

논문 21-1-16

가스절연개폐기에서 용량성 전압프로브를 이용한 부분방전의 측정

Partial Discharge Measurement by a Capacitive Voltage Probe in a Gas Insulated Switch

길경석^{1,a}, 박대원¹, 최수연¹, 김일권¹, 박찬용¹

(Gyung-Suk Kil^{1,a}, Dae-Won Park¹, Su-Yeon Choi¹, Il-Kwon Kim¹, and Chan-Yong Park¹)

Abstract

An objective of this paper is to develop a partial discharge (PD) measurement device for monitoring gas insulated switches installed in power distribution system. A capacitive voltage probe was studied and designed to detect PD pulse without an electrical connection. The PD measurement device consists of the capacitive voltage probe attached outside of a bushing, a coupling network which attenuates AC voltage by 270 dB, and a low noise amplifier with the gain of 40 dB in ranges of 500 kHz~20 MHz. The sensitivity of the prototype device calculated by a calibrator was 1.98 mV/pC. An application experiment was carried out in a 25.8 kV gas insulated switch and the peak pulse of 76.7 pC was detected. From the experimental results, it is expected that the PD measurement device can be applied to online monitoring system of gas insulated switches.

Key Words : Partial discharge, Gas insulated switch, Capacitive voltage probe, Coupling network, Low noise amplifier, Online monitoring

1. 서론

지난 수십 년에 걸친 정보통신기술의 급속한 진보와 산업사회의 고도화로 모든 분야의 자동화가 이루어졌고, 이에 따라 전력수요도 급증하여 한 순간이라도 정전이 발생하면 유·무형의 많은 경제적인 손실이 발생하게 된다. 특히 전력기기에서 절연과피는 여러 가지 형태의 사고로 진전되므로 온라인 상시 열화진단에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. 대부분의 절연과피는 부분방전으로부터 진전되며, 방전량과 관계없이 절연재료를 빠르게 열화시켜 전기설비의 수명을 단축시키므로 부분방전의 발생을 측정하면 전기적 사고를 미연에 방지할 수 있다[4,5].

본 논문에서는 전력 IT기술의 일환으로 특고압

가공배전선로에 설치되어 있는 SF₆ 가스절연개폐기의 열화진단을 위한 온라인 상시 부분방전 검출 기술에 대하여 연구하였다. 가스절연개폐기에서 부분방전의 측정은 비접촉식 용량성 전압센서의 원리로 절연성능과 고주파 특성이 우수하도록 설계하였다. 또한 부분방전을 측정하기 위해 상용주파수 60 Hz 전압은 270 dB로 감쇄시키고 -3 dB의 차단주파수가 1 MHz인 결합회로망과 500 kHz~20 MHz (-3 dB) 대역에서 40 dB의 이득을 가지는 저잡음 광대역 증폭기를 제작하였다.

제안한 부분방전 측정장치는 교정용 펄스를 인가하여 기본 특성을 평가하였으며, 산출된 감도는 1.96 mV/pC이었다. 적용실험으로는 주상용 25.8 kV 가스절연개폐기에 운전전압 13.2 kV를 인가하여 부분방전펄스의 측정이 가능함을 확인하였다.

1. 한국해양대학교 전기전자공학과
(부산시 영도구 동삼동 1)

a. Corresponding Author : kils@hhu.ac.kr

접수일자 : 2007. 10. 26

1차 심사 : 2007. 12. 7

심사완료 : 2007. 12. 21

2. 검출 이론

부분방전 검출전극인 용량성 전압프로브는 그림 1과 같이 환상구조로 가스절연개폐기의 붓싱 외부에

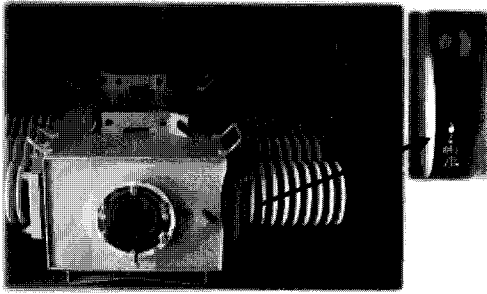


그림 1. 용량성 전압프로브의 설치.
Fig. 1. Installation of the capacitive voltage probe.

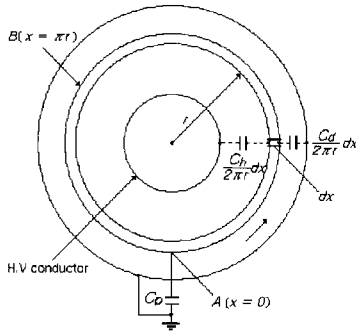


그림 2. 용량성 전압프로브의 동가구조.
Fig. 2. Equivalent structure of the capacitive voltage probe.

