Cascaded Buck-Boost 컨버터를 이용한 태양광 모듈 집적형 저전압 배터리 충전 장치 개발

김동희¹, 이희서¹, 이영달¹, 이은주¹, 이태원², 이병국[†]

Development of PV Module Integrated Type Low Voltage Battery Charger using Cascaded Buck-Boost Converter

Dong-Hee Kim¹, Hee-Seo Lee¹, Young-Dal Lee¹, Eun-Ju Lee¹,
Tae-Won Lee², and Byoung-Kuk Lee[†]

Abstract - In this paper, in order to use module integrated converter using cascaded buck-boost converter for a low battery charger in stand-alone system, a charging algorithm which considers photovoltaic and battery status and PWM controllers which are changed according to charging modes are proposed. The proposed algorithm consists of constant current mode, constant voltage mode and maximum power point tracking mode which enables the battery to charge with maximum power rate. This paper also presents design of cascaded buck-boost converter that is the photovoltaic charger system. A 150W prototype system is built according to verify proposed the charger system and the algorithm.

Keywords: photovoltaic (PV), battery charger, stand-alone, cascaded buck-boost converter, 4-switch buck-boost converter, maximum power tracking (MPPT)

1. 서 론

태양광 (Photovoltaic, PV) 발전 시스템은 에너지 사용에 대한 규제와 그리드 패리티 (Grid Parity) 도달에 따라 점점 더 청정 에너지원으로 각광 받고 있으며 이에 따라 많은 연구들이 진행되고 있다^{[1],[2]}. 하지만 태양 에너지 특성상 주변 환경의 변화에 따라 발전이 종속되며, 직병렬로 구성된 태양광 모듈간의 일사량 불균형 (Mismatching) 문제나 모듈에 음영이 생기는 현상이 발생할 경우, 기존의 하나의 PCS (Power Conditioning System)로 태양광 발전을 제어하는 중앙 PCS는 각각의 태양광 모듈의 발전을 최대로 제어할 수 없다. 이를 극복하기 위해 각각의 태양광 모듈에 전력변환장치를 추가하여 주변 환경의 변화에 능동적으로 대응하여 발전

량을 극대화 할 수 있는 모듈 집적형 컨버터 (Module Integrated Converter, MIC)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[3]-[5]}.

MIC의 경우 각각의 태양광 모듈 출력을 독립적으로 제어하기 때문에 각 모듈의 최대전력점 (Maximum Power Point, MPP)을 추종할 수 있는 장점을 가지며, 크게 MIC는 출력이 교류인 AC-MIC 또는 Micro Inverter와 직류 출력인 DC-MIC로 나뉜다^[2]. 이 중 독립형의 경우 태양광이 없는 경우 부하로 전력 공급을 해주기 위해 2차 배터리가 반드시 추가된다. 태양광 모듈의 출력 I-V 곡선은 부하의 임피던스에 따라 결정되며 기후조건에 따라서도 변화한다. 또한 배터리의 충전 상태 (State of Charge, SOC)에 따라 배터리 전압도 변동되기 때문에 적절한 배터리 충전 알고리즘이 필요하다. 또한 입출력의 넓은 전압 변동으로 인해 순수 강압 또는 승압 토폴로지를 사용할 경우 전 범위 내에서 원하는 출력으로 배터리를 충전할 수 없기 때문에 승강압 토폴로지 사용이 필요하다.

기존의 태양광 발전을 이용한 독립형 충전기의 경우 Buck 컨버터나 Boost 컨버터를 이용하여 태양광 모듈의 발전 조건의 변화에 따라 배터리가 원하는 최대 전력으로 능동적으로 충전할 수 없는 구조를 가지거나^{[6]-[9]}, 승

Paper number: TKPE-2012-17-6-1 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: bklee@skku.edu, College of Information and Communication Eng., Sungkyunkwan Univ.
Tel: +82-31-299-4581 Fax: +82-31-299-4612

¹ College of Information and Communication Eng., Sungkyunkwan Univ.

² PIA TF, Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd.

