

전력케이블의 절연열화 및 수명에측기술

조 연옥* · 류 희석**

(* 한국전기연구소 고전압연구실장)

(** 한국전기연구소 고전압연구실 연구원)

1. 서 론

사회발전에 따른 전력수요의 증가에 따라 전력계통은 고전압화·대용량화되고 있으며 이와 함께 인구밀집지역에서 주로 사용되는 전력케이블도 같은 경향을 나타내고 있다. 현재 국내에서도 345KV급 전력케이블의 포설이 계획중에 있으며, 세계적으로는 교류 500KV급 전력케이블, 장거리 송전을 위한 직류 ± 600KV급 전력 케이블, 대용량 단거리 송전을 위한 1200KV급 관로기중케이블 등이 개발되고 있다.

이러한 추세에 따라 전력케이블의 절연체에 인가되는 전기적 stress도 점차 높아져 더욱 우수한 특성을 갖는 절연재료의 개발욕구가 증가하였다. 종래에 전력케이블에 가장 많이 사용된 절연재료는 종이로서 절연유와의 복합 구조물로서 현재에도 널리 사용되고 있다. 그러나 손실특성, 포설공사 및 환경상에 많은 단점을 갖기 때문에 이러한 단점들을 보완하여 새로이 개발된 고분자 절연재료들을 사용하기 시작하였다. 새로운 절연재료 가운데 Cross Linked Polyethylene은 전력손실이 적고 사용온도도 높으며 절연특성도 우수하여 배전계통에 사용되는 전력케이블에서 부터 급속히 사용되기 시작하여 154KV급에도 사용되고 있으며 275KV급 전력케이블의 개발도 이루어지고 있다.

전력케이블은 주로 지중선로에 사용되기 때문에 가공선에 비해 많은 비용이 필요하고 사고시 계통에 미치는

영향 또한 매우 크다. 따라서 전력케이블은 전기적·기계적·열적으로 매우 안정된 상태에서 목표수명년간 동안 사용될 수 있어야만 한다. 종래의 지절연 전력케이블은 설계시 목표로한 장기간의 안정성이 많은 운용실적으로 입증되고 있다. 그러나 새로이 개발된 Plastic 절연 전력케이블들은 사용 경험이 적기 때문에 장기 신뢰성이 입증되지 못하고 있으며 오히려 목표수명동안 운전되지 못한다는 증거가 세계적으로 발견되고 있다.

1940년대 후반 T.W.Dakin이 화학반응을 정량화하는 Arrhenius의 식으로부터 착안한 실험식을 전기적 절연열화과정을 정량화하기 위해 적용한 이래, 고체 절연재료를 사용한 전력기기의 장기특성을 평가하는 기본식이 되었다. 이 실험식을 사용하여 초기에 측정한 수명곡선에 의해 목표수명년한에서의 잔존 특성을 예측함으로써 제품 생산시 단시간 시험에 의해 장기특성을 측정할 수 있다는 이론에 따라 대부분의 전력케이블은 특성측정의 생산시의 단시간 시험으로 완료되었다.

그러나 Plastic전력케이블이 목표수명년간 이전에 파괴되는 사고가 발생하여 이 원인을 규명하기 위한 연구가 진행된 결과, 실험실적으로 단시간에 측정된 열화특성과 실선로 운용시의 열화특성은 다르다는 것이 밝혀졌고, 그 원인으로서 부분방전 발생전압 이하의 저전계에서도 장시간 전압인가에 따라 발생하는 Tree현상등이 주목되었다.

