

태양광 MPPT와 연계한 배터리 충전 전력제한 알고리즘 연구

서주형, 토포페펀, 최성진
울산대학교 전기전자컴퓨터공학과

Power Curtailment Algorithm for Battery Charging under MPPT Operation of Stand-Alone PV Generation

Ju-Hyeong Seo, Tofopefun Nifise Olayiwola, Sung-Jin Choi

Department of Electrical, Electronic, and Computer Engineering, University of Ulsan
Ulsan, 44610, South Korea

ABSTRACT

독립형 태양광(PV) 발전 시스템이 증가함에 따라 부하 전력에 비해 초과 공급 전력을 저장해야 한다. 이로 인해 배터리 에너지 저장 시스템(BESS)의 역할이 중요해지고 있다. 이러한 문제에 대응하기 위해 본 논문은 기존의 P&O MPPT 및 슬라이딩 모드 제어 기법을 기반으로 한 새로운 컨버터 제어 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 환경 및 부하 조건 변화에 관계없이 지속적으로 최대 전력을 추출하고, 상황에 따라 초과하는 전력의 흐름을 적절히 제한한다. MATLAB/Simulink를 통해 수행된 예비 실험 결과, 이 알고리즘이 태양광 패널의 전력을 제한하고 전압과 전류의 리플을 감소시켜 배터리의 안정성과 수명을 연장하는 데 기여할 수 있음을 검증하였다.

1. 서론

전세계적으로 재생 가능한 에너지원 사용이 증가함에 따라 태양광 패널에 대한 수요도 늘어나고 있다.^[1] 태양광 패널은 가격이 크게 하락하였고, 이 패널들은 DC 전력을 생산하지만 안정적이지 않다. 따라서 불안정한 전력으로 인하여 독립형 태양광 패널은 배터리 에너지 저장장치를 사용한다.^[2] 하지만 태양광 패널은 배터리 시스템이 받아들일 수 있는 전력보다 더 많은 전력을 발전시킬 수 있고, 배터리의 과충전으로 이어져 화재나 폭발과 같은 위험한 상황을 초래할 수 있어 전체 시스템의 안전 및 수명에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.^[3] 이에 따라, 본 연구는 기존의 p&o mppt 방법과 슬라이딩 모드 제어 기법을 결합한 새로운 컨버터 제어 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 태양광 패널의 최대 전력을 지속적으로 추출하면서 필요에 따라 BESS로의 초과 전력 흐름을 제한하는 기능을 수행함으로써 전체 시스템의 안정성을 개선하는 것을 목표로 한다. MATLAB/Simulink를 활용한 모의 실험 결과, 제안된 알고리즘은 전력을 제한하여 독립 태양광 발전 시스템의 안정성에 기여함을 확인할 수 있다.

2. 제안하는 방법

2.1 블록 구성도

본 논문에서 사용된 시스템 구성은 그림1과 같다. 벅 컨버터의 입력측에는 65W급 태양광 패널(BP365)^[4]이 연결이 되어있고, 출력측에는 18650 리튬이온 배터리 2개가 직렬로 연결이 되어있다. 컨트롤러는 MPPT 알고리즘을 위해서 태양광 패널에서 전압(v_{PV})과 전류(i_{PV})와 슬라이딩 모드 컨트롤^[5]을 위

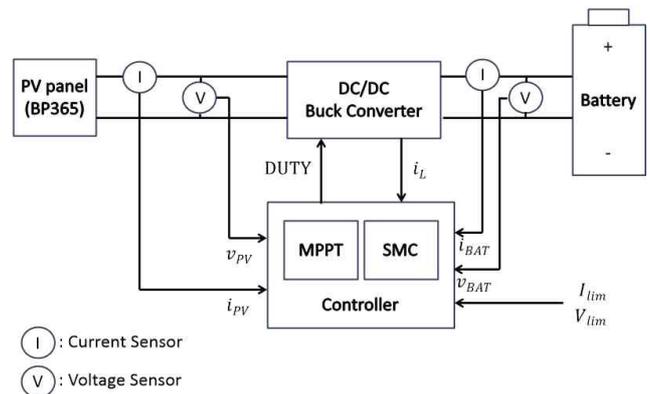


그림 1 전체 시스템 블록도

해서 벅 컨버터의 인덕터 전류 i_L , 리튬이온 배터리로 들어가는 i_{BAT} , 전압제한치 V_{lim} 와 전류제한치 I_{lim} 가 들어가게 된다. 커패시터 전류 i_C 는 $i_L - i_{BAT}$ 로 계산이 된다. 이후 컨트롤러에서는 벅 컨버터의 제어를 위해 DUTY를 조절한다.

