

일사량 변동에 대응한 태양광발전시스템의 최대전력 추종기법 연구

유병규^{1*}

¹공주대학교 전기전자제어공학부

Study on maximum power point tracking method for PV system under varying irradiance

Byung-Gyu Yu^{1*}

¹Division of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju National University

요 약 태양광발전시스템에서 최대전력 추종기법은 태양광 발전용 전력변환장치에 구현되는 기술로서, 태양전지에서 발생할 수 있는 전력을 최대로 추출해 내는 제어 기법이다. 이러한 태양광 발전장치에서의 최대전력 추종기법은 추종 효율, 추종 속도 등에 따라 많은 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 지금까지의 연구는 일사량 등 환경요인이 고정된 조건에서의 정적 최대전력 추종 성능 개선에 집중해 왔다. 본 논문에서는 대표적인 최대전력 추종 기법인 외란 후 관찰에 의한 기법을 바탕으로 해서, 일사량이 변화하는 조건에서도 최대전력 추종 성능을 높일 수 있는 수정된 외란 후 관찰 기법을 제안한다. 제안된 기법은 최대전력 추종 제어주기 동안 추가적인 태양전지 전압/전류 계측으로 인해 일사량 변화시에도 높은 성능을 보일 수 있게 된다. 본 제안 내용의 타당성은 EN50530기준을 바탕으로 250kW 태양광 인버터를 사용해서, 실험을 통해서 검증하였다.

Abstract Maximum Power Point Tracking (MPPT) method for Photovoltaic (PV) system is implemented in PV inverter and it generate the maximum electric power from PV cell. MPPT method has been studied to have high efficiency and high tracking speed. However, these studies are basically focused on the performance under fixed irradiance condition. Based on the typical Perturbation and Observation (P&O) method, this paper presents the research results on modified P&O method to have a better performance under varying irradiance condition. The modified P&O method can have a better performance under varying irradiance condition because the additional measurements during the MPPT control period are conducted. The proposed MPPT method is verified by using 250kW PV inverter under linearly varying irradiance condition according to EN 50530.

Key Words : Maximum power point tracking; Varying irradiance, Photovoltaic generation

1. 서론

지구온난화 현상 및 기존 화석연료의 점진적 고갈로 인하여 신재생에너지에 대한 전세계적인 관심이 집중되고 있다. 이 중 태양광발전의 실용화는 구미 선진국을 중심으로 활발히 진행되어 그 시스템 단가는 점점 낮아지

는 추세이고, 이와 더불어 주택용전원, 인공위성 전원 뿐만 아니라 MW급 태양광 발전소 등으로 그 사업영역을 점차 확장하고 있다[1-5].

태양광발전시스템은 태양광에너지로부터 광전효과를 통해 태양전지가 전력을 발생하는 원리에 기반을 두고 있다. 태양전지의 출력은 일사량, 표면온도 등의 환경에

본 논문은 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임. (No. 20123010010060)

*Corresponding Author : Byung-Gyu Yu(Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9162 email: bgyuyu@kongju.ac.kr

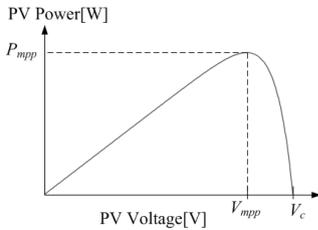
Received August 8, 2013

Revised (1st August 27, 2013, 2nd September 17, 2013)

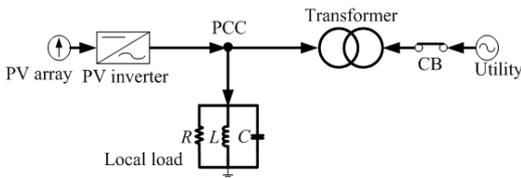
Accepted October 10, 2013

따라 동작전압과 전류의 상태를 나타내는 특성 곡선이 Fig. 1과 같이 비선형적인 특성을 나타내게 되는 데, 이러한 특성 곡선상의 전압-전류의 동작점이 결정되면 태양 전지의 출력 전력량이 결정되게 된다.

