

Faraday효과를 이용한 광CT의 온도특성에 관한 연구

(The Study of the Optical CT Temperature Characteristic Using Faraday Effects)

전재일* · 허순영 · 박원주 · 이광식 · 김정배 · 김민수

(Jea-Il Jeon · Soon-Young Heo · Won-Zoo Park

· Kwang-Sik Lee · Jung-Bae Kim · Min-Soo Kim)

요 약

본 논문에서는 패러데이 효과(Faraday effect)를 이용한 초고압 전력설비에서의 대전류 측정을 위한 광CT의 온도 특성에 대한 기초연구를 기술하였다. 1310[nm] 레이저 다이오드를 광원으로 사용하고 PIN-Photodiode를 수신부로 사용하고 광의 전송로는 Fiber내에서 편광상태를 유지 할 수 있는 30[m]의 단일 모드 광섬유를 사용하였다. 온도 변환에 따른 실험을 하기 위한 온도변환장치는 알루미늄으로 제작하였다. 전류의 측정은 400[A]에서 1300[A]까지의 범위에서 측정하였으며 온도는 -40[°C]에서 50[°C]까지 10[°C]씩 증가시키면서 측정하였다. 동일한 실험 환경 하에서 출력신호는 인가전류가 증가할수록, 주변온도가 높을수록 비례하여 증가하였다.

Abstract

In this paper, we wrote about the basic experimentation of Optical CT's temperature characteristic to measure high-current in a super-high-voltage electric power equipment which is using Faraday effect. We used the 1310[nm] Laser Diode as the light source and PIN Photodiode as receiver. For the transmission line of light, we used 30[m] single mode fiber which could maintain the state of polarization in the optical fiber. For the experiment, the temperature transformation device make by aluminium. The range of current was from 400[A] and 1300[A] and the range of temperature was from -40[°C] to 50[°C]. In a same experimental condition, magnitude increased input current increase follow by increasing proportion of input current.

Key Words : Optical CT, Faraday effect, Laser Diode

1. 서 론

최근 전력설비의 대용량화로 인해 그에 따른 초고

압설비에 대한 요구가 증가되고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 전자기장식 변류기(Current Transformer, 이하 CT)는 자기장에 의해 도체주변의 철심에 유도되는 전류를 측정함으로써 도체전류를 관측할 수 있었다.

하지만 기존 철심형 CT는 부피 및 중량이 크고 잔류자기와 자기포화 등에 따른 출력신호의 왜곡 등의 문제가 있다. 이러한 기존 CT의 문제점을 해결할

* 주저자 : 구미기능대학 전기계측제어공학부 부교수
Tel : 053-810-3926, Fax : 053-810-4629

E-mail : jjael@kopo.or.kr
접수일자 : 2004년 10월 7일
1차심사 : 2004년 10월 11일
심사완료 : 2005년 10월 20일

수 있는 방법으로 최근 광을 이용한 측정방식이 각광을 받고 있다. 기존의 CT를 광학적 방법을 이용한 광CT로 대체함으로써 이점으로는 광범위한 측정영역과 소형·경량화 구조로 경제적 절감효과를 얻을 수 있으며, 자기포화나 잔류자기 등에 의한 영향이 없어 과전류에 의한 주회로의 사고발생이 없다는 것이다. 그리고 계통보호제어시스템의 신속성 향상 및 디지털 계전시스템과의 높은 호환성으로 자동화를 통한 무인화 시스템을 실현 시킬 수 있다. 특히 광을 이용한 센서는 저손실, 고절연성, 무유도성, 경량성, 보수의 용이성 등의 장점을 가지고 있어 기존의 CT를 광CT로 교체하기 위한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다[1]-[6].

먼저 국외의 경우를 살펴보면 일본의 경우는 레이저 광을 이용한 전류 계측시스템에 대한 연구와 송·배전계통과 전력기기 등 전반적인 전력분야에 적용시키기 위한 Load Test가 활발히 진행되고 있으며, 미국에서는 전력분야에 대한 연구개발이 미약한 실정이었지만 최근에는 광자계 센서에 대한 연구가 진행 중이다[7].

