

# 스마트 제어를 이용한 하이브리드 형 제어장치 연구

김희철\*

## A Study on Hybrid Control Unit Using a Smart Control

Hee-Chul Kim\*

요 약

본 연구는 슈퍼캐패시터 EDLC(Electric double layer capacitor)를 적용한 가로등용 태양광-풍력 하이브리드 발전시스템 성능의 우수함과 안정성을 입증하고자 한다. 독립전원용 태양광-풍력 하이브리드 발전시스템의 부하로 LED 광원을 이용한 조명장치를 적용하고 고효율 발전시스템을 통한 가로등 시스템 장치의 개발을 목표로 하고 있다. 발전된 전력을 배터리에 저장하는데 있어서 보조장치로 적용될 EDLC는 기존의 컨트롤러와는 달리 배터리의 고효율과 긴 수명을 보장할 수 있어 기존장치에 비해 유지보수가 적게 들고 우수한 성능을 확보할 수 있다.

### ABSTRACT

This study is to demonstrate the superiority and stability of the solar - wind power hybrid power generation system for street lamps using super capacitor EDLC(Electric Double Layer Capacitor). It is aiming to apply the lighting device using LED light source as the load of solar-wind power hybrid power generation system for independent power source and to develop the street light system device with high output power generation system. Unlike conventional controllers, EDLC, which is used as an auxiliary device for storing the developed power in the battery, can guarantee the high output and long life of the battery.

### 키워드

Solar-Wind Hybrid Generation System, Standalone, MPPT, Efficiency, Charge  
태양광-풍력 발전시스템, 독립형, MPPT, 효율, 충전

## 1. 서 론

EDLC를 적용한 가로등용 태양광-풍력 하이브리드 발전시스템의 상용화를 위한 신재생에너지의 활용기술을 높이고 에너지의 생산과 저장에 따른 안정적인 메카니즘을 확보하기 위해서는 에너지원으로부터 일관된 에너지활용기술이 필요하다. 독립형 태양광발전 시스템은 한국전력 계통과 연계되지 않고 독립적으로

운영되므로 시공설비가 간단하고 비용이 적게 드는 장점이 있지만 최대출력점제어 MPPT(Maximum Power Point Tracking)를 포함한 컨버터와 생산된 에너지를 배터리에 저장하기 위한 충전회로 및 배터리 매니징회로가 요구된다.[3~5].

독립전원용 태양광-풍력 하이브리드 발전시스템의 부하로 LED 광원을 이용한 조명장치를 적용함으로써 고효율 발전시스템을 통한 가로등 시스템 장치의 개

\* 교신저자 : 광주대학교 컴퓨터공학과  
• 접수일 : 2016. 10. 14  
• 수정완료일 : 2016. 11. 13  
• 게재확정일 : 2016. 11. 24

• Received : Oct. 14, 2016, Revised : Nov. 13, 2016, Accepted : Nov. 24, 2016  
• Corresponding Author : Hee-Chul Kim  
Dept. of Computer Engineering, GwangJu University.  
Email : jaziri@daum.net

발을 목표로 하고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템 구성을 제시하며, 3장에서는 EDLC를 적용한 태양광-풍력 하이브리드 독립형 발전시스템의 안정성을 위한 구조설계 기술을 확보하고, 4장에서는 정전압 및 정전류 드라이브설계 기술을 적용하였다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 연구방안으로 마무리한다.

## II. 시스템 구성

독립전원용 발전시스템에는 주로 태양광 발전시스템이 운영되고 있다. 태양광 발전시스템은 기상 영향의 영향을 직접적으로 받고 있으므로, 여름철 장마 기간에는 전력생산에 많은 문제점을 야기한다. 그림 1은 태양전지의 어레이와 풍력발전기에서 발생된 직류는 인버터를 통하여 교류로 변환시켜 전력을 일반 부하에 공급하고 잉여전력은 축전지에 저장한다.

