

## 지중배전케이블 준공시험 관련 국제규격 동향과 국내 기준개선 방안

**이재봉\***, 정연하\*, 송일근\*, 조성훈\*\*  
한전전력연구원\*, 한국전력공사 배전운영처\*\*

### The International Standard Trends of MV Power Cable Installation Test and its Application on Korean Standard

Jae-Bong Lee\*, Yeon-Ha Jung\*, Il-Keun Song\*, Sung-Hoon Cho\*\*  
KEPRI(Korea Electric Power Research Institute)\*, KEPCO(Korea Electric Power Corporation)\*\*

**Abstract** - 국내 지중배전선로에 XLPE 절연체를 사용한 전력케이블이 1980년대 중후반부터 사용되기 시작하여 20년 이상 사용경험이 축적되고 있다. 현재 국내는 전기설비기술기준에 의하여 직류내전압시험을 사용하여 준공시험을 수행하고 있다. 그러나 최근 20여년의 국제적 연구결과는 직류내전압시험이 XLPE 절연체의 결함을 발견하지 못하며 절연체 내에 장기 공간전하를 형성함으로써 케이블의 수명을 단축하는 역효과가 발생한다고 보고되고 있다.

2000년대에 XLPE 절연체를 사용한 전력케이블의 준공시험으로 초저주파(VLF) 내전압시험이 CENELEC과 IEEE 규격으로 제정되었다.

국내에도 전력케이블의 준공시험으로 초저주파 내전압시험을 도입하여 적용하는 것이 적절하며, 초저주파전압을 이용한 열화진단기술을 적용하는 것이 XLPE 절연 케이블의 고장예방에 효과적일 것으로 기대된다.

## 1. 서 론

100여년 전부터 고전압 배전선로를 사용해온 구미 선진국들은 최초로 유침 절연지를 사용한 케이블(예, PILC)을 많이 사용하였으며, 지금도 선진국의 지하에는 PILC 케이블이 많이 사용되고 있다. 1960 년대부터 XLPE 절연체를 사용한 케이블이 등장한 후 현재는 거의 모든 전력케이블이 XLPE 절연체를 사용하게 되었다.

한편 전력케이블 준공시험 방법은 시험장비의 단순화가 가능한 DC 내전압시험이 PILC 케이블에 적합한 시험방법으로 그 신뢰성을 인정받으며 사용되었다. 그러나 XLPE 절연 전력케이블의 시험방법으로 DC 내전압시험이 심각한 결함에도 케이블이 파괴되지 않아 상용전원 투입 후 곧바로 고장이 발생하고, 공간전하 형성으로 케이블의 수명이 단축되는 등 XLPE 절연 전력케이블의 시험방법으로 부적합하다는 사실이 알려지면서 대체시험으로 초저주파시험(VLF), 진동파 시험(OSW), 부분방전시험(PD), 유전손실시험 등 여러 시험방법이 등장하고 평가를 받았다.

2000년대 들어서면서 여러 가지 대체 시험방법에 대한 평가가 마무리되어 연구자들 간에 공통된 견해가 확립되면서 국제규격이 제정되기 시작하였다. 1996년에 유럽에서 먼저 CENELEC HD 620 S1에 VLF 시험방법이 대체시험으로 명시되었으며, 2001년에는 IEEE Std 400에 VLF, OSW 시험 등이 대체시험방법으로 명시되었다.

국내에서는 이러한 국제 동향에 따라 1998년 전력연구원 이 지중배전 케이블에 대한 준공시험 방법으로 DC내전압, 상용주파 AC내전압, VLF 내전압, 진동파시험 등을 평가하여 진동파 시험방법을 적용할 것을 제안한 바 있다. 그러나 당시에는 적절한 시험장비가 개발되지 않아 즉시 적용하는 데에는 한계가 있었다.

