

DC-DC 전압 레귤레이터를 이용한 태양광전원의 효율향상 방안 에 관한 연구

태동현, 박재범, 김미영, 최성식, 김찬혁, 노대석*
한국기술교육대 전기전자통신공학부

A Study on the Efficiency Improvement Method of Photovoltaic System Using DC-DC Voltage Regulator

Donghyun Tae, Jaebum Park, Miyoung Kim, Sungsik Choi,
Chanhyeok Kim, Daeseok Rho*

Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology & Education

요약 최근, 전 세계적으로 신재생에너지에 대한 관심이 증가됨에 따라 친환경적이고 무한한 태양에너지를 이용하는 태양광전원의 설치가 급증하고 있다. 이러한 태양광전원은 주변 환경에 따라 출력이 크게 좌우되는데, 예를 들어 구름 또는 건물의 음영으로 인한 일부 모듈의 문제로 인해서 해당 스트링이 출력을 발생하지 못할 수 있다. 즉 기존의 제어방식에서는 모듈이 직렬로 연결된 스트링이 인버터에 연계되어 있으므로, 일부 모듈에 음영이 발생할 경우 스트링의 전압이 인버터의 동작전압 미만으로 되어 해당 스트링이 인버터에서 탈락되는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 각각의 스트링마다 전압을 제어하는 DC-DC 전압 레귤레이터를 이용하여, 스트링이 인버터에서 탈락되는 문제점을 개선하는 새로운 태양광전원 제어방식을 제안하였다. 또한, 회로해석 상용 프로그램인 PSIM S/W를 이용하여, 정전압 제어 및 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어기능을 가지는 DC-DC 전압 레귤레이터와 위상동기루프(PLL, Phase-Locked Loop) 제어 기반의 3상 인버터의 모델링을 수행하였다. 이 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 부분적으로 음영이 발생하는 모듈을 가진 스트링이 인버터에서 탈락하는 현상을 개선함으로써 태양광전원의 운용효율이 향상됨을 확인하였다.

Abstract Recently, the installation of photovoltaic (PV) systems has been increasing due to the worldwide interest in eco-friendly and infinitely abundant solar energy. However, the output power of PV systems is highly influenced by the surrounding environment. For instance, a string of PV systems composed of modules in series may become inoperable under cloudy conditions or when in the shade of a building. In other words, under these conditions, the existing control method of PV systems does not allow the string to be operated in the normal way, because its output voltage is lower than the operating range of the grid connected inverter. In order to overcome this problem, we propose a new control method using a DC-DC voltage regulator which can compensate for the voltage of each string in the PV system. Also, based on the PSIM S/W, we model the DC-DC voltage regulator with constant voltage control & MPPT (Maximum Power Point Tracking) control functions and 3-Phase grid connected inverter with PLL (Phase-Locked Loop) control function. From the simulation results, it is confirmed that the present control method can improve the operating efficiency of PV systems by compensating for the fluctuation of the voltage of the strings caused by the surrounding conditions.

Keywords : Constant Voltage Control, DC-DC Voltage Regulator, Maximum Power Point Tracking, Photovoltaic System, 3-Phase Inverter

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20163010012310)

*Corresponding Author : Daeseok Rho(Koreatech)

Tel: +82-41-560-1167 email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received April 15, 2016

Revised (1st July 1, 2016, 2nd July 6, 2016)

Accepted July 7, 2016

Published July 31, 2016

1. 서론

최근 에너지 고갈과 환경오염 문제로 인하여, 재생 가능하고 환경오염을 유발하지 않는 대체에너지에 대한 관심이 증가되고 있다. 특히, 태양광발전이 주목받고 있으며, New Energy Finance에 의하면 전 세계적으로 2013~2030년까지 약 1.5[TW]의 태양광전원이 신규로 설치될 전망이다[1,7-10].

이러한 태양광전원은 주변 환경에 따라서 출력이 크게 좌우되는데, 예를 들어 구름 또는 건물로 인하여 일부 모듈에만 음영이 발생하여도 태양광전원 전체적인 운용효율이 상당히 저하되는 문제점이 발생되고 있다. 즉, 기존의 태양광전원 제어방식에서는 스트링(다수 모듈의 직렬 연결로 구성)이 인버터에 연결되므로, 일부 모듈에 음영이 발생하면 해당 스트링의 전압이 인버터의 동작전압 미만으로 되어서, 해당 스트링 전체가 인버터에서 탈락하게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 각각의 스트링마다 DC-DC 전압 레귤레이터를 추가하여 스트링의 전압이 감소하더라도, 운용효율을 향상시키는 새로운 태양광전원 제어방식을 제안하였다. 이 제어방식은 MPPT(Maximum Power Point Tracking)와 정전압 제어 기능을 가지는 DC-DC 전압 레귤레이터와 위상동기 루프(PLL, Phase-Locked Loop) 제어 기능을 가지는 인버터로 구성된다. 또한 회로해석 상용 프로그램인 PSIM S/W를 이용하여, 제안한 태양광전원 제어방식을 모델링하고 시뮬레이션을 수행한 결과, 기존의 방식에서는 음영으로 인해 스트링이 인버터에서 탈락되는 반면, 제안한 방식에서는 부분적으로 음영이 발생된 모듈을 가진 스트링이 인버터에서 탈락되지 않아서 태양광전원의 운용효율이 상당히 향상됨을 확인하였다.

