

# 지중배전케이블 준공시험 관련 국제규격 동향과 국내기준 개선 방안

論 文

57-11-7

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

李 載 奉\* · 鄭 蓮 賀\* · 宋 一 根\* · 趙 誠 勳†

(Jae-Bong Lee · Yeon-Ha Jung · Il-Keun Song · Soung-Hoon Cho)

**Abstract** - XLPE insulated power cables are introduced in Korea in 1980s. The cable installation test has been carried out according to the Korean Technical Reference of Electrical Facilities. But recent research results shows DC Hipot test cannot detect the serious defects in XLPE insulated cables. VLF test is recommended as a installation test of XLPE insulated cables by CENELEC and IEEE standards in 1996 and 2001 respectively. We suggest to apply VLF test as an installation test for XLPE insulated MV cables in Korea.

**Key Words** : Cable, Installation Test, VLF, DC, 준공시험

### 1. 서 론

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

한편 전력케이블 준공시험 방법은 시험장비의 단순화가 가능한 DC 내전압시험이 PILC 케이블에 적합한 시험방법으로 그 신뢰성을 인정받으며 사용되었다. 그러나 DC 내전압 시험에서 XLPE 절연 전력케이블의 심각한 결함에도 케이블이 파괴되지 않아 상용전원 투입 후 곧바로 고장이 발생하고, 공간전하 형성으로 케이블의 수명이 단축되는 등 XLPE 절연 전력케이블의 시험방법으로 부적합하다는 사실이 알려지면서 DC 내전압시험을 대체하기 위하여 초저주파(VLF, Very Low Frequency), 진동파(OW, Oscillating Wave), 부분방전(PD, Partial Discharge), 유전손실(Dissipation Factor) 등을 활용한 시험방법들이 1990년대에 등장하였다.

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

국내에서는 이러한 국제 동향에 따라 1998년 전력연구원 이 지중배전케이블에 대한 준공시험 방법으로 DC내전압, 상

용주파 AC내전압, VLF내전압, 진동파시험 등을 평가하여 진동파 시험방법을 적용할 것을 제안한 바 있다. 그러나 당시에는 상용화된 시험장비가 개발되지 않아 현장에 적용하는 데에는 한계가 있었다.

최근 MV(Medium Voltage)급에서 상기 시험방법들을 적용한 다양한 시험장비가 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 국내 케이블 시공관련 고장 현황

지중배전케이블의 DC 내전압시험에 의한 준공시험은 국내에서도 효과가 없는 것으로 나타나고 있다.

케이블 시공 후 1년 내 고장발생 건수가 2003년부터 2008년까지 약 5년간 20건에 이르며, 이중 가압순간에 고장이 발생한 경우가 6건이나 된다. 또한 시공 후 5년 내 고장은 상기 1년 내 고장을 포함하여 44건에 이르고 있는 실정이다. 이러한 대부분의 고장에서 준공시험은 DC 내전압시험을 수행하거나, DC 내전압시험 대신 절연저항시험을 적용한 경우이고 이러한 준공시험에서 케이블결함, 시공결함을 검출해 내지 못한 것이다.

따라서 DC 내전압시험은 XLPE 절연 케이블의 결함과 시공 결함을 검출해 내지 못하는 것으로 추정되며, 효과적이고 단순한 케이블 준공시험을 선정하여 현장에 적용할 필요가 있다.

\* 正 會 員 : 한전전력연구원 배전연구소

† 稿 進 者 者, 正 會 員 : 한국전력공사 배전운영처

E-mail : soungmoon@kepco.co.kr

接 受 日 子 : 2008年 8月 19日

最 終 完 了 : 2008年 9月 30日

2.2 케이블 준공시험 방법

본 논문에 등장하는 시험방법에 대한 이해를 위하여 각 시험방법에 대하여 간단히 설명하고자 한다.

2.2.1 DC 내전압시험

DC 내전압시험은 규정된 직류전압을 절연체 양단의 도체에 일정시간 인가하여 절연체의 이상을 검출하는 시험방법이다. DC를 사용하므로 시험장비가 단순하고 가벼워서 현장에서 활용하기 쉬운 장점이 있다.

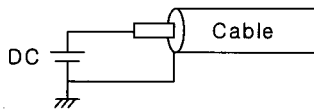


그림 1 DC 내전압시험 회로  
Fig. 1 DC Test Setup

2.2.2 상용주파 AC 내전압시험

상용주파 AC 내전압시험은 실제 계통에서 사용되는 50 Hz 또는 60 Hz의 주파수를 가진 전압을 시험대상에 인가하여 절연체의 이상을 검출하는 시험방법이다. 실제 케이블에 인가되는 전압과 동일하므로 실제와 다른 형태의 정압을 인가하는 다른 시험방법들에 비하여 특성의 차이에 대한 고려가 불필요하다. 그러나 시험전압을 높이기 위해서는 장비가 크고 무거워져 현장에서 활용하기 어렵다.

