

# Duty 제어와 전류 제어 방식의 MPPT 효율 비교

이재현, 조종민, 이재도, 차한주  
충남대학교 전기공학과

## Comparison of MPPT Efficiency between Duty - Cycle Control and Current Control

Jaehyun Lee, Jongmin Jo, Jaedo Lee, Hanju Cha  
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

### ABSTRACT

본 논문은 태양광발전 시스템에서 P&O 방식 기반의 제어 기법인 duty 제어와 전류 제어 방식의 최대전력점 추종특성을 동일모드 조건에서 비교하였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. Duty 제어 방식은 P V 특성곡선을 이용하여 전력과 전압의 변화량을 통해 duty 증감을 결정함으로써 동작점을 결정한다. 이와 달리, 전류 제어 방식은 P I 특성곡선을 이용하여 전력과 전류의 변화량을 통해 전류 지령치를 생성하고 비례 적분제어기를 통해 전류제어를 수행하여 동작점을 결정한다. 두 가지 제어 방식의 정확한 비교를 위해 등가의  $\Delta duty$  및  $\Delta I_{ref}$ 의 값을 선정하여 모드 변화에 따른  $\Delta V$ 의 변화를 동일하게 맞추었다. DC-DC 부스트 컨버터를 이용하여 시뮬레이션과 실험에 두 제어 방식의 태양광발전 시스템을 구성하여 태양광 전압과 전류, 에너지 측면에서 특성을 비교하였다. 최대 전력점이 1.7kW인 특성곡선 조건 하에서, 시뮬레이션과 실험의 결과로 두 방식은 동일 MPPT 모드 시 동일한 동작점에 존재하며, 같은 값의 전력을 출력하여 동일한 성능의 효율을 보임을 검증하였다.

### 1. 서론

최근, 국내에서는 환경오염으로 인해 화석연료 사용을 줄이고, 원자력 발전소의 위험성으로 원자력 발전소를 줄여야 한다는 목소리가 높아지고 있다. 이러한 국내 정서 가운데 정부는 2030년 까지 신재생에너지 발전 비중을 20%까지 증가시키는 신재생에너지 3020 계획을 발표하였다. 이중 태양광은 10GW 규모를 보급한다는 계획이다. 태양광 발전은 친환경적이고, 고갈되지 않는 에너지이며, 초기 설치 후 추가 비용이 적게 드는 장점을 가지고 있고, 많은 분야에서 다양하게 사용 가능하다. 그러나 태양광 시스템은 발전 효율이 낮다는 단점과 온도나 일사량에 의해 특성이 변화하므로, 빠르고 정확하게 최대 전력점을 추종하는 알고리즘이 반드시 필요하다. 최대 전력점을 추종하는 여러 알고리즘이 있지만, 대표적인 방식은 Perturbation and Observation(P&O) 방식과 Increment Conductance(IncCond) 방식<sup>[1]</sup>, Linear approximation(LA)<sup>[2]</sup> 방식이 있다. 그 중 P&O 방식은 간단하게 구현 가능하며, 빠른 응답성 등 많은 장점으로 인해 태양광 산업에서 많이 쓰이는 방식이다. 이 P&O 방식은 duty제어<sup>[3]</sup>와 전류제어<sup>[4]</sup> 방식이 많이 쓰이는데, 이 두 방식을 비교하는 연구는 없었으므로, 본

논문에서는 필요에 따라 두 제어 방식을 선택해 사용하도록 알고리즘의 특성을 비교하였다.

### 2. 듀티 제어와 전류제어

#### 2.1 태양광 시스템 구성

그림 1은 태양광 시스템의 구조로서 태양광 모듈, 부스트 컨버터, 3상 인버터, LCL 필터 및 계통으로 구성된다.  $V_{PV}$ 는 태양광 모듈의 출력전압을 나타내며,  $I_{PV}$ 는 태양광 모듈의 출력전류,  $V_{DC}$ 는 DC Link 전압,  $I_{inv}$ 는 인버터 출력전류이다. 태양광 시스템의 발전 범위를 확대하기 위해 부스트 컨버터를 사용하며, 태양광 모듈의 출력 전압을 낮추어야 하는 경우에는 벅 컨버터를 이용하여 전압을 낮추어 사용한다.