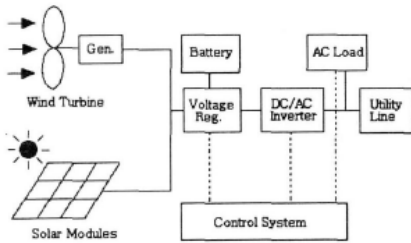


그림 1. 하이브리드 발전시스템의 에너지저장 흐름 블록다이어그램

Fig. 1 Energy storage flow diagram of a hybrid power generation system

### 2.1 풍력발전의 원리

바람의 힘을 회전력으로 전환시켜 발생하는 유도전기를 전력계통이나 수요자에게 공급하는 기술로 일시적이고 변하기 쉬운 에너지원의 특성을 갖는다. 풍력발전은 바람의 힘을 회전력으로 전환시켜 이 회전력은 동력전달장치를 통해 발전기로 전달된다. 발전기에서 생성된 전력은 적절한 형태의 전력변환과정을 거쳐 계통연계형의 경우 전력 계통에 전달되고 독립형의 경우 축전지에 전달되어 최종 수요자에게 공급되는 구조이다[1~3].

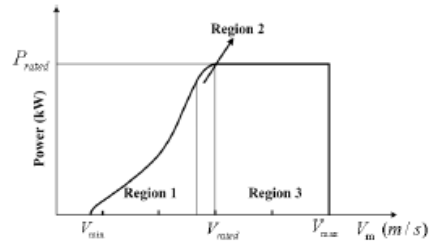


그림 2. 풍력 터빈 동력 곡선  
Fig. 2 Wind turbine power curve

그림 2는 풍력 터빈의 동력 곡선으로 영역 1(저 풍속), 영역 2(천이 구간), 영역3(고 풍속)으로 구분하여 수행한다. 영역 1에서는 실질적으로 블레이드 피치 제어는 수행하지 않고 블레이드 설계시 결정된 최적 피치 각도로 고정된 상태로 운전하며, 발전기는 최대의 출력을 인출할 수 있도록 최대출력점 추종(MPPT)방식으로 제어된다. 영역 3은 풍력발전기의 회전속도 및 출력이 허용된 한계치를 넘지 못하도록 발전기 토크 제어가 수행된다.

### 2.2 풍력발전시스템의 에너지생성

발전기는 바람에 의한 기계적인 에너지로 변환되는 동력전달장치인 풍력터빈 특성에 의해 전기에너지를 생성하게 된다. 풍력에너지를 기계적인 에너지로 변환하는 관계식으로 질량  $m[\text{kg}]$ 인 공기의 풍속이  $V[\text{m/s}]$ 일 때 유체가 갖는 운동에너지  $E_w$ 는 식(1)과 같다.

$$E_w = \frac{1}{2} m V^2 [\text{joules}] \tag{1}$$

이때, 공기흐름의 한 부분(Parcel)의 체적  $V$ 는 회전자의 회전단면적을  $A[\text{m}^2]$ , Parcel의 두께를  $D$ 라 하면 식 (2)와 같다.

$$V = AD[\text{m}^3] \tag{2}$$

공기의 두께  $D$ 의 Parcel을 시간  $T$ 동안 통과한다고 가정하면 속도  $v$ 는 식 (3)과 같다.

$$v = \frac{D}{T} [\text{m/s}] \tag{3}$$

따라서 공기가 갖는 풍력은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 P_{air} &= \frac{1}{2}(\text{mass flowrate per second}) V_w^2 & (4) \\
 &= \frac{1}{2}(\rho A D V_w) V_w^2 \\
 &= \frac{1}{2} \rho A T V_w^3 [W] \\
 &= 0.5 \rho A T (V_w)^3 C_p [W]
 \end{aligned}$$

여기서  $\rho(\text{kg/m}^3)$ 는 공기밀도,  $V_w(\text{m/s})$ 는 풍속,  $A(\text{m}^2)$ 는 터빈 블레이드가 움직이는 면적, 즉 풍력터빈의 회전단면적,  $C_p$ 는 동력계수로 회전자의 효율로 정의되고, 풍력발전기의 동작 상태에 의존한다. 식 (2)은 풍속에 의해 발생할 수 있는 이상적인 풍력이다. 풍력으로 인해 회전자에서 얻어지는 에너지의 출력은 식 (5)와 같다.

$$P = \frac{E_w}{T} = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \cdot A \cdot T}{T} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \cdot A \quad (5)$$

여기서 에너지 출력과 회전자 단면적에 대해 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \quad (6)$$

풍력발전기는 기계적인 마찰과 손실이 있기 때문에 풍속이 증가하여 회전자에서 발생하는 토크가 이를 극복할 때 회전자가 회전하게 된다. 이때 풍속을 시동 풍속  $V_c$ , 풍력발전기의 출력이 정격  $P_r$ , 정격 풍속  $V_r$ 이라 한다. 회전자의 설계 풍속은 풍력발전시스템의 효율과 경제성을 결정하는 중요한 파라미터이다.