광CT에 대한 연구는 국내에서도 10여 년간 이어져 왔으나 상용화는 아직 초기 단계이며 현재 구체적인 시장규모와 생산업체를 파악하기는 어렵다[9].

따라서 본 연구에서는 GIS(Gas Insulated Switchgear)에 적용되는 광CT의 실용화 개발을 목표로 두고 있으며 광원으로서는 1310[nm] Laser Diode를 사용하여 온도변화에 따른 광CT의 기초실험을 하였다[11].

2. Faraday 효과

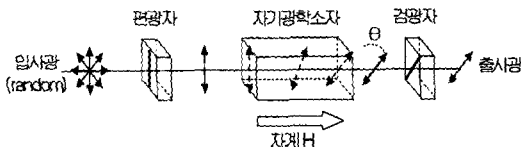


그림 1. Faraday 효과 개념도
Fig. 1. Schematic diagram of Faraday effect

광을 이용한 전류는 그림 1에서와 같이 광신호가 자성체 광 매질의 내부를 진행하는 경우 자기장의

영향에 의하여 편광(polarization)의 축이 회전하는 현상인 Faraday 효과를 이용하여 측정하였다.

편광면의 회전각 θ 는 매질에 가해진 자계의 세기 H 에 비례하고 그 매질의 길이 L 에 비례하므로

$$\theta = V \cdot H \cdot L \cdot \cos \phi \quad (1)$$

$$= V \cdot H \cdot L \quad (2)$$

V : Verdet 상수[rad/A]

H : 자계의 세기[A/m]

L : Faraday 소자의 길이(광경로 길이)[m]

ϕ : 빛의 진행방향과 자기장 사이의 각

이라는 식 (1)의 관계를 만족시킨다. 이때 Verdet 상수 V 는 물질의 특성을 결정하는 상수이다. ϕ 는 빛의 진행방향과 자기장 사이의 각이며, 즉 광신호의 진행방향과 자계의 방향이 평행하므로 $\phi = 0$ 가 되어 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 단일모드 광섬유를 Faraday 소자로 이용하였으며, 도체 전류에 의해 자기장이 형성된 공간에 자기장의 진행방향과 평행한 방향으로 광섬유를 원형으로 감아 센싱부를 구성하였다[8]. 그리고 이와 같은 구성에서 회전각 θ 는 인가전류 및 광섬유의 감은 횟수에 비례하게 되며 식 (2)는 Stokes정리에서

$$\theta = Vn \int H \cdot dl = VnI \quad (3)$$

n : 광섬유를 감은 횟수

I : 인가전류

와 같이 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

어떤 특정 물질의 Verdet 상수는 광의 파장, 온도 및 자기적 특성에 따라 조금씩 달라진다.

반자성체 (diamagnetic materials)의 경우 Verdet 상수가 작고 온도특성이 우수한데 비해, 상자성체 (paramagnetic) 및 강자성체 (ferromagnetic)의 경우 반자성체에 비해 Verdet상수 값이 훨씬 크지만 온도에 의해 영향을 받는다[6],[10].

3. 실험장치 및 방법

실험장치는 크게 세 부분으로 나누어진다. 원하는 빛을 발생시키기 위한 발광부(E/O변환기)와 변화된 빛의 특성을 검지하기 위한 검출부(O/E변환기) 그리고 온도변화를 제공할 수 있는 온도변환장치인 센싱부로 나눌 수 있다. 광원에서 나온 빛은 광파이버를 지나 온도장치 내부에 있는 센싱부까지 전송된다. 전송된 빛은 인가된 자계에 따라서 편광면이 회전하게 되고 회전각 θ 는 검출기로 광강도가 변조되어 수광소자로 전달된다. 그림 2는 실험장치의 개략도를 나타낸다.

