



## 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

# 미분계수 알고리즘을 이용한 태양전지 MPPT 제어

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

白承學

2012年  
2月  
碩士學位論文

미분계수 알고리즘을 이용한  
태양전지 MPPT 제어

白承學

**미분계수 알고리즘을 이용한  
태양전지 MPPT 제어**

**The MPPT Control of Solar Cell Using  
Differential Equation Algorithm**

2012年 2月 24日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

白承學

# 미분계수 알고리즘을 이용한 태양전지 MPPT 제어

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

白承學

# 白承學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. 태양광 발전 MPPT 제어 .....	3
A. 태양전지의 특성 .....	3
1. 태양전지의 동작특성 .....	3
2. 태양전지의 전기적 특성 .....	9
B. Boost 컨버터 .....	11
C. MPPT제어 알고리즘 .....	15
1. 일정전압 제어방법 .....	16
2. P&O 제어방법 .....	17
3. IncCond 제어방법 .....	19
4. Newton Method방법 .....	22
5. 제안한 알고리즘 제어방법 .....	27
III. 시뮬레이션 및 고찰 .....	28
A. 태양전지 출력특성 .....	28
B. MPPT 제어 특성 .....	30
C. BOOST 제어 특성 .....	33
IV. 결 론 .....	37
참고 문헌	

## List of Tables

Table 3-1 Parameter of photovoltaic module .....	28
Table 3-2. Design parameters for DC-DC boost converter .....	33

## List of Figures

Fig. 2-1 The equivalent circuit of solar cell .....	3
Fig. 2-2 The voltage and current characteristics of solar cell .....	5
Fig. 2-3 Effect of resistance in the I-V characteristics .....	8
Fig. 2-4 Solar cell characteristics curve according to variation irradiation .....	10
Fig. 2-5 Solar cell characteristics curve according to variation temperature .....	10
Fig. 2-6 The basic circuit of DC-DC boost converter .....	11
Fig. 2-7 The equivalent circuit of DC-DC boost converter .....	12
Fig. 2-8 Waveform current and voltage in a DC-DC boost converter .....	12
Fig. 2-9 Waveform of inductor voltage in a boost converter .....	14
Fig. 2-10 Flowchart of CV MPPT method .....	16
Fig. 2-11 Flowchart of the P&O algorithm .....	18
Fig. 2-12 Flowchart of IncCond MPPT algorithm .....	21
Fig. 2-13 Getting radical values using newton method .....	22
Fig. 2-14 M according to the value of the voltage output .....	24
Fig. 2-15 Derivative according to the PV curve .....	25
Fig. 2-16 Flowchart of the newton method algorithm .....	26
Fig. 2-17 Flowchart of the proposed newton method algorithm .....	27
Fig. 3-1 PV control system using simulink .....	29
Fig. 3-2 I-V characteristics curve at difference insolation .....	29
Fig. 3-3 P-V characteristics curve at difference insolation .....	29
Fig. 3-4 Output characteristics according to variation insolation .....	32
Fig. 3-5 Whole control system using simulink .....	33



Fig. 3-6 Boost converter circuit using simulink .....	34
Fig. 3-7 MPPT control circuit using simulink .....	34
Fig. 3-8 Output characteristics using conventional P&O MPPT control method .....	35
Fig. 3-9 Output characteristics using improved newton method control method .....	35
Fig. 3-10 Output characteristics according to rises rapidly insolation using conventional P&O MPPT control method .....	36
Fig. 3-11 Output characteristics according to rises rapidly insolation using improved newton method control method .....	36

# ABSTRACT

## The MPPT Control of Solar Cell Using Differential Equation Algorithm

Seung-Hak Baek

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

Department of Electrical Engineering,  
Graduate School of Chosun University

Now a days the world consume many energy resources. Among them electrical energy is depending on nuclear power generation hydro-power generation and thermal-power generation. Those generations have problem exhaustion resources, environmental pollution, an ecological system destruction. So recently green energy is spot lighted. In this paper research photovoltaic(PV) system using the solar power generation in the many green energy.

Photovoltaic arrays produce electric power directly from sunlight. Photovoltaic generation is becoming increasingly important as a renewable source since it offers many advantages such as incurring no fuel costs, not being polluting, requiring little maintenance, and emitting no noise.

Because of the nonlinear relationship between the current and the voltage of the photovoltaic cell, it can be observed that there is a unique maximum power point (MPP) at a particular environment, and this peak power point keeps changing with solar illumination and ambient temperature.

In this paper, new newton method MPPT is proposed to tracking MPP at low and high insolation by combining constant voltage method with modified perturbation and observation(PO) method. The proposed method is simulated under varying operating conditions. The effectiveness of these different MPPT methods is investigated thoroughly by MATLAB simulation.

Such improved algorithm has successfully tracked the MPP, even in case of rapidly changing atmospheric conditions, and has higher efficiency than ordinary algorithm.

# I. 서 론

현재 전 세계적으로 지구의 온실가스 배출기준이 규제되고, 화석에너지의 고갈에 따른 미래에너지의 대안으로 태양광, 풍력, 연료전지 및 바이오 메스 등 다양한 대체에너지의 연구가 독일 및 일본, 미국 등의 해외 선진기업 중심으로 이루어지고 있다.

우리나라는 세계 10위의 에너지 소비국이며, 에너지 대외의존도 97%로 자원 빈곤 국가에 속한다. 또한 자원고갈에 대한 우려와 각국의 자원민족주의 정책 기조는 에너지가격 상승을 유발하고, 우리나라의 경제발전은 물론, 세계 속에서 설 자리마저 위협을 받고 있다.

태양광 발전은 결정질 규소모듈(단결정, 다결정, 리본-규소)이며 가장 많이 상용화된 태양전지 모듈로서 효율은 12~17[%]이고, 내구연한은 30년 정도이다. 또한 무한정한 에너지원으로 연료의 운송, 기계적 가동, 국부적 고온 및 고압부가 없어 발전설비의 유지관리가 용이하고, 설비규모의 선택과 설치 공사가 쉬운 장점을 가지고 있다.<sup>[1,2]</sup>

태양에너지로부터 최대전력을 얻기 위해서는 태양전지와 이를 부하에 연결하는 컨버터 및 인버터의 기능이 매우 중요하며 이중에서도 태양전지 어레이의 최대출력제어 기술 및 시스템의 적정 설계에 대한 연구가 중요하다. 현재 태양전지의 MPP를 제어하기 위해 가장 많이 적용되는 방법으로 정전압방법 P&O(Perturbation and Observation)방법, IncCond(Incremental Conductance) 방법, Newton method 방법 등이 있다.<sup>[3,4,5]</sup>

태양전지의 출력 효율을 높이기 위하여 일반적으로 태양전지의 셀 자체의 효율을 높이거나 태양광발전 제어용 전력변환시스템의 변환효율 및 태양전지가 최대전력으로 발전하도록 최대전력점 추적(Maximum Power Point Tracking : MPPT) 제어를 하게 된다.

본 논문에서는 일반적으로 가장 많이 사용되어지는 MPPT 방법에 대하여

장점, 단점 및 특징을 서술하고, 그 동작 특성을 비교 분석한다.

Newton Method 제어는 기울기가 작으면 해를 구하기 어렵고 추적 속도가 느리며, 계산식도 복잡하다. 본 논문에서 제안된 Newton Method 방법은 기존의 Newton Method를 정전압 제어와 결합하여 다른 방법보다 현저히 빠르게 추적한다. 일사량  $200[W/m^2]$  이하 일 경우 정전압제어를 하고  $200[W/m^2]$  이상일 경우 Newton Method를 사용함으로써 고 일사량뿐만 아니라 저 일사량 시에도 MPP를 추적함으로써 발전량을 증대시키고 효율을 향상시킨 새로운 MPPT 제어방법이다. 제안한 방법의 타당성을 입증하기 위해 MATLAB을 이용하여 비교 분석 결과를 제시하였다.

## II. 태양광 발전 MPPT 제어

### A. 태양전지의 특징

#### 1. 태양전지의 동작특성

태양전지는 한 개의 이상적인 다이오드와  $I_{ph}$ 의 크기를 갖는 정전류원의 구성으로 모델링 할 수 있으나 이상적인 다이오드를 제작하는 것이 불가능하므로 태양전지의 접촉저항 및 표면층의 시트(Sheet) 저항을 고려해야 한다.

태양전지 표면에 입사되는 빛의 일부분은 표면에서 반사되며, 표면을 투과한 빛은 태양전지 내에서 흡수되며 광자의 수는 지수 함수적으로 감소한다.<sup>[6,7]</sup>

그림 2-1은 빛이 조사될 때 광기전력효과에 의한 태양전지의 등가회로를 나타내고 있다. 여기서  $I_{ph}$ 는 입사된 빛에 의해 생성된 캐리어(Carrier)가 외부로부터 방해받지 않을 때 폐회로를 통해 흐르는 광전류이고,  $I_d$ 는 암전류로서  $I_{ph}$ 와는 반대 방향이다. 직렬저항  $R_s$ 와 병렬저항  $R_p$ 는 이상적인 다이오드 특성에서 벗어나 일정한 상수 저항으로 표시되는 접촉저항이나 누설저항을 나타내며  $R_L$ 은 외부에 연결되는 부하저항을 나타낸다.<sup>[8,9]</sup>

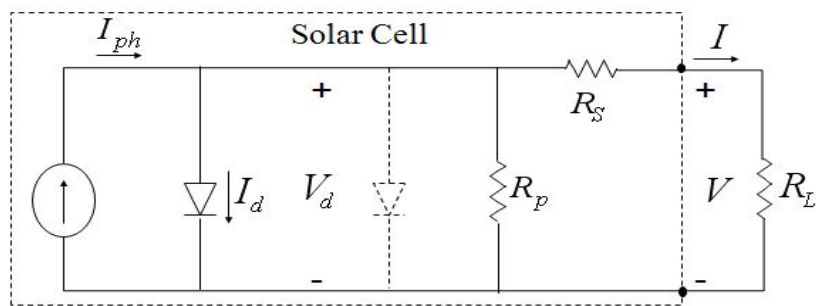


Fig. 2-1 The equivalent circuit of solar cell

그림 2-1과 같은 태양전지의 등가회로에서 태양전지의 출력전류  $I$ 는 식 (2-1)과 같다.