최근 상기 시험방법들을 적용한 다양한 시험장비가 경쟁적으로 시장에 나와 있으므로 국내에서도 조속히 국제규격을 인용하여 준공시험방법을 적용하여야 할 것으로 사료된다.

본 논문에서는 XLPE 전력케이블에 대한 DC 내전압시험의 위험성에 대한 연구 논문들을 다시 한 번 살펴보고, 최근의 국제규격 제정 내용을 소개하고, 국내 상황과 적용을 위한 당위성 등을 살펴보고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 XLPE 절연 전력케이블에 대한 DC 내전압시험의 무효성

DC 내전압시험은 PILC 케이블에 대하여 수십년 동안 신뢰성 있는 시험방법으로 사용되어 왔다. 그러나 XLPE 케이블이 개발되면서 DC 내전압시험이 케이블의 결함을 제대로 발견하지 못하거나 절연체 내부에 공간전하를 형성하여 수명을 단축할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 그와 관련된 주요 연구결과들은 다음과 같다.

Eager의 연구에서 XLPE 또는 EP 절연케이블의 동일 결함에 대하여 DC내전압시험전압이 AC내전압시험에 비하여 훨씬 높게 나타났으며, 갈자국, 바늘구멍 등 인공적인 결함이 있는 케이블에 대하여 0.1Hz 전압은

DC 전압에 비하여 1/5 ~ 1/2 수준에서 절연파괴가 된다고 하였다(표 1 참조)<sup>[1]</sup>. 또한 DC 시험은 슈트리가 형성된 케이블을 더욱 열화시킨다고 하였다.

**<표 1> 인공결함을 가진 15kV 케이블의 절연파괴전압<sup>[1]</sup>**

Type of Imperfection (See Note)	Breakdown Voltage		Ratio
	DC, kV	0.1Hz, kV(RMS)	
<b>EP Cable</b>			
Knife Cut (0.38 mm)	30.0	16.3	0.54
Sharp Needle (0.76 mm)	44.0	20.1	0.46
Drilled Hole (0.30 mm)	66.2	17.3	0.26
<b>XLPE Cable</b>			
Knife Cut (0.58 mm)	47.5	9.2	0.19
Sharp Needle (0.58 mm)	41.0	8.2	0.20
Sharp Needle (1.47 mm)	80.0	21.9	0.27
Drilled Hole (0.25 mm)	92.0	21.9	0.24
Note : The value in ( ) is the thickness of insulation remaining after creating imperfection			

Thu는 DC 시험이 PILC 케이블에는 매우 효과적인 시험이지만, 다습한 환경에서 사용되는 XLPE의 수명을 5년 이상 단축시키며, DC 시험을 대신할 여러 시험방법이 있다고 하였다<sup>[2]</sup>.

Finke는 EPRI의 연구결과를 인용하여 DC 내전압시험이 신품케이블에 대해서는 수명을 단축시키는 영향이 없지만 현장에서 열화된 케이블은 수명을 단축시키며, 특히 슈트리열화가 있는 케이블은 슈트리의 성장을 증대시킨다고 하였다. 그리고 XLPE 케이블 관련 산업규격(AEIC, ICEA, IEEE 등)에서 DC시험 관련 내용을 개정하여야 한다고 하였다<sup>[3]</sup>.

Eager는 1997년 다시 0.1Hz 절연파괴전압과 ACBD전압 시험결과가 거의 유사함을 검증하였으며, DCBD는 ACBD 또는 VLF BD에 비하여 매우 높다고 하였다<sup>[4]</sup>. 열화된 XLPE 절연케이블에 0.1Hz 시험을 하여도 케이블의 열화를 촉진시키지 않는다고 하였다.

### 2.2 국제규격 제정 동향

XLPE 케이블에 대한 준공시험으로 DC시험을 하지 않는 대신 다른 시험방법들이 고안되었으며, 그 신뢰성을 인정받은 시험방법들이 기존 국제표준에 포함되거나 새롭게 제정되었다.

