

電力케이블 絶緣劣化 診斷技術

유 명호*, 한 민구**
(*한전 기술 연구원 선임연구원,
**서울대 공대 전기공학과 조교수)

電力使用이 급성장하면서 負荷의 大容量 偏在化되는 추세에 따라 電氣設備은 대규모화 하는데 反하여 設備의 故障, 停止는 높은 전기 의존도를 가진 고도의 산업사회에 있어서 막대한 경제적 손실을 초래할 뿐만아니라 전력 공급 신뢰도 저하로 인한 대단위 공장 또는 電力會社의 가장 큰 관심사로 그 해결책을 모색하여 왔다.

그러나 自然에 노출되어 있는 設備의 특수성으로 인하여 사고를 완전 제거할 수는 없으며 그 예방활동과 신속 복구가 중요한 관건이다. 전력설비 중에서도 특히 電力케이블은 주로 공장 또는 대도시의 도로지반에 분포하고 있어 사고시 많은 복구시간이 必要할 뿐 아니라 도로복구, 교통장애등 그 피해가 극심한 設備이다.

따라서 地中設備의 원활한 전력공급을 위하여 전력케이블의 예방진단기술은 예전에 事後保修하던 개념과 달리 케이블의 운전상태를 점검하고 그 異常狀態(劣化狀態)를 미리 豫測하는 기술로서 電線路의 地中化 時代에 이룩해야 할 당면과제이다.

2. 電力設備 維持保修 개념의 변화

우리나라의 電力設備 또는 機器에 대한 保修개념의 變化는 사용목적 또는 사용장소별로 달라 명확하게 특정지어 말할 수는 없지만 사고시 피해가 적고 보수가 용이하던 시대 즉 최초의 保修概念인 事後保修에서 최근 事故를 미리 예측하고 대비하는 예방진단의 개념으로 변환하고 있다.

대략 연대별로 保修개념의 變化를 일반화시켜 보면 다음과 같이 표시할 수 있다.

차 례

1. 서 언
2. 전력 설비 유지보수 개념의 변화
3. 전력케이블의 절연노화에 관한 시험법
4. 유절연 케이블의 예방진단
5. XLPE 케이블의 절연노화진단법
6. 노화케이블의 잔존수명 추정법
7. 결 언

1950년대 이전 事後保修(Breakdown Maintenance)

- 事故時 피해가 작은시대
- 電力設備의 고장을 제거하기 위한 최초의 보수개념

1960년 대 豫防保修(Preventive Maintenance)

- 돌발사고 예방등을 위한 정기점검 등
- 정기점검(Over all)시 부품교환등의 개념

1970년 대 改良保修(Corrective Maintenance)

- 設計時 보존비등을 고려 경제성을 판단

- 設備改良을 重視하는 보수개념

1980년 대 豫防診斷(Predictive Maintenance)

- 設備의 劣化와 異常상태를 豫測
- 劣化상태의 감시 또는 잔존수명에측 개념

3. 電力 케이블의 절연노화에 관한 시험법

전력케이블로서는 과거 저전압에 사용하던 SL케이블, 배전용에서 부터 초고압급까지 광범위하게 사용하는 가

교 Polyethylene(CV)케이블, 안정한 절연성능을 가지고 있는 OF, POF케이블을 들수 있다.

이 케이블을 시험하는 방법에는 구조, 온도, 인장시험 등과 같이 비전기적인 시험과 직류전원시험, 교류전원시험, 삼각파시험등 전기적인 시험으로 나눌 수 있으며 이들 각각에 파괴시험과 비파괴시험으로 분류할 수 있다.

여기서는 케이블의 노화가 진행되는 메카니즘을 검토할 수 있고 노화상태의 판단이 가능한 전기적인 비파괴시험을 소개하겠다.

표 1. 각종 시험법의 개요와 특징

| 시 험 법 | 개 요 | 특 징 |
|-----------|--|---|
| 절연저항시험 | • 절연저항계(메가)에 의해 절연체 또는 Shieith '의 절연저항을 측정하여 케이블의 노화상태를 조사 | • 측정기가 소형 경량이고 조작은 아주 간단 • 옛부터 널리 시행되고 있음 |
| 직류누설전류 시험 | • 케이블 절연체의 직류고전압을 인가하여 검출되는 누설전류의 크기 또는 전류의 시간변화를 측정하여 절연체의 노화상태를 조사 | • 긴 케이블에서도 소형전원으로 가능하고 측정도 비교적 간단하여 현장시험에 적합하며 실적이 많음 • 교류에 비해 케이블 損傷이 적음 |
| 부분방전시험 | • 케이블 절연체에 직류고전압을 인가하여 局部的 缺陷部에 발생하는 부분방전을 정량적으로 잡아 부분방전 개시전압, 소멸전압 및 방전전하량들을 구하여 절연상태를 판정 | • 최근 Synchro scope, pulse 계수계, 동조식코로나 측정기등의 장치의 개발과 측정기술의 진보에 의해 가능 • 일정한전압 인가중에는 시간경과와 함께 감소 • 측정중 상승, 하강에 대해서 검토 |
| 직류방전법 | • 케이블을 직류고전압에 의해 충전하여 일정의 충전전압에 달했을 때 방전저항을 통하여 시정수가 수밀리초에서 수십밀리초로 충전전하를 방전시켜 발생하는 부분방전을 정량적으로 잡아서 절연상태를 판정한다. | • 직류 부분방전시험의 상승중 또는 하강중의 특질과 유사하고 잔류전하의 영향을 받지않음 |
| 殘留電壓法 | • 케이블 절연체에 소정의 직류고전압을 인가하여 1분간 保持한 후 전압을 제거하면 케이블에 충전된 전하는 케이블의 절연저항을 통해서 방전한다. • 케이블의 절연이 양호한 경우는 방전에 장시간을 요하고 불량한 경우는 방전하므로 인가전압부터 소정의 판정전압으로 떨어질때까지의 방전시간을 계측하여 절연의 良, 不를 판정 | • 측정기는 소형경량으로 조작은 간단 • 유도잡음의 영향을 받지않고 高精度 측정 • 단말, 온도, 습도의 영향이 크다. • 원리적으로는 누설전류에 대응한다. |
| 회복전압법 | • 케이블 절연체에 소정의 직류전압을 소정의 인가시간 후 전원을 분리하여 단시간 접지하여 그 접지를 개방해서 케이블 도체의 유기되는 회복전압을 일정시간 측정하여 시간경과에 대한 잔류전압의 변화 Patten에 의해 노화판정을 행한다. | • 소용량 전원으로 간단하게 측정가능 • 수볼트의 유기전압이 발생하므로 외부유도, 잡음의 영향이 적다. • 측정이 장시간을 요한다.(10분~30분) • 면면대전, 단말부의 영향이 크다. • 원리적으로는 역흡수전류에 대응한다. |

