

PD 검출을 통한 케이블 접속부 진단

이성희, 이진희, 이왕하
 포항산업과학연구원 기전연구팀

Diagnosis of cable joint by PD detection

Seunghee Lee, Jinhee Lee, Wangha Lee
 Mechanical and Electrical Engineering Team, RIST

Abstract - It has little possibility that cable and cable joint causes any problem in transmission system. But when cable fault occurs, the damage is very severe. There are weak points to have potential problem due to many cable joint especially in high voltage transmission line. In this study, we propose novel method to detect PD in cable joints and show the effectiveness of the proposed method through experiment results.

1. 서 론

산업 사회가 고도화됨에 따라 에너지 공급의 안정성이 더욱 중요시되고 있다[1]. 송배전 케이블은 문제시 될 확률이 아주 낮은 반면, 문제가 발생하는 경우 아주 큰 경제적 손실을 유발한다. 케이블의 결함 원인은 크게 제작 불량과 시공 불량 및 경년 열화가 주된 것으로 알려져 있다. 154kV 송전 케이블의 경우, 제작 시 최대 길이가 500m 이내로 제한되어 시공 시 접속부위가 많이 발생되고, 시공 불량에 의한 초기 결함을 가지는 경우 많다.

전력 케이블에서 발생하는 부분방전(PD : partial discharge)은 케이블의 열화 상태 및 사고에 대한 많은 정보를 제공하기에 오래 전부터 지속적인 연구 대상이 되어왔다[2]. 케이블 내부 결함에 의한 부분방전을 측정하는데 있어서, IEC-270에서 정한 커플링 유닛를 사용하는 방식이 표준으로 사용되는데, 활성 상태에서의 부분방전의 직접 측정은 어렵기 때문에 동반되는 음파를 측정하는 초음파 센서 사용 방법과 전자기장을 측정하는 전자파 방식 등이 많이 연구되어 왔다.[3]-[5]

본 논문에서는 케이블 접속재 내부에 절연을 약화시키는 공극 또는 이물질이 존재하는 경우 발생하는 부분방전을 감지하는데 있어서, 감도가 우수한 전자파 감지 방식 측정 장치를 제시하고, 실험 결과를 통해 제안된 진단 장치의 우수성을 보인다.

2. 본 론

2.1 케이블 절연체 결함과 부분방전

전력용 케이블은 여러 종류가 있는데 근래에 들어 시공의 편의성, 유지보수의 용이성 및 환경 친화성 등의 이유로 저중선로의 대부분은 XLPE(cross linked polyethylene: 가교 폴리에틸렌) 케이블의 한 종류인 CV 케이블(XLPE Insulated and PVC Sheathed Cable: 가교 폴리에틸렌 절연 비닐 시스 케이블)이 주종을 이루고 있다. CV 케이블의 구조는, 내부 중앙에 도체부가 있고, 그 바깥에는 도체 차폐층(반도전층), 그 다음에 주 절연층, 절연 차폐층(반도전층), 도전성 스웰링 테이프층, 외부 도체인 중성선, 스웰링 테이프층이 있고 제일 바깥 부분에 PVC 재질의 자켓(jacket)이 싸

여 있다. 케이블의 결함이란 주 절연층에 이물질이 있거나 공극을 말한다. 케이블의 연결을 위한 접속부의 시공은 두 케이블의 절연층을 제거한 후 도체부 연결 후 절연층, 차폐층 등의 재시공이 이루어져야 하는데, 구조가 복잡하다. 접속부의 시공은 현장에서 이루어지므로 내부에 이물질이 투입되거나 절연층 구성에 있어서 공극 발생 가능성이 높다.

그림 1은 주 절연층에 공극이 존재하는 경우에 부분방전이 발생과 케이블 단면에서 본 전계분포를 보여준다. 활성 상태에서 공극 부분에 전계가 집중되는 상황이 전개되고, 이 전압이 과도한 경우 부분방전이 발생된다. 일반적으로 공극 1mm당 부분방전 발생 임계 전압은 3kV인 것으로 알려져 있는데, 대체적인 공극의 길이는 수 백 μm 이내이다.

