

직류전압 감쇄성분 측정에 의한 CV케이블의 절연열화 예측

유 명 호, 한 민 구

서울대학교 전기공학과

Diagnostic method of Insulation Deterioration for
CV cable Using D.C. Potential Decay Components.

Myeong-Ho, Yoo. Min-Koo, Han

Department of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract

In this paper, we studied the diagnostic method of insulation deterioration for 22.9kV CNCV cable using D.C potential decay component.

At first, arbitrary D.C high voltage is applied the CNCV cable for two minutes and switched off in vacuum.

And then D.C potential decay components is measured for ten minutes.

It is detecting source for cable insulation deterioration that its gradient is.

Provisionally, we decided the criterion voltage and select the high voltage meter and S.W.

1. 序論

전력사용이 급증하면서 부하의 대응량 편재화하는 추세에 따라 전기설비 또한 대규모화하고 있는데 반하여 전기설비의 고장, 정지는 현대 산업사회의 높은 전기 의존도로 인한 막대한 경제적 손실을 초래할 뿐 아니라 전력회사에 대한 공기업의 이미지를 실추시키는 요인이 되고 있다.

그러나, 전력설비는 자연에 노출되어 있는 특수성 때문에 사고를 완전제거 할수는 없으며, 그 예방활동과 신속복구가 중요한 판단이다.

전력설비 중에서도 특히 전력케이블은 주로 공장, 대도시 도로지반에 분포하고 있어 사고시 많은 복구

시간이 필요할 뿐만 아니라 도로복구 교통장애 등 그 피해가 극심한 설비이다.

따라서 지중설비의 원활한 전력공급을 위하여 종래에는 전력케이블의 절연상태를 판정하기 위하여 절연저항측정, 직류누설전류 측정, 내전압시험이 주로 이용되어 왔는데 조작성 간단하나 측정에 숙련을 필요로 하고 케이블 길이등의 영향을 많이 받을 뿐 아니라 또한 케이블을 손상시킬 위험이 있으며 측정결과 오차가 크고, 주변환경 Noise 등의 영향을 받아서 효과적인 방법이 되지 못했다.

따라서 많은 특고압 지중 배전선로에서 측정이 간단하고 단시간에 판정이 가능한 효율적인 시험법의 필요성이 대두되어 왔다.

본 논문에서는 케이블에 일정시간 직류고전압을 인가한 후 전압을 제거하면 케이블에 충전된 전하는 케이블의 절연저항을 통해서 방전하게 되는데 케이블의 절연이 양호한 경우에는 방전이 장시간을 요하고 절연이 불량한 경우는 충전전하가 작은 절연저항을 통해서 빨리 방전할 것이므로 인가전압에서 부터 소정의판정전압으로 떨어질때까지의 방전 시간을 계측하여 절연상태를 판정하는 방법을 이론적으로 전개하고 실 샘플의 실험을 통해서 인가전압, 판정전압, 방전시간의 기준을 정하고자 한다.

또한 더불어 기존의 케이블 시험법인 직류누설 전류 측정법과는 원리적으로 대응성이 있으므로 샘플 실험시 누설전류도 동시에 측정하여 비교를 행하고 개폐 S.W의 영향도 고려해 보고자 했다.

2. CV케이블의 등가회로¹⁰⁾

절연체는 일반적으로 다음 그림 1와 같이 C, R 등가회로로 나타낼 수 있다.

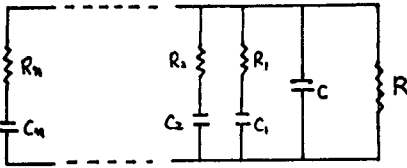


그림 1. 절연체의 등가회로

- R : 누설전류를 결정하는 요소로서 각종노화에 따라 R이 저하됨.
- C : 순시 충전전류를 결정하는 요소로서 노화시에도 거의 일정함.
- Cn, Rn : 흡수전류를 결정하는 요소로서 Cn과 Rn값이 노화에 따라 변한다.

이 등가회로는 결국 그림 2-1로 합성될 수 있고

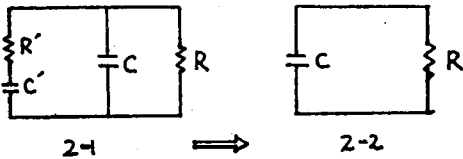


그림 2. 등가회로의 합성

그림 2-2로 대표할 수 있다.