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V_d}{R_p} = I_{ph} - I_0 \left( \exp \frac{qV_d}{nKT} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad (2-1)$$

여기서  $I_0$ 는 다이오드 역 포화전류,  $n$ 은 다이오드 상수,  $K$ 는 볼츠만 상수이고  $q$ 는 전자의 전하량이며  $T$ 는 절대온도이다. 또한 다이오드 전압  $V_d$ 는 식 (2-2)과 같다.

$$V_d = V + IR_s \quad (2-2)$$

따라서 태양전지의 전류  $I$ 는 식 (2-1)로부터 식 (2-3)과 같이 된다.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \frac{q(V + IR_s)}{nKT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2-3)$$

태양전지가 내부 직렬저항  $R_s = 0$ , 병렬저항  $R_p = \infty$ 인 이상적인 pn 접합 다이오드라고 가정하면 태양전지의 출력전류는 식 (2-4)과 같다.

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \frac{qV}{nKT} - 1 \right) \quad (2-4)$$

일정온도와 일정 일사조건에서 태양전지의 전압-전류 특성 곡선은 그림 2-2와 같다.

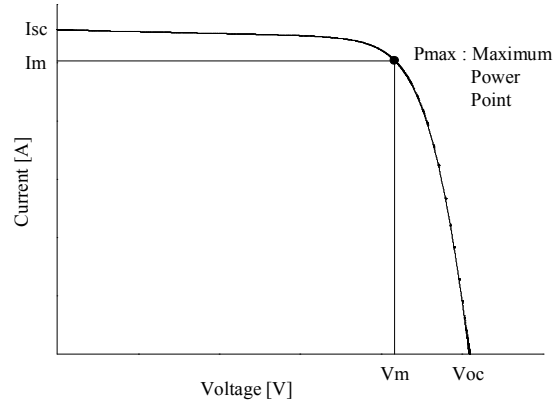


Fig. 2-2 The voltage and current characteristics of solar cell

단락상태에서 태양전지 출력전압  $V=0$  이 되며 단락전류  $I_{sc}$  는 식 (2-5)과 같이 되고 개방상태에서 태양전지 출력전류  $I=0$  이 되며 개방전압  $V_{oc}$  는 식 (2-6)과 같이 된다.

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (2-5)$$

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (2-6)$$

부하 저항에서 소비되는 전력을  $P_{out}$ 라 하면 식 (2-7)과 같다.

$$P_{out} = V \cdot I = V \cdot \left[ I_{ph} - I_0 \left( \exp \frac{qV}{nKT} - 1 \right) \right] \quad (2-7)$$

태양전지에 연결된 부하저항의 크기를 조정함으로써 어떤 최적 동작 점에서 최대의 출력  $P_{max}$ 가 출력될 수 있다. 이 최적동작점을 최대전력점 (Maximum Power Point : MPP)라 하고 이때 출력전류를 최적동작전류  $I_{mp}$ , 출력전압을 최적동작전압  $V_{mp}$ 이라 하며 최대 출력 전력  $P_{max}$ 는 식 (2-8)과



같다.<sup>[9,10]</sup>

$$P_{\max} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (2-8)$$

최대전력점에서 태양전지의 최적동작전류  $I_{mp}$ 는 최적동작전압  $V_{mp}$  시 출력전류로서 식 (2-4)로부터 식 (2-9)과 같이 되며, 단락전류에 관한 식 (2-5)에 의하여 식 (2-10)과 같이 된다.

$$I_{mp} = I_{ph} - I_0 \left( \exp \frac{qV_{mp}}{nKT} - 1 \right) \quad (2-9)$$

$$I_{mp} = I_{sc} - I_0 \left( \exp \frac{qV_{mp}}{nKT} - 1 \right) \quad (2-10)$$

최대전력점에서  $\frac{dP_{out}}{dV} = 0$  이므로 식 (2-7)으로부터 최적동작전압  $V_{mp}$ 은 식 (2-11)과 같이 되며 개방전압에 관한 식 (2-6)에 의하여 식 (2-12)과 같이 된다.

$$V_{mp} = \frac{nKT}{q} \left[ \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) - \ln \left( \frac{qV_{mp}}{nKT} + 1 \right) \right] \quad (2-11)$$

$$V_{mp} = V_{oc} - \frac{nKT}{q} \ln \left( \frac{qV_{mp}}{nKT} + 1 \right) \quad (2-12)$$

최대전력점에서 최적동작전류  $I_{mp}$  및 최적동작전압  $V_{mp}$ 에 관한 식 (2-10)과 식 (2-12)에서  $P_{\max}$ 이 커지기 위해서는  $I_{mp}$ 과  $V_{mp}$ 이  $I_{sc}$ 와  $V_{oc}$ 에 가까워야 함을 알 수 있다.

태양전지의 특성을 평가함에 있어서 단락전류, 개방전압과 더불어 가장 중요한 요소 중 하나는 충전율(Fill Factor : FF)이며 식 (2-13)과 같다.

$$FF = (V_{mp} \times I_{mp}) / (V_{oc} \times I_{sc}) \quad (2-13)$$

태양전지의 에너지 변환효율은 태양전지에서 얻을 수 있는 최대의 전기 에너지를 입사광에너지로 나눈 값으로 식 (2-14)와 같다.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \times FF \quad (2-14)$$

여기서  $P_{in}$ 은 입사된 빛 에너지이다. 따라서 태양전지의 효율을 높이기 위해서는 단락전류  $I_{sc}$ , 개방전압  $V_{oc}$ , 충진율  $FF$ 를 높여야 한다.

태양전지의 특성을 고찰한 결과 태양전지의 전기적 특성을 결정하는 내부적인 요소를 보면 내부적인 변수로서 내부 직렬저항  $R_S$ , 병렬저항  $R_P$  그리고 다이오드 역포화 전류  $I_0$  등이 있다.<sup>[11,12]</sup>

태양전지의 내부 직렬저항은 태양전지에 광전류가 흐를 때 전류의 흐름을 방해하는 저항 값으로서 n 층의 표면저항, p 층의 기판저항, 전극 접촉저항 및 전극자체의 고유저항 등이 포함된다. 병렬저항 즉 누설저항은 태양전지 내부의 누설에 의한 것으로, pn 접합면의 재결합전류, 태양전지의 가장자리에서 발생하는 표면 누설전류 등이 있을 수 있다.

태양전지의 내부 직렬저항  $R_S$  및 병렬저항  $R_P$  을 고려한 태양전지의 전류 식 (2-3)에서 단락상태에서의 단락전류  $I_{sc}'$  는 식 (2-15)과 같고 개방상태에서  $I=0$  이므로 식 (2-16)과 같이 된다.

$$I_{sc}' = I_{sc} - I_0 \left( \exp \frac{qI_{sc}R_S}{nKT} - 1 \right) - \frac{I_{sc}R_S}{R_P} \quad (2-15)$$

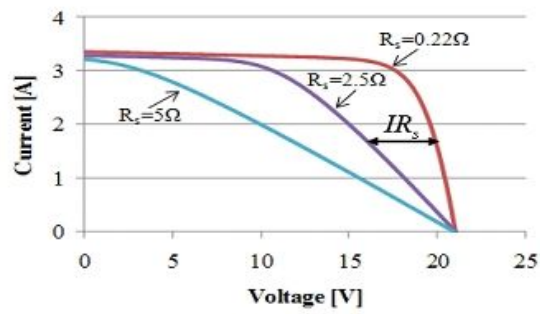
$$0 = I_{sc} - I_0 \left( \exp \frac{qV_{oc}}{nKT} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_P} \quad (2-16)$$

식 (2-15)과 (2-16)로부터 태양전지의 내부 직렬저항에 따른 전압강하와 병렬저항에 따른 전류손실은 식 (2-17) 및 식 (2-18)과 같이 된다.

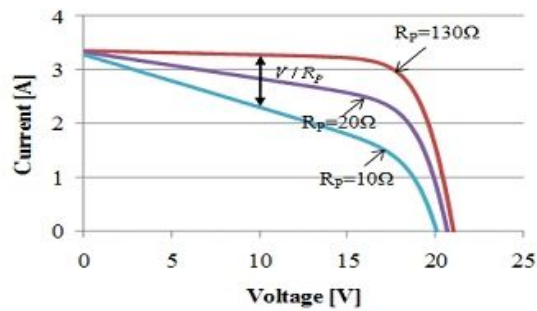
$$I_{sc}' R_S = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_0 \exp\frac{qV_{oc}}{nKT} - I_{sc}'}{I_0}\right) \quad (2-17)$$

$$\frac{V_{oc}}{R_p} = I_{sc}' - I_0 \exp\frac{qV_{oc}}{nKT} \quad (2-18)$$

그림 2-3은 태양전지의 내부 직렬저항과 병렬저항이 태양전지의 특성에 미치는 영향을 나타내고 있다.



(a) series resistance



(b) shunt resistance

Fig. 2-3 Effect of resistance in the I-V characteristics

## 2. 태양전지의 전기적 특성

태양전지의 광전류  $I_{ph}$  는 일사강도에 따라 선형적으로 변화된다. 그런데 단락전류는  $I_{sc} = I_{ph}$  이므로 식 (2-19)과 같이 된다.<sup>[13,14]</sup>

$$I_{sc} = \frac{I_{sc}^*}{G^*} G_{eff} \quad (2-19)$$

여기서  $G^*$  는 표준 시험조건(Standard Test Conditions : STC)에서 일사강도이고  $I_{sc}^*$  는 STC 에서 태양전지 단락전류이며  $G_{eff}$  는 실제 조사되는 일사강도이다. STC 는 일사강도  $1000 [W/m^2]$ , AM1.5, 태양전지 온도  $25^\circ C$  인 표준 상태이다.

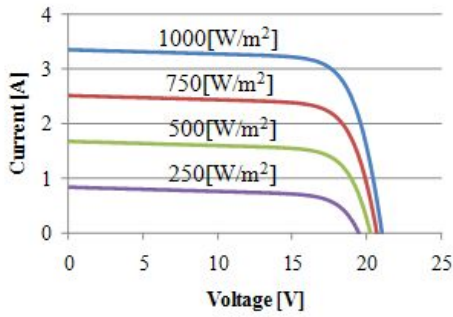
따라서 일사강도에 따른 태양전지의 출력특성은 그림 2-4와 같이 전압의 변화는 미소하지만 단락전류는 크게 변화된다.

태양전지의 개방전압  $V_{oc}$  는 태양전지의 온도  $T$  의 증가에 따라 선형적으로 감소하며 식 (2-20)과 같다.

