

電氣設備의 새로운 技術診斷 ②

絶緣材料의 劣化診斷技術

成 英 權

高麗大工大 電氣工學科 教授

1. 序 論

高度로 機能이 발전한 現代社會에서는 이에 수반하여 電力需要의 增大와 각종電氣設備의 多樣化와 複雜化時代에 들어간 오늘날 만일에 電氣設備의 사고가 발생했을 경우 그 복구에 많은 노력과 시간이 소요되어 그 경제적 손실이 막대하다. 한편 省資源, 省에너지의 추세에 들어감에 따라 단순히 電氣設備가 設計壽命에 이르렀다고 하여 捨사리 更新되는 것이 아니며 보다 더 그 設備의 延命을 도모하는 것이 강하게 요망되고 있다.

이러한 시점에서 各種電氣設備의 絶緣診斷의 정기점검을 통해 신뢰성의 확보와 수명의 延命을 도모하게 되어 있으나 그 基本問題는 그 主된 構成物인 絶緣材料의 劣化이다.

원래 劣化란 사용상태의 유무에 관계없이 시간의 경과와 더불어 특성이 나빠지는 현상을 뜻한다. 따라서 劣化의 척도는 수명이며 이것은 破壞壽命과 特性壽命으로 나누어진다. 劣化現象의 원인에는 여러 가지가 있으나 현상으로서서는 電氣的, 機械的, 熱的, 物理的, 化學的 등의 작용에 의해 그 특성변화로써 생긴다. 가령 아주 낮은 電界에서도 長時間課電된 상태에서는 絶緣破壞가 일어나는 경우가 많으나 그 원인으로서서는 역시 絶緣物내의 Void나 表面에서의 氣中코로나, 또는 이온電氣에 의한 전기분해물질의 生成이나 空間電荷의 발생, 열에 의한 화학적, 기계

적 변질 등이 있다.

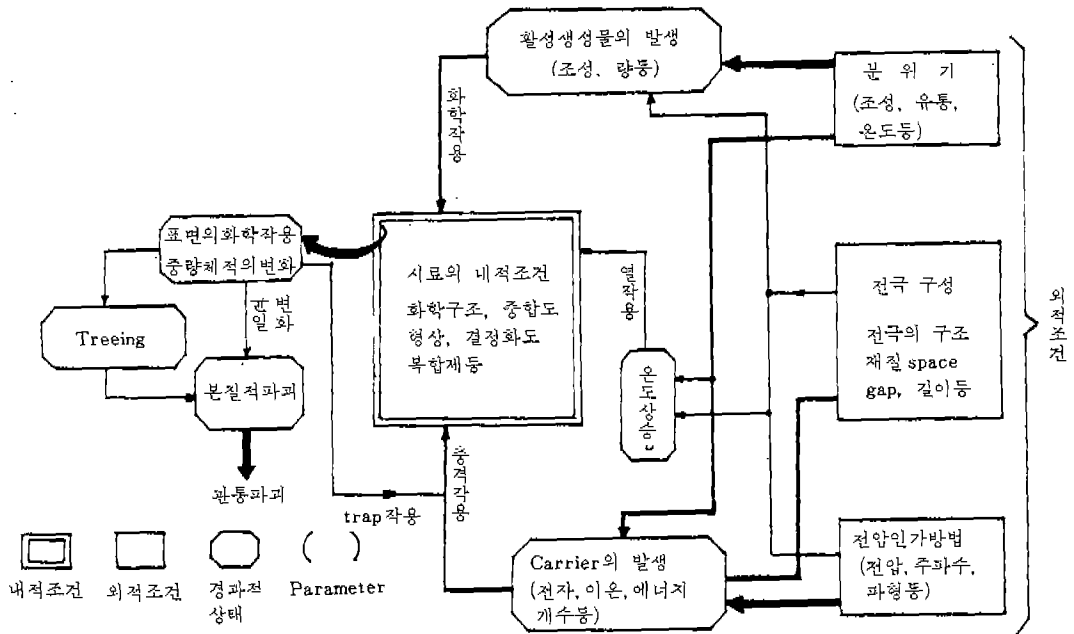
여기서는 이와같은 絶緣劣化形態와 그 檢出方法에 대해 概說하되 絶緣材料의 劣化診斷法의 輪廓을 파악하는데 一助가 되었으면 한다.

