

자기광학효과를 이용한 광전류센서에 관한 연구

(The Study of the Optical Current Sensor Using Magneto-Optic Effects)

전재일* · 이정수 · 송시준 · 정철우 · 박원주 · 이광식 · 김정배 · 김민수

(Jea - Il Jeon · Jung - Soo Lee · Si - Joon Song · Cheol - Woo Jung · Won - Zoo Park
Kwang - Sik Lee · Jung - Bae Kim · Min - Soo Kim)

요 약

본 논문은 자기광학효과에 의한 초고압 전력설비에서의 광전류 센서의 특성에 대한 기초 연구를 하였다. 광원은 He-Ne laser(633[nm])를 사용하고, 수신부는 PIN-Photodiode를 사용하였다.

Faraday 효과에 의한 편광면의 회전각은 도체에 인가된 전류에 비례하므로 광섬유를 도체 주위에 감아서 센싱 부를 구성하였다. 광섬유센서를 통과한 광신호를 입력편광에 대하여 θ 방향으로 정렬된 검광자를 통과시켜 그 회전각을 분석하여 100[A]에서 1000[A]까지의 광 CT 동작특성과 60[Hz] 교류전류측정을 하였다. 측정 결과에서는 전류에 따른 출력 신호가 선형적으로 증가함을 알 수 있었고 파이버의 권수에 따른 출력차이를 통해 파이버의 권수가 많을수록 강도가 커진다는 것을 알 수 있었다. 또한 자장과 감긴 파이버 사이의 매질에 따라 출력의 차이뿐만 아니라 선형성까지도 차이가 난다는 것을 알 수 있었다. 기준값과 광전류 센서의 출력 강도와의 오차율을 구했을 때 약 $\pm 7\%$ 이하의 오차가 나왔고 이는 매질과 권수에 따라 그 오차율이 점점 나아질 수 있다는 것을 확인 시켜주었다.

Abstract

In this paper, we described the laboratory layout of the optical CT in connection with the measurement of large current based on Magneto-Optic Effects. It was used He-Ne laser for light source and was used PIN-Photodiode for light receiver. The sensing section was organized by winding optical fiber around conductor on the concept that the rotation angle of polarizing axis by Faraday Effect is proportional to the applied current in to conduction. The optical signal passed through optical fiber sensor was induced to analyzer arranged in the direction of θ for input polarization, and then analyzed its rotation angle and researched on operating characteristics of optical CT for 60[Hz] AC current measurement from 100[A] to 1000[A] was carried out. In this results, the output signals induced linearly with the current and proved that the intensity is increased with increasing turns of fiber through output differences which in accordance with turns of fiber and we verified that there is not only difference of the output with the medium between electric field and optical fiber, but also the lineality. Measuring the references and output intensities of the optical CT, ratio errors were within $\pm 7\%$. This confirmed that error rate will be improved by each medium and turns.

Key Words : Optical CT, Faraday efect, Optical fiber

* 주저자 : 구미기능대학교 전기공학과
Tel : 053-810-3926, Fax : 053-813-8230
E-mail : jjael@kopo.or.kr
접수일자 : 2003년 3월 27일
1차심사 : 2003년 4월 7일
심사완료 : 2003년 10월 16일

