

태양광 발전 시스템의 120Hz 리플 전압 영향 감소를 통한 DC-Link 소형화와 출력 전류 왜곡률 감소에 관한 연구

송민근¹, 이우철[†]

A Study on the DC-Link Miniaturization and the Reduction of Output Current Distortion Rate by Reducing the Effect of 120 Hz Ripple Voltage on Photovoltaic Systems

Min-Geun Song¹ and Woo-Cheol Lee[†]

Abstract

The PV module of solar power systems requires maximum power point tracking (MPPT) technique because the power-voltage and current-voltage characteristics vary depending on the surrounding environment. In addition, the 120 Hz ripple voltage on the DC-Link is caused by the imbalance of the system voltage and current. The effect of this 120 Hz ripple voltage reduces the efficiency of the power generation system by increasing the output current distortion rate. Increasing the capacity of DC-Link can reduce the 120 Hz ripple voltage, but this method is inefficient in price and size. We propose a technique that detects 120 Hz ripple voltage and reduces the effect of ripple voltage without increasing the DC-Link capacity through a controller. The proposed technique was verified through simulations and experiments using a 1 kW single-phase solar power system. In addition, the proposed technique's feasibility was demonstrated by reducing the distortion rate of the output current.

Key words: Photovoltaic system, 120 Hz ripple voltage, DC-Link capacitor, Current distortion

1. 서 론

기존의 에너지원인 화석 연료를 대체할 수 있는 다양한 신재생 에너지원 중 태양 에너지를 전기 에너지로 변환하여 사용하고 2차 공해를 유발하지 않는 태양광 발전 시스템에 대한 관심과 개발이 증가하고 있다. 또한, 태양광 발전 시스템에 사용하는 태양광 모듈은 지속적인 발전으로 인해 모듈 자체의 가격과 발전 단가가 낮아지면서 신재생 에너지원 중 가장 실용적인 에너지원

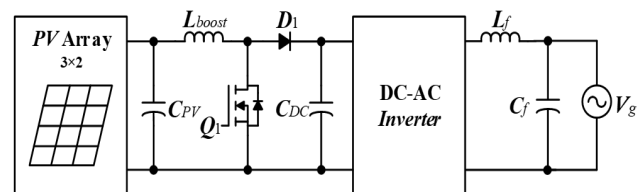


Fig. 1. Single phase PV system.

으로 각광받는 중이다^{[1],[2]}.

계통 연계형 태양광 발전 시스템의 경우 신재생 에너지를 이용한 효율적인 발전 시스템이지만 DC-AC 인버터의 사용으로 인해 DC-Link(C_{DC})에 120Hz 리플 전압이($V_{DC,ripple}$) 필연적으로 발생하게 된다. 만약 충분한 용량의 DC-Link를 사용하지 않는다면 커패시터 내부의 큰 120Hz 리플 전압으로 인해 제어 시스템에 영향을 주게 되고 계통 전류의 왜곡률을 증가시킨다^[3]. 또한, 태양광 패널에도 영향을 주게 되며 이는 태양광 패널의 최대 전력 점 추종 기법(Maximum Power Point Tracking, MPPT)의 성능을 저하시킬 수 있다^[4].

Paper number: TKPE-2021-26-5-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: woocheol@hknu.ac.kr, School of Electronic & Electrical Engineering, Institute for Information Technology Convergence, Hankyong National University, Korea

Tel: +82-031-670-5323 Fax: +82-031-670-5329

¹ School of Electronic & Electrical Engineering, Hankyong National University, Korea

Manuscript received Mar. 31, 2021; revised Apr. 13, 2021; accepted Jun. 9, 2021

— 본 논문은 2020년 추계학술대회 태양광논문상 수상논문임

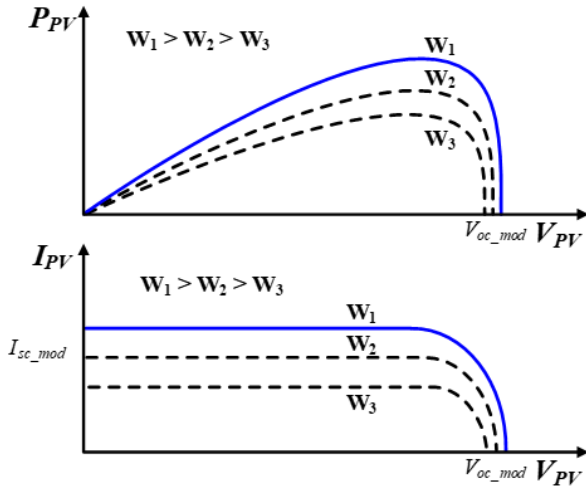


Fig. 2. PV module P-V, I-V characteristic curve at various solar irradiation.

