

전력케이블 진단을 위한 부분방전 검출장치의 설계 및 제작

Design and Fabrication of a PD Detector for Power Cable Diagnosis

송재용* 서황동** 길경석*** 한문섭† 장동욱††
Jae-Yong Song, Hwang-Dong Seo, Gyung-Suk Kil, Moon-Seob Han, Dong-Uk Jang

ABSTRACT

In this paper, we designed and fabricated a partial discharge (PD) detector to diagnose the soundness of CNCV cables by analyzing PD pulses and to predict discharge locations. The PD detector is consisted of a coupling network with a discharge free capacitor and a detection impedance, a voltage follower and a low noise amplifier. Lower cut-off frequency of the detector is adjusted at 175kHz to block AC voltage and to pass discharge pulse only. The discharge location could be obtained by the time of arrival method using travelling wave propagation theory. In a laboratory test on an eighty-meter CV cable, we could position the discharge location within a two-meter error.

1. 서론

현대 산업사회는 도시의 광역화와 인구집중, 산업구조가 복잡 다단화 되면서 전력사용이 급증하고 있어 전력설비 및 수용가에 원활한 전력공급을 위해서는 전력케이블의 고신뢰성 및 안전성이 요구된다. 전력케이블에서 절연열화에 의한 고장이 발생하는 경우 고장의 규모에 비해 그 파급영향은 매우 심각하다. 따라서 시공초기부터 고신뢰성을 보장할 수 있도록 시설하는 것이 필수적이며, 아울러 시설 후에도 지속적인 유지관리를 통해 안정성을 확보하여야 한다^{[1]~[4]}.

그러나 현재까지는 케이블 및 접속재 등의 기자재 개발 및 시공방법 등 설비 시설 측면에 주안점을 두어 기술개발을 추진한 결과, 전력케이블 제조회사에서 케이블의 제조 및 시공기술은 수출 단계까지 와 있으나, 시설 후 일정기간이 경과한 설비에 대한 체계적인 유지보수 또는 교체 등 유지관리기법에 대한 기술개발은 상대적으로 등한시되어 왔다. 따라서 전력케이블에서의 고장 징후를 사전에 예측하고 체계적으로 관리하기 위해서는 전력케이블 진단기술이 필수적이라 할 수 있다. 전력케이블의 열화진단에 사용되는 시험방법 중 부분방전 검출방법은 케이블의 절연상태 및 사고에 대한 많은 정보를 제공해주기 때문에 오래전부터 지속적으로 연구대상이 되어 왔으며, 부분방전 위치검출은 케이블의 절연상태에 따른 결함 및 고장점을 파악함으로써 보다 경제적이며 신뢰성 있는 유지보수 및 관리가 가능하다^{[5][6]}.

본 연구에서는 전력용 케이블에서 부분방전 신호를 검출할 수 있는 부분방전 측정시스템을 설

* 책임저자 : 한국해양대학교 박사과정, 정회원

** 한국해양대학교 석사과정, 학생회원

*** 한국해양대학교 부교수, 정회원

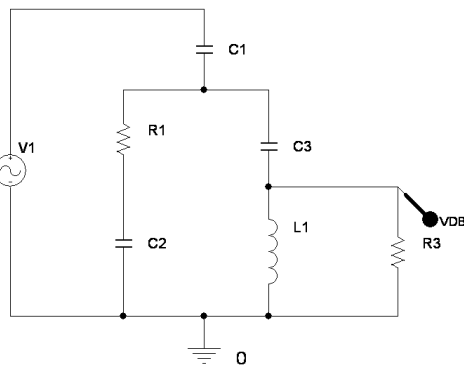
† 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

