

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 26, No. 2, 2006

BESS를 적용한 계통연계형 PV시스템의 운전특성에 관한 연구

이강연, 정병호, 조금배, 백형래*, 정해덕**

*조선대학교 전기공학과 (space112@hanmail.net), (urchurguni@hanmail.net), (gbcho@chosun.ac.kr),
(hlbaek@chosun.ac.kr), 목포대학교 전기제어신소재공학부(hdjung@dorim.mokpo.ac.kr)**

A Study on the Operating Characteristics for the Grid Interconnected PV System with BESS

Lee, Kang-Yeon, Jeong, Byeong-Ho, Cho, Geum-Bae,
Baek, Hyung-Lae*, Jung, Hae-Duck**

*Cho-Sun university Dept. of Electrical Engineering (space112@hanmail.net),
(urchurguni@hanmail.net), (gbcho@chosun.ac.kr), (hlbaek@chosun.ac.kr),
Mok-Po National University Division of Electrical and Control Eng.**

Abstract

Photovoltaic is an attractive technology to remote power applications, because of its reliability, low maintenance, and zero fuel requirements.

In this paper represents residential PV system based on BESS(battery energy storage system) for managing the electric power, a pattern of daily operation considering the load characteristics of the house, the generation characteristics of PV power, and utility power leveling. For apply to control algorithm, we consider the load on monthly power consumption trend and daily usage pattern. As for the control of the proposed system, to increase the conversion efficiency of the PV power, bidirectional converter is used for MPPT and SPWM inverter. An experimental system is implemented, and some experimental results are provided to demonstrate the effectiveness of the proposed system.

Keywords : 에너지저장시스템(Battery Energy Storage System), MPPT(Maximum Power Point Tracking)

1. 서 론

태양광발전은 태양의 복사에너지를 직접 전기에너지로 변환하는 시스템으로 가동부분이나 열기관이 없어 수명이 길고 다른 발전방식에 비해 운전과 유지보수가 용이하며 모듈로 구성하기 때문에 수요나 지형에 맞게 설계할 수 있다.[1,2]

계통연계형 태양광발전시스템은 발전전력이 없는 밤에는 계통으로부터 전력을 공급받을 수 있기 때문에 독립형보다는 계통연계형 태양광발전시스템이 안정적이고 상용전력의 부하분담효과에 어느 정도 실효를 거둘 것으로 전망된다.[3,4] 그러나 이런 계통연계형 발전시스템은 그 원천이 계통에 있으므로 실질적으로 계통(상용전력)에 문제가 발생할 경우 부하에 전력을 공급하지 못하는 문제점이 있다.[5]

본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하고자 소규모의 계통연계형 태양광발전시스템의 계통에 이상이 발생하여도 부분적으로 독립운전이 가능하도록 BESS를 적용하여 부하에 전력을 안정적으로 공급하기 위한 시스템을 제안하여 실부하에 전력을 안정적으로 공급하고 주택용 부하의 용량에 따라 계통으로의 전력을 되돌려주어 가정용부하가 피크인 야간시간대의 부하를 중점적으로 분담하도록 시스템을 설계하였다. 설계된 시스템의 효용성을 입증하기 위해 BESS 시스템을 구성하여 실험함으로써 전체계통에서는 전력분담 효과 및 계통고장 시 발생하는 정전에 대한 문제해결을 실증하고자 한다.

2. 태양전지의 특성 및 MPPT

2.1 태양전지의 특성

태양전지는 한 개의 이상적인 다이오드와 I_{ph} 의 크기를 갖는 정전류원으로 구성되어 있지만 이상적인 다이오드를 제작하는 것이 불가능하므로 접촉저항 및 표면층의 시트(sheet) 저항 등을 표시하는 직렬저항 R_s 와 병렬저항 R_{sh} 를 고려해야 한다.

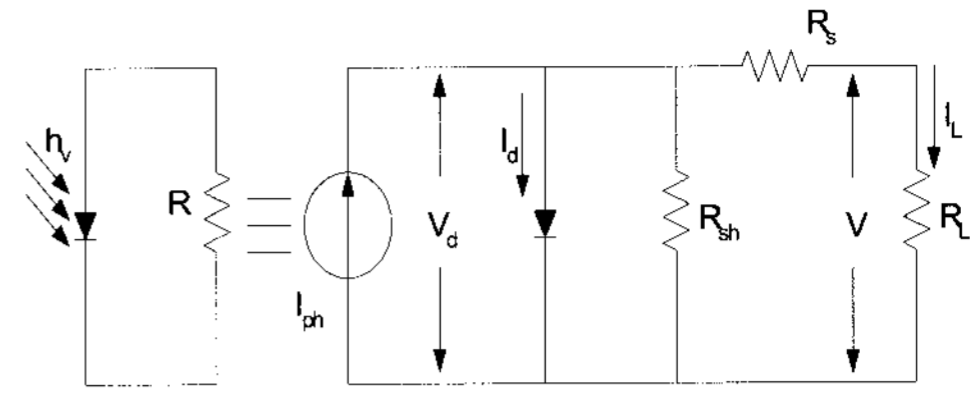


그림 2-1. 태양전지의 등가회로

등가회로에서의 태양전지의 출력전류를 구하면 식(2-1)과 같다.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-1)$$

그림 2-1에서 광 투사시 $R_s = 0$, $R_{sh} = \infty$ 인 이상적인 PN접합 다이오드인 경우 부하에 흐르는 전류 I_L 은 식(2-2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{-qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (2-2)$$

여기서, I_L 은 출력전류, I_{ph} 는 광전류, I_0 는 다이오드 포화전류, n 은 다이오드 상수, K 는 볼츠만 상수이고 q 는 전자의 전하량이다.

개방 전압 V_{oc} , 단락전류 I_{sc} , 충전율 FF (fill factor) 등 3개의 변수는 에너지 변환효율과 관련되는 파라미터로서, $I_L = 0$ 인 조건에서 개방전압 V_{oc} 는 식(2-3)과 같다.

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (2-3)$$

단락전류 I_{sc} 는 $V_L = 0$ 인 조건으로부터 $I_{sc} = I_{ph}$ 가 된다. 전지에 연결된 부하저항의 크기를 조정함으로써 어떤 최적 동작점에서 최대의 출력 P_{max} 를 식(2-4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{max} = V_m \cdot I_m = FFV_{oc} I_{sc} \quad (2-4)$$

부하저항에서 소비되는 전력을 P_{out} 라 하면 식 (2-5)과 같다.

$$P_{out} = V \cdot I = V \cdot \left\{ I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_L}{nkT}\right) - 1 \right] \right\} \quad (2-5)$$

2.2. MPPT 제어

태양전지의 출력특성은 일사량, 동작전압 및 온도 등에 따라 동작특성이 다르며 에너지효율이 가장 높은 최대출력점은 항상 변한다. 본 논문에서 제시된 MPPT는 Matlab m-file을 이용하여 Buck-Boost MPPT 방식을 적용하여 태양전지 모듈의 전압, 전류, 전력특성곡선을 검토하였는데 최대전력점에서 전압은 16.1 [V], 전류는 3.3 [A], 전력은 약 53 [W]로 나타났다. 그러나 실제 실험에서는 약 16 [V]에서 19[V]의 전압과 3.1 [A]에서 3.6 [A]의 전류가 출력되었는데 이것은 부하의 가변 시나 PV시스템 설계 시 내부저항에 의한 손실에 의한 것으로 사료된다.

