



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2012年 2月  
工學碩士學位論文

# MPPT에 의한 독립형 PV시스템의 배터리 제어기 설계

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

任志惠

2012年  
2月  
碩士學位論文

MPPT에 의한 독립형 PV시스템의  
배터리 제어기 설계

任志惠

# MPPT에 의한 독립형 PV시스템의 배터리 제어기 설계

Battery Controller Design of Stand-alone  
PV System Using MPPT

2012年 2月 24日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

任志惠

# MPPT에 의한 독립형 PV시스템의 배터리 제어기 설계

指導教授 曹錦培

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2011年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

任志惠

任志惠의 碩士學位 論文을 認准함.

委員長 朝鮮大學校 教授 白 亨 來 印

委 員 朝鮮大學校 教授 金 容 載 印

委 員 朝鮮大學校 教授 曹 錦 培 印

2011年 11月

朝鮮大學校 大學院

# 목 차

## ABSTRACT

I. 서 론 .....	1
II. 이론적 고찰 .....	3
A. 태양광발전 시스템 .....	3
1. 태양광발전 시스템의 구성 .....	3
2. 독립형 태양광발전 시스템 .....	4
3. 계통연계형 태양광발전 시스템 .....	6
B. MPPT 제어 알고리즘 .....	9
1. 일정 전압 제어방식 .....	10
2. P&O 제어방식 .....	10
3. IncCond 제어방식 .....	12
C. Flyback 컨버터 동작특성 .....	15
1. 스위치 Turn-on 인 경우 .....	16
2. 스위치 Turn-off 인 경우 .....	18
III. 시스템 구성 및 설계 .....	24
A. 시스템 구성 .....	24
1. 태양전지 및 시스템 구성 .....	24
2. 플라이 백 컨버터 설계 .....	26

B. 충전기 설계 .....	28
IV. 시뮬레이션 및 실험 .....	32
A. 시뮬레이션 .....	32
B. 실험 .....	35
C. 결과검토 .....	37
V. 결    론 .....	38
참고문헌	

## List of Tables

<표 1> 태양전지 모듈 규격 .....	25
<표 2> 제안된 시스템 설계사양 .....	25



## List of Figures

그림 1. 독립형 태양광발전시스템 구성 .....	4
그림 2. 계통연계형 태양광발전 시스템 구성도 .....	6
그림 3. 단방향 계통연계형 태양광발전시스템 블록다이어그램 .....	8
그림 4. 양방향 계통연계형 태양광발전시스템 블록다이어그램 .....	8
그림 5. P&O 제어 방식 제어알고리즘 순서도 .....	11
그림 6. IncCond 제어 방식 제어알고리즘 순서도 .....	14
그림 7. 플라이백 컨버터 회로도 .....	15
그림 8. 스위치가 Turn-on 상태에서의 회로도 .....	17
그림 9. 스위치가 Turn-off 상태에서의 회로도 .....	22
그림 10. 플라이백 컨버터 전류 및 전압 파형 .....	23
그림 11. MPPT를 적용한 Battery 충방전 제어 시스템 구성도 .....	24
그림 12. 플라이백 컨버터 방식의 충방전 회로도 .....	26
그림 13. 충전지 모델 .....	28
그림 14. 충방전시 전압 모델 .....	29
그림 15. 충전 효율 구성도 .....	29
그림 16. 방전 전압 모델 .....	30
그림 17. 온도 특성 구성도 .....	30
그림 18. 충방전시 잔존율 모델 .....	31

그림 19. Matlab-Simulink를 이용한 제어 알고리즘 블록도 .....	32
그림 20. 일사량 변화에 따른 태양전지 .....	33
그림 21. 배터리 충전 전압, 전류 .....	33
그림 21. 배터리 충방전 제어기 전체 구성도 .....	35
그림 22. 충전시 충전지의 각부 파형 .....	36
그림 23. 충전시 태양전지 출력 전압 및 전류 .....	36
그림 24. 충전지의 충전 전압 및 전류 .....	37
그림 25. 방전시 충전지 전압 및 전류 .....	37

# ABSTRACT

## Battery Controller Design of Stand-alone PV System Using MPPT

Ji-Hye Im

Advisor : Prof. Geum-Bae Cho, Ph.D.

Department of Electrical Engineering,

Graduate School of Chosun University

The current world resource depletion and environmental pollution as measures for the environmentally sound renewable energy development. Among the various renewable energy sources and energy is a clean energy indefinitely for photovoltaics. Solar power is the insolation energy is converted into electrical energy to receive direct semiconductor devices using solar power system. Therefore, there is no pollution or noise pollution, and can produce an infinite energy, semiconductor devices are easy to maintain and installation.

However, the output power is joining the surroundings and solar insolation of the affected disadvantages.

Solar cell has the maximum power point tracking always near to

maximum output power points about external conditions. Among the most of MPPT widely methods used incremental conductance (IncCond method) control method and perturbation and observation (P&O) control method and on the day before voltage control mode control.

This paper study of 170W stand-alone Photovoltaic MPPT system for charge and discharge control system of the battery. The proposed system is a way of flyback converters, and controls the algorithm used P&O control method and ATmega128.

# I. 서 론

현재 세계는 자원고갈과 환경오염에 대한 대책으로 친환경적인 신재생 에너지 개발에 힘쓰고 있다. 여러 가지 신재생에너지 중에서도 관리가 쉽고 무한정한 에너지를 가지는 청정에너지인 태양광발전이 각광받고 있다.

태양광발전은 태양의 빛 에너지를 받아 직접 전기에너지로 변환하는 반도체 소자인 태양전지를 이용하는 발전시스템이다. 따라서 오염이나 소음 등의 공해가 없고 무한한 에너지를 생산할 수 있으며, 반도체 소자로서 수명이 길며 설치 후 유지관리가 쉽고 설치가 비교적 용의하다.

하지만 태양광발전의 출력전력은 온도, 그림자 등 주변 환경의 영향을 많이 받으며 태양전지에 입사되는 일사광선의 양의 영향을 많이 받는 단점이 있다.<sup>[1,2]</sup>

태양광발전의 효율을 높이기 위해서 태양전지 셀 자체의 효율을 높이거나 에너지 손실을 최소화 하며, 태양전지로부터 최대 전력을 얻을 수 있는 최대 출력 제어가 필요하게 되는데, 주어진 외부조건에 대하여 태양전지가 항상 최대 출력 전력점 근처에서 동작하도록 하는 것을 최대 전력 추종 제어(Maximum Power Point Tracking)라고 한다.

최대 전력 추종 제어(MPPT)의 여러 가지 제어방법 가운데 가장 많이 사용하는 방법으로는 일정 전압 제어 방식과 Perturbation and Observation (P&O) 제어방식과 Incremental Conductance (IncCond) 제어방식이 있다.

이러한 최대 전력 추종 제어를 하기 위해선 태양전지가 외부조건에 대하여 항상 MPP에서 동작할 수 있도록 추종해주는 컨버터가 필요하다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 MPPT를 적용한 170W 급 독립형 태양광발전 시스템의 배터리 충전제어 제어 시스템에 대해서 연구하였다. 제안된 컨버터는 DC-DC 플라이백 컨버터를 사용하였고 제어 MCU(Micro Controller Unit)는 Atmel 사의 8bit RISC 방식의 ATmega128을

사용하였고, 제어 알고리즘으로는 P&O 제어방식을 적용하여 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였으며 실험을 통해 비교하여 보았다.

## II. 이론적 고찰

### A. 태양광발전시스템

#### 1. 태양광발전시스템의 구성

태양광발전시스템은 태양의 직사광선을 받아 바로 직류전력을 발전하는 태양전지와 발전된 전력을 부하에 공급하기 위한 부하 매칭의 기능을 필요로 한다.

태양광발전시스템은 일사량에 의존하여 직류전력을 바로 발전하는 태양전지 어레이, 발전된 전력을 저장하는 전력 저장 축전기능, 발전된 직류전력을 교류전력으로 변환시켜주는 인버팅 기능과 전력품질 및 보호기능을 갖는 PCS(Power Conditioning System) 기능, 전력계통이나 다른 전원에 의한 Back-up 기능 그리고 발전된 전력을 공급하기 위한 대상 부하의 기능으로 구성되어 있다. [1]

태양광발전시스템은 일사광선인 태양 빛에너지를 받아 직접 전기에너지로 변환하는 부분은 태양전지나 배선, 지지 구조물을 총칭하여 태양전지 어레이라고 한다. 태양전지 어레이 구조물과 구성기기는 일반적으로 주변장치라고 한다. 태양전지 어레이와 축전지를 제외한 인버터 등의 전기적인 전력변환 기기류와 제어·보호장치를 일체구조의 유니트로서 공급하는 경우를 PCS라고 한다.

## 2. 독립형 태양광발전시스템

독립형 태양광발전시스템은 낙도나 산간벽지, 무인등대, 무인중계소 등 전력 계통으로부터 전력을 공급받지 못하는 곳에 축전지나 인버터를 이용하여 DC 부하 또는 AC 부하에 전력을 공급하여주는 시스템이다.

독립형 태양광발전시스템의 구성은 그림 1과 같이 과전압 안정회로를 부착한 축전지 저장방식으로 인버터 내에 과전압 보호 장치의 설치되어 있어 항상 일정전원을 축전지에 공급하여 운전하는 시스템으로 구성되어 있다.

