

지중배전케이블 절연성능 향상 방안

(The Improvement on Insulation Performance of Underground Distribution Power Cables)

이재봉* · 이병성 · 김상준 · 장상옥 · 한용희 · 오재형 (한국전력공사)

(Jae-Bong Lee*, Byung-Sung Lee, Sang-Joon Kim, Sang-Ok Jang, Yong-Huei Han, Jae-Hyoung Oh)

Abstract

The primary failure causes of underground distribution power cables are water penetration in insulation layer and stress enhancement at inner semi-conductive layer. Accordingly, it is needed to improve the materials and the structure of power cables for extending lifetime and preventing failure. We use non-flaming PE materials instead of PVC as a covering material and encapsulating structure. We also use super smooth class material as a inner semi-conductive layer. The newly developed cables are improved in AC breakdown voltage after ageing tests.

1. 서 론

지중에서 운전되는 배전케이블은 절연을 목적으로 고분자재료를 사용한다. 현재 국내에서 가장 많이 사용되는 지중배전용 전력케이블은 수밀형 22.9kV 동심 중성선 전력케이블(CNCV-W)이다. 1998년 이전에는 도체가 수밀되지 않은 전력케이블인 CNCV를 주로 사용하였으나, 최근에는 도체를 통한 수분침투의 억제력을 강조하는 추세이므로 수밀형으로 전환되었다. 하지만 이러한 변화에도 불구하고 전력케이블의 고장은 감소되지 않고 있는 실정이다[1].

국내에서 발생하고 있는 고장의 대부분은 외상 고장을 제외하고는 크게 두 가지 원인에 의한 것으로 분석되고 있다. 첫째 전력케이블로의 수분침투에 의한 것이고, 두 번째는 절연층과 반도체층의 계면의 불규칙 현상에 의한 전계집중이다. 현재와 같이 PVC를 외피로 사용하는 경우 PVC가 극성기를 가진 재질이므로 궁극적으로 수분침투를 억제하기 곤란하다. 따라서 전력케이블을 기대수명까지 운전하기 위해서는 수밀 성능에 대한 재질적, 구조적 검토가 수반되어야 한다.

한편 전력케이블은 절연층의 재료로 대부분 XLPE를 사용하고 있으며, 전계완화를 목적으로 내외부에 반도체층을 적용하고 있다. 이중 내부 반도체층은 도체와 직접 접촉하게 되며, 압축 도체의 빈공간을 채워 전계완화와 부분방전 억제 역할을 가진다. 그러나 반도체 계면의 불규칙 현상은 주로 돌기(protrusion) 결함으로써 국부적인 전계집중을 일으켜 전력케이블 조기고장의 원인이 되고 있다. 이러한 계면의 문제는 제조업체의 품질관리 공정에서 일부 해결할 수 있으나 절연층과 반

도체층 계면의 평활도를 높이는 방향으로 재질이 개선되어야만 궁극적인 해결방안이 될 것으로 판단된다.

전력연구원에서는 이 두 가지 핵심 고장요소를 개선하기 위하여 새로운 재질과 구조를 가진 지중 배전용 전력케이블을 개발하고 그 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1. 신규케이블 개발 방향

본 연구에서는 2회의 케이블 전문가 회의에서 얻어진 결과와 배전처 등 활용부서의 의견을 수렴하여 신규 케이블의 개발 방향을 결정하였다. 또한 연구과제의 기간 및 연구비용, 그리고 가속열화시험설비의 수용 한계 등이 고려되었다.

현재 한전에서 보유한 가속열화시험설비가 연구기간 내에 2 종류의 케이블만을 시험할 수 있는 용량이므로 2 종류의 케이블이 선정되었다.

본 연구에서는 기존 CNCV-W 케이블, laminate 구조 케이블 및 encapsulating 구조 케이블 등 3가지 구조의 케이블을 검토하였다. 신개발 케이블의 수분침투 성능을 기존제품과 비교하여야 하므로 CNCV-W 케이블은 기준시료로서 필수적으로 선택되었다.