설치되며, 동가 구조는 그림 2와 같다. 부분방전 펄스의 검출은 가스절연개폐기의 내부도체와 검출전극 사이의 정전용량과 검출전극의 정전용량에 의한 분압으로 이루어진다.

고전압 도체층의 정전용량 C_h 와 대지표류정전용량 C_d 는 분포정수인데 비하여 저전압측 정전용량 C_p 는 집중정수이다.

이들 분포정수와 집중정수는 용량성 분압회로의 고주파 응답을 제한하게 된다. 응답특성은 다음과 같이 해석할 수 있다. C_p 의 접속점을 원점으로 하여 검출전극으로부터의 거리를 x 라고 하면 주파수 f 인 전압 V 를 전원도체에 인가하면 검출전극상에서의 전압분포 v_x 와 전류분포 i_x 는 다음의 방정식을 만족시켜야 한다[6].

$$dv_x + j\omega \frac{L_o}{2\pi r} dx i_x = 0 \quad (1)$$

$$j\omega \frac{C_h}{2\pi r} dx (V - v_x) - j\omega \frac{C_d}{2\pi r} dx v_x + di_x = 0 \quad (2)$$

여기서, $\omega = 2\pi f$, j = 복소수의 허수단위, L_o = 검출전극의 주변방향의 자체인덕턴스이다. 경계조건으로

$$x = 0 \text{ 에서 } v_x = -\frac{1}{j\omega C_p} i_x \quad (3)$$

$$x = \pi r \text{ 에서 } i_x = 0 \quad (4)$$

이라고 가정하고, 이들 경계조건을 적용하여 식(3), 식(4)을 풀면, $x=0$ 에서 v_x 의 값 즉, C_p 의 단자 전압 V_0 는 다음과 같이 된다.

$$V_0 = \frac{C_h}{C_d + C_h} \frac{1}{\frac{C_p}{C_d + C_h} \cdot \frac{g}{2} \cdot \frac{e^g + 1}{e^g - 1} + 1} V \quad (5)$$

여기서, $g = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}$, $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_o(C_d + C_h)}}$ 이다.

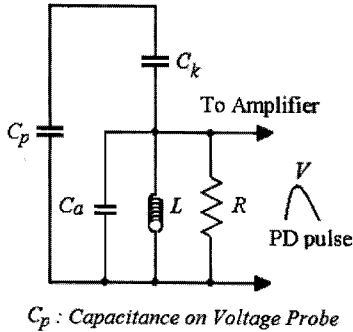
식(5)에 나타난 바와 같이 전압프로브의 출력전압은 피측정 전압원의 주파수에 따라 변화한다.

본 논문에서 제작한 검출전극은 두께 0.16 mm의 polyimide film 양면에 0.15 mm 두께의 동판을 접착시킨 구조이며, 실험 대상 가스절연개폐기에 그림 1과 같이 설치가 가능하도록 폭 9 mm, 길이 290 mm로 제작하였다. 검출전극의 일단에는 동축 케이블을 접속할 수 있도록 특성임피던스 50 Ω의 SMA형 BNC를 접속하였으며, 검출전극의 정전용량은 3.1 nF이다.

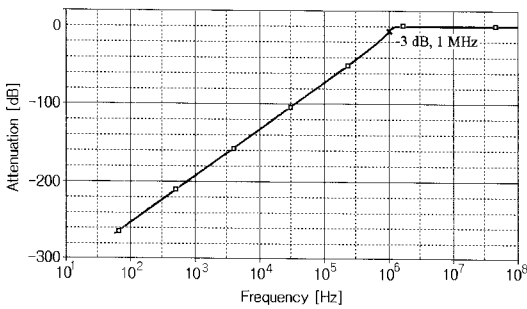
3. 부분방전 측정장치

부분방전 펄스는 수 백 kHz~수 십 MHz 대역의 미약한 신호로 전원주파수에 극히 작게 포함되어 있고, 주변 전기적 노이즈에 노출되어 있기 때문에 직접적인 검출은 불가능하다.

본 연구에서는 용량성 전압프로브로 검출된 신호 중 부분방전 펄스만을 증폭기에 통과시키기 위해 결합회로망과 미소 신호를 증폭시키기 위한 저잡음·고주파 증폭기를 설계하였다.



(a) 구성



(b) 주파수 응답

그림 3. 결합회로망.

Fig. 3. Coupling network.

결합회로망의 구성과 주파수 특성은 그림 3에 나타내었으며, 출력 전압 V 는 식(6)과 같다[7].

$$V = \frac{q}{K + C_a \left(1 + \frac{K}{C_k}\right)} \exp\left(-\frac{t}{2}\right) \cos \omega t \quad (6)$$

여기서 q 는 방전펄스의 크기, m 은 회로의 합성정 전용량, $\omega = \sqrt{\frac{1}{Lm} - \frac{1}{4R^2m^2}}$ 이다.