### 2.3 태양전지의 전기적 특성

태양전지의 출력전력은 출력전압과 출력전류의 곱으로 계산되며 그림 3과 같이 포물선의 형태로 나타난다.

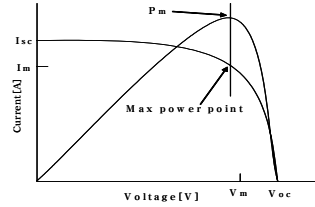


그림 3. 태양전지의 최대 전압과 최대 출력점  
Fig. 3 The maximum voltage of a solar cell and the maximum output point

또한, 온도에 의존하는 태양전지의 출력전력이 최대가 되는 점이 존재하며 전류-전압 특성곡선에서도 출력이 최대가 되는 동작점이 일사량 변화에 따라 그림 4에 나타나고 있다.

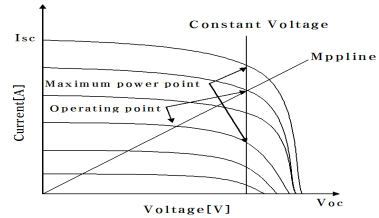


그림 4. 일사량의 차이에 의한 MPPT  
Fig. 4 MPPT solar radiation due to differences in

태양에너지는 분광(Spectrum)에 의해 나타나는 각 파장에 따라 그 에너지 분포가 결정된다. 일사량, 태양전지의 표면온도, 풍속, 이외에도 Air Mass, 투명도, 혼탁도, 오존층과 수증기층의 두께 등이 태양전지의 효율에 영향을 미치는 파라미터로 적용한다.

## III. EDLC를 적용한 하이브리드 발전시스템의 설계 방법

### 3.1 하이브리드 발전시스템 구성

하이브리드 발전은 각각 서로 다른 특징을 갖는 복수의 시스템을 조합하여 상호보완적으로 하나의 발전 시스템을 구축하는 특징을 가지고 복수의 시스템을 원활히 조합할 수 있도록 하고 각각의 개별 시스템의 장점과 그 이상의 이점을 획득하기 위함이 목적이다. 그림 5는 하이브리드 발전시스템의 에너지저장 흐름 블록다이어그램이다. 발전시스템의 출력은 전력변환장치를 통해 DC출력으로 변환되어 공통 DC버스로 전

달된다. 하이브리드 발전시스템은 MPPT 운전을 수행하는 태양광발전시스템이 요구되고, 풍력발전시스템 역시 풍속에 따른 가변출력특성을 갖는 출력전압의 변동이 심하므로 별도의 DC/DC 컨버터를 사용하더라도 병렬운전에 대한 별도의 알고리즘이 필요하다.

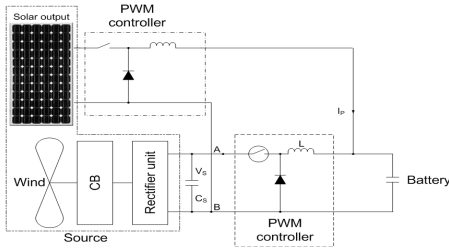


그림 5. 하이브리드 발전시스템의 에너지저장 흐름 블록다이어그램  
Fig. 5 Energy storage flow diagram of a hybrid power generation system

### 3.2 궤환에 의한 MPPT 알고리즘

표 1은 태양전지모듈의 최대출력이 144W 2장이 병렬접속 되었다. STC에서 MPP 전압은 60.5[V]이고 MPPT 전류는 4.7[A]이다. 분산형 전원의 배전계통연계 기술기준에 의해 MPPT 오차범위가 3%이내의 성능을 가진 태양전지모듈을 적용하여 최대전력점을 찾은 것이다[5][13].

