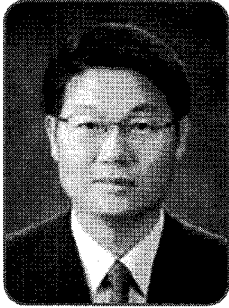


화력발전소 전력케이블 절연진단 동향



한전전력연구원
엔지니어링센터
전기설비진단팀
선임연구원/발송배전기술사
김경열
Tel : (042)865-7576

1890년 Deptford와 London사이에 1만Volt에 처음으로 Paper Insulated Cable이 사용된 이후 현재는 가교폴리에틸렌(Cross Linked Polyethylene)이 발전소 인입선로, 고압전동기 및 지중송배전 선로용 전력케이블로 절연재로 넓게 사용되고 있다. 고압케이블에는 3.3kV와 6.6kV의 케이블이 있으며, 특별고압케이블은 11kV 이상을 말하며 국내의 경우 대부분 22.9kV급이다. 케이블의 열화현상은 절연체내에서 발생하는 것으로 통상 XLPE 케이블을 중심으로 설명하고 있다. XLPE 케이블의 구조를 분석해 볼 때 내부와 외부 반도체층의 재질은 당초 반도체 테이프를 사용하였으나 최근에는 압출된 반도체층을 사용하고 있다. 반도체층의 압출은 수트리(tree) 발생을 억제시킴으로 절연열화가 현저히 낮게 일어나기 때문이다. XLPE 케이블의 부품은 종단접속부(케이블 헤드)와 직선 접속부(조인트)가 있으며 전체의 완화를 위하여 스트레스콘을 형성하는데 절연 고무테이프와 합침테이프를 감았으나, 최근에는 미리 고무로 몰드된 조립형이 사용되고 있다.

일본 조사사례에 의하면 이러한 고압케이블의 사고원인은 3.3kV 선로에서는 열화가 60%, 6.6kV 선로에서는 외상이 42%를 차지하고 있는 것으로 나타나고 있다. 열화의 원인 중 수트리, 자연열화, 침수, 트레킹, 열 및 코로나가 60%를 차지하고 있다. 한편 고압케이블의 사고건수에 비하여 부품의 고장은 20~30% 정도로 낮게 분석되고 있다. 표 1은 6.6kV 배전선의 케이블 사고를 나타내고 있다.

또한 표 2는 2003년도에 조사된 가공전선로 및 지중전선로에 발생된 6kV 배전선로의 사고원인별 건수와 구성비율을 나타내었다. 가공에서는 자연현상 건수가 많은 것에 비하여 지중에서는 열화가 가장 많이 나타나고 있다. 케이블과 접속부(종단을 제외)는 관로에 시설이 되어 있기 때문에 낙뢰, 태풍 등의 영향을 받기 어려운 반면에 침수 등으로 절연열화에 대한 영향을 받기가 쉽다. 고전압 케이블은 열 열화, 부분방전 열화, 수트리 열화 및 전기트리 열화 등에 의해 내부에서 절연열화가 생성되어 진전됨에 따라 최종적으로 절연파괴가 발생한다. 고압케이블이 지하에 매설된 경우 수트리 혹은 접지불량에 의해 부분방전이 발생되어 외부에서부터 내부로 절연열화가 진전되어 절연파괴에 이른다. 따라서 이러한 절연열화 현상을 사전에 인지하기 위해 직류전류 시험, 내전압 시험, 유전정접 시험, 부분방전 시험, 잔류전하 시험 및 활선진단 시험 등이 사용되고 있으며, 이에 절연진단 동향을 소개하고자 한다.