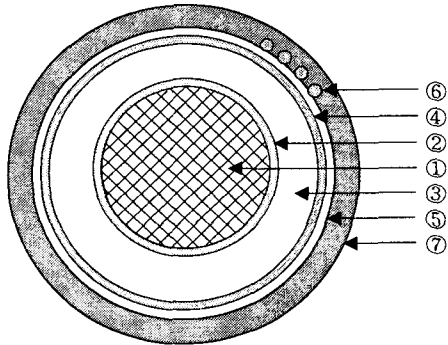
lamine 구조의 케이블은 차수성능은 뛰어나지만 접속부 등에서 수분침투 가능성이 있어서 완전한 차수성능을 기대하기 어렵고, laminate 추가에 따라 전기적 문제가 추가로 고려되어야 하며, 또한 중첩부의 장기적인 접착성 문제와 굴곡부의 laminate 박리현상 가능성 등이 문제로 인식되었다. 따라서 encapsulating 구조의 케

이블을 선정하였다.

절연층의 재료는 제조과정에서 XLPE 내부의 수분함유, 외피 손상에 의한 수분침투 등에 대비하여 절연층 자체의 트리억제 성능이 필요하여 TRXLPE 재질을 사용하기로 하였다.

내부반도전층의 경우 표면 평활성과 적절한 기계적 강도와 전도성이 요구되어 주로 송전급 케이블에 적용하고 있는 고품질의 반도체 재료인 SS(super smooth) 급 반도체 재료를 적용하기로 하였다.

그림 1은 최종 확정된 신규케이블의 개발 방향이며, 표 1은 기존 케이블과의 특성을 비교한 것이다.



| No | 항 목 | 재 료 |
|----|---------|-----------------------|
| 1 | 도 체 | 수밀 컴파운드 충전 원형압축 연동연선 |
| 2 | 내부반도전층 | Super Smooth 반도체 컴파운드 |
| 3 | 절 연 층 | 트리억제형 가교폴리에틸렌 컴파운드 |
| 4 | 외부반도전층 | 흑색 반도체 열경화성 컴파운드 |
| 5 | 중성선 수밀층 | 반도체성 부풀음 테이프 |
| 6 | 중 성 선 | 연동선 (Encapsulating) |
| 7 | 충 실 외 피 | 난연성 PE 계열 |

그림 1. 신개발 케이블(TRCNCE-W)의 구조 및 재질
Fig.1. Structure of TRCNCE-W cable

표 1. 기존 케이블과 신개발 케이블의 비교
Table 1. Comparison of cables

| 구 분 | 기존 케이블 | | 신규 케이블 | 비 고 |
|----------|--------|-------|--------|-----------|
| | 수밀형 | 트리억제형 | | |
| 케이블 원가 | ○ | △ | △ | 수밀형 대비 |
| 외피 차수성능 | × | × | △ | radial 방향 |
| 중성선 차수성능 | △ | △ | ○ | |
| 수트리 저항성 | × | ○ | ○ | |
| 현장 시공성 | ○ | ○ | ○ | 전용공구 사용시 |
| 난연성능 | ○ | ○ | ○ | 난연성 PE |

○ 좋음, △ 보통, × 나쁨

2.2. 외피용 컴파운드 개발 및 특성평가

외피용 재료로 사용되고 있는 기존 PVC는 저가이면서 난연성을 가지므로 많이 사용되었으나 수분침투가 용이하여 기계적 특성이 취약하고, 화재시 인체에 유해한 독성물질이 나오며, 도체온도 130℃ 이상에서 장시간 사용이 곤란한 단점이 있다.

PVC를 대체할 수 있는 재료를 선정하기 위하여 국내에서 시판되고 있는 6종의 폴리에틸렌을 기저수지로 선정하였다. LDPE 2종, LLDPE 2종, MDPE 및 HDPE 각 1종의 물성치를 비교 시험한 결과 LLDPE가 기계적 성질과 범용성, 수증기 투과율(water vapor transmission: WVT) 등에서 특성이 가장 적합한 것으로 나타났다. MDPE와 HDPE도 우수한 특성을 가지나 밀도가 높아 딱딱하여 기계적으로 불리하였다. LLDPE는 LDPE에 비하여 높은 용융지수(melt index)를 가지고 있어서 동일조건에서 더 많은 압출물을 얻을 수 있으며, 특히 기계적 특성 및 열적 열화에서 우수한 특성을 보인다.