#### 2.2.1 유럽 CENELEC 규격

먼저 1996년 유럽 규격인 CENELEC HD 620 S1 : 1996에 AC내전압 시험에 대한 대안으로 0.1Hz AC 내전압시험이 포함되었다<sup>[5]</sup>. 이 시험기준에 의하면 AC 45~65Hz 상용주파수에서는 2U<sub>0</sub>의 전압을 절연체에 60분간 인가하여 절연파괴가 없어야 하며, AC 0.1Hz에서는 3U<sub>0</sub>의 전압을 절연체에 60분간 인가하여 절연파괴가 없어야 한다고 권고하고 있다.

**<표 2> CENELEC HD620 S1 권장 준공시험<sup>[5]</sup>**

	Test	Requirements	Test method
1.	Voltage test on insulation <sup>1) 2)</sup>		
1.1	a.c. test voltage 45 to 65 Hz - test voltage (rms) 2U <sub>0</sub> - test duration 60 min	no breakdown	
	alternatively:		
1.2	a.c. test voltage 0.1 Hz - test voltage (rms) 3U <sub>0</sub> - test duration 60 min	no breakdown	

### 2.2.2 IEEE Std. 400 Series

한편 미국의 IEEE에서는 2001년 전력케이블 절연체의 현장시험 및 평가 가이드(IEEE Std 400-2001)를 제정하였으며, 이후 세부 규격을 추가로 제정해 오고 있다. 먼저 2004년에는 현장의 전력케이블에 대한 VLF 절연 시험을 위한 시험방법 가이드(IEEE Std 400.2-2004)를 제정하였고, 2006년에는 현장의 전력케이블에 대한 부분방전 시험 가이드(IEEE Std 400.3-2006)를 제정하였으며, 2007년에는 적층절연(Laminated dielectric) 케이블에 적용할 수 있는 DC 내전압시험 가이드(IEEE Std 400.1-2007)를 별도로 제정하였다. 이러한 IEEE의 규격제정 과정은 XLPE 절연 케이블이 등장하면서 한계를 나타낸 DC 내전압시험을 적층절연 케이블에 한정하여 사용하도록 하고 다른 케이블에는 별도의 시험 방법을 제시함으로써 전력케이블에 종류에 따라 시험방법을 구분하여 적용하도록 정리한 것이다.

IEEE Std 400을 살펴보면 직류내전압시험(DC testing), 상용주파 내전압시험(Power frequency testing), 부분방전시험(PD testing), 초저주파 내전압시험(VLF testing), 유전손실계수시험(Dissipation factor testing), 진동파시험(Oscillating wave testing) 등에 대한 측정방법과 장비, 그리고 장단점이 설명되어 있다. DC 시험에 대한 설명을 살펴보면, DC가 인가되면 절연체의 기하구조와 도전성에 의하여 전계가 형성되는데, 케이블이 운전되는 AC에서는 절연체의 기하구조와 유전상수에 의하여 전계가 형성되는 차이가 있다. 또한 DC시험에서는 절연체의 도전성에 영향을 받고, 도전성은 온도의 영향을 받게된다. 반면 AC 시험에서는 절연체의 유전상수와 관련이 깊은데 유전상수는 온도에는 거의 무관한 상수이다. 그리고 AC 시험에서는 절연체의 공극이나 도전성 불순물과 관련된 결함에서 부분방전이 발생하게 되어 절연파괴로 이어지므로 결함검출이 쉽다.

한편 사용중 케이블에 대한 DC 시험의 위험성도 언급이 되어 있다. 열화된 케이블에 DC 시험을 하고 나서 재운전시 고장이 발생하는 경우가 많고, 절연체에 큰 결함이 있어도 검출되지 않는다고 하였다. 결국 DC 시험은 적층절연케이블에만 적합하다고 하였다.