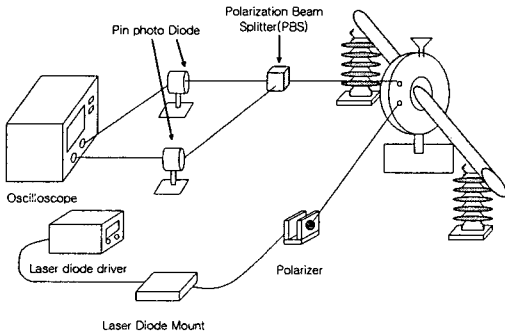


그림 2. 광CT 구성도
Fig. 2. Schematic diagram of the optical CT

일반적으로 광통신에 레이저 다이오드가 많이 사용되고 있으며 He-Ne laser보다 선택의 폭에 있어서 훨씬 다양하기 때문에 본 실험에서는 광원으로써 약 25[mW]의 출력을 가지는 레이저 다이오드 (1310[nm])를 광원으로 사용하였다. 광원을 편광 시켜주기 위한 장치로 편광기를 사용하였으며, 레이저 다이오드의 구동 드라이버에서 최출출사될 때의 빛이 He-Ne laser에 비해 그 편광도가 낮기 때문에 결과의 정밀도를 높이기 위해 일반적으로 사용하는 파장판을 사용하지 않고 OZ-Optics사의 각도 조절이 자유로운 편광기를 사용하였다. 센싱부로 사용한 단일 모드 광섬유는 30[m]를 사용하였으며, 광섬유는 미터 당 약 10회 꼬았다. 그리고 인가한 전류는 400[A]이하에서는 센싱부와 전류가 인가된 도체의 거리가 먼 관계로 측정이 어려워 400[A]에서

1300[A]까지 100[A]씩 증가시켜 측정하였다. 온도변화는 $-40[^\circ\text{C}]$ 에서 $50[^\circ\text{C}]$ 까지 $10[^\circ\text{C}]$ 씩 증가시켰다. 실험을 위한 온도변환장치는 GIS내부에 광파이버를 감은 코어를 장착할 수 있도록 고안된 센싱부를 내장하도록 만들었으며 재질은 알루미늄이고, 저온 실험 시에는 내부에 액체질소를 투입하여 저온으로 만들고 응결을 방지하기 위해 내부를 진공으로 만들었다. 그리고 고온 실험 시는 온수를 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 전류발생 장치를 사용하여 400[A]에서 1300[A]까지 100[A]씩 변화시켰을 때의 광CT의 출력값을 오실로스코프로 측정하였다.

또한 온도변환장치를 이용하여 $-40[^\circ\text{C}] \sim 50[^\circ\text{C}]$ 까지 각 $10[^\circ\text{C}]$ 씩 증가시켰을 때의 광CT의 출력값을 오실로스코프로 측정하였다.

그림 3과 그림 4는 400~1300[A]전류 인가시 각각 온도를 $-40[^\circ\text{C}]$ 에서 $0[^\circ\text{C}]$ 까지와, $10[^\circ\text{C}]$ 에서 $50[^\circ\text{C}]$ 까지 변화시켰을 때 30[m] 광섬유센서를 온도장치 내부에 취부 하여 실험한 결과를 각각 5회 측정하여 평균한 값을 나타낸 것이다.

전류가 증가할수록 출력값이 증가함을 볼 수 있으며 또한 온도가 높을수록 비례하여 출력값이 증가함을 알 수 있다.

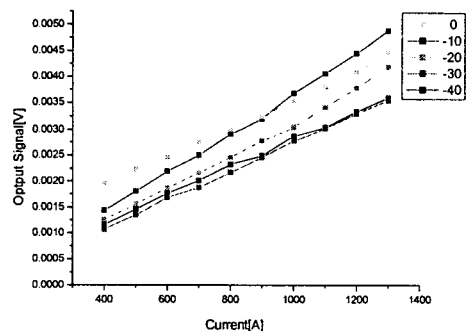


그림 3. 400~1300[A]인가시 $-40[^\circ\text{C}]$, $-30[^\circ\text{C}]$, $-20[^\circ\text{C}]$, $-10[^\circ\text{C}]$, $0[^\circ\text{C}]$ 온도변화에서의 측정결과
Fig. 3. Results measured temperature at $-40[^\circ\text{C}]$, $-30[^\circ\text{C}]$, $-20[^\circ\text{C}]$, $-10[^\circ\text{C}]$, $0[^\circ\text{C}]$ in 400~1300[A]

