

전력용 광계측 기술

강 옥

(한국전기연구원 정보광응용연구그룹)

최근에 들어 전력 분야의 현황을 보면 경제활동의 성장과 사회의 고도화에 따라 전력 수요가 증대하여 전력설비의 고전압화 및 대용량화와 전력의 안정적 공급 및 효율적 이용이 점점 요구되고 있다.

특히 전기생산 설비인 발전계통부터 소비계통인 배전계통이나 수요가에 이르기까지 감시제어와 보호기술의 고도화를 이룩하기 위해서 전자기술을 응용한 시스템들이 도입되고 있는데 이러한 시스템들은 컴퓨터를 이용한 디지털 방식이 필수적이다.

그러나 전력환경은 이러한 디지털 방식의 시스템들이 설비운영되는 데에 많은 위해요인들이 있게 된다. 고전압이나 대전류 환경이 상시 존재하고 있으며 대전류나 고전압이 충전된 개폐기의 조작이나 고장시 생기는 각 종 임펄스 전압, 전류 그리고 자연계의 기상변화에 기인하는 뇌서지등이 직접 경로를 통해서나 또는 간접적인 정전 유도나 전자기유도 등으로 각종 제어장치에 영향을 주기 때문이다.

이러한 전력계통에서 디지털 시스템들이 보호되기 위한 수단으로 중앙처리장치 등이 위해현장과 이격되어 설치되는 원격제어방식이 적용되고 있으나 센서 단말이나 신호를 송신하는 전송매체는 피할 수 없이 전력설비와 근접된 장소에 설치되기 마련이다.

이러한 조건에서 대부분 신호처리의 기본이 디지털 신호를 송수신 해야 하므로 가능하면 전력계측 시스템의 보호나 정밀성을 요구하기 위해서 잡음이 함유되지 않는 시스템 구성기술이 필요하게 된다.

이같은 환경내에서의 광전자기술의 적용은 유도잡음이나 서지 및 절연성에 강한 시스템 구성 기술로서 가장 적절한 것이라 할 수 있다.

다음 표 1은 전력용 광계측 기술의 특징을 보였다.

현재 전력용 광전자기술의 적용 기술 중 가장 활발히 실용화되고 있는 분야는 광통신 분야이며 기존 송전선 등의 고전압전력에 무유도나 절연성의 특성을 살려 직접 삽입하거나 감는 방식으로 기간 통신망을 대체하고 있으며 일부 전력 현장 구내등에 아날로그 통신 케이블 대신 광케이블을 이용하여 필요 계측 단말의 광데이터 링크 등은 실용화되고 있는 추세이다.

표 1. 광계측기술의 특징

광전송	광섬유 센서	전력계에서 이점
광대역(고속, 대용량)	구동전원불요	내서지 대책
저손실	내전압성	내전자유도대책
누설이 없음	내전자유도	내자기유도대책
전자기도장해 없음	내서지	내정전유도대책
경량	방폭성	내절연성
절연성	소형, 경량	검출부 전원 불필요
소자본		전력기기내부 협소장소에 이용 가능
		고신뢰성
		다중 계측 데이터 광역 전송

그러나 통신용 수동소자로서 발전된 광섬유의 활동 범위는 앞서 논의된 바와 같이 광학소자의 결합이나 그 자체로서 능동형부품으로의 활용이 가능하여 종래의 전기신호 변조기와 전송로를 일치화시킬 수 있으므로 통신용 이외에 광계측 분야로서 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- 광의 직접강도 변환방식에 의한 송전선의 고장구간 판정 장비
- Pockels효과, Faraday 효과 등을 이용한 전압 전류 측정용 광 PT, CT
- 광의 차단, 반사방식에 의한 풍향, 풍속 등의 기상 현상
- 광의 흡수, 산란방식에 의한 대기환경 감시
- 광의 반사 및 유무에 의한 광섬유 케이블의 유량 검출
- 영상 광섬유에 의한 화력발전소의 노내 감시
- 광신호에 의한 사이리스터 직접접촉방식에 이용

1. 전력계측용 광 CT, PT

1959년 레이저 광이 최초로 인공적으로 만들어진 이래 매우 짧은 기간에 많은 종류의 레이저 발전기와 그 응용이 고려되어 왔다. 그중에서도 레이저광을 각종 계측 수단으로 사용하려는 것은 레이저광이 간섭성이 좋고 레이저빔을 좁게 할 수 있으며 직진성이 있어 광섬유와 같은 광도파로에

서 효율 좋게 전송되고 coherence가 좋아 각종의 변조를 행할 수 있는 등 우수한 성질을 갖고 있기 때문에 계측의 매체로는 유망하다고 생각되었다.