그런데, 케이블은 오랜동안 사용하게 되면 Treeing 현상이 일어나 열화하게 되는데 이때의 절연체의 등가회로는 그림 3와 같이 생각할 수 있다.

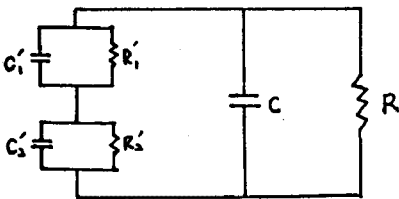


그림 3

그림 3. 열화 케이블의 등가회로

- R : 정상적인 케이블부의 절연저항
- C : 정전용량 (순시충전전류 결정)
- R.C : Treeing 현상이 발생한 저항과 정전용량
- R2C2 : Treeing 현상이 발생한 절연체 부분에서 아직 Tree가 진전하지 않는 부분의 저항과 정전용량

이러한 Treeing 현상은 Water Tree로 진전하기 때문에 Water Tree부의 저항 R은 수분을 많이 포함하고 있어, 정상적인 절연체의 저항보다 상당히 낮다 일반적으로 Water Tree는 細長의 형상을 하고 있기 때

문에 고전압이 인가되면 Water Tree先端部는 고전계이다. 그래서 R2는 정상적인 절연체의 저항이지만 Water Tree 선단부의 고전계 영향을 받아 저항치는 저하한다고 판단되며 이러한 상태에서 C에 충전된 전하의 대부분은 (R1 + R2)의 저항을 통해서 방전하게 된다.

그러나 거시적인 케이블의 등가회로는 케이블이 열화되었다 할지라도 합성되면 결국은 그 크기는 변화지만 합성 절연저항과 캐패시턴스로 표시될 수 있으므로 다음 3항에서 설명하는 직류전압, 감쇄성분의 R.C. 시정수 역할에는 변함이 없다.

3. 측정이론³⁾

케이블에 직류전압을 인가하면 그림 4와 같이된다.

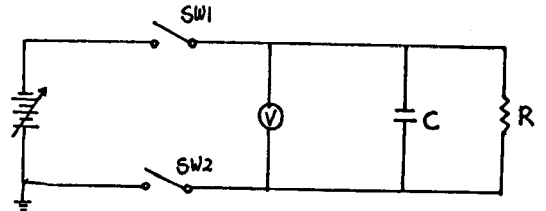


그림 4. 시험결선도

이때 케이블심선을 접지하여 유도된 전하를 모두 방전시키고 DC 전압을 일정시간 인가하여 전하를 충전한 다음, 순간적으로 고압 S.W를 개방하면 케이블에 충전된 전하는 절연저항 R을 통해서 방전할 것이다.

이 경우 절연저항이 양호한 경우에는 방전이 장시간을 요하고 케이블이 열화하여 절연저항이 저하한 경우에는 전하의 방전이 빨리 이루어 질 것이다. 이때의 직류전압 즉 어떤 인가전압에서 부터 소정의 판정전압 까지의 방전시간을 측정하여 표준 방전시간과 비교하고 케이블 절연저항의 良, 不를 판정하는 방법이다.

그림 4에서 고압 S.W를 개방한 후 전압변화는

$$V = V_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{--- } \textcircled{\ast}$$

V₀ : 인가전압 (D.C)

R : 케이블 절연체의 저항

C : 케이블 절연체의 Capacitance

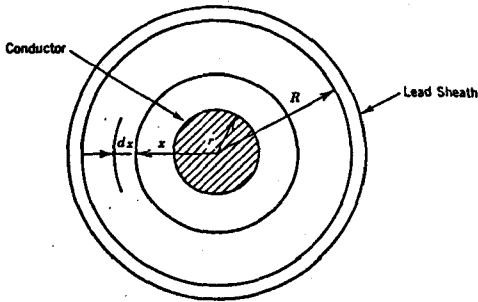


그림 5 Cross section of single-conductor cable.