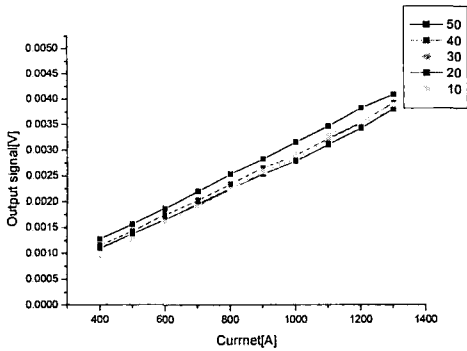


그림 4. 400~1300(A)인가시 10(°C), 20(°C), 30(°C), 40(°C), 50(°C) 온도변화에서의 측정결과
 Fig. 4. Results measured temperature at 10(°C), 20(°C), 30(°C), 40(°C), 50(°C) in 400~1300(A)

그림 5~11에 나타난 결과는 -40[°C]~50[°C] 각 온도에서의 인가전류와 출력의 관계를 나타낸 것으로 출력의 크기와 산포를 알 수 있다. 각각의 온도조건에서 전류를 변화시켜 출력값을 5회 측정한 후 평균값과 최소값 · 최대값을 표현한 그림으로 출력값의 변동폭을 알 수 있다. 그림 5는 -40[°C]일때의 인가전류와 출력의 관계를 나타낸 것으로 인가전류 1300[A]에서 출력의 평균값은 3.6이고, 이 때 최소값은 3.5이며, 최대값은 3.7로 나타났다. 인가전류에 따라 출력값이 비례하여 증가함을 알 수 있다.

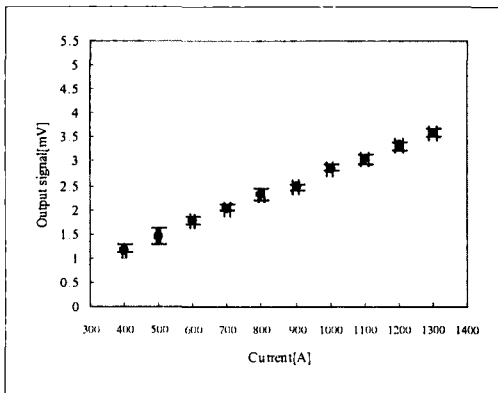


그림 5. -40(°C)일때의 인가전류와 출력의관계
 Fig. 5. Relation of current and output for -40(°C)

그림 6은 -30[°C]일때의 인가전류와 출력의 관계를 나타낸 것으로 인가전류 1300[A]에서 출력의 평균값은 3.5이고, 이 때 최소값, 최대값은 각각 3.3, 3.8로 나타났다. 출력신호의 크기는 인가전류에 따라 비례하여 증가함을 알 수 있다.

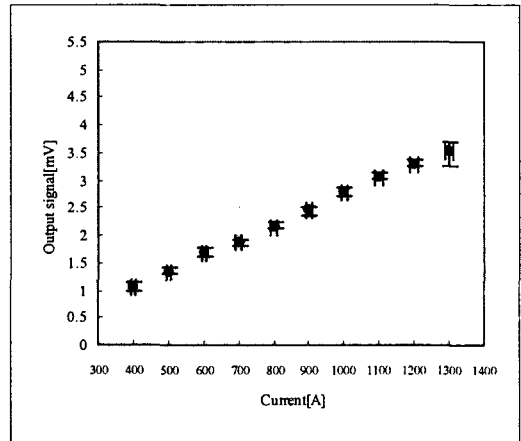


그림 6. -30(°C)일때의 인가전류와 출력의관계
 Fig. 6. Relation of current and output for -30(°C)

그림 7은 -10[°C]일때의 인가전류와 출력의 관계를 나타낸 것이다. 이 때 인가전류 1300[A]에서 출력신호의 평균값은 4.9이고, 최소값, 최대값은 각각 3.4, 3.8로 나타났다. 출력신호의 크기는 인가전류에 따라 비례하여 증가함을 알 수 있다.