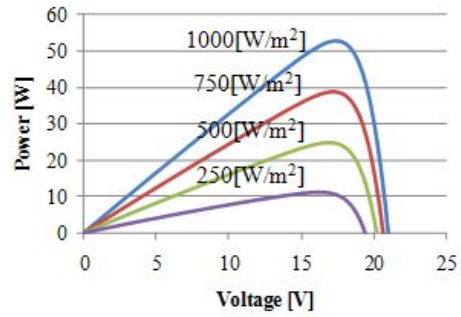
$$V_{oc}(T) = V_{oc}^* + (T - T^*) \frac{dV_{oc}}{dT} \quad (2-20)$$

여기서  $V_{oc}^*$ ,  $T^*$  는 STC 에서의 태양전지 개방전압 및 온도이고 실리콘 태양전지에서 일반적으로  $\frac{dV_{oc}}{dT} = -2.3 [mv/(^\circ C \cdot cell)]$  이다.

따라서 태양전지 온도에 따른 태양전지의 출력특성은 그림 2-5와 같이 전류의 변화는 미소하지만 개방전압은 크게 변화된다.

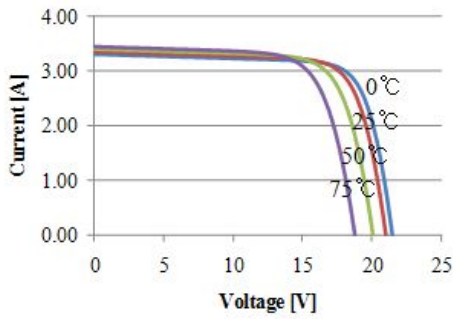


(a) I-V curves

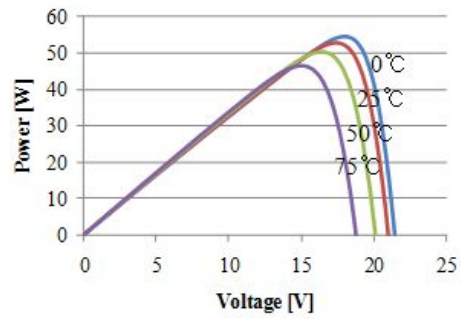


(b) Power curves

Fig. 2-4 Solar cell characteristics curve according to variation irradiation



(a) I-V curves



(b) Power curves

Fig. 2-5 Solar cell characteristics curve according to variation temperature

## B. Boost 컨버터

Boost 컨버터는 입력전압보다 높은 출력전압을 얻을 수 있는 컨버터로서 그림 2-6은 승압형 DC-DC Boost 컨버터의 회로도를 나타낸다.

Boost 컨버터 역시 스위치  $S$ 와 환류다이오드  $D$ 로 스위치부가 구성되어 있으며, 인덕터  $L$ 과 커패시터  $C$ 로 이루어진  $LC$  필터부가 있다. 스위치  $S$ 가 한 주기내의 도통시간이  $DT_s$  이면서 주기  $T_s$ 로 ON/OFF를 반복한다고 했을 때, 그림 2-7(a)은 스위치 도통시의 등가회로를, 그림 2-7(b)은 스위치 차단시의 등가회로를 각각 나타내며, 승압형 DC-DC 컨버터의 주요 부분 파형은 그림 2-8과 같이 나타난다.

그림 2-7에서 알 수 있듯이 스위치  $S$ 가 도통되면 다이오드  $D$ 가 차단되면서 인덕터  $L$ 에는 에너지가 저장되며, 출력 필터  $C$ 에 저장되어 있던 전하가 방전하면서 출력 단에 출력전압을 발생시킨다. 또한 스위치 차단 시에는 입력전압  $V_i$ 와 스위치 도통시  $L$ 에 저장되어 있던 에너지가 더해져서 출력 단으로 전달된다.

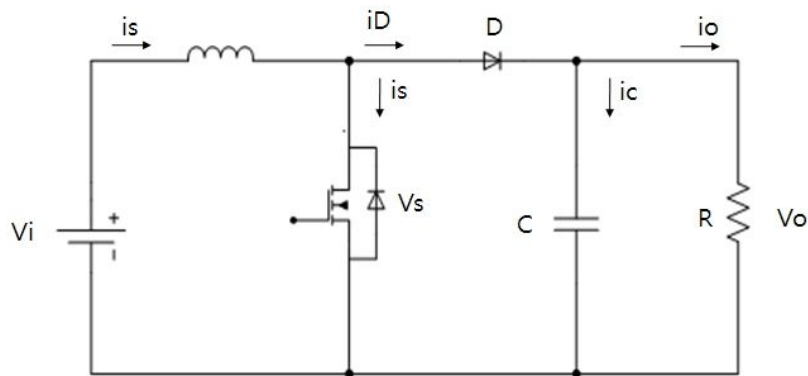
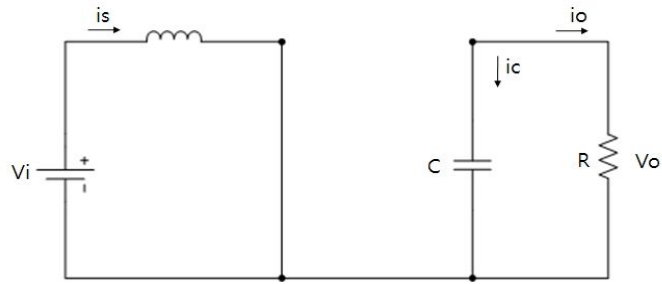
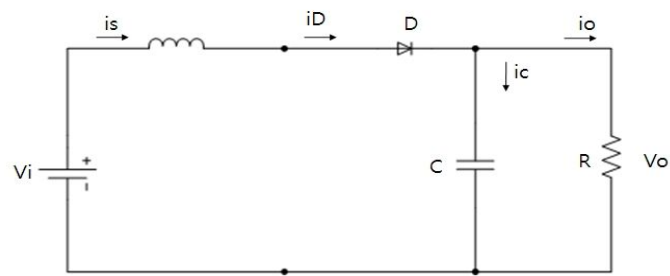


Fig. 2-6 The basic circuit of DC-DC boost converter



(a) S : On



(b) S : Off

Fig. 2-7 The equivalent circuit of DC-DC boost converter

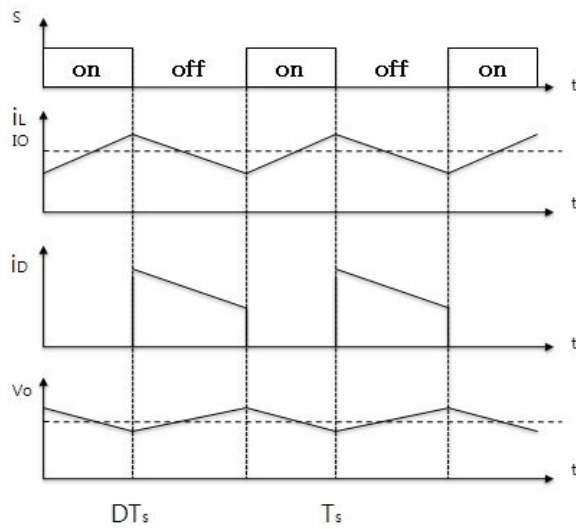


Fig. 2-8 Waveform current and voltage in a DC-DC boost converter

이와 같은 과정을 수식적으로 나타내기 위하여 정상상태에서 출력전압  $V_O$ 의 리플성분을 고려하지 않고 직류성분만을 생각하여 출력전압을  $V_O$ 로 표시하고, 도통시간 동안의  $L$ 양단 전압  $V_l$  을 표시하면

$$V_l = V_i \quad (2-21)$$

이 되고, 차단시간 동안의  $L$ 양단 전압  $V_l$ 은

$$V_l = -(V_O - V_i) \quad (2-22)$$

이 된다.

승압형 DC-DC Boost컨버터에 대해서도 강압형 DC-DC Buck컨버터에서와 같이 인덕터 Voltage-sec 평형조건을 식 (2-21)과 식(2-22)에 적용하면 식 (2-23)과 같이 표현할 수 있고, 이를 그림으로 나타내면 그림 2-9 와 같다. 여기서  $D$ 는 듀티비 이다.

$$V_i \cdot DT_s = (V_O - V_i) \cdot (1 - D)T_s \quad (2-23)$$

또한 식 (2-23)으로부터 정상상태에서의 입출력 특성을 식 (2-24)와 같이 구할 수 있다.



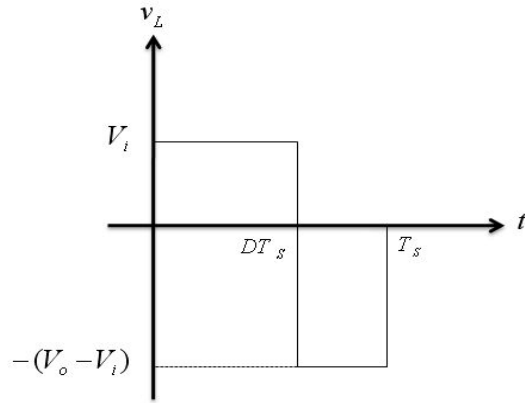


Fig. 2-9 Waveform of inductor voltage  
in a boost converter

$$V_o = \frac{1}{(1-D)} V_i \quad (2-24)$$

식 (2-24)에서 알 수 있듯이 승압형 PWM DC-DC 컨버터의 직류 출력전압의 크기는  $(1-D)$  에 반비례함을 알 수 있다. 또한 강압형 DC-DC 컨버터와 마찬가지로 시비율을 증가시키면 출력전압도 증가하며, 시비율을 감소시키면 출력전압도 감소되며,  $V_o \geq V_i$ 의 조건이 항상 성립함을 알 수 있다.<sup>[15]</sup>

## C. MPPT 제어 알고리즘

태양전지 어레이의 최대전압은 일사량과 온도에 의해서 순시적으로 변화된다. 이 때문에 태양전지의 특성이 변화하지 않아도 동작점이 변하게 되어 최대출력을 얻을 수 없다. 따라서 태양전지를 효율적으로 동작시키기 위해서는 태양전지 어레이 출력을 항상 최대전력점에서 동작하도록 하는 제어가 필요하다.

MPPT 제어기법은 태양전지 어레이에 연결된 부하를 제어하여 임피던스 매칭을 최적화함으로써 최대출력점 동작이 가능하게 하며 그 제어방법은 크게 아날로그 방식과 디지털 방식으로 분류된다. 알고리즘 측면에서는 일정전압제어 알고리즘, P&O 알고리즘, IncCond 알고리즘 등으로 분류할 수 있다.

