

삼상 배전반에서 자기센서 기반의 고정밀 전류 측정 기법

High-Accuracy Current Sensing Technique Based on Magnetic Sensors for Three-Phase Switchboards

이성호 · 김태민* · 김남수* · 안영호** · 이성철

Sungho Lee · Taemin Kim* · Namsu Kim* · Youngho Ahn** · Sungchul Lee

요 약

본 논문에서는 공장에서 많이 사용하는 삼상 배전반에서 자기센서를 이용한 고정밀 전류를 측정하기 위한 기법을 제안하고 이를 분석 및 검증한 결과를 서술하였다. 일반적으로 개방형 자기센서 기반의 비접촉식 방식으로 전류를 측정할 경우 인접한 전선의 전류에서 유도되는 자기장의 영향으로 그 오차가 10 % 이상으로 증가되는 단점을 가지고 있으며, 이로 인하여 대부분의 상용 전류센서의 경우 투자율이 큰 ferrite를 이용한 루프형 구조를 채택하고 있다. 제안된 고정밀 전류센싱 기법은 인접한 자기장의 크기를 측정하여 이를 수학적으로 제거함으로써 고정밀의 전류센서를 개방형 자기센서를 사용하여 구현 가능할 수 있으며, 전류센서의 단가 및 사이즈를 줄일 수 있어 공장 내의 다양한 하위 노드 단에서 소모되는 전류를 측정 가능한 장점을 가지고 있다.

Abstract

In this paper, a high-accuracy current sensing technique for three-phase current paths in an electrical switchboard is proposed. Conventional open-style current sensors using magnetic sensors show inaccurate sensing performance with more than 10% error due to undesired magnetic field interference from neighboring paths. To increase accuracy, large and expensive current transformers with large permeabilities have been used, which increased the cost and size. The proposed technique can improve the measured magnetic field by the calculation of magnetic interference effect from neighboring current paths. The relationship between neighboring magnetic fields and the desired magnetic field is theoretically analyzed in a general case. The proposed technique is verified using magnetic field simulations in a three-phase busbar environment.

Key words: Current Sensor, Magnetic Sensor, Magnetic Field, Three-Phase Current, Switchboard

I. 서 론

최근 공장 내 설비나 기계에 다양한 센서를 설치하여

데이터를 실시간으로 수집 분석하여 보다 효율적인 에너지 관리를 하고자 하는 목적으로 스마트 팩토리를 향한 관련 기술 개발이 증가하고 있다. 공장에 필요한 많은 센

「본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20152020106010).」

전자부품연구원 SoC플랫폼 연구센터(Department of Radio Science & Engineering, Korea Electronics Technology Institute)

*건국대학교 기계설계공학과(Department of Mechanical Engineering, Konkuk University)

** (주)레티그리드(RetiGrid, Co.)

· Manuscript received August, 7, 2017 ; Revised October, 16, 2017 ; Accepted November, 30, 2017. (ID No. 20170807-074)

· Corresponding Author: Sungho Lee (e-mail: slee@keti.re.kr)

서 중 많은 전력을 소모하는 공장에서 사용하는 전력을 모니터링하고 유향 전력과 낭비되는 전력을 인지하고 미래의 소모 전력을 예측하는 것은 소모 전기 절약을 넘어서 공장 내 설비의 배치, 고장 및 오작동을 판단할 수 있으므로 효율적, 지능적인 공장 관리를 위해서는 반드시 필요한 기능이다.

기존 대부분의 공장은 외부로부터 들어오는 22,000 V의 삼상 전압을 받아 이를 공장 내부에서 나눠서 사용하는 형태이며 공장 내의 다양한 대규모 설비들이 각기 다른 조건에서 큰 전력 소모를 하고 있음에도 불구하고, 각각에 대한 에너지 사용을 모니터링하는 데는 모니터링 기기의 크기나 단가로 인하여 그 설치 및 운용에 한계가 있는 실정이다.