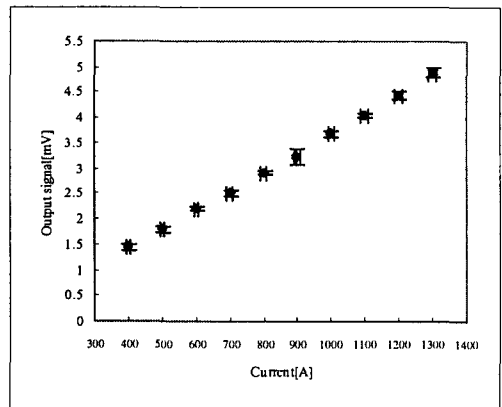


그림 7. -10(°C)일때의 인가전류와 출력의관계
 Fig. 7. Relation of current and output for -10(°C)

Faraday효과를 이용한 광CT의 온도특성에 관한 연구

그림 8은 0[°C]일때의 인가전류와 출력의 관계를 나타낸 것으로 인가전류 1300[A]에서 출력의 평균값은 4.5이고, 이 때 최소값은 4.4이며, 최대값은 4.6로 나타났다. 인가전류에 따라 출력값이 비례하여 증가함을 알 수 있다.

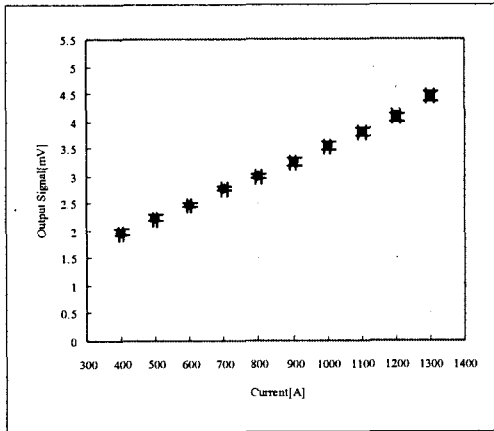


그림 8. 0[°C]일때의 인가전류와 출력의관계
Fig. 8. Relation of current and output for 0[°C]

그림 9는 10[°C]일때의 인가전류와 출력의 관계를 나타낸 것으로 인가전류 1300[A]에서 출력의 평균값은 3.9이고, 이 때 최소값은 3.7이며, 최대값은 4.0으로 나타났다. 인가전류에 따라 출력값이 비례하여 증가함을 알 수 있다.

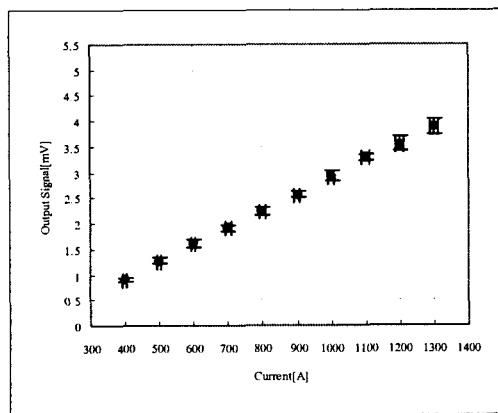


그림 9. 10[°C]일때의 인가전류와 출력의관계
Fig. 9. Relation of current and output for 10[°C]

그림 10은 30[°C]일때의 인가전류와 출력의 관계를 나타낸 것이다. 이 때 인가전류 1300[A]에서 출력 신호의 평균값은 3.8이고, 최소값, 최대값은 각각 3.7, 3.8로 나타났다. 출력신호의 크기는 인가전류에 따라 비례하여 증가함을 알 수 있다.

