

충격파-부분방전(SI-PD) 시험방법을 이용한 케이블 진단에 관한 기초 연구

김정태*o, 구자윤**, 장은**, 조연옥#, 김상준##, 송일근##, 김주용##
*대전대학교 전기공학과, **한양대학교 전기공학과, #고려애자(주) 연구소, ##전력연구원 배전기술팀

A Possible diagnostic method of cable system using SI-PD measurement

J.T.KIM*o, J.Y.KOO**, E.JANG**, Y.O.CHO#, S.J.KIM##, I.K.SONG##, J.Y.KIM##
* Dae Jin University, ** Han Yang University, # Korea Insulator Co., ## KEPRI

Abstract

In this paper, applicability of SI-PD (switching impulse - partial discharge) testing method was put on an attempt as a newly proposed diagnostic method for the underground distribution power cable system in Korea. For this purpose, SI-PD testing equipment was designed, and tests were performed using artificial needle-type defects integrated into the 22.9 kV CN/CV cables in order to prove its reliability.

As a result, arc noises, generated from spark gap, were considerably decreased by use of a pneumatic switch immersed into oil, and artificial needle-type defects were well detected with impulse voltage level under 2U₀. These results imply that it is likely possible to apply SI-PD measurement method as a the nondestructive test for the 22.9 kV CN/CV cable system in Korea.

1. 서 론

고분자절연 지중케이블 시스템의 준공검사와 진단시험으로 기존에 적용되어 오던 직류 전압시험은 여러가지 문제점이 제기되어, 이를 대체할 수 있는 대체시험방법의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 대체시험방법으로 대두되는 것은 진동파 전압시험과 초저주파 전압시험을 들 수 있는데, 이들은 모두 파괴적인 시험방법으로 케이블 시스템에 결함이 존재하는 경우 시험시 결함에서 절연파괴됨으로써 결함을 검출하는 방법이다.[1,2]

한편, 케이블의 준공검사 및 진단시험의 비파괴적인 시험방법으로는 케이블 시스템의 결함에서 발생하는 부분방전을 측정하는 방법이 있다. 그러나, 현장

에서의 정확한 부분방전 측정을 위해 일반적으로 상용주파수의 교류 전원을 이용하게 되지만, 케이블의 큰 커패시턴스로 인해 교류 전원 발생장치가 상당히 커지게 되므로 실제적인 적용은 어렵다.

이러한 현장 부분방전 측정의 어려움을 해결하기 위해 작고 가볍고 경제적인 비파괴 검사방법으로 개폐충격파-부분방전 시험방법이 제시되었다.[3,4] 이 시험방법은 케이블에 1 ~ 10 ms 정도의 파두장을 갖는 개폐충격파를 시험케이블에 인가하여 이로 인해 나타나는 부분방전 펄스들을 측정함으로써 케이블의 결함을 검출하는 방법이다. 특히 개폐충격파의 파두장을 상용주파수 교류전압의 1/4 파장과 비슷하게 함으로써, 개폐충격파에서의 부분방전 특성은 교류에서의 부분방전과 유사한 형태로 검출된다는 장점이 있다. 또한, 부분방전 특성은 결함의 위치를 파악할 수 있는 정보를 포함하기 때문에 최근 부분방전 위치검출에 대한 연구도 추진되고 있다.[5]

본 연구에서는 국내 지중배전계통에 사용되는 22.9 kV CN/CV 케이블 시스템의 준공검사 대체시험 및 진단시험 방법으로 개폐충격파-부분방전 시험이 가능한지를 알아보기 위하여, 개폐충격파-부분방전 시험장치를 시제작하고, 인위적인 결함에 대한 부분방전을 검출하고자 하였다.