†† 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

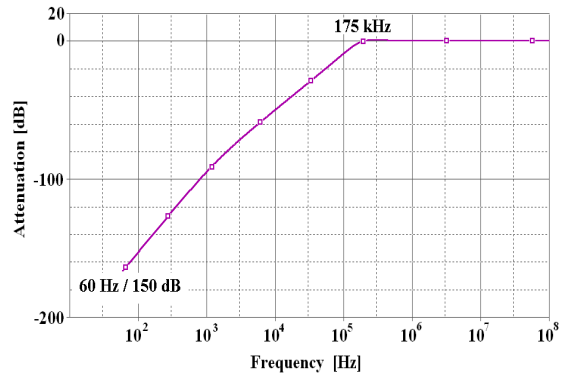
계·제작하였다. 부분방전 측정시스템은 결합콘덴서 및 검출임피던스로 구성되는 결합회로망과 고감도 저잡음 증폭회로를 사용하여 케이블에서 부분방전 측정하였다. 또한 최초 검출된 부분방전 펄스와 케이블 말단에서 반사되어 돌아오는 펄스를 동시에 측정함으로써 부분방전의 위치추정이 가능하였다.

2. 측정시스템의 설계 및 제작

부분방전 신호는 수 ns ~ 수 μ s 정도의 대단히 짧은 시간동안 발생하고, 그 크기도 수 mV 이내로 대단히 작게 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 고주파의 부분방전 신호만을 통과시킬 수 있는 결합회로망의 구성이 필요하며, 부분방전 신호의 크기는 대단히 작게 나타나므로 저잡음 고감도의 증폭회로가 필요하다. 그림 1은 결합회로망의 구성 및 주파수 응답 특성을 나타낸 것으로 결합콘덴서 C1의 용량은 80 pF이며, RLC회로의 조합을 통하여 60 Hz의 전원주파수 신호에 대한 감쇄비는 150 dB로 $10^{7.5}$ 배 이상 감쇄되고, 175 kHz 이상의 주파수를 갖는 부분방전 신호만을 통과시킬 수 있는 구성이다.



(a) 결합회로의 구성



(b) 주파수 응답 특성

그림 1 결합회로의 구성

그림 1과 같이 결합회로를 구성하면 결합회로의 출력측에는 고주파 부분방전 신호만이 전달되는데 이 신호는 대단히 작게 나타나므로 저잡음 고감도 증폭회로의 적용이 필수적이다.

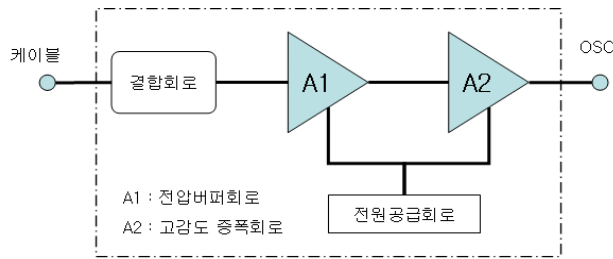
본 연구에서는 그림 2(a)와 같이 신호의 왜곡을 최소로 할 수 있도록 결합회로의 출력측에 전압 버퍼회로를 설치하여 신호의 왜곡을 방지할 수 있도록 하였으며, 저잡음 고감도 증폭회로를 통하여 최종적인 부분방전 신호가 검출되도록 구성하였다. 여기서 사용한 전압 버퍼회로는 높은 입력임피던스와 낮은 출력임피던스를 갖는 LH0033(주파수 대역 : 70 MHz)을 사용하여 주파수 대역 및 신호 왜곡에 대한 문제를 해결하였다.

고감도 증폭회로는 입력 및 출력 임피던스가 50 Ω 이고, 증폭도 25 dB의 저잡음 광대역 증폭기인 RF425(Agilent, 0.1 ~ 1.3 GHz)를 적용하였다.

