

# PV 시스템의 최대출력점 추정을 위한 알고리즘 개발

(Development of Algorithm for Maximum Power Point Tracking of PV system)

박기태\* · 고재섭 · 최정식 · 박병상 · 정동화

(Ki-Tae Park · Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Byung-Sang Park · Dong-Hwa Chung)

## Abstract

This paper is proposed a novel method to approximate the maximum power for a photovoltaic inverter system and tracking method. It is designed for power systems application and utilities.

The proposed Maximum Power Point Tracking(MPPT) control has the advantage to provide a new simple way to approximate the optimal or rated voltage, the optimal or rated current and maximum power rating produced by a solar panel and the photovoltaic inverter. And this straightforward method will be named linear reoriented coordinates method(LRCM) with the advantage that  $P_{max}$  and  $V_{op}$  can be approximated using the same variable as the dynamic model without using complicate approximations or Taylor series. Furthermore tracking method is improved over 50% photovoltaic efficiency.

This paper is proposed MPPT using LRMC and tracking method using weather condition of domestic moderate program technique. This paper is proposed the experimental results to verify the effectiveness of the new methods.

## 1. 서론

태양은 시간 및 위치에 따라 변하기 때문에 태양의 일조 시간은 여름철에 가장 길고 겨울철에 가장 짧다. 따라서 계절에 상관없이 태양광 출력량을 증가시키기 위하여 고정식 보다 추적식에 대한 연구가 필요하다.

PV 어레이의 최대전압은 일사량과 태양전지 표면온도에 따라 시시각각으로 변한다. 또한 부하상태도 변하기 때문에 태양전지의 특성이 변하지 않지만 동작점은 변하게 되어 최대출력을 얻을 수 있는 부하에서 동작을 할 수 없다. 따라서 태양전지를 효율적으로 동작시키기 위하여 PV 어레이 출력을 항상 최대로 동작시킬 필요가 있다. 태양광의 손실 최소화와 PV 어레이로부터 최대 전력을 얻을 수 있도록 제어가 가능한 MPPT(Maximum Power Point Tracking)에 관한 연구가 다양하게 이루어지고 있다.[1]-[4]

MPPT 제어를 위한 종래의 방식은 CV(Constant Voltage) 방식, PO(Perturbation and Observation) 방식 및 IC(Incremental Conduction) 방식이 있다.[5] 낮은 일사량에서는 PO 및 IC 방식은 CV 방식 보다 효율이 높지 않다. 특정의 낮은 일사량에서 CV 방식을 사용해야 한다. PV 어레이의 상호작용, 제어기 및 인버터 등을 표현해야 하는 동적 모델은 다양한 파라미터에 의하

여 매우 복잡하다. 따라서 종래의 동적 모델은 인버터에 의해 발생하는 최적 전압과 최대 전력을 발생시킬 수 없다. 또한 이 모델은 직접적으로 전력 흐름 해석을 위한 실용성이 없다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 PV 어레이를 위한 dc 측 동적 방정식과 LRCM(Linear Reoriented Coordinates Method)을 사용하여 계통 연계를 위한 새로운 수학적인 동적 모델을 제시한다. LRCM은 근사적인 해법으로 반복적으로 나타나는 최적 전압과 최대 전력을 결정하며 계산 시간을 절약할 수 있는 장점을 가진다. 그리고 MPPT 제어와 동시에 국내의 기상조건에 적합한 프로그램 방식을 이용하여 태양광 추적식을 제시한다. 태양광 발전 시스템을 구성하고 실험결과 분석을 통하여 본 논문에서 제시한 방식의 타당성을 입증한다.

## 2. 태양광 발전의 추적식

### 2.1 태양광 발전 시스템의 구성

그림 1은 태양광 발전 시스템의 전체 구성도를 나타낸다.