그런데, 단심케이블의 경우 정전용량 C는 그림 5 으로부터 단위길이당, 도체표면에 q [C]의 전하가 충전되고, 완전선형 대칭구조라고 가정하면 반경 x 에서의 전기장의 세기는

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon x} \text{ V/m}$$

도체와 sheath의 전위차 V 는

$$\begin{aligned} V &= \int_r^D E \cdot dx \\ &= \int_r^D \frac{q}{2\pi\epsilon x} \cdot dx \\ &= \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{D}{r}\right) \end{aligned}$$

단위길이당 케이블의 도체와 Sheath에는 $+q, -q$ 가 충전되므로

$$\begin{aligned} C &= \frac{q}{V} \\ &= \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \text{ [F/m]} \end{aligned}$$

ϵ : 절연체의 유전율

r : 도체 반경

D : 절연체 반경

또한 단심케이블에서 절연저항 R 은

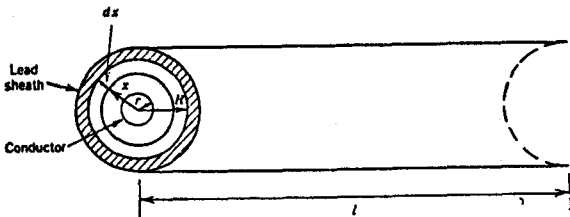


그림 6 Cross section of single-conductor cable.

그림 6에서와 같이 단위 길이당 케이블 절연체의 원통방향 미소증분 절연저항이

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{\rho}{2\pi x} dx \\ (\because R &= \rho \frac{l}{S}) \\ \therefore R &= \int_r^D \frac{\rho}{2\pi x} dx \\ &= \frac{\rho}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r}\right) \text{ [}\Omega \cdot \text{m]} \end{aligned}$$

그러므로 ①식의 전압은

$$\begin{aligned} V &= V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \\ &= V_0 e^{-\frac{t}{\epsilon \rho}} \\ &= V_0 e^{-\frac{t}{\epsilon_0 \epsilon_r \rho}} \end{aligned}$$

ϵ_0 : 진공유전율 (8.854×10^{-12} F/m)

ϵ_r : 재질의 비유전율

ρ : 재질의 저항률

이 된다.

이식에서 보면 그림 4에서 S.W 개폐시에 직류 전압변동은 케이블의 공장, 도체 size, 절연체의 두께 등에 상관되지 않고 절연체의 물성정수 ϵ_r 과 ρ 만의 함수라는 사실이다.

이 시험방법은 케이블의 절연성능을 시험하기 위하여 절연저항을 측정하거나 누설전류측정, 부분방전의 측정등에서 케이블 길이 절연체 두께에 따라 값이 변화하는 측정상의 난점을 개선 가능하리라 판단된다.

4. 시험방법

가. 인가접압

케이블 운전전압(상전압) 13.2kV 이상은 개폐 과도전압에 의한 케이블 및 부속자재의 손상이 우려 되므로 4kV ~ 15kV의 범위에서 적정전압을 선정코자 4, 8, 12, 15kV의 전압별로 측정하였다.

나. 시료케이블

국내에서 사용하고 있는 CV케이블의 종류는 전력 공급형태별로 비직지용(Δ)과 다중직지용으로 대별할 수 있는데, 그 구조는 중성선의 구조의 차이뿐 이므

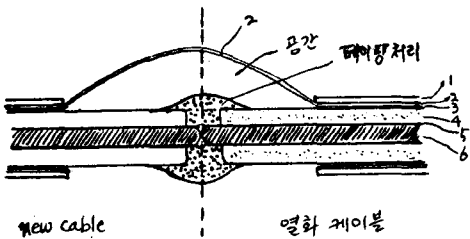
로 본 연구에서는 그 설비량에서 보유가 많고 앞으로의 사용이 늘어날 22.9kV CN/CV케이블을 선정하여 시험하였다. 또한 앞으로 비직지용 (Δ) CV케이블도 시료로 선정하여 시험할 예정이다.

측정원리에서 제시한 것처럼 케이블의 길이, 절연체의 두께등 케이블 규격에 따른 직류전압, 감쇄성분의 변화가 무관함을 증명하기 위해 10m, 50m, 60m의 길이별로 60mm², 200mm², 325mm²의 케이블을 종류별로 측정하였다.

