https://doi.org/10.6113/TKPE.2020.25.1.1

실제 날씨를 고려한 PV-MPPT 제어기의 최적 주기와 변량전압

류단비[1], 김용중[1], 김효성†

Optimum Control Period and Perturbation Voltage for PV-MPPT Controller Considering Real Wether Condition

Danbi Ryu[1], Yong-Jung Kim[1], and Hyosung Kim†

Abstract

Solar power generation systems require maximum power point tracking (MPPT) control to operate PV panels at their maximum power point (MPP). Most conventional MPPT algorithms are based on the slope-tracking concept. A typical slope-tracking method is the perturb and observe (P&O) algorithm. The P&O algorithm measures the current and voltage of a PV panel to find the operating point of the voltage at which the calculated power is maximized. However, the measurement error of the sensor causes irregularity in the calculation of the generated power and voltage control. This irregularity leads to the problem of not finding the correct MPP operating point. In this work, the power output of a PV panel based on the P&O algorithm is simulated by considering the insolation profiles from typical clear and cloudy weather conditions and the errors of current and voltage sensors. Simulation analysis suggests the optimal control period and perturbation voltage of MPPT to maximize its target efficiency under real weather conditions with sensor tolerance.

Key words: Solar power generation, Perturb and observe algorithm, MPPT efficiency, MPPT control period, Perturbation voltage

1. 서 론

태양광발전시스템은 최대의 전력을 생산하기 위하여 PV 패널의 운전을 최대전력점에서 동작하게 하는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어가 필요하다. 기존의 MPPT 알고리즘은 PV 패널 출력 전력의 변화 기울기를 판단하여 최대전력 운전점을 찾아가는 경사법에 기초하고 있으며, 그중 대표적인 방법이 P&O(Perturb and Observe) 알고리즘이다. 이러한 경사법 알고리즘은 일정한 MPPT 제어주기마다 PV 패널의 단자전압을 일정한 변량으로 빼거나 더하는 변화를 주고, 그에 따른 PV 패널 출력전력의 변화를 계산하여, 최대 출력전력을 향하여 PV 패널 단자전압의 다음 운전점을 찾아간다[1],[2].

P&O 알고리즘의 MPPT 성능을 좌우하는 두 가지 인수는 MPPT 제어주기와 변량전압의 크기이다. 만약 변동하여 최대전력점을 추종하지만, 일사량이 변화하지 않는 정상상태에서는 PV 패널 출력전력이 최대전력점을 중심으로 크게 진동하여 전력생산에 손실이 발생한다. 반대로 변량전압을 작게 설정하면 일사량이 변하지 않는 정상상태에서는 PV 패널의 출력전력이 최대전력점 부근에서 작게 진동하게 되어 전력생산량을 안정되게 유지할 수 있으나, 구름이 많이 낀 흐린 날과 같이 일사량이 자주 변화하는 상황에서는 최대전력점을 미처 추종하지 못하여 전력생산에 큰 손실이 발생할 수 있다[3],[4].

MPPT 제어주기를 짧게 설정하면 변량전압을 작게 설정해도 MPPT 제어기의 동특성을 빠르게 할 수 있으나, 필요 이상으로 짧은 MPPT 제어주기는 MPPT의 성능 개선에는 기여하지 못하고 PCS(Power Conditioning

Paper number: TKPE-2020-25-1-1
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: hyoskim@kongju.ac.kr, Div. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University
Tel: +82-41-521-9167 Fax: +82-41-563-3689
[1] Dept. of Electrical, Electronic and Control Eng., Kongju National University
Manuscript received Aug. 28, 2019; revised Sep. 23, 2019; accepted Oct. 28, 2019
— 본 논문은 2019년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

System) 제어기의 시간 자원을 소모하여 PCS의 제어 특성을 악화시키는 문제를 일으킨다[5].

