

고전압설비에서 발생하는 부분방전 검출용 전계센서의 설계 및 특성 검토

論文
52C-10-2

Design and Application of Electric Field Sensor for Measuring PD Signals in High Voltage Equipments

李 剛 遠* · 姜 聲 華** · 林 基 祖***
(Kang-Won Lee · Seong-Hwa Kang · Kee-Joe Lim)

Abstract - It is very difficult and dangerous to measure PD(Partial Discharges) from high voltage equipments in outdoor situation. But that is very important thing for preventing them from more serious accident by defects made by insulating degradation. This paper provides useful method to detect PD signals easily without any dangerous situation. Electric field sensor by the principle of capacitor can detect PD signals without direct connection between sensor and high voltage equipment and has very wide frequency range suitable for noise rejection. Electric field sensor and related circuit for processing PD signal show good performance as a PD sensor when it is applied to simulated high power equipment generating PD pulses.

Key Words : PD, Electric field sensor, Frequency response, Ψ -q-n, Ψ -n

1. 서 론

고전압 절연시스템에서의 부분방전은 절연파괴가 발생하기 전에 발생하여 절연의 열화정도를 사전에 파악할 수 있는 정보를 가지고 있다. 절연물 내에서의 부분방전은 크기는 같으나 서로 다른 극성을 가진 두 전하가 임의의 미소 거리만큼 떨어진 것과 같이 표현될 수 있다[1]. 절연물 내에서 부분방전이 발생하였을 때, 두 전하는 표면방전 또는 스트리머방전을 통하여 결합되고, 전하의 양이 변화하면서 변화된 전계 크기의 변화는 전계센서에 의하여 검출된다[2,3]. 전계센서는 일종의 용량성 결합 안테나로도 불리며, 매우 간단한 구조로 이루어져 있다. 본 논문에서는 부분방전을 측정하기에 적합한 전계센서를 설계하고, 그 동작원리를 검토하였으며, 전계센서로부터 출력된 신호의 시간적 특성과 주파수 응답 특성 등을 고찰하여 본 전계센서에 적합한 정합회로를 구성하였다. 또한 기존 IEC270에 의하여 부분방전 파형 및 분포의 비교를 하여 부분방전측정에 대한 실제적 적용가능성도 검토하였다.

2. 실험

고전압장치 내에서 부분방전을 발생시키는 결합의 대부분은 절연물 내에 존재하는 보이드 또는 고전압축의 돌기물 그

리고 전력케이블 등을 지지하는 절연물 표면의 불균일성에 의한 것 등이다. 이러한 결합들에서는 코로나 또는 스트리머 형태로 방전이 발생한다. 코로나는 방전크기가 작고, 이웃한 전력장치들의 노이즈와 구별하기 힘들 정도로 크기가 작으며, 주파수분포도 낮은 주파수(10M이하)영역에 존재하고, 절연열화에 미치는 영향이 작다.

따라서 본 논문에서는 주로 발생한 방전크기가 크고(수십~수백 pC), 높은 주파수 영역에 분포하는 스트리머방전을 모의하여 실험하였다. 모의된 스트리머방전 발생장치의 구조는 침단 반경이 약 0.5mm인 침대 평판전극구조로 이루어졌으며, 갭길이는 1cm이다. 평판의 가장자리는 가능한한 전계의 집중을 막기 위하여 원형을 이루도록 제작되었다. 이러한 침대 평판전극구조는 일종의 다이폴 안테나 역할을 하며, 방전이 발생한 경우 전자기파를 외부로 방사할 수 있다.

