

장조장 XLPE 케이블 절연 파괴 원인 규명을 위한 전구차단 장치의 응용

이창영*, 김동욱
LG 전선 (주) 전력연구소

The Application of Pre-Breakdown Partial Discharge Detection Method for Breakdown of Investigation of Long Distance XLPE Cable

C. Y. Lee, D. W. Kim
Electric Research & Technology Center, LG Cable Ltd.

Abstract - This paper describes AC test for long delivered drum length of cable using pre-breakdown partial discharge detection(PPD) method, which can be applied to observe the causes of electrical breakdown of EHV XLPE insulation. This method is to de-energize applied voltage to cable rapidly using pre-breakdown partial discharge, and is able to prevent complete breakdown. By this effect, defects such as voids, metal particles and protrusion in cable can be observed clearly. AC resonant test set was used for PPD method. Localization of partial discharge was performed by time difference detection of the traveling wave. Accuracy of localization was 1% to the length of test cable. Through several experiments with XLPE cable, successful results of PPD method were obtained.

직전의 아크 전류는 절연체의 열적 손상을 일으키기 때문에, 파괴지점에 존재하던 결함의 관찰이 불가능하게 된다. 그러나 절연파괴 직전에는 부분방전이 발생하게 되고, 결함의 종류 및 인가전압에 따라 수초에서 수십 초 이상 지속 후 절연파괴에 이르게 된다. 전구차단 장치란 파괴직전의 부분방전 신호를 내전압 시험기의 차단 동작 신호로 이용하는 장치로서, 아크전류에 의한 절연체의 손상을 억제할 수가 있다.[1],[2]

전구차단장치의 구성은 부분방전을 검출하기 위한 부분방전 검출부, 노이즈와 부분방전을 식별하고 차단부를 구동시키기 위한 판별부, 그리고 시험 전압을 차단하는 차단부로 되어 있다. 장조장 XLPE 케이블의 시험을 위한 전구차단 장치를 설계하기 위해서는 그림 1과 같은 고려 사항이 필요하다.

1. 서 론

전력의 안정적 공급을 위해서는 초고압 전력기기의 품질 신뢰성이 무엇보다도 중요하다. 초고압 지중 전력케이블의 주종을 이루고 있는 XLPE 전력케이블의 경우에도 출하 전 모든 제품에 대한 전수검사를 실시함으로써 엄격한 품질 관리를 거치게 된다. 특히, 완제품에 대한 부분방전 측정과 AC 단시간 내전압 시험은 절연체내 이물, 반도체 돌기 등의 결함의 유무를 검사하는 중요한 시험항목이 되어왔다. 이 시험 과정에서 케이블의 절연파괴가 발생하게 되면, 절연파괴의 원인을 반드시 규명하여 동일 원인으로 인한 품질 문제가 재발되지 않도록 제조 공정이나 설계에 반영하게 된다. 그러나 케이블 절연파괴의 대부분의 경우, 파괴시의 아크 전류로 인한 파괴부위의 소손으로 인해 원인 규명에 상당한 어려움이 있다.

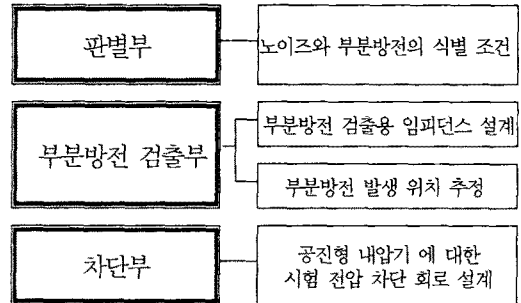


그림 1. 전구차단장치의 구성 요소별 고려사항

2. 본 론

2.1 전구차단장치의 설계

일반적으로, 전력기기의 절연성능 시험에 사용되는 내전압 시험기는 절연파괴 시의 아크 전류를 검출하여 인가전압을 차단시킨다. XLPE 전력케이블의 경우, 차단