단상 태양광 발전 시스템에서는 발전 용량에 따라 DC-Link의 용량을 증가시키므로써 120Hz 리플 전압의 영향을 감소시킨다. 그러나 이것은 시스템의 크기와 제작 비용의 측면에서 비효율적이다^{[5],[6]}. 따라서 태양광 발전 시스템의 전체적인 효율 향상을 위해 다양한 방법을 통한 120Hz 리플 전압 보상 기법에 대한 연구가 지속되어 왔다^[7]. 또한, DC-AC 인버터 혹은 DC-DC 컨버터를 사용하는 회로에서 DC-Link의 120Hz 리플 전압은 필연적으로 발생하므로 태양광 발전 시스템뿐 아니라 다른 다양한 회로에서도 리플 전압의 영향을 감소시키기 위한 연구가 진행되고 있다^[8]. 한 예시로 배터리 충전 분야 양방향 DC-DC 컨버터의 경우 인터리브드 회로를 추가하여 리플 전압을 감소시키는 방법을 사용하기도 한다^[9].

본 논문에서는 DC-Link 커패시터의 용량을 증가시키지 않고 계통 전압(V_g)과 전류(I_g), DC-Link에 흐르는 전압(V_{DC})을 검출 받아 120Hz의 리플 전압을 검출하고 제어기를 통해 리플 전압의 영향을 감소시키는 기법을 제안한다. 120Hz 리플 전압은 커패시터에 흐르는 전류를 적분기와 고역 통과 필터(High Pass Filter, HPF)를 이용하여 검출한다. 검출한 리플 전압을 기존의 제어기에 추가적으로 적용하여 출력 전류의 왜곡률을 감소시킨다.

그림 1과 같은 1kW급 태양광 인버터 시스템을 구성하여 제안된 기법을 적용한 PSIM 시뮬레이션 및 실험을 진행하고 DC-Link 리플 전압 영향 감소로 인한 출력 전류 왜곡률 감소를 확인하였다.

2. 태양광 모듈 특성 및 최대 전력 점 추종 기법

2.1 태양광 모듈 출력 특성

태양광 모듈은 일사량과 온도의 영향을 받아 그림 2와 같은 P-V, I-V 특성 곡선을 나타낸다. 그림 2의 W_1 ,

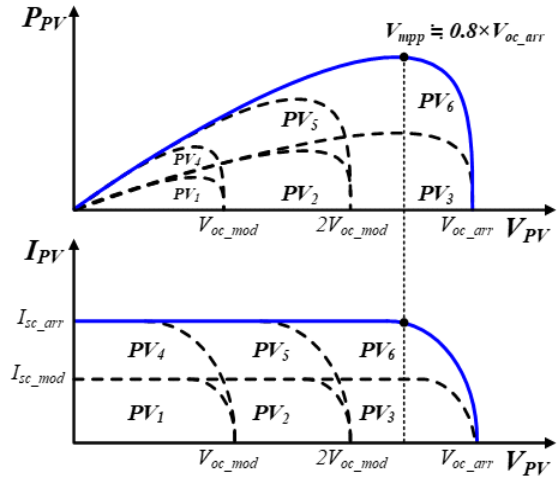


Fig. 3. 3×2 PV array P-V, I-V characteristic curve.

W_2 , W_3 은 일사량을 나타내며 일사량의 감소에 따라 태양광 모듈의 개방 전압(V_{oc_mod})은 미비하게 감소하는 반면 단락 전류(I_{sc_mod})는 일사량의 감소에 따라 개방 전압보다 크게 감소한다. 일사량에 따른 변화와 반대로 온도의 변화에는 단락 전류의 변화량에 비해 개방 전압의 변화량이 크게 증가하게 된다.

단일 태양광 모듈은 약 200-300W의 발전량을 가지도록 설계되며 일반적으로 $N \times n$ 직·병렬 어레이로 구성한다. 이때 N 은 직렬 연결 개수, n 은 병렬 연결 개수이다.

직·병렬로 구성된 태양광 어레이의 개방 전압(V_{oc_arr})과 단락 전류(I_{sc_arr})는 각각 직렬과 병렬로 연결된 태양광 모듈의 수만큼 증가하여 식 (1), (2)와 같이 계산되고, 3×2로 구성된 태양광 어레이의 P-V, I-V 특성 곡선은 그림 3과 같다.

$$V_{oc_arr} = N \times V_{oc_mod} \quad (1)$$

$$I_{sc_arr} = n \times I_{sc_mod} \quad (2)$$

$$V_{mpp} \approx 0.8 \times V_{oc_arr} \quad (3)$$

2.2 P&O 최대 전력 점 추종 기법

일반적으로 태양광 모듈의 최대 전력 점(V_{mpp})은 개방 전압의 약 80% 지점에 존재한다. 따라서 직·병렬로 연결된 태양광 모듈이 증가해도 어레이의 개방 전압은 식 (1)과 같이 계산되므로 태양광 모듈 어레이의 최대 전력 점은 식 (3)과 같이 계산하여 구할 수 있다.