기존의 전류를 측정하는 방식은 크게 네 가지로 나눌 수 있다^{[1]-[7]}. 첫번째 방식은 셉트 방식으로 매우 작은 정밀한 저항을 이용하여 흐르는 전류를 양단의 전압을 측정하여 계산할 수 있으나, 이러한 방식은 측정시 전력 손실이 있고 이로 인한 발열로 인하여 대전류 측정은 어려운 단점이 있다. 두번째 방식은 관통형 전류 트랜스포머(Current Transformer: CT) 방식으로 간섭 등 외란에 강해 정밀도가 높은 장점이 있는 반면에 DC 전류 측정이 불가능하며 용량이 커질수록 CT의 크기 및 무게가 증가하여 제품 단가가 급격히 증가하는 단점을 가지고 있다. 또한 전선이 CT를 관통해야 하므로 설치 및 유지 보수시 단선

이 필요한 문제가 존재한다. 세 번째로는 광 신호 기반의 CT 방식을 들 수 있으나, 배전반의 특성상 전체 시스템의 크기를 임의로 조정할 수 없는 좁은 공간에 광신호를 모든 전류 경로에 모두 설치하기에는 크기의 제한이 존재하고 온도와 스트레스에 따른 광신호의 복굴절이 보정이 어려운 단점이 존재한다. 마지막으로 본 논문에서 제안된 개방형 자기센서 방식을 들 수 있다. 자기센서 방식의 경우 전류량과 무관하여 매우 작은 자기센서를 통하여 전류가 흐르는 전선과 자기센서의 거리를 조정함으로써 다양한 전류까지 전류를 측정할 수 있는 장점이 존재하고 전선의 관통없이 측정할 수 있어 설치가 용이하다. 특히 자기센서 중 홀 센서나 자기저항 센서의 경우 단가가 매우 낮고 인가된 자기장에 선형적으로 비례하는 홀 전압이 출력되므로 자기장의 크기를 쉽게 측정할 수 있다. 반면 자기센서는 전자기 유도에 따라서 측정하게 되므로 인접 전선이나 부스바에 흐르는 전류로부터 유도된 자기장의 영향을 받을 수 있다. 이러한 간섭은 일반적인 경우에는 문제가 되지 않으나 고 정밀도가 요구되는 응용이나 분배전반과 같이 부스바나 전선이 밀집된 환경과 같이 공간적으로 협소한 상황에서는 오차가 증가되는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 개방형 자기센서를 이용하여 전류를 측정할 경우 발생하는 인접 전류 간섭에 대한 문제를 해결하는 알고리즘을 제안하여 분석 후 시뮬레이션을 통하여 검증까지를 서술하고자 한다.

II. 전류 자기장 영향분석

일정한 전류 I 가 흐르는 도선에서 유도되는 자속 밀도(B)의 크기는 식 (1)과 같이 나타난다^[8].

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{4\pi} \int \frac{dl \times \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_0 \mu_r I}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (1)$$

식 (1)에서 μ_0 는 진공 중의 투자율을 나타내며 μ_r 은 상대 투자율, r 은 도선에서 거리를 나타낸다. 따라서 자속밀도는 도선의 전류가 클수록 그리고 거리에 반비례할수록 크게 나타난다.

하나의 전류가 흐를 때는 측정하고자 하는 전류 이외의 외란은 거의 존재하지 않으며 미약한 지구 자기장(0.25~

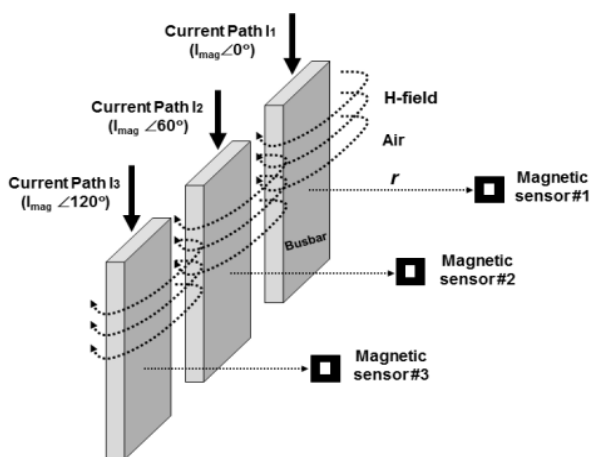


그림 1. 삼상 전류 및 전류 측정을 위한 자기센서 배치
Fig. 1. Sensor location for three-phase current sensing.

