DBpia

Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2022) 36(3) : 29～35
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2022.36.3.029 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)
논문 36-3-5

HIL-Simulation을 이용한 50kW PV 시스템의 MPPT 제어 성능 검증

(Verification of MPPT Control Performance of 50kW PV System by HIL-Simulation)

안재범* · 정승재** · 조현빈* · 임승범*** · 류홍제†
(Jae-Beom Ahn · Seung-Jae Jeong · Hyun-Bin Jo · Seung-Beom Lim · Hong-Je Ryoo)

Abstract

This paper proposes a maximum power tracking control algorithm based on the incremental conductance method with a variable step size coefficient that is not affected by the insolation of 50kW PV system. A PV module for consisting 50kW PV system is modeled as a single module considering the real-time calculation of RTBOX, and a control module is modeled to control MPPT and load balance of three-phase interleaved converter. HILS system consists of RTBOX, TMS320F28379D, and interface board. Through PLECS simulation and HILS, under the conditions of changes in insolation, performance of MPPT efficiency, tracking time to the maximum power point, and load balance of interleaved converter are verified.

Key Words : HILS, INCCND, MPPT, Photovoltaic, PLECS, Variable step

1. 서 론

2020년 이후로 전세계 Photovoltaic(PV) 시장의 신규 설치되는 설비의 용량은 139GW에 이르고 있으며, 현재 누적된 세계 PV 설치 용량은 760GW 이상에 달한다[1]. 국내에서도 신재생 에너지원 중 67%의 가장 큰 비중을 차지하는 PV 시스템은 태양전지의 출력 특성으로 인해 Maximum power point tracking(MPPT) 제어가 요구되며, 이는 주로 PV 시스템에 구성된 PV 인버터나 DC-DC 컨버터를 제어함으로써 이루어진다. MPPT 기법으로는 보편적으로 Hill climbing 기법과 Perturb and Observe(P&O) 기법, 그리고 Incremental conductance(INCCND) 기법이 주로 사용되며, 이중 INCCND 기법은 정상상태에서의 전력 리플이 낮아 더 높은 출력 효율을 달성할 수 있는 장점이 있다[2]. 이 기법은 태양광 모듈의 동작점을 파악하고 레퍼런스 전압을 업데이트하여 최대 전력점의 전압에 도달하도록 제어되는데, 동작점을

† Corresponding Author : Professor, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
Tel : 02-820-5178
E-mail : hjryoo@cau.ac.kr
https://orcid.org/0000-0001-8657-7350
* M.S and Ph.D. course, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
https://orcid.org/0000-0003-2881-8931
https://orcid.org/0000-0003-1808-1534
** Undergraduate student, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
https://orcid.org/0000-0002-4140-3557
*** General manager, ESS Department Head, Eon Co., Ltd, Korea
https://orcid.org/0000-0002-7497-4970
Received : January 24, 2022
Revised : January 25, 2022
Accepted : January 26, 2022

Copyright ⓒ 2022 KIIEE All right's reserved
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/ licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

www.dbpia.co.kr

추종하기 위한 스텝사이즈의 크기 선정에 따라 최대 전력점 추종속도와 정상상태의 출력 효율간의 trade off가 존재한다[3]. 이에 따라 동작점으로부터 최대 전력점까지의 거리에 따라 스텝사이즈를 가변할 수 있는 가변스텝 사이즈 기반의 MPPT 알고리즘이 연구되었다[4]. 그러나 이는 일사량의 변동이 존재하는 경우, 조절 계수의 변동으로 인해 제어가 불안정한 단점이 있으며, 이를 위해 본 논문에서는 일사량에 영향을 받지 않는 가변스텝 방식의 MPPT 알고리즘이 제안된다.

한편 수 kW 이내의 가정용 태양광 발전과 같은 저용량의 시스템의 경우 실험을 통한 알고리즘 검증이 비교적 용이하지만, 수십 kW부터 수 MW에 이르는 중대형 PV 시스템의 경우, 실험적인 검증을 위한 시스템 구축에 큰 비용과 시간이 요구되는 문제가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 50kW 용량의 PV 시스템에 적용되는 MPPT 알고리즘의 검증을 위해 PLECS 기반 시스템을 모델링하고 Hardware in the loop simulation (HILS) 시스템 구축을 통해 시뮬레이션 및 HILS 알고리즘 검증을 수행한다.