IEEE Std 400.2에서는 VLF 전압을 사용한 시험에 대하여 집중적으로 설명하고 있다. VLF를 이용한 준공시험과 유지보수를 위한 유전손실계수 시험, 부분방전시험 등에 대하여 상세하게 설명하고 있으며 VLF 파형별로 케이블의 사용전압별로 권장 시험전압을 명시하였다.

〈표 3〉 IEEE Std 400.2 권장 사인파 VLF 내전압시험 전압<sup>[7]</sup>

Cable rating phase to phase	Installation phase to ground	Acceptance phase to ground	Maintenance phase to ground
rms in kV	rms or (peak)	rms or (peak)	rms or (peak)
5	9(13)	10(14)	7(10)
8	11(16)	13(18)	10(14)
15	18(25)	20(28)	16(22)
25	27(38)	31(44)	23(33)
35	39(55)	44(62)	33(47)

### 2.3 한전 전력연구원 연구결과

1998년 한전 전력연구원에서도 위와 같은 국제동향과 상용주파 AC 내전압시험 및 DC 전압시험의 문제점과 한계를 인식하고 국내 지중 배전케이블에 대한 준공시험 방법을 비교 연구하였다. 이때 비교대상 시험방법은 상용주파 AC 내전압시험, DC 내전압시험, 진동파전압시험, 0.1Hz VLF 내전압시험이었다.

당시의 연구결과 DC내전압시험에서는 표 4와 같이 시험전압을 8U<sub>0</sub>인 106kV까지 상승시켰으나 침결함과 칼흠집 결함에서 전혀 파괴되지 않는 결과가 나타남으로써 DC 내전압시험이 실효가 없음을 알 수 있다. 한편 장비의 무게 및 크기, 결함검출을 위한 시험전압의 크기 등에서 진동파 시험방법이 가장 우수하고, 다음이 VLF 내전압시험으로 결과가 나왔다. 진동파 시험과 VLF 시험 조건이 국의 연구사례와 국제규격에 있는 것과 다르지만 결과의 경향은 거의 일치하고 있다.

〈표 4〉 기준 결함에 대한 전력연구원의 각종 내전압시험 결과<sup>[7]</sup>

시험전압	60Hz AC	진동파	0.1Hz VLF	DC
시험조건	2U <sub>0</sub> 30분	4U <sub>0</sub> 50회	3U <sub>0</sub> 30분	시작 46 kV 최종 106 kV 스텝속도 10kV/10분
침결함 (파괴수/시료수)	5 / 5	5 / 5	7 / 10	0 / 5
칼흠집결함 (파괴수/시료수)	3 / 10	5 / 5	3 / 3	0 / 5

이러한 연구결과를 바탕으로 국내 전기설비기술기준 개정을 요청한 바 있으나 당시에는 상용화된 시험장비가 나오지 않아 적용하기 어려웠다. 그러나 많은 연구결과를 바탕으로 국제적으로 10여년에 걸친 시험장

비의 개발이 이어져 VLF 시험장비가 장비의 크기, 무게 등에서 많은 발전이 되고 후속 연구도 많이 진행되어 연구데이터가 축적됨으로써 국제규격으로 채택되었다. 이에 따라 한전에서는 2008년부터 진동파 전압시험(3U<sub>0</sub> 50회)과 VLF 내전압시험(3U<sub>0</sub> 60분)을 지중배전케이블의 준공 시험 기준으로 적용할 계획이며, 전기설비기술기준의 개정을 건의할 계획이다.

### 2.3 국내 시험기준 (전기설비기술기준의 판단기준)

국내 전기설비기술기준의 판단기준(표 5)에 따르면 지중배전선로에는 최대사용전압 25 kV의 0.92배인 23 kV 상용주파 AC 전압을 케이블의 도체와 중성선간에 10분간 인가하여 시험하거나, DC 시험의 경우 여기에 2배를 하여 46 kV를 10분간 인가하여야 한다. 그러나 앞에서 살펴본 바와 같이 전기설비기술기준에 따른 DC 내전압시험은 XLPE 절연체를 사용하는 국내 지중배전케이블의 준공시험방법으로서 실효성이 없다. 따라서 DC 내전압시험을 대체할 시험방법을 기준으로 정정해야 한다.

