Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 17, No.6, pp. 60~65 November 2003 논문 17-6-9

Faraday 효과를 이용한 클램프형 광-전류 변류기 연구

(Study of Clamp-type Optical Current Transformer using Faraday Effect)

김수길* · 이용욱 · 이병호 · 임용훈 · 홍선기
(Soo - Gil Kim · Yong - Wook Lee · Byoung - Ho Lee · Yong - Hun Lim · Sun - Ki Hong)

요 약

본 논문에서는 Faraday 효과를 이용한 클램프형 구조의 광-전류 변류기 헤드 설계시에 고려해야할 조건을 이론적으로 해석하고, 이를 토대로 한 클램프형 광-전류 변류기 헤드를 제작하여, 도선에 흐르는 전류, 광의 입사각에 따른 광출력의 변화 및 감도를 측정하고 분석함으로써 전류계로서의 가능성을 입증하였다.

Abstract

In this paper, we analyzed theoretically design requirement of a clamp-type optical current transformer(COCT) head, and manufactured a COCT head based on design requirement. Also, we measured and analyzed the current of conductor, and change of optical power and sensitivity with incidence angle of light using COCT head, and demonstrated the feasibility of manufactured COCT through those experiments.

Key Words : Optical current transformer, Faraday effect, FD10 glass, bulk-type, clamp-type

1. 서 론

최근 전력설비의 대용량화로 인하여 양질의 전력을 안정적으로 공급하기 위해서 전력 계통의 운용중에 발생하는 사고를 신속히 감지, 판별하여 사고부분을 신속히 분리시킬 수 있는 보호계전 시스템의 역할이 더욱 중요시되고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 전자기장식 전류변류기(Current Transformer, 이하 CT)는 도체 주변에 전류가 흐르게 되면 생기는 자기장을 이용, 도체 주변의 철심을 흐르는 전류를 측정하는 방식이다. 하지만 이 방식은 공진 현상과 자기 포화에 의하여 결과에 왜곡이 생길 수 있다. 또한 외부에서 발생한 자기장에 의해서도 결과에 오류가 생길 수 있으며, 더욱이 송배전 전압의 초고압화에 따른 절연장치의 규모가 커질수록 절연 비용이 많이 들고 취급 등에 어려움이 많은 실정이다[1].

이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 개발된 CT중의 하나가 광-전류변류기(Optical Current Transformer, 이하 OCT)이다. OCT는 기본적인 개념이 제안된 것은 매우 오래되었고 1980년대 이후 국내외적으로 활발한 연구가 이루어진 분야이다.

하지만 30여 년간의 이론적 발전에 비하여 그 기술적 완성도나 여건이 아직은 실용화 단계에 미치지 못하고 있다. 이는 OCT 시스템에 사용되는 광소자의 품질과 제조기술, 가격경쟁력, 그리고 기술인력의

* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 조교수
Tel : 041-540-5676, Fax : 041-540-5693
E-mail : sgkim@office.hoseo.ac.kr
접수일자 : 2003년 4월 17일
1차심사 : 2003년 5월 9일
심사완료 : 2003년 7월 24일

확보 등 기반조건이 취약하였고, 실제 플랜트에 적용할 경우 겪게 되는 여러 가지 환경적 외란에 의한 노이즈와 안정성의 문제 등을 효율적으로 해결할 수 있는 최적 설계가 이루어지지 않았기 때문이다. 그러나 최근 광통신 산업의 발달에 힘입어 관련소자의 품질과 가격경쟁력이 향상되었고 유용한 기술인력의 수가 늘어남에 따라 과거 어느 때보다도 실용화의 가능성이 고조되고 있는 시점이다. OCT의 장점으로는 절연성이 뛰어나며 또 광의 방향과 전류에 의해 생기는 자기장의 방향이 일치해야만 광의 성질에 변화가 생기므로 외부 자기장에 의해 결과가 왜곡이 되지 않는다는 것이다.

