

# 계통 연계 PV-ESS 확장성 확보를 위한 병렬 DC-모듈형 PCS 설계

황락훈\*, 나승권\*\*, 최병상\*\*

## The bidirectional DC module type PCS design for the System Inter Connection PV-ESS of Secure to Expandability

Lark-Hoon Hwang\*, Seung-Kwon Na\*\*, Byung-Sang Choi\*\*

**요약** 상용계통과 연계한 PV 시스템은 인버터의 특성과 더불어 소형, 고 역률, 낮은 고조파 출력, 고 신뢰성, 최대출력 운전, 저비용 등의 장점이 요구된다. 태양광발전시스템의 PV 에너지를 계통과 부하로 전달하기 위해 양방향의 PCS가 요구되어 진다. 본 논문에서는 태양광 발전의 ESS를 고려한 PCS를 제안하여 부하평준화를 통한 전력의 안정적인 공급을 확인하고자 한다. 이를 위해 일사량과 부하량에 따른 5단계의 동작 모드 알고리즘을 제안하고, 충/방전 제어를 위한 제어기를 설계 하였다. 양방향의 효율적인 에너지 전달을 위해 DC-link단에 양방향 컨버터 및 배터리를 연결하고, 연계형 인버터를 통해 DC-link 전압 및 인버터 출력전압을 제어하였다. 제안된 시스템의 타당성을 입증하기 위해 PSIM을 사용한 시뮬레이션을 수행하여 타당성과 안정성을 검토하였으며, 이를 확인하기 위해 3[kW] PCS를 제작하여 실험하였다. 실험 결과를 통해 제안된 시스템에 요구되어지는 특성을 검증하였으며 기존 시스템에 비해 강한 시스템을 구성하였다.

**Abstract** In this paper, the PV system with a link to the commercial system needs some advantages like small capacity, high power factor, high reliability, low harmonic output, maximum power operation of solar cell, and low cost, etc. as well as the properties of inverter. To transfer the PV energy of photovoltaic power generation system to the system and load, it requires PCS in both directions. The purpose of this paper is to confirm the stable power supply through the load leveling by presenting the PCS considering ESS of photovoltaic power generation. In order to achieve these purpose, 5 step process of operation mode algorithm were used according to the solar insolation amount and load capacity and the controller for charging/ discharging control was designed. For bidirectional and effective energy transfer, the bidirectional converter and battery at DC-link stage were connected and the DC-link voltage and inverter output voltage through the interactive inverter were controlled. In order to prove the validity of the suggested system, the simulation using PSIM was performed and were reviewed for its validity and stability. The 3[kW] PCS was manufactured and its test was conducted in order to check this situation. In addition, the system characteristics suggested through the test results was verified and the PCS system presented in this study was excellent and stronger than that of before system.

**Key words** : charging/ discharging control, ESS, PCS, photovoltaic power, PSIM, PV system,

### 1. 서론

태양광에너지는 풍부하고 이를 이용한 태양광 발

전시스템은 설치가 쉬울 뿐만 아니라 수명이 길며 유지 보수가 용이하여 신재생 에너지원 가운데 차세

This Paper was supported by research Fund of Semyung University in 2020.

\*Department of Electrical Engineering, Semyung University / Lark-Hoon Hwang

\*\*Corresponding Author : Department of Electrical Engineering, Semyung University (lhwang@Semyung.ac.kr)

Received January 13, 2021

Revised January 14, 2021

Accepted January 26, 2021

대 에너지원으로 가장 각광받고 있다.[1]

태양광발전시스템은 태양전지에서 생산된 전력을 안정적으로 수용자가 사용할 수 있도록 하기 위한 전력변환 제어시스템이다. 태양전지의 출력은 직류이나 대부분의 부하는 교류부하이므로 태양전지의 상용화를 위해 DC-AC 변환장치가 필수적이며 상용계통과의 연계 운전 시 단위 역률의 정현파 전압, 전류를 계통에 공급해 주어야 한다. 일사량에 따른 영향이 큰 태양전지의 출력은 태양전지로부터 가능한 많은 에너지를 얻어내기 해 항상 최대 출력점을 추종하도록 제어해야 한다.[2]~[8] 그러나 기존의 중앙 집중형 태양광발전시스템의 경우 모듈간의 전력 부정합 문제와 모듈의 주변 환경에 의한 부분 음영으로 인해 모듈이 최대 출력점에서 발전하지 못하고, 스트링형 태양광발전시스템의 경우도 여전한 출력감소 문제와 더불어 발전단가가 상승하는 단점이 있다. 또한 DC-모듈형 태양광발전시스템의 경우 증설이 어렵고 고가의 직류차단기를 사용해야 한다는 단점이 있으며, AC-모듈형 태양광발전시스템의 경우 설치비용이 높고 대용량 시스템 구성이 어려운 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 기존의 태양광발전시스템이 갖는 단점의 개선 방안으로 직류차단기가 요구되지 않고 유지 보수 및 용량 증설이 용이한 병렬 DC-모듈형 전력변환시스템을 제안한다. 태양광에너지를 대상에 맞는 전력형태로 변환하려면 인버터(DC-AC), 컨버터(DC-DC)등을 포함한 PCS(Power Conditioning System)가 요구 된다.[5]~[7] 일반적으로 상용계통과 연계한 PV시스템은 인버터의 특성과 더불어 소형의 고효율, 고 역률, 고 신뢰성, 태양전지의 최대 출력운전, 낮은 고조파 출력, 저비용 등 계통연계된 PCS의 장점이 요구된다. 태양광 발전시스템의 PCS는 PV(photovoltaic) 에너지를 단방향 형태로 계통 또는 부하로만 전달하였으나 최근에는 ESS를 이용한 예비전력과 잉여 태양광에너지를 저장하기 위한 양방향 형태의 PCS연구가 활발히 진행되고 있다.[8]~[12] ESS는 전력요금이 싼 심야 시간에 배터리를 충전하고 전력요금이 비싼 주간에 배터리 에너지를 태양광발전전력과 함께 계통으로 공급함으로

써 전력 공급의 유연성을 확보하게 해준다. 또한 수요 예측의 신뢰성 확보를 통해 전력공급자가 효율적인 발전을 기획할 수 있다.[13]~[15]

본 논문에서는 시간별 일사량과 부하의 요구량을 반영한 5단계의 동작 모드 알고리즘을 제안하여 제어를 설계하였으며 PSIM을 사용한 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기의 타당성과 안정성을 검토하였고, 제안된 시스템의 검증에 위해 3[kW]급 PCS를 구성하여 실험을 수행하였다.

## 2. 태양광발전과 PCS

### 2.1 태양광발전의 PCS 특성

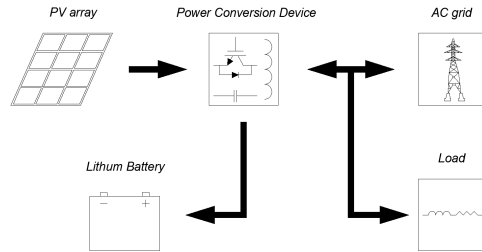


그림 1. ESS를 고려한 PCS 구성  
Fig. 1. PCS configuration considering ESS

그림 1은 주 에너지원으로 태양전지 발전전력과 계통전력을 사용하고, 보조 에너지원으로 리튬폴리머 배터리를 사용한 PCS의 구성을 나타낸다. 본 논문에서 동작 모드에 따른 PCS의 제어방법 및 충/방전 제어 알고리즘의 검증을 위해 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 3 [kW]급 하드웨어시스템을 제작하여 실험하였다.

