

절연파괴 원인규명을 위한 Pre-breakdown PD 검출기술 개발

김충식\*, 김영홍\*  
LS전선\*

Development of Pre-breakdown Partial Discharge Detection Method for Explanation of the Cause of EHV XLPE Cable Joint Breakdown

Choongsik Kim\*, Younghong Kim\*  
LS Cable Ltd.\*

**Abstract** - 케이블의 원가절감을 위해 절연체의 절연두께를 줄이거나 초초고압화가 되어 갈수록 절연성능의 신뢰성 향상이 한층 요구되고 있다. 이를 위해 케이블 및 접속함의 절연체 내에 각종 결함이 어느 정도 절연성능을 떨어뜨리는지 정량적으로 파악하여 개선할 필요가 있다. 또한 완제품 내 잔존하고 있는 이물의 종류 및 위치를 알 수 있으면 생산공정 내에서 이물 유입 경로를 파악하여 이물이 유입되는 것을 차단할 수 있다.

AC내전압 파괴시험을 수행할 때 설계치 보다 저전계에서 파괴될 경우 파괴공을 조사하여 원인을 규명하고자 하지만 국부적인 결함으로 인한 파괴는 결함부를 소실시키기 때문에 파괴공 및 주위의 절연체를 현미경으로 관찰하여도 찾기가 어렵다. 따라서, 전원을 고속으로 차단하여 결함부가 완전히 소손되는 것을 막고 PD발생 위치를 추정하여 결함을 확인하는 방법이 요구 되어진다. 이러한 시험 방법을 전구차단법이라고 하며, 고도의 PD측정기술과 판정기술이 필요한 종합적인 기술이다. 본 논문에서는 PPD 기술의 핵심인 노이즈 제거 기술과 판별기술을 서술하고 실제 접속함(PMJ)에 적용하여 PPD 기술의 유효함을 증명하였다.

1. 서 론

계통의 초초고압화와 더불어 선로의 고신뢰성이 요구되면서 케이블 및 접속함의 결함 관리 중요성이 높아지고 있다. 초고압 제품의 생산과정 중 청정도 관리를 제대로 하지 못하였거나 작업자의 실수 등으로 이물이 유입되었을 경우 절연성능을 저하시켜 선로사고를 일으킬 수 있다. 이러한 이물의 유입으로 발생한 결함은 절연파괴 후 결함주위가 크게 소손되므로 결함원인을 찾을 수가 없다. 만일, 파괴 전 결함원인을 찾을 수 있다면 생산공정에서 발생하는 불량을 개선하여 초고압 품질을 월등히 향상시킬 수 있을 것이다.

PPD법은 전구차단법이라고도 하며 6mm, 11mm 절연두께 모델 케이블의 이물 종류에 따른 파괴 전계 강도 및 파괴 메커니즘 규명을 위해 최초로 개발 되었다. 이 기술에 앞서 파괴 시 최대한 짧은 시간 이내 인가된 전압을 차단시키는 고속차단법, 절함에 주입되는 속류 및 돌입 에너지를 감소시켜 결함의 손실을 줄이는 소손억제법이 개발되었으나 XLPE케이블에 걸리는 높은 전압과 대전류로 인해 기술 적용의 한계가 드러나자 이를 극복하고자 절연파괴 전 차단을 목적으로 결함의 트리진 전 시 발생하는 부분방전을 검출하여 전원을 차단하는 PPD법을 개발하였다. Fig. 1의 (a)는 절연파괴 시 파괴공이며, (b)는 PPD법을 적용해 측정된 절연파괴 형상이다.