논문의 순서로 2장에서는 제안된 MPPT 제어기법에 대해 다루며, 3장에서는 50kW PV MPPT 시뮬레이션 구축 및 결과를 다룬다. 4장에서는 HILS를 이용한 MPPT 알고리즘 검증 내용을 다루며, 5장에서는 결론으로 제안된 알고리즘의 검증을 위한 모델링 내용과 HILS를 통한 성능 결과를 정리하여 기술한다.

2. 가변스텝 방식의 incremental conductance를 이용한 MPPT 기법

MPPT 기법은 태양전지의 출력 특성을 이용하여 최대의 전력을 출력할 수 있는 동작점을 빠르게 추종하고 해당 동작점에서 낮은 전력 리플로 유지되도록 제어함으로써 출력 효율을 최대화 할 수 있다. 한편 최대 전력점 추종을 위한 스텝사이즈는 추종 속도와 출력 효율에 영향을 끼친다. 큰 스텝사이즈를 선정할 경우 추종 속도는 빠르지만, 정상상태에서의 전력 리플이 큰 단점이 있으며, 작은 스텝사이즈를 선정할 경우 정상상태에서의 전력 리플은 작지만, 최대 전력점 추종 속도가 느린 단점이 존재한다. 이러한 trade off 문제를 보완할 수 있는 기법으로 가변스텝 기법이 고려된다. 가변스텝 기법은 고정된 스텝사이즈 기법과 비교하여 최대 전력점까지의 거리에 따라 초기에는 큰 스텝 사이즈로 추종하며, 최대 전력점에 가까워짐에 따라 작은 스텝 사이즈로 추종하기 때문에 최대 전력점까지의 빠른 추종속도와 정상상태에서의 높은 효율을 달성할 수 있다.

가변스텝 기법을 적용하기 위해 가변스텝 조절계수의 선정이 요구되며, 태양광 모듈은 전류원 특성이 있어 일사량에 따라 출력전류가 달라지기 때문에, 본 논문에서는 일사량 변동에 따른 출력전류의 크기 변화에 영향을 받지 않는 가변스텝 조절계수로 M(k)가 제안된다. 가변스텝 조절계수 M(k)는 식 (1)을 통해 정의된다.

$$M(k)=\begin{cases}\left|1+\dfrac{V}{I}*\dfrac{dI}{dV}\right| & \text{for } M(k)\le 1\\ 1 & \text{for } M(k)\ge 1\end{cases} \quad (1)$$

Fig. 1은 태양광 모듈의 출력 전압에 따른 출력 전력 곡선과 함께 가변스텝 조절 계수 M(k)의 크기를 나타낸다. M(k)는 최대 전력점으로부터 먼 거리에서는 크기가 1로 일정하며 최대 전력점에 가까울수록 작아지며, 최대 전력점에서는 0으로 수렴한다. 또한 M(k)는 일사량의 크기에 따라 P-V 곡선의 출력 특성이 다른 조건에서도 동일한 값을 갖는다.

가변스텝 조절계수 M(k)가 적용된 MPPT 제어 알고리즘은 Fig. 2와 같다.

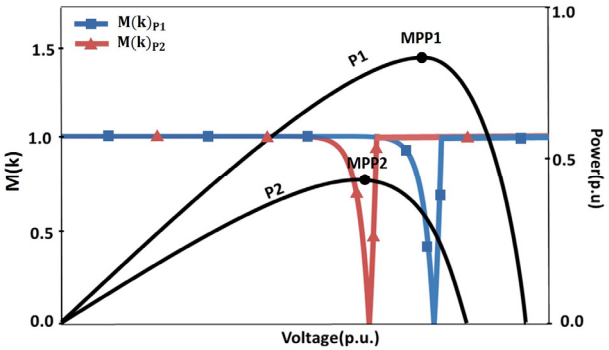


Fig. 1. Coefficient M(k) of variable step size for MPPT control

www.dbpia.co.kr

태양광 모듈의 출력 전압과 출력 전류 정보를 받아 M(k)를 계산하며, 태양전지의 출력 컨덕턴스와 증분 컨덕턴스의 비교를 통해 현재의 동작점을 파악하고, M(k)에 비례한 가변스텝 사이즈만큼 레퍼런스 전압을 조절한다.