### 2.2 태양광발전시스템

그림 2는 리튬폴리머 배터리 기반의 PCS의 구성을 나타내었으며 태양전지어레이, 리튬폴리머 배터리 팩, 가정용 부하, 계통, 부스트컨버터, 양방향 컨버터, 계통연계형 인버터로 구성된다. 부스트컨버터는 태양전지의 MPPT(Maximum Power Point Tracking)를 수행하며 계통연계형 인버터는

DC-link의 제어 및 PLL(Phase Locked Loop)을 통한 계통연계를 담당한다. 또한 양방향 컨버터는 리튬폴리머 배터리의 충전/방전 시 전류제어를 수행한다.[16]~[20] 그림 2에 나타난 PCS 전력변환시스템은 태양전지의 출력력을 하나의 대용량 전력변환장치에 연결하므로 단위 용량당 발전시스템의 단가가 감소하고, 구조가 간단한 장점이 있다. 그러나 태양광 어레이 전체의 MPPT를 하나의 대용량 전력변환장치가 수행하기 때문에 태양전지간의 전력 부정합 문제 및 태양전지모듈의 주변 환경에 따른 부분 음영의 발생에 의해 각각의 태양전지모듈이 MPPT를 수행하지 못하는 단점을 갖는다.

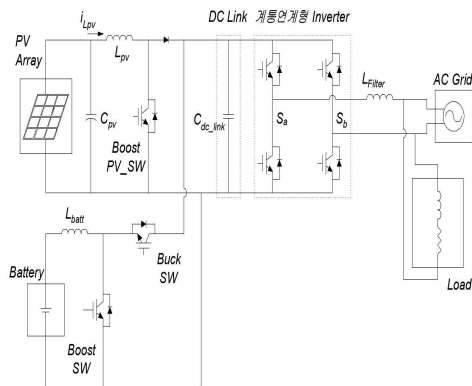


그림 2. PCS 전력변환시스템  
Fig. 2. PCS power conversion system

2.3. 배터리와 부하에 연결된 PV모듈

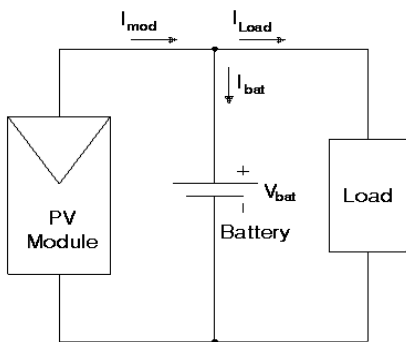


그림 3. 태양전지 모듈의 PSPICE 등가회로  
Fig. 3. PV module PSPICE equivalent circuit

배터리와 부하에 대한 PV 시스템은 그림 3에 나타난 것과 같으며 여기서 3개의 소자들은 병렬로 연결되었다. 키르히호프의 전류법칙(KCL)에 의해 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$I_{mod} = I_{bat} + I_{load} \tag{1}$$

여기서,  $I_{mod}$  : PV시스템의 출력전류,  $I_{bat}$  : 배터리로 흐르는 전류,  $I_{load}$ :부하에 흐르는 전류 리튬이온 전지배터리 모델 그림 3에 의한 전압과 전류 시뮬레이션 파형을 그림 4에 나타내었다.

2.4. DC-DC 컨버터 PLL 제어기법

태양광 발전시스템의 계통연계 발전은 역률, 유효전력, 무효전력 등의 제어 성능이 계통과 위상 동기화를 통해 결정되므로 PLL(Phase Locked Loop) 제어기법이 요구된다. PLL은 계통의 위상을 추정하는 기법으로서 현재 다양한 방법들이 소개되어 있다.단상 시스템의 대표적인 PLL 기법으로는 영점 검출방식 및 가상 2상 방식이 있다. 영점검출방법은 계통 전압의 영점을 검출하여 위상을 초기화하는 방법으로 반주기마다 영점을 지나는 점에서 검출한 위상차를 바탕으로 위상을 제어하고 추정 주파수로 위상을 계산한다.

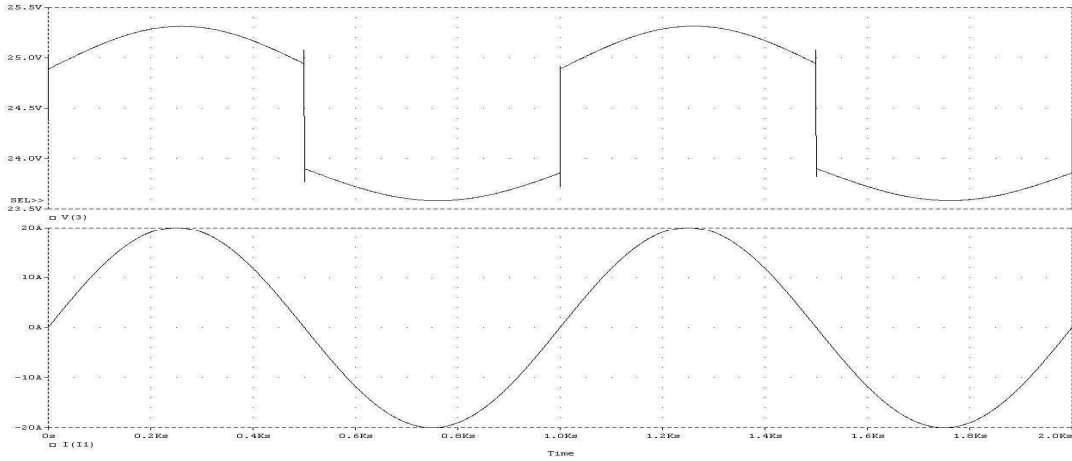


그림 4. 전류 및 전압 시뮬레이션 파형  
Fig. 4. Simulation of current and voltage waveform

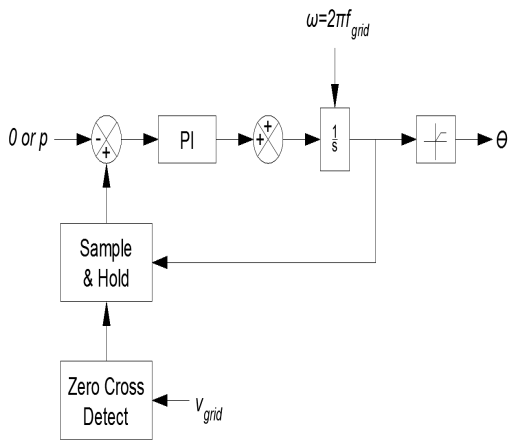


그림 5. 영점 검출방식을 이용한 위상제어 블록도  
Fig. 5. Phase control block diagram using zero point detection method

그림 5는 영점 검출방식을 이용한 위상제어 블록도이다. 연산 값이 음일 경우 극성의 반전을 의미하므로 그 사이에 영점이 존재하는 것으로 추정하며 현재 값의 부호를 통하여 0과  $\pi$ 를 구분한다. 이러한 방식은 제어기의 구조가 매우 간단하여 구현이 쉽다는 장점이 있으나 노이즈에 민감하다는 단점을 갖는다. 예컨대 영점부근에 외부 노이즈 및 고조파가

존재할 경우 그림 6의 (b)에서 보여 지는 것처럼  $t_1, t_2, t_3$ 를 영점으로 검출하는 오류가 발생하여 잘못된 위상을 검출하게 된다.