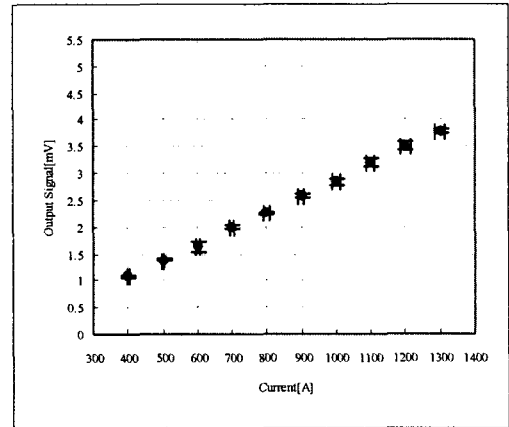


그림 10. 30[°C]일때의 인가전류와 출력의관계
Fig. 10. Relation of current and output for 30[°C]

그림 11은 50[°C]일때의 인가전류와 출력의 관계를 나타낸 것으로 인가전류 1300[A]에서 출력의 평균값은 4.1이고, 이 때 최소값은 3.8이며, 최대값은 4.3으로 나타났다. 인가전류에 따라 출력값이 비례하여 증가함을 알 수 있다.

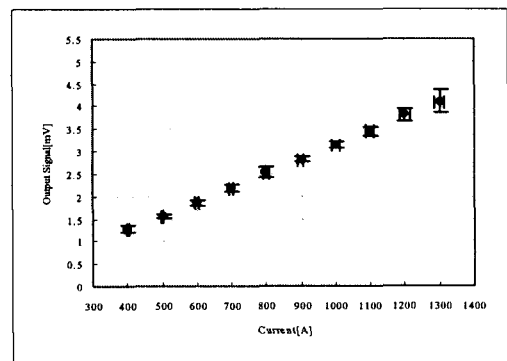


그림 11. 50[°C]일때의 인가전류와 출력의관계
Fig. 11. Relation of current and output for 50[°C]

그림 12는 -40[°C]에서 50[°C]까지의 온도변화에

대한 400[A]에서 1200[A]까지의 인가전류에 대한 출력변화와 오차를 나타낸 것이다. 동일 전류 값에서 온도에 따른 편차가 적음을 알 수 있고 -20[°C]와 0[°C]에서 출력의 변동이 큰 것을 볼 수 있다.

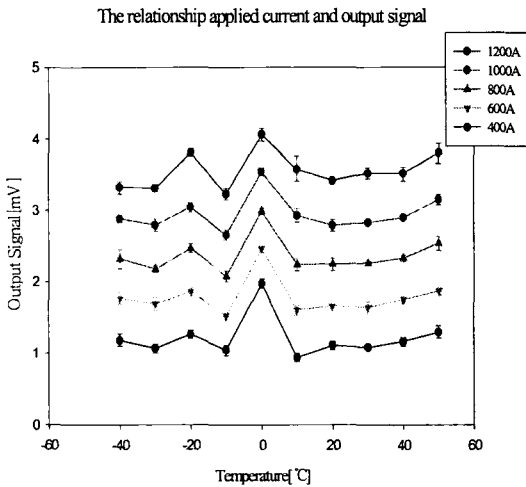


그림 12. -40~50[°C] 온도변화에 대한 각 전류값의 변화와 오차
Fig. 12. The change and an error of current at temperature change -40[°C]~50[°C]

이것은 광섬유의 재질 특성에 따라 verdet 정수가 20[°C]를 기준으로 설정되어 있기 때문에 온도에 따라 verdet 정수값이 영향을 받아 변화는데 기인하여 출력값의 변동이 큰 것으로 생각된다. 이에 따른 대안으로 외부온도를 측정해 보상할 수 있는 방식이 구현 되어야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 논문에서는 Faraday 효과를 이용한 광전류센서를 설계·제작하여 전류 인가시 센싱 파이버, PBS(Polarization Beam Splitter)를 거쳐 포토다이오드로 출력되어 나오는 신호강도를 reference 값에 따른 출력의 오차율과 센싱부 광섬유의 온도변화에 따른 출력신호강도를 측정하였다.

