

電力 케이블의 豫防診斷 技術現況

김 상 준·유 명 호

(한전 기술연구원 배전연구실 선임연구원)

1. 서 론

인구밀집 도심지역과 공장에서의 전력 공급신뢰도 향상과 공급력 확보 및 주위환경과의 조화라는 측면에서 전력선로를 지중화할 필요가 있으며, 이는 앞으로도 꾸준히 추진될 전망이다.

이들 지중선로는 지하에 매설되므로 통상적인 육안점검이 곤란한 설비이며, 일단 고장이 발생하면 전기의존도가 높은 고도의 산업사회에 미치는 영향이 크고, 대도시와 공장의 지하에 위치하고 있어 복구에 장시간이 소요될 뿐만 아니라, 때로는 도로복구와 교통장애, 화재사고 유발등 피해가 극심한 설비이다.

따라서 지중설비 중 전력케이블의 절연진단기술은 과거 사후 보수하던 개념과는 달리, 케이블의 운전상태를 미리 점검하여 절연연화와 이상상태를 예측하는 예방진단 기술로 바뀌고 있으며, 이러한 예방진단 기술은 전선로의 지중화 시대에 반드시 이룩해야 할 당면과제이다.

2. 전력 케이블 절연 측정법의 개요 [35]

전력 케이블의 절연측정에 관한 연구는 1950년부터 시작되어 직류 고압법, 유전체 역률법, 부분방전법, 직류 성분법, 임펄스 파형법 등의 각종 측정법이 확립되어 왔으며, 그 중에서도 현장측정에는 직류 고압법이 널리 채용되어 왔다.

또한 1960년대에는 SL 케이블을 주로 한 절연측정 기술이 개발되었으며, 1978년부터 CV 케이블에 대한 절연진단 연구가 활발하게 진행되어 과거의 시험 결과를 토대로 기존 측정법을 개량하는 새로운 측정 기술이 계속 개발되고 있다.

이러한 케이블의 시험방법은 구조, 온도, 인장시험등과 같이 비전기적인 시험과 직류전원시험, 교류전원시험, 삼각파시험 등 전기적인 시험으로 나눌 수 있으며, 이들은 또한 각각 파괴시험과 비파괴시험으로 분류된다.

표 1에서는 케이블 절연 측정기술 개요를, 표 2에서는 전력 케이블의 각종 절연측정법에 관한 특징을 소개한다.

3. OF, POF 케이블의 예방진단 기술 [35]

OF 케이블은 절연지와 절연유에 의한 복잡한 구조의 절연체계를 갖고 있다. 정상운전 상태에서 Voids가 없는 케이블은 절연노화를 고려하지 않아도 되나, 일반적으로 케이블의 절연이 양호한 상태를 유지할 수 있도록 케이블과 그 접속재의 절연유 압력상태를 감시해야 한다.

최근 Splices(접합)과 Sealing box가 불량하기 때문에 발생하는 절연유의 절연 특성 저하를 검출하기 위하여 Splices와 Sealing box에서 절연유를 채취하여 절연유의 분해 생성물을 조사하는 분석법이 이용된다.

표 1. 케이블 絶緣 測定技術 概要

| 케이블絶緣測定法 | 通用케이블 | 測定 概要 | 試驗段階 | 實用段階 |
|----------------------|-----------|---|------|------|
| 누설전류 측정법 | OF.CV.SL | 직류전압을 인가해서 누설전류를 측정하고 전류킥(KICK)을 관찰 | → | → |
| 유전정접 측정법 | OF.CV | 교류전압을 인가하여 유전정접을 측정 | → | → |
| 절연유 분석법 | POF.OF | 절연유를 채취하여 전산가, 함유수분, 고유저항, 유전정접, 가스성분을 측정 | → | → |
| Radiography 에 의한 측정법 | OF.CV.POF | X선 또는 γ 선으로 투과사진을 촬영하고 케이블 및 접속부의 구조변화를 관찰 | → | → |
| 부분방전 측정법 | OF.CV | 직류 또는 교류전압을 인가하여 공극이나 국부결함에 의한 방전전하측정 | → | |
| 잔류전압 측정법 | CV | 직류고전압을 인가후 10초간 접지한후 개방하여 도체에 유기된 전압을 측정 | → | |
| 역흡수 전류 측정법 | OF.CV | 직류전압 인가후 방전시의 역흡수 전류를 측정 | → | |
| 초음파에 의한 부분방전 측정법 | OF.CV | 부분방전이 일어날 때 동시에 발생하는 초음파를 측정 | → | |

gas가 절연유내에 존재하는 것은 코로나 방전이나 arc가 내부에서 발생하고 있다는 의미이므로 이 gas 분석은 변압기의 유지보수에도 중요한 역할을 한다. 절연유의 절연 열화를 검출하기 위한 분석법으로는 수분과 gas 분석외에 유전정접시험, 체적저항률 측정 등이 있다.

이들 측정에는 시료를 오염없이 채취하는 것이 매우 중요하므로 주사기등을 사용하여 맨홀 내부의 접속상이나 중단접속상에서 채취한다.

OF 케이블의 절연유 진단에 대한 시험적인 기준은 표 3과 같다.

4. XLPE케이블의 절연열화 진단법

XLPE케이블은 우수한 절연특성과 그 취급이 용이하여 그 사용이 급증하고 있는 케이블이다. 그러나 XLPE케이블은 Treeing에 의한 절연특성의 저하가 가장 큰 문제이다. 그것은 주위의 수분의 존재에 의한 흡습 또는 제조시 수분등의 침입으로 발생하는데 수분, Voids(공동), 이물 등이 존재하는 절연체에 전계가 가해지면 강전계가 국소적으로 발생하여 stress를 강하게 받으므로 그 점에서 부터 열화하여 점차 tree가 진전된다. 따라서 제조시의 품질관리가

중요하며 지금까지 제안된 Treeing현상에 의한 열화의 검출방법은 기존 D.C 누설전류 측정이나 $\tan \delta$ 측정외에 여러가지가 있는데 그것들은 활선측정 방법(상시감시장치)과 사선측정방법으로 대별된다.

4.1 사선 상태에서의 측정방법

Treeing현상의 발생과 전파는 절연물에 주입되어 축적된 전하와 밀접한 관계가 있다. 그러므로 절연체 내에서의 전하를 측정하는 것은 절연물의 절연과 피 이전의 열화진전상태를 예측하는 유용한 방법이다. 최근 Treeing현상에 의한 열화를 검출하는 여러 가지 방법이 제안되고 있다.

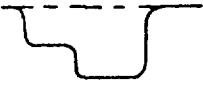

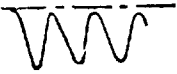
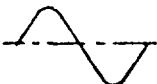

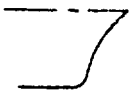
(1) 회복전압 측정법[30]

케이블이 직류전압(1KV/mm)을 인가한 후 전압을 제거하고 10초동안 접지한 후에 접지를 제거하고 케이블 도체에 유기되는 회복전압을 일정시간 측정하여 그 추이로서 케이블 상태를 판정하는 방법으로서 대체로 그림1과 같은 추이를 나타낸다. 이 방법은 측정시간이 긴 단점이 있다.