0.65 guass)만 존재한다. 또한 자기센서 중 홀센서를 이용할 경우 최종 출력 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_H = v_x B_z w \quad (2)$$

식 (2)에서 v_x 는 홀센서에 인가된 전압을 나타내며 B_z 는 수직방향으로 인가된 자기장, w 는 홀센서의 출력 양단의 간격을 의미한다. 따라서 수직방향으로 인가된 자기장의 크기에 선형적으로 비례하는 전압이 생성되며 이를 통해 전류의 크기가 측정이 가능하게 된다.

한편 하나의 전류가 아닌 다수의 전류라인이 존재할 때는 각 전류로부터 자기장이 유도되며 실제 전류와 측정된 전류가 간섭되는 자기장으로 인하여 달라지게 된다. 자기센서에 측정된 전류를 나타내는 행렬을 I 라고 하고, H 는 자기장 간섭 계수 행렬, I' 는 실제로 전선에 흐르는 전류 행렬을 나타낼 때 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = H \cdot I' \quad (3)$$

따라서 총 N 개의 전류를 행렬로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & \cdots & h_{n,1} & \cdots & h_{N,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} & \cdots & h_{n,2} & \cdots & h_{N,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ h_{1,n} & h_{2,n} & \cdots & h_{n,n} & \cdots & h_{N,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ h_{1,N} & h_{2,N} & \cdots & h_{n,N} & \cdots & h_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ \vdots \\ I'_n \\ \vdots \\ I'_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

위의 행렬에서 간섭 계수 행렬 H 의 각 원소 $h_{m,n}$ 은 n 번째 회로에서 흐르는 전류가 m 번째 자기센서에 영향을 주는 간섭의 계수를 의미하며 거리, 전류, 차폐, 온도에 의해 영향을 받을 수 있다. 이를 온도별로, 전류별로, 거리별로 측정하거나 회로가 설치된 상태에서 측정을 통하여 정해질 수 있게 된다. 따라서 n 번째 자기센서에서 측정된 전류 I_n 은 실제 n 번째 전선에서 흐르는 전류량 I'_n 과 인접한 전류인 $I'_1, \dots, I'_{n-1}, I'_{n+1}, \dots, I'_N$ 으로부터 간섭된 전류량의 합으로 나타낼 수 있다. 또한 $h_{0,0}, h_{1,1}, \dots, h_{N,N}$ 은 측정 대상 회로가 자신에게 영향을 미치는 비율을 뜻하는 것으로 1일 수 있으나 온도나 전류량 거리에 따라 변수에 따라서는 1이 아닐 수 있다. 간섭 계수 행렬

H 의 각 원소 $h_{m,n}$ 은 각 전류의 경로를 순차적으로 켜거나 끄므로써 모두 구할 수 있게 된다. 예를 들어 I'_1 를 제외한 모든 전류를 0으로 만들게 되면 측정된 I_1, \dots, I_N 를 통해서 $h_{1,1}, \dots, h_{N,1}$ 까지의 간섭 계수 행렬의 원소값을 구할 수 있으며 이와 같은 방식으로 N 번째 전류까지 순차적으로 켜므로써 모든 행렬의 원소 값을 구할 수 있다. 한편, 인접 전류원의 간섭은 거리가 두배 증가함에 따라 자속의 크기도 절반으로 급격히 감소하게 되므로 실제 간섭 계수는 인접 전류와의 간섭만을 고려해도 충분한 정확도를 얻을 수 있다. 따라서 식 (4)는 식 (5)와 같이 더욱 단순하게 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ h_{1,2} & h_{2,2} & h_{3,2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & h_{2,3} & h_{3,3} & h_{4,3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \cdots & 0 \\ \cdots & 0 & h_{n-1,n} & h_{n,n} & h_{n,n+1} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ I'_3 \\ \vdots \\ I'_n \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)를 통하여 임의의 I_n 을 구하기 위해서는 측정된 전류와 함수 H 를 구해야하며 I_n 을 제외한 다른 전류가 모두 흐르지 않는다고 가정하고 계산하면 $h_{n,n}$ 을 구할 수 있다. 이와 같은 방식으로 구하고자 하는 $h_{n,n}$ 에 해당하는 전류원만 제외하고 나머지 전류를 0으로 바꿔서 계산하게 되면 식 (4)에 비하여 매우 간단하게 간섭계수를 구할 수 있다. 이는 실제 구현 시 초기에 각 전류원을 순차적으로 하나씩만 전류를 흐르게 하여 값을 구할 수 있으므로 매우 손쉽게 간섭계수를 얻을 수 있게 된다. 이렇게 얻은 간섭계수를 사용하면 임의의 전류 I_n 은 다음과 같이 계산 할 수 있게 된다.

