

# PV System 기반 ESS의 최적운전을 위한 설계 및 제어 특성에 관한 연구

차인수<sup>\*†</sup> · 박종복<sup>\*\*</sup> · 정경환<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>동신대학교 수소에너지학과

<sup>\*\*</sup>주식회사 에이스전력, 대표이사

<sup>\*\*\*</sup>동신대학교 대학원 에너지환경공학과

## A Study on the Design and Control Characteristics for Optimum Operation of the PV System-based ESS

Cha Insu<sup>\*†</sup> · Park Jongbok<sup>\*\*</sup> · Jung Gyeonghwan<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Department of Hydrogen Energy and Fuel Cell Technology.

<sup>\*\*</sup>Ace Electric Power. Co., Ltd.

<sup>\*\*\*</sup>Department of Energy Environment Engineering, Graduate School of Dong Shin University.

<sup>†</sup>Corresponding author: [ischa@dsu.ac.kr](mailto:ischa@dsu.ac.kr)

### Abstract

In this study, realize voltage regulation  $220V_{ac} \pm 10\%$  or less, frequency fluctuation  $60Hz \pm 1\%$  or less over the independent operation and grid-connected operation technologies for power stabilization relates to the ESS designed and manufactured in conjunction with solar installations and solar to compensate the output reduction due to the polarization of the solar module through the polarization prevention technology for preventing the optical module efficiency is lowered, in conjunction with the BMS inverter efficiency was more than 92%, more than 90% of the charging efficiency to the target. This study was designed in conjunction with the ESS solar power plants, grid-connected operation and independent operation, Peak-Cut, it can stabilize the grid via the Peak-Shifting operation

**Keywords:** 에너지 저장 시스템(Energy Storage System), 배터리 관리 시스템(Battery Management System), 전력변환시스템(Power Conditioning System), 분극화 방지(Prevent Polarization), 전력안정화(Power Stabilization), 최대 전력점 추종(Maximum Power Point Tracking)

### 1. 서론

태양광 발전시스템은 무한정, 무공해 등 많은 장점 때문에 에너지원으로 주목받고 있다.

최근 일본의 원전사태로 인하여 대규모 정전사태가 발생하였는데, 기존에 설치된 태양광 발전 시스템(주택, 상용, 발전소)도 동시에 정지되어 에너지를 생산하지 못해 문제점으로 인식됨에 따라



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.36, No.5, pp.19-30, A 2016  
<http://dx.doi.org/10.7836/jkses.2016.36.5.019>

pISSN : 1598-6411  
eISSN : 2508-3562

Received: 18 July 2016  
Accepted: 23 September 2016

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

계통연계운전과 독립운전을 만족하는 시스템적인 요구가 증가하고 있다.

계통 연계형 태양광발전시스템은 정전 시 계통을 보호하기 위하여 단독운전방지장치를 필수적으로 포함하고 있기 때문에 정전 시에는 에너지 발전이 정지되어 태양광에너지를 효과적으로 활용할 수 없는 문제점을 가지고 있다.

이에 대한 방안으로 정전시도 태양광발전시스템을 효과적으로 활용할 수 있는 에너지저장시스템이 개발되고 있으며, 에너지저장시스템(Energy Storage System: ESS)은 다양한 발전원에서 생산된 전력을 수요가 적을 때 저장했다가 필요할 때 공급함으로써 에너지 효율을 높이는 것으로 전력 공급 안정화, 신재생에너지 확산 등 부가가치를 창출하는 녹색 분야 핵심 기술로 급성장할 것으로 예상되는 신산업 분야이다.

## 2. ESS 이론적 배경

계통 연계형 PCS(Power Conversion System)는 상용 전력계통과 연계운전하며 ESS를 통해 첨두 부하전력을 억제하고 잉여전력을 계통으로 반환한다. 신재생에너지 발전 설비들이 여기에 해당된다. 발전전력을 최적화하기 위해태양광 최대 전력점 추종(Maximum Power Point Tracking: MPPT) 기술이 사용되고 고조파제거, 고효율 제어, 단독운전 방지 그리고 단락사고 감시기술 등이 필요하다<sup>1)2)3)</sup>.

### 2.1 피크컷 세이프 시스템(Peak cut-save system)

피크컷 세이프 시스템은 일반 태양광 발전 시스템과 달리 출력전력이 즉시 계통으로 전달되지 않고 피크 수요시간 이외에는 Battery를 충전하는 데 사용된다. 이때 Battery가 완충되면 잉여전력을 계통으로 발전한다. 피크시간 내에서는 Battery의 일정 전력을 계통으로 주입한다.