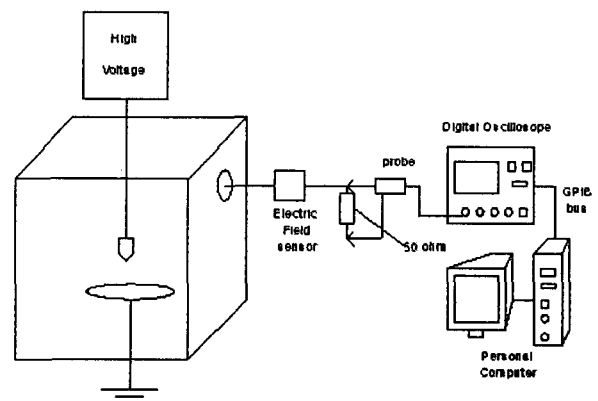


그림 1 실험장치
Fig. 1 Experimental setup

* 準 會 員 : 韓國鐵道技術研究院 研究員
** 正 會 員 : 忠清大學 産業安全科 副教授 · 工博
*** 正 會 員 : 忠北大國 電氣電子工學副 教授 · 工博
接受日字 : 2003年 5月 15日
最終完了 : 2003年 9月 2日

전계센서를 설치하기 위한 외함의 구성은 50cm × 50cm × 50cm의 정육면체구조로 제작하였으며, 외함의 외벽에는 변압기 및 전력기기의 철제외함을 모의하여 알루미늄호일로 처리하고, 그위에 전계센서를 설치하였다. 이때 외함은 침대 평판전극과 전기적으로 절연되어 있는 구조이다. 그림 1은 이러한 실험구성도이며, 부분방전개시전압은 3.1kV(60Hz)였고, 부분방전 펄스가 정주기(0~180°)에서 발생하였을 때 전압이 3.3kV이 었다. 전계센서로부터 출력된 신호는 50Ω의 단말저항 양단에서 디지털 오실로스코프(tektronix, 2Gs/s)의 프로브를 통하여 파형을 관측하였고, 관측된 신호는 GPIB로 인터페이스하여 컴퓨터로 전송 및 저장하였다.

2. 실험결과 및 고찰

전자기 이론에 의하면 거리 d만큼 떨어지고 크기는 같으나 극성이 다른 두 전하(+Q, -Q)로 이루어진 쌍극자로부터 거리 r 만큼 떨어진 곳의 전계의 세기는 쌍극자 모멘트 (Q×d)에 비례하고 r³에 반비례하므로, 부분방전에 의하여 변화된 전계의 세기는 외부 전계센서에 의하여 검출되며, 부분방전에 의해 변화된 전계의 세기 (ΔE)는 부분방전의 크기(부분방전전하량)의 변화분 (ΔQ)과 서로 비례관계가 존재한다는 것을 알 수 있다.

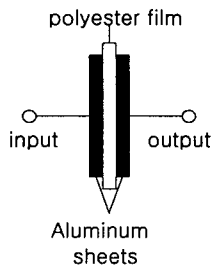


그림 2 전계센서의 구조
Fig. 2 Electric field sensor

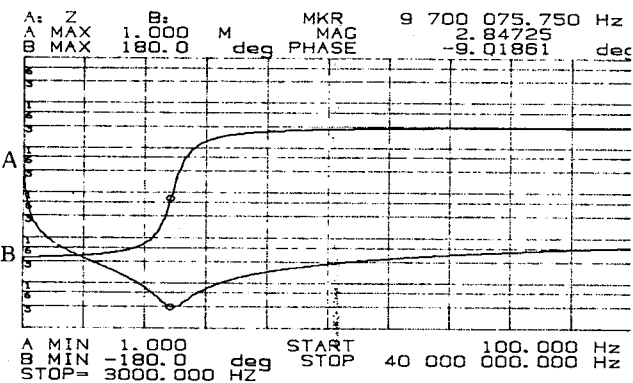


그림 3 전계센서의 주파수 특성(A:임피던스, B:위상)
Fig. 3 Frequency response of the sensor(A: Impedance, B: Phase)

즉 $\Delta E \propto \Delta Q$ 이다. 본 논문에서 제작된 전계센서는 두장의 알루미늄판(10cm × 25cm, 두께:15 μm)의 사이에 polyester film이 끼워진 구조로 이루어져 있으며, 이때 폴리에스터 필