*시료케이블 (22.9kV CN/CV케이블)의 규격 (한전 표준규격 참조)

구분	규격	60mm ²	200mm ²	325mm ²
절연체두께 (mm)		8	8	8
외부반도전층두께 (mm)		0.5	0.5	0.5
절연저항 (M·km)		3,000	2,000	1,500
정전용량 (F/kw)		0.21	0.32	0.38
시험전압 (kV/분)		44	44	44
쉬스시험전압 (kV/10분)		4	4	4
수량		60 m	60 m	60 m
제작사		대한전선	대한전선	대한전선

최초의 시료케이블은 신품으로서 절연상태가 양호한 케이블을 선정하여 시험하였으며 케이블의 열화현상을 구현하기 위하여 실제 열화케이블을 한국전력공사 광명지점으로 부터 입수하여 그림 7 과 같이 집합하고 집합부분에는 전계의 영향이 없도록 중성선 (차폐층) 과 충분히 분리하여 열화 케이블을 만들었다.



- 1: 비닐 sheath (방식층)
- 2: 금속 차폐층 (동선)
- 3: 외부 반도전층
- 4: 절연층 (XLPE)
- 5: 내부 반도전층
- 6: 도체

그림 7. 열화케이블 집합.

다. 접지의 영향 검토

접지방식에 따른 영향을 측정하기 위하여 그림 4 에서 같은 조건에서 SW1 개폐시 또는 SW1, SW2의 동시 개폐로 접지를 제거하였을 때와의 데이터를 비교 검토하였으며 케이블의 편단접지 및 양단접지시의 영향을 검토하기 위하여 각각 구분시험하여 결과치를 비교하였다.

라. SW. 전극 (절연물)의 영향검토

개폐기의 절연물에 따라 누설되는 영향을 검토하기 위하여 Air Switch (Cos, 배선용 차단기) oil Switch (OCB) 진공 Switch (V. C. B)로 구분하여 같은 조건하에서 시험결과를 비교하였다.

마. 충전시간의 영향검토

최초 직류전압을 가하기 전에 심선 (도체)를 접지하여 모든 전하를 방전하고 일정 직류전압을 가한후 시간을 30초, 1분, 2분으로 구분하여 차단 결과 즉 충전시간을 30초, 1분, 2분으로 구분 시험한 결과를 측정 비교하였다.

바. 측정전압계의 선정

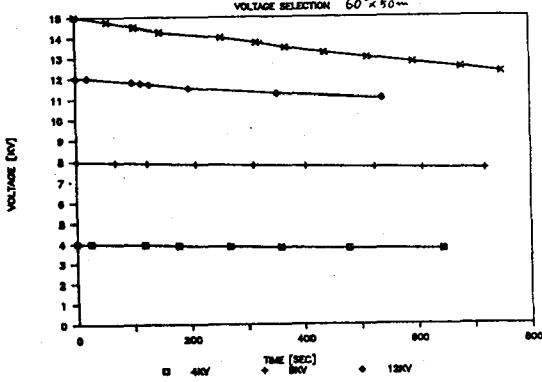
측정전압계는 정전전압계 (Electro Static Potentio Meter)를 사용하여야 한다. 왜냐하면 저항식전압계는 아무리 입력 임피던스가 고저항 일지라도 케이블의 저항보다 낮아서 전압계 자체로 누설되기 때문이다.

5. 결과데이터 분석 및 검토

가. 인가전압의 선정

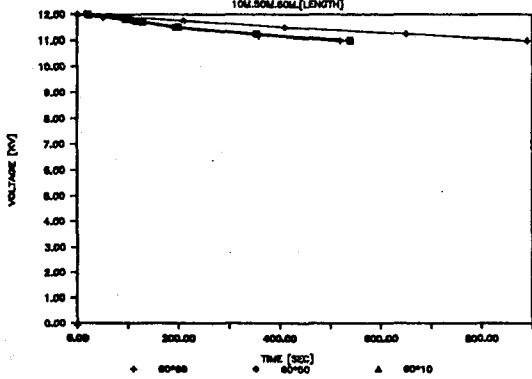
시료케이블이 22.9kV Y 배선선로용이기 때문에 상전압이 13.2kV이다. 일반적으로 낮은 전압에서도 같은 전압감쇄 특성이 나타나지만, 측정시간이 길어지는 단점이 있다. 그러므로 높은 전압이 측정은 용이하지만 전압의 위험성, 변동성이 심하고 기존 케이블의 손상이 우려되므로 시험한 4 가지(4, 8, 12, 15) 중에서는 12kV의 전압이 유용하다고 판단되며 10~12 kV 정도에서는 같은 특성일 것으로 추정된다.