OCT의 종류에는 먼저 광 루프를 광섬유(optical fiber)를 사용하여 만드는 광섬유형과 어떤 매질을 하나의 덩어리 형태로 만들어 광 폐루프를 만드는 형태인 벌크(bulk)형으로 나눌 수 있으며, 벌크형 광전류센서는 전류를 측정하기 위한 센서 헤드(sensor head)가 유리이므로 절연성이 좋으며, 광경로가 폐루프를 형성하므로 주변 도체에 흐르는 전류에 의한 영향이 제거된다[2,3,4]. 광섬유형 OCT는 광섬유 내부에 존재하는 선형 복굴절(linear birefri- ngence)과 광섬유를 휠 때 만들어지는 복굴절의 영향을 해결해야 하는 어려움이 있다. 그에 반해 벌크형 OCT는 광을 여러 번 반사를 시켜야 하므로 광 정렬(optical alignment)이 어렵고 센서 헤드를 설치를 할 때 전류가 흐르는 도체를 파괴하지 않고서는 설치를 할 수 없다는 단점이 있다. 이런 단점을 보완하기 위해서 클램프형 광 전류 변환기(Clamp-type Optical Current Transformer, COCT)가 개발되었다[5].

본 논문에서는 클램프형 구조의 센서 헤드 설계시에 고려해야할 조건을 이론적으로 해석하고, 이를 토대로 한 클램프형 센서헤드를 제작하여, 도선에 흐르는 전류, 광의 입사각에 따른 광출력의 변화 및 감도를 측정하고 분석함으로써 전류계로서의 가능성을 입증하였다.

2. 광전류센서의 기본원리

2.1 기본원리

일반적으로 OCT는 페러데이 효과(Faraday Effect)를 이용하여 어떤 도체에 흐르는 전류의 양을 측정한다. 어떤 도체에 전류가 흐르게 되면 그 주변에는 오른 나사의 방향으로 자기장이 생기게 된다. 그림 1에서 알 수 있듯이 자기장의 방향과 같은 방향으로 선형 편광된 빛이 입사되면 이 빛의 편광면은 자기장의 세기에 비례하여 회전하게 된다.

$$\theta_F = VHL \tag{1}$$

θ_F : Faraday 회전각
V : Verdet 상수
H : 자기장의 크기
L : Faraday cell의 길이

여기서 전류의 법칙에 의해 자기장 H가 영향을 미치는 길이, 즉 Faraday cell의 길이만큼 선적분을 해주면

$$\begin{aligned}\theta_F &= V \cdot \oint H \cdot dL \\ &= V \cdot I\end{aligned} \tag{2}$$

가 되어 페러데이(Faraday) 회전각 θ_F는 전류에 비례하게 된다. 이 회전각에 따른 광세기를 광검출기로 측정함으로써 도체에 흐르는 전류를 측정하는 것이 가능하다.

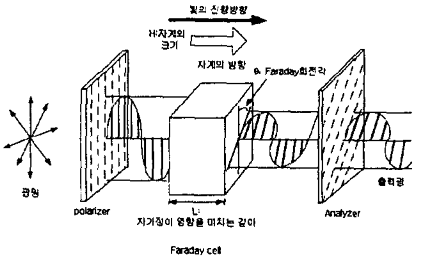

그림 1. 광 전류변류기의 기본원리
Fig. 1. Principle of optical current transformer

2.2 센서헤드내의 입사파와 반사파의 위상관계

유전상수가 위치에 관계없이 일정하고(homogene-

ous) 전계의 방향에 관계없이 유전상수가 일정한 (isotropic) 두개의 매질은 0의 전도도를 가지고 있어서 투명하다고 가정하자. 이 경우에 두 매질의 투자율은 1로 볼 수 있다. 그러면 두 개의 매질의 경계면에서 생기는 입사면에 평행한 편파와 수직인 편파에 대해 입사파와 투과파 그리고 입사파와 반사파간의 관계는 식 (3)-(6)까지의 Fresnel 공식으로 표현된다[6].

$$T_{\parallel}=\frac{2n_1\cos\theta_i}{n_2\cos\theta_i+n_1\cos\theta_t}A_{\parallel} \tag{3}$$

$$T_{\perp}=\frac{2n_1\cos\theta_i}{n_1\cos\theta_i+n_2\cos\theta_t}A_{\perp} \tag{4}$$

$$R_{\parallel}=\frac{n_2\cos\theta_i-n_1\cos\theta_t}{n_2\cos\theta_i+n_1\cos\theta_t}A_{\parallel} \tag{5}$$

$$R_{\perp}=\frac{n_1\cos\theta_i-n_2\cos\theta_t}{n_1\cos\theta_i+n_2\cos\theta_t}A_{\perp} \tag{6}$$