| | | | |
|---|---------|--|--|
| 法 | 耐電壓試驗法 | <ul style="list-style-type: none"> 케이블 절연체에 규정의 직류고전압을 일정시간 인가하여 그때의 내전압 성능을 확인하여 절연상태의 양부를 판정한다. | <ul style="list-style-type: none"> 시험은 비교적 간단하고 단시간에 결과가 나오는 잇점은 있지만 케이블을 파괴시킬 위험성이 있기 때문에 노화진단법으로는 채용하지 않음. 소용량 전원으로 간단하게 측정가능 충전은 저압 100V로도 되고 측정음의 위험성이 없다. 미소전류를 측정하기 때문에 외부유도, 잡음, 기온, 습도의 영향이 크다. 측정에 장기간을 요한다. (10분~30분) |
| | 逆吸收電流法 | <ul style="list-style-type: none"> 케이블의 절연체에 소정의 직류전압을 소정시간 인가후 전원을 차단하여 단시간 단락하고 과도전류를 영으로 한다. 그 후 방전시의 역흡수전류를 측정하여 일정시간적분하여 이를 역흡수 전류로 하고 케이블 길이의 영향을 없애기 위해 케이블의 정전용량으로 제한한 Q/C치의 크기에 의해 노화 판정. | <ul style="list-style-type: none"> 시험장치는 직류누설 전류 시험장치와 거의 같다. 직류누설 전류시험보다 전류의 절대치가 크고 유도 잡음의 영향을 안받음. lp와 tan와는 좋은 상관성이 있음. 케이블 길이에 의해 직류 Peak 전류치(lp)가 달라지므로 현장 적용으로는 주의를 요함. 측정시간이 길다(30~40분) |
| | 과도직류전류법 | <ul style="list-style-type: none"> 케이블 절연체에 소정의 전압을 소정시간 인가후 전원을 분리하여 단시간 점지하고 충전 전하를 측정한다. 그 후 즉시 시험전압을 인가해서 순시적인 돌입전류를 가하여 노화부분의 절연저항분 전류를 측정해서 그 Peak치(lp)의 크기에 의해 노화 판정한다. | <ul style="list-style-type: none"> 대형의 전원장치가 필요 피측정 Cable이 정전 또는 전자유도를 받는 경우에는 특별한 배려를 요함 공장시험 Data는 풍부함. |
| 交 流 法 (商 用 周 波) | 유전정점시험 | <ul style="list-style-type: none"> 케이블 절연체에 상용주파교류전압을 인가해서 Shering Bridge 등에 의해 유전정점(tan)의 전압특성을 측정해서 절연의 상태를 판정한다. | <ul style="list-style-type: none"> 대형의 전원장치 필요 외부잡음의 영향이 크기 때문에 그 제거방법에 대해서 특별한 배려가 필요 |
| | 부분방전시험 | <ul style="list-style-type: none"> 케이블 절연체에 일정한 상용주파 교류전압(사용전압 전후)을 인가하여 이상부분에서 발생하는 부분방전을 정량적으로 잡아 절연의 상태를 판정한다. | <ul style="list-style-type: none"> 정전용량의 측정은 그 자체로 노화를 판정하기 위한 것이 아니라 직류누설 전류측정에 의해 얻는 절연저항을 정격전압, 절연두께, 길이의 차이에 무관하게 비교할 수 있는 양으로서 C.R치의 산정을 위해 이용하는 것을 목적으로 한다. |
| | 정전용량측정 | <ul style="list-style-type: none"> 케이블에 상용주파 교류전압을 인가하여 새링 브리지등으로 정전용량을 측정한다. | <ul style="list-style-type: none"> 대형의 전원장치가 필요 사용전압에 견디는 보증은 되지않 노화도의 판정은 곤란 케이블을 파괴하는 시험이 있으므로 노화진단으로는 채용하지 않는다. |
| | 내전압시험 | <ul style="list-style-type: none"> 케이블 절연체에 규정한 상용주파교류 전압을 일정시간 인가하여 그 때의 내전압 성능을 확인해서 절연상태의 양, 부를 판정함. | |