2. 태양광전원의 운용효율 향상을 위한 최적제어방식

2.1 기존의 태양광전원 제어방식

일반적으로, 다수 모듈(Module)이 직렬로 연결되어 1개의 스트링(String)을 구성하고, 스트링 여러 개가 병렬로 연결되어 태양광전원을 구성한다. 기존의 태양광전원 제어방식은 Fig. 1과 같이 스트링 여러 개가 3상 인버터(3-Phase Inverter)에 연결되어 운용되고 있다. 그러므로

모듈에 발생된 음영에 의하여 해당 스트링의 전압이 감소하면, 바이패스 다이오드(Diode)에 의하여 해당 스트링이 인버터에서 탈락되어 태양광전원 전체적인 운용효율이 저하하게 된다.

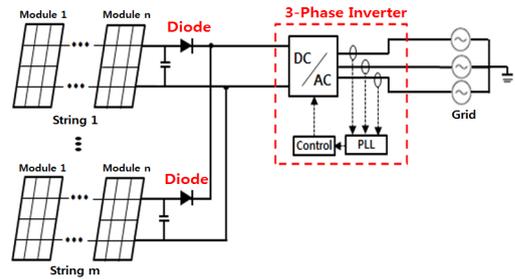


Fig. 1. Concept for existing control method

2.2 제안된 태양광전원 제어방식

기존 태양광 제어방식의 운용효율 저하를 개선하기 위하여, 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 각 스트링별로 DC-DC 전압 레귤레이터(DC-DC Voltage Regulator)를 기존 제어방식에 추가하는 새로운 태양광전원 제어방식을 제안한다. 이 제어방식은 전압 레귤레이터와 계통연계 인버터로 구성되며, 전자는 MPPT 제어기능과 정전압 제어기능을 수행하고, 후자는 전류제어 기능과 PLL 제어기능을 수행한다.

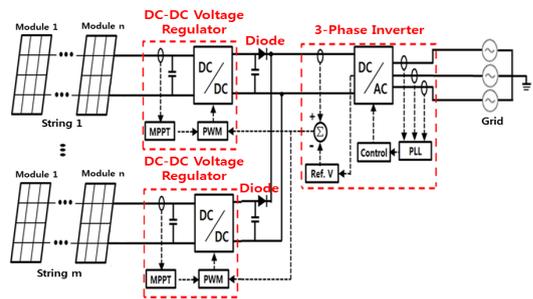


Fig. 2. Concept for proposed control method

2.2.1 DC-DC 전압 레귤레이터의 MPPT 제어

DC-DC 전압 레귤레이터의 MPPT란 태양광 모듈의 출력이 최대인 점(최적 동작점)을 추적하는 제어를 말한다. MPPT 제어방식으로는 일반적으로 P&O(Perturbation & Observation)방식, IncCond (Incremental Conductance) 방식, 미분요소 제어방식 등이 사용되고 있다. 본 논문에서

서는 가장 많이 사용되고 있는 P&O 방식을 전압 레귤레이터의 출력 제어방식에 적용한다. 이 제어방식은 Fig. 3 과 같이 기준전압(V_{ref})에 전압변동분을 가감하고, 이전 전력값과 현재 전력값을 비교함으로써 최대전력출력점을 추종한다[2-4]. Fig. 3에서 $V(t)$, $I(t)$, $P(t)$ 는 각각 현재의 스트링 전압, 전류, 전력을 의미하며, Δt 는 측정 시간 간격을 나타낸다.

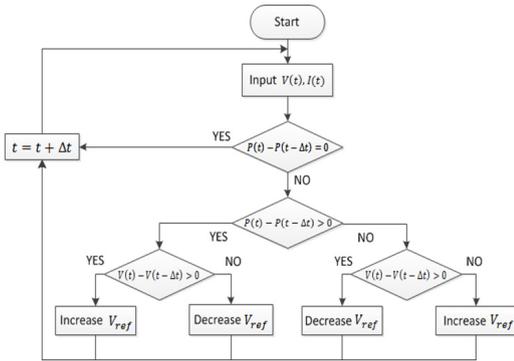


Fig. 3. P&O algorithm for MPPT control

2.2.2 DC-DC 전압 레귤레이터의 정전압 제어

DC-DC 전압 레귤레이터는 스트링의 전압(입력)을 목표전압(출력)으로 유지시키는 정전압 제어를 수행하며, 구체적인 제어 알고리즘은 다음과 같다.