일사량의 변화에 따라 그림 2와 같이 개방 전압과 단락 전류가 변동되면 태양광 모듈의 최대 전력 점이 변동된다. 태양광 발전 시스템은 일사량에 따른 최대 전력 점을 감지하고 추종하기 위해 최대 전력 점 추종 기법을 필요로 한다^{[10],[11]}.

본 논문에서는 P&O(Perturbation & Observation) MPPT 알고리즘을 사용하였고, 이 알고리즘은 그림 4와 같이 진행된다. 알고리즘에서 사용한 변수는 다음과 같다.

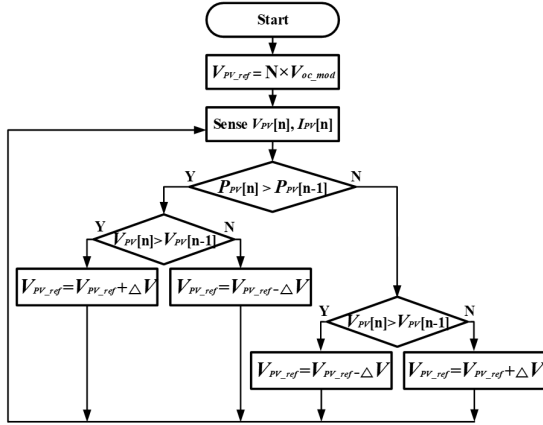


Fig. 4. P&O MPPT algorithm.

V_{PV_ref} : 태양광 전압 지령치.

V_{oc_mod} : 단일 태양광 모듈의 개방 전압.

$P_{PV[n]}, P_{PV[n-1]}$: 태양광 어레이의 현재, 이전 전력.

$V_{PV[n]}, V_{PV[n-1]}$: 태양광 어레이의 현재, 이전 전압.

$I_{PV[n]}, I_{PV[n-1]}$: 태양광 어레이의 현재, 이전 전압.

ΔV : 태양광 전압 지령치의 변경량.

3. 제안된 DC-Link 리플 전압 영향 보상 기법

3.1 120Hz 리플 전압 검출

계통 연계형 태양광 발전 시스템은 태양광 모듈의 전압을 승압시켜 인버터에 인가하고, MPPT 동작을 수행하는 부스트 컨버터와 태양광 발전에 의한 전력을 계통에 전달해 주기 위한 DC-AC 풀-브릿지 인버터를 사용한다. 따라서 DC-Link에는 120Hz 리플 전압이 발생하게 되고 제어 시스템의 불안정과 계통 전류의 왜곡을 야기한다.

계통 전압과 전류는 역률 1로 제어하여 동상으로 정의할 때 식 (4)와 같이 나타내며 식 (5)와 같이 계산하여 확인할 수 있다. 이때 120Hz 리플 전압은 식 (5)의 계통 전력량과 DC-Link의 용량, 태양광 발전 시스템의 전력량 ($V_{PV} \times I_{PV}$)을 이용해 식 (6)과 같이 계산할 수 있다. 이때 식 (6)의 $\omega L_f I^2 \sin^2 \omega t$ 는 LC 필터에서 소모하는 전력량을 계산하는 식이며 C값은 매우 작은 값으로 설정하였으므로 생략하였다.

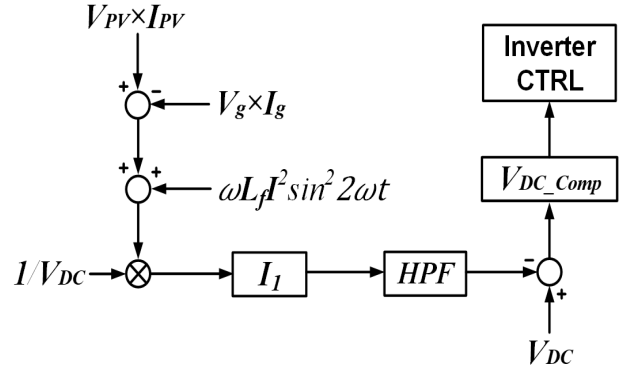
$$V_g = V \sin \omega t, I_g = -I \sin \omega t, \omega = 2\pi f, f = 60\text{Hz} \quad (4)$$

$$V_g \cdot I_g = -VI \frac{(1 - \cos 2\omega t)}{2} \quad (5)$$

$$V_{DC_ripple} = \frac{1}{C} \int \frac{-V_g I_g + V_{PV} I_{PV} + \omega L_f I^2 \sin^2 \omega t}{V_{DC}} dt \quad (6)$$

3.2 120Hz 리플 전압 영향 감소

그림 5는 120Hz 리플 전압을 계산하는 식 (7)을 이용한 리플 파형 생성기이다.

