

# 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

(3)

田 永 國

韓國電氣研究所 電力機器研究委員

## 나. 高壓回轉機

### 1) 絶緣劣化要因

고압회전기의 固定子 권선 절연은 전기적, 기계적 강도가 좋은 絶緣基材(集成 MiCA)와 접착성·내열성이 우수한 舍浸樹脂로 구성되어 있다.

운전중인 고압회전기의 固定子 권선 절연에는 각종 電氣的·機械的·化學的인 Stress가 加해지고 이들 Stress에 의해 절연이 점차적으로 열화하기 시작하는데 回轉機의 사용 용도에 따라 부하상태, 운전시간, 기동정지회수, 사용환경 등이 다양하기 때문에 絶緣劣化要因을 한가지로 取扱하는 것은 곤란하지만 대표적인 劣化要因 및 현상은 表15와 같다.

이들 절연 열화 요인은 각 단독으로 작용할 수도 있고, 각요인들 사이의 상호작용에 의해 복합 요인으로 작용할 수도 있는데 이러한 劣化영향 要因들 사이의 相互관계는 그림17과 같다.

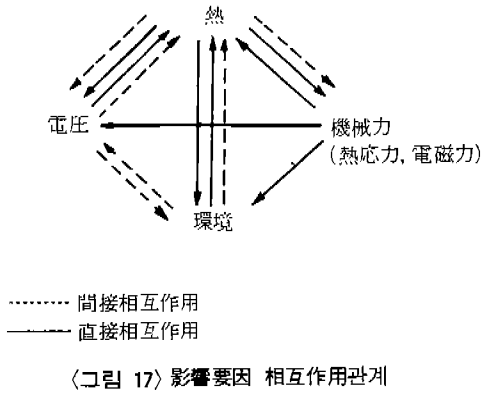
### 2) 絶緣劣化特性

#### 가) 단독요인 열화특성

##### (1) 電氣的劣化

〈表 15〉 絶緣劣化 要因과 現象

劣化要因	劣化因子	劣化現象
電氣	部分放電 ARC TREEING TRACKING	酸化 熱分解 炭化 破壞
	振動 繰返疲勞 熱 CYCLE 熱膨張收縮 衝擊 CREEP	CRACK 破斷 分解 摩耗
化學	熱 HEAT CYCLE	熱分解 酸化分解
	環境 吸濕·吸水 化學藥品 油 塵埃 溶劑 OZONE	膨潤 溶解



전기적 열화는 주로 부분放電, 電氣Treeing, Arc, Tracking에 의해 回轉機 絶緣物の 취약 부분에서 야기되는 절연과피로 인해 絶緣은 점차적으로 열화하기 시작한다.

(2) 機械的劣化

回轉機의 絶緣物은 기동정지, 부하변동 및 돌발적인 短絡 등에 의해 열응력, 반복피로 및 진동응력으로 인한 機械的劣化가 발생하는데 이러한 열화가 발생하면 절연물에 Crack, 破斷, 마모등이 생겨 絶緣物의 機械的強度 및 電氣的特性이 저하하게 된다.

(3) 化學的劣化

가) 열 열화

열 열화에 의한 絶緣物特性 變化는 분해 반응으로 인해 분해 생성물이 생겨 重量감소등 物理的變化가 나타나고 이로 인해 점차적으로 電氣的特性이 저하된다.

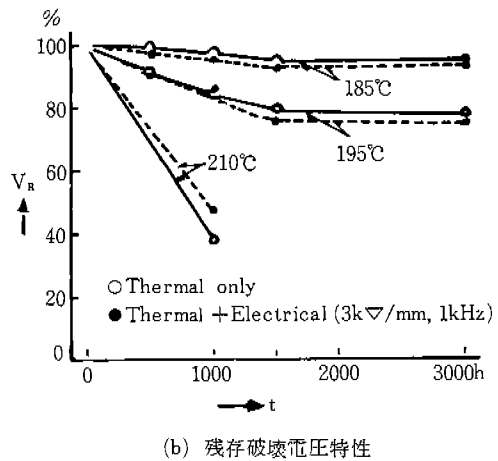
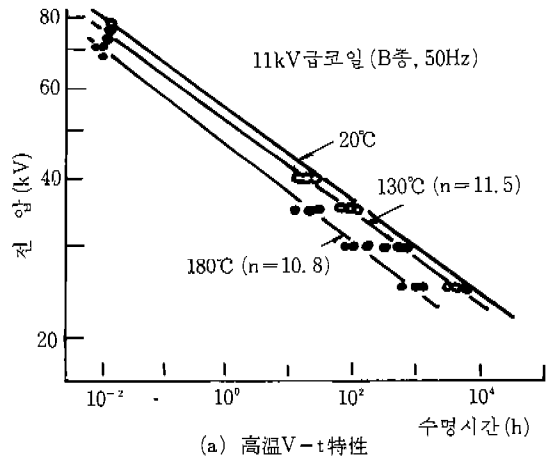
나) 환경열화

전파형인 것을 제외한 모든 回轉機는 운전時에 흡습·화학적약품, 油, 塵埃 및 부식성 Gas에 의해 오손, 膨潤, 용해 및 加水分解가 발생하여 絶緣物의 電氣的, 機械的 特性 저하가 일어난다.

