

지중송전 XLPE케이블 활선상태 PD 측정기술 향상을 위한 가이드라인 제시

박진우, 최경규, 이진선
한국전력공사 전력연구원, LS전선

Guideline for Field Partial Discharge measurement of Underground Transmission Level XLPE Cable

Jin-Woo Park, Kyung-Kyu Choi, Joen-Seon Lee
Korea Electric Power Corporation / LS Cable Ltd.

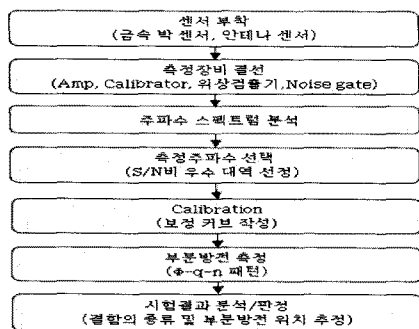
Abstract - 국내 지중송전선로는 주로 XLPE케이블과 OF케이블로 구성된다. 1971년 154kV급 OF 케이블이 최초로 한전에 의해 상용운전에 들어간 후 XLPE 케이블 지중선로가 1983년부터 병용운전 되고 있으며 OF케이블의 경우 절연유의 사용으로 인한 화재의 위험과 환경오염 문제 등으로 인하여 점진적으로 XLPE케이블로 대체되는 추세에 있다. 하지만 내전압 시험, 절연저항이나 누설전류 측정, tanδ 측정 등으로 진단이 가능했던 OF케이블과는 달리 XLPE케이블의 경우 종래의 시험을 통한 진단은 한계가 있고 부분방전을 통한 진단이 가장 효율적인 진단방법으로 제시되어 국내외 XLPE케이블의 진단을 위해 운영되고 있으며 보다 정확한 PD측정을 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 지난 10년여 간의 국내외 연구결과 XLPE케이블에 대한 PD 측정기술의 정확성은 상당히 향상되었고 그 결과물로서 수많은 측정 장비와 기법이 개발되어 오늘날 널리 보급되고 있다. 하지만 여전히 측정된 Data에 대한 해석은 일부 전문가들에게조차 복잡하고 어려운 일로 남아 있다. 자칫 그릇된 해석은 향후 큰 사고로 이어질 수 있으므로 선로 운영자의 입장에서는 측정결과와 신뢰성에 민감할 수밖에 없다.

1. 서 론

현재 국내 지중송전선로 PD측정에 대한 해석은 측정용역업체들이 제공하는 측정보고서에 전적으로 의존하고 있는 실정이지만 정작 이들 보고서에는 그들이 사용하는 측정기법 및 장비에 대한 상세설명 없이 일반적인 원리나 절차에 대해서만 설명하고 있고 상세 Data나 결과에 대한 근거 없이 단순히 측정구간에 대한 PD의 존재여부만 알려주는 경우가 대부분이다. 이러한 결과보고서만으로는 선로 운영자가 측정Data를 정확히 이해하고 그 결과에 대해서 믿음을 가지기 어려우며, 또한 상당히 위험하고 큰 손실을 불러올 수도 있는 도 있다. 본 논문에서는 지중송전 XLPE케이블 PD 측정Data에 대한 해석에 있어서 영향을 미칠 수 있는 요소들을 살펴보고 이를 통해 측정신뢰도를 향상시킬 수 있는 방안을 찾아보고 나아가 PD측정기술 향상을 위해 나아가야할 방향을 제시하고자 한다.

2. 본 론

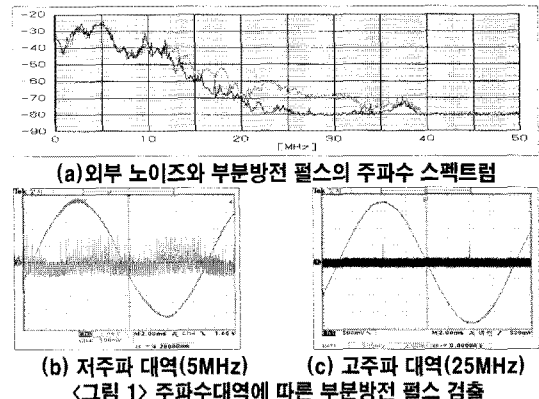
2.1 국내 PD 측정기술



<그림 1> PD 측정절차

2.1.1 HFPD 검출법

국내 지중송전 XLPE케이블의 Field PD 측정에는 주로 고주파 부분방전(HFPD) 검출법이 주로 사용되고 있다. 차폐실이나 실험실과는 달리 송전선로 현장은 심한 외부 노이즈에 노출되어 있고 따라서 수백 kHz 대역에 주로 분포하는 이런 외부노이즈에 의한 간섭을 피하기 위하여 수~수백 MHz 대역의 주파수에서 측정하는 것이 효과적이다.