독립형 태양광발전시스템에는 Back-up System을 보완시킨 축전지 저장장식을 사용하여 축전지의 전력이 떨어질 경우 Back-up System으로 축전지를 충전하여 운전하도록 설계하여 태양전지와 축전지를 최악조건에 맞추어 충분하게 설치하지 않아도 되므로 직류 부하용 시스템으로서 가장 이상적이며 효율적인 시스템이다. [2]

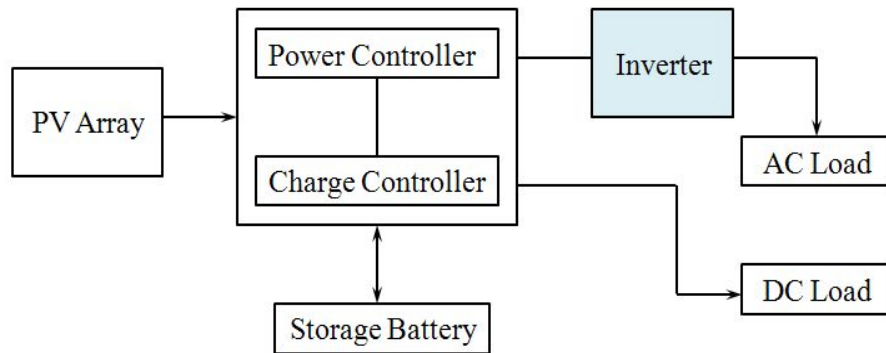


그림 1. 독립형 태양광발전시스템 구성



독립형 태양광발전시스템은 축적설비를 가지고 있으며 계통선과 분리되어 있기 때문에 시스템에서 발생된 무효전력이나 유효전력 그리고 고조파는 전력계통선에 영향을 끼치지 않는다. 그러나 축적설비가 고가이고 넓은 설치공간을 필요로 하며 축전지의 액 보충, 유출, 폭발과 같은 문제점이 있다. 또한 태양전지에 축전지를 직접 병렬로 연결하여 사용하는 경우 축전지의 전압동요가 태양전지의 동작점을 이동하게 하여 최대 전력을 얻는 것이 불가능하며, 축전지의 충방전 손실이 발생하게 되어 효율이 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

### 3. 계통연계형 태양광발전 시스템

계통연계형 시스템은 PV 모듈과 인버터를 직접 연결함으로써 PV 모듈로부터 발생하는 직류 전원과 계통선의 교류전원을 균형있게 유지하여 AC 부하에 전력을 공급하는 시스템이다.

계통연계형 태양광발전시스템은 단방향 연결형과 양방향 연결형으로 구분할 수 있으며, 단방향 계통선 연결방식은 주택용, 공장용 전원 등으로 많이 이용되는 시스템으로서 단방향 계통선 연계형 인버터를 사용하여 부하측에 전력을 공급하며 축전지를 사용하지 않고 운전한다. 그리고 계통선에서는 태양전지에서 공급되는 전력의 부족분만을 부하측으로 공급하는 시스템으로서 그림 2은 계통연계형 태양광발전시스템의 구성도를 나타내고 있다.<sup>[3,4]</sup>

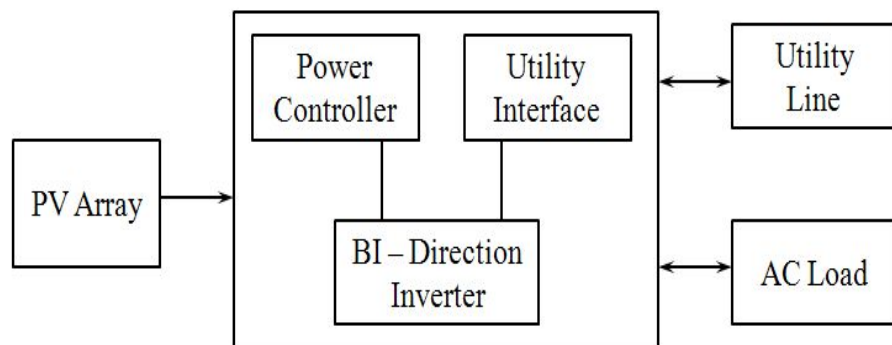


그림 2. 계통연계형 태양광발전 시스템 구성도

계통연계형 태양광발전시스템은 대용량 발전소의 경우나 주택용 전원 등에 이용하는 시스템으로 계통선 연계형 인버터 출력이 부하가 필요로 하는 전력보다 클 경우 그 잉여전력은 계통선으로 공급되며, PV 모듈로부터 발생된 인버터 출력이 부하가 필요로 하는 전력보다 적을 경우 부족한 전력은 계통선에서 공급된다.

또한 독립형 시스템에서와 같이 고가의 축적설비가 필요 없기 때문에 축전지의 충방전 손실이 없고 효율이 개선되는 장점을 가지고 있다. 그러나 계통연계형 시스템에서 PV 모듈의 발생전력은 인버터를 통해 계통선과 직접 연결되어 있기 때문에 인버터에 발생하는 고조파에 의한 유효전력과 무효전력의 동요는 직접 전력 계통선에 영향을 미치게 된다.

계통선에는 많은 시스템들이 연결되어 있고 시스템의 발생전력과 수요전력이 균형상태에 있다면 계통선에서 문제들은 찾기가 매우 어렵다. 그러므로 안정성에 관련된 기술적인 문제들이 나타나게 되며, 이러한 기술적인 문제점 해결을 위해 태양전지와 계통선 사이에 전기적인 절연이 필요하며, 시스템 효율이 높기 때문에 주택용 PV 시스템으로 사용하기 위한 가장 이상적인 시스템 형태라 할 수 있다.

그림 3은 단방향 계통연계 방식의 블록다이어그램을 나타내며 그림 4에서는 양방향 계통연계 방식의 블록다이어그램을 나타내고 있다.

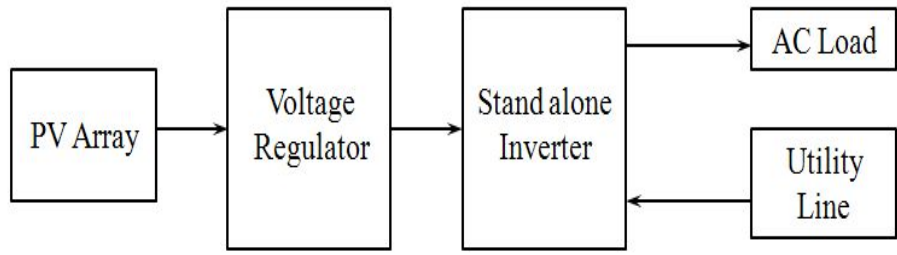


그림 3. 단방향 계통연계형 태양광발전시스템 블록다이어그램

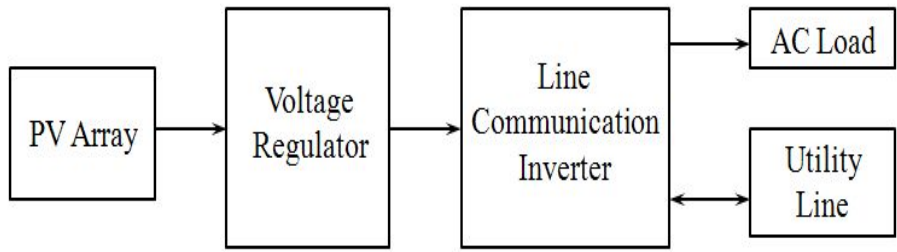


그림 4. 양방향 계통연계형 태양광발전시스템 블록다이어그램

## B. MPPT 제어 알고리즘

태양광발전은 태양전지에 태양광을 받아 직접 전기에너지로 변화하는 발전 시스템이다. 이러한 태양전지는 주변환경의 영향을 많이 받으며 출력되는 최대전압은 일사량과 온도에 의해서 순시적으로 변화하게 되기 때문에 태양전지의 동작점이 변하게 되어 최대출력을 얻을 수 없다.

따라서 태양전지를 효율적으로 동작시키기 위해서는 태양전지 출력을 항상 최대전력점에서 동작하도록 하는 제어가 필요하다. 이러한 태양전지의 최대 전력점을 찾아 제어하는 방식을 최대 전력출력 추종 제어 MPPT라고 한다.

MPPT제어는 태양전지 어레이에 연결된 부하를 제어하여 임피던스 매칭을 최적화함으로써 MPP 동작이 가능하게 되며, 제어방법은 아날로그 방식과 디지털 방식으로 분류된다. 알고리즘 측면에서는 일정 전압제어 알고리즘, P&O 알고리즘, IncCond 알고리즘 등으로 분류 할 수 있다.<sup>[5]</sup>

아날로그 제어방식의 경우 제어회로와 센서를 이용하여 구현이 가능하지만, 제어의 유연성과 다른 종류의 태양전지 어레이에 적용을 쉽게 하기 위하여 DSP 또는 마이크로 컨트롤러를 이용하는 것이 유용하다.

MPPT기술의 핵심은 측정된 어레이 파라미터(I,V,P)를 이용하여 최대전력점을 추적하는 알고리즘이며, 태양전지 어레이의 동작점 변화와 어레이 출력 전력의 변화에 일치시키기 위하여 연속적으로 동작시키는 것이다.

MPPT 추종 알고리즘은 태양전지의 특성에 종속적이지 않고 자유로워야 하며, 실제적인 최대전력점 추종이 가능하여야 하며 주기적인 튜닝이 필요치 않아 추종 속도가 빨라야 한다. 이 방법들은 전력-전압의 기울기에 의하여 제어하는 방식으로 여러 실험을 통하여 P&O 방식보다 IncCond 방식이 더 향상된 알고리즘 방식임이 증명되었으며 빠른 일사량 변동 시에 유리한 알고리즘으로 알려져 있다.<sup>[6,7]</sup>

## 1. 일정 전압 제어방식

태양전지 어레이 출력전압은 일사량의 변화에 대해서 약간의 변동폭을 가지는 정전압 특성을 나타내고 있으므로, 어떤 일정한 전압을 설정하여 정전압으로 제어하는 방법을 일정전압 제어방법이라 한다. 이 기법은 출력에 대해 전력량이 필요하지 않으며, 부스트 컨버터의 Duty는 제어 회로에 의해 결정되며 이것의 출력측 DC전압은 정상상태 조건의  $V_{ref}$  값에 의해 일정하게 유지된다. 이 일정전압 제어방법은 전류센서를 줄일 수 있으나 일사량이 급변하는 경우 정확한 최대 전력점을 찾아 동작하지 못해 출력효율이 감소하는 단점이 있다.<sup>[8]</sup>

## 2. P&O 제어방식

P&O 제어방법은 간단한 피드백 구조를 갖으며 소수의 측정 파라미터를 갖기 때문에 널리 사용된다. 이는 태양전지의 전압을 주기적으로 증가 또는 감소시킴으로써 동작하며, 이전의 교란주기 동안의 태양전지 어레이 출력 전력과 함께 현재 어레이 출력 전력 비교에 의해 최대전력의 상태를 연속적으로 추적하며 찾는 방법이다.

