

가스절연기기(GIS)의 인위적 결함에 의한 부분방전의 검출을 위한
Probe-Type Pockels Sensor의 적용 가능성

류철취*, 이재호*, 마지훈*, 강원종**, 장용무*, 구자윤*
한양대학교 전기공학과*, LG산전**

A possible application of the partial discharge measurement due to artificial defect using Pockels sensor
in GIS(Gas Insulated Switchgear)

Cheol-hwi Ryu*, Jae-ho Lee*, Ji-hoon Ma*, Won-jong Kang**, Yong-moo Chang*, Ja-yoon Koo*

SMDT Lab., Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ.* LG Industrial System**

Abstract - 본 연구는 국내에서 최초로 제안되고 적용가능성이 입증되어 설계, 제작된 Probe-type Pockels sensor(HY-Pockels Sensor)를 GIS등의 고전압 장비들에 응용한 레이저 부분방전 진단 시스템 개발을 목표로 하고 있다. 이러한 목적으로, 170kV 급 실 규모 GIS 내부의 전류 도체에 다양한 곡률 반경의 침 전극을 부착시켜 부분방전에 기인된 불평등 전계를 형성시켜 개발된 센서의 실 규모 적용 가능성을 고찰하였다. 본 레이저 계측 시스템은 He-Ne laser, single·multi-mode optical fiber, 2x2 50/50 laser to single mode fiber coupler, probe-type Pockels sensor, photo detector 등으로 구성되어 레이저의 진행을 유도하고, 신호의 특성을 분석하였다. probe-type Pockels sensor로부터의 출력 신호는 photo detector를 통해 전기적 신호로 변환되어 digital oscilloscope에 의해 측정되고, 또한 PC를 통해 데이터의 저장과 통계적, 분석적 처리 과정을 수행하게 된다.

본 연구의 결과로서 부분방전원에서 생성된 방전 신호에 대한 거리에 따른 센서 감도 결정, 그에 대한 센서 감도의 보정·향상, 전계의 세기의 변화에 따른 센서의 선형성 등이 도출되었고, 이러한 실험결과를 통해 실 GIS(170kV급) 내부에서 발생하는 부분방전의 검출에 본 레이저 부분방전 진단 시스템의 적용 가능성이 제시되었다.

1. 서 론

현 사회는 고도로 산업화되어 있고, 이에 따른 전력의 소비가 증가함에 따라 전력 설비의 용량이 거대화되어 전력 공급에 있어서 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 따라서 이러한 설비들의 사고 예방·진단을 위하여 많은 방법들이 적용되어 왔으며, 그 중에서 부분 방전 검출을 이용하는 방법은 여타 측정 방법에 비해 많은 장점을 지니고 있어 광범위하게 연구, 적용되고 있다.[1][2]

부분방전을 측정하는 방법에는 전기적 측정 방법과 초음파 측정 방법 등이 있다. 전기적 측정방법으로는, 변압기의 경우 부분방전에 수반되는 전류 펄스를 중성점 접지에 부착한 Rogowski coil이나 부상의 탭에서 발생하는 부분방전 신호를 검출하는 전류 측정 방법 등이 있다. 이들 방법의 경우 부분방전 전기 신호를 직접 측정할 수 있으나, 부분방전 발생 위치의 추정이 불가능하다. 한편, 초음파 측정 방법은 설비의 외함에 부착한 초음파 센서를 이용하는 측정방법으로, 부분방전의 발생 위치의 추정이 가능하지만, 센서의 출력 크기가 매우 미약한 단점이 있다. 또한 위의 방법들은 다단계의 증폭 장치가 필요하며, 외부 noise의 영향이 심각하게 나타나는 등 여러 가지 문제로 인해 현장 적용에 상당한 어려움이 있는 것으로 인식되고 있다. 이러한 문제점들로 인해 본 연구실에서는 초고압 설비 내부에서 발생하는 부분방전을 직접 검출하기 위하여 전기 광학 효과에 기초를 둔 레이저 부분 방전 진단 시스템을 국내 최초로 제안하여 연구한 결과를 보고한 바 있다.[3][4][5] 전기 광학 효과는 결정에 전계를 인가하여 결정의 굴절률이 변화함에 따라 이를 통과하는 레이저광이 변조되는 현상을 의미하는 것으로, 일반적으로 전압(전계) 측정을 위한 광분압기 등에 많이 적용되고 있다.[6] 포켈스 센서를 이용한 전압(전계) 측정법은 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 첫째, Pockels 소자인 LiNbO₃결정은 유전율이 상당히 크기 때문에 측정하고자 하

