

## Step 가변형 MPPT 제어기법과 DVR을 적용한 계통연계형 태양광 발전 시스템

(Grid-Connected Photovoltaic System Applying the Step Variable MPPT Control and DVR)

이용식\* · 정성원 · 김재현\*\*

(Yong-Sik Lee · Sung-Won Jeong · Jae-Hyeon Gim)

### Abstract

Grid-connected photovoltaic generator system requires high performance PCS(Power Conditioning System) according to the standard of 'Distributed Generation Grid-Connected Technology Standards'. This paper presents the MPPT control method which improves output efficiency through fast tracking to the maximum power point of PV and a reduced self-excited vibration. Secondly, in this paper DVR function was applied to PCS to compensate the voltage sag frequently happening for a power system.

The proposed PCS control is analyzed and compared to conventional PCS operating characteristic, the various insolation and loads, and voltage sag condition through PSIM tool. It proves the utility.

Key Words : PV System, MPPT Algorithm, Voltage Sag, Dynamic Voltage Restorer

### 1. 서 론

태양광 발전 시스템은 태양전지로부터 전력변환 및 출력 시스템에 이르기까지 태양광의 가치사슬(Value Chain) 측면에서 볼 때 각 사업 분야가 모두 중요하지만, 태양전지의 발전 전력을 변환하여 계통에 안정적으로 공급하는 PCS가 가장 중요하다고 할 수 있다. 이는 태양전지의 효율이 높다 하더라도 PCS의 동작 및

이용효율이 낮으면 전체 시스템의 경제성과 효율성이 저하될 뿐만 아니라 계통의 전력 품질 및 안정성에 영향을 줄 수가 있기 때문이다. 이에 따라 태양전지에서 발생된 전력을 계통에 연계할 때는 전력 품질규제가 뒤따르며 이를 준수해야 하므로 우수한 PCS 개발을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다[1].

일반적으로 계통연계형 태양광 발전 시스템은 태양전지와 PCS로 구성되며, PCS는 태양전지의 최대전력 출력을 위한 MPPT 제어, 계통사고 보호를 위한 단독 운전방지 기능, 계통연계를 위한 PLL(Phase Lock Loop)제어 기능을 수행한다. 이러한 시스템은 계통의 순간 전압 강하, 고장, 계통 유지, 보수작업 등으로 인해 단독운전 방지 동작을 하게 되며, '분산형 전원 배전계통 연계기술 기준-계통 재 병입'[2]에 따라 계통

\* 주저자 : 순천대학교 전기공학전공 박사과정

\*\* 교신저자 : 순천대학교 전기제어공학과 교수

Tel : 061-750-3545, Fax : 061-750-3540

E-mail : jhg@sunchon.ac.kr

접수일자 : 2012년 3월 10일

1차심사 : 2012년 3월 14일, 2차심사 : 2012년 7월 10일

심사완료 : 2012년 7월 17일

의 정상상태로 5분간 유지 후 투입하게 되어 이용률이 매우 저조하게 된다. 또한 고정된 Step 값에 의한 MPPT 제어로 자려진동이 발생하여 시스템의 출력효율이 떨어진다.

따라서 본 논문에서는 태양광 발전전력의 출력효율을 높이기 위해 가변 Step 전류 제어형 IC MPPT방법을 제시하고, 계통에 전력을 공급함과 동시에 전압강하로 인한 전력 품질을 보상하기 위한 DVR 제어기능을 적용한 계통연계형 태양광 발전 시스템을 제안한다. 제안한 시스템의 동작특성을 분석하기 위해 PSIM을 이용하여 모의실험을 하였으며, 각 부하에 따른 동작특성을 분석하였다. 또한 전압 외란 시 시스템의 동작 특성, 계통 및 부하측 전력 상태를 분석하여 시스템의 제어설계에 대한 타당성을 입증하였다.

## 2. 계통연계형 시스템 구성

계통연계형 전력변환장치는 태양광 발전의 최대전력점 추종제어, 계통연계 보호, 단독운전방지, 태양광 어레이로부터 발생된 직류전력을 상용 주파수를 가지는 교류로 변환하여 전력계통에 연계함과 동시에 전기적인 보호를 해야 한다.

본 논문에서는 전력 품질 기능을 갖는 시스템을 설계하기 위하여, 제어의 용이성 및 확장성을 고려하여 그림 1과 같이 Two-Stage 형태로 (a)의 컨버터 단과 (b)의 인버터 단으로 구성하였다[3-4].