름의 두께는 0.5mm이며, 폴리에스터의 유전율은 약 3.16이었다. 이러한 센서의 구성은 그림 2와 같다. 전계센서를 일반적인 커패시터로 보고 계산된 커패시턴스의 값은 1,400nF이었고, 임피던스 분석기(HP4194A)에 의하여 측정된 결과는 1kHz에서 약 1,180nF이었으며, 이러한 차이는 전계센서 제작 시 치수의 부정확성 및 알루미늄필름과 폴리에스터 필름 사이의 밀착성에 의하여 발생된 오차라고 생각된다. 임피던스 분석기에 의하여 100Hz ~ 40MHz사이에서 측정된 전계센서에 대한 주파수 응답곡선은 그림 3과 같으며, 이때 공진주파수는 9.8MHz(1.7Ω)이었고, 이러한 특성은 전계센서가 일종의 대역통과필터로서도 작용할 수 있다는 것을 보여준다.

그림 4는 부분방전원(V_{PD})을 전원으로 한 전계센서를 이용한 측정회로의 등가회로이다. 등가 커패시터 C_e를 통하여 흐르는 펄스형 변위전류 I_{PD}는 거의 $\omega C_e V_{PD}$ 값으로 표현될 수 있으며, 저항 R의 양단에 걸리는 전압 V_R은 RI_{PD}로서 표현될 수 있다. 이때 저항 R은 커패시터의 리액턴스 X_C보다 상당히 작은 값이다.

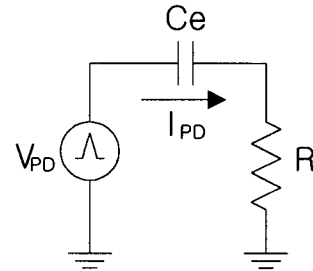


그림 4 전계센서의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of the sensor

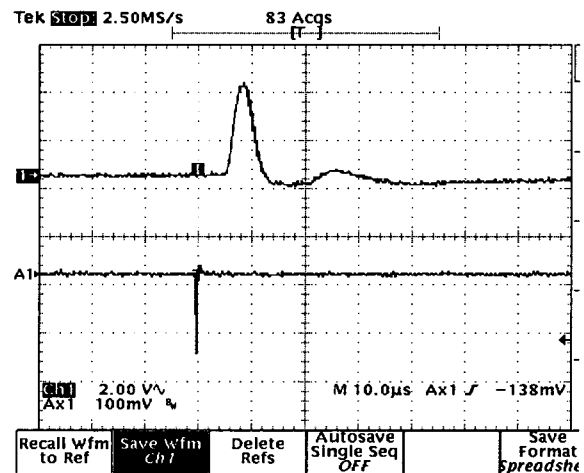
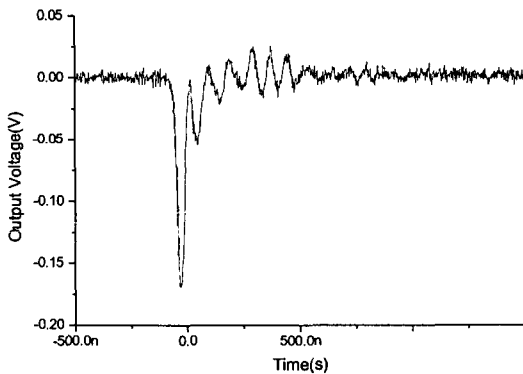


그림 5 전계센서(A1) 및 PD검출기(1)의 출력파형
Fig. 5 Output waveform of electric field sensor(A1) and PD detector(1)

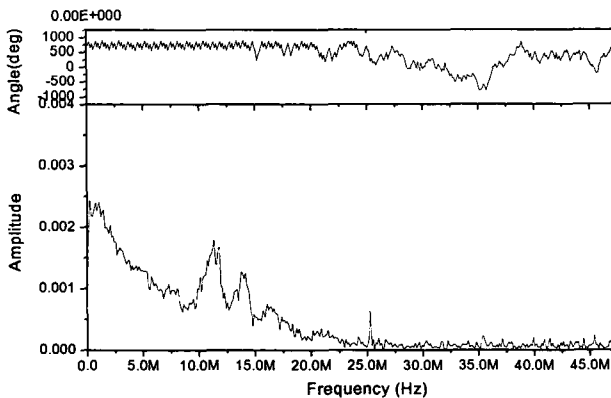
IEC270에 의한 부분방전계측기(Biddle사)의 출력단에서의 파형과 전계센서의 출력파형을 동시에 측정하여 비교한 결과가 그림 5이다. 두신호의 시간 차이는 부분방전계측기의 저주파 영역(30kHz~300kHz)에서의 응답과 신호처리시스템에서의 시간지연에 의하여 발생한다. 다른 한편으로 전계센서