Manuscript received Aug. 20, 2012; accepted Sep. 13, 2012

— 본 논문은 2012년 전력전자학술대회 우수추천논문임

강압이 가능한 토폴로지를 이용한 연구도 진행되었지만 제어 알고리즘의 용의성과 구조의 간단함 때문에 Buck-Boost 컨버터 또는 Sepic 컨버터를 이용하여 연구가 진행되었다^{[10]-[13]}. 태양광 발전 특성 상 날씨가 흐릴 경우 발전을 할 수 없기 때문에 충전이 가능할 때 배터리에 최대의 전력을 충전할 필요가 있다. 이는 전력변환 장치가 고효율화를 이루어야 하는 의미이며 Buck-Boost 컨버터와 Sepic 컨버터는 토폴로지 특성 상 소자의 전압 스트레스가 크기 때문에 고효율을 기대하기 힘들다. 다른 승강압 컨버터보다 상대적으로 높은 효율을 가지는 Cascaded Buck-Boost 컨버터를 이용한 충전기도 개발 되었지만 상세한 제어 알고리즘과 MPPT 동작 및 Constant Current-Constant Voltage (CC-CV) 동작을 병행하여 충전하는 알고리즘은 제시되지 않았다.

본 논문에서는 모든 조건에서 최대의 전력량으로 2차 전지를 충전하기 위해 승강압이 가능하며 효율 향상을 위해 동기정류방식을 적용한 Cascaded Buck-Boost 컨버터를 적용하여 시스템을 구성하였으며, 입출력 조건에 따른 CC-CV 및 MPPT 충전모드 알고리즘을 제안하였

고 이를 바탕으로 시스템 흐름도를 구현하였다. 또한 각각의 동작 모드에서 쉽게 동작할 수 있는 Cascaded Buck-Boost 컨버터의 제어를 제안하였다. 150W급 하드웨어 설계를 통해 시작품을 제작하였으며 이를 통해 제안한 시스템의 효율 및 제안한 알고리즘을 검증하였다.

2. 시스템 구성 및 충전 알고리즘

2.1 시스템 구성

그림 1은 MIC를 이용한 저전압 배터리용 충전장치를 나타낸다. 사용한 토폴로지는 승강압 컨버터 중 상대적으로 효율이 높은 Cascaded Buck-Boost 컨버터이며 출력 전압이 반전되지 않는 특성을 가지고 있다. 태양광 모듈의 전압 및 전류 특성을 고려하여 시스템의 효율을 증가시키기 위해 다이오드 대신 스위치를 사용하여 동기정류방식을 적용하였으며, 승강압 동작은 Q_1 및 Q_2 스위치가 상보로 동작하여 강압 운전 (Buck 모드)을 하게 되고, Q_3 및 Q_4 스위치가 상보적으로 동작하여 승압 운전 (Boost

Fig. 1 System configuration of charger system using the MIC

(a) I-V curve under partial shading

(b) P-V curve under irradiation variation

Fig. 2 PV output curve with charging requirement

모드)을 한다. 또한 CC-CV 및 입력의 MPP를 추종하기 위해 입출력에 전압 전류 센서를 추가하였다.

2.2 태양광 모듈 출력에 따른 충전 특성

태양광 모듈의 경우 주변 환경에 따라 출력 특성이 변한다. 그림 2-(a)는 부분 음영 조건에 따른 태양광 모듈의 I-V 곡선을 나타내며 리튬 계열의 배터리를 충전할 수 있는 영역을 같이 표현하였다. 배터리의 경우 SOC에 따라 충전할 수 있는 영역이 변하며 A-B 곡선은 배터리에 최대 전류로 충전할 수 있는 크기를 의미하며, B-C 곡선은 더 큰 전류로 충전 가능하지만 컨버터의 정격으로 인해 최대의 전력으로 충전하는 구간이다. C-D 구간은 CV 모드로 충전 시 전압이 유지되며 전류가 줄어드는 것을 의미한다. 마지막으로 D-E 구간은 최소의 전력으로 충전하는 구간이다. 배터리가 요구

하는 전압 전류가 태양광 모듈 출력에 따라 승압 조건이나 강압 조건이 될 수 있는 것을 알 수 있으며, 이 때문에 배터리가 요구하는 최대의 전력으로 충전하기 위해서 승강압 구조의 컨버터가 필요함을 알 수 있다. 그림 2-(b)는 일정 전력으로 배터리를 충전하고 있을 경우 일사량이 줄어들어 발전량보다 기존 충전량이 클 경우를 나타낸다. 발전량이 줄어들었기 때문에 배터리 충전 요구량을 변경해야하며 CC 모드나 CV 모드로 충전 중에 CC 전류 크기를 낮추거나 CV 전압을 낮추어야 한다. 하지만 태양광 모듈이 발전할 수 있는 전력은 복잡한 식^[14]을 이용해서 도출해야 하므로 정확한 충전요구량의 변경을 추종하기가 힘들다. 따라서 이 경우에는 MPPT 제어를 수행하여 발전할 수 있는 최대 전력으로 배터리를 충전하는 방법이 필요하다.