| | | | |
|-------|--------|--|--|
| 超低周波法 | 유전정접시험 | <ul style="list-style-type: none"> 시험전원에 超低周波(0.1Hz 정현파)를 사용해서 교류법과 같이 유전정접 시험, 부분방전 시험, 정전용량 측정을 행하여 절연의 상태를 조사함. | <ul style="list-style-type: none"> 초저주파에 의한 시험도 충전전류가 적으므로 전원장치가 소용량으로도 되고 시험장치도 소형경량이다. 외부유도, 잡음이 용이하게 판별되므로 제거가 간단함 유전손 부분방전 발생빈도가 작아서 측정을 위한 과전압 인가에 의한 손상이 적다. 유전정접, 정전용량을 그의 절대치, 전압특성, 주파수 특성등으로 부터 상용주파법에 대응할 수 있는 가능성이 있다. |
| | 부분방전시험 | <ul style="list-style-type: none"> 시험전원에 준삼각파(0.1Hz정도)를 사용하여 부분방전시험을 행하여 절연상태를 조사함. | <ul style="list-style-type: none"> 교류인가와의 등가성이 있다. 특별한 시험전원이 필요하지만 전원용량은 작아도 된다. |
| | 정전용량측정 | | |
| 交直重疊法 | 유전정접시험 | <ul style="list-style-type: none"> 시험전원으로 직류전압과 상용주파 교류전압을 중첩한 것을 사용하여 교류법과 같이 유전정접시험, 부분방전시험 또는 직류누설 전류 측정(직류분시험)을 행하여 절연상태를 조사함. | <ul style="list-style-type: none"> 유전정접은 교류법보다 감소한다. 부분방전은 직류법보다 발생하기 쉽고 교류법의 경우와 거의 같다. 직류법 전류는 외부의 영향이 적고 직류법의 경우보다 노화상황에 대응하는 변동을 잘한다. 전원으로서 직류, 교류가 필요하지만 교류전원은 교류법보다 용량이 작아도 된다. 교류 직류전압비(조합비)가 여러종류 있으나 표준화가 어렵고 실측예가 적다. |
| | 부분방전시험 | | |
| | 직류분시험 | | |
| 活線診斷法 | 직류성분법 | <ul style="list-style-type: none"> 케이블 절연체에 상용주파 교류전압을 인가했을때 절연체에 tree가 있으면 그 정류작용에 의해 직류성분을 발생시키므로 송전중 케이블의 접지선에서 이 직류성분을 검출해서 노화진단을 한다. | <ul style="list-style-type: none"> 교류과전시의 직류성분의 水tree발생 케이블로부터 노화신호인 것으로 실증되고 있다. nA급의 미소전류를 관측할 필요가 있으므로 현장용의 측정기가 개발되고 있다. 측정용 전원불요, 측정기는 소형경량으로 계측도 아주 간단하다. |
| | 영상전류법 | <ul style="list-style-type: none"> 케이블의 노화는 3심 일정하지 않으므로 노화가 진행하면 영상전류가 증가한다. 이 영상전류의 증가를 케이블에 접속되어 있는 영상변류기 또는 접지변압기의 중성점에서 송전중에 측정하여 노화진단을 한다. | <ul style="list-style-type: none"> 측정은 간단하지만 3상 불평형 전류에 의해서도 영상전류가 증대하므로 노화경향을 잡는 것은 곤란한 면이 있다. |
| | 직류중첩법 | <ul style="list-style-type: none"> 케이블에 접속되어 있는 접지변압기의 중성점을 통해서 사용중인 상용주파수에 중첩하여 DC 50V의 직류전압을 인가하고 케이블 절연체를 통해서 차폐층에 나타나는 직류 누설전류를 고감도 전류계에 의해 측정해서 절연저항치를 직독한다. | <ul style="list-style-type: none"> 직류 누설전류 특성과의 상관성이 인정되고 있다. Shieth, 방식층의 절연저항도 측정가능하다. 장치는 상당히 커진다. 직류중첩에 의한 타기기 보호장치등에의 영향에 대해 검토할 필요가 있다. |

4. 油절연 (OF, POF) 케이블의 예방진단¹⁹⁾

OF 케이블은 절연지와 절연유에 의한 복잡한 구조의 절연체계를 갖고 있다. 정상운전 상태에서 Voids(공동)이 없는 케이블은 절연노화를 고려하지 않아도 되고 일반적으로 케이블의 절연이 양호한 상태로 유지되는지는 케이블과 그 접속재의 절연유 압력상태를 감시해야 한다.

최근 Splices(접합)과 Sealing box가 불량하기 때문에 발생하는 절연유의 절연특성저하를 검출하기 위하여 Splices 와 Sealing box에서 샘플 채취한 절연유의 분석법이

이용됨.

gas가 절연유내에 존재하는 것은 코로나 방전이나 arc 가 내부에서 발생하고 있다는 의미이며 이 gas분석은 변압기의 유지보수에도 중요한 역할을 한다. 절연유의 절연노화를 검출하기 위하여 분석법으로는 수분과 gas 분석외에 유전정접시험, 체적저항을 측정 등이 있다.

이들 측정에는 시료를 오염없이 채취하는 것이 매우 중요한데 주사기등을 사용한다.

OF케이블의 절연유 진단에 대한 시험적인 기준은 다음 표2와 같다.

표 2. OF 케이블의 절연유진단에 대한 잠정적 시험기준

| Items | Threshold level | Remarks |
|-------------------------------|---------------------------|--|
| T.C.G | 1500ppm | excluding O ₂ ,N ₂ ,CO ₂ |
| H ₂ | 500ppm | H ₂Corona discharge C ₂ H ₂ ...Arc CO, CO ₂ ...Overheating CH ₄ ,C ₂ H ₆ ,C ₃ H ₆ ... Decomposition of oil at low temp. C ₂ H ₄ ,C ₃ H ₆ ...Decomposition of oil at high temp. |
| C ₂ H ₂ | Trace | |
| CO | 100ppm | |
| CO ₂ | 1000ppm | |
| CH ₄ | 200ppm | |
| C ₂ H ₆ | 200ppm | |
| C ₂ H ₄ | 200ppm | |
| C ₃ H ₆ | 200ppm | |
| C ₃ H ₈ | 200ppm | |
| T.G | 10000ppm | |
| Total Acid Value | 0.02KOHmg / g | Chemical Degradation |
| Moisture Content | 10ppm | Airtightness Insulation Performance |
| Specific Volume Resistivity | 1×10 ¹³ Ω · cm | Insulation Performance |
| Dielectric Dissipation Factor | 2% | |

T.C.G : total combastibic gas

T.G : total gas

5. XLPE 케이블의 절연노화 진단법

XLPE 케이블은 우수한 절연특성과 그 취급이 용이하여 그 사용이 급증하고 있는 케이블이다. 그러나 XLPE

케이블은 水 tree에 의한 절연특성의 저하가 가장 큰 문제이다. 그것은 주위의 수분의 존재에 의한 흡습 또는 제조시 수분등의 침입으로 발생하는데 수분이나 Voids(공동), 이물 등의 존재하는 절연체에 강전계가 가해지면 전

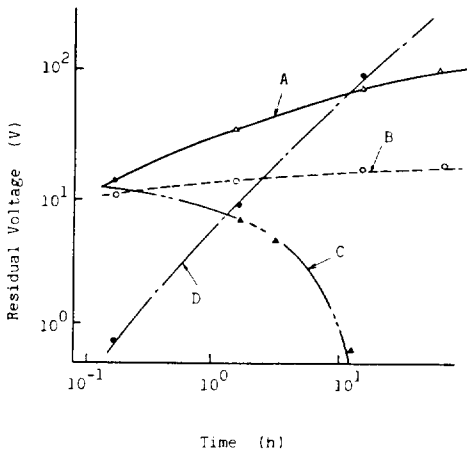
제가 국소적으로 발생하여 그 점에서 부터 점차 水 tree가 발생한다. 따라서 제조시의 품질관리가 중요하며 지금까지 제안된 水 tree 노화의 검출방법은 기존 dc 누설전류 측정이나 $\tan\delta$ 측정외에 여러가지가 있는데 그것들은 활선측정 방법(상시감시장치)과 사선측정방법으로 대별된다.

