

電氣設備의 트러블 對策

1

제 1 장 劣化와 트러블(Trouble)의 프로세스(Process)

I. 絶緣劣化로부터 短絡, 地絡에의 프로세스

電力機器는 항상 쉬지 않고 움직이고 있다. 電力用 콘덴서(Condenser)는 주야 구별없이 100% 부하이며 변압기에 대해서 공장가동률은 80% 부하라고 해도 일요일이나 야간에는 10% 이하의 경부하가 된다. 그러나 高壓電力設備의 모든 전력 케이블 및 기기에는 전압이 충전되고 있으며 이 충전시간은 연속적이고 주야의 구별은 되지 않는다. 가령 경부하시에 있어서도 전압이 印加되어 있으면 地絡, 短絡事故를 유발할 위험요소가 존재하고 부하운전시에는 다시 過負荷, 缺相 및 熱的破壞의 위험요인이 대기하고 있다. 더욱이 關閉서지(Surge)나 타사에 있어서 사고시의 電位上昇, 서지 및 雷서지 등의 이상전압이 전력설비를 위협하고 있기 때문이다. 이것들에 의하여 地絡, 短絡事故에 이르는 데에는 프로세스(Process)가 존재하지만 어떠한 약한 부분(絶緣劣化하고 있는 개소)이 사고를 일으킨다.

1. 電力機器의 발전과 절연재료

電力設備가 대용량화, 고전압화, 소형경량화 등

의 성능향상을 도모하고 또는 안전성, 신뢰성이 확보된 것은 절연물의 진보없이는 이야기할 수 없다. 機器의 콤팩트(Compact)화는 필연적으로 사용상의 온도상승을 수반하고 보다 耐熱性, 絶緣性이 우수한 재료가 요구되고 있으나 高分子系材料의 개발이 그 보조를 빨리했다고 할 수 있다.

가. 回轉機器 絶緣材料의 향상

회전기기는 소형경량화, 대용량화 경향은 현저하고 그 사용조건은 점점 더 가혹해진다. 절연층에 관해서도 그 사용조건에 견디는 절연성능이 필요하게 된다. 回轉機器에 사용되는 절연재료는 주로 전선용 재료, 舎浸니스(Varnish), 薄葉材料로 분류된다. 전선으로는 耐熱에나멜(Enamelled Wire)전선, 舎浸니스는 에폭시(Epoxy)樹脂, 薄葉材料로는 集成마이크(雲母), 耐熱高分子 필름의 개발이 이의 발전에 크게 기여했다. 固定子絶緣構成은 각 기기에 다소의 차이가 있으나 전선에는 DGC線, 마이크(Mica) 테이프捲線, 耐熱필름(Film) 捲線이 주로 사용되고 있다. 對地絶緣에서는 耐코로나(Corona)성이 뛰어난 마이크가 여전히 주체이며 직류전동기, 차량용 전동기에는 耐熱필름이 많이 사용되고 있다.

나. 電力用 케이블 絶緣材料

油沈紙絶緣 케이블(濕式 케이블)로부터 고무·플라스틱(Plastic)絶緣 케이블(乾式 케이블)로의移行이 본격화한 것은 1956년경부터이다. 그리하여 현재 사용되고 있는 케이블의 대부분이 고무·플라스틱 케이블이다. 이 乾式 케이블 중에서 가장 많이 채용되고 있는 것이 架橋폴리에틸렌(Crosslinked Polyethylen) 전력케이블(CV)이다. 이들의 발전 추이를 표1에 나타내었다.