파괴직전의 부분방전을 전압 차단 신호로 이용할 경우, 시험 도중 측정 시스템으로 유입되는 단발성 외부 노이즈에 의해 시험기의 우발적인 차단이 일어 날 수 있다. 따라서 차단 오동작을 방지하기 위하여 절연파괴 직전의 부분방전과 단발성 외부 노이즈를 식별할 수 있는 알고리즘이 요구된다. 노이즈와 구별되는 파괴전 부분방전의 특징은 케이블에 가해지는 전압Cycle의 매 주기마다 연속해서 일정 크기 이상의 부분방전 Pulse가 발생하게 된다. 이러한 특징을 이용한 노이즈 식별 기능의 H/W로서, Lemke사 LDW-6 부분방전 측정기를 판별부로 하였다. 판별부는 그림 2에 나타난 바와 같이 일정 시간(Delay time) 동안 연속해서 일정크기(Threshold Level) 이상의 Pulse가 매 20ms 마다 검출될 경우 부분방전으로 인식하도록 되어 있다. 설정 가능한 Delay time은 200ms~10min으로 되어 있다. 또한 판별 조건과 일치하는 부분방전이 검출되면 차단부를 구동하기 위한 Trigger 신호를 발생시킨다.

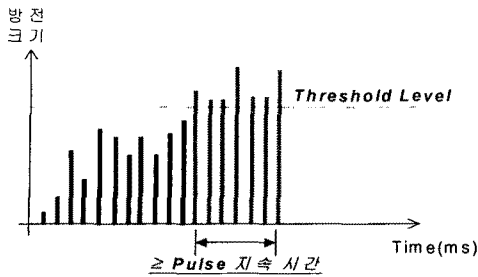


그림 2. 판별부의 부분방전 식별 알고리즘

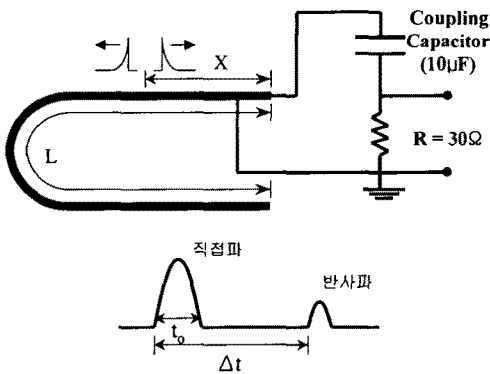
2.2.2 부분방전의 검출 및 위치 추정

부분방전은 기존 IEC 270 사양에 따른 측정 회로로서, C/C(Coupling Capacitor)에 설치된 임피던스회로를 통해 검출하고 판별부로 입력된다.

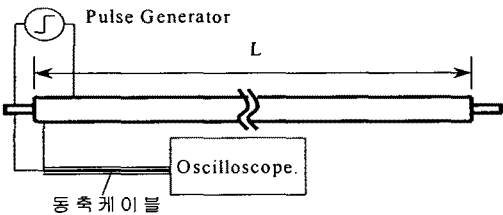
부분방전 발생 위치 추정은 그림 3에서와 같이, 부분방전 pulse의 반사파 시간차 측정법을 이용하였다. 장조장 케이블의 어느 지점 X 에서 발생된 부분방전 Pulse는 발생지점의 양 쪽으로 케이블을 따라 진행하게 된다. 이때 케이블의 한쪽에 설치된 검출회로에는 X지점으로부터 직접 도달한 Pulse와 케이블 끝에서 반사되어 도달한 Pulse가 관찰되고, 이 두 Pulse의 시간차를 측정함으로써 식 (1)과 같이 발생위치를 계산 할 수 있다.[3]

$$X = L - \frac{\Delta t \times V}{2} \dots \dots \dots (1)$$

V : 케이블을 통한 부분방전 진행과 속도 (m/s)



케이블 중의 부분방전 진행과 속도는 그림 4에서와 같이, Pulse Generator를 이용한 직접파와 반사파의 시간차 Δt'를 측정하여 구할 수 있다.