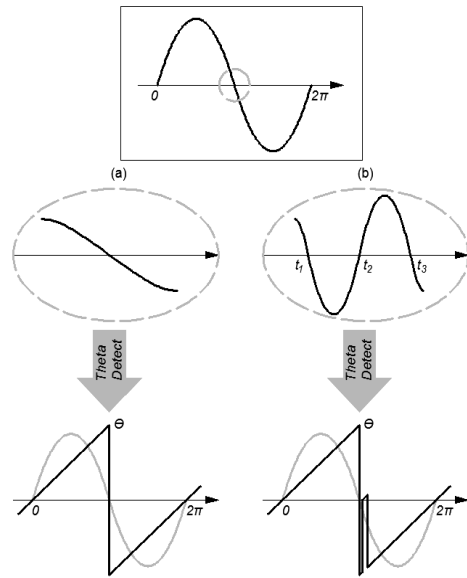


그림 6. 고조파의 존재여부에 따른 영점검출  
Fig. 6. Zero point detection by presence of harmonics

### 3. PCS 알고리즘과 제어기 설계

#### 3.1 PCS 알고리즘

배터리의 전류를 제어하는 양방향 DC-DC 컨버터는 전류 지령치의 설정을 위한 알고리즘이 필요하다. 그림 7에 PV 전력, 배터리전력, 부하전력, 계통전력에 의한 양방향 DC-DC 컨버터의 알고리즘을 나타내었다. 사용된 알고리즘은 각부 전압 및 전류를 검출하여 각각의 전력량을 연산하고 PV어레이의 출력이 0 인지 아닌지를 구분하여 제한된 5단계의 제어알고리즘에 따른 최종 배터리전력을 계산하게 된다.

$P_{PV} \neq 0$ 인 경우  $P_{PV}$ 의 값과  $P_{load}$ 를 비교하여 배터리 충/방전 전력을 결정하고,  $P_{PV} = 0$ 인 경우  $P_{grid}$ 와  $P_{load}$ 를 비교하여 배터리 충/방전 전력을 결정한다. 양방향 컨버터의 동작 모드는 그림 7의 알고리즘에 따라 연산된 배터리의 전력 값에 따라 결정되고 도출된 전류 지령치의 제어를 위해 PWM 신호를 인가하게 된다.

그림 8은 PCS의 인버터 및 컨버터의 제어블록도

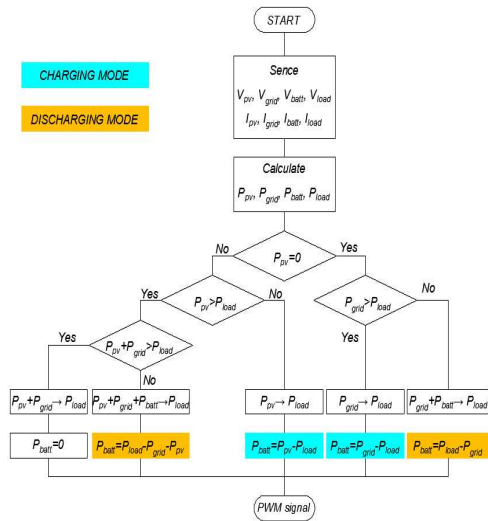


그림 7. 양방향 DC-DC 컨버터의 배터리 충/방전 알고리즘  
 Fig. 7. Battery charge/discharge algorithm of a bidirectional DC-DC converter

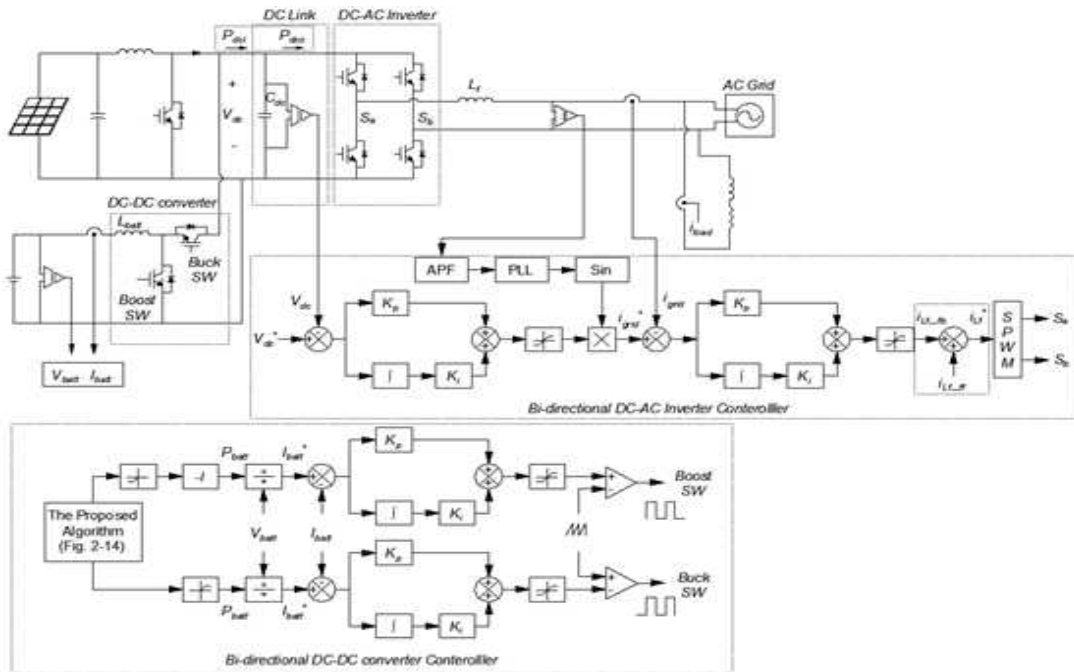


그림 8. PCS의 양방향 컨버터 및 DC-AC 인버터 제어블록도  
 Fig. 8. Bidirectional converter and DC-AC inverter control block diagram of PCS

이다. DC- AC 인버터는 DC-link의 전압을 제어하고 계통연계를 위한 제어를 수행한다.