Table 1. Characteristics of the solar cell module

Item	Symbol	Value
Nominal peak power	Pmax	144W(±3%)
Maximum power voltage	Vmp	30.5V
Maximum power current	Imp	4.70A
Open circuit voltage	Voc	37.5V
Short circuit current	Isc	5.10A
Module Efficiency	$\eta_m$	13.2%
Maximum system voltage	-	1,000V
STC	-	1,000W/m <sup>2</sup> , 1.5AM, 25°C

### 3.3 에너지 저장 장치 및 EDLC

태양광 발전 시스템에서 주간에 배터리는 발전된 전기를 저장하고 부하량이 발전량보다 큰 경우나 발전이 불가능한 야간에 에너지원으로 사용된다. 배터리의 충전 시 단자전압 V는 배터리의 무부하시의 기전력 E<sub>0</sub>보다 큰 값을 나타낸다. 이것은 내부 등가저항

R 때문이다. 배터리의 잔존용량 SoC(State Of Charge)은 충전이 진행됨에 따라 증가하게 되는데, 그 값은 식 (7)과 같이 전류에 대한 시간의 적분 값으로 나타낼 수 있다. 개로전압과 내부 저항성분은 잔존용량의 함수로 표현되고, 충전 전류를 i라고 할 때 식 (7)과 같으며 배터리 특성을 개로 전압, 내부저항, 가변저항 및 잔존용량 성분으로 나타낼 수 있다.

$$SoC = SoC_i + \int_{i_r}^{f i_r} dt \quad (7)$$

여기서, SoC<sub>i</sub>는 충전 후 잔존용량, SoC<sub>i</sub>는 충전 초기 잔존용량, I<sub>r</sub>는 충전전류이다. 배터리는 충전하면 잔존용량 증가와 함께 전압이 상승하고 방전 시에는 반대로 전압이 감소하는 특성을 갖는다. 그림 6은 배터리 충·방전 특성을 나타낸다[10].

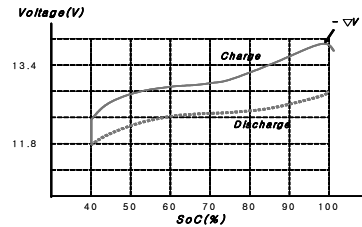


그림 6. 배터리의 충·방전 특성그래프  
Fig. 6 The battery charge and discharge characteristics graph

충전 과정에서 - • V /점은 전압이 상승하다 만 충전 상태가 되면 배터리 내부의 역반응으로 전압이 일시적으로 감소하는 지점으로 충전을 종료하지 않을 경우 많은 열이 발생하고 배터리에 손상을 주어 배터리 수명을 단축시키는 원인이 된다. 따라서 - • V /점에서는 충전을 즉시 종료하여야 한다. V<sub>b</sub>는 배터리의 단자전압은 식 (8), 식 (9)와 같다.

$$V_{b_r} = R i + V_{op} \quad (8)$$

$$V_{b_r} = r i + R_{v_r} i + F(SoC) \quad (9)$$

여기서 F(SoC)는 SoC의 함수이다.

### 3.4 배터리 용량 산정

배터리 용량산정에서 가장 중요한 요소는 부하의

크기와 태양전지가 발전하지 않는 기간 동안 사용 가능한 부일조일이다. 국내 기상조건에서는 장마철이나 폭설의 영향이 있는 경우를 가장 긴 부일조일로 선정하는데 3-4일 이상 부일조일인 경우가 거의 없기 때문에 일반적으로 부일조일을 4일로 계산한다. 배터리 용량산정은 부일조일과 배터리의 효율, 1일 소비전류량, 방전심도 및 배터리의 여유도의 곱으로 식 (10)과 같다[8~9].

$$B_{W_f} \times \epsilon_{b_f} \times B_{DOD_f} = N_d \times L_a \quad (10)$$

여기서,  $B_{W_f}$ 는 배터리 용량,  $N_d$ 는 부일조일,  $\epsilon_b$ 는 배터리효율,  $L_a$  일일 사용전력량,  $B_{DOD}$  배터리방전심도(0.6-0.7)이다. 1일 사용 전류량은 부하량과 사용시간을 감안하여 전압과 효율로 나눈 값이며 식 (11)와 같다.

$$L_{a_f} = \frac{L_{W_f} \times H_{a_f}}{V_b \times \epsilon_{i_f}} \quad (11)$$

여기서  $H_a$ 는 사용시간,  $V_b$ 는 배터리 전압,  $\epsilon_i$ 는 시스템효율,  $L_{W_f}$ 는 부하량을 의미한다. 실제 배터리 용량 산출식은 식 (12)와 같다.