아날로그 제어방식의 경우 제어회로와 센서를 이용하여 구현이 가능하지만, 제어의 유연성과 다른 종류의 태양전지 어레이에 적용을 쉽게 하기 위하여 DSP 또는 마이크로컨트롤러를 사용하는 것이 유용하다. MPPT 기술의 핵심은 측정된 어레이 파라미터( $I$ ,  $V$ ,  $P$ )를 이용하여 최대전력점을 추적하는 알고리즘이며, 태양전지 어레이의 동작점 변화와 어레이 출력전력의 변화에 일치시키기 위하여 연속적으로 동작시키는 것이다.<sup>[16,17]</sup>

MPPT 추종 알고리즘은 태양전지의 특성에 종속적이지 않고 자유로워야 하며, 실제적인 최대전력점 추종이 가능하여야 한다. 또한, 주기적인 튜닝이 필요치 않아야 하며 추종 속도가 빨라야 한다.

대표적인 MPPT 제어 방법으로는 일정전압 제어방법, IncCond 방법, P&O 방법 등을 들 수 있는데 P&O법과 IncCond법이 많이 쓰이는 방법이며, 이 방법은 전력-전압의 기울기에 의해 제어하는 방식이다. 많은 실험을 통하여 IncCond법이 P&O법보다 향상된 알고리즘임을 증명하고 있으며 빠른 일사량 변동 시에 유리한 알고리즘으로 알려져 있다.<sup>[18~20]</sup>

## 1. 일정전압 제어

태양전지의 최대 출력전압은 일사량과 태양전지 온도에 크게 영향을 받지 않는다. 태양전지 어레이의 출력전압은 일사량의 변화에 대해서 약간의 변동폭을 가지는 정전압 특성을 나타내고 있으므로,  $V_{ref}=0.76V$  로 설정하여 정전압으로 제어하는 방법을 정전압제어 방법이라고 한다. 따라서 이 기법은 출력에 대해 전력량이 필요하지 않다.

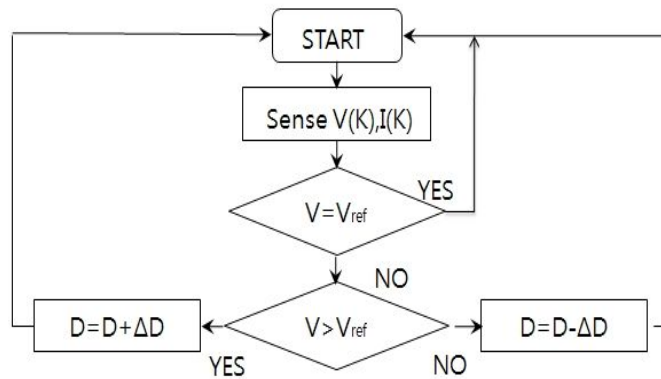


Fig. 2-10 Flowchart of CV MPPT method

Boost 컨버터의 duty는 제어 회로에 의해 결정되고, 출력 측 DC 전압은 정상상태 조건의  $V_{ref}$  값에 의해 일정한 값으로 유지된다.

이 제어방법은 일사량급변 시 정확한 MPP를 추정하지 못해 출력 효율이 감소되고 태양전지 모델링의 정확성에 성능이 좌우되는 단점이 있지만, 어레이 및 DC측의 센서를 줄일 수 있는 장점을 갖는다. 그림 2-10은 정전압의 MPPT 제어 알고리즘을 나타내고 있다.

## 2. P&O 제어방법

P&O 제어 알고리즘은 만약 전력이 증가하면 교란은 다음 주기 동안 계속 해서 같은 방향으로 증가할 것이며 그렇지 않으면 교란의 방향은 반대가 될 것이다. 이것은 어레이 단자전압이 모든 MPPT 주기 동안 교란된다는 것을 의미한다. 그러므로 MPP에 이르렀을 때 P&O 알고리즘은 일정 혹은 천천히 변하는 환경조건에서 자려 진동할 것이며 그 결과 태양전지 어레이의 손실이 발생하게 된다.

이러한 문제는 최대전력점에 도달했을 때를 검출하기 위해 바로 앞의 주기 동안의 두 개의 파라미터 비교와 교란부를 바이패스하기 위한 P&O 알고리즘의 개선에 의해 해결할 수 있다.

전력손실을 줄이기 위한 다른 방법으로는 교란 step( $\Delta V$ )의 감소가 있는데 이 방법은 일사량이 낮은 경우 제어특성이 나빠지고, 환경조건이 급하게 변할 경우 최대전력점 추적속도가 늦어지게 되므로 step의 결정이 중요하게 된다.

IncCond (Incremental Conductance) 제어 알고리즘은 부하 임피던스와 태양전지 임피던스와의 비교에 의해서 태양전지 출력을 제어하는 방법으로, P&O 알고리즘의 결점인 최대전력점에서 자려진동이 일어나는 특징과 일사량 변동에 따라 전압 변동 폭이 따라 가지 못하는 단점을 보완 한 것으로 IncCond 알고리즘은 Hill-climb 방법에 따른 IncCond MPPT의 특성이며 과거의 값과 비교하여 MPPT를 수행한다. 즉 어레이 단자전압이 이 값의 상대적인 최대전력점 전압 값에 따라 항상 조절되어지는 것으로 알고리즘은 그림 2-11과 같다.<sup>[21]</sup>

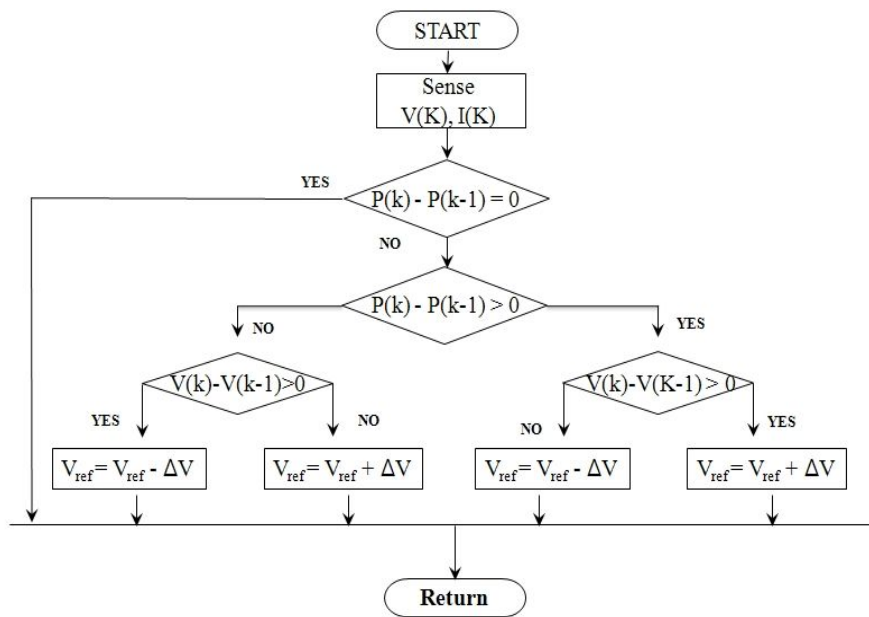


Fig. 2-11 Flowchart of the P&O algorithm

### 3. IncCond 제어방법

IncCond 알고리즘은 P&O 알고리즘의 교란점이 생겨 효율이 떨어지는 단점을 피하기 위한 방법으로 제안되었다. 태양전지 전압  $V$ 에 대한 출력전력  $P$ 의 미분이 최대전력점에서 '0'이 된다는 것을 기초로 하였다. 태양전지의 P-V특성을 보면 최대전력점을 기준으로 왼쪽의 미분 값은 '0'보다 크고, 오른쪽은 '0'보다 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 다음과 같은 식을 이끌어 낼 수 있다.

$$V = V_{mp} \quad \frac{dP}{dV} = 0 \quad (2-25)$$

$$V < V_{mp} \quad \frac{dP}{dV} > 0 \quad (2-26)$$

$$V > V_{mp} \quad \frac{dP}{dV} < 0 \quad (2-27)$$

식 (2-25)으로부터  $P = VI$ 와의 관계를 이용하여 식 (2-28)을 구한다.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (2-28)$$

식 (2-25)과 식 (2-28)을 조합하여 MPP조건  $V = V_{mp}$ 을 만족하는 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2-29)$$

이 알고리즘은 DC-DC컨버터의 입력이나 P&O 알고리즘의 기준 전압  $V_{ref}$

을 조정함으로써 이행된다.

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

$$dV(k) \approx V(k) - V(k-1) \quad (2-30)$$

$$dI(k) \approx I(k) - I(k-1) \quad (2-31)$$

MPP를 찾기 위한 중심함수는 다음과 같은 조건을 적용한다.

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2-32)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (2-33)$$

만약 식 (2-32)의 조건과 일치한다면 시스템은 MPP에서 동작하므로 동작 전압을 바꿀 필요가 없다. 만약 식 (2-32)와 틀리다면 식 (2-26)과 식 (2-27)에 대한 식 (2-33)은 전압이  $V_{mp}$ 보다 크거나 작을 때 동작하는 시스템 조건을 결정하기 위해 사용되며, 항상 MPP동작전압이 조정되어 최대전력을 얻을 수 있게 된다.<sup>[22,23]</sup>

그림 2-12은 IncCond 제어 알고리즘의 순서도를 나타내고 있다.