Fig. 5. V_{DC_Comp} generator using V_{DC_ripple} formula.

식 (7)과 동일한 방식으로 검출 받은 태양광 전압, 전류와 계통 전압, 전류를 통해 소프트웨어를 이용하여 리플 전압을 계산한다. 그림 5에서 사용하는 적분기(I_1)는 PI 제어기를 기반으로 하며 비례 제어를 사용하지 않고 적분 제어만을 이용하여 적분기의 역할을 수행한다. 계산을 통해 제작된 파형은 적분기를 통과하는 과정에서 오프셋을 포함하게 된다. 포함된 오프셋을 제거해 주기 위하여 고역 통과 필터를 이용한다. HPF를 소프트웨어에서 구성하고 차단 주파수를 20Hz로 통과시켜 DC 오프셋을 제거한 리플 전압 파형을 구현한다. 소프트웨어로 HPF를 구성하기 위한 진행 과정은 식 (7), (8)과 같은 1차 고역 통과 필터의 식을 (9), (10)과 같이 변환하여 진행하였다.

$$f_s = \frac{1}{T}, \omega_0 = 2\pi f_c, H(s) = \frac{s}{s + \omega_0}, s = 2f_s \frac{Z-1}{Z+1} \quad (7)$$

$$H(s) = \frac{2f_s Z - 2f_s}{(\omega_0 + 2f_s)Z + (\omega_0 - 2f_s)} = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (8)$$

$$-\left(\frac{\omega_0 - 2f_s}{\omega_0 + 2f_s}\right) = \frac{2 - \omega_0 T}{2 + \omega_0 T} = H_a, \frac{2f_s}{\omega_0 + 2f_s} = \frac{2}{2 + \omega_0 T} = H_b \quad (9)$$

$$Y(s) = Z^{-1} H_a Y(s) + (1 - Z^{-1}) H_b X(s) \quad (10)$$

구현된 리플 전압 파형은 실제로 리플 전압을 감소시키는 역할을 하지 않지만 검출 받은 V_{DC} 전압 파형에 리플 전압 파형을 추가시켜 리플 전압의 영향이 제거된 보상 파형(V_{DC_Comp})을 제작한다. 보상 파형은 인버터 전류 제어기에 사용되고 제어되는 계통 전류는 리플 전압의 영향을 받지 않는 상태에서 제어를 하게 된다. 따라서 출력되는 계통 전류에는 120Hz 리플 전압에 의한 왜곡률이 감소하게 되며 태양광 발전 시스템의 효율이 증가하게 된다.

3.3 리플 전압 영향 감소 파형을 이용한 제어

그림 6은 본 논문에서 제안한 리플 전압 보상 파형을 이용하는 전체적인 회로 동작을 보여준다.

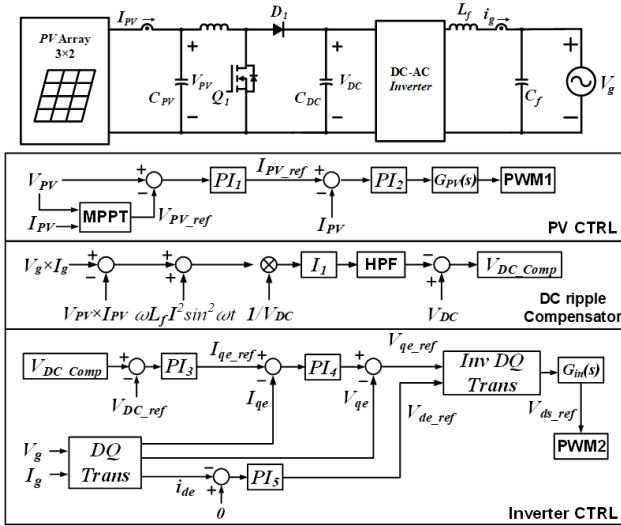


Fig. 6. Single phase PV system block diagram using proposed system.

TABLE I
SINGLE PHASE PV SYSTEM SIMULATION
PARAMETER

Parameter	Value
Module open-circuit voltage: (V_{oc_mod})	60 [V]
Module short-circuit current: (I_{sc_mod})	4.1 [A]
Array open-circuit voltage: (V_{oc_arr})	180 [V]
Array short-circuit current: (I_{sc_arr})	8.2 [A]
Control cycle	100 [μ s]
Switching frequency: F_s	10 [kHz]
Input capacitance: C_{PV}	330 [μ F]
DC link capacitance: C_{DC}	680 [μ F]
Boost inductance: L_{boost}	1.5 [mH]
Filter inductance: L_f	2.4 [mH]
Filter capacitance: C_f	5 [μ F]
Grid voltage: V_g	110 [V_{rms}]

부스트 컨버터에서 P&O 알고리즘을 통한 MPPT 동작을 진행하고 태양광 전압을 승압시킨다. 계통 전류는 DQ 변환을 통해 무효분(i_{de})과 유효분(i_{qe})으로 분리하고 보상 파형(V_{DC_Comp})은 전류의 유효분 지령치(i_{qe_ref})를 제어하는 데 사용한다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 구성

본 논문에서 제안된 기법을 적용했을 때 회로의 동작 파형을 확인하기 위하여 PSIM을 통해 그림 6과 같이 회로를 구성하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에서 구성한 회로의 파라미터는 표 1에 나타낸 것과 같다.