[STEP 1] 전압 레귤레이터의 목표로 하는 출력전압 (V_{target})을 설정하고, 목표값과 현재 출력전압($V_o(t)$)을 비교하여 오차분이 허용범위 이내이면, 정전압 제어가 정상적으로 이루어진다고 판단하여 기존의 듀티비(Duty ratio)를 유지한다.

[STEP 2] 목표값과 현재 출력전압을 비교하여 오차분이 허용범위를 벗어나면, 오차분에 대한 PI 제어를 수행한다. 여기서, 목표전압과 전압 레귤레이터의 출력전압 사이의 오차분은 식 (1)과 같고, 오차분에 대하여 PI 제어를 수행한 것은 식 (2)와 같다.

$$e_V(t) = V_{target} - V_o(t) \quad (1)$$

$$PI(t) = K_p e_V(t) + K_i \int_0^t e_V(\tau) d\tau \quad (2)$$

여기서, e_V : 전압 오차분[V], V_{target} : 전압 레귤레이터의 목표 출력전압[V], V_o : 전압 레귤레이터의 출력전압

[V], K_p : 전압 오차분에 대한 비례적분 제어 계산값, K_i : 비례이득, K_i : 적분이득, t : 시간

[STEP 3] STEP 2에서 출력된 신호는 삼각파와 비교되어 듀티비가 결정되고, MOSFET 소자에 인가되어 전압 레귤레이터의 출력전압이 결정된다.

상기의 알고리즘을 플로우차트로 나타내면 Fig. 4와 같다.

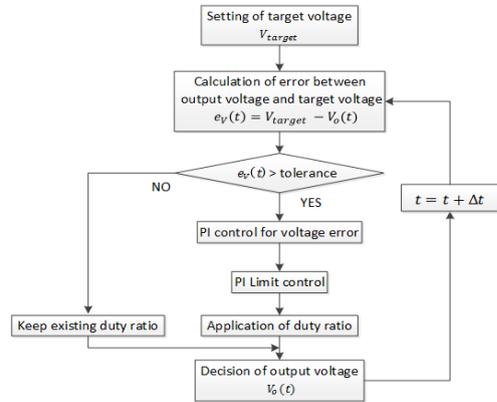


Fig. 4. Constant voltage control algorithm

2.2.3 DC-DC 전압 레귤레이터의 안정화 회로

안정화 회로는 DC-DC 전압 레귤레이터에서 승압된 전압 유지와 출력전압 리플의 감소를 위해서 필요하다. 즉, 안정화 회로는 정상적인 동작을 위한 적정 리액턴스 및 커패시턴스 용량을 산정하는 것이다. 먼저, 전압 레귤레이터의 승압제어는 인덕터에 에너지를 저장시키거나 방출시키는 MOSFET 스위칭 동작을 통하여 이루어진다. 승압된 전압의 유지를 위해서 인덕터의 최소전류가 0보다 커야한다는 조건에 의하여 인덕터의 최소용량은 식 (3)과 같다. 또한 목표 출력 리플전압(ΔV_{out}) 범위를 유지하기 위한 적정 커패시터의 용량은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{min} > \frac{R}{2} \times (1-D)^2 DT \quad (3)$$

$$C = \frac{V_{in}}{(1-D)R \times \Delta V_{out}} \times DT \quad (4)$$

여기서, L_{min} : 인덕터의 최소용량[H], R : 부하저항[Ω], D : 듀티비, T : 스위칭 주기[s], C : 커패시터의 용량

[F], V_{in} : 전압 레귤레이터의 입력전압[V], ΔV_{out} : 전압 레귤레이터의 출력 리플전압[V]

2.2.4 인버터의 PLL 제어

일사량 변동이나 태양광 모듈의 탈락 등으로 인해 입력되는 전압 및 전류가 변동되더라도, 인버터는 PLL 제어를 통해 계통의 위상을 정확하게 추종한다. 먼저, 3상 선간전압을 상전압으로 변환하고 2상 동기좌표계로 변환한 d축 및 q축 전압은 식 (5)와 (6)과 같다. d축 전압에 케환신호 $-\sin\theta_s$ 를 곱하고 q축 전압에 케환신호 $\cos\theta_s$ 를 각각 곱한 후 계산된 각속도 변화량은 인버터 출력전압의 위상(θ_s)과 계통전압의 위상(θ_g)의 차가 작다고 가정하면, 식 (7)과 같이 근사화 될 수 있다. 따라서, θ_s 와 θ_g 가 일치하면, 최종적으로 PLL 제어가 이루어진다[5-6].

