

태양광 발전 시스템을 위한 새로운 최대 출력점 추종 제어 알고리즘

論 文

51B-3-5

A Novel Maximum Power Point Tracking Control Algorithm for Photovoltaic System

金 兌 燁* · 李 允 揆** · 安 鎬 均*** · 朴 勝 圭***

(Tae-yeop Kim · Youn-Kyu Lee · Ho-Gyun Ahn · Seung-Kyu Park)

Abstract - Most maximum power point tracking(MPPT) control algorithm is based on Perturb and Observe(P&O) and Incremental Conductance(IncCond). In comparison with P&O and IncCond algorithm, the dynamic and tracking characteristic of IncCond algorithm is better than P&O algorithm in condition of rapidly changing solar radiation. But in the case of digital implementation, the IncCond algorithm has error on decision of maximum power operation point(MPOP). To solve this problem, this paper proposes a improved IncCond algorithm, which can determine the MPOP correctly by inserting the test signal in control input. This paper proposes a novel MPPT control algorithm for the digitally implemented photovoltaic system in condition of rapidly changing solar radiation. To verify the validity of the proposed control algorithm, the computer simulation and experiment are carried out.

Key Words : Maximum power point tracking, Photovoltaic system, Perturb and Observe, Incremental Conductance

1. 서 론

경제성장과 산업·사회생활의 고도화에 따라 증대하는 에너지 수요와 화석 에너지 보유량의 감소, 지구환경문제 등으로 인해 태양광, 태양열, 풍력, 연료전지, 소수력 등과 같은 대체 에너지의 개발 및 보급이 에너지 자원 확보와 환경문제 등을 고려한 세계 각국의 경쟁적 투자에 힘입어 활기를 띠고 있다.

이러한 대체 에너지 중의 하나인 태양광 발전은 높은 설치 비용으로 기존 발전시설에 비해 높은 발전단가와 낮은 효율이라는 단점이 있지만 무공해라는 높은 환경적 가치에 따라 경제적, 사회적 경쟁력이 재평가[1]되고 있어 그 보급이 선진국을 위주로 급격히 증가하고 있는 추세이다.

태양전지의 출력은 일사량, 태양전지의 표면온도 등에 의해서 출력이 변한다[2]. 그리고 태양전지의 동작 전압 및 전류의 상태에 따라 I-V특성 곡선이 비선형적으로 변화하는 비선형 특성을 가지고 있으며, I-V 특성곡선 상의 전압 및 전류 동작점에 따라 태양전지의 출력이 결정되어 진다. 즉 동일한 용량, 일사량 및 표면온도에서도 태양전지의 출력 전압 및 전류의 동작점에 따라 출력의 차이가 발생한다. 이러한 태양전지가 최대출력을 발생시킬 때의 동작점을 최대 출력동작점(Maximum Power Operating Point : MPOP)이라고 하

며, 태양전지의 동작점이 최대 출력점(MPOP)에 있도록 제어하기 위해 최대 출력점 추종제어(Maximum Power Point Tracking : MPPT)가 필요하다. 즉 최대 출력점 추종 제어기의 성능에 따라 같은 용량의 태양전지로부터 얻을 수 있는 전력량이 달라지게 되며 전체 시스템의 안정도 및 속응성이 영향을 받게 된다.

대부분의 최대 출력점 추종(MPPT) 제어 알고리즘은 전력비교법(Perturb and Observe : P&O) 과 증분 컨덕턴스법(Incremental Conductance : IncCond)에 기반을 두고 있다. 전력비교법(P&O)은 일사량 증가에 대해 제어점이 최대 출력점으로부터 멀어질 수 있으며, 속응성이 느리고, 최대 출력점 부근에서 출력이 진동하는 단점이 있다[3]. 증분컨덕턴스(IncCond)은 일사량 변화에 따른 추종성능이 우수하나, 디지털 방식으로 구현했을 경우 컨덕턴스의 변화량에 일사량 변화가 영향을 미치게 되어 최대 출력점 추종에 실패할 수 있어 이의 개선이 필요하다.