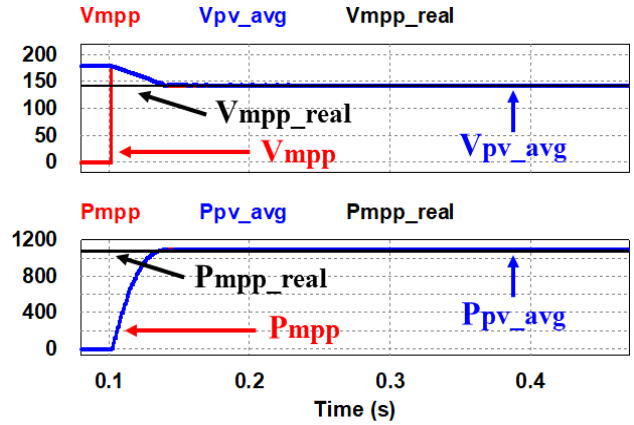


Fig. 7. Simulation result of P&O MPPT.

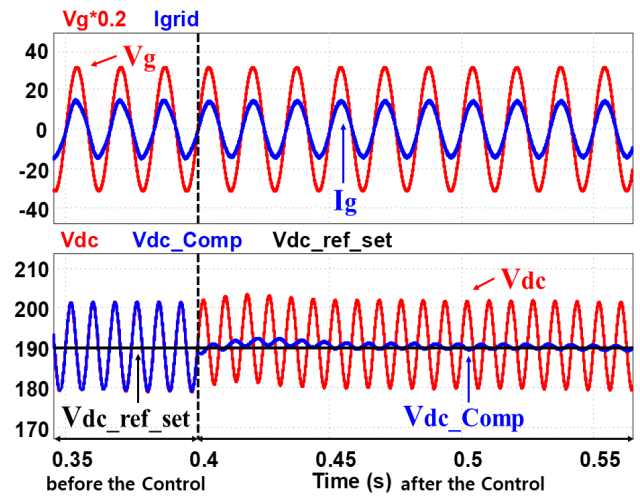


Fig. 8. Simulation result before and after proposed control.

4.2 시뮬레이션 결과

그림 7로 시뮬레이션에서 구성한 회로의 P&O MPPT 동작 파형을 확인하였다. P&O 알고리즘에 의해 개방 전압에서 동작을 시작하여 태양광 전압(P_{PV_avg})을 ΔV 씩 제어하여 최대 전력 점을 추종한다. 이때 이론상 최대 전력 점(P_{mpp_real})과 거의 동일한 최대 전력 점(P_{mpp})에서 동작하는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 제어 기법의 효과를 확인하기 위해 계통 전압, 전류의 파형과 실제 DC-Link 전압(V_{DC}), 보상을 위한 파형(V_{DC_Comp})을 그림 8과 같이 시뮬레이션으로 진행하였다.

시뮬레이션 파라미터의 조건에 맞춰 제안된 제어 기법을 적용하기 전의 계통 전류에서 왜곡이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 이후 제어 기법을 적용하면 보상 파형의 리플 전압이 감소하고 보상 파형으로 제어된 계통 전류는 왜곡이 줄어들게 된다. 이때 실제 DC-Link의 리플 전압은 감소하지 않은 것을 확인하였다.

V_{DC} 의 리플 전압 $21.6V_{PP}$ 에 비해 보상 파형의 경우 $3.9V_{PP}$ 로 제안한 보상 파형을 제어기에 적용할 경우 약 82.4% 정도의 리플 전압 영향을 감소시켰다.

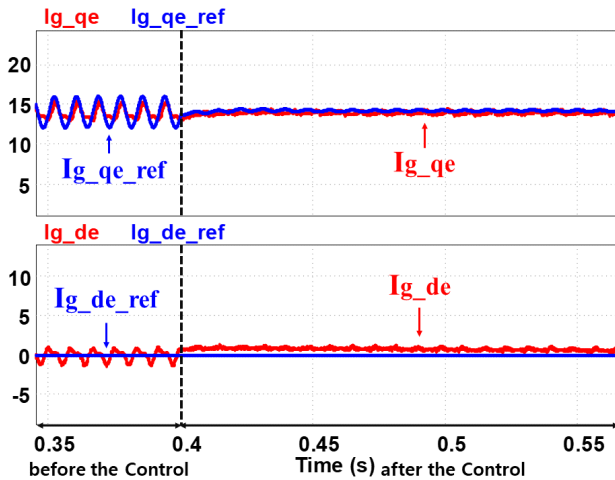


Fig. 9. I_{g_de} , I_{g_qe} simulation result before and after proposed control.