표 2-1. PV 모듈 정수

Parameter	Value	Parameter	Value
최대전압	53[W]	표준온도	25[°C]
개방전압	21.0[V]	정격전압	17.4[V]
단락전류	3.35[A]	정격전류	3.04[A]

그림 2-3은 온도변화에 따른 태양전지의 전압-전류특성을 시뮬레이션을 통해 관찰한 파형으로 온도변화가 0 [°C]에서 75 [°C] 까지 변화시켰을 때 특성을 나타내고 있다. 온도가 변함에 따라 최대 전력점이 변동함을 알 수 있으며, 따라서 최대출력점 기준값도 변동값에 따라 가변하여야 함을 알 수 있다.

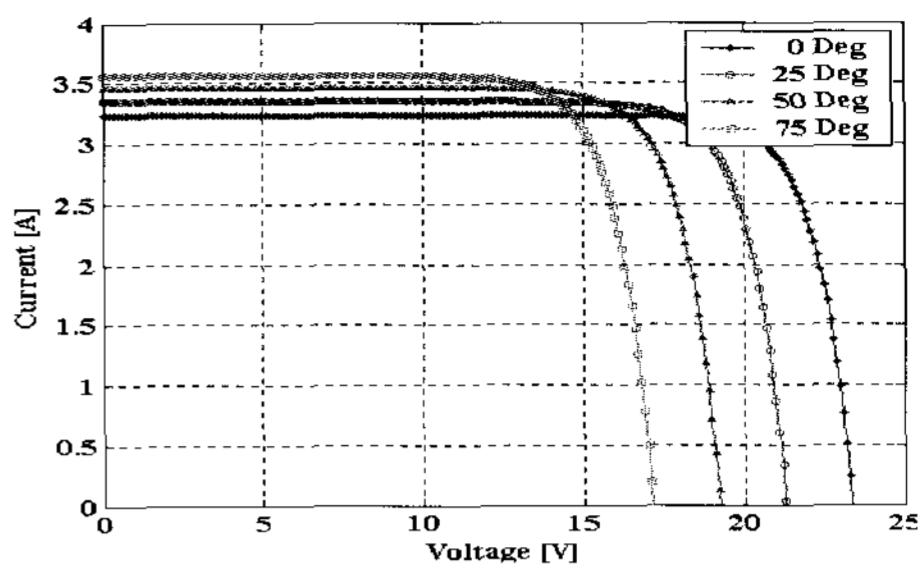


그림 2-2. 온도변동에 따른 I-V 출력특성

그림 2-3에는 일사량변화에 따른 출력특성을 시뮬레이션한 것으로 전압의 변화는 미소하지만 단락 전류는 크게 변화함을 확인할 수 있다.

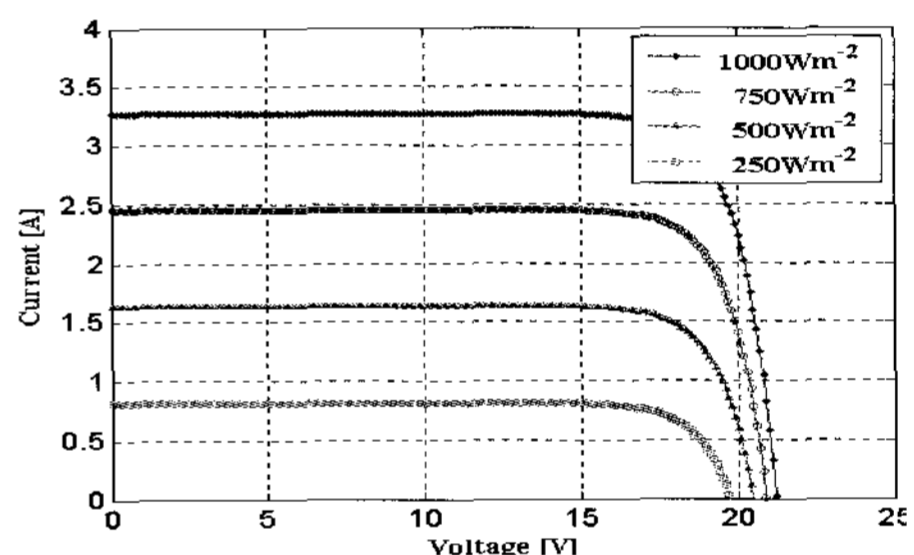


그림 2-3. 일사량의 변동에 따른 I-V 출력특성

그림 2-4는 일사량이 1000 [W/m²] 을 기준으로 하고 일사량을 250 [W/m²] 간격으로 감소한다는 가정 하에서 시뮬레이션을 수행한 결과 일사량의 감소에 따라 최대전력점이 감소함을 확인할 수 있었다. 기후설계 도구 개발을 위해 표준 기후데이터와 건물생체기후도에 관해 고찰하였으며, 각 내용은 다음과 같다.