$$B_{W_f} = \frac{N_d \times L_{W_f} \times H_{a_f}}{V_b \times \epsilon_{i_f} \times \epsilon_{b_f} \times B_{DOD_f}} \quad (12)$$

#### IV. 구현 및 성능평가

##### 4.1 슈퍼캐패시터의 특성

EDLC는 축전지의 대체 및 태양광 발전으로부터 생산된 전력을 인버터를 통하여 교류로 변환시켜 계통에 연계시키거나, 직류를 그대로 활용하여 ESS 및 전기자동차 충전에 활용할 수 있도록 준비한다.

그림 7은 2차전지와 EDLC를 동시에 사용했을 경우의 에너지 저장 밀도를 나타낸 그래프이다.

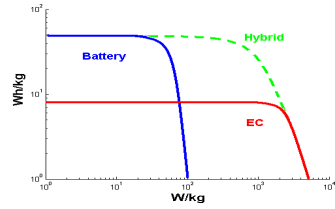


그림 7. 배터리, EDLC 그리고 하이브리드형의 에너지와 저장밀도

Fig. 7 Batteries, EDLC and the energy storage density and hybrid

##### 4.2 EDLC의 전압 밸런스 회로

EDLC의 전압프로파일은 캐패시티브 성분과 저항 성분 두 개의 요소를 갖는다. 캐패시티브 성분은 에너지의 변동에 따른 전압의 변화를 나타내고, 저항성분은 등가직렬저항 ESR( Equivalent Series Resistance)에 의한 전압의 변동을 의미한다. 그림 8은 슈퍼캐패시터의 방전프로파일을 나타낸다[3], [10].

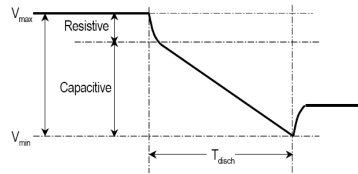


그림 8. 슈퍼캐패시터의 정전류 방전프로파일  
Fig. 8 A constant current discharge profile of the super capacitor

그림 8에서 변수  $V_{max}$ 는 동작 전압이고, Resistive(ESR)은 ESR에 기인한 전압 강하이고, Capacitive는 캐패시터의 방전에 기인한 전압강하이다.  $V_{min}$ 은 시스템 또는 방전시간 동안의 최소전압에 의한 최소전압이고,  $T_{dsch}$ 는 방전시간을 각각 의미한다. 캐패시티브 성분은 식 (13)에 의해 결정된다.

$$i = C \times \frac{dV}{dt} \quad (13)$$

여기서  $I$ 는 전류,  $C$ 는 캐패시턴스,  $dV$ 는 전압의 변동분,  $dt$ 는 시간의 변동분을 의미한다. 또한 저항성분은 식 (14)에 의해 결정된다.

$$V = i \times R \quad (14)$$

여기서  $V$ 는 저항의 전압강하,  $I$ 는 전류,  $R$ 은 ESR을 의미한다.

### 4.3 하이브리드 발전시스템 출력량

과거의 실측된 기후데이터를 토대로 풍속 및 태양광 일사량의 확률밀도 함수를 결정하고 이에 따른 풍속 및 태양광 일사량의 확률 밀도 함수와 태양광 어레이 및 풍력발전기의 파라미터는 하이브리드 발전시스템의 평균 발생전력을 계산하는데 사용한다. 또한, 부하변동에 대한 최적의 태양광 어레이, 풍력발전용량을 선정한다. 그림 9는 맑은 날과 비오는 날의 시간별 태양전지 및 풍력발전기의 출력량 그래프이다[8].

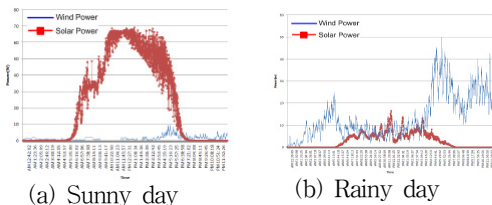


그림 9. 실험용 웨이브 형태의 하이브리드 발전 시스템

Fig. 9 Experimental wave forms of hybrid generation power system

## V. 결론

본 연구를 통해 태양광-풍력 하이브리드 독립형 발전시스템의 잉여에너지의 배터리저장기술 중, 밸런싱 제어기술을 설계 및 제작·실험하여 적용하는데 슈퍼캐패시터를 활용한 기술과 조명용 고효율 LED 조명장치의 정전압 및 정전류 드라이브설계 기술을 확보하였다.