(2) 역흡수 전류법[23]

CV케이블에 일정 직류전압을 가하면(2분정도) 직류누설전류가 일정치에 이르는데 이때 단락하여 케

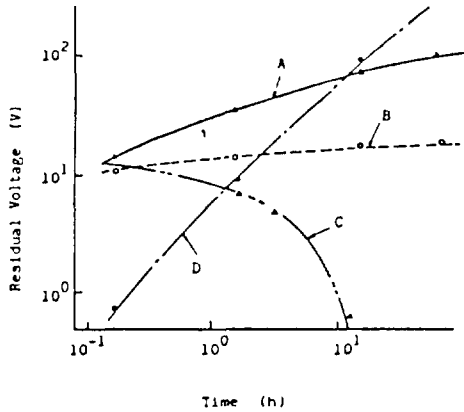
표 2. 電力 케이블의 各種 絕緣 測定法

| 測定法 | 印加電壓 및 波形 | 測定項目 | 特 徵 |
|----------------|--|--|--|
| 直流法 | DC 30kv : 3~7分 50kv : 7分  | 1. 電流-時間特性 2. 放電電流 (kick현상) 3. 部分放電 특성 | 1. 現場試驗이 容易함 2. 經驗이 豊富하고 過去의 Data가 많음 3. SL, Belt케이블에서는 判定基準이 明確함 4. 一般적으로 吸濕劣化의 검출로 平均値를 表示함 5. 交流와의 關聯, 공극의 검출에 문제가 있음. |
| 交流法 | 商用周波交流  | 1. 誘電特性 2. 部分放電 특성 | 1. 運轉中の 絕緣狀態를 把握할 수 있고, 공장 내에서의 試驗 Data가 많음 2. 局部的 劣化, 특히 公극外傷 등의 檢出이 可能함 3. 今後의 研究에 따라 케이블의 常時監視가 可能함 4. 現在의 方法으로는 길이 긴 케이블의 試驗이 어려움 |
| 交流重疊法 | AC : 8kv DC : 30kv 程度  | 1. 電流-時間特性 2. 誘電特性 3. 部分放電 특성 | 1. 直流法에 比하여 劣化檢出이 용이함 |
| 超低周波法 | AC 0.1~0.05Hz 30~50kv  | 1. 誘電特性 2. 靜電容量의 變化 3. 部分放電 특성 | 1. 充電電流가 적기 때문에 소용량의 試驗裝置로 交流法에 의한 試驗이 可能함 |
| 直流電壓上昇法(直流放電法) |  指數減衰波 時定數 : 수초~수십초 30kv | 1. 部分放電 2. 放電性電流 | 1. 局部的 劣化의 檢出이 可能하고 交流法과 特價性이 있음 2. 直流法과 同一한 發生장치를 利用할 수 있음 |
| 放電法 | 指數減衰波 時定數 : 70ms 15kv程度  | 1. 部分放電 특성 | 1. 充·放電法과 거의 同一하나 試驗장치가 複雜함. 2. 直流法과 同一한 發生장치를 利用할 수 있음 |
| 高周波重疊法 | 運轉電壓에 700Hz정도의 高周波를 중첩 | 1. 不平衡高周波電流 | |

단, 印加電壓은 22kv級 케이블의 試驗에 적합한 電壓值임.

이들에 충전된 전하를 방전하면 다음 그림 2와 같은 전류특성을 얻을 수 있다.

Treeing이 발생한 열화 CV케이블에서는 정상케이블에 비해 큰 역흡수 전류(Id)가 흘러 감쇄 시정수



A : 새 케이블 B,C,D : 노화된 케이블

그림 1. 잔류전압의 시간 의존성

도 크다. 이 역흡수 전류를 일정시간동안 실측하여 적분을 통해서 방전전하량을 구한다. 이방전전하량을 케이블의 정전용량으로 나눈값으로 열화를 측정하는 방법이다.

$$V = \frac{100}{C_0} S \frac{t_1}{t_0} I_d dt \quad (1)$$

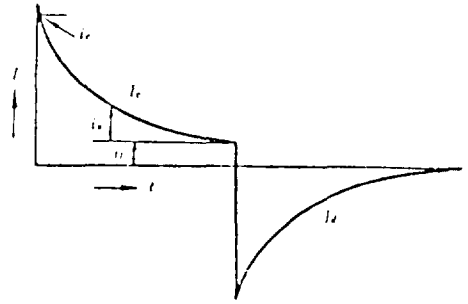


그림 2. 충전전 특성

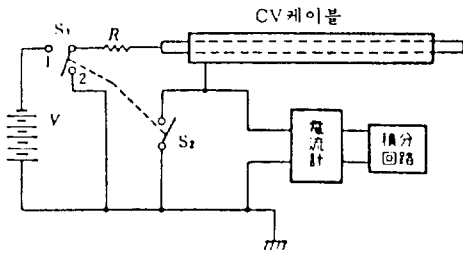
측정회로는 다음 그림 3과 같은 회로에서 S₁을 1 단자로 S₂를 ON상태로 2분간 유지하여 케이블에 충전한 후 S₁을 2단자로 S₂는 ON상태에서 3초간 방전한 후 S₁을 2단자로 상태로 하고 S₂를 off하여 역흡수 전류를 30초간 측정한다. 그 대표적인 결과는 다음 그림 4와 같다.

(3) 잔류전압법(DC Potential Decay 성분측정법)[26]

이 방법은 측정이 간단하고 단시간에 판정이 가능하며 전압을 측정하므로써 noise나 유도 영향이 비교적 저감되는 이점이 있다. 또한 케이블 길이에

표 3. 절연유 가스 분석·물리 특성 시험 관리 기준

| 시험항목 | 기준치 | 비고 |
|--------------------------------------|------------------------|---|
| 가연성가스총량(T.C.G.) | 1500ppm | 이상가스 발생의 전체적 평가를 시행(O ₂ , N ₂ , CO ₂ 는 제외) |
| H ₂ (수소) | 500ppm | * 개개의 가스는 각 가스 단독으로 특이하게 발생하는 경우 평가 시행 |
| C ₂ H ₂ (아세치렌) | Trace | * H ₂코로나 방전 |
| CO(일산화탄소) | 100ppm | * C ₂ H ₂아아크 발생 |
| CO ₂ (탄산가스) | 1000ppm | * CO, CO ₂절연체 과열 |
| CH ₄ (메탄) | 200ppm | * CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈절연유 저온분해 |
| C ₂ H ₄ (에치렌) | 200ppm | * C ₂ H ₄ , C ₃ H ₆절연유 고온분해 |
| C ₂ H ₆ (에탄) | 200ppm | |
| C ₃ H ₈ (프로판) | 200ppm | |
| C ₃ H ₆ (프로피렌) | 200ppm | |
| 용존 가스 | 10,000ppm | 기밀성의 평가를 시행 |
| 전 산 가 | 0.02KO Hmg/g | 화학적 열화의 전체적 평가 |
| 수 분 | 10ppm | 기밀성평가와 함께 절연성의 영향을 평가 |
| 체적저항율 | 1×10 ¹³ Ωcm | 절연성의 평가 |
| 유전 정접 | 2% | |



S_1 : 1, S_2 : ON으로 하고 케이블에 충전(2分間)
 S_1 : 2, S_2 : ON으로 하고 방전(3秒間)
 S_1 : 2, S_2 : OFF으로 하고 흡수전류를 측정(30秒間)

그림 3. 역흡수 전류측정 회로

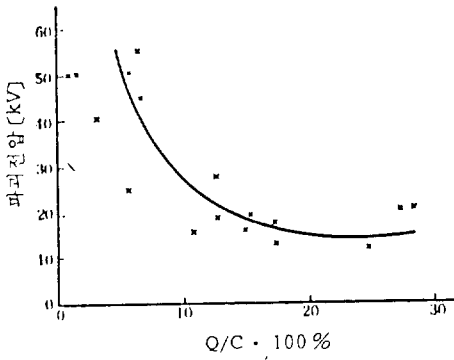


그림 4. 철거 케이블의 상용주파수 과피전압과 역흡수 전류의 관계

도 영향을 받지 않는 점도 현상측정에 유리하다.