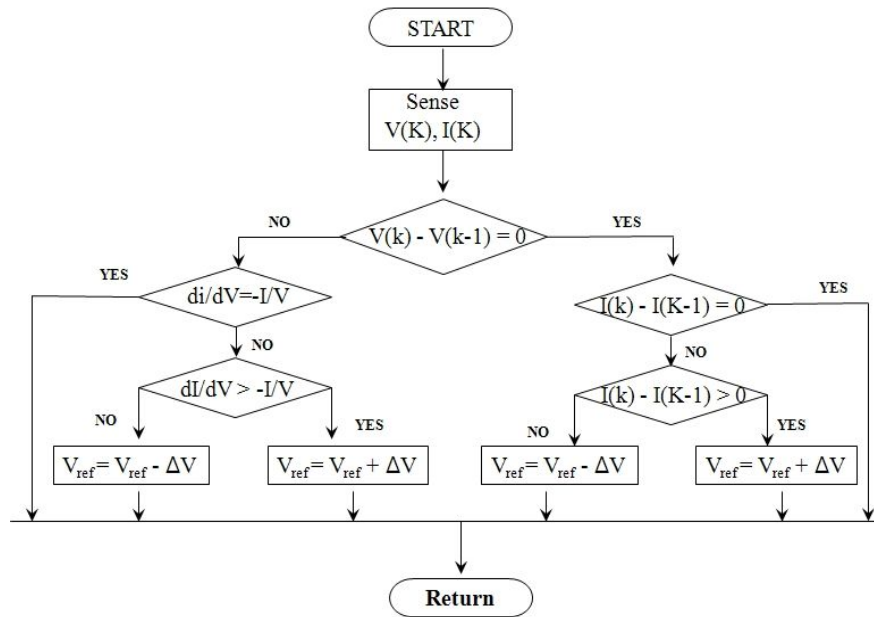


Fig. 2-12 Flowchart of IncCond MPPT algorithm



#### 4. Newton Method 제어방법

Newton Method 방법은 일반적인 함수의 근사 값이나, 실제 값을 찾는 데 매우 효율적인 방법이다. 이 방법은 구하고자 하는 근의 값 근처에서는 수렴되는 속도가 매우 빠르므로, 원하고자 하는 값을 찾는 속도가 일반적인 미분방정식을 이용하여 근을 찾는 것보다 빠르게 찾을 수 있다. 하지만 방정식의 기울기가 작게 되면 해를 구하기 힘들어져 처음 접근 포인트 점을 잘못 잡게 되면 원하는 근의 값을 찾을 수 없다.

Newton Method를 이용하여 근을 구하는 법을 알아보면, 그림 2-13처럼 그래프  $y=f(x)$ 을 그려 그래프 상에 임의의  $x$ 값을 지정, 이 값을  $x_0$ 라 한다. 다음 단계로  $x_0$ 에서 접선을 그려주어 이 접선과  $x$ 축이 만나는 점을  $x_1$ 이라고 하며, 접선에 해당하는 식 (2-34)과 같이 나타낼 수 있다.

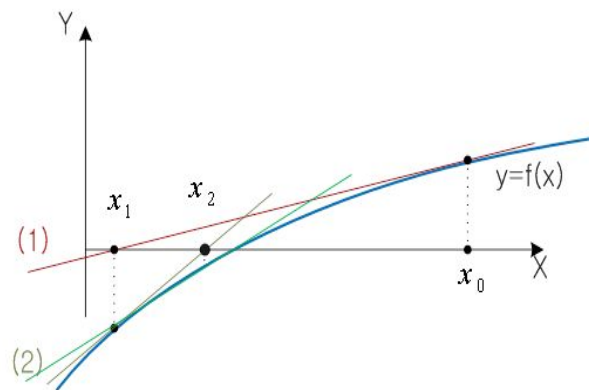


Fig. 2-13 Getting radical values using newton method

$$y = f'(x)(x_1 - x_0) + f(x_0) \quad (2-34)$$

식(2-34)의  $y$ 값을 0으로 놓고 식 (2-35)와같이  $x$ 절편 값을 구하여 준다.

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x)} \quad (2-35)$$

그래프  $f(x)$ 의  $x$  값이  $x_1$  이 되는 점의 접선의 방정식을 구해 준다.

$$y = f'(x)(x_2 - x_1) + f(x_1) \quad (2-36)$$

그리고  $y=0$  으로 두고  $x$ 절편을 구한다.

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x)} \quad (2-37)$$

이러한 과정을 계속 반복하게 되면 식 (2-38)과 같은 식이 나오게 된다는 것을 알 수 있다.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x)} \quad (2-38)$$

MPPT 제어를 하기위한 수학적 모델링을 하면, 식 (2-39)과 식 (2-40)번과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{k+1} = V_k - \frac{f(x_n)}{f'(x)} (k=0,1,2\dots N) \quad (2-39)$$

전압 전력의 식으로 다음 과 같이 풀이 할 수 있다.

$$V_{k+1} = V_k - \frac{\frac{P(V_k) - P(V_{k-1})}{V_k - V_{k-1}}}{\frac{\frac{P(V_k) - P(V_{k-1})}{V_k - V_{k-1}} - \frac{P(V_{k-1}) - P(V_{k-2})}{V_{k-1} - V_{k-2}}}{V_k - V_{k-2}}} \quad (2-40)$$

$(k = 0, 1, 2, \dots, N)$

식 (2-40)은 IncCond 방식에서 한 번 더 미분한 식이 된다.

$$V_{k+1} = V_k - M \frac{P(V_k) - P(V_{k-1})}{V_k - V_{k-1}} \quad (2-41)$$

$(k = 0, 1, 2, \dots, N)$

식 (2-41)은 수식이 복잡하기 때문에 간략하기 위해서 분모의 식을 M으로 선정하여 보다 빠르게 계산하도록 선정하였다. 하지만 M의 값을 다르게 하면 많은 오차가 있음을 알 수 있었다. 그림 2-14는 M의 값을 각각 0.5와 2로 했을 경우를 비교하였으며, 0.5는 교란이 있고, 2는 일정하게 출력됨을 확인하였다.

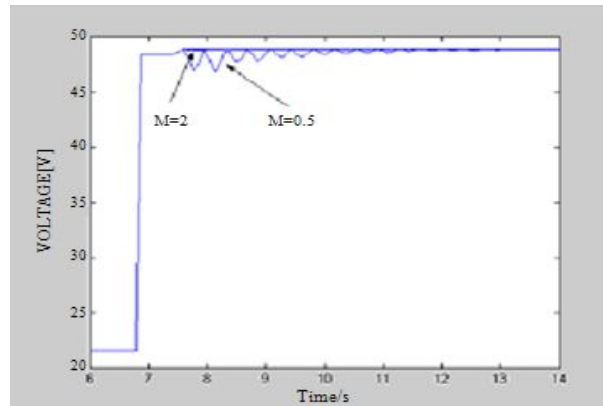


Fig. 2-14 M according to the value of the voltage output

P&O 방식은 간단한 피드백 구조를 가지고 태양전지 전압을 주기적으로 증

가 또는 감소시켜 동작을 하며 이전의 교란주기 동안의 태양전지 어레이 출력 전력과 현재 어레이 출력전력을 비교하여 최대 출력 전력 점을 찾는 방식이다. 그리고 IncCond 방식은 부하 임피던스와 태양전지 임피던스를 비교하여 태양전지 출력 제어를 하는 방법이다 P&O 방식과 IncCond 방식은 주기를 비교하여 최대 전력 출력 점을 찾아가는 방식이라면 Newton Method 방식은 주기를 바로 구하여 최대 출력 전력 점을 찾는 방법이라 할 수 있다. 그림2-15는 PV 곡선을 나타내었는데 한번 미분된 곡선과 두 번 미분된 곡을 나타내면 두 번 미분된 곡선이 빠르게 최대 점을 찾는 것을 확인 하였다. 그림2-16은 Newton Method를 이용한 MPPT제어의 알고리즘을 나타내고 있다.<sup>[24]</sup> 단  $\Delta D$ 는 다음 식 (2-42)과 같다.

$$\Delta D = M \frac{P(V_k) - P(V_{k-1})}{V_k - V_{k-1}} \quad (2-42)$$

( $k = 0, 1, 2, \dots, N$ )

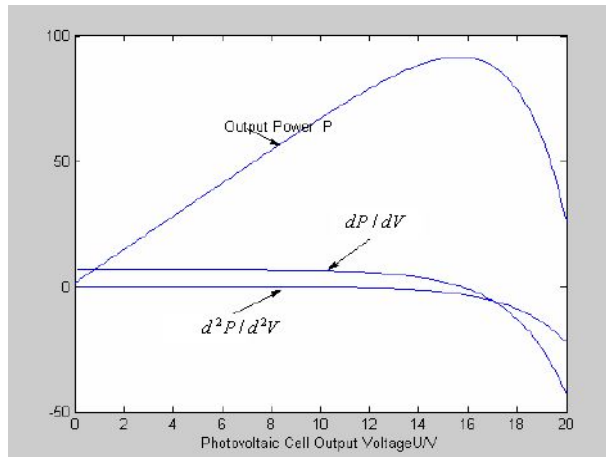


Fig. 2-15 Derivative according to the PV curve

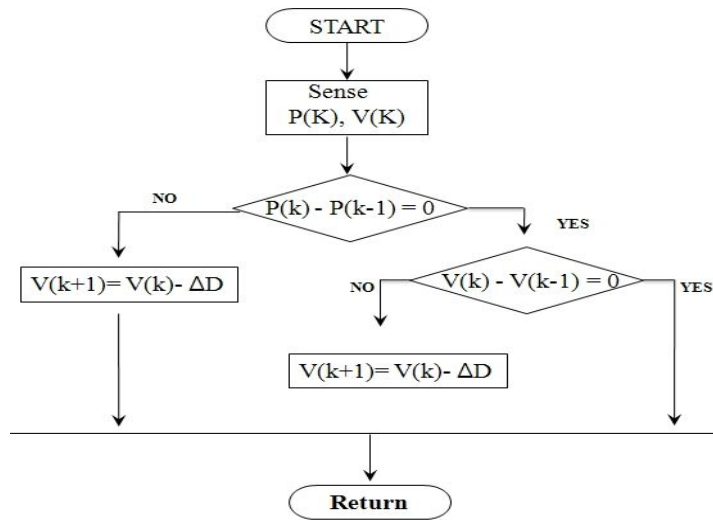


Fig. 2-16 Flowchart of the newton method algorithm

## 5. 제안한 알고리즘 제어방법

본 논문에서는 Newton Method과 정전압을 결합한 제어를 제안하였다. 일사량이 적은  $200[W/m^2]$ 일때 정전압 방식을 사용하고, 그 이상의 일사량일 경우 Newton Method 방식을 이용하여 최대출력점을 추적하는 방식이다. 태양전지의 효율에 있어서 최대 출력 전력 점을 찾는 것을 매우 중요하며, 보다 빠르고 안정적으로 최대 출력 전력점을 찾아 태양전지의 효율을 높이는 것을 매우 중요한 부분이다.

기존의 사용되는 Newton Method를 정전압제어와 결합하여 더욱 빠르고 정확하게 최대 출력 점을 찾는다. Newton Method 제어는 두 번 미분하는 방정식으로 기울기가 작으면 해를 구하기 어렵고 추적 속도가 느리다. 문제점을 보완하기 위해 일사량이 낮은 경우에는 정전압 제어를 사용하여 안정적이고 빠르게 최대 출력 전력 점을 찾도록 하였다. 하지만 전압 값과 전력 값의 초기 값 설정을 정확하게 설정해 주지 않으면 최대 출력 전력 점을 찾는 과정에 있어서 불안정한 과정이 나타난다. 그림 2-17은 제안된 제어 알고리즘의 순서도를 나타내고 있다.