는 전계를 거의 왜곡시키지 않는다. 둘째, 전계의 시간적 변화에 따른 응답 특성이 매우 좋으며, 이러한 센서의 소형화가 가능하다. 셋째, 측정된 광 신호 정보는 optical fiber에 의해 전달되므로 외부 전자기장에 의한 영향을 전혀 받지 않는다. 넷째, 이러한 레이저 측정 시스템은 DC에서 GHz까지 광범위한 주파수 응답 특성을 갖는다.[7] 이러한 특성들을 이용하여, 본 논문에서는 이미 발표된 연구 결과를 이용해 SF₆ 가스절연차단기(GIS, Gas Insulated Switchgear)에 임의로 부분 방전이 발생하도록 침 결함을 삽입하여, 결함에 의해 발생하는 부분방전(corona discharge)을 본 레이저 진단 시스템을 이용해 검출하고 분석한 결과를 발표한다.

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 방법

초고압 GIS에서 자주 발생하는 도체부 돌기 결함(high voltage conductor protrusion)을 모의하기 위하여 170kV급 단상 GIS의 도체 내부에 침결함을 삽입하여 부분방전을 발생시켰다. 전원 장치는 최대 100kV의 교류 전압 인가가 가능한 고전압 시험기(Hipotronics)를 사용하였고, 본 실험을 위한 레이저 진단 시스템의 개략도는 그림 1.에 나타내었다.

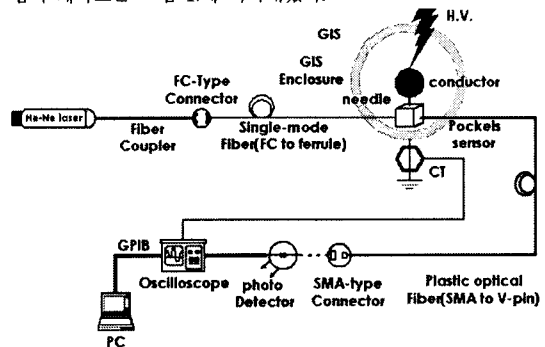


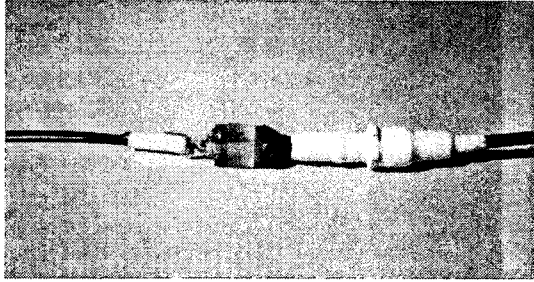
그림 1. 실험 장치

그림 3.에서 보는 바와 같이 GIS내부 도체의 침단에 5 μ m, 10 μ m, 100 μ m, 200 μ m의 곡률반경을 가진 OGURA 침을 삽입해 각각의 경우에 발생하는 corona 방전을 측정하였고, IEC60270 규격을 만족하는 부분방전 측정기에 의해 교정된 CT센서로 측정 한 결과 100pC이 발생되었다.

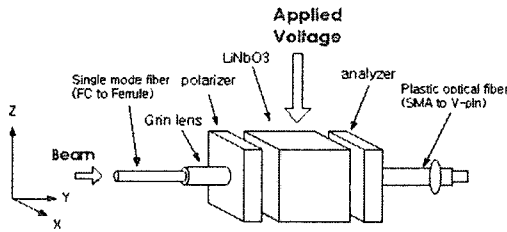
광원은 He-Ne laser(파장 : 632.8nm, 출력 : 10mW, 편광 : 500:1 선형편광)를 사용하였고, 레이저 광은 laser coupler를 거쳐, single-mode fiber(core : 4 μ m, clad : 125 μ m)를 통해 Pockels sensor에 입사되어 진행하면서 부분방전에 의해 발생하는 전계의 불규칙적 변화에 비례하여 변조된다. sensor를 통과한 변조광은 Plastic optical fiber(core : 1000 μ m)로 전송되어 Photo Detector로 전달되며, 이 검출기 내부에서 광 신호가 전기적 신호로 변환되어 출력된다. 출력 신호는 digital oscilloscope에 의해 측정된다.

