



# VLF 지중케이블 신 판정기준 개발 및 Global Standard 확보



김동섭  
KEPCO 배전운영처 배전운영팀장

## 1. 개 황

우리나라를 포함한 세계 주요국가의 전력설비는 이미 포화상태에 이르렀다. 향후 전력정책의 Focus 는 과거 시장경제의 성장을 위한 신속한 대규모 설비 확충에서 기 구축된 설비의 효율을 극대화하기 위한 유지보수 기법, 즉 수명의 종점까지 운영하여 설비투

자비의 가치를 최대화할 수 있는 경제성 기반의 운영 정책에 초점이 맞춰지고 있다.

세계적으로 전력분야의 화두가 되고 있는 Smart Grid 역시 설비의 현 상태(Operational Status)에 대한 정확한 판정을 전력 Grid 구성의 전제조건으로 하는 바 와 같이 경제적 설비의 운용을 위해서는 설비의 진단, 즉 보다 정확한 설비의 수명예측이 전제된다.



[그림 1] 차량설치형 VLF 진단 및 Portable VLF 진단(해저케이블)

진단을 통한 효율적 설비운영은 진단이력, 진단수치를 포함한 진단 Data의 관리 및 운영체계에 기반을 둔다. 또한 Data의 운영체제는 전력설비의 상태를 Index화 할 수 있는 ▲진단기법과 이론적 타당성 ▲누적된 Data를 집약적으로 Index화 할 수 있는 통계기법 ▲진단결과에 따른 설비의 수명예측 추론기법 등을 총체적으로 고려하여 수립하여야 한다.

## 2. 진단기법의 선정

KEPCO는 2010년 지중 전력케이블 진단기법으로 VLF Tan  $\delta$ 를 선정하여 운영하기 시작하였다. 기존에 수년간 운영하던 등온완화전류 측정법(IRC, Iso-thermal Relaxation Current)을 마감하고 새로운 진단기법으로 과감하게 선회한 이유 중 하나는 설비 상태를 진단하는 주체에 대한 전환의 필요성 때문이다. 기존의 진단장비는 케이블의 특정 인자를 측정하고 스스로 상태를 판정해서 알려주는 의미 그대로의 진단 장비인 반면 VLF tan  $\delta$ 는 엄밀히 따지면 케이블의 유전손실을 측정하는 계측장비로 분류되고, 측정된 유전손실량과 손실유형으로 케이블의 상태를 진단하는 몫은 사람에게로 돌아간다.

이러한 진단체계는 실무자로 하여금 진단업무의 관심도를 고조시킬 수 있으며, Data를 이해하고 케

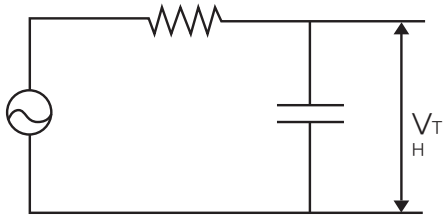
이블의 열화현상을 분석하는 기술력 축적을 유도하게 되었다. KEPCO에서 선정한 VLF tan  $\delta$  기법을 간략히 소개하면 다음과 같다.

tan  $\delta$ 는 유전정접, Dielectric Dissipation Factor 또는 탄델타로 통칭되며 케이블 절연체의 정전용량의 변화를 측정하는 방식이다. 케이블은 구조상 Cylindrical Capacitor로 분류할 수 있기 때문에 tan $\delta$ 의 산출식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

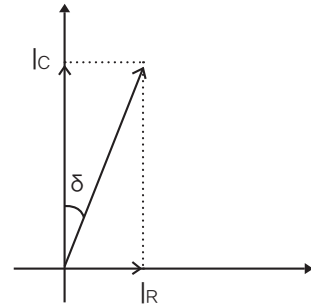
$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\text{true power}}{\text{reactive power}} = \frac{V^2/R}{V^2 \omega C} = \frac{1}{\omega CR}$$

$I_R$ 은 케이블 내 인가전압에 따른 실부하 이며  $I_C$ 는 정전용량에 따른 충전부하를 뜻한다. 즉, 저항과 콘덴서가 연결된 회로에 전원이 인가되었을 때 복소평면 상 x축에 실부하 전류값, y축에 용량성 허부하 전류값이 표현되면 이에 대한 tangent값을 tan $\delta$ 로 한다.