2. 絶緣材料의 劣化形態와 劣化診斷의 基本

絶緣材料의 劣化形態는 복잡 다양한 원인에 의해 달라지나 우선 絶緣材料의 분위기나 經時變化에 따르는 劣化過程을 요소적으로 圖式化하면 대체로 그림 1처럼 되어서 복잡 다양한 요인이 혼합하여 가지각색의 劣化形態가 나타남을 알 수 있다.

특히 Treeing과 같은 불균일성 劣化는 예측 불가능한 不確定性요소를 가지고 현 단계에서는 그 거동에 대해서 현상적인 관찰 등이 행해지고 있을 뿐이다. 이러한 각종 복잡다양한 劣化要因, 形態 및 主要原因을 表記하면 표-1와 같다.

이와 같은 絶緣物의 劣化診斷은 實用物의 경우 必然的으로 非破壞로 行하여야 하며 따라서 劣化에 수반하는 여러形態를 檢出하여 이로부터 劣化의 정도를 判別하는 것이 노화진단의 기본이다. 따라서 이들의 노화형태가 劣化程度와 어떻게 相關되며 그 劣化가 앞으로 어떤 속도로 진행되는가를 파악해둘 필요가 있다. 그리하여 각각의 형태파악에서 豫測



〈그림-1〉 열연체의 열화 Process의 도식적표시

〈표-1〉 각종 열연재료의 劣化形態

열화요인	형태	주요한원인
○전기적	○부분방전→절연열화→파괴 ○Tracking...표면Leak→탄화수손파괴 ○이상전압...절연체파괴	○외상·과도의 굴곡에 의한 변형·파상 ○외뢰, 개폐 Surge의 침입
○물리적 (물리적+전기적)	○고온...연화→변형 경화→균열발생 ○저온...균열발생 ○Water Tree→절연열화→파괴	○허용전류이상의 통전 ○과전류통전○굴뚝, 증기관동의 고온물과의 근접 ○저온에서의 과도의 굴곡과 충격 ○외상부에서의 침식 또는 흡습+급준한 전계
○화학적	○평윤→파열, 색 Vinyl의 변화 ○경화→균열발생 ○용해 ○화학적 Tree→절연저하→파괴	○기름, 유해성약, 폐유와의 접촉, 침적 Polyethylene은 계면활성제가 있어서 Crack발생 ○고온의 벤젠, 톨루엔, 크실렌과의 접촉 ○SO ₂ , H ₂ S 등을 포함한 물 Gas와의 접촉
○기계적	○절연체의 변형, 외상, 균열, 파괴 ○Tracking, Water Tree, 부분방전 →절연열화→파괴	○중량물낙하, 돌기물존재 등에 의한 외상, 과도의 굴곡과 비틀림 ○기계 응력+부식성 Gas
○동물해	○절연체의 훼손→절연파괴	○흰개미에 의한 해 ○쥐에 의한 해

하여 각종 絶緣診斷法 中에서 最適이라고 생각되는 方法을 택하여 측정 진단하는 것이 肝要하다.

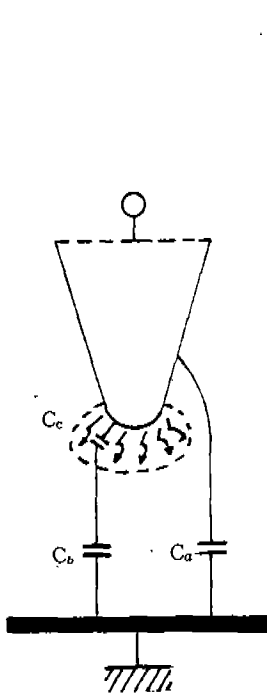
3. 絶緣材料의 劣化 診斷法

前述한 絶緣材料의 노화형태를 檢知하는 方法에 는 여러가지가 있다. 가령 外觀의 변화에 수반하는 것이나 각종 분위기(酸素나 水分)에기인한 劣化 등 에 따라 적용시키는 絶緣劣化 진단법이 다르나 各種 劣化診斷法의 全貌는 표 2와 같다. 여기서 표 2 중 저면관계상 가장 널리 활용되고 있는 部分 放電法, 直流누설법 및 $\tan \delta$ 법의 원리에 대해서만 概說하기로 한다.