측정회로와 케이블의 등가회로를 표시하면 그림 5와 같으며 소정의 직류전압을 인가하고 그 전압을 1분간 유지한 후 고압스위치를 연다.

이때 케이블에 충전된 전하가 케이블의 절연저항 R을 통해서 방전하기 때문에 전압은 점차 하강한다. 케이블의 절연이 양호한 경우는 방전이 장시간을 요하고 케이블이 열화하여 절연이 불량한 경우는 단시간에 방전한다. 이 인가전압에서 소정의 판정 전압

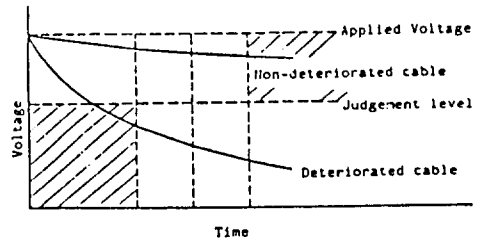


그림 6. DC전압을 인가한 후의 방전특성

까지의 방전시간을 측정후 그 시간을 비교하여 良, 不를 판정하는 것이다. 그 결과는 그림 6과 같다.

케이블의 직류전압 특성은 그림 5에서와 같이 근사 등가회로로 부터 전압은

$$V = V_0 \exp \frac{-t}{RC} \quad (2)$$

이다.

이때 C.R은

$$(\text{정전용량}) C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r\ell}{\ln(R'/r)} \quad (3)$$

$$(\text{저항}) R = \frac{\rho}{2\pi} \ln\left(\frac{R'}{r}\right) \quad (4)$$

이므로 ② ③ ④식으로부터

$$V = V_0 \exp \frac{-t}{\epsilon_r \rho} \quad (5)$$

ℓ : 케이블 길이

R' : 절연체 반경

r : 도체반경

ϵ_0 : 진공유전율

ϵ_r : 절연체 비유전율

ρ : 절연체 저항율

이다.

즉 인가전압의 변동특성은 케이블공장, 도체

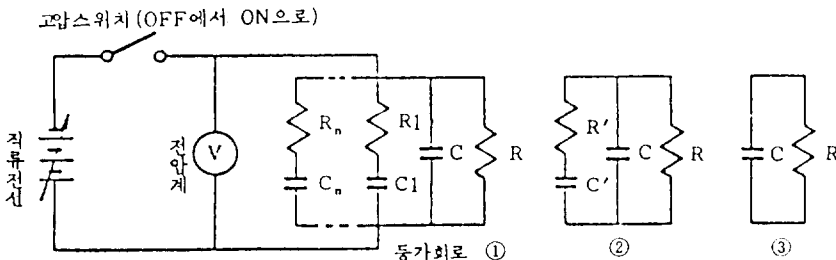


그림 5. 회로의 구성

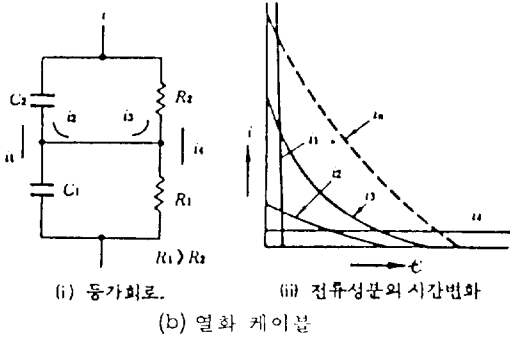
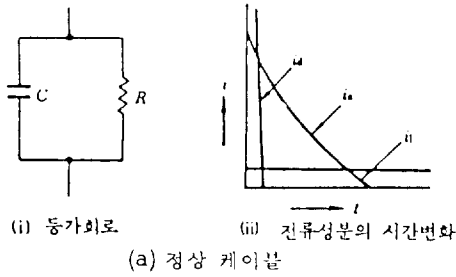


그림 7. 케이블의 등가회로와 직류전류 성분의 시간변화

Size, 절연체두께 등에 상관없는 ϵ_r 과 ρ 의 함수이다.

그런데 CV케이블의 열화는 watreke가 대표적인데 watreke가 발생할 때는(절연체의 저항=watreke부의 저항+watreke가 진전하지 않는 저항)으로 표현할 수 있는데 전체적으로 저항성분이 많이 약화되어 ρ 값이 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 C에 충전된 전하의 대부분은 낮은 저항을 통해서 방전되므로 전압은 빨리 떨어지게 된다.

(4) 직류과도 전류법[22]

케이블에 직류전압을 인가했을 때 절연체를 흐르는 과도전류의 크기로 부터 열화를 진단하려는 방법이다. 정상 케이블의 경우 등가회로인 과도전류는 다음 그림 7(a)와 같이 나타나지만 열화케이블은 (b)와 같이 생각할 수 있다. 이것은 watreke가 커짐에 따라 R_2 의 저하로 인하여 i_3 성분이 증대하는 점에 착안한 것이다.

이의 측정회로는 그림 8과 같으며 i_3 의 측정을 위해서는 유전분극에 기초한 흡수전류의 역제가 필요하기 때문에 시험케이블에 일정 직류전압을 약 30분간 인가하여 절연체중에 분극을 형성하고 분극완료 후 케이블에 고전압측을 1~5초간 접지시켜 C_1C_2 의

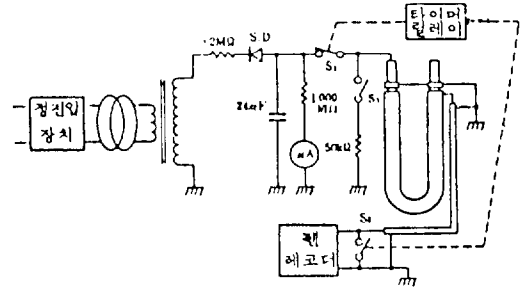


그림 8. 과도 직류전류법의 측정

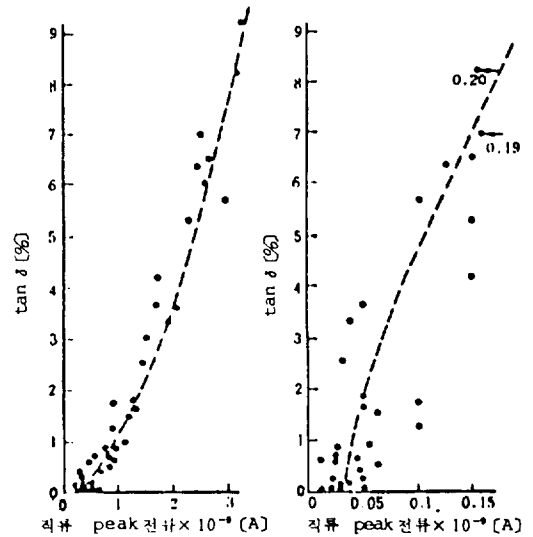


그림 9. $\tan \delta$ 와 i_3 및 누설전류의 관계

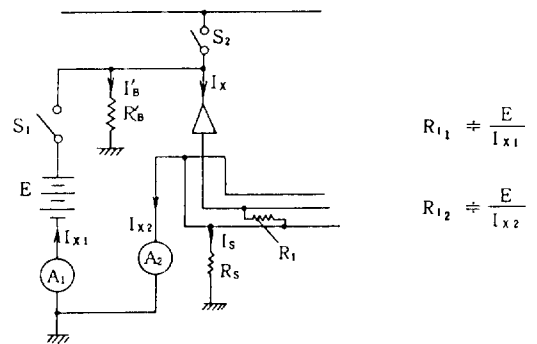


그림 10. 직류 누설 전류 측정법

전하(기하학적 정전용량에 충전된 전하)를 일단 방전한다. C_1C_2 의 전하 방전후 시험전압을 즉시 인가하여 i_3 를 측정한다. 시험전압 인가시에는 순간적인 변위전류 i_1 이 흐르므로 계기의 보호를 위해 전압인