제작한 결합회로망의 주파수 응답은 그림 3(b)와 같이 상용주파수 60 Hz는 -270 dB로 감쇄시키고, -3 dB의 저역차단주파수가 1 MHz로 부분방전 펄스 검출에 적합한 특성이다.

그림 4는 결합회로망의 출력에 접속하여 미소부분방전 펄스를 증폭시키기 위한 저잡음 증폭기의 회로도이다. 저잡음 광대역(1.6 nV/√Hz, 330 MHz) 연산증폭기를 2단으로 구성하여 고이득으로 고역차단주파수를 제한하지 않도록 하였다.

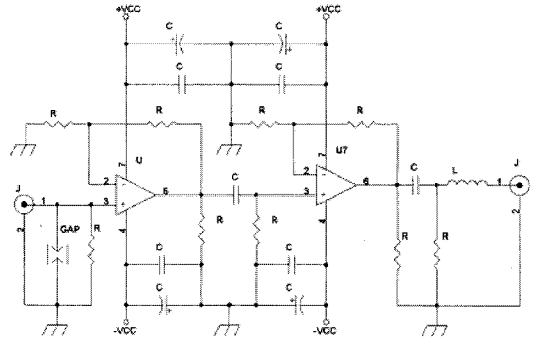


그림 4. 저잡음 증폭기의 회로.

Fig. 4. Circuit of the low noise amplifier.

실제 · 제작한 증폭기의 이득은 40 dB이며, -3 dB의 주파수 대역은 500 kHz~20 MHz로 결합회로망에서 전달된 부분방전 펄스를 감쇄없이 증폭시킬 수 있는 특성이다.

4. 교정 실험

검출된 부분방전펄스의 검보기 전하(apparent charge)의 크기를 산출하기 위하여, 이미 알고 있는 크기의 방전전하를 인가하여 검출회로의 교정이 필요하다[8].

본 연구에서는 전용의 교정펄스발생기(CAL1A, 1 ~ 100 pC, Pos./Neg.)를 이용하여, 그림 5에 나타낸 바와 같이 가스절연개폐기의 고정도체와 외함사이에 교정펄스를 입력하고, 검출신호의 크기로부터 측정장치의 감도(mV/pC)를 산출하였다.

그림 6에 50 pC의 부극성 펄스를 인가하였을 때, 증폭기 출력에서 검출된 파형의 예를 나타내었다. 증폭기 출력 전압이 98 mV이므로 부분방전 측정장치의 환산감도는 1.96 mV/pC 임을 알 수 있다.

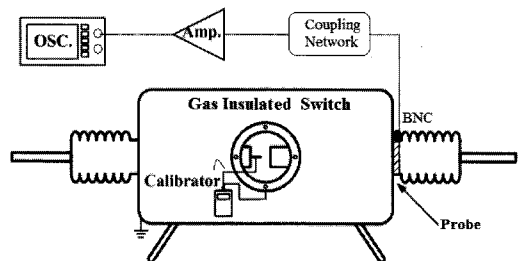
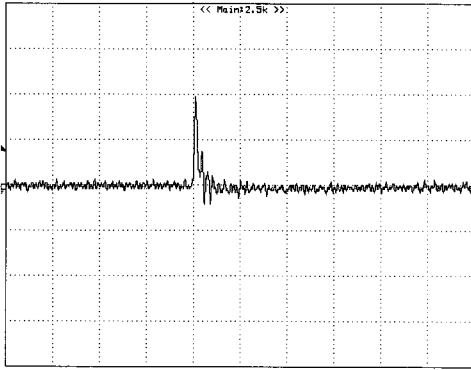


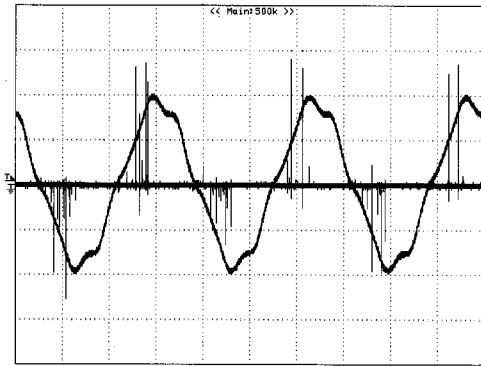
그림 5. 교정 실험계.

Fig. 5. Calibration experiment system.