조명 · 전기설비학회논문지 제17권 제6호, 2003년 11월

1. 서 론

최근 산업의 발달과 인구의 고밀집화 추세에 따라 향후 예상되어지고 있는 전력수요의 증가에 따른 송

자기광학효과를 이용한 광전류센서에 관한 연구

전전압의 초고압화와 대규모 설비에 의한 부지확보의 어려움, 기존 CT(Current Transformer)의 보수 및 가격, 정확성 등의 문제점들의 해결방안으로 광원인 레이저와 에너지 손실이 적은 광섬유를 중심으로 하는 광센서 기술을 응용함으로써 신뢰성이 높은 광계측 시스템을 개발하여 고전압 대전류로 보다 효과적인 방법으로 측정함으로써 전력계통에 이용하고 광CT[1~5]의 국산화에 따른 수입대체 효과와 외국제품과의 경쟁력을 향상시켜야 할 필요성이 있다. 광CT에 대한 실용화연구는 신뢰성향상과 경제성추구라는 두 가지 측면에서 진행된다. 신뢰성향상에 관해서는 전계해석기술의 고도화 및 절연성능진단법의 확립, 경제성에 관해서는 소형축소화를 기본으로 하는 기기구성의 간소화가 요구된다. 특히, 현대에는 한정된 자원과 인력을 효율적으로 사용하여 생산을 극대화시키는 것이 경쟁력의 근본이다. 따라서 설비보수의 빈도를 줄이는 방안과 아울러 무정전의 높은 신뢰성 확보는 극히 중요하다.

이러한 이유로 본 논문에서는 Optical Fiber Sensor기술[6]을 응용하고, Faraday 효과의 편광면 회전량을 수광부에서 검출하여 100[A]에서 1000[A]까지의 전류측정을 위한 광 CT의 동작특성과 센서의 선형성 등에 대한 연구를 행하였다.

2. Faraday 효과

최근 방전 메커니즘의 해석 및 고전압현상과 관련된 고전압, 대전류, 전자계 등 전기적 물리량의 측정에 광계측의 적용이 급속도로 진전되고 있다. 광계측의 적용 중에서 Faraday효과, Voigt효과 등과 같은 자기광학효과(Magneto-optical effect)를 이용하여 대전류를 측정할 수 있고, Pockels효과, Kerr효과 등과 같은 전기광학효과(Electro-optical effect)를 이용하여 고전압을 측정할 수 있다. 납유리와 같은 투명한 물질에 선형 편광된 광을 입사시킬 때, 그 진행방향에 대해 평행한 자기장을 걸어주면 광파의 편광면 회전하게 되는데 이러한 광학적 현상을 Faraday 효과라고 한다. 즉, 그림 1과 같이 어떤 [7~10],

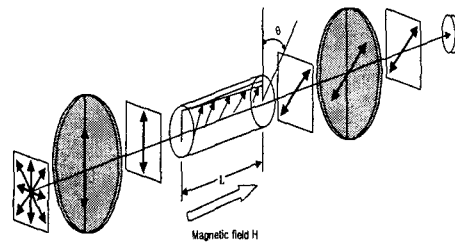


그림 1. Faraday효과 개념도

Fig. 1. Schematic diagram of Faraday effect

결정에 가해지는 자계의 방향과 평행하도록 Polarizer로 직선편광된 빛을 투과시키면 자계의 세기에 비례하여 광의 편광면이 회전하게 되고, 이 빛은 수광부에서 검출하게 되는데 이러한 광학적 현상을 자기광학효과(Magneto-Optical Effect)라고 한다. Faraday효과를 가지는 자성체 소자를 Faraday 소자라고 하며, 납유리, BGO, BSO, ZnSe, YIG 등이 있다. Faraday 효과에 의한 회전각 θ 는, 빛의 진행방향에 가해진 자계 H, Faraday 소자에서의 광학경로 길이 L, 그리고 Verdet정수 V에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = VHL \quad (1)$$

V : Verdet 정수[rad/A]

H : 자계강도[A/m]

L : Faraday 소자에서의 광학경로길이[m]

Faraday 효과에 의한 편광축의 회전각은 측정전류에 비례하므로 광섬유센서를 통과한 광신호를 입력편광에 대하여 θ 방향으로 정렬된 검광자(Polarization analyzer)를 통과시켜 그 회전각을 분석하여 전류를 측정할 수 있다. Verdet정수는 Faraday 효과의 크기를 나타내는 물질정수이다. Verdet정수는 Faraday 소자의 자기적 특성에 따라 달라진다. 반자성체(diamagnetic materials)는 Verdet정수가 작지만 온도의 영향을 받지 않는다. 이에 반해, 상자성체(paramagnetic materials) 또는 강자성체(ferromagnetic materials)는 Verdet정수 값이 좀 더 크긴 하지만 항상 온도의 영향을 받는다[10]. 그러므로, 상자성체나 강자성체를 소자로서 이용하게 되면, 원하는 정밀도를 가진 측정값을 구하기 위해 매우 정

확한 온도 측정 및 보정이 필요하다. 따라서 자기광학 변류기의 센서소자로서 이용하는 데는 반자성체가 적합하다고 할 수 있다[11].