* 진행과 속도 계산식 : $V = 2L / \Delta t'$

그림 4. 진행과 속도 측정

시간차 측정의 정밀도를 높이기 위해서는 부분방전

Pulse의 왜곡을 최소화 시켜야 하기 때문에 무유도 저항으로만 검출임피던스를 구성하였다. 또한 케이블의 종단과 가까운 지점에서 부분방전 발생 할 경우 두 파의 중첩되어 시간차 측정이 불가능하기 때문에, Pulse Width to를 60ns 이내로 가정하고 식 (2)의 관계에 따라 R 값을 선정하였다. [6]

$$C \cdot R \geq 5 t_0 \dots \dots \dots (2)$$

C : Coupling Capacitor의 커패시턴스 값
R : 검출 임피던스 저항 값

또한 상용 주파 전압에 대한 영향을 제거하기 위해 100kHz cut-off frequency의 High pass filter를 설치하였고, 파형의 관찰은 4GHz Bandwidth의 디지털 오실로스코프를 이용하였다.

2.2.3 차단부의 설계

공진형 내압기에 설치된 기존 차단 회로는 Arc detector부터 설비 조작에 필요한 몇 단계의 Relay 회로를 거쳐, 여자 변압기 1차측 O.C.B를 구동시키도록 되어 있다. 전구 차단 장치의 차단부는 판별부의 Trigger Pulse로 구동되는 Relay를 기존 회로에 추가로 설치하여 O.C.B를 동작시키도록 하였다.

그림 5는 차단부 설치 후 판별부의 Trigger 신호부터 차단까지의 시간을 나타내고 있다. Trigger 개시 후 O.C.B 동작까지는 100ms, 그리고 시험기에 충전된 에너지의 소멸 시간은 400ms 이내의 차단 특성을 나타내었다.[4],[5]

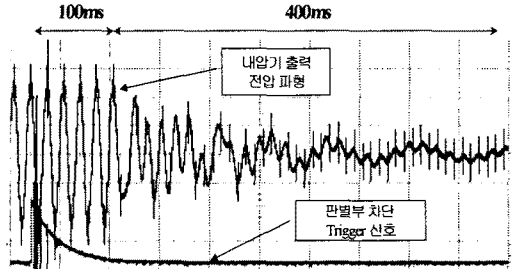


그림 5. 차단부 동작 특성

그림 6은 이상과 같은 설계를 토대로 하여 완성된 전구 차단 장치에 의한 시험 개략도를 보여주고 있다.

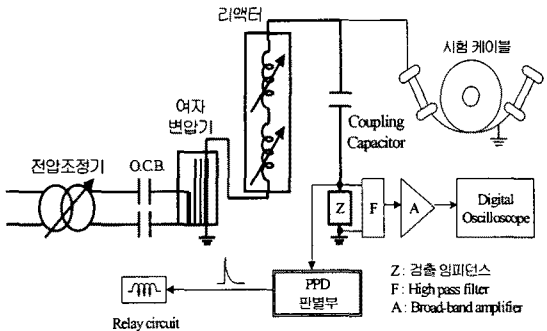


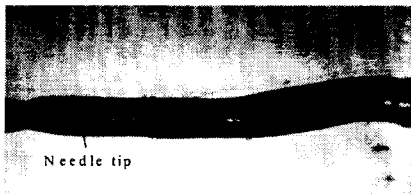
그림 6. 전구차단 장치에 의한 시험 개략도

2.3 시험 및 평가

2.3.1 차단 조건의 설정

전구차단 장치의 성능평가와 판별부의 차단 조건을 설정하기 위하여, 침전극이 삽입된 22.9kV 케이블 시료에 대하여 실험을 실시하였다. 판별부의 Threshold Level은 케이블의 길이나 종류에 따라 부분방전 량이 달라지기 때문에 모든 케이블에 동일한 값을 적용하기가 곤란하였다. 따라서 Threshold Level를 500pC로 고정하고 Delay time을 차단변수로 하였다. 부분방전에 의한 차단 성공 여부는 초기 차단이 일어난 후 3, 4회 정도 전압을 재인가하여 유사한 전압에서 차단이 계속될 때로 간주하였다. 또한 절연파괴로 진전되지 않고 초기 부분방전에 의한 차단과 구별하기 위하여 매 차단시 Threshold Level를 100pC씩 증가시켜가며 과정을 반복하였다.

이상과 같은 실험을 통하여 본 전구차단 장치로서 성공적인 차단이 가능한 Delay time은 200~300ms로 설정하였다. 그림 7은 전구차단 여부에 따른 침전극 지점의 파괴 형상을 보여주고 있다. 전구차단에 실패하거나 장치를 사용하지 않을 경우 그림 7의 (a)와 같이 침전극의 형상 관찰이 불가능한 반면, 전구차단이 될 경우 그림 (b)와 같은 관찰이 가능하였다.