태양광과 풍력 발전은 발전 환경적 특성이 서로 상대적이다. 태양광은 맑은 날씨에서 풍력은 바람이 부는 흐린 날씨에서 발전량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 하이브리드 형태의 전력을 생산할 경우 전체 생산 전력의 맥동을 줄일 수 있어 부하 시스템에 안정적인 전력을 공급할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구과제로 시간대별로 변화하는 전력요금과

총 누적 부하 전력량에 따른 누진 전력요금의 영향도 적정 축전지 용량산정에 반영하여 집광형 태양전지 모듈과 연계해서 고도화 된 태양광-풍력 하이브리드형 발전시스템의 설계기술의 확립을 위해 표준화를 추진한다.

### 감사의 글

이 연구는 2016년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음

### Reference

- [1] Y. JUNG, D. KIM, and N. Cho, *AVR Atmega128A Bible*. BOGD00, 2013, pp. 200-216.
- [2] R. Ruther, A. Montenegro, A. Salamon, and I Araujo, "The Petrobras 45.5kwp, gridconnected PV System: a Comparative Study of Six Thin-film Module Types Operating in Brazil", *Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2002*, PP. 1440-1443.
- [3] H. Huh and J. Lee, "A Study on Development of H8 MCU IDB(Integrated development board) for Embedded Education," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 4, no. 1, 2009, pp. 51-57.
- [4] M. Wang, M. Nehri, and D. Nelson, "A simulink-based model for a stand-alone wind-photovoltaic/fuel cell generating system" In *Proc. of the NAPS 2001*, Texas A&M University, College Station; TX, Oct 2001.
- [5] R. Andoubi, A. Mami, and M. Annabi. "Bond Graph Modelling and Dynamic Study of a Photovoltaic System Using MPPT Buck-Boost Converter", *IEEE ICS*, vol. 3, 2002, pp. 200-205.
- [6] H. J. Noh, D. Y. Lee, and D. S. Hyun, "An Improved MPPT Converter With Current Compensation Method for Small Scaled

PV-Applications," *IEEE IES*, vol. 2, 2002, pp. 1113-1118.

- [7] N. Mohan and P. Robbins, *Power Electronics :Converters, Applications and Design, Willey, Third Edition*, 2003 pp. 161-173.
- [8] J. Im, J. Choi, S. Song, and D. Lee, "The Design of Digital Controller for Boost Converter on Photo-Voltaic System," *J. of the Korean Solar Energy Society*, vol. 30, no. 6, 2010, pp. 22-27.
- [9] S. Kim and K. Lee, "Implementation of Successive Approximate Register Typed A/D Converter for a Monitored Battery Voltage Conversion," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 2, 2011, pp. 256-261.
- [10] Y. Jung, "A Study on Generalized Output Capacitor Ripple Current Equation of Interleaved Boost Converter," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 6, 2012, pp. 1429-1435.
- [11] Y. Jung, "Input Ripple Current Formula Analysis of Multi-Stage Interleaved Boost Converter," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 6, 2011, pp. 865-871.
- [12] H. Shin, "Characteristics of AC-DC Converter using Multilayer Piezoelectric Transformer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 6, 2012, pp. 1315-1320.
- [13] H. Kim, "Development of d stand-alone solar street light controller intergrated," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 6, 2014, pp. 641-647.

## 저자 소개



### 김희철(Hee-Chul Kim)

1990년 조선대학교 대학원 컴퓨터 공학과 공학석사

2003년 조선대학교 대학원 컴퓨터 공학과 공학박사

1982년 ~ 1985년 육군통신장교 중위 전역

현재 광주대학교 컴퓨터공학과 교수

2012년 ~ 현재 광주광역시 사회적기업 네트워크 운영위원

2012년 ~ 현재 광주광역시 지방건설기술심의회 위원회 평가위원

2013년 ~ 현재 전라남도 지방건설기술심의회 평가위원

※ 관심분야 : RFID/USN, 임베디드시스템, 로봇틱스, 태양광, 네트워크 설계 및 분석