D.C.VOLTAGE DECAY COMPONENT



나. 시료케이블의 길이, 두께에 따른 영향
3 항이론에서 검토한 바와 같이 거의 같은 감쇄 성분을 나타내었다.

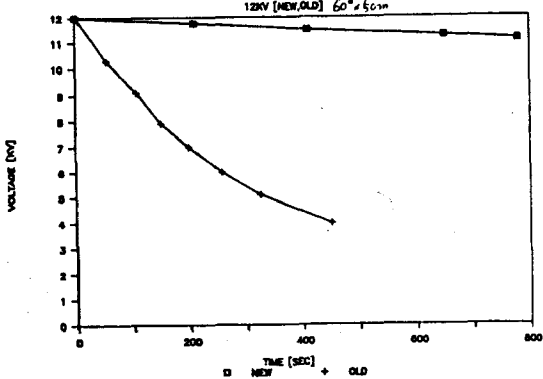
D.C.VOLTAGE DECAY COMPONENT



다. 판정전압의 선정

본 연구의 가장 중요한 Parameter 이며 이것의 결정은 많은 실험 데이터가 장기간 축적되어야만 할 사항이다. 다만 여기서는 열화케이블의 집합 제작에 의한 케이블의 감쇄성분을 제시하고 현재 규격으로 삼고 있는 케이블 정수를 이용하여 열화 케이블의 기준을 추정하고자 한다.

DETERIORATION CRITERION

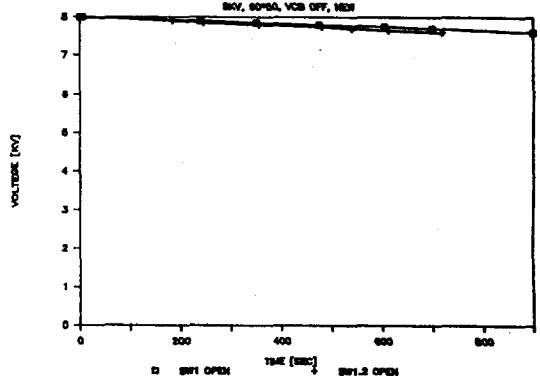


라. 접지의 영향

접지방식은 기존 배전방식에 따라 비접비 (Δ) 와 다중접지 (Y) 시설되므로 이 연구의 실제이용에 중요한 Factor가 된다. 비접비 (Δ) 방식의 경우 편단 접지 또는 양단접지를 시행하고 있으며 다중접지 (Y) 의 경우 5Ω/km으로 접지를 시행하고 있다.

본 시험에서는 진공 차단시 즉 VCB 사용시 접지의 영향은 받지 않았다. 즉 SW1 개폐와 SW1, SW2 동시개폐 또는 편단접지와 양단접지시의 전압감쇄는 거의 비슷하였다. 그러나 실제용에서는 또 다른 특성을 나타낼 가능성을 배제할 수 없었으나 시험 데이터를 추적하지 못하였다. 앞으로 Data 축적이 요구된다.