인버터에서 계통 전압과 전류는 DQ 변환을 통해 유효분과 무효분으로 분리하여 제어하고 보상 파형은 계통 전류의 유효분 지령치 제어에 사용되므로 제안된 기법에 따른 계통 전류 유효분 제어를 그림 9에서 확인하였다.

보상 파형에 의한 제어가 적용된 후 계통 전류 유효분 지령치의 리플 성분이 감소하고 제어기에 의해 유효분의 리플 성분도 감소한다. 이때 계통 전류 유효분의 리플 성분 감소치는 약 83% 정도로 보상 파형과 V_{DC} 의 리플 성분 감소치와 비슷하였다. 유효분 리플 성분의 감소로 인해 무효분의 리플 성분도 감소하게 되고 결론적으로 계통 전류의 THD를 향상시켰다.

5. 실험

5.1 실험 구성

시뮬레이션을 진행하여 제안된 기법의 타당성을 확인한 후 회로를 구성하여 실험을 진행하였다.

그림 10(a)는 실험에서 태양광 모듈을 대신하기 위한 PV 시뮬레이터이며 AMETEK사의 Elgar TerraSAS ETS 600을 사용하였고, (b)는 실험을 위해 구성한 단상 태양광 발전 시스템이다.

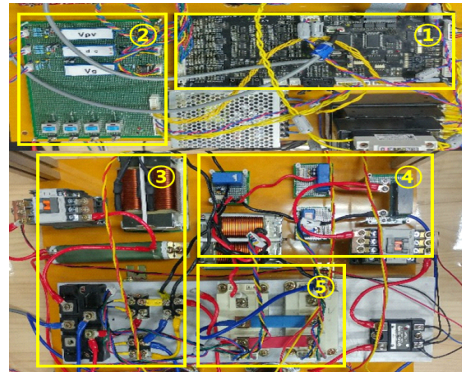
실험에서 사용한 PV 시뮬레이터를 통해 PSIM 시뮬레이션에서의 태양광 모듈과 동일한 성능의 태양광 모듈 어레이를 구성하였고, 그 외의 회로 구성 파라미터는 시뮬레이션에 사용한 표 1의 파라미터와 같이 설정하였다.

5.2 실험 결과

본 논문에서 사용하는 P&O MPPT 기법의 정상 동작을 확인하기 위하여 최대 전력 점 추종 과정을 그림 11과 같이 확인하였다. 어레이 개방 전압부터 전압을 감소시켜 최대 전력점을 추종하여 동작함을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 10. (a) PV simulator (Elgar TerraSAS ETS 600), (b) Single phase PV system. ① DSP, ② AD board, ③ Boost converter, ④ LC filter, ⑤ Full-bridge inverter.

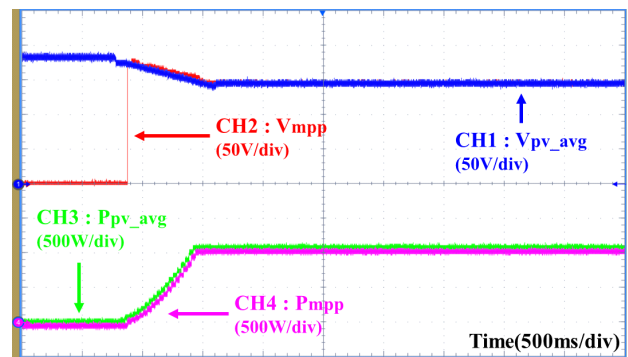


Fig. 11. Experimental result of P&O MPPT.

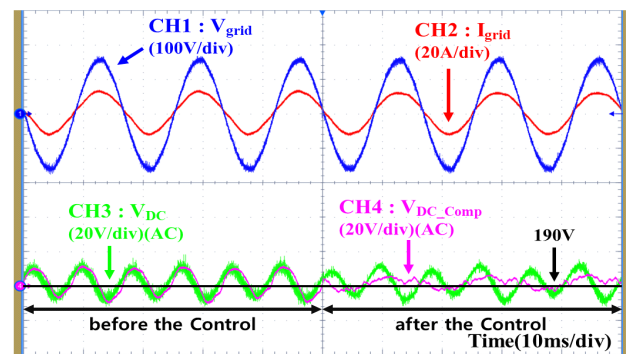


Fig. 12. Experimental result of before and after proposed control.