표 2. 외피용 기저수지의 물성
Table 2. Physical property of base resins for outer jacket

| Physical Property | LLDPE | | LDPE | | MDPE | HDPE |
|------------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | | |
| Melt Index [g/10min] | 1.1 | 2.3 | 0.3 | 0.33 | 0.23 | 0.21 |
| Tensile Strength [Mpa] | 20.0 | 20.7 | 18.9 | 18.4 | 34.5 | 34.8 |
| Tensile Elongation [%] | 836 | 872 | 593 | 684 | 860 | 865 |
| Retension of Tensile St. [%] | 102 | 100 | 52 | 46 | 85.6 | 96.2 |
| Retension of Elongation [%] | 90 | 96 | 69 | 70 | 86 | 89 |
| Shore D Hardness | 49 | 48 | 48 | 49 | 56 | 60 |

기저수지의 결과를 바탕으로 6종의 컴파운드를 제조하여 특성을 평가한 결과 기저수지에 대한 시험결과와 유사하게 기본 물성 외에도 수증기 투과시험이나 기계적 특성에서 LLDPE와 MDPE 컴파운드가 우수한 특성을 나타내었다. 특히 수분침투 억제 면에서 PVC와 비교하여 10 ~ 20 배 이상의 성능을 보였다.(그림 2, 3)

실제의 케이블 시료에 대한 수분침투시험은 ASTM E96을 적용하기 곤란하므로 송전케이블에 적용하는 동경전력의 방법을 적용하였다[2][3]. 코어부분을 제거한 30 cm의 케이블 시료에 실리카겔을 넣고 밀봉하고, 60℃ 수조에서 30일 까지 10일마다 중량을 측정하여 다음과 식을 이용하여 투습도를 계산한다.

$$\text{투습도}(P) = \frac{Q}{L} \times \log \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \frac{1}{2\pi d}$$

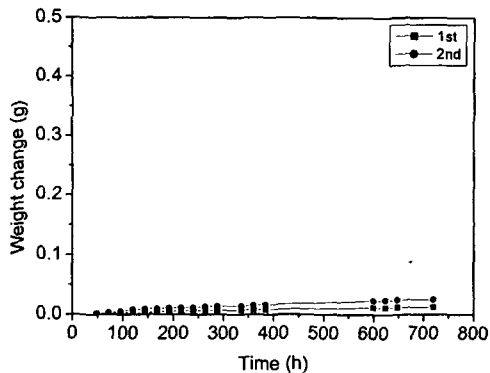


그림 2 외피용 LLDPE 컴파운드의 WVT
Fig.2. WVT of LLDPE compound

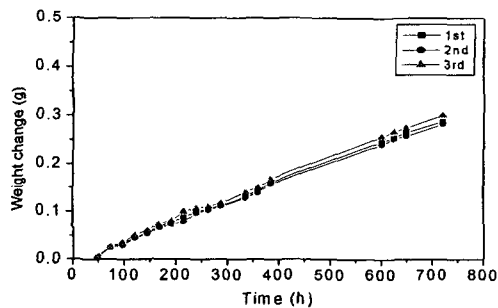


그림 3 외피용 PVC 컴파운드의 WVT
Fig.3. WVT of PVC compound

여기서, Q는 투과수분량(g), L은 시료길이(cm), R_1 은 차수층의 내경(cm), R_2 는 외피의 외경(cm), d는 시험온도에 따른 포화수증기압(mmHg, 60°C의 경우 149.5 mmHg), t는 시험시간(day)이다. 차수성능은 투습도의 평균치가 $1 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm/cm}^2 \cdot \text{day} \cdot \text{mmHg}$ 이하이어야 한다.

다음 4가지의 시료에 대하여 투습도 시험을 실시하였다.

- CNCV-W 케이블(PVC 외피)
- Laminate 구조 케이블(LLDPE 및 MDPE 외피)
- Encapsulating 구조 케이블(LLDPE 및 MDPE 외피)
- FR CNCO-W 케이블(난연 PE 외피)

기존 CNCV-W 케이블은 PVC 외피를 시험하기 위한 것이고, FR-CNCO-W 케이블은 난연 외피로 변경시에 발생할 수 있는 수분침투 저항성을 평가하기 위한 것이다.

CNCV-W 케이블에 대한 투습도 시험 결과 투습도는 20일에서 최대치를 보이다가 약간 감소하는 경향이 나

타난다. 이는 수분의 포화현상에 의한 것으로 판단된다. CNCV-W 케이블의 투습도는 동경전력 시험에서 규정하고 있는 기준치에 미달하는 결과를 보인다. 이는 극성기를 가진 PVC 외피에 기인한다고 판단된다.