다. 變壓器 絶緣材料

사용실적보다 역시 유입변압기가 주류를 이루고 있으나 최근의 고층빌딩을 포함한 도시의 과밀화, 복잡한 사회구조를 배경으로 하여 火災, 기타의 문제에서 절연류를 사용하지 않은 전식변압기를 사용하는 분야가 넓어지고 있다. 거기서 등장한 것이 H種 전식변압기(많은는 冷却媒體로서 공기를 이용하고 절연물로서 마이카(雲母), 글라스크로스(Glass Cross), 글라스섬유, 실리콘(Silicone) 樹脂積層板, 磁器 등 무기질재료를 주체로 한 실리콘바니시(Silicon Vanish) : 含浸處理)인데 절연특성 특히 습기 및 먼지에 의하여 절연능력이 저하되는 등의 결점이 있다. 거기에 難燃性에 있어서는 H種 乾式과 또 絶緣性能에 있어서는 油入과 각기 동등의 변압기로서 등장한 것이 몰

드(Mold) 변압기이다. 몰드와 乾式과의 가장 큰 차이는 捲線에 있다.

몰드捲線의 목적은 樹脂로써 導體部를 被覆하는데 따라서 절연특성의 향상과 충전부를 가능한 노출시키지 않는 안전성을 추구한 것으로 이 목적을 위하여 捲線은 절연특성이 뛰어난 에폭시(Epoxy)樹脂로 被覆하고 있으며 전기적으로도 강하고 단단하다.

또 SF₆ 가스 절연변압기는 특별고압용으로서 각광을 받고 있으며 防災性이 강하고 低騒音으로 耐濕性에 뛰어나 보수도 간단하다.

다른 기기에 있어서도 마찬가지로 크게 향상, 발전하고 있는 것이다. 이 절연재료의 발전에 따라서 전력기기의 수명은 크게 신장되어 있다. 그렇다고 해서 전력설비 사고가 격감했느냐 하면 그렇지 않다. 역시 진보된 절연물에도 결함은 존재하고 있는 것이다. 또 우리들은 「예기치 못한 사실」에 마주치게 된다. 「CV 케이블이 2,000MΩ 이상 절연되었는데 지락사고가 발생했다», 「몰드식 계기용 변압기가 2,000MΩ 이상이 절연되었는데 다음날 파괴되었다», 「고압모터가 300MΩ이나 절연되어 있었는데도 절연이 파괴되어 버렸다», 「절연저항측정기로서 전부 2,000MΩ 이상의 케이블과 기기인데 때때로 地絡方向 繼電器가 동작한다」 등이다.

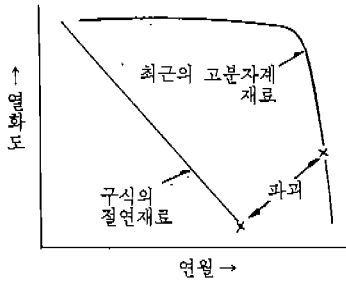
재래식의 절연물로는 매년 절연저항을 측정하여 그 값이 어떤 수치까지 저하되면 교환 등의 조치를 취하여 그것으로 관리가 가능했다. 그러나 절연물은 향상된 것이며 그림1과 같이 어느때 갑자기 파괴되는 것이다.

2. 電力機器 絶緣劣化의 요인과 형태

전력기기는 규격에 준하여 설계 제작되고 또 충분한 시험과 검사를 거친 후 출고되고 있다. 그러나 단순기기의 사고에 우연히 접하게 되는 것은 제조상의 문제가 크다. 다음에 시공상의 문제, 유지보수 관리상의 문제 등을 기술해 본다.

<표1> 케이블과 回轉機의 推移(일본의 예)

종 류	케 이 블 종 류	1945	'55	'65	'75	'83년
종 이 케 이 블	벨트케이블(~15kV)	-----	-----	-----	-----	-----
	H形紙케이블(22kV)	-----	-----	-----	-----	-----
	SL케이블(22kV)	-----	-----	-----	-----	-----
	OF케이블(66~500kV)	-----	-----	-----	-----	-----
고무합성 케 이 블	BN케이블(~33kV)	-----	-----	-----	-----	-----
	EV케이블(~22kV)	-----	-----	-----	-----	-----
	CV케이블(~154kV)	-----	-----	-----	-----	-----
회 전 기	고압유도전동기	-----	-----	-----	-----	-----
	대형발전기	-----	-----	-----	-----	-----
	직류전동기	-----	-----	-----	-----	-----
		A종	B종	F종	H종	