만약 전력이 증가하게 되면 교란은 다음 주기 동안 계속해서 같은 방향으로 증가할 것이다. 하지만 그렇지 않으면 교란의 방향은 반대가 될 것이다. 이것은 어레이 단자전압이 모든 MPPT 주기 동안 교란된다는 것을 나타낸다. 그러므로 출력전력이 최대 전력점에 이르렀을 때 P&O 알고리즘은 일정하거나 또는 천천히 변하는 환경조건 하에서 자력진동 (Self Oscillation)을 한다. 그 결과 태양전지 어레이에 손실이 발생하게 된다.

이 문제는 최대 전력점에 도달했을 때를 검출하기 위해 바로 앞의 주기 동

안의 두 개의 파라미터 비교와 교란부를 바이패스하기 위한 P&O 알고리즘의 개선에 의해 해결할 수 있다. 전력손실을 줄이기 위한 다른 방법으로는 교란  $\text{step}(\Delta V)$ 의 감소가 있는데 이 방법은 일사량이 낮은 경우 제어특성이 나빠지고, 환경조건이 급하게 변할 경우 최대 전력점 추적속도가 늦어지게 되므로 step의 결정이 중요하게 된다.<sup>[9]</sup>

P&O 방식 제어알고리즘은 그림 5와 같은 순서도에 의해 동작한다.

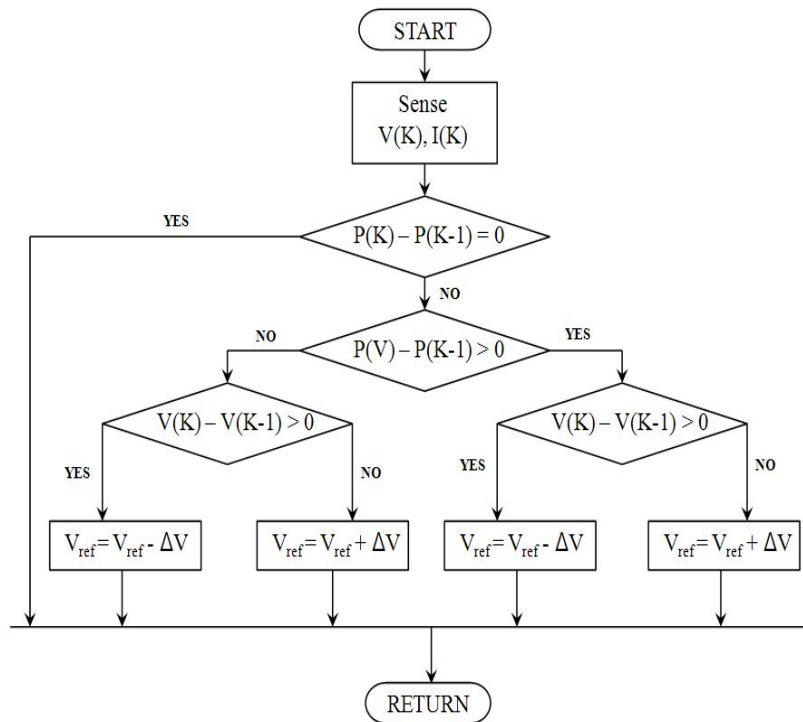


그림 5. P&O 제어 방식 제어알고리즘 순서도

### 3. IncCond 제어방식

IncCond 알고리즘은 P&O 알고리즘의 단점을 피하기 위한 방법으로 제안된 알고리즘이다. 태양전지 전압  $V$  에 대한 출력전력  $P$  의 미분이 최대 전력점에서 '0' 이 된다는 이론을 기초로 한 제어방법이다. 태양전지의 P-V 특성을 보면 최대전력점을 기준으로 왼쪽의 미분값은 '0' 보다 크고, 오른쪽은 '0' 보다 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 다음과 같은 식을 이끌어 낼 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$V = V_{mp} \quad \frac{dP}{dV} = 0 \quad (1)$$

$$V < V_{mp} \quad \frac{dP}{dV} > 0 \quad (2)$$

$$V > V_{mp} \quad \frac{dP}{dV} < 0 \quad (3)$$

$V_{mp}$ 는 최대출력전력점의 전압을 나타낸다. 식 (1)로부터  $P = VI$  와의 관계를 이용하여 식 (4)를 구한다.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dI}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (4)$$

식 (1)와 식 (4)를 조합하여 MPP(Maximum Power Point) 조건  $V = V_{mp}$  을 만족하는 다음 식을 얻을 수 있다.



$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (5)$$

이 알고리즘은 DC-DC 컨버터의 입력이나 P&O 알고리즘의 기준 전압  $V_{ref}$  를 조정함으로써 이행된다.

필요 증분  $dV$  와  $dI$  의 변화는 이전 주기에 측정된  $V$  와  $I$  의 값에 대하여 가장 최근 값을 비교함으로써 접근시킨다.

$$dV(k) \approx V(k) - V(k-1) \quad (6)$$

$$dI(k) \approx I(k) - I(k-1) \quad (7)$$

MPPT 를 찾기 위한 중심함수는 다음과 같은 조건을 적용한다.

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (8)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (9)$$

만약 식 (8)의 조건과 일치한다면 시스템은 MPP에서 동작하게 되므로 동작전압을 바꿔줄 필요가 없다. 하지만 만약 식 (8)에서 동작을 하지 않을 경우 식 (2) 과 식 (3) 에 대한 식 (9) 을 전압이  $V_{mp}$  보다 크거나 작을 때 동작하는 시스템 조건을 결정하기 위해 사용한다. 이 때 항상 MPP 동작전압이 조정되어 최대전력을 얻을 수 있게 된다.<sup>[11,12]</sup>

그림 6 은 IncCond 제어 방식 제어알고리즘 순서도를 나타내고 있다.

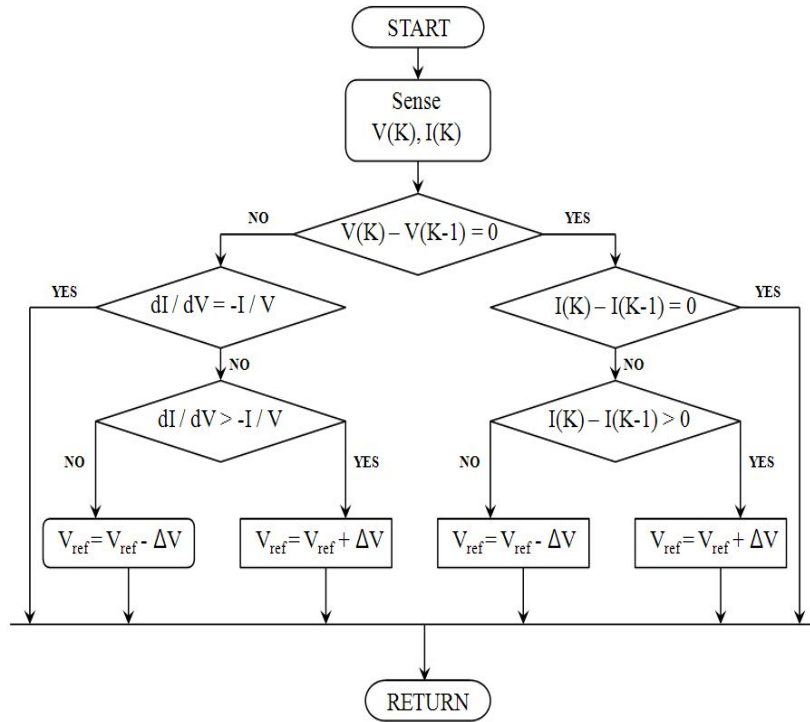


그림 6. IncCond 제어 방식 제어알고리즘 순서도

### C. Flyback 컨버터 동작특성

플라이백 컨버터(Flyback Converter)는 입력단과 출력단을 절연시킨 직류-직류(DC-DC) 변환기이다. 플라이백 컨버터는 그림 7에서와 같이 자화인덕턴스  $L_M$ 을 포함한 변압기 모델로 가정하여 설명할 수 있다. 플라이백 컨버터는 점선 부분의 권선비  $n_T(N_2/N_1)$ 를 갖는 이상적인 변압기와 자화 인덕턴스  $L_M$ 으로 구성되어 있다. 그림 7은 플라이백 컨버터의 회로도를 나타내고 있다.<sup>[13]</sup>

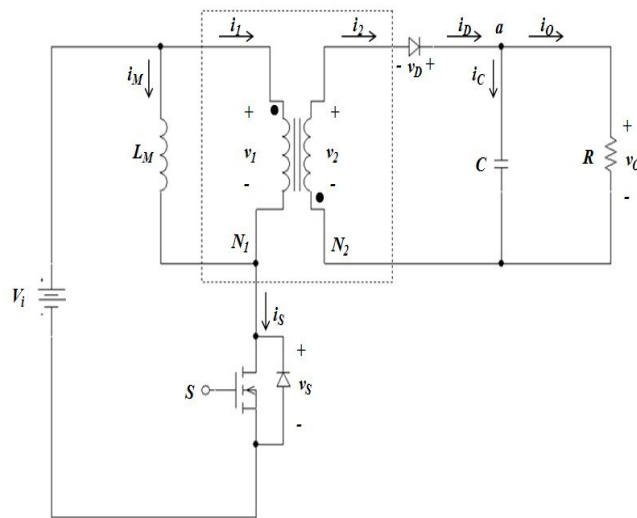


그림 7. 플라이백 컨버터 회로도

플라이백 컨버터의 해석을 위하여 출력 커패시터 값이 매우 커서 출력 전압이  $V_o$ 로 일정하며 회로가 정상상태로 동작하여서 모든 전압 및 전류가 주기적이고 각 값들은 한 스위칭 주기의 시작점과 끝점의 값이 동일하다고 가정을 한다. 또한 컨버터의 스위칭 주기  $T$ 로 일정하게 제어되고, 주기  $T$ 에 대해

스위치  $S$ 가 on되는 구간을  $DT$ 라 하고, 스위치  $S$ 가 off 되는 구간을  $(1-D)T$ 로 가정하도록 한다.