FR CNCO-W 케이블은 30일 시험에서도 투습도의 포화가 나타나지 않아 40일까지 시험을 실시하였다. 투습도는 기준치에 약간 미달하는 결과를 나타내었는데 송전케이블처럼 금속 차수층이 없기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

laminate 구조의 케이블은 외피 재질에 상관없이 동경전력의 송전케이블 기준치를 만족한다. 이는 laminate 차수층과 MDPE의 우수한 수증기 투과 억제성능에 기인한다고 판단된다.

encapsulating 구조의 케이블은 금속 차수층이 없는 구조이므로 기준치를 만족하지는 못하였다. 또한 FR CNCO-W 케이블에 비해서도 투습도가 약간 높게 나타났다. 결국 encapsulating 구조에서는 차수성능이 전적으로 외피 재질에만 의존하므로 radial 방향으로의 수분 침투를 완전히 차단하기는 어렵다.



그림 4. 실제 케이블 시료에 대한 투습도 시험
Fig.4. Water penetration test for cable

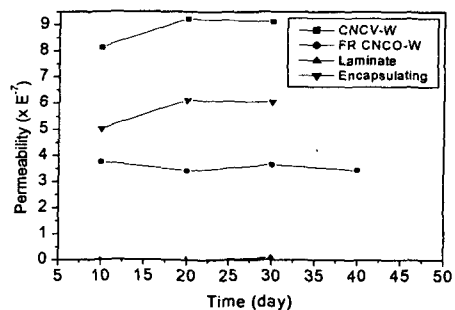


그림 5. 실제 케이블 시료에 대한 투습도 시험 결과
Fig.5. Results of water penetration test

2.3. 반도체 컴파운드 개발 및 특성평가

반도체 재료의 개선을 통해 전력케이블의 절연성능을 향상시키는 방안은 절연층과 반도체층의 계면의 평활성을 증가시켜 전계집중을 억제하는 것이다. 그중에서도 내부 반도체층이 케이블 구조상 절연층에 더 큰 영향을 미치므로 중요하며, 외부 반도체층의 경우 본 연구를 통하여 외피의 재질 및 구조개선으로 외부 반도체층으로의 수분침투는 사실상 곤란하지만 외부반도체층의 개질을 통하여 전기적 특성 및 수분침투 억제능력의 향상을 시도하였다.

현재 내부 및 외부 반도체층의 재질은 EVA(ethylene vinyl acetate)를 사용하고 있다. 본 연구에서는 반도체 재료의 개선을 위하여 EVA 2종, EEA(ethylene ethyl acrylate), EBA(ethylene butyl acrylate) 등 총 4종의 기저수지를 선정하고 기본 물성시험과 수증기 투과시험, 전기적 특성시험을 실시하였다.

EEA는 EVA보다 열적 안정성 및 기계적 강도 등이 우수하며, EBA는 EEA보다 가격면에서 유리하다. 수증기 투과율 및 교류 절연파괴강도에서도 EEA는 EVA보다 우수한 특성을 나타냈다.

표 3. 반도체 재료용 기저수지의 물성
Table 3. Physical property of base resins for semi-conductive layer

| Physical Property | EVA1 | EVA2 | EEA | EBA |
|------------------------|------|-------|------|------|
| Melt Index [g/10min] | 5.79 | 12.35 | 7.03 | 3.80 |
| Tensile Strength [Mpa] | 20 | 24.5 | 16.8 | 14 |
| Tensile Elongation [%] | 747 | 688 | 746 | 700 |
| DSC Melting Pt [°C] | 90 | 63 | 100 | 93 |

4종의 기저수지에 대하여 산화방지제, 가공성 향상을 위한 활제, 전기전도성 부여를 위한 카본블랙, 기계적 강도 향상을 위한 가교제 등을 첨가하여 컴파운드를 제조한다.

내부 반도체층의 경우에는 수지변중시험과 기저수지별 카본블랙 변량시험을 실시하였으며, 외부 반도체층의 경우 한가지의 기저수지만을 사용하므로 카본블랙 변중 및 변량시험을 실시하였다.