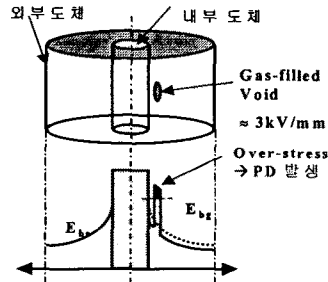


그림 1. 케이블 내부 공극과 전계 집중
 Fig.1. Void in cable and concentrated potential.

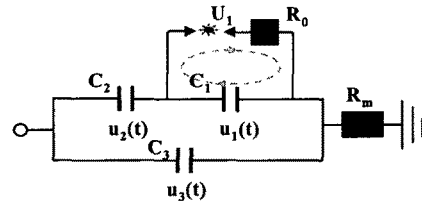


그림 2. 공극 존재 케이블 절연층의 등가회로
 Fig. 2. Equivalent circuit of insulator in cable with void.

그림 2는 케이블 절연층에 존재하는 공극의 전기적 등가회로를 나타내는데, 전계의 변화와 부분방전의 발생을 설명한다. 절연층과 공극은 커패시터로 모델링되는데, XLPE 재질의 긴 절연층과 가스로 채워진 짧은 공극은 길이 차이로 인해 각각의 정전용량은 $C_1 \cong C_2$ 의 관계를 가진다. 이로 인해 각각에 분담되는 전압 관계는 $U_1(t) \cong U_2(t)$ 가 되고, 짧은 간격을 지닌 공극이

3kV/mm의 낮은 내압 특성을 가지므로 내부 방전이 쉽게 발생된다.

CV 케이블 및 접속재의 주 절연층을 이루는 에폭시 계열 고체 절연은, 내부 부분방전이 치명적인 절연 파괴로 연결되는 경우가 많기 때문에, 부분방전의 검출과 부분방전특성으로부터 열화 상태나 방전 발생 위치를 탐지하는 기술에 관한 연구가 꾸준히 수행되고 있다. 부분방전이 발생되면 동반되는 물리적 현상이 빛, 열, 진동, 음파, 전자파 등이다. 빛은 케이블 절연재 및 접속재의 분투명성으로 감지가 불가능하며, 열은 발생량이 작아 감지가 어렵다. 일반적으로 사용하는 방식이 진동 또는 음향 감지 및 전자파 감지 방식이다. 그런데, 진동이나 음향은 여러 종류의 매질을 통과하면서 감쇄가 심하여 감도가 낮고 센서의 제작 방법에 따라 출력력을 달리하는 문제점이 있으며, 전자파 측정 방식은 감도가 우수하고 센서 장착 구조에 영향을 적게 받는 장점을 가지는 반면 주위 잡음 발생원에 의한 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다.

2.2 케이블 접속부 진단 장치의 구성

케이블 및 케이블 접속부 진단 장치는 다음의 조건들을 고려하여 설계되어야 한다. 활성 상태에서 진단이 가능해야 하고, 감도가 높아야 하며, 기 설비 케이블 및 접속재에 적용이 가능해야 하고, 측정 시스템 및 측정자의 안전이 고려되어야 하고, 외부 잡음에 의한 영향이 적어야 하며, 측정 결과에 대한 신뢰성이 높아야 한다. 본 연구에서 채택한 부분방전 탐상 방법은 위의 사항들을 고려하여 전자파 감지 방식을 채택하였다. 전자파 감지 방식은 활성상태 진단이 가능하며 감도가 우수하고, 기 설비의 개조 없이 적용이 가능하며, 비접촉 또는 절연 접촉으로 측정 시스템 및 측정자의 안전이 보장된다. 문제점으로 외부 잡음의 영향 제거 및 신뢰성 확보 방안인데, 그림 3의 파형과 같은 전자파(RF: radio frequency) 신호의 적분 결과를 이용하고, 적분 결과의 주파수 스펙트럼 분석을 통해 외부 잡음의 영향을 최소화하면서 신뢰도를 높였다. 그림 3의 회로는 예측되는 RF 신호 파형과 RF 신호의 적분 결과 파형 및 설계 회로이다. 부분방전에 의한 RF 신호는 그림에 나타난 바와 같은 형태를 가지며 지속 시간은 최대 수십 μsec 로 매우 짧다. 하지만 이를 증폭하여 적분하면 안정된 값을 얻을 수 있다. 적분 결과 파형에서 감쇄 부분은 저항 R2를 통한 방전에 의해 이루어진다.