플라이백 컨버터의 기본적인 동작으로는 스위치가 Turn-on되는 구간동안 자화 인덕턴스  $L_M$ 에 에너지가 저장되었다가 스위치가 Turn-off 되는 구간에 자화 인덕턴스  $L_M$ 에 저장되었던 에너지가 부하로 전달된다. 입력과 출력의 관계를 알아보기 위하여 스위치가 Turn-on되는 구간과 Turn-off 되는 구간으로 나누어 회로를 해석 해 보도록 한다.<sup>[14]</sup>

### 1. 스위치 Turn-on 인 경우 : $0 \leq t < DT$

스위치가 Turn-on 되는  $0 \leq t < DT$  구간에서 변압기의 전원측을 식 (10)과 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_1 = V_s = L_M \frac{di_{L_M}}{dt} \quad (10)$$

$$\frac{di_{L_M}}{dt} = \frac{\Delta i_{L_M}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L_M}}{DT} = \frac{V_s}{L_M} \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에 의하여 변압기의 자화 인덕턴스  $L_M$ 에서의 전류 변화량을 구하면 식 (12)와 같이 나타난다.

$$(\Delta i_{L_M})_{on} = \frac{V_s DT}{L_M} \quad (12)$$

변압기의 부하측에서는 식 (13), 식 (14), 식 (15) 와 같이 성립된다.

$$v_2 = v_1 \left( \frac{N_2}{N_1} \right) = V_s \left( \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (13)$$

$$v_D = -V_o - V_s \left( \frac{N_2}{N_1} \right) < 0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} i_2 &= 0 \\ i_1 &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

다이오드가 off 상태이므로  $i_2 = 0$  이고 그에 따라서  $i_1 = 0$  이라고 할 수 있다. 그러므로 스위치가 Turn-on 되는 동안 자화 인덕턴스  $L_M$  에 흐르는 전류는 선형적으로 증가하며, 이상적인 변압기의 권선에는 전류가 흐르지 않게 된다. 이것은 실제 변압기에서 1차 권선에 흐르는 전류는 선형적으로 증가하지만 2차 권선에는 전류가 흐르지 않는다는 것을 의미한다. 그림 8은 스위치가 Turn-on 상태에서의 회로도 를 나타내고 있다.<sup>[15]</sup>

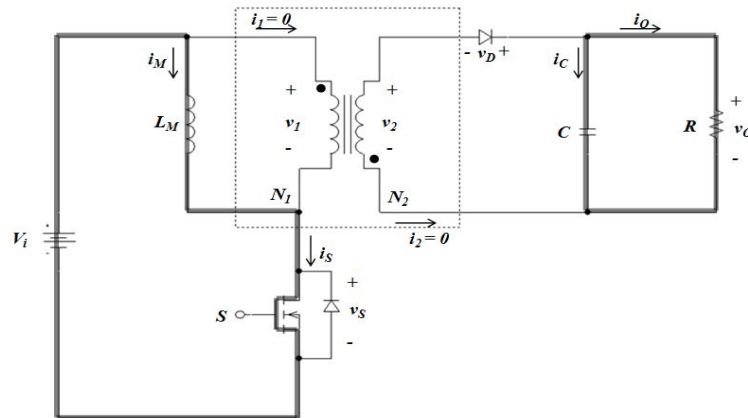


그림 8. 스위치가 Turn-on 상태에서의 회로도( $0 \leq t < DT$ )

## 2. 스위치 Turn-off 인 경우 : $DT \leq t < T$

스위치가 Turn-off가 되더라도 자화 인덕턴스  $L_M$ 에 흐르는 전류가 순간적으로 변화하는 것은 불가능하므로 이상적인 변압기의 1차 권선을 통해 자화 인덕턴스 전류  $i_{L_M}$  가 흐르게 된다. 자화 인덕턴스 전류  $i_{L_M}$  이 1차측 권선에서 점이 찍혀있지 않는 단자로 흘러 들어가므로 2차측 권선에서는 점이 찍혀있지 않는 부분에서 전류가 흘러 나가게 된다. 이 2차측 전류가 다이오드에 흐르는 순방향 전류  $i_D$  가 된다. 출력전압이  $V_o$  로 일정하게 유지되고 있다고 가정하여 본다면 변압기의 2차측 전압  $v_2$  는  $-V_o$  가 된다. 2차측 전압  $v_2$  에 의해 1차 권선에 전압이 유기되어 자화 인덕턴스  $L_M$  양단에는 전압  $v_1$  이 식 (16)과 같이 걸리게 된다.<sup>[16]</sup>

$$v_1 = -V_o \frac{N_1}{N_2} \quad (16)$$

스위치가 Turn-off 인 상태에서의 전압과 전류의 값은 식 (17), 식 (18), 식 (19), 식 (20) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_2 = -V_o \quad (17)$$

$$v_1 = v_2 \frac{N_1}{N_2} = -V_o \frac{N_1}{N_2} \quad (18)$$

$$L_M \frac{di_{L_M}}{dt} = v_1 = -V_o \frac{N_1}{N_2} \quad (19)$$

$$\frac{di_{L_M}}{dt} = \frac{\Delta i_{L_M}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L_M}}{(1-D)T} = \frac{-V_o}{L_M} \frac{N_1}{N_2} \quad (20)$$

식 (20)에 의하여 스위치가 Turn-off 인 경우 변압기의 자화 인덕턴스  $L_M$  에 흐르는 전류의 변화량은 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\Delta i_{L_M})_{off} = \frac{-V_o(1-D)T}{L_M} \frac{N_1}{N_2} \quad (21)$$

정상상태 동작에서 한 주기  $T$  동안 자화 인덕턴스  $L_M$  의 자화 인덕턴스 전류  $i_{L_M}$  의 순수 변화량이 0이어야 하므로 식 (12)와 식(21)에 의하여 식 (22) 와 같이 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (\Delta i_{L_M})_{on} + (\Delta i_{L_M})_{off} &= 0 \\ \frac{V_s DT}{L_M} - \frac{V_o(1-D)T}{L_M} \frac{N_1}{N_2} &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

식 (22)에 의하여 출력전압  $V_o$ 은 식 (23)과 같이 나타낸다.

$$V_o = V_s \frac{D}{1-D} \frac{N_2}{N_1} \quad (23)$$

스위치가 Turn-off된 동안의 기타의 전압, 전류의 값은 다음 식 (24)와 같이 나타난다.

$$i_D = -i_1 \left( \frac{N_1}{N_2} \right) = i_{L_M} \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \quad (24)$$

$$v_{Sw} = V_s - v_1 = V_s + V_o \left( \frac{N_1}{N_2} \right)$$

$$i_R = \frac{V_o}{R}$$

$$i_C = i_D - i_R = i_{L_M} \left( \frac{N_1}{N_2} \right) - \frac{V_o}{R}$$

스위치 Turn-off 상태의 스위치 양단전압  $v_{Sw}$  가 전원전압보다 더 높게 나타난다.

이상적인 경우, 부하저항에서 소모되는 전력이 전원에서 공급한 전력과 같아야 하므로 식 (25)와 같이 나타난다.

$$P_s = P_o \quad (25)$$

$$V_s I_s = \frac{V_o^2}{R}$$

평균 전원전류  $I_s$  와 자화 인덕턴스 전류의 평균 값  $I_{L_M}$  의 관계는 식 (26)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_s = \frac{(I_{L_M})DT}{T} = (I_{L_M})D \quad (26)$$

식 (25)에 평균 전원전류  $I_s$  를 대입하여 자화 인덕턴스 전류 평균값  $I_{L_M}$  을



구하면 식 (27) 과 같이 나타난다.

$$V_s I_{L_M} = \frac{V_o^2}{R} \quad (27)$$

$$I_{L_M} = \frac{V_o^2}{V_s D R}$$

입력전압  $V_s$ 에 관한 식 (23)을 이용하여 평균 인덕턴스 전류  $I_{L_M}$  를 나타내면 식 (28)과 같이 나타난다.

$$I_{L_M} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = \frac{V_o}{(1-D)R} \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \quad (28)$$

인덕터 전류의 최대값과 최소값은 식 (28)과 식 (12)에 의하여 식 (29)와 식 (30) 과 같이 나타난다.

$$I_{L_M \max} = I_{L_M} + \frac{\Delta i_{L_M}}{2} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 + \frac{V_s D T}{2L_M} \quad (29)$$

$$I_{L_M \min} = I_{L_M} - \frac{\Delta i_{L_M}}{2} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 - \frac{V_s D T}{2L_M} \quad (30)$$

연속전류로 동작하려면 식 (30)에서  $I_{L_M \min} \geq 0$  이어야 한다. 스위칭 주파수를  $f$ 라고 하면 연속전류와 불연속전류 사이의 경계에서는 식 (31)과 같이 나

타난다.

$$I_{L_M, \min} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = \frac{V_s D T}{2L_M} = \frac{V_s D}{2L_M f}$$

식 (31)에 의하여 전류를 연속적으로 흐르게하는 자화 인덕턴스  $L_M$ 의 최소값은 식(32)와 같이 나타낸다.

$$L_{M, \min} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (32)$$

그림 9는 스위치가 Turn-off상태인 경우의 회로도를 나타내고 있다.