2.2 제안하는 알고리즘

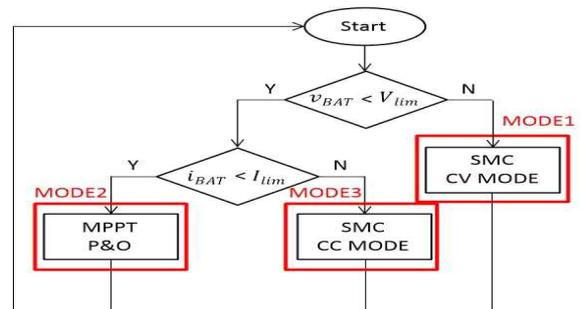


그림 2 제안하는 알고리즘 순서도

그림2는 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 순서도이다. 제안하는 알고리즘은 크게 세 가지 모드로 동작한다. 모드1은 $v_{BAT} > V_{lim}$ 인 경우로 배터리에 인가되는 전압이 한계치를 초과하였기 때문에 슬라이딩 모드 컨트롤을 통하여 $v_{BAT} = V_{lim}$ 로 만들어준다. 모드2와 모드3은 배터리 충전전류 I_{BAT} 에 따라 동작한다. 모드2는 $I_{BAT} < I_{lim}$ 인 경우로 배터

리 충전 전압과 전류가 제한전압과 전류보다 적은 상황에서는 MPPT 알고리즘을 통하여 최대전력으로 배터리를 충전시킨다. 모드3는 $I_{BAT} > I_{lim}$ 인 경우로 기준치 전류보다 더 높은 전류가 배터리로 들어가면 위험하기 때문에 슬라이딩 모드 컨트롤을 통하여 $I_{BAT} = I_{lim}$ 로 만들어준다. 따라서 배터리를 정전류로 안정적으로 충전할 수 있도록 한다.

3. 시뮬레이션 결과

표 1. 배터리로 인가되는 전력

일사량 (W/m ²)	Battery Power (P&O) [W]	Battery Power (P&O+Hysteresis) [W]	Battery Power (P&O+SMC) [W]
100	5.0	5.0	5.0
300	16.4	16.4	16.4
700	36.7	14.6	16.0
1000	47.9	9.7	10.5

시뮬레이션은 Texas Instruments에서 제작된 BQ24650 백 컨버터용 IC에 사용되는 알고리즘과 비교되었다. 이 알고리즘은 배터리 충전 전압이 낮을 때는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 알고리즘으로 동작하며, 충전 전압이 설정 값을 초과하면 컨버터의 동작을 중지시킨다. 또한, 히스테리시스 제어기가 추가되어 배터리 충전 전압이 임계값 아래로 떨어지면 다시 MPPT 동작을 수행한다^[6]. 표 1은 일사량을 100, 300, 700, 1000으로 인가했을 때, 각 알고리즘에 의해 배터리에 인가되는 전력을 나타낸 것이다. P&O 알고리즘에 비해 제안된 알고리즘과 히스테리시스 컨트롤 알고리즘은 전력이 제한이 되어 배터리에 공급된다. 그림3은 표1의 일사량을 조건에서 V_{lim} 의 값을 8.12V로 설정했을 때, MPPT, 히스테리시스 제어, 제안된 방법을 각각 비교한 배터리 충전 전압과 전류 파형이다. 그림 3(a)는 배터리 충전 전압 파형과 확대한 파형을 보여준다. 히스테리시스 제어는 MPPT 동작을 수행하다가 V_{lim} 에 도달하면 컨버터의 동작을 멈추고, 전압이 감소하면 다시 MPPT 동작을 수행한다. 이는 제안된 방법에 비해 더 많은 리플을 생성하며, 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 충전 전류의 리플도 커지는 것을 알 수 있다. 그림 4는 태양광 패널의 출력 전력 파형을 나타낸다. 기존의 P&O MPPT 알고리즘과 히스테리시스 제어, 제안된 알고리즘을 비교하여 전력이 제한되는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서 제안된 시스템은 MATLAB/Simulink를 활용하여 시뮬레이션 되었다. 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘은 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 알고리즘과 SMC(Sliding Mode Control) 알고리즘을 선택적으로 구동할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 전력 제한이 가능함을 확인할 수 있다. 또한, 기존 알고리즘에 비해 전압과 전류의 리플이 줄어들어 더 안정적인 전압과 전류를 배터리에 공급할 수 있음을 보였다. 이는 배터리의 안정성과 수명을 연장하는 데 기여한다.