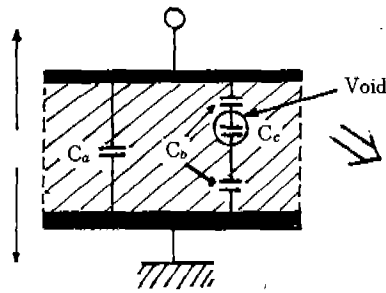
3-1. 部分放電法

絶緣体내에 局部的인 傷處나 Void등의 결함이 있으면 高電界에 의해 이 部分이 放電하여 소위 部分 放電이 발생한다. 따라서 이 放電을 檢出 함으로써

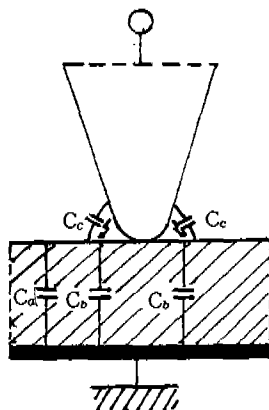
絶緣体的 局部的인 결함을 檢知하는 것이 部分放電法이다. 가령 전기기기나 케이블 등의 絶緣体내에 Void가 존재하는 경우 또는 전극단과 絶緣体 표면 사이에 공극이 있는 경우의 部分放電狀態는 그림 2~4에 나타낸 바와 같이 내부 보이드放電, 沿面放電 및 코로나放電의 세 종류로 대별된다. 이들의 放電은 어느 경우나 電極과 電極사이를 橋絡되게 발생 하는 것이 아니라 電極에 끼어진 絶緣体的 一部分에서 放電하는 部分과 나머지 放電하지 않는 健全한 絶緣체로서 이루어지고 있다. 따라서 이들의 等價回路는 供試体的 靜電容量 C_a , Void의 靜電容量 C_c , C_c 에 直列로 삽입된 健全部分의 靜電容量 C_b 라 하면 그림 5와 같다. 이 그림에서 電極間에 電壓 V 가 印加되면 C_b 와 C_c 로 分壓된 電壓 $\Delta V = \frac{C_b}{C_c + C_b}$ 가 C_c 에 가해져 이 ΔV 가 C_c 의 間隔이나 형상 등으로 정해지는 불꽃 放電에 이룰때 部分放電이 발생한다. 通常 $C_a \gg C_b$, $C_a \gg$



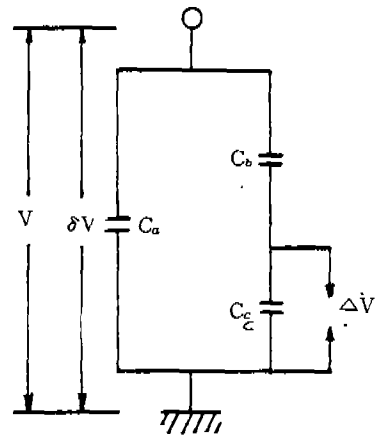
〈그림-2〉 코로나放電



〈그림-3〉 Void放電

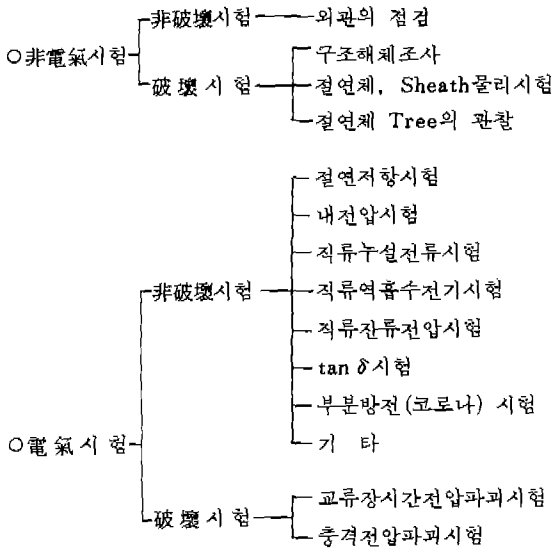


〈그림-4〉 沿面放電



〈그림-5〉 部分放電의 等價回路

〈표-2〉 각종절연열화진단방법의 전모



C₀로 볼 수 있으므로 放電의 크기도 대단히 작다. 그러나 이들의 放電이 장시간 계속하여 발생하고 있으면 絶緣体는 차츰 劣化되어 결국 全路破壞에 이르게 된다.