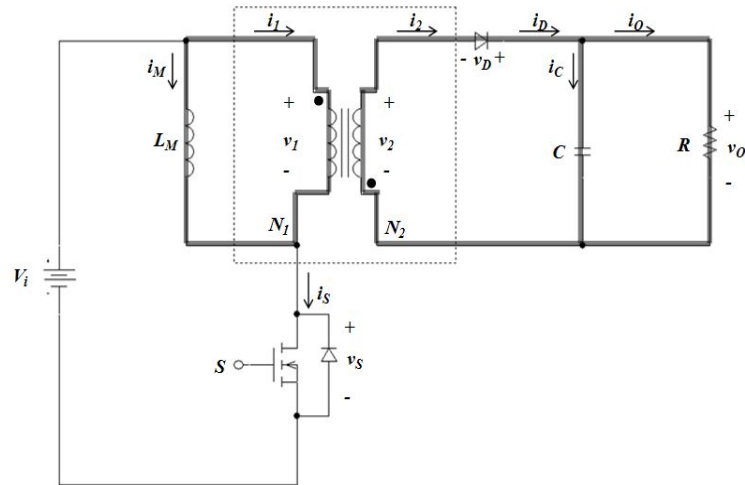


그림 9. 스위치가 Turn-off 상태에서의 회로도( $DT \leq t < T$ )

그림 10은 플라이백 컨버터의 각부의 전압과 전류 파형을 나타내고 있다.

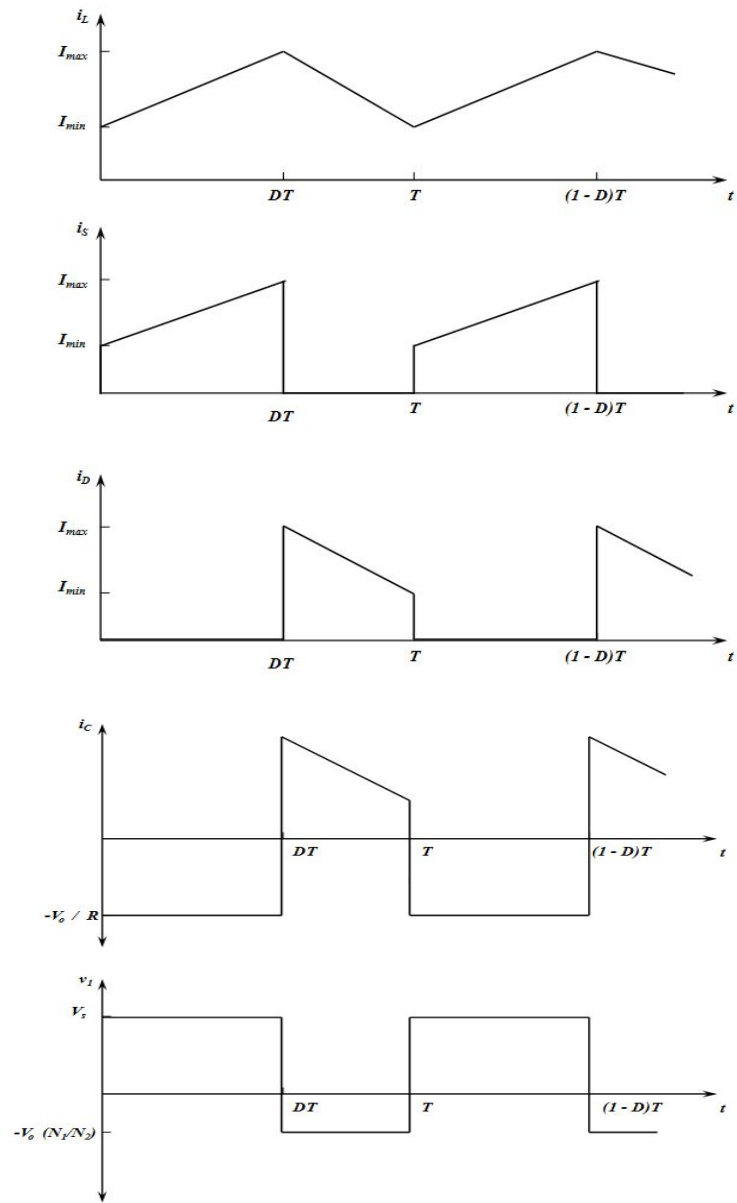


그림 10. 플라이백 컨버터 전류 및 전압 파형

### III. 시스템 구성 및 설계

#### A. 시스템 구성

##### 1. 태양전지 및 시스템 구성

그림 11은 본 논문에서 제안하는 MPPT를 적용한 독립형 태양광 시스템의 Battery 충방전 제어 시스템 구성을 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 충방전 시스템의 제어는 16MHz의 발진을 갖는 마이크로프로세서인 ATmega128을 사용하였다. 그리고 10비트 분해 기능을 가지고 있는 A/D변환기 8채널을 가지며, 2개의 16비트 타이머-카운터 1과 3으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 16비트 타이머카운터 1과 PV입력 전압, 전류 센싱을 위한 2개의 A/D 컨버터를 사용하였다.

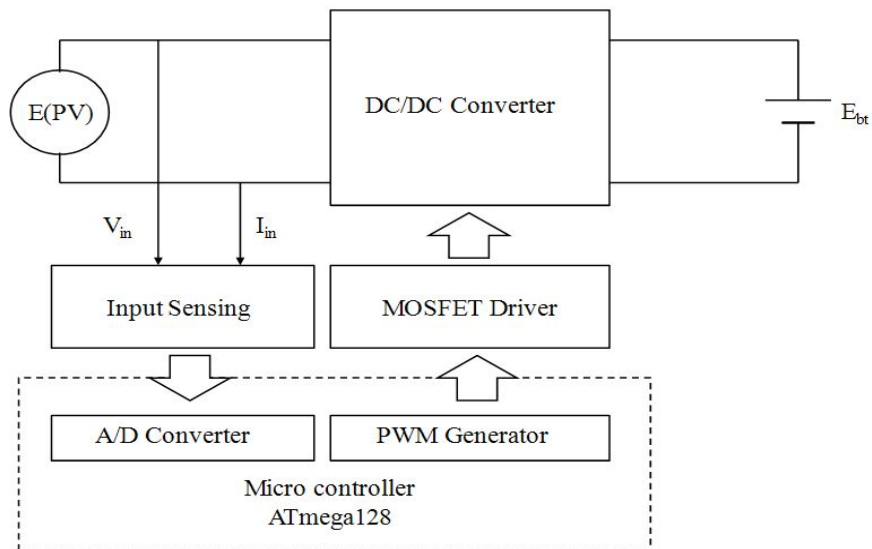


그림 11. MPPT를 적용한 Battery 충방전 제어 시스템 구성도

기본적으로 MPPT를 수행을 위하여 A/D 컨버터의 2채널을 이용하여 태양 전지의 전압과 전류를 연속적으로 센싱하는 것으로 마이크로 컨트롤러에서 최대 전력점을 추종하여 PWM 신호를 컨트롤하여 줌으로써 최대 전력점을 추종하게 된다.

표 1은 본 논문에서 사용한 태양전지 모듈 규격을 나타내며, 표 2는 제안된 제어 시스템의 설계 사양과 규격을 나타내고 있다.

<표 1> 태양전지 모듈 규격

항목	세부사항
모 델	HIP-170N1
제 조 사	Sanyo
최대출력 (Pmax)	170 [W]
단락전류 (Isc)	3.65 [A]
개방전압 (Voc)	45.2 [V]
최대출력전류 (I <sub>p,max</sub> )	4.74 [A]
최대출력전압 (V <sub>p,max</sub> )	35.9 [V]

<표 2> 제안된 시스템 설계사양

설계 사양				
Parameter		Symbol	Value	Unit
Input	최소입력전압	Vin(min)	30	V
	정격전압	Vin(nom)	36	V
	최대입력전압	Vin(max)	42	V
Output	출력전압	Vo	24~28	V
	출력전류	Io	5.2	A
PWM Control	모델명	ATmega128		
	PWM mode	Phase Correct PWM		
	구조	16bit 타이머/카운터 1		
	주파수	40KHz		

## 2. 플라이 백 컨버터 설계

그림 12는 본 논문에서 제시한 플라이백 컨버터 방식의 충방전 회로도를 타나내고 있다. 플라이백 컨버터의 출력 크기를 결정하려면 직류출력 전류를  $I_o$  로 하면 그 값은 2차 권선을 흐르는 전류  $i_2$  와 평균값이 된다. 즉 트랜지스터의 Turn-off 기간을  $T_{off}$ 로 하면 출력전류  $I_o$  는 식 (15)와 같이 나타난다.