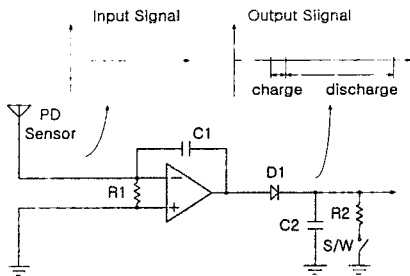


그림 3. 예측되는 RF 신호 파형과 RF 신호의 적분 결과 파형 및 설계 회로
Fig. 3. Expected RF signal waveform and its integrated result and designed circuit.

그림 4는 RF 감지 방식 케이블 접속부 진단 장치의 내부 블록도이다. 시공된 케이블 접속부는 22kV급의 경우 0.5m 정도의 길이이고, 154kV급의 경우 2m 정도로 길다. RF 신호는 거리의 3승에 비례하여 감쇄하는 특성을 가지므로 취약부위인 양 끝 부분에 개별 센서

를 장착한다.

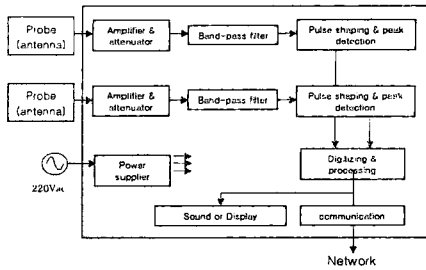


그림 4. 전자파 감지 방식 케이블 접속부 진단 장치의 내부 블록도
Fig. 4. Block diagram of test equipment of cable joint by RF detection

센서는 광대역 RF 수신안테나로 구성되는데, 부분방전에 의한 RF 신호 대역인 1MHz - 30MHz 대역만 통과하도록 증폭 후 필터를 통과한다. 필터링 된 신호는 그림 3과 같은 적분 회로를 통과하여 디지털 데이터로 변환되며, FFT에 의한 스펙트럼 분석을 통해 전원 주파수의 2배 주파수 성분을 추출할 수 있다.

제안된 RF 감지 방식 케이블 접속부 진단 장치는 신호 적분 회로를 채용함으로써 주변 잡음의 영향을 적게 받으며, 디지털 프러세싱을 통하여 전원 주파수의 2 배 주파수 성분만 취함으로써 대상 케이블에서 발생될 수 있는 산발적 잡음을 제거할 수 있다.

2.3 실험 및 결과

실험을 위한 RF 감지 센서는 그림 6과 같이 제작되어 케이블 접속부에 장착된다. 센서 내부는 VHF 대역 전자파 수신을 위한 loop-안테나를 변형시킨 형태의 코일이 놓이며, 부분방전에 의한 전자파의 신호 크기 및 거리에 의한 감쇄를 고려하여 대상 부위에 최대 밀착시키는 장착시킬 수 있는 재질이다. loop의 길이, 내부 면적 및 코일의 턴 수는 부분방전에 의한 전자파 에너지가 밀집된 주파수 대역을 고려하여 선정되었다. 그리고 제작된 탐상 장치는 전력 케이블이 3상 선로임을 감안하여 6개의 센서를 연결하여 분석하도록 제작되었다.