실제 이러한 식이 VLF tan $\delta$  측정 장비에서 어떠한 방식으로 적용되는지 살펴볼 필요가 있다. Ideal한 케이블의 경우 심선에 전원을 인가하게 되면 이상적인 심선 도체부는 무저항이기 때문에 결국 용량성 저항성분만 남게되므로  $V = (R + \frac{1}{j\omega C}) \times I$ 에서  $R=0$ 이며, 결국  $V = \frac{1}{j\omega C} \times I = -j \frac{1}{\omega C} \times I$ 가 된다. 케이블에 전원을 인가하게 되면 케이블이라는 부하로 인해 전압보다 위상이



(a) 케이블 등가회로



(b) VLF 전원에 대한 복소평면

[그림 2] 케이블 시험전압에 대한 등가회로와 복소평면

90° 앞서는 진상전류가 발생하게 된다. 그러나 실제의 케이블에 있어서 특히, 수트리와 같은 열화가 진전된 케이블의 경우 R성분이 존재하게 된다. 결국 케이블은 R과 C가 혼합된 저항성분을 갖게 되며 그림 2 (b)와 같이 R에 의한 실부하 전류 IR, C에 의한 허부하 전류 IC가 발생하기 때문에 전압과의 위상차는 90°가 아닌 IC와 IR의 벡터 합에 따른 위상차만큼 변하게 된다. tanδ의 측정값이 상대적으로 크다는 것은 모수인 IR 값이 커짐을 의미한다. 이상적인 경우 IR 값은 0이 되겠지만 실제 케이블은 동저항, 반도전층의 계면저항 등 여러 가지 요인에 의해 IR ≠ 0이 된다. 따라서 tanδ 측정값은 케이블의 수트리 뿐만 아니라 도체와 절연체 사이의 모든 상태를 반영한다고 볼 수 있다. 그 중 수트리의 영향이 가장 지대하므로 이 진단법은 케이블 수트리 진단수단으로 사용하는 것이 적합하다고 볼 수 있다.

### 3. 진단결과 Data Base

2011년에 취득한 데이터는 3,621,833m(7,863구간)의 케이블을 VLF로 측정된 결과값으로 IEEE

Std. 400-2001의 판정기준을 변형시킨 KEPCO 자체 판정기준을 수립하여 이를 준용하였다. 이때 IEEE에서 제시한 판정인자는 TD와 DTD 2개의 인자를 적용하였으며, 판정결과는 ‘Good(양호)’, ‘Aged (요주의)’, ‘Highly Degraded(불량)’의 3등급으로 구분한다. IEEE의 기준과 KEPCO 자체기준의 차이는 시험전압의 크기와 각 등급을 분할하는 TD, DTD 인자의 기준수치로 표 1과 2에 비교하였다.

국내의 케이블을 대상으로 VLF 측정 후 측정수치에 따른 케이블 시료를 분석한 선행연구 결과 시험전압을 2U<sub>0</sub>에서 1U<sub>0</sub>로 낮추어도 동일한 경향을 나타냈다. 불량으로 판정된 케이블의 잔여 내전압 내력을 비교하였을 경우, 시험전압을 낮춤에 따라 판정수치 또한 일정부분 낮게 조정해야할 필요성을 나타내었다. 따라서 2010년 표 2와 같이 새로운 판정기준을 제시하였다.

이에 따라 2011년도 VLF 측정 DB는 표 2의 판정 기준을 따른 1.0U<sub>0</sub>의 TD와 1.5U<sub>0</sub> - 0.5U<sub>0</sub> DTD의 수치로 구성되어 있다. 이후 2011년 IEEE Std 400 Draft 11에서 TD, DTD의 시험전압을 KEPCO의 시

[표 1] IEEE 400-2001 판정기준

Tanδ at 2U <sub>0</sub>	Differential of Tan δ tan δ 2U <sub>0</sub> - tan δ U <sub>0</sub>	Assessment
Less than 1.2 × 10 <sup>-3</sup>	Less than 0.6 × 10 <sup>-3</sup>	Good
Greater than or = 1.2 × 10 <sup>-3</sup>	Greater than or = 0.6 × 10 <sup>-3</sup>	Aged
Greater than or = 2.2 × 10 <sup>-3</sup>	Greater than or = 1.0 × 10 <sup>-3</sup>	Highly degraded