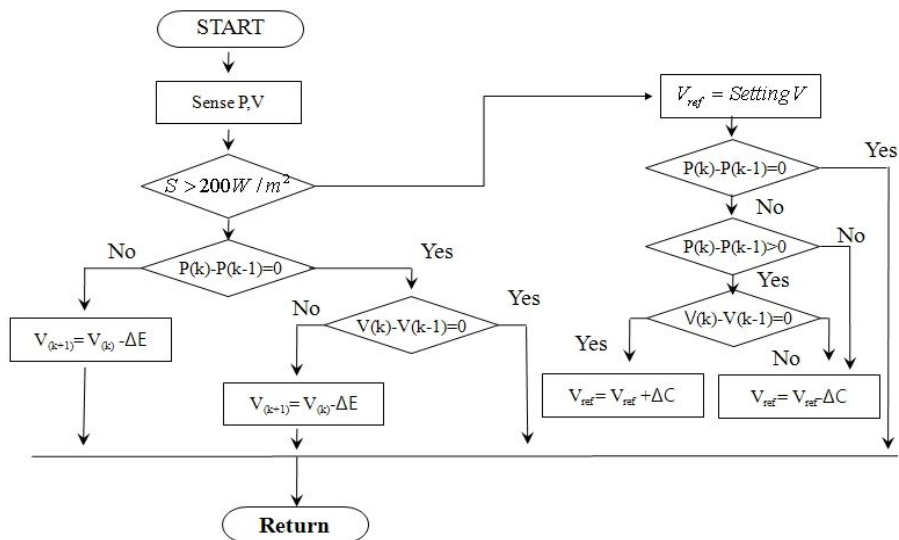


Fig. 2-17 Flowchart of the proposed newton method algorithm

### III. 시뮬레이션 및 고찰

#### A. 태양전지 출력특성

본 논문에서는 태양전지의 출력특성 및 기존의 P&O 제어 알고리즘과 IncCond 알고리즘, Newton Method 알고리즘, 제안한 Newton Method 알고리즘 의한 출력특성을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다.

표3-1은 시뮬레이션을 수행하기위한 태양전지 모듈의 파라미터를 나타내고 있다. 시뮬레이션 툴은 MATLAB Simulink를 이용하여 특성비교 하였다.

Table 3-1. Parameter of photovoltaic module

Parameter	Value	Parameter	Value
Maximum power	220[W]	Temperature	25[°C]
Open circuit voltage	55.5[V]	Max. power voltage	45.9[V]
Short circuit current	5.21[A]	Max. power current	4.79[A]

그림 3-1은 MATLAB Simulink를 이용한 태양전지 모듈의 모델링을 나타내고 있다. 일사량이  $1000[W/m^2]$  을 기준으로 하고 일사량을  $200[W/m^2]$  간격으로 감소한다는 가정 하에 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3-2는 일사량가변에 따른 태양전지 모듈의 전압-전류특성을 그림 3-3은 전압-전력 특성곡선을 나타내었다. 일사량이 증가함에 따라 전력이 증가함을 확인할 수 있었다.

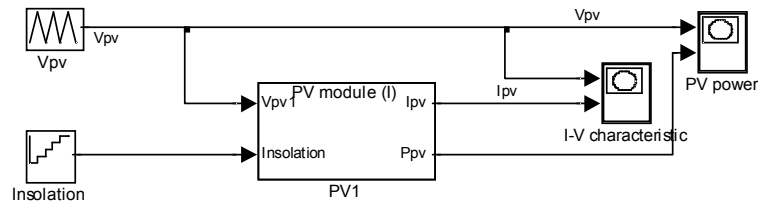


Fig.3-1 PV control system using simulink

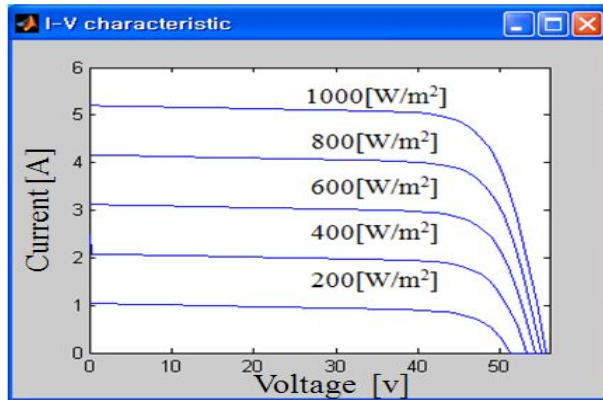


Fig. 3-2 I-V characteristics curve at difference insolation

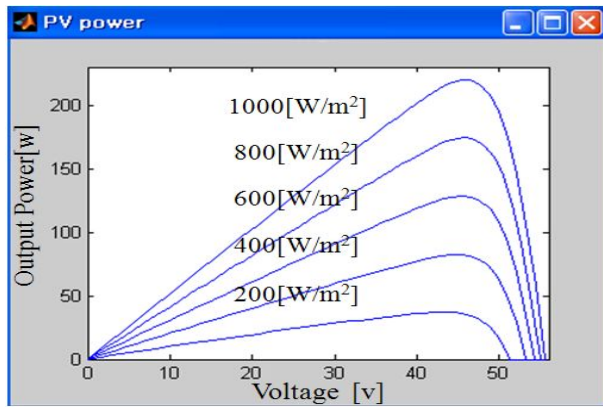


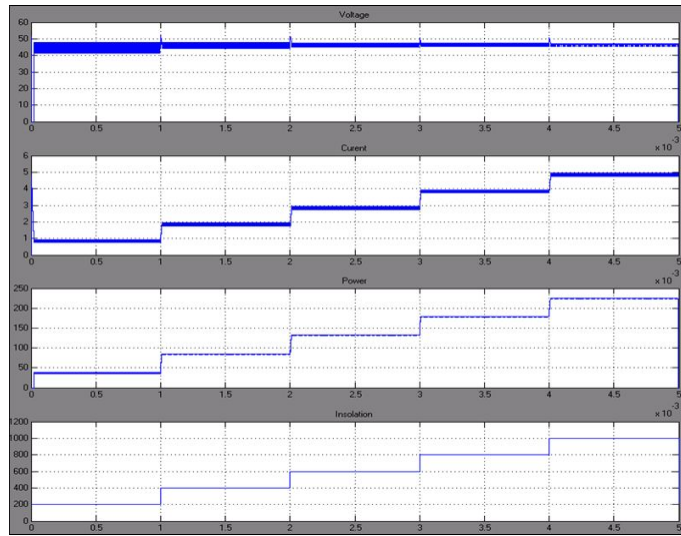
Fig. 3-3 P-V characteristics curve at difference insolation



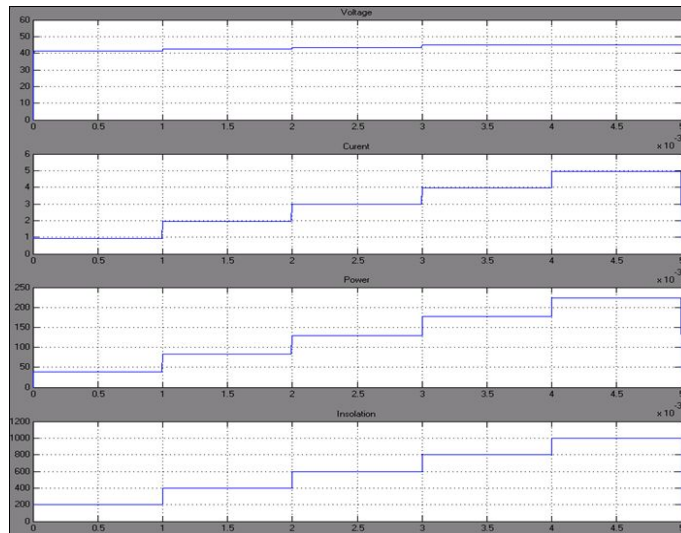
## B. MPPT 제어 특성

표 3-1의 파라미터 값을 가지고 MPPT를 MATLAB simulink를 수행하였다. 그림 3-4는 기호를 각각 일사량  $200[W/m^2]$ 부터  $200[W/m^2]$  단위로  $1000[W/m^2]$ 까지 상승할 때 정전압제어, P&O 제어, IncCond 제어, Newton method 제어, Proposed Newton method 제어를 simulink를 수행하였다.

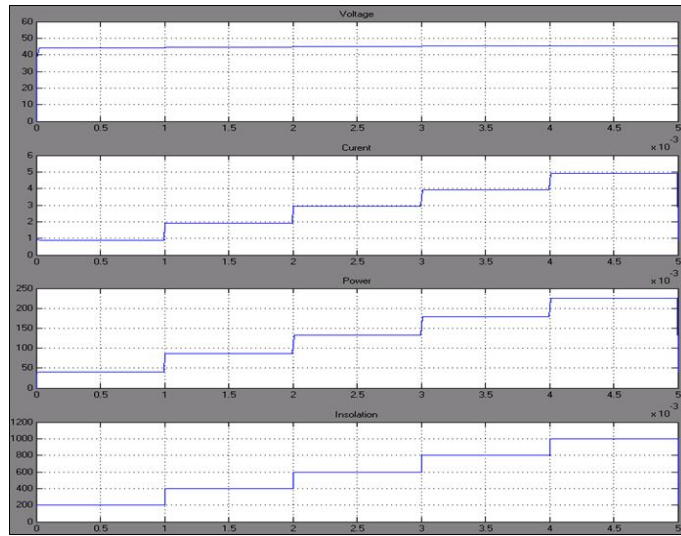
일정전압 제어는  $V_{ref}=0.76V$  로 설정하여 정전압으로 제어하는 방법이다. 이 기법은 출력에 대해 전력량이 필요하지 않으며, 일사량이 낮은 점에서 추적이 잘된다. 하지만 일사량의 급변시에 추적을 잘못하는 단점이 있다. P&O 제어는 그림 3-4 (a)에서처럼 앞의 주기 동안의 두 개의 파라미터 비교 하기 때문에 일사량 급변시에도 추적은 잘되지만 교란이 생겨 효율이 떨어진다. IncCond 제어는 그림 3-4 (b)이며, P&O 제어 단점을 보완하기 위해 나왔으며, 전력값을 한번 미분하여 0의 점을 추적 하는 방법으로 P&O제어 보다 계산이 복잡하지만 빠르고 교란 점도 없다. Newton Method제어는 그림 3-4 (c)와 같이 (b)보다 전력점을 더 빠르게 추적한다. 하지만 전력점을 두 번 미분된 값으로 전력점의 기울기가 낮으면 추적이 잘 되지 않는 단점이 있다.그림(c)와 같이 일사량이 낮을 경우 Tracking time 이 늦음을 알 수 있다. 제안된 Newton Method 방법은 기존의 Newton Method를 정전압 제어와 결합하여 다른 방법보다 현저히 빠르게 추적하고, 일사량  $200[W/m^2]$ 이하 일 경우 정전압제어를 하고  $200[W/m^2]$  이상일 경우 Newton Method를 사용함으로써 고 일사량뿐만 아니라 저 일사량 시에도 MPP를 추적함으로써 발전량을 증대시키고 효율을 향상시킨 새로운 MPPT 제어 방법이다. 하지만 전압 값과 전력 값이 초기 값 설정을 정확하게 설정해 주지 않으면 최대 출력 전력 점을 찾는 과정에 있어서 불안정한 과정이 나타난다.