특히, 태양광발전시스템의 MPPT 제어 알고리즘은 불규칙하게 변화하는 실제의 다양한 날씨 환경에서 항상성을 갖고 최대전력점을 추종하여야 하며, 전류 및 전압 센서의 측정 노이즈 및 오차로 인한 MPPT 제어 오류를 최소화해야 한다. 최적의 MPPT 제어주기와 변량전압의 크기를 결정하기 위해서는 실제 날씨 환경에서 다양한 일사량 프로파일의 패턴에 대한 MPPT 제어기의 성능 분석이 필수적이며, 센서의 정확도 범위 내에서 불규칙하게 변화하는 오차를 반드시 고려해야 한다.

본 논문에서는 전형적인 맑은 날씨와 흐린 날씨에서 취득한 일사량 데이터와 전류 및 전압 센서의 오차를 고려하여 P&O 알고리즘에 의한 전력생산량을 시뮬레이션하고, 시뮬레이션 분석을 통해 실제 날씨 및 센서 허용오차 조건에서 MPPT 목표 효율을 극대화할 수 있는 최적의 MPPT 제어주기와 변량전압의 크기를 제시한다.

2. 실제 날씨 환경의 일사량 분석

일사량을 측정하는 방법으로는 일사량계를 사용한 직접측정 방법과 PV 패널의 단락 전류 I_{SC}가 일사량에 비례하는 특성을 이용하여 PV 패널의 I_{SC} 변화를 관찰함으로써 일사량의 변화를 간접적으로 추정하는 방법이 있다. 본 논문에서는 실험의 경제성과 효과성을 고려하여 간접측정 방법을 채택하였다. PV 패널의 단락 전류 I_{SC}는 일사량에 비례하므로 날씨 변화에 따른 일사량 백분율(G)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(t) = \frac{I_{SC/SEN}(t)}{I_{SC/NOM}} \times 100\,[\%] \quad (1)$$

단, $I_{SC/SEN}(t)$: 실제 일사조건에서 측정한 PV 패널의 단락전류
$I_{SC/NOM}$: STC(Standard Test Condition)에서 PV 패널의 단락전류

본 논문에서 일사량 분석에 사용된 PV 패널은 다결정 타입이며, 전기적 사양은 표 1과 같다. 하루 동안의 날씨 변화에 따른 일사량 분석을 위해 오전 6시부터 오후 7시까지 13시간 동안 일사량을 측정하였으며, 일사량의 샘플링 구간은 20ms로 설정하였다. 그림 1과 그림 2는 전형적인 맑은 날과 흐린 날의 일사량 프로파일을 나타낸 것으로 맑은 날은 일사량의 변화가 완만한 반면에 흐린 날은 일사량이 매우 불규칙적으로 급변하는 것을 확인할 수 있다.

표 2는 1일 중 총 일사량을 13시간의 샘플 시간에 대하여 적산한 것으로, 맑은 날의 총 일사량이 흐린 날에 비해 약 4.7배 큰 것을 확인할 수 있다. PV 패널의 발전량이 이상적으로 일사량에 비례하는 것으로 가정한다면 맑은 날은 흐린 날에 비해 약 4.7배 발전량이 증가할 수 있음을 알 수 있다. 표 2에서 적산일사량의 백분율(G_{TOT})은 다음 식 (2)와 같이 계산하였다.

TABLE I
ELECTRICAL SPECIFICATIONS OF THE PV MODULE USED IN MEASUREMENT

Parameter	Value
Maximum power (P_{MPP})	250 [W]
MPP voltage (V_{MPP})	30.61 [V]
MPP current (I_{MPP})	8.18 [A]
Open circuit voltage (V_{OC})	38.0 [V]
Short circuit current (I_{SC})	8.64 [A]

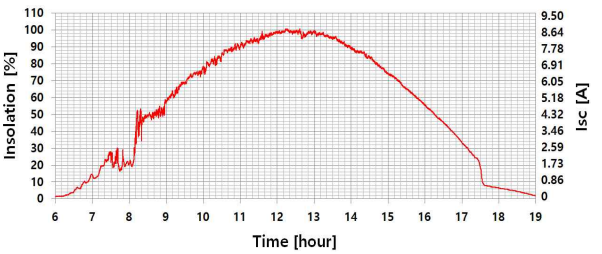


Fig. 1. 13-hour insolation profile in clear sky.