나) 복합요인 열화특성

(1) 열과 전압

열과 전압으로 인한 복합요인 열화에 대한 고압회전기 절연수명 및 殘存破壞電壓 特性을 예로 들면 그림18과 같다. 이것은 열과 전압 Stress의 축차적인 印加로써 얻은 결과로 열열



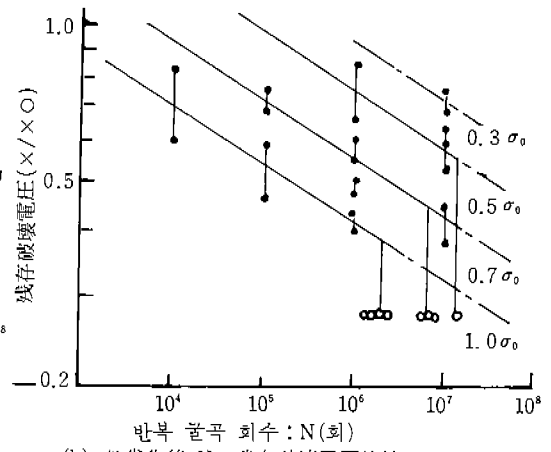
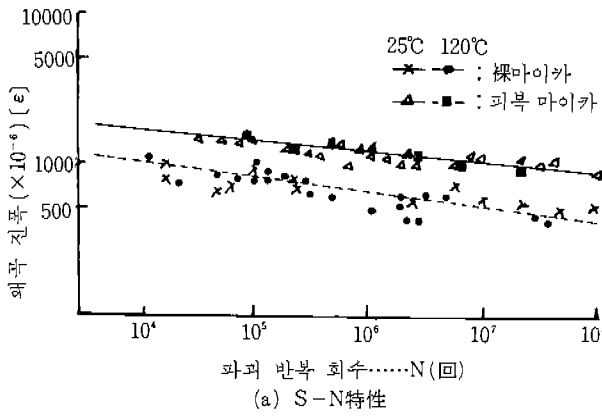
〈그림 18〉(熱-電壓)의 複合要因劣化特性

화가 발생하지 않는 온도에서 V-t특성은 온도가 높아짐에 따라 단시간 쪽으로 이동하고 常溫에서의 특성과 거의 평행한 특성이며 온도가 높아져서 열 열화의 영향을 받으면 기울기가 급하게 된다(그림 18(a) 참조). 잔존 파괴 전압 특성은 열 열화 특성과 거의 비슷한 경향이지만 장시간 영역에서는 전압 열화가 생겨 잔존 파괴 전압이 저하하는 特性을 알 수 있다.

(2) 열과 기계력

열과 기계력에 의한 수명특성 및 잔존과피전압 특성은 그림19와 같다.

그림 19(a)는 기계력에 의한 劣化의 溫度特性



〈그림 19〉 [熱-機械力]의 複合要因劣化特性

을 나타낸 것으로서 高温에서 S-N특성은 N가 작은 쪽으로 평행 이동한다. 그림 19(b)는 200℃에서 30일간 열 열화시킨 후 반복 굴곡회수와 잔존 파괴전압과의 관계를 나타낸 것으로 MiCA와 樹脂 사이에 피로파괴가 일어나 미소 Crack이 생겨 열화는 급격하게 증가한다.

(3) 電壓과 機械力

機械力과 電壓의 複合적인 印加로써 정적 굴곡응력부하일 경우의 V-t 특성은 그림20과 같다. MiCA 絶緣은 높은 굴곡응력 Level이 되면 絶緣層에 Crack이 발생하여 課電수명이 급격히 단축되며, Heat-cycle에 의해 피로 열화를 시킨후 V-t 특성은 단시간 쪽으로 이동하지만 피로 열화를 시키지 않은 경우와 거의 평행한 특성을 나타내고 있다.

3) 故障진단(전동기)

가) 溫度異常

측정온도가 規格值 이내일지라도 통상 운전 상태에서 溫度가 급격히 상승하거나 長時間에 걸쳐서 점차적인 溫度상승이 있을 경우에는 반드시 그 原因에 대한 검토가 必要하다. 참고로 觸手に 의한 溫度추정 基準은 다음과 같다.

- 맨손으로 장시간 촉수 가능한 경우 : 50℃ 이하
- 뜨겁지만 2~10초 정도 촉수 가능한 경우 : 50~60℃

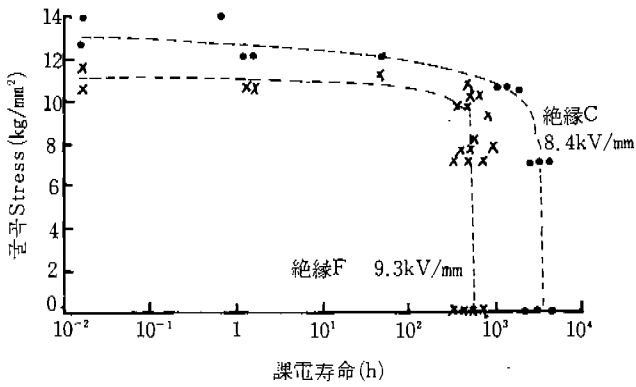
- 잠깐동안만 촉수 가능한 경우 : 70℃ 이상 온도異常상승부위별 故障원인은 다음과 같다.