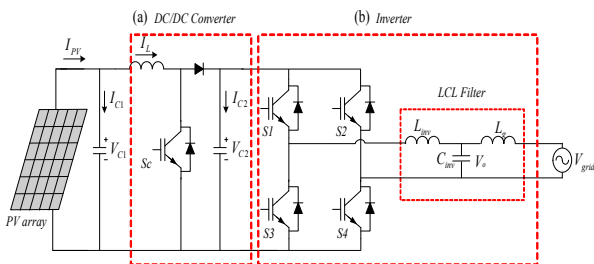


그림 1. 태양광 발전 시스템 구성  
Fig. 1. Composition of Photovoltaic System

PCS의 기본동작은 계통 전류와 동기를 취하고, 계통 전압과 필터를 통과하기 전 PCS 전압의 위상차를

조정함으로써 전력량과 흐르는 방향을 조정한다. PCS 전압위상이 계통측 보다 빠르면 계통측으로 전력이 공급되며 반대로 계통측 보다 늦으면 DC link 단의 커패시터가 충전하는 것처럼 PCS로 전력이 공급된다.

그림 1의 LCL 필터는 PCS 기본회로 구성으로 볼 때 연계리액터 L로 표현할 수 있다. 연계리액터에 흐르는 전류를  $i_{PCS}$ , 리액터의 전압강하를  $V_L$ 로 표현하여 PCS의 출력 전압 및 출력 전류와 계통 전압의 관계를 나타낼 수 있다. 리액터 L은 PWM 과형 출력의 평활 리액터도 겸하고 있으며, 인버터의 출력 전류  $i_{PCS}$ 는 계통 전압  $V_{grid}$ 와 항상 동상으로 되도록 제어되며 리액터의 전압강하  $V_L$ 은 출력 전류  $i_{PCS}$ 에 대해서  $90^\circ$  위상차를 갖게 된다.

따라서 PCS의 출력 전력은 식 (1), (2)를 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 PCS의 전압, 위상각을 통해 제어됨을 확인할 수 있다.

$$I_{PCS} = \frac{V_L}{\omega L} \tag{1}$$

$$V_L = V_o \cdot \sin\theta \tag{2}$$

$$P = \frac{V_{grid} \cdot V_o \cdot \sin\theta}{\omega L} \tag{3}$$

## 3. 전력 품질 개선을 위한 시스템

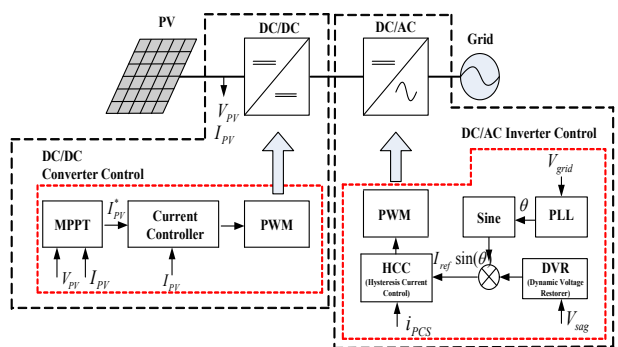


그림 2. 전력 품질 개선을 위한 PCS 제어  
Fig. 2. PCS control for power quality improvement

그림 2는 본 논문에서 제시한 PCS 제어구성도이며, Two-Stage 형태로 컨버터 단은 MPPT 제어

로 최대전력점을 추종하며, 인버터단은 PLL 제어 로 위상추종 및 기준 전류로부터 HCC(Hysteresis Current Control)로 계통에 연계한다. 또한 계통 전압에 따라 DVR 제어가 가능하도록 설계하였다.

### 3.1 개선된 MPPT제어

MPPT 제어는 일사량과 온도변화에 따라 가변하는 태양전지 어레이의 최대전력점을 추정할 수 있는 전압 또는 전류 지령치를 생성하며, 태양전지 어레이의 출력 값과 오차연산 후 PI 제어를 통해 PWM 신호를 생성한다. 대표적인 MPPT 제어방법으로 PO(Perturbation and Observation), IC (Incremental Conductance) 등이 있다. PO 방법은 태양전지의 전압과 전력을 이용하는 방법으로 현재의 값과 이전 값을 비교하여 지령 전압을 결정하며, 간단한 피드백 구조와 제어의 용이성으로 널리 사용되고 있지만, 어레이 단자전압이 MPP에 이르렀을 때 빠른 환경변화에 민감하게 변화할 수 없는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고자 태양전지 전압과 출력전력의 기울기에서 최대전력점이 되는 ‘영(0)’점을 찾는 계산에 기초를 두는 IC 방법이 제안되었다. IC 방법은 환경변화에 대한 추적속도가 빠르다는 장점이 있으나, 최대전력점을 찾기 위한 최초 동작점과 기준 전압 값의 변동 및 변화되는 환경조건에 의해 PO 방법과 동일하게 Step 값의 크기에 따라 자려진동이 발생하게 되어 손실을 갖게 된다[5-6].