가. 사선 상태에서의 측정방법

tree의 발생과 전파는 절연물에 주입되어 축적된 전하와 밀접한 관계가 있다. 그러므로 절연체 내에서의 전하를 측정하는 것은 절연물의 절연파괴 이전의 노화진전상태를 예측하는 유용한 방법이다. 최근 水 tree 노화를 검출하는 여러가지 방법이 제안되고 있다.

1) 회복전압 측정법³⁰⁾

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



A : 새 케이블, B, C, D : 노화된 케이블

그림 1. 잔류전압의 시간의존성

2) 역흡수 전류법²³⁾

CV케이블에 일정 직류전압을 가하면 (2분정도) 직류 누설전류가 일정치에 이르는데 이때 단락하여 케이블에 충전된 전하를 방전하면 다음 그림 2와 같은 전류특성을 얻을 수 있다.

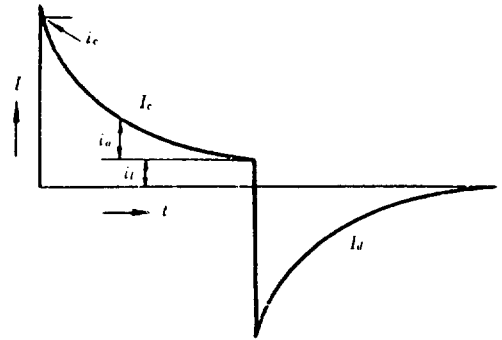


그림 2. 충전전 특성

水 tree가 발생한 노화 CV케이블에서는 정상케이블에 비해 큰 역흡수 전류(I_d)가 흘러 감쇄 시정수도 크다. 이 역흡수 전류를 일정시간동안 실측하여 적분을 통해서 방전전하량을 구한다. 이 방전전하량을 케이블의 정전용량으로 나눈값으로 노화를 측정하는 방법이다.

$$V = \frac{100}{C_0} \int_0^{10} I_d dt \quad (1)$$

측정회로는 다음 그림 3과 같은 회로에서 S_1 을 1단자로 S_2 를 ON상태로 2분간 유지하여 케이블에 충전한 후 S_1 을 2단자로 S_2 는 ON상태에서 3초간 방전한 후 S_1 을 2단자로 S_2 를 off하여 역흡수 전류를 30초간 측정한다. 그 대표적인 결과는 다음 그림4와 같다.

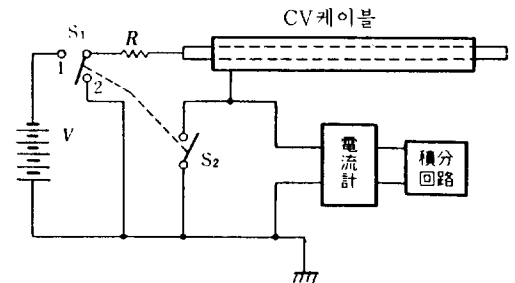


그림 3. 역흡수전류측정회로

(순서)

S_1 : 1, S_2 : ON으로 하고 케이블에 충전(2분간)

S_1 : 2, S_2 : ON으로 하고 방전(3秒間)

S_1 : 2, S_2 : OFF로 하고 흡수전류를 측정(30秒間)

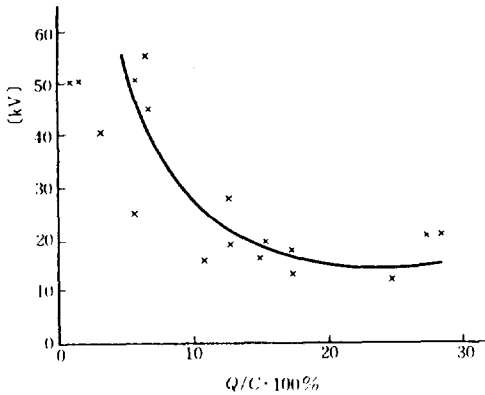


그림 4. 철거 케이블의 상용주파수파괴 전압과 역흡수 전류의 관계

3) 잔류 전압법²⁶⁾

이 방법은 측정이 간단하고 단시간에 판정이 가능하며 전압을 측정하므로써 noise나 유도 영향이 비교적 저감되는 이점이 있다. 또한 케이블 길이에도 영향을 받지 않는 점도 현장측정에 유리하다.

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

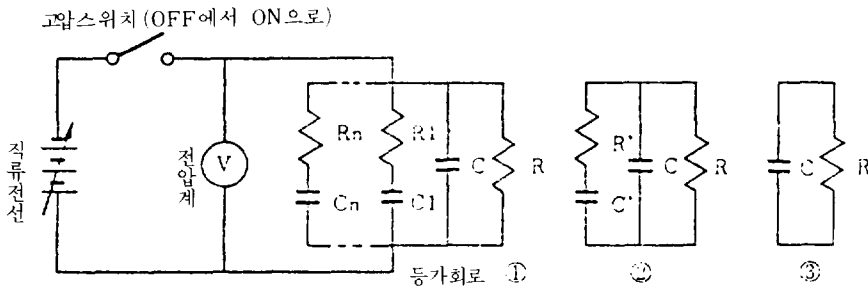


그림 5. 회로의 구성

이때 케이블에 충전된 전하가 케이블의 절연저항 R을 통해서 방전하기 때문에 전압은 점차 하강한다. 케이블의 절연이 양호한 경우는 방전이 장시간을 요하고 케이블이 노화하여 절연이 불량한 경우는 단시간에 방전한다. 이 인가전압에서 소정의 판정 전압까지의 방전시간을 재측한 후 그 시간을 비교하여 良, 不를 판정하는 것이다. 그

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

이므로 ② ③ ④ 식으로부터

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{\epsilon_0 \epsilon_r \rho}} \quad (5)$$

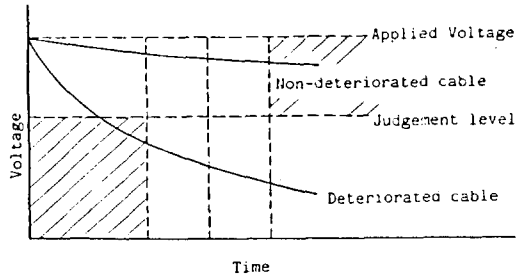


그림 6. DC 전압을 인가한 후의 방전 특성

결과는 그림 6과 같다.