$$I_n = h_{n-1} \cdot I'_{n-1} + h_n \cdot I'_n + h_{n+1} \cdot I'_{n+1} \quad (6)$$

또한 간섭계수 행렬을 역함수로 바꿀 경우 실제 측정된 값과 간섭계수를 통하여 실제 배전반에 흐르는 전류 값을 정확하게 계산할 수 있게 된다.

III. 시뮬레이션 및 측정 결과

II장에서 제안된 왜란 자기장을 제거하는 기법을 검증

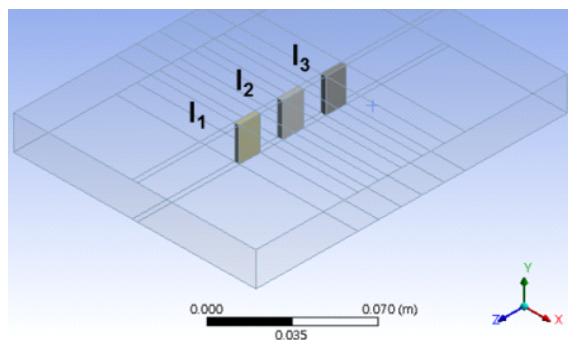


그림 2. 삼상 전류 경로 기반 자기장 시뮬레이션 환경
Fig. 2. Magnetic simulation condition for three-phase currents.

하기 위하여 그림 2와 같이 시뮬레이션을 ANSYS를 이용하여 검증하였다. 3개의 버스바를 사용하여 전류 경로를 만들고 각 버스바에 흐르는 전류간의 위상 차이는 60도씩 두고 100 A의 진폭을 가지는 AC 전류가 흐르는 삼상 전류를 구현하였으며, 전류를 측정하는 홀센서는 버스바의 중앙을 기점으로 2 mm 앞에 배치하는 것을 가정하고 거리 $r=2$ mm에서의 자기장의 크기를 시뮬레이션을 수행하였다. 실제 유도되는 자기장을 이미지화할 수 있으며 60도의 위상 차이를 가지고 각 버스바를 중심으로 순차적으로 자기장의 크기 및 위상이 바뀔을 그림 3과 같이 알 수 있다. 자기센서 위치에서 측정된 자기장의 방향은 전류 방향이 X축이라 하면 Y축과 Z축 성분이 추출되며 자기센서의 감지 방향 기준 Z축 성분의 자기장의 크기만을 이용하여 분석되었다.

그림 4는 왜란 자기장의 영향을 알아보기 위하여 3개의 버스바에서 가운데에 위치한 자기센서에서 받는 영향

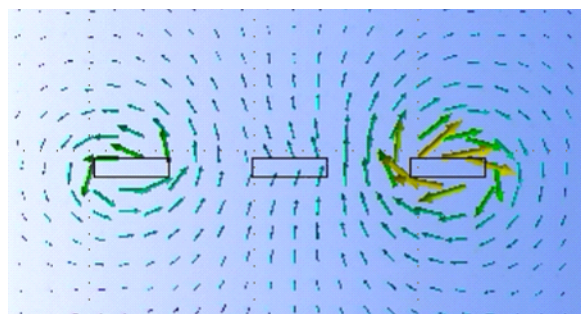


그림 3. 삼상 전류 경로로부터 유도되는 자기장 모습
Fig. 3. Magnetic field from three-phase currents.