〈표 5〉 전기설비기술기준의 판단기준 제13조 2항(정정2007.1.17)<sup>[10]</sup>

전로의 종류	시험 전압
고압 및 특별고압의 전로(팔호 안 생략)는 표 13-1에서 정한 시험전압을 전로와 대지간(팔호 안 생략)에 연속하여 10분간 가하여 절연내력을 시험하였을 때에 이에 견디어야 한다. 다만, 전선에 케이블을 사용하는 교류 전로로서 표 13-1에서 정한 시험 전압의 2배의 직류 전압을 전로와 대지간(팔호 안 생략)에 연속하여 10분간 가하여 절연내력을 시험하였을 때에 견디는 것에 대하여는 그러하지 아니하다.	최대 사용전압의 0.92배의 전압
2. 최대 사용전압 7,000 V 초과 25,000 V 이하인 중성선 접지식 전로(중성선을 가지는 것으로서 그 중성선을 다중 접지하는 것에 한한다)	최대 사용전압의 0.92배의 전압
- 기타 생략 -	- 생략 -

### 3. 결 론

DC내전압시험은 시험장비가 작고 경제적인 이유로 상용주파 AC 내전압시험 대신 사용되어 왔으나 XLPE 절연 전력케이블에 있는 상당한 결함조차 검출하지 못하는 한계를 가지고 있다. 그리고 상용주파 AC 내전압시험은 시험장비가 크고 무거운 현장에 포설된 케이블의 준공시험으로 사용하기 어려운 한계를 가지고 있다. 또한 열화가 진행된 XLPE 케이블에 대한 DC 내전압시험은 케이블의 수명을 단축시키는 문제점도 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복하고자 여러 가지 대체 시험방법이 개발되었으며, VLF 내전압시험은 신뢰성을 인정받아 국제규격으로 제정되었다.

전기설비기술기준의 판단기준에 따라 XLPE 절연 전력케이블에 대한 준공시험으로 DC내전압시험은 조속히 폐기하고 국제기준을 참조하여 VLF 내전압시험을 대체시험으로 사용하도록 개정되어야 할 것이다.

VLF 내전압시험 방법은 국의 연구사례, CENELEC HD620 S1의 기준, 그리고 국내 연구결과를 바탕으로 3U<sub>0</sub>의 전압(국내의 경우 39.6 kV)을 60분간 인가하는 것이 적절할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] G.S. Eager, et al. "Effect of DC Testing Water Tree Deteriorated Cable and a Preliminary Evaluation of VLF as Alternate", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, 1992
- [2] W.A. Thue, "Let's Put Field Testing of Cable in Perspective", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 12, No. 5, 1996
- [3] B.H. Finke, "Recommendations in HV DC Testing of MV Cable Insulation", IEEE Industry Applications Magazine, 1997
- [4] G.S. Eager, et al. "High Voltage VLF Testing of Power Cables", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, 1997
- [5] CENELEC HD 620 S1-1996 Distribution Cables with Extruded Insulation for Rated Voltages from 3,6/6 (7,2) kV to 20,8/36 (42) kV-Volume 1: Parts 1 to 5
- [6] IEEE Std. 400-2001 IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems
- [7] IEEE Std. 400.2-2004 IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)
- [8] 구자운 외, "진동파 전압을 이용한 22.9kV CN/CV 전력케이블의 준공검사에 관한 연구", 전기학회논문지 47권 4호 1998
- [9] 송일근 외, "지중배전선로의 준공시험기술 및 접속계 진단기술 개발(최종보고서)", 전력연구원 연구보고서, 1998
- [10] 전기설비기술기준의 판단기준 제13조 2항(산업자원부 공고 제 2007-10호, 정정 2007.1.17)