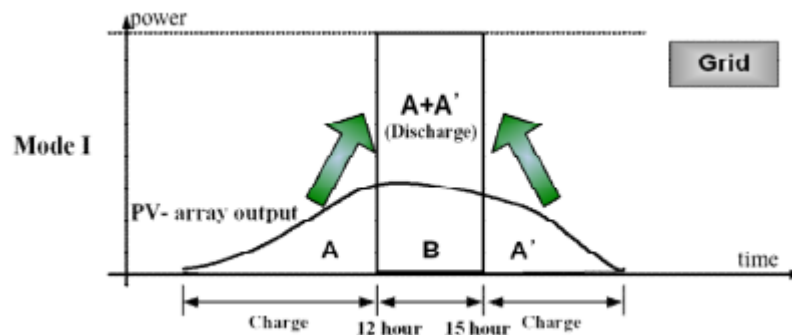


Fig. 1 PV Output of Power = Annual output mode

본 논문의 적용된 ESS는 계통연계형으로 과충전이 발생하면 잉여 전력을 계통으로 역으로 송전한다. Fig. 1은 이상적인 모드로서 발생하기 힘든 모드로 볼 수 있으나 시스템 운전 방법을 설명하기 위한 핵심 개념이다. 이 모드에서는 1일 시스템 발전량은 기준치와 동일하므로 PCS는 외부에 의해 설정된 운전시간대에서만 운전한다.

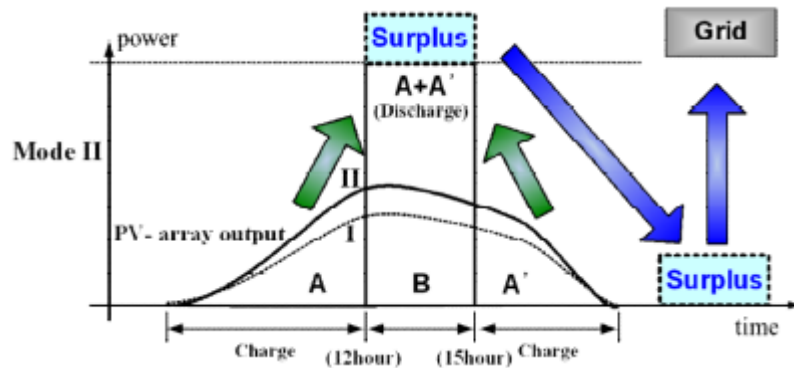


Fig. 2 PV Output of Power > Annual output mode

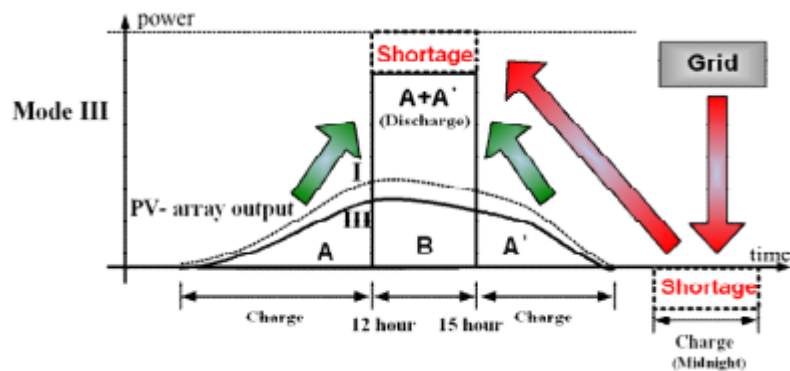


Fig. 3 PV Output of Power < Annual output mode

Fig. 2은 1일 PV(Photovoltaic)-array의 발전량이 기준치를 초과한 경우이다. 이 모드가 반복되면 Battery와 같은 전력저장장치의 이용 시 Battery가 과충전이 될 수 있어 1일 PV-array로부터 발전된 전력을 충전시킬 수 없는 경우가 발생할 수 있으므로 야간에 충전된 양을 방전한다. 잉여전력이 발생한 경우 계통으로 역으로 송전한다.

Fig. 3의 경우는 일기가 좋지 않을 경우 발생할 수 있는 모드로서 이 모드가 반복되면 침투 부하발생 시간대에 발전해야 할 전력량을 확보할 수 없는 경우가 발생한다. 그러므로 이런 경우에는 DC-AC 컨버터의 양방향전력 제어 특성을 이용하여 침투부하 시간대 외의 시간인 발전 설비의 이용률이 낮은 심야시간대를 이용해서 Battery를 충전한다. 전력이 부족할 경우 계통으로부터 전력을 보충한다<sup>4)</sup>.

## 2.2 BMS, EMS, AMR과 연계운전

ESS는 단일기기로 구성할 수 없고 Fig. 4와 같은 여러 가지 기기로 이루어져 있다. PCS는 앞서 보았듯이 신재생에너지의 전력을 변환하는 전력변환 장치이다.

BMS(Battery Management System)는 Battery의 셀 밸런싱과 충전량을 관리하는 시스템이다. 리튬폴리머 Battery의 BMS는 단위 셀마다 셀 밸런싱을 제어하고 충전량(Battery의 잔존용량)을 연산하며 또한 수명까지 나타낸다<sup>5)</sup>.