여기서, θ_i는 입사각, n_1과 n_2는 각각 공기와 공기와 접하고 있는 물질의 굴절률을 나타낸다. $T_{\parallel}$와 $R_{\parallel}$은 입사면에 평행하며 한 매질에서다른 매질로 전파되어지는 투과파와 반사파이며 $T_{\perp}$와 $R_{\perp}$는 입사면에 수직하며 한 매질에서 다른 매질로 전파되어지는 투과파와 반사파이다. 마찬가지로 $A_{\parallel}$는 입사면에 평행한 입사파를 $A_{\perp}$는 입사면에 수직한 입사파를 나타내며, 이러한 관계는 그림 2에 나타내었다.

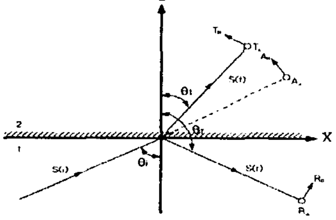

그림 2. 평면파의 굴절과 반사
Fig. 2. Refraction and reflection of plane wave

식 (3)과 (5)는 입사면에 평행한 편파의 경우에 대한 투과파와 반사파를 나타내고, 식 (4)와 (6)은 입사면에 수직인 편파의 경우에 대한 투과파와 반사파를 나타낸다. 식 (5)와 (6)에 Snell의 굴절법칙을 이용하여 Fresnel 공식을 변화시키면 다음과 같다.

$$R_{\parallel}=\frac{\sin\theta_i\cos\theta_i-\sin\theta_t\cos\theta_t}{\sin\theta_i\cos\theta_i+\sin\theta_t\cos\theta_t}A_{\parallel} \tag{7}$$

$$R_{\perp}=-\frac{\sin\theta_i\cos\theta_t-\sin\theta_t\cos\theta_i}{\sin\theta_i\cos\theta_t+\sin\theta_t\cos\theta_i}A_{\perp} \tag{8}$$

전반사의 경우 입사각과 굴절각에 대한 관계는 Snell의 법칙에 의해 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\sin\theta_t=\frac{\sin\theta_i}{n}$$
$$\cos\theta_t=\pm i\sqrt{\frac{\sin^2\theta_i}{n^2}-1} \tag{9}$$

식 (9)를 이용하여 전반사의 경우에 있어서 입사면에 평행한 편파와 수직인 편파의 반사파를 다시 쓰면 다음식과 같다.

$$R_{\parallel}=\frac{n^2\cos\theta_i-i\sqrt{\sin^2\theta_i-n^2}}{n^2\cos\theta_i+i\sqrt{\sin^2\theta_i-n^2}}A_{\parallel} \tag{10}$$

$$R_{\perp}=\frac{\cos\theta_i-i\sqrt{\sin^2\theta_i-n^2}}{\cos\theta_i+i\sqrt{\sin^2\theta_i-n^2}}A_{\perp} \tag{11}$$

여기서, n은 n_2/n_1을 나타낸다. 그러므로 전반사되는 빛의 세기는 입사파의 빛의 세기와 같음을 식으로부터 알 수 있으며, 입사파와 반사파간의 위상성분의 변화는 식 (10)과 식 (11)로부터 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{R_{\parallel}}{A_{\parallel}}=e^{i\delta_{\parallel}},\quad \frac{R_{\perp}}{A_{\perp}}=e^{i\delta_{\perp}} \tag{12}$$

식 (10), (11), (12)으로부터 식 (13)이 유도된다.

$$\tan\frac{\delta_{\parallel}}{2}=-\frac{\sqrt{\sin^2\theta_i-n^2}}{n^2\cos\theta_i}$$
$$\tan\frac{\delta_{\perp}}{2}=-\frac{\sqrt{\sin^2\theta_i-n^2}}{\cos\theta_i} \tag{13}$$

입사면에 평행한 편파와 수직인 편파사이의 위상차를 다음식과 같이 정의하면,

$$\delta = \delta_{\perp} - \delta_{\parallel} \qquad (14)$$

이 되고, 식 (14)에 대하여 식 (13)을 다시 표현하면 식 (15)와 같다.