따라서 본 논문에서는 최대전력점 추적속도를 높이고 자려진동을 억제하기 위해 전류제어형 IC 제어기법을 제안하였다. 초기 Step 값은 0.1로 설정하고 태양전지 어레이의 출력 전력 오차  $\Delta P$ 의 크기에 따라 표 1과 같이 Step 변동값을 설정하였으며, MPPT 알고리즘 순서도는 그림 3과 같다.

환경변화에 대해 태양전지 특성은 전압보다 전류의 변화 비율이 높기 때문에 전류제어형 알고리즘이 전압제어형 알고리즘 보다 추적속도가 빠르며, 출력 전력 오차에 따른 Step 값의 조정에 의해 자려진동이 줄어들게 된다.

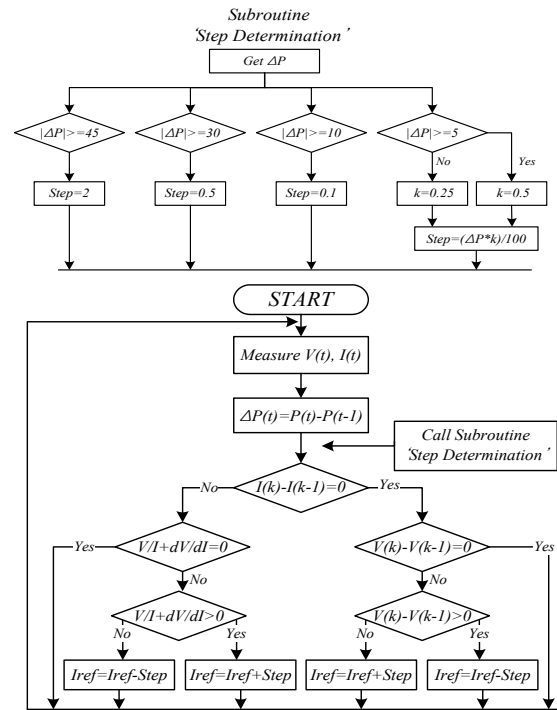


그림 3. 개선된 IC MPPT 알고리즘 순서도  
Fig. 3. The improved IC MPPT algorithm flowchart

표 1. PV 출력 전력의 오차에 대한 Step 값  
Table 1. Step value about PV power output

Case	$\Delta P$ Value	Step Value
Case 1	$\Delta P \geq 45$	Step = 2
Case 2	$\Delta P \geq 30$	Step = 0.5
Case 3	$\Delta P \geq 10$	Step = 0.1
Case 4	$\Delta P \geq 5$	$Step = \frac{ \Delta P  \cdot K}{100}$
	$\Delta P < 5$	

### 3.2 DVR 제어

계통 전압에 왜곡이 일어날 경우 전력 품질에 영향을 미치게 되며, 전압 강하를 보상하기 위해 계통선로에 보상기기를 설치한다. 본 논문에서는 추가설비 없이 전력 품질 보상을 위해 PCS에 DVR 기반의 제어 알고리즘을 추가 적용하였다. DVR의 주요기능은 IEEE Std. 1159에서 규정하는 전압강하에 대하여 부하 측의 전압을 보상하는 것으로써 시스템 해석을 위한 등가회로도에는 그림 4와 같다[7].

그림 5는 전압강하에 대한 보상방법 벡터도로 사고 전 전압벡터  $V_{pre-sag}$ 에서 사고 후 전압벡터  $V_{sag}$ 의 차이를 보상하게 되며, 부하전류  $I_L$ 을 이용하여 보상 벡터의 위상각을 구할 수 있다. 이 벡터도를 이용한 DVR 전압보상 방법은 동상기법(In-phase control), 사고 전 기법(Pre-sag control), 최소 에너지 기법(Minimum energy control)의 3가지가 있다[7-9].

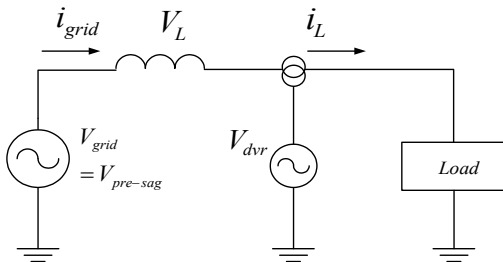


그림 4. DVR 등가회로도  
Fig. 4. DVR equivalent circuit diagram

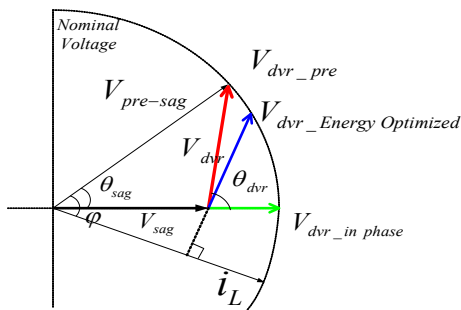


그림 5. 보상전압 계산 방법  
Fig. 5. Calculation method of compensation voltage

본 논문에서는 전력 품질 기능을 가진 PCS를 최적 상태로 제어하기 위해 사고 전 전압의 크기와 위상각에 동기 된 전압에서 사고 시의 전압의 차의 크기에 따라 보상전압( $V_{dvr\_pre}$ )이 결정되는 사고 전 기법을 사용하였으며, 보상전압 크기와 보상 위상각은 식 (4), (5)와 같다.