내부반도체층의 조성으로는 기저수지로 EVA와 EEA를 사용하고, 카본블랙으로 AB와 FB-2를 사용한 컴파운드만이 적합한 것으로 나타났다. 수증기 투과율에서도 EEA를 기저수지로 사용한 컴파운드가 낮은 값을 나타냈다. 한편 기저수지별 카본블랙 변량시험에서는 EVA와 EEA 모두 60 phr 정도의 카본블랙 함량을 사용하는 것이 전기적 특성과 기계적 특성면에서 적절한

것으로 나타났다.

외부 반도체용 컴파운드에 요구되는 물성은 적절한 기계적 강도와 전기전도성, 박리성 등이 중요하다. 박리성의 문제로 한 종류의 EVA만 사용하였으며, 외부 반도체층 컴파운드에 대한 카본블랙 변중시험에서 AB 및 FB-2 카본블랙을 사용한 컴파운드만이 압출한 외관이 양호한 결과를 나타냈다. 또한 변중시험에서 양호한 결과를 나타낸 AB 및 FB-2에 대하여 카본블랙 변량시험(55 ~ 65 phr) 결과 모든 컴파운드가 적합하였으나 카본블랙 함량이 감소하면 전기전도도가 크게 감소하기 때문에 카본블랙의 함량은 60 ~ 65 phr 범위가 적정한 것으로 판단된다.

한편 외부 반도체층에 대한 수증기투과시험 결과 기존 컴파운드보다 높게 나타났으며 이는 외부 반도체층 기저수지로 VA 함량이 매우 높은 EVA를 사용하였기 때문인 것으로 판단된다.

2.4. 모델 케이블 제조 및 특성평가

신개발 케이블의 주요 특징은 내부반도체층과 절연층에 SS급 반도체 컴파운드와 TRXLPE를 각각 적용하며, 난연성 PE 외피로 된 encapsulating 구조의 케이블이다.

먼저 계면 불규칙 현상에 의한 전계집중 현상을 완화하기 위하여 채용된 SS급 반도체 컴파운드는 열적 안정성이 우수한 EEA를 기저수지로 사용하고 있으며, 고순도의 아세틸렌 블랙을 사용하여 전기전도성을 부여하고 있다. 한편 절연층에는 케이블 구조가 개선되더라도 접속재 불량 시공 등에 의해 발생할 수 있는 수분침투 현상을 고려하여 TRXLPE를 채용하였다. 이와 같은 내부 반도체층 및 절연층은 기존 케이블과 동일한 두께로 적용하였다.

외피 재질로 선정된 난연성 PE의 경우에는 난연성 및 물리적 특성, 경제성 등을 고려하여 LLDPE에 난연제가 포함된 컴파운드를 적용하였다. 외피의 두께는 한전구매시방서 및 IEC 60502-2를 참조하여 결정하였다.

이상과 같은 검토를 통하여 설계한 신규 케이블의 규격은 표 4와 같다.

표 4. 신규 케이블의 설계(안)
Table 4. Structure of new cable

| No | 항 목 | 재 료 | 비 고 |
|----|---------|----------------------|---------|
| 1 | 도 체 | 수밀 컴파운드 충전 원형압축 연동연선 | 325 sq. |
| 2 | 내부반도체층 | Supersmooth 반도체 컴파운드 | 0.6 mm |
| 3 | 절연층 | 트리억제형 가교폴리에틸렌 컴파운드 | 6.6 mm |
| 4 | 외부반도체층 | 고순도 컴파운드 | 0.7 mm |
| 5 | 중성선 수밀층 | 반도체성 부풀음 테이프 | |
| 6 | 중성선 | 연동선 (Encapsulating) | |
| 7 | 충실외피 | 난연성 PE (LLDPE) | 2.0 mm |

내부 반도체층의 변화가 케이블의 절연성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 다음과 같이 2종류의 모델 케이블을 제조하였다.

- TR용 내부반도체층 / TRXLPE / TR용 외부반도체층
- SS 내부반도체층 / TRXLPE / TR용 외부반도체층

모델 케이블의 도체단면적은 60 mm²이며, 열화를 가속하기 위하여 수밀하지 않은 채로 제조하였다. 반도체층의 두께는 0.6 mm 정도로 기존케이블과 동일하며, 열화 가속효과를 높이기 위하여 절연층의 두께는 약 1.8 mm로 최소화하여 제작하였다.

케이블을 수조에 75%이상 침수한 상태에서 도체온도 85℃를 100시간 동안 유지하여 가속열화를 하였다.