특히 전력산업에서 절연물속을 전파하는 레이저광은 절연상 가장 이상적인 정보 전달 매체이고 송전선에서 나타나는 각종의 전자유도에 의한 장애를 받지 않는 특성을 가지고 있다. 특히 광을 단순히 정보전달 매체만이 아닌 전기, 자기와의 상호작용을 통하여 직접 전기 및 자기량으로 변환하는 방식이 레이저광에 의해서 용이하다. 이 방식은 변환부에 어떤 능동소자, 전원 등을 함유하지 않으므로 대단히 간단하며 신뢰성이 높고 전기적 절연, 장애를 받지 않는 계측시스템을 구축할 수 있다.

현재까지 사용하고 있는 전력용 전류, 전압 측정 수단과 비교하여 보면 과거 교류 대전류 측정에는 계측용 변류기(CT: Current Transformer)가 사용되어 왔다. 이것은 철심의 전자 유도를 이용하는 것으로서 구조는 견고하고 신뢰성도 상당히 높다. 또한 주파수 특성도 상당히 양호한 편이다. 그러나 최근 전력 수요가 증가함에 따라 국내의 전력회사에서는 500kV급 이상의 송전계통이 계측되고 있고 전력계통의 보호, 전류 감시 등 목적으로 500kV급 이상의 송전계통용 대형 CT가 제작되고 있다. 여기서 재래의 CT로서는 철심을 넣어 교류전류를 변류하여 측정하는 것이므로 초고전압에 대한 절연 문제 특히 내열해성을 고려한 거대한 부싱 애관이 필요하다. 따라서 이러한 형식의 CT는 종래의 기술로서도 충분한 정도, 속도, 신뢰성을 갖고 있지만 크기, 가격, 보수 안정성에 있어 문제가 많고 또 철심을 사용하므로 고장시 대전류에 의하여 철심이 포화되어 구조상 직류전류나 마이크로 초에서 나노(nano)초급의 전류 펄스의 측정은 행할 수가 없다. 반면에 광센서를 이용한 초고압 변류기(광 CT)는 이러한 난점을 피하고 무접촉형의 원리에 의해 먼거리에서 고전압에 흐르는 전류를 레이저광을 통하여 직접 변환하여 계측을 시도하는 것으로 절연 문제가 용이하게 해결될 뿐만 아니라 직류에서 나노(nano)초까지 넓은 주파수 대역에 걸쳐 충실한 전류파형의 재현성을 갖고 있는 장점이 있다.

광CT의 원리는 광학적인 파라데이(Faraday)회전으로서 대전류가 흐르는 도체 근방에 나타난 전계에 비례하여 광의 편광 파면이 회전하는 것을 검출하는 것이다. 또 전기 광학효과를 갖고 있는 결정을 사용하여 전계에 의해 광을 변조하는 것도 가능하다. 그 원리는 레이저광의 변조기로서 넓게 응용되는 것이지만 이것을 전계 또는 전압계측기로 고려하면 대단히 높은 입력 임피던스의 전압계측이 가능할 뿐만 아니라 전기적으로 상호절연을 취할 수 있는 전압계측기로서 유리하다.

전압계측용 계기용 변압기(PT: potential transformer)에는 고주파의 공진에 의한 측정정차가 문제로 되고 있다. 전기 광학효과를 이용한 광 PT의 연구는 비교적 많지 않다. 그 이유는 감도와 온도 특성이 좋은 Pockels 효과소자가 없었기 때문으로, 최근 개발된 BSO소자의 의의는 매우 크다. 현재 BSO는 전계센서로서 응용되고 있으며, 광학기술의 진보에 따라 소형, 고정도화가 기대된다. 그리고 보호계측의

고도화, 고신뢰성화의 요청에 따라 디지털형의 보호계측 장치의 개발이 진행되고 있다. 이 경우 광 CT, PT가 디지털형의 보호계 전기시스템에 가장 적합하다. 또한 대도시에서는 변전소의 형태가 GIS화하는 경향이 있기 때문에 GIS에 적합한 방식, 형상, 성능을 가진 광 PT의 개발도 활발히 연구되고 있다.