로부터 획득된 신호는 상당히 빠른 수 ns의 상승시간과 하강시간을 가지고 있고, 고주파영역에 분포하므로(기중에서 수M~수십MHz) 낮은 샘플링회로에 적용시키기 위해서는 첨두치를 시간적으로 지연시켜 측정할 수 있도록 하는 Peak Detector가 필요하다.

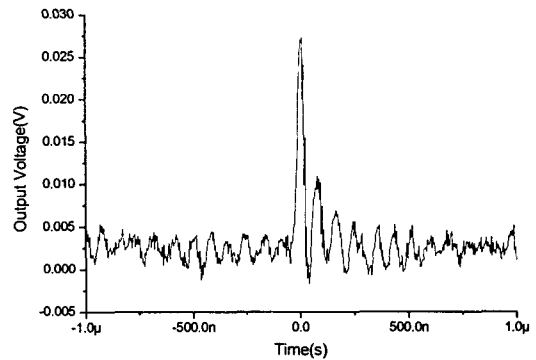
그림 6(a)는 인가전압의 정주기(0~180°)에서 발생된 부분방전을 전계센서로 검출한 파형 및 그 주파수응답을 보여주며 대부분의 주파수 성분이 30MHz이하에 존재하고 있음을 알 수 있고, 그림 6(b)는 인가전압의 부주기(180~360°)에서 측정된 파형과 주파수응답을 보여주며, 정주기에 비해 신호의 크기가 작고 주파수 성분들의 크기도 작으며 약12MHz에서 약한 첨두치를 보여준다. 일반적으로 부분방전계측기에 의하여 출력된 파형과는 반대의 결과를 보여주는데, 이러한 결과는 스트리머 또는 코로나가 침대평판전극구조에서 발생하였을 때, 쌍극자의 경우처럼 생각하면 쌍극자가 회전한 결과로서 생각된다. 즉 방전이 개시되기 전에는 외함의 전계센서에는 일정한 전하가 전계를 발생시킨 결과로서 센서의 출력이 0이 되지만 일단 방전이 시작되면, 방전된 전하에 의하여 극성이 변화하고 변화된 전하에 의하여 전계센서에는 전계의 세기가 변화되어 그 변화분이 출력된다. 이때 방전된 극성의 전하 및 전자는 서서히 감소하고 다시 원래의 상태로 되돌아간다. 이러한 과정을 거쳐 전계센서로 검출된 파형은 그림 6과 같다.



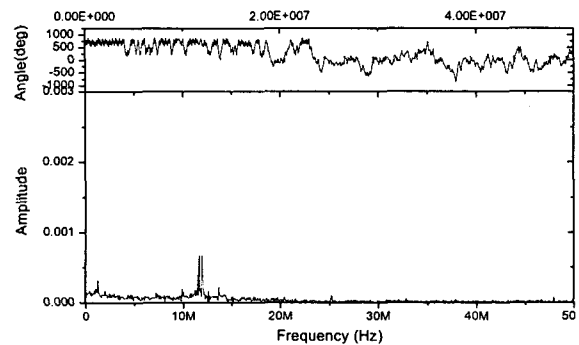
(a) 전계센서 출력



(a) 주파수 응답



(b) 전계센서 출력



(b) 주파수 응답

그림 6 센서의 출력파형 및 주파수 응답

Fig. 6 Waveforms and frequency responses of the sensor

그림 7의 윗부분의 파형은 부분방전계측기로 검출한 한 주기 동안의 부분방전펄스 검출파형이고, 아래 부분의 파형은 전계센서의 출력파형으로서, 관찰된 파형의 비교를 통하여, 본 논문에서 제작된 전계센서는 원래의 예상과는 달리 코로나와 같은 미약한 신호의 검출에도 용이하여, 상당히 민감도가 좋은 센서라는 것을 알 수 있다. 참고로 공기 중에서 발생하는 부분방전을 코로나로 정의하고 있다.

