

계통연계형 멀티스트링 태양광 발전 시스템

권 정민¹⁾, 김 응호²⁾, 권 봉환³⁾

Photovoltaic Multi-string PCS with a Grid-connection

Jungmin Kwon, Eungho Kim, Bonghwan Kwon

Key words : photovoltaic(태양광), PV PCS(태양광 발전 시스템), multi-string(멀티-스트링), MPPT(최대 전력 추종), current ripple reduction(전류 리플 저감)

Abstract : In this paper, a PV multi-string PCS with a grid-connection is proposed. An improved MPPT algorithm for the PV multi-string PCS is suggested. Each PV string has its own MPP tracker and the proposed MPPT algorithm prevents LMPP tracking due to power ripple. In the PV PCS with single-phase inverter has a large current ripple at twice the grid frequency. The current ripple reduction algorithm without external component is suggested. Also, this paper proposes a simple control method to achieve sharing of the PV string voltage and current among the interleaved parallel boost converters. All algorithms and controllers are implemented on a single-chip microcontroller. Experimental results obtained on a 3kW prototype show high performance of the proposed PV multi-string PCS.

Nomenclature

P_{PV1}, P_{PV2} : 현재의 PV1, PV2 스트링의 전력
 P_{past1}, P_{past2} : 과거의 PV1, PV2 스트링의 전력
 $P_{reverse1}, P_{reverse2}$: MPPT 방향을 바꾸는 기준 전력

Subscrip

PV : photovoltaic
PCS : power conditioning system
MPP : maximum power point
MPPT : maximum power point tracking
LMPP : local maximum power point

1. 서론

환경오염, 화석 연료 고갈 등의 문제로 신재생에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 태양광발전은 소음이 없고, 설치 후 관리 및 유지비가 거의 들지 않아 가정용으로 매우 적합하다. 하지만 투자비용 대비 발전량이 적다는 단점이 있다. 태양광 발전이 더욱 활성화하기 위해서는 발전 기기의 가격을 낮추고, 발전 효율을 높이는 것이 필수적이다.

센터럴 PCS는 그림 1 (a)과 같이 PCS에 많은 양의 태양전지가 직병렬로 연결 되어있어 높은

전압과 높은 전력이 발생한다. 그러나 태양전지에 높은 전압의 DC 케이블이 연결되며, 직렬로 연결된 태양전지가 병렬로 연결되면서 발생하는 전압 불균형 문제 등이 있다. 또한 부분적으로 그림자가 가릴 경우, 효과적인 MPPT가 힘들다는 단점이 있다.¹⁾

태양전지가 직렬로 연결된 것을 스트링이라고 한다. 스트링 PCS는 그림 1(b)와 같이 PCS에 1개의 스트링이 연결된 구조이다. 스트링 PCS는 센터럴 PCS의 문제점 대부분이 해결되어있다. 태양전지 스트링이 병렬로 연결되지 않아 병렬로 연결 시 발생하는 문제점이 없다. 또한 부분적으로 그림자에 가릴 때 발생하는 문제도 센터럴 PCS에 비해 완화된다. 하지만 태양전지를 연결 할 수 있는 양이 제한되어있어 높은 정격 전력을 내기 힘들다는 단점이 있다.

그림 1 (c)의 멀티스트링 PCS는 센터럴 PCS와 스트링 PCS가 결합되어 각각의 장점이 있는 PCS이다. 정격 전력의 제한, 태양전지의 병렬연결 문제가 없으며, 부분적으로 그림자가 가릴 때 효과적인 MPPT가 불가능한 문제도 적다. 일반적으로

1) POSTECH
E-mail : jmkwon@postech.ac.kr
2) POSTECH
E-mail : znight@postech.ac.kr
3) POSTECH
E-mail : bhkwon@postech.ac.kr

로 멀티스트링 PCS의 스트링은 1개는 스트링 PCS의 스트링 보다 연결된 태양전지 수가 적다. 따라서 부분적으로 그림자 저서 MPPT 효율이 떨어지는 문제가 스트링 PCS보다 더 완화된다.