케이블의 직류전압 특성은 그림5에서와 같이 근사 등가회로로부터 전압은

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

이다.

이때 C.R은

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln(R/r)} \quad (3)$$

- l : 케이블 길이
- R : 절연체 반경
- r : 도체 반경
- ϵ_0 : 진공유전율
- ϵ_r : 절연체 비유전율
- ρ : 절연체 저항율

이다.

즉 인가전압의 변동특성은 케이블공장, 도체 Size, 절연체두께, 등에 상관없는 ϵ_r 과 ρ 의 함수이다.

그런데 CV케이블의 노화는 水 tree가 대표적인데 水 tree가 발생할 때는

절연체의 저항=水 tree部の 저항+水 tree가 진전하지 않는 저항으로 표현할 수 있는데 전체적으로 저항성분이 많이 약화되어 ρ 값이 낮아짐을 알 수 있다. 따라서 C에 충전된 전하의 대부분은 낮아진 저항을 통해서 방전되므로 전압은 빨리 떨어지게 된다.

4) 직류과도 전류법²¹⁾

케이블에 직류전압을 인가했을 때 절연체중을 흐르는 과도전류의 크기로 부터 노화를 진단하려는 방법이다. 미노화 케이블의 경우 등가회로인 과도전류는 다음 그림 7 (a)와 같이 나타나지만 노화 케이블은 (b)와 같이 생각할 수 있다. 이것은 水 tree가 커짐에 따라 R_2 의 저항으로 인하여 i_3 성분이 증대하는 점에 착안한 것이다.

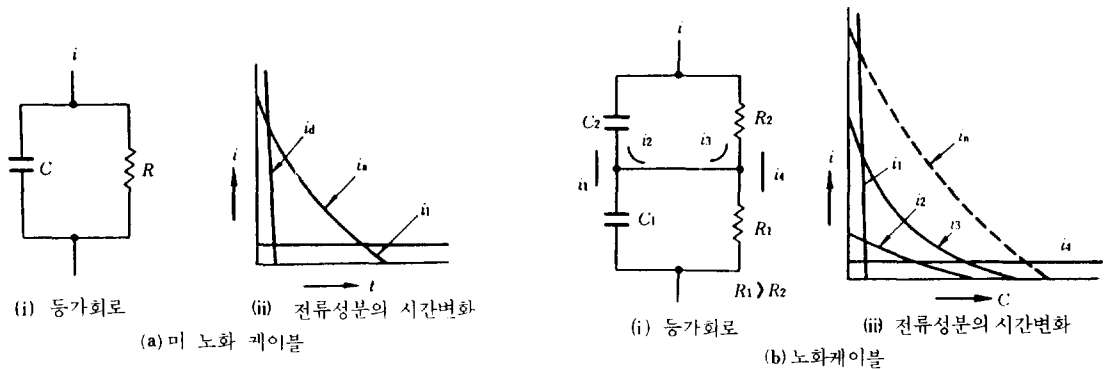


그림 7. 케이블의 등가회로와 직류전류 성분의 시간변화

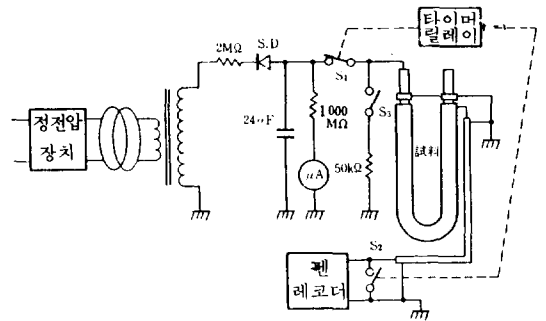


그림 8. 과도직류전류법의 측정

이의 측정회로는 다음 그림 8과 같으며 i_3 의 측정을 위해서는 유전분극에 기초한 흡수전류의 역제가 필요하기 때문에 시험케이블에 일정직류 전압을 약 30분간 인가하여 절연체중에 분그5을 형성하고 분극완료 후 케이블에 고전압측을 1~5초간 접지시켜 C_1C_2 의 저항(기하학적 정전용량에 충전된 전하)를 일단 방전한다. C_1C_2 의 전하 방전후 시험전압을 즉시 인가하여 i_3 를 측정한다. 시험전압 인가시에는 순시적인 변위전류 i_1 이 흐르므로 계기의 보호를 위해 전압인가 3초후에 i_3 를 측정하여 저항분 전류 피크치(i_p)에 의해 노화를 판정한다. 이 결과를 나타내면 다음 그림 9와 같이 누설전류- $\tan\delta$ 의 관계보다도 비교적 좋은 상관관계가 있다고 볼 수 있다.