표 1. 6.6kV 배전선의 케이블 사고

	3.3kV 배전		6.6kV 배전	
	건수	%	건수	%
열화	67(12)	58.0	192(49)	24.7
자연현상	5(0)	4.4	27(3)	3.5
외상	14(2)	12.3	325(2)	41.8
설비불량	19(17)	16.7	140(110)	18.0
기타	9(4)	7.9	93(20)	12.0
합계	114(35)	100	777(184)	100

표 2. 6kV 사고의 원인별 건수와 구성비율

	가공전선로		지중전선로	
	건수	구성비율(%)	건수	구성비율(%)
열화	860	12	115	41
설비불량	431	6	65	23
자연현상	3,051	41	22	8
고장·과실	550	7	49	18
타물접촉	1,526	20	2	1

※ ()내의 수는 부속품의 사고를 의미한다.

열화된 케이블의 시험을 위한 방법으로 여러 가지 시험법이 있으나, 널리 알려진 DC, AC, Very Low Frequency Test(VLF), Oscillating Wave Test(OSW), DFR(Dielectric Frequency Response) 등에 대해 다루고자 한다.

가. DC(직류내전압) 시험법

PILC(Paper Insulated Lead Cable)케이블이 도입되면서 케이블의 손상을 진단하기 위해 DC시험법이 주로 사용되어 왔으며, 시험전압은 대략 4-4.5배 정도였다. 그러나 이 시험은 DC전압을 열화된 압출형 케이블에 인가하면, 특정 장소에 전하가 축적되는 현상이 나타나며, 시험후 정상적인 전원가압이나 재시험의 경우 절연파괴가 발생하는 현상이 보고되어[1, 8, 9], 현재는 거의 설치하는 동안의 합격시험 판정(Acceptance Test) 또는 신뢰도 검사용으로만 사용된다. 균일한 절연재, 동일한 이상적인 새로운 케이블의 경우, 케이블 절연체내에 전계의 형성은 AC, DC시험법에 관계없이 동일한 유전상수 값을 가지나, 결합이 있는 경우 동일한 값을 갖지 못한다[2]. 이러한 이유 때문에 DC시험법이 상당히 단순하고, 사용하기 쉬운 편리함이 있음에도 불구하고 압출케이블 설치후 시험등에 사용되고 있다. 아울러 DC시험을 하는 경우 중요한 것은 시험후에 반드시 상용전압을 인가하기전에 공간전하(Space Charge)가 제거가 될수 있는 충분한 시간을 가져야 한다는 것이다. 이 시험은 최종공장시험전압의 60%를 초과하지 않는 시험전압을 사용할 것을 권장한다.

DC 시험법의 장단점은 다음과 같다.

- 공간전하(Space Charge)의 축적이 발생할 가능성이 높다.
- 현장시험용으로 상대적으로 장비는 단순하고 작다.
- 입력전원을 쉽게 얻을 수 있다.
- 열화된 XLP케이블에서 시험을 하는 경우 케이블 손상을 앞당기는 결과를 초래한다.
- 장비 가격이 상대적으로 저렴하다.
- 특정 종류의 결함 즉 void, cuts에 대해서 검출이 어렵다
- 도전성 형식 결함에 유리하다.

나. AC 시험법

이름이 의미하듯 이 시험법은 시험전원으로 운전주파수와 동일한 교류전류를 사용하여 시험이 이루어지며, 새로운 케이블 및 부속품에 대한 공장시험과 가장 비슷한 시험이다. 더욱이 진단목적으로 부분방전 또는 $\tan\delta$ 를 확인할 수 있다. 대체적으로 케이블의 유효 커패시턴스와 인덕터가 공진이 되면 좀 더 작은 변압기를 사용함으로써 필요한 장비의 크기를 줄일 수 있다. 완전히 이상적인 경우 시험전원은 단지 케이블과 장비의 인덕터 저항손실만큼만 공급하면 된다. 그림은 일반적인 AC전압 시험장비의 회로도이다. 이 시험법은 장비의 무게, 크기와 가격 때문에 쉽게 이용하기가 어려우며 또한 현장으로의 장비의 이동도 어렵다. 이 시험장비로 시험할 수 있는 용량은 아래와 같은 식으로 결정된다.

$$VA = 2\pi f c E^2$$

f : 주파수 c : 커패시턴스(uf/mile)
E : 시험전압(kV)

케이블 검수시험(Acceptance test)과 정비를 위한 시험전압은 최종 공장시험 시험전압의 60~80%로 사용하도록 권장된다.