異常온도상승부위	고 장 원 인
분 체	○과부하
	○공급전압 과부족
	○냉각 불량
	○3상회로의 단상운전
	○고조파 전류 流入
	○여자권선 단락
Bearing	○Grease 充填量 과부족
	○油量, 油種 不良
	○오일링 회전不良
	○Bearing 부차 不良
	○負荷와의 直結不良
	○Belt의 과도한 張力

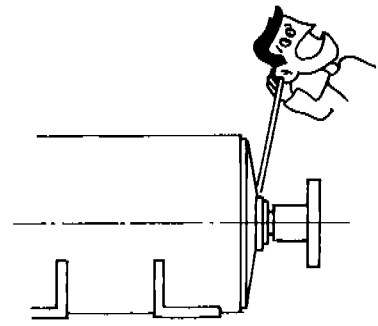
나) 異常音

回轉機에서 발생하는 소리는 크게 나누어 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 磁氣音
- 風音
- Bearing音



〈그림 20〉 정적 굽곡응력 - 과전수명 관계



〈그림 21〉 베어링음 診斷방법

• 기타 접촉음

운전중인 回轉機에서 발생하는 소리의 變化를 잘 감지할 수 있으면 고장을 미연에 檢知하여 사고예방을 할 수 있다. 일반적으로 소리의 간이진단 방법은 막대의 한쪽 끝에 共鳴器를 부착한 전용 청진봉이나 Driver 혹은 금속

봉으로 그림21과 같이 듣고자하는 부위에 한쪽 끝을 접촉시키고 다른 쪽에는 귀를 대어音色, Level을 진단하는 것이다.

異常音 발생 부위별 발생음과 고장 원인은 표16과 같다.

다) 異常振動

〈표 16〉 異常音과 故障原因

종 류	異 常 音	고 장 원 인
Bearing音	리터너음	Grease 부족
	스러스트 落下音	회전중 정상 근처의 비부하권에 있는 스러스트가 충격에 의해 리터너 회전보다 빨리 낙하
	비껴소리	Grease 윤활상태 불량
	상처음	Bearing 제작 결함
	먼지음	Bearing 오손
電 磁 音	정상時보다 클 경우	○Air Gap 불평형 ○Core 이완 ○전류 불평형 ○고조파 전류 유입
회 전 자 음	회전자음에 큰 소리가 발생할 때	가감속중 Torque에 의해 Core와 축의 맞물림이 이완된 경우
부하접속부음	부하접속부에 異常音이 발생할 때	○Coupling 혹은 Pully Boss와 축과의 맞물림 이완 ○Coupling Bolt 마모 ○Gear Coupling의 윤활유 부족 및 톱니바퀴 마모 ○Belt이완, 마모

〈표 17〉 振動의 種類와 原因

종 류	고 장 원 인
電磁氣的 振動	○ Air Gap 불평형
	○ Core 이완
	○ 전류 불평형
	○ 고조파 전류 유입
기계적 振動	○ 부하 결합상태 불량
	○ Belt Coupling Bolt 불량
	○ 기초 Bolt 혹은 회전기부착 Bolt 이완
	○ 회전자 Balance 불량

回轉機의 소음은 대부분 기기의 진동에 의한 것이며 진동 주파수의 크기에 따라 소음으로 느껴기도 하고 단지 진동으로 느껴기도 한다.

(1) 진동의 종류 및 원인

回轉機의 진동의 종류는 '電磁氣的 振動 및 機械的 振動'으로 구분할 수 있으며 그 종류별 진동 원인은 표 17과 같다.

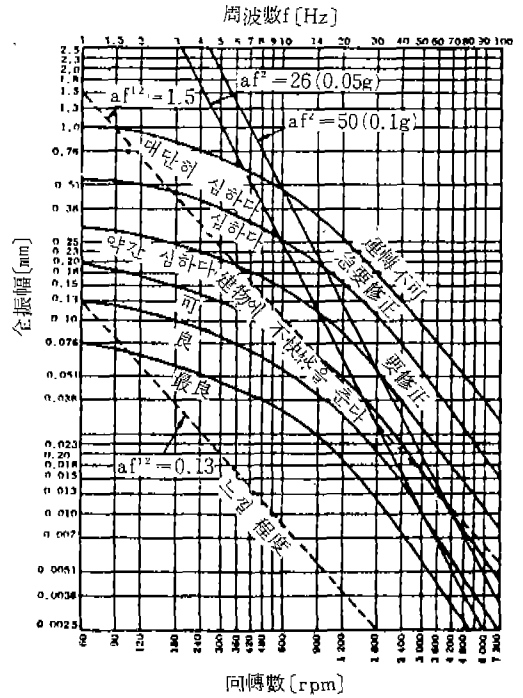
(2) 진동허용치: 그림 22 참조

라) Brush의 異常 마모

Brush의 마모 정도는 Brush의 재질, 주위 환경, 부하 상황에 따라 틀리지만 보통 1000 시간 운전할 때 1~5mm 정도이다. Brush 마모가 많으면 그 분말이 Slip ring 정류자 부근에 쌓여 短絡을 야기시키거나 권선에 부착하여 絶緣 耐力, 絶緣抵抗을 저하시키는 고장을 발생시킨다. 여기서 Brush 이상 마모 원인을 들면 다음과 같다.