독립형 태양광 인버터 시스템에서는 출력 전력의 동작점이 부하의 용량에 의해서 결정되지만, 계통연계형 태양광 인버터 시스템에서는 Fig. 2와 같이 계통 부하를 무한대로 변동 가능한 부하로 볼 수 있기 때문에, 시스템의 효율을 높이기 위하여 태양전지에서 발생하는 전력을 최대한으로 이용할 수 있는 최대전력추종 (MPPT; Maximum Power Point Tracking) 기법이 필요로 하게 된다. MPPT 기법들에 대한 연구는 현재까지도 시스템의 복잡도, 센서의 유무, 수렴 속도, 비용적 측면, 하드웨어 구현 등의 관점에서 다음과 같이 많은 연구가 진행되고 있다[4-12].



[Fig. 1] Power-voltage curve of PV array



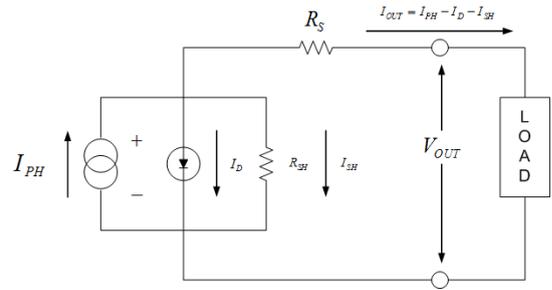
[Fig. 2] Typical grid connected PV system

하지만, 지금까지의 연구는 일사량 등 환경요인이 고정된 조건에서의 정적 최대전력 추종 성능 개선에 집중해 왔다. 본 논문에서는 대표적인 최대전력 추종 기법인 외란 후 관찰에 의한 기법을 바탕으로 해서, 일사량이 변화하는 조건에서도 최대전력 추종 성능을 높일 수 있는 제어 방법을 설계하였다. 그리고 이를 250kW 태양광 인버터에 기존의 P&O 기법과 수정된 P&O 기법을 구현하여, 실험을 통해서 일사량 변동 하에서의 최대전력 추종 특성을 서로 비교하였다.

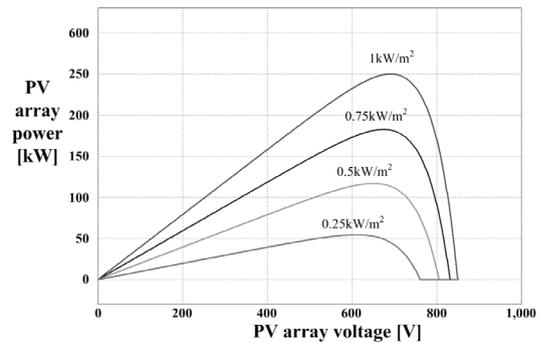
2. 태양전지 모델링

태양전지 어레이의 출력은 일사량과 온도에 따라 최대

출력이 변동하며 비선형 특성을 지니고 있다. 따라서 이러한 출력 특성에 따라 시스템을 시뮬레이션 하기 위해서는 태양전지 어레이를 모델링하여 시뮬레이션으로 구현하여야 한다. 태양전지의 특성은 일반적으로 Fig. 3에서 보이는 바와 같은 등가회로로 표현되며 다음의 수식으로 표기할 수 있다.



[Fig. 3] Equivalent circuit of PV cell



[Fig. 4] Simulated power-voltage curve of PV array with different irradiation

$$I_{OUT} = I_{PH} - A \left\{ \exp \frac{q}{BkT} (V_{OUT} + I_{OUT}R_S) - 1 \right\} - \frac{V_{OUT} + I_{OUT}R_S}{R_{SH}} \quad (1)$$

\$I_{PH}\$: 광발생전류, \$I_{OUT}\$: 부하측에 흐르는 전류, \$V_{OUT}\$: 태양전지 출력전압, \$R_S\$: 내부 직렬저항, \$R_{SH}\$: 내부 병렬저항, \$A\$: pn접합의 재료특성과 온도특성 계수, \$B\$: 재료 계수, \$k\$: 볼츠만 상수, \$T\$: 전지 온도, \$q\$: 전하량.