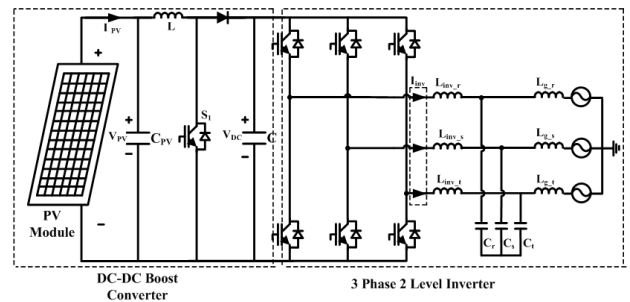


그림 1 태양광 시스템의 구성  
Fig. 1 The configuration of PV system

#### 2.2 Duty 제어

그림 2는 태양광 발전의 최대 전력점을 추종하기 위한 duty 제어 MPPT 알고리즘이다. Duty 제어 방식은 태양광 모듈에서 출력되는 전압과 전류를 측정 후 곱하여 전력을 계산하고, 이 전력의 현재 값과 과거 값을 비교 후, 전압의 현재 값과 과거 값을 비교하여 그림 3의 P V 특성곡선에서의 동작 위치를 파악한다. 초기 동작점은 개방 전압이며, 동작 점이 최대 전력점의 오른쪽에 위치하는 경우는 식 (1)과 같이 P V 특성곡선이 음의 기울기로 계산된다. 이 경우 duty를 증가시켜 전압을 감소시킨다. 기울기가 식 (2)와 같이 양의 값인 경우는 동작점이 최대 전력점의 왼쪽에 위치하는 것이므로, 이 경우는 duty를 감소시켜 전압을 증가시킨다. 이러한 과정을 반복하여 최대 전력점을 추종한다.

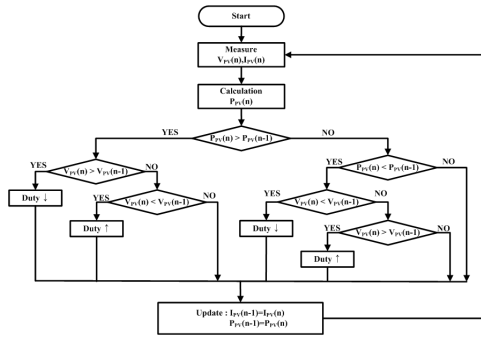


그림 2 P&O 방식을 이용한 duty 제어 MPPT 알고리즘  
Fig. 2 MPPT algorithm of duty control using P&O method

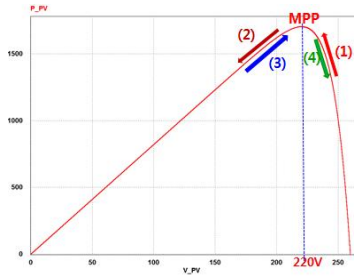


그림 3 P-V 특성곡선  
Fig. 3 P-V characteristic curve

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} < 0 \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta V_{pv}} > 0 \quad (2)$$

### 2.3 전류 제어

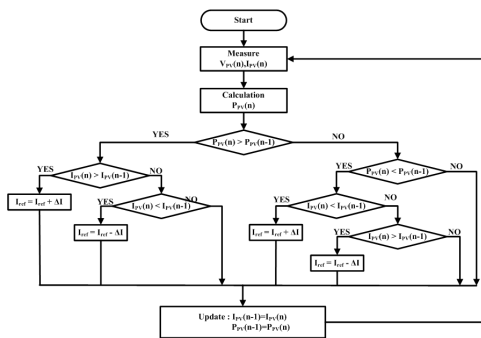


그림 4 P&O 방식을 이용한 전류 제어 MPPT 알고리즘  
Fig. 4 MPPT algorithm of current control using P&O method

그림 4는 태양광 발전의 최대 전력점을 추종하기 위한 전류 제어 MPPT 알고리즘이다. 전류 제어 방식은 태양광 모듈에서 출력되는 전압과 전류를 측정 후 곱하여 전력을 계산하고, 이 전력의 현재 값과 과거 값을 비교 후 전류의 현재 값과 과거 값을 비교하여 그림 5의 P I 특성곡선에서의 동작 위치를 파악한다. 초기 동작점은 0A이며, 동작 점이 최대 전력점의 왼쪽에 위치하는 경우는 식 (3)과 같이 P I 특성곡선이 양의 기울기로 계산된다. 이 경우 전류 지령치를 증가시켜 동작점을 오른쪽으로 이동시킨다. 기울기가 식 (4)와 같이 음의 값인 경우는 동작

점이 최대 전력점의 오른쪽에 위치하는 것이므로, 이 경우는 전류 지령치를 감소시켜 동작점을 왼쪽으로 이동시킨다.