(1) Brush의 압력이상

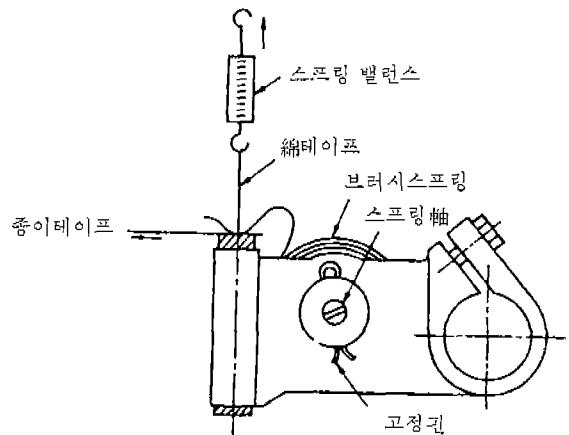
Brush 압력은 너무 강하거나 약해도 좋지 않고 Brush 재질에 따라 제작사에서 제시한 壓力 値로 하는 것이 重要하다. Brush 壓力은 그림 23과 같이 Brush와 Brush 용수철 사이에 종이 Tape를 삽입하고 종이 Tape를 가볍게 당기면서 Spring 저울을 위로 당겨 종이 가 갑자기 움직이기 始作할 때의 눈금을 2~3회 읽어서 그 平均 値를 Brush 面積으로 나누어 구한



〈그림 22〉 振動 許容值 (Rathborne의 評價曲線)

다. Brush 壓力은 고정 Pin을 Spring 축에서 뽑고 Spring 축을 回轉시켜 조정한다.

- (2) Brush 재질의 異種 재질 混用
- (3) Brush의 固着



〈그림 23〉 용수철 壓力 측정

Brush Holder와 Brush 사이의 간격은 보통 두께방향 0.05~0.25mm, 축 방향 0.1~0.3mm 정도를 基準으로 하는데 먼지 등에 의해 Brush Slip이 저해된다.

- (4) Brush의 용수철 소손
- (5) Brush Pig tail의 접촉 불량
- (6) Brush의 異常진동

마) 整流不良

직류기의 고장은 整流子에 관계되는 것이 대단히 많으므로 整流子의 취급에 세심한 注意를 할 필요가 있다. 整流子의 整流不良 원인을 보면 다음과 같다.

- (1) 整流子面 오손
- (2) 整流子의 異常溫度
- (3) 整流子의 變形
- (4) 여자 Coil, 보상 Coil 短絡
- (5) 라이저 部分의 接觸不良

바) 起動時의 異常

Switch를 넣어도 起動되지 않는 경우는 回轉機에 어떤 異常이 있는 것이므로 즉시 Switch를 끄고 점검해야 한다. 起動時의 異常種類 및 원인을 보면 表18과 같다.

4) 絶緣劣化診斷

高壓 回轉機의 수명과 절연, 신뢰성에 관계되는 절연층 내부의 결점검출, 결점이 절연수명에 미치는 영향, 절연특성 측정 및 절연열화

〈표 18〉 起動時 異常種類 및 原因

종 류	고 장 원 인
기계소리가 나지 않을 경우	○전원축 고장 ○ 1차권선의 2상이상 단선. (3상회전기) ○전기자 구출선 단선(직류기)
異常잡(울림)이 발생할 경우	○ 1상이 결상되어 단상 운전 ○ 2차측회로에 1상단선 또는 접촉 불량 ○고정자 권선의 오결선 ○고정자권선의 층간 또는 상간 단락 ○회전자권선의 층간 또는 상간 단락

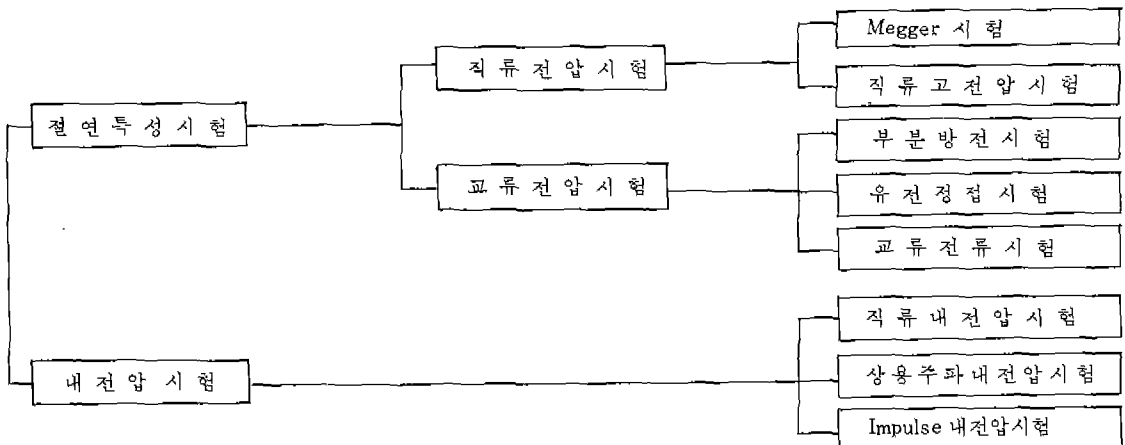
정도를 判定하는 것은 기기의 운전에 必要한 절연내력의 보유 有無를 판단하는데 대단히 중요하다. 回轉機 권선의 絶緣劣化 診斷試驗은 주로 비파괴 절연시험으로, 그 시험항목은 表 19와 같다.

가) 絶緣劣化診斷試驗

(1) 絶緣抵抗試驗

- 절연내력시험 전후의 이상유무 확인

〈표 19〉 絶緣試驗方法



〈표 20〉 Megger의 종류 및 측정범위

측정회로	Megger 종류	측 정 범 위
저압회로	500V Megger	0~100MΩ 혹은 1~1,000MΩ
고압회로	1,000V Megger	2~2,000MΩ
	2,000V Megger	5~5,000MΩ

- 고장 발생시 절연불량 감소 판정
- 운전중인 기기의 절연열화정도 조사
- 정지중인 기기의 운전 개시전 절연저항보유 유무 확인

기기의 絶縁抵抗은 절연저항계를 사용하여 측정하고 보통 사용되고 있는 Megger의 종류 및 測定범위는 표20와 같다.