단상 계통전압의 크기를 고려한 DC-link 전압은 380[V]가 되도록 제어하며 계통과 동일한 위상과 주파수를 갖는 인버터의 출력은 PLL (Phase Locked Loop)기법을 통해 제어한다. 양방향 컨버터는 그림 7의 알고리즘에 따라 충/방전 모드로 구분된다. 양방향 컨버터는 방전 모드에서 승압 동작을 하며 전류 흐름이 배터리 측으로부터 계통 또는 부하 측으로 형성된다. 전류의 흐름이 계통 측인 경우 계통전압과 전류는 180도의 위상 차이가 나며, 부하 측인 경우는 배터리 전력과 부하 전력의 차이만큼 계통에서 보충한다. 또한 충전 모드에서의 강압 동작을 통해 계통에서 배터리 측으로 에너지가 전달된다.

### 3.2 태양광 병렬 DC-모듈형 ESS 장치

그림 9의 시스템은 양방향 컨버터 및 배터리를 DC-link단에 연결하여 태양광에너지 발전량과 부하의 사용량에 따른 부하평준화 동작이 가능하다.

일사량 및 배터리 충전상태에 따라 DC-link단의 직류 전압 및 전류는 계통 측으로 출력되거나 배터리 단으로 충전되며 CC-CV 제어를 통해 양방향 컨버터의 출력전압 및 전류는 일정한 직류성분으로 유지된다.

특히, 태양광 병렬DC-모듈형 시스템은 10 [kW] 이하의 저용량 ESS에 사용되므로 최대 계통전압보다 낮은 저전압 배터리의 사용이 적합하다. 따라서 양방향 컨버터는 3가지 동작 모드 즉, 벡-부스트, 부스트 동작 모드를 모두 수행 가능한 토폴로지로 선정되어야 한다.

### 3.3 DC를 DC로 변환하는 PCS의 기능

그림 10은 EV의 타이머 1과 3의 카운팅 모드와 비교기에 설정된 값과 가운트 값과 일치된 순간에 출력되는 PWM 출력파형을 나타내고 있다. EV에는 4개의 타이머가 있으며 타이머 1과 3은 각각 3쌍의 PWM 출력을 위한 기준 시간을 제공한다.

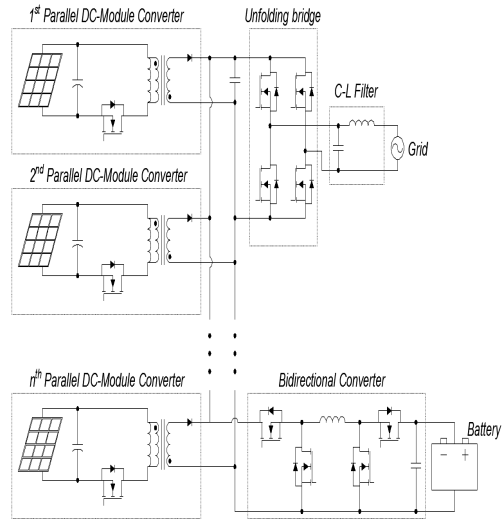


그림 9. 태양광 병렬 DC-모듈형 에너지 저장장치  
Fig. 9. PV parallel DC-modular ESS

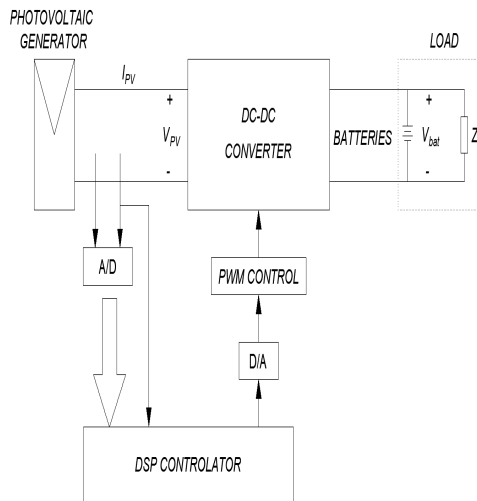


그림 10. PWM 컨버터 추종제어시스템  
Fig. 10. PWM converter tracking control system

위상천이 폴-브릿지 컨버터의 출력은 각 레그간의 위상차에 의한 유효 시비율(Deff)에 의해 결정된다. 각 레그의 위상을 제어하기 위해서는 서로 다른 두 개의 기준 시간이 필요하므로 두 개의 타이머를 이용하였다.

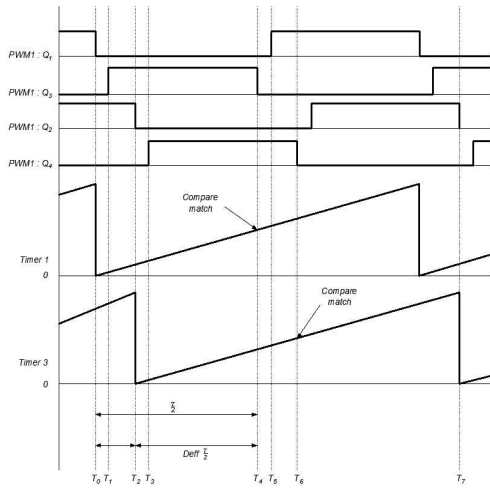


그림 11. PWM 출력 파형 생성  
Fig. 11. PWM output waveform Generation

위상차를 얻기 위해 지상 레그 타이머가 진상 레그 타이머 보다 위상차의 시간만큼 지연 후 카운팅을 시작해야 한다. 이런 출력을 구현을 위해 지상 레그 타이머의 초기 카운트 값을 그림 11과 같이 설정해 주어야 한다. 컨버터의 영전압 스위칭을 위해 MOSFET의 역병렬 다이오드의 도통으로 영전압이 되는 타이밍에 스위칭하기 위한 데드타임이 필요하다. DSP의 EV에는 이러한 데드타임을 위한 기능을 내장하고 있으며 Dead band 설정 레지스터에 원하는 데드타임 값을 입력함으로써 구현할 수 있다.

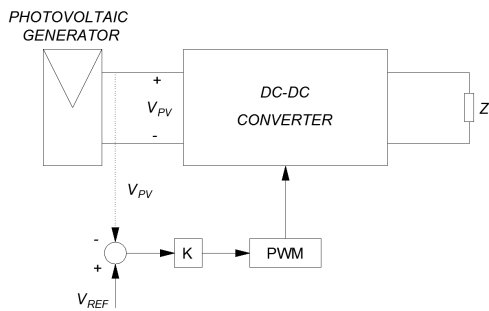


그림 12. PWM 변조 전압 피드백  
Fig. 12. PWM modulation voltage-feedback

그림 12는 PWM 변조 전압 피드백 보상 방법의 블록도이다. 기존의 동적 과변조 기법의 과변조 성능

을 향상시키기 위하여 고정자 지령전압 크기와 과변조에 의해 수정된 고정자 지령전압 크기의 오차를 LPF(Low Pass Filter)를 통과시킨 뒤, 보상 이득 값을 곱하여 3상 극전압 지령에 피드백 보상해 준다.

PWM 변조 전압 피드백 보상 방법은 최소거리 과변조기법, 스위칭 상태유지 과변조기법을 적용했을 때 지령전압 변조지수 값에 대한 인버터출력전압의 변조지수를 나타낸다. 전압 피드백 보상 방법이 기존의 기법보다 인버터의 출력전압 변조 성능을 향상시킬 수 있으므로 과변조 성능이 향상된다.