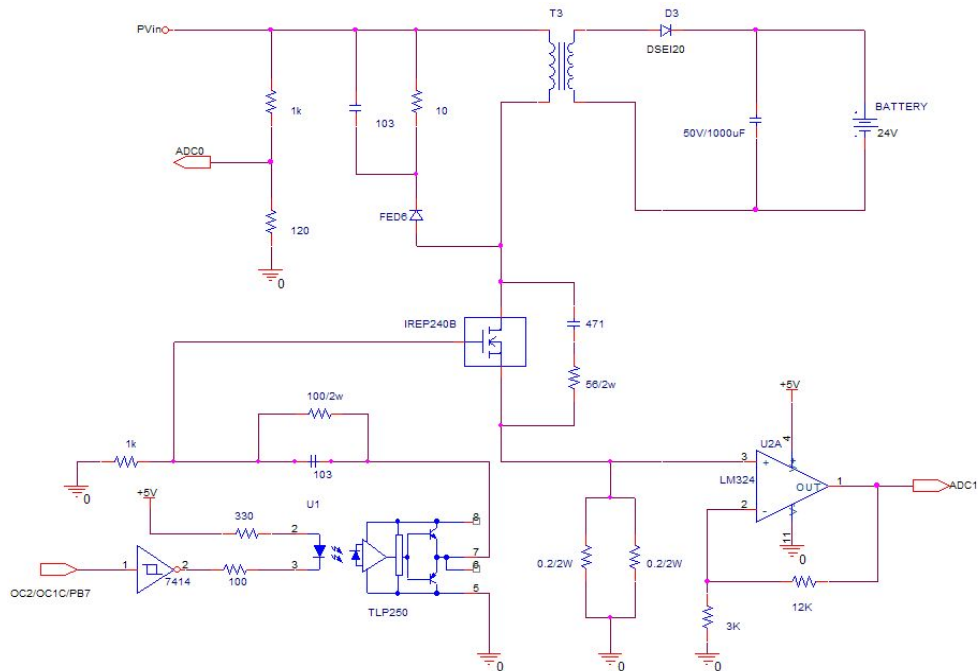


그림 12. 플라이백 컨버터 방식의 충방전 회로도

$$\begin{aligned}
I_o &= \frac{1}{T_{on} + T_{off}} \int_0^{t_{off}} i_2 \cdot dt \\
&= \frac{i_{2p} \cdot t_{off}}{2T}
\end{aligned} \tag{15}$$

여기서 2차측은 콘덴서 Input형 정류로 되어 있기 때문에 2차측 다이오드의 순방향 전압을  $V_F$ 로 하면 트랜스의 2차 단자 전압  $V_2$  식은 식 (16)과 같다.

$$V_2 = V_o + V_F \tag{16}$$

그리고 MOSFET 동작이 Turn-on 구간 중에 트랜스에 축적된 전력과 2차측에 소비되는 전력은 같아 지지 않는다. 이는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
\frac{1}{2} L_p \cdot i_{1p}^2 \cdot f &= \frac{V_{\infty}^2 \cdot t_{on}^2}{2L_p} \\
&= I_o \cdot (V_o + V_f)
\end{aligned} \tag{17}$$

식 (17)에서 알 수 있듯이 이벽 전압이나 출력 전류가 변화할 때 Turn-on 시간  $t_{on}$  이나 주파수  $f$  시간의 파라미터를 바꾸어 주면 출력 전압  $V_o$  를 일정하게 유지 할 수 있다.

## B. 충전기 설계

충전지의 충방전 특성을 고찰하기 위하여 Matlab-Simulink를 이용하여 설계하여 보았다. 충전지는 충전율 모델과 방전율 모델, 온도 특성 모델 그리고 충방전시의 잔존율 모델로 구성이 된다. 그림 13 은 충전지 모델을 나타내고 있다. 그림 14는 충전지의 충방전시 전압 모델을 나타내고 있으며 그림 15는 그림 14의 충전율 모델부분의 충전 효율 구성도를 나타내고 있다. 그림 16은 충전지의 전압 모델의 방전율 구성도 부분의 방전 전압 모델을 나타내며 그림 17은 그림 14의 충방전시 전압 모델에서의 온도 특성 모델을 나타내고 있다.

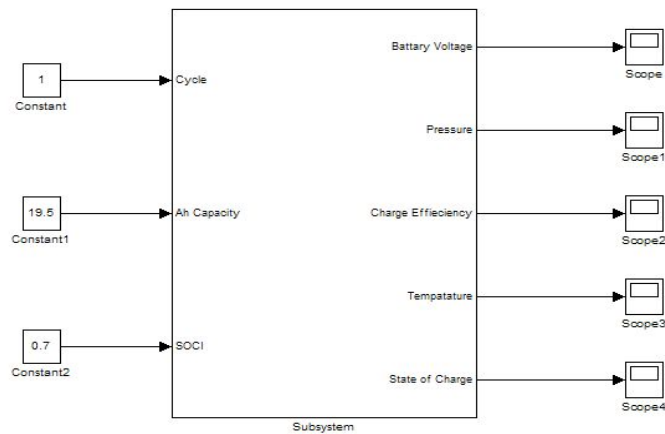


그림 13. 충전지 모델



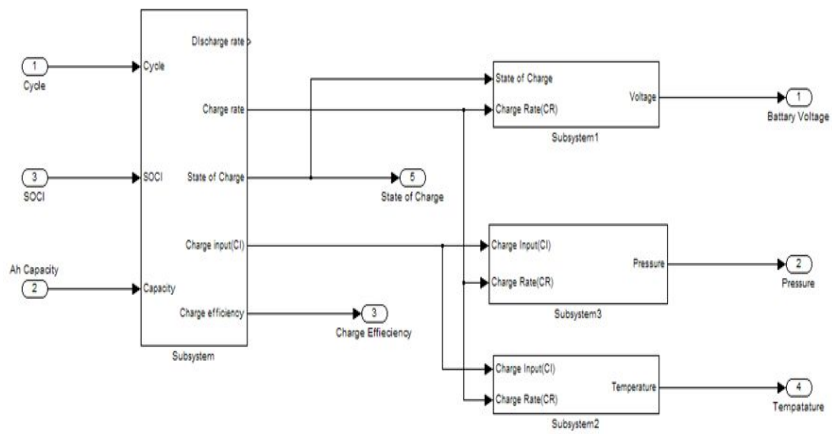


그림 14. 충전시 전압 모델

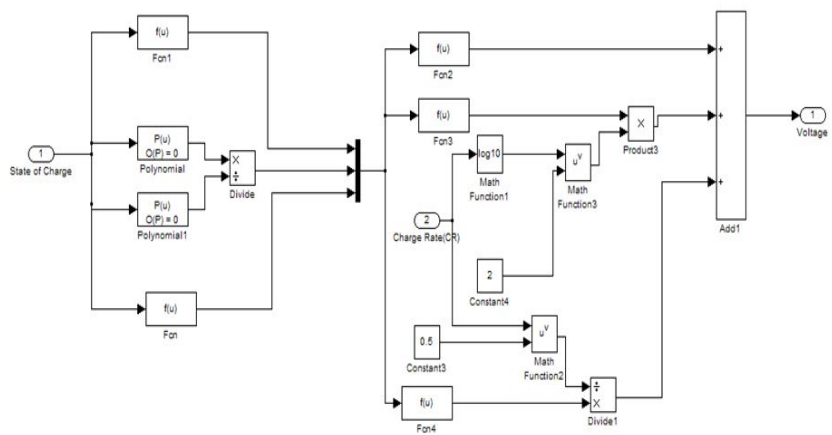


그림 15. 충전 효율 구성도

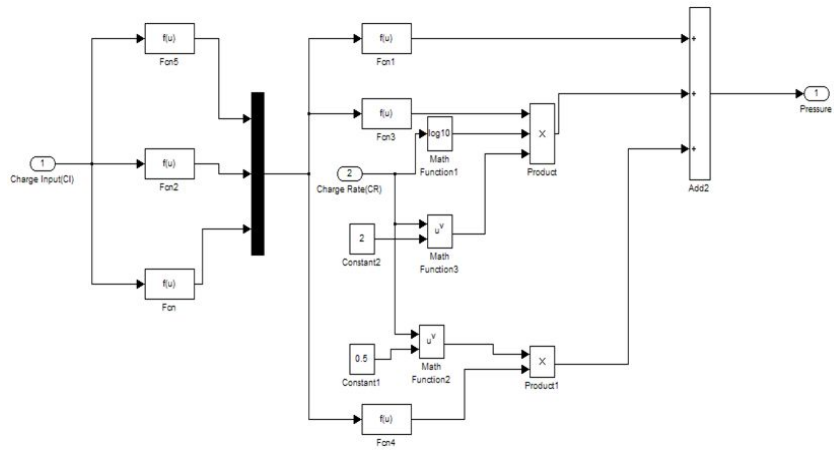


그림 16. 방전 전압 모델

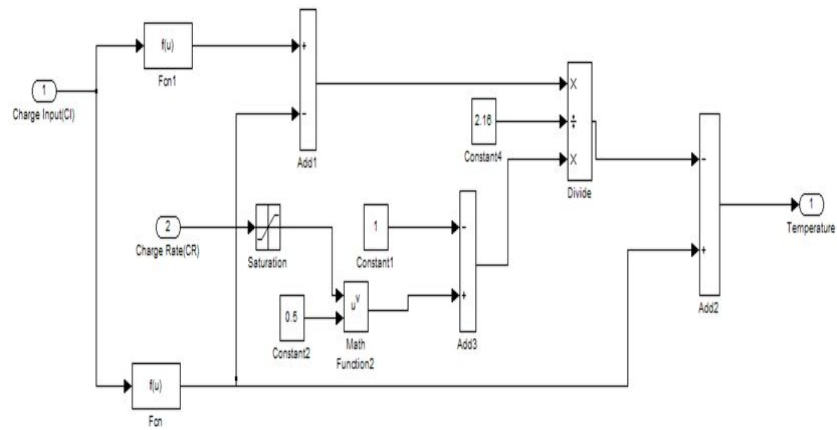


그림 17. 온도 특성 구성도

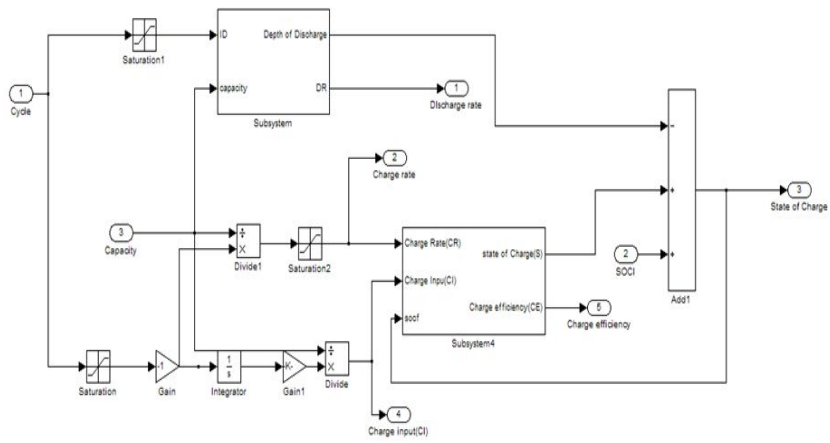


그림 18. 충방전시 잔존율 모델

## IV. 시뮬레이션 및 실험

### A. 시뮬레이션

본 논문에서는 MPPT를 적용한 170[W]급 독립형 태양광발전시스템의 배터리 충방전 제어시스템에 대하여 연구 하였다. 제안한 DC-DC 컨버터는 플라이백 컨버터를 사용하였고 제어 MCU은 ATmega128을 사용하였다. MPPT 제어 방식 가운데 많이 상용화된 P&O 제어 방식을 적용하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