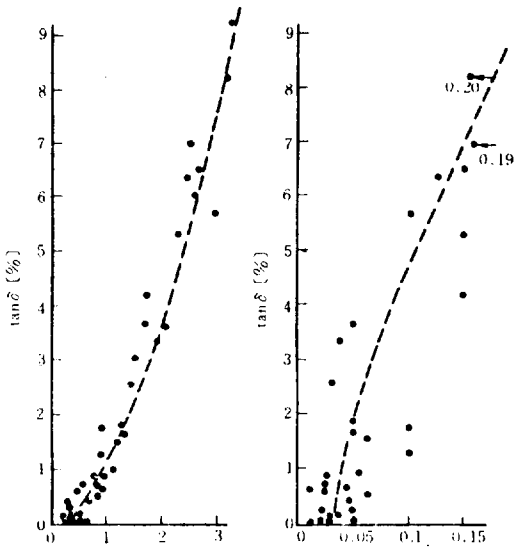


그림 9. $\tan\delta$ 와 I_3 및 누설전류의 관계

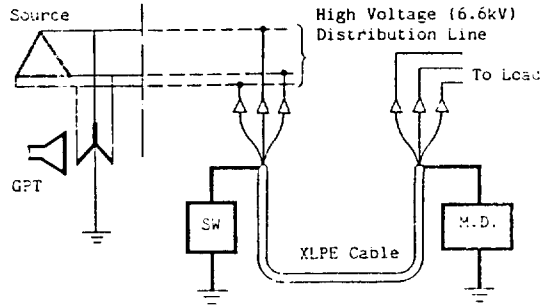
나. 환선상태에서의 측정방법

기존의 측정방법으로는 보통 케이블을 계통으로부터 분리하여 시험을 시행하였으나 부하차단 등의 계통조작을 요하기 때문에 중요 선로 등에서는 부하공급중의 환선 상태에서 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 노화의 정도를 판별하는 방법이다. nA정도의 미소전류를 관측할 필요가 있으며 측정용 전원이 불필요해 측정에 유리하다. 이 측정회로는 다음 그림 10과 같으며 측정시 케이블 Shield를 손쉽게 접지하기 위하여 Sw(Switch)를 케이블 Shield의 한쪽 끝단과 접지와의 사이에 연결하고 M.D(측정장치)를 다른쪽 끝단과 접지사이에 설치하여 dc성분을 측정한다. (Switch Open 시) 이때 폐회로가 GPT, 배전선로, 케이블 절연체, M.D(측정장치), 접지를 통하여 이루어지며 측정시 절연과피등의 위험을 방지하기 위하여 안전 보호장치가 필요하다.

그 결과는 다음 그림11과 같이 ac 절연과피 전압과 밀접한 관계가 있을뿐 아니라 水 tree 길이와도 함수관계를 갖고 있음이 확실해지고 있다.



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

그림 10. 직류성분 측정회로(스위치)

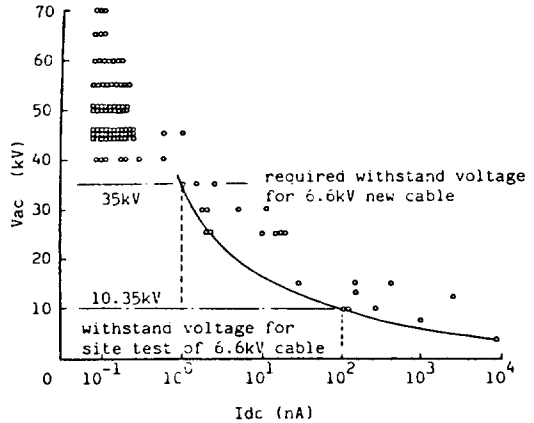


그림 11. dc성분 (Idc)과 ac 절연과피전압(Vac)의 관계

또한 6.6kV CV케이블에서의 DC성분전류의 잠정적인 시험기준을 보면 다음표 3과 같다.

표 3. 6.6KV 케이블에서의 Idc의 잠정적인 시험기준

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

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

케이블에 접속되어 있는 접지면압기의 중성점을 통하여 나타나는 상용전원에 직류전압을 중첩하여 인가하고 케이블 절연체를 통해서 Shield에 나타나는 누설전류를 측정하여 절연저항치를 측정하는 방식으로 대지귀로 전류의 식별장치도 구성되어 있다. 이 장치의 회로구성은 다음 그림 12와 같으며 GPT의 중성점과 접지사이에 콘덴서와 Blocking Coil을 통하여 E(-50V)를 인가하고 I을 측정하는 방식도 콘덴서로 연결하여 직류적으로는 대지와 절연하여 교류적으로는 저임피던스 접지하고 Blocking

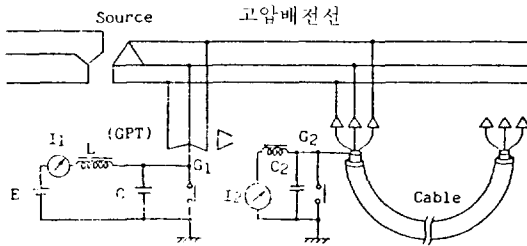


그림 12. 절연 저항 측정회로

3) 영상전류법(절연과피 예지기술)²¹⁾

-Detecting Treeing Deterioration in XLPE Cable Insulation Site- CV케이블의 절연과피는 최종적으로 電氣 tree에 원인이 있으므로 treeing 放電 Pulse를 검출하는 방법이 중요하다.

전기 tree의 진전과 더불어 부분방전 Pulse의 분포형태가 규칙성을 갖고 변화해 나가는 것이 Void 방전, 반도전 축 돌기부의 방전 등의 연구에서 명확해 졌다. 즉 부분방

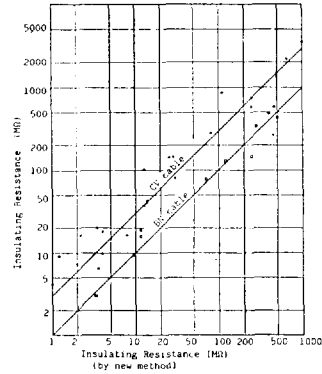


그림 13. DC 누설전류 측정법과 새로운 측정 방법으로 얻어진 두 절연 저항의 관계.

표 4. XLPE 절연 케이블에서의 절연저항의 잠정적인 시험기준

| Rank | Insulating Resistance | Judgement | Remarks |
|------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
| - | $1000M\Omega \leq$ | Good | - |
| A | $1000 - 100M\Omega$ | Cautionary | Follow up at shorter intervals |
| B | $100 - 10M\Omega$ | Cautionary (serious) | Prepare new cables |
| C | $10M\Omega \geq$ | Bad | Be replaced |

Coil을 통해서 측정한다. 이 방법의 측정결과는 기존의 DC 누설전류 측정에 의하여 얻어진 절연저항과 밀접한 관계가 있다.

다음 그림 13은 그 결과를 비교한 그래프이다.

또한 XLPE의 절연 진단판정의 잠정적인 기준은 다음 표 4와 같이 제시되고 있다. 이 방법은 측정장치는 상당히 커지는 편이며 직류중첩에 의한 타기기 보호장치에 미치는 영향을 검토해야 한다.