본 연구에서는 기존 최대 출력점 추종(MPPT)제어기의 문제점을 파악하고, 가변이득(Adaptive Gain)을 도입하여 시스템의 속응성 및 안정성을 향상시키고, 제어 입력에 테스트 신호를 주입하여 급격한 일사량 변화에도 정확히 최대 출력점(MPOP)을 추종할 수 있는 새로운 최대 출력점 추종 제어 알고리즘을 제시하였고 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

2. 태양전지의 출력

본 연구에서 사용된 직렬 병렬 저항을 고려한 태양전지의 특성방정식은 식(1)로 나타내어진다[4][5].

* 正 會 員 : STX 技術研究所 研究員 · 工博

** 準 會 員 : 昌原大 電氣工學科 碩士課程

*** 正 會 員 : 昌原大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 8月 22日

最終完了 : 2002年 1月 4日

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

태양전지의 특성 및 최대 출력점을 설명하기 위해 태양전지의 I-V 및 P-V 특성곡선을 그림 1에 나타내었다[6]. I-V 특성곡선은 일사량과 온도변화에 대해 일사량이 증가하면 출력전류가 증가하여 ①선에서 ②선으로 변화하며, 온도가 증가하면 출력전압이 감소하여 ①선에서 ③선으로 변화하게 된다.

즉, 일사량 및 온도의 변화에 의해 태양전지의 특성곡선이 변하게 되며 이에 따라 최대 출력점도 계속 변하게 된다. 따라서 최대 출력점 추종제어의 목적은 이러한 외부 조건에 영향을 받지 않고 태양전지의 동작점을 항상 최대 출력점에 위치시키는 것이다.

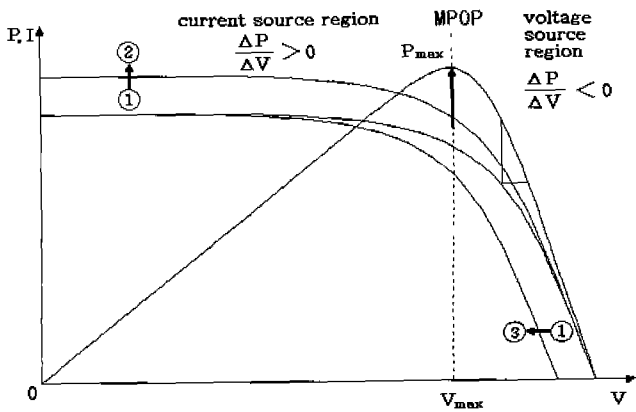


그림 1 태양전지의 특성곡선
Fig. 1 Characteristic curve of solar cell

태양전지의 출력특성은 전압 변동에 따른 출력의 변화율이 영이 되는 최대 출력점 전압(V_{max})을 기준으로 전류원 영역(current source region), 최대출력점, 전압원 영역(voltage source region)으로 나뉘며, 식(2)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} &> 0 && \text{current source region} \\ \frac{\Delta P}{\Delta V} &= 0 && \text{maximum power point} \\ &< 0 && \text{voltage source region} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 최대 출력점 추종제어의 목적은 식(2)의 변화율을 영으로 만드는 것이다.

3. 최대 출력점 추종 제어

태양전지의 온도변화 및 일사량에 따라 최대 출력점 전압이 결정되므로 온도 및 일사량을 측정 한 후 최대 출력점 전압을 결정하여 제어하는 방법이 있으나, 태양전지의 노후화,

부분적인 그림자, 급격한 일사량 변화 등에 대해 각각의 상황을 모두 만족할 수 없으므로 출력전압 및 전류를 제한하여 사용하는 것이 일반적이다.

최대 출력점 추종 제어기는 속응성과 안정성이 요구되며, 일사량 및 온도변화에 따른 태양전지 출력특성의 변화와 무관하게 최대 출력점을 추종해야 한다.

대부분의 최대 출력점 추종 제어기는 전력비교법(P&O)과 증분컨덕턴스(IncCond)에 기반을 두고 있다.