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-003)의 결과물입니다.

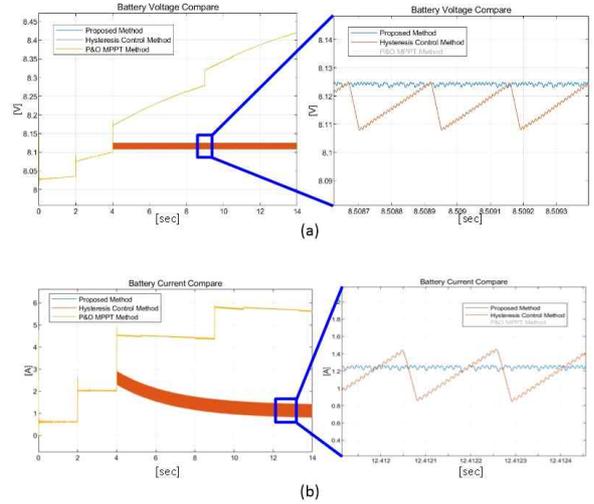


그림 3. 배터리 충전 전압과 전류 파형 (a) 배터리 충전 전압 파형 (b) 배터리 충전 전류 파형

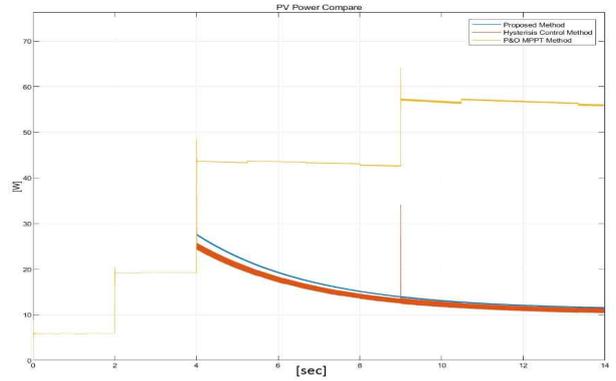


그림 4. 태양광 패널 출력 전력 비교 파형

참고 문헌

- [1] Olayiwola, T.N, Hyun, S.-H, Choi, S.-J. "Photovoltaic Modeling: A Comprehensive Analysis of the I - V Characteristic Curve." Sustainability 2024, 16, 432.
- [2] H. Hasabelrasul, Z. Cai, L. Sun, X. Suo and I. Matraji, "Two-Stage Converter Standalone PV-Battery System Based on VSG Control," in IEEE Access, vol. 10, pp. 39825-39832, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3165664.
- [3] C. Wu, J. Sun, C. Zhu, Y. Ge and Y. Zhao, "Research on Overcharge and Overdischarge Effect on Lithium-Ion Batteries," 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 1-6
- [4] bp solar. (2004). bp365. www.bpsolar.com.
- [5] Siew-Chong Tan, Y. M. Lai and C. K. Tse, "A unified approach to the design of PWM-based sliding-mode voltage controllers for basic DC-DC converters in continuous conduction mode," in IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 53, no. 8, pp. 1816-1827, Aug. 2006, doi: 10.1109/TCSI.2006.879052.
- [6] F. S. Bagci, K. A. Kim, Y. -C. Liu and Y. -H. Liu, "Evaluation of Power Maximization and Curtailment Control Methods for Converters in Wearable Photovoltaic Energy Harvesting Applications," in IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 3, pp. 508-520, 2022, doi: 10.1109/OJPEL.2022.3194185.

