

실선로 측정 PD 패턴 분석을 통한 154kV 지중송전선로 절연열화 측정

박진우*, 박준우*, 문경희*, 박흥석*, 최경규*, 한상옥**
한국전력공사*, 충남대학교**

**Assessment of Insulation system for 154kV Underground Transmission Line
By Analysing PD Pattern**

Jin-Woo Park*, Jun-Woo Park*, Kyung-Hee Mun*, Hung-Sok Park*, Kyung-Kyu Choi*, Sang-Ok Han**
KEPCO*, ChungNam Nat'l Univ**

Abstract - 오늘날 국내 지중선로는 주로 XLPE케이블과 OF케이블로 구성된다. 기존 사용되던 OF케이블의 화재 위험성 및 환경오염 문제 등으로 인해 XLPE케이블의 비중이 점차 높아지고 있지만 XLPE케이블의 경우 운전 중 케이블의 열화나 절연진단 등이 쉽지 않은 점이 문제로 제기되고 있다. 그러나 XLPE케이블에 대한 PD측정은 현재로서는 가장 유용한 케이블 진단기법으로 알려져 있으며 그 활용성과 신뢰성을 높이기 위한 연구가 국내외적으로 계속되고 있는 실정이다. 본 논문에서는 실제 운전 중인 154kV 지중송전선로에 대해 PD측정을 수행하고 그 결과로 취득된 Pattern의 분석을 통해 선로내부에서 PD가 발생하고 있는지 판별하는 과정을 소개하였다.

1. 서 론

XLPE케이블은 OF케이블과 함께 국내 지중송전선로의 대부분을 차지하고 있으며 1983년에 최초로 포설되어 운전에 들어간 이후 가공송전이 곤란한 도심지역 등의 전력공급에 중요한 역할을 하고 있다. 최근에 들어서는 OF케이블의 절연유로 인한 화재 위험성과 환경오염 문제로 인해 XLPE케이블의 비중이 더욱 증가하고 있는 추세지만 내전압 시험, 절연저항이나 누설전류 측정, tanδ측정 등으로 진단이 가능했던 OF케이블과는 달리 XLPE케이블은 종래의 시험을 통한 진단은 한계가 있다는 점이 단점으로 지적되어 왔다. XLPE케이블 지중송전선로의 가장 대표적인 진단기법으로는 케이블 내부의 결함에 의해 발생하는 Partial Discharge(이하 PD)를 측정하는 방법이 현재로서는 가장 효과적인 진단 방법으로 제시되어 실선로 진단에 널리 활용되고 있으며 그 정확성과 신뢰성을 향상시키기 위한 연구가 국내외에서 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 하지만 아무리 측정기기의 성능이 우수하고 센싱기술이 향상된다고 하더라도 측정결과에 대한 최종적인 판단은 여전히 전문가의 몫으로 남아있으며 부정확한 판단은 향후 불필요한 인적, 물적 낭비나 돌이킬 수 없는 큰 사고를 불러올 수 있다는 점에서 과거의 이력 및 다수의 경험이 PD측정에 있어 매우 중요하게 고려되고 있다. 본 논문에서는 운전 중인 154kV XLPE 지중송전선로에서 PD측정을 통해 검출된 신호가 PD에 의한 신호인지를 밝혀내는 과정을 담고자 한다.

2. 본 론

2.1 케이블 내부결함에 의한 PD의 특성

XLPE케이블 지중선로에서의 절연과피를 일으키는 주요결함으로는 케이블 제작 시 발생된 반도전층의 돌기나 왜곡, 엠버, 절연체 내의 도전성/절연성 이물 등이 있을 수 있으며, 여러 개의 부품이 조립된 중단 접속함이나 중간 접속함의 경우 부품간의 계면에 존재하는 도전성/절연성 이물이나 보이드, 스크래치 등의 계면결함 또한 주요 고장의 원인으로 보고되고 있다. 이러한 결함은 오랜 시간에 걸친 열적, 기계적, 전기적 스트레스로 인해 절연체 내에서 PD를 일으키게 되는데 XLPE케이블 지중송전선로에서 발생하는 PD는 다음과 같은 특징을 가진다.