2. 시험장치 구성

개폐충격파-부분방전 시험장치

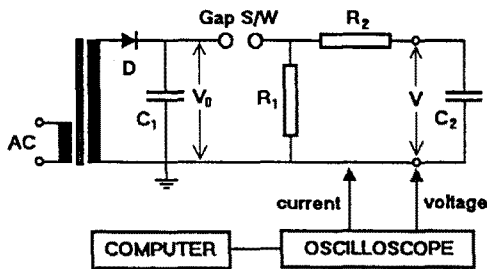
본 연구에서 제작한 개폐충격파-부분방전 시험장치의 개략적인 회로도도 그림 1과 같다. 여기서, 개폐충격파 전압을 발생시킬 때 사용하는 구획 스위치는, 절연유 속에 담긴 유압(pneumatic) 스위치를 사

용하여 구궤 방전시에 발생하는 아-크의 존속시간을 줄이도록 노력하였다.

케이블 절연층에 대한 인위적인 결함

일반적으로 시험시에는 현장에서 케이블 시스템에 실질적으로 많이 발생하게 되는 결함을 모델링한 인위적인 결함을 사용하며, 여기에는 침결함(needle defect), 칼홈결함(knife cut defect), 접속재 위치 잘못 등이 있다. 이 중, 침 결함은 절연층 내에 존재하는 도전성 이물질이나 케이블 반도전층으로 부터의 도전성 돌기 등을 모델링 한 것으로, 경우에 따라서는 열화된 케이블의 수트리로도 모델링[1]될 수 있는 것이며, 케이블 시스템의 대표적인 결함이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 우선적으로 침 결함을 사용하여 시험함으로써 본 시험장치의 신뢰성을 입증하였고, 다른 종류의 결함에 대해서는 앞으로의 연구에서 다룰 예정이다.

본 연구에서 사용한 침 결함은 케이블 절연층에 곡률반경 10 μm 의 스텐레스 침을 외부반도전층 쪽에서 1 mm, 2 mm 및 3 mm의 깊이로 삽입한 것으로, 개폐충격파 전압인가시 침을 접지시켜 시험하였다. 절연층의 두께는 내부 반도전층을 포함하여 8 mm 였다. 이 때, 시험 대상 케이블의 총길이는 200 m로 하여, 실제 현장 상황에 가깝도록 하였다.



C_1 : 충전 커패시터, C_2 : 케이블의 커패시턴스,
 R_1, R_2 : 파두장 및 파미장 조절용 저항,
 V_0 : 충전전압, V : 케이블 인가전압

그림 1. 개폐충격파 전압 발생장치의 개략적인 회로도

전압인가 및 부분방전 측정 방법

개폐충격파는 보다 낮은 전압을 인가하여 케이블의 결함에서 나타나는 부분방전을 측정하여 결함을 검출할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 본 연구에서 제

작한 장치의 회로 구성상 같은 충전전압이라 할지라도 케이블 인가전압 V 는 R_2 에서의 전압강하로 인하여 충전전압 V_0 보다는 상당히 작게 되며, 케이블의 커패시턴스에 따라 달라지게 된다. 시험케이블의 길이가 200 m 인 경우 본 시험장치의 전압효율(V/V_0)은 약 63 % 정도 였다. 따라서, 본 연구에서는 충전전압을 기준으로 개폐충격파를 시험케이블에 인가하여 디지털 오실로스코프에 기록되는 파형으로 부분방전을 측정하였다.

이 때, 부분방전을 검출하기 위해 전압 인가시에 흐르는 전류를 측정하였으며, 이러한 전류의 측정은 미국 Pearson사의 변류기(current monitor)를 사용하였다. 물론 변류기를 이용하여 전류를 측정하였기 때문에 수 백 kHz 이상의 파형에 대한 측정 감도가 낮아 부분방전의 특성이 잘 측정되지 않을 수 있으므로, 변류기를 사용하지 않고 직접 시제작한 인덕터를 이용하여 부분방전을 검출하기도 하였다.