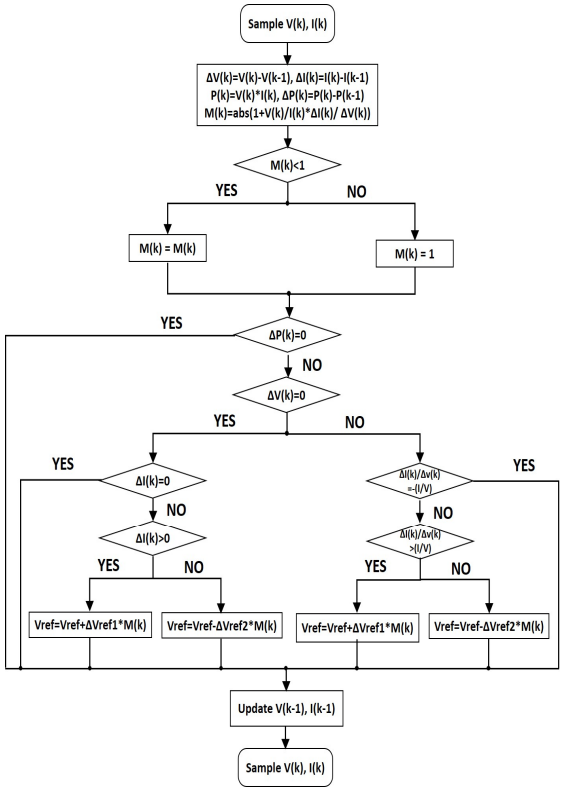


Fig. 2. Flow chart of MPPT algorithm

3. PLECS 모델링 및 시뮬레이션

3.1 태양광 모듈

태양광 모듈은 내부 병렬 저항, 외부 직렬저항, 커패시턴스, 기생 다이오드와 같은 성분으로 Fig. 3의 회로와 같이 등가 모델링 된다.

본 논문에 적용된 태양광 모듈은 하나의 모듈 당 최대 215W를 출력하는 1Soltech 1STH-215-P를 기반으로 모델링 되었다. 따라서 Fig. 3의 등가회로를 직병렬로 구성함에 따라 50kW 출력 용량의 다중 모듈로 구성된 PV 어레이를 구성할 수 있다.