(a)Before PPD application (b) After PPD application  
〈Fig. 1〉 Breakdown images by treeing

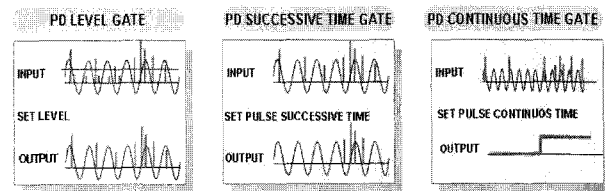
2.1 PPD법(전구차단법)

케이블 또는 PMJ에 결함이 있는 경우, 전기트리가 발생하고, 계속 진전되면 절연파괴에 이르게 된다. 이때 파괴 전 현상인 전기트리 발생에 수반되는 부분방전 펄스를 검출하여, 파괴 직전 단계에서의 전원 차단을 통해 결함의 소실을 방지하는 방법이 PPD법(전구차단법)이다.

시스템은 전원 차단을 결정하는 파괴 전 부분방전 판별, 높은 인가전압으로 인해 외부에서 발생하는 국부적 방전 또는 잡음으로 인한 부분방전 판별부의 오작동 방지를 위한 노이즈 제거, 결함의 위치를 추정하는 부분으로 구성된다.

2.1.1 파괴 전 부분방전 판별조건

측정된 부분방전 펄스는 다음과 같은 판별조건으로 Pre-breakdown PD가 검출된다. 한 사이클에 Threshold level 이상의 크기를 가지는 펄스가 설정된 Successive time내 한개 이상 측정되는 경우가 Continuous time 이상 유지될 때 PPD 판별장치는 릴레이 신호를 내보내 전원을 차단시킨다(Fig. 2).



〈Fig. 2〉 Conditions to distinguish Pre-breakdown PD

2.2 PPD Method를 적용한 PMJ 결함검출

본 연구에서는 PMJ의 파괴 전 결함을 확보를 통해 제조 공정 중 결함 발생원을 제거함으로써 불량 발생률 감소를 목적으로 PPD법을 154kV PMJ 내전압 시험에 적용하기 위한 시스템을 구성하였다.

2.2.1 실험구성

PMJ의 내부에서 결함으로 인해 발생하는 부분방전을 측정하기 위해 박센극을 사용하였고[1-6], 외부 노이즈는 5m 길이의 안테나 5개를 사용하여 측정된 신호를 Mixer를 통해 단일 출력으로 변환하였다. 노이즈 게이팅 장비에서 출력된 PD신호는 PPD 판별장치를 통해 파괴 전 부분방전 판별을 하였다. 발생되는 릴레이 신호는 600kV 내압기의 컨트롤 단자에 입력하여 전원을 차단하도록 하였다.

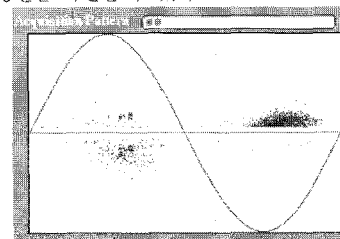
2.2.2 노이즈 제거

고전압 인가로 인해 시험장 주변의 금속 구조물 또는 다른 시료에서 발생하는 코로나 및 기타 노이즈가 부분방전 측정용 박센서를 통해 유입되는 것을 근본적으로 막을 수 없는 차폐되지 않은 환경이기 때문에 유입되는 노이즈 제거를 위한 방법으로 주변 금속 구조물에 대한 접지와 노이즈 게이팅 장비를 이용하였다[1-3].

주변 노이즈 측정을 위해 안테나들을 설치하고 여기에서 측정된 신호들은 Mixer를 사용하여 하나의 출력으로 바꾼 후 노이즈 게이팅 장비에 입력하였다. 시료에 캘리브레이터를 연결한 후 가압을 하여 캘리브레이션 신호와 외부에서 발생된 코로나와 기타 노이즈 신호를 측정하였다. 박센서에 주입된 캘리브레이션 신호와 코로나 신호 중 노이즈 게이팅을 통해 노이즈만 제거되었다.