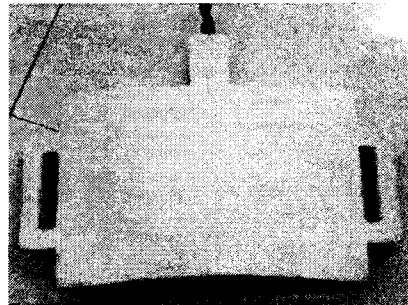


그림 5. 케이블 접속부 탐상을 위한 RF 센서
Fig. 5. RF sensor for test of cable joint

그림 6은 약 100pC의 부분방전에 대하여, 입력 증폭된 출력 파형과 적분 결과 파형을 측정한 결과이다. 증폭된 RF 신호는 100 μsec 정도인데, 적분 결과 파형은 정형화된 결과를 보여준다. RF 신호를 직접 디지털 프러세서에서 측정하여 판단하기는 어려운 반면, 적분 결과 파형은 외부 잡음이 제거됨과 동시에 발생 시간 및 크기를 정확히 분별할 수 있다.

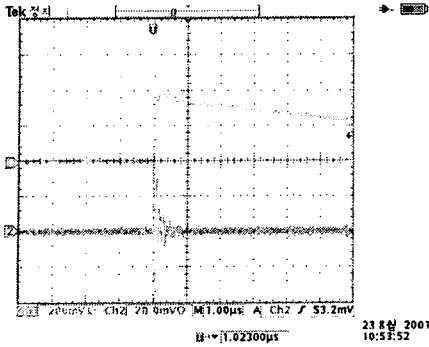


그림 6. 측정된 RF 신호 파형과 RF 신호의 적분 결과 파형(아래: RF 신호, 위: 적분신호)
 Fig. 6. Measured RF signal waveform and its integrated result.
 (lower: RF signal, 20mV/div, upper: integrated result, 200mV/div, horizontal: 1usec/div)

제한된 측정 장치는 10pC의 부분방전에 대해서 주변 공중과 잡음의 영향이 제거되고 재현성이 뚜렷하여 판독이 가능한 정형화된 파형이 획득되었다. 그런데 RF 신호의 세기는 거리에 민감하게 반응하였고, 부분방전 크기에 따른 진단 장치의 출력 값 변동이 심하여 증폭 이득을 조정하여 실험하였다. 표 1은 센서 장착 거리 및 진단 장치 내부 증폭 이득을 일정하게 고정시킨 후 부분방전의 크기에 따른 진단 장치의 출력 전압의 최대 값을 측정 한 결과이다. 대체적으로 부분방전의 크기에 비례하는 출력을 얻었는데, 500pC 근처의 값들은 정량화에 최적인데, 2500pC 이상의 값은 포화되어 구분이 되지 않으며, 10pC 이하의 부분 방전에 대한 출력을 이루지 않는다.

표 1. 부분방전 크기에 따른 진단 장치의 출력 값
 Table 1. Output result of system by varying PD

부분방전 크기 [pC]	5	20	100	200	500	2000	5000
출력 전압 [V]	0.0~0.02	0.04 ±5%	0.2 ±5%	0.4 ±5%	1.0 ±5%	4.0 ±5%	5.0 (포화)

*부분 방전 발생은 LDIC사의 모듈 사용

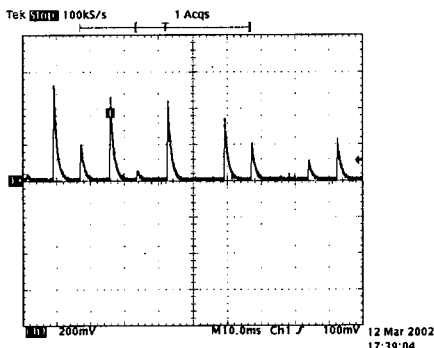


그림 7. 평균 300pC 부분방전에 대한 탐상 장치의 반응 파형 (부분방전 크기는 Hubbel사의 DDX™-7000으로 측정)
 Fig. 7. Measured waveform from test equipment for 300pC PD.
 (vertical: 200(mV/div), horizontal: 10(ms/div))