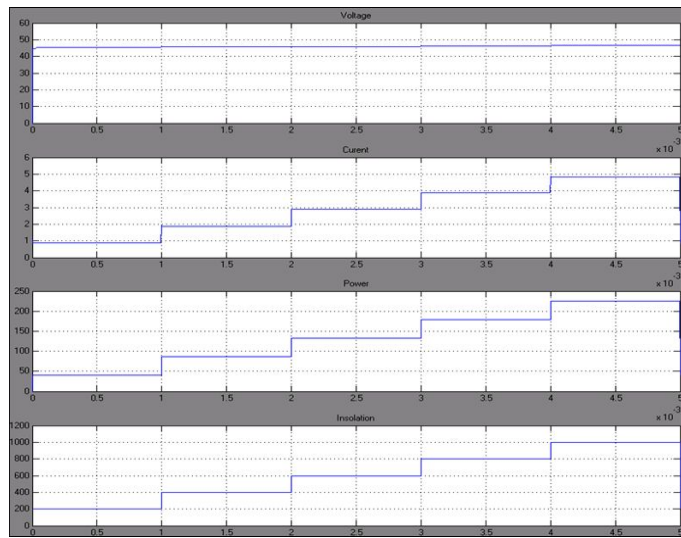
(a) P&O control method



(b) InCond control method



(c) Newton control method



(d) Proposed control method

Fig 3-4 Output characteristics according to variation insolation

### C. Boost 제어 특성

시뮬레이션 파라미터는 부스트 컨버터 설계사양인 표 3-2와 같은 파라미터를 채택하였다. 그림 3-5는 Boost 컨버터를 이용한 PV어레이 MPPT제어에 대한 Simulink 구성 도를 나타내고 있다. 이 회로도에는 기본적으로 태양전지 모듈에 부스트 컨버터와 mppt 제어부로 구성하였으며, 기존의 P&O 제어 알고리즘과 본 논문에서 제안하는 개선된 Newton Method 제어 알고리즘을 비교하는 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 3-6은 DC-DC Boost 컨버터에 대한 Simulink 구성 도를 나타내고 있으며, 그림 3-7은 MPPT 제어 알고리즘을 나타낸 것이다.

Table 3-2. Design parameters for DC-DC boost converter

Parameters	Volume	Unit
Output power	1	[kw]
Input voltage	90-240	[V]
Output voltage	300	[V]
Output current	0.15-3.8	[A]
Switching frequency	100	[khz]

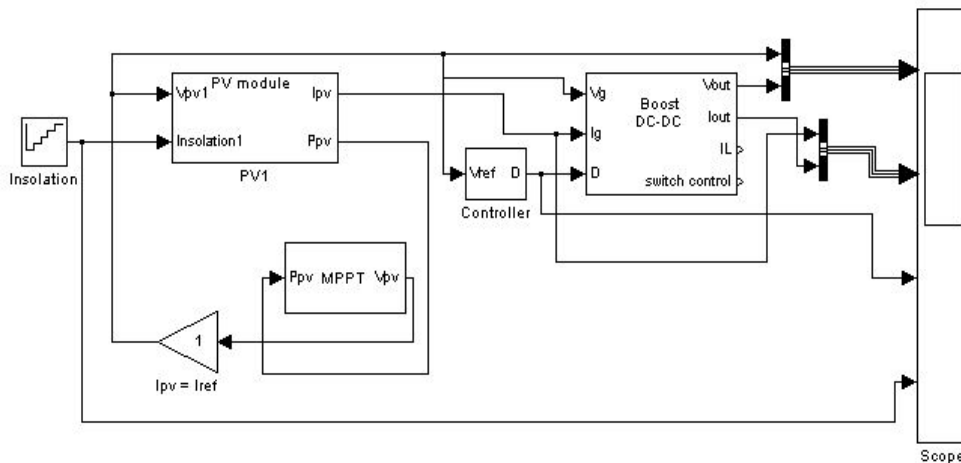


Fig. 3-5 Whole control system using simulink

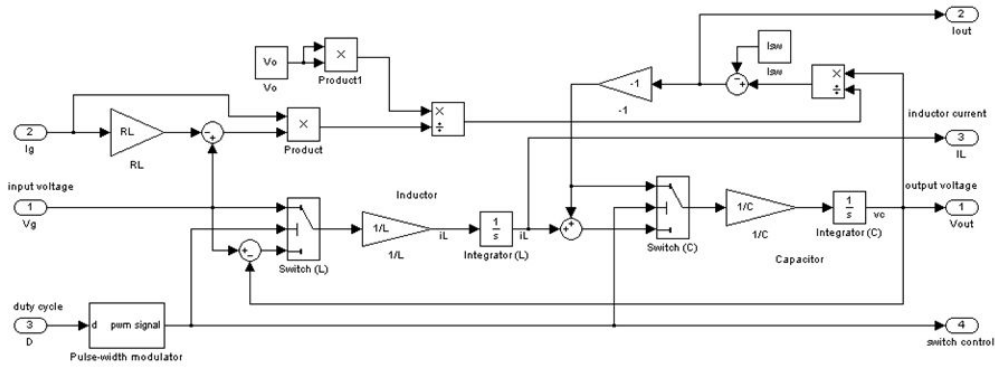


Fig. 3-6 Boost converter circuit using simulink

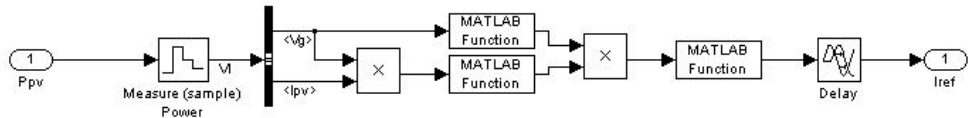


Fig. 3-7 MPPT control circuit using simulink

그림 3-8과 그림 3-9는 P&O 제어 알고리즘을 일사량  $200[W/m^2]$ 부터  $1000[W/m^2]$ 까지  $200[W/m^2]$ 단위로 상승할 때 기존의 P&O 알고리즘과 제안한 Newton Method 제어 알고리즘에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 일사량이 점차 상승하면 PV 어레이의 출력전류 및 전압이 상승하고 따라서 듀티비는 하강하면서 출력전압은  $300[V]$ 로 일정하게 출력됨을 확인하였다. 또한 MPPT 제어가 잘되고 개선된 Newton Method 제어의 경우 추적속도가 개선되었음을 확인 하였다.

그림 3-10과 그림 3-11 은 일사량 급변시 출력특성을 고찰하기 위하여  $200[W/m^2]$ 부터  $800[W/m^2]$ 급 상승시 출력특성을 고찰하였다. 일사량 급상승시 개선된 Newton Method 제어 알고리즘에 의한 MPPT 제어는 기존 P&O 제어 알고리즘보다 Tracking time이 현저히 증가됨을 확인 하였다.

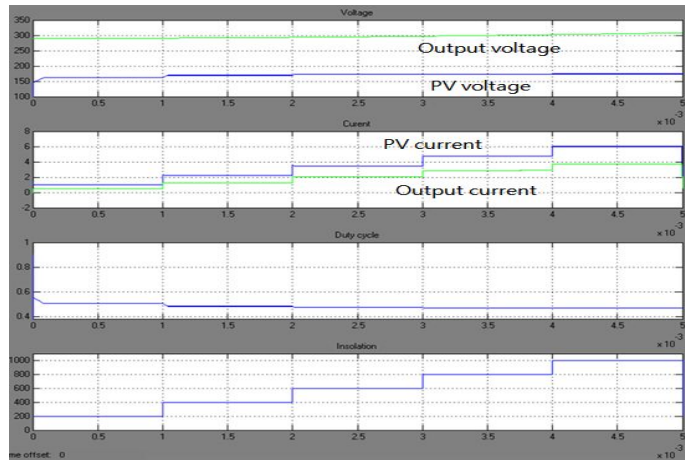


Fig. 3-8 Output characteristics using conventional P&O MPPT control method

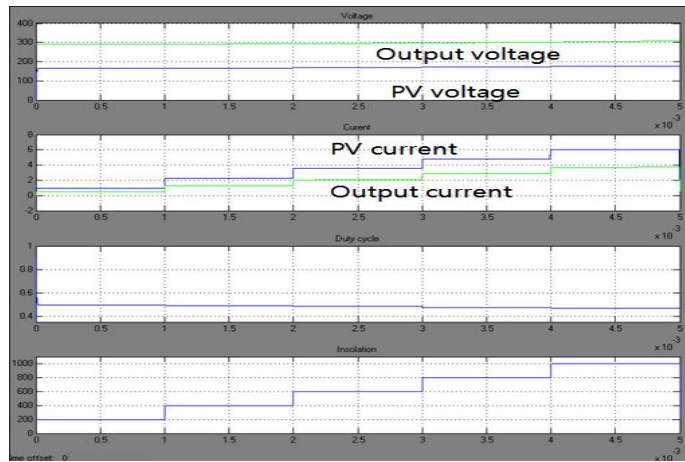


Fig. 3-9 Output characteristics using improved newton method control method

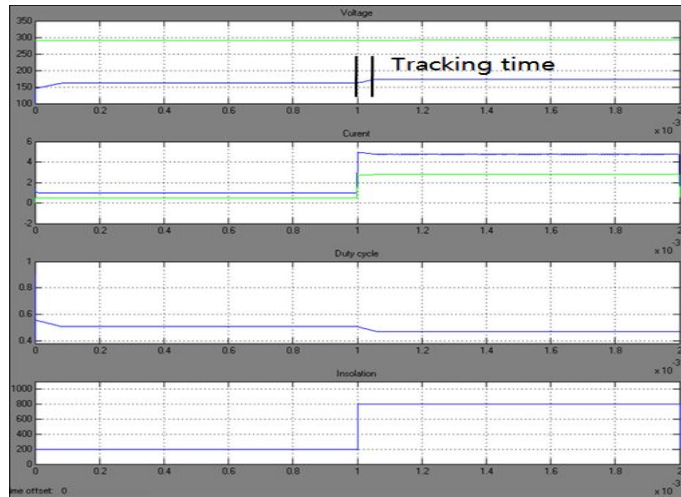


Fig. 3-10 Output characteristics according to rises rapidly insolation using conventional P&O MPPT control method