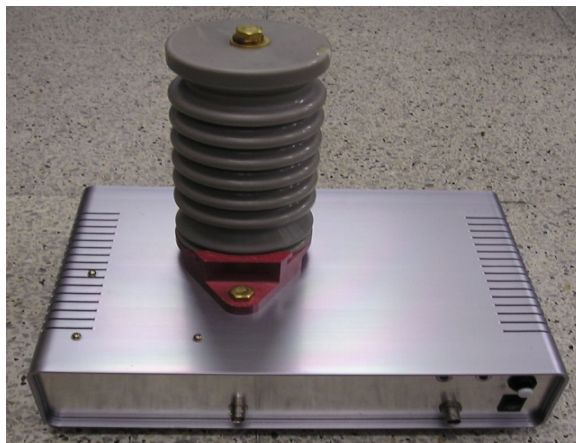
최종적인 검출회로의 구성은 그림 2(b)와 같으며, 결합콘덴서, 결합회로 및 전압버퍼회로, 증폭회로, 전원공급회로로 구성되는데, 여기서 결합회로 및 전압버퍼회로와 증폭회로는 개별적으로 금속 케이스에 의해 차폐구조로 이루어지며, 검출회로는 전체적으로 금속 외함 사용에 의해 이중차폐구조를 가지도록 구성하였다. 이는 외부 방사잡음의 영향을 최소화하기 위한 구성이다.

부분방전 신호는 대단히 작게 나타나기 때문에 외부 잡음에 대한 영향을 받기 쉽기 때문에 외부 잡음을 최소화 할 수 있는 구성이 필요하며, 잡음레벨에 따라 측정감도가 달라지므로 잡음신호를 억제하기 위한 대책이 필요하다. 부분방전 측정시 발생하는 잡음은 크게 외부 잡음과 내부 잡음으로 구분지어 생각할 수 있다. 먼저 외부 잡음은 전력용 케이블에 공급되는 전원에 의해 발생하는 수십 ~ 수백 kHz 대역의 잡음, FM방송국에서 송신되는 수십 MHz 대역의 통신 신호, 외부

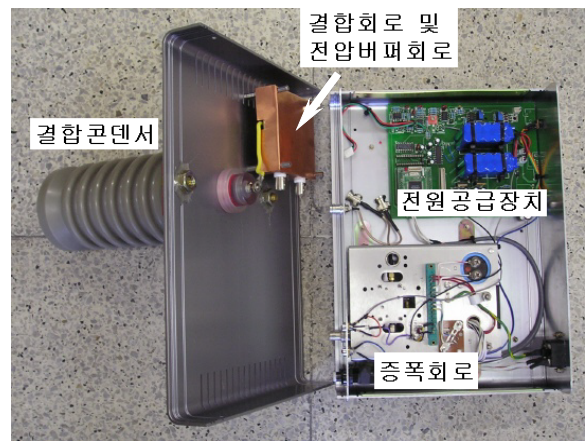
전력설비에서 발생하는 고주파 신호로 구분된다. 여기서 수십 ~ 수백 kHz의 잡음은 결합회로의 차단주파수를 175 kHz로 선정하였기 때문에 어느 정도 차단이 가능하다. 또한 수십 MHz 대역의 잡음 신호는 방사 잡음으로 검출회로가 외부 금속 케이스의 차폐구조로 이루어지기 때문에 이에 대한 영향은 무시할 수 있다.