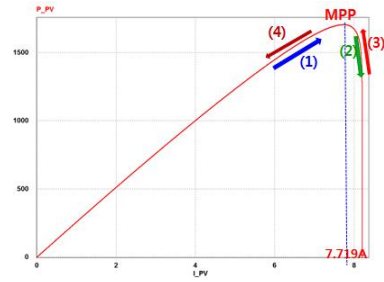


그림 5 P-I 특성곡선  
Fig. 5 P-I characteristic curve

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta I_{pv}} > 0 \quad (3)$$

$$\frac{\Delta P_{pv}}{\Delta I_{pv}} < 0 \quad (4)$$

### 3. Duty제어 방식과 전류제어 방식의 비교

그림 6은 duty 제어 방식과 전류 제어 MPPT 모드가 3에서 4로 변화 할 때를 비교한 그림으로 그림 6의 duty는 duty 제어 방식에서 태양광 모듈의 출력 전압을 제어하기 위해 부스트 컨버터를 제어하는 duty 이며,  $\Delta duty$ 의 크기로 변화한다.  $I_{ref}$ 는 전류 제어 방식에서 부스트 컨버터에 흐르는 전류를 제어하는 전류 지령치 이며, 모드변화 시 PV 전류를  $\Delta I$  만큼 변화시켜 PV 전압을 변화시킨다.  $V_{PV}$ 는 PV 전압,  $E_{Duty}$ 는 duty 제어 방식의 출력에 대한 에너지 값을 나타내며,  $E_{Current}$ 는 전류 제어 방식의 출력에 대한 에너지 값을 나타낸다. 두 제어 방식의 PV 전압 측면에서 비교하면, 그림 6의 duty 제어 방식의 경우  $\Delta duty$  만큼 증가 시 PV 전압은 빠르게 수직의 형태로 감소하는 것을 볼 수 있으나, 전류 제어 방식의 경우 PV 전압 측면에서 비교하면, 전류 지령치( $I_{ref}$ )를  $\Delta I$  증가 시, PI 제어기의 존재로 PV 전압이 느리게 감소하는 것을 볼 수 있다. 순시전력 적산 값인  $E_{Duty}$ 와  $E_{Current}$ 는 MPPT 1개 모드의 주기 동안 PV 전압과 전류의 곱으로 계산된 순시전력을 적산하며, 식 (5)와 (6)으로 표현된다.  $E_{Duty}$ 와  $E_{Current}$ 는 다른 MPPT 모드가 시작되면, 0으로 재설정되어 적산을 시작한다.

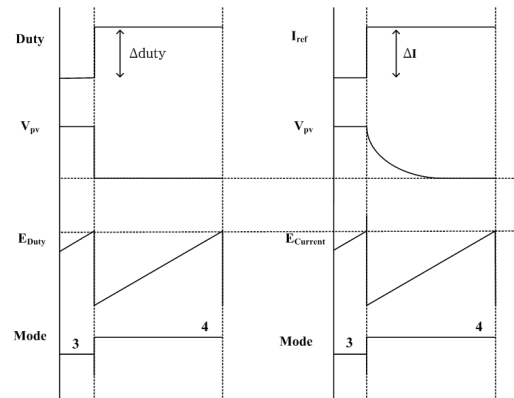


그림 6 Duty 제어 방식과 전류제어 방식의 비교  
Fig. 6 Comparison of Duty - Cycle Control and Current Control

MPPT 모드가 끝났을 때의  $E_{Duty}$ 와  $E_{Current}$ 를 비교해 보면 동일한 값을 확인 할 수 있으며, 이는 두 제어기의 정상상태 도달 시간이 순시전력과 에너지 측면에서 영향을 주지 않음을 의미한다.

$$E_{Duty} = \int_0^{MPPT_T} v_{PV} \cdot i_{PV} dt \quad (5)$$

$$E_{Current} = \int_0^{MPPT_T} v_{PV} \cdot i_{PV} dt \quad (6)$$

#### 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 7은 PV 특성곡선의 최대 전력점인 1.7[kW]인 조건에서 duty 제어와 전류 제어 방식의 MPPT 알고리즘을 비교하는 실험을 수행하는 하드웨어 구성이며, 표 1은 태양광 모듈 및 부스트 컨버터의 시스템 파라미터를 나타낸다.