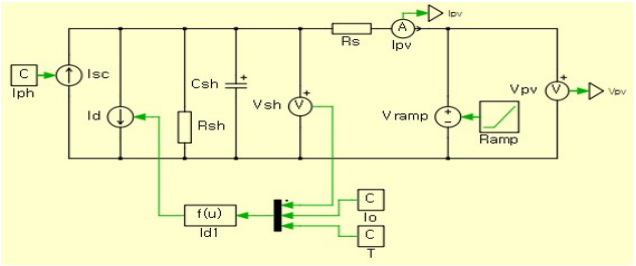


Fig. 3. Equivalent circuit of 50kW PV module

한편 50kW PV 시스템은 HILS 검증시 Plant를 담당하는 RTBOX에서 실시간 동작되는데, 한정된 core에서 실시간 시뮬레이션을 위한 고도의 연산이 이루어지기 때문에, 50kW PV 시스템을 구성하는 약 240개의 모듈을 실시간 동작하기 위해서는 core의 높은 할당이 요구되며, 장치의 overrun을 초래할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 50kW의 PV 시스템을 하나의 단일 모듈로 등가 모델링하였다. 직병렬 240 개의 태양광 어레이는 각 등가회로의 상수값과 Id에 Ns, Np 계수를 적용함으로써 모델링 되었다. 50kW PV 단일 모듈을 RTBOX에서 단독으로 동작시 요구되는 Core 할당량은 약 35%로 측정된다. 반면 복수개의 모듈로 구성시 Core 할당량은 개수에 비례하여 증가하므로, 단일 RTBOX에서 구동에 한계가 있다. 따라서 제안된 단일 모듈 모델링 방법을 통해 50kW PV 시스템의 HILS 검증시 요구되는 RTBOX의 core의 할당량을 효과적으로 감소시켰다. Table 1은 등가 모델링된 50kW 태양광 모듈의 파라미터를 나타낸다.

Table 1. 50kW PV module parameter

50kW PV Module parameter	
단락전류, Isc	Np*7.84*Ins A
다이오드 이상상수, n	0.98117
기생다이오드 역포화전류, Io	Np*2.9259e-1 A
내부 병렬 저항, Rsh	(Ns/Np)*5.3233
외부 직렬 저항, Rs	(Ns/Np)*0.0065638
전하량, q	1.602177e-19
직렬 연결 cell, Ns	720
병렬 연결 cell, Np	20

www.dbpia.co.kr

3.2 DC-DC converter

50kW 태양광 모듈의 출력 제어를 위해 three-phase interleaved boost converter(IBC)가 사용되었다. 일반 boost converter와 비교하여 각 상에 흐르는 인덕터의 전류 리플은 컨버터의 입력 string에서 서로 120 도의 위상차를 갖고 상쇄되기 때문에, 전류 리플을 효과적으로 감소시킬 수 있으며, 이는 태양광 모듈의 출력 특성 및 MPPT 효율 개선이 가능한 장점이 있다. 또한 하나의 스위치 및 인덕터에 흐르는 전류를 $(1/N)$배, 인가되는 전압은 $(1/N^2)$배 감소시킬 수 있기 때문에 대용량 DC-DC 컨버터의 토폴로지로 활용된다[5]. 태양광 모듈 및 three-phase IBC 컨버터 시스템은 Fig. 4와 같이 구성된다. 그러나 interleaved 방식의 경우 각 컨버터의 부하 불평형 문제가 발생할 수 있으며, 이를 고려한 제어기의 모델링이 요구된다.

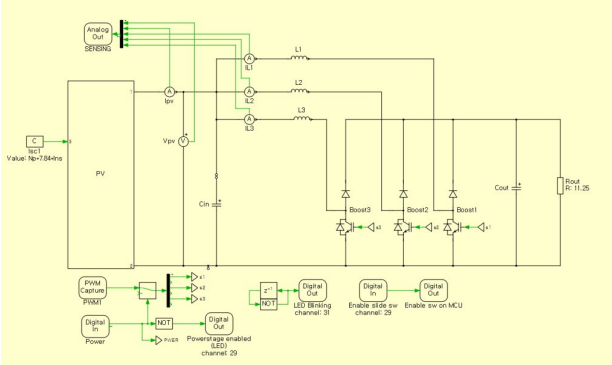


Fig. 4. System with interleaved boost converter

3.3 제어 모듈

제안된 MPPT 제어를 수행하고 IBC의 부하 불평형을 개선하기 위한 제어 모듈이 Fig. 5와 같이 구성된다. 제어 모듈은 MPPT 제어부와 부하 평형을 위한 인덕터 전류평형 제어부로 구성된다.

제어 모듈은 태양광 모듈의 출력전압과 출력전류, 그리고 각 상의 인덕터 전류를 센싱 받는다. 제안된 MPPT 알고리즘은 C-script를 통해 최대 전력을 출력하기 위한 레퍼런스 전압을 업데이트하여 PV 출력전압과의 오차를 보상하는 형태로 제어하며, 각 상의 인덕터의 전류 센싱값들의 오차는 전류 평형 제어기를 통해 보상되는 형태로 제어된다.

제어 모듈 구성을 위한 ADC 및 PWM 기능은 PLECS에서 제공되는 TI C2000 Target Support library Model이 사용되었다.