본 논문에서 나타낸 실험결과는 다음과 같다.

① 광전류센서의 출력신호를 측정된 결과 전류가 증가할수록, 주변온도가 높을수록 출력신호가 비례

하여 커지는 것을 알 수 있었다.

② 동일 전류 값에서 온도에 따른 편차가 적음을 알 수 있고 -20[°C]와 0[°C]에서 오차가 큰 것을 볼 수 있었다

③ 30[m] 길이의 광섬유를 기준으로 -40[°C]~50[°C]의 온도변화를 10[°C] 씩 증가시켜 광전류센서의 출력 변화를 Oscilloscope로 측정된 결과 reference 값과의 최대 오차율은 다음과 같이 나타났다.

-40[°C]	-30[°C]	-20[°C]	-10[°C]	0[°C]
-3.97[%]	2.92[%]	3.86[%]	-2.79[%]	1.96[%]
10[°C]	20[°C]	30[°C]	40[°C]	50[°C]
1.55[%]	3.35[%]	1.78[%]	2.26[%]	1.93[%]

실험을 위해 구성된 시스템은 광을 이용한 페루프형 센서 이므로 측정대상도체 이외의 다른 외부 전자기적 신호에 의해 영향을 받지 않으며 센싱부의 광섬유의 길이 즉, 권수의 조정과 신호처리 과정의 최적화를 통해서 보다 정밀한 전류 측정도 가능하리라 예상된다.

그리고 시제품 개발을 위해 추후 연속 데이터측정 및 현장적용 시험을 통해 그에 따른 보강실험 및 문제점 보완 등을 통해 광계측법을 이용한 대전류 측정기술을 확립·발전시킬 수 있을 것이다.

이 연구는 (주)효성의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 이에 감사 드립니다.

References

- (1) 이정수 "가스절연개폐장치용 optical CT를 이용한 대전류 측정" 영남대학교, 석사학위논문 p. 1, 2002.02.
- (2) 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.
- (3) 齋藤成文, et al., "レーザを利用した無接触超高圧変流器", J.I.E.E.J.8/68, Vol. 88-8, No. 959 JANUARY 1990.
- (4) George I. Chandler and Franz C. Jahoda, "Current measurements by Faraday rotation in single-mode optical fiber", Rev. Sci. Instrum. 56(5), May 1985.
- (5) M. Kanoi, et al., "Optical Voltage And Current Measuring

Faraday효과를 이용한 광CT의 온도특성에 관한 연구

- System For Electric Power Systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 1, January 1986.
- [6] T. Sawa, et al., “Development Of Optical Instrument Transformers”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990.
 - [7] 김영수 “광전류·전압센서의 적용사례조사연구” 대한전기학회 전기물성·응용부문화 추계학술대회논문집, pp. 215-218, 2002.11.9.
 - [8] 전재일 “자기광학효과를 이용한 광전류센서에 관한 연구” 한국조명·전기설비 학회 논문지.
 - [9] 정철우 “대전류 측정을 위한 Optical CT 기술 개발 연구” 영남대학교, 석사학위논문 p. 2, 2004.02.
 - [10] 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.
 - [11] 전재일 “대전류 측정을 위한 광CT의 온도특성” 대한전기학회 고전압 및 방전응용기술 연구회 춘계학술대회, pp1~3, 2004.

◇ 저자소개 ◇

전재일 (全在—)

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

허순영 (許順英)

1981년 6월 26일생. 2003년 경일대학교 전기공학과 졸업. 2003년~현재 영남대학교 전기공학과 석사 과정.

박원주 (朴元柱)

1954년 3월 14일생. 1978년 영남대학교 전기공학과 졸업. 1982년 일본 큐우슈우대학 대학원 졸업(박사). 현재 영남대학교 전자정보공학부 교수.

이광식 (李廣植)

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

김정배 (金正倍)

1966년 10월 12일생. 1989년 한양대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 일본 큐우슈우대학교 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.