

22.9kV TR CNCE-W 케이블 개발 및 규격 제정

이재봉, 김주용, 정익중*, 정낙현*, 고동호**
 한전 전력연구원, *한전 배전처, **코스모링크(주)

The Development and Establishment of Purchasing Specification of
 22.9kV TR CNCE-W cables

J. B. Lee, J. Y. Kim, I. J. Jeong*, N. H. Jung*, D. H. Ko**
 KEPRI, KEPCO*, Cosmolink Co., LTD**

Abstract - 국내 지중배전계통에 사용되는 케이블은 경제성을 이유로 송전급 케이블에 준하는 신뢰성을 확보하지 못하고 있다. 초창기 CNCV 케이블로부터 지속적으로 성능이 향상되어 왔음에도 불구하고 여전히 수분침투에 의한 수트리 열화와 반도체층 계면의 전계집중으로 인한 케이블 고장이 많이 발생하고 있다.

이에 한전에서는 위 두 가지 고장원인을 제거하기 위하여 TR CNCE-W 케이블을 개발하였으며, 2005년 4월 규격을 제정하였다. 새로운 케이블은 지중 관로에 포설될 것이며 지중배전계통의 신뢰성을 한층 향상시키게 될 것이다.

케이블을 검토하였다. 신개발 케이블의 수분침투 성능을 기존제품과 비교하여야 하므로 CNCV-W 케이블은 기존 시료로서 필수적으로 선택되었다.

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

절연층의 재료는 제조과정에서 XLPE 내부의 수분함유, 외피 손상에 의한 수분침투 등에 대비하여 절연층 자체의 트리액체 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.

1. 서 론

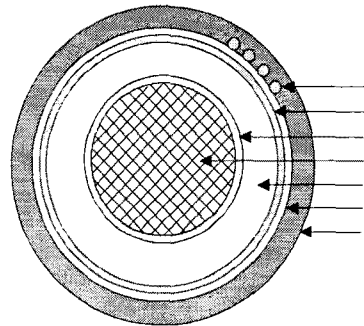
지중에서 운전되는 배전케이블은 절연을 목적으로 고분자재료의 사용이 일반화되었다. 현재 국내에서 가장 많이 사용되는 지중배전용 전력케이블은 수밀형 22.9 kV 동심 중성선 전력케이블(CNCV-W)이다.

1998년 이전에는 도체가 수밀되지 않은 전력케이블인 CNCV를 주로 사용하였으나, 최근에는 도체를 통한 수분침투의 억제를 강조하는 추세이므로 수밀형으로 전환되었다. 하지만 이러한 변화에도 불구하고 전력케이블의 고장은 감소되지 않고 있는 실정이다.

국내에서 발생하고 있는 케이블 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 전력케이블의 내부 반도체층은 도체와 직접 접촉하게 되며, 압축 도체의 빈 공간을 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 과정에서 일부 해결할 수 있으나 절연층과 반도체층 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 검증하였으며, 케이블 규격을 제정하였다.



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

그림 1. 신개발 케이블(TR CNCE-W)의 구조 및 재질

2. 본 론

2.1 신규 케이블의 개발 방향

본 연구에서는 기존 CNCV-W 케이블, laminare 구조 케이블 및 encapsulating 구조 케이블 등 3가지 구조의

표 1. 기존 케이블과 신개발 케이블의 비교

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

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 폴리올레핀을 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.

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 10일 마다 중량을 측정하여 다음과 식을 이용하여 투습도를 계산한다.

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

여기서, Q는 투과수분량(g), L은 시료길이(cm), R₁은 차수층의 내경(cm), R₂는 외피의 외경(cm), d는 시험온도에 따른 포화수증기압(mmHg, 60℃의 경우 149.5 mmHg), t는 시험시간(day)이다. 차수성능은 투습도의 평균치가 1×10⁻⁷ g·cm/cm 2·day·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 나타난다. 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.