이러한 연구결과 전력케이블의 장기 신뢰성 보장을 위

해서는 현실적으로 가능한 한도내에서 실제의 선로운용 상태와 가장 가까운 시험상황을 부여하여 년단위 이상의 장기실증시험이 필요하다는 결론이 내려졌다. 이러한 결론에 따라 세계 각국에서는 대규모 장기실증시험설비를 건설하기 시작하였고, 대표적으로 미국의 Waltz Mill 케이블시험장, 일본의 요코수가 케이블 시험설비등이 현재에도 운전되고 있다. 이러한 시험설비는 전력케이블 개발업체에서 제품의 품질보증을 위해 운용되어야 하겠으나 시험기간이 매우 길고 많은 투자를 필요로 하기 때문에 통상적으로 연구 및 시험능력을 갖춘 연구용역기관에서 운영하고 있다. 또한 세계적으로 전력케이블의 장기신뢰성에 관한 연구로는 앞서 설명한 바와 같이 신뢰도가 입증된 저절연 전력케이블 보다는 Plastic 전력케이블 또는 새로이 개발되는 전력케이블을 주 대상으로 하고 있다. 아직 사용경험이 적은 해저케이블, 직류케이블등에 대해서도 조사연구가 진행되고 있으며 기 설치된 전력케이블의 열화정도를 측정하기 위한 열화진단기술 및 설비에 대해서도 계속 연구되고 있다.

2. 전력케이블의 절연열화현상

전력케이블의 절연특성은 케이블에 인가되는 stress의 종류에 따라 교류·직류·충격전압등에 대한 내전압특성과 유전율·유전정접·누설저항등의 변화로 나타나는 손실특성으로 대별할 수 있다. 이 가운데 전력케이블의 사용여부를 판정하는 기준은 주로 내전압특성이 되기 때문에 내전압특성의 변화 원인 및 사용조건에 따른 변화경향을 개략한다.

2.1. 부분방전현상에 의한 열화

고체절연체의 진성파괴이론, 열파괴이론과 함께 내전압 특성의 저하과정을 설명하는 고전적 이론으로서 Electrical Tree 현상을 설명하는 기초가 되기도 한다.

절연체의 표면 또는 내부에 Gap 또는 Void가 존재할 경우, 방전개시전압 이상의 전계가 가해지면 부분적인 방전현상이 발생한다. 이 방전현상에 의해 절연체가 침식되고, 침식부분이 진전하면서 단시간 내에 절연파괴에 도달하기도 하고, Electrical Tree로서 비교적 천천히 진전하기도 하며, 주위 환경에 따라 다른 형태로 변화하기도 한다.

이러한 부분방전현상에 의한 열화과정은 비교적 오래전부터 조사연구가 이루어져서 평행평판전극을 이용한 IEC시험법, 집중전극법, Kreuger에 의한 Void 시험 등에 의한 연구결과가 발표되어 있다. 이 연구결과들에 의하면 부분방전현상에 의한 열화과정은 중량감소를 나타내는 대단히 격한 산화분해반응으로 밝혀졌으며, Void에서 부분방전이 발생하는 경우 절연파괴에 도달하는 수명곡선의 수명지수 n은 약9정도인 것으로 알려졌다.

부분방전현상은 대부분 초기부터 전기적인 측정에 의해 유해한 크기의 방전을 감지할 수 있기 때문에 현재는 주로 전력케이블 절연체 내에 존재하는 Void 등의 결합부분을 측정하는 수단으로 이용되며, 전력케이블 생산공정개선이 이루어지고 후술할 Water Tree 현상에 의한 특성저하현상이 매우 급속하다는 것이 밝혀진 이후 실제 전력케이블의 열화과정에 대한 연구에서 비중이 적어졌다.

2.2. Electrical Tree현상에 의한 열화

Electrical Tree는 주로 두꺼운 절연물에서 발견되며 국부고전계에 의해 절연층에 형성되는 것으로 큰 경우 수 μm 의 직경을 갖는 미세공구조를 갖는다.

이러한 구조의 생성원인은 국부고전계에 의한 진성파괴에 기인한다는 설과 국부방전에 의한 이온충격으로 발생한다는 설이 있으며, 실제의 Tree현상에서 발견되는 Time lagging 현상을 설명하기 위하여는 maxwell유력에 의한 Crush발생과 기계적인 파괴가 Tree의 발생에 관련된다는 설도 있다.

Electrical Tree의 진전속도는 부분방전 현상의 발생량과 밀접한 관계가 있어 1pc당 $3\sim 5 \times 10^7 \text{mm}$ 의 신장율을 측정한 연구결과도 있다. 그러나 이 진전속도는 주위 환경에 의해 변화되는 수치로서 실제의 전력케이블 설계시에 감안하기 위해서는 V-t 곡선에 의해 측정된 수명지수 n의 값이 필요하다.