태양광 MPPT와 연계한 배터리 충전 전력제한 알고리즘 연구

Ju Hyeong Seo* Tofopefun Nifise Olayiwola* and Sung-Jin Choi**

*3342chris@gmail.com *tofopefungraduate@gmail.com **sjchoi@ulsan.ac.kr

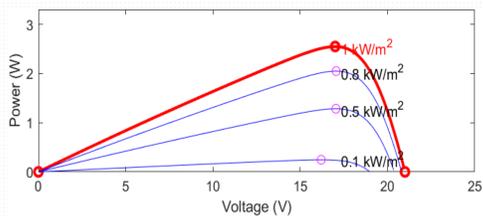
Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 44610, South Korea

1. 요약

- ❖ 독립형 태양광(PV) 발전 시스템이 증가함에 따라 부하 전력에 비해 초과 공급 전력을 저장해야 함
- ❖ 이로 인해 배터리 에너지 저장 시스템(BESS)의 역할이 중요해지고 있음
- ❖ 태양광 패널의 생산전력이 배터리가 수용할 수 있는 전력을 초과하는 경우 **전력 제한이 필요**
- ❖ 본 논문은 기존의 P&O MPPT 및 슬라이딩 모드 제어 기법을 기반으로 한 **새로운 컨버터 제어 알고리즘을 제안**
- ❖ **환경 및 부하 조건 변화에 관계없이** 지속적으로 최대 전력을 추출하고, **상황에 따라 초과하는 전력의 흐름을 적절히 제한**
- ❖ MATLAB/Simulink를 통해 이 알고리즘이 태양광 패널의 전력을 제한하고 전압과 전류의 **리플을 감소시켜 배터리의 안정성과 수명을 연장**하는데 기여할 수 있음을 검증

2. 제안하는 알고리즘

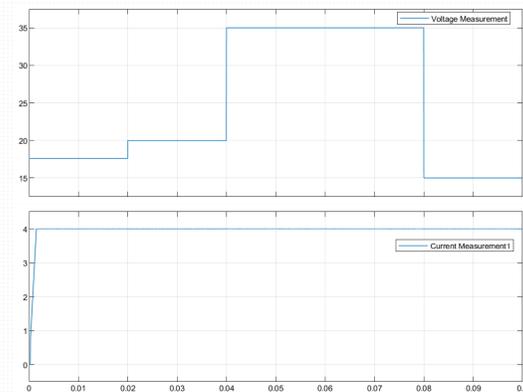
- ❖ MPPT (Maximum Power Point Tracking) 알고리즘



태양광 패널 주변 환경에 따라 특성 곡선이 변하므로 MPPT 알고리즘을 사용하여 **항상 최대 전력 지점**을 찾아 시스템의 효율을 향상 시켜야함.

그림 1. 태양광 특성 곡선

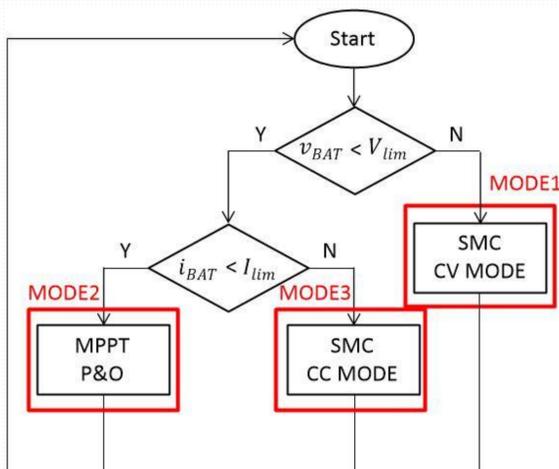
- ❖ SMC (Sliding Mode Control) 알고리즘



외란에 강한 강인(Robust) 제어를 사용하여 **다양한 입력값에도 원하는 출력을 유지**

그림 2. Sliding Mode Control 알고리즘 시뮬레이션 파형

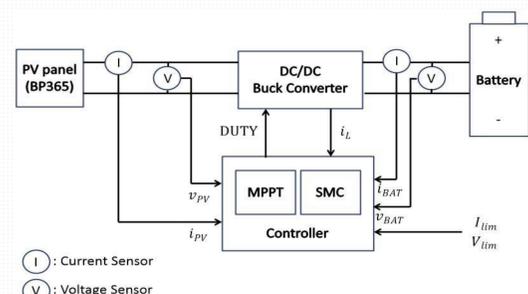
- ❖ 제안하는 알고리즘



배터리로 인가되는 전압, 전류의 값에 따라 크게 **3가지 모드**로 동작

- MODE1 : CV MODE
- MODE2 : MPPT(P&O) MODE
- MODE3 : CC MODE

그림 3. 제안하는 알고리즘 순서도



- 벽 컨버터와 제어기로 구성
- 벽 컨버터 입력단
 - 65W급 태양광 패널(BP365)
 - 전압, 전류 센서
- 벽 컨버터 출력단
 - 18650 리튬이온 배터리(2-series)
 - 전압, 전류 센서