가속열화 전후의 절연파괴강도를 비교한 결과 그림 6과 같이 SS 내부반도체층을 사용한 시료의 절연파괴강도가 가속열화시험 전후 모두 높게 나타나 절연성능이 향상된 것으로 판단된다.

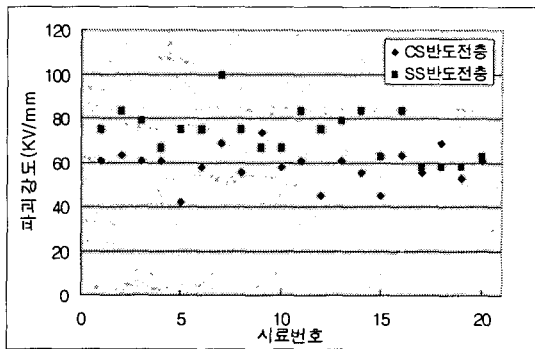


그림 6. 모델케이블의 절연파괴강도
Fig.6. Breakdown strength of model cables

표 5. 신개발 케이블에 대한 가속열화시험
Table 6. Accelerated ageing test for new cables

| 시험변수 | | 옥외 과통전열화시험 (AEIC) | 옥내 침수과통전열화시험 (CRIEPI) |
|--------|------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 케이블 길이 | | 40 m × 4개 | 12 m × 9개 |
| 전처리 | 물 | 관로에 케이블 침수 tap water | 수조에 케이블 침수 tap water |
| | 도체온도 기간 | 135℃ 14일 | 90℃ 10일 |
| 열화 | 온도 | 도체온도 90℃ (6h/상승 2h/on cycle) | 도체온도 90℃, 물온도 60℃ |
| | 주기 | 8h on/16h off | 연속 |
| | 전압 | 3U ₀ (40 kV) | 3U ₀ (40 kV) |
| | 주파수 기간 | 60 Hz 120일/180일/360일 | 60 Hz, 1 kHz 120일/180일/360일 |

한편 신개발 케이블의 수명특성 평가를 위하여 표 4에 제시한 규격대로 케이블을 제조하여 표 5와 같은 옥외 과통전 열화시험과 옥내 침수 과통전 열화시험을 수행하고 있으며, 옥내 열화시험은 완료되었으나 옥외 과통전 열화시험은 현재 진행중이다.

열화시험이 종료되면 열화된 케이블에 대하여 AC 내전압 시험을 실시하고 Weibull 수명평가와 화학분석에 의한 열화상태를 평가할 계획이다.

3. 결 론

절연성능 향상을 위한 신규 케이블 개발방향은 다음과 같다. 내부반도체층의 돌기에 의한 조기고장을 방지하기 위하여 SS급의 반도체 컴파운드를 적용하기로 하였으며, 절연층의 경우 접속부 등에서의 수분침투를 고려하여 TRXLPE를 절연층 재료로 선정하였다. 외피 재료로는 난연성을 가지면서 수분침투를 방지할 수 있는 난연성 PE를 선정하였고, encapsulating 외피구조를 채용하였다. 이러한 신규케이블은 절연층과 반도체층의 불규칙 계면을 최소화할 수 있으며, 수분침투에 대한 저항성을 높여 배전케이블의 절연성능을 크게 향상시킬 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) 전력연구원 최종보고서, "지중배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화진단 시스템 구축", 1997.
- (2) ASTM E 96, "Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials", 1995.
- (3) TEPCO specification 5A-5, "Specification of 154 kV CV Cables".
- (4) IEC 60502-2, "Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 1 kV up to 30 kV", 1997.
- (5) H. Sarma, E. Cometa and J. Densley, "Accelerated Aging Tests on Polymeric Cables Using Water-Filled Tanks-A Critical Review", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No. 2, pp. 15-26, 2002.
- (6) H. Fukagawa et al., "Insulation Degradation by Water Treeing in XLPE Cables and Its Diagnostic Method", CRIEPI Report, Vol. 113, 1983.
- (7) B. S. Bernstein et al., "Accelerated Aging of Extruded Dielectric Power Cables Part II -Life Testing of 15 kV XLPE-Insulated Cables", IEEE Trans. PD, vol. 7, No. 2, pp. 603-608, 1992.
- (8) H. Sarma et al., "Breakdown Strength of TRXLPE Insulated Cables after Extended Aging under Moderate Test Conditions", Proc. of IEEE PES T&D conference and Exposition, pp. 813-818, 2001.