(a) 구성



(b) 외부

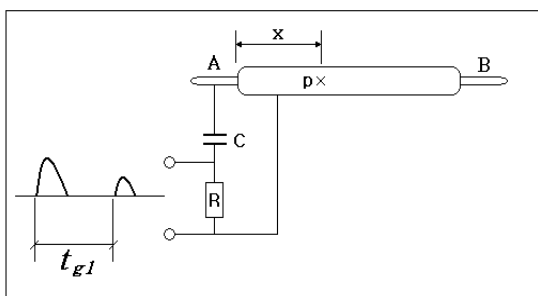


(c) 내부

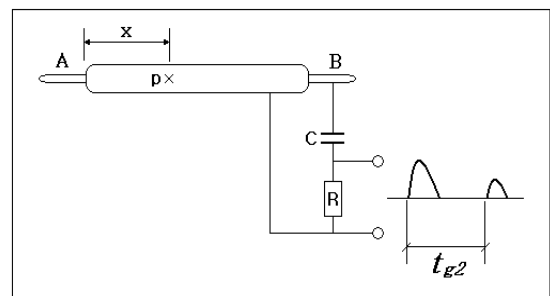
그림 2 검출회로의 구성

3. 부분방전 검출 및 위치 추정

지중 또는 터널내에 설치된 전력 케이블 단말에서 부분방전을 검출할 수 있으면, 부분방전펄스의 왕복 반사에 의한 신호검출과 이들의 시간차로부터 케이블 내에서의 방전위치를 추정할 수 있다^{[7],[8]}. 케이블에서의 방전신호검출은 그림 3과 같이 2가지의 경우로 나타낼 수 있으며, 각각의 경우에 대하여 이론적으로 방전위치에 대한 설명이 가능하다.



(a) 단말 A에 검출회로 접속



(b) 단말 B에 검출회로 접속

그림 3 부분방전의 위치 추정

그림 3(a)의 경우는 p점에서 발생한 부분방전펄스는 양단의 케이블 단말(A, B)로 전파하고, 검출회로에서 제 1의 펄스가 검출되며, 몇 ns후에 단말 B에서 반사된 펄스가 진폭이 감소하면서 단말 A로 전파되어 제 2의 펄스가 검출된다.

제 1의 펄스는 방전점 p로부터 거리 x 를 전파하므로 $t_1 = \frac{x}{v}$ 이며, 제 2의 펄스는 방전점 p로부터 단말 B로 진행하고 이점에서 다시 단말 A로 반사되므로 $t_2 = \frac{2l-x}{v}$ 가 된다. 따라서 제 1펄스와 제 2펄스의 시간차는

$$t_{g1} = t_2 - t_1 = \frac{2l-2x}{v} \quad (1)$$

가 된다. 이들의 시간차로부터 부분방전의 위치 p는 검출기로부터 x 거리이므로

$$x = l - \frac{1}{2}t_{g1}v \quad [\text{m}] \quad (2)$$

가 된다.

그림 3(b)의 경우는 p점에서 발생한 부분방전펄스가 (a)의 경우와 마찬가지로 양단의 케이블 단말(A, B)로 전파하고, 단말 B에 설치된 검출회로에서 제1의 펄스가 검출되고, 몇 ns후에 단말 A에서 반사된 펄스가 진폭이 감소하면서 단말 B로 전파되어 제2의 펄스가 검출된다.

제1의 펄스는 방전점 p로부터 거리 $l-x$ 를 전파하므로 $t_1 = \frac{l-x}{v}$ 이며, 제2의 펄스는 방전점 p로부터 단말 A로 진행하고 이점에서 다시 단말 B로 반사되므로 $t_2 = \frac{l+x}{v}$ 가 된다. 따라서 제1펄스와 제2펄스의 시간차는

$$t_{g2} = t_2 - t_1 = \frac{2x}{v} \quad (3)$$

가 된다. 이들의 시간차로부터 부분방전의 위치 p는 케이블 단말 A로부터 x 거리이므로

$$x = \frac{1}{2}t_{g2}v \quad [\text{m}] \quad (4)$$

가 된다.