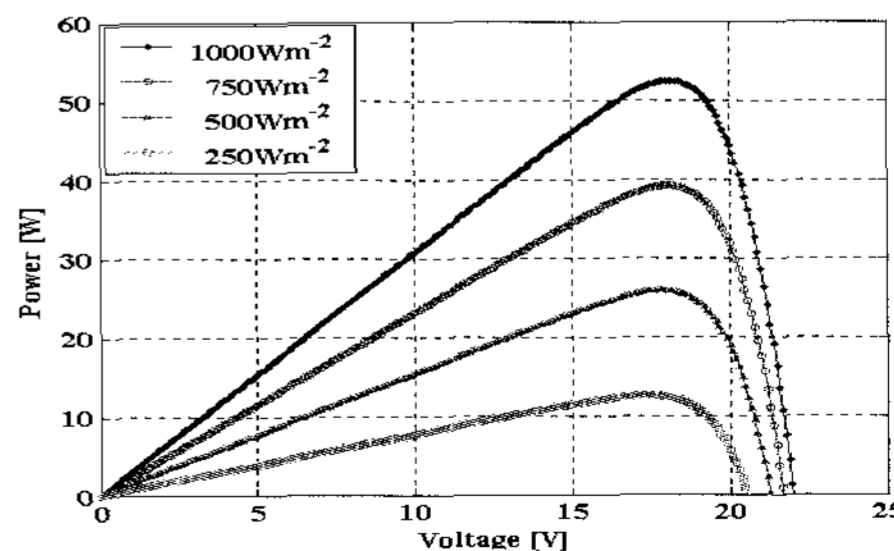


그림 2-4. 일사량 변동에 따른 출력전력특성

3. 계통연계형 PV시스템 및 전력저장장치

3.1 계통연계형 태양광발전시스템

계통연계형 태양광발전시스템은 단방향 연결형과 양방향 연결형으로 분류한다. 그림 3-1은 양방향 계통연계방식의 회로도를 보여준다. 인버터는 기본적으로 변환부의 IGBT(Q1~Q5) 및 필터(리액터 L, 콘덴서 C), 절연트랜스 등으로 구성되어 직류전력을 교류전력으로 변환하여 계통과 동기운전을 하면서 고조파 전류가 적은 정현파전류를 부하기기 및 계통에 공급한다.

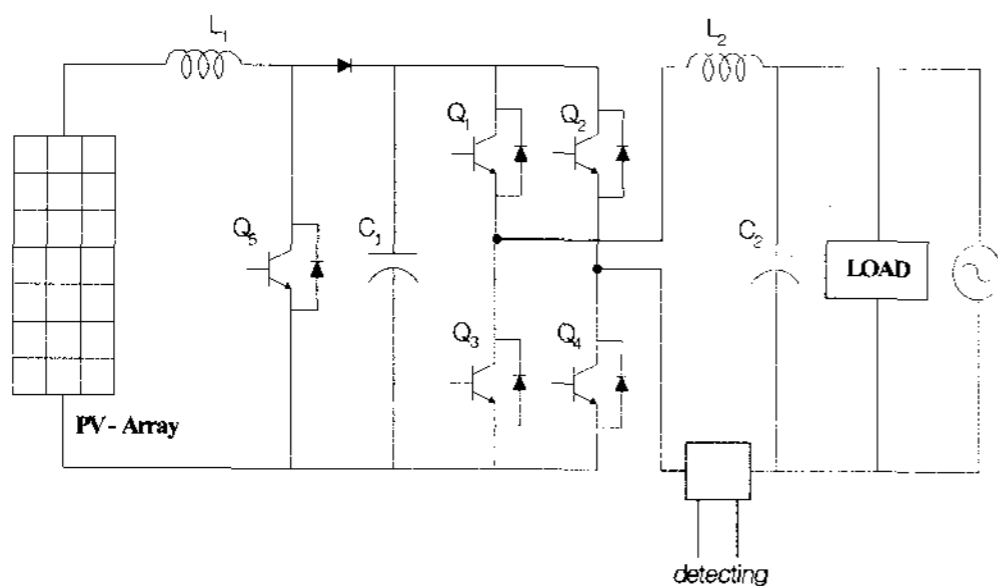


그림 3-1. 계통연계형 PV시스템의 토폴로지

3.2 전력저장장치

전력저장장치가 적용된 시스템에서 주간동안에 배터리는 발전된 전기를 저장하고 부하량이 발전량보다 큰 경우나 발전이 불가능한 야간에 에너지원으로 사용된다. 배터리의 잔존용량(SoC, State Of Charge)은 충전이 진행됨에 따라 증가하게 되는데, 그 값은 식 3-1과 같이 전류에 대한 시간의 적분 값으로 나타낼 수 있다.

$$SoC = SoC_i + \int_i^{f_i} I dt \quad (3-1)$$

여기서, SoC : 충전 후 잔존용량, SoC_i : 충전 초기 잔존용량, I : 충전전류이다. 배터리는 충전하면 잔존용량 증가와 함께 전압이 상승하고 방전 시에는 반대로 전압이 감소하는 특성을 갖는다. 그림

3-2은 배터리 충·방전 특성을 나타내었다. $-\nabla V$ 점은 충전 과정에서 전압이 상승하다 만충전 상태가 되면 배터리 내부의 역반응으로 전압이 일시적으로 감소하는 지점으로 충전을 종료하지 않을 경우 많은 열이 발생하고 배터리에 손상을 주어 배터리 수명을 단축시키는 원인이 된다. 따라서 $-\nabla V$ 점에서는 충전을 즉시 종료하여야 한다.

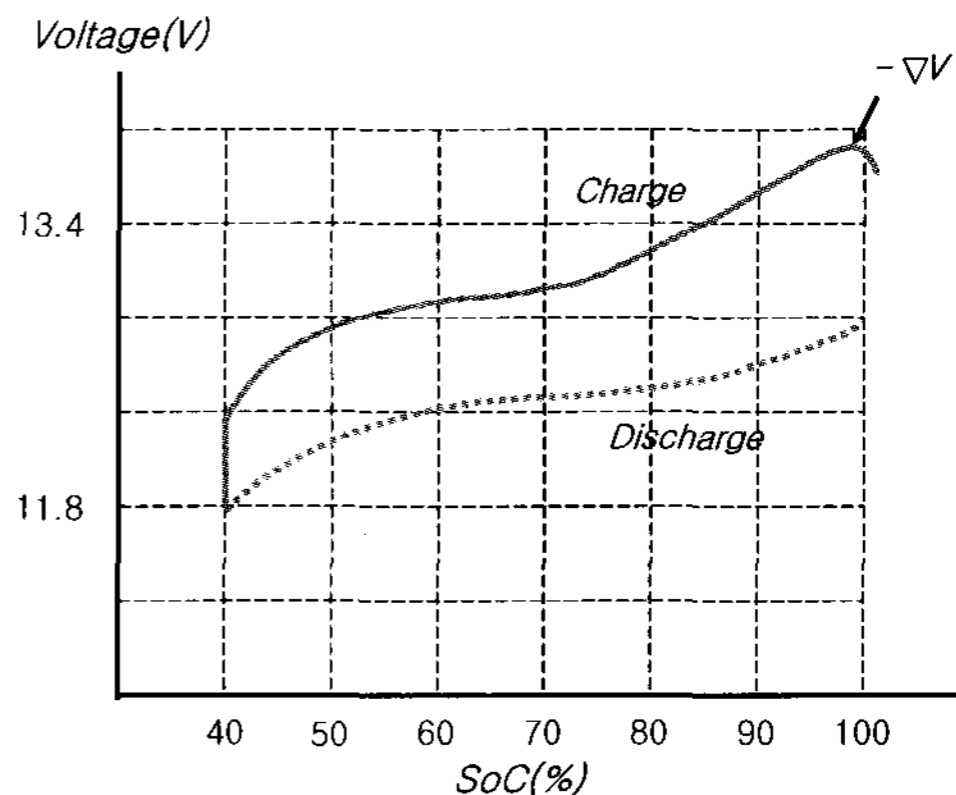


그림 3-2. 배터리의 충방전 특성 곡선

그림 3-3에서 실선은 충전특성 곡선이고 점선은 방전 특성 곡선이다. 방전시에는 배터리 내부저항으로 인해 동일 잔존용량일 때 충전시 전압보다 낮은 전압을 나타내게 된다. 배터리의 보호를 위해 충·방전시 Cut off 전압을 설정하여 배터리의 과충·방전을 예방해야 한다.