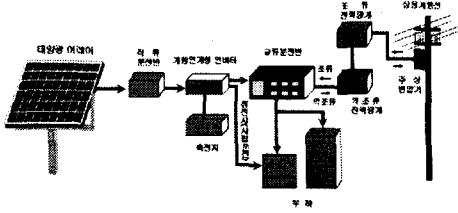


그림 1 계통연계형 태양광 발전 시스템의 전체 구성도  
 Fig. 1 Overall configuration of unit-interactive photovoltaic generation system

그림 1에서 반도체 PN 접합으로 구성된 태양전지에 태양광이 조사되면 광에너지에 의한 전자와 정공이 생겨난다. 전자와 정공이 이동하여 N층과 P층을 교차하여 전류가 흐르게 되는 광기전력 효과에 의해 기전력이 발생하여 외부로 전류가 흐르게 된다. 이 때 전력은 DC이므로 직류 분전반을 통해 인버터로 인가되어 일부는 축전지에 저장하고 일부는 AC로 변환하여 교류 분전반을 통해 부하에 공급된다. 남은 잉여전력은 역조류 전력량계를 통하여 상용 계통선을 통해 한전에 판매한다. 비 또는 눈이 오거나 날씨가 흐린 날에는 태양광 발전을 할 수 없으므로 한전의 상용 계통선을 이용하여 전력을 부하에 공급하게 된다. 태양광 발전 시스템과 한전은 계통연계형으로 상호 협조하며 원활하게 부하에 전력을 공급한다.

## 2.2 태양광 발전의 추적식

태양광 발전의 추적식은 고정식에 비해 효율을 50% 이상 높일 수 있다. 본 논문에서는 120°로 삼면을 나누어 고감도 광 센서를 장착하여 태양광의 빛의 세기를 수집하여 측정한다.

태양광 추적 시스템을 구현하기 위한 하드웨어 구성도는 그림 2에 나타낸다.

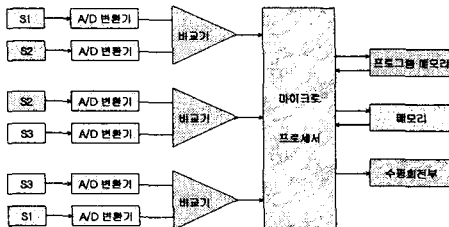


그림 2 태양광 추적식의 하드웨어 구성도  
 Fig. 2 Hardware block diagram of PV tracking scheme

본 논문에서 태양광 추적식의 하드웨어는 센서로부터 A/D 변환기와 각 센서의 디지털 값을 비교하기 위한 비교기로 구성한다. 마이크로프로세서는 비교기의 출력인

광량의 차이를 입력받아 태양광의 추적에 따른 제어신호를 출력한다. 기기의 초기상태의 정보, 제어의 순서 및 방법 등에 따른 정보를 저장하는 프로그램 메모리와 마이크로프로세서에 의해 제어되는 회전부로 구성한다.

## 3. 태양광 MPPT 제어

MPPT 제어는 일사량과 표면온도의 변화에 따라 가변 하는 태양전지의 최대 출력점을 추정한다. 일사량과 표면온도가 일정할 때 태양전지의 출력은 그림 3의 I-V 곡선을 따라 움직인다. 최대 출력을 발생시키는 동작점을 최대 출력점(MPP: Maximum Power Point)이며 이 동작점을 제어하기 위하여 MPPT가 필요하다. 따라서 최대 출력점을 추종하는 제어성능에 따라 동일한 용량의 태양전지로부터 얻을 수 있는 전력량이 다르다. 또한 인버터를 포함한 전체 시스템의 안정도에 영향을 미치게 된다.

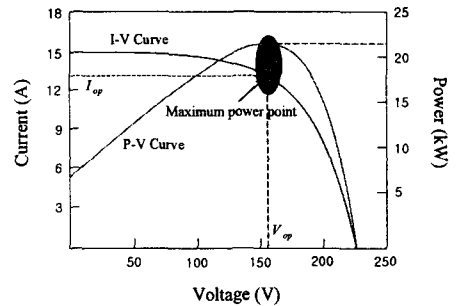


그림 3 태양광 셀의 최대출력 지점  
 Fig. 3 Maximum power point of solar cell

제안한 I-V 특성 모델 방정식은 태양 전지에 대한 빛의 효과적인 강도, I-V 곡선을 위한 특정 상수, 그림자 선형 요인 및 각 전지를 위한 단락회로 정격전류와 개방회로 전압을 고려한다.

$$I(V) = \alpha \times I_{\max} - \alpha \times I_{\max} \times \exp\left(\frac{V}{b \times (\gamma \times \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max}} - \frac{1}{b}\right) \quad (1)$$

여기서  $V$ 는 PV 인버터 시스템을 위한 동작 전압이며  $\alpha$ 는 태양 전지판에 입사되는 빛의 강도를 백분율로 나타낸다. 그리고  $b$ 는 지수함수의 I-V 특성 상수이며  $\gamma$ 는  $V_{\max}$ 에 따른 차광 선형 계수이다.

