지 定量測定을 할 수 있는 메릿이 있고 後者에는 간편하게 사용할 수 있다는 메릿이 있다.

그림 14에 전기적인 부분방전의 測定回路를 들었다. 어떤 회로를 사용할 것인지는 변압기나 전원회로의 형편에 따라 정하면 된다. 그림의 검출 임피이던스 Z_d는 보통 시판되고 있는 部分放電 測定器에 내장되어 있다. **그림15**에 부분방전 측정결과의 예를 들었는데 부분방전의 크기뿐 아니라 發生頻度를 측정하는 것도 중요하다.

전기적 방법보다 간편한 방법으로 音響法이 있다. 변압기 내에서 부분방전이 발생하면 **그림16**에 표시한 주파수 스펙트럼의 超音波가 발생한다. 이 초음파를 탱크 壁에 붙인 코로나마이크에 의하여 検出周波數 100kHz 전후에서 검출하



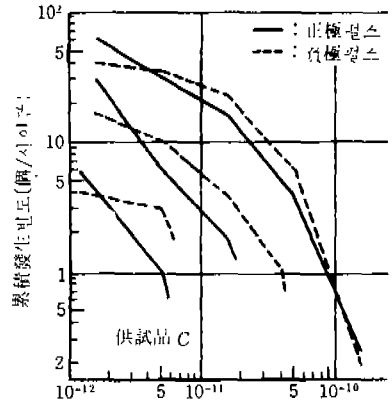
〈그림 14〉 変圧器의 部分放電 測定回路 (A : 加圧試驗, B : 誘導試驗)

여 그 출력을 오실로스코프나 미터로 모니터하는 방법이다. 변압기에는 철심의 勵磁音이 있는데 100kHz정도의 검출주파에서는 이 여자음에 의하여 방해되지는 않는다.

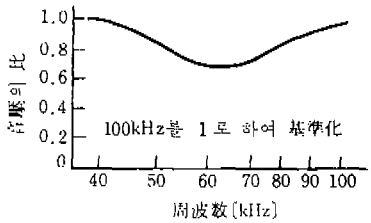
電氣的 方法과 音響法을 함께 구성하면 부분방전이 어느 위치에서 발생했는지를 標定할 수가 있다. **그림 17**에 시험회로를 들었는데 변압기내에서 발생한 부분방전 전기 펄스에서 오실로스코프를 트리거하고 그 후에 部分放電音이 코로나마이크에 검출되기까지의 시간지연을 측정한다. 측정된 오실로그램의 일례를 **그림 18**에 들었는데, 電流 펄스에서의 시간지연에 超音波의 油中傳搬速度 1.4m/ms를 곱하면 油中傳搬距離(그림 18의 수치)를 알 수 있고 부분방전의 발생점이 標定된다.

최근에는 이 기술이 더욱 발전하여 변압기의 自動部分放電 監視裝置가 개발되어 있다. 이 장치의 기본원리는 위에서 해설한 부분방전 標定과 거의 같은데 변전소에서의 劣惡한 서지나 노이즈 환경을 고려하여 펄스의 傳送에 **그림19**와 같이 光 파이버에 의한 光傳送을 채용하고 있다.

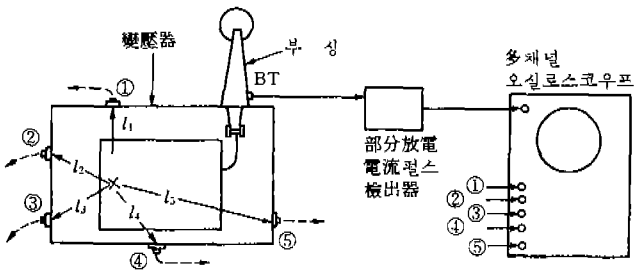
또한 本体에 내장된 마이크로컴퓨터에 의하여 전기와 音 펄스의 시간지연의 패턴을 식별하여 내부 부분방전인지 외부 코로나 또는 外部音인지를 판별하여 자동기록하는 장치로 되어 있다.