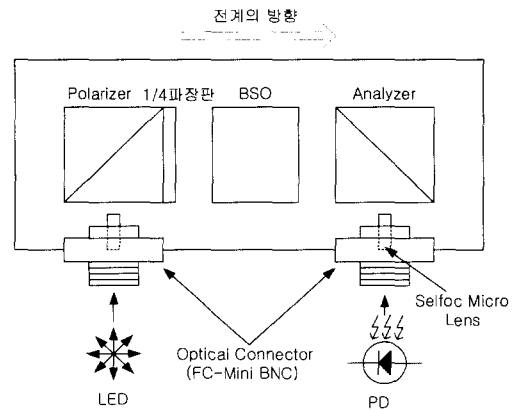


그림 1. 광전압 센서의 구성도

2. 지중선로의 상시 안전 감시를 위한 광계측 시스템

쾌적한 생활환경을 위한 사회의 인식변화로 인하여 전력의 수요자와 공급원간의 거리는 점차로 멀어지고 있으며, 도심구간에서는 송전선로가 지중화되어 장거리 지하 전력구가 시설 운용되고 있다. 또한 도서지방에서는 전력공급을 위한 해저전력케이블이 설치·운용되고 있다. 장거리 송전, 장거리 지하전력구 및 해저 전력케이블 등의 설비는 환경이 열악한 지하 및 해저에 설치되어 있으므로 관리자의 접근이 용이하지 않기 때문에 감시 및 유지보수에 어려움이 따른다. 현재까지 이러한 전력설비 및 각종 중요 시설물의 안전감시 및 진단을 목적으로 그 특성이 우수하고, 장거리 구간에 대한 분포계측이 가능한 광섬유의 비선형 현상을 이용한 시스템이 활발히 연구 개발되고 있다.

이러한 기술 분야 중에서 비선형 현상인 탄성적 레일리 역산란(Elastic Rayleigh Backscattering)을 이용한 OTDR (Optical Time Domain Reflectometer)이 광통신 선로의 전송 손실을 측정하기 위해서 최초로 현장에 적용되었으며 그 후 비탄성 산란의 하나인 라만 역산란(Raman Backscattering)광을 이용한 분포용 온도 계측 시스템(Distributed Temperature Sensor, DTS)이 개발되었다. 하지만 DTS system에서 사용하는 라만 역산란광은 매우 미약하기 때문에 장거리 계측을 위해서는 고출력 레이저, 복잡한 광과장 분리기 및 외란에 취약한 단점을 가지고 있다. 특히 DTS용 광원으로는 laser diode(pulsed LD)가 사용되고 있으나 LD를 사용하는 DTS system으로 진단이 가능한 거리는 약 10km정도에 불과하므로 장거리의 감시 및 진단을 위

해서는 고출력 레이저 광원이 요구되고 있다. 한편, LD는 고출력화가 힘들므로 이를 대체한 고출력레이저는 장비 크기가 크고 유지관리가 힘든 단점이 있다. 선진국에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 고출력 시스템으로 LD 여기 레이저 개발 연구가 활발하게 진행되고 있다. LD 여기 방식은 기존의 Nd:YAG 레이저와 비교하여 고효율이며 장치의 소형화가 가능한 특징을 가지고 있어 고출력의 계측용 광원으로 적합하다. 현재 LD 여기형 고체레이저는 광섬유에서 전달광의 저손실에 유리한 1.3 μm, 1.5 μm 파장의 출력을 내는 다양한 레이저 매질에 대한 연구가 진행되고 있다. 최근에 개발된 1.54 μm Er³⁺ 레이저는 매질의 열전도성이 좋지 않기 때문에 온도가 높아지기 쉬우며, 고출력화가 어려운 문제점이 있다. 최근에 또한 Nd:KGW(KGd(WO₄)₂) 레이저에 대한 연구가 수행되었다. Nd:KGW는 레이저 전이의 단면적(cross-section)이 크고, 광 흡수폭(absorption band)이 넓으며, 농도 소광(concentration quenching)없이 결정이 함유할 수 있는 Nd ion의 농도가 8% 정도로 높으며, 활성 매질의 광학적특성이 우수한 특성을 가지고 있다. Nd:KGW 레이저는 기존의 Nd:YAG 레이저와 비교하여 발진 효율이 2배 이상 높으며, 넓은 온도범위에서 안정된 발진을 하고 선형편광 발진을 하는 특징을 가지고 있으나 역시 열전도율이 낮으므로 열렌즈 등에 의한 레이저 출력의 감소 문제 해결이 관건이다.

