

## 수도사업장 전력케이블 절연진단 신뢰성 고찰

함동령\*, 이은춘\*, 채지석\*, 이종석\*  
한국수자원공사\*

### A Study of Reliability for Insulation Diagnosis of Power Cable in Water Purification Plant

Dong-Young Ham\*, Eun-Chun Lee\*, Ji-Seog Chae\*, Jong-Seuk Yi\*, Jin-Seok Choi\*, Byoung-il Son\*  
K-water\*

**Abstract** - 산업설비 중, 전력케이블은 설치 이후 적게는 수년에서 많게는 수십년에 걸쳐 진단없이 계속 사용 중에 있다. 인입케이블 경우, 한국전기안전공사에서 주기적으로 사업장 정기검사 시에만 DC내전압 시험을 실시하고 있으며 그 외에는 장시간 사용에도 불구하고 상태점검을 정확히 못하고 있다.

본 연구에서는, DC내전압 시험 대신 현장에 적용되고 있는 VLF(Very Low Frequency) 진단방법에 대하여 수도사업장(취수장, 정수장 등)에서 사용 시, 진단방법 및 결과에 대한 신뢰성을 고찰하였다.

#### 1. 서 론

산업발전시기에 건설된 많은 전기설비의 교체시기가 도래하면서 수변 전설비의 전반적인 개·대체가 고려되는 시점이다. 현재, K-water에서는 발전 및 수도사업장에서 20년 이상 사용한 전력케이블에 대하여 정밀절연진단을 실시하고 있다. 케이블의 절연체 상태를 파악하고자 VLF 장비로 유전정점(TD) 및 부분방전(PD)을 측정하고 2013년 자체적으로 수립한 열화판정기준에 의하여 평가하고 있다. 이에, 발전 및 수도사업장 진단 시, 유독 수도사업장에서 PD를 측정하기 위한 Calibration이 여러 현장에서 어려운 상황을 확인하고 이에 대한 원인분석과 대응방안을 모색해 보고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 전력케이블 VLF 진단

G.S. Eagar는 1997년 연구에서, 0.1Hz에서 XLPE 절연체의 파괴전압이 60Hz에서의 파괴전압과 거의 일치하는 것을 확인하였다.[1] 이를 근거로 VLF 내전압시험이 60Hz 내전압시험을 대체할 수 있는 기초를 마련했고 2004년에는 북미 전기규격인 IEEE에서 준공시험으로 채택되었고 2012년에 우리나라 전기설비기술기준 판단기준 제13조 6항에 VLF 내전압시험이 추가되었다.

##### 2.1.1 VLF 진단 배경

DC 내전압시험은 고분자 절연체 케이블이 개발되기 전에 많이 사용되었던 PILC(Paper Insulated Lead Covered) 케이블의 절연상태를 시험하는 방법이었으며 지금까지 오랫동안 사용되고 있다. 종이와 절연유가 복합된 절연체는 절연상태가 DC 전압에 따라 누설전류와 파괴전압이 적절히 반응함으로써 절연상태를 파악하는 좋은 시험법이었다. 그러나 고분자절연체 전력케이블에서는 결합이 있어도 DC 내전압시험에서 잘 파괴되지 않았고 실제 운전이 시작된 후 고장이 발생함으로써 새로운 방법을 찾게 되었다. 0.1Hz VLF 전압은 DC의 1/2에서 1/5 수준의 낮은 전압에서 결합을 파괴하는 것을 확인하였다.[3]

##### 2.1.2 VLF 판정기준

〈표 1〉 VLF tan δ 판정기준 [x10<sup>-3</sup>]

1st 평가	TD (1.0U <sub>0</sub> )	DTD (1.5U <sub>0</sub> -0.5U <sub>0</sub> )	STDEV (1.0U <sub>0</sub> )	MaxDev (1.0U <sub>0</sub> )	2nd 평가
A (정상)	≤ 1.0	≤ 0.5			
B (관심)	≤ 2.0	≤ 1.2			
C (요주의)	≤ 6.0	≤ 6.0	≥ 0.10	≥ 0.30	D (이상)
D (이상)	≤ 10.0	≤ 12.0	≥ 0.20	≥ 0.60	E (불량)
E (불량)	≤ 27.0	≤ 60.0	≥ 0.70	≥ 2.20	F (임박)
F (임박)	> 27.0	> 60.0			
판정조건	OR		OR		
	AND				판정조건

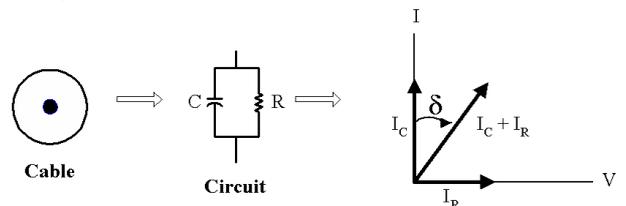
#### 〈표 2〉 VLF PD 판정기준

- VLF PD 시험전압 : VLF tanδ 측정 후 4개 전압 (1.0 - 1.25 - 1.5 - 1.75 U<sub>0</sub>)에서 측정
- VLF PD 판정기준 : 어느 전압에서든 500pC 초과시 tanδ 판정기준에 상관없이 고장 임박에 준하여 조치 (PD 발생시 큐어로 절연회복 불가)