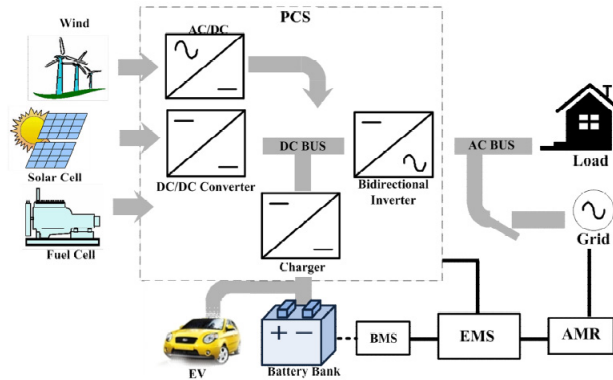


Fig. 4 Configuration of the ESS in the smart grid

최근에는 충전량 연산을 위해 전류적산방법과 외부온도 등의 환경변수가 적용된 테이블을 이용하는 조합된 알고리즘을 사용한다. EMS(Energy Management System)는 다수의 BMS와 PCS의 정보를 저장하여 사용자에게 보여주는 장치이다. 최근에는 누적된 데이터를 이용하여 운전 명령을 내리는 시스템도 보급되고 있다.

AMR(Automatic Meter Reading)은 사용자의 전기 사용량을 실시간으로 측정한다. 실시간 사용량을 이용하면 ESS가 에너지를 보다 효율적으로 처리할 수 있게 된다<sup>6)</sup>.

### 2.3 ESS 최적설계 방안

ESS 최적설계 이론으로는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째로는 부하 평균화이고 두 번째로는 주파수 보정이다. 이 두 가지는 안정적인 전력공급에서 중요한 부분이다.

첫 번째 방법은 심야의 전력 요금을 인하하고, 낮 동안의 전력요금을 인상함으로써 전력의 이용시간을 분산시키는 방법이다. 두 번째 방법은 에너지 저장기기를 이용하여 발전기와 부하 사이에서 전력의 수급시간을 조절하는 것이다. 전자는 송전 단열 효율만을 높일 수 있어 가장 좋은 방법이다. 후자는 송전 단열 효율을 높이는 작용은 있지만, 에너지 저장기에 의한 여분의 손실이 더해지기 때문에 거꾸로 연료 소비량을 증가시킬 위험성도 있는 방법이다. 현실적으로는 이 두 가지 방법을 혼합해서 부하평균화를 추진하고 있다.

주파수 보정은 일정한 전력을 공급하기 위하여 필요한 부분이다. 주파수가 보정되지 않으면 출력이 상황에 따라 달라지기에 전기기기에 무리를 주거나 원활한 작동을 방해하는 요소가 된다. 따라서 주파수 보정을 통하여 얼마만큼 일정한 전력을 공급할 수 있도록 하는지가 ESS를 설계하는 데 중요한 부분이라 할 수 있다.

## 3. ESS 설계

### 3.1 구성

본 연구에서는 태양광발전설비와 연계한 ESS 설계 및 제작에 관한 연구로 Fig. 5와 같이 설계하였으며, 계통연계운전과 독립운전, Peak-Cut, Peak-Shifting 운전을 통해 계통을 안정화할 수 있다.

계통연계운전 및 독립운전을 위한 전력변환장치는 3 kW급으로 구성하였고, BMS와 CAN 통신을 통해서 동작된다. Battery 뱅크는 3개의 Battery 트레이를 병렬로 연결하여 51.8 V, 156 Ah, 8.1 kW로 구성되고 각 트레이는 어드레스 지정과 TCP/IP 통신을 통해 스마트 BMS와 통신하고 동작하게 된다. 3.7 V 2.6 Ah 리튬이온전지를 14직렬×20병렬로 연결하여 1개의 Battery 트레이를 구성하였다.

Main(Charge+), Main(-)가 PV 어레이와 연결되는 단자이고, Tray#은 Battery 뱅크를 뜻한다.

Voltage Detect는 컨버터로부터 전압 값을 읽어오는 것을 뜻한다.

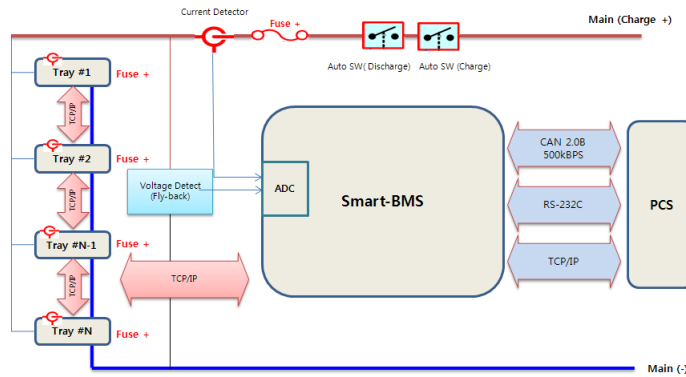


Fig. 5 ESS configuration in conjunction with solar installations

### 3.2 ESS 최적 설계

#### (1) BMS

BMS란 Battery 매니지먼트 시스템으로 Battery의 충방전을 상태에 맞춰서 관리해주는 시스템이다.