표 2에서 제안된 시스템 설계사양을 Matlab-Simulink를 사용하여 플라이백 컨버터를 이용한 독립형 태양광발전 MPPT 추종 제어를 시뮬레이션 하여 검증하였다. 그림 19는 그림 12에서 플라이백 컨버터방식의 충방전 회로도를 이용한 Matlab-Simulink를 시용한 MPPT 제어 알고리즘 블록도를 타나내고 있다.

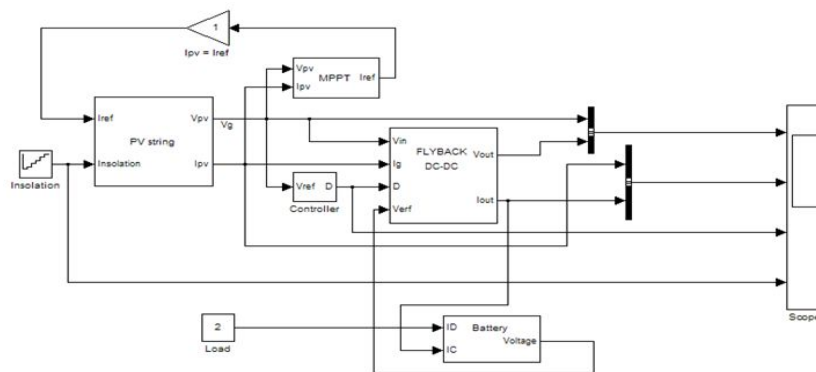


그림 19. Matlab-Simulink를 이용한 제어 알고리즘 블록도

그림 20은 일사량을 200, 400, 800, 1000 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]로 200[ $\text{W}/\text{m}^2$ ] 간격으로 일사량을 변화하였을 경우의 태양전지 출력 특성을 나타내며, 그림 21은 P&O 제어 방식 알고리즘을 적용한 플라이 백 컨버터의 배터리 충전 전압, 전류 파형을 나타낸다.

그림 20을 보면 일사량이 200[ $\text{W}/\text{m}^2$ ] 간격으로 증가함에 따라 전류, 전압, 전력 역시 일정하게 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 21을 보면 배터리의 충전 전압은 표 2에서 제안한 충전 전압 24~28[V]와 동일하게 시간이 흐름에 따라 24[V]에서 28[V]까지 충전되어 증가하는 것을 알 수 있다.

전류 역시 제안한 전류 값 5.2[A]와 동일한 5.2[A]가 출력되는 것을 알 수 있으며 이러한 결과는 제안한 P&O 제어 방식 알고리즘을 적용한 플라이백 컨버터를 사용한 독립형 태양광발전 배터리 충방전 제어 시스템이 제안된 시스템 설계 사양에 부합되는 것을 알 수 있다.

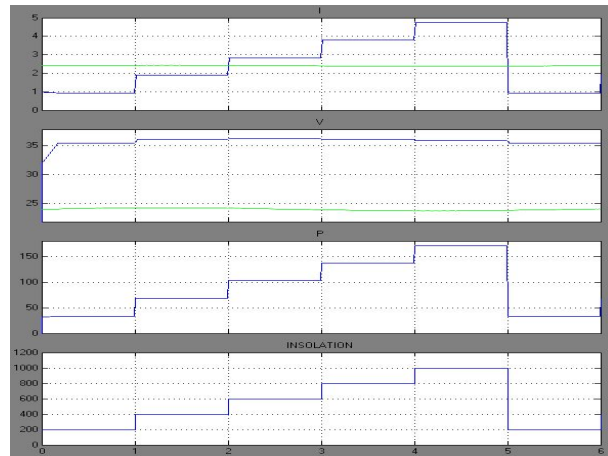


그림 20. 일사량 변화에 따른 태양전지  
전류, 전압 전력

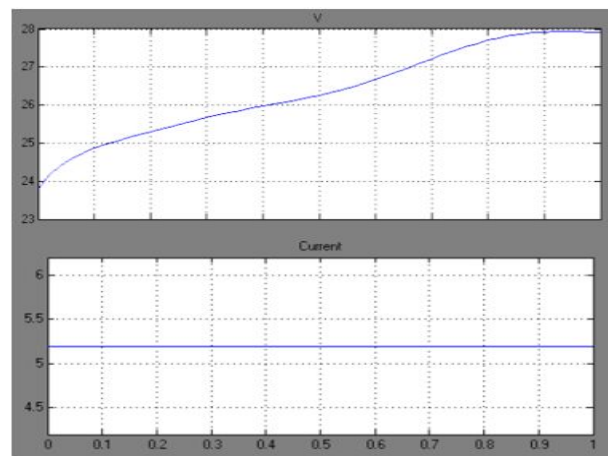


그림 21. 배터리 충전 전압, 전류

## B. 실험

본 논문에서는 그림 12의 플라이백 컨버터방식의 충방전 회로도를 사용하여 MPPT제어 알고리즘 가운데 Perturbation & Observation (P&O) 방식 제어를 적용한 At21mel 사의 8bit RISC 방식의 ATmega128을 MCU(Micro Controller Unit)로 사용하여 설계한 회로도를 직접 제작하여 제안한 시스템 사양과 비교하여 본다.

그림 21은 PV 독립형 태양광발전 시스템의 배터리 충방전 제어기의 전체 구성도를 나타내고 있다.

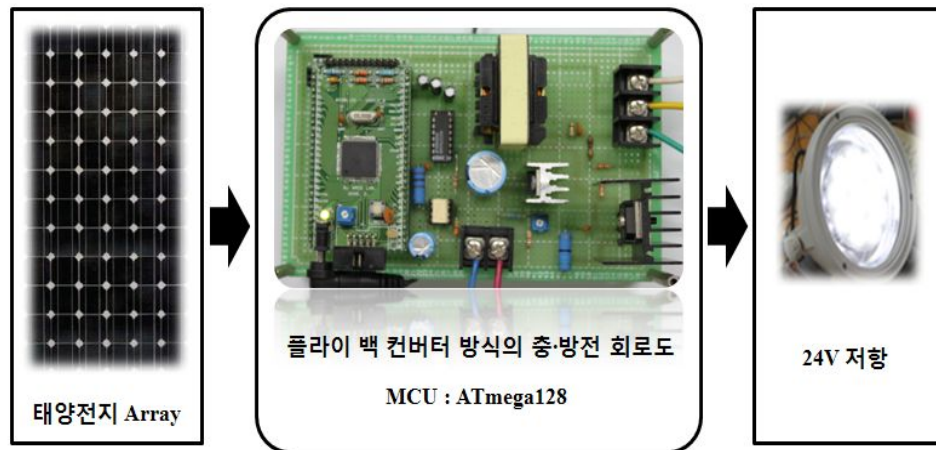


그림 21. 배터리 충방전 제어기 전체 구성도

그림 22는 충전시 태양전지 출력 전압 및 전류를 나타내며, 출력 전압은 27.5[V], 출력 전류는 5.2[A]로 나타난다. 그림 23은 충전지의 충전 전압 및 전류 파형을 나타내며 충전전압은 26.3[V], 충전전류는 5[A]로 나타난다. 그림 24는 방전시 충전지 전압 및 전류를 나타내며 방전전압은 25.3[V], 방전전류는 781[mA]로 나타난다.