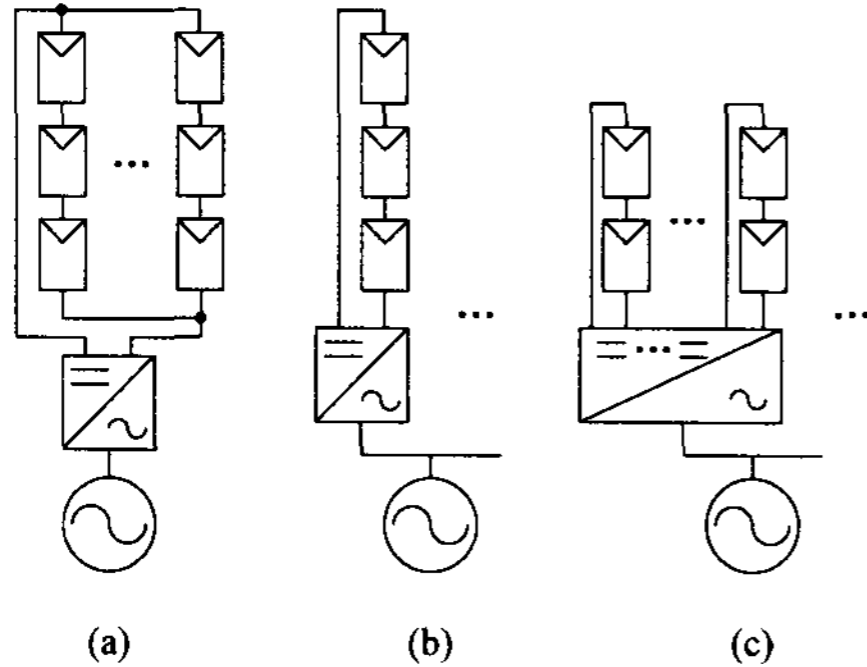


Fig. 1. Three kinds of PCS. (a) Central PCS. (b) String PCSs. (c) Multi-string PCSs.

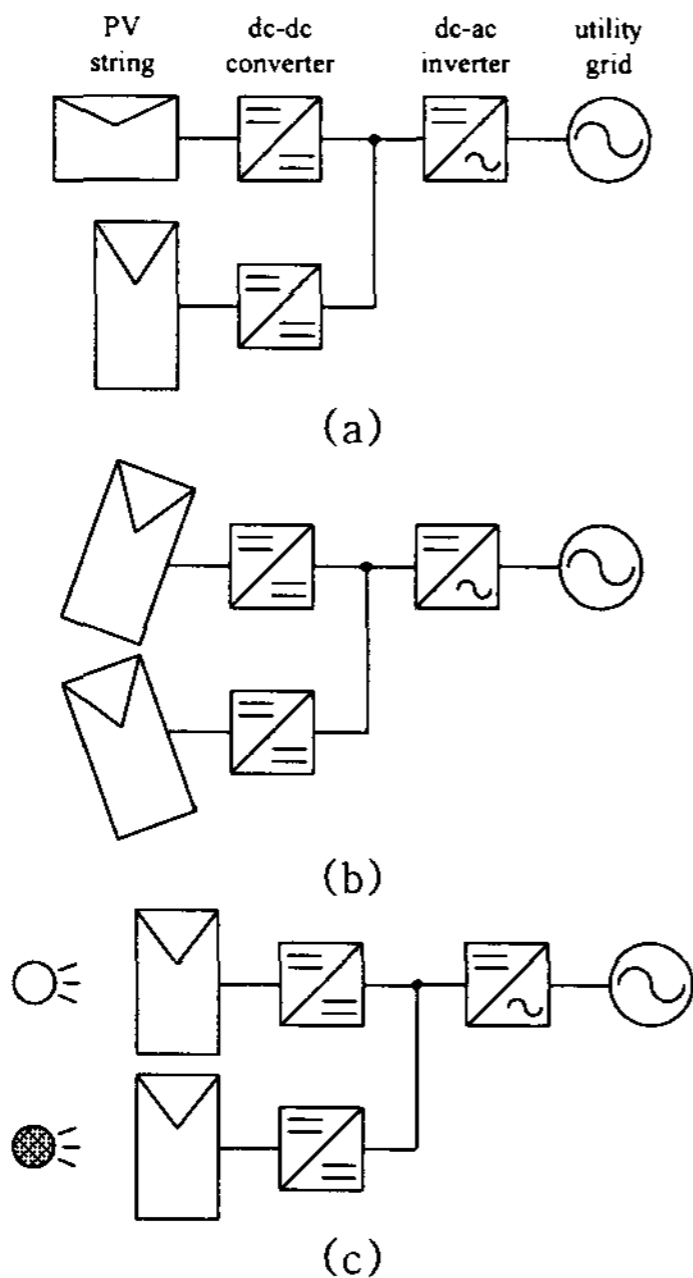


Fig. 2. Connections of the multi-string PCS by different PV string characteristics. (a) Different PV strings. (b) Different orientated PV strings. (c) Different degree of shading in PV strings.