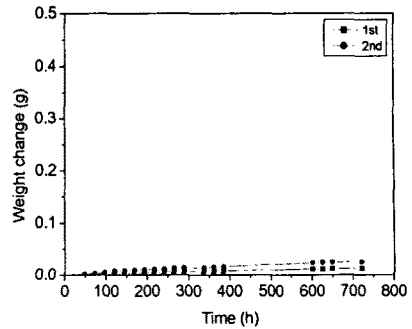


그림 2. 외피용 LLDPE 컴파운드의 WVT

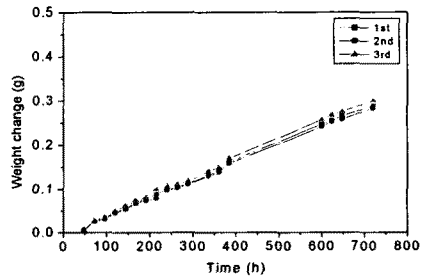


그림 3. 외피용 PVC 컴파운드의 WVT

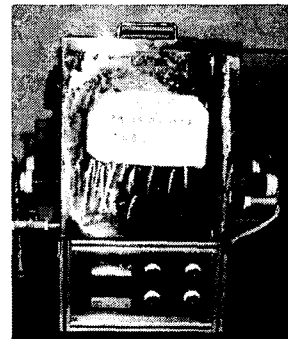


그림 4. 실제 케이블 시료에 대한 투습도 시험

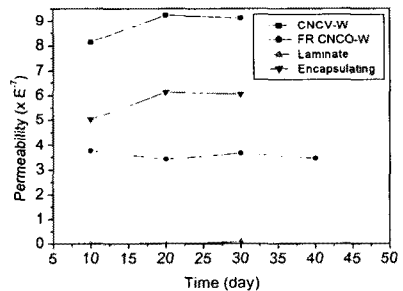


그림 5. 실제 케이블 시료에 대한 투습도 시험 결과

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 동전력률의 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 수분침투를 완전히 차단하기는 어렵다.

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 가격 면에서 유리하다. 수증기 투과율 및 교류 절연과강도에서도 EEA는 EVA보다 우수한 특성을 나타냈다.

표 2. 반도체 재료용 기저수지의 물성

| 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 [t] | 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 수지중성시험과 기저수지별 카본블랙 변량시험을 실시하였으며, 외부 반도체층의 경우 한가지의 기저수지만을 사용하므로 카본블랙 변종 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 반도체층 컴파운드에 요구되는 물성은 적절한 기계적 강도와 전기전도성, 박리성 등이 중요하다. 박리성의 문제로 한 종류의 EVA만 사용하였으며, 외부 반도체층 컴파운드에 대한 카본블랙 변종시험에서 AB 및 FB-2 카본블랙을 사용한 컴파운드만이 압출한 외관이 양호한 결과를 나타냈다. 또한 변종시험에서 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 적절한 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. TR CNCE-W 케이블 구매규격 제정

이상과 같은 제질 평가를 통하여 내부반도체층의 제질 변경, 절연층의 수트리 억제형 TR XLPE 적용, 외피 재질에 PE 계열 기저수지를 적용함으로써 전력케이블에서 많이 발생하는 고장 요인을 상당히 저감할 수 있도록 케이블 설계를 변경하였다.

위와 같은 기본 평가를 거친 후, 표 5와 같은 설계(안)을 제정하였으며, 시범 생산한 케이블에 대하여 교류파괴시험, 가속 수트리 시험 등을 통하여 그 성능을 검증하였으며, 기존 CNCV-W 케이블 보다 우수한 결과를 나타냈다. 평가 내용은 본고에서는 생략하였다.

표 3. 신규 케이블의 설계(안)

| No | 항 목 | 재 료 | 비 고 |
|----|---------|----------------------|---------|
| 1 | 도 체 | 수밀 컴파운드 충전 원형압축 연동선 | 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 부품을 테이프 | |
| 6 | 중성선 | 연동선 (Encapsulating) | |
| 7 | 중실외피 | 난연성 PE (LLDPE) | 2.0 mm |

연구 결과 신개발 케이블에 대한 구매규격(안)을 만들고 이 규격(안)에 대하여 2004년 10월말 케이블 제조업체 및 컴파운드 제조업체가 참여한 가운데 공청회를 개최하였으며, 공청회에서 제시된 의견에 따라 규격(안)을 일부 수정하고 최종적으로 2005년 4월 구매규격이 제정되었다.

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 TR XLPE를 절연층 재료로 선정하였다. 외피 재질로는 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.

향후 국내 지중배전선로의 관로에는 TR CNCE-W 케이블이 포설될 것이며, 제조업체의 인증시험에 소요되는 2년여의 시간이 흐른 후 2007년부터 국내 배전계통에 실제통에 포설될 것이다. 한편, 전력구에는 FR CNCO-W 케이블이 포설될 것이며, 이에 따라 향후 국내 배전계통은 이 두 가지 케이블이 중점적으로 운영될 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 전력연구원 최종보고서, "지중 배전케이블의 절연성능 향상에 관한 연구" 2004.
- [2] 한전등록구매규격 RS 126-670/673('05.04.22)"22.9 kV 수트리억제 충실 전력케이블"
- [3] IEC 60502-2, "Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 1 kV up to 30 kV", 1997.
- [4] ICEA S-94-649(2000) Concentric Neutral Cables Rated 5,000 - 46,000 Volts