3.1 전력비교법(Perturb & Observe : P&O)

전력비교법(P&O)[7][8]은 알고리즘이 간단하고, 디지털방식으로 구현이 용이하며, 태양전지의 파라미터가 필요 없다. 또한 전지의 노후화에 따른 특성변화에 무관하게 동작하는 장점을 가지고 있어 태양전지의 최대 출력점 제어 알고리즘 중 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 수렴속도가 느려 급격한 일사량 변화에 의해 최대 출력점이 변동되는 경우 추종 성능이 떨어지며, 심지어 추종에 실패할 수도 있다. 뿐만 아니라 최대 출력점에 도달하더라도 최대 출력점 부근에서 계속적으로 진동하게 되어 효율이 감소하게 된다[3].

3.2 증분컨덕턴스(Incremental conductance: IncCond)

전력비교법의 단점을 보완하기 위한 방법으로 태양전지의 컨덕턴스 및 컨덕턴스의 미분을 이용하여 최대 출력점을 판별하는 증분컨덕턴스(IncCond)이 있다[3].

최대 출력점에서 전력을 전압으로 미분하면 식(3)으로 나타내어진다.

$$dP/dV = d(IV)/dV = I + VdI/dV = 0 \quad (3)$$

식(2)와 마찬가지로 식(3)을 전류원영역, 최대 출력점 및 전압원영역으로 나누면 식(4)로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dV} &> -\frac{I}{V} && \text{Current source region} \\ \frac{dI}{dV} &= -\frac{I}{V} && \text{Maximum power point} \\ \frac{dI}{dV} &< -\frac{I}{V} && \text{Voltage source region} \end{aligned} \quad (4)$$

증분컨덕턴스는 식(4)를 이용하여 태양전지의 최대 출력점을 판별한다. 식(4)에 의한 증분컨덕턴스의 알고리즘 흐름도는 그림 2로 표현할 수 있다[3][9].

현재 전류, 전압값을 측정하고 이전 제어주기의 전류(I_b), 전압값(V_b)과 비교하여 dI , dV 값을 계산하고, dI/dV 와 $-I/V$ 를 비교하게 된다. 그리고 비교 결과에 의해 기준전압값(V_r)을 최대 출력점으로 향하도록 조절하게 된다. 최대 출력점에서는 $dI/dV = -I/V$ 가 되어 제어동작이 필요없고 선행된 값을 그대로 저장하게 된다. 실제로 $dI/dV = -I/V$ 이 되는

를 찾는 것이 매우 어려워 이러한 값이 일정오차 범위를 만족하는 것으로 근사화하여 사용하게 된다[10].

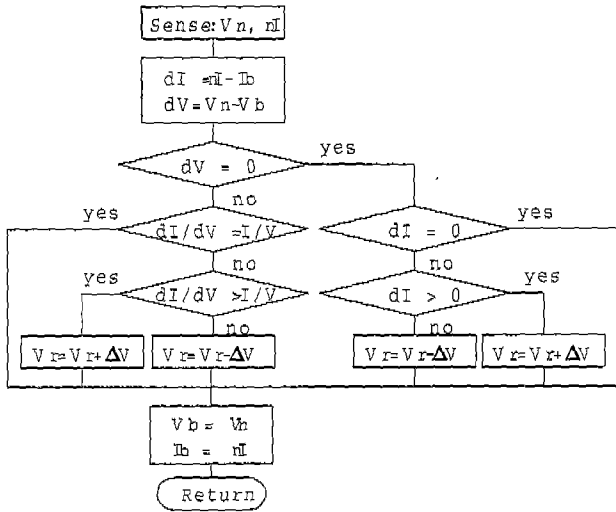


그림 2 증분컨덕턴스 알고리즘 흐름도
Fig. 2 Flow chart of the IncCond MPPT algorithm

4. 일사량 변화시 추종을 위한 새로운 알고리즘

전력비교법의 경우 일사량 증가에 대해 제어점이 최대 출력점으로부터 멀어질 가능성이 매우 크며, 순시적 추종 성능이 떨어진다[3]. 이에 비해 증분컨덕턴스의 경우 일사량 변화에 의한 순시 추종 성능이 우수한 것으로 연구되어 왔다. 하지만 증분컨덕턴스를 디지털방식으로 구현하는 경우 컨덕턴스의 변화량에 일사량 변화가 영향을 미치게 되어 최대 출력점 추종에 실패할 수 있다. 이는 일사량에 의한 전류 증가분이 동작영역 판별에 영향을 미치기 때문이다.