$$\tan\frac{\delta}{2} = \frac{\tan\frac{\delta_{\perp}}{2} - \tan\frac{\delta_{\parallel}}{2}}{1+\tan\frac{\delta_{\perp}}{2}\tan\frac{\delta_{\parallel}}{2}} = \frac{\left(\frac{1}{n^2}-1\right)\frac{\sqrt{\sin^2\theta_i - n^2}}{\cos\theta_i}}{1+\frac{\sin^2\theta_i - n^2}{n^2\cos\theta_i}} = \frac{\cos\theta_i\sqrt{\sin^2\theta_i - n^2}}{\sin^2\theta_i} \qquad (15)$$

식 (15)로부터 입사면에 수직인 편파와 수평인 편파를 가지는 입사파가 반사된 후에 두 모드간의 위상차가 발생하지 않기 위해서는 입사파가 임계각으로 입사($\sin\theta_i = n$)해야 한다는 것을 알 수 있다. Faraday 효과를 이용하는 폐로형 OCT 내부에서는 반사가 일어나는데, 앞에서 언급한 조건이 충족되지 않을 때는 두 모드간에 위상차가 발생하여 선형편파의 입사파는 반사가 일어난 후에는 타원편파로 변환되는 현상이 발생한다. 선형편파의 회전된 정도를 이용하여 전류를 측정하는 폐로형 OCT 센서에서 이러한 문제는 측정전류값에 오차를 유발하므로 측정의 정확도를 떨어뜨리는 역할을 하며, 심한 경우에는 측정값에 대하여 신뢰할 수 없는 결과를 발생시킬 수도 있다. 따라서, 측정전류의 오차를 줄이기 위해서는 입사파가 반사면에 임계각으로 입사하도록 해야 한다.

2.3 임계각을 고려한 COCT 헤드설계 및 제작

COCT 헤드를 설계할 때 고려해야 할 사항은 광원에서 나온 빛이 매질로 입사하여 반사할 때 전반사가 일어나도록 설계해야 하며, 반사에 의한 위상차가 발생하지 않도록 빛이 반사하는 부분에서의 입사각이 임계각이 되도록 하여야 한다. 전반사가 일어나는 임계각은 다음식과 같이 정의된다.

$$\theta_c = \sin^{-1}\frac{n_2}{n_1} \qquad (16)$$

여기서, n_1과 n_2는 각각 공기와 매질의 굴절률을 나타낸다. 그림 3은 반사시에 광의 손실이 일어나지 않도록 식 (16)의 조건을 만족하는 임계각을 가진, 두 개의 동일한 bulk-glass의 조각을 사용하여 설계한 COCT 헤드이며, 재질은 반자성체 도핑유리인 FD10이며 광원에서 나온 빛의 편광면을 전류의 세기에 따라 회전시키는 Faraday 소자이다. FD10의 굴절률은 1.799이다. 파장 633[nm]에서 버뎃(Verdet) 상수는 2.23×10^{-5} rad/A이며, 이 조건에 맞는 임계각은 33.774도이다.

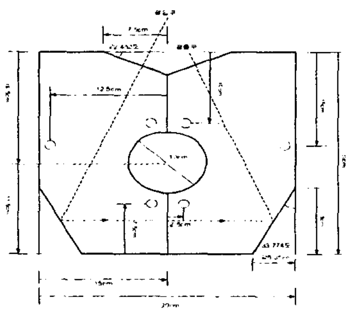

그림 3. 설계된 COCT 헤드
Fig. 3. COCT head

임계각을 고려하여 설계하는 경우에 경사각은 아주 정밀하게 가공되어야 하는데, 이는 국내회사들의 기술수준을 고려해보면 고정밀도로 가공하는 것은 불가능하여, 실제 제작된 변류기 헤드의 임계각은 33.7도였으며, 크기는 가로 30[cm], 세로 30[cm], 두께 1[cm]였다.

3. 실험 및 결과 분석

본 연구에서 제작된 변류기 헤드가 앞에서 이론적으로 언급된 것처럼 도체에 흐르는 전류를 측정할 수 있는 지를 검증하기 위해 그림 4와 같은 실험시스템을 구축하였다.

그림 4에서 약 86[A]가 흐르는 도체를 20번 감아 최대 약 1700AT까지 흐를 수 있도록 만들었다. 변류

기 헤드에 입사되는 광원은 출력이 35[mW]이고 파장이 633[nm]인 He-Ne 레이저(모델 1144P, JDS Uniphase)를 사용하였다. He-Ne레이저에서 입사된 빛은 변류기 헤드의 임계각으로 반사되도록 정렬되었고, 변류기 헤드에서 나온 빛은 검광기(모델 03FPG007, Melles Griot) 를 지난 후에 광세기를 광검출기(모델 818-SL, Newport)에 측정할 수 있도록 실험장치를 구성하였다.