3. 시험 결과 및 검토

정상적인 케이블에 대한 개폐충격파의 부분방전 시험

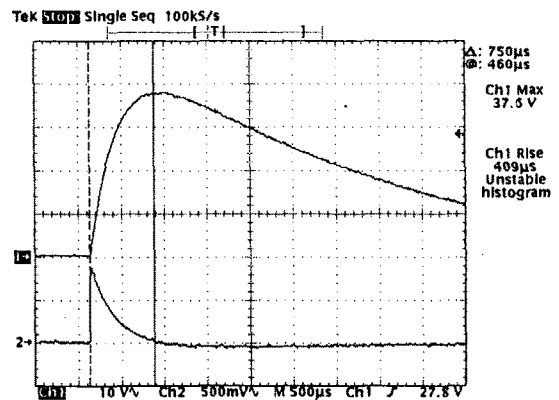


그림 2. 정상적인 케이블의 개폐충격파 전압과 전류 파형 (V_0 : 60 kV, V : 37.6 kV)

그림 2는 200 m 길이의 정상적인 케이블에 대해 장치의 직류충전전압을 60 kV로 하고 개폐충격파를 발생시킨 경우의 임펄스 전압과 전류를 나타내었다. 그림에서 구한 개폐충격파의 파두장/파미장은 800/2500 μs 로서 타 연구결과에서 제시하는 파두장의 길이인 1 ~ 10 ms의 범위 보다는 짧게 나타나고 있

다. 그러나, 케이블의 길이가 이 보다는 긴 현장에서는 이 범위 안에 들 것으로 예상된다. 이 개폐충격파의 최대값(crest value)은 37.6 kV로서, 출력전압의 효율이 상당히 좋지 않은 것으로 나타났으나, 이것은 파두장을 길게하려면 그림 1의 저항 R_2 의 값을 크게 하기 때문에 이 저항에서 전압강하가 많이 일어나기 때문이다. 만일 지금 상태에서 파두장의 길이를 1 ~ 10 ms 로 맞추려면 R_2 저항의 값을 더 크게 하여야 하므로, 출력전압의 효율은 더욱 저하하게 된다.

한편, 개폐충격파 전압 인가시의 전류를 보면 전압의 변화에 따른 변위전류가 상당히 포함되어 있음을 알 수 있다. 이 변위전류는 적절한 고주파 필터를 사용하면 제거될 수 있다. 또한, 절연유 속에서 동작하는 압력(pneumatic) 스위치를 사용하여 구괘 방전시 아-크 노이즈를 상당히 줄였기 때문에, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전압인가시에 노이즈를 많이 저감시킬 수 있었다.

인위적인 결함을 갖는 케이블에 대한 개폐충격파의 부분방전 시험

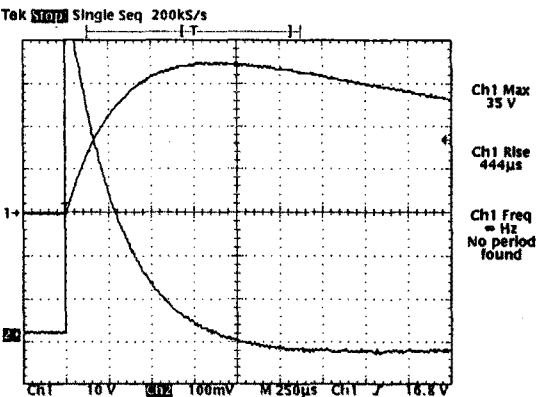


그림 3. 1 mm 침결함의 경우 개폐충격파 전압과 전류파형 ($V_0 : 55 \text{ kV}$, $V : 35 \text{ kV}$)

200 m 길이의 케이블 절연층에 스텐레스 침을 삽입한 후 개폐충격파를 이용하여 부분방전을 측정하였다. 그림 3과 4에 각각 침 결함의 깊이가 1 mm와 2 mm인 경우에 충전전압 55 kV로 개폐충격파를 발생시켜 측정된 전압과 전류 파형을 나타내었다. 케이블에 실제로 인가된 전압은 모두 $2U_0$ 보다 높은 35 kV 였으나, 전혀 부분방전 필스가 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 이미 보고된 바 있는 진동파