$$|V_{dvr}| = |V_{pre-sag}| - |V_{sag}| \quad (4)$$

$$\theta_{dvr} = \tan^{-1} \left( \frac{V_{pre-sag} \sin(\theta_{pre-sag})}{V_{pre-sag} \cos(\theta_{pre-sag}) - V_{sag} \cos(\theta_{sag})} \right) \quad (5)$$

그림 6은 본 논문에서 제안한 전압 강하 개선 기능을 위한 제어블록도이며, DC link의 전압 값에 대해 기준 전류 진폭( $I_{dvr\_ref\_amp}$ )이 결정되고, PLL의 위상 정보와의 연산으로 기준 전류( $I_{dvr\_ref\_amp} \sin(\theta_{dvr})$ )를 결정한 후 HCC에 의해 PWM 신호를 생성한다.

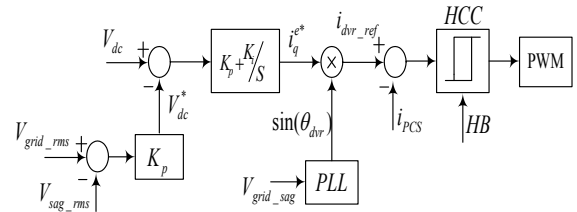


그림 6. 전력 품질 보상제어  
Fig. 6. Control of power quality compensation

#### 4. 시스템 구성 및 성능결과

태양전지 모델링은 KYOCERA-KC200GH-2P의 단 일조건 사양으로 1,200[W]로 구성하였으며, PCS의 수 동소자 설계조건은 표 2와 같다. 그림 7은 전체 시스템 구성도이며, 태양전지의 전압에 의한 스위칭 변환으로 동작한다.

표 2. 모의실험을 위한 PCS 설계조건  
Table 2. Designed to simulate conditions for PCS

변수	크기	변수	크기
계통 전압 [ $V_s$ ]	220	DC link Capacitor [ $\mu F$ ]	2200
온도 [ $^{\circ}C$ ]	25~28	$L_{inv}$ [ $mH$ ]	6
일사량 [ $W/m^2$ ]	200~1,000	$L_{grid}$ [ $mH$ ]	2
Series TR	1:1	$C_{inv}$ [ $\mu F$ ]	22
Sag [pu]	0.1~0.9	Load [VA]	600~2,000

시스템 샘플링 시간은  $5[\mu s]$ 이며, 동작시간은 0.5~1.0[s]으로 계통의 정상상태와 전압강하 상태로 구분하여 비교분석하였다. 또한 전압강하 지속 시간을 최대 200[ms]로 하고, 200[ms] 이상 지속될 경우 저전압으로 규정하며 전압강하 크기는 0.1~0.7[pu]에 대해 실험하였다.

Step 가변형 MPPT 제어기법과 DVR을 적용한 계통연계형 태양광 발전 시스템

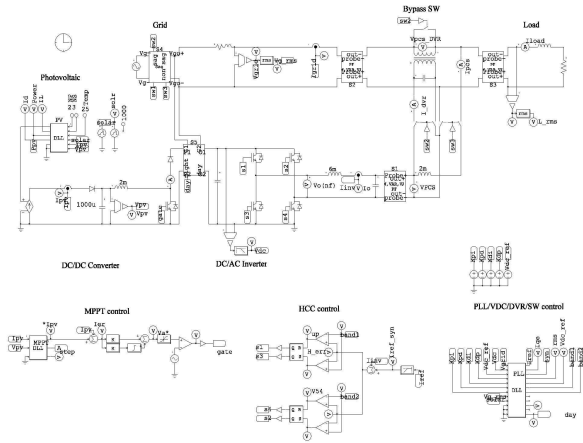
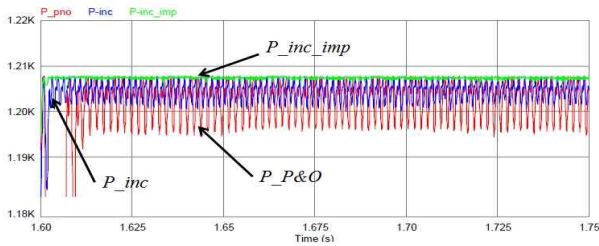
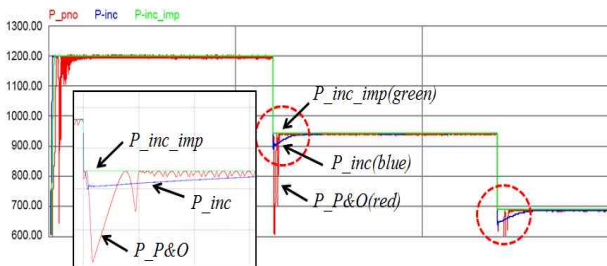