2.3 MPPT를 고려한 충전알고리즘 및 흐름도

태양광 발전을 이용한 독립형 충전기의 경우 최대 태양광 발전량과 배터리 충전 요구량의 크기에 의해 충전 모드가 결정된다. 그림 3은 이를 이용하여 CC-CV로 충전하는 기존의 충전 알고리즘에서 MPPT 모드를 추가하여 나타낸 그래프다. 발전량이 충전량보다 클 경우에는 CC 모드와 CV 모드 둘 다 동작이 가능하지만 태양광 모듈에서 일사량 변화나 부분 음영이 발생할 경우 발전량이 줄어들기 때문에 MPPT 모드로 변경된다. 그림 3의 실선은 모든 영역에서 발전량이 큰 경우이며 점선은 CC 모드에서 발전량이 부족한 구간이 발생하여 MPPT 모드로 변경되어 충전되고 CV 모드로 변경되는

Fig. 3 Charging profile by considering status of PV and battery requirement

Fig. 4 Control algorithm flowchart

것을 나타내었다. CV 구간에서도 발전량이 줄어들게 되면 MPPT 모드로 변경되어 동작하게 된다.

각각의 충전 모드 변경 조건은 다음과 같다.

$$\text{CC \& CV 모드: } V_{out}[n] - V_{out}[n-1] < 0 \quad (1)$$

$$\text{MPPT 모드: } P_{PV,old} - P_{PV}[n] \leq 0 \quad (2)$$

CC 모드에서는 발전량이 충전량보다 클 때 충전전류는 일정하고 출력전압 (V_{out})이 커지는 제어를 수행하게 된다. 따라서 출력전압이 작아진다는 의미는 출력 발전량이 충전량보다 작기 때문에 원하는 대로 제어가 되지 않는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 출력전압의 현재 값과 과거 값을 비교하여 이 값이 0보다 작을 경우 MPPT 모드로 변경된다. CV 모드에서도 출력전압은 고정되고 배터리의 임피던스 증가로 인해 충전 전류가 줄어들기 때문에 현재 전압 값이 과거 값보다 작아지면 마찬가지로 MPPT 모드로 변경된다. MPPT 모드는 태양광 모듈의 전력을 최대로 발전하는 모드며 CC 모드 및 CV 모드로 변경되는 경우는 MPPT 모드가 되기 직전의 전력 값과 현재 값을 비교하여 0 이하의 값을 가질 경우로 모드 변경 이전 전력 값 ($P_{PV,old}$)보다 같거나 큰 의미가 된다. 각각의 모드 변경 조건은 실시간으로 비교하여 제어 된다.

그림 4는 그림 3과 수식 (1) 및 (2)를 반영한 제어 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 입출력 조건에 의해 총 4 가지 동작 모드로 구성되며 이 중 Floating 모드는 배터리가 완전히 충전된 상태로 Q1 및 Q3 스위치를 오프

시켜 태양광 모듈과 배터리를 분리시키는 모드를 뜻한다. CC 모드와 CV 모드에서 MPPT 모드로 변경 되도록 각각의 조건문을 추가하였다.

2.4 제어 알고리즘

Cascaded Buck-Boost 컨버터의 경우 Buck Unit과 Boost Unit의 스위치가 승압 또는 강압 모드에 적절하게 PWM 신호를 인가하여 제어 되어야 한다. 따라서 각각의 승압 또는 강압 모드를 판단해야할 필요가 있다. 본 논문에서는 그림 5와 같이 각각의 모드별 제어를 제안한다. CC 모드에서 CV 모드로 변경 될 때 동일한 제어기로 동작하기 위해 그림 5-(a)와 같이 제어기를 구성하였고, 출력전압 지령치는 CC 모드일 때 출력전압 지령치 발생기에서 출력되는 값을 이용하며 CV 모드에서는 미리 지정한 출력전압 지령치를 이용한다. CC 모드일 때 출력전압 지령치는 식 (3)과 같이 만들어 진다.

$$V_{out}^* = V_{out,old}^* + k \cdot (I_{CC} - I_{out}) \quad (3)$$

MPPT 모드도 출력전압과 전류를 이용하여 제어할 수 있지만 제어 특성이 입력전압 전류를 이용하는 제어 방식보다 떨어지기 때문에 본 논문에서는 입출력전압 전류를 이용하여 제어를 수행하였다. 제어기가 센싱되는 값들이 바뀌게 되지만 각각의 변수와 이전에 저장되었던 값들을 제어기가 변경될 때 동일하게 사용하며 같은 구조의 제어기를 사용하기 때문에 안정적으로 제어 된다. 같은 값을 사용하는 변수는 다음과 같다.