$$V_{ds} = V_m \cos(w_g t + \phi_g) = V_m \cos \theta_g \quad (5)$$

$$V_{qs} = V_m \sin(w_g t + \phi_g) = V_m \sin \theta_g \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta w &= V_{ds} \times (-\sin\theta_s) + V_{qs} \times (\cos\theta_s) \\ &= V_m \sin(\theta_g - \theta_s) \\ &\approx V_m (\theta_g - \theta_s) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, V_{ds} : d-q 정지좌표계의 d축 전압[V], V_{qs} : d-q 정지좌표계의 q축 전압[V], V_m : 상전압 피크값 [V], w_g : 계통 각속도[rad/s], θ_g : 계통전압의 위상[rad], θ_s : 인버터 출력전압의 위상[rad], Δw : 각속도 변화량[rad/s]

3. PSIM을 이용한 제안된 태양광전원 제어방식의 모델링

3.1 태양광 스트링의 모델링

태양광 모듈 8개를 직렬로 연결하여 1개의 스트링을 구성하고, 이 스트링 2개가 병렬로 연결된 경우에 대하여 PSIM S/W를 이용하여 모델링하면 Fig. 5와 같다. 여기서, 태양광 모듈은 출력, 최대출력시 전압 및 전류, 개방전압, 단락전류, 온도에 따른 개방전압 및 단락전류 변동률 등의 파라메타로 구성된다. 또한 모듈의 다양한 특성을 나타내기 위하여, 일사량 및 온도 제어소자가 모듈의 입력부에 추가된다.

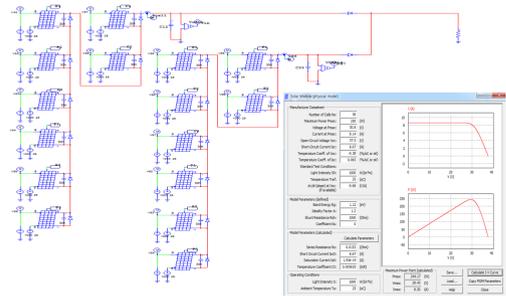
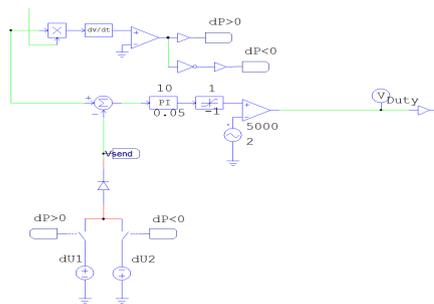


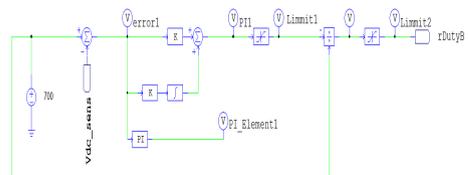
Fig. 5. Modeling of photovoltaic string using PSIM software

3.2 DC-DC 전압 레귤레이터의 모델링

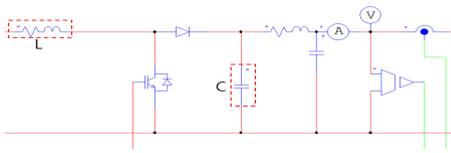
DC-DC 전압 레귤레이터는 MPPT 제어기 및 정전압 제어기, 안정화 회로로 구성되며, Fig. 6은 각각의 제어 회로를 나타낸다. 먼저, 태양광전원의 최대출력을 추종하는 MPPT 제어기를 Fig. 3의 알고리즘을 이용하여 모델링하면 Fig. 6 (a)와 같으며, PI 제어기, Limit 제어기, 출력 변동분에 대한 제어기 등으로 구성된다. 또한 전압 레귤레이터의 정전압 제어기를 Fig. 4의 알고리즘을 이용하여 모델링하면 Fig. 6 (b)와 같으며, PI 제어기, Limit 제어기, 전압변동분 제어기 등으로 구성된다. 마지막으로 안정적인 승압 및 출력맥동을 저감시키기 위한 안정화 회로의 리액터 및 커패시터의 용량을 식 (3), (4)를 이용하여 모델링하면 Fig. 6 (c)와 같이 나타낼 수 있다.