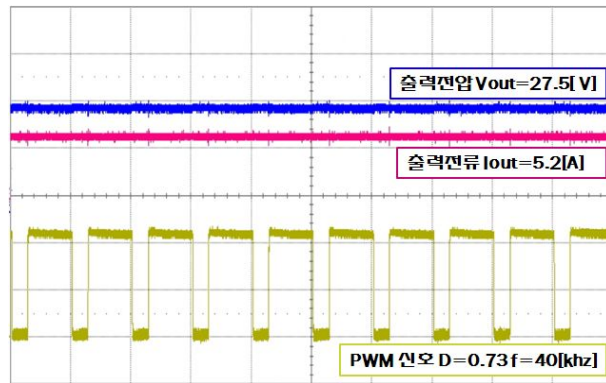


그림 22. 충전시 충전지의 각부 파형

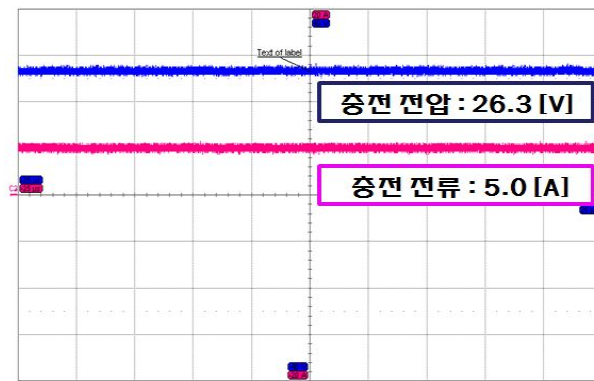


그림 23. 충전지의 충전 전압 및 전류



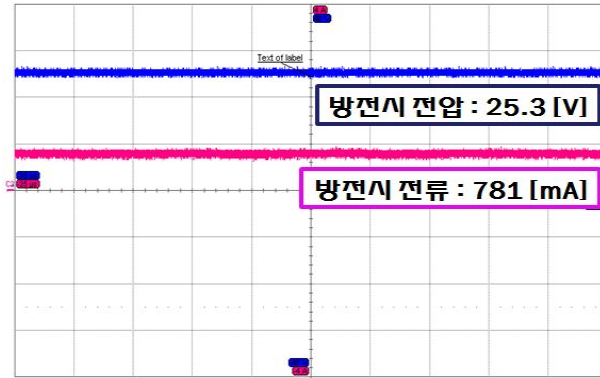


그림 24. 방전시 충전지 전압 및 전류

### C. 결과 검토

본 논문에서는 플라이백 컨버터방식의 충방전 회로도를 사용하여 P&O 알고리즘 제어 방식을 적용한 배터리 충방전 회로도를 시뮬레이션과 직접 제작을 통하여 비교하여 보았다.

시뮬레이션 결과 시간이 흐름에 따라 24[V]에서 28[V]로 증가하며 설계한 시스템 사양에서 제안한 충전전압인 24~28[V]와 동일함을 알 수 있었으며, 제안한 전류 값 5.2[A]와 동일한 5.2[A]가 출력되는 것을 알 수 있었다.

또한 제작하여 측정한 결과 역시 충전전압이 26.3[V]로 제안한 설계 사양과는 다소 차이가 있지만 해당 범위내의 값이 측정되는 것을 알 수 있었으며, 충전전류 역시 5[A]로 다소 차이는 있지만 제안한 시스템 설계 사양과 근접한 값이 측정되는 것을 알 수 있었다.

## V. 결 론

태양광발전 시스템은 온도, 날씨 등 주변 환경에 따라 발전 전력량의 변동이 심하기 때문에 독립형 태양광발전 시스템에서는 부하 전력 조절을 통한 전력 평균화와 MPPT를 통한 전력 안정화 등을 필요로 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 외부 환경조건의 변화에 따라 태양전지가 항상 MPPT 동작을 할 수 있도록 추종해 주는 컨버터가 필요로 한다.

본 논문에서는 MPPT 제어 방식 가운데 일반적으로 널리 사용되는 P&O 제어 방식을 적용하여 일정한 MPPT 동작을 위한 플라이 백 컨버터를 사용한 170[W]급 태양광발전 충방전 제어 시스템을 제안된 시스템 사양으로 설계하여 이를 Matlab-Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 실행하며 실제 제작을 통하여 비교하여 보았다.

Matlab-Simulink를 이용하여 시뮬레이션 한 결과 논문에서 제안한 충전전압 24~28[V]와 비슷하게 시간의 흐름에 따라 24[V]에서 28[V]로 충전되는 것을 알 수 있었고 전류역시 제안한 5.2[A]와 동일한 5.2[A]가 나타나는 것을 알 수 있었다. 플라이백 컨버터방식의 충방전 회로도를 바탕으로 배터리 충방전 제어기를 제작하여 측정하여 본 결과 충전시 태양전지 출력 전압은 27.5[V], 출력 전류는 5.2[A]로 나타나며 충전지의 충전전압은 26.3[V], 충전전류는 5[A]로 나타난다. 그리고 충전지의 방전전압은 25.3[V], 방전전류는 781[mA]로 나타나는 것을 알 수 있었다. 이를 시뮬레이션 한 결과와 비교하여 보는 경우 출력전압의 경우 약간의 차이는 있었지만 제안한 시스템 사양과 거의 동일하게 출력되는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션과 실험 결과를 비교한 결과 본 논문에서 설계한 배터리 충방전 제어기가 독립형 PV시스템의 충방전용 배터리로 타당함을 알 수 있다. 본 논문을 이용하여 향후 연구에 적용함으로써 효율이 더 좋은 배터리 제작에 밑바탕이 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] Roger Messenger Jerry Ventre, "Photovoltaic Systems Engineering", CRC, pp.283, 2004
- [2] 유권중, 정영석, 최주엽 "새로운 고효율 MPPT 제어 알고리즘 고찰" 한국 태양에너지학회 Vol.22, No3, pp.11-20, 2002
- [3] Riley, Daniel M. Venayagamoorthy, Ganesh K. "Characterization and modeling of a grid - connected photovoltaic system using a Recurrent Neural Network", Neural Networks (IJCNN), Aug. 2011
- [4] Seo, H.C. Kim, C.H. Yoon, Y.M. Jung, C.S. "Dynamics of grid-connected photovoltaic system at fault conditions", Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009, pp.1-4, Oct. 2009
- [5] Jiyong Li, Honghua Wang, "Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Generation Based on the Optimal Gradient Method", APPEEC 2009. Asia-Pacific, pp.1-4, March 2009
- [6] Thenkani, A. Senthil Kumar, N. "Design of optimum Maximum Power Point Tracking algorithm for solar panel", Computer, Communication and Electrical Technology (ICCCET), pp.370 - 375, March 2011
- [7] Armstrong, S. Hurley, W.G. "Self-regulating maximum power point

tracking for solar energy systems", UPEC 2004. 39th International, pp.604 - 609 vol. 1, Sept. 2004

- [8] Ruther, R., de Silva, V.J.G., Montenegro, A.A., Salamon, I.T., Araujo, R.G., "The Petrobras 45.5kwp, grid-connected PV System; A Comparative Study of Six Thin-film Module Types Operating in Brazil", Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2002, pp.1440-1443, 2002
- [9] Kotosopoulos, A., Duarte, J.L., Hendrix, M.A.M., Heskes, P.J.M., "Islanding Behaviour of Grid-connected PV Inverters Operating under Different Control Schemes", Proceedings of the 2002 IEEE 33rd Annual IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Congerence - Volume 3, pp.1506-1511, 2002
- [10] Gwongjong Yu, Jinsoo Song, "Development of Power Converter for Photovoltaic System", Japen-Korea Joint Seminar on TECHNICAL DIGEST PHOTOVOLTAICS, pp.247~274, 1995
- [11] K.H.Hussein, I.Muta, T.Hoshino and M.Osakada., "Maximum Photovoltaic power Tracking: an algorithm for rapidly changing aymopheric conditions", IEE-Proceeding. Generation, Transmission and Distribution, Vol. 142, pp59-64, Jan.1995
- [12] Femia, N. Petrone, G. Spagnuolo, G. Vitelli, M., "Increasing the efficiency of P&O MPPT by converter dynamic matching ", Industrial

Electronics, 2004 IEEE, pp. 1017 - 1021 vol. 2, May 2004

- [13] 홍순찬. 전희중. 백형래. 원충연, "PSpice를 활용한 전력전자공학", pp. 295-305
  
- [14] Fanghua Zhang. Lan Xiao. Yangguang Yan., "Bi-directional forward-flyback DC-DC converter", PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, pp.4058 - 4061 Vol.5, June 2004
  
- [15] Soo-Seok Kim. Dae-Kyu Choi. Su-Jin Jang. Tae-Won Lee. Chung-Yuen Won., "The Active Clamp Semic- Flyback Converter", PESC '05. IEEE 36th, pp. 1209 - 1212
  
- [16] Xi, Y. Jain, P.K. Joos, G. Yan Fei Liu. "An improved zero voltage switching flyback converter topology", PESC 98 Record. 29th Annual IEEE, pp.923 - 929 vol.2, May 1998

## 감사의 글

많은 추억을 가져다준 지난 2년간 대학원 생활이 마무리 되어가고 있습니다. 그동안 감사했던 모든 여러분들에게 감사의 인사를 드리고자 합니다. 우선 학위과정동안 많은 가르침과 용기로 자신감을 주신 조금배 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 올립니다. 그리고 논문심사와 논문에 관한 많은 조언을 해주신 백형래 교수님과 김용재 교수님께도 감사의 말씀 올립니다. 또한 항상 지켜봐주시고 격려해주신 전기공학과 모든 교수님들께도 감사의 말씀 드립니다.

학위과정동안 옆에서 항상 격려해주시고 도움을 주신 태양광발전실험실의 최연옥, 이강연, 정병호, 문은아, 박정민, 오만석 선배님들께도 감사의 말씀 드립니다. 그리고 실험실에서 함께 공부하며 의지하였던 박정국, 신승호, 백승학, 장인혁, 이권, 김기현, 전법준 오빠들에게 고맙다라는 말 전하고 싶습니다. 그리고 다 같이 수고한 전기공학과 대학원 동기인 규명이오빠, 국도오빠, 경훈이오빠, 수근이오빠에게도 수고했다와 고맙다라는 말 전하고 싶습니다.

마지막으로 항상 뒤에서 묵묵히 바라보며 응원해 주시고 하느님께 기도 해주신 아버지, 어머니 그리고 오빠에게도 정말 고맙다라는 말을 새삼 전하고 싶습니다.

많은 분들의 격려와 응원, 가르침으로 무사히 졸업할 수 있게 되었습니다. 많은 분들의 마음을 소중히 간직하며 실망시켜드리지 않을 열심히 사는 모습 보여드리겠다 다짐을 논문에 담아 올립니다.

2011년 12월

임 지 혜