<그림 1> 絶縁材料와 劣化의 進行

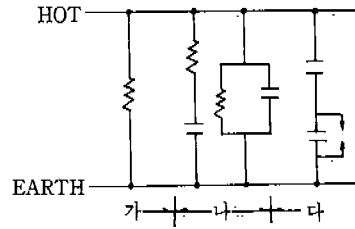
최초에는 문제가 되지 않는 결함이었다 하여도 그것이 장기간의, 더구나 주야의 구별없이 작동하는 전력설비는 서서히 劣化가 진행되며 어떤 때는 雷서지(Surge)에 엄습당하고 더욱이 그 결함 부가 커져 돌연 地絡, 短絡事故에 이른다. 그 문제가 되지 않는 결함부를 목표로 하고 있는 劣化 進行要因은 표 2와 같다.

몰드(Mold)식 계기용 변압기의 제조상 생각할 수 있는 劣化要因의 예로서

- (i) 코일內的 異物混入
- (ii) 전선의 핀홀(Pin Hole)

<표 2> 電力機器의 劣化進行要因

電力機器 劣化要因	油入變壓器	몰드機器	콘덴서	케이블
規定電壓	코로나放電 발생에 의한 絶緣體 侵食	좌 등	좌 등	좌 등
서지 등 異常電壓	絶緣體의 급속한 侵食	좌 등	좌 등	좌 등
水分	絶緣耐力 低下	-	-	수트리의 발생
化學藥品	-	酸, 알칼리, 油, 有機溶劑에 의한 侵食	-	黃化物이 銅과 反應하여 化學트리의 발생
熱	과도한 溫度上昇에 의한 絶緣體의 絶緣耐力 低下	-	同油入機器	좌 등
地電壓	-	-	-	실드의 燒損



<그림 2> 劣化形態의 等價回路

- (iii) 층간 絶緣紙의 파손
- (iv) 조인트(Joint)部 처리 불충분
- (v) 에폭시(Epoxy)樹脂처리 불충분
- (vi) 기타 절연처리 불충분

등을 생각할 수 있다.

劣化의 원인에는 여러 가지가 있으나 크게 분류하면 그림 2와 같이 (i) 吸濕의 要素, (ii) 絶緣物 중의 空隙, (iii) 그것들이 混在할 경우 등이다.

가. 吸濕劣化 (i)

최근의 절연재료는 吸濕되지 않는데, 吸濕한 것에 의하여 생각할 수 있는 것은 절연저항의 저하, 漏洩電流의 증가에 따른 절연물 표면의 熱破壞 및 誘電正接을 증가시킴으로 인한 誘電體 손실의 증가 등이다. 또 誘電率도 증가하므로 空隙에 걸리는 전계가 증대하고 부분방전도 발생하기 쉬운 경우가 있다. 근래 문제가 되고 있는 CV 케이블의 수트리 제조과정 및 시공시 또는 사용중에 케이블 내부에 침투한 물이 電界의 영향에 의하여 절연물을 침해하는 것으로서, 心線內部로부터 발생하는 內部트리와 外皮의 半導電層에서 발달하는 外部트리, 그 위에 절연물 내부의 異物, 보이드 등으로부터 생기는 것이 있다. 화학트리는 黃化水素와 같은 黃化物이 케이블 외부에서의 시즈(Sheath), 절연물을 통하여 導體의 銅과 반응에 따라 나온 황화물이 절연물 중에 析出하고 트리 상태에 발달하여 절연불량하게 되고 최종적으로는 절연파괴가 된다.