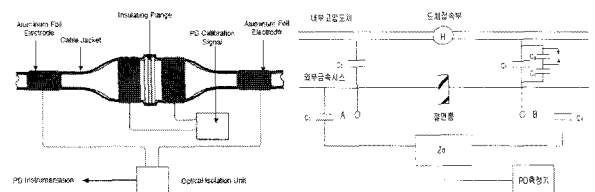


<그림 1> 주파수대역에 따른 부분방전 펄스 검출

<그림 1>은 그 예를 잘 보여주고 있다. (a)에서 외부노이즈(빨간색)의 경우 주로 25MHz이하의 주파수 대역에 분포하는 반면 PD신호(녹색)는 40MHz까지 보다 넓은 대역에 분포하고 있다. 측정주파수에 따른 부분방전 검출결과인 (b)와 (c)를 비교해보면 5MHz대역에서의 측정결과에 비해 25MHz대역에서의 측정결과가 부분방전 펄스를 확실히 구분시켜 줌을 알 수 있다.

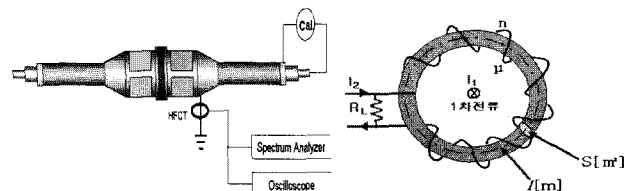
2.1.2 금속 박센서와 HFCT 센서

국내에서는 활선상태 및 별도의 센서가 취부되어 있지 않은 기설선로에서도 측정이 가능한 외부착센서를 이용해서 PD를 측정하고 있으며 그 중에서도 금속박센서와 HFCT센서가 주로 활용되고 있다. 두 센서 모두 설치가 간단하고 기존선로의 전기적, 기계적 성능에 영향을 미치지 않는다는 장점이 있다.



<그림 2> 금속박센서 설치와 등가회로

금속 박센서를 활용한 측정원리는 <그림2>와 같이 절연통을 중심으로 케이블 한쪽에서 PD가 발생할 경우 나머지 한쪽의 커패시턴스 성분이 커플링 커패시턴스로 작용하여 양 측에 설치된 금속 박센서에 접속된 측정임피던스를 통하여 PD신호를 검출해내는 방식이다. HFCT를 이용한 측정법은 철도를 통해 흐르는 PD신호의 고주파 성분을 <그림3>과 같이 협대역 고주파 필터를 이용하여 검출해 내는 방식이다.



<그림 3> HFCT센서 설치와 CT의 구조

2.2 PD측정에 영향을 주는 요소

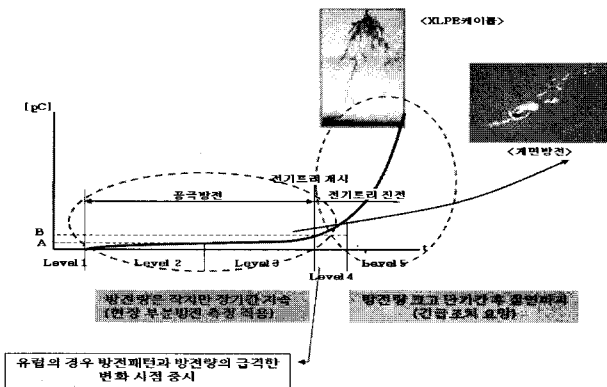
PD 측정을 통해서 얻을 수 있는 Data는 PD신호의 주파수 대역, PD 방전펄스의 위상, 방전 횟수, 방전펄스 크기 및 발생 주기 등이고, 이들 Data에 대한 해석을 통해 케이블 내부의 PD의 존재여부를 결정짓게 된다. 만일 PD의 존재가 의심되는 경우 PD신호 발생위치를 찾기 위한 측정을 추가적으로 시행하게 된다. <표 1>에 PD신호의 특성에 대해 설명되어 있다. 이들 각각의 Data는 결합의 종류나 위치, 케이블 절연체의 종류, 인가전압 및 측정시의 부하나 측정시간대와 같은 선로 운전상태 그리고 케이블의 온도 등과 같은 요소의 영향을 받게 된다.