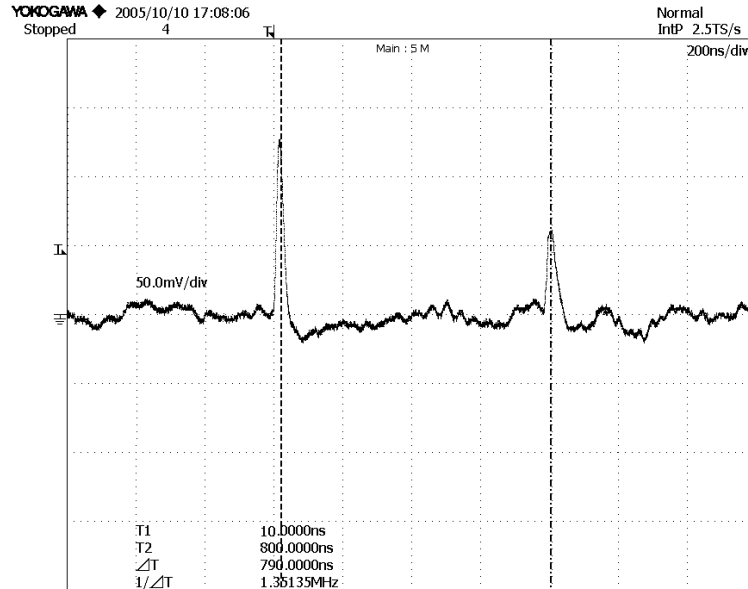
제안한 부분방전 측정시스템에서 부분방전 검출 및 방전위치 추정을 위한 적용실험은 실험실 환경을 고려하여 80 m의 CNCV 케이블을 사용하였다. 실험에 사용된 CNCV 케이블의 비유전율 ϵ_r 은 3의 값을 가지므로 케이블내에서 방전신호의 전파속도는 식(5)와 같이 표현된다.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \times c \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

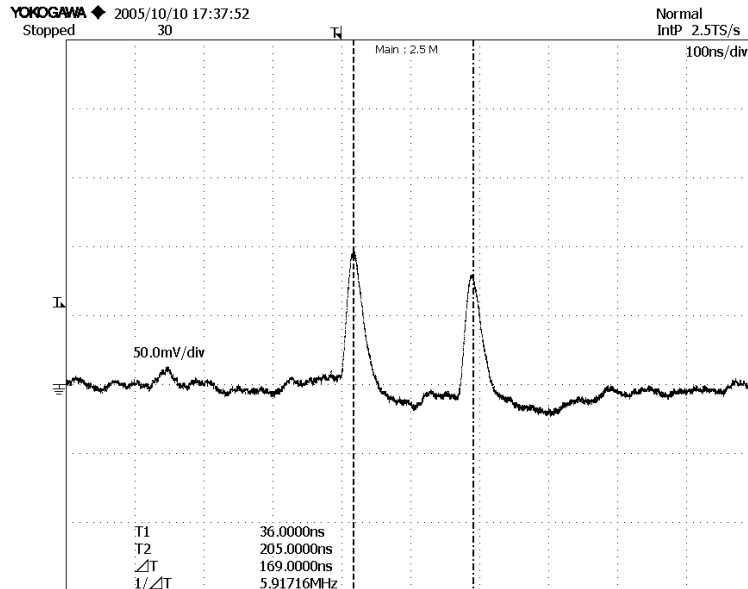
여기서, c 는 빛의 속도(3×10^8 m/s)이고, 따라서 케이블내에서 방전신호의 전파속도는 약 1.7×10^8 m/s로 계산된다.

그림 3의 구성에서 단말 A를 기준으로 케이블의 15 m 지점에 임의의 결함 만들고, 시험전압

을 인가하여 부분방전이 발생할 수 있는 조건을 모의하였다. 이때 발생하는 부분방전 신호를 측정하면 방전위치에서 측정시스템이 설치되어 있는 단말 A로 전파되는 부분방전 신호가 검출되고, 일정 시간이 지난 후 방전위치에서 다른 단말 B까지 진행 한 후 반사되어 돌아오는 신호가 측정된다. 이렇게 검출된 방전신호의 시간차를 이용함으로써 방전 발생위치를 추정할 수 있다. 단말 A 및 단말 B에 측정시스템을 접속하고 부분방전 신호를 측정하면 그림 4에 나타낸 바와 같이 측정되는데, 측정시스템이 설치된 위치에 따라 두 신호간의 시간차이는 다르게 나타난다.