나. 放電劣化 (ii)

절연물 중에 空隙이 존재함과, 전압이 순차적으로 상승하면 오존(Ozone) 냄새와 함께 지-지-하는 放電음이 난다. 이와 같은 부분적인 방전을 부분방전이라 하며, 이것들의 방전으로 즉각 절연 파괴에 이르지 않는으나 장시간 계속하면 放電熱이나 生成物과의 화학작용으로 절연물이 침식되고 마침내는 절연파괴가 된다.

3. 現場簡易式 진단방법

절연열화의 진단측정에는 이미 1,000V메가가 사용되지 않는 것은 절연재료의 향상에 따른 것으로 생각하여도 무방하다. 여기에 표 3의 각종 진단법이 채용되고 있다. 각각 결점과 장점이 있으나 현장시험이 간편하고 劣化檢出에는 효과가 있다.

4. 트리 發生 케이블 및 보이드를 가진 計器用變壓器의 진단

가. 1,000V메가로서의 측정결과

(1) 局部的인 吸濕劣化는 발견할 수 없다

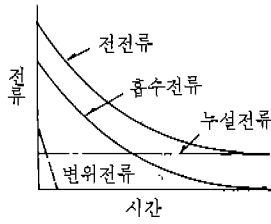
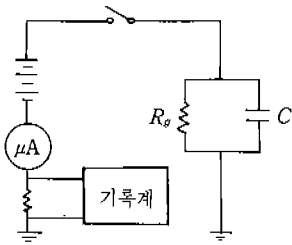
트리카이블과 같이 국부적으로 심하게 吸濕되고 있어도 그 부분이 건전한 폴리에틸렌과 組合되면 절연저항치는 높아질수록 양호하리라고 판단된다. 이 케이블의 경우 절연물의 두께가 3mm로 검은 水트리가 약 9/10가 生成되고 있으나 더욱이 건전부는 1/10뿐으로 1,000MΩ이나 높은 수치가 되어 버린다.

(2) 局部的인 보이드의 발견은 어렵다

보이드를 가지고 있는 CT와 같이 절연물 중에 보이드, 클라크의 핀홀이 있다고 해도 측정전압

<표 3> 絶緣診斷法과 그 특징

진단방법	전 원	인가전압	진 단 세 트	특 정 사 항	특 징	검 출 능 력	
						흡 습	보이드등
直 流 高 壓 法	측전지로 가능	직 류	소형으로 취급, 운반이 손쉬움	① 절연저항-시간 ② 절연저항-전압 ③ 방전성전류의 유무	① 현장시험이 용이 ② 과거의 데이터 중부 ③ 흡습열화의 점검을 잘하고, 커다란 보이 드 등도 검출 가능	○	△
交 流 電 流 法	파형변형이 없는 교류전원, 경우에 따라 스타퍼라이 서 및 노이즈 필 터가 필요	교 류	공시물의 충전전 류에 따라 큰 내 압세트가 필요 기타 결합콘덴서 및 각종 진단기기 필요	① 전압-제1전류 급 중점 ② 전압-제2전류 급 중점	① 전식된선기기에 대 한 효과가 있다. ② 전류급중 전압에 의 한 파괴전압의 예측 도 경우에 따라 가능	△	○
誘 電 正 接 法				① 전압-tan δ ② 온도-tan δ	① 절연물의 형상, 크 기에 관계없이 판정 할 수 있다.	○	△
交 流 部 分 放 電 法				① 전압-방전전하량 ② 방전개시전압과 소 멸전압 ③ 코로나 발생위상각 ④ 코로나 발생빈도	① 국부적 열화의 검출 이 잘됨. ② 방전의 상태가 정확 하게 포착됨. ③ 운전상태에서의 측 정도 가능	△	○



- 판정항목
 - (1) 누설전류(절연저항) $M\Omega$
 - (2) 누설전류-시간특성 $M\Omega-T(Pi)$
 - (3) 누설전류-전압특성 $M\Omega-V$ (약점비)
 - (4) 방전성전류의 유무
 - (5) 상간불평형률(케이블에 적용)