### 3.4 계통연계 전압형 인버터와 시스템 구동 특성

태양전지 셀의 최대출력 전력을 DC-link단의 커패시터 축으로 전달하기 위하여 부스트 컨버터는 Inductor 전류를 제어하며 일정전압제어를 통해  $V_{cell}$ 이 최대전력점에서 유지되도록 하였다. 인버터는 정현 펄스폭 변조(SPWM : Sinusoidal Phase Width Modulation) 방식을 통해  $V_{dc}$ 로부터 주파수와 크기의 가변이 용이하게 그림 13과 같이 PCS를 구성하고 태양전지 셀의 최대 출력을 얻기 위해 태양전지의 전압과 전류를 검출하고 태양전지 어레이를 회전을 통해 태양의 위치를 찾아가도록 스테핑모터를 제어하였다.

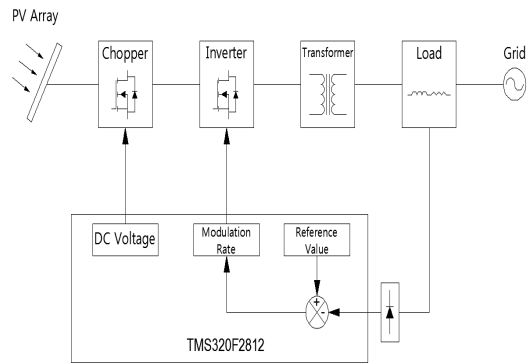


그림 13. PCS 구성도  
Fig. 13. PCS configuration Diagram

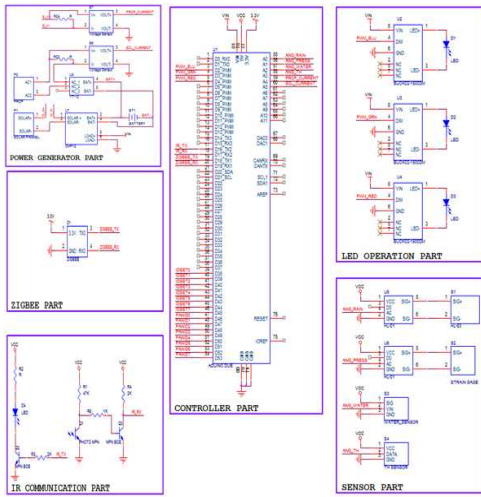


그림 14. 제어시스템 구성도  
Fig. 14. Control system configuration diagram

시스템에서 태양전지의 전압을 승압초퍼를 통해 승압 제어하였고, 전압형인버터의 출력전압을 일정하게 유지시키기 위해 출력전압을 검출하여 부하변동 및 입력전압에 영향을 받지 않고 일정전압을 유지하도록 그림 14와 같이 제어를 구성하였다.

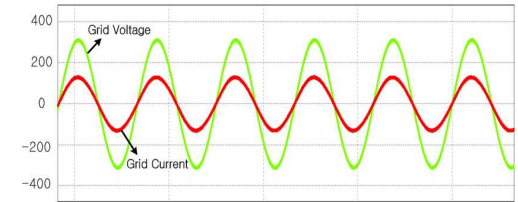
#### 4. 시뮬레이션 및 실험 결과 고찰

##### 4.1 충·방전 시뮬레이션 결과파형 분석

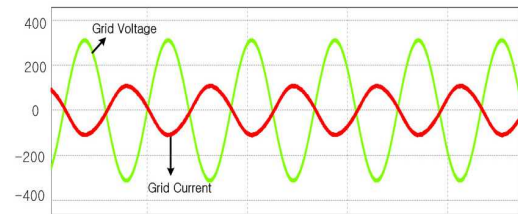
그림 15는 PCS의 3[kW] 충·방전 시뮬레이션 결과파형이다. 그림 15의 (a)는 충전 모드 시 계통계통전압과 전류파형으로 계통의 에너지를 배터리 측으로 전달하므로 계통전압과 전류는 동상이 된다. 또한 그림 15의 (b)는 방전 모드 시 계통전압과 전류파형으로 배터리의 에너지를 계통 측으로 전달하기 때문에 계통전압과 계통전류는 180도 위상차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

그림 15의 (c)는 충전 모드에서 방전 모드로 절환하는 경우의 계통전압과 배터리전류의 파형으로 배터리 완충 후 배터리전류가 감소하여 정상 방전 상황에서 일정한 배터리전류를 유지하고 있다. 또한 그림 15의 (d)는 방전 모드에서 충전 모드로 절환하는

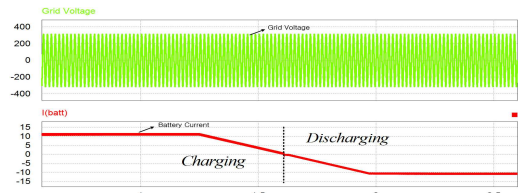
경우의 계통전압과 배터리전류의 시뮬레이션 결과파형으로 방전 후 배터리전류가 증가하여 완충 상태가 될 때 배터리전류가 일정하게 유지됨을 볼 수 있다.



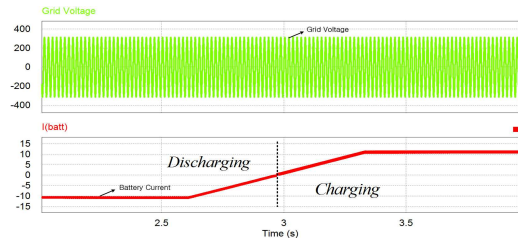
(a) 충전 모드(계통전류×10)



(b) 방전 모드(계통전류×10)



(c) 충전 모드 → 방전 모드



(d) 방전 모드 → 충전 모드

그림 15. 3[kW] 충·방전 시뮬레이션 결과 파형  
Fig. 15. 3[kW] charge/discharge simulation result waveform

그림 16은 태양광 발전이 없는 경우의 PCS의 충·방전 실험 결과파형이다. 그림 16의 (a)는 충전 모드 시 계통전압과 전류파형으로 위상이 동상이며 그림 16의 (b)는 방전 모드 시 계통전압



과 전류파형으로 180의 위상차를 확인할 수 있다.