<표 1> PD신호의 5가지 특성

주파수	부분방전 시 발생하는 주파수 패턴이 여러 주파수 대역에서 검출됨.
위상	2 신호 사이의 위상차가 180° 인가
방전횟수	10~30pps 이상의 펄스수 가지는가?
부분방전량	노이즈와 구분되어 방전펄스 발생
방전 발생시간	규격적이지 않다.

2.2.1 결합의 종류 및 위치

케이블 및 접속함 내에서 발생하는 PD는 방전을 일으키는 결합의 종류에 따라 PD발생 후 수 시간 내에 절연파괴로 이어질 수도 있다. 따라서 결합의 종류를 판단하고, 결합의 위치를 찾아내는 것은 선로 운영과 케이블 및 접속함의 교체시기를 결정짓는 매우 중요한 일이다. 케이블이나 접속함 내부에서 PD를 발생시키는 결합은 절연체 내부 혹은 절연체와 반도체층 사이의 공극이나 보이드, 스크래치, 접속함 내 케이블과 악세서리 경제면에 존재하는 공극, 돌기, 보이드 등으로 인해 진전된 전기트리 등이 있으며 이들 결합은 케이블의 생산, 보관 및 운송과정이나 접속함 설치과정에서 우연히 생길 수 있고 또한 운전 중에 전기적, 기계적 혹은 열적 스트레스나 주변 환경 등의 요인에 의해서 생겨날 수도 있다. 이들 각각의 결합에 의해 발생된 PD 측정Data는 과거의 유사 측정결과 혹은 모의실험을 통한 측정결과와 비교함으로써 결합의 종류가 판단되고 이후 PD신호의 전송시간을 활용하여 발생위치를 추정하게 된다. PD가 발생한다고 하더라도 결합의 종류에 따라 선로 운영자의 대응은 달라지는데 이는 XLPE케이블 절연체 내부의 전기트리에 의해 발생하는 수 pC의 PD는 즉각적인 점검 및 교체를 필요로 하지만 계면에서 나타나는 PD는 수천 pC정도 일지라도 절연파괴에 도달하기까지는 수개월이 걸릴 수도 있기 때문이다. <그림 4> 참조.



<그림 4> PD의 종류 및 성장

2.2.2 운전상태

케이블의 운전상태 역시 측정결과에 큰 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 PD를 발생시키는 전기적 스트레스는 운전전압 혹은 개폐시나 낙뢰시의 과도전압에 의해 발생한다. 과도전압의 크기 및 발생 빈도는 시스템의 구성이나 지질학적인 지형에 따라 달라진다. 따라서 적절한 과도전압 차단 시스템이나 접지설계는 케이블에 영향을 주는 전기적 스트레스를 감소시켜 PD발생 가능성을 감소시킨다. 선로의 부하도 PD측정결과에 영향을 미칠 수 있는 요소가 될 수 있다. 만일 XLPE케이블이 적정수준 이상의 온도에서 운전되고 있었을 경우 절연체의 기계적, 구조적 변형을 불러올 수 있고 이는 곧 PD 결합 생성의 원인이 될 수 있으며 그 정도에 따라 방전크기도 달라진다.

2.3 PD 측정결과와 신뢰성을 향상시키기 위한 방안

2.3.1 선로에 대한 정확한 정보제공

PD 측정 결과에 대한 신뢰성을 높이고 또한 보다 정확한 PD측정을 위해서는 지중송전선로 운영자에 의해서 선로에 대한 정확하고 상세한 정보가 사전에 측정자에게 제공되어야 할 필요가 있다. 케이블 직경, 길이,

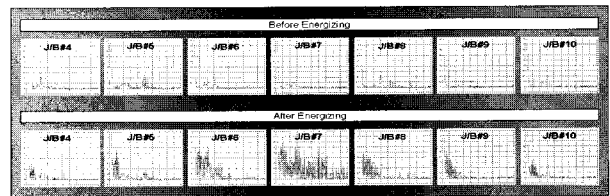
상시 운전전압 및 부하량, 접지의 종류, 준공일차, 운영 및 사고이력, 접속함의 위치 및 종류 등과 같은 측정대상 케이블 특성에 대한 정보는 측정 신뢰도를 향상 시킬 수 있는 좋은 자료가 된다.