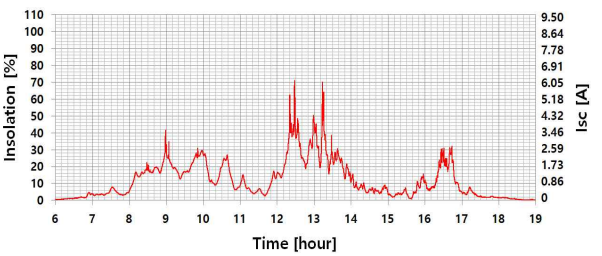


Fig. 2. 13-hour insolation profile in cloudy sky.

TABLE II
ACCUMULATED INSOLATION ACCORDING TO WEATHER

Weather condition		Insolation quantity	
		Actual value [A.s]	Percentage [%]
STC condition		404,698	100
Actual	Clear sky	226,179	55.89
	Cloudy sky	48.397	11.96

$$G_{TOT} = \int G(t) \cdot dt\,[\%] \quad (2)$$

3. MPPT 제어주기와 변량전압 크기에 따른 발전효율 분석

본 논문에서는 그림 1과 그림 2의 맑은 날과 흐린 날에 취득한 실제 날씨 환경에서의 일사량 데이터를 기반으로 센서 측정오차를 고려하여 P&O 알고리즘에 대한 MPPT 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 PV 패널의

TABLE Ⅲ
ELECTRICAL SPECIFICATION OF PV MODULE APPLIED TO SIMULATION

Parameter	Value
Maximum power (P_{MPP})	19.95 [W]
MPP voltage (V_{MPP})	17.50 [V]
MPP current (I_{MPP})	1.14 [A]
Open circuit voltage (V_{OC})	21.50 [V]
Short circuit current (I_{SC})	1.31 [A]

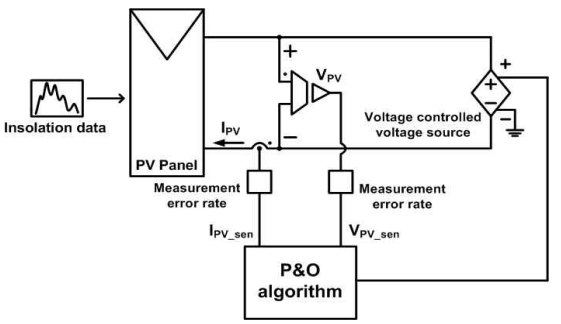


Fig. 3. Conceptual diagram of P&O MPPT algorithm simulation considering measurement error.

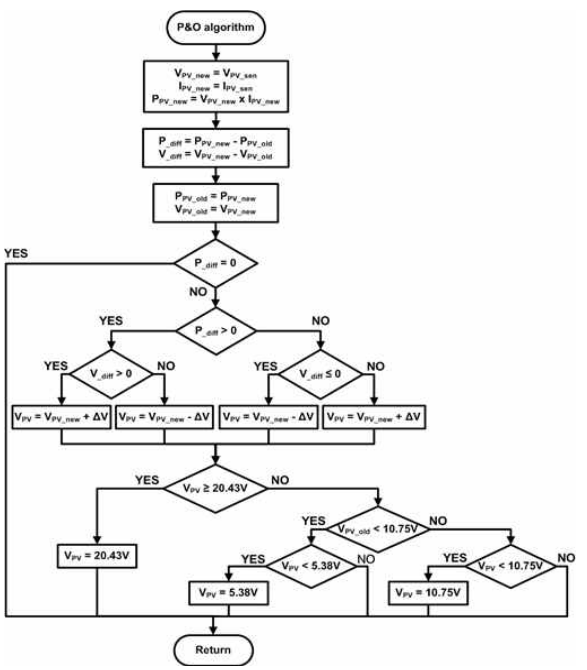
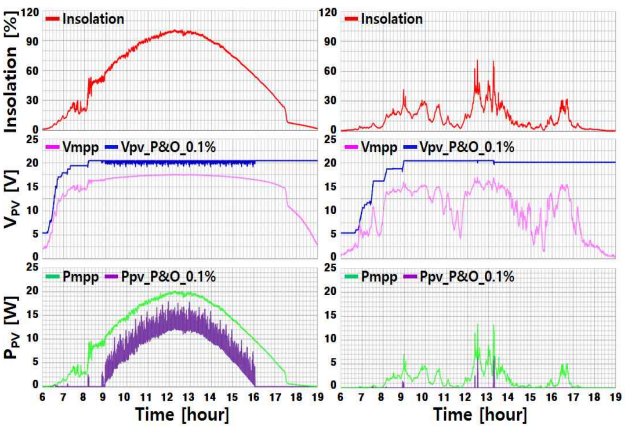