(a) MPPT control circuit



(b) Constant voltage control circuit



(c) Stabilization circuit

Fig. 6. Control circuits of DC-DC voltage regulator using PSIM software

3.3 태양광전원 모델링

상기에서 제시한 태양광 어레이, DC-DC 전압 레귤레이터(MPPT 제어, 정전압 제어, 안정화 회로), 인버터 제어기(PLL 제어) 모델링을 종합하여, 태양광전원을 모델링하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

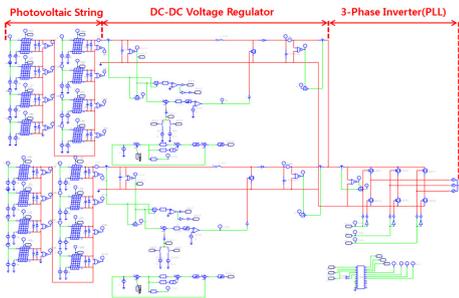


Fig. 7. Modeling of proposed photovoltaic system using PSIM software

4. 시뮬레이션 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

기존 태양광전원 제어방식과 제안한 태양광전원 제어방식의 특성을 Fig. 8과 Fig. 9의 모델 계통을 이용하여 비교 분석한다. Fig. 8은 기존 제어방식이 적용된 모델 계통으로 태양광 스트링, 3상 인버터, 계통으로 구성된다. 그리고 Fig. 9는 제안한 제어방식이 적용된 모델 계통으로, 기본 구성은 Fig. 8과 동일하나, 스트링별 DC-DC 전압 레귤레이터가 추가된다. 이에 대한 상세 시뮬레이션 조건은 아래와 같다.

먼저, 태양광 모듈은 Fig. 8과 Fig. 9에 동일하게 적용되며, 정격출력 250[W] 모듈 8개가 직렬로 연결되어 1개 스트링을 구성하고, 2개 스트링이 병렬로 인버터에 연계되도록 모의하였다. 여기서 대상으로 한 태양광모듈은 S사 제품으로 상세 사양은 Table 1과 같다. DC-DC

전압 레귤레이터는 스트링당 1개씩 설치되며, 정격용량은 2[kW]이고 240[V]의 전압을 입력받아 700[V]까지 승압시키도록 모의하였다. 3상 인버터의 동작전압범위는 600[V]~750[V]이고 정격용량은 30[kW]로, 2[kW] 스트링이 15개까지 연계되도록 구성하였다.

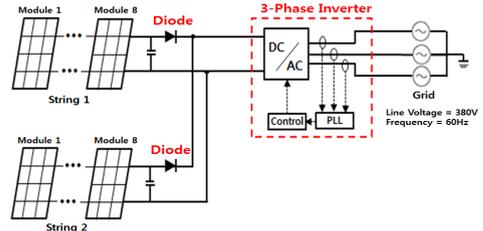


Fig. 8. Existing photovoltaic system model consisting of two strings

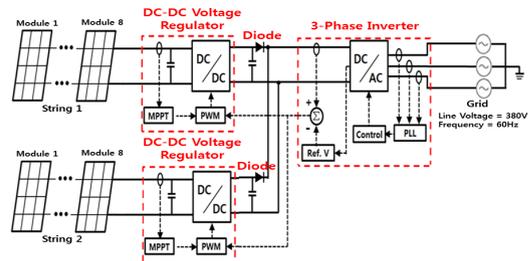


Fig. 9. Proposed photovoltaic system model consisting of two strings

Table 1. Specifications of a photovoltaic module

STC(Solar radiation 1000[W/m ²], module's temperature 25[°C])	SM-250PC8
Rated power (P_{max})	250 [W]
Voltage at Pmax (V_{mp})	30.8 [V]
Current at Pmax (I_{mp})	8.14 [A]
Short-circuit current (I_{SC})	8.67 [A]
Open-circuit voltage (V_{OC})	37.5 [V]

4.2 기존 제어방식에 의한 태양광전원의 출력 특성

태양광 모듈에 발생된 음영이 태양광전원 운용효율에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 기존 제어방식에 의한 태양광전원 출력 특성을 분석하였다. 예를 들어, Fig. 8에서 String 2번의 Module 8번에 음영이 발생된 경우, 태양광전원의 출력 특성을 분석하면 Fig. 10과 같다. Fig. 10 (a)는 스트링별 전압, Fig. 10 (b)는 스트링별 출

력, Fig. 10 (c)는 인버터의 출력을 나타낸다. 즉, 음영이 발생되지 않은 String 1번의 전압은 240[V], 출력은 1,870[W]로 유지되는 반면, String 2번의 전압은 210[V], 출력은 0[W]로 감소하게 된다. 따라서 Fig. 10 (c)와 같이, 음영으로 인하여 인버터의 전체 출력은 3,720[W]에서 1,850[W]로 감소하여, 태양광전원의 전체 운용효율은 약 50% 정도 저하하게 된다. 즉, 음영으로 인해서 String 2번의 전압이 저하되고, String 2번의 바이패스 다이오드가 작동하여 String 2번은 인버터에서 탈락하게 되므로, 기존의 제어방식은 운용효율 측면에서 개선의 여지가 있음을 확인하였다.