전압에 대한 전류의 동적 방정식을 얻기 위하여 식 (1)을 전압에 대하여 한번 미분하면 식 (2)와 같다.

$$\frac{dI(V)}{dV} = \frac{I(V) - \alpha I_{\max}}{b \times (\gamma \times \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max}} \quad (2)$$

식 (1)에 전압  $V$  를 곱하면 PV 인버터의 전체 출력인  $P-V$  특성 방정식을 얻는다.

$$P = V \times I(V) = \alpha \times V \times I_{\max} - \alpha \times V \times I_{\max} \times \exp\left(\frac{V}{b \times (\gamma \times \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max}} - \frac{1}{b}\right) \quad (3)$$

여기서  $I(V)$ 는 PV 인버터의 전체 출력 전류를 나타낸다. 식 (3)을 전압으로 미분하면 다음 식과 같다.

$$\frac{dP}{dV} = i + \frac{P \times (1 - \alpha \times I_{\max} / i)}{b \times (\gamma \times \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max}} \quad (4)$$

태양 전지에 대한 효과적인 100% 빛의 강도를 위하여 태양 전지 어레이에서  $I(0)$ 는 단락회로의 정격전류이고  $V_{\max}$ 는 개방회로의 정격 전압을 나타낸다.  $I_{\max}$ 는 그림 4의 실험적인  $I-V$  특성곡선을 이용하여  $V=0$ 일 경우 식 (1)을 풀면 얻을 수 있다.

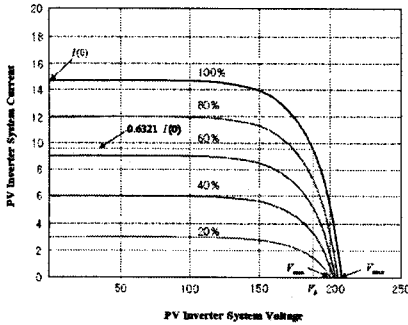


그림 4 실험에 의한  $I-V$  특성  
Fig. 4 Experimental  $I-V$  Characteristics

다음 식은  $I_{\max}$ 와 태양 전지에 대한 단락전류 사이의 관계를 나타낸다.

$$I_{\max} = \frac{I(0)}{\alpha - \alpha \times \exp\left(\frac{-1}{b}\right)} \quad (5)$$

그림 4의  $I-V$  특성곡선은  $\alpha$ ,  $b$ ,  $\gamma$ ,  $V_{\min}$  및  $V_{\max}$ 를 계산하는데 사용한다. 특성상수  $b$ 는 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$b = 1 - V_b / ((\gamma \times \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max}) \quad (6)$$

여기서  $V_b$ 는 그림 4의 특성곡선을 사용하여 전류가  $0.6321I(0)$ 일 때 근사화 된다.

$\gamma$ 는 식 (7)과 같이 빛의 최대 강도에서 최소 강도까지의 전압( $V_{\max}$ ) 손실률로 정의한다.  $V_{\min}$ 은 태양 전지에 20 이하의 빛의 강도가 입사될 때를 위한 태양 전지 어레이의 개방회로에 대한 정격전압이다.

$$\gamma = 1 - V_{\min} / V_{\max} \quad (7)$$

그림 4에서 특정 빛의 강도에 대한 최대 전력량을 예측할 수 있으며 이 값은 MPPT라고 한다. MPPT는 식 (3)을 미분하여 영으로 놓고 풀면 최적 전압( $V_{op}$ )을 얻을 수 있는 조건을 구할 수 있다.

$$\alpha \times I_{\max} + \exp\left(\frac{V_{op}}{b \times (\gamma \times \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max}} - \frac{1}{b}\right) \times \left(-\alpha \times i_{\max} - \frac{\alpha \times V_{op} \times I_{\max}}{b \times (\gamma \times \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max}}\right) = 0 \quad (8)$$

그러나 식 (8)의 해를 찾는 것은 불가능하며 유일한 해법은 수치적인 방식이다. 그러나 이 방식은 시행착오 반복법이 요구되며 실용적인 해법은 아니다.