시스템의 배터리용량은 기상조건이 나쁘거나 계통의 이상 시에도 정상적인 동작이 가능해야 한다. 국내 기상조건에서는 장마철의 경우를 제외하고는 태양광발전이 3-4일 이상 부일조일인 경우가 거의 없기 때문에 일반적으로 부일조일을 4일로 계산한다.

1일 사용 전류량은 부하량과 사용시간을 감안하여 전압과 효율로 나눈값이며 식(3-2)와 같다.

$$L_a = \frac{L_W \times H_a}{V_b \times \eta_i} \quad (3-2)$$

여기서 H_a 사용시간, V_b 배터리 전압, η_s 시스템 효율, L_w 부하량이다. 실제 배터리 용량 산출식은 다음과 같다.

$$B_w = \frac{N_d \times L_w \times H_a}{V_b \times \eta_s \times \eta_b \times B_{DOD}} \quad (3-3)$$

4. 시스템의 구성 및 실험

4.1 시스템 동작모드

소규모의 계통연계형 PV시스템의 계통에 이상이 발생하여도 부분적으로 독립운전이 가능하도록 BESS시스템을 구성하여 부하에 전력을 안정적으로 공급하기 위한 시스템은 태양광발전부, DC-DC 컨버터부와 BESS부로 구성되어 있으며 태양광발전부에서 DC전력을 공급받아 DC-DC컨버터부에서는 안정된 DC전력을 공급할 수 있도록 하며, BESS는 배터리와 양방향 컨버터, 상용으로부터 부하에 전력을 공급하고 배터리에 전력을 충전하는 부분을 통칭한다.

PV전력을 배터리부에 저장하여 주택용 부하가 최대로 전력을 소비하는 야간 시간대에 전력을 공급함으로써 공급전력을 전체부분 중 상용전력이 공급하는 전력을 저감할 수 있으며 계통이상 시에도 전력을 공급할 수 있는 시스템으로 그림 4-1에서 시스템을 보여준다.

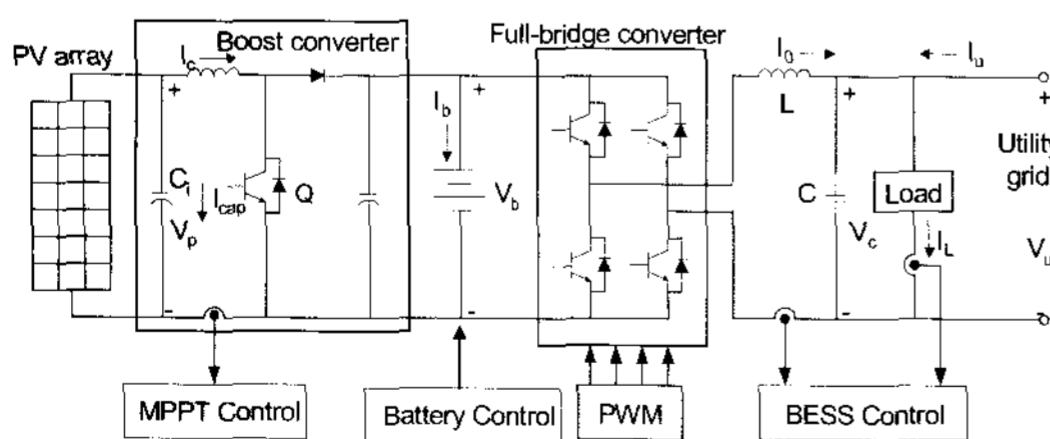


그림 4-1. 제안된 시스템의 구성도

그림 4-2에서는 일일동안의 전력운용면에 있어서 일반소비자의 부하는 야간에 소비전력량이 최대

라는 사실과 태양광발전은 주간에만 전력이 생산되는 점을 감안하여 상용전원, 부하전력, 배터리전력, 태양광전력의 상호관계에 따른 동작을 부하소비전력과 PV출력을 기준으로 하여 4가지 모드로 나누어 제어한다.

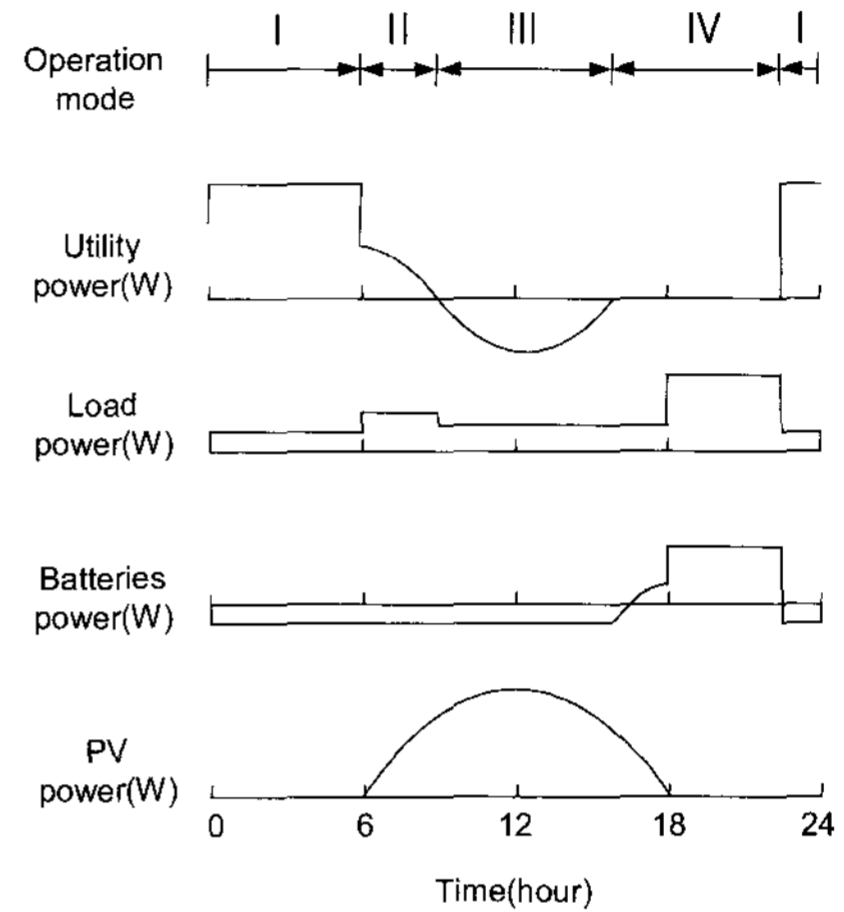


그림 4-2. 전력소비에 따른 24시간 동작패턴

4가지 동작모드에서 Mode I은 기저부하구간, Mode II는 저 일사량 구간, Mode III은 고 일사량 구간이며 이상의 Mode I에서 Mode III구간은 BESS부가 충전하는 구간이며 Mode IV는 방전구간으로 분류 하였다.