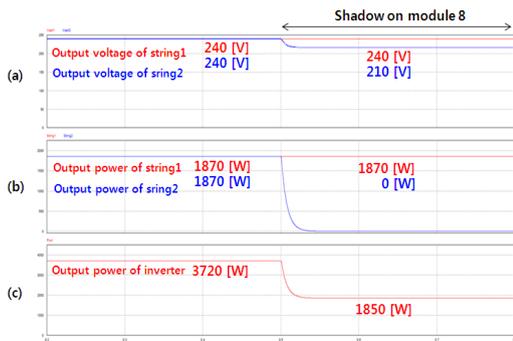


Fig. 10. Output characteristic of photovoltaic system by existing control method

4.3 제안한 제어방식에 의한 태양광전원 출력 특성

기존 제어방식에 의한 태양광전원 운용효율 저하를 개선하기 위하여, 본 논문에서는 DC-DC 전압 레귤레이터를 이용한 태양광전원 제어방식을 제안하였다. 새로운 제어방식의 유효성을 확인하기 위하여, 전압 레귤레이터의 안정화 회로 특성 및 MPPT 제어 특성, 정전압 제어 특성, 인버터 출력 특성을 분석하였다.

4.3.1 안정화 회로 특성 분석

DC-DC 전압 레귤레이터의 정상적인 동작을 위하여, 리액턴스 및 커패시턴스로 구성된 안정화 회로가 필수적이다[11]. 적절한 리액턴스 및 커패시턴스는 상기에서 제시한 식 (3), (4)에 의하여 구할 수 있다. 여기서, 부하 저항 275[Ω], 듀티비 0.34, 스위칭 주기 0.1[ms], 출력 리플전압 1[V]의 운전조건에 대하여 적절한 용량을 구하면, 리액턴스는 2[mH], 커패시턴스는 60[uF]임을 확인하였다.

4.3.2 MPPT 제어 특성 분석

일사량 변동에 따른 MPPT 제어 특성을 확인하기 위하여, 태양광전원 모듈에 인가되는 일사량을 변동시키며 DC-DC 전압 레귤레이터의 출력을 분석하였다. Fig. 9의 String 1번과 String 2번의 모든 Module에 인가되는 일사량을 200[W/m²]씩 감소시킨 경우, String 2번에 설치된 DC-DC 전압 레귤레이터의 MPPT 제어 특성은 Fig. 11과 같다. 즉, Fig. 11 (a)는 모듈에 인가되는 일사량의 변동을 나타내고, Fig. 11 (b)는 일사량 변동에 따른 String 2번의 전압과 DC-DC 전압 레귤레이터의 출력전압, Fig. 11 (c)는 일사량 변동에 따른 String 2번의 출력과 DC-DC 전압 레귤레이터의 출력을 나타낸다. 여기서, 일사량이 1,000[W/m²]에서부터 200[W/m²]까지 단계적으로 저하될 때, 2번 스트링의 전압은 240[V], DC-DC 전압 레귤레이터의 출력전압은 700[V]로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 그러나 일사량 감소로 인한 DC-DC 전압 레귤레이터의 출력은 1,850[W]에서 350[W]까지 저하되어, MPPT 제어가 정상적으로 동작함을 확인하였다.

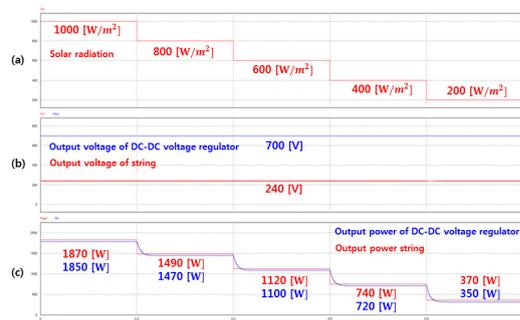


Fig. 11. Output characteristic of DC-DC voltage regulator by MPPT control

4.3.3 정전압 제어 특성 분석

DC-DC 전압 레귤레이터의 정전압 제어 특성을 확인하기 위하여, 스트링에 연결되어 있는 모듈에 음영을 발생시키면서, 전압 레귤레이터의 출력전압과 출력을 분석하였다. Fig. 9의 String 2번의 Module 8번부터 Module 5번까지 순차적으로 음영을 발생시킨 경우, 전압 레귤레이터의 출력 특성은 Fig. 12와 같다. Fig. 12는 String 2번의 전압과 DC-DC 전압 레귤레이터의 출력전압을 나타낸다. 여기서, String 2번의 전압은 음영에 의해 240[V]부터 120[V]까지 단계적으로 감소한 반면, DC-DC 전압 레귤레이터의 출력전압은 700[V]로 일정

하게 유지됨을 알 수 있었다. 따라서, 음영에 의해 String 2번의 전압이 저하되더라도, 정전압 제어가 정상적으로 동작하여 전압 레귤레이터의 출력전압이 일정함을 확인하였다.