2.1.1 수 nsec의 매우 짧은 전류펄스

일반적으로 케이블 절연층의 전기트리나 보이드에서 발생한 PD 전류 펄스는 350psec~수 nsec 정도의 상승시간과 수 nsec 정도의 펄스 지속 시간을 가지며 이러한 펄스에 대해 Fourier 분석을 하게되면 수백 MHz까지의 주파수 대역을 갖게 된다. 이러한 특성은 화이트노이즈의 영향을 덜 받는 수십~수백MHz 대역에서 PD측정을 하는 기법인 HFPD 측정을 가능하게 해주어 노이즈저감 및 측정감도 향상 등에 이용될 수 있다.

2.1.2 Travelling Wave

케이블 내부에서 발생하는 PD 전류 펄스는 발생지점으로부터 선로 양측으로 케이블을 타고 전송되게 되는데 XLPE케이블의 고주파 감쇄 특성으로 인해 PD측정지점이 발생지점으로부터 멀어질수록 측정감도는

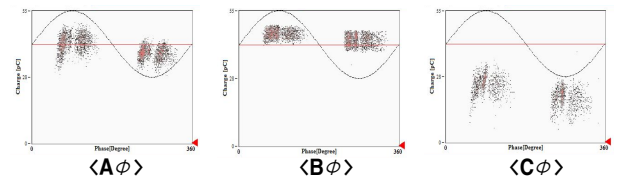
떨어질 수밖에 없다. 하지만 이러한 단점은 접속부위나 중단 근처에서 측정된 부분방전의 원인을 케이블 시스템의 액세스리에 의한 것으로 한정할 수 있다는 점에서 짧은 길이에서의 측정시 장점으로 작용할 수도 있다.

2.1.3 PD펄스 발생의 불규칙성

케이블 및 접속함 내부 결함에 의해 발생하는 PD는 온도, 압력, 결함의 크기, 형태 등에 따라서 발생 위상, 방전횟수, 방전횟수 등이 변하는 불규칙성을 지니며 때론 결함에 의해서 발생되던 PD가 일시적으로 멈춘 뒤 시간이 지나서 다시 발생하기도 한다. 이러한 이유로 짧은 시간동안의 PD측정은 정확한 케이블 진단에 효과적이지 못하며 지속적이고 반복적인 측정이 요구된다.

2.2 실선로 측정 PD패턴 분석

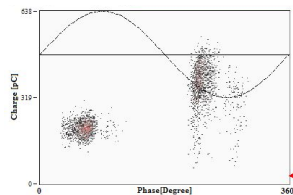
본 논문에서 논의될 실선로는 154kV XLPE케이블 지중송전선로이며 측정개소는 변전소 내 EBG접속함으로 2001년 6월 준공된 선로이다. 측정대상선로에서 처음 PD로 의심되는 펄스가 검출된 때는 2008년 12월로써 당시 측정된 PRPD(Phase Resolved Partial Discharge) 패턴은 <그림 1>과 같은 형태를 띠고 있었다.



<그림 1> 1차 측정시 PRPD 패턴

방전크기는 B상에서 가장 크게 나타났으며 세 상에서 유사한 패턴을 지닌 것으로 보였다. 이처럼 방전 크기가 일정한 패턴은 주로 Gas중에서 발생하는 PD 또는 외부 노이즈로써 케이블 내부에서 발생하는 PD는 아닌 것으로 판단되었으나 보다 정확한 진단을 위해 추후 재측정을 시행할 필요가 있을 것으로 생각되었다.

2차 측정은 1차 측정 후 4개월 후 시행되었다. 1차 측정시 가장 큰 방전크기 보이던 B상에서 2차 측정시 나타난 PRPD패턴은 <그림2>와 같다.

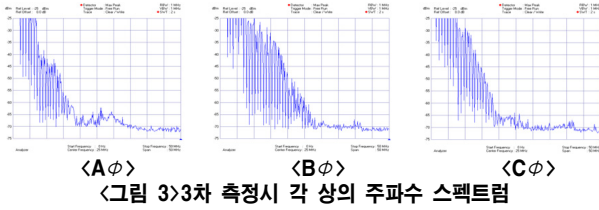


<그림 2> 2차 측정시 B상의 PRPD 패턴

1차 측정 때와 비교할 때 3상에서 여전히 유사한 패턴이 발생함을 확인할 수 있었고 B상에서 가장 큰 방전크기 보였다. 하지만 1차 측정 때와는 달리 패턴의 형태가 Gas중 방전이라고 단정하기 어려운 형태의 패턴을 보이고 있었으며 방전크기 또한 1차 측정시에 비해 상당히 커진 상태였다. 2차 측정 후 측정된 신호의 패턴이 불분명해짐에 따라 보다 정확한 펄스 분석을 위해 15일 후 다음의 세가지 기법을 이용하여 3차 측정을 시행하였다.