[표 2] KEPCO 판정기준(2010년)

Tanδ at 1U <sub>0</sub>	Differential of Tan δ tan δ 1.5U <sub>0</sub> - tan δ 0.5U <sub>0</sub>	Assessment
Less than 1.0 × 10 <sup>-3</sup>	Less than 0.5 × 10 <sup>-3</sup>	Good
Greater than or = 1.0 × 10 <sup>-3</sup>	Greater than or = 0.5 × 10 <sup>-3</sup>	Aged
Greater than or = 2.0 × 10 <sup>-3</sup>	Greater than or = 1.0 × 10 <sup>-3</sup>	Seriously Aged

[표 3] PE계열 절연체 케이블 판정기준

Condition Assessment	VLF-TD Time Stability at U <sub>0</sub>		VLF-DTD 1.5U <sub>0</sub> - 0.5U <sub>0</sub>		Mean VLF-TD at U <sub>0</sub>
No Action Required	< 0.1	and	< 5	and	< 4
Further Study Advised	0.1 ≤, ≤ 0.5	or	5 ≤, ≤ 80	or	4 ≤, ≤ 50
Action Required	> 0.5	or	> 80	or	> 50

험전압과 동일한 1.0U<sub>0</sub>의 TD와 1.5U<sub>0</sub> - 0.5U<sub>0</sub> DTD로 개정을 제시하였으며, TD와 DTD 외 VLF 시험전압에 대한 시간안정도를 나타내는 TDTS(TD Time Stability)를 새로운 측정인자로 제시하였다.

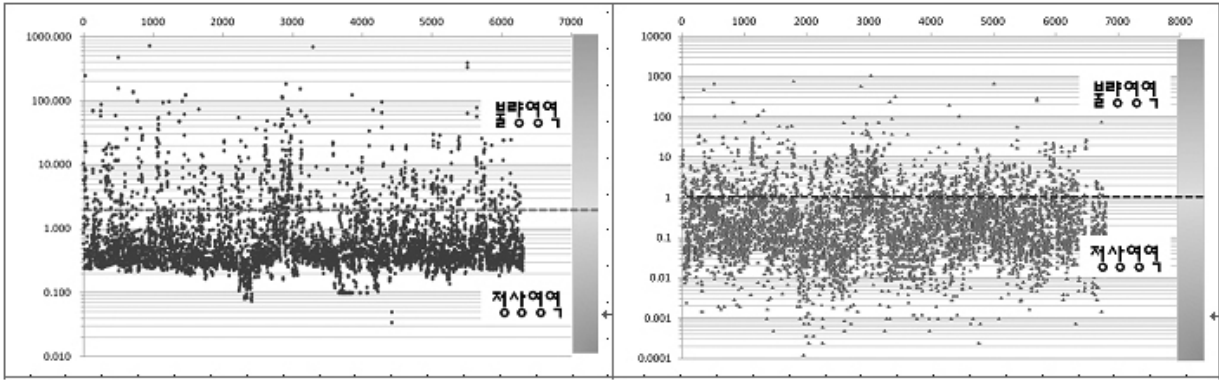
이에 따라, KEPCO는 2012년부터 TD, DTD와 더불어 TDTS의 항목을 추가하여 측정 Data를 확보하였으며, 2011년 측정 Data의 일부분에 대해서 TDTS의 측정값을 추가로 확보하였다.