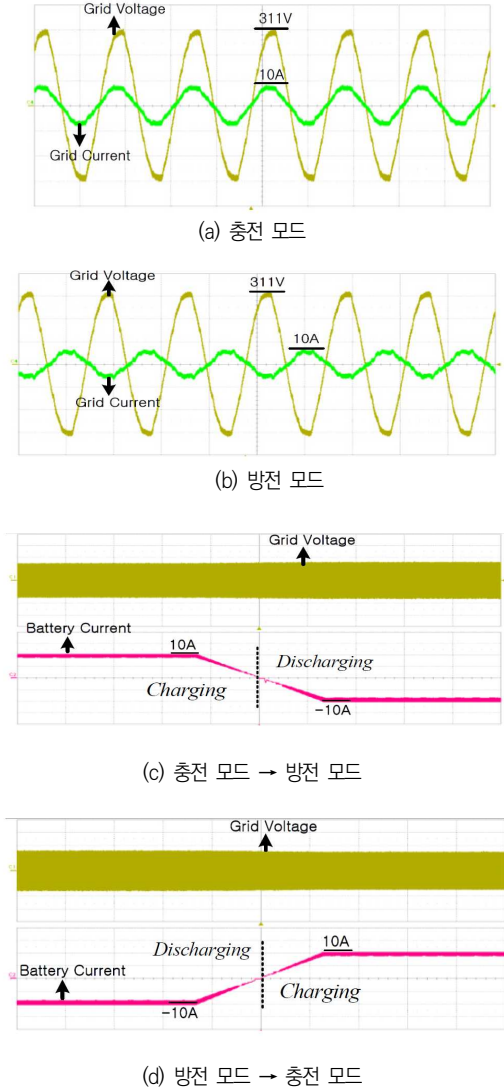


그림 16. 3[kW] 충/방전 실험 결과 파형  
Fig. 16. 3[kW] charge/discharge experimental result waveform

그림 16의 (c)는 충전 모드에서 방전 모드로 전환 되는 경우이고 그림 16의 (d)는 방전 모드에서 충전 모드로 전환 되는 경우를 나타내고 있다. 그림 16의 실험결과 파형은 계통전압과 전류의 충/방전 상태의 위상이 일치하고 그 값이 대

략 310[V]와 10[A]로 일치한다. 또한 모드 전환 시 배터리의 충전 전류와 방전전류의 위상이 일치하고 그 값이 각각 10[A]와 -10[A]로 시뮬레이션결과 값과 거의 일치함을 확인할 수 있다.

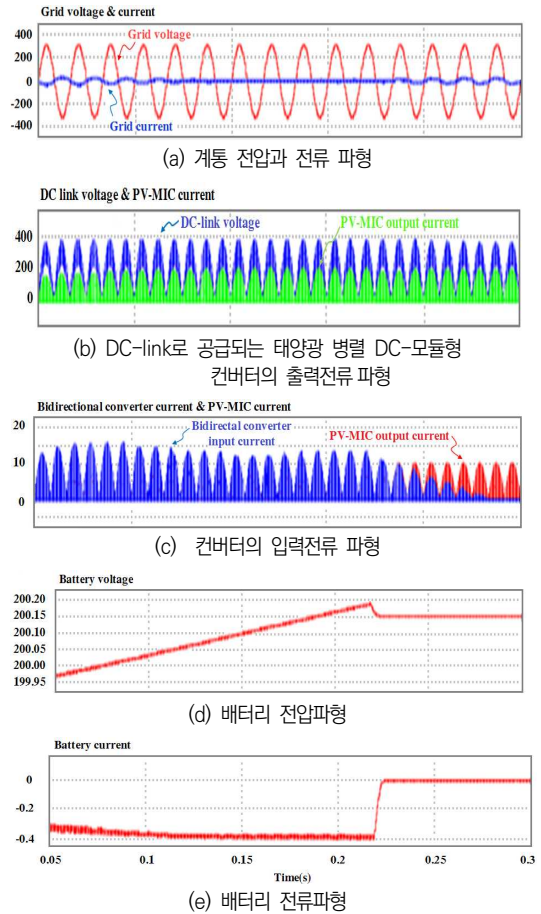


그림 17. 계통연계 시 충전 모드 시뮬레이션  
Fig. 17. Simulation of charge mode in grid connection

그림 17의 (a)는 계통 전압과 전류파형으로 계통 전압과 전류의 위상이 180도의 차이를 보이는 구간은 방전 모드 구간으로 컨버터의 공급 전력 일부가 계통으로 공급되는 것을 확인할 수 으며 위상이 동상인 구간은 충전 모드 동작 구간이다.

그림 17의 (b)는 DC-link로 공급되는 컨버터의 출력전류 파형이며 DC-link 전압과 같은 위상의

120[Hz] 맥류파형으로 공급되는 것을 확인할 수 있다. 그림 17의 (c)는 2-stage 양방향 컨버터의 입력 전류 파형으로 전류제어를 통해 DC-link 전류와 같은 위상으로 공급받고 있는 것을 나타내고 있으며 배터리 완충 시 입력전류가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 17의 (d)와 그림 17의 (e)는 배터리의 전압과 전류파형으로 안정적인 CC-CV 제어가 수행되고 있음을 나타낸다. 그림 18은 2-stage 양방향 컨버터의 사용 시 방전 모드 동작에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 18의 (a)는 계통 전압과 전류파형으로 전압-전류가 같은 위상으로 공급되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 18의 (b)는 DC-link로 공급되는 컨버터의 출력전류 파형이며 DC-link 전압과 같은 위상으로 공급됨을 확인할 수 있다.

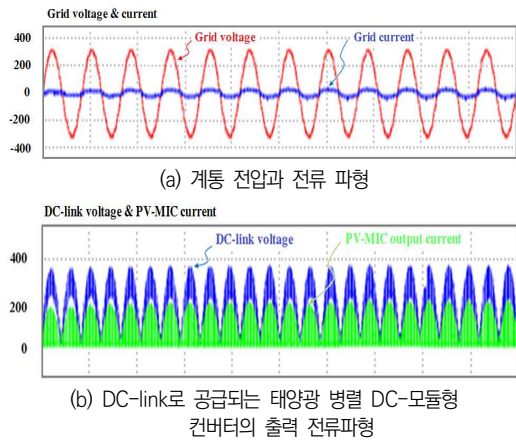


그림 18. 계통연계 모드 동작 시 방전 모드 시뮬레이션  
Fig. 18. Simulation of discharge mode in grid connected mode operation

표 1은 제안된 PCS의 컨버터, 인버터 및 배터리의 주요 실험 파라미터를 나타낸다.

표 1. PCS 실험 파라미터  
Table 1. PCS experimental parameter

	Parameter	Value	Unit
Inverter	Input Voltage	Phase 220	[V]
	Rated Output	3	[kW]
	Switching Frequency	10	[kHz]
	link	1700	[uF]
Converter	Rated Output	3	[kW]
	Switching Frequency	10	[kHz]
	Battery Voltage	200	[V]
	Battery current	15	[A]
Battery	cell Voltage	42	[V]
	Battery Bank	200	[V]

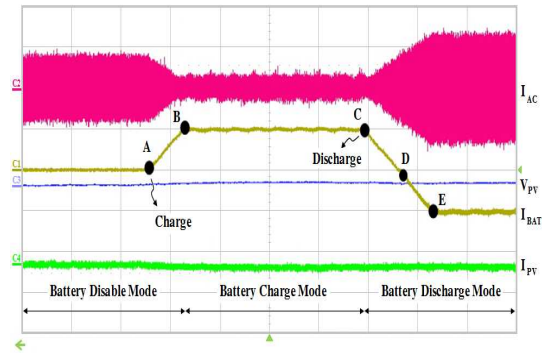


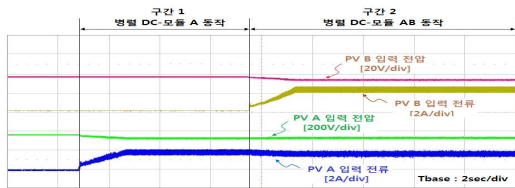
그림 19. 배터리전력 1[kW] 시, 충/방전 전류에 따른 계통전류 실험 결과 파형  
(a) C1 : 배터리전류[10A/div]  
(b) C2 : 계통전류[10A/div]  
(c) C3 : PV전압[200V/div]  
(d) C4 : PV전류[5A/div]  
Fig. 19. Experimental result waveform of grid current according to charge / discharge current at battery power 1[kW]  
(a) C1 : Battery current[10A/div]  
(b) C2 : Grid Current[10A/div]  
(c) C3 : PV voltage[200V/div]  
(d) C4 : PV Current[5A/div]