그림 2는 멀티스트링 PCS의 장점을 보여준다. 그림 2 (a)와 같이 다른 종류의 태양전지 스트링이 연결되어도 되며, 그림 2 (b)와 같이 태양전지 스트링이 다른 방향으로 설치되어도 각각의 태양전지 스트링 특성에 맞게 MPPT를 하여 최대 전력을 생산한다. 그림 2 (c)와 같이 일부 스트링이 그림자에 가려도 각각의 스트링의 특성에 맞도록 MPPT가 수행된다.²⁾

계통연계형 태양광 PCS의 경우 계통에 역률 1로 전력을 내어주면서 태양전지에 계통의 2배 주

파수의 전력 리플이 발생한다. 이러한 전력 리플은 MPPT 효율을 떨어트리며, 법으로 리플을 5% 이하로 줄이도록 규제되고 있다. 이러한 저주파 전력 리플을 없애기 위해서는 큰 LC필터를 달아야 하며, 이러한 LC 필터는 PCS의 가격 인상 요인이 된다. 본 논문에서 이러한 필터 없이 전력 리플을 감소시킬 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

태양전지가 이미 설치가 되어있거나, 멀티스트링 방식을 사용하지 못할 경우가 있다. 이 경우 센트럴 PCS를 사용해야한다. 그러나 PV PCS 시장규모는 작고 PV PCS 업체는 영세하여 여러 종류의 PCS를 생산하게 되면 수익성이 떨어진다. 만약 멀티스트링 PCS를 센트럴 PCS로 사용할 수 있으면, PV PCS 업체는 센트럴 PCS를 따로 만들지 않아도 되어 수익성이 향상된다. 본 논문에서는 멀티스트링 PCS의 부스트 컨버터를 병렬로 연결하여 센트럴 PCS처럼 쓸 수 있는 병렬연결 운전 알고리즘을 제안한다.

2. 멀티스트링 PCS

2.1 회로구성

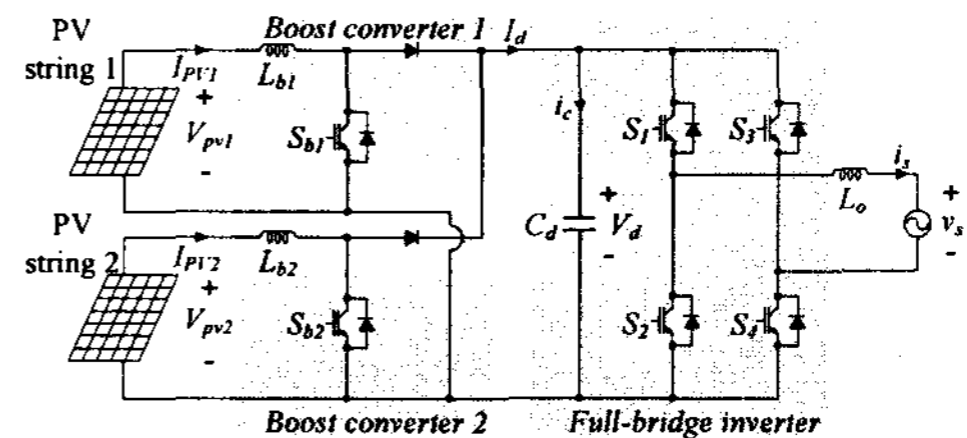


Fig. 3. Multi-string photovoltaic single-phase power conditioning system.

멀티스트링 PCS는 그림 3과 같이 2개의 부스트 컨버터와 1개의 풀브리지 인버터로 구성되어 있다. 각각의 부스트 컨버터는 정격 전압의 50% 용량이며 부스트 컨버터2의 PWM 스위칭 주기는 부스트 컨버터1의 PWM 스위칭 주기와 같으나, 위상이 180도 차이가 나도록 하여 dc link의 스위칭 전압 리플이 적게 하였다. 풀브리지 인버터는 무변압기형이며, 계통 전압과 같은 위상의 전류를 낸다.