본 논문에서는 식 (8)을 풀기 위해 LRCM(Linear Reoriented Coordinates Method)의 새로운 방식은 제시하여 MPPT에 의해 계산된  $P_{\max}$ 의 근사 해를 찾는다.

LRCM의 주요 관점은 그림 7에서  $I-V$  곡선의 접점을 찾는다.  $I-V$  곡선의 접점은  $P_{\max}$ 를 발생하는 최적 전류( $I_{op}$ )와 최적 전압( $V_{op}$ )이다. 그림 5에서  $I-V$  곡선을 이용하여 선형 전류 방정식은 초기치와 최종치로부터 결정된다.

$$IL(V) = \alpha \times I(0) \times (I - V / V_{\max}) \quad (9)$$

접점에서  $I-V$  곡선의 기울기는 선형 전류 방정식의 기울기에 근사하게 된다.

$$\frac{dI}{dV} \cong \frac{dIL}{dV} \quad (10)$$

이 근사화에 의해  $V_{op}$ 와  $I_{op}$ 는 서로 근접한다.

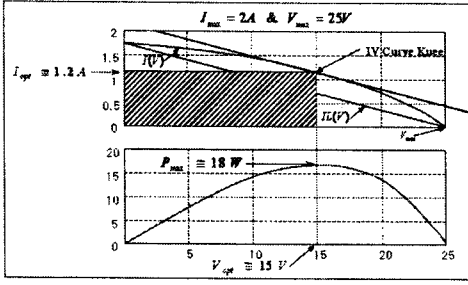


그림 5 LRCM에 의한 P-V와 I-V 곡선  
Fig. 5 P-V and I-V Curves with LRCM

전류방정식 (1)과 선형 전류 방정식 (9)는 다음 식과 같이 한번 미분한다.

$$\frac{dI}{dV} = \left( \frac{\alpha \times I_{\max}}{b \times (\gamma \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max}} \right) \times \exp\left( \frac{V}{b \times (\gamma \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max}} - \frac{1}{b} \right) \quad (11)$$

$$\frac{dL}{dV} = \frac{-\alpha \times I(0)}{V_{\max}} \quad (12)$$

V를 얻기 위하여 위 두 식을 같게 놓고  $V_{op}$ 의 해를 구한다.

$$V_{op} = b \times (\gamma \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max} \times \left( \frac{1}{b} + \ln\left( \frac{(\gamma \alpha + 1 - \gamma) \times b \times I(0)}{\alpha \times I_{\max}} \right) \right) \quad (13)$$

식 (5)을 식 (13)에 대입하여 간략화 한  $V_{op}$ 는 다음 식과 같다.

$$V_{op} = (\gamma \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max} + b \times (\gamma \alpha + 1 - \gamma) \times V_{\max} \times \ln\left[ b \times (\gamma \alpha + 1 - \gamma) \times \left( 1 - \exp\left( \frac{-1}{b} \right) \right) \right] \quad (14)$$

식 (14)를 식 (1)에 대입하여  $I_{op}$ 를 구한다.

$$I_{op} = \alpha \times I_{\max} \times \left[ 1 - b \times (\gamma \alpha + 1 - \gamma) \times \left( 1 - \exp\left( \frac{-1}{b} \right) \right) \right] \quad (15)$$

근사  $P_{\max}$ 는 식 (14)와 식 (15)를 곱하여 구한다.

$$P_{\max} = V_{op} \times I_{op} \equiv V_{op} \times I_{ap} \quad (16)$$

마지막으로 식 (8)에서  $V_{op}$ 를 풀면  $P_{\max}$ ,  $I_{op}$ 와  $V_{op}$ 의 정확한 값을 구할 수 있다.  $P_{\max}$ 의 근사 범위에 들기 위