2.2.3 부분방전 측정(결함 형태 위치 및 PRPD)

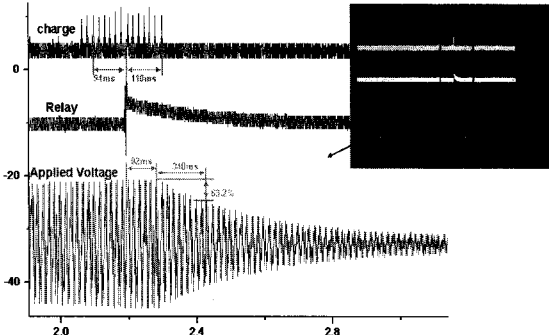
사용된 PMJ는 반도체층과 절연층 계면에 길이 10mm, 두께 1~2mm가량의 알루미늄 호일을 감아서 제작하였다. 이를 Fig. 3과 같이 PRPD 패턴을 통해 부분방전을 확인할 수 있다.



〈Fig. 3〉 PRPD pattern from PMJ including artificial defect

### 2.2.4 차단속도

과과 전 부분방전 판별부터 전원이 차단되어 부분방전이 소멸되기까지의 시간을 측정하였다. 이를 위해 구성된 PPD 시스템의 판별장치 PD출력과 릴레이 차단신호, 600kV 내압기의 분압 신호를 동시에 측정하였다. Threshold level - 20pC, Continuous time - 50ms의 경우 Fig. 4처럼 PPD 판정신호 발생후 인가되었던 전압이 100ms동안 유지하다가 그 이후 시정수값인 63.2%까지 감소하는데 300~400ms가 소요되었다.



<Fig. 4> Threshold level: 20pC, Delay time: 50ms

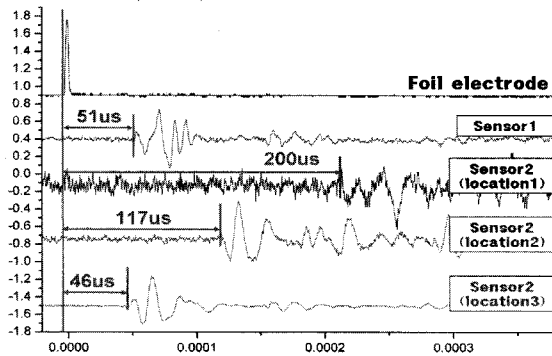
여러 조건에서 측정한 결과 평균적으로 전체 차단시간은 500ms이하가 소요됨을 알 수 있다. 400kV PMJ의 경우 내부에 형성되는 최대 전계가 약 12kV/mm이며, 해당 전계에서 이물에 의해 파괴되기까지는 약 100초가량이 소요된다. 따라서 PMJ가 부분방전에 의해 파괴되기 전에 충분히 전원 차단이 가능함을 알 수 있다.

### 2.2.5 초음파를 이용 결함 위치 추정

노이즈의 유입이 비교적 적은 초음파 센서를 이용하여 PMJ의 결함으로 인해 발생하는 PD신호를 측정하여 그 도달 시간차를 이용한 위치 추정 가능성을 확인하였다.

초음파 센서를 두 개를 Fig 6와 같이 PMJ의 중간부분에 빈 공간이 생기지 않도록 실리콘 그리스를 이용하여 설치한 후 Sensor2의 위치를 ①~③까지 각각 달리하여 측정하였다.

PMJ 내부에 존재하는 결함에서 발생한 신호가 각 센서들에 도달하는 시간차를 Fig. 5과 같이 확인하였으며, Sensor1은 51us, Sensor2는 위치에 따라 각각 200us, 117us, 46us가 측정되었다.