이 모든 실험은 170kV급 실 GIS에서 이루어졌으며, 외부 noise로부터 차폐되지 않는 실제 현장과 비슷한 조건의 장소에서 행해졌다.

corona 방전 검출에 사용된 probe-type Pockels sensor는 그림 2.에 나타내었다. 연구를 위해 설계, 제작된 HY-Pockels sensor는 5mm×5mm×5mm의 정육면체로 transverse-mode 응용을 위해 X-Z면이 연마된 Y-cut LiNbO₃ 결정과 상용 diachronic 편광기를 5mm×5mm 절단한 편광기와 검광기로 구성되어 있고, sensor와 single-mode fiber와의 접촉부에 Grin Lens를 삽입해 레이저 광의 초점을 검광기면에 집중시켜 레이저의 alignment를 용이토록 했다.



(a) 센서부 구성 사진



(b) 센서부 구성도

그림 2. 자체 제작된 probe-type Pockels sensor

전압은 GIS 도체에 직접 인가하였고, 센서의 위치 조절을 위해 GIS 내부에 전계에 영향을 거의 주지 않는 밀착형 지지대를 부착한 실험 장치를 자체 제작하였다.

그림 3.에 GIS 내부의 침 결합 삽입 위치와 그에 따른 sensor의 위치변화 좌표 및 GIS 내부의 구조를 나타내었다.

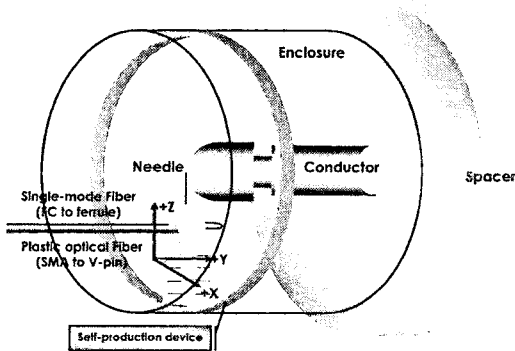


그림 3. GIS 내부 구조 및 센서의 위치

2.2 결과 및 고찰

2.2.1 인가전압에 대한 HY-Pockels sensor의 선형성

최초 침 결합과 센서의 수직 간격을 5mm로 고정시킨 후, 전압을 1kV에서 20kV까지 1kV 간격으로 증가시키면서 인가전압에 따른 센서 출력의 특성을 시험하였고, 그 결과는 그림 4.에 보여 지는 바와 같이 선형성이 있음을 확인하였다. 이로써 HY-Pockels sensor가 GIS내부 부분방전에 의한 전계변화 값

의 정확한 측정이 가능함을 보였다.

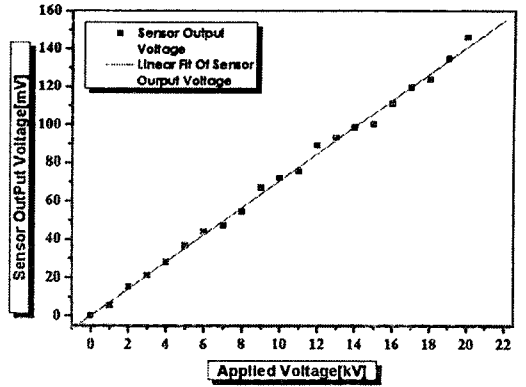


그림 4. 인가전압에 대한 HY-Pockels sensor의 선형성

2.2.2 상용 CT센서와 HY-Pockels sensor와의 비교

상용 CT sensor(Power Diagnostix, 20MHz~25MHz)와 HY Pockels sensor로 동일한 부분방전을 검출한 것을 그림 5.에 나타내었다. 이는 HY Pockels sensor가 상용 CT sensor와 동일한 위상에서 부분방전을 검출하고 있음을 보여주고 있다.

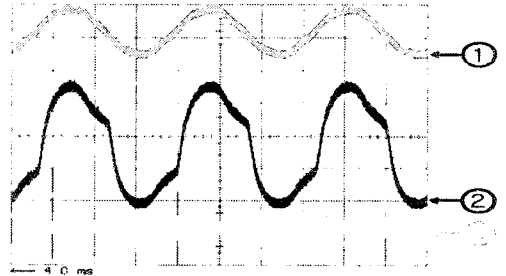


그림 5. 상용 CT sensor와 HY-Pockels sensor의 부분방전 검출위상 비교

그림 5.는 인가전압 하에 곡률반경 5 μ m의 침 결합을 삽입한 후, 결합과 센서와의 거리를 5mm로 유지한 상태에서 오실로스코프로 검출한 파형이다. 1번 채널은 인가전압을 10000:1 분압기로 측정된 60Hz 인가전압파형이고, 2번 채널은 HY-Pockels sensor의 출력 파형이며, 3번 채널은 상용 CT 센서에 의해 검출된 파형이다.