AC 시험법의 장단점은 다음과 같다.

- 시험법의 장점은 쉽게 시험전압을 이용할 수 있다.
- 공장시험과 비교할 수 있다
- 시험전압 이상인 경우 장비가 무겁고 비싸지며 절연물 상태 평가가 어렵다는 것이다.
- 비싸고 현장시험에 비실용적이다.
- 특정형태의 결함을 증폭시킨다.

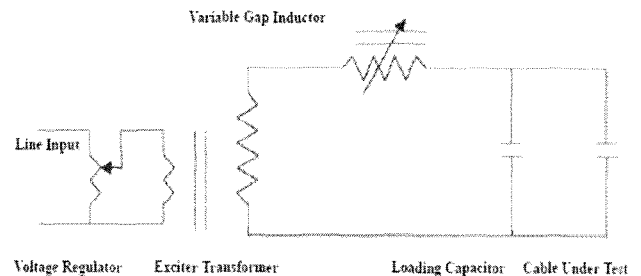


그림 1. 직렬공진회로

다. VLF 시험법

진단장비의 크기를 가늠하기하기 위해 케이블과 같은 유도성부하에 요구되는 피상전력(Apparent Power)을

$S=2\pi fCV^2$ 로 계산을 하며, 예를들면 정격15kV인 케이블에 시험전압 16kV(60Hz) 304m인 경우 필요한 피상전력은 약 10kVA이며, 만약 220V인 경우 45A가 필요하게 된다.(참고로 케이블 커패시턴스는 100pF/foot임) 식에서 알수 있듯이 실질적인 전력의 크기를 줄이는 방법은 주파수를 낮추는 것이다. 동일한 시험전압에서 60Hz를 0.1Hz로 낮추면 피상전력의 크기가 600배나 작아지게 된다. 이런 관점에서 VLF(Very Low Frequency)가 개발되었으며, 중요한 사실은 VLF는 여전히 AC전원이며 느리게 움직이는 AC전원이라는 점이다.[10]

VLF 시험법의 장단점은 다음과 같다.

- AC시험특성을 가지면서 현장시험을 위한 운반 용이
- 상대적으로 낮은 전력이 요구됨
- 공장시험과 직접적으로 비교할 수 없다.
- 여러 가지 결함이 있는 오래된 케이블에는 부적합
- 케이블을 오래된 케이블을 악화시킴
- 짧은 시간에 결함이 빠르게 성장을 하게 하는 결과의 원인이 됨

아래 그림 2는 전형적인 VLF 정현 파형 회로도이다.