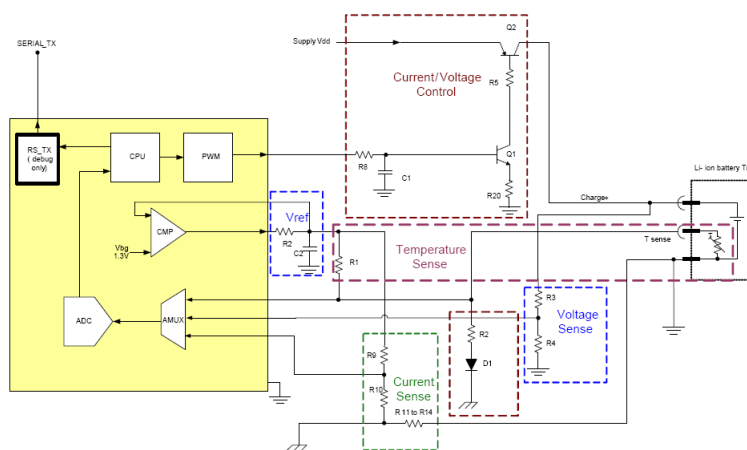


Fig. 6 BMS circuit

Fig. 6은 Fig. 5의 Smart-BMS를 나타내며, RC 필터를 통해서 PWM 듀티 전압을 일정하게 유지(듀티비 왜곡방지)하고 Battery 충전전류를 IGBT를 통해서 제어하도록 하였다. Battery 충전전류 시 발생할 수 있는 역전류를 피하기 위하여 2개

의 FET를 사용하였고, 전류센서는 0.25옴을 사용하여 측정하였다. Battery의 전압 범위에 따라 전압 Sensing 저항을 이용하여 제어하였다. 또한 Sunt 저항(고유저항)으로  $V=IR$ 을 사용하였고,  $V_{ref}$  표준을 사용하였다. GND는 공통접지방 법으로 온도센싱은 서미스터를 이용하였다.

## (2) PCS

PCS란 태양광 어레이로부터 발전된 직류전력을 교류로 변환하는 장치로 DC 전원소스를 상용전원 AC 220 V 60 Hz로 출력하는 역할을 한다. MCU는 TMS320이 적용되었고 스위칭 소자는 IGBT를 채택하였으며, Zero-crossing을 통해서 PLL 검출하고 상용전원과 동기화하였다.

Fig. 7은 Fig.5에서 제안된 PCS의 등가회로로써 다섯 개의 스위치와 하나의 인덕터 그리고 출력단의 LC 필터를 포함한다. 스위치 동작에서 단지 QA 스위치만 초핑 동작을 수행하고, 나머지 스위치들은 계통의 극성에 따라 출력의 방향만을 결정하는 데 이용된다. 따라서 폴-브리지 스위치 전체가 초핑을 동작을 수행하는 방식에 비교하여 스위칭에 의한 손실은 상당히 감소시킬 수 있다. DC 링크단인  $V_{dc}$ 는 항상 일정 전압 레벨을 유지하고 전압은 폴브리지 인버터를 통해서 AC 정현파로 변경된다.

스위치 4개를 통해서 AC 정현파가 생성되고, Fig. 8에는 제안하는 전류원형 PWM 인버터의 주요 동작 파형을 나타낸 것으로써 각 스위치의 인가 신호와 인덕터에 흐르는 전류, 출력단의 전압과 전류의 파형을 나타내고 있다. 전압변동의 경우 Q4에서 컨버팅되어 일정하게 유지된다.

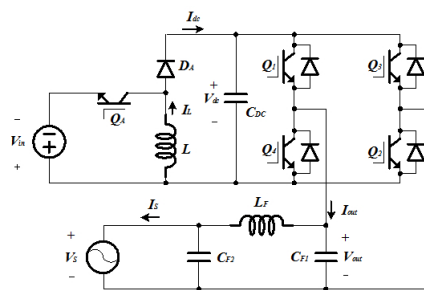


Fig. 7 The equivalent circuit

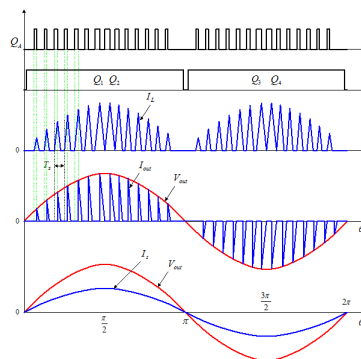


Fig. 8 The main operating waveform

본 논문에서는 MPPT 기법을 시스템의 복잡도, 센서의 유무, 수렴 속도(전압-전류 센싱에 의한 듀티비를 제어하는 속도), 비용적 측면, 하드웨어 구현(각 소자 배치시 발생하는 리플 등) 등의 중점을 두어 Fig. 9와 같이 개선된 P&O(Perturbation and Observation) MPPT 알고리즘을 적용하여 수렴의 정확성을 높이도록 하였다<sup>7)8)</sup>. P&O MPPT 기법은 태양전지 출력 전력-전압 특성에서의 비선형 특성을 바탕으로, 출력전압(V)을 주기적으로 변동하여, 이때 대응하는 출력전력(Power: P)의 크기를 이전 주기와 비교하여 최대 전력점을 추종한다<sup>9)10)</sup>.