그림 12에서 최대 전력 점 추종 후 본 논문에서 제안한 기법의 적용 후의 계통 전압, 전류 파형과 DC-Link 전압 파형을 확인하였다. Ch4의 제안된 보상 파형

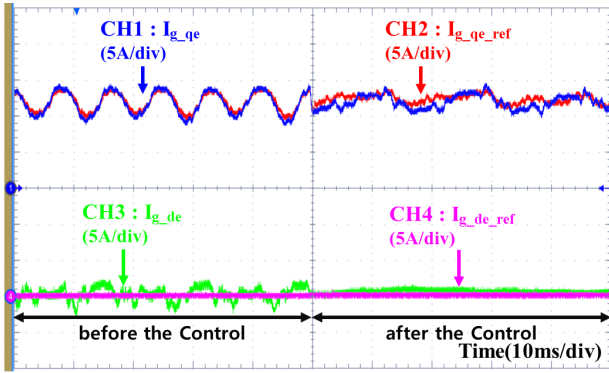


Fig. 13. I_{g_dc} , I_{g_qe} experimental result of before and after proposed control.

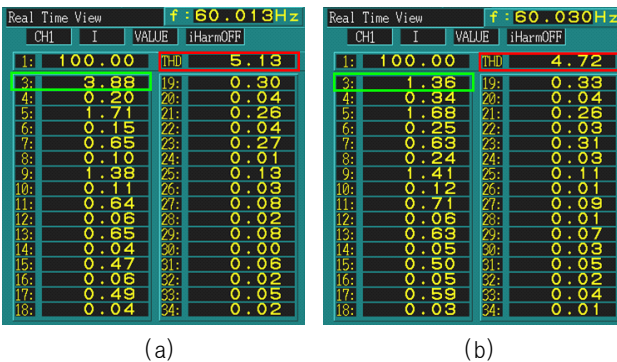


Fig. 14. (a) Measurement of current THD before control, (b) Measurement of current THD after control.

을 이용하여 제어한 경우 계통 전류 파형의 왜곡률이 감소하게 된다. 또한, 제안된 기법에 따라 Ch3의 DC-Link 리플 전압은 감소하지 않음을 확인할 수 있다. V_{DC_Comp} 보상 파형의 리플 전압은 제어 전 약 $24V_{PP}$ 에서 제어 후 약 $6V_{PP}$ 로 75% 정도의 리플 전압이 감소한 파형을 출력하게 되며 보상 파형을 통한 인버터 전류 제어에 의하여 계통 전류의 왜곡률이 감소하게 된다.

그림 13에서 계통 전류 유효분 지령치에 해당하는 Ch2의 파형에서 본 논문에서 제안한 기법의 효과를 확인하였다. 제안한 기법의 적용 전 계통 전류 유효분 지령치는 DC-Link 전압의 120Hz 리플 전압 성분을 모두 포함하고 있다. 제안한 기법의 적용 후 계통 전류 유효분 지령치는 보상 파형에서 감소시킨 만큼 120Hz 리플이 감소하게 되고, 그로 인해 계통 전류 유효분도 리플 성분이 감소하게 된다.

향상된 THD를 확인하기 위해 그림 14와 같이 HIOKI사의 HIOKI 3196 Power Quality Analyzer를 사용하여 실험을 진행하였다. 본 논문에서 제안한 기법으로 인해 계통 전류의 THD는 제어 전 약 5.2%에서 제어 후 4.7% 정도로 전류의 왜곡이 감소함을 확인하였고, 특히 제3 고조파의 경우 제어 전 약 4%에서 제어 후 1.3%까지 감소하는 것을 확인하였다. DC-Link 소형화의 가능성을 확인하기 위하여 DC-Link 값에 따른 출력 전류

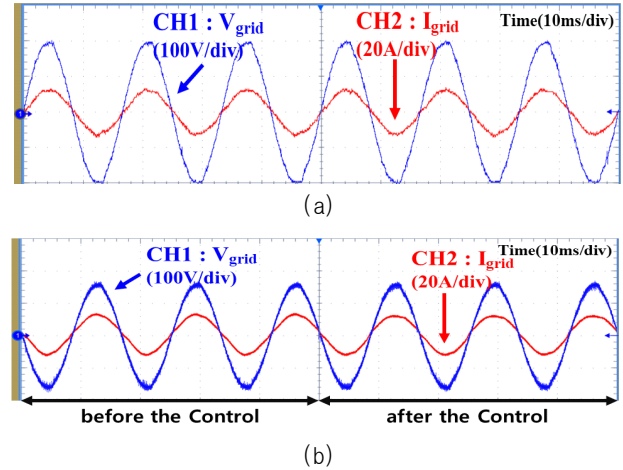


Fig. 15. (a) Experimental result of V_{grid} , I_{grid} ($C_{DC}=2200\mu F$), (b) Experimental result of V_{grid} , I_{grid} ($C_{DC}=680\mu F$).