전 Pulse의 인가전압 위상에 대한 평균방전 Pulse의 분포상태가 노화의 진전과 함께 변화해 가는 것에 착안한 방법으로 이것은 통계량으로서의 3차 moment인 歪度 S가 다음 그림 14, 15와 같이 正에서 부터 負로 변화하는 것과 電氣 tree의 진전이 대응하는 것으로 부터 절연노화의 상태를 진단하고자 하는 것이다.

이 歪도에 의한 판정은 방전 Pulse가 나가는 방향의 형상을 이용하고 있어 절대치의 정확한 측정보다도 상대치

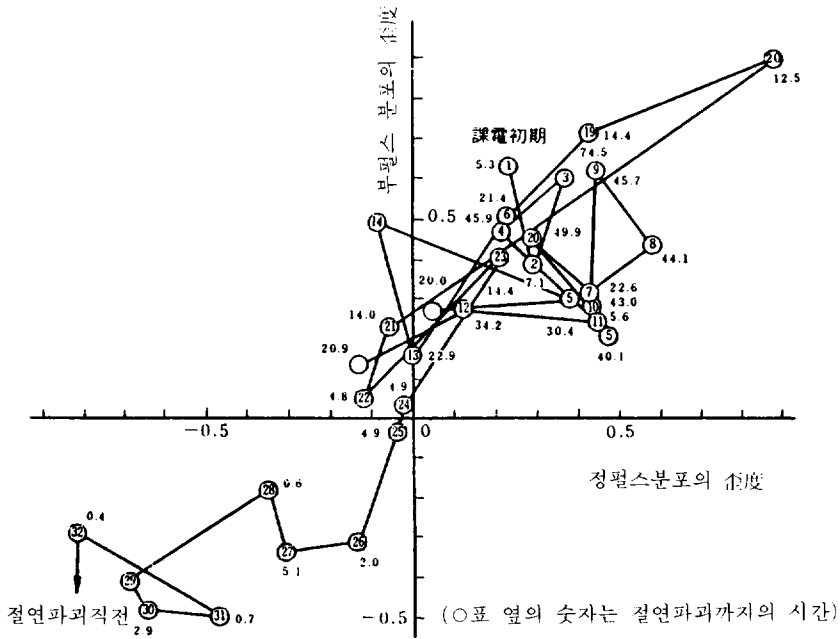


그림 15. S평면표시의 한예

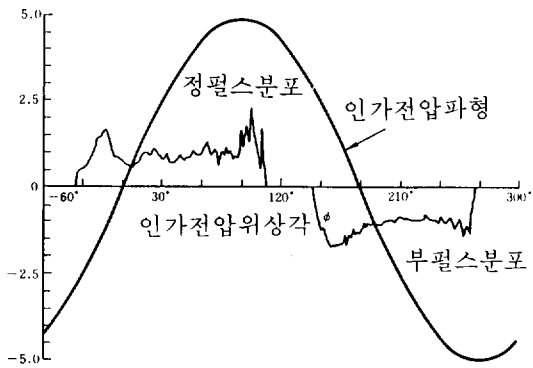


그림 14. φ - q 분포 패턴 측정예

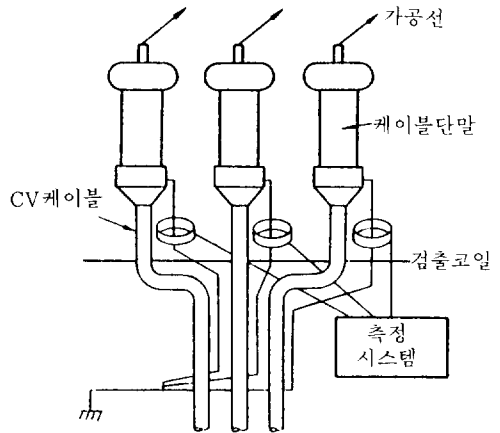


그림 16. 부분방전펄스의 검출 (t_{50} , t_{90} , t_{99} 를 각각 신뢰도 50%, 90%, 99%로 했을 때의 최종 측정시간에서부터의 추정잔존 수명)

가 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.(그림16) 이에 의해 종래 고전압측에서 Pulse를 측정하는 방법과 달리 안전하

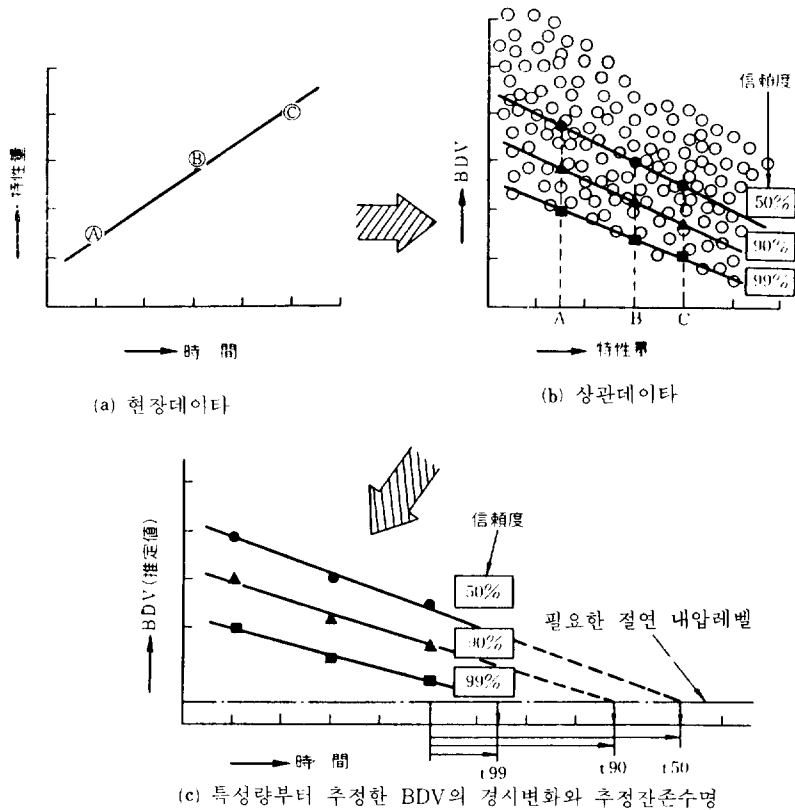


그림 17. 현장 데이터와 상관 데이터에 의한 잔존수명 추
정순서의 모식도

고 간편하게 활선감시를 행할수 있게 되었다. 또 實線路에서는 아주 다양한 잡음신호가 포함되어 있어 노화판정에 유효한 Pulse신호를 검출하는 것이 어려웠지만 계측시스템에 MICOM을 조합하여 논리적으로 잡음신호를 제거하는 방법이 개발되어 판정을 하는데 확도를 높이고 있다.