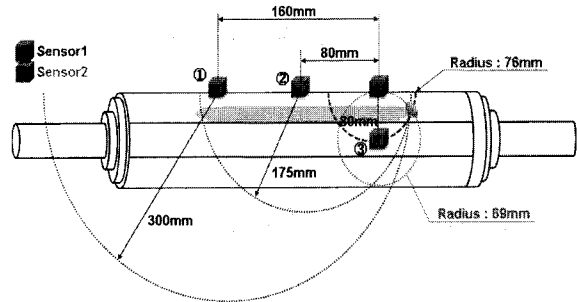
<Fig. 5> Measured pulses by foil and ultrasonic sensors

Fig. 5과 같이 일반고무에서 초음파의 전달속도 1500m/s를 적용하여 계산한 결과 결함과 Sensor1과 약 7.65cm가량 떨어져 있는 것을 추정할 수 있다. 원래 삽입된 결함은 Sensor1로부터 약 5.2cm 거리에 있어 실제보다 약 2cm가량의 오차가 발생하였다. 따라서 실제 PMJ 내부에서의 초음파 전달속도가 1024m/s임을 알 수 있다.

### 2.2.6 박센서를 이용한 위치 추정

박센서를 이용하여 결함의 위치를 추정하는 펄스 극성 판별법은 동시에 측정된 펄스와 위상의 극성이 같으면 +전극이 연결된, 다르면 -전극이 연결된 박센서 부분에 결함이 존재함을 이용하여 측정하는 방법으로, Fig. 7과 같이 설치된 센서에서 측정된 펄스와 위상의 극성이 같으면 +전극이 연결된 ①번 박센서에 결함이 존재한다.

따라서 결함이 존재하는 쪽의 박전극을 계속 반으로 줄여나감으로써 보다 정확한 위치를 측정할 수 있다.



<Fig. 6> The result of PD location by AE sensors



<Fig. 7> Pulse polarity discrimination method

## 3. 결 론

XLPE 케이블 접속함인 PMJ의 결함 검출을 위해 PPD 법을 적용한 시스템을 구축하였다. PMJ의 경우 가장 큰 문제가 되는 노이즈를 제거하기 위해서 다수의 노이즈 측정용 안테나를 사용하였으며, 노이즈 게이팅을 통해 PD신호의 손실 없이 주변에서 발생하는 코로나 및 기타 노이즈를 제거할 수 있다. 또한 초음파센서와 펄스 극성 판별법을 이용해 결함의 위치 찾을 수 있다.

차단속도는 PMJ의 경우 인가된 전압이 약 500ms이내에서 시정수에 해당하는만큼 감소하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 다수의 노이즈 안테나 설치를 통해 노이즈 게이팅 효율을 높일 수 있었다.
- 구성된 PPD 시스템을 통해 과과 전 전원차단이 충분히 가능하다.
- 초음파 센서, 펄스 극성 판별법, 직접파 및 반사파 도달시간 차이 등을 이용한 위치 추정이 가능하다.

본 연구를 통해 접속함 내 이물을 과과 전 확인할 수 있는 시스템을 구축하였다. 또한 이러한 정밀한 결함원 분석 기술로 생산 공정 중에 발생할 수 있는 이물 유입 경로를 사전에 차단하여 고품질의 초고압 제품을 생산 할 수 있는 Solution을 확보하였다.

### [참고 문헌]

1. 김충식, 이진선, 김원년, "초고압 케이블 선로에 대한 고주파 부분방전 시험", 대한전기학회 추계 방전 및 고전압 연구회, 2004
2. 김충식, 이진선, 이상교, 김원년, "초고압 중단접속함에 대한 PD측정 기술", 대한전기학회 춘계학술대회, 2005
3. 김충식, 이창영, 김원년, "초고압 선로 부분방전 On-line 모니터링 시스템 개발", 대한전기학회 하계학술대회, 2005
4. 이창영, 신두성, 김충식, 김동욱, 박완기, "차폐 분리에 의한 전력케이블 및 접속함의 부분방전 위치 검출", KIEE Transaction, Vol 49C, p196-201, March 2000
5. 신두성, 이창영, 김충식, 전승익, 김동욱, 박완기, "고주파 부분방전 측정에 의한 초고압 접속함 신뢰성 평가 기술", KIEE Transaction, Vol 49C, p186-195, March 2000
6. 김충식, "154kV XLPE 케이블 실선로 부분방전 검출", 대한전기학회 추계 방전 및 고전압 연구회 2004