왜곡률을 그림 15에서 확인하였다. 그림 15(a)에서 DC-Link는 $2200\mu F$ 이고 (b)의 DC-Link는 $680\mu F$ 으로 제안한 기법을 적용할 경우 (a)와 유사한 전류 파형을 갖는 것을 확인하였다.

6. 결론

본 논문에서는 단상 계통 연계형 태양광 발전 시스템에서 발생하는 120Hz 리플 전압의 영향을 저감시키는 기법을 시뮬레이션과 실험의 결과를 토대로 제안하였다.

120Hz 리플 전압 검출을 통한 보상 파형을 이용하여 인버터를 제어하는 기법을 제안하였고, 시뮬레이션의 결과를 토대로 실험을 통해 제안된 기법을 검증하였으며 계통 전류 왜곡률 측정을 통해 성능을 확인하였다.

제안된 기법을 통하여 $680\mu F$ 의 DC-Link로 기존의 $2200\mu F$ DC-Link를 사용한 것과 유사한 전류를 출력하는 것을 확인하였다. DC-Link의 용량 증가 없이 계통 전류의 왜곡률을 감소시킬 수 있으므로 태양광 발전 시스템의 제작 비용을 감소시키고 크기를 축소시키는 데 적합할 것으로 기대된다.

추후 연구에서는 계통 연계 및 다양한 부하를 추가한 조건에서의 120Hz 리플 영향 감소를 연구해 볼 예정이다.

본 연구는 한국전력공사의 2020년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음. (과제번호: R20X002-37)

References

- [1] M. Boztepe, F. Guinjoan, G. Velasco-Quesada, S. Silvestre, A. Chouder, and E. Karatepe, "Global MPPT

- scheme for photovoltaic string inverters based on restricted voltage window search algorithm," *IEEE Transactions on Industry Electronics*, Vol. 61, No. 7, pp. 3302-3312, Jul. 2014.
- [2] Y. Wang and Y. Li "High-accuracy and fast-speed MPPT methods for PV string under partially shaded conditions," *IEEE Transactions on Industry Electronics*, Vol. 63, No. 1, pp. 235-245, Sep. 2016.
- [3] W. Sim, J. Jo, Y. Kim, and H. Cha, "Reactive power control of single-phase reactive power compensator for distribution line," *The Transactions of the Korea Institute of Power Electronics*, Vol. 25, No. 2, pp. 73-78, Apr. 2020.
- [4] J. Shi, L. Liu, and H. Li, "A single-phase grid-connected PV converter with minimal DC-link capacitor and low-frequency ripple-free maximum power point tracking," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 2385-2390, Sep. 2013.
- [5] B. Gu and K. Nam, "A DC link capacitor minimization method through direct capacitor current control," *IEEE Transactions on Industry Electronics*, Vol. 42, No. 2, pp. 573-581, Mar. 2006.
- [6] J. Jung, S. K. Lim, and K. Nam, "A feedback linearizing control scheme for a PWM converter-inverter having a very small DC-link capacitor," *IEEE Transactions on Industry Electronics*, Vol. 35, No. 5, pp. 1124-1131, Sep. 1999.
- [7] J. H. Vardhana and B. K. Naick, "Optimization of PV MPPT performance and DC link Voltage ripples compensation using a duty cycle modifier," *IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering*, Jaipur, India, May 2014.
- [8] F. Blaabjerg and D. O. Neacsu, "Adaptive SVM to compensate DC-link voltage ripple for four-switch three-phase voltage-source inverters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 743-752, Jul. 1999.
- [9] J. M. Seo and W. C. Lee, "A study on bidirectional coupled-inductor interleaved DC-DC converter for battery charging and discharging system," in *Annual Conference of the KIPE*, pp. 133-135, Jul. 2019.
- [10] M. G. Villalva and E. Ruppert, "Analysis and simulation of the P&O MPPT algorithm using a linearized PV array model," in *IEEE Industrial Electronics*, pp. 231-236, Nov. 2009.
- [11] A. Al-Diab and C. Sourkounis, "Variable step size P&O MPPT algorithm for PV systems," in *IEEE Optimization of Electrical and Electronic*, pp. 1097-1102, May. 2010.



송민근(宋民根)

1996년 4월 10일생. 2021년 한경대 전기전자제어공학과 졸업. 2021년~현재 동 대학원 전자전기공학부 석사과정.



이우철(李雨哲)

1964년 3월 24일생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988년~1998년 효성중공업(주) 기술연구소 책임연구원. 2007년~2009년 Virginia Polytechnic Institute and State University Visiting Professor. 2002년~현재 한경대 전자전기공학부 교수. 2021년 대한전기학회 EMECS 부문회 부회장.