케이블 공장이 긴 경우에도 변전소에 정보를 보내는 설치방법이 가능하고 앞으로 放電發生地點(구간)의 위치결정도 할 수 있으리라 기대된다. 부분방전을 측정하는 다른 방법으로서 부분방전이 동반하는 음향 Pulse를 잡는 방법, 전자파의 방사를 loop 안테나로 잡는 방법등이 연구중에 있다.

6. 노화케이블의 잔존수명 추정법

진단한 케이블이 노화하고 있는 것을 알아도 앞으로 어

느 정도까지 사용할 수 있나를 아는 것이 중요하다. 이런 잔존수명을 측정하는 방법으로 종래에는 V-t곡선을 근거로 하여 결정론적 수법으로 추정되어 왔지만 케이블은 각각 그 포설조건과 사용조건이 다르므로 수명도 달라진다. 그러므로 V-t곡선법은 타당성이 없는 것으로 판단되며 새로 제안된 방법으로써 설정 신뢰도에 대한 수명추정 방법이 있다.

즉 Strees 강도 Model의 생각법을 이용하여 케이블에 가해지는 Strees분포와 절연내력 분포가 시간과 더불어 변해서 양자에 중첩이 생겨 이 부분에서 케이블이 고장이 된다고 생각하는 방식이다.

구체적인 추정법을 다음 그림 17에서 설명하겠다. 우선 대상케이블의 비파괴 측정데이터가 현장에서 얻어져야 하고(a도)그의 비파괴 파라메타와 파괴전압과의 상관관계를 나타내는 측정(b도)을 이용하여 각 시점에서의 파괴전압을 각 신뢰도 level에 맞추어 구해서 C도처럼 Plot

하면 그 연장선상에 소요절연 내력 level에 대응해서 잔존수명을 추정하는 것이다.

예를들면 C도에서 t90이란 확률 90%에서의 케이블의 잔존수명을 의미하고 있다. 즉 이와 유사한 케이블을 100회선 갖고 있을때 90회선은 그 수명이 t90보다 길다는 말이다.

추정신뢰도를 올리면 수명도 짧아지는 것은 당연한 이치다. 이러한 아이디어는 다른 기기에도 적용할 수 있다.

그림(b)에 대응하는 특성으로서 CV케이블의 경우에 대해 표시하면 다음 그림 18과 같다. 이와같이 통계 처리할 수 있는 데이터가 많을수록 좋다.

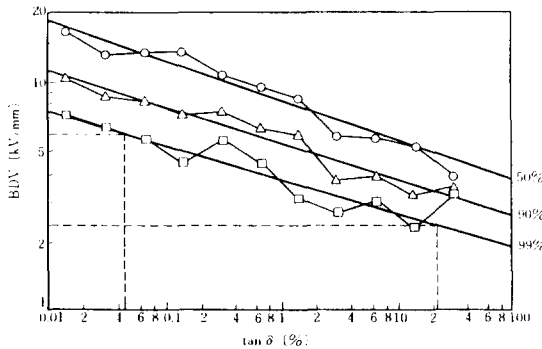


그림 18. $\tan\delta$ 와 교류과괴전압(BDV)의 상관관계

7. 결 언

본고에서는 OF케이블의 gas분석에 관한 언급을 제외하고는 주로 CV케이블의 전기특성면에서의 절연노화 진단에 관하여 가장 실용화에 접근한 시험법과 측정결과를 개략적으로 기술하였다. 그러나 소개하지 못한 연구시험 중에 있는 신기술도 많이 있다. 다만, 이 여러가지 시험법과 이론이 증명하듯이 최근 전력케이블의 노화진단 기술을 확립하려는 많은 노력이 경주되었다는 것이다.

앞으로 머지않아 이 결과들이 정리되어 최적의 케이블 진단기술이 확립될 것이다.

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 No6, Dec. 1986.

4) K. Soma, M. Aihara Y.Kataoka, "Diagnostic Method For Power Cable Insulation" IEEE T-EI, Vol. EI-21 No6, Dec. 1986.

5) Ralph. E. Thomas "Life Prediction for Cable Insulation Material Based 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.No5 Oct. 1982.

9) W.D. Wilkens, "Environmental Effects on The Rate of Aging OF. EP-Insulated Power Cable" IEEE T-EI, Vol. EI-16, No6 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-14 No.3. Jun. 1979.

14) Abdel-Razak Nosseir. "Calculation of Discharge Inception Voltage Due to the Presence of Voids

- In Power Cables" 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. Brancato "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. 1978.
 - 18) L.H. Minnema, A.Barneved, "An Investigation into the Mechanism of Water 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와 保守點檢技術. 1984.
 - 20) 電氣協同研究 제34권 제1호. 특별고압가교 Polyethylene 및 接續部의 高電壓試驗法.
 - 21) 岡本, 吉本 "CV 케이블의 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 實布設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 絶緣監視裝置(OLCM)의 實用化에 關係서" Report of study Meeting on Electrical Insulating Materials IEE of Japan, EIM-86-34, 1986.
 - 25) 大西, 浦野, 望月, 柚, 小谷, 神尾, "CV 케이블의 水 tree 活線診斷裝置". 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 Diagnostic Device for Power Cables." Showa wire and Cable Review Vol.32. No.2. 1982.
 - 27) 深川 外 "電力 Cable의 絶緣劣化 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) "絶緣劣化診斷 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. Imai I. Okamoto "Diagnostic Method of CV Cables by Residual Voltage Measurement" Report of National Convention, IEEE of Japan, No 850, 1978.