기기의 절연저항값은 시험시의 주위 환경에 영향을 많이 받기 때문에 測定시의 온도 및 습도를 반드시 기록하여 둘 필요가 있다. 이 값은 회전기의 구조, 치수, 용량, 시험전압 등에도 영향을 받기 때문에 그 값의 크기로서 절연열화 상태를 판정하는 것은 곤란하다. 따라서 정기적으로 절연저항값을 測定하여 장기적인 變化를 보고 판정하는 것이 좋다.

(2) 직류 고전압시험

이 試驗은 回轉機에 직류 고전압을 인가하여 이때 흐르는 전류를 측정하여 전류-시간 특성(흡수특성), 절연저항-전압특성 등에 의해 기기 절연불의 열화상태를 判定하는 것으로 절연물에 직류고전압 인가시 흐르는 電流 I(t)는 다음과 같이 표현된다.

$$I(t) = I_a(t) + I_r \dots\dots\dots (1)$$

$I_a(t)$  : 흡수전류

$I_r$  : 누설전류

여기서 누설전류  $I_r$ 은 時間에 대해 거의 일정하지만 흡수전류  $I_a(t)$ 는

$$I_a(t) = kt^{-n} \dots\dots\dots (2)$$

$k$  : 정수

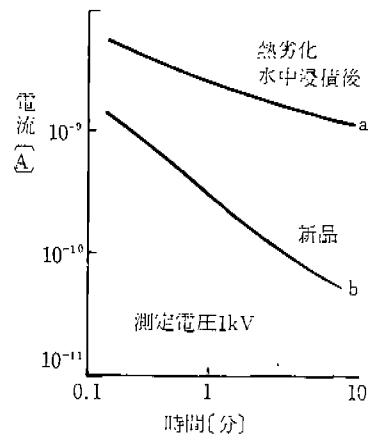
(2) 식으로 표현되며 흡수전류-시간특성을 Log-Log Graph에 나타내면 기울기  $n$ 인 직선으로 된다.

따라서 흡수전류가 시간이 흐름에 따라 점차적으로 감쇠하기 때문에 전류  $I(t)$ 는 시간이 경과함에 따라 누설전류의 영향이 크게 나타나 점점 선형(직선) 특성에서 멀어지게 된다.

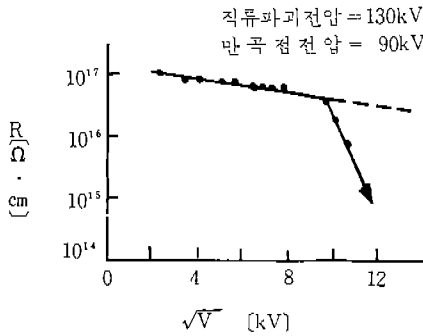
전류-時間특성에서 절연저항 및 成極指數 (PI: Polarization Index) 指標가 구해지는데 절연저항은 인가전압을 누설전류( $I_r$ )로써 나눈 값이며 흡수전류의 감쇠가 장시간을 요하기 때문에 일반적으로 電壓 인가후 1분 혹은 10분 후 전류 [ $I(t)$ ]로 나눈 값이 사용되고 있고, 成極指數(PI)는 전압 인가후 1분후 전류를 10분후 전류로서 나눈 값이다. 이러한 전류-시간특성의 예를 보면 그림24와 같다.

절연층이 건전한 경우는 누설전류가 극히 적기 때문에 흡수전류는 거의 선형(직선)적으로 저하하는 곡선a와 같은 흡수특성을 나타내며 이때의 PI값은 상당히 크다. 절연층이 흡수되고 표면이 오손 흡수된 경우에는 누설전류의 크기가 크기 때문에 곡선b와 같은 흡수특성을 나타내고 이때의 PI값은 작아지게 된다.

절연저항-전압특성에 대해서는 낮은 전압 영역에서의 누설전류는 OHM 법칙에 따르기 때문에 전압에 대한 절연저항은 일정하지만 높은 전압으로 되면 ion 電流가 증가하여 지수함수적으로 전류가 급증하여 絶縁抵抗은 저하하며 더 한층 전압이 높아지게 되면 결국에는 절



〈그림 24〉 전동기 코일의 흡수 특성



〈그림 25〉 log R -  $\sqrt{V}$  特性

연파괴에 도달하게 된다. 이러한 현상에 착안하여 絶緣物의 절연파괴전압을 추정하는 방법이 제안되고 있다.

이 방법은 그림25에 나타나 있는것 같이 절연저항-전압특성을  $\log R - \sqrt{V}$ 의 관계로 나타내어 이때 나타나는 灣曲点 電壓에서 절연파괴 電壓을 추정하는 것이다.

참고로 灣曲点 電壓과 절연파괴 電壓과의 관계를 예들들면 다음과 같다.