식 (1)이 수식을 간단히 하기 위해서 \$R_S = 0\$, \$R_{SH} = 0\$ 로 설정하면 식 (2)로 간략화 시킬 수 있다.

$$I_{OUT} = I_{PH} - A \left\{ \exp \frac{q}{BkT} V_{OUT} - 1 \right\} \quad (2)$$

일사량 1kW/m^2 일때의 단락전류를 I_{MAX} 로 놓으면 다음 식 (3)과 같이 정의되며

$$I_{OUT} = I_{PH} = I_{MAX} \quad (3)$$

태양전지의 출력을 개방($I_{OUT} = 0$)하면, 태양전지의 출력전압은 다이오드의 순방향 전압이 되기 때문에 다음 식 (4)와 같이 표현된다.

$$0 = I_{MAX} - A \left\{ \exp \frac{q}{BkT} V_D - 1 \right\} \quad (4)$$

여기서 계수 B는 제조상수이며 결정질 실리콘 태양전지에서는 일반적으로 1에서 2사이의 수치를 사용한다. 본 연구에서는 수식을 좀더 단순히 하기위해 B=1로 선정하였다. 따라서, 식(3),(4)를 정리하면 다음의 식 (5)를 통해 온도특성 계수 A를 구할 수 있다.

$$A = \frac{I_{MAX}}{\exp \left\{ \frac{q}{BkT} V_D \right\} - 1} \quad (5)$$

다이오드 순방향 전압 V_D 를 새로운 계수 K로 정의 ($V_D = K$)하면, 특정일사량에서 동작하는 태양전지 출력전류의 일반식은 다음과 같이 표현 된다.

$$I_{OUT} = I_{SC} - \frac{I_{MAX}}{\exp \left\{ \frac{q}{BkT} K \right\} - 1} \left\{ \exp \left(\frac{q}{BkT} \frac{V_{OUT}}{V_{OC}} K \right) - 1 \right\} \quad (6)$$

I_{SC} : 일사량에 따른 단락전류

I_{MAX} : 일사량 1kW/m^2 시의 단락전류

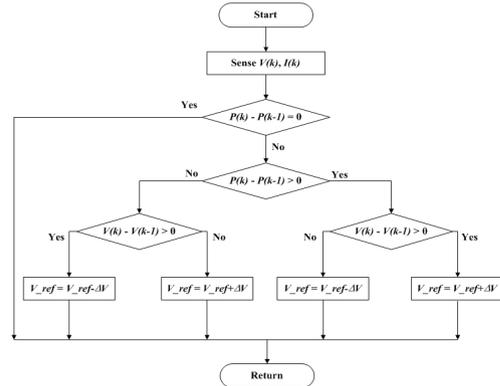
V_{OC} : 일사량 1kW/m^2 시의 개방전압

K : 계수(다이오드 순방향 전압 V_D)

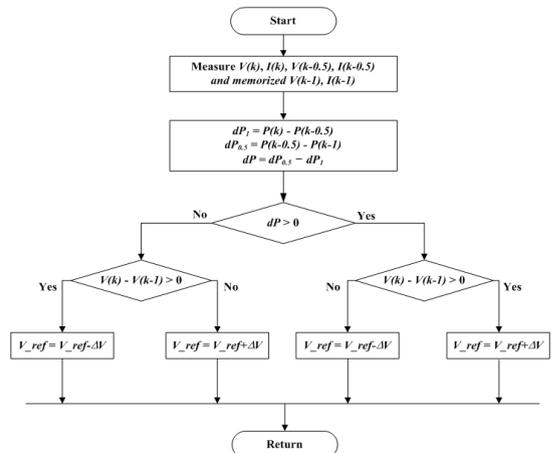
식 (6)을 이용하면 일사량에 따른 태양전지 어레이의 출력특성을 얻을 수 있으며, 전력전자용 시뮬레이션 툴인 PSIM을 이용한 시뮬레이션 결과를 [Fig. 4]에 나타내었다. 250kW 정격출력을 기준으로 일사량이 100% 기준인 1kW/m^2 부터, 일사량 25% 기준인 0.25kW/m^2 까지 태양광 어레이의 출력 전압 특성을 시뮬레이션을 통해서 확인하였다.

3. 기존의 P&O 최대전력 추종 기법

P&O 법(Perturbation and Observation Method)은 구성이 간단하고, 아날로그 혹은 디지털로 구현이 가능하여, 현재 시판되는 계통연계형 태양광인버터에 가장 많이 사용되고 있는 최대전력추종 기법 중의 하나이다. P&O 기법의 기본 알고리즘은 태양전지출력 전력-전압 특성에서의 비선형 특성을 바탕으로, 출력전압을 주기적으로 변동하여, 이 때 대응하는 출력전력의 크기를 이전 주기와 비교하여 최대전력점을 추종하는 방식이다. Fig. 5에서처럼 현재의 태양전지 어레이 전압과 전류로부터 현재의 태양전지 출력전력 $P(k)$ 와 이전의 출력전력 $P(k-1)$ 을 비교하여, 태양전지의 특성곡선에서 전압원 영역에 있는지, 전류원 영역에 있는 지를 판단한다. 만약 현재 출력이 이전 출력보다 증가하였다면, 출력전압 명령은 최근 명령과 동일한 방향으로 진행된다. 반대로 현재 출력이 이전 출력보다 감소하였다면, 출력전압 명령은 최근 명령과 반대방향으로 바뀌어 동작하게 된다.