표 4. 케이블 시험전압 및 판정기준(국내)

○ 내압시험

| 케이블공칭전압 | 인 가 전 압 | | 인 가 개 소 | 인 가 시 간 |
|----------|---------|--------|-----------------------|------------------------|
| | 직류(kv) | 교류(kv) | | |
| 6.6kv-△ | 20.7 | 10.35 | 심선-대지간 " " " | 연속 10분간 " " " |
| 22.9kv-y | 46 | 23 | | |
| 22kv-△ | 62.5 | 31.25 | | |
| 154kv | 354.2 | 177.1 | | |

○ 누설전류

| 공칭전압 | 판 정 | | 양 호 | 요주의 | 불 량 |
|-------------|--------|-------|----------------------------------|-----------------------------------|--|
| | 인가전압 | 케이블 | | | |
| 6.6kv-△ | DC10kv | CV케이블 | 10μA/km 이 하 50μA/km 이 하 | 11~50 μA/km 51~200 μA/km | <ul style="list-style-type: none"> • 51μA/km 이상 • 좌기범위에서 진류치가 급격히 변동되는 경우 및 기상의 바란스가 취해지지 않은 경우 • 201μA/km 이상 |
| 22kv-△ | DC30kv | BN " | | | |
| 22.9kv-y | | EV " | | | |
| | | SL " | | | |
| 성 극 비 | | | | | 1미만 |
| 상 간 불 평 형 율 | | | | | 200% 이상 |

가 3초후에 i_3 를 측정하여 저항분 전류 피크치(I_p)에 의해 열화를 판정한다. 이 결과를 나타내면 다음 그림 9와 같이 누설전류-tan δ의 비교적 양호한 상관관계가 있다고 볼 수 있다.

(5) 직류 누설전류 측정법[36, 39]

케이블 절연체에 직류 고전압을 인가하여, 그 때의 누설전류-시간특성, 절연저항-전압특성, 누설전류의 相間 평형상태 및 방전성 전류(Kick현상) 등에 의하여 절연열화 상태를 판정하는 방법이다. S_2 는 고압모선과의 사이에 차단기로서 직류누설전류 측정방법으로 절연저항을 측정하려면, 측정자가 위험하지 않도록 차단기를 OFF시켜 측정하여야 한다. 누설전류를 측정하는 위치로서는 (A₂), 즉 직류전원의 한쪽극과 대지사이에 삽입하는 경우와, (A₃)와 같이 차폐단과 대지사이에 전류계를 삽입하는 경우가 있으나 그림 10과 같이 양방법을 동시에 사용하지는

않는다. 그러나 양방법을 동시에 사용했을 경우 (A₁), (A₂)의 값이 일단 같은 것으로 생각될 수 있지만, 실제로는 상이점이 있다. 이것을 다음식으로 표시한다.

$$I_{X1} = I_B + I_X$$

$$I_{X2} = I_X - I_S$$

$$\therefore I_{X1} > I_{X2}, R_{I1} < R_{I2} \text{ (일반적으로 } I_{X1} \approx I_{X2} \text{)}$$

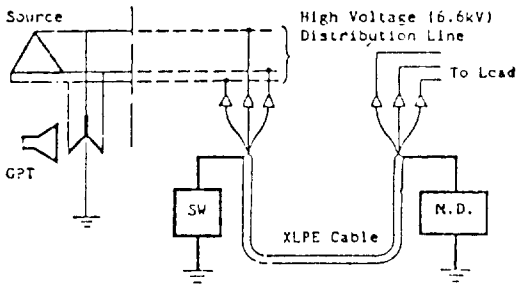
여기서 I_B 는 직류전원의 고전압측의 끝에서 시작하여 CABLE의 말단에 이르는 사이의 모든 장소에서의 대지에 대한 누설저항 R'_B 를 통한 전류이고, I_S 는 방식층 절연 불량저항 R_S 를 통하여 대지로 누설하는 전류이다. I_S , I_B 도 R_I 를 통한 누설전류 I_X 와 다른 전류로 작용하는 + 또는 -의 오차 전류라 하는 것이 된다.

4.2 활선상태에서의 측정방법

기존의 측정방법으로는 보통 케이블을 계통으로부터 분리하여 시험을 시행하였으나 부하차단 등, 계통조작을 요하기 때문에 선로 등에서는 부하공급 중의 활선상태에서 케이블을 손쉽게 진단하는 새로운 방법이 개발되고 있다.

(1) 직류 성분법(Method of dc Component in Charging Current) [25]

케이블 절연체에 水tree가 발생한 경우 이 水tree가 갖는 정류작용을 이용한 것으로 접지선에 흐르는 전류의 직류분을 측정하여 그의 大, 小로부터 열화의 정도를 판별하는 방법이다. nA정도의 미소전류를 관측할 필요가 있으며 측정용 전원이 불필요해 측정에 유리하다. 이 측정회로는 다음 그림 11과 같으며 측정시 케이블Shield를 손쉽게 접지하기 위하여 Sw(Switch)를 케이블Shield의 한쪽 끝단과 접지와 사이에 연결하고 M.D(측정장치)를 다른쪽 끝단과 접지사이에 설치하여 dc성분을 측정한다. (Switch Open시) 이때 폐회로가 GPT, 배전선로, 케이블 절연체, M.D(측정장치), 접지를 통하여 이루어지며 측정시 절연과피등의 위험을 방지하기 위하여 안전 보호장치가 필요하다.



SW: Switch(스위치)
GPT: Grounding potential transformer
M. D.: Measuring device of dc component.

그림 11. 직류성분 측정회로(스위치)

그 결과는 다음 그림 12와 같이 ac절연과피 전압과 밀접한 관계가 있을뿐 아니라 水tree길이와도 함수관계를 갖고 있음이 확실해지고 있다.

또한 6.6KV CV케이블에서의 DC성분전류의 잠정적인 시험기준을 보면 다음 표 5와 같다(일본).

(2) 직류 중첩법(Method of Insulating Resistance) [24]

케이블에 접속되어 있는 접지변압기의 중성점을 통하여 나타나는 상용전원에 직류전압을 중첩하여 인가하고 케이블 절연체를 통해서 Shield에 나타나는 누설전류를 측정하여 절연저항치를 측정하는 방식으로 대지극로 전류의 식별장치도 또한 구성되어 있다. 이 장치의 회로구성은 다음 그림 13과 같으며 GPT의 중성점과 접지사이에 콘덴서와 Blocking Coil을 통하여 DC전압 E(-50V)를 인가하는데 콘덴서로 연결하여 직류적으로는 대지와 절연하고 교류적으로는 저임피던스 접지하며 대지극로 전류 측정에서도 Blocking Coil을 통해서 전류를 측정한다. 이 방법의 측정결과는 기존의 DC누설전류측정에 의하여 얻어진 절연저항이 밀접한 관계가 있다. 다음 그림 14는 그 결과를 비교한 그래프이다.