이와 같은 放電의 경우 1회의 部分放電에서 잃는 放電電荷 Q는 그림 5에서 C₀가 ΔV로서 放電한 경우 다음 식으로 주어진다. 단 C_a ≫ C₀, C_a ≫ C₀이다.

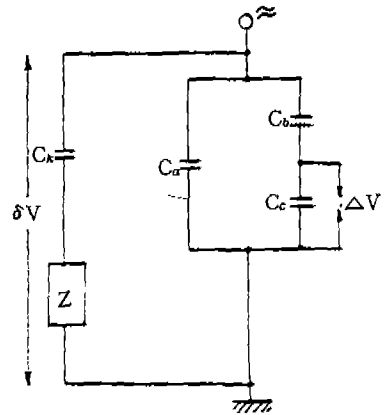
$$Q = \frac{C_a C_0}{C_a + C_0} \Delta V = \frac{C_a \cdot C_0}{C_a} \Delta V = C_0 \Delta V \quad (1)$$

따라서 C₀와 ΔV는 Void가 커지면 크게 되므로 결국 Q는 Void 등의 절연체내의 결합에 관련됨이 추정되어 측정적도에 有用하다는 것을 알 수 있다.

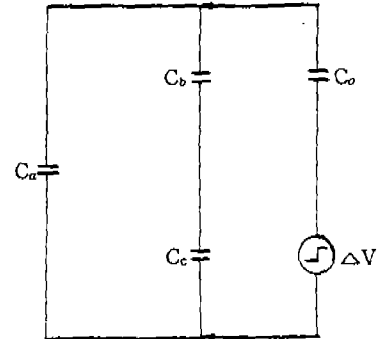
한편 部分放電 Q에 의해 電極間 C_a의 兩端에 생기는 電壓變化 δV는 ΔV가 C_a와 C₀로 分压된 C_a의 兩端電壓으로 (2) 식으로 주어져 放電電荷에 比例하고 供試體의 靜電容量에 逆比例한다.

$$\delta V = \frac{C_0}{C_a + C_0} \Delta V = \frac{C_0}{C_a} \Delta V = \frac{Q}{C_a} \quad (2)$$

이와 같은 檢出은 電壓이 아니라 실지로는 그림 6에 나타낸 바와 같이 C₀인 結合콘덴서를 통해서 檢出임피던스의 Z를 접속시키고 이 檢出임피던스



〈그림-6〉 부분방전의 검출방법



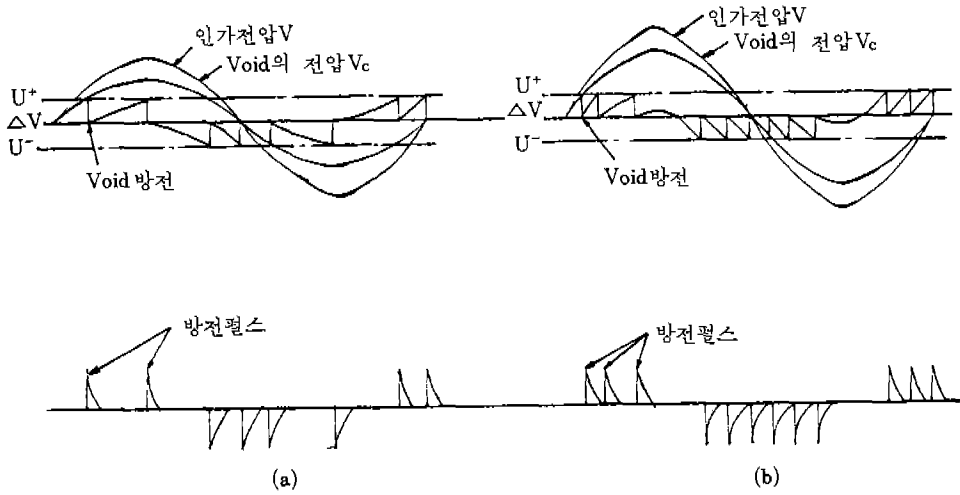
〈그림-7〉 부분방전의 교정원리

兩端의 電壓變化를 增幅시켜 放電電荷 Q로서 체크한다. 그 이유는 δV가 供試體(C=C_a)에 따라 상이하고 放電電荷를 精確하게 표시하지 않기 때문이다.