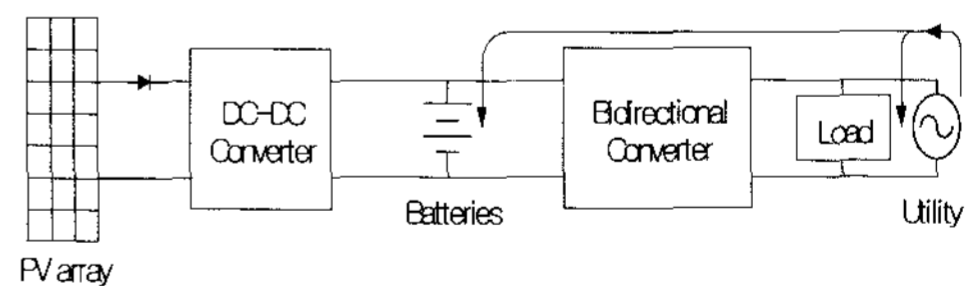


그림 4-3. 모드1에서 동작

그림 4-3은 Mode I의 동작으로 소비전력이 피크가 아닌 시간대(23-06시)로 PV 발전전력이 없는 시간이므로 상용전력이 부하에 직접 전력을 공급하고 배터리에 충전한다.

그림 4-4는 Mode II로 PV 전력이 발전되나 아직 일사량이 부족한 시간대인 이른 아침(06-08시)

의 경우로 PV전력만으로는 전체부하를 감당하지 못하므로 계통의 전력이 함께 부하에 전력을 공급하고 배터리에 충전을 시킨다.

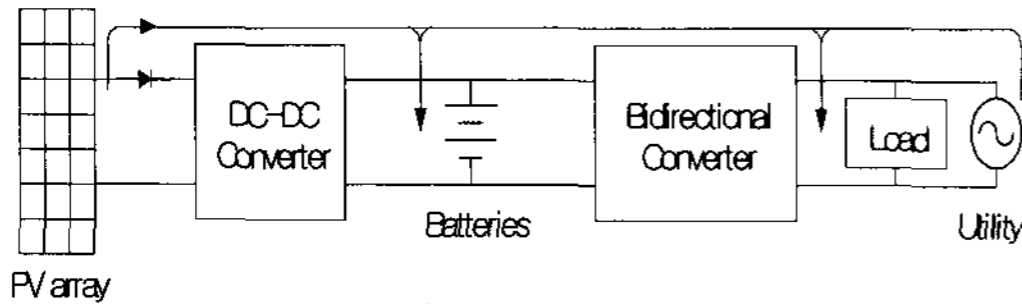


그림 4-4. 모드2에서 동작

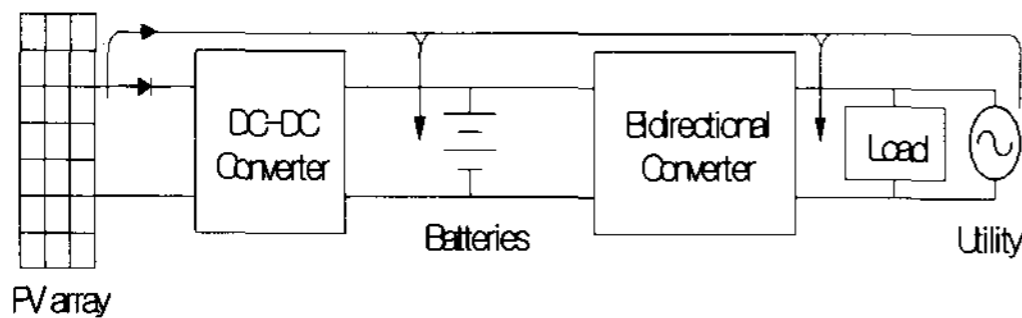


그림 4-5. 모드3에서 동작

그림 3-5는 모드 III으로 PV 전력이 충분히 큰 시간대이고 소비전력이 그렇게 크지 않는 시간대인 낮 시간대(08-16시)로 충분한 PV전력이 배터리에 충전도 하면서 부하에 공급하고 잉여 전력을 상용계통에 공급한다.

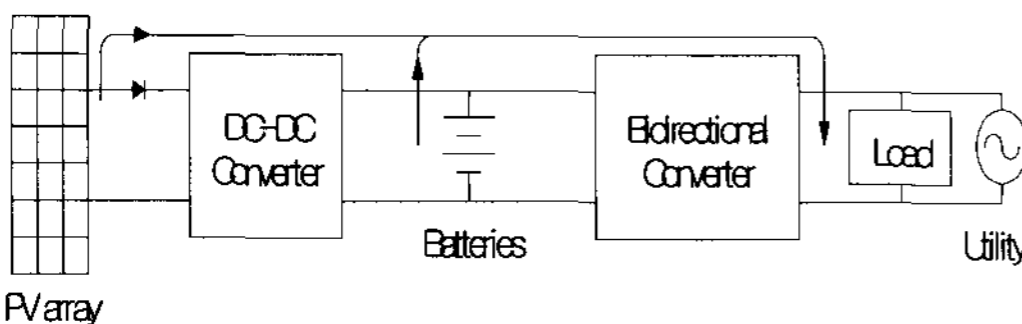


그림 4-6. 모드4에서 동작

그림 4-6은 모드 IV로 PV전력이 많이 발전되지 않는 시간대(16-23시)이나 충분한 배터리 충전전력을 방전하여 부하에 전력을 공급한다. 이 시간대가 일반적인 가정의 경우 가장 많은 전력의 소비시간대이다. 이와 같이 모드 I에서 모드 IV로 순환 운전되면서 PV어레이의 전력과 배터리 전력, 상용전력이 부하에 상시 공급하는 시스템으로 운전이 용이하게 진행될 수 있다.

4.2 BESS 제어부

그림 4-7은 4부분의 주요한 BESS제어부를 보여준다. 각각의 부분은 강제전류 스위칭부, 액티브 파워 필터제어기 G_{apc} , 방전제어기 G_{dc} 그리고 충전제어기 G_{cc} 이다. 이들의 4부분의 멀티 루프제어시스템 형태로 컨버터전류 i_o 가 액티브파워필터제어기 G_{apc} 에 의해 발생된 기준전류 i^*_o 를 추종하도록 설계하였다.