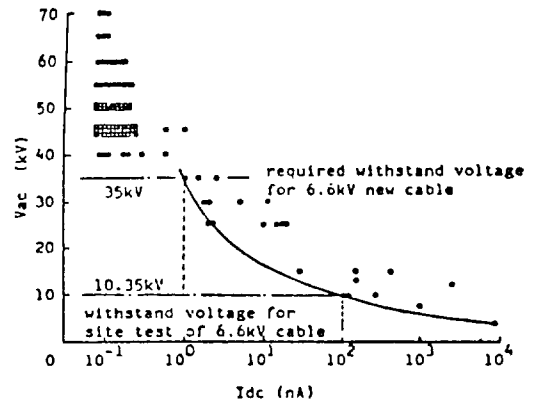


그림 12. dc성분(I_{dc})과 ac절연과피전압(V_{ac})의 관계

표 5. 6.6KV케이블에서의 I_{dc} 의 잠정적인 시험기준(일본)

| Code | Judgement | DC Component |
|------|------------|---|
| C | Good | $I_{dc} < 1nA$ |
| B | Cautionary | $1 nA < I_{dc} < 100 nA$ |
| A | Bad | $I_{dc} \geq 100nA$ $I_{dc} \geq 1nA$ with polarity change |

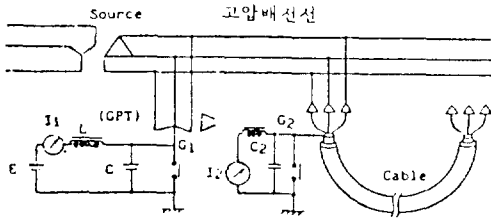


그림 13. 절연저항 측정회로

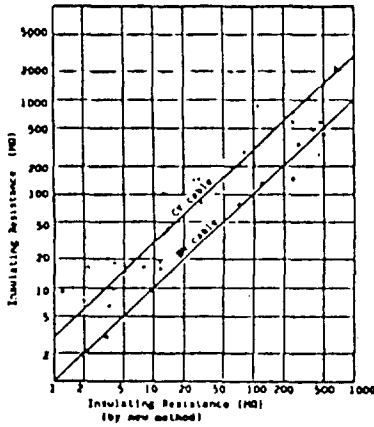


그림 14. DC누설전류 측정법과 새로운 측정방법으로 얻어진 두 절연저항의 관계

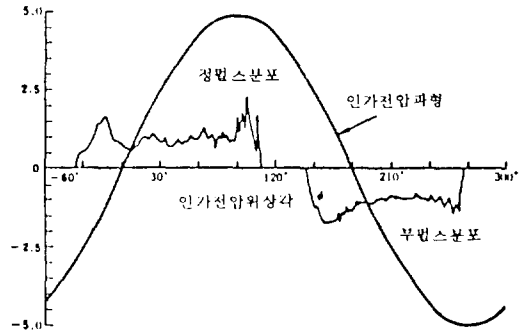


그림 15. ϕ -q분포 패턴 측정에

또한 XLPE케이블의 절연저항 판정의 잠정적인 기준(일본)은 다음 표6과 같이 제시되고 있다. 이 방법은 측정장치는 상당히 부피가 큰 편이며 직류중첩에 의한 타기기 보호장치에 미치는 영향을 검토해야만 한다.

(3) 영상전류법(절연과피 예지기술)[21]

—Detecting Treeing Dereriation in XLPE Cable Insulation Site—CV케이블의 절연과피는 최종적으로 Treeing현상에 원인이 있으므로 treeing放電 Pulse를 검출하는 방법이 중요하다.

Treeing의 진전과 더불어 부분방전 Pulse의 분포

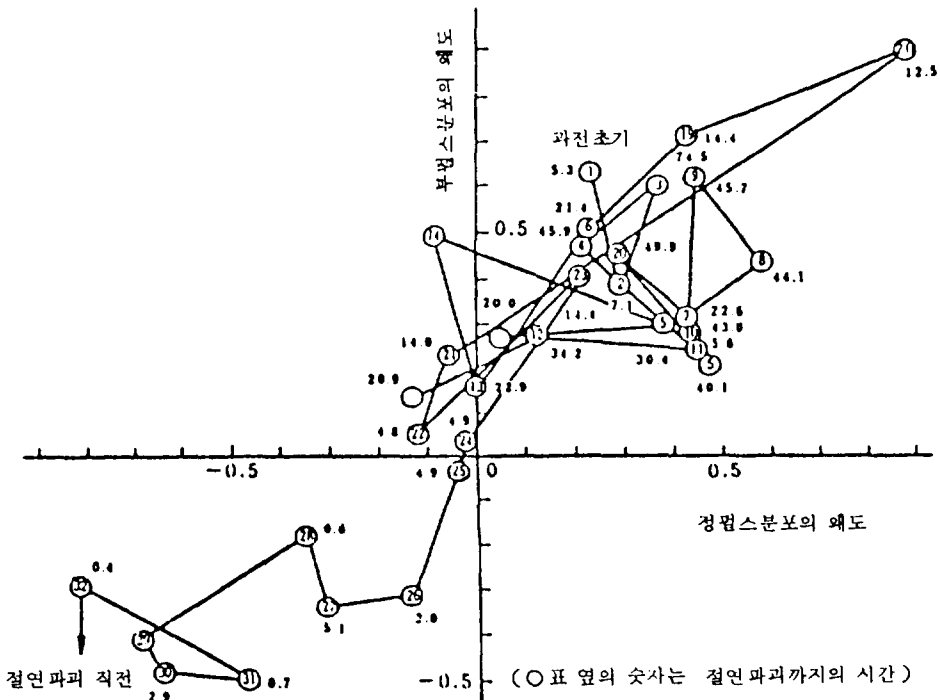


그림 16. S평면 표시의 한 예

형태가 규칙성을 갖고 변화해나가는 것이 Void방전, 반도체층 돌기부의 방전 등의 연구에서 명확해 졌다. 즉 부분방전 Pulse의 인가전압 위상에 대한 평균방전 Pulse의 분포상태가 열화의 진전과 함께 변화해 가는 것에 착안한 방법으로 이것은 통계량으로서의 3차 moment인 δ 가 다음 그림 15, 16과 같이 π 에서 부터 $\pi/2$ 로 변화하는 것과 Treeing현상의 진전이 대응하는 것으로 부터 절연열화의 상태를 진단하고자 하는 것이다.

이 δ 에 의한 판정은 방전 Pulse가 나가는 방향의 현상을 이용하고 있어 절대치의 정확한 측정보다도 상대치가 중요하며 종래 방법보다 간편하다. 이 방법은 Computer를 이용하여 신속히 처리하는 것이 필요하고 앞으로 발전이 크게 기대된다.

또 부분방전의 정확한 측정을 위해 광 Fiber를 이용하는 방법이 제안되고 있으며 케이블에 고감도 Coil을 붙여 Pulse를 검출하는 방법이 개발되었다. (그림 17)

이에 의해 종래 고전압측에서 Pulse를 측정하는 방법과 달리 안전하고 간편하게 활선 감시를 행할 수 있게 되었다. 또 實踐路에서는 아주 다양한 잡음 신호가 포함되어 있어 열화판정에 유효한 Pulse신호를 검출하는 것이 어려웠지만 계측시스템에 MICOM을 조합하여 논리적으로 잡음신호를 제거하는 방법이 개발되어 판정을 하는데 정확도를 높이고 있다.