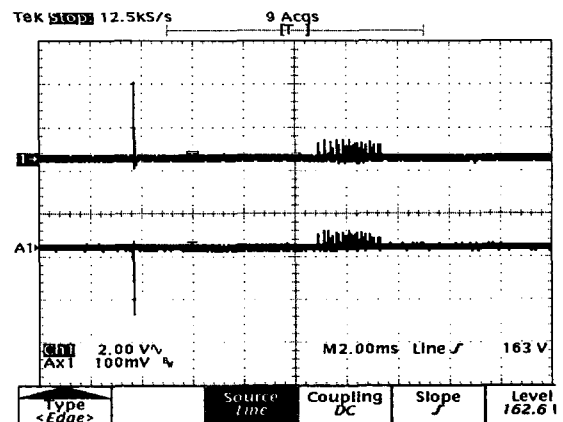
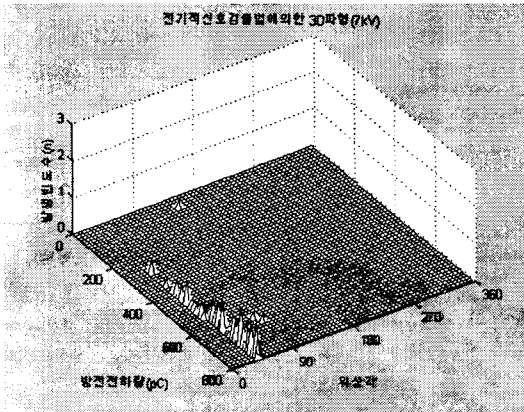


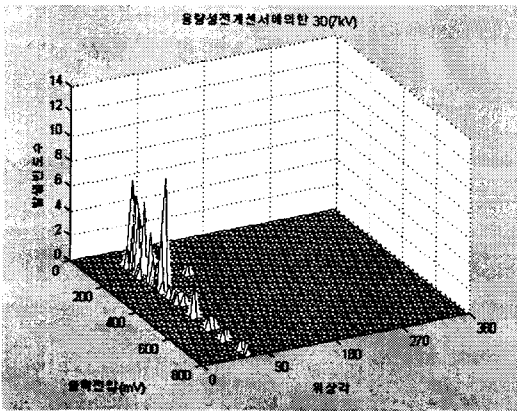
그림 7 검출된 코로나 방전 파형

Fig. 7 Detected corona

이러한 조사결과를 토대로 전기적 검출법과 함께 전계센서의 한주기당 파형을 낮은 샘플링(1Ms/s)으로 관찰하게 되면 하나의 펄스파형으로서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 펄스파형을 여러 주기 동안 계속 측정하면 각 위상별 크기와 발생빈도에 대하여 하나의 패턴으로서 일종의 3차원분포를 이루게 되며, 그 결과가 그림 8에서 보여지며, 이때의 인가전압은 7kV이고, 300주기동안 측정된 결과이다. 그림 8(a)는 부분방전측정기를 이용하여 전기적으로 검출한 $\phi-q-n$ 분포이고, 그림8(b)는 용량성 센서를 이용하여 관측한 출력전압(v)에 의한 $\phi-v-n$ 분포이며, 방전전하량과 비교하기 위한 것이다. 그림 8(a)와 (b)를 비교하면 알 수 있듯이 전계센서를 이용한 측정이 발생위상각과 패턴에 있어서 전기적 검출법에 의한 것과 매우 유사하지만, 전계센서측이 낮은 부분방전량의 영역에서 발생빈도가 오히려 증가하는 현상은 본 전계센서에 대하여 적절한 필터회로를 사용하지 않은 결과로 생각된다. 그림 8(a), (b)의 분포에 대한 비교는 전계센서가 부분방전계측기에 비하여 부분방전 발생양상을 충실하게 재현하고 있다는 것을 보여주며 이것은 전계센서의 감도 및 응답속도가 부분방전계측기에 비하여 매우 좋다는 것을 확인시켜 주었다.