2.2.3 HY-Pockels sensor의 위치에 따른 응답 특성

침 결합을 내부 도체(지름 : 60mm)의 말단 중앙에 도전성 에폭시로 고정시키고, 방전량을 100pC으로 일정하게 유지하면서 그림 3.과 같이 sensor를 3-dimension으로 각각 5mm씩 이동시켜가며, 이격 거리 별로 센서 출력 파형을 검출하여 HY Pockels sensor의 부분방전 검출 범위를 알아보았다. 이때 곡률반경이 5 μ m, 10 μ m, 100 μ m, 200 μ m인 네 개의 침(길이 60mm)을 각각의 경우에 삽입해 측정을 수행하였다. sensor와 침 결합의 최초 수직 이격 거리는 5mm로 하였다.

실험 결과, 본 실험에 사용한 네 가지 침 결합의 곡률반경에 따른 방전량의 변화는 침과 sensor의 거리에 따른 방전량의 변화에 비해 sensor의 방전 검출 범위에 별 영향을 주지 못하는 것으로 판명되었기 때문에 침 결합과 sensor의 거리에 따른 방전량으로 데이터를 정리하였다.

이에 대한 결과를 그림 6.에 나타내었으며, 수차례의 실험을 통해 얻은 실험값의 평균치를 적용한 것으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, Y방향으로 센서를 이동한 경우, 센서의 감도가 거의 선형적으로 감소하다가 결국엔 sensor output voltage가 oscilloscope상에서 전혀 검출되지 않고 zero 값을 나타내었다.

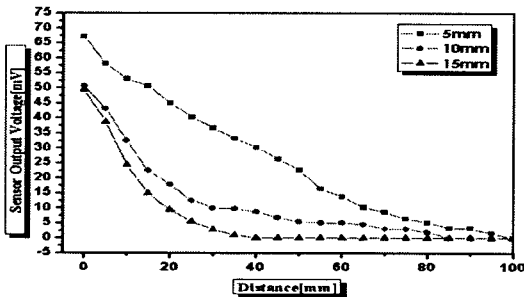
둘째, $\pm X$ 방향으로 이동시킨 경우로, 이때는 센서가 침 결합과

의 거리는 멀어지나, 도체와의 거리는 같게 유지되므로, (c)의 경우보다 센서에 작용하는 전계의 세기는 작지만 여전히 일정 전계 내에 위치한다. 그러므로 센서에 의해 더 이상 부분방전이 검출되지 않아도 출력값이 zero가 되지 않고, (c)에서 25mm 이상 이격했을 경우보다 작은 크기의 인가전압을 유지하게 된다.

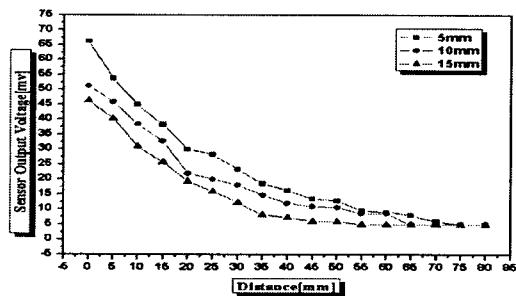
셋째, +Y방향의 경우는, 침결함으로부터 거리가 멀어질수록 sensor는 도체의 전계가 일정하게 유지되는 부분으로 이동하게 되므로 부분방전의 신호가 전계의 영향으로 인해 검출되지 않게 된다. 따라서 검출 범위가 좁아지고, 더 이상 방전 검출이 되지 않는 상황에서도, 인가전압의 sine파형이 (b)경우보다는 크게 나타나게 된다.

그림 6. (a), (b), (c)의 각각의 경우의 특징을 비교해 보면, (a)의 검출 범위가 (b), (c)의 경우보다 더 큰 값을 가지는 것으로 나타난다. 이는 (a)의 경우, 센서가 침결함으로부터 멀어질수록 도체의 전계가 미치는 범위에서 벗어나게 되므로 sensor로 검출되는 방전량이 인가전압에 영향을 받지 않고, zero값을 가지게 될 때까지 검출이 가능하기 때문이다.