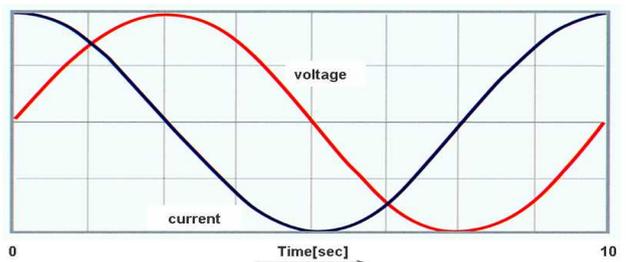
전력케이블 열화에 대한 VLF 시험은 유전정점(TD)과 부분방전(PD) 2가지로 진행된다. VLF TD 판정기준은 많은 연구 결과, 국제적으로 IEEE 표준이 2001년에 제정되었으며 2013년에 개정판이 발표되었다. 국내에서는 한전에서 현장에서의 시범진단과 연구개발을 통해 2009년에 판정기준을 만들고 2012년에 개정하였다. 또한, VLF PD는 2009년에 만들어 현재 사용 중이다. 이에, K-water에서는 2013년 자체 판정기준을 수립하였다. TD는 한전의 2012년(표 1), PD는 한전의 2009년(표 2) 기준을 준용하였다.[4],[5],[6]

#### 2.2 VLF TD 측정

VLF TD는 그림 1와 같이 유전손실각 δ의 정의로, 이에 대한 측정 방법에는 휘스톤브리지의 원리를 이용하여 직접 측정하는 방법과 그림 2와 같이 전압과 전류의 위상차로부터 측정하는 방법 등이 있다. 실험실 환경에서는 정밀한 고전압 AC 전원이 구비되어 있으므로 주로 휘스톤 브리지를 사용하여 측정하고, 현장의 측정에서는 고전압 AC 전원의 크기와 무게 때문에 사용하기가 곤란하므로 가볍고 DC의 영향이 없는 0.1Hz VLF 전원을 사용하며, 여기서는 전압과 전류의 위상차를 측정하는 방법을 사용하고 있다. 특히, 0.1Hz의 저주파를 사용하며 위상차를 정밀하게 측정하여야 하므로 VLF 전원의 품질이 매우 중요하다. 주변의 노이즈는 주로 전압 전류의 크기에 영향을 미치게 되므로 위상차의 변화에 미치는 영향은 미미한 수준으로 볼 수 있다. 즉, TD 측정법은 주변의 노이즈에 거의 영향을 받지 않는 진단방법이다.[7] 그 결과, TD 측정 시에는 수도사업장에서 노이즈에 의한 영향은 없다.



〈그림 1〉 유전손실각 δ의 정의

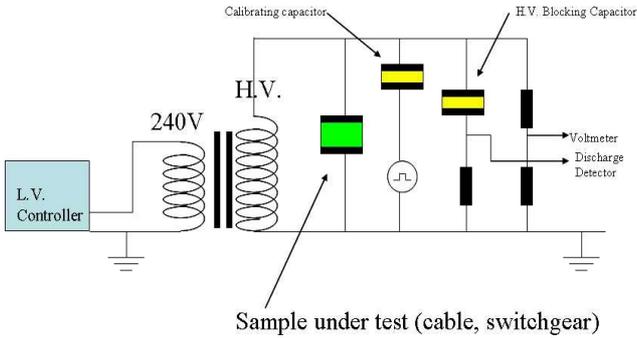


$$\text{Dissipation Factor } \tan \delta = \frac{\text{true power}}{\text{reactive power}} = \frac{U^2 / R}{U^2 \omega C} = \frac{1}{\omega C R}$$

〈그림 2〉 Tan δ의 정의 및 측정

### 2.3 VLF PD 측정

PD가 없는 또는 고조와 성분이 없는 양질의 고전압을 시료에 인가하고 coupling capacitor를 통하여 부분방전 신호를 포착하는 방법을 사용한다. PD 신호는 매우 미약하므로(수 pC) 고전압원의 전기 품질이 매우 중요하고 외부에서 노이즈가 유입되지 않도록 하는 것이 중요하다.[7]



〈그림 3〉 부분방전 측정방법

#### 2.3.1 수도사업장 VLF PD 문제점

K-water의 여러 수도사업장(정수장, 취수장)에서 VLF를 적용한 결과, 한전 배전선로나 K-water의 발전사업장과 달리 VLF PD 측정 시, 많은 노이즈로 인하여 Calibration을 찾지 못하고 PD 판정 기준치인 500pC를 크게 상회하는 5,000pC 이상의 값에서 주로 Calibration을 할 수 있었다.