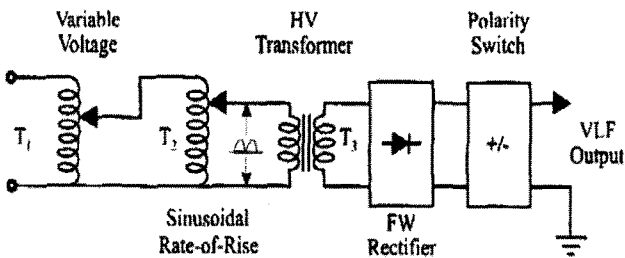


그림 2. VLF 파형발생 회로도

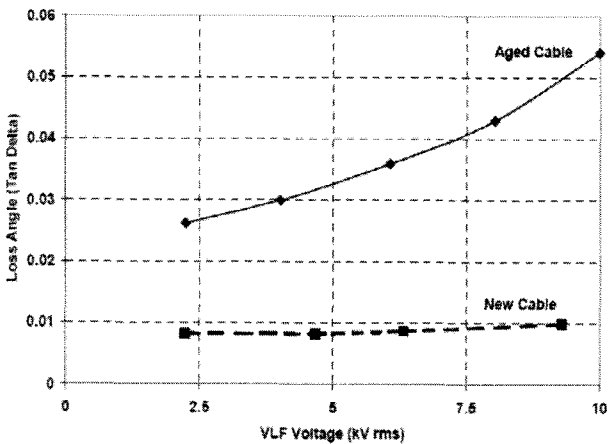


그림 3. 15kV XLPE케이블 시험결과

시험결과로서 케이블 절연물이 양호할경우 $\tan\delta$ 는 인가전압이 증가함에 따라 약간 변하게 된다. 그림 3에서 커패시턴스값과 $\tan\delta$ 은 1-10KV 전압에 대해서는 거의 동일한 특성을 보인다. 만약케이블이 수트리(Water Tree)가 발생한 경우 절연물의 저항과 커패시턴스 특성변화로 인해 $\tan\delta$ 값은 그림에서 보는 것처럼 높은 전압에서 더 높게 된다.

또한 Groenefeld에 의하면 0.1Hz는 전압을 증가시키면 지수함수적으로 전기트리가 성장하게되는 반면 60Hz에서는 크게 변하지 않았다. 15분동안 시험전압을 가하는 경우 0.1Hz 시험법에서는 전기트리 성장속도가 빠른 반면에 60Hz에서는 성장속도가 훨씬 느린 것으로 조사되어 0.1Hz에서 시험을 하는 경우 시험시간을 조절할 필요성이 있다.

이와같이 VLF시험법은 60Hz AC시험법에 비해 전기트리성장속도(Growth Rate)가 훨씬 빠르며, 일반적으로 높은 PD 개시전압(Inception Voltage)가 필요하다는 단점이 있다. 반면 앞에서 설명한것처럼 저주파수를 사용함으로써 충전전류가 큰 폭으로 작아지기 때문에 전원이 콤팩트하고 실용적이다.

표 3는 IEEE Standard 400-2001에서 제시하는 VLF 시험 판정기준에 대한 것이다.

표 3. IEEE VLF 판정기준

$\tan\delta$ at $2V_0$	$\tan\delta 2V_0 - \tan\delta V_0$	평가
$<1.2 \times 10^{-3}$	$<0.6 \times 10^{-3}$	양호
$\geq 1.2 \times 10^{-3}$	$\geq 0.6 \times 10^{-3}$	열화
$\geq 2.2 \times 10^{-3}$	$\geq 1.0 \times 10^{-3}$	교체

라. OSW(Oscillating Wave) 시험법

이 시험법은 1988년 CIGRE에서 케이블설치후 시험방법으로 제안되어졌으며, 주로 Gas Insulated 케이블에 사용한다.

OW시험법(Oscillating Wave Test)는 그림 4처럼 DC전압원과 Charging Capacitance(C), 케이블 커패시턴스로 이루어져 있다. Charging Capacitor와 Cable에 시험전압까지 몇초동안 DC전압이 인가된 후, Solid State Switch에 의해 인덕터와 커패시터에 의해 직렬공진회로가 형성된다. 이러한 회로는 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 주파수로 0.3~1초정도의 시간으로 케이블을 여자시키고 케이블의 유전체손실(dielectric loss)에 상응하여 진동감쇄하게된다.

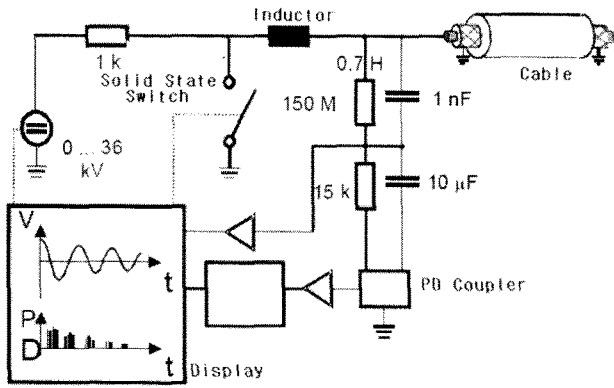


그림 4. OSW시험 기본 회로도]