(a) CC mode & CV mode

(b) MPPT mode

Fig. 5 Controllers of each mode

$$V_{in}^* = V_{in.old} \quad (4)$$

$$k_{i.V} \int v_{in.err}(t)dt = k_{i.V} \int v_{out.err}(t)dt \quad (5)$$

$$k_{i.I} \int i_{in.err}(t)dt = k_{i.I} \int i_{out.err}(t)dt \quad (6)$$

여기서 V_{inold} 는 모드가 변경되기 전 입력전압을 의미하며, 수식 (5)와 (6)의 오른쪽 적분항은 CC모드와 CV 모드에서 제어기의 누적된 값을 의미한다. 수식 (5)와 (6)은 CC 및 CV 모드에서 MPPT 모드로 변경 될 때 유지되는 제어기 변수를 의미하며 그 반대로 모드가 변경될 때는 수식의 좌변과 우변이 바뀌게 된다.

각각의 모드의 PWM 출력에서 Boost Unit에 인가되는 신호는 Buck PWM에서 PU 단위로 1을 뺀 값이 인가되어 Buck 스위치와 Boost 스위치가 동시에 PWM 신호가 인가되지 않게 제어하였다. 또한 동기정류방식을 사용하기 때문에 각각에 Unit에 인가되는 신호는 반전된다.

3. 하드웨어 구현 및 검증

3.1 하드웨어 구현

본 논문에서는 150W급 태양광 모듈을 이용하여 배터리 충전기를 만들기 위해 하드웨어를 제작하였다. 하드웨어의 소자 설계를 위해 입출력 조건을 정리하였으며 배터리의 경우 리튬-인산철을 9셀을 직렬로 연결한 전압으로 출력전압 변동을 정하였다. 각각의 파라미터는 표 1과 같다.

Cascaded Buck-Boost 컨버터의 경우 동작 모드에 따라 각각의 스위치에 인가되는 전압 스트레스가 달라진다. Q_1 및 Q_2 스위치는 입력전압만큼의 전압 스트레스가 인가되며 Q_3 및 Q_4 의 경우 출력전압만큼의 전압 스트레스가 인가된다. 따라서 Buck Unit 스위치 Q_1 및 Q_2 는 전압마진을 고려하여 55V 정격을 가진 IOR사의 AUIRF3705Z MOSFET를 사용하였다. Boost Unit 스위치의 경우 인가되는 전압 스트레스가 30V 미만이므로 Buck Unit의 스위치와 동일한 스위치를 사용할 수 있지만 식 (7)과 같이 실리콘 Device의 $R_{DS(on)}$ 의 경우 전압 정격 (Break Voltage)의 제곱에 비례하므로 낮은 전압 정격의 스위치를 사용하는 것이 시스템 효율과 단가 측면에서 장점을 가진다^[15]. 이때 α 는 공정 시 결정되는 계수다. Boost Unit의 스위치로 사용한 MOSFET는 Infineon사의 IPP065N04N을 사용하였다.

$$R_{DS(on)} = \alpha \cdot V_{break}^2 \quad (7)$$

인덕터의 인덕턴스 경우는 동기정류방식을 사용함에 따라 전류불연속모드로 동작하게 되면 인덕터에 역전류

Table 1 Parameters of PV module & battery

PV Module	ISC: 5.7[A] VMP: 29.0[V]	IMP: 5.4[A] VOC: 36.0[V]
Battery	14.4[V] - 29.7[V]	
Switching Frequency	200[kHz]	

가 흐르게 되고 이에 따라 태양광 모듈로 전류가 인가될 수 있는 문제가 발생할 수 있기 때문에 충전기가 동작하는 전영역에서 연속전류모드로 동작하도록 설계하였다. 인덕턴스의 불연속모드 경계조건은 Buck 모드와 Boost 모드가 동일하기 때문에 식 (8)을 만족하는 인덕턴스로 선정하였다^[16]. 5% 부하 조건인 7.5W 발전 시 최저 출력전압인 14.4V 조건에서 인덕턴스를 구하였으며 일사량이 부족하여 발전량보다 배터리 충전요구량이 큰 조건이기 때문에 입력전압은 태양광 모듈의 MPP 전압과 동일하므로 이때의 전압인 20V으로 선정하여 식 (8)에 의해 계산된 값인 19.4uH이상인 21uH로 인덕턴스를 선정하였다. 이때 D 는 스위치의 통류율 (Duty Ratio)를 의미하며 T 는 PWM의 주기를 의미한다.