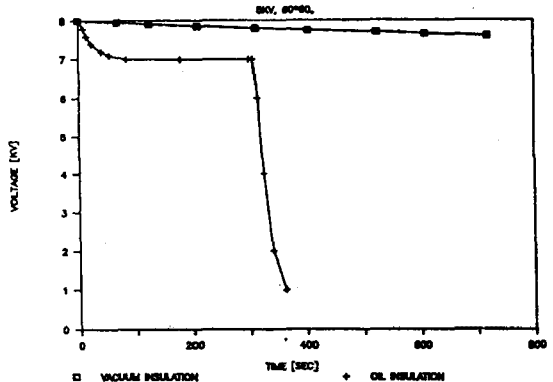
EARTH EFFECTS INDECAV COMPNT



마. 개폐기 전극(절연물)의 영향 및 누설,

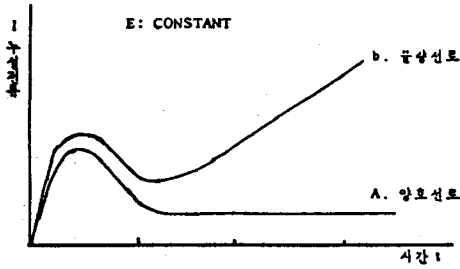
개폐기의 종류에 따라 누설의 정도가 현저한 차이를 보였으며 가장 안정적인 개폐장치는 VCB 즉 진공차단방식으로 충분한 이격거리를 요하고 공기중의 누설부분도 영향을 받으므로 노출부분을 가능한 한 적게하여 시험을 하여야 하며 날씨의 영향이 많으므로 맑은날 시험을 요하고 습도에 대한 보정 계수를 정할 필요가 있다.

EFFECTS OF INSULATION MATERIAL



바. 충전시간의 영향

충전전류의 특성이 그림 13과 같으므로 보통 2 분정도 충전하면 완전한 것으로 판단되나 본 시험에서는 거의 변화가 없었다.



절연열화시험 측정도표

사. 직류 누설전류와의 대응

직류누설전류 시험은 기존 케이블의 측정시험법 으로서는 직류 내전압시험과 함께 유일한 방법으로 현재 한국전력공사에서도 운용하고 있다. 직류누설 전류시험과 본 시험과는 원리적으로 대응된다. 시험결과 또한 열화 판정기준이 한전측에서 사용하는 누설전류 판정기준과 비슷한 정도이다.

6. 결론

본 연구에서 시행한 실험과 분석을 통하여 시험이론에서 제시한 직류전압의 감쇄성분이 케이블의 규격, 즉 케이블의 길이나 절연체의 두께에 영향을 받지않고 재료의 비유전율과 저항율에 따라서 변화됨을 확인할 수 있었다. 그러므로 케이블이 Treeing 현상들에 의한 열화시에 거시적으로 일부분의 Treeing 열화가 전체재료의 ϵ_r 와 ρ 의 변화로 나타남을 알 수 있다.

본 연구에서 검토하고 제시한 기준안은 본 시험방법의 가장 기본이 되는 첫단계의 데이터로서 앞으로 계속적인 Data 축적이 이루어져야 할 뿐 아니라 실제등의 시험데이터 축적이 필요하며 본 연구에서는 다루지는 않았지만 온도의 변화에 따라

의 값이 변하는 것이 일반적이므로 온도에 따른 ρ 의 보정도 필요하다. 그러나 측정시간을 부하차단후 시험을 즉시 시행하면 케이블 운전온도를 그대로 적용할 수 있어 보완되리라 본다. 앞으로 이 분야에 기준데이터가 정립이 되면 전력

케이블의 열화 예방진단에 크게 기여하여 전력공급 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. K. Suzuki, S. Saito, S. Yoshida. "Power Cable Insulation" IEEE. T-EI, Vol. EI-21 No 6 Dec. 1986.
2. S. Hiyama, Y. Fujiwara. "Testing Methods For Power Cable Insulation" IEEE T-EI. Vol EI-21 No 6. Dec. 1986.
3. K. Soma, M. Aihara Y.Kataoka, "Diagnostic Method For Power Cable Insulation" IEEE T-EI. Vol. EI-21 No 6. Dec. 1986.
4. 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.
5. M.H.S.A. Rageb, A.J. Pearmain "An Approach to the Predication of the Lifetime of Electrical Insulations " IEEE T-EI, Vol. EI-19.No 2. 1984.
6. K. Kadotani, Y. Kako "A simple Method to Derive Correlation Curves for Insulation Diagnosis " IEEE T-EI, Vol. EI-18. No 1. Feb 1983.
7. R.B. Vlodge, 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.
8. 池田, "XLPE Cable 의 水 Tree 劣化를 판정하기 위한 新直流試驗法" 電力中央研究報告 No 175072 (1976).
9. 小野, 山本, 井上 "逆吸收電流法에 의한 實布設 Cable 의 劣化測定" Report of Study Meeting on Electrical Insulating Materials IEE of Japan. EIM-81-3, 1981.
10. 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.