또한, Verdet 정수는 광의 파장 의존성이 강한 점을 들 수 있다. 따라서, 좁은 스펙트럼 대역을 가지는 레이저(예를 들어 He-Ne laser, laser diode 등)를 광원으로 사용하여 이용하는 것이 측정결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

편광면이 회전하는 각도는 (1)식에서처럼 자기장의 방향에 관계되는 vector 값이므로 자성체 소자를 사용할 경우 측정하기가 매우 곤란해진다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 Faraday 소자를 대신해 광섬유로 도체 주위에 페루프형 센싱부를 구성함으로써 코일의 형태나 센서코일과 도체와의 거리 등에 무관하게 일정한 값을 가지고 측정도체 이외의 인근 신호원에 영향을 받지 않는 Ampere의 전류법칙(Ampere's circuit law)을 적용시킬 수 있다[12].

광섬유를 도체주위에 감아서 센싱부를 구성할 경우 편광면의 회전각도는 다음 식 (2)와 같이 바꿀 수 있다.

$$\theta = Vn \oint H \cdot dl = VnI \quad (2)$$

여기서 n은 광섬유의 권수이고, I는 전류의 크기를 나타낸다.

Faraday 효과를 나타내는 (2)식을 이용해서 전류 변화에 대한 θ 의 변화를 그림 2에 나타내었다. 실험

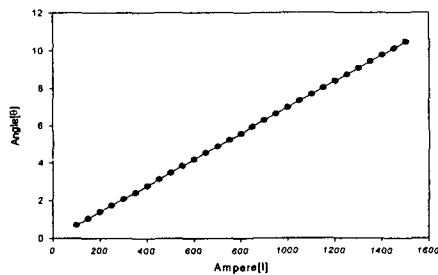


그림 2. 전류변화에 따른 Polarization Rotation
Fig. 2. Rotation of polarization angle in accordance with current

에 사용된 633[nm]파장대의 He-Ne laser의 Verdet 상수 값은 약 $4.68 \times 10^{-6} \text{ rad/A}$ 이고, 광섬유의 길

이 L은 10[m], 25권수로 하였다[13]. 그림 2에서 알 수 있듯이 전류 1000[A]일 때의 편광면의 회전각은 약 7[deg]정도이므로 충분한 Faraday rotation을 얻기 위해서는 센싱부의 광섬유의 권수를 늘어줌으로써 보상받을 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

실험장치는 크게 3부분으로 나뉘어진다. 원하는 빛을 발생시키기 위한 발광부(E/O변환기)와 변화된 빛의 특성을 검지하기 위한 검출부(O/E변환기) 그리고 발생된 빛의 특성을 변화시키는 센싱부로 나눌 수 있다. 광원에서 나온 빛은 광파이버를 지나 센싱부까지 전송된다. 전송된 빛은 인가자계에 따라서 편광면이 회전하게 되고 회전각 θ 는 검출기로 광강도가 변조되어 수광소자로 전달된다. 그림 3은 실험 장치의 개략도를 나타낸다.