○Asphalt Compound 절연: 灣曲点 電壓의 약 1.9배 정도

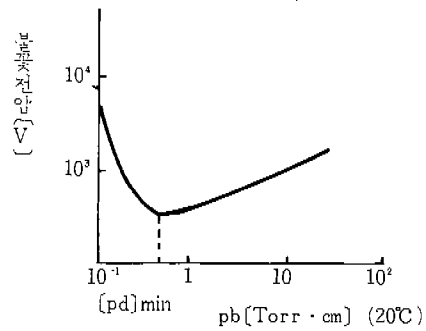
○Epoxy 제 절연: 灣曲点 電壓의 약 1.5배 정도

(3) 部分放電試驗

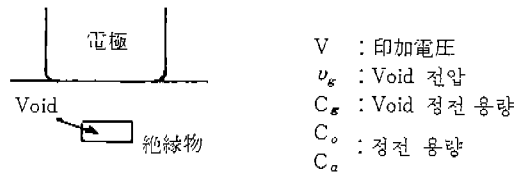
Paschen 법칙에 의해 일반적으로 금속전극 사이의 Gap에서 불꽃放電이 발생하는 電壓은 氣體壓力 (p)와 Gap길이 (d)의 곱(pd)의 함수로써 表現된다.

공기에서의 예를 보면 그림26과 같고 pd가 작은 범위에서는 pd가 증가함에 따라 불꽃電壓은 낮아지고 (pd)min에서 최소불꽃전압으로 되며 이 이상의 영역에서는 (pd)값이 상승하면 불꽃電壓도 같이 상승한다. 20°C에서 공기의 (pd)min은 0.57(Torr·cm)이고 이 때의 最小불꽃電壓은 330V(파고치)이다.

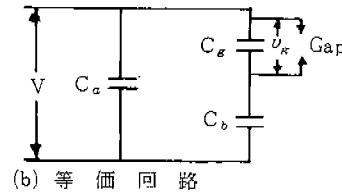
部分放電이란 絶緣物 내부의 Void 혹은 절연체 表面에서 部分的으로 발생하는 미소한放電을 말하는데 이러한 Void의 불꽃 電壓도 Paschen 법칙이 적용가능하다.



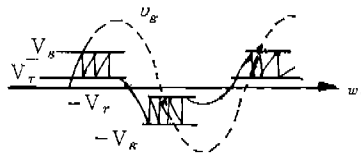
〈그림 26〉 공기의 불꽃 전압 (Paschen 법칙)



(a) 絶緣物中の Void



(b) 等価回路



(c) Void 전압의 시간적 변화

〈그림 27〉 Void부분방전

그림27은 部分放電 현상을 나타낸 것인데 그림 (a)와 같이 電極 사이의 절연물 내부에 Void가 있고 電極間에 교류電壓을 인가하면 그림 27(b)와 같은 등가 回路로써 나타낼 수 있고 이때 Void에 걸리는 電壓의 時間的 變化는 그림 27(c)와 같이 된다.

전극간 인가전압[V]이 상승하면 Void에 걸리는 電壓[V<sub>g</sub>]도 점차적으로 상승하여 Void放



電壓 (Paschen의 불꽃전압)  $[V_g]$ 에 도달하면 Void에서 불꽃放電이 생겨 Void에 걸리는電壓  $[V_g]$ 은 잔유전압  $[V_r]$ 까지 급격하게 저하한다. 이러한 과정은  $[V_g]$ 가 상승하지 않을때까지 인가電壓의 極性이 바뀌어도 계속되며 이들 放電 形成 시간은  $1[\mu s]$ 이내의 극히 단시간에 끝나는 것으로 放電할 때에는 部分放電 Pulse라고 부르는 Pulse性 電流가 흐른다.

部分放電 Pulse 발생 개수는 인가전압이 높으면 높을수록 增加하고 발생하는 位相幅도 점차적으로 넓어지게 되며 또한 실제의 絶緣物 내부에는 크기가 다른 Void가 많이 존재하기 때문에 部分放電 발생빈도가 많아지게 된다.

部分放電試驗에서는 부분방전 개시전압  $[V_i]$ , 소멸전압  $[V_e]$ , 방전전하  $[q]$ , 최대방전전하  $[q_{max}]$  및 발생개수  $[N]$  등을 測定한다. 部分放電檢知法에는 부분방전 Pulse 전류검출, 부분방전 발광관찰, 放電音 檢出,  $O_3$  檢出 등이 있지만 일반적인 검지법으로 Pulse 전류를 檢出하여 指示回路에 전달하는 방법에는 廣帶域法과 同調法이 있는데 각 回路를 이용한 部分放電 測定器가 시판 되고 있고 두 방법을 비교하면 表21과 같다.

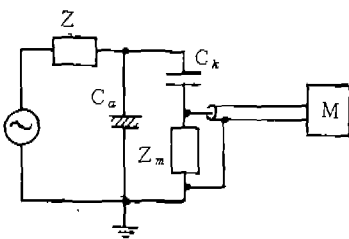
部分放電試驗의 기본적인 測定回路는 그림

28과 같은데 그림 28(a)에서는 測定裝置(M)가 結合 Condenser의 接地側에 있기 때문에 被試品이 接地되어 있는 경우에 유용하고 部分放電에 의한 Pulse 전류는 結合 Condenser ( $C_k$ )를 통해서 검출 Impedance ( $Z_m$ )에 Pulse 電壓으로 나타난다. 測定裝置(M)에서는 신호에 포함된 상용주파전압을 제거하고 이 신호를 增幅시킨후 設定電壓 이상의 Pulse를 계수하게 된다.

이때 測定裝置 주파수 대역 내에서 被試品에서 발생하는 放電 Pulse가 전원 Impedance를 통해 Bypass하는 것을 막기 위해 被試品을 전원으로 부터 폐쇄 Impedance  $[Z]$ 로써 Blocking 시켜야 한다.