이 시험법의 AC전압에 근접한 파형을 사용하며, 장비규모가 작고 쉽게 사용할 수 있다는 장점이 있다. 반면 DC시험법의 단점인 아주 높은 전압에서 절연체에 공간전하가 형성되지 않는다는 근거가 없으며, 다른 시험법에 비해 현장 사용이 많지 않다는 것이다.

OSW 시험법의 장단점은 다음과 같다.

- AC 시험 메커니즘과 동일하다.
- DC 시험법의 단점이 발생하지 않는다.
- 적용이 쉽고 장비 가격이 비싸지 않다.
- DC시험법 보다 검출이 좋으나 AC시험법보다는 좋지 않다.

지금까지 앞에서 설명한 시험법의 장단점을 비교하면 아래 표 4와 같다[5].

표 4. 케이블 시험방법 장단점 비교

	장비의 크기	Water Tree 검출능력	노후화 케이블에 영향
AC	×	◎	○
DC	◎	×	×
OSW	○	○	◎
VLF	○	○	×

◎ : 적합, ○ : 가능, × : 부적합

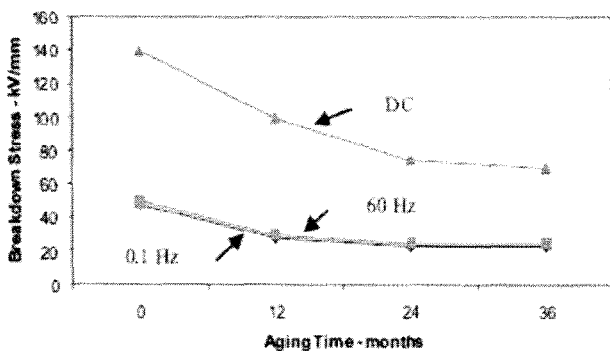


그림 5. Breakdown Stress

또한 절연체에서 AC시험법, VLF시험법은 DC시험법보다 그림에서 보는 것처럼 낮은 Stress를 절연체에 주는 것으로 확인되었다.

참고문헌

- [1] EPRI Report WP-114431, "Review of After-laying Tests for extruded Transmission Cables", December 1999
- [2] Electrical Power Cable Engineering, William A. Thue, Marcel Dekker, inc
- [3] Electrical Power Equipment Maintenance and Testing, Paul Gill, CRC Press
- [4] EPRI Report EL-1013782, "Advanced Diagnostics Estimation of Life of Extruded Dielectric Cables", December 2007
- [5] Katsumi Uchida, Yoichi Kato, Masahiko Nakade, Daisuke Inoue, Hiroyuki Sakakibara and Hideo Tanaka, "Estimating the Remaining Life of Water-Treed XLPE Cable by VLF Voltage Withstand Tests" Furukawa Review, No. 20, 2001
- [6] 발전소 6.9kV급 전력케이블의 절연평가와 진단기술개발, 전력연구원
- [7] X. Wang, Y. Tanaka, T. Takada, C. Shinoda and T. Hashizumi, "Space Charge in XLPE Power Cable Under DC Electrical Stress and Heat Treatment," IEEE Trans Diel Elec Insul, Vol. 2, pp. 467-474, June, 1995
- [8] Gnerlich, H. R., "Field Testing of HV Power Cables: Understanding VLF Testing," IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, No. 5, pp. 13-16, Sep./Oct. 1995
- [9] Craig Goodwin, "New Testing Requirements for Medium Voltage Cables," Energize, pp 12-17, May, 2005
- [10] Petzold, F. "PD Diagnosis on Medium Voltage Cables with Oscillating Voltage," Power System Technology, Vol. 1, pp. 729-735 2004, IEEE International Conference