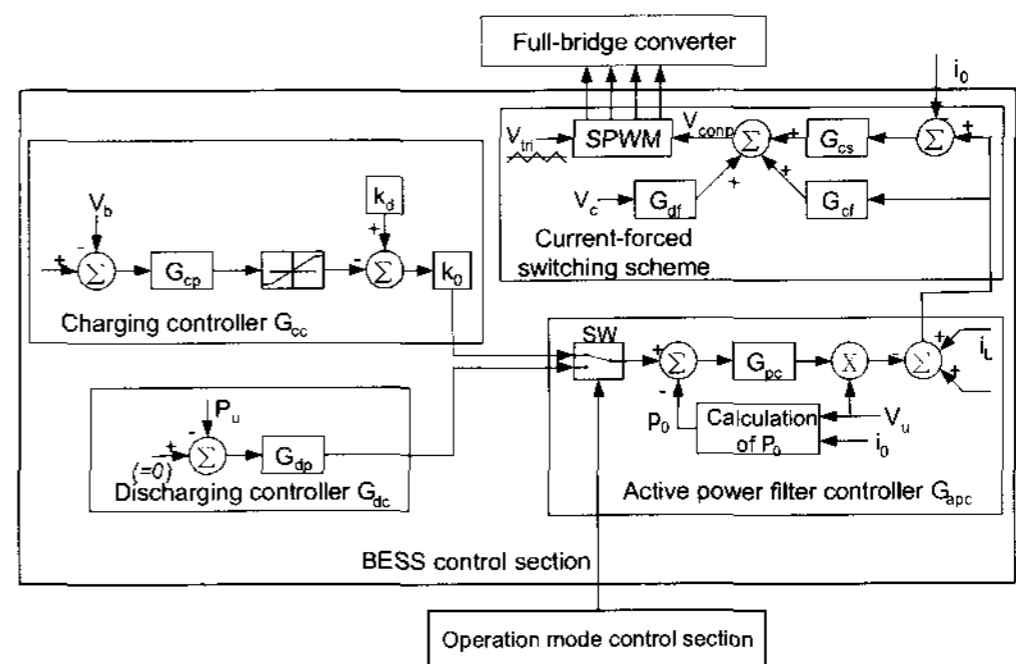


그림 4-7. BESS 제어부

액티브파워 필터제어기 G_{apc} 는 기준전력 P^*_o 을 추종하기위한 방법에 있어 양방향 컨버터의 실제전력 P_o 을 조절할 뿐만 아니라 무효전력을 보상하기 위한 컨버터제어와 단위역률로 제어하기 위한 제어기이다. 기준전력 P^*_o 는 G_{dc} 나 G_{cc} 에 의해 발생되고 스위치 SW 모드선택에 의해 선택되어진다.

시스템이 모드 I-III에서 동작될때 PV제어부의 기준전류 i^*_c 에 k_d 요소(전압)를 곱하여 충전제어기로부터 기준전력 P^*_o 을 발생시키며 k_d 는 다음의 식(4-1)과 같다.

$$k_d = \frac{V_b(V_p - V_b)}{V_p} \quad (4-1)$$

따라서 기준전력 P^*_o 은 $(k_d i^*_c - i^*_b)$ 과 k_o 의 스케일 조절에 의해 얻어진다. 배열에 따라 전력의 흐름은 각각의 모드로 동작되며 다음과 같이 운전된다.

- 1) 모드 I, $i_c^* = 0$, 실제전력흐름은 배터리 충전을 명령하고 상용은 부하에 공급하고 기준 전력 P_o^* 으로 배터리를 충전한다.
- 2) 모드 II, 만약 $k_d i_c^*$ 가 전류 i_b^* 보다 적다면, 배터리는 PV 어레이와 상용전력에 의해 잘 충전된다. 부하는 상용전력에 의해 공급된다.
- 3) 모드 III, 만약 $k_d i_c^*$ 가 전류 i_b^* 보다 적고 전력 P_o^* 이 부하전력보다 크면, PV 어레이는 배터리에 충전되고 모든 부하전력에 공급된다. 그리고 전력 P_o^* 과 부하전력사이의 차는 상용전력에 의해 공급된다.

시스템이 모드 IV에서 작동될때, 상용전력 P_o^* 이 0에 세트되었기 때문에 전력 P_o^* 는 방전제어기 G_{dc} 에 의해 발전되어진다. 4가지 모든 모드에서 G_{apc} 의 액티브 파워필터에 의해 부하교조파들과 무효전력은 양방향 컨버터에 의해 보상한다.

4.3 배터리부

배터리는 정격전압 12[V] 50hr(20Ah) 델코사 Hi-Ca50제품 16개를 직렬연결하여 직류 192[V]를 얻고 최대 충전시 210[V]까지 얻을 수 있는 총용량 10[kWh]급을 적용하였다.

5. 실험결과 및 고찰

가정용 부하의 월 사용전력량 302[kWh]이므로 하루 전력사용량 평균 10.1[kWh]로 조사되었는바 조사에 표본이 된 가정의 부하에는 거실 전등 6개(20W), 안방 전등 2개(40W), 작은방 2개에 전등 2개(각 40W), 세면장 2곳 전등 2개(60W), 주방 전등 2개(각 40W)와 냉장고(500W), 김치냉장고 (300W), 전자렌지(500W), 런닝머신(1kW), TV 2개(300W), 오디오등 이었다.

일일 시간대별 전력 소비패턴은 그림 5-1의 전력소비량으로 표시하여 보여준다. 또한 PV어레이의 전력발생량을 관찰하면 발전전력은 낮 시간대에

최대로 전력을 생산하는데 반해 수용가의 소비전력은 야간시간대에 최고임을 알 수 있었다. 야간시간대의 소비전력량은 시간당 0.7~0.8[kW]로 나타났으며, PV어레이 최대발전전력은 낮 시간대에 시간당 2.3[kW] 정도로 발전된다.