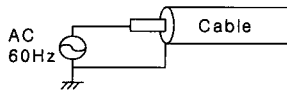


그림 2 상용주파 내전압시험  
Fig. 2 Power Frequency Test Setup

2.2.3 0.1 Hz VLF 내전압시험

VLF(Very Low Frequency) 내전압시험은 0.1 Hz의 초저주파 전압을 사용하여 내전압시험을 수행한다. VLF 전원은 DC 수준으로 시험장비의 무게가 가벼워 현장에서 활용하기 유리하고, AC 전압이므로 시험결과도 상용전원의 특성과 유사하거나 더 좋은 특성을 가지고 있다. AC와 DC의 장점만 결합된 시험방법이라고 볼 수 있다.

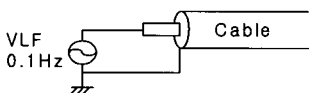


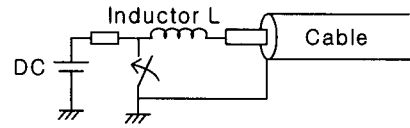
그림 3 VLF 내전압시험  
Fig. 3 VLF Test Setup

2.2.4 진동파(OW) 시험

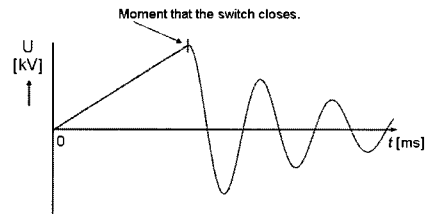
진동파시험은 케이블의 커패시턴스와 시험장치에 부착한 인덕턴스의 직렬공진현상을 이용한 시험방법이다. 그림과 같이 케이블과 인덕터를 직렬로 연결하고 DC 전원으로 충전한 다음 스위치를 닫으면 L-C 공진이 발생하여 주파수

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

인 진동파가 발생하고 케이블과 인덕터의 내부 저항에 의하여 감소된다. 이러한 진동파를 케이블에 수십 회 인가하여 케이블의 절연상태를 검증하는 시험이다.



(a) Test Circuit



(b) Wave Form

그림 4 진동파 시험 회로와 파형

Fig. 4 Oscillating Wave Test Setup and Wave Form

2.3 XLPE 절연 전력케이블에 대한 DC 내전압시험의 무효성 관련 연구동향

DC 내전압시험은 PILC 케이블에 대하여 100여 년 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.

표 1 인공결함을 가진 15kV 케이블의 절연파괴전압[1]

Table 1 Breakdown voltages of 15kV cables having artificial defects

Type of Imperfection (See Note)	Breakdown Voltage		Ratio
	DC, kV	0.1Hz, kV(RMS)	0.1Hz / DC
<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

Eager의 연구에서 XLPE 또는 EP 절연케이블의 동일 결함에 대하여 DC내전압시험전압이 AC내전압시험에 비하여 훨씬 높게 나타났으며, 칼자국, 바늘구멍 등 인공적인 결함이 있는 케이블에 대하여 0.1Hz 전압은 DC 전압에 비하여 1/5 ~ 1/2 수준에서 절연파괴가 된다고 하였다(표 1 참조)

조)[1]. 또한 DC 내전압시험은 수트리가 형성된 케이블을 더욱 열화시킨다고 하였다.

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

Finke는 EPRI의 연구결과를 인용하여 DC 내전압시험이 신폼케이블에 대해서는 수명을 단축시키는 영향이 없지만 현장에서 사용되어 열화된 케이블은 수명을 단축시키며, 특히 수트리 열화가 있는 케이블은 수트리의 성장을 증대시킨다고 하였다. 그리고 XLPE 케이블 관련 산업규격(AEIC, ICEA, IEEE 등)에서 DC시험 관련 내용을 개정하여야 한다고 하였다[3].

Eager는 1997년 다시 0.1Hz 절연파괴전압과 ACBD(AC Breakdown)전압 시험결과가 거의 유사함을 검증하였으며, DCBD(DC Breakdown) 전압은 ACBD 또는 VLF BD에 비하여 매우 높다고 하였다[4]. 열화된 XLPE 절연케이블에 0.1Hz 시험을 하여도 케이블의 열화를 촉진시키지 않는다고 하였다.

#### 2.4 국제규격 제정 동향

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

##### 2.4.1 유럽 CENELEC 규격

먼저 1996년 유럽 규격인 CENELEC HD 620 S1:1996에 AC내전압시험에 대한 대안으로 0.1Hz AC 내전압시험이 포함되었다[5]. 이 시험기준에 의하면 AC 45~65 Hz 상용주파 내전압시험에서는  $2U_0$ ( $U_0$ 는 실효치 상전압)의 전압을 절연체에 60분간 인가하여 절연파괴가 없어야 하며, AC 0.1 Hz 내전압시험에서는  $3U_0$ 를 60분간 인가하여 절연파괴가 없어야 한다고 권고하고 있다.