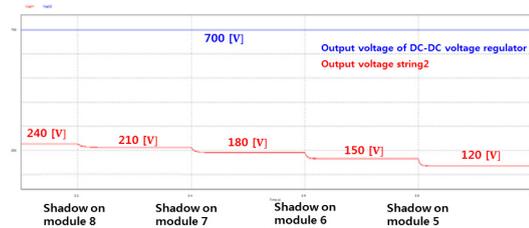


Fig. 12. Output characteristic of DC-DC voltage regulator by constant voltage control

4.3.4 인버터 출력 특성 분석

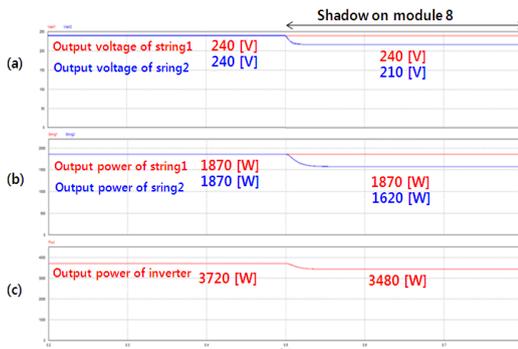


Fig. 13. Output characteristic of inverter by proposed control method

제안한 제어방식에 의한 태양광전원 운용효율을 확인하기 위하여 인버터 출력 특성을 분석하였다. 예를 들어, Fig. 9에서 String 2번의 Module 8번에 음영이 발생한 경우, 인버터의 출력 특성은 Fig. 13과 같다. Fig. 13 (a)는 스트링별 전압, Fig. 13 (b)는 스트링별 출력, Fig. 13 (c)는 인버터 출력을 나타낸다. 여기서, 음영이 발생되지 않은 String 1번의 전압은 240[V], 출력은 1,870[W]이고, 모듈 음영이 발생된 String 2번의 전압은 210[V], 출력은 1,620[W]로 저하되었다. Fig. 13 (c)와 같이 음영으로 인한 인버터 출력은 3,720[W]에서 3,480[W]로 Module 8번의 출력에 해당되는 전력만큼 감소하게 되어 전체 태양광전원 운용효율은 6.5[%] 저하하게 된다. 즉, 음영에 의해서 String 2번의 전압이 저하되더라도, DC-DC 전압 레귤레이터의 정전압 제어에 의하여, String 2번은 인버

터에서 탈락되지 않는다. 따라서 Module 8번에 음영이 발생하는 경우, 기존의 제어방식에서는 태양광전원의 운용효율이 50[%] 정도 저하되지만, 제안한 제어방식에서는 6.5[%] 정도의 효율이 저하하게 되어, 새로운 태양광전원 제어방식의 유효성을 확인하였다.

4.4 태양광전원 운용효율 종합 분석

기존 제어방식과 제안한 제어방식에 의한 태양광전원의 운용효율 특성을 비교하기 위하여, 음영이 발생된 모듈의 개수를 파라메타로 하여 태양광전원의 인버터 출력을 분석하였다. 여기서, 음영이 발생된 모듈의 개수는 2가지 Case로 나누었는데, 먼저 Case I은 Fig. 8과 Fig. 9에서 String 1번의 Module 8번에 음영이 발생한 경우이고, Case II는 String 1번의 Module 7번, 8번에 음영이 동시에 발생한 경우를 상정한 것이다. 제어방식에 따른 음영 발생 전/후의 인버터 출력(P)과 태양광전원의 운용효율(O_{eff})은 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

Table 2. Operating efficiency of photovoltaic system according to control methods

Control method	Without shadow P[W]	With shadow			
		Case I		Case II	
		P[W]	O_{eff} [%]	P[W]	O_{eff} [%]
Existing	3,720	1,850	49.7	1,850	49.7
Proposed	3,720	3,480	93.5	3,240	87.1

Table 2와 같이, Case I에 대하여 음영 발생 전을 기준으로, 기존 제어방식에서는 50[%] 정도의 출력이 감소하였지만, 제안한 제어방식에서는 6.5[%] 정도의 출력만이 감소하였다. 따라서 제안한 제어방식의 운용효율이 기존의 제어방식에 비해 1.88배 정도 향상됨을 알 수 있었다. 또한, Case II에 대하여 음영 발생 전을 기준으로, 기존 제어방식에서는 50[%] 정도의 출력이 감소하였지만, 제안한 제어방식에서는 12.9[%] 정도의 출력이 감소하였다. 즉, 제안한 제어방식의 운용효율이 기존의 제어방식에 비해 1.74배 정도 이상 향상됨을 알 수 있었다. 따라서, 제안한 제어방식이 기존 제어방식에 비해, 전체적으로 태양광전원의 운용효율을 상당한 폭으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