그림 7. PCS 제어를 위한 시스템 회로도  
Fig. 7. System circuit for PCS control



(a) 일사량 1000 [W/m<sup>2</sup>]



(b) 일사량 변경 (1000 ~ 600 [W/m<sup>2</sup>])

그림 8. MPPT 비교 모의실험  
Fig. 8. MPPT comparison simulation

그림 8은 본 논문에서 제안한 MPPT와 종래의 PO, IC MPPT의 일사량 변경에 따른 비교 결과로써 PO(989.30[W]), IC(1016.68[W]), 개선된 IC(1059.17 [W])의 평균 전력량을 갖는다. 개선된 IC MPPT 제어 특성이 자러진동이 적고 최대전력점에 가장 빠르게 도달하는 것을 확인할 수 있다.

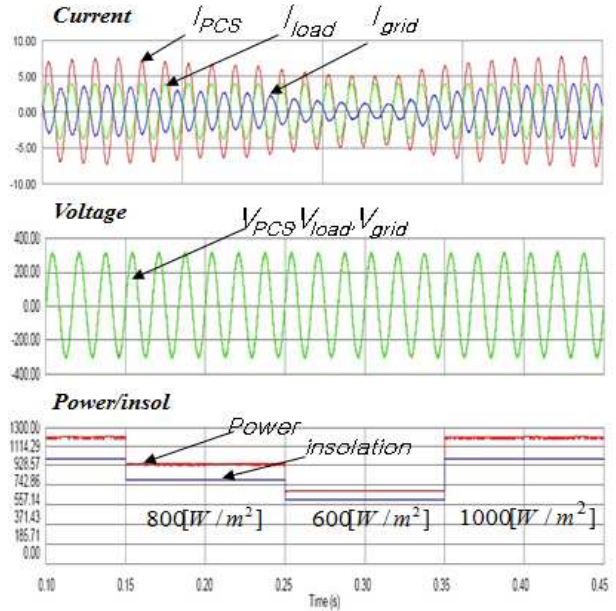


그림 9. 600[W] 저항 부하 시 PCS 출력 전류  
Fig. 9. PCS output current at 600[W] resistance load

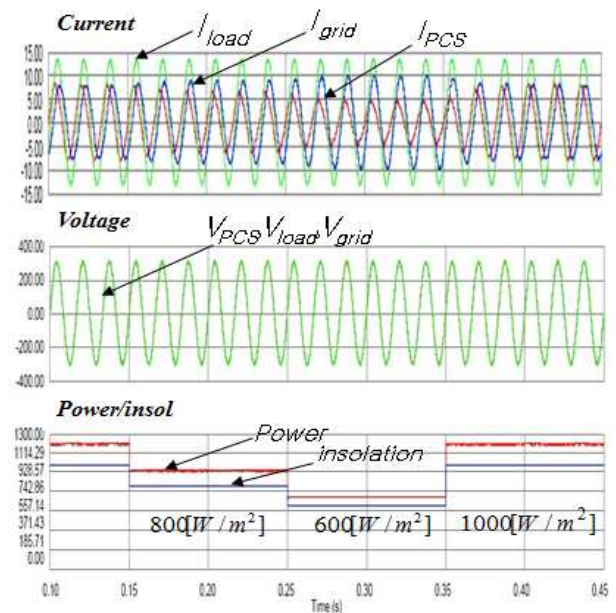


그림 10. 2(kVA) RL부하 시 PCS 출력 전류  
Fig. 10. PCS output current at 2(kVA) RL load

그림 9는 일사량이 600~1,000 [W/m<sup>2</sup>]로 변동하는 경우에 대한 600[W] 저항부하에 대한 결과파형으로

태양광 발전으로부터 부하에 대한 전력을 공급하고 잉여전력은 계통에 공급하되 일사량에 따라 달라짐을 확인할 수 있다.