표 2 CENELEC HD620 S1의 케이블 준공시험[5]  
Table 2 Cable installation test of ENELEC HD620 S1

	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) $2U_0$ - test duration 60 min	no breakdown	
	alternatively:		
1.2	a.c. test voltage 0.1 Hz - test voltage (rms) $3U_0$ - test duration 60 min	no breakdown	

##### 2.4.2 IEEE Std. 400 Series

한편 미국 중심의 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 전원을 이용한 시험방법 가이드(IEEE Std 400.2-2004)를 가장 먼저 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 시험방법을 제시함으로써 전력케이블에 종류에 따라 시험방법을 구분하여 적용하도록 정리한 것이다.

표 4 IEEE Std 400 시리즈 - 전력케이블 현장시험 방법  
Table 4 IEEE Std 400 Series - Field testing of power cables

규격번호	제정년도	규격 분야
IEEE Std. 400	2001	Field Testing of Power Cables
IEEE Std. 400.1	2007	DC Test for Laminated Cables
IEEE Std. 400.2	2004	VLF Testing for Power Cables
IEEE Std. 400.3	2006	PD Testing for Power Cables
IEEE Std. 400.4	□□	DF(Dissipation Factor) Testing
IEEE Std. 400.5	□□	PF(Power Frequency) Testing
IEEE Std. 400.6	□□	OW(Oscillating Wave) Testing

IEEE에서는 전력케이블에 대한 현장 시험방법으로 앞으로 표 4와 같이 유전정점(Dissipation factor) 시험, 상용주파수(Power frequency) 내전압, 그리고 진동파(Oscillating wave)를 이용한 시험 등에 대하여 규격을 제정할 예정이다. 이러한 내용은 IEEE Std 576-2000에 언급되어 있다.[11]

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 받게 된다. 반면 AC 시험에서는 절연체의 유전상수와 관련이 깊는데 유전상수는 온도에는 거의 무관한 상수이다. 그리고 AC 시험에서는 절연체의 공극이나 도전성 불순물과 관련된 결함에서 부분방전이 발생하게 되어 절연파괴로 이어지므로 결함검출이 쉽다.

표 3 IEEE Std 400.2 사인파 VLF 내전압시험 전압[7]  
Table 3 Sine wave VLF test in IEEE Std 400.2

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)

한편 사용 중 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 DC시험은 적층절연케이블



고 국제기준을 참조하여 VLF 내전압시험 또는 진동과전압 시험을 대체시험으로 사용하도록 개정되어야 한다.

국내의 지중배전케이블 준공시험 방법은 국외 연구사례, CENELEC HD620 S1의 기준, 국내 연구결과, 그리고 VLF Tanδ 및 PD 시험의 가능성 등을 고려하여 3U<sub>0</sub>의 0.1Hz VLF 전압(국내의 경우 39.6 kV)을 30~60분간 인가하는 시험방법을 먼저 적용할 것을 제안한다.

**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] 구자윤 외, "진동과 전압을 이용한 22.9kV CN/CV 전력케이블의 준공검사에 관한 연구", 전기학회논문지 47 권 4호 1998
- [9] 송일근 외, "지중배전선로의 준공시험기술 및 접속재 진단기술 개발(최종보고서)", 전력연구원 연구보고서, 1998
- [10] 전기설비기술기준의 판단기준 제13조 2항(산업자원부 공고 제 2007-10호, 정정 2007.1.17)
- [11] IEEE Std. 576-2000 IEEE Recommended Practice for Installation, Termination, and Testing of Insulated Power Cables as Used in Industrial and Commercial Applications

**감사의 글**

본 논문은 2008년 7월 대한전기학회 제39회 하계학술대회에서 "지중배전케이블 준공시험 관련 국제규격 동향과 국내 기준개선 방안"으로 발표되어 좌장 추천 논문으로 선정되었음을 밝힙니다.

**저 자 소 개**



**이재봉 (李載奉)**

1971년 1월 17일생. 1993년 전남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1995년~현재 한전 전력연구원 근무.

Tel : 042-865-5914

Fax : 042-865-5904

E-mail : jbonglee@kepco.co.kr



**정연하 (鄭蓮賀)**

1980년 3월 6일생. 2004년 숭실대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 한전전력연구원 근무

Tel : 042-865-5917

Fax : 042-865-5904

E-mail : mywendy@kepco.co.kr



**송일근 (宋一根)**

1961년 3월 3일생. 1984년 숭실대학교 전기과 졸업, 1986년 숭실대학교 전기과 졸업(석사), 1997년 숭실대학교 전기공학과 졸업(공학박). 1995년~현재 한전전력연구원 근무

Tel : 042-865-5910

Fax : 042-865-5904

E-mail : songilg@kepco.co.kr



**조성훈 (趙誠勳)**

1962년 8월 5일생. 2004년 연세대학교 공과대학원 전기공학과 졸업(석사), 1990년~현재 한국전력공사 근무

Tel : 02-3456-4831

Fax : 02-3456-4899

E-mail : sounghoon@kepco.co.kr