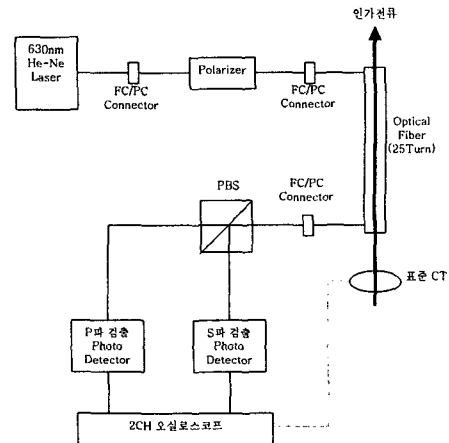


그림 3. 광 CT 시스템 개략도
Fig. 3. Schematic diagram of the optical CT

본 실험에서는 광원으로써 최대 25.0[mW]의 출력을 내는 가시광 영역의 He-Ne laser (633[nm])를 광원으로 사용하였다. 센싱부의 광섬유를 감는 turn 수와 전류변화에 따른 Polarization Rotation 값을 고려하였을 때, Verdet 정수값이 큰 광원으로써 He-Ne laser를 선택하게 되었다. 그림 4는 He-Ne laser의 분광스펙트럼을 나타낸다.

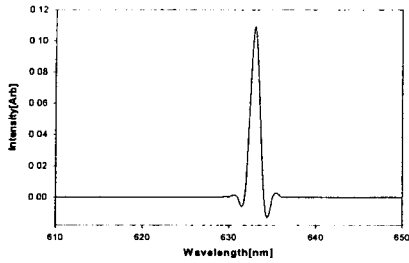


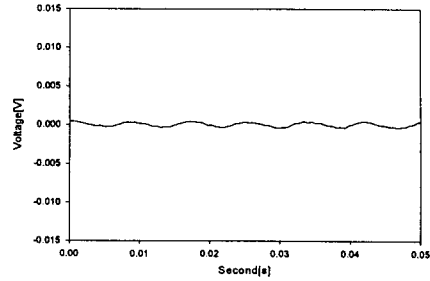
그림 4. He-Ne laser의 분광스펙트럼
Fig. 4. Spectrum of the He-Ne laser

He-Ne laser에서 출사된 광이 Polarizer를 지나게 되는데 본 실험에 사용된 Polarizer는 0도부터 360도 까지 1도 간격으로 선형편광의 각도조절이 가능하므로 PBS(Polarization Beam Splitter)와 ± 45 도의 각을 이루도록 선형편광된 광으로 조정하였다. 이 선형편광된 광이 센싱부의 Single Mode Bare Fiber를 통과하고, 이 때 도체에 흐르는 전류에 의해서 자계가 인가되면 광의 편광면이 θ 만큼 회전하게 된다. 도체에 인가되는 전류는 최대 1500[A]까지 발생하는 전류발생장치를 주문 제작하여 사용하였다. 편광면의 회전량은 검광자인 PBS에 의해 두 개의 광으로 나뉘어 O/E변환기인 수광소자로 전달된다.

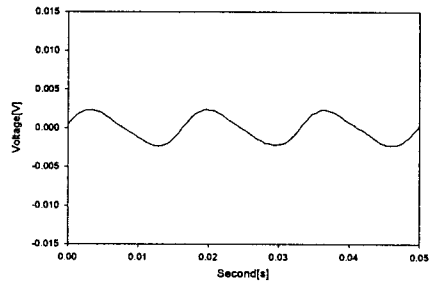
일반적으로 광CT에 있어서는 빠른 응답속도($\sim 0.2\text{ns}$)를 가지는 PIN-PD가 많이 사용되므로 본 연구에서도 Photo Detector로는 PIN-PD를 사용하였다. 광원인 He-Ne laser와 광섬유를 연결시키기 위한 장치로는 FC/PC커넥터를 사용하였다. O/E변환기는 E/O변환기와는 반대로, 즉 검광자를 통해 나오는 광신호를 Photo Detector로 전기신호인 전압으로 변환시킨다. 이 전압을 여러 가지 방법으로 검출 가능한 적절한 크기로 증폭시켜 그 신호의 상대치를 측정함으로써 피측정전류의 크기를 측정할 수 있다.