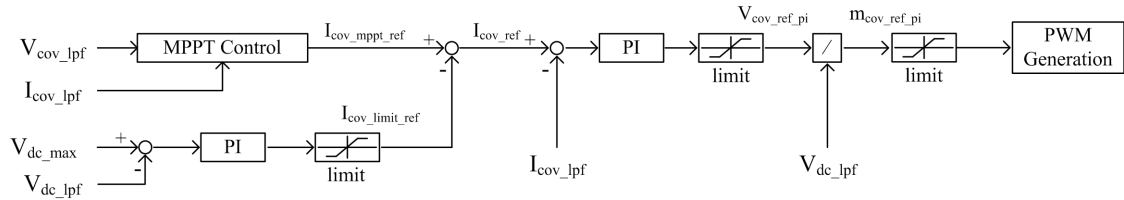


Fig. 9 P&O MPPT algorithm, a control block

알루미늄 프레임과 태양전지 어레이 음극 단자 사이에 음의 전압이 인가되는 상황이 지속이 되면, 태양전지 모듈에서 생성된 일부의 전자들이 알루미늄 프레임을 통해서 유출 되는 분극화 현상이 발생한다. 즉, 광전 효과에 의해서 발생하는 태양전지의 발전 특성이 저하되며 이러한 현상을 PID(Potential Induced Degradation)라고 한다. PID의 영향을 받고 있는 상태이기 때문에 추가적인 조치가 없다면 데이터 시트 값 대비 20%까지 출력저하가 초래될 수 있다. PID 현상은 긴 시간 동안 분극화로 인해 발생하기 때문에 Fig. 10과 같이 역 분극화를 통해 PID를 제거할 수 있다. 동작순서는 어레이 전압 체크를 한 후 접지 대비 (-)단자 전압 체크를 하고, 접지 대비 (-)단자의 출력전압이 0 V가 될 때 까지 (+) 전압 인가하여 분극화 Zero를 달성하였다.

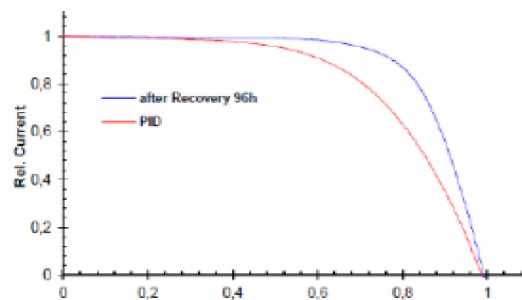


Fig. 10 After recovery due to the PID module and the PID module characteristics

## 4. 시스템 제작 및 시험

### 4.1 시스템 제작

본 논문에서 제작된 Smart PV ESS는 Fig. 11은 제작된 시제품사진을 나타내고 있다. BMS, Battery Tray, PCS, Anti-PID가 전면부와 후면부에 나누어 배치되어 있는 Rack 구조로 설계하고, 전면부에는 충전 시 전류와 PCS 구동 시

전력이 디스플레이하도록 하였으며, Battery의 용량이 크기기 때문에 DC 릴레이를 통해서 동작 시 발생할 수 있는 역전류를 차단하였고, 각 구성부는 TCP/IP, RS-232, CAN 통신을 통해서 동작하도록 설계하였다.



Fig. 11 Smart PV ESS prototype photos

#### 4.2 실험

본 연구에서 제작된 Smart PV ESS의 출력을 측정하기 위하여 Fig. 12와 같은 실험 환경을 구축하고 실험을 진행하였고 전자부품연구원을 통해서 성능 평가를 진행하였다.

Smart PV ESS의 입력단과 출력단에 AC 전자부하기(3091LD), AC 전원공급기(ES6000W)를 각각 연결하고 전력분석기(WT1800)를 이용하여 입출력 특성을 측정하였다.

Battery의 경우 단일 Battery Tray는 3.7 V 2.6 A 리튬이온 Battery를 14직렬×20병렬로 연결하여 구성하였으며, 단일 리튬이온 Battery 3.7 V 2.6 A와 4병렬로 연결된 Battery 팩을 6 C로 고율 방전했을 경우에도 출력 특성이 유사함을 알 수 있고, Battery 팩의 설계가 최적화됨을 나타낸다. Battery SOC 결정을 위하여 3.7 V 2.6 Ah 리튬이온전지를 분석한 결과 그림과 같이 SOC 80%까지 사용했을 경우에 3,000 Cycle을 확보할 수 있기 때문에 본 논문에서는 SOC를 80%까지 사용하도록 하였다. PV ESS의 용량은 Output Power : 4.5 kW, Output Voltage : AC 220 V, Battery Capacity : 8.1 kWh, THD : >5% 이다.