C : 被診斷器의 대지정전용량(純)

R_0 : 누설저항

(a) 직류고압법 회로

(b) 직류인가 시간적 변화

<그림 3> 直流高壓法の 원리와 판정항목

1,000V로는 $M\Omega$ 計의 변화가 검출되지 않는다. 또 $100M\Omega$ 指示에 있어서 1,000 $M\Omega$ 오더의 漏洩電流의 변화는 $M\Omega$ 計로는 나타내기 어렵다. 따라서 豫知發見은 불가능하였다.

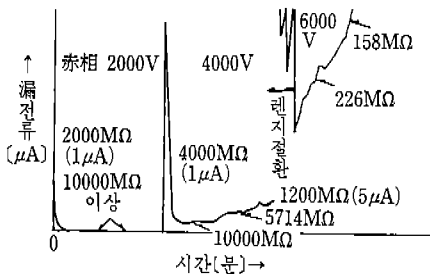
나. 直流高壓에서의 측정결과

(그림 3 참조)

트리 發生 케이블에 2, 4, 6kV와 전압을 印加할 경우의 漏洩電流 特性커브를 그림 4에 나타내었다.

● 判定

- (1) 漏洩電流(絶緣抵抗) → 6kV에서 158 $M\Omega$ 로 불량
- (2) 漏洩電流-時間 → 시간과 함께 $M\Omega$ 低下로 불량



<그림 4> 트리 發生 케이블의 診斷結果 (PI-6000에서)

(3) 漏洩電流-電壓 → 전압의 上昇에 수반하는 $M\Omega$ 의 降下로 불량

(4) 放電性電流의 有無 → 有로 불량

이 케이블은 전체의 판정항목에 대하여 不良이며 운전에는 견디기 어렵다고 판단했다. 연 1 회의 정전에 의하여 정기정밀검사는 1,000V메가에서 2,000 $M\Omega$ 이상으로 양호하다. 2,000 $M\Omega$ 이상도 있으므로 절연상태는 양호하다고 판단하여 受電하였다. 그러나 受電함과 동시에 이 케이블의 절연은 對地電壓($6,600 \times 2/\sqrt{3} \approx 5,400V$)으로 충전되어 200~100 $M\Omega$ 로 운전되어진다. 이것으로는 CV 케이블의 절연성능은 발휘되지 않으며 地絡에 이르는 것은 확실한 것이다.

보이드 CT의 경우는 高壓印加捲線과 2차 및 철심간의 거리에 따라 각 항목과도 특별한 문제는 발생되지 않았다. 다만, 漏洩電流의 킁(Kick)은 조금씩 보였으나 양호한 범위이다.

다. 部分放電法에서의 측정결과

(그림 5 참조)

보이드 CT에 AC 6,600V를 印加할 경우의 常時對地電壓은 $6,600 \times 1/\sqrt{3} \approx 4,000(V)$ 이며 그렇게 걱정하지는 않다고 상정되었다. 그러나 여기에서 생각해 볼 필요가 있는 것은 상시전압의 다른 雷서지(Surge) 등 이상전압의 침투이다. 그림 3의 部分放電檢出法 原理의 등가회로에서 생각해

면 전압분담은 C_g 와 C_b 의 靜電容量에 관계하고 있다. C_g 는 보이드에서 공기라고 생각하면 적게 보아 그 용량비는 3대 1 이상이 된다. 이와 같은 것은,

$$\text{건전한 절연물}(C_b)\text{에는 } \frac{6,600}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{4} \approx 953(\text{V})$$

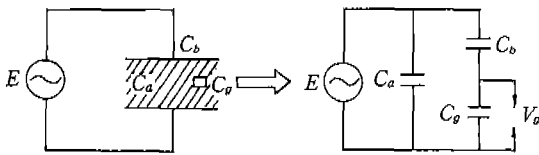
의 전압분담

$$\text{보이드부}(C_g)\text{에는 } \frac{6,600}{\sqrt{3}} \times \frac{3}{4} \approx 2,860(\text{V})\text{의}$$