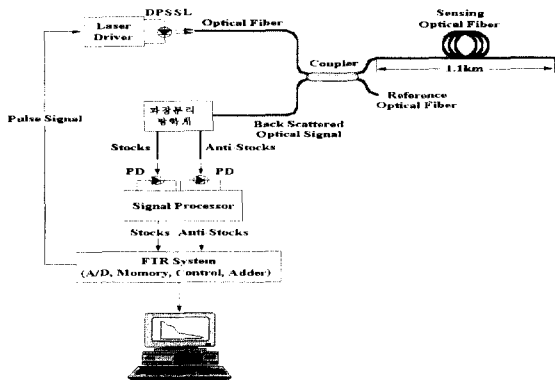


그림 2. 장거리 감시용 분포형 온도계측 시스템

이 외에 유도 브릴루앙 산란(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)을 적용한 산란광의 경우는 주파수가 광섬유에 인가되는 스트레스에 의존하므로, 최근 장거리 구조물에 대한 안전 진단을 목적으로 하는 감시시스템 구축 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 SBS 주파수편이(~11GHz)는 가해진 스트레인에 선형적으로 변화하며 5MHz/0.01%, 온도의 경우 1MHz/1°K 정도의 고정밀도를 가지고 있다. 또한 라만역산란과는 달리 후방 산란성이 강해 시스템을 구성하는 데 편리하며 산란광의 강도 검출이 아닌 주파수 검출이므로 낮은 광출력으로도 장거리 계측이 가능하다. 그러나 SBS와 레일리 역산란과의 주파수대가 매우 근접해 있으므로 이에 대한 주파수 분리가 기술적으로 매우 어렵다.

이 외에도 광섬유를 이용한 다양한 광계측 시스템이 있다. 예로서 케이블의 절연성을 높이기 위해 첨가한 절연유분이

부분 방전 등에 발생하는 가스(CH₄등)의 성분을 조사하기 위한 광섬유 센서, 땅 속 등 임의의 지점에 외부로부터 외력(침입자 등)이 광섬유에 가해 졌을 때 주요 시설물의 침입자 유무 및 종류를 감지하고 판별할 수 있는 광섬유 침입자 감시시스템, 관성 공간에서 회전감지계로 사용되는 기계식 자이로를 대체하는 광섬유 자이로 등 광섬유 및 광학 시스템을 조합한 다양한 광계측 시스템이 개발되고 있다.

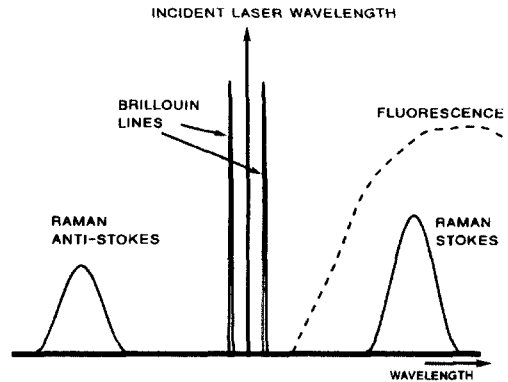


그림 3. 광섬유 내에서 파장별 산란 현상

한편 앞에서 언급한 광계측 시스템들 이외에 전력 통신, 눈보호(eye-safe) LIDAR, 레이저거리계측기 등 다양한 광계측 응용 분야에서 광섬유 저손실용 1.3-1.6 μm 레이저들의 활용성이 증대되고 있다. 또한 1.3-1.6 μm 범위에서 광계측을 위한 단펄스-고출력(short and powerful laser pulse)레이저가 요구되고 있다. 이를 위하여 Rotating Reflector, Electrooptic Shutter, Acoustooptic Shutter 등의 능동형 Q-스위치(active Q-switch)가 레이저와 함께 사용될 수 있으나 복잡한 기계장치 및 전기회로 및 이에따른 소형화의 어려움과 고가의 장치 비용등이 문제가 된다. 한편 수동형 Q-스위치(passive Q-switch)의 경우는 Q-스위치 작동을 위한 특별한 구동 장치가 필요없어 소형화가 쉽고 가격이 저렴하나 1.3-1.6 μm 파장 범위대에서 상업적으로 생산되는 수동형 Q-switch는 없는 실정이다. 현재 1.0-1.4 μm 영역에서는 YAG:V³⁺ 결정과 1.3-1.6 μm 영역에서 Co²⁺를 함유한 MgAl₂O₄, LiGa₂O₄, LaMgAl₁₁O₁₉, ZnSe 등의 결정 등이 실험적으로 연구되고 있으나 결정 제조 및 천이 원소들의 조절 등의 어려움이 따르고 있다. 따라서 1.3-1.6 μm 파장 범위대에서 효율적이며 신뢰성을 줄 수 있는 수동형 Q-스위치 소자 개발이 절실히 요구되고 있다.

지금까지 한국전기연구원에서 연구되었거나 연구되고 있는 분야에서 전력 분야와 연관된 광계측 분야의 일부를 지면상 짧막하게 기술하였다. 현재 전기분야에서도 전기와 광을 변환하여 이용하는 레이저 응용기술, 또는 전력설비 진단 및 계측에 있어 광을 이용한 고효율성, 신뢰성, 소형화 및 환경 친화적인 장비 기술등이 지속적으로 발전하고 있다. 따라서 광기술분야와 전력 산업분야와의 접목을 통한 고부가가치의 기술 창출 및 전환이 필요하며 이는 기존의 전력 산업과 상호 보완적으로 국가의 국제경쟁력 향상에 기여할 것이다.