2.2 MPPT

MPPT 알고리즘으로 look up table 방식, P&O (perturb and observe) 방식, IC (incremental conductance) 방식 등이 있다. 특히 P&O 방식은 구현이 간단하며, 태양전지의 특성을 몰라도 MPP를 찾을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 그림 4와 같이 sensing noise나 전력 리플 등이 있으면, MPP를 잘 찾지 못하는 경우가 발생하여, MPPT 알고리즘은 이를 고려하여야 한다.

본 논문에서는 sensing noise와 전력 리플을 고려한 개선된 P&O 알고리즘 알고리즘을 제안하며, 순서도는 그림 5에 나타나있다. PV 스트링1

과 PV 스트링2의 동작 분석은 같으므로 PV 스트링 2의 동작 분석은 생략하였다. MPPT 알고리즘을 실행하기에 앞서 모든 파라미터들은 초기화하여야 하며, $flag1$ 과 $flag2$ 는 MPP를 찾아가는 방향을 뜻한다.

sensing noise와 전력 리플은 발전전력이 크면 그 값은 더 커지며, 발전 전력이 작아도 어느 정도 이상의 값을 가지고 있다. 따라서 전력 리플 허용량은 다음과 같이 결정된다.

$$P_{r1} = k_r P_{PV1} + P_{offset} \quad (1)$$

MPPT 방향 전환은 현재 전력이 $P_{reverse1}$ 보다 작은 경우 이루어지며, $P_{reverse1}$ 는 다음 식으로 결정된다.

$$P_{reverse1} = P_{past1} - P_{r1} \quad (2)$$

P_{PV1} 가 P_{past1} 보다 클 경우 MPPT의 방향은 MPP를 찾아가는 방향이므로 MPPT의 방향을 유지한다. P_{PV1} 가 $P_{reverse1}$ 보다 작을 경우 MPPT의 방향이 MPP를 찾아가는 방향과 반대 방향으로 $flag1$ 를 반대로 바꾸어 MPPT의 방향을 바꾼다. P_{PV1} 가 P_{past1} 보다 작지만 $P_{reverse1}$ 보다 클 경우는 그림 4의 LMPP의 조건이며, 기존의 P&O 알고리즘은 LMPP에서 발전을 하게 되어 실제 MPP를 찾지 못한다. 그러나 제안한 알고리즘은 이 경우 sensing noise나 전력 리플로 보고 MPPT의 방향을 바꾸지 않아 실제 MPP를 찾을 수 있다.

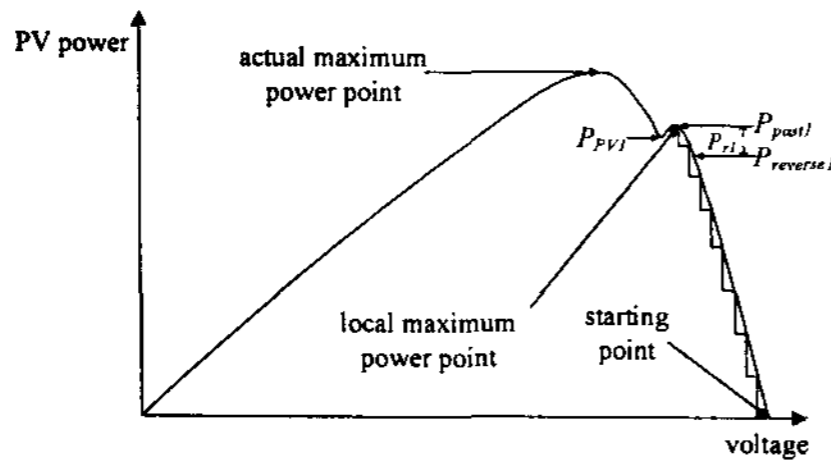


Fig. 4. Output characteristic of the PV string.