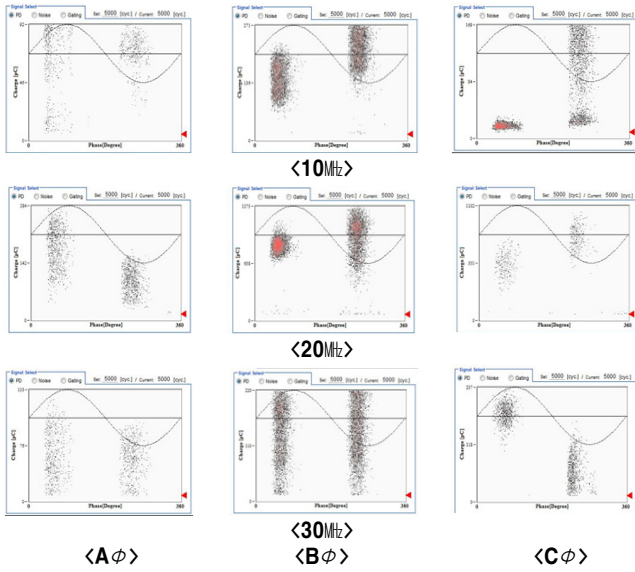
2.2.1 주파수 스펙트럼 및 PRPD 패턴 분석

HFCT 센서와 Spectrum Analyzer를 이용하여 해당선로의 주파수 스펙트럼을 분석한 결과는 <그림 3>과 같았다. 화이트노이즈이외의 원인이 불분명한 펄스에 의한 주파수 성분을 3상 모두 나타내고 있었으며 특히 B상에서는 25MHz대역까지의 주파수 성분이 검출되었다.



<그림 3> 3차 측정시 각 상의 주파수 스펙트럼

각 상의 주파수 대역별 PRPD패턴은 아래 그림과 같다.

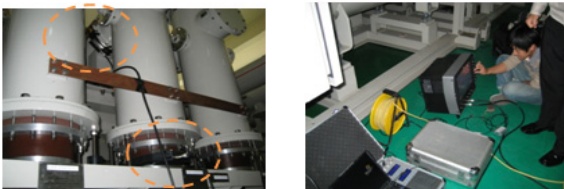


<그림 4> 주파수 대역별 각 상의 PRPD패턴

주파수 대역별 각 상의 PRPD패턴을 살펴보면 2차 때와 비슷한 방전 크기를 보이고 있으며 10~30MHz대역내에서 모두 유사한 형태의 PRPD패턴을 나타내고 있었다. 또한 동일한 위상 내에 모든 방전 펄스가 분포하고 있으며 방전크기 또한 대체적으로 일정하게 나타나고 있다는 점에서 고체절연물에 의해 발생하는 전형적인 PD패턴과는 상이한 형태를 보이고 있으며 3차 측정시 측정된 펄스의 발생원인이 1,2차 측정시 측정된 펄스의 발생원인과 동일하다고 가정할 때 측정된 미지의 펄스를 발생시키는 원인은 XLPE케이블 내부에 존재하는 결함은 아닌 것으로 판단되었다.

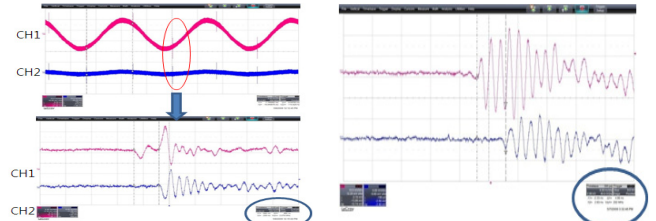
2.2.2 Oscilloscope를 이용한 펄스 분석

측정개소가 변전소내 EBG인 점을 감안할 때 만약 측정된 펄스가 PD에 의한 전류펄스라면 그 원인은 측정지점에서 가까운 EBG 내부 액세서리 혹은 EBG와 가까운 지점의 GIS에서 발생될 것이라 판단되어 아래 사진과 같이 GIS PD 측정용 UHF센서를 EBG접속함과 GIS에 각각 부착하여 그 출력을 Oscilloscope로 분석하고자 하였다.