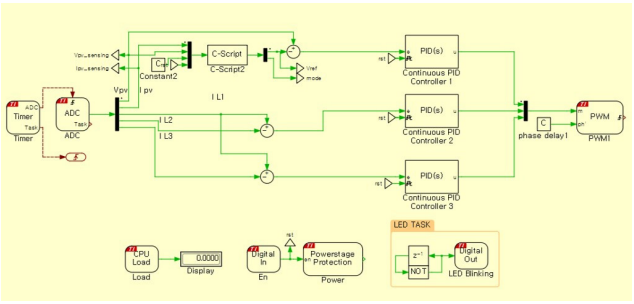


Fig. 5. Controller for MPPT and current balancing control

3.4 PLECS 시뮬레이션 결과

Fig. 6은 모델링 된 태양광 모듈에 500W/m^2, 1000W/m^2의 일사량이 입력되는 조건에서, 출력전압을 0V에서 개방전압인 435V까지 주입 시킬 때의 특성 곡선을 나타낸다. 약 348V에서 최대 전력을 출력하고, 이때의 최대 전력점에서의 전류는 146A이다. 또한 개방전압은 약 435V이다.

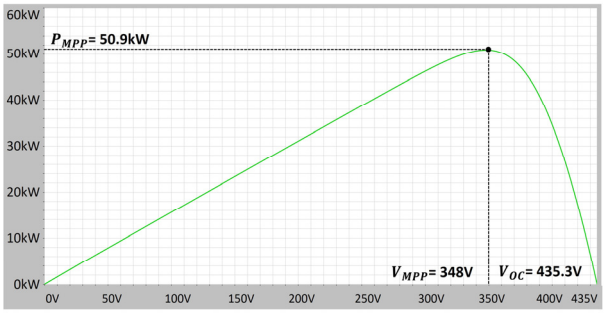
PLECS 시뮬레이션을 통한 PV 출력전력과 출력 효율, PV 출력 전압과 출력 전류, 그리고 인덕터 전류 파형은 Fig. 7과 같이 나타낸다. 태양광 모듈의 출력전력은 약 25.5kW와 51kW로 최대 동작점에서 동작되는 것을 알수 있으며, 이때의 최대 효율은 약 99.6% 이다. 또한 각 상의 인덕터의 전류 평형을 통해 부하간 불평형이 발생하지 않은 것을 알수있으며, 일사량 변화 순간의 MPPT 제어가 안정적으로 동작되는 것을 확인할 수 있다.

4. HIL-Simulation

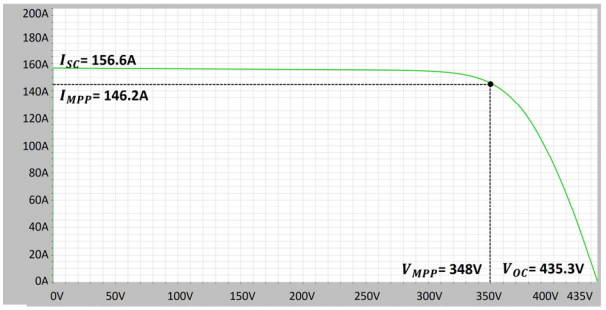
4.1 HILS system

PLECS 시뮬레이션을 통해 모델링 된 50kW급 태양광 시스템 및 제어 모듈의 동작 성능을 검증하기 위한

www.dbpia.co.kr



(a)



(b)