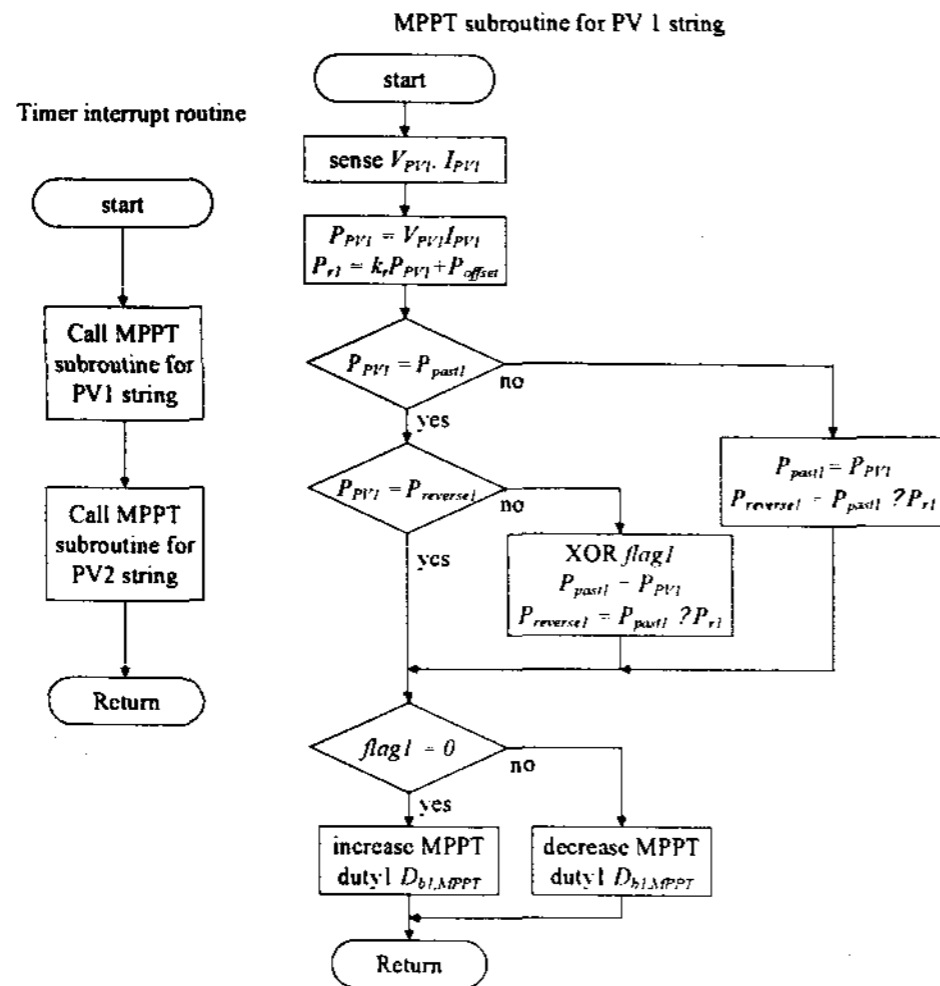


Fig. 5. Flowchart of the proposed MPPT algorithm.

2.3 입력 전류 리플 절감

계통 전압과 동일한 위상의 전류를 내면, PCS에서 계통 주파수 2배의 전력이 발생한다.

$$p_s = v_s i_s = \sqrt{2} V_s \sin \omega t \sqrt{2} I_s \sin \omega t \quad (3)$$

$$= V_s I_s (1 - \cos 2\omega t)$$

이러한 전력 리플은 태양전지에 영향을 미쳐 태양전지에 DC 전류에 계통 주파수 2배의 AC전류 리플이 더해진다. 이 현상을 제거하기 위해, 기존에는 큰 LC 필터를 연결하였다. 그러나 이 경우 가격인상의 요인이 되며, 부피와 무게도 늘어난다. 본 논문에서는 이러한 필터를 사용하지 않고, 부스트 컨버터에서 전류 보정을 하는 방식을 제안한다. MPPT로 결정된 부스트 컨버터의 시비율에 전류 리플을 보정하기 위한 추가적인 시비율을 더하여 부스트 컨버터에 인가하면, 전류 리플이 줄어든다.