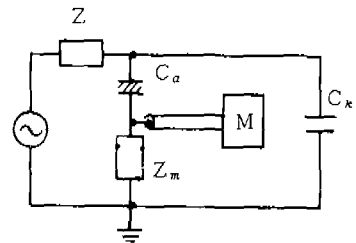
그림 28(b)는 測定裝置가 被試品の 低壓側에 연결되기 때문에 시료를 接地로부터 Floating시켜야 한다. 이 回路에서는 잡음 방해를 제거하는데 다소 이점이 있는데  $C_k$ 가  $C_a$ 에 비해 크면 잡음은 대략  $C_a/C_k$ 비로 감소한다.

回轉機 권선이 열화하여 절연층에 Crack, 剝離, Void등이 생기면 이들 결점부분에서 部分放電이 일어나는데 이러한 部分放電 開始電壓  $[V_i]$ 은 절연층 내부에 存在하는 Void 중에서 가장 낮은 電壓에서 放電하는 Void의



(a) 供試物이 接地된 경우

- $C_a$  : 공시물
- $C_k$  : 결합 콘덴서
- M : 측정 장치
- $Z_m$  : 검출 임피던스
- Z : 폐쇄 임피던스



(b) 저압측에 검출 임피던스를 접속할 수 있는 경우

〈그림 28〉 부분 방전 시험 기본 회로

〈표 21〉 部分放電 測定法

측정장치	중주파수대역	Pulse분해능력	Radio방해	가격	기	타
광대역방식	수KHz ~ 수MHz	0.1 ~ 10 $\mu s$	제거 곤란	고가	Pulse파형을 비교적 충실하게 관찰할 수 있다.	
동조 방식	400 $\pm$ 45KHz	25 $\mu s$	제거 용이	저가	출력파형은 모두 같기 때문에 구별할 수 없다.	

放電開始電壓을 나타낸다.

따라서 Void가 하나인 경우에는  $V_i$ 의 시간적變化로써 絶緣物의 열화정도를 추정할 수 있지만 실제 回轉機의 絶緣物에는 크기가 다른 Void가 多數 포함되어 있는 경우가 많기 때문에  $V_i$ 에 의한 열화 판정은 대단히 어렵다. 部分放電試驗은 絶緣物의 평균 絶연 열화정도를 測定하는 것이 아니라 국부적인 絶연결점을 測定하는 것으로 絶연物의 最大放電 電荷 [ $q_{max}$ ]를 測定하여 국부적인 絶연 열화정도를 檢出하고 있다. 그림29에서는 最大放電 電荷 [ $q_{max}$ ]와 絶연 파괴전압과의 관계를 나타내고 그림30에서는 부분방전 누적빈도 분포 특성(N-q특성)을 나타낸다.

최대방전 전하( $q_{max}$ )가 많으면 絶연物의 絶연 파괴 전압이 低下하고 있고 또한 絶연 열화가 진행되면 방전전하( $q$ )가 많아지고 방전 발생개수  $N$ 도 增加하는 경향을 볼 수 있다.

(4) 誘電正接 試驗 ( $\tan \delta$  시험)

絶緣物에 교류전압을 인가하면 누설전류, 誘電分極, 部分放電 등에 의해 손실이 발생하기 때문에 그림31과 같이 인가전압  $\dot{V}$ 에 대한 전전류  $\dot{I}$ 는 충전전류  $\dot{I}_c$ 보다 지연된다. 이때 지연각  $\delta$ 를 誘電損角이라고 한다. 일반적으로  $\delta$ 는 매우 적기 때문에

$$\cos \varphi = \sin \delta \cong \tan \delta \dots\dots\dots (3)$$

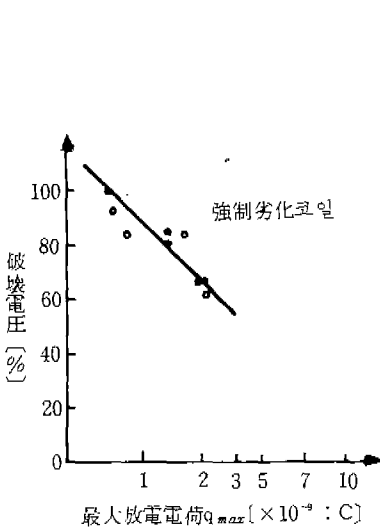
의 관계가 성립하고 여기서  $\tan \delta$ 를 誘電正接이라고 부른다.  $\tan \delta$ 값은 絶연物의 형상이나 치수에 관계없이 그 絶연物 고유의 값이므로 물질의 性狀을 나타내는데 사용되고 있고 이 값은 絶연物의 국부적인 것을 나타내는 것이 아니라 平均化된 性狀을 나타내고 있다.

絶연物의  $\tan \delta$ 는 絶연物 性狀, 불순물 잔유, 絶연열화 혹은 Void에서의 部分放電에 의한 손실 등에 의해 그 固有값으로 부터 벗어나기 때문에 회전기 권선의 품질관리나 絶연 열화 판정에 널리 使用되고 있다.

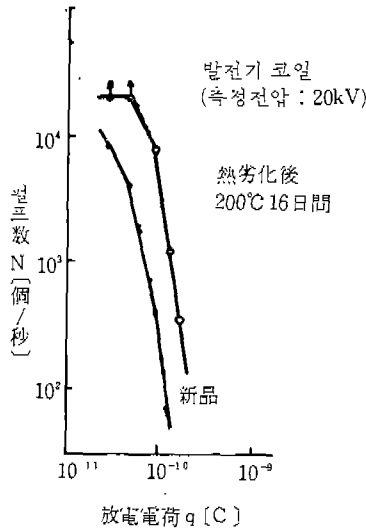
$\tan \delta$  시험에서는 絶연층의 건조 흡습정도, 열화상태 및 Void 유무 등을 추정 可能케 하며 일반적으로 그림32와 같은  $\tan \delta$  - 電壓特性을 보여주고 있다.