Fig. 6. Characteristic curves of 50kW PV module (a) P-V curve (b) I-V curve

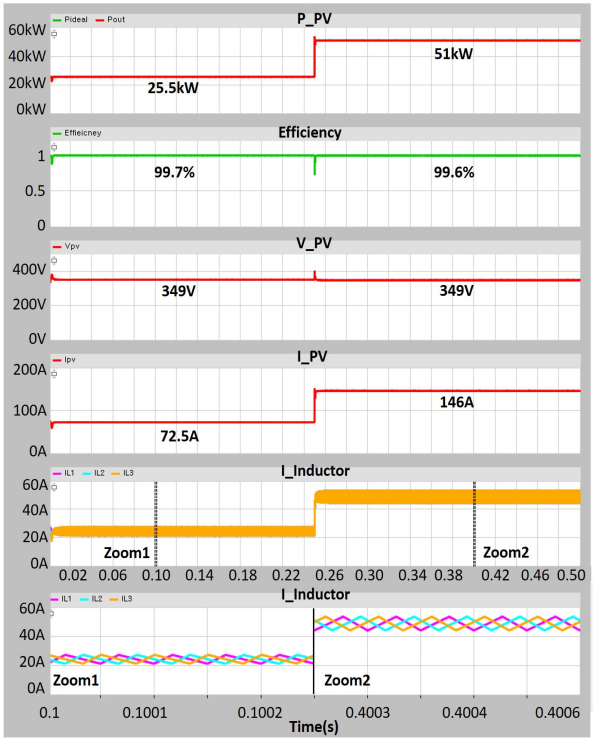


Fig. 7. Simulation result of 50kW PV MPPT

HILS 시스템은 Fig. 8과 같이 RTBOX와 인터페이스 보드, 그리고 TMS320F28379 제어보드로 구성된다. 태양광 모듈과 IBC는 Plant 모델로써 RTBOX에서 동작되며, 제어 모듈은 DSP 보드에서 동작된다. RTBOX와 DSP는 인터페이스 보드를 통해 ADC 센싱값과 PWM 신호를 주고받는다. PC와 제어보드, 그리고 PC와 RTBOX와의 Serial 통신을 통해 Real-time으로 변하는 측정값을 확인하고 MPPT 동작 성능을 검증한다. 50kW PV 단일 모듈 및 IBC 시스템을 RTBOX에서 동작 시 요구되는 Core 할당량은 약 76%로 측정된다.



Fig. 8. Picture of HILS system

4.2 HIL-Simulation 결과

Fig. 9는 일사량 500W/m^2과 1000W/m^2이 입력되는 조건에서 제안된 가변스텝 INCCND 알고리즘에 의한 태양광 모듈의 출력전력, 출력전압, 그리고 출력전류를 나타낸다. 시뮬레이션과 마찬가지로 99% 이상의 출력 전력 효율을 갖으며, 일사량이 급변하는 조건에서 MPPT 제어가 안정적으로 동작되며, 최대 전력점 도달까지의 최대 전력점까지의 추종시간은 약 20ms로 측정된다. 또한 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 각 상의 인덕터 전류 평형을 통해 부하 불평형 문제가 발생하지 않는 것을 검증하였다.

5. 결 론

본 논문은 50kW PV 시스템의 일사량에 영향을 받지 않는 가변스텝 조절계수를 적용한 INCCND 기법 기반의 MPPT 제어 알고리즘을 제안하며, 50kW 용량