전압분담

弱點의 보이드부에 큰 부담이 걸리며 당시의 전압에서도 코로나 放電이 발생하고 절연물이 침

식되며 또 雷서지 침투의 경우도 전압분담은 같은 것으로서(1:3) 보이드부는 점점 손상을 받아 地絡으로 이행되어 버리는 것이다. 그리하여 적은 보이드 클러크라도 미리 발견해 두지 않으면 안 되는 이유를 알게 되었다고 생각한다. 몇 번을 반복하더라도 문제가 되지 않는 것같은 보이드라고 해도 이 보이드가 시간과 함께 자연소멸되는 일은 절대로 없고 정상운전시도, 외부 사고시도 雷서지의 침입에 대하여 어느 시점에 있어서나 약한 보이드부의 전압분담이 健全部보다 높아지며 점점 열화되어 가는 방향으로만 회복방향이 되는 것은 있을 수 없다.



- E : 대지전압
- C_a : 케이블의 대지정전용량
(보이드와 병렬의 건전부분 靜電용량)
- C_b : 보이드와 직렬에 유입되는 정전용량
- C_g : 보이드 정전용량
- V_g : 보이드의 방전전압
- 원리도(결함이 있는 절연물의 등가회로)

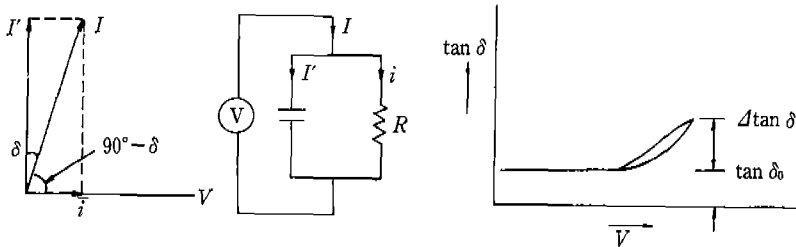
- 판정항목
 - (1) 방전전하량(Qpomax)
 - (2) 방전전하량-전압특성
 - (3) 방전개시전압
 - (4) 방전소멸전압
 - (5) 방전발생빈도
 발생전위차

<그림 5> 部分放電檢出法(交流法)의 원리와 판정항목

라. 誘電正接法の 측정결과(그림 6 참조)

트리 발생 케이블은 그림 2 劣化形態의 등가회로(라)에 상당하는 것으로서 트리부(吸濕으로 검은 부분)와 건전절연물(폴리에틸렌의 흰 부분)이 혼재하기 때문에 充電電流 I의 有效分이 많아지고 $\tan \delta$ 치로서는 커다란 불량으로 판단했다(트리 발생부의 $\tan \delta$ 0.65%, 건전케이블의 $\tan \delta$ 0.02%).

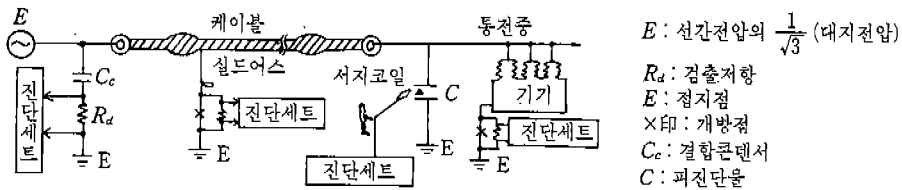
이상의 시험결과를 표로 집약해 보면 표 4와 같다. 여기에서 생각하지 않으면 안될 것은 한 가지 방법만으로는 안전하다고 할 수 없다는 것이다. 전력실비는 플랜트로 생각해도 좋고 각종 기구에 의하여 구성되어 있다. 더구나 한정된 정