한 가장 좋은 방식은 그림 5를 이용하여 기하학적 해석과 다양한 상수에 대한 물리적 조건을 정의하여 얻는다. 예를 들면, 식 (22)에서 변수  $b=0$ 는 무 손실이 아닌 이상적인 태양 전지 에레이를 나타낸다.

$$P \in A \text{ where } A \text{ is } \{P \in \mathbb{R} \ 0 \leq P \leq P_{\max}\} \quad (17)$$

$$V \in B \text{ where } B \text{ is } \{V \in \mathbb{R} \ 0 \leq V \leq V_{\max}\} \quad (18)$$

$$I \in C \text{ where } C \text{ is } \{I \in \mathbb{R} \ 0 \leq I \leq I(0)\} \quad (19)$$

$$\alpha \in D \text{ where } D \text{ is } \{\alpha \in \mathbb{R} \ 0 < \alpha\} \quad (20)$$

$$b \in E \text{ where } E \text{ is } \{b \in \mathbb{R} \ 0 < b < 1\} \quad (21)$$

$$P_{\max} = I(0) \times V_{\max} \text{ if and only if } b = 0 \quad (22)$$

기하학적 해석에 의해서  $P_{\max}$ 에 대하여 다음 식과 같은 두 개의 부등식을 얻을 수 있다.

$$\int_0^{V_{\max}} I(s) ds > I(V_{op}) \times V_{op} = P_{\max} \quad (23)$$

$$P_{\max} \geq I_{op} \times V_{op} > 0.315 \times I(0) \times V_{\max} \quad (24)$$

여기서  $P_{\max}$ 는 식(1)에 의해 얻어진 곡선의 내부에 최대 직사각형 영역에 위치한다. 일반적으로  $P_{\max}$ 는 식 (23)과 같이 전체 전류 곡선 면적보다 작다. P-V 특성곡선은 유일한 최대 전력점을 가지는  $P_{\max}$ 는 근사화  $P_{\max}$ 와 같거나 그 이상이다.

마지막으로 LRCM은 최적 전압과 최적 전력을 계산하는 대신에  $V_{op}$ 와  $I_{op}$ 를 얻기 위하여 전류 방정식과 선형 전류 방정식을 이용하여 해를 얻는다. 그런 다음  $P_{\max}$ 는 추정한다. 또한 LRCM은  $V_{op}$ 와 근사 해를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. LRCM은 테일러 급수, 연속 분수 전개 및 타 근사법을 사용하지 않은 구 모델과 같은 결과를 도출 할 수 있다. 그림 6은 MPPT를 수행하기 위한 제어 시스템을 나타낸다.

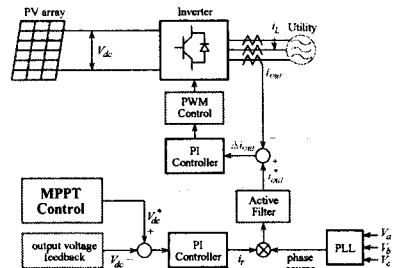


그림 6 MPPT를 위한 제어 시스템  
Fig. 6 Control system for MPPT

#### 4. 시스템의 성능결과

그림 7과 8은 고정식 및 추적식의 시간대별 인버터의 출력 전압과 전류의 응답특성을 비교한 결과이다. 추적식의 응답특성이 고정식에 비해 전압과 전류가 높게 나타나고 있다. 일사량이 많은 낮 시간 동안에는 응답특성이 거의 비슷하지만 일사량이 적은 오전과 오후 시간대에는 추적식의 응답특성이 매우 우수하게 나타났다.