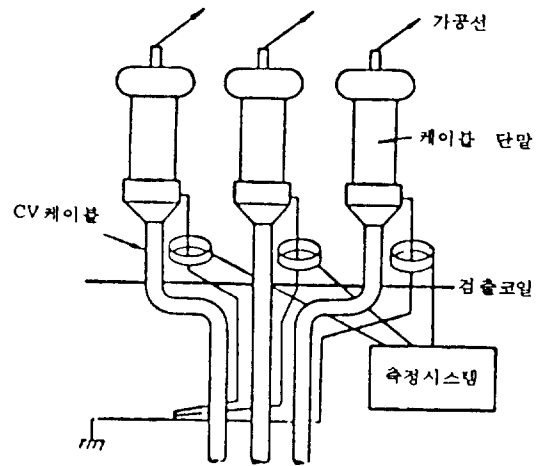


그림 17. 부분 방전펄스의 검출

또한 케이블 공장이 긴 경우에도 변전소에 정보를 보내는 설치방법이 가능하고 앞으로 發電發生地點(구간)이 위치결정도 할 수 있으리라 기대된다. 부분방전을 측정하는 다른 방법으로서 부분방전이 동반하는 음향 Pulse를 잡는 방법, 전자파의 방사를 loop안테나로 잡는 방법등이 연구 중에 있다.

(4) 종합적인 케이블 열화진단 장치 개발[36]

최근에는 직류성분, 유전정점, 직류전압 중첩법 세가지 전부를 종합 측정하여 케이블의 절연열화를 진단하는 장치가 그림 18과 같이 개발되었다.

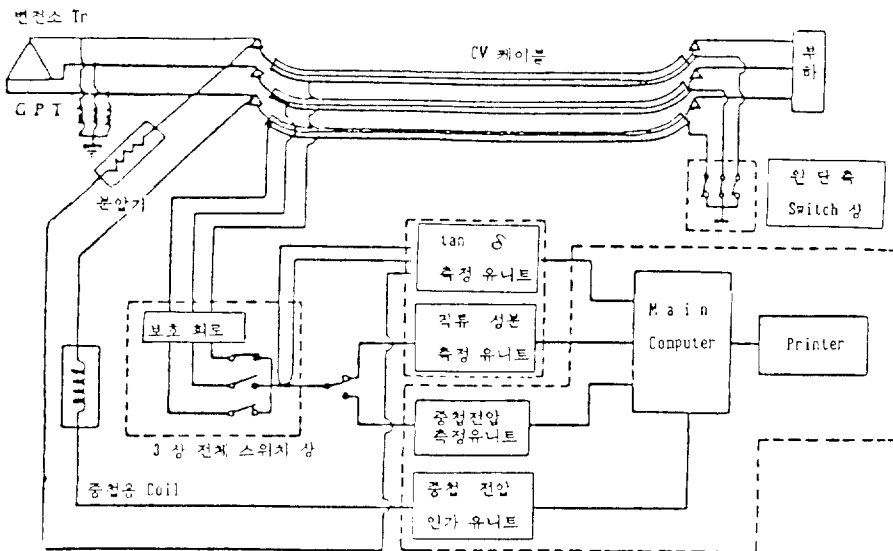


그림 18. 직류성분, 유전정점, 직류 전압 중첩 조합 회로도

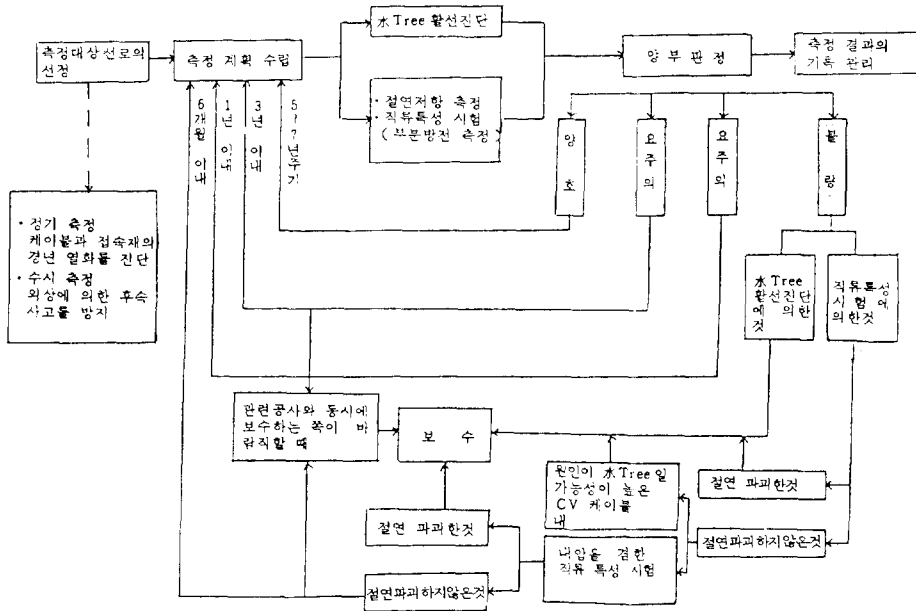


그림 19. CV케이블의 열화 측정 업무 흐름도

4.3 열화진단 주기와 측정업무 흐름 [36]

케이블의 절연열화 진단시 대체적인 수순으로서 는, 기본적으로 육안에 의한 이상점검과 간이진단에 의한 정기진단을 실시하고, 이 결과 이상상태가 나타나면 정밀진단을 실시한다.

그림 19는 CV케이블의 절연열화 측정업무를 나타 내는 흐름도이다.

5. 열화케이블의 잔존수명 추정법

진단한 케이블이 열화하고 있는 것을 알아도 앞으 로 어느 정도까지 사용할 수 있나를 아는 것이 중요 하다. 이런 잔존수명을 측정하는 방법으로 종래에는 V-t곡선을 근거로하여 결정론적 수법으로 추정되어 왔지만 케이블은 각각 그 포설조건과 사용조건이 다르므로 수명도 달라진다.

그러므로 V-t곡선법은 타당성이 없는 것으로 판단 되며 새로 제안된 방법으로써 설정신뢰도에 대한 수 명추정 방법이 있다.

즉 Stress강도 Model의 추정법을 이용하여 케이블 에 가해지는 Stress분포와 절연내력 분포가 시간과 더불어 변화해서 양자에 중첩이 일어나고 이 부분에

서 케이블의 고장이 발생한다고 생각하는 방식이다.

구체적인 추정법을 다음 그림 20에서 설명하면 우 선 대상케이블의 비파괴 측정데이터가 현장에서 얻 어져야하고(a도) 그의 비파괴 파라메타와 파괴전압 과의 상관관계를 나타내는 측정(b도)을 이용하여 각 시점에서의 파괴전압을 각 신뢰도 level에 맞추어 구 해서 c도처럼 plot하면 그 연장선상에 소요 절연내력 level에 대응해서 잔존수명을 추정하는 것이다.