일사량 증가($I_{ph} \approx 2.0 \sim 2.1$)에 따른 최대 출력점 판단 오류 및 동작에 대한 전력의 특성곡선을 그림 3에 나타내었다.

전압 변화율이 음인 경우 전력 변화율도 음이 되어 크기가 커지게 되고, 전압 변화율이 양인 경우 전력 변화율은 음이 되어 크기가 줄어들게 된다. 하지만 전류의 변화율에 비하여 광전류의 증가율이 커지게 되는 경우 전력 변화율이 양이 되어 최대 출력 추종 제어가 전류원 영역으로 오인하게 되며, 동작점이 최대 출력점으로부터 멀어지게 된다.

일사량 변화에 따라 전력 변화율 측정에 오차를 가져오게 되며 이를 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \tag{5}$$

$$\frac{dP}{dV} \Big|_{k=} = \frac{I(k) + \Delta I_{ph}}{V(k)} + \frac{I(k) - I(k-1) + \Delta I_{ph}}{V(k) - V(k-1)}$$

여기서 $I(k)$ 와 $I(k-1)$ 은 일사량에 영향을 받지 않은 순수한 성분으로 가정한다.

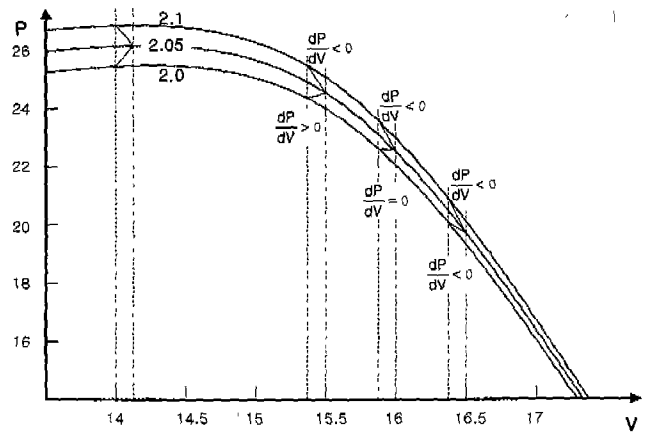


그림 3 일사량 변화에 따른 V-dP/dV 곡선
Fig. 3 V-dP/dV characteristics curve by irradiation change ($I_{ph} \approx 2.0 \sim 2.1$)

식(5)에서 일사량의 변화에 따른 광전류 성분을 분리하면 식(6)으로 나타낼 수 있다. 식(6(a))는 일사량에 영향을 받지 않은 순수한 성분이며 식(6(b))는 일사량 감소 및 증가에 따른 광전류 성분이다.

$$\frac{I(k)}{V(k)} + \frac{I(k) - I(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \tag{a}$$

$$\frac{dP}{dV} \Big|_{k=} = \frac{\Delta I_{ph}}{V(k)} + \frac{\Delta I_{ph}}{V(k) - V(k-1)} \tag{b}$$

식(6)에서 동작영역 판별에 영향을 주는 것은 광전류 성분이며, 이것에 의해 최대 출력점 추종 오차가 발생한다.

따라서 일사량 변동시 올바른 최대 출력점을 판단하기 위해 식(7)이 만족되어야 한다.

$$\left| \frac{I(k)}{V(k)} + \frac{I(k) - I(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \right| \tag{7}$$

$$\left| \frac{\Delta I_{ph}}{V(k)} + \frac{\Delta I_{ph}}{V(k) - V(k-1)} \right|$$

설명을 간략화하기 위해 동작영역 중 전압원 및 최대 출력점 영역에서 $V(k) \gg V(k) - V(k-1)$ 및 $I(k) \gg \Delta I_{ph}$ 이라는 조건을 만족함으로써 식(7)은 식(8)로 근사화할 수 있다.

$$|\Delta I| > |\Delta I_{ph}| \tag{8}$$

전류 변화량(ΔI)이 광전류 변화량(ΔI_{ph})보다 크다는 식(8)의 조건을 만족하는 경우 일사량 변화에 따른 최대 출력점 판단 오차는 줄어들게 된다. 하지만 전류 변동분을 크게 하기 위해서 출력전압의 변화를 크게 해야하고, 이러한 출력

변화는 시스템의 안정도를 저하시키게 된다. 또한 최대 출력 점 부근에서는 식(8)의 조건을 만족시키기가 더욱 어렵게 된다. 따라서 일사량의 증가·감소가 있는 경우 최대 출력점에서 동작하는 것이 불가능하며, 식(7)을 만족하는 영역내에서 최대 출력점이 진동하게 된다.