전압 시험에서의 결과[6]와 동일한 것으로 생각된다. 즉, 2 mm의 인위적인 침 결함에 대한 $4U_0/50$ 회의 진동파 전압 시험에서 절연파괴가 일어나지 않았을 뿐 아니라, 인가 횟수에 따라 진동파의 파형 변화가 거의 없었으므로 전기트리의 개시와 진전이 없었다는 결과와 본 연구에서 개폐충격파 인가시 부분방전이 검출되지 않았다는 결과는 일치하는 것이다. 한편, 그림 3과 4에서 모두 같은 전압을 인가하였으므로 전류 파형은 같은 크기의 변위전류가 나타났음을 알 수 있다.

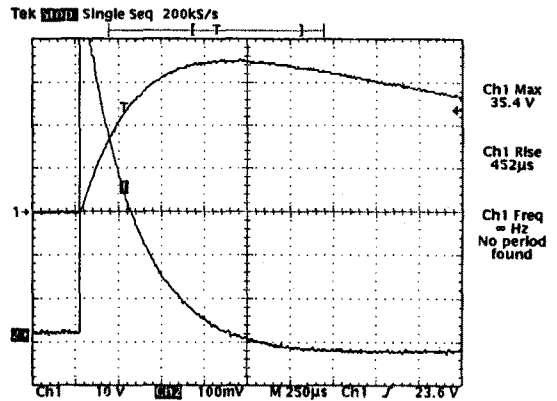


그림 4. 2 mm 침결함의 경우 개폐충격파 전압과 전류파형 ($V_0 : 55 \text{ kV}$, $V : 35 \text{ kV}$)

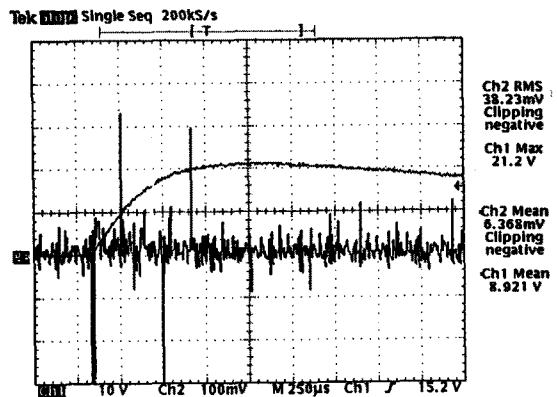


그림 5. 3 mm 침결함에서 개폐충격파 전압과 전류 (부분방전)파형 ($V_0 : 30 \text{ kV}$, $V : 21.2 \text{ kV}$)

침 결함의 깊이를 3 mm로 더욱 깊게한 경우에 측정된 개폐충격파 전압과 전류 파형을 그림 5에 나

타내었다. 이 때, 전류측정의 감도를 높이기 위해 변류기를 사용하지 않고 직접 시제작한 인덕터를 이용하였다. 충전전압은 30 kV였고 케이블에 인가된 전압은 21.2 kV였으며, 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 상당한 크기의 부분방전 펄스들이 노이즈 등과 함께 나타났다. 이 결과도 이미 보고된 결과[6], 즉, 같은 크기의 침결함(3 mm)에 진동과 전압 인가시 부분방전이 측정되었고 절연과피가 일어났던 결과와 일치하는 것이다. 개폐충격과 전압에서 이 부분방전을 검출한 전압레벨은 $2U_0$ 이하인 21.2 kV로서 상당히 낮은 전압이었다. 따라서, 상당히 낮은 전압레벨에서 결함을 검출할 수 있다는 것을 입증하였다.