4. 실험 결과 및 검토

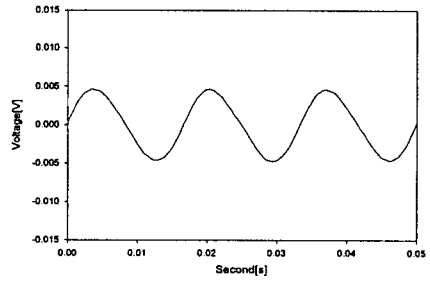
전류발생장치를 사용해서 인가전류를 0~1000[A]까지 변화시켰을 때, 광 CT의 출력파형을 오실로스코프를 통해서 관측하였다. 그림 5는 인가전류변화에 따른 출력을 0[A], 200[A], 400[A], 600[A], 800[A], 1000[A]로 나타내었다.



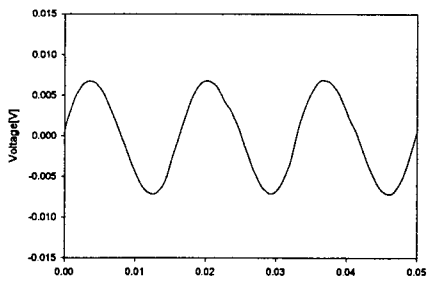
0[A]



200[A]



400[A]



600[A]

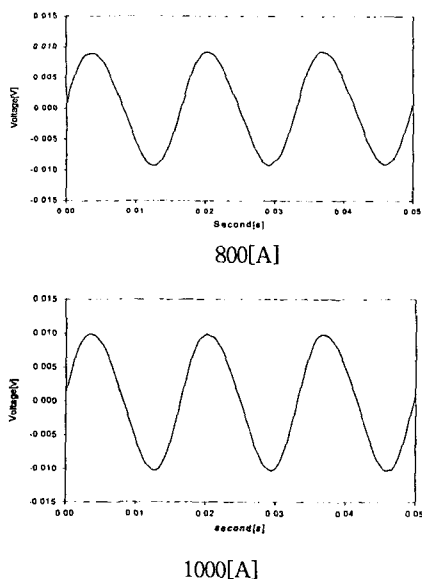


그림 5. 전류변화에 따른 광 CT 출력
Fig. 5. Output signal of the optical CT vs current variation

그림 6은 PBS로 편광분할 한 후 광CT의 P파 및 S파의 실효값과 기준값과의 선형성 측정결과이다. 인가전류를 100[A]~1000[A]까지 100[A]씩 증가하면서 인가하고 각각의 인가전류에 대해서 P파, S파 Photo Detector의 출력을 오실로스코프를 이용해서 측정한 후 측정 파형을 분석한 결과이다. P파 Photo Detector의 출력오차 특성은 6%이내의 error값을 나타내고 있다. 그리고 S파 Photo Detector의 출력 오차특성은 인가전류 100[A]일 때 50%정도의 심한 error값을 나타내고 있으며, 나머지 경우에 대해서는 9%의 error값을 나타내고 있다.

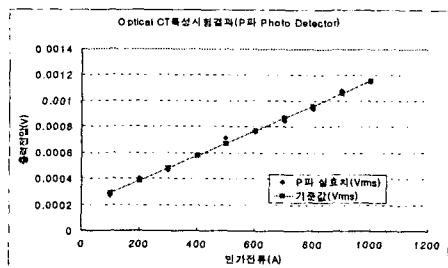


그림 7은 그림 6의 P파와 S파의 두 가지 Photo

Detector의 출력을 오실로스코프에서 동시에 취득한 후, 두 신호를 신호 처리한 측정결과이다. 인가된 전류가 점차 증가함에 따라서 출력도 거의 선형적으로 증가하는데 약 $\pm 7\%$ 의 선형성 오차를 보이고 있는 것을 알 수 있었다. 그림 8은 1000[A]일 때의 광 CT 출력파형을 FFT(Fast Fourier Transform) 스펙트럼으로 표시한 것인데, 교류성분의 60[Hz]의 신호만이 나타나는 것을 볼 수 있다.