유전체손 = $VI \cos(90^\circ - \delta)$
 $VI \sin \delta \approx VI \tan \delta$
 \therefore 유전체력률 = $\tan \delta$
 절연물의 등가회로와 벡터도

- 판정항목
 - (1) $\tan \delta_0$ (베이스의 유전정점)
 - (2) $\Delta \tan \delta$ ($\tan \delta E - \tan \delta_0$)
 - (3) C_0 (베이스의 정전용량)
 - (4) $\Delta C / C_0$ ($CE - C_0 / C_0$)
 - (5) ΔI 전류증가율 $\approx \Delta C / C_0$

<그림 6> 誘電正接法($\tan \delta$)(交流法)의 원리와 판정항목



<그림 7> 活線部分放電檢出의 각 방법

<표 4> 診斷方法과 劣化檢出 에어리어

진단항목	시공품	CV 케이블	계기용 변류기
① 1,000V 메가		×	×
② 직류고압법		○	△
③ 부분방전법		△	○
④ 유전정접법		○	△
⑤ PI-6000 법		○	○

○: 검출, ×: 검출 불가, △: 조금 검출

전시간에 진단시험을 실시할 필요가 있다. 거기에 개발된 現場用簡易診斷器가 「PI-6000」이다. 이 장치의 기능을 한마디로 말하면,

(i) 6,000V메가((1,000V 피치, 전압자동 소프트上昇)

(ii) 直流高壓法에 의한 진단

(iii) 部分放電 檢出法에 의한 진단

이상의 기능을 치밀하게 진단한 形式로 완성된 것으로서 최종불량판정도 이 장치 한 대로 행하고 있다. 다만, 어느 경우에도 판정하기 어려운 것(특히 고압모터)에 대해서만 별도 교류부분 방전검출법을 실시하고 있다.

5. 活線狀態의 진단방법

전력설비는 정전하고 체크하는 것도 필요하지만 活線상태이기 때문에 검출 발견할 수 있는 劣化요소도 많이 있다. 劣化가 진행되는 과정에서의 漏洩電流 增大, 그 파형, 放電性 펄스(Pulse) 검출, 이상음, 진동, 기타 현장에 적합한 방법을 구사할 필요가 있다(그림 7 참조).

- (i) 시설해야 할 接地線에 흐르는 전류의 크기 및 그 波形에서 吸濕 및 放電劣化의 검출
- (ii) 종합콘덴서를 사용하여 放電劣化를 검출한다.
- (iii) PT·CT 2차 파형의 분석에 따라 방전열화를 검출한다.
- (iv) 서지 코일(Surge Coil)을 이용한 放電劣化의 검출
- (v) 초음파검출기로 방전열화의 검출
- (vi) 이상진동의 검출
- (vii) 上記와 동시에 熱劣化의 검출을 위하여 活線溫度 측정

전력설비는 절연물로 구성되어 있으며 그 절연물의 진보에 대해서는 눈을 크게 뜨고 볼 일이다. 현장기술자의 대응도, 일을 생각하는 방법도 더욱더 향상되지 않으면 설비의 진보에 뒤떨어진 관리기술자가 되어버리며 그 존재가치도 약해져 버린다. 절연물의 향상에만 의지하지 않고 그 향상된 절연물의 결점을 보완해야 할 새로운 진단 시스템의 개발이나 일상의 순시점검방법을 개발할 필요가 있다고 생각한다. 완전무결한 설비라는 것은 없다. 劣化는 진행하여 가는 것이다. 그래서 어느날 갑자기 그것은 地絡, 短絡이라는 정전사고가 되어 버린다. 이 사고에 이르기까지의 프로세스(Process)는 여러 가지가 있으나 어느 것이나 조금의 정보를 발하는 것도 사실이다. 이 정보를 정확하게 검출처리하는 것이 기업의 심장인 전력설비를 보호하는 우리들 현장기술자의 사명이라고 생각한다.