정확한 최대 출력점 검출을 위해서는 일사량 변화에 따른 광전류의 변화를 검출하고 이를 보상하면 된다. 하지만 광전류의 변화량을 검출하는 것은 매우 힘들며, 이를 직접적으로 보상하는 것은 불가능하다. 특히, 식(7) 및 식(8)을 통하여 일사량 변화가 컨덕턴스에는 많은 영향을 주지 않으나, 컨덕턴스 변화율(dG)에는 많은 영향을 주게 됨을 알 수 있고, 이러한 점이 최대 출력점 추종에서 외란 역할을 하게 된다.

따라서 일사량 변화에 따른 컨덕턴스의 변화율 측정오차를 줄이기 위한 방법을 제시하기 위하여 다음과 같은 가정을 도입한다.

■ 가정

1. $V(k) = V(k-2)$ 이다.
2. $I(k)$ 값을 기준으로 과거에 측정했던 전류($I^*(k-1)$, $I^*(k-2)$)와의 관계는 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I^*(k-1) &= I(k-1) - \Delta I_{ph} \\ I^*(k-2) &= I(k-2) - 2\Delta I_{ph} \end{aligned} \quad (9)$$

식(9)에서 $I^*(k-1)$ 과 $I^*(k-2)$ 는 측정된 전류값이며, $I(k-1)$ 과 $I(k-2)$ 는 일사량 변화에 의한 영향을 받지 않는 순수한 성분으로 가정한다.

3. 제어주기 (k-2)~(k)의 범위에서 일사량의 변화는 일정하다.

일사량 변화시 위의 가정을 만족하는 최대 출력점 검출상태에서의 컨덕턴스 변화율은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

그림 4에서 일사량 증가에 따른 3개의 I-V 특성곡선에서 2개의 컨덕턴스 변화량(dG)의 합은 식(10)으로 나타낼 수 있다.

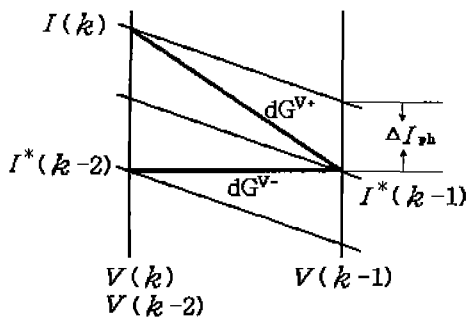


그림 4 일사량 변화에 따른 컨덕턴스 측정
Fig. 4 Measurement of conductance by irradiation change

$$\begin{aligned} & dG^{V+} + dG^{V-} \\ &= \frac{I(k) - I^*(k-1)}{V(k) - V(k-1)} + \frac{I^*(k-1) - I^*(k-2)}{V(k-1) - V(k-2)} \\ &= \frac{I(k) - I(k-1) + \Delta I_{ph}}{V(k) - V(k-1)} \\ &\quad + \frac{I(k-1) - I(k-2) + \Delta I_{ph}}{V(k-1) - V(k-2)} \\ &= \frac{I(k) - I(k-1) + \Delta I_{ph} - \{I(k-1) - I(k) + \Delta I_{ph}\}}{V(k) - V(k-1)} \\ &= \frac{2\{I(k) - I(k-1)\}}{V(k) - V(k-1)} \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)에서 가정 1에 의해 $V(k) = V(k-2)$ 이므로 $I(k) = I(k-2)$ 이다.