그림 19는 태양광발전이 있는 경우의 PCS의 실험파형으로 태양광이 약 1.5[kW]로 발전하고 있는 상태에서의 1[kW] 충/방전 시 실험결과 파형이다. 최초 시작 시점에서 A지점까지는 태양전지 출력이 계통으로 전송된다. 구간 A-B는 배터리 충전이

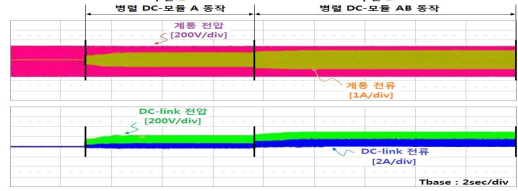
시작되어 태양전지의 출력을 배터리에 충전하고 남은 전력만 계통으로 송전된다. 구간 B-C는 배터리의 충전이 정상상태로 유지되는 구간이며 C점은 배터리의 상태가 충전 모드에서 방전 모드로 전환 되기 시작하는 점으로 방전시작 지령이 주어지는 시점이다. 충전전류에서 방전전류로 전환 되는 D점은 안정적인 절환을 위해 0.5s의 Dead Time을 삽입하여 충/방전 전류제어를 제어하였다. 방전전류가 정상상태가 되는 E점은 계통 송전 전력이 태양전지 발전전력과 배터리 방전 전력의 합으로 최대가 된다.

그림 20은 태양광 병렬 DC-모듈형 ESS의 계통 연계 발전 시의 태양전지 추가 발전실험 파형을 나타낸다. 그림 20의 (a)는 하나의 태양광모듈이 동작하고 있는 상황에서 다른 태양광모듈이 추가발전을 수행하는 경우로 각각의 태양광모듈의 출력전압-전류 파형을 나타낸다. 그림 20의 (b)는 계통 공급 전류와 DC-link 측 전압-전류파형을 각각 나타낸다.

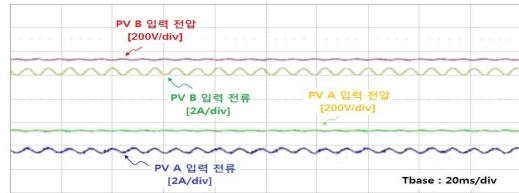
그림 20 (a)와 그림 20 (b)는 하나의 태양광모듈이 발전하여 계통으로 전력을 공급하는 것을 구간 1로, 추가된 태양광모듈이 발전을 수행하여 계통으로 추가 전력이 공급되는 것을 구간 2로 나타내었다. 그림 20 (c)와 그림 20 (d)는 태양광모듈의 전압-전류와 계통 및 DC-link 전압 및 전류의 확대파형으로서 두 개의 태양광 병렬 DC-모듈이 각각 발전을 수행하여 전력을 계통으로 공급하는 것을 확인할 수 있다. 그림 20 (e)와 그림 20 (f)는 각각 그림 20 (a)와 그림 20 (b)의 구간 2의 확대파형으로 음영이 지지 않은 태양광 병렬 DC-모듈이 발전하여 전력을 계통으로 공급하는 것을 나타낸다.



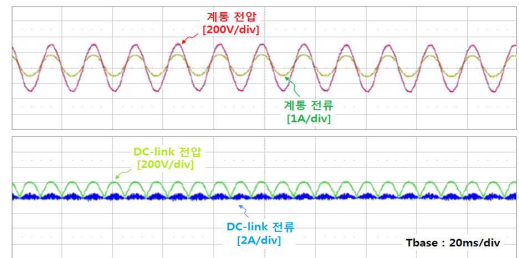
(a) 태양광모듈 전압-전류 파형(Time div:2sec/div)



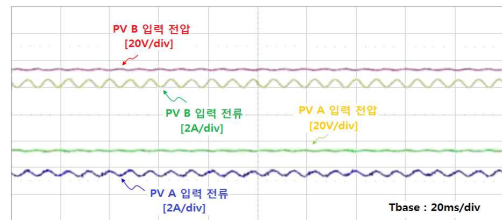
(b) 계통 및 DC-link 전압-전류 파형



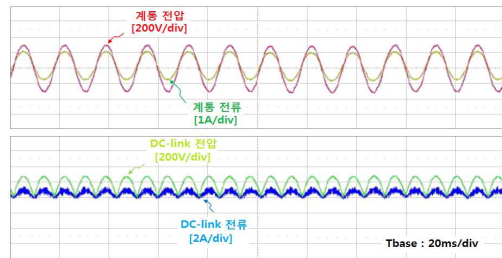
(c) 태양광모듈 전압-전류 확대파형



(d)계통및DC-link전압-전류확대파형



(e) 태양광모듈 전압-전류 확대파형



(f) 계통 및 DC-link 전압-전류 확대파형

그림 20. 계통연계 시 태양전지 발전 실험

Fig. 20.I PV power generation experiment in generation of grid connection

실험결과 음영이 지지 않은 태양전지에 연결된 병

렬 DC-모듈은 음영이 진 태양전지에 연결된 병렬 DC-모듈의 출력에 영향을 받지 않고 최대 전력점에서 안정적인 동작을 수행함을 확인할 수 있다.

그림 16 ~ 그림 20에 제안된 데이터에 의하여 나타낸 결과를 보면 만족된 동작 결과로 보이며, 5 단계의 동작 모드 알고리즘을 적용한 PCS시스템이 일사량과 부하의 전력 요구량 및 배터리의 충전상태에 따라 충/방전 모드 동작 제어함으로써 부하평준화 동작이 가능하였다. 또한, 태양광 병렬 DC-모듈의 출력 효율을 향상시키기 위해 주 스위치 양단 전압크기에 대응하는 능동 스너버(Snubber) 제어기법을 적용하여 주 스위치 턴 오프(turn off)시 주 스위치 양단에 발생하는 전압을 저감한 것을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문은 ESS를 고려한 리튬폴리머 배터리 기반의 PCS에서 발생할 수 있는 5가지 동작 모드로 구분하여 분석하였으며 각각의 상황에 맞는 능동적인 제어를 위한 제어 알고리즘과 기존의 태양광발전시스템의 단점을 보완한 태양광 병렬 DC-모듈형 태양광발전시스템을 제안하였으며 제안된 시스템의 검증을 위해 3[kW]급 PCS를 제작하여 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었고 차후 연구에 대한 내용을 제사하고자 한다.