2.3. Water Tree에 의한 열화

1967년 Polyethylene을 사용한 수중모타선에서 많은 Tree현상이 발견된 이후, 물이 관련되며 비교적 저전계에서도 시간에 따라 발생하기 때문에 Electrical Tree와 구별하여 Water Tree로 명명되었다. 이 Water Tree현상이 Plastic 절연 전력케이블의 수명을 단축시키는 주요인인

것으로 규명되어 많은 연구가 다방면에 걸쳐 진행되었지만 현재까지 구조나 발생원인등에 있어서 명확한 설명이 어려운 상태에 있다. 현재도 여러가지 측면에서 연구가 진행되고 있으나 거시적인 관점에서의 Water Tree에 대한 특성을 개선하는 작업이 이루어졌다. Water Tree현상은 수분의 존재가 필수적이기 때문에 생산기술의 측면에서 수분의 존재를 최소화하기 위해 3층동시압출과 함께 진식가교공정을 도입하고 케이블 외장층에 수분을 차단하는 차수구조를 도입하였다. 이러한 개발의 결과 현재 가장 문제시되는 것은 절연체 내부의 Void 또는 이물질로부터 발생하는 Bow Tie 형태의 Water Tree이다. 어떤 형태이든 전력케이블구조에 수분이 존재하는 경우 그림 1에서와 같이 수명지수는 2.6 정도의 낮은 값이 얻어진다.

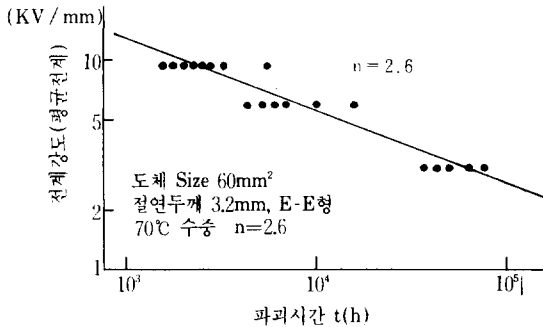


그림 1. XLPE 절연케이블의 V-t 측정결과

따라서 근본적인 Water Tree의 발생억제방법이 발견되어야 하기 때문에 첨가제의 사용이나 새로운 Polymer Branding법의 개발등 여러방면에서의 노력이 경주되고 있다.

2. 기타 열화현상

전력케이블은 교류 또는 직류인가전압에 의한 stress뿐 아니라 통전에 따른 Thermal Stress, 포설에 따른 기계적 stress, 뇌섬락전압 침투에 따른 Impulse stress, 계통운용시 발생하는 switching surge에 의한 stress등에 처하게 된다. 따라서 전력케이블의 설계시 이러한 stress들에 의한 특성열화도 감안되어야 하는데, Impulse 및 switching surge에 대해서는 반복인가시 우발적 파괴의 형태를 나타내기 때문에 Basic Impulse Level로써 보증될 수 있으며, 기계적 stress의 경우도 포설시 최소굴곡반경의 제한 등

에 의해 운용상의 문제점을 해결할 수 있다.

그러나 절연재료의 상시허용온도범위 이하의 온도에서도 교류 및 Impulse 등에 대한 절연특성이 크게 변화하기 때문에 각 절연특성의 열화특성을 고려할 때 반드시 온도의존성을 감안하여야만 한다. 또한 상시허용온도 이상에서는 절연재료가 물성적으로 변화하기 때문에 설계시 또는 운용시 포설조건에 따른 허용전류용량, 허용단락전류용량등에 주의할 요한다.

3. 전력케이블의 수명예측기술

전력기기는 전기적·열적·기계적으로 목표수명년까지 안정되게 운전될 수 있도록 설계 제작되어야 하나, 대부분의 경우 내부·외부에서의 여러가지 원인으로 고장현상이 발생하여 전력계통의 정상적인 운영을 저해하는 원인이 된다. 이러한 고장현상을 완전히 제거하지 못하는 것이 현실이라면 고장현상을 예측하고 적절한 시기에 보수 또는 교체작업을 실시함으로써 예상치 못한 사고에 의한 비정상적 계통운영상태를 최소화할 필요가 있다.