그림 4. 전체 시스템 블럭도

4. 시뮬레이션 결과

- ❖ Texas Instruments에서 제작된 BQ24650 벽 컨버터용 IC에 사용되는 알고리즘 과 비교

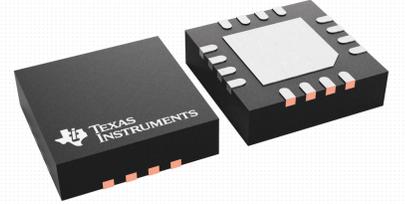


그림 5. Texas Instruments사의 BQ24650

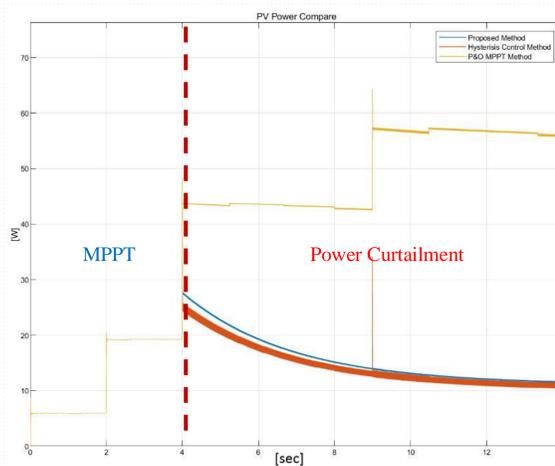
- 배터리 충전 전압이 낮을 때는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 알고리즘 사용
- 충전 전압이 설정 값을 초과하면 컨버터의 동작을 중지하고 배터리 충전 전압이 임계값 아래로 떨어지면 다시 MPPT 동작을 수행하는 **히스테리시스 제어** 사용

- ❖ 시뮬레이션 결과

표 1. 배터리로 인가되는 전력

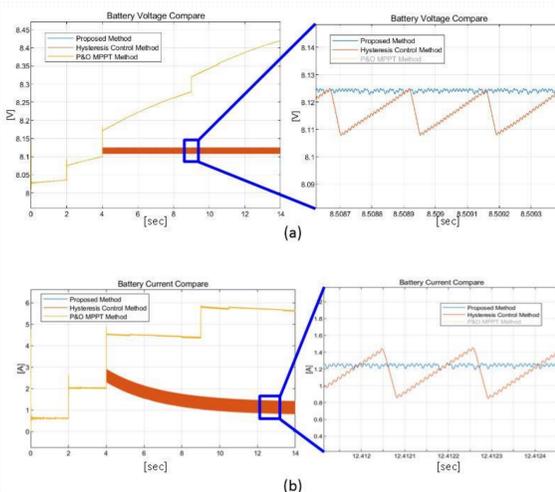
일사량 (W/m ²)	Battery Power (P&O) [W]	Battery Power (P&O+Hysteresis) [W]	Battery Power (P&O+SMC) [W]
100	5.0	5.0	5.0
300	16.4	16.4	16.4
700	36.7	14.6	16.0
1000	47.9	9.7	10.5

 : MPPT P&O Algorithm
 : Power Curtailment



단독으로 사용된 MPPT P&O 알고리즘에 비해 제안된 알고리즘과 히스테리시스 컨트롤 알고리즘은 **전력이 제한**

그림 6. 태양광 패널 출력 전력 비교파형



Model 상황을 가정

- 배터리의 전압이 설정한 전압값에 도달한 후 유지가 되고 이에 따라 전류가 감소
- 제안하는 알고리즘의 전압과 전류의 리플이 더 적음

그림 7. 배터리 충전 전압과 전류 파형 (a) 배터리 충전 전압 파형 (b) 배터리 충전 전류 파형

5. 결론

- ❖ 제안된 알고리즘은 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 알고리즘과 SMC(Sliding Mode Control) 알고리즘을 **선택적으로 구동**할 수 있고 이를 통해 **전력 제한이 가능**
- ❖ 기존 알고리즘에 비해 **전압과 전류의 리플이 줄어들어** 더 안정적인 전압과 전류를 배터리에 공급할 수 있으므로 **배터리의 안정성과 수명을 연장**하는 데 기여