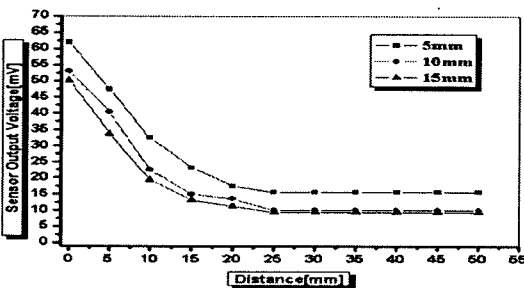
(d)의 경우는 곡률반경 100mm의 침결함으로 실험한 것으로, 보는 바와 같이 sensor를 -Z방향으로 이동시키면 방전의 검출 범위가 급격히 줄어들기 때문에 (a), (b), (c)의 각각의 경우, 모두 침결함과 sensor를 30mm 이상 이격시킨 경우에는 방전이 거의 검출되지 않았다.



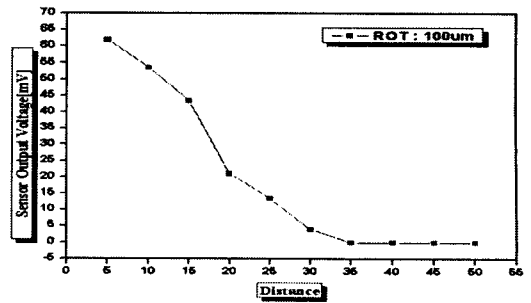
(a) sensor를 -Y방향으로 이동시켰을 경우



(b) sensor를 ±X방향으로 이동시켰을 경우



(c) sensor를 +Y방향으로 이동시켰을 경우



(d) sensor를 -Z방향으로 이동시켰을 경우

그림 6. 침결함과 sensor의 거리에 sensor의 응답 특성

3. 결 론

본 연구에서는 가스절연기기(GIS)에서 발생하는 부분방전 검출을 위한 probe-type Pockels sensor를 설계, 제작하여 레이저 진단시스템을 구성하여 부분방전 측정 실험을 한 결과는 다음과 같이 요약된다.

1. GIS의 도체에 침결함을 삽입하여, 주어진 system에 인가된 1kV부터 20kV까지의 전압에 비례하여 커지는 전계 파형을 검출함으로써, 센서의 선형성이 증명 되었다.

2. 상용 CT 센서로 검출한 신호와 본 HY-Pockels sensor의 출력신호를 서로 비교해보면, 부분방전이 발생하는 위상이 일치함을 알 수 있었다.

3. GIS 내부의 부분방전에 대한 센서의 응답 특성을 통해 부분방전의 발생 위치를 추정할 수 있었다.

이와 같은 결과들로부터 GIS등의 고전압 기기에서, 본 HY-Pockels sensor를 이용해 corona 방전 검출 및 해석이 가능함을 보였으며, 향후 본 레이저진단시스템이 실 GIS에서 충분한 신뢰성을 가질 수 있도록 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 전자재료 및 부품연구센터의 지원에 의해 수행된 연구 결과의 일부로 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. P. Steiner. "Partial Discharge IV. Commercial PD testing". IEEE EI Magazine. Vol. 1. No. 1 pp. 20~33. 1991
- [2] F. H. Kreuger. "Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment". Butterworths. 1989.
- [3] 마지훈, 류철휘, 강원중, 장용무, 구자윤, "광계측 시스템을 이용한 유. 기중 코로나 방전의 전계변화 및 비교 연구." pp. 1668~1670. 하계대한전기학회, 2002
- [4] J. Y. Koo, Y. M. Chang, J. Y. Hong, "Development of measuring techniques for high voltage impulse and small signal using Pockels cell". pp. 221~226. CEIDP-IEEE. 1994
- [5] W. J. Kang, Y. S. Lim, J. Y. Koo, Y. M. Chang, "Possible application of the PD detection technique using a laser interferometer, and Pockels effect with a nonlinear characteristic analysis of the PD signals", pp.674~679, JKPS, Vol.38, No. 6, 2001
- [6] Amnon Yariv. Pochi Yeh. "Optical waves in crystals", Wiley-interscience. 1984
- [7] Josemir Coelho Santos and Kunihiko Hidaka. "Optical high voltage measurement technique using Pockels Device". Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 36, pp. 2394~2398, 2001.