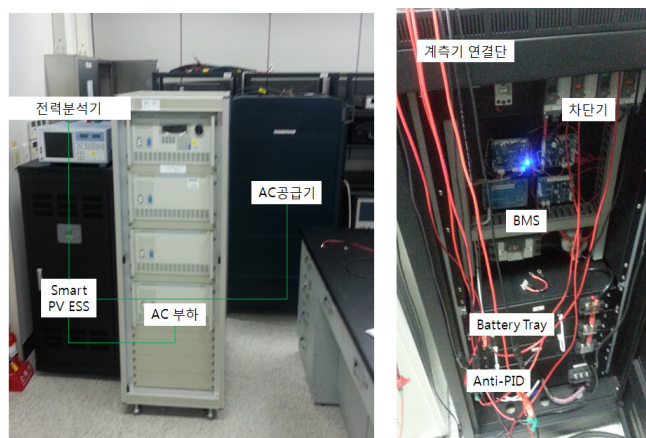
Table 1 Charging the battery tray balancing

NO	V	°C	mΩ	Balance	Status	NO	V	°C	mΩ	Balance	Status
1	3.627	27.05	0.00		Normal	22	3.651	27.05	0.00		Normal
2	3.652	27.18	0.00		Normal	23	3.660	27.28	0.00		Normal
3	3.658	27.05	0.00		Normal	24	3.644	27.05	0.00		Normal
4	3.650	27.18	0.00		Normal	25	3.619	27.28	0.00		Normal
5	3.622	27.05	0.00		Normal	26	3.599	27.05	0.00		Normal
6	3.603	27.18	0.00		Normal	27	3.594	27.28	0.00		Normal



**Table 1** Charging the battery tray balancing (Continue)

NO	V	°C	mΩ	Balance	Status	NO	V	°C	mΩ	Balance	Status
7	3.597	27.05	0.00		Normal	28	3.613	27.05	0.00		Normal
8	3.645	27.00	0.00		Normal	29	3.615	27.23	0.00		Normal
9	3.661	27.00	0.00		Normal	30	3.641	27.23	0.00		Normal
10	3.655	27.00	0.00		Normal	31	3.657	27.23	0.00		Normal
11	3.633	27.00	0.00		Normal	32	3.660	27.23	0.00		Normal
12	3.608	27.00	0.00		Normal	33	3.642	27.23	0.00		Normal
13	3.599	27.00	0.00		Normal	34	3.615	27.23	0.00		Normal
14	3.603	27.00	0.00		Normal	35	3.600	27.23	0.00		Normal
15	3.652	27.09	0.00		Normal	36	3.621	27.28	0.00		Normal
16	3.663	27.23	0.00		Normal	37	3.648	27.14	0.00		Normal
17	3.647	27.09	0.00		Normal	38	3.660	27.28	0.00		Normal
18	3.624	27.23	0.00		Normal	39	3.651	27.14	0.00		Normal
19	3.603	27.09	0.00		Normal	40	3.625	27.28	0.00		Normal
20	3.600	27.23	0.00		Normal	41	3.603	27.14	0.00		Normal
21	3.616	27.09	0.00		Normal	42	3.602	27.28	0.00		Normal



**Fig. 12** Smart PV ESS experiment configuration

### 4.3 실험결과

#### (1) 계통연계 운전 시 Smart PV 운전특성

Fig. 13은 실험 구성을 통해 Smart PV ESS 운전 특성을 측정하는 것으로 계통 연계 운전 시 출력 전압과 전류를 측정하는 것이다.

출력전압 217.9 Vac, 출력 전류 18.5 A, 출력 전력 4.03 kW, 60 Hz, 효율 98.9%가 측정되었다.