Fig. 4. Flowchart of applied P&O MPPT algorithm.

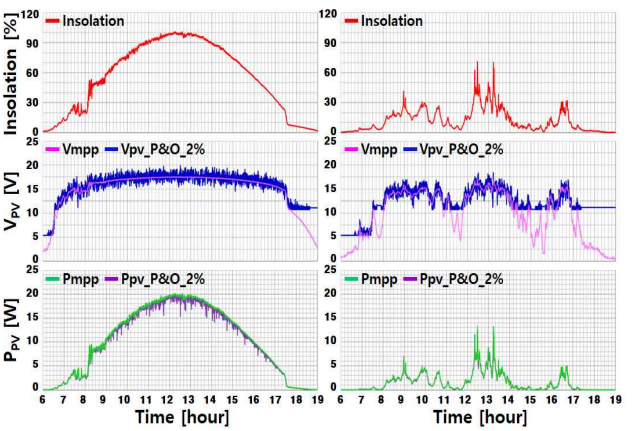
TABLE Ⅳ
SIMULATION CONDITIONS

MPPT control period	5sec, 10sec, 50sec, 100sec
Magnitude of the perturbation voltage	0.1%, 0.5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6% based on V_{OC}
Current sensor measurement error rate	Up to 2% based on I_{SC}
Voltage sensor measurement error rate	Up to 2% based on V_{OC}



(a) Clear sky (b) Cloudy sky

Fig. 5. P&O MPPT algorithm simulation waveform considering measurement error: T_{MPPT} = 5sec, ΔV = 0.1%.

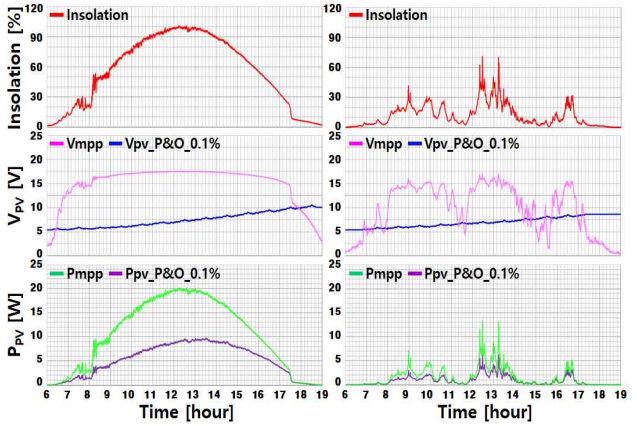


(a) Clear sky (b) Cloudy sky

Fig. 6. P&O MPPT algorithm simulation waveform considering measurement error: T_{MPPT} = 5sec, ΔV = 2%.