www.dbpia.co.kr

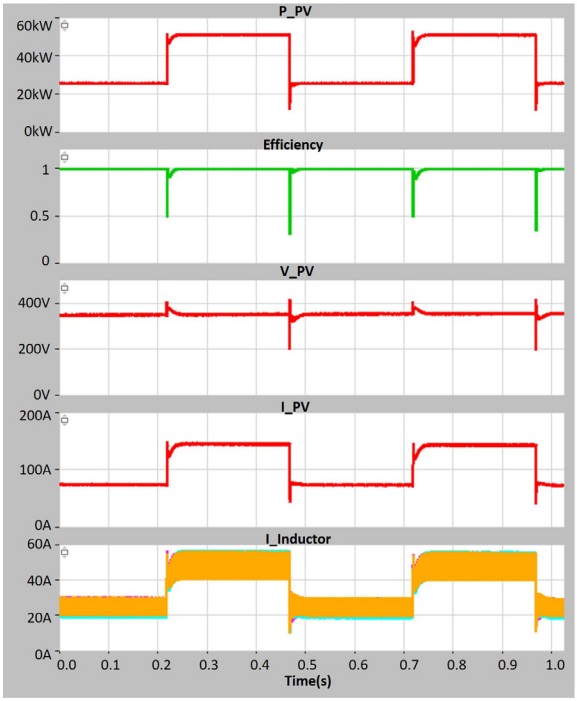


Fig. 9. HILS result of 50kW PV MPPT

의 PV 시스템에 적용되는 MPPT 알고리즘의 검증을 위해 PLECS 시뮬레이션 및 HILS 검증이 수행되었다. 50kW PV 시스템 구축을 위한 태양광 모듈이 RTBOX의 실시간 연산량을 고려하여 단일 모듈로 모델링 되었으며, three-phase IBC의 MPPT 및 부하 평형을 제어하는 컨트롤 모듈이 모델링되었다. 이는 PLECS 시뮬레이션과 HILS 검증을 통해 일사량의 변화 조건에서도 99 %의 높은 효율을 달성하며, 일사량 변화 조건에서도 20ms 내에 MPPT 도달하고, interleaved 컨버터의 부하 평형 제어됨을 검증하였다.

Acknowledgement

This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF), Korea government (MSIT) (No. NRF2020R1A2C2099663) and in part by the Ministry of Trade, Industry and Energy, Korea, under the "Regional Innovation Cluster Development Program (R&D, P0016220)" supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT).

References

[1] REN21, "Renewables 2020 Global Status Report," 2021.

[2] Nicola Femia, Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, and Massimo Vitelli, "Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method," IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 20, No. 4, pp. 963-973, 2005.

[3] KuiJun Lee, et al., "An Adaptive Maximum Power Point Tracking Scheme Based on a Variable Scaling Factor for Photovoltaic Systems," The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 17, No. 5, pp. 423-430, 2012.

[4] JaeSub Ko and DongHwa Chung, "MPPT Control of Photovoltaic using Variable IC Method," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 26, No. 8, pp. 27-34, 2012.

[5] Gautham Ram Chandra Mouli, et al., "Design and Comparison of a 10-kW Interleaved Boost Converter for PV Application Using Si and SiC Devices," IEEE Journal of Emerging And Selected Topics In Power Electronics, Vol. 5, No. 2, pp. 610-623, 2017.

Biography



Jae-Beom Ahn

He received the B.S. degree in electronic engineering from Kook-min University, Seoul, South Korea, in 2019. He is currently pursuing the integrated M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include power electronics for high-voltage pulse power systems and renewable energy, and arc fault detection in DC PV systems.



Seung-Jae Jeong

He is pursuing the B.S. degree at the Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Seoul. South Korea, in 2016. His research interests include power electronics and PV inverter control.



Hyun-Bin Jo

He received the B.S. degree in electronic engineering from Catholic University, Bucheon, South Korea, in 2016. He is currently pursuing his M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include Grid connected Inverter and high-voltage pulsed-power supply systems.

www.dbpia.co.kr



Seung-Beom Lim

He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Dankook University, Yongin, Korea, in 2004, 2006, and 2014, respectively. Since 2007, he has been a General Manager of ESS R&D department on EON Co., Ltd., Anyang, Korea. His current research interests include multi-level converters/inverters, high-power density converter/inverter design, and modular UPSs.



Hong-Je Ryoo

He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Seoul, South Korea, in 1991, 1995, and 2001, respectively. From 2004 to 2005, he was a Visiting Scholar with WEMPEC, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA. From 1996 to 2015, he joined the Electric Propulsion Research Division as a Principal Research Engineer, the Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, South Korea, where he was a Leader with the Pulsed Power World Class Laboratory, a director of Electric Propulsion Research Center. From 2005 to 2015, he was a Professor with the Department of Energy Conversion Technology, University of Science and Technology, Deajeon, South Korea. In 2015, he joined the School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul, where he is currently a Professor. His current research interests include pulsed-power systems and their applications, as well as high-power and high-voltage conversions. Prof. Ryoo is the cooperation vice president of the Korean Institute of Power Electronics, a editorial director of the Korean Institute of Electrical Engineers, and the Vice President of the Korean Institute of Illuminations and Electrical Installation Engineers.

www.dbpia.co.kr