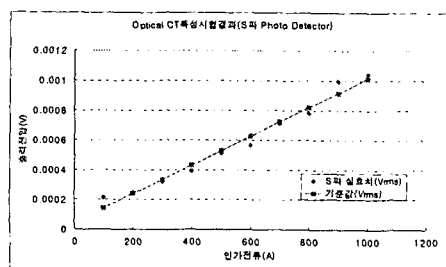


그림 6. 광CT의 출력 오차특성
Fig. 6. The error span characteristics for output signal of the optical CT

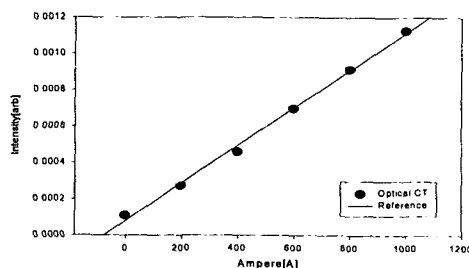


그림 7. 광섬유전류센서의 선형성 측정결과
Fig. 7. The linearity measurement of Optical Fiber current sensors

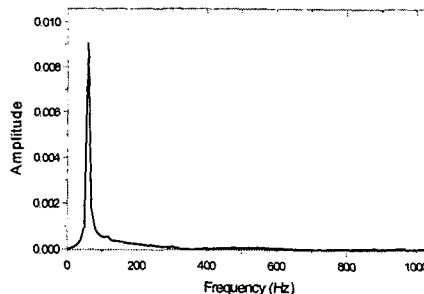


그림 8. FFT Spectrum
Fig. 8. FFT spectrum

자기광약효과를 이용한 광전류센서에 관한 연구

그림 9는 권수와 출력신호 강도의 관계를 나타낸다. 그림에서 1번 감았을 때 보다 3번, 5번, 7번 감았을 때 신호가 선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있고, 이는 권수를 점차 늘려나감으로써 광CT의 감도는 점차 좋아진다는 것을 알 수 있다. 이때 도체와 파이버와의 거리는 5[cm]로 하였고 전류는 1000[A]를 유지하였다.

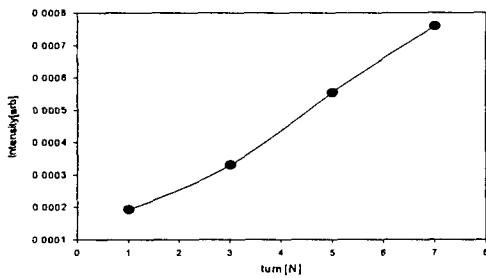


그림 9. 권수에 따른 출력특성
Fig. 9. Output characteristics according to turns

5. 결 론

본 논문에서는 Faraday 효과를 이용한 광전류 센서를 설계·제작하여 전류인가시 센싱 파이버, PBS를 거쳐 포토다이오드로 출력되어 나오는 신호강도를 연산과정을 통해 오실로스코프로 측정하고 reference 값에 따른 출력의 오차를 뿐 아니라, 감은수에 따라 나타나는 신호강도를 측정하였다.

본 논문에서 나타낸 실험 결과는 다음과 같다.

- ① 광전류센서의 출력신호를 측정한 결과 도체에 흐르는 전류가 커질수록 출력신호는 커지는 것을 알 수 있었다. 이 때 신호는 진폭의 크기만 증가하고 위상은 동일하게(60[Hz]) 나타나는 것을 알 수 있었다.
- ② 자장에 따른 광전류센서의 출력신호는 reference ($\pm 2\%$, CT)값에 비교했을 때 $\pm 7\%$ 의 선형성 오차가 나타나는 것으로 알 수 있었다.
- ③ 도체에 파이버를 권수는 신호출력에 선형적으로 비례한다. 1번 감았을 때 보다 3번, 5번, 7번 감았을 때 신호강도는 점점 크게 나타났다.