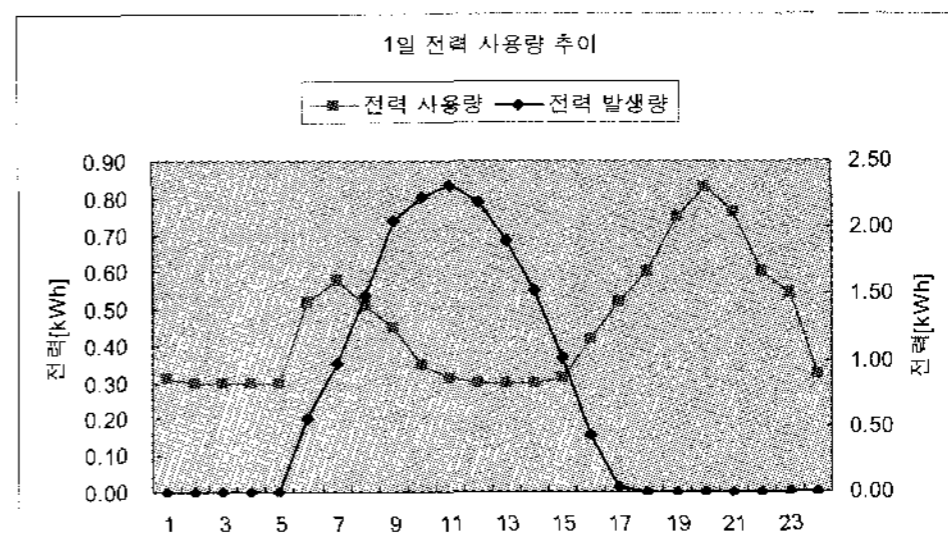


그림 5-1. PV 출력과 일일 전력소비량의 비교

그림 5-2는 전력저장장치에서 전력의 입출력 상황을 보여주고 있는데 제어장치에 의해 전력의 일률적인 충·방전 상태로 기저부하대인 23시부터 아침 6시까지 계통에 이상이 없는 경우 계통으로부터 전력을 받아 부하에 사용하고 저장시스템에도 전력을 공급하여 충전하고 있으며 가정용부하의 피크시간대인 18시부터 22시까지 전력을 전담하고 있다. 전력저장장치에서 평상시 감당하는 부하량은 약 3~4[kW]임을 알 수 있었다.

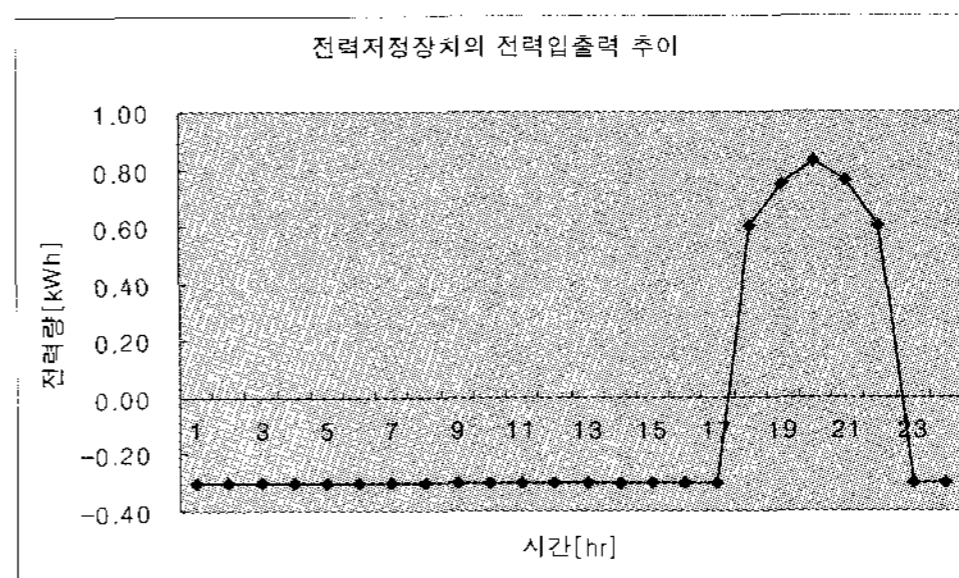


그림 5-2. BESS의 전력흐름

본 실험에 적용된 BESS시스템을 이용하여 PV 어레이, 인버터측, BESS의 충전·방전시, 계통 전력 이상시 부하에의 전력공급을 실험을 하였다.

시스템은 정상적으로 동작하고 계통이상을 가정하여 실험을 행하였다.

그림 5-3은 정상상태에서의 인버터의 출력전압과 전류파형을 보여준다. 그림 5-4는 배터리의 방전시 전압과 전류파형을 나타낸다. 그림 5-5는 급격한 부하변동이 발생 할 때 전류파형을 보여준다. 그림 5-6은 모드Ⅳ의 동작으로 배터리로부터 부하에 공급된 전압 및 전류파형을 보여준다.