2.3.2 사전회의

본격적인 PD측정에 들어가기 전 선로 운영자와 측정자간의 사전회의가 필요하다. 회의를 통해 양측은 선로의 상태와 그에 따른 적절한 측정기법을 논의하고 해당 선로에 대한 과거의 측정결과가 있을 경우 이를 검토해 볼 필요도 있다. 또한 측정시간 및 측정개소에 대해 협의하고 측정자는 선로 운영자로부터 최종승인을 구한 후 측정을 실시해야 한다. 이 과정에서 측정과정에서 발생할 수 있는 안전사고에 대해 예방교육을 실시하고 측정 장비 및 선로에 대한 상태를 다시 확인해볼 수도 있다.

2.3.3 사전시험 및 Calibration

본격적인 PD측정을 하기 전에 측정에 사용할 장비를 활용한 사전시험을 통해 장비의 상태 및 선로의 특성을 이해하는 것도 측정결과와 정확도를 높이는 데 도움이 될 수 있다. Calibration을 통해 측정센서의 감도를 확인하고 또한 <그림5>에서 보이는 것처럼 케이블을 따라 진행되는 PD신호의 감쇄특성 등을 사전에 파악하여 측정을 위한 최적의 개소를 찾아낼 수 있다.



<그림 5> PD신호의 진행에 따른 신호의 감쇄

2.3.4 PD 측정 DB 구축 및 Law Data의 활용

향후 지속적인 신뢰성 향상을 위해 현재 시행되고 있는 실선로 PD측정을 통해 취득한 Data를 활용한 DB를 구축하고 부분방전 패턴에 대한 Raw데이터를 지속적으로 축적 관리할 필요가 있다. 부분방전 패턴인식은 Raw데이터가 많을수록 신뢰성 있는 패턴 판단이 가능해진다. 그리고 새로운 분석법이 제안/개발 되더라도 기존의 Raw데이터를 이용하여 실선로에 대한 신뢰성 검증의 시간 절약과 더불어 다양한 응용이 가능해진다. 또한 수많은 결합원인에 대한 부분방전 패턴 데이터를 활용하여 부분방전특성에 대한 연구를 활성화 시킬 수도 있다.

3. 결론 및 향후 진행방향

최근 10년여 간의 국내외 연구결과 XLPE케이블에 대한 PD 측정기술은 상당히 발달했고 그 결과 수많은 측정 장비와 기법이 개발되어 오늘날 널리 활용되고 있다. 그럼에도 불구하고 여전히 측정된 Data를 분석하여 PD존재 여부 및 결합의 종류를 판단하는 일은 일부 전문가들에게조차 복잡하고 어려운 일로 남아 있다. 여기에는 물론 기술적인 제약도 있을 수 있지만 기존의 Data를 좀더 활용하지 못하고 PD측정자와 선로 운영자간의 정보교환이 부족한 탓도 있다. PD 측정에 대한 연구를 함에 있어서 가장 아쉬운 점은 서로가 가진 정보를 독점하려고 하는 경향이 너무 강하다는 것이다. 이는 기술향상을 위한 걸림돌이자 전 세계적으로 볼 때 상당한 경제적, 문화적, 과학적 손실이라고 볼 수 있다. 여전히 PD측정기술은 미완의 기술이며 개선되어야 할 수많은 문제점들을 안고 있다. 과거의 PD측정 용역업체들에 의한 일방적인 측정 및 보고를 벗어나 서로 정보를 공유하고 협력한다면 보다 신뢰성있는 케이블 진단으로 국내의 안정적인 전력공급에 기여할 뿐만 아니라 PD측정기술을 세계적인 수준으로 향상시킬 수 있는 토대를 마련할 수 있을 것이다. 보다 거시적인 관점에서 세계유수의 연구기관 및 PD측정 장비 제작업체, 측정 서비스 업체, 전력회사 등이 자신들의 Know-How를 공유하고 측정기술 향상을 위해 협력한다면 그동안의 연구를 통해 제시된 문제점을 획기적으로 해결할 수 있는 수준 높은 장비와 신뢰성 있는 해석프로그램을 개발할 수 있을 것이라고 본다.

[참고 문헌]

[1] C-19W Working Group, "IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment", IEEE Std 400.3, 2007,
 [2] S. Eckroad T. Zhao , "Field Partial Discharge Measurements on Extruded Dielectric Transmission Cable Systems", EPRI, 1013791, 2008.
 [3] 서울전력관리처, "지중 송전선로 부분방전 측정기술 신뢰도 향상 기술", 한국전력공사, '06제05-34호, 2007