실험을 위해 구성된 시스템은 페루프형 센서이므로 측정대상도체 이외의 신호원에 의해서는 영향을

받지 않으며, 센싱부의 광섬유 권수의 조정과 신호처리 과정의 최적화를 통해서 보다 정밀한 전류측정도 가능하게 되었다.

보강실험 및 정밀도 개선과 현장실험 및 문제점 보완 등을 통하여 광계측법을 이용한 고전압·대전류 측정기술을 확립·발전시킬 수 있을 것이다.

- 감사의 글 -

본 연구는 2002년도 산업자원부 전력산업연구 개발사업 전력기술기초(과제번호 : 00-역-02)와 (주)효성의 지원에 의하여 이루어진 연구로서 관계부처에 감사 드립니다.

References

- [1] George I. Chandler and Franz C. Jahoda, "Current measurements by Faraday rotation in single-mode optical fiber", Rev. Sci. Instrum. 56(5), May 1985.
- [2] M. Kanoi, et al., "Optical Voltage And Current Measuring System For Electric Power Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 1, January 1986.
- [3] G. Degli Esposti, et al., "Current Measurements On A High Voltage Apparatus Using A Fiberoptic Sensor", Fifth International Symposium On High Voltage Engineering, August 1987.
- [4] 齋藤成文, et al., "レーザを利用した無接触超高電圧変流器", J.I.E.E.J.8/68, Vol. 88-8, No. 959 JANUARY 1990.
- [5] T. Sawa, et al., "Development Of Optical Instrument Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990.
- [6] Kiyoshi KUROSAWA, et al., "Flexible Fiber Faraday Effect Current Sensor Using Flint Glass Fiber and Reflection Scheme", IECE TRANS., Vol. E83-C, No. 3, March 2000.
- [7] K. Kawashima et al., "Development of an Optical Current Transformer for adjustable Speed Pumped Storage System", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997.
- [8] Masao Takahashi et al., "Optical Current Transformer for Gas Insulated Switchgear Using Silica Optical Fiber", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997.
- [9] A. Schnettler, et al., "Experiences With Optical Instrument Transformer", CIGRE, 1998.
- [10] A. J. Rogers, "Optical technique for measurement of current at high voltage", Proc. IEE, Vol. 120, No. 2, Feb. 1973.
- [11] A. Papp, H.Harms, "Magneto current transformer", Applied Optics, Vol. 19, No. 22, 15 Nov. 1980.
- [12] 송민호, 양창준, 안성준, 박병석, 이병호, "과전류 보호계전기용 광섬유 전류센서", 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 5, October 2001.
- [13] 김병태, 이창준, 함길호, "광을 이용한 고전압, 대전류 측정" proceedings of Kiee vol. 50, No.9, Sep. 2001.

◇ 저자소개 ◇

전재일 (全在一)

1955년 11월 20일생. 1998년 영남대 산업기술대학원 졸업(석사). 2003년 8월 영남대학교 대학원 전기공학과 박사 수료. 현재 구미기능대학 전기계측제어공학과 부교수.

이정수 (李政洙)

1974년 11월 20일생. 2000년 경산대학교 물리학과 졸업. 2003년 영남대학교 전기공학과 졸업(석사).

송시준 (宋時準)

1975년 3월 9일생. 2000년 영남대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).

정철우 (鄭哲宇)

1976년 10월 22일생. 2002년 영남대학교 전기공학과 졸업. 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

박원주 (朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1982년 일본 큐우슈우 대학 대학원 졸업(박사). 현재 영남대학교 전자정보 공학부 교수, 영남대학교 교수협의회 회장.

이광식 (李廣植)

1948년 10월 20일생. 1971년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1988~1989년 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 현재 한국 조명·전기설비학회 부회장. 현재 영남대학교 전자정보공학부 교수.

김정배 (金正培)

1966년 10월 12일생. 1989년 한양대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 일본 규슈대학 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년~현재 효성중공업 연구소 창원분소 수석연구원.

김민수 (金旼秀)

1971년 1월 24일생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 효성중공업 연구소 창원분소 선임연구원.