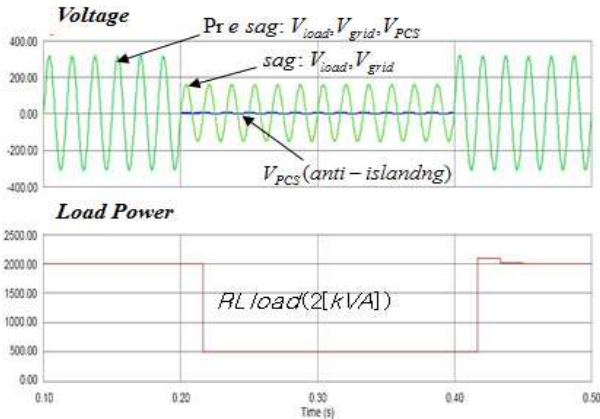


그림 11. 전압강하 및 부하전력 결과 파형  
Fig. 11. The result waveform of voltage sag and load power

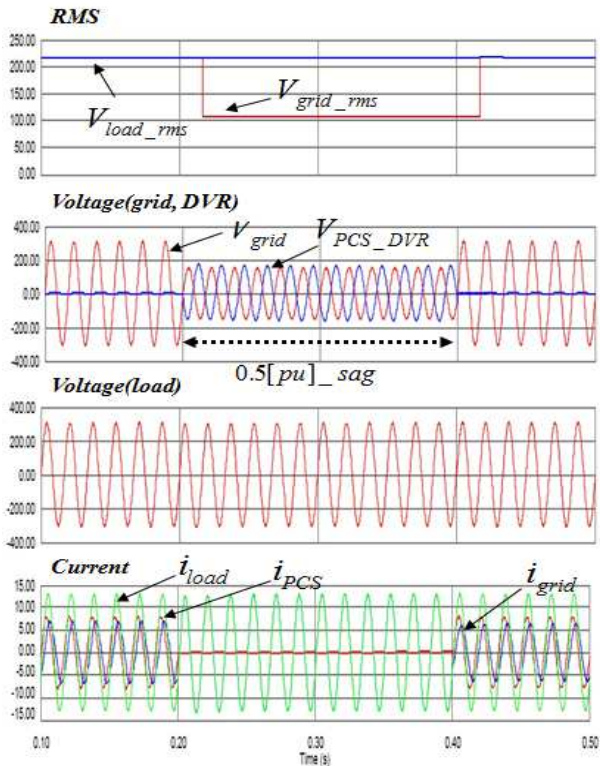


그림 12. 0.5(pu) 전압강하에 대한 결과 파형  
Fig. 12. The result waveform about voltage sag 0.5(pu)

그림 10은 2[kVA] RL 부하에 대한 전류, 전압 결과 특성으로 PCS의 출력 전력은 부하에 공급하되 부족한 부분은 계통에서 공급하며, 정상상태 전압은 계통의 전압과 동상이고, 각 부하에 공급되는 전류특성을 분석함으로써 PCS의 기본동작 특성을 확인할 수 있다.

그림 11은 전압강하 발생에 대한 일반적인 계통연계형 태양광 시스템 및 부하전력 특성을 나타낸 것으로 계통의 전압강하 발생시 태양광 발전 시스템은 단독 운전 방지기능으로 계통연계를 차단하게 된다.

그림 12는 일사량 최적상태에서 0.2~0.4[s] 동안 0.5[pu] 전압강하 발생에 대한 결과특성으로 시스템에서 계통의 전압강하를 보상하여 부하측 전압이 일정함을 나타낸다.

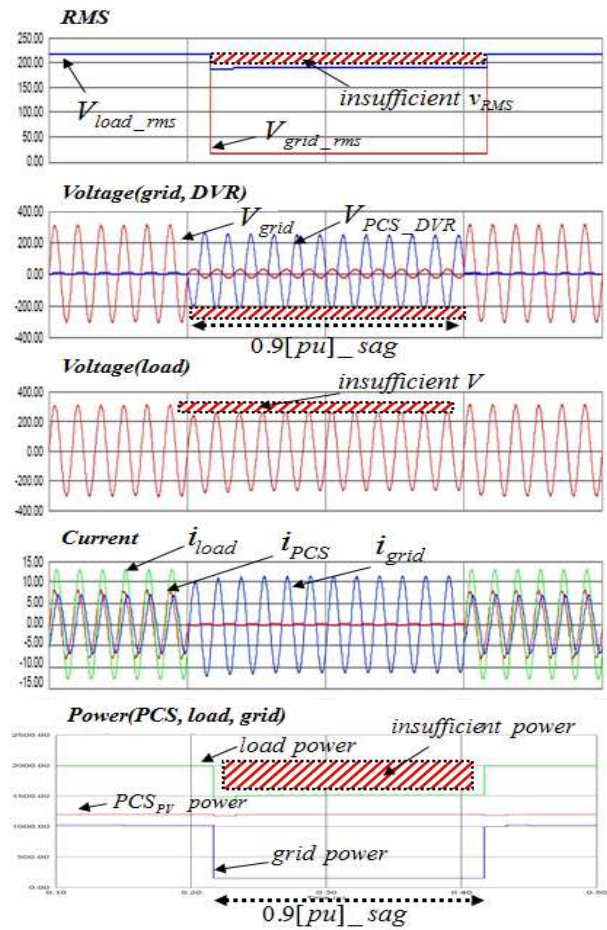


그림 13. 0.9(pu) 전압강하에 대한 결과 파형  
Fig. 13. The result waveform about voltage sag 0.9(pu)