[Fig. 5] Flow chart of the conventional P&O MPPT method



[Fig. 6] Flow chart of the modified P&O MPPT method

이와 같이 P&O 기법은 일사량이 고정되거나, 혹은 일사량의 변동이 적을 때는 제대로 추종을 하지만, 일사량의 변동이 클 경우 P&O MPPT 제어 명령에 의한 전력 변동양과 일사량의 변동에 의한 전력 변동양이 혼합되어, 제대로 최대전력점을 추종하지 못하는 문제가 발생한다.

4. 수정된 P&O 최대전력 추종 기법

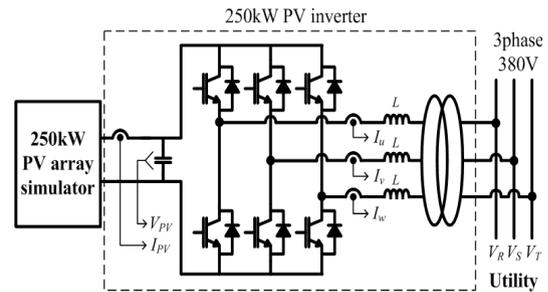
기존의 P&O 기법은 MPPT의 현재주기와 과거주기의 전력량을 비교해서, 정해진 P&O 알고리즘에 따라서 MPPT 제어를 결정짓는 구조를 가지고 있다. 하지만, 이러한 기존의 P&O 기법의 경우는 일사량 및 온도가 변화할 때, 앞서 설명하였듯이 추종성능이 떨어지는 단점이 있다. 이는 MPPT 제어의 핵심이 MPPT 제어 명령에 의한 전력 변동량의 비교를 기반으로 하고 있는데, 일사량이나 온도가 변화하게 되면 MPPT 제어 명령과 일사량에 의한 제어 명령이 합쳐져서 출력 전력의 변동량이 나타나기 때문이다. 이를 해결하기 위해서는 MPPT 제어 명령에 대한 출력전력의 변동량과 일사량에 의한 전력 변동량을 서로 구분해 줄 수만 있다면, MPPT 제어명령에 따른 전력변동량을 정확히 판단하여 일사량이 변하는 환경에서도 원만히 최대전력을 추종할 수 있게 된다. 이를 바탕으로 하나의 MPPT 제어 주기를 나누어, 현재 주기 및 과거 주기를 비롯해서, MPPT 제어주기의 반주기의 전력을 측정하여, 과거주기와 MPPT 제어 반주기와의 전력변동량을 측정하여 MPPT 명령에 의한 전력변동량과 일사량에 의한 제어 변동량을 산출하게 된다. 그리고 현재주기와 MPPT 제어 반주기와의 전력량을 측정하여, 일사량 변동에 따른 전력 변동량을 계속하여, 앞서 계산한 전력변동량과의 차이를 통해 MPPT 제어 명령에 따른 출력전력의 변동량을 정확히 구할 수 있게 된다. 이를 구체적으로 표현 제어 흐름도가 Fig. 6에 나타나 있다.

5. 실험결과 및 분석

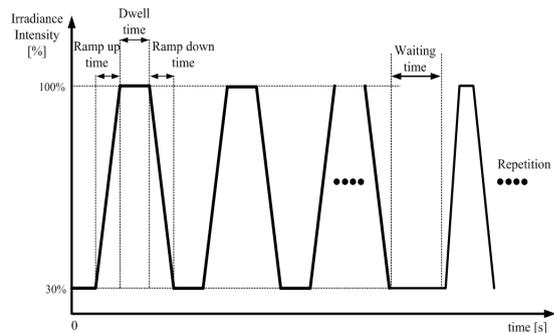
본 논문에서는 수정된 P&O 최대전력 추종기법과 기존의 P&O 최대전력 추종 기법을 비교하기 위해서, 250kW 태양광 인버터를 기반으로 하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 태양광 어레이 시뮬레이터의 시스템 파라미터는 Table 1과 설정하였다. 태양광 인버터는 Fig. 7에서처럼 250kW 용량을 사용하여 실험을 수행하였다.