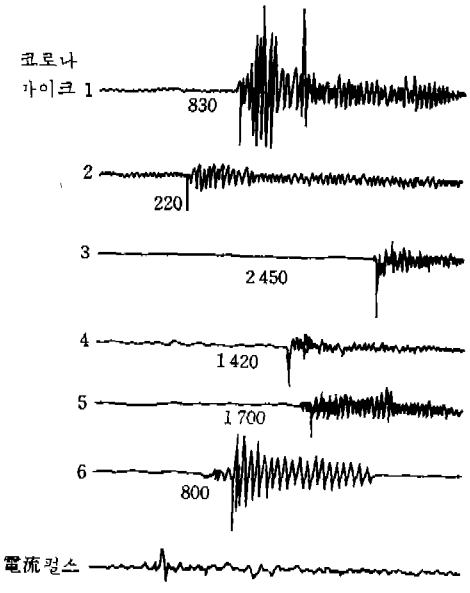
〈그림 15〉 部分放電 測定結果의 일례



〈그림 16〉 部分放電音의 周波數 스펙트럼

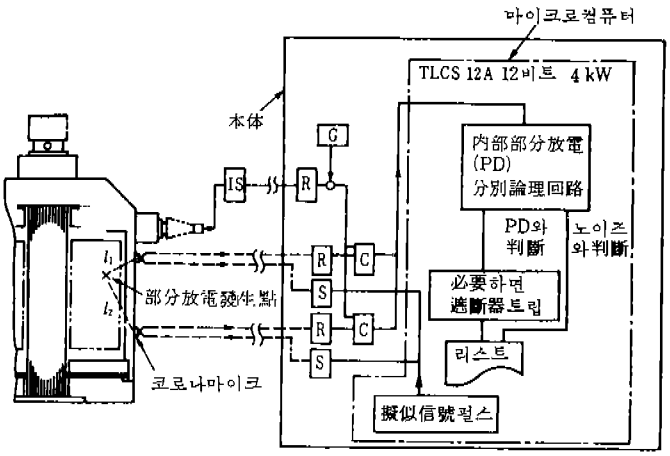


〈그림 17〉 音響法에 의한 部分放電 標定試驗回路圖



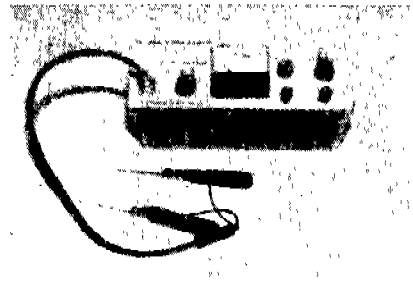
註 : 數字는 코로나音의 전파거리, 單位 mm

〈그림 18〉 코로나 標定의 일례

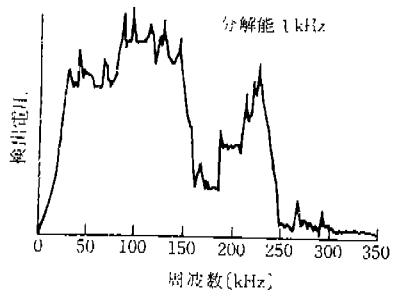


IS : 部分放電流檢出部및發光部 G : 發振器
R : 受光部 S : 受光部 C : 카운터 ····· : 光파이버

〈그림 19〉 變压器 自動部分放電 監視裝置의 시스템圖



〈그림 20〉 GIS의 部分放電 檢出器



〈그림 21〉 GIS에 발생하는 超音波 스펙트럼

이 장치와 같은 자동절연진단장치의 필요성은 앞으로도 더욱 높아질 것으로 본다.

(2) GIS의 部分放電 檢出法

GIS의 전기적 부분방전 검출도 변압기와 마찬가지로 측정할 수 있는데 GIS에서는 그 장점을 살린 스페이서 검출법이 현장에서의 절연진단법으로서 불가결의 기술로 되어 있다. 測定裝置를 **그림 20**에 들었는데 그림의 針電極을 GIS의 절연 스페이서를 매립한 실드에 접촉시키는 것만으로 GIS 내의 부분방전, 특히 스페이서 내의 미소한 보이드性 部分放電을 검출할 수가 있다.

GIS에서도 초음파검출법이 실용화 되고 있다. 課電되어 있는 GIS 내에 금속 異物이 있으면 異物은 케이스 밑에서 돌아다닌다. 이때 異物이 케이스에 충돌할 때에 생기는 초음파(주파수 스펙트럼을 **그림 21**에 들었다)를 檢出하는 것이다.

이같은 GIS의 절연진단장치는 현장에서 간편하게 사용할 수 있으며 검출감도도 높기 때문에 널리 사용되고 있다. GIS의 絶緣信賴性 향상에 큰 도움이 되고 있다.

4. 맺음말

이상 回轉機 및 靜止器 분야에서의 절연진단을 위한 새로운 시험장치에 대하여 토픽的으로 소개했다. 앞으로 操作의 용이성, 소형, 경량화 등의 관점에서 점차 새로운 絶緣診斷裝置가 등장할 것으로 생각되는데 경량화에만 치중하여 精度가 나쁘고 오차가 생기거나 특정한 조건에서만 정확하고 다른 경우에는 誤測의 원인이 되는 장치가 되어서는 안된다. 절연진단의 본질을 잘 이해하여 비파괴절연시험에 의하여 얻어지는 특성과 절연파괴특성과의 상관관계가 명확해야 된다.

절연진단에서는 絶緣劣化 檢出理論과 절연진단기는 이른바 車의 두 바퀴로서 双方이 일체가 되어 전진함으로써 비로소 진보가 탄생한다. 이같은 견지에서 앞으로 電氣機器의 제조자, 사용자, 진단자 상호의 협력과 학계에서의 활발한 움직임을 기대한다.