(a) 일반적인 절연파괴 형상



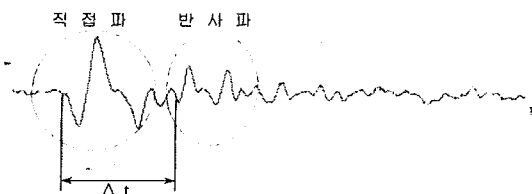
(b) 전구차단장치에 의한 파괴 형상

그림 7. 전구 차단 여부에 따른 절연파괴 형상 비교

2.3.2 실 케이블에 대한 전구차단 시험

시험에 사용된 케이블은 60m길이의 154kV XLPE케이블로서, 제조 과정에서 이상이 발생한 제품이다. 최초의 차단은 전압의 승압 도중 160kV에서 일어났으며, 3,4회 전압을 재인가하여 약 40kV 부근에서 지속적으로 차단됨을 확인하였다.

이 때 검출된 부분방전 Pulse는 그림 8의 (a)와 같으며, 그림 4에서의 실험을 통해 구해진 진행파 속도는 1.63×10^8 m/s였다.



(a) 부분방전 Travelling wave 시간차 측정

시간차(μs)	$\Delta t \times V/2$	추정위치(m)
0.439	35.78	24.22
0.423	34.48	25.53
0.419	34.15	25.85
0.435	35.45	24.55
0.424	34.56	25.44
0.448	36.51	23.49
0.418	34.07	25.93

* 위치 추정 평균 지점 : 25m, 오차 : ± 1m

(b) 위치 계산

그림 8. 부분방전 발생 위치의 추정

또한 위치 추정 정밀도를 높이기 위해 7회 파형을 관찰하여 그림 8의 (b)와 같이 예상 지점과 오차범위를 계산하였다. 이상과 같이 구해진 거리의 평균값으로부터 케이블 절연체를 조사 한 결과, 그림 9와 같이 내부 이물로부터 절연파괴가 진전되는 모습을 확인 할 수 있었다.

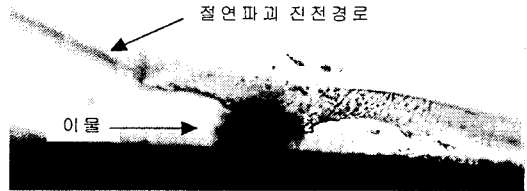


그림 9. 절연 파괴 지점의 이물 관찰

3. 결 론

본 논문에서는 XLPE 케이블의 절연파괴 원인 규명을 목적으로 공진형 내전압 시험기에 대한 전구차단 장치를 설계하였고, 실제 결합이 있는 154kV XLPE케이블에 대한 시험으로 성능을 확인하였다.

설계된 전구차단장치는 부분방전의 판별부터 최종 인가 전압의 소멸까지 700~800ms의 시간 내에서 차단되도록 하였다. 또한 실제 결합이 있는 장조상 케이블의 차단 실험에서 반사파 시간차 측정법에 의한 위치 추정 오차는 약 ±1m였다. 그러나 향후 위치 추정의 정밀도를 향상하기 위해서는 시험케이블과의 임피던스 Matching을 고려한 검출 임피던스 회로의 개선이 필요하다.

XLPE 케이블 파괴 원인 규명에 본 장치를 이용함으로써, 향후 제품의 품질향상에 상당한 기여를 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Takeshi Endoh "Experimental study on the causes of electrical breakdown of EHV XLPE insulation using pre breakdown partial discharge detection method" CEIDP. 1990, p. 255~260
- [2] Hikita, et al "New approach to breakdown study by measuring Pre-breakdown current in insulation materials", Japan, J. Appl., Phys., Vol. 123, p. 886~888, 1984
- [3] Dr F. H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Butterworth & Co. Ltd, 1989, p. 105~106.
- [4] F. H. Kreuger, "Breakdown phenomena in polyethylene insulation cable" CIGRE. No. 21 05, 1972
- [5] P.J. Walsh, et al "Voltage current relationship for pulsed arc discharges", J. App. Phy, Vol. 52, p.5476~5482, 1981