(1) 태양광에너지 출력에 따른 인터리브드 플라이백 컨버터(Interleaved Fly-Back Converter) 상제어 기법을 제안하여 배터리 충/방전 전류에 포함된 전류 리플의 크기를 감소시켰다.

(2) 비 반전 양방향 벡-부스트 컨버터를 시스템에 적용하여 벡-부스트 모드 동작은 물론 벡과 부스트의 개별 모드 동작이 가능하게 되어 입출력 전압범위를 증대시키고, 스위칭 손실을 저감하였다.

(3) 제안된 제어시스템을 통해 태양전지 출력의 MPPT 제어가 가능하였고 전압형 인버터의 출력전압이 입력전압과 부하변화에 관계없이 일정전압으로 유지되었다.

향후 실험에 있어서 교류전압 검출기의 실효 값 검출과 고조파를 억제하기 위한 교류전력 필터(filter)의 설계가 필요하고, 기상조건에 따른 변화가 심하므로 앞으로의 연구로 풍력과 태양광을 겸비한 하이브리드 시스템(Hybrid System)을 제안하며 이러한 문제점을 해결하면 태양전지 및 연료전지 등 소규모 발전을 나아가 대용량 신재생에너지 시스템으로서 응용될 수 있으며, 독립 운전 기능을 추가한다면 스마트 그리드와 더불어 가정용 전력 공급의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 2020학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의한 연구임.

## REFERENCES

- [1] E. Koutroulis, K. Kalairzakakis and N.C. Voulgaris, "Development of a Microcontroller -Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System", IEEE trans, Power Electronics, Vol. 16, pp. 46-54, Jan. 2001
- [2] Trishan Eram, Patrick L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22. no. 2. June. 2007
- [3] Byung-Duk Min, Jong-Pil Lee, Jong-Hyun Kim, Tae-Jin Kim, Dong-Wook Yoo, and Eui-Ho Song, "A New Topology With High Efficiency Throughout All Load Range for Photovoltaic PCS," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, November. 2009
- [4] Jung-Min Kwon, Bong-Hwan Kwon, Kwang-Hee Nam. "Grid-Connected Photovoltaic Multistring PCS With PV Current Variation Reduction Control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, November. 2009
- [5] Manoj Datta, Tomonobu Senjyu, Atsushi Yoneda, Toshihisa Funabashi, Chul-Hwan Kim, "A Frequency Control Approach by Photovoltaic

- Generator in a PV-Diesel Hybrid Power System", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 2, June, 2011
- [6] Xiaohu Liu, Andreas Aichhorn, Liming Liu, Hui Li, "Coordinated Control of Distributed Energy Storage System With Tap Changer Transformers for Voltage Rise Mitigation Under High Photovoltaic Penetration", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 2, June, 2012
- [7] Zhan Wang, Hui Li, "A soft switching three-phase current-fed bidirectional dc-dc converter with high efficiency over a wide input voltage range," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 27, No. 2, pp. 669-684, Feb. 2012
- [8] Junhong Zhang, Jih-Sheng Lai, Rae-young Kim, Wensong Yu, "High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional DC-DC converter," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 22, No. 4, pp. 1145-1153, Jul. 2007
- [9] S. J. Chiang, K. T. Chang, C. Y. Yen, "Residual Photovoltaic Energy Storage System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 3, June, 1998
- [10] Laxman Maharjan, Shigenori Inoue, Hirofumi Akagi, Jun Asakura "State-of-Charge(SOC)-Balancing Control of a Battery Energy Storage System Based on a Cascade PWM Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 6, June, 2009
- [11] S. D. Gamini Jayasinghe, D. Mahinda Vilathgamuwa, Udaya K. Madawala, "Direct Integration of Battery Energy Storage Systems in Distributed Power Generation", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, no. 2, June, 2011
- [12] L. Chen, H. Wu, Y. Xing, and X. Xiao, "Performance evaluation of a 1kW non-isolated high step-up/step-down bidirectional converter for distributed battery storage system," 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Taipei, p. 1-5, 2015.
- [13] H. He, R. Xiong, X. Zhang, F. Sun and J. X. Fan, "State-of-Charge Estimation of the Lithium-Ion Battery Using an Adaptive Extended Kalman Filter Based on an Improved Thevenin Model," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.60, No.4, pp. 1461-1469, 2011.
- [14] S. Massoud Amin, Bruce F. Wollenberg, "Toward a Smart Grid", IEEE Power & Energy Magazine, September/October, 2005
- [15] Y. Yusof, S. Sayuti, M. Latif, and M. Wani, "Modeling and Simulation of maximum power tracker for photovoltaic system.", in Proceedings of Power and Energy Conference, pp.88-93, Nov. 2004
- [16] Kyritsis, A. Ch., Tatakis, E.C., Papanikolaou, N.P., "Optimum Design of the Current-Source Flyback Inverter for Decentralized Grid-Connected Photovoltaic Systems", Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 23, pp.281-293, 2008.
- [17] G. M. Masters, "Renewable and Efficient Electric Power Systems," John Wiley & Sons Ltd., 2004.
- [18] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems," John Wiley & Sons inc., 2011.
- [19] H. D. Paulino, P. J. M. Menegaz, and D. S. L. Simonetti, "A Review of the Main Inverter Topologies applied on the Integration of Renewable Energy Resources to the Grid," in Proc. IEEE COBEP, pp. 963-969, 2011.
- [20] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A Review of Single-Phase Grid Connected inverters for Photovoltaic Modules," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 41, issue 5, pp. 1292-1306, 2005

---

 저자약력
 

---

**황 락 훈 (Lark Hoon Hwang)****[정회원]**

- 1981년 2월 : 명지대학교 전기공학과 (공학사)
- 1983년 8월 : 명지대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1989년 8월 : 명지대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1988년 3월 ~ 1991년 2월 충남 전문대학 전기과 (현, 대덕대학 전기과) 조교수
- 1991년 3월 ~ 현재 세명대학교 전기공학과 교수

〈관심분야〉 전동기 제어, 대체에너지 분야, 에너지 변환, 반도체 시뮬레이션, 전력전자 응용분야

**나 승 권 (Seung Kwon Na)****[정회원]**

- 1999년 2월 세명대학교 전기공학과 (공학사)
- 2001년 2월 세명대학교 대학원 전기전자공학과 (공학석사)
- 2008년 2월 세명대학교 대학원 전기전자공학과 (공학박사)
- 1981년 7월 ~ 1988년 4월 부산 위생 (한방) 병원
- 1988년 5월 ~ 1994년 8월 한국수자원공사
- 1994년 9월 ~ 현재 한국폴리텍대학 원주캠퍼스전기제어공학과 교수

〈관심분야〉 의용공학 및 대체 에너지 분야, 에너지 변환, 전력전자 응용분야

**최 병 상 (Byung Sang Choi )****[정회원]**

- 2010년 : 비에스티 연구소장
- 2021년 현재 : 한국폴리텍대학 원주캠퍼스 의료공학과 교수
- 2021년 현재: 세명대학교 박사과정 수료

〈관심분야〉 IoT 어플리케이션, 전력전자 응용