따라서 放電電荷 Q의 校正은 그림 7에 나타낸 바와 같이 C₀를 대표하는 靜電容量 C₀를 통해 C_a의 兩端에 ΔV에 대응한 直角波를 加하여 δV와의 關係를 구하므로써 이루어진다.

한편 이와같은 供試體에서 발생하는 部分放電의 빈도는 Void의 大小, 數 또는 供試物의 Virgin如何 등에 따라 달라지며 아울러 나타나는 펄스의 크기가 大小 여러가지가 있어 放電電荷가 다양하게 변화하기 때문에 대단히 복잡하여 再現性있는 데이터를 얻기 힘들다.

그림 8은 그림 5의 等價回路에 交流電壓 V를 印加한 경우의 部分放電의 반복상태를 나타낸 것으로

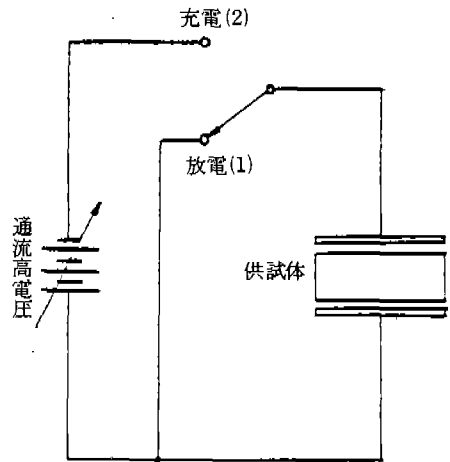


(그림 - 8) 교류전압인가시의 방전발생의 양상

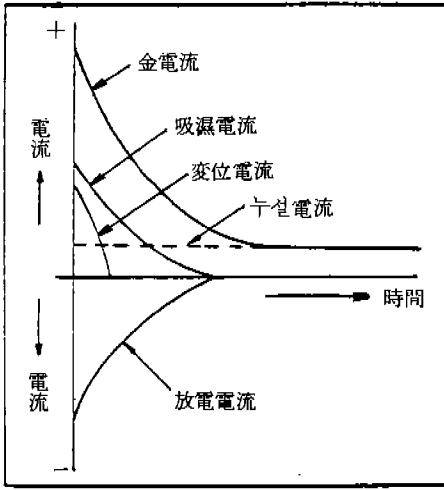
V가 낮에서 正으로 상승해 가면 Void에 加해지는 電壓 V_c 도 이에 비례하여 상승하며 이것이 Void의 放電電壓 U^+ 로 되면 방전이 일어나 交流의 周期에 비해 대단히 짧은 시간(0.1 μ sec이하)에 ΔV 만 低下하여 Void의 電壓은 거의 零으로 되어 放電은 停止한다. (그림에서 V^+) 印加電壓을 더욱 상승시키면 Void 電壓이 다시 U^+ 로 되고 방전이 일어난다. 다시 印加電壓이 正의 最大値에서 負로 변화하면 Void에 加해지는 電압도 같은 식으로 변화하여 U^- 의 放電電壓에 이르면 放電이 일어난다. 이와 같은 機構로 放電이 시간적인 변화에 의해 반복하여 일어난다. 따라서 單一 Void의 경우에는 印加電壓을 현저하게 높여도 그림 8 (b)에 나타낸 바와 같은 U^+ , U^- 가 일정하므로 放電의 發生頻도는 증가하여도 放電電荷 Q 는 C_0 와 ΔV 가 일정하므로 변화하지 않는다. 또 交流電壓值가 一定하면 1사이클 사이에 發生하는 放電數는 일정하므로 交流電壓의 주파수에 비례한 發生頻도를 나타낸다. 그러나 일반적인 部分放電은 既述한 바와 같이 Void의 형상, 크기 또는 含有率 등이 다양 복잡하기 때문에 放電電荷, 發生頻度, 發生間隔 등이 다양하게 변함으로써 체크시 注意를 기울여야 한다.

3 - 2. 直流누설電流法

直流누설電流法은 일반적으로 多濕 또는 吸濕이 용이한 絶緣材料에 적용시키는 것으로 그 測定原理는 다음과 같다. 즉 그림 9에 나타낸 回路圖에서 스위치 S를 ①에서 ②로 切換시키면 그림 10에 나타낸 바와 같이 切換시킨 直後에 단시간에 靜電容量을 充溢하기 위해 흐르는 變位電流, 絶緣體의 防電分極에 의한 비교적 장시간 감쇠하면서 흐르는 吸收電流 및 시간의 경과에 의존하지 않는 一定한 누설電流의 세 종류의 電流로 구성된 電流-時間 特性이 얻어진다.