구름 또는 건물로 인하여 일부 태양광 모듈에 음영이 발생하면, 태양광전원 전체 운용효율이 상당히 저하되는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서, DC-DC 전압 레귤레이터를 이용하는 새로운 태양광전원 제어방식을 제안하였으며, 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존 제어방식이 적용된 태양광전원의 모듈에 음영이 발생하면, 스트링의 전압이 인버터의 동작전압 범위 미만으로 저하되어, 해당 스트링이 인버터에서 탈락되므로 태양광전원 전체 운용효율은 0%까지 저하될 수 있음을 확인하였다.
- (2) 음영에 의해서 스트링의 전압이 저하되더라도, DC-DC 전압 레귤레이터의 정전압 제어에 의하여 해당 스트링이 인버터에서 탈락하지 않고 지속적으로 운전할 수 있는 제어방식을 제안하였다.
- (3) 제안한 제어방식이 적용된 태양광전원 전체효율은 기존 제어방식에 비해 최대 88[%]까지 상승하였다. 즉, 음영이 발생한 모듈의 출력만큼만 인버터의 출력이 저하되므로 기존 제어방식에 비하여 태양광전원의 운용효율을 상당한 폭으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] Jung-hwa Kang, "Global PV industry outlook in 2014", The Export-Import Bank of Korea, <http://slidegur.com/doc/1484107/Industrial PV of the World--koreaccim>, 2014.
- [2] Yong-Sik Lee, Nam-In Kim, Sung-Won Jeong, Jae-Hyeon Gim, "Comparison of MPPT Control Method Characteristic for Stand-alone PV System", Journal of The Korean Solar Energy Society 61(1), pp. 75-79, 2012.1.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.1.075>
- [3] Seungkyu Ock, Oh Yang, "A Study on the New MPPT Control Method for Grid-connected PV Generation System", Journal of Korean Institute of Information Technology 10(2), pp. 28-35, 2012.2.
- [4] Jung-Hyun Kim, Gwang-Seob Kim, Kyo-Beum Lee, "A Sensorless MPPT Control Using an Adaptive Neuro-Fuzzy Logic for PV Battery Chargers", THE KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS 35(2), pp. 43-52, 2015.4.
DOI: <http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2013.18.4.349>

- [5] Wujong Lee, Hyunsik Jo, Hak Ju Lee, Hanju Cha, "Seamless Transfer Operation Between Grid-connected and Stand-Along Mode in the Three-phase Inverter", Journal of The Korean Institute of Electrical Engineers 62(2), pp. 201-207, 2013.2.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.2.201>
- [6] Jeong Ku-In, Kwon Jung-Min, "Parallel operating technique for the stand alone PV PCS", The Transaction of The Korean Solar Energy Society 35(6), pp. 9-15, 2015.12.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7836/ksees.2015.35.6.009>
- [7] S. Y. Pyo, O. S. Kwon, K. H. Kim, "A Study on Efficient Management of Solar Powered LED Street Lamp Using Weather forecast", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC) vol. 15, no. 2, pp.129-135, Apr. 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.2.129>
- [8] K. H. Kim, "Internet Management System for an Intelligent Remote Control and Monitoring", The Journal of The Institute of Webcasting, Internet and Telecommunication vol. 10, no. 4, pp. 1-5, 2010.
- [9] Y. S. Hong, C. S. Kim, B.J. Yun, "A Management Method for Solar Photovoltaic Power Generation System Using Intelligence", The Journal of The Institute of Webcasting, Internet Television and Telecommunication vol. 6 no. 2, pp. 35-41, 2006.
- [10] J. J. Kang, D. Y. Lim, "Implementation of Solar Garden Light using HIC(Hybrid Integrated Circuit)", The Journal of The Institute of Webcasting, Internet Television and Telecommunication, vol. 6 no. 1, pp. 51-56, 2006.
- [11] I. K. Park, W. B. Lee, "Development of Current Control System Appropriate to a Big-Capacity LED Lamp using Microprocessor", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC) Vol. 15, No. 4, pp.191-198, Aug. 31, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.4.191>

태 동 현(Dong-Hyun Tae)

[정회원]



- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 석사수료

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

박 재 범(Jae-Bum Park)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

김 찬 혁(Chan-Hyeok Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2010년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

김 미 영(Mi-Young Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 충북대학교 물리학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 북해도대학교 정보과학연구과 졸업 (공학박사)

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석

최 성 식(Sung-Sik Choi)

[정회원]



- 2010년 5월 : 한국기술교육대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석