기기의 고장현상을 예측하기 위해서는 대상기기의 고장현상이 나타내는 경향을 분석하여 우발적 파괴가 발생하는 초기 고장형태를 갖는가 또는 사용에 의해 고장원인이 누적되는 마모열화형태를 지니는가의 여부를 판단하여야만 고장현상 예측을 위한 판단기준을 가지화시킬 수 있다.

이러한 관점에서 전력케이블에 사용되는 Polyethylene film의 절연과파괴특성을 측정하여 Weibull 분포지에 그린 것이 그림 2이다.

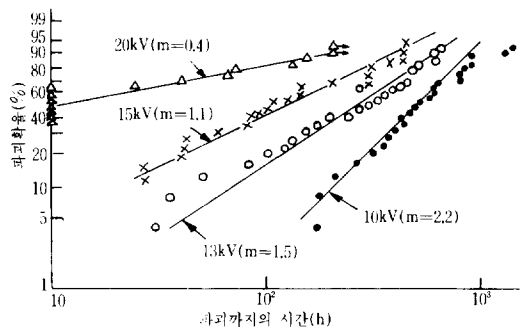


그림 2. 침수 V-t 특성의 Weibull 분포

그림 2에서 보인 것처럼 인가전계가 진성파괴치 부근 까지 높아질 경우 Weibull 확률분포에 따른 형태 parameter m 이 1보다 작은 우발적 파괴의 형태를 나타내지만 인가전계가 낮아질수록 m 이 1보다 큰 열화가 누적되는 마모형 파괴의 형태를 나타낸다. 보통 절연체의 두께가 두꺼워 질수록 형태 parameter의 값은 커지며, 통상적으로 실사용시의 전계강도가 진성파괴치의 50% 이하로 설계되는 전력케이블의 경우는 더욱 뚜렷한 마모파괴의 형태를 나타낸다.

이로부터 수명예측기술은 출발하게 되며, 특성변화의 시간에 따른 변화추이를 측정하여 수명곡선을 작성함으로써 전력케이블의 사용가능년한을 추정하고 사용중인 전력케이블의 절연특성잔여수준을 판정하기 위하여 열화에 따른 제반 측정기술 및 측정설비에 대해 기본자료를 제공한다.

3.1. v-t 특성

전력케이블의 수명년한을 추정하기 위해서는 절연열화의 변화추이를 가시화 할 필요가 있다. 이를 위해 사용되는 특성항목은 주로 내전압특성을 대표하는 교류전압파괴치가 된다. Arrhenius의 식을 응용하여 T.W.Dakin에 의해 제안된 파괴전압과 시간과의 관계를 수식화한 실험식이 다음에 표현된 역 n승의 법칙이다.

$$t = K \cdot V^{-n} \quad (1)$$

식(1)에서 V 는 인가전압이고 K 는 상수, t 는 전압인가 시간, n 은 수명지수이다. 서론에서 설명한 바와 같이 식(1)에서 사용되는 시간 t 의 단위는 년으로서 최소 1년이 상이어야만 한다. 식(1)을 도식화한 것이 그림 3이다.

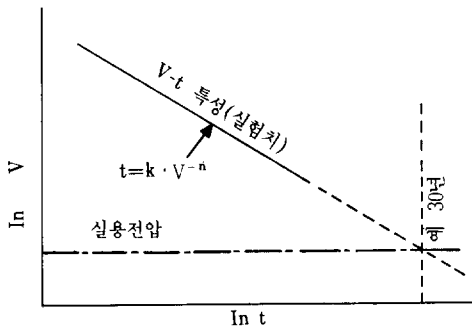


그림 3. V-t 특성의 역n승법칙

전력케이블은 실제의 운용시 도체전류로 인하여 주위 온도보다 높은 온도분포를 나타낸다. 따라서 절연체의 특성은 사용시의 온도조건에서 증명되어야 한다. 고체절연체는 통상적으로 고온에서 그 절연특성이 저하되어 절연특성열화정도도 많아진다. 그림 4는 이러한 특성의 예로서 XLPE전력케이블의 수중 V-t 특성을 온도에 따라 측정한 것이다.