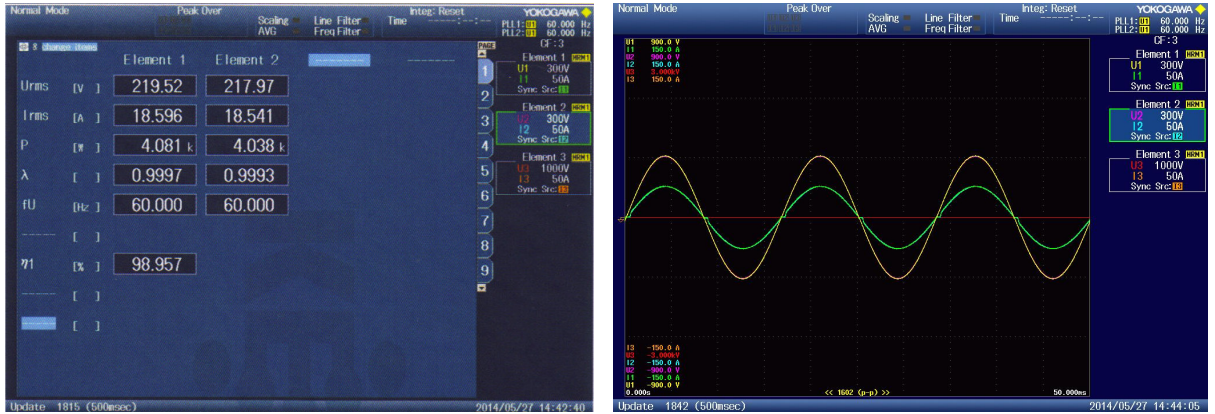


Fig. 13 Grid-connected operation when the output characteristics smart PV ESS

## (2) Smart PV ESS의 입출력 특성

Fig. 14~16은 SOC 100% 상태에서 500 W, 1,000 W, 2,000 W 부하를 동작시키기 위한 Smart PV ESS의 독립 운전 시 입출력 특성을 측정하는 것이다. AC 부하는 Catifomia Instrument의 3091LD 교류 전자부하기를 사용하였다.