(그림 - 9) 直流누설電流法의 測定原理



〈그림-10〉 電流-時間特性

이들 전류 중에서 絶緣測定의 對象으로 되는 것은 吸收電流과 누설전류로 절연물이 吸濕 또는 熱劣化가 深化될수록 누설전류가 크게 흐르고 吸收電流가 단시간에 감쇠해 버린다. 다음에 스위치 S를 ②에서 ①로 되돌리면 吸收電流가 逆方向으로 흘러 스위 可逆性이 나타나나 이 특성은 直流電源의 内部抵抗이 작은 경우로 内部抵抗이 數MΩ인 直流電源에서는 차이가 생기므로 주의를 요한다. 그외에 케이블의 端末, 중간접속 또는 絶緣體에 局部的인 劣化(상처, Void등)가 있으면 電流-時間 特性에 소위 킥(Kick)이라고 하는 急峻한 電流變化가 엿보이는 경우도 있다.

이상의 電流-時間 特性에서 부터 絶緣의 劣化상태를 判定하기 위한 指標은 다음과 같은 定義가 있다.

- ① 누설電流(μA) = 印加時間中の 최종시의 電流值
- ② 케이블의 경우 1km당의 누설電流(μA/km)

$$= \frac{\text{누설電流}(\mu\text{A})}{\text{선로길이}(m)} \times 1000$$
- ③ 相間不平衡率(%) = $\frac{3 \text{相의 누설電流 最大-最小}}{3 \text{相 누설電流의 平均}} \times 100$

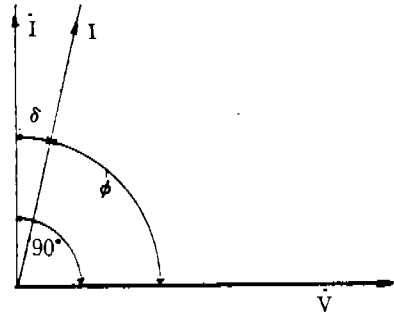
④ 成極比 = $\frac{\text{電壓印加 1分後의 電流值}}{\text{電壓印加 후 所定時間 또는 최종 電流值}}$

⑤ 弱點比 = $\frac{\text{第 1스틸 電壓의 絶緣抵抗}}{\text{第 n스틸 電壓의 絶緣抵抗}}$
단 第 1스틸 電壓 < 第 n스틸 전압
 $n = 2 \sim 5$ (표-1 참조)

⑥ 킥 = 電流-時間 特性曲線에 나타낸 킥의 크기 및 발생수

3-3. tan δ 法

일반적으로 絶緣物에 交流電壓을 인가하면 에너지를 수반하여 그림 11에 나타낸 바와 같이 流電電流가 흘러 그 位相은 印加電壓의 90° 進行角보다 δ 만큼 뒤진다. 이 뒤진角을 誘電損失角, 90° - δ = φ 를 力率이라 하나 δ는 일반적으로 대단히 작기 때문에 다음 식이 成立하며 보통 [%]로 나타내며 이 誘電特性의 等價回路와 그 관계식은 표 3와 같다.



〈그림-11〉 絶緣體의 電壓-電流 벡터圖

〈표-3〉 絶緣體의 等價回路와 관계식

	並列	直列
等價回路		
式	$\tan \delta = \frac{I}{\omega C_p R_p}$	$\tan \delta = \omega C_s R_s$

$$\tan \delta \approx \sin \delta = \cos \phi$$

이와 같은 $\tan \delta$ 는 絶緣物이 吸濕하거나 熱劣化가 되면 증대하며 絶緣物의 형상, 치수에 左右되지 않고 絶緣物의 平均値를 나타내는 特性이 있다. 따라서 $\tan \delta$ 의 大小를 파악함으로써 그 대상物의 絶緣特性의 良否判定에 널리 活用되고 있다. 일반적으로 絶緣物이 吸濕되면 그 수분에 의해 이온의 解離작용이 수반하며 그 解離作用은 水分의 높은 유전율에 의하여 助長되므로 導電손실이 증가하게 되는 것이다.