그림 13은 0.2~0.4[s] 동안 0.9[pu] 전압강하가 발생한 2[kVA] 부하에 대한 결과파형으로 계통의 전압강하에 대해 전압보상이 부족한 상태를 나타내고 있다. 2[kVA] 부하의 0.9[pu] 전압강하에 대한 보상전력량은 1,700[W]이지만 제안한 시스템의 태양광 발전 최대 출력전력은 1.2[kW]로서 약 500[W]의 부족 전력에 따라 보상 제한을 나타내고 있다.

본 논문에서 사용한 태양전지 어레이는 최대 일사량인 조건에서 1.2[kW] 출력을 갖으며, 2[kVA] 부하에 대해 전압강하를 0.1~0.9[pu]까지 분석한 결과 그림 14와 같이 최대 0.6[pu] 전압강하까지 전압보상이 가능함을 확인할 수 있다.

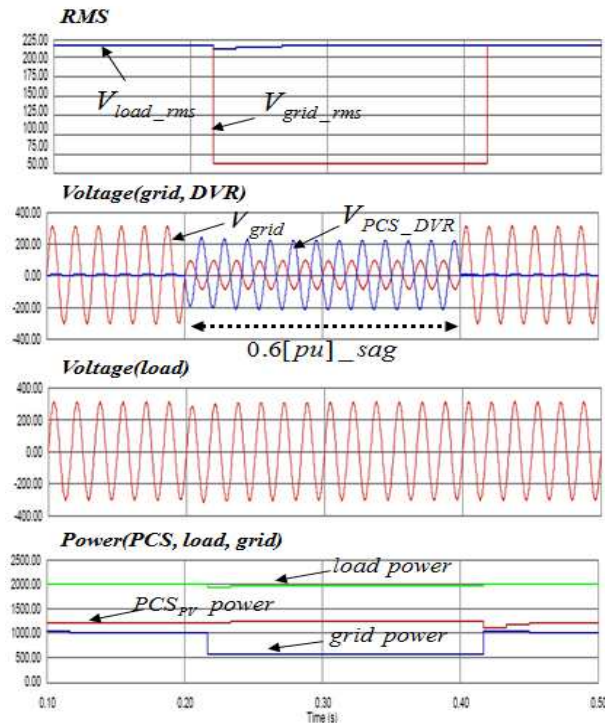


그림 14. 0.6(pu) 전압강하에 대한 결과 파형  
Fig. 14. The result waveform about voltage sag 0.6(pu)

그림 15는 전압강하 기간이 200[ms] 이상 지속될 경우 계통사고 및 선로의 유지보수로 판단하여 PCS의 단독운전 방지기능을 통하여 계통연계를 차단한 결과 파형이다. 이는 ‘분산형 전원 배전계통 연계 기술기준 -단독운전 방지 및 계통 재병입’에 따라 계통 고장 및

사고 시 0.5[s] 이내 분산형 전원을 전력계통에서 분리시키고, 전력계통의 정상상태로 5분간 유지된 후 재병입할 수 있는 규정에 따라 동작한다.

전압보상 결과에 대한 부하전압의 실효치 값은 정상상태 대비 약 2~3[%] 오차를 보이고 있지만, 이는 국내 전압규정의 6[%]에 만족하며, 제안한 시스템을 통하여 전압강하에 대한 보상이 가능함을 확인할 수 있다.