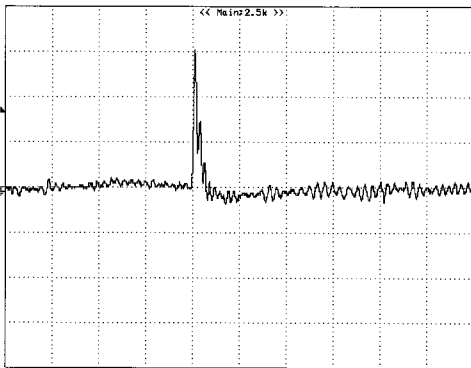


[50 mV/div, 500 ns/div]

그림 6. 교정펄스에 대한 응답.
Fig. 6. Response to a calibration pulse.



Ch.1 인가전압파형 [10 kV/div, 5 ms/div]
Ch.2 부분방전펄스 [50 mV/div, 5 ms/div]
(a) 전원전압-부분방전펄스



[50 mV/div, 500 ns/div]
(b) 부분방전 펄스

그림 7. 부분방전 펄스의 예.
Fig. 7. Example of a partial discharge pulse.

관측장치 즉, 오실로스코프의 측정범위를 고려하면, 10 pC(약 20 mV) 이상이 되어야 안정적으로 측정이 가능하다.

5. 적용 및 분석

25.8 kV 가스절연개폐기의 내부 고정전극 도체에 부분방전이 발생하도록 침전극을 설치하고, 외부에서 고정전극과 외함사이에 고압변압기(AC 220 V/20 kV)를 연결하여 대지전압에 해당하는 AC 13.2 kV를 인가하였다.

그림 7에 검출된 부분방전펄스의 예를 나타내었으며, 전원전압과 부분방전펄스의 위상관계 및 고속 샘플링 영역에서 방전 펄스의 크기를 알 수 있다. 본 실험에서는 최대 76.5 pC(150 mV)가 검출되었다.

6. 결론

본 논문에서는 25.8 kV 주상용 가스절연개폐기에서 부분방전의 발생을 측정하기 위해 비접촉식 용량성 전압프로브를 적용하고, 검출 특성에 적합한 결합회로망, 증폭기로 구성되는 부분방전 측정장치를 설계·제작하였다. 결합회로망은 -3 dB의 저역차단주파수가 1 MHz로 60 Hz 교류전원전압은 270 dB로 감쇄시키며, 수 MHz이상의 부분방전펄스는 감쇄없이 전달하는 특성이다. 미소 부분방전펄스의 증폭을 위해 주파수 대역 500 kHz~20 MHz (-3 dB)에서 40 dB의 이득을 가진 저잡음 증폭기를 제작하였다.

제안한 부분방전 측정장치는 가스절연개폐기에서 설치하여 교정실험결과, 감도는 1.96 mV/pC로 산출되었으며, 관측장치의 특성을 고려하면 10 pC 이상이 되어야 분석이 가능하다. 특고압 배전선로에서와 같이 상-대지간에 13.2 kV를 인가하는 적용 실험에서는 임의적으로 부분방전을 발생시켜 부분방전 펄스를 관측할 수 있었다.

실험결과로부터 본 논문에서 제안한 부분방전 검출장치는 충전부에 비접촉식으로 설치되므로 기설 및 신설 개폐기에 적용이 가능하며, 주상용 가스절연개폐기의 온라인 원격감시에 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] P. D. Agoris, S. Meijer, and J. J. Smit, "Evaluation of On-line Insulation Condition Assessment Techniques for power transformers", International Symposium on High-Voltage Engineering(ISH), Beijing, China, 2005.
- [2] 길경석, 박대원, 김일권, 최수연, 박찬용, "부분방전에 의한 음향신호의 검출과 위치추정에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 20권, 10호, p. 907, 2007.
- [3] S. Tenbohlen, D. Uhde, J. Poittevin, H. Borsi, P. Werle, U. Sundermann, and H. Matthes, "Enhanced Diagnosis of Power Transformers using On- and Off-line Methods: Results, Examples and Future Trends", CIGRE Paris, paper 12-204, 2000.
- [4] 황창호, 박신우, 김남열, 허창수, "평등전계에서 SF₆/CF₄ 혼합가스의 AC절연내력특성", 전기전자재료학회논문지, 20권, 4호, p. 381, 2007.
- [5] 권태호, 이종길, 이준호, "광섬유 센서를 이용한 절연유내의 부분방전 위치검출에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 16권, 9호, p. 838, 2003.
- [6] 이복희, 길경석, 이형호, 정상진, 하성철, 김상진, "가스절연 개폐설비에서 급준성 과도과전압의 측정장치", 대한전기학회논문지, 43권, 10호, p. 1721, 1994.
- [7] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworth, p. 50, 1989.
- [8] IEC Publication 60270, High-voltage test techniques- Partial discharge measurement, 2000.