(a) $\phi-q-n$ of electrical PD detecting method



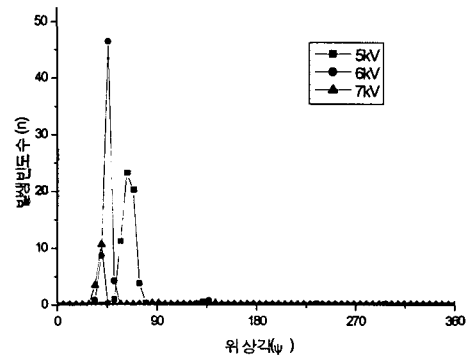
(b) $\phi-v-n$ of electric field sensor

그림 8 전기적 검출법과 전계센서법의 비교

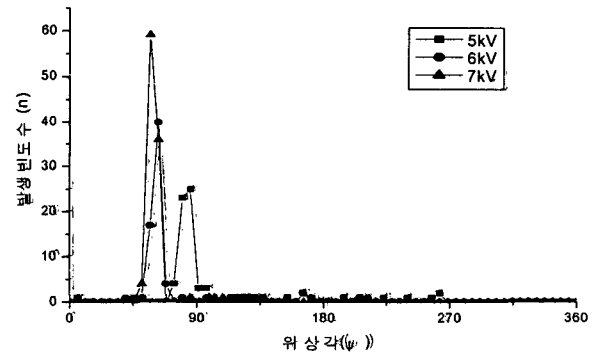
Fig. 8 Electrical PD detecting method and electric field sensor

그림 9는 전압을 각각 5kV, 6kV, 7kV로 인가한 경우, 전기적 검출법으로 300주기 동안 측정된 결과와 전계 센서를 이용하여 300주기 동안 측정된 결과를 위상에 따른 발생빈도수($\phi-n$)와 위상에 따른 방전크기($\phi-q$)분포 및 위상에 따른 센서출력 전압($\phi-v$)분포로 나타내어 비교한 결과이다.

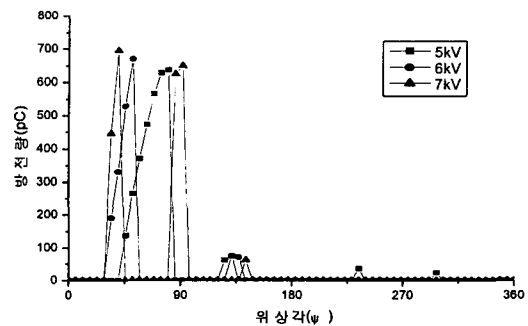
그림 9(a),(b)에서 알 수 있듯이 각각의 인가전압 하에서 전기적 측정법 및 전계센서측정법 모두 부분방전이 거의 0° 와 90° 사이에서 측정되었다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 전기적 검출법의 경우 전압이 증가함에 따라 발생빈도수가 감소하였으나, 전계센서의 경우 전압이 증가함에 따라 발생빈도수가 증가하였다.



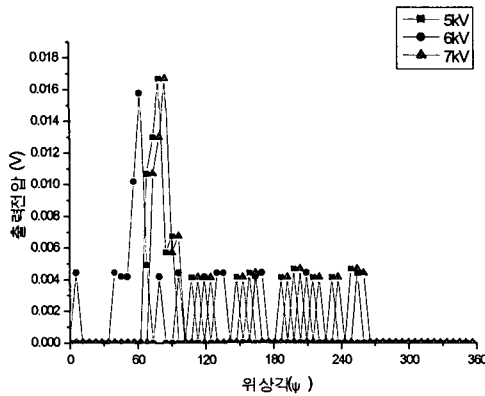
(a) $\phi-n$ distribution of electrical PD detecting method