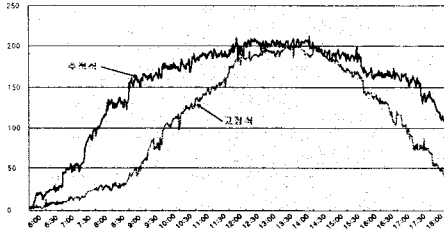


그림 7 인버터 출력단의 전압 응답특성 비교  
Fig. 7 Comparison of voltage response characteristics about inverter output terminal

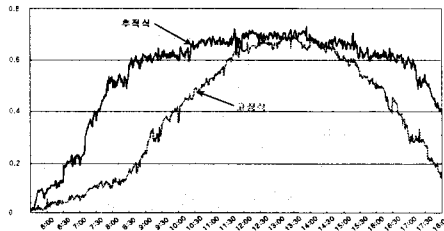


그림 8 인버터 출력단의 전류 응답특성 비교  
Fig. 8 Comparison of current response characteristics about inverter output terminal

그림 9와 10은 고정식과 추적식의 시간대별 인버터 출력단의 전력과 효율을 비교하여 나타내었다. 전체적인 전력 및 효율은 추적식은 고정식에 비해 높게 나타났다. 특히 일사량이 적은 오전시간과 오후시간에 추적식은 최대 50% 이상의 에너지 절감 효과가 얻을 수 있었다.

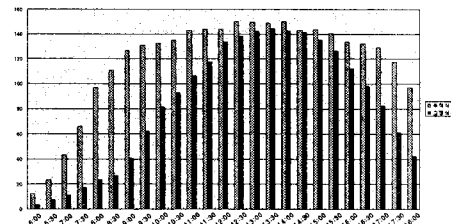


그림 9 인버터 출력단의 평균 전력 비교  
Fig. 9 Comparison of average power about inverter output terminal

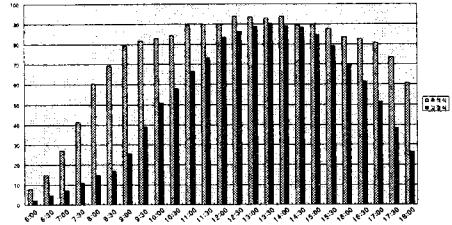


그림 10 태양광 발전의 효율 비교  
Fig. 10 Comparison of efficiency about photovoltaic generation

그림 11에서 그림 14는 일사량을 일정하게 두고 각각의 MPPT 알고리즘에 따라 변화되는 전류를 나타낸다. 각각의 그림에서 위쪽의 파형은 전압을 나타내고 아래쪽의 파형은 전류의 파형을 나타낸다. 결과 파형의 전압간격은 100[V/div], 전류의 간격은 0.5[A/div]로 설정하였다. 그림 11은 종래의 CV MPPT 방식의 응답특성이고, 그림 12는 IC MPPT 방식, 그림 13은 PO MPPT 방식 및 그림 14는 본 논문에서 제시한 LRCM MPPT 방식의 응답특성을 나타내었다. 본 논문에서 제시한 MPPT 방식의 응답특성이 종래의 방식에 비해 미소하게 전류값이 증가하였다. 전류는 미소하게 증가하였지만 태양광 발전의 시간 및 누적 발전량을 고려할 때 그 양은 매우 크게 나타났다. 따라서 본 논문에서 제시한 방식은 종래의 타 방식과 비교하여 우수한 성능을 얻을 수 있었다.