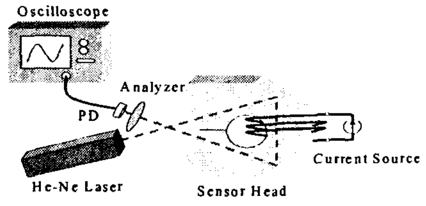

그림 4. 전류측정장치 구성도
Fig. 4. Setup for current measurement

도체에 흐르는 전류값을 0A에서부터 1600AT까지 실험하였으며, 그림 5는 오실로스코프(LC534 AM, LeCroy)로 400AT과 1600AT을 측정한 파형을 보여주는 그림이다.

전류파형은 그림에서 도시되어 있지 않지만 그림 5에서의 파형의 주기와 일치하는 결과를 보여주었으며, 전류값이 클수록 측정된 전류파형이 깨끗하였으며, 전류의 크기가 커지면 피크값도 커지는 것을 볼 수 있다.

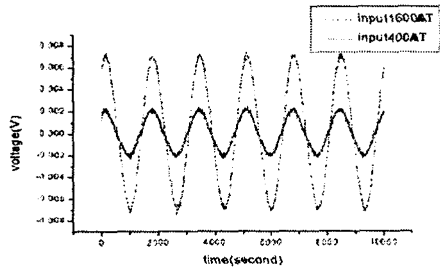

그림 5. 입력 전류가 400AT와 1600AT일 때 광검출기의 출력전압
Fig. 5. Output voltages of optical detector at 400AT and 1600AT(input currents)

그림 6은 도체에 흐르는 전류를 200AT부터 1600AT까지 변화시키면서 각각 5회 측정하였으며, 측정한 전압 파형의 실효치에 대한 5회 평균치를 나타낸 그래프이다.

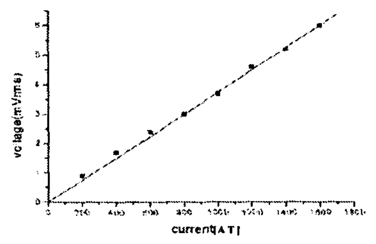

그림 6. 200AT부터 1600AT까지의 전류를 측정한 실험결과
Fig. 6. Experimental results of current measurement from 200AT to 1600AT

최대 오차는 도체에 흐르는 전류가 200AT일 때 최대 17%였으며, 600AT까지는 10%미만 그리고 1600AT까지의 전류값의 범위에 대해서는 5%미만의 오차가 나타났다. 오차는 전류값이 커질수록 작아지는 것을 측정결과로 확인할 수 있었다. 전류값이 작을 때는 파장이 일정할 때의 Verdet 상수로 인해 생기는 빛의 편광면의 회전정도가 작고, 전류값이 클 때는 편광면의 회전정도가 커짐으로써 측정결과에서의 오차가 작아지는 것이라고 생각된다. 따라서, Verdet 상수가 큰 변류기 헤드를 사용하거나 반대로 Verdet 상수가 작지만 변류기 헤드가 큰 것을 이용하여 전류를 측정하면 전류가 작은 경우에도 측정오차는 작아지리라 생각된다.

그림 7은 입사각에 따른 광출력의 변화를 측정한 결과를 보여준다. 입력면에서의 입사각을 80도에서 100도까지 변화시켜가며 실험을 하였다.

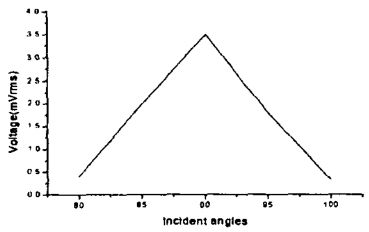

그림 7. 입사각과 출력의 관계
Fig. 7. Relation between incidence angle of light and output voltage

그림 7에서 입사각이 90도일 때 가장 좋은 결과를 얻으며 90도에서 1도가 벗어나면 실효치가 약 0.3[mV]씩 줄어듬을 알 수 있다. 또한 입사각이 90도에서 ±10도를 벗어나면 출력을 얻지 못함을 알 수

있는데 이는 광경로가 생기지 않기 때문이다. 제작된 변류기 헤드는 입사면에 90도로 입사할 때 반사면에서 임계각으로 입사하도록 설계된 변류기 헤드이므로, 그림 7과 같은 결과는 변류기 헤드가 정상적으로 잘 제작되었다는 것을 의미한다.