[Table 1] System parameter for experiment

Spec.	Value	Unit
PV array power	250	kW
Open circuit voltage	810	V
Short circuit current	453	A
MPP voltage	650	V
MPP current Female	409	A



[Fig. 7] System configuration of PV system for MPPT performance evaluation



[Fig. 8] Irradiation variation profile

Table 1과 같이 설정된 태양광 어레이 시뮬레이터의 출력특성은 일사량 100% 기준, 즉 1kW/m^2 을 기준으로 설정되는 값이다. 하지만, 실제 일사량 변동에 따른 효율 특성 살펴보기 위해서, 주입하는 일사량의 값을 변동시켜야 한다. 이러한 일사량 변동에 따른 효율의 중요성이 대두 되면서, 유럽에서는 유럽공식 기준으로 이러한 일사량 주입 조건들이 기준으로 제정해서 EN 50530이라는 기준으로 2010년 발표하였다[13]. 본 논문에서는 실험방법은 EN 50530 기준에서의 실험 수행 방법을 따른다. 즉 Fig. 7의 일사량변동을 위한 태양광 어레이시뮬레이터와 계통

연계형 인버터, 상용계통으로 시스템을 구성하고, 일사량 변동을 위한 태양광 시뮬레이터의 일사량 데이터를 선형적으로 변화시킨다. 이 기준에서는 일사량 변동에 대해서만 평가를 한정한 것으로, 그 외의 환경변수는 기준에서 언급한 대로 STC 조건(25℃, AM 1.5)에 따른다. 이 기준에서 제시하는 일사량 변동 조건은 기본적으로 일사량을 30% 기준에서 100% 기준까지 변동시키는데, 변동시키는 속도를 Fig. 8에서 처럼 Ramp up time과 Ramp down time처럼 이 값들을 조정해서 변동시키게 된다. 여기서는 변동시키는 속도를 총 6개로 나누어 Ramp up Time과 Ramp down time 이 70초, 50초, 35초, 23초, 14초, 7초로 구성되도록 하여 실험을 수행한다. 유지시간(Dwell time)은 10초로 정하고, 총 실험 수행 시간은 1시간 56분 동안 수행한다.

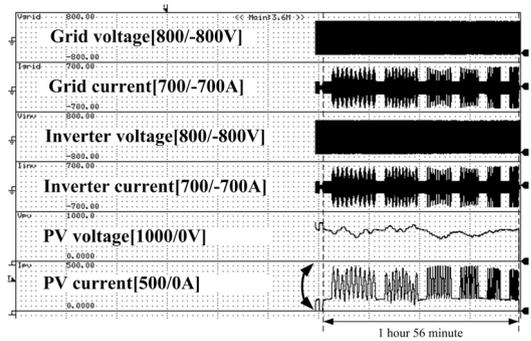
이러한 일사량 변동에 대해서 효율을 계측하는 방법은 태양광 시뮬레이터에서 나올 수 있는 이상적인 최대전력량에 대해서 실제 발전되어 태양광 인버터에 입력으로 들어가는 전력량의 비로 식(7)과 같이 정의 된다.

$$\eta_{MPPT} = \frac{1}{\sum_j P_{mpp,PVS,j} \cdot \Delta T_j} \sum_i V_{dc,i} \cdot I_{dc,i} \cdot \Delta T_i \quad (7)$$

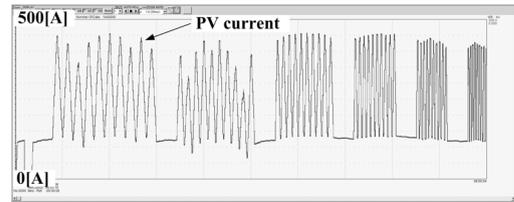
$P_{mpp,PVS}$: PV 시뮬레이터에서 공급되는 MPP 전력,
 P_{dc} : 피시험 장치의 계측된 입력 전력,

$V_{mpp,PVS}$: PV 시뮬레이터 에서 공급가능한 MPP 전압,
 V_{dc} : 피시험 장치에서 계측된 입력 전압, $I_{mpp,PVS}$: PV 시뮬레이터에서 공급가능한 MPP전류, I_{dc} : 피시험 장치의 계측된 입력전류