그림 7은 평균 300pC의 부분방전을 가지는 실제 케이

블에서 여러 주기 동안 측정된 진단 장치의 출력 파형이다. 관측된 파형의 주파수는 인가 전원 주파수의 2배인 120Hz이고, 각각의 파형 크기가 다르게 나타났다. 이는 양의 최대 전압 및 음의 최대 전압 부근에서 각각 발생되기 때문이며, 케이블 또는 케이블 접속재 내부의 공극이, 부분방전 발생이 지속됨에 따라 특성을 달리하기 때문이다. 또한 부분방전 크기는 케이블 자체의 결합 특성으로 결정되고 인가 전압 크기에는 무관하며, 임계 전압을 기준으로 발생 여부가 결정되었다.

표 2. PD 발생원과 센서 거리에 따른 출력 레벨
 Table 2. Output level by distance from source

발생원과의 거리 [cm]	left 40	left 20	ref. 0	right 20	right 40	right 60
출력 레벨	0	7 ±4	20(max)	3 ±3	0	0

*출력 레벨은 최대 값 20을 가지는 아날로그 메타의 출력 값임.

표 2는 6개의 센서를 케이블 접속부 부근에 20cm 간격으로 설치한 후 아날로그 메타의 출력 레벨을 측정 한 결과이다. 이 때 장치 내부 증폭 이득은 동일하게 설정 하였다. 이로서 센서의 거리에 따른 민감성을 확인하였고, 2개 이상의 전자파 센서가 부착되어 동작되면 원격지에서 결합부의 방향 또는 위치 판정이 가능함을 확인 하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 전자파 측정에 의한 활선 상태 온-라인 방식 케이블 접속부 진단 장치를 제안하고, 제안된 장치의 동작 실험을 통하여 우수성을 입증하였다. 실제 케이블에서 발생하는 부분방전 신호를 제안된 탐상 장치로 분석한 결과 10pC 이상의 부분방전에 대해서 반응하였고, 부분방전 크기에 따라 선형적인 출력 특성을 가졌다. 2개 이상의 센서가 장착되는 경우 결합 위치 판정이 가능하였다. 또한 온-라인 연속 측정을 통한 케이블의 노화 진행 모니터링 및 교체 시점 판단이 가능하다. 제안된 탐상 장치의 문제점으로는 증폭 이득 및 센서 취부 방법에 따라 출력을 달리하며 주변 전자파 잡음의 영향을 받을 수 있다는 것이다. 향후, 측정 결과에 따른 노화 진행 정도의 정량화 기법 구축과, 주변 전자파 잡음에 대한 대책마련 연구가 수행될 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 남궁도, 한상용, "초전도 케이블용 고분자 절연재료의 부분방전 열화특성에 관한 연구," 전기학회논문지 45권 7호, pp1020-1025, 1996.
- [2] 김정태, 김남준, 이천선, 구자윤, "전력케이블에서 교류전압과 진동과 전압을 이용한 부분방전 측정," 전기학회 논문지 48C권 5호, pp247-252, 1999.
- [3] 이우영, 김광화, 송일근, 김주용, 김상준, "23kV급 전력케이블 조립형 직선접속재의 활선진단 부분방전 검출 기기 개발," 전기학회논문지, 47권 3호, pp358-363, 1998.
- [4] Dirk Russwurm, "On-site partial discharge monitoring using the differential Lemke Prove LDP-5 and its accessories", Proceeding of HV testing, monitoring and Diagnostics wrokshop, pp8-1~8-11, 2000.
- [5] E. Lemke, T. Strehl, and W. Mosch, "Advanced partial discharge diagnostic of MV power cable system using oscillating wave test system," IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol.26, no.3, 1991.