$$L \geq \frac{V_{in}}{2I_{out}} \cdot D(1-D)T \quad (8)$$

출력 캐패시턴스 선정은 배터리의 전압리플을 줄이기 위해 출력 전압의 0.1%의 리플 크기를 가지는 값을 선정하였다. Buck 모드에서 출력전압이 가장 작으므로 14.4V를 기준으로 하였고 설계된 인덕턴스 값을 이용하여 37uF 이상의 캐패시턴스 값을 선정하였다. 본 논문에서는 3.3uF의 캐패시터 12개를 병렬로 사용하였다. Buck 모드에서는 출력 캐패시턴스보다 기생요소인 ESR에 영향을 많이 받을 수 있지만 본 논문에서 사용한 소자의 경우 5.3mΩ의 낮은 저항값을 가지기 때문에 그대로 12개의 캐패시터를 병렬로 사용하였다.

Fig. 6 150W prototype

$$\Delta V_{out} = \frac{1}{LC} \cdot \frac{V_{in}(1-D)D \cdot T^2}{8} \quad (9)$$

디지털 제어기의 경우 제안한 알고리즘 및 시스템 모니터링을 위해 TI사의 DSP320F28035를 사용하였으며 최종적으로 완성된 하드웨어는 그림 6과 같다.

3.2 하드웨어 및 알고리즘 검증

구현한 하드웨어 및 알고리즘을 검증하기 위해 150W 급 모듈을 대상으로 실험을 진행하였다. 배터리의 경우 14.4V에서 29.7V로 변하는 조건으로 전하로드를 이용하여 모의하였다. 사용한 MPPT는 Perturbation & Observation 알고리즘을 사용하였다.

그림 7-(a)의 경우 일사량이 최대일 때의 조건으로, 태양광 모듈의 발전량이 배터리의 충전요구량보다 충분히 클 경우의 실험 파형으로 CV전압인 종지전압 29.7V를 기준으로 CC-CV 모드가 변하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 Experimental results

Fig. 8 System efficiency

그림 7-(b)의 경우 일사량이 최대인 조건에서 CC 모드로 충전을 진행하고 있는 중에 일사량이 줄어들게 되어 MPP 전압 및 전류가 27.4V 및 4.0A로 줄어드는 경우로 총 발전량이 156W에서 110W로 줄어들게 된 조건을 검증하였다. CC 모드에서 초기 충전 시 배터리 충전 전력이 태양광의 발전량보다 작은 상태이기 때문에 모드 변경 없이 제어가 된다. 하지만 일사량이 줄어들게 되어 배터리 충전 전력이 110W보다 커질 경우 동일한 전류 크기로 CC 충전을 할 수 없게 된다. 따라서 제어기는 MPPT 모드로 변경되고 입력전압이 일정하게 제어되고 출력 전류는 출력 전압이 늘어나게 됨에 따라 줄어든다. 최종적으로 종지전압으로 도달할 경우 CV 모드로 변경되어 충전 과정이 완료되며 입출력 조건에 따라 잘 제어됨을 알 수 있다.

그림 8은 입력전압 29V 출력전압 26V인 조건에서 25W 단위로 시스템 효율을 측정한 결과이다. 입출력 Common Mode 필터, 제어기 및 보조회로의 소비 전력을 포함한 결과로 150W에서 96.6%의 효율 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 논문은 Cascaded Buck-Boost 컨버터 구조의 MIC를 이용한 태양광 발전 시스템의 저전압 배터리 충전을 위한 알고리즘과 제어기를 제안하였고 150W 하드웨어 설계를 통해 시작품을 제작하였다. 제안한 알고리즘은 태양광 발전 특성을 고려하여 충전 모드가 결정되고 이에 따라 배터리를 최적으로 충전할 수 있다. 또한 하드웨어 설계를 통해 최고 효율 96.6%를 얻을 수 있었다. 이에 따라 기존의 승압 또는 강압 조건으로 동작하는 저전압 배터리 충전시스템보다 다양한 조건에서 적용가능하며 각각의 조건에 따른 최적의 충전 모드가 결정되어 PV 모듈과 배터리를 최적으로 선정할 수 있다. 개발된 시스템은 독립된 섬 지역, 가로등 및 안내판 등의 LED에 적용하게 되면 최적으로 배터리를 충전하여 운영할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Alonso, P. Ibanez, V. Martinez, E. Roman, A. Sanz, "Analysis of performance of new distributed MPPT architectures," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 3450-3455, 2010.
- [2] M. Rogol, S. Doi, and A. Wilkinson, "Sun screen: Investment opportunities in solar power," *Solar Power Sector Outlook*, CLSA Asia-Pacific Markets, 2004 July.
- [3] Perry Tsao, "Simulation of PV systems with power optimizers and distributed power electronics," *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 389-393, 2010.
- [4] R. Orduz, J. Solorzano, M. A. Egido, E. Roman,