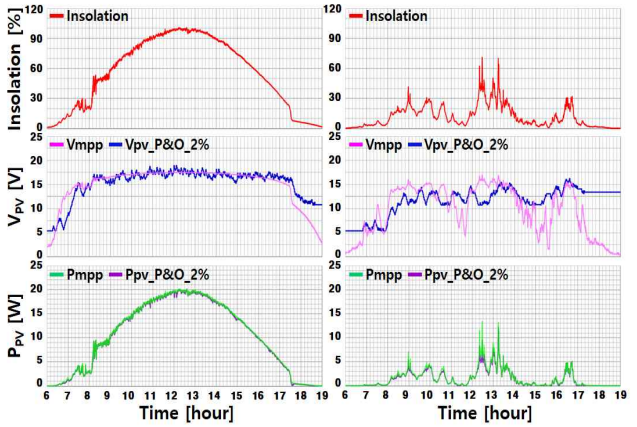
발전 효율을 추정하였고, MPPT 제어주기와 변량전압의 설정값에 따른 P&O 알고리즘의 특성을 비교, 분석하였다. 표 3은 MPPT 시뮬레이션에 적용된 PV 패널의 전기적 사양을 나타내고, 표 4는 시뮬레이션 조건을 나타낸다. 시뮬레이션에 적용된 MPPT 제어주기의 범위는 5초~100초, 변량전압의 크기는 V_{OC} 기준 0.1%~6%이며, 전류 및 전압 센서의 측정오차를 실제 상황과 유사하게 2%로 설정한 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행한다.

그림 3은 센서 측정오차를 고려한 P&O MPPT 알고리즘 시뮬레이션의 개념도를 나타낸 것이다. 20ms의 샘플링 구간을 갖는 일사량 데이터를 입력으로 하여 측정된 PV 패널의 출력전류 I_{PV}와 출력전압 V_{PV}에 측정오차를 적용한 값인 I_{PV_sen}과 V_{PV_sen}을 사용하여 P&O MPPT 제어를 수행한다. 이때, 실제 MPPT 제어 환경을 고려하여 MPPT 제어 시작전압은 STC(Standatd Test Condition) 조건에 따른 V_{OC}의 25%로 설정하고,



(a) Clear sky (b) Cloudy sky

Fig. 7. P&O MPPT algorithm simulation waveform considering measurement error: T_{MPPT} = 100sec, ΔV = 0.1%.



(a) Clear sky (b) Cloudy sky

Fig. 8. P&O MPPT algorithm simulation waveform considering measurement error: T_{MPPT} = 100sec, ΔV = 2%.

MPPT 운전전압 범위는 STC 조건에 따른 V_{OC}의 50%부터 95%로 설정한다. 그림 4에 본 논문에서 적용한 P&O MPPT 알고리즘의 플로우챠트를 보인다.

그림 5부터 그림 8까지는 센서 측정오차를 고려하였을 때 MPPT 제어주기와 변량전압 크기 변화에 따른 P&O 알고리즘의 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 첫 번째 파형은 일사량 프로파일, 두 번째 파형은 이상적인 V_{MPP}와 P&O MPPT 제어에 의한 운전전압 $V_{PV_P\&O}$을 나타내고 세 번째 파형은 이상적인 P_{MPP}와 P&O MPPT 제어에 의한 출력전력 $P_{PV_P\&O}$를 나타낸다.

그림 5와 그림 6은 MPPT 제어주기가 5초이고 변량전압의 크기가 0.1%, 2%인 조건에서의 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 그림 5(a)와 그림 5(b)는 변량전압의 크기가 0.1%인 조건에서의 맑은 날과 흐린 날에 대한 시뮬레이션 파형을 나타내고, 그림 6(a)와 그림 6(b)는 변량전압의 크기가 2%인 조건에서의 맑은 날과 흐린 날에 대한 시뮬레이션 파형을 나타낸다.