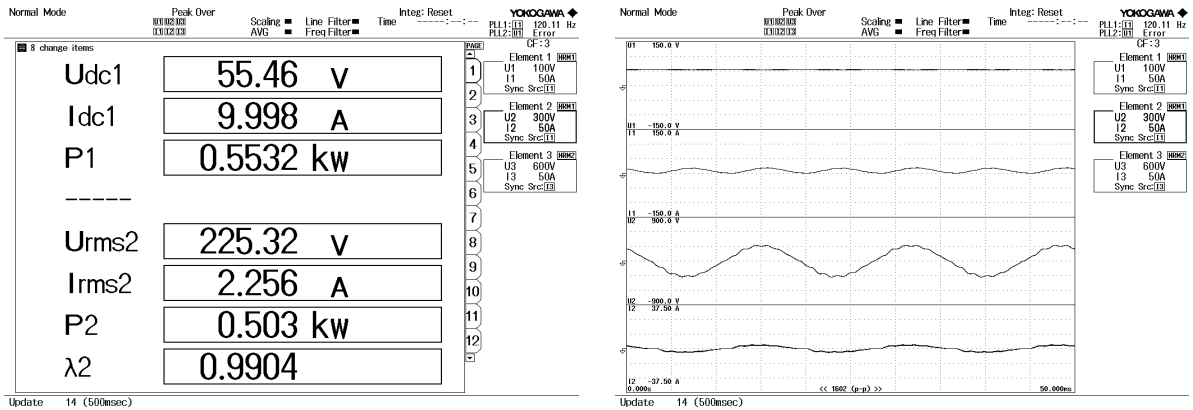


Fig. 14 Independent driving characteristics of the smart PV ESS at 500 W load

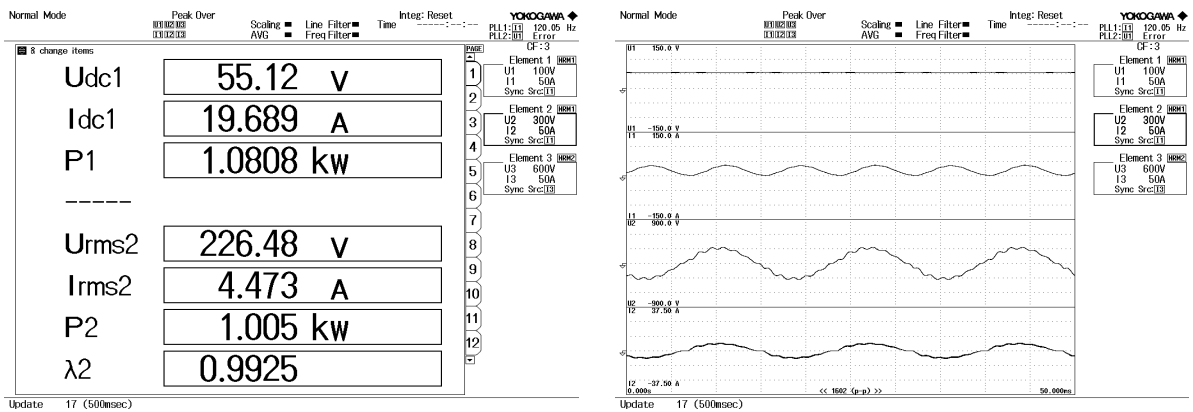


Fig. 15 Independent driving characteristics of the smart PV ESS at 1 kW load

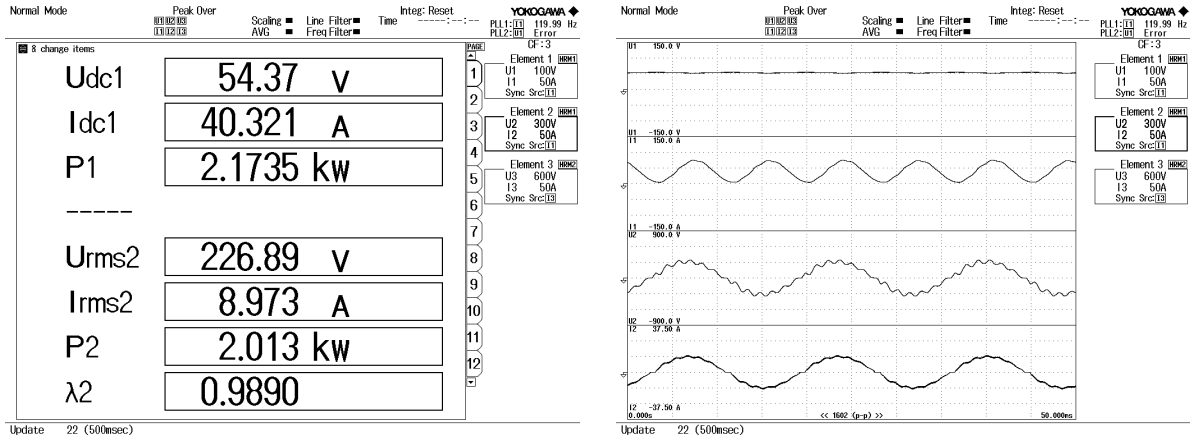


Fig. 16 Independent driving characteristics of the smart PV ESS at 2 kW load

## 5. 결론

본 논문에서는 태양광발전설비와 연계한 ESS 설계 및 제작하였고, 계통연계운전과 독립운전, Peak-Cut, Peak-Shifting 운전을 통해 계통을 안정화할 수 있게 했고, 계통연계운전 및 독립운전을 위한 전력변환장치는 3 kW급으로 구성하였으며, BMS와 CAN 통신을 통해서 동작하게 시스템을 구축하였다.

BMS, Battery Tray, PCS, Anti-PID가 전면부와 후면부에 나누어 배치되어 있는 Rack 구조로 설계하고, 전면부에는 충전 시 전류와 PCS 구동 시 전력이 디스플레이하도록 하였다. 이와 같은 태양광발전설비와 연계한 ESS 설계 및 제작을 통해서 다음과 같은 운전 특성을 얻게 되었다.

- (1) 전력안정화를 위한 독립운전 및 계통연계 운전 기술 개발을 통해 전압 변동율  $220 \text{ V}_{ac} \pm 10\%$  이내, 고조파 왜율 5% 미만, 주파수변동  $60 \text{ Hz} \pm 1\%$  이내를 실현하였다.
- (2) 태양광모듈 효율저하를 방지하기 위한 분극화 방지 기술 개발을 통해 태양광모듈의 분극화에 의한 출력 저하가 보상됨을 확인하였다.
- (3) 계통 연계 운전 시 정격 3 kW에서 인버터 효율 98.9%를 달성하였다.
- (4) Battery 충전 전압 실험을 통해 충전효율 93.6%를 달성하였다.
- (5) ESS 최적화 설계 방법 중 BMS의 직렬×병렬 배열에 따라 첫 번째로 Battery의 수명이 3000 Cycle에서 5000 Cycle로 1.5배로 수명이 길어졌고, 두 번째로 Battery의 수명이 길어짐에 따라 교체 타임이 길어져서 가격 저감을 갖게 되었다.

## 후기

본 연구는 중소기업청의 지원으로 수행되었음(과제번호 : S2111785).

## REFERENCES

1. Nezamabadi, P. and Gharehpetian, G. B., "Electrical energy management of virtual power plants in distribution networks with renewable energy resources and energy storage systems," in Proc. EPDC '11, pp. 1-36, 2011.
2. Duong, T. and Khambadkone, A. M., "Energy Management for Lifetime Extension of Energy Storage System in Micro-Grid Applications," IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 4, Issue. 3, pp. 1289-1296, 2013.
3. Etxeberria, A., Vechiu, I., Camlong, H., and Vinassa, J. M., "Hybrid Energy Storage Systems for renewable Energy Sources Integration in microgrids," in Proc. IPEC '10, pp. 532-537, 2010.
4. Broussely, M. and Pistoia, G., "Industrial Applications of Batteries from Cars to Aerospace and Energy Storage," ELSEVIER.
5. Zhao, B., Song, Q., Liu, W., and Xiao, Y., "Next-Generation Multi-Functional Modular Intelligent UPS System for Smart Grid," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 60, Issue. 9, pp. 3602-3618, 2013.
6. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., and Castilla, M., "Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 56, Issue. 3, pp. 726-736, 2009.
7. Jain, S. and Agarwal, V., "A new algorithm for rapid tracking of approximate maximum power point in photovoltaic systems," IEEE Power Electron '04, Vol. 2, No. 1, pp. 16-19, 2004.
8. Bose, A., "New smart grid applications for power system operations," Power and Energy Society General Meeting, pp. 25-29, 2010.
9. Kollimalla, S. K. and Mishra, M. K., "A Novel Adaptive P&O MPPT Algorithm Considering Sudden Changes in the Irradiance," Energy Conversion, IEEE Transactions on Vol. 29, Issue. 3, pp. 602-610, 2014.
10. Texas Instruments, TMS320F28335 Data Manual, Literature Number: SPRS439M, 2007.