3. 병렬연결 운전

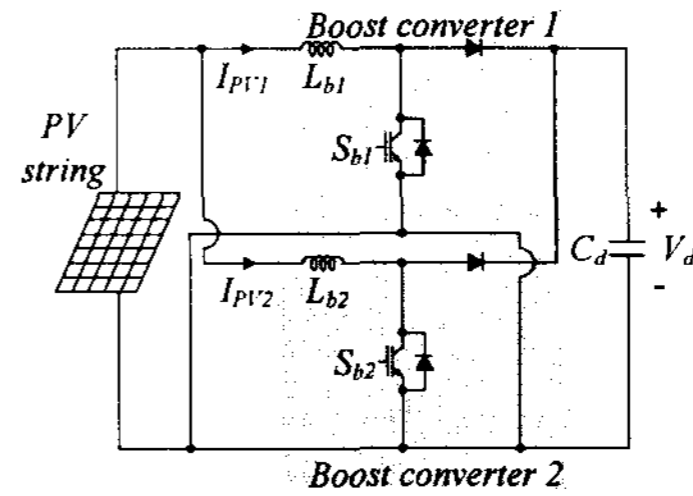
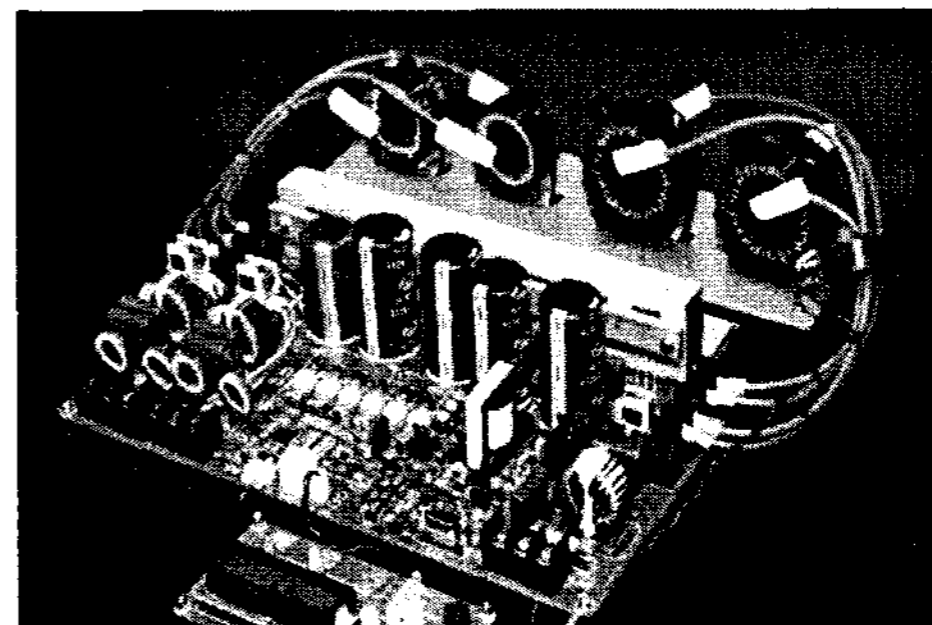


Fig. 6. Flowchart of the proposed MPPT algorithm.

그림 6은 멀티스트링 PCS의 병렬연결을 보여준다. 이때 2개의 부스트 컨버터는 인터리빙으로 작동하여, 기존의 1개의 부스트 컨버터를 이용한 센트럴 PCS에 비해 스위칭 리플을 줄일 수 있다는 장점도 있다. 2개의 부스트 컨버터에 같은 전류가 흘러야 하므로, 부스트 컨버터2의 시비율은 부스트 컨버터 1의 시비율에 전류 평형을 위한 추가적인 시비율을 더하여 전류 평형을 이룬다.