#### 4. 진단 Data의 통계분석과 표준화

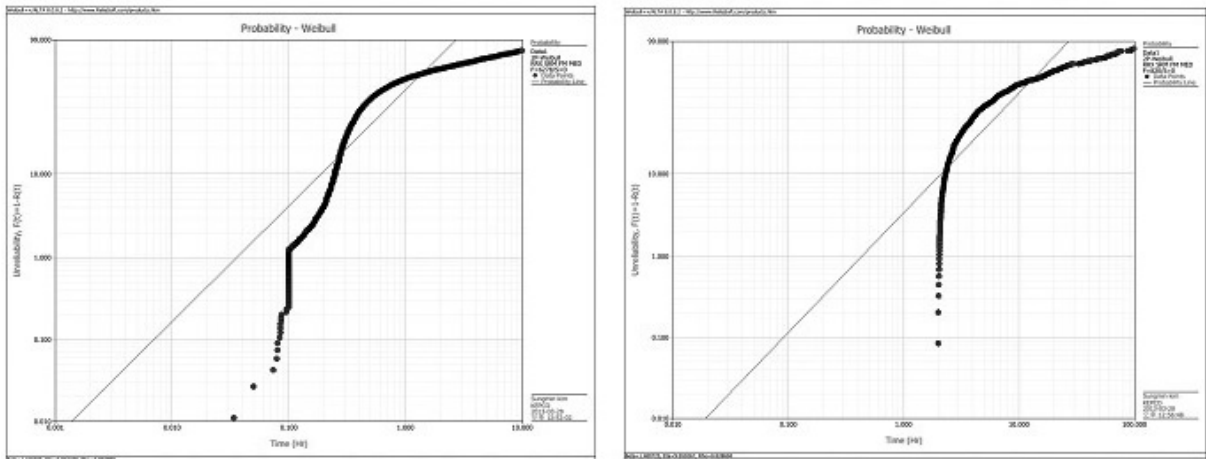
VLF tan δ 측정수치 해석이 난해한 이유는 데이터가 분산형이며, 수치의 편차가 크다는 점에 기인한다. 취득한 데이터를 Log Scale로 펼쳤을 때 그림 3과 같이 0.001에서 1,000에 이르는 광범위한 스케일 내에서 데이터 점들이 분산되어 있는 것을 볼 수 있다.

정규성이 없이 때문에 정규분포를 따르지도 않는





[그림 3] VLF TD at 1.0U0(좌), VLF DTD(우)



[그림 4] 전제 DB의 와이블분포( $\beta = 1.5$ )(좌), 2.0 이상의 와이블 분포( $\beta = 1.4$ )(우)

이러한 데이터의 성향을 분석하기에 가장 적절한 통계함수로 와이블분포를 언급할 수 있다. 와이블분포(Weibull Distribution)는 기기 등의 수명을 예측하는 분포함수로 경년에 따라 측정값을 달리하는 VLF  $\tan \delta$ 와 맥락을 같이 하기 때문이다.

VLF  $\tan \delta$  데이터를 와이블로 분포시킨 결과 그림 4와 같은 분포도를 확인할 수 있었다. 그림 4의 분포에서 보이듯이 Data는 3개의 변곡점을 나타내며 4개

의 영역으로 분류가 가능하다. 이때 '불량'영역에 해당하는  $\tan \delta > 2.0 \times 10^{-3}$ 의 Data를 재분포 시키면 그림 4와 같이 또 다른 변곡점을 나타내며 2개의 영역으로 재분류된다.

결국  $\tan \delta$ 는 5개의 영역으로 분류시킬 수 있다는 논리를 가질 수 있게 된다. 이때 실제 절연파괴가 발생하는 Data를 확인함으로써 와이블분포의 신뢰성을 확인할 수 있는데 KEPCO의 경우 누적신뢰도가 98%

수준에 해당한다. 상기의 와이블분포를 토대로 KEPCO에 적합한 VLF  $\tan \delta$  판정기준을 재정립한 결과 4개의 측정인자로 구성된 6단계의 상태판정 Criteria를 도출할 수 있었으며, 이는 기존의 판정기준과는 큰 차이를 보인다. 이후 1년 간의 검증단계를 거친 결과 케이블 고장이 29% 감소되었으며, 기존 판정기준 대비 새로운 판정기준 적용에 따라 140억 원 수준의 케이블 교체 투자비를 절감하게 되었다.

이와 같은 일련의 Data 분석과 현장 검증을 거치는 과정에서 상태판정 시스템은 설비의 환경에 따라 탄력적으로 운영되어야 하며, 북미 지중설비를 기반으로 한 국제규격은 국내의 환경에 부합하지 못하다는 결론에 이르게 된다. KEPCO의 진단분야에서 보인 높은 추진력과 이를 바탕으로 축적된 진단 Skill과 운영 Know-How는 현재 국제시장에서 주목을 받고 있으며, 진단분야의 Reference로 인용되고 있다. 