식(10)에 산술평균을 취하면 식(11)로 정리될 수 있다.

$$\frac{dG^{V+} + dG^{V-}}{2} = \frac{I(k) - I(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (11)$$

식(11)은 일사량 증가에 따른 전압에 대한 전력 변화율로 광전류 성분이 영향을 받지 않음을 보여주고 있다. 따라서 앞에서 제시한 가정을 만족하는 경우 식(11)과 같이 두 주기의 컨덕턴스의 평균값을 이용하여 일사량 변화에 영향을 받지 않는 컨덕턴스를 계산할 수 있으며, 정확한 최대 출력점을 판단할 수 있게 된다.

앞에서 제시한 가정은 증분컨덕턴스의 아날로그방식과 다음과 같은 유사점을 가지고 있다. 아날로그 방식의 경우 PWM의 온-오프 구간 내에서 컨덕턴스 및 컨덕턴스의 변화량을 측정(가정1, 가정2)함으로써 전압 및 전류 변동율이 비교적 크고(식(7)에서 식(8)로 전개되는 과정), 이를 적분하여 평균치(식(11))를 사용하며 검출시간이 짧아 일사량 변화량이 거의 일정하다(가정3)고 할 수 있다.

반면에 증분컨덕턴스를 디지털 방식으로 구현했을 경우 한 제어주기내의 PWM 온-오프 구간에서 컨덕턴스 변화량을 측정하기는 어려워 수~수십 샘플링 구간에서 측정하게 되며, AD 변환에 따른 양자화 오차 및 노이즈에 의한 오차도 발생할 수 있다. 이러한 컨덕턴스 변화량 측정 오차에 의해 일사량 변화시 최대 출력점 추종에 실패하는 문제점을 가지게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 제어 입력 신호 즉, 컨버터 입력 Duty에 일정 크기의 $\pm \Delta Duty$ 와 일정한 주파수를 가지는 테스트 신호를 중첩하여 인가함으로써 디지털 방식에서도 쉽게 위의 가정을 만족시킬 수 있으며, 일사량 변화시 최대 출력점 추종 성능을 향상시킬 수 있다. 하지만 위의 가정과 완전히 일치되지는 않으나, 대부분의 경우에서 식(8)을 만족하게 되어 최대 출력점 추종에 많은 영향을 주지 않는다.

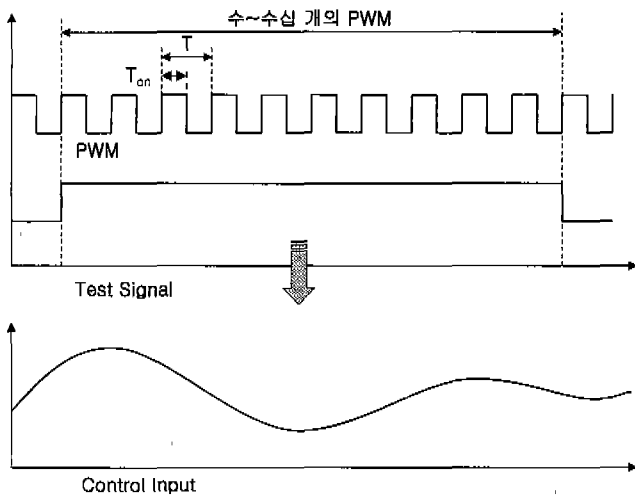


그림 5 제어입력과 테스트 신호의 중첩
Fig. 5 Superposition of Test signal with control input

제어입력인 컨버터 입력 Duty에 일정크기의 $\pm \Delta Duty$ 와 일정한 주파수와 크기를 가지는 테스트 신호를 중첩하여 인가함으로써 디지털 방식에서도 위의 가정을 쉽게 만족시킬 수 있어 일사량 변화에 대한 최대 출력점 추종성을 향상시킬 수 있다. 하지만 상위제어기인 MPPT 제어기 주기내에서 하위 전압제어기 입력이 변화함으로 위의 가정을 완전히 일치시킬 수는 없으나, 대부분의 경우 식(8)을 만족하게 된다. 그림 5는 수에서 수십개의 PWM 주기에 해당하는 테스트 신호를 제어입력인 PWM duty에 중첩하는 것을 나타낸 그림이다. 하지만, 이러한 테스트 신호의 크기와 주파수는 컨버터의 종류 및 출력필터의 특성에 따라 달라져야 하며, 입력 필터 및 AD 회로에서의 위상 지연에 주의해야한다.