<그림 5> UHF센서 부착 및 Oscilloscope 분석

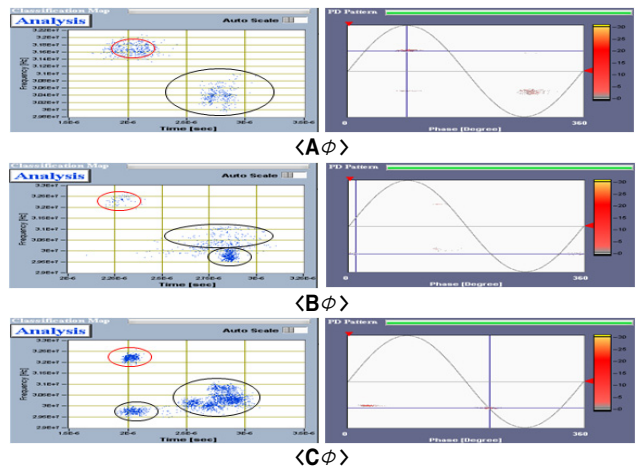
분석결과 해당 펄스는 정확히 한 주기에 2개씩(정극성 1, 부극성 1) 발생하고 있었으며 상승시간 또한 200ns 정도로 PD펄스와는 분명 다른 특성을 보이고 있었다.



<그림 6> 측정된 펄스(좌)와 GIS에서 나타나는 전형적인 PD펄스(우)

2.2.3 T-F Mapping을 통한 패턴 분석

T-F Mapping은 측정된 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하고 트리거 레벨을 이용해서 각각의 부분방전 개별 펄스에 대하여 시간과 주파수에 대하여 신호 분석을 하여 노이즈 신호와 부분방전 신호를 구분하는 S/W적인 노이즈 제거방법이다. 해당 선로에서 측정된 신호를 T/F Mapping한 결과 각 상에서 발생하는 펄스는 둘 혹은 세 개의 펄스 발생원인을 가지는 것으로 나타났으며 이들 각각의 원인별로 다시 PRPD 패턴 분석을 한 결과 <그림 7>과 같이 PD에 의한 PRPD패턴은 나타나지 않았다.



<그림 7> 측정된 펄스들 대한 T/F Mapping

3. 결 론

이상으로 지중송전선로에서 발생하는 PD의 특성에 대해서 알아보고 그 특성을 바탕으로 원인이 불분명한 펄스형태의 신호가 검출된 154kV XLPE케이블 지중송전선로에 대해 3차에 걸친 PRPD패턴 및 스펙트럼 분석과 Oscilloscope 및 T-F Map을 이용하여 미지의 신호에 대한 특성 및 원인분석을 시행하였다. 그 결과 첫째, 측정 시기별로 PRPD패턴의 형태에 있어 약간씩의 차이가 있긴 하지만 매번 측정되는 신호의 발생원인이 동일하다고 가정할 경우 측정된 PRPD패턴은 케이블 내부결함에 의한 PD패턴은 아닌 것으로 판단되며, 둘째, UHF센서와 Oscilloscope를 이용한 펄스 분석 결과 PD의 일반적인 특성보다 훨씬 긴 Rising Time을 가진 채 매 주기당 정확히 2개의 펄스만이 검출된다는 점에서 PD 전류 펄스와는 구별되는 특성을 보이고 있었다. 마지막으로 T/F Map을 이용해 측정된 펄스들을 발생원인별로 분리하고 분리된 펄스들에 대해 각각 PRPD패턴 분석을 시행한 결과 각각의 패턴들은 전형적인 Noise에 의해 생성되는 패턴의 형태를 나타내었다. 이상의 결과를 종합해볼 때 측정된 신호는 케이블 시스템 내부 혹은 EBG 나 GIS 내부 결함에 의한 PD펄스는 아닌 것으로 판단되며 외부에서 지속적으로 유입되는 수~수십MHz 주파수 대역의 노이즈에 의한 신호인 것으로 추정된다. 하지만 PD의 발생이 규칙적이지 않다는 PD의 특성을 감안할 때 3차에 걸친 측정 시 검출된 펄스가 동일한 원인에 의한 것이 아닐 수도 있다는 점에서 향후 해당선로에 대한 지속적인 관찰과 반복측정이 필요할 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

[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] 전력연구원, "송전케이블의 절연열화 진단기법의 정립 및 수명예측에 관한 연구", '99전력연-단762, p115, 1999
 [3] 서울전력관리처, "지중 송전선로 부분방전 측정기술 신뢰도 향상 기술", '06제05-34호, 2007