(a) 단말 A에 설치



(b) 단말 B에 설치

그림 4 부분방전 신호의 측정파형

먼저 단말 A에 측정시스템을 설치하여 측정한 결과 그림 4(a)와 같이 제 1펄스와 제 2펄스의 시간차는 790 ns로 측정 되었다. 케이블에서의 전파속도와 단말 A에서 검출된 부분방전 신호의 시간차를 고려하여 식(2)에 따라 방전 발생점을 추정하면 약 12.85 m로 나타나는데 실제 15 m의 방전위치와는 2.15 m의 오차를 나타내었다. 한편 단말 B에 측정시스템을 설치하고 부분방전 신호를 검출한 결과, 두 방전 신호의 시간차는 169 ns로 측정되었다. 이 시간차를 식(4)에 적용하여 방전위치를 계산하면 14.45 m로 얻어지는데 실제 방전위치와 0.55 m의 차이를 나타내었다. 따라서 실험결과로부터 부분방전의 제 1펄스와 반사되어 돌아오는 제 2펄스의 시간차를 이용하여면 부분방전의 발생위치 추정이 가능하다.

4. 결 론

본 연구에서는 전력케이블의 부분방전 검출을 위한 측정시스템을 설계·제작하였다. 검출회로는 결합콘덴서 및 검출임피던스로 구성되는 결합회로망은, 60 Hz의 전원주파수 전압 신호를 150 dB로 완전히 차단하고, 175 kHz 이상의 주파수를 갖는 부분방전 신호만을 통과시킬 수 있도록 구성하였으며, 증폭회로에는 전압 버퍼 회로를 사용하여 주파수 대역 및 신호 왜곡에 대한 문제를 해결하였다.

부분방전의 신호검출 및 방전위치 추정에는 80 m의 CNCV 케이블을 적용하여 임의의 위치에 결합을 생성한 후, 시험전압을 인가하여 방전신호를 발생시키고, 측정시스템에서 부분방전 신호를 측정하였다. 측정된 부분방전 신호의 제 1펄스와 제 2펄스의 시간차를 이용하여 방전위치를 추정하였으며, 실험결과로부터 최대 2.15 m의 오차로 위치 추정이 가능함을 확인하였다.

향후 현장측정조건에서 제안한 부분방전 측정시스템을 적용하여 부분방전신호 검출 및 방전 위치 추정에 관한 연구를 지속적으로 수행하고자 한다.

참고문헌

1. S. S. Bamji, A. Bulinski, Y. Chen and X. Han. "A Diagnostic Technique to Assess the Operating State of HV Apparatus", Proceeding 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA, pp. 119 ~ 122, June 5 ~ 8, 1994.
2. T. Heizmann and W. S. Zaengl, "A Novel Diagnostic Method for Buried Polymer Insulated Medium Voltage Cables", Proc. 8th ISH, Yokohama, Japan, August 23 ~ 27, Paper No. 67. 1993.
3. Chata K et al., "Characteristics of long term deterioration of XLPE cable and its diagnostic techniques in Japan", JICABLE '99, pp.457 ~ 462, 1999
4. G. C. Montanari and A. Motori, "Thermal Endurance Evaluation of XLPE Insulated Cables", J. Phys. D: Appl. Physics, Vol. 24, pp. 1172 ~ 1181, 1991
5. G. C. Montanari and A. Motori, "Electrical Conduction Measurements in Aged Cables and Compensation Effect", Proceeding 5th IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Leicester, UK, pp. 22 ~ 27, July 10 ~ 13, 1995
6. E. Pultrum, et al., "Test After Laying, Diagnostic Testing using Partial Discharge Test at Site", CIGRE, 1996-Session, 15/21/33-12, 1996
7. F. H. Kreuger, Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Butterworth pp.50~182, 1989
8. Dieter König, Y. Narayama Rao, Partial Discharges in Electrical Power Apparatus, ved-verlag gmbh, pp.15~38, 1993