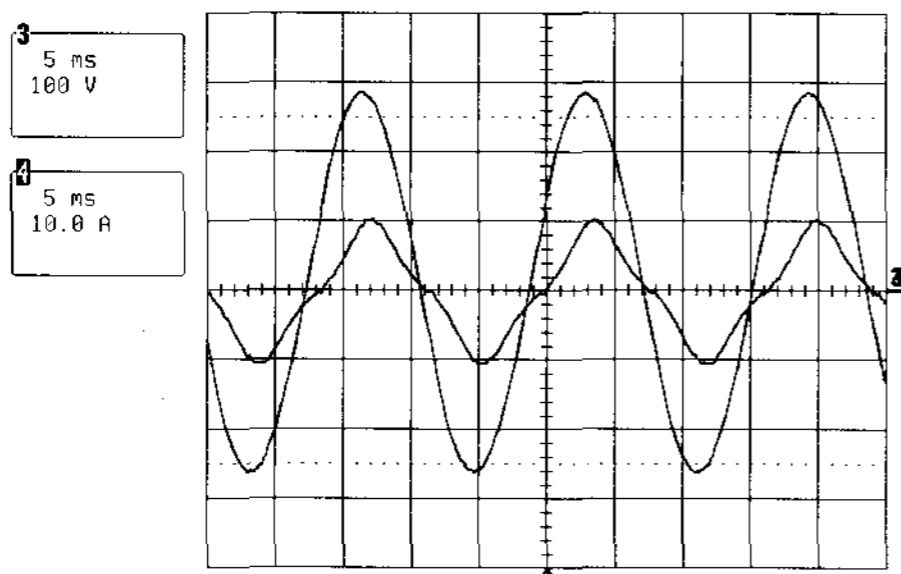


그림 5-3. 인버터의 출력전압과 전류파형

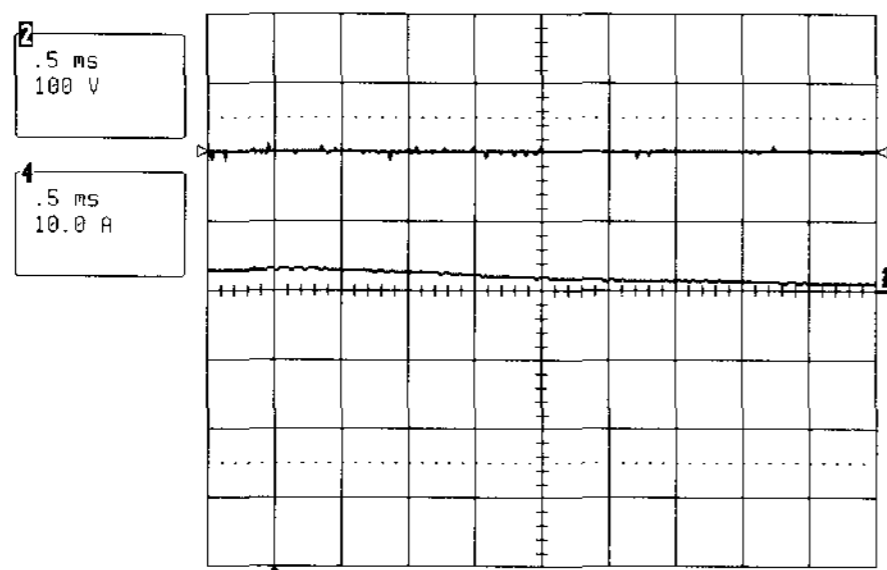


그림 5-4. 배터리 방전시 전압과 전류파형

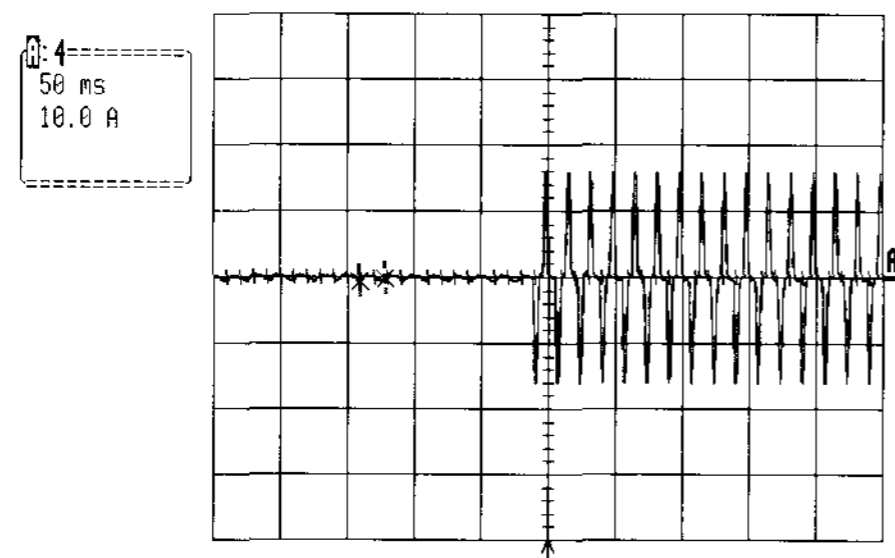


그림 5-5. 급격한 부하변동에 따른 전류파형

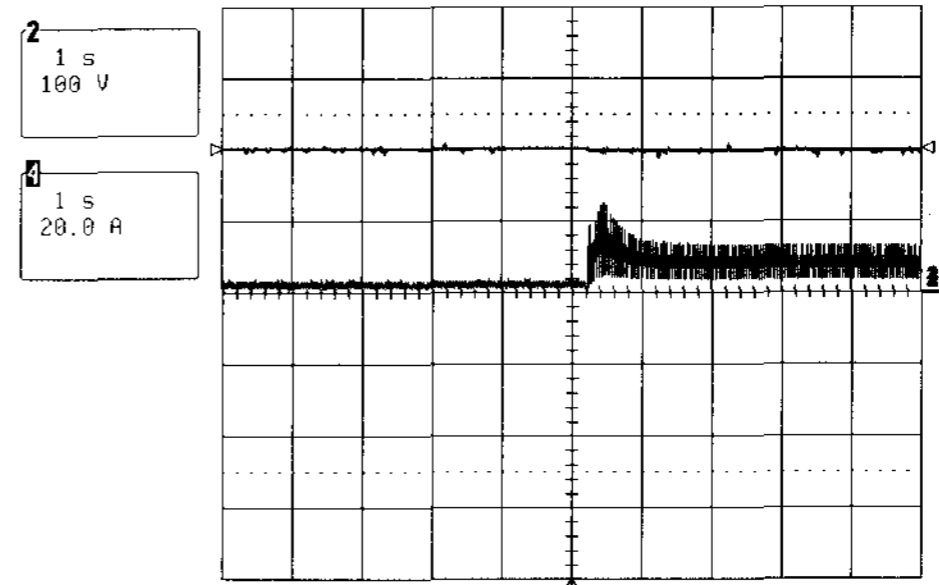


그림 5-6. 배터리로부터 공급된 전압 및 전류파형

6. 결 론

본 논문에서는 주택용 계통연계형 태양광발전을 기본으로 전력저장장치시스템(BESS)을 적용하여 주택용 부하를 적용시켜 실험한 결과, 전체 소비전력 중 상당부분을 주택용 부하의 피크시에 감당하고, 낮 시간대의 잉여전력을 계통으로 보내 낮 시간대에 소비가 늘어나는 사무실 등의 부하를 분담하도록 분산전원체제를 확립하였다. 또한 기후의 변화에 따른 PV어레이의 출력의 변화에 따라 배터리로부터의 안전한 운전이 가능함을 확인하였고 정전과 같은 계통의 이상 발생 시 배터리전력이 원활히 부하에 공급됨을 알 수 있었다.

추후 배터리의 수명과 용량에 관련한 연구추이에 따라 계통의 장시간 이상시 전력 수급의 불안을 자체적으로 해소할 수 있는 방안이 요구된다.

후 기

본 연구는 2003년 조선대학교 교내연구비지원으로 수행되었음

참 고 문 헌

1. Dr. F. Lasnier, Tony Gan Ang, "Solar Photovoltaic Handbook", Energy Technology Division Asian Institute of Technology,

- Vol. 1 , PP. 10-50, 1998.
2. Andoubi, R., Mami, A., Dauphin-Tanguy, G., Annabi, M. "Bond Graph Modelling and Dynamic Study of a Photovoltaic System Using MPPT Buck-Boost Converter", IEEE ICS, Vol. 3, PP. 200-205, 2002.
 3. 유권종의, "PWM Chopper에 의한 태양전지 출력제어?", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, PP. 401~408, 1990. 7.
 4. Tai-Fu Wu, Chien-Hsuan Chang, Yong-Jing Wu, "Single-stage converters for PV Lighting system with MPPT and Energy Backup", IEEE Trans, on Aero. and Electro. Systems. Vol. 35. No. 4, PP. 1306-1317 1999.
 5. E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Novel Battery Charging Regulation System for Photovoltaic Applications", IEE Proceeding. Power Appl., vol. 151, No. 2, PP. 191~197, 2004.
 6. Nagayoshi, H., Orio, S., Kono, Y., Nakajima, H., "Novel PV Array/module I-V Curve Simulator Circuit" IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2002, PP. 1535-1538 , 2002.