한편, 절연과피가 일어난 케이블에 대해 10 kV의 충전전압으로 개폐충격파를 인가한 경우의 전압과 전류 파형을 그림 6에 나타내었다. 예상되는 바 처럼 전압이 제대로 인가되지 않고 낮은 전압레벨에서 케이블 절연층 내의 지속적인 방전이 일어나고 있음을 알 수 있다.

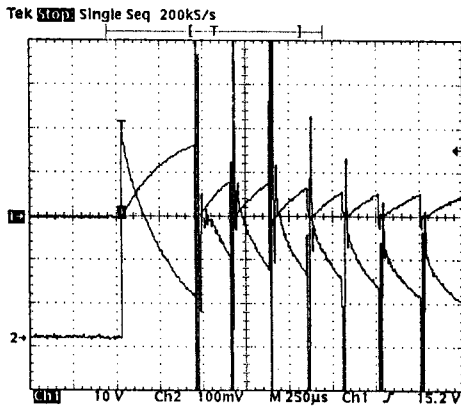


그림 6. 절연과피가 일어난 케이블에 대한 개폐충격과 전압과 전류파형 ($V_0 : 10 \text{ kV}$)

4. 결 론

본 연구에서는 최근 케이블 준공검사 및 진단시험 방법으로 연구되고 있는 개폐충격과-부분방전 시험방법에 대해 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다 :

절연유 내 압력 스위치의 사용으로 구궤 방전시 발생되는 아-크성 노이즈가 상당히 저감되어, 전류 측정의 신뢰성을 입증하였다.

본 시험장치는 케이블에 존재하는 1 mm 및 2 mm의 침 결함에 부분방전을 나타내지 않았으나, 3 mm의 침 결함에 대해서는 $2U_0$ 이하의 낮은 전압레벨로 부분방전이 잘 검출되어, 보다 낮은 전압에서 결함 검출 가능성을 제시할 수 있었다.

이상과 같은 기초 연구로서 개폐충격과-부분방전 시험의 적용 가능성을 제시할 수 있었다. 본 연구에서는 침결함에 대한 개폐충격과-부분방전 시험의 검출 전압이 $2U_0$ 이하로 나타났으나, 케이블 준공검사와 진단시험을 위한 전압인가 조건에 대해서는, 앞으로 보다 여러가지의 결함에 대한 많은 실험을 통해 결정되어야 한다고 사료된다. 또한, 부분방전이 갖고 있는 정보를 보다 자세히 알기 위해 측정방법의 개선이 필요하며, 노이즈 저감에 대한 노력도 계속되어야 한다.

참고문헌

- [1] W. Kalkner, R. Bach, R. Plath, Zhiyong, "Investigation of Alternative After Laying Tests for MV cables", Jicable 1991, B.3.2 (1991)
- [2] 内田克己, 小林眞一, 小島孝雄, 弘津研一, 井上均, 田中秀郎, 佐久間進, "CV 케이블의新しい現地耐壓試驗法の有効性に關する研究", T.IEE Japan, Vol.115-B, No.10, 1995
- [3] Lemke E., Friese G., "PD Phenomena in Polyethylene under AC and Impulse Stresses with respect to On-Site Diagnosis Tests of Extruded Cables", 7th ISH, Dresden, Paper 75.07, 1991
- [4] Lemke E., Roding R. Weissenberg W., "On-Site Testing of Extruded Power Cables by PD Measurement at SI Voltage", CIGRE, Vienna, Paper 1020-02, 1987
- [5] I. Krage, W. Kalkner, "PD-Detection and Localisation using Unipolar Impulse Voltage for On-Site Testing of Polymer Insulated Cables", 8th ISH, Yokohama 1993
- [6] J.Y.Koo, S.S.Rho, E.Jang, Y.O.Cho, J.T.Kim, S.J.Kim, I.K.Song, J.Y.Kim, "A Possible New After Laying Test Method employable to the Underground Distribution Power Cables in Korea", Korea-Japan Joint Symp., Kumi, May, 1996