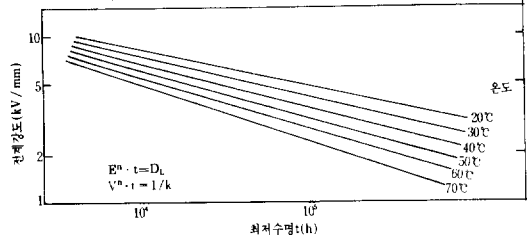


그림 4. 대표적인 XLPE 전력케이블 V-t 특성의 온도의존성

그림 4에서 알수 있듯이 온도에 따른 절연특성의 변화도 심하고 또한 실제의 전력케이블 절연체는 온도분포뿐 아니라 시간적인 전류변화에 따라 온도가 상승하강되는 Heat Cycle현상을 갖고 있다. 따라서 식(1)은 온도의 함수로서 표현될 수 있어야 한다. 이같이 수명예측식을 온도의 함수로 표현하는 연구는 현재도 결론이 내려지지 않고 계속적인 연구가 진행되고 있어, 실제 시험에서는 계통의 부하변화를 가정한 일일부하변동법에 의해 시험되고 있다.

또한 식(1)을 적용하기 위해서는 년단위 이상의 장기 시험에 의해 전력케이블의 특성변화를 측정해야 하기 때문에 새로운 제품개발이나 연구시 매우 긴 연구기간을 필요로 한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 전력케이블의 초기특성변화와 장기특성변화 사이의 연관관계를 증명하려는 연구도 진행되고 있다.

이러한 수명예측기술을 위한 연구의 다음 단계로서 실제 사용되고 있는 전로의 열화진행상태를 판정하기 위한 열화진단기술이 연구되고 있다.

3.2. 전력케이블의 열화진단기술

현재 전력케이블의 수명을 단축시키는 주요인은 Water Tree현상때문으로 여겨지고 있다. 따라서 종래부터 지절연이나 액체절연을 대상으로 사용하는 직류고압법, 절

연저항측정법등에 의해서 Plastic 절연 전력케이블에 발생한 Water Tree를 판정할 수 있는가 하는 것이 의문시되고 있다. 또한 전력케이블이 고전압화됨에 따라 절연체에 인가되는 전압 stress도 상승하여 일단 절연열화의 징후가 나타나면 Water Tree가 발생하는 경우에서 처럼 급속히 절연파괴로 진전하기 때문에 더욱 정밀한 절연진단 기술과 설비가 필요하게 되었고, 진단설비가 정밀화됨에 따라 현장에서의 측정시 발생하는 측정오차 및 외부로부터의 유도현상을 제거하기 위한 노력도 경주되고 있다.

열화진단기술에 있어 출발은 특성열화 과정의 변화와 추이를 같이 하는 측정 가능한 특성치를 선정하는 작업이다. 전력케이블의 사용가능여부를 판정하는 최종기준은 절연파괴특성 또는 내전압특성이 되기 때문에 이 특성과 일치하는 비파괴 절연측정치를 선별하고 그 기준을 확립하여야 한다.

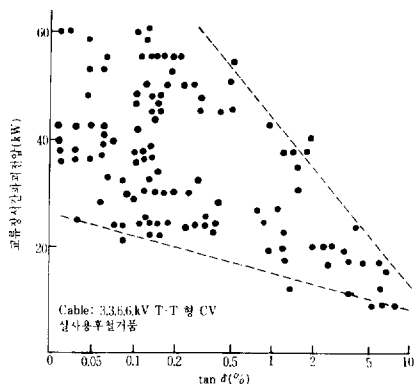


그림 5. 유전정점과 교류 파괴전압

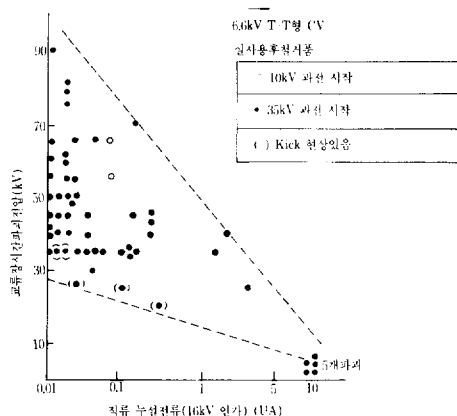


그림 6. 직류누설전류와 교류파괴전압

그림 5와 6은 실사용후 절거한 3~6KV XLPE전력케이블의 유전정점 및 직류누설전류와 교류장시간 파괴전압과의 관계를 측정된 결과이다.