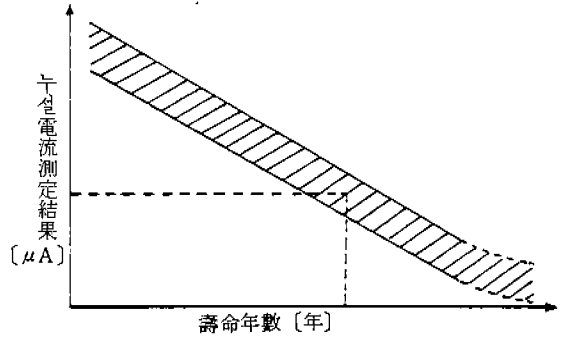
또 絶緣物의 $\tan \delta$ 그 자체는 測定電壓의 영향을 거의 받지 않지만, 電氣적으로 보아 均일하지 않고 내부에 기포와 같은 약점이 있을 때에는 電界가 어느 값 이상이 되면 이온화가 시작되어 電力의 소모가 있게되어 외견상 $\tan \delta$ 는 증가한다. 따라서 $\tan \delta$ 의 電壓特性曲線은 이온化 곡선이라고도 부르며 이 급증점에서 이온化점을 알 수 있다. 또 적당한 2개의 電壓 E_1, E_2 를 취하고 각각에 대응하는 $\tan \delta_1, \tan \delta_2$ 를 측정하여 $\tan \delta_2 / \tan \delta_1$ 을 이온化率, $\tan \delta_2 - \tan \delta_1$ 을 이온化계수라고 한다.

이와 같이 $\tan \delta$ 에 의한 판정법은 絶緣材料의 노화나 내부 Void의 유무를 알아내는데 유효한 방법이지만, 絶緣耐力과의 직접적인 관계는 없으므로 정기적인 자료축적이 필요하다.

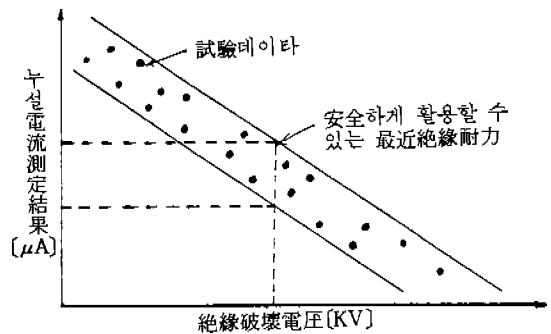
이와 같은 $\tan \delta$ 의 測定에는 결구 等價回路의 C_p, R_p 또는 C_s, R_s 를 測定하는 것으로 보통 高压 션링브릿지, 簡易션링브릿지 등이 이용되고 있으므로 近來에 와서는 0.1%정도 이하의 $\tan \delta$ 가 측정되고 遮蔽가 접지되는 점 등으로 高压화된 簡易션링브릿지가 사용되고 있다.

4. 絶緣劣化判定에서의 最善策

上述한 각종 試驗測定에 의해 絶緣材料의 劣化判定을 위한 여러 데이터가 얻어지나 한가지 방법으로만 限定시켜 얻은 데이터로부터 해당 供試物의 수명을 추정하는등의 劣化判定은 實質적으로 不可能하며 반드시 複數의 방법을 곁들여 얻은 데이터로부터 判定함이 바람직하다. 가령 그림 12에 나



〈그림-12〉 測定結果-壽命特性(假想)



〈그림-13〉 누설電流-絶緣破壞電壓特性

타넨바와 같이 누설電流値를 지닌 絶緣物이 정상적인 사용한도에 대해 앞으로 몇년 더 견딜 수 있는가 하는 데이터가 얻어지면 최선이지만 人体의 健康診斷의 경우처럼 진단결과로부터 注意를 환기시킬 수 있으나 수명을 예측하기는 곤란하다.

따라서 이의 次善策으로서 각종 실물물에 대한 試驗데이터의 축적에 의해 그림 13에 나타낸 바와 같이 누설電流値와 그電流値를 지닌 實用物의 절연과 과전압 나아가서 劣化種類와 이에 대응한 現象과의 관계를 알면 진단의 척도가 될 수 있다. 또 絶緣劣化는 여러 요인에 의해 지배되므로 하나의 시험법 뿐만 아니라 여러 종류의 시험법에 의한 多面的인 진단이 바람직하다.