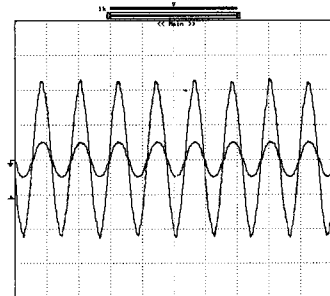


그림 11 CV MPPT의 응답특성  
Fig. 11 Response characteristic of CV MPPT

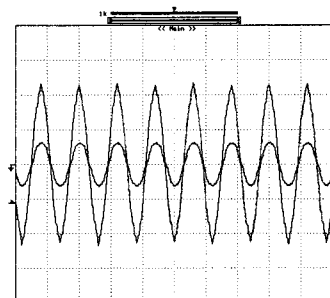


그림 12 IC MPPT의 응답특성  
Fig. 12 Response Characteristic of IC MPPT

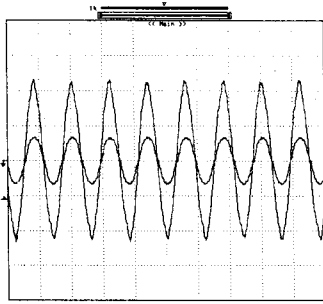


그림 13 PO MPPT의 응답특성  
Fig. 13 Response Characteristic of PO MPPT

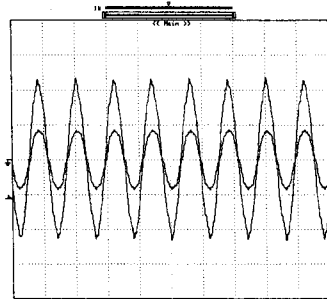


그림 14 제시한 MPPT의 응답특성  
Fig. 14 Response characteristic of proposed MPPT

그림 15는 MPPT 방식에 따른 누적 전력량을 나타낸다. 1달 동안 전력량을 비교했을 경우에는 본 논문에서 제시한 MPPT 방식의 전력이 매우 높게 나타났다. 따라서 본 논문에서 제시한 MPPT 방식의 타당성을 입증할 수 있었다.

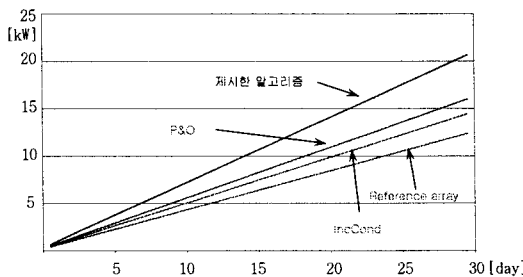


그림 15 MPPT 제어 방식에 따른 누적 전력량의 비교  
Fig. 15 The comparison of accumulated power with MPPT control

## 5. 결론

본 논문에서는 태양광 발전시스템의 MPPT 제어를 위하여 근사적인 해법인 LRCM과 국내의 기상조건에 적합한 프로그램 방식을 이용한 태양광 추적식을 제시하였다. LRCM은 근사적인 해법으로 계산 시간을 절

약할 수 있는 장점을 가진다. 또한 태양광 추적식은 고정식에 비하여 에너지 절감 효과를 얻을 수 있었다.

종래의 방식에 의한 MPPT 제어는 PV 어레이의 상호작용, 제어기 및 인버터 등을 표현해야 하는 동적 모델은 다양한 파라미터에 의하여 매우 복잡하고 종래의 동적 모델은 인버터에 의해 발생하는 최적 전압과 최대 전력을 발생시킬 수 없다. 또한 이 모델은 직접적으로 전력 흐름 해석을 위한 실용성이 없는 문제점을 가지고 있었다. 그러나 LRCM은 근사적인 해법으로 반복적으로 나타나는 최적 전압과 최대 전력을 결정하며 계산 시간을 절약할 수 있는 장점을 가진다. 태양광 추적식은 국내의 기상조건을 고려하여 태양광 발전의 효율을 상승 시켰다.

LRCM을 이용한 MPPT제어는 종래의 방식에 비하여 전류가 상승하였으며 이러한 전류 상승은 발전시간, 누적발전량 등을 고려하였을 때 매우 우수한 제어 성능을 나타내었다. 태양광 추적식은 고정식에 비하여 일사량이 적은 오전이나 오후 시간대에 최대 50% 이상의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제시한 LRCM을 이용한 MPPT제어의 응답특성이 양호하게 나타났으며, 태양광 추적식도 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시한 LRCM과 태양광 추적식의 타당성을 입증할 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] C. Hua, J. Lin and C. Shen, "Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking," IEEE Trans. on IE, vol. 45, pp. 99-107, 1998.
- [2] E. Koutroulis, K. Kalaizakis and N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system," IEEE Trans. on PE, vol. 16, pp. 46-54, 2001.
- [3] M. Matsui, T. Kiano, D. H. Xu and Z. Q. Yang, "New MPPT control scheme utilizing power balance at dc link instead of array power detection," in Proc. IPEC-Tokyo'00, vol. 1, pp. 164-169, 2000.
- [4] T. Noguchi, S. Togashi and R. Nakamoto, "Short-current pulse based adaptive maximum power point tracking for photovoltaic power generation system," Proc. IEEE, vol. 1, pp. 157-167, 2000.
- [5] G. J. Yu, et al., "A study on the MPPT control algorithm and efficiency evaluation method," KJPE Trans., vol. 6, no. 2, pp. 164-172, 2001.