#### 2.3.2 전원단 노이즈

수도사업장에서 노이즈에 의한 영향으로 그림 4에서와 같이 5,000pC로 Calibrator에서 신호를 주어야 Calibration이 가능하였다. 이에, 수도사업장에 많은 정류기들과 전동기 운전용 인버터 등에 의한 영향으로 전원단으로 들어오는 노이즈를 고려하였다. 이에, 그림 4와 같이 VLF 진단장비의 전원단 앞에 NCT(Noise Cut TR)를 설치하여 전원단 품질을 향상시켰다.



〈그림 4〉 Calibration(5,000pC) 및 전원단 NCT 연결

그럼에도 불구하고, 노이즈는 줄지 않았고 Calibration에 영향을 주지 못 하였다. 이에, 그림 5의 왼쪽에 필터에서 전원으로 연결하는 케이블을 오른쪽 그림과 같이 제거한 후 Calibrator 신호를 주니 500pC에서도 Calibration이 가능했다. 즉, VLF 장비의 전원케이블이 측정대상인 전력케이블에 연결되면 전력케이블로부터 노이즈를 받아서 Calibration을 하기 어려운 상황을 확인하였다.



〈그림 5〉 PD 케이블 결선 및 전원선 제거 사진

#### 2.3.3 전력케이블 노이즈

수도사업장의 전력케이블은 전기실에서 각 공정의 건물동으로 간선이

이동한다. 이때, 공동구의 케이블 덕트를 타고 이동하는데, 덕트의 공간이 비좁고 전력케이블 수는 많아서 그림 6의 사진과 같이 많은 전력케이블들이 얽혀있는 상황이다.



〈그림 6〉 공동구 케이블 덕트

이로 인하여, 전력케이블 간에 유도현상에 의한 노이즈로 PD 측정 시, 500pC 이하의 양호한 상태를 만들 수가 없게 된다. VLF 장비가 주로 사용되는 한전 배전선로는 전력케이블 상간 및 타회선간 이격거리를 두어 유도현상을 최소화하는데 반해, 수도사업장들은 현실적으로 전력케이블간 차폐를 하기 어렵다.

### 2.4 전력케이블 측정 시, 고려사항

전력케이블에서 TD의 경우, 주변의 노이즈는 주로 전압 전류의 크기에 영향을 미치게 되므로 위상차의 변화에 미치는 영향은 미미한 수준으로, 수도사업장에서 정확한 측정이 가능하다.

이에 반해, PD의 경우는 기존에 설치된 전력케이블들 간에 간섭으로 인해 노이즈를 줄일 수 있는 상황이 아니다. 이에, 최소한의 Calibrator 신호로 Calibration을 한 후, PD를 측정하여 주변의 노이즈 이상의 부분방전량만 측정해야 하는 현실이다. 이는 물론, 500pC 이하의 판정기준에 부합하지는 않지만, PD량이 큰 값은 확인할 수 있는 방법이다.

이에 더하여, 수도사업장에서는 절대적인 값을 기준으로 하는 OFF-Line PD 측정값과 더불어 정상시의 상태보다 증가하는 패턴을 감지하여 경고를 알려주는 ON-Line PD 설치를 검토하여야 한다.

### 3. 결 론

전력케이블에 대한 진단방법은 DC내전압 시험에서 AC 0.1Hz VLF 시험으로 대체되고 있는 상황이다. 이에, 수도사업장에서 20년 이상된 케이블을 진단 시, 유전정점(TD)와 부분방전(PD)에 대한 문제점을 고찰하였다. TD는 노이즈와 무관한데 반해, PD는 노이즈에 민감하여 정확한 측정을 위해서는 노이즈를 줄여야 한다. 하지만, 수도사업장 공동구 케이블 덕트에 얽혀 설치되어 있는 많은 전력케이블들은 서로간에 간섭을 발생하여 많은 노이즈를 발생하고 있다. 이에, 현장마다 최소한의 Calibrator 신호로 Calibration을 실시한 후, PD를 측정해야 하며 향후, ON-Line PD를 설치하여 지속적인 PD량 변화를 관찰하여 전력케이블 관리를 하는 방안도 검토하여야 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] G.S. Eager, C. Katz, B. Fryszczyn, J. Densley, B.S. Bernstein, High Voltage VLF Testing of Power Cables, IEEE, 1997
- [2] G.S. Eager, B. Fryszczyn, C. Katz, H.A. Elbadaly, A.R. Jean, Effect of D.C. Testing Water Tree Deteriorated Cable and a Preliminary Evaluation of V.L.F. as Alternate, IEEE, 1991
- [3] 김성민, 이재봉, 지중케이블 열화·진단 개론, 한국전력공사 배전운영처, 2010.11
- [4] IEEE Std. 400-2001 IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems
- [5] 지중배전케이블 최적 열화진단기술 선정 및 운영방안에 관한 연구 (최종보고서), 한국전력공사전력연구원, 2009.09
- [6] 전력케이블 열화판정 알고리즘 제시 및 판정기준 적정성 검토(최종보고서), K-water연구원, 2013.11
- [7] BAUR, BAUR TD, PD Diagnosis Guidelines, BAUR, 2012