일출 기간 중, PV 발전 초기에 PV 모델에 의하여 추정된 이상적인 V_{MPP}가 MPPT 제어 시작전압보다 작을 경우, MPPT 제어를 수행하지 않고 P&O MPPT 제어전압을 STC 조건에 따른 V_{OC}의 25%로 고정시킨다. PV 모델에 의하여 추정된 이상적인 V_{MPP}가 MPPT 제어 시작전압보다 클 경우, MPPT 제어가 수행되고 P&O MPPT 제어전압은 최대전력점을 추종하기 시작한다. MPPT 제어주기가 5초이고 변량전압의 크기가 0.1%인 경우 맑은 날과 흐린 날에서 P&O MPPT 제어에 따른 $V_{PV_P\&O}$가 이상적인 V_{MPP}를 추종하지 못하여 P&O MPPT 제어에 의한 출력전력 $P_{PV_P\&O}$가 목표 P_{MPP}를 따라가지 못하는 것을 알 수 있다. 반면, MPPT 제어주기가 5초이고 변량전압의 크기가 2%인 경우 P&O MPPT 제어에 따른 $V_{PV_P\&O}$가 이상적인 V_{MPP}를 적절히 추종함에 따라 P&O MPPT 제어에 의한 출력전력 $P_{PV_P\&O}$가 이상적인 P_{MPP}와 유사한 발전량을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8은 MPPT 제어주기가 100초이고 변량전압의 크기가 0.1%, 2%인 조건에서의 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 그림 7(a)와 그림 7(b)는 변량전압의 크기가 0.1%인 조건에서의 맑은 날과 흐린 날에 대한 시뮬레이션 파형을 나타내고, 그림 8(a)와 그림 8(b)는 변량전압의 크기가 2%인 조건에서의 맑은 날과 흐린 날에 대한 시뮬레이션 파형을 나타낸다. MPPT 제어주기가 100초이고 변량전압의 크기가 0.1%인 조건에서 맑은 날과 흐린 날에서는 P&O MPPT 제어에 따른 $V_{PV_P\&O}$가 이상적인 V_{MPP}를 전혀 추종하지 못하여 P&O MPPT 제어에 의한 출력전력 $P_{PV_P\&O}$가 목표 P_{MPP}를 따라가지 못하는 것을 알 수 있다. 반면, MPPT 제어주기가 100초이고 변량전압의 크기가 2%인 조건에서 P&O MPPT 제어에 따른 $V_{PV_P\&O}$가 목표 V_{MPP}를 어느 정도 추종함에 따라 P&O MPPT 제어에 의한 출력전력 $P_{PV_P\&O}$가 이상적인 P_{MPP}와 유사한 발전량을 보이는 것을 알 수 있다.

이를 그림 5의 MPPT 제어주기 5초, 변량전압의 크기 2%인 경우와 비교하면, 맑은 날에서는 MPPT 제어주기가 100초인 경우가 5초인 경우보다 약 0.24% 높은 발전효율을 보이지만 흐린 날에서는 MPPT 제어주기가 100초인 경우가 5초인 경우보다 약 7.4% 낮은 발전효율을 나타냄을 확인할 수 있다.

그림 5부터 그림 8까지의 시뮬레이션 결과를 통해, 변량전압의 크기를 너무 작게 설정하면 각각의 MPPT 제어주기 조건에서 $V_{PV_P\&O}$가 최대전력 운전점인 V_{MPP}를 적절히 추종하지 못하는 것을 알 수 있는데, 이는 센서의 오차에 따른 것으로 고려된다. 또한, 변량전압의 크기를 적정한 값으로 설정하여도 MPPT 제어주기를 너무 길게 설정하면 일사량의 변화가 급격한 흐린 날의 경우에는 최대전력 운전점의 변화에 적절히 응동하지 못하고 시간 지연이 발생함을 확인할 수 있다.

그림 9는 시뮬레이션 결과에 따른 MPPT 효율을 비교한 그래프로서, 맑은 날과 흐린 날에서의 MPPT 제어

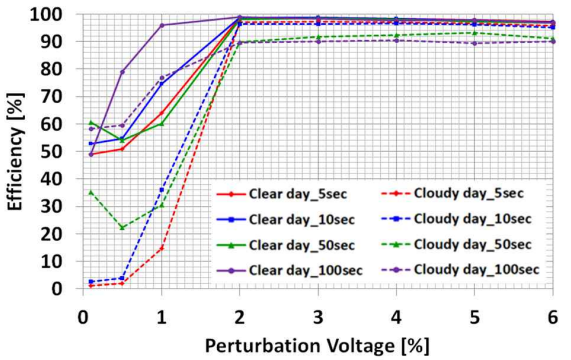


Fig. 9. Simulation Results Considering Measurement Error: MPPT Efficiency According to MPPT control period and perturbation voltage.