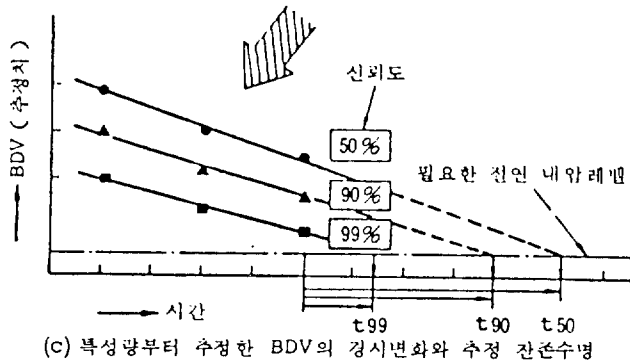
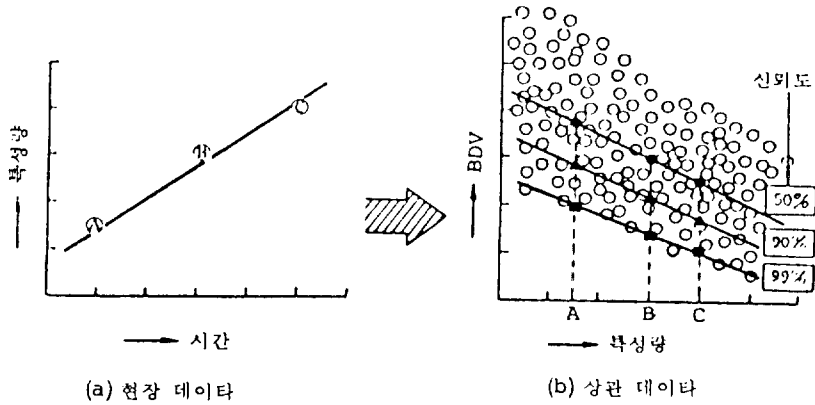
예를들면 c도에서 t90이란 확률 90%에서의 케 이블의 잔존수명을 의미하고 있다. 즉 이와 유사한 케 이블을 100회선 갖고 있을 때 90회선은 그 수명이 t90보다 길다는 말이다.

추정신뢰도를 올리면 수명도 짧아지는 것은 당연 한 이치다. 이러한 아이디어는 다른 기기에도 적용 할 수 있다.

그림 b도에 대응하는 특징으로서 CV케이블의 경 우에 대해 표시하면 다음 그림 21과 같다. 그러므로 통계처리할 수 있는 데이터가 많을수록 좋다는 것은 자명한 이치이다.

6. 장래의 동향과 과제

케이블의 절연진단은, 현재로서는 휴전한 상태에



(t50, t90, t99 값 각각 신뢰도 50%, 90%, 99%로 했을때의 최종 측정시간에서 부터의 추정 잔존수명)

그림 20. 현장 데이터와 상관 데이터에 의한 잔존수명 추정 순서도

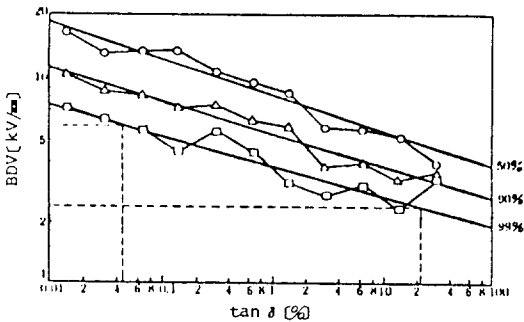


그림 21. $\tan \delta$ 와 교류파괴전압(BDV)의 상관관계

서 절연진단을 실시하고 있지만, 진단을 위하여 휴전하는 것이 쉽지 않으므로, 앞으로는 활선상태에서의 절연진단이, 더 나아가서는 운전상태에서의 절연 성능 자동감시시스템이 연구개발되어 가리라 생각된다.

또한, 케이블의 포설 당시부터 기자재 사양, 제조년도, 초기data, 운전data와 열화진단 분석data를 통계적으로 종합처리하는 합리적인 절연성능 관리기법이 개발될 것이다.

따라서 장래 과제로서는

- 1) 열화진단 기준치의 정확도 향상과 확립
- 2) 측정기술의 정확도 향상과 잡음제거
- 3) 활선 열화진단 sensor의 개발
- 4) 운전중 절연성능 자동진단 기술의 개발
- 5) 잔존수명 예측수법의 확립
- 6) 합리적인 절연성능의 관리기법 개발

이 요망되며, 이들이 모두 달성되면 지중선로 고장의 사전 방지, 지중선로의 완전 자동감시, 수명예측에 의한 케이블교체 계획수립 등 이에 따른 성과가 클 것이다.

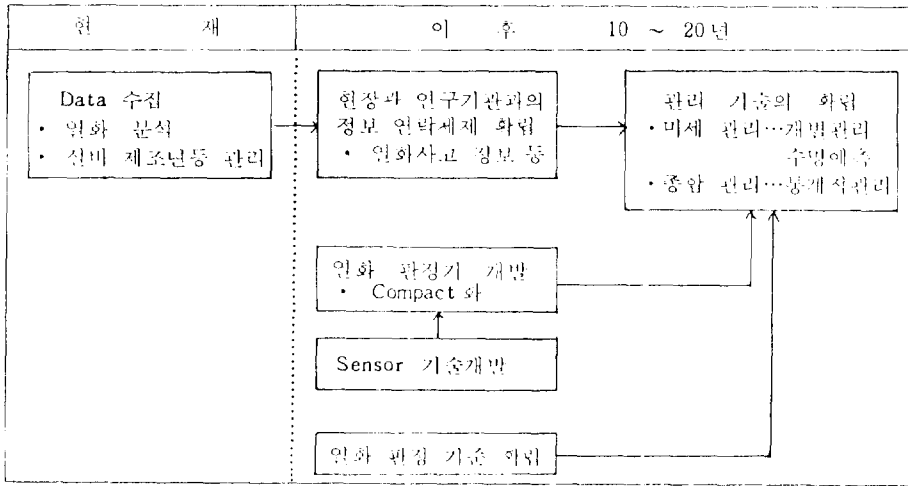


그림 22. 열화 진단 기술의 전개

7. 결 언

본고에서는 OF케이블의 gas분석에 관한 언급을 제외하고는 주로 CV케이블의 전기적 특성면에서의 절연열화 진단에 관하여 가장 實用化에 접근한 試驗法과 측정결과를 개략적으로 기술하였다. 그러나 소개하지 못한 研究試驗中에 있는 신기술도 많이 있다. 다만, 이 여러가지 시험법과 이론이 증명하듯이 최근 전력 케이블의 열화진단 기술을 확립하려는 많은 노력이 경주되고 있다는 것이다.

앞으로 머지않아 이 결과들이 정리되어 최적의 케이블 진단기술이 확립될 것이며 이에따라 전력케이블의 절연과과 사고를 미연에 방지하므로써 電力供給信賴度 向[]에 이바지 하게 될 것으로 확신된다.

따라서 國內에서도 電力케이블의 絕緣劣化診斷에 관한 新技術 研究에 많은 관심과 참여로 우리의 자체 技術蓄積을 시도해야 하겠다.

참 고 문 헌

[1] Th. Kwaaitaal, W.M.M.M. Van den Eijnden "Dielectric Loss Measurement As a Tool To Determine Electrical Aging of Extruded Polymeric Insulated Power Cable," IEEE T-EI. vol. EI-22 no. 1 Feb. 1987.

[2] K. Suzuki, S. Saito, S.Yoshida. "Power Cable Insulation," IEEE. T-EI, vol. EI-21 no.6 Dec. 1986.