4. 실험 결과

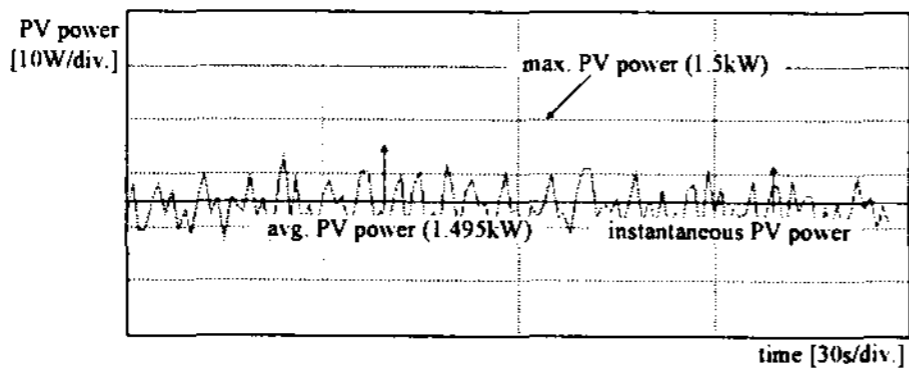


Picture. 1 Prototype of the proposed PV PCS

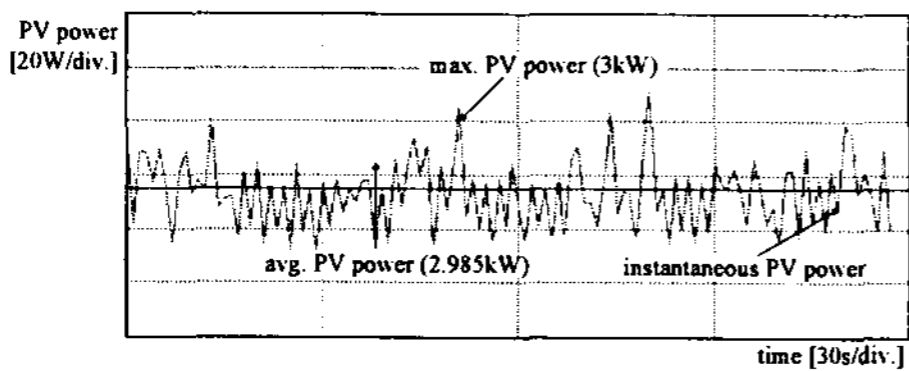
사진 1은 그림 3의 멀티스트링 PV PCS를 구현한 것이다. 상세한 사용 소자 값은 표 1에 표시하였다.

Table 1 PCS parameter

| 기호 | 값 |
|---------------|--------------|
| 용량 | 3kW |
| 계통 | 220V 60Hz |
| 스위칭 주파수 | 15kHz |
| 부스트 컨버터의 인덕터 | 2mH |
| dc link 커패시터 | 2350 μ F |
| 출력 필터 인덕터 | 2mH |
| dc link 기준 전압 | 350V |

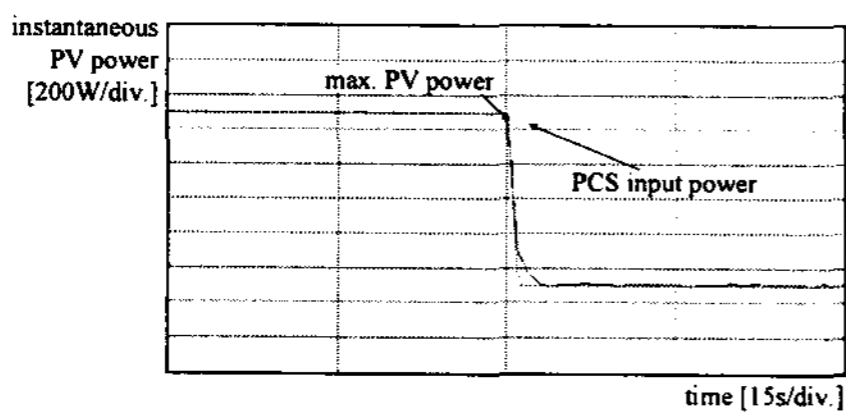


(a)

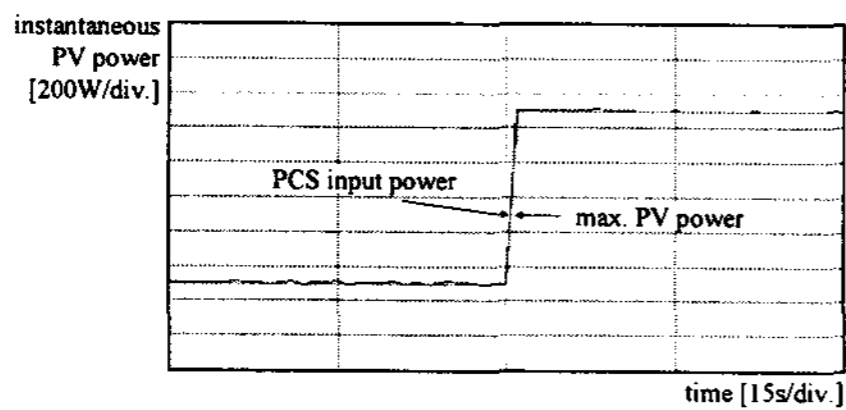


(b)

Fig. 7. PV string power and PCS input power. (a) Multi-string mode. (b) Parallel mode.