주기와 변량전압 크기에 따른 MPPT 효율의 특성을 보인다. 여기에서 MPPT 효율은 다음 식으로 계산하였다.

$$\eta_{MPPT} = \frac{\int P_{PV}(t) \cdot dt}{\int P_{MPP}(t) \cdot dt} \times 100[\%] \quad (3)$$

단, $P_{PV}(t)$: P&O 알고리즘을 적용하여 구한 발전 전력
$P_{MPP}(t)$: 이상적인 최대발전 전력

전체적으로 각 조건에 대해 맑은 날이 흐린 날보다 MPPT 효율이 높은 것을 확인할 수 있다. 각각의 MPPT 제어주기 조건에서 변량전압 크기를 2% 이상으로 설정할 때 약 90% 이상의 발전효율을 보이며, MPPT 제어주기가 5초일 때 약 96% 이상의 높은 발전효율을 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서 맑은 날과 흐린 날에 상관없이 96% 이상의 높은 MPPT 효율을 갖는 최적의 MPPT 제어주기는 5초이고, 최적의 변량전압 크기는 V_{OC} 기준 2%인 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 실제 날씨 환경과 센서 허용오차 조건에서 P&O MPPT 제어의 발전효율을 극대화할 수 있는 MPPT 제어주기와 변량전압의 크기를 결정하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 분석 결과, 변량전압의 크기를 센서의 오차율보다 작게 설정하면 MPPT가 제대로 수행되지 않음을 확인하였다. 반면, 변량전압의 크기를 적정한 값으로 설정해 주어도 MPPT 제어주기를 너무 길게 설정하면 일사량의 변화에 적절히 응동하지 못하고 시간 지연이 발생함을 확인하였다.

결론적으로, 센서 허용오차 조건에서 맑은 날과 흐린 날의 일사량 변화에 영향을 받지 않고 MPPT 제어의 발전효율을 극대화할 수 있는 최적의 MPPT 제어주기는 5초, 변량전압의 크기는 전압센서 오차율과 같은 2%임을 확인하였다. 제안된 분석 방법은 태양광발전용 PCS(power conditioning system)의 적절한 MPPT 제어주기와 변량전압을 결정하는데 활용할 수 있다.

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원을 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (2016R1D1A3B01008279)

References

[1] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Evaluation of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques," in *IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, Mar. 2012.
[2] R. John, S. S. Mohammed, and R. Zachariah, "Variable step size perturb and observe MPPT algorithm for standalone solar photovoltaic system," in *IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing*, Mar. 2017.
[3] B. Subudhi and R. Pradhan, "A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 4, pp. 89-98, Jul. 2013.
[4] Q. Fu and N. Tong, "Research on MPPT technique in photovoltaic power generation system," in *International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, Vol. 3, pp. 394-398, Mar. 2012.
[5] D. Ryu, Y. J. Kim, and H. Kim, "Optimum MPPT control period for actual insolation condition," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 24, No. 2, pp. 99-104, Apr. 2019.

류단비(柳단비)
1995년 5월 2일생. 2018년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2018년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 석사과정.

김용중(金龍中)
1988년 11월 10일생. 2013년 공주대 전기전자제어공학부 졸업. 2015년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전기전자제어공학과 박사과정.

김효성(金孝城)
1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 전기공학과 졸업(공박). 1996년~1997년 일본 오까야마대학 방문교수. 1999년~2000년 덴마크 연구부교수. 1987년~현재 공주대 전기전자제어공학부 교수.