部分放電이 발생하지 않은 낮은 전압에서의  $\tan \delta$  값을  $\tan \delta_0$ 라고 하며, 이 값은 누설전류 및 유전분극 등에 의한 손실로써 생긴 材料 固有값인데 絶연층 흡습정도, 絶연층 표면오손상태 및 絶연열화 진행 등에 의해 變한다.

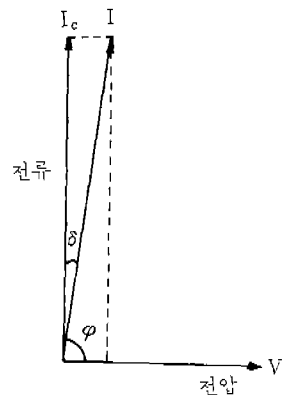
일반적으로 絶연층이 흡습 및 표면오손되어 絶연저항이 저하되면  $\tan \delta_0$ 는 增加하고 인가전압을 상승시켜 部分放電이 發生하면 部分放電에 의한 損失이 첨가되기 때문에  $\tan \delta$  값이



〈그림 29〉 最大放電電荷 - 破壊電壓 關係



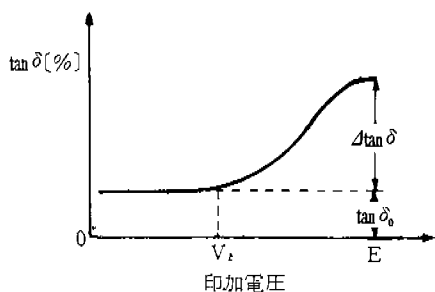
〈그림 30〉 누적 빈도분포



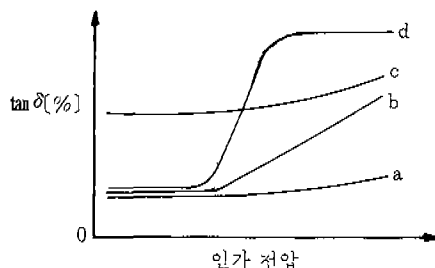
〈그림 31〉 絶연物의 전류-전압 기본 Vector 도

〈표 22〉  $\tan \delta$  측정장치

측 정 장 치	精 度	特 徴
Schering Bridge	측정치 $\pm 3\%$ , 단 정확도 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 이상(절대치)	○표준형 정밀급 장치 ○측정대상으로서 비접지 피시품이어야만 가능
역 Schering Bridge	"	○据付式 혹은 可搬式이다. ○접지 피시품도 측정 가능하며 현지시험에 사용된다.
간이 Schering Bridge	최대눈금의 $\pm 4\%$	○직독, 可搬式 ○측정대상에 따라 계기용, Condenser용 등으로 분류된다.
간이역 Schering Bridge	최대눈금의 $\pm 10\%$	○직독, 可搬式 ○접지 피시품도 측정 가능하고 조작이 간단해 현지시험에 잘 사용된다.
$\tan \delta$ 計	$\pm 5 \times 10^{-3}$ (절대치)	○직독, 휴대용 지시계기 ○측정정도는 Bridge 법보다 낮다.



〈그림 32〉  $\tan \delta$  - 電壓特性



〈그림 33〉 절연 열화로 인한 절연물의  $\tan \delta$  - 전압 특성 변화

크게 된다. 정격전압 [E]에서의  $\tan \delta$ 값과  $\tan \delta_0$ 값과의 차이를  $\Delta \tan \delta$ 라고 부르는데 절연층 중에 Void가 있으면 Void에서 部分放電이 일어나  $\tan \delta$ 가 增加해  $\Delta \tan \delta$ 값도 커지게 된다. 따라서  $\Delta \tan \delta$ 는 部分放電에 의한 損失에서 발생하기 때문에 이 값이 작은 편이 양호한 절연이다.

回轉機 권선의 절연열화에 의한  $\tan \delta$  - 電壓特性 변화의 일반적인 경향은 그림33과 같다.

절연층이 건전한 경우에는 인가전압이 상승해도 누설전류 등에 의한 손실의 增加 정도로 曲線a와 같은 거의 평평한 電壓特性을 나타내고 절연층에 Crack이나 Void가 생기면 部分放電이 발생하기 때문에 部分放電 개시전압보다 높은 전압에서  $\tan \delta$ 가 增加하는 曲線b와같

은 특성이며 절연층의 Crack이나 Void가 흡습되면 曲線c와 같이  $\tan \delta_0$ 값이 크게 된다. 또한 절연층에 層狀의 Crack이나 Void가 있을 경우에는 曲線d와 같이 인가전압이 높은 영역에서 다시 평평한 전압특성을 나타내고 절연층 표면이 오손 흡습한 경우에는 c와 같은 특성을 나타낸다.

이러한  $\tan \delta$ 測定장치로는 다음과 같은 Bridge 回路가 있다.

- Schering Bridge
- 간이 Schering Bridge
- 역 Schering Bridge
- 간이역 Schering Bridge
- 손실각계

이들 장치의 특징은 표22와 같다. (계속)