Fig. 9에서는 기존의 P&O 기법을 이용하여 일사량 30%에서 100%까지 변화할 때, 태양광 인버터의 각 부 주요 파형을 측정한 것으로 380V, 60Hz의 상용계통 전압, 상용계통으로 유입되는 전류, 태양광 인버터 출력전압, 태양광 인버터 출력전류, 태양광 어레이 출력 전압과 전류의 파형이 나타나 있다. 총 1시간 56분 동안 계측된 파형으로써, 일사량이 다양한 기울기로 변화할 때, 태양광 어레이의 출력전류의 크기가 선형적으로 변화하지 않고 왜곡을 가지고 변화함을 알 수 있다. 마찬가지로, 일사량이 변화할 때, 기존의 P&O 기법은 최대전력점을 제대로 추종하지 못해, 태양광 어레이의 출력 전압이 계속해서 변화하면서 제어가 불안정해 짐을 확인할 수 있다. 즉, 선형적으로 변화하는 일사량에 대해서 선형적으로 최대 전력점을 추종하지 못하고 있다.



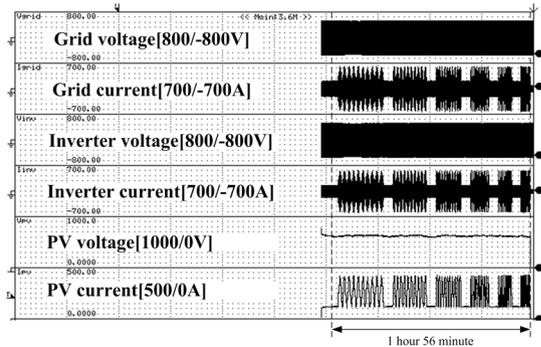
(a)



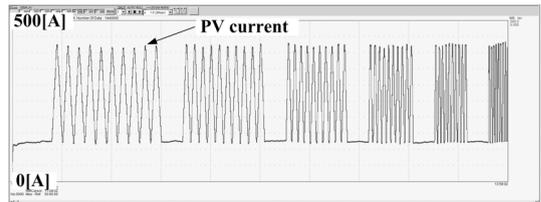
(b)

[Fig. 9] Experimental results of the conventional P&O method when irradiation changes from 30% to 100%

(a) Main waveforms, (b) Enlarged PV current waveform



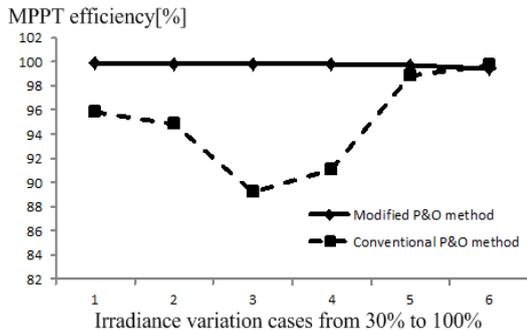
(a)



(b)

[Fig. 10] Experimental results of the modified P&O method when irradiation changes from 30% to 100%

(a) Main waveforms, (b) Enlarged PV current waveform



[Fig. 11] Experimental results of the modified P&O method

Fig. 10에서는 수정된 P&O 기법을 적용한 경우 상용 계통 전압, 전류, 태양광 인버터 출력 전압/전류, 그리고 태양광 어레이 시뮬레이터의 출력 전압/전류 파형을 보여주고 있다. 기존의 P&O 기법과는 달리 수정된 P&O 기법은 태양광 어레이 출력전류가 선형적으로 일사량과 같은 비율로 최대전력점을 추종하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 수정된 P&O 기법이 일사량 변동에 의한 전력 변동분과 MPPT 제어 명령에 의한 전력변동분을 분리하도록 전력을 계산 함으로써, 순수하게 MPPT 제어 명령에 의한 전력변동분만을 통해서 제어 명령이 발생시키기 때문이다.