이러한 조사연구의 결과 유전정점과 직류누설전류치가 교류파괴치와 밀접한 관계에 있고 Water Tree에 의한 열화과정과도 일치하고 있음을 알았다.

이외에도 연구방향에 따라 여러가지 진단시험방법이 검토되고 있다.

부분방전시험은 Void, 공극, 크랙등의 검출에는 유효하나 측정시 외부에서 침투하는 잡음을 제거하는 기술이 관건이 된다. 현재로 유효한 설비들이 개발되어 상품화되는 단계에 있다.

직류내전압법에 있어서는 교류파괴치와 직류파괴치 간의 관계가 명확히 규명되지 못한 상태로서 직류누설전류 측정시에 직류고전압을 사용하는 복합적인 방법으로 사용되기도 한다.

활선열화진단법으로서 직류중첩법, 직류 성분법, 연속부분방전측정법, 3상불평형 전류측정법등이 검토되고 있고, 이외에도 잔류전하법, 역흡수전류법, 전위감수법, 직류파괴전류법 등 다방면에 걸쳐 연구개발이 수행되고 있다.

4. 결 언

이상과 같이 전력케이블의 수명예측기술과 관련하여 세계적으로 많은 연구개발이 수행되고 있으며 향후에 개발될 극저온·초전도 전력케이블 및 대용량 송전을 위한 새로운 전력케이블에 대해서도 많은 검토가 이루어지고 있다.

수명예측기술은 전력케이블의 개발 및 운용을 위해 필수적으로 연구검토 되어야 할 기술분야로서 국내에서는 지금까지 약간 소홀히 되어 온 것이 현실이다. 그러나 국내에서도 지중선로가 증가되기 시작하여 절연열화에 의한 사고도 증가하는 시점에 와있기 때문에 새롭게 개발필요성이 대두되고 있다.

이러한 수명예측기술의 개발을 위해서 필수적으로 필요한 것이 전력케이블을 대상으로 하는 장기과전시험설비와 전국적인 전력케이블 관련분야의 조사연구를 담당할 생산자와 사용자를 망라하는 조직이다. 이를 위하여는 과감한 투자가 이루어져야 할 것이며 선진국의 기술장벽이 높아져 가는 것을 감안한다면 더 이상 시기를 늦추지

않아야 할 것이다.

이러한 저간의 상황을 접하고 있는 한국전기연구소에서는 1986년 후반기부터 전력케이블의 수명예측기술 분야에 대한 검토및 투자를 시작하여 1987년부터 기초적인 연구를 개시하였고 1989년부터 장기실증시험을 위한 실험 규모 전력케이블 시험설비를 건설하여 1991년경부터 운전을 시작할 예정이다.

참 고 문 헌

- 1) 조연옥외, "23KV급 XLPE전력케이블의 수명예측기술개발을 위한 연구" 한국전기연구소 연구보고 7K-CO30, 1987. 12.
- 2) "Underground transmission - Extruded cable System" EPRI journal May 1982. p44
- 3) Z.Z. Bajbor, "Cable Life Expectancy Calculation - A Practical Approach" IEEE trans on EI, vol EI-22 NO 4, Aug 1987. P485~487
- 4) "Distribution - Estimation of cable life" EPRI JOURNAL July / August 1983 P49
- 5) "Estimation of Cable Life" EPRI JOURNAL May 1981 p41
- 6) "Waltz Mill Cable Test Facility" EPRI Report RP-7801, April 1979
- 7) "Experimental Techniques for Investigating the Degradation of Electrical Insulation" EPRI EL-1854 May 1981
- 8) B.R. Schmidt, "Special Report for Group 21" CIGRE 1986 Session paper 21-00, Aug / Sept 1986.