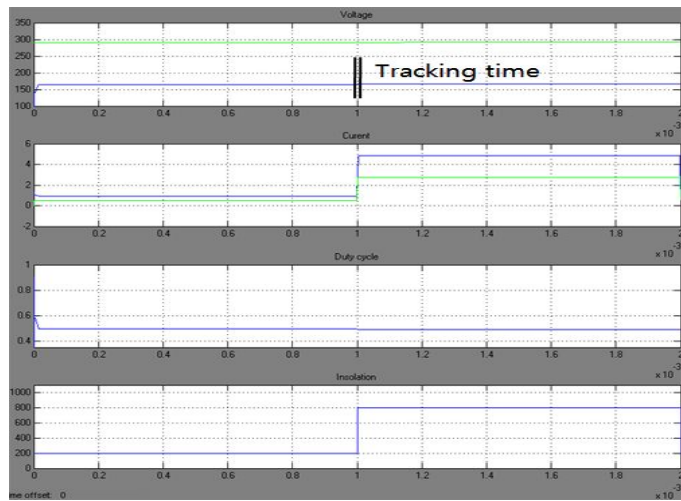


Fig. 3-11 Output characteristics according to rises rapidly insolation using improved newton method control method

## IV. 결 론

태양광 발전시스템의 최대 전력점제어는 일반적으로 MPPT라고 하며, 그 제어 방법에 대해서는 많은 저서와 논문을 통하여 다양한 방법의 연구 결과가 보고되고 있으나 각각의 제어방법들은 장점과 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 제안된 Newton Method 제어와 일반적으로 가장 많이 사용되어지는 MPPT 방법에 대하여 장점, 단점 및 특징을 서술하고, 그 동작 특성을 비교 분석하였다. 정전압 제어는 일사량이 낮은 경우 추적이 잘 되지만 일사량의 급변시에 추적이 어려움이 있다. P&O제어는 앞의 주기 동안의 두 개의 파라미터 비교 추적하며 급변시에도 잘 추적이 된다. 하지만 교란이 생겨 효율이 떨어진다. IncCond 제어는 전력값을 한번 미분하여 0의 미분점을 추적 하는 방법으로 P&O제어 보다 계산이 복잡하지만 빠르고 교란 점도 없다. Newton Method제어는 다른 제어보다 전력점을 더 빠르게 추적한다. 하지만 전력점을 두 번 미분된 값으로 기울기가 낮으면 추적이 잘 되지 않는 단점이 있다. 제어방법의 문제점을 개선하기 위해 새로운 Newton method 제어방법을 제안한다. 기존의 제어 방법은 기울기가 작으면 해를 구하기 어렵고 추적 속도가 느리며, 계산식도 복잡하다. 제안된 Newton Method 방법은 기존의 Newton Method를 정전압 제어와 결합하여 다른 제어방법보다 현저히 빠르게 추적하며, 계산식도 간소화 하였다. 일사량  $200[W/m^2]$ 이하 일 경우 정전압제어를 하고,  $200[W/m^2]$  이상일 경우 Newton Method를 사용함으로써 고 일사량뿐만 아니라 저 일사량 시에도 MPP를 추적함으로써 발전량을 증대시키고 효율을 향상시킨 새로운 MPPT 제어방법이다.

MATLAB을 이용하여 비교 분석 결과를 제시하여 본 논문의 타당성을 입증 할 수 있었다.

본 연구를 통하여 얻은 기술로서 태양광 가로등 시스템 및 DC-DC컨버터, 등 필요로 하는 응용시스템에 사용이 가능할 것으로 보이며 향후 손실분석을 통한 최적효율 개선에 관한 연구와 최적의 MPPT 시스템 모델링 및 모니터링 시스템 및 장기간 운전에 따른 특성분석에 관한 연구가 필요하다 사료 된다.



## 참 고 문 헌

- [1] Goetzberger, A. and V. U. Hoffmann "Photovoltaic Solar Energy Generation". New York, Springer. pp.100-110, 2005.
- [2] Patel, M. R. "Wind and Solar Power Systems". Boca Raton, CRC Press. pp. 125-130, 1999.
- [3] Charles. R. Sullivan, Matthew J Powers, "A high-efficiency maximum power point tracker for photovoltaic array in a solar-power race vehicle", Proceedings of the IEEE, pp. 574-580, 1993.
- [4] Hussein K H, Muta I, "Modified Algorithms for Photovoltaic Maximum Power Tracking", Record of 1992 Joint Conference of Electrical and Electronics Engineers in Kyushu Japan, pp. 301, 1992.
- [5] K.H Hussion, "Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions", Proceedings of IEE, Col 142, NO 1, pp. 59-64, 1995.
- [6] Nagayoshi H. Orio S. Kono Y. Nakajima H., "Novel PV array/module I-V curve simulator circuit", IEEE Photovoltaic

Specialists Conference vol. 1 pp. 1535-1538, 2002.

- [7] B. P. Edwards, "computer based sun following system", Solar Energy, Vol. 21 pp. 491-496, 1998.
- [8] Yano, A., K. Tsuchiya, et al.. "Development of a Greenhouse Side-ventilation Controller driven by Photovoltaic Energy." Biosystems Engineering pp. 633-641, 2007.
- [9] Rohouma, W. M., I. M. Molokhia, et al. "Comparative study of different PV modules configuration reliability." Desalination pp.122-128, 2007.
- [10] SMA "PV-System Technology", 2005.
- [11] Yano, A., A. Furue, et al. "Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north-south oriented greenhouse." Biosystems Engineering pp. 228-238, 2009.
- [12] Chang, T. P. "Output energy of a photovoltaic module mounted on a single-axis tracking system." Applied Energy pp.2071-2078, 2009.
- [13] Eicker, U. Solar Technologies for Buildings. Chichester, John Wiley & Sons Ltd. pp. 23-26, 2003.

- [14] De Soto, W., S. A. Klein, et al. "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance." *Solar Energy* pp. 78-88, 2006.
- [15] 신승호, "독립형 PV 시스템용 다중제어 DC-DC 컨버터", 조선대학교 전기공학과 석사학위논문, pp 20-23, 2011.
- [16] T. Eswam and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007.
- [17] Victorio Arcidiacono, Sando Corsi, Luciano Lambri, "Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power Plants", *IEEE*. pp. 507-512, 1982.
- [18] 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.
- [19] Kazuyoshi Tsukamoto, "Photovoltaic Power System Interconnected with Utility", *Proceedings of the American Power Conference*, pp. 276-281, 1997.
- [20] Masato Hoshino, Gunji Kimura, Mitsuo Shioya, "DC-DC Converter

and Inverter for Photovoltaic Modules”, IECON. pp. 569–574, 1988.

- [21] 이강연, “전력저장장치를 적용한 주택용 태양광발전시스템에 관한 연구” 조선대학교 전기공학과 박사학위논문, pp. 20–25. 2004.12
  
- [22] Kotsopoulos, 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 Power Electronics Specialists Conference - Volume 3 , pp. 1506–1511 , 2002.
  
- [23] Gwonjong Yu, Jinsoo Song, “Development of Power Converter for Photovoltaic System”, Japan-Korea Joint Seminar on TECHNICAL DIGEST PHOTOVOLTAICS, pp. 247–254, 1995.
  
- [24] Fang Luo and Pengwei Xu and Yong Kang and Shangxu Duan, “A Variable Step Maximum Power Point Tracking Method Using Differential Equation Solution”, 2007 Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 2261, 2007.

## 감사의 글

신묘년 한해를 마무리 하고, 토끼들이 뛰놀 듯이 학교에서 즐겁게 보낸 시간도 어느덧 3년이란 시간이 흘러, 함께 해온 선·후배와 교수님을 떠올리며 감사의 글을 적습니다.

학·석사 연계라는 과정으로 학부 4학년때부터 실험실에 들어와 모든 것이 낯설고, 새로웠지만 세심한 지도와 가르침을 주시고 또한 학문적 용기를 주신 조금배 교수님께 진심으로 감사드립니다. 논문을 완성하기까지 아버지 같은 조언과 따뜻한 격려를 주신 백형래 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다. 또한 격려와 조언을 주신 조선대학교 전기공학과 이우선 교수님, 최효상 교수님, 김용재 교수님, 김남훈 교수님 은혜에 감사드립니다.

항상 힘과 용기를 주신 태양광 발전실험실의 최연욱, 이강연, 정병호, 박정민, 문은아, 서강성, 선배임들에게 깊이 감사드리며, 실험실에서 함께한 박정국, 김보현, 김대승, 신승호, 선배님들 장인혁, 임지혜, 이권, 늦게 들어온 막내 김기현, 전범준까지 고맙고 감사합니다. 그리고 함께 의지하며, 어려움을 같이한 동기 경훈이형, 규명이형, 국도형, 수근이형에게도 감사드립니다.

10년이 넘게 함께 우정을 쌓아온 김진현, 정승균, 이승환, 전성중, 이동남, 박혜민, 그리고 사랑하는 숙이와 옆에서 힘을 준 친구들에게 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 온갖 정성과 사랑으로 아낌없이 격려를 주신 아버지 어머니께 진심으로 사랑하고 고개 숙여 감사를 드리며, 누나, 매형에게도 감사합니다. 저를 사랑하고 제가 사랑하는 모든 분께 행운이 가득하길 기원하며, 앞으로도 노력하고 부모님께 효도하는 아들이 되도록 노력하겠습니다.

2011년 12월

백 승 학