이를 정량적으로 6개의 일사량 변동 군에 대해서, 식 (7)에 의해 최대전력 추종 효율을 계속해 보면 Fig. 11과 같이 나타난다. 모든 일사량 변동 군에 대해서, 기존의 P&O 기법은 평균 94% 정도의 추종 효율을 나타낸다. 하지만, 수정된 P&O 기법을 사용했을 경우에는, 이 6개의 일사량 변동 군에 대해서 모두 우수한 추종효율을 나타내고, 평균적으로 99%의 추종성능을 가짐을 확인하였다. 이와 같은 결과는 Fig. 5에서 나타난 기존의 P&O 기법의 제어주기 동안 일사량이 바뀌어 최대전력점이 바뀌었음에도 불구하고, 일사량이 바뀌기 전의 데이터를 바탕으로 제어 명령이 도출됨에 따라, 최대전력 추종에 실패하게 된다. 하지만 Fig. 6의 수정된 P&O 기법의 경우에는 동일한 제어 주기를 가지지만, 제어 명령 중간 지점에서 태양전지의 전압, 전류 데이터를 다시 한 번 계측함으로써 일사량이 변한 데이터가 반영되어 최대전력 추종을 성공적으로 수행하게 된다.

이와 같은 결과를 토대로, MPPT 제어 주기의 반주기 전력값을 계속함으로써, 일사량 변동에 따른 전력변동분을 상쇄하는 수정된 P&O 최대전력 추종 기법이 기존의 P&O 기법보다 우수한 성능을 나타냄을 확인 하였다.

6. 결론

본 논문에서는 대표적인 최대전력 추종 기법인 P&O 최대전력 추종 기법을 바탕으로 해서, 일사량이 변화하는 조건에서도 최대전력 추종 성능을 높일 수 있는 수정된 P&O 최대전력 제어 방법을 설계하였다. 설계된 최대전력 추종기법의 타당성을 검증하기 위해 250kW 태양광 인버터를 사용해서, 일사량이 변화하는 조건에서의 추종 효율을 기존의 P&O 기법과 비교하였다. 그 결과 수정된 P&O 기법은 일사량 변동에도 불구하고, 지속적으로 높은 추종 성능을 나타냄을 검증하였다.

References

- [1] T. Esmar, and P. L. Chapman “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22:439-449, 2007
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2006.874230>
- [2] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of perturb and observe maximum power point trackingmethod”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20:963 - 973, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2005.850975>
- [3] C. Hua and C. Shen, “Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system”. in *Proc. APEC*, 679-685, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APEC.1998.653972>
- [4] M. Soum, H. Dehbonei, and E. F. Fuchs, “Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power point tracking”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17:514-522, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2002.805205>
- [5] J.L., Agorreta, L. Reinaldos, R. Gonzalez, M. Borrega, J. Balda, and L. Marroyo, “Fuzzy switching technique applied to PWM boost converter operating in mixed conduction mode for PV systems”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56:4363-4373, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2019567>
- [6] L. Zhang, Y. Bai, and A. Al-Amoudi, “GA-RBF neural network based maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems”, in *Proc. Int. Conf. Power Electronics, Machines and Drives*, 18-23, 2002.

- DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/cp.20020083>
- [7] D. Sera, R. Teodorescu, J. Hantschel, and M. Knoll, "Optimized maximum power point tracker for fast-changing environmental conditions", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55:2629-2637, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2008.924036>
- [8] B.K. Bose, P.M. Szczesny and R.L. Steigerwald, "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 21:1182-1191, 1985.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.1985.349522>
- [9] H. Sugimoto and H. Dong, "A New Scheme For Maximum Photovoltaic Power Tracking Control", in *Proc. IEEE Power Conversion Conference*, 2:691-696, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PCCON.1997.638281>
- [10] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, "Maximum Photovoltaic Power Tracking: an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions", in *Proc IEE on Generation, Transmission, and Distribution*, 142: 59-64, 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/ip-gtd:19951577>
- [11] Hiren Patel, Vivek Agarwal, "Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions", *IEEE transaction on Industrial Electronics*, 55:1689-1698, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2008.917118>
- [12] T.Noguchi, S.Togashi and R.Nakamoto, "Short current pulse based maximum power point tracking method for multiple photovoltaic and converter module system", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49:217-223, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/41.982265>
- [13] European Standard EN50530, "Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters", 2010.

유 병 규(Byung-Gyu Yu)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한국과학기술원 전자전산학과 (석사)
- 2010년 3월 : 동경공예대학교 기전공학과 (박사)
- 2004년 7월 ~ 2012년 2월 : 한국에너지기술연구원 선임연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 전기전자제어공학부 조교수

<관심분야>
전기공학, 전력전자