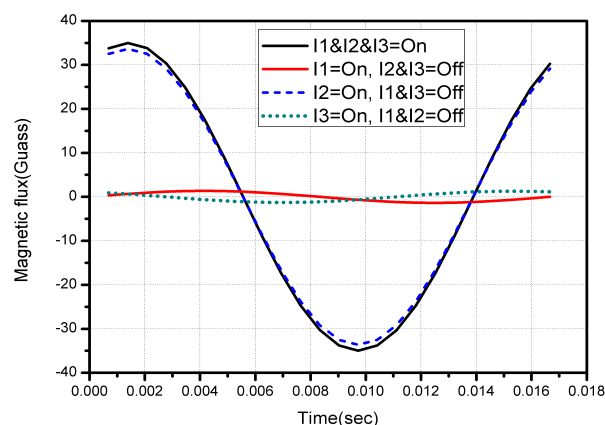


그림 4. 삼상 전류 중 I_2 앞 센서의 시뮬레이션 파형
Fig. 4. Simulated sensing waveform in front of I_2 .

에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 먼저 $h_{m,n}$ 을 구하기 위해 3개의 전류 경로 중 각각 하나의 전류만 흐를 경우에 각 자기센서에 나타나는 자기장의 크기를 측

표 1. 자기센서기반 테스트 결과

Table 1. Simulated and measured results.

		Three phase currents on ($I_1, I_2, I_3=On$)	One currents(I_1) path on ($I_1=On, I_2 \& I_3=Off$)	One currents(I_2) path on ($I_2=On, I_1 \& I_3=Off$)	One currents(I_3) path on ($I_3=On, I_1 \& I_2=Off$)	Error ratio (%)
Simulation (Magnetic flux)	Maximum	34.98	0.67	33.67	0.64	0
	Minimum	-34.98	-0.67	-33.67	-0.64	0
Measurement (ADC output of sensor)	Maximum	2,333	75	2,117	64	3.30
	Minimum	-2,345	-65	-80	-2,127	3.10

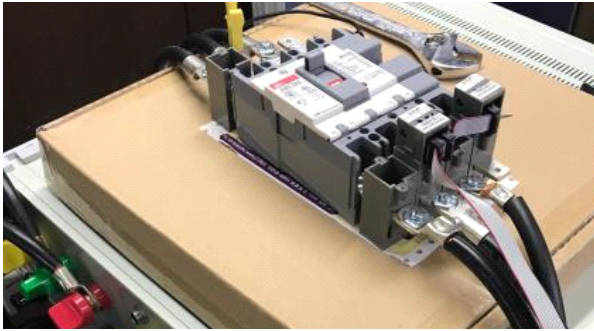


그림 5. 자기센서기반 테스트 배전반 사진

Fig. 5. Switchboard photograph based on proposed magnetic sensor.

정하였다. 중간의 자기센서 2의 위치에서 측정된 자기장은 바로 앞에 있는 버스바에 흐르는 전류 I_2 에 유도되는 자기장이 가장 크고, 양쪽에 존재하는 버스바에서 서로 다른 위상을 가지고 미약하게 간섭을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 모든 전류(I_1, I_2, I_3)가 흐를 때와 중간의 전류 I_2 만 흐를 때에 감지되는 자기센서 2의 값은 미세하게 서로 다를 수 있다. 순차적으로 전류를 흐르게 함으로써 얻은 간섭계수 함수 H 를 이용하여 식 (5)를 적용하면 간섭의 영향을 고려하여 실제 흐르는 전류를 계산할 수 있게 된다. 이러한 결과는 가운데 버스바 앞에 존재하는 센서 2의 위치에서도 그림 5와 같이 위치와 상관없이 인접전류의 영향을 받는 자기장을 더할 경우 모든 전류가 흐를 때와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 시뮬레이션 결과를 기반으로 그림 5와 같이 테스트용 배전반 모듈을 이용하여 측정하였다. 자기센서에서 나오는 출력전압을 디지털화 한 값을 읽은 측정 결과와 시뮬레이션 자기센서의 자기장 값의 데이터는 표 1에 정리되었다. 표 1에서 보듯이 시뮬레이션 결과에서는 오차가 없이 정확히 일치하는 결과를 얻었으며, 측정결과에서는 오차율이 3 % 수준으로 나타났다. 시뮬레이션 상으로는 0 %로 나오나 측정 시 오차가 발생하는 원인으로서는 하나의 전류를 사용할 때와 모든 버스바에 전류가 흐를 때 계산된 자기장의 미세한 위상차로 인한 보정값의 불완전함과 자기센서의 자기장 방향에 따른 비선형성으로 분석된다. 그러나 이러한 보정기법을 사용하지 않는 경우, 그 오차는 10 %를 넘어가게 되므로 제안된 기법이 개방형 자기센서