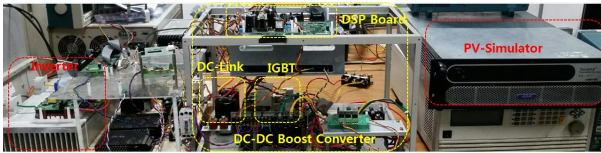


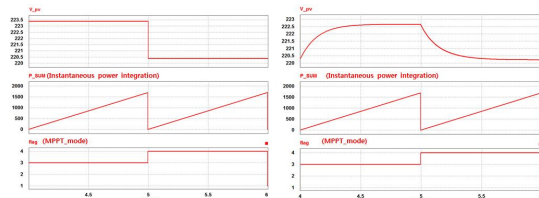
그림 7 하드웨어 구성  
Fig. 7 Hardware configuration

표 1 태양광 모듈 및 부스트 컨버터 파라미터  
Table 1 PV module and boost converter parameter

태양광 모듈 파라미터	
최대전력( $P_{max}$ )	1.708kW
개방전압( $V_{oc}$ )	260V
단락전류( $I_{sc}$ )	8.21A
정격전압( $V_{mp}$ )	220V
정격전류( $I_{mp}$ )	7.719A
부스트 컨버터 파라미터	
인덕터(L)	2mH
PV 커패시터( $C_{PV}$ )	5000uF

#### 4.1 시뮬레이션 결과

그림 6은 Duty 제어 방식과 전류 제어 방식의 PSIM 시뮬레이션 결과로 동일한 모드 변화(3→4)에서 시뮬레이션 결과파형으로



(a) Duty 제어 방식 (b) 전류 제어 방식

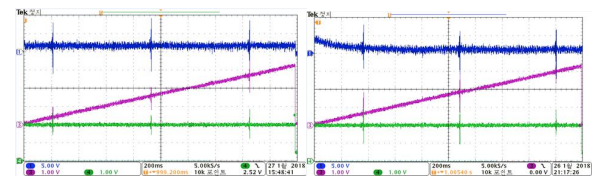
그림 8 시뮬레이션 결과  
Fig. 8 Simulation results

모드가 바뀔 때 duty 제어와 전류 제어 방식의 PV 전압과 순시 전력의 적산 값을 보여준다. 시뮬레이션의 MPPT 모드 주기는 1초로 순시전력 적산 값은 duty 제어 방식의 MPPT의 경우 1.7045[kWs]이고, 전류 제어 방식의 MPPT의 경우 1.7027[kWs]이

다. 두 제어기의 순시 전력 적산 값의 차이는 18[W]인데 duty 제어 방식과 전류 제어 방식의 MPPT 알고리즘이 동일한 성능으로 특성곡선의 최대 전력을 이용함을 나타낸다.

#### 4.2 실험 결과

그림 7은 duty 제어 방식의 실험결과와 전류 제어 방식 실험 결과 파형이며, 두 방법 모두 동일한 모드 변화(3→4)에서의 결과 파형으로 모드가 바뀔 때 PV 전압과 순시전력의 적산 결과이다. 실험에서 MPPT 모드의 주기는 2초로 설정하였으며, 순시 전력 적산 값은 duty 제어 방식은 3.22[kWs], 전류 제어 방식은 3.24[kWs]로 측정되어 두 제어기의 순시 전력 적산 값의 차이는 20[W]로 계산되었다. 이것 결과는 duty 제어 방식과 전류 제어 방식의 MPPT 알고리즘이 동일한 성능으로 특성곡선의 최대 전력을 이용함을 나타낸다.



(a) Duty 제어 방식 (b) 전류 제어 방식

그림 9 실험 결과  
Fig. 9 Experimental results

### 3. 결론

본 논문에서는 duty 제어 방식 및 전류 제어 방식 MPPT의 특성을 P V 및 P I 곡선을 통해 조사하고 최대 전력점을 추종하는 제어 관점에서 두 가지 방식 간의 성능을 비교하였다. 부스트 컨버터를 이용하여 시뮬레이션과 실험에 두 제어 방식의 태양광발전 시스템을 구성하여 태양광 전압, 에너지 측면에서 특성을 비교하여, 최대 전력점인 1.7kW인 특성곡선 조건 하에서, 시뮬레이션과 실험의 결과로 두 방식은 동일 MPPT 모드 시 같은 값의 전력을 출력하여 동일한 성능의 효율을 보임을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] 심재희, 양승대, 정승환, 최주엽, 최익, 안진웅, 이동하. (2011). 태양광 발전시스템의 MPPT 알고리즘 분석. 한국태양에너지학회 논문집, 31(2), 16-21.
- [2] 김수빈, 조영민, 김형진, 송승호, 최주엽, 최익, 이영권. (2015). 태양광 발전시스템의 새로운 하이브리드 MPPT. 한국태양에너지학회 논문집, 35(2), 43-52.
- [3] M. K. S Samanta, "Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems" IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 62, no. 9, pp.5549-5559, Feb. 2015.
- [4] S. K. Kollimalla, M. K Mishra, "A Novel Adaptive P&O MPPT Algorithm Considering Sudden Changes in the Irradiance" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 29, no. 3, pp. 602-610, May 2014.