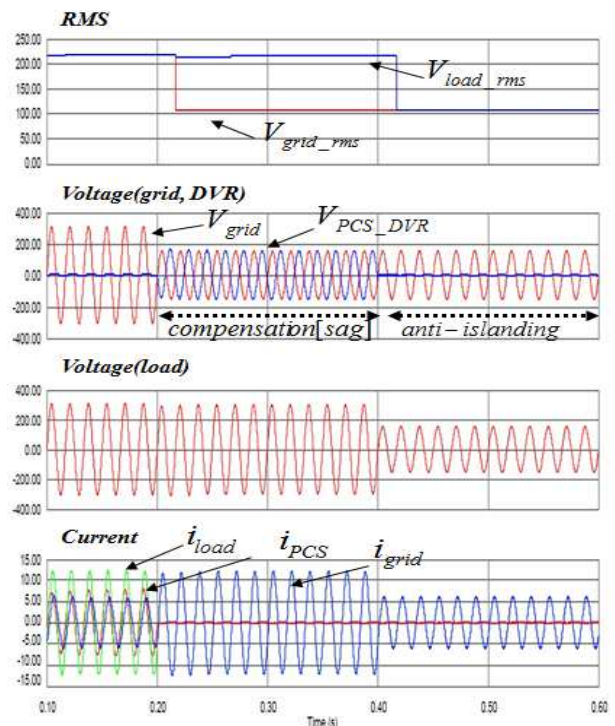


그림 15. 단독운전 방지에 대한 결과 파형  
Fig. 15. The result waveform about anti-islanding

#### 4. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템 구성을 위해 이론적 해석을 토대로 동작원리 및 시스템 제어 알고리즘을 분석한 후, 추가 제어기능과 개선된 제어 알고리즘을 적용하였다. 제안한 시스템의 유용성을 확인하기 위하여 PSIM 및 C/C++를 사용하여 PCS의 각 부하에 따른 출력 및 전압강하에 대한 모의실험 하였다. 본 논문의 연구내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 태양광 발전의 출력 효율을 높이기 위해 가변 Step 및 전류 제어형 IC MPPT 제어기법을 제시하고, 종래의 PO, IC MPPT 제어를 비교하여 추적 속도가 빠르고 자려진동이 작아 출력 효율이 향상되는 것을 입증하였다.

나. 계통연계형 태양광 발전 시스템은 전압강하 외란에 대해 단독운전 방지기능을 하게 되어 이용효율이 낮아지게 되는데, 제안한 시스템은 DVR 제어기능으로 순간 전압강하를 보상한 후, 계통상태에 따라 단독운전 방지기능을 하기 때문에 배전계통의 전압 강하를 개선하고 시스템의 이용효율도 높였다.

본 논문은 태양광 발전 시스템의 출력 및 이용효율을 높이고, 전압강하를 보상하여 배전계통의 전력 품질을 향상하기 위한 제어방법으로써 PCS는 DVR 제어기능을 수행하지만, 일사량에 따라 PCS의 출력 특성이 변하기 때문에 전압보상 범위의 한계를 갖게 된다. 따라서 보다 높은 보상 범위를 갖기 위해서는 태양광 발전의 출력 전력용량을 높이거나 풍력발전 및 연료전지 등의 신재생 에너지와 병합한 하이브리드 시스템으로 전압 강하를 보상함으로써 계통의 전력 품질을 향상 시킬 수 있을 것이다.

## References

[1] Sung-Jun Park, Sung-Geun Song, Yong-Koo Kim, Research trends of Photovoltaic Power Condition System, pp. 47, 2010.

[2] KEPCO, 'Distributed Generation Grid-Connected Technology Standards', 2010.

[3] Y. Xue, L. Chang, S. B. Kjaer, J. Bordonau and T. Shimizu, "Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: an overview", IEEE Transactions PE, Vol. 19, No. 5, pp. 1305-1314, Sep. 2004.

[4] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner and V.G. Agelidis, "Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview", IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference 02, Vol. 4, pp. 1995-2000. Jun. 2002.

[5] L. Fangrui, D. Shanxu, L. Fei, L. Bangyin, K. Yong, "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV systems", IEEE Trans. on IE, Vol. 55, No. 7, pp. 2622-2628, 2008.

[6] Z. Chao, Z. Dean, W. Jinjing, An Yi, C. Guichang, "A novel two-mode MPPT method for photovoltaic power generation system", IEEE 6th International (IPEMC '09), pp. 2100-2102, May. 2009.

[7] F.M. Mahdianpoor, R.A. Hooshmand, M. Ataei, "A New Approach to Multifunctional Dynamic Voltage Restorer Implementation for Emergency Control in Distribution Systems", IEEE Trans. on PD, Vol. 26, No. 2, pp. 882-890, 2011.

[8] J.G. Nielsen, F. Blaabjerg, "A detailed comparison system topologies for dynamic voltage restorers", IEEE Trans. on IA, Vol. 41, No. 5, pp. 1272-1280, 2005.

[9] C. Meyer, C. Romaus, and R.W. De Doncker, "Optimized Control Strategy for a Medium-Voltage DVR-Theoretical Investigations and Experimental Results", IEEE Trans. on PE, Vol. 23, No. 6, pp. 2746 - 2754, 2008.

## ◇ 저자소개 ◇



**이용식 (李龍植)**

1983년 12월 9일생. 2008년 순천대 전기 제어공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기 전자정보통신공학부 박사과정.  
E-mail : ys5675@sunchon.ac.kr



**정성원 (鄭盛元)**

1975년 11월 26일생. 2002년 순천대 전기 제어공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 2008년 동 대학원 졸업(박사). 현재 (주)SDN 재직.  
E-mail : ww180@naver.com



**김재현 (金在顯)**

1956년 1월 25일생. 1977년 홍익대 전기 공학과 졸업. 1989년 University of Texas at Arlington 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(박사). 현재 국립 순천대학교 전기제어공학과 교수.  
E-mail : jhg@sunchon.ac.kr