를 기반으로 전류를 감지할 경우 정밀도를 크게 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 공장에서 널리 사용하는 분전반에서 개방형 자기센서를 이용한 고정밀 전류센싱을 구현하기 위하여 인접 전류의 자기장 영향 분석, 보정하는 기법을 제안하였다. 인접하는 전류로부터 유도된 자기장의 간섭계수를 해석함으로써 고정밀의 전류 센싱이 가능함을 증명하였으며, 분석된 결과를 실제 시뮬레이션과 측정 결과를 통하여 검증하였다. 수식적으로 계산된 간섭을 고려하면 매우 정밀한 전류 측정을 자기장 측정 및 보정을 통하여 가능함을 증명하였다.

References

- [1] S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H.-C. Iu, and L. J. Borle, "Current sensing techniques: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 354-376, Mar. 2009.
- [2] H.-G. Kim, G.-B. Kang, and D.-J. Nam, "Coreless hall current sensor for automotive inverters decoupling cross-coupled field," *Journal of Power Electronics*, vol. 9, no. 1, pp. 68-73, Jan. 2009.
- [3] Y. Ouyang, J. He, J. Hu, and S. X. Wang, "A current sensor based on the giant magnetoresistance effect: Design and potential smart grid applications," *Sensors* 2012, vol. 12, no. 11, pp. 15520-15541, 2012.
- [4] A.-R. A. M. Makky, H. Abo-Zied, F. N. Abdelbar, and P. Mutschler, "Design of the instrument current transformer for high frequency high power applications," in *2008 12th International Middle-East Power System Conference*, Mar. 2008, pp. 230-233.
- [5] E. R. Olson, R. D. Lorenz, "Effective use of miniature multipoint field-based current sensors without magnetic cores," *Industry Applications, IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 2, pp. 901-909, Feb. 2010.
- [6] Z. Jubia, L. Casado, G. Aldabaldetrek, A. Montero, E. Zubia, and G. Durana, "Design and development of a

low-cost optical current sensor", *Sensors* 2013, vol. 13, no. 10, pp. 13584-13595, 2013.

[7] M. Takahashi, K. Sasaki, and K. Terai, "Optical current sensor for DC measurement," in *IEEE/PES Transmission*

and Distribution Conference and Exhibition, vol. 2012, no. 1, Oct. 2002, pp. 440-443.

[8] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Oxford, Clarendon Press, 1881.

이 성 호



1998년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

2000년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

2011년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)

2000년~2009년: GCT Semiconductor Analog

Division 책임연구원

2010년~현재: 전자부품연구원 SoC 플랫폼 연구센터 책임연구원
[주 관심분야] IoT 센서 인터페이스 및 웨어러블 디바이스 설계, CMOS RF/Analog IC 설계

안 영 호



1997년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)

1998년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학석사)

1999년~2000년: 삼성전자 중앙연구소

2000년~2012년: GCT Semiconductor

2013년~현재: (주)레티그리드 대표이사

[주 관심분야] 스마트그리드, 신호처리, 전력품질분석

김 태 민

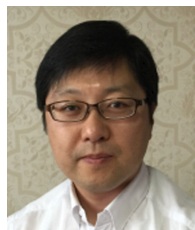


2017년 2월: 건국대학교 기계공학과 (공학사)

2017년~현재: 건국대학교 기계설계학과 석사과정

[주 관심분야] 방열 설계, 다중 물리 해석

이 성 철



1993년 2월: 전북대학교 정보통신공학과 (공학사)

1995년 2월: 전북대학교 정보통신공학과 (공학석사)

2008년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학박사)

1995년~현재: 전자부품연구원 SoC 플랫

폼 연구센터 수석연구원

[주 관심분야] 센서신호처리 및 에너지변화, IoT 및 웨어러블 디바이스용 SoC

김 남 수



1998년 2월: 한양대학교 기계공학과 (공학사)

2004년 8월: University of Texas at Austin (공학석사)

2009년 8월: Georgia Institute of Technology (공학박사)

2010년~2015년: 전자부품연구원 선임연

구원

2015년~현재: 건국대학교 기계공학과 조교수

[주 관심분야] 신뢰성기반 최적설계, 다중물리해석, 열화매커니즘 분석