(b) $\phi-n$ distribution of capacitive electric field sensor



(c) $\phi-q$ distribution of electrical PD detecting method



(d) $\phi-v$ distributon of electric field sensor

그림 9 전기적 검출법과 전계센서의 측정치 비교

Fig. 9 Results of electrical PD detecting method and electric field sensor

또한, 그림 9의 (c)와 (d)에서는 위상각에 따른 전기적 검출법에 의한 $\phi-q$ 분포와 전계센서의 출력에 의한 $\phi-v$ 분포이다. 그림 9(c)의 경우는 방전전하량이 인가전압에 따라 증가를 하지만, 그림 9(d)의 경우는 6kV의 인가전압에서의 출력최대전압이 5kV의 인가전압인 경우보다 작게 나오는 것을 관찰 할 수 있다. 이러한 차이는 낮은 샘플링주파수에 기인하는 것으로 보여진다. 샘플링주파수가 충분히 높지 않은 경우 일부의 펄스파형에 대하여 관찰할 수 없는 결과가 생길 수 있다. 또한 그림 9(d)에서 양의 주기와 음의 주기에서 각 인가전압마다 계속 나타나는 약 0,0045V 정도의 출력전압은 노이즈로서 생각할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 변압기 및 기타 전력용 기기에서의 절연이상에 의한 부분방전을 검출할 수 있는 일종의 용량성 전계센서를 제안하였다. 제작된 전계센서는 일종의 대역통과필터 ($f_c: 9.7\text{MHz}$)의 기능을 하는 것으로 확인되었고, 고전압기기에서 부분방전이 발생한 경우, 측정자의 위험도를 저감시키며 효과적으로 부분방전을 측정할수 있도록 1차측과 2차측이 절연된 구조로 되어 있으며, 수 ns의 펄스폭을 가진 부분방전신호의 측정 시 좋은 감도와 빠른 응답속도를 보여준다. 그러므로 전계센서는 부분방전신호파형의 검출 및 부분방전의 발생양상을 관찰하기 위한 좋은 도구임을 확인하였고, 전기적 측정법(IEC270)에 의한 부분방전계측기와 전계센서의 측정결과에 대한 각각의 3차원분포($\phi-q(v)-n$)와 2차원분포($\phi-q(v), \phi-n$)의 비교분석에 의하여 전계센서의 부분방전신호측정예의 적용타당성 및 성능을 다시 한번 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Lutz Niemeyer, " A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling". IEEE Tans. on Dielectrics and

Electrical Insulation, Vol 2, No.4, pp510-528, August 1995.

[2] Z. Liu, T.R. Blackburn, B.T. Phung and R.E. James. "Detection of Partial Discharge in Solid and Liquid Insulation with An Electric Field sensor.", Proceedings of International symposium on Electrical Insulating materials, P2-17, pp661-664, sept.27-30, 1998.
 [3] Judd, M.D., Farish, O., and Pearson, J. S., "UHF couplers for gas insulated substations-a calibration technique", IEE proceedings, Sci. Meas. Technol., 144(3), pp117-122, 1997.
 [4] F. H. kruger, Partial Discharge Detection in High-voltage Equipment, Butterworth & Co. Ltd, pp. 105-106, 1989

저 자 소 개



이 강 원 (李剛遠)

1970년 2월 22일생. 1995년 충북대 전기공학과 졸업. 2001년~현재 동 대학원 박사과정, 2003~한국철도기술연구원 연구원
 E-mail : wklee@krii.re.kr



임 기 조 (林基祖)

1973년 한양대 공과대학 전기공학 학사, 1986년 한양대 대학원 전기재료 박사. 1977-1981 국방과학연구소 연구원, 1983년~현재 충북대학교 전기전자공학부 교수, 대한전기학회 편집이사, 2003~현재 충북대 기획협력처장
 E-mail : kjlim@cbu.ac.kr



강 성 화 (太權姜聲華)

1963년 2월 22일생. 1987년 충북대 전기공학과. 1997년 충북대 공학박사. 1991~1993 생산기술연구원 연구원, 1998~1999 미국 MIT 고전압연구실 Visiting scientist, 1993~현재 충청대학 산업안전과 부교수, E-mail : shkang@ok.ac.kr