"Analytical study and evaluation results of power optimizers for distributed power conditioning in photovoltaic arrays," *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, Nov. 2011.

- [5] Q. Li, P. Wolfs, "A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different dc link configurations," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 3, pp. 1320-1333, May. 2008.
- [6] H. J. Chiu, Y. K. Lo, C. J. Yao, T. P. Lee, J. M. Wang, J. X. Lee, "A modular self-controlled photovoltaic charger with interintegrated circuit (I2C) interface," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 1, pp. 281-289, March. 2011.
- [7] Y. C. Chuang, H. S. Chuang, Y. L. Ke, "design and implementation of battery charger with zero-voltage-switching resonant converter for photovoltaic arrays," *IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, pp. 1-6, 2006.
- [8] K. Liu, J. Makaran, "Design of a solar powered battery charger," *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, pp. 1-5, 2009.
- [9] C. C. Hua, P. K. Ku, "Implementation of a stand-alone photovoltaic lighting system with MPPT, battery charger and high brightness LEDs," *IEEE Power Electronics and Drives Systems*, pp. 1601-1605, 2005.
- [10] V. R. Vladimir, B. Simone, S. Giorgio, "Low-complexity MPPT technique exploiting the PV module MPP locus characterization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 5, pp. 1531-1538, May. 2009.
- [11] R. Alonso, P. Ibanez, V. Martinez, E. Roman, A. Sanz, "Analysis of Performance of New Distributed MPPT Architectures," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 3450-3455, 2010.
- [12] S. J. Chiang, H. J. Shieh, M. C. Chen, "Modeling and control of PV charger system with sepic converter," *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol. 56, No. 11, pp. 4344-4353, Nov. 2009.
- [13] B. S. Manju, R. Ramaprabha, B. L. Matur, "Modeling and control of standalone solar photovoltaic charging system," *International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology*, pp. 78-81. 2011.
- [14] N. K. Gautam, N. D. Kaushika, "An efficient algorithm to simulate the electrical performance of solar photovoltaic arrays," Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi, India; 2002.
- [15] A. Radic, A. Prodic, "Buck converter with merged active charge-controlled capacitive attenuation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 3, pp. 1049-1054, Mar. 2012.
- [16] E. C. Nho, G. B. Jung, N. S. Choi, "Power Electronics 3rd edition," Munundang, Korea, 2011.

김동희(金東熙)

1984년 5월 27일생. 2009년 성균관대 전자전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 태양광시스템협동과정 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 전기전자컴퓨터공학과 박사과정.

이희서(李義書)

1985년 12월 31일생. 2011년 성균관대 전자전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 석사과정.

이영달(李永達)

1983년 12월 7일생. 2011년 한밭대 제어계측공학과 졸업. 2011년~현재 성균관대 대학원 이동통신공학과 석사과정.

이은주(李恩珠)

1984년 8월 3일생. 2011년 성균관대 전자전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 이동통신공학과 석사과정.

이태원(李泰遠)

1971년 7월 14일생. 2000년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(공학박). 2007년~2008년 미국 Michigan State University Postdoctoral Research Associate. 2008년~현재 삼성전기 책임연구원. 당 학회 학술위원.

이병국(李秉國)

1968년생 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 2001년 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학박). 2002년 1월~2003년 1월 Postdoctoral Research Associate, Texas A&M University. 2003년 4월~2005년 9월 한국전기연구원 산업전기연구단 전력전자그룹 선임연구원(팀장). 2006년 3월~현재 성균관대 정보통신공학부 부교수. 2004년~현재 IEEE Senior Member, IEEE VPPC2012 General Chair, 현재 당 학회 재무이사.