그림 8은 입사면에 들어오는 빛의 입사각에 따라 변류기의 감도에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 80도 일 때는 광출력이 거의 없으며, 입사각이 85도일 때보다 90도일 때가 약 6배 가까이 큰 광출력을 얻을 수 있으며, 감도도 좋아진다는 것을 알 수 있다.

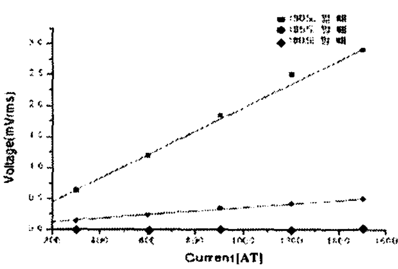

그림 8. 입사각에 따른 감도
Fig. 8. Sensitivity with incidence angle of light

4. 결 론

제작된 COCT 헤드를 이용하여 전류를 0A~1600AT까지 측정하여 전류값의 크기에 비례하는 광출력을 얻었으며, 이로부터 전류측정 광-전류 변류기로서의 가능성이 입증되었다.

COCT 헤드는 전류값에 따른 선형적인 특징을 나타내고 있으며, 오차는 전류의 값이 커질수록 작아지므로 소전류보다는 대전류를 측정하는데 적합하리라 생각된다.

광의 입사각이 입사면에 대해 90도일 때 감도는 최대가 되고, 10도 이상으로 입사각이 변할 때는 감도가 최소로 되므로 광이 COCT 헤드의 입구에서의 입사면에 수직으로 입사해야 한다는 것을 알 수 있다.

향후 주변 온도가 광-전류 변류기의 측정결과에 미치는 영향, 광원의 편광의 회전에 따른 광출력의 변화, 장시간 측정에 대한 센서헤드의 안정도 실험 등을 통하여 제작된 광-전류 변류기의 성능을 테스트하고 분석해야 할 것이다.

References

[1] N. Itoh, et al., "Bi-Substituted Rare-Earth Iron Garnets for Fiber Optic Current Sensors", Technical Digest of the 11th Sensor Symposium, pp83~86, 1992.
[2] M. Takahashi, etal. "Optical current transformer for gas insulated switchgear using silica optical fiber," IEEE Transactions on Power Delivery vol.12, no.4, pp. 1422~1427, 1997.
[3] T. Fujimoto, etal., "Development of an optical current transformer for adjustable speed pumped storage systems," IEEE Transactions on Power Delivery vol.12, no.1, pp. 45~50, 1997.
[4] B. Yi, etal. "New design optical electric-current sensor for sensitivity improvement," IEEE Instrumentation and Measurement vol. 49, no. 2, pp. 418~423, 2000.
[5] 정현, 이용욱, 김수길, 이병호, 박병석, "클램프형 부피 광 전류센서" 대한전기학회 하계학술대회 논문집 C, pp. 1924~1926, 2002.
[6] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, Fundamentals of Photonics, (Wiley-Interscience, 1991) pp. 203~210.

◇저자소개◇

김수길 (金秀吉)
1965년 8월 2일생. 1988년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1997년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 조교수.

이용욱 (李鎔旭)
1975년 4월 25일생. 1998년 2월 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 졸업(학사). 2000년 2월 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 졸업(석사). 2003년 3월~현재 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사과정 중.

이병호 (李竝浩)
1964년 7월 5일생. 1987년 서울대학교 전자공학과 졸업(학사). 1989년 서울대학교 전자공학과 졸업(석사). 1993년 Univ. of California at Berkeley, Electrical engineering and computer science졸업(박사). 1993년 9월~1994년 7월 Unive. of Califonia at Berkeley Post doc. 재직. 1994년 9월 ~ 현재 서울대학교 전기공학부 부교수 재직.

임용훈 (林勇勳)
1968년 8월 26일생. 1996년 건국대학교 전자공학과 졸업(학사). 1998년 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1996년 한전 입사. 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임보연구원.

홍선기 (洪璿基)
1965년 1월 24일생. 1987년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(학사). 1989년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수.