끝으로 實用的인 特高压CV케이블에 대해 檢討된 각종절연측정법의 概要一覽을 참고로 표-사에 表記해 둔다.

측정 방법	개 요	측 정 방 법	측 정 상 의 주 의	특 징	열화정비와의 관련성과 환경기준
		100KV를 사용하는 간이 Schering Bridge로 측정한다.	lead cable의 길이가 긴 경우에는 tan δ를 보정한다.	있다. 유도를 받기 쉽다.	따라서 유도 또는 그외의 외란을 받지 않을 정도의 전압에서 측정하면 된다. 요주의 환경기준: tan δ 1%이상
	0.1Hz 정도의 초저주파 전압을 인가하여 유전 정접을 측정한다.	초저주파전압 3KV(가동하면 10KV에서 사용전압까지)를 인가 하여 Schering Bridge로 tan δ를 측정한다.	단말부의 누설주분이 측정되어 영향을 주므로 잘 치료시킨다.	• Cable의 길이가 긴 경우에도 소용량 전원으로 측정이 가능하다 • 상용주파의 유도를 받기 어렵다 • 평형조각에 시간이 걸린다.	상용주파수에서 측정된 tan δ 측정치 보다 큰 값을 나타낸다. 현재로서는 측정 data가 적고, 환경기준은 미정.
• 부분방전 측정법	전연체종의 공구 및구 부결함에 의한 부분방전 현상을 검출한다.	아래의 직류전압을 가하여서 약후 1분후의 부분방전의 크기와 인도를 측정한다. 가능한 한 전압상승, 강하에서도 측정한다. 22KV Cadle; 30KV 33 " ; 50KV 66 " ; 90KV 77 " ; 109KV (154 " ; 210KV)	잡음의 편별 및 제거에 주의한다. (Cable 2점을 평정되므로 꾸며 논리제어잡음 판별기분사 용하는 것이 바람직하다) 잡음level을 25pps이하로 억제해야 바람직하나 이 이상의 경우에 대해서는 그 값을 기록하여 측정한다. 단말부의 코르나 방전을 방지한다. 등속기의 주파수 대역에 의한 반사파의 영향에 주의한다.	잔인용량이 각어도 무방함. 선적이 풍부하다. 느리게어 잡음 번거를 이용함으로써 측정잡도를 낮출 수 있다 부분방전 발생빈도가 교류전압인 기보다 작다.	• 상규여지전압보다 높은 전압을 이용하여 Void, Tree등을 검출할 수 있다. • CV Cable은SL Cable에 비해 방전에 약하므로 큰 방전을 발생시키면서 장기간 사용하는 것은 곤란하다. 따라서 감도가 좋은 측정이 필요하다. • 요주의환경기준: 배초 1개의 빈도도 50pp이상, 단점을 level의 2배 이상
• 초음파에 의한 부분방전 측정법	부분방전이 일어난 때 발생하는 초음파를 검출한다.	아래의 파고치를 가지는 초저주파 전압 또는 준 3자파 전압을 인가하여 부분방전의 크기와 인도를 측정한다. 22KV Cable; 22KV 33 " ; 33KV 66 " ; 66KV 77 " ; 77KV (154 " ; 154KV)	상기내용을 기록하고 측정빈도(한Cycle당 10개)의 방전전압률 구한다. 전압과고저상승시의 방전개시전압과 방전의 전압특성을 구한다.	• 劣化와 관련된 data가 적다. • CV Cable에 대한 측정예가 적다. • 요주의 환경기준: 한Cycle당 10개의 측정빈도에서 50pp이상, 단 점을 level의 2배 이상	• 초음파에 의한 부분방전 측정법은 배초코르나의 경우에 이용되고 있으나 CV Cable에는 적용하기가 곤란하다.
• Radiography에 의한 측정법	X선 또는 γ선으로 투과파사진을 촬영하여 구조 변화를 검출한다.	조용파 검출 Sensor를 Cable의 외피에 접촉시켜 Oscillograph로 관측한다.	인체에 조사되지 않게 주의	油中부분방전은 검출가능하나 CV Cable에의 적용은 곤란	
• TSC법	지분전압을 인가한 시료를 저온으로 유지한 후, 전압을 끊고 온도를 올려 방출전류를 측정한다.	Cable에 대해 동일된 측정방법은 아직 확립되어 있지 않음	현재에 조사되지 않게 주의	현장실측에 이용하기 곤란함	