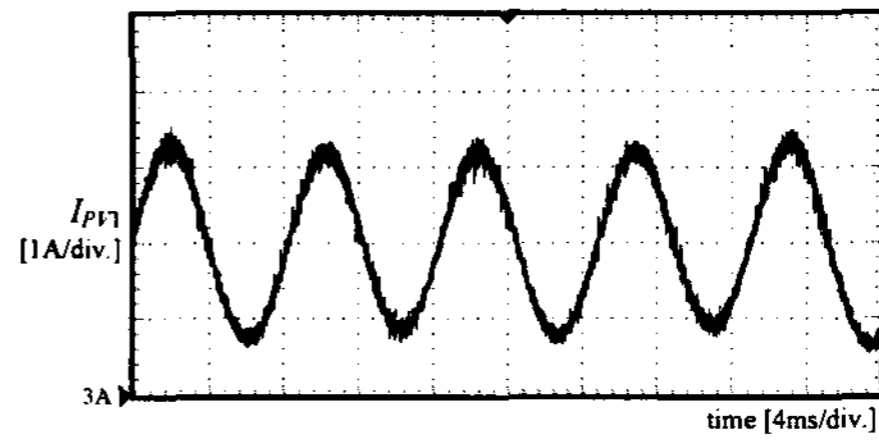


(a)

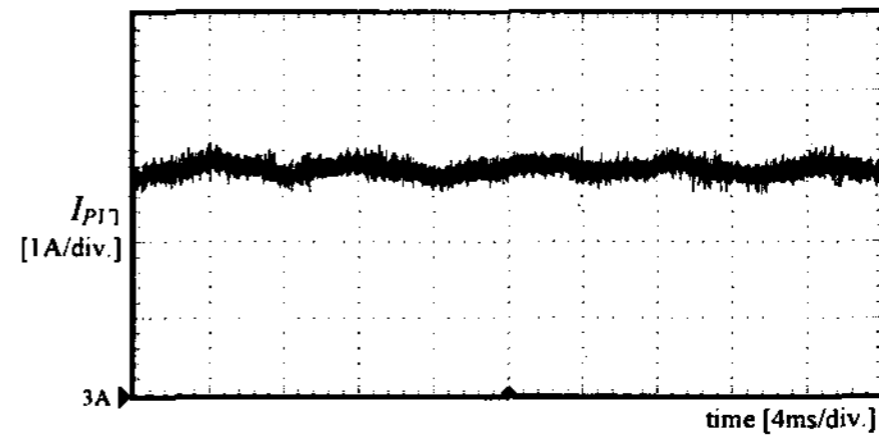


(b)

Fig. 8. Maximum PV array power and PCS input power. (a) Maximum PV array power is changed abruptly from 0.5kW to 1.5kW. (b) Maximum PV array power is changed abruptly from 1.5kW to 0.5kW.



(a)



(b)

Fig. 9. PV1 current. (a) Without the input current ripple reduction control. (b) With the input current ripple reduction control.

그림 7 (a)는 멀티스트링 mode에서의 MPPT 결과를 보여주며, (b)는 병렬 운전시의 MPPT 결과를 보여준다. MPPT 효율은 99.5% 이상으로 측정되었다. 그림 8 (a)와 (b)는 일사량이 급격하게 변화하였을 때 MPPT 특성을 나타내며, 일사량이 급격히 변화하여도 빠른 속도로 MPP를 찾아감을 보여준다. 그림 9 (a)는 입력 전류 리플 저감 알고리즘이 없는 경우의 태양전지 전류이며, (b)는 입력 전류 리플 저감 알고리즘을 적용한 경우이다. 전류 리플이 24%에서 4%로 줄어들었다.

5. 결론

계통연계형 멀티스트링 PCS의 MPPT 방식을 제안하였다. 제안된 MPPT 알고리즘은 P&O 방식을 개량한 것으로 LMPP에서 발전하는 것을 막으며 MPPT 효율이 증가되었다. 입력 필터의 사이즈 및 비용을 줄이기 위해, 입력전류 리플 저감 알고리즘을 제안하였다. 또한 병렬운전을 통해 센트럴 PCS처럼 작동할 수 있도록 하였다. 3kW급 시제품을 만들어 알고리즘의 우수성을 확인하였다.

References

- [1] Zhang, Z., Ni, H., Yao, D., Cao, R. X., and Shen, W. X., "Design of single phase grid-connected photovoltaic power plant based on string inverters," in Proc. IEEE ICIEA, p.p. 1-5, 2006.
- [2] Meinhardt, M., Cramer, G., Burger, B., and Zachrias, P., "Multi-string-converter with reduced specific cost and enhanced functionality," Solar Energy, vol. 69, no. 6, pp. 217-227, Jul. 2000.