[3] S. Hiyama, Y. Fujiwara. "Testing Methods For

Power Cable Insulation," IEEE T-EI. vol. EI-21 no. 6 Dec. 1986.

[4] K. Soma, M. Aihara Y. Kataoka. "Diagnostic Method For Power Cable Insulation," IEEE T-EI. vol. EI-21 no.6 Dec. 1986.

[5] Ralph. E. Thomas "Life Prediction for Cable Insulation Meterial Base on Weibull Accelerated Testing Without Failures," IEEE. T-EI. vol. EI-20. no.1. Feb. 1985.

[6] M.H.S.A. Rageb, A.J. Pearmain "An Approach to the Prediction of the Lifetime of Electrical Insulations," IEEE T-EI. vol. EI-19. no.2 1984.

[7] K. Kadotani, Y. Kako "A simple Method to Derive Correlation Curves for Insulation Diagnosis," IEEE T-EI vol EI-18 no.1 Feb. 1983.

[8] T. Fukuda, S. Irie, Y. Asada, M. Maeda, H. Nakagawa, N. Yamada "The Effect of Morphology on the Impulse Voltage Breakdown in XLPE Cable Insulation," IEEE T-EI. vol. EI-17. no. 5 Oct. 1982.

[9] W.D. Wilkens, "Environmental Effects on The Rate of Aging of EP-Insulated Power Cable," IEEE T-EI. vol. EI-16. no.6 Dec. 1981.

[10] R.B. Blodgett, R.M. Made, W.D. wilkens "An Attempt at Predicting Cable Breakdown Voltage From Dielectric Measurements," IEEE T-EI vol. EI-16. no.6 Dec. 1981.

[11] G.C. Stone, M. Kurtz, J.M. Braun, S.A. Boggs "Toward A Credible Aging Test For Extruded Cable," IEEE T-EI vol. EI-15. no.4. Aug. 1980.

- [12] Rainer. Patsch, "On Tree-Inhibition In Polyethylene," IEEE T-EI vol. EI-14. no.4 Aug. 1979.
- [13] R. J. Densley "An Investigation Into The Growth of Electrical Trees In XLPE Cable Insulation," IEEE T-EI vol. EI-4. no. 3. Jun. 1979.
- [14] Abdel-Razak Nosseir. "Calculation of Discharge Inception Voltage Due to the Presence of Voids In Power Cable," IEEE T-EI vol. EI-14. no.2 Apr. 1979.
- [15] Y. Ikeda, Y. Nitta, T. Tanaka. "New Electrodes for Partial Discharge Endurance Test," IEEE T-EI vol. EI-13. no.6 Dec. 1987.
- [16] E.L. Bran cato "Insulation Aging-A. Historical and Critical Review," IEEE T-EI vol.EI-13. no.4 Aug. 1987.
- [17] R.J. Densley. "The Impulse Strength of Naturally Aged XLPE Cables Containing Water Trees," IEEE T-EI vol EI-13 no.5 Oct. 1987.
- [18] L.H. Minnema, A. Barneveled. "An Investigation into the Machanism of Wate Treeing In Polyethylene High Voltage Cables," IEEE T-EI vol. EI-15 Dec. 1980.
- [19] 電氣協同研究 第 4卷 第 3號, 地中送電設備의 補修點檢技術, 1984,
- [20] 電氣協同研究 第 34卷 第 1號, 특별고압 가교 Polyethylene 및 接續部의 高電壓試驗法.
- [21] 岡本, 占本 "CV케이블의 Treeing 劣化檢出法の 개발," 電力中央研究報告 no 183032.(1984).
- [22] 池田, "XLPE Cable의 水tree 劣化를 判定하기 위한 新直流試驗法," 電力中央研究報告 No. 175072 (1976).
- [23] 小野, 山本, 井上 "逆吸收電流法에 의한 實施設 Cable의 劣化測定" Report of Study Meeting on Electrical Insulating Materials IEE of Japan. EIM-81-3, 1981.
- [24] 中山 "케이블 活線下 絕緣監視裝置(OLCM)의 實用化에 關해서" Report of study Meeting on Electrical Insulating Materials IEE of Japan EIM-86-35, 1986.
- [26] M. Aihara K. Nanba, Y. Ebinuma, N. Sasaki "Development of Dignostic Device for Power Cables." Showa wire and Cable Review vol.32. no. 2. 1982.
- [27] 沈川外 "電力 Cable의 絕緣劣化 監視技術" 設備診斷 Automation. 電氣書院, 1986.
- [28] 丸山外 "電力 Cable의 新 診斷 Technique." 設備診斷, Technique
- [29] "絕緣劣化診斷 試驗方法" 電氣學會 技術報告(Ⅱ部) 제182호(1984)
- [30] M. Kuwabara, M. Taya, S. Kashiwagi, K. Orito. K. Hirose K. Imar I. Okamoto "Diagnostic Method of CV Cable by Residual Voltage Measurement" Report of National Convention, IEEE of Japan, No 850, 1978.
- [31] 岡圭介外, "CV케이블의 絕緣診斷 技術의 現狀과 壯來", 1984년 電氣四學會 聯合大會
- [32] 家田 正之外, "高電壓 機器·케이블 絕緣의 乾式化와 將來 展望," 1984년 電氣四學會 聯合大會
- [33] 田中國昭外, "電氣·電子 絕緣의 새로운 方向," 1985년 電氣·情報 關聯學會 聯合大會
- [34] 岡本 達希外, "高電壓 絕緣 新測定 技術," 1986년 電氣·情報 關聯學會 聯合大會
- [35] 金 權泰, "케이블 絕緣劣化 診斷 補修," 公務國外旅行歸國報告書, 韓國電力公社, 1987
- [36] 地中 送配電 技術 WORKSHOP, 韓國電力公社 技術研究院, 1989
- [37] CV케이블, 코로나사, 1986
- [38] 23KV급 XLPE 전력케이블의 수명예측 기술개발을 위한 연구, 한국전기연구소, 1987
- [39] 活線下 케이블 絕緣監視裝置, 대한전선, 1989
- [40] 北井 茂外, "CV케이블의 活線 劣化 診斷法の 開發," 1987년 電氣學會 全國大會
- [41] 武田 強外, "活線 케이블 劣化 診斷裝置의 開發에 대하여," 1987년 電氣學會 全國大會
- [42] 田 邊勉外, "自動 絕緣 測定 시스템의 開發," 1987년 電氣學會 全國大會
- [43] 秋本 光政外, "CV케이블의 直流 漏泄 電流에 의한 劣化 診斷法," 1987년 電氣學會 全國大會
- [44] "高電壓 絕緣特性의 新測定 技術," 電氣學會 技術報告 Ⅱ部 第222號, 1986
- [45] "特別高壓 CV케이블의 設備實態와 絕緣診斷 技術의 動向," 電氣學會技術報告 Ⅱ部 第266號, 1988
- [46] "特別高壓 回轉機·케이블의 絕緣劣化 診斷 技術," 電氣學會 技術報告 Ⅱ部 第267號, 1988
- [47] "配電 케이블 思考의 現狀과 活線 診斷技術의 必要性," OHM, 1988.2月號
- [48] "電氣設備의 診斷技術," OHM, 1989.6月號
- [49] "地中 配電機材의 劣化와 診斷," 電氣現場技術, 1989.2月號
- [50] "地中 配電 工事의 設計와 工事의 實際," 電氣現場技術, 1987.4月號~1987.12月號