5. 가변이득적용

태양전지의 최대 출력점 검출 후 컨버터의 제어입력을 변화시켜 최대 출력점으로 동작점을 이동하도록 기준입력을 결정하게 된다. 이러한 제어 동작은 Duty를 직접 변화시키거나, 기준입력에 출력이 수렴하도록 다른 제어기를 사용하는 방법이 있다. 하지만 두 방법 모두 큰 차이점을 가지고 있지않다. 즉, 최대 출력점을 향하도록 Duty 혹은 기준입력을 변화시키는 것은 동일하다.

입력의 동작점에서 최대 출력점까지 도달하는 시간은 제어입력을 얼마나 크게 변화시키는가에 달려 있다. 따라서 앞에서 설명한 두 가지 알고리즘에서 기준입력에 대한 입력 증분의 크기가 제어기의 속응성을 결정하게 된다.

중분권덕턴스의 장점은 현재 동작점이 최대 출력점으로부터 얼마나 멀리 떨어져있는가를 판단할 수 있다는 것이다.

그림 6은 $dP/dV-V$ 의 관계 곡선으로 현재 동작점에서 최대 출력점까지의 거리를 측정할 수 있는 중요한 자료로 사용될 수 있음을 보여주고 있다. 즉, 동작점이 최대 출력점으로부터 멀어질수록 dP/dV 가 증가함을 알 수 있다[3].

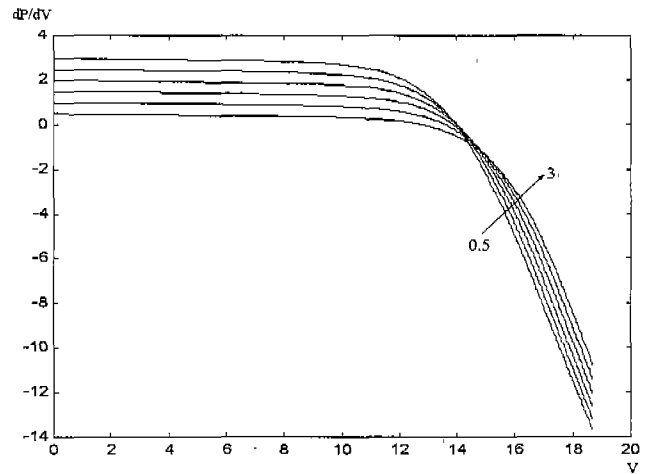


그림 6 태양전지의 $dP/dV-V$ 특성곡선
Fig. 6 $dP/dV-V$ characteristic curve of solar cell

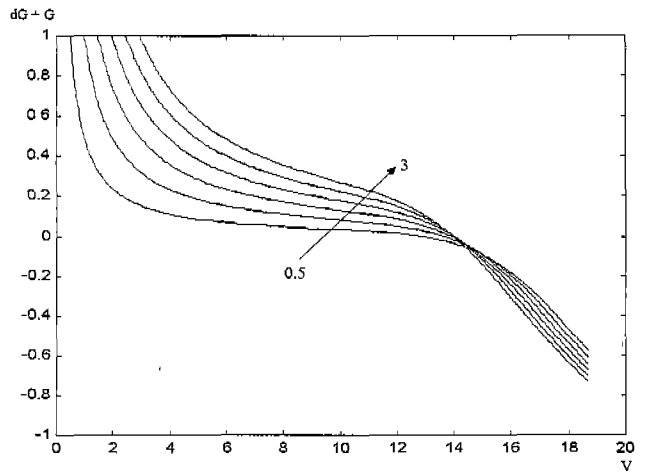


그림 7 태양전지의 $dG+G-V$ 특성곡선
Fig. 7 $dG+G-V$ characteristic curve of solar cell

하지만 그림 6의 $dP/dV-V$ 곡선은 전압원과 전류원 영역 간의 최대 출력점과 동작점의 오차에 대하여 비선형적 상관 관계를 가지고 있으며, 특히 전류원 영역에서는 동작점에서 최대 출력점까지의 거리를 측정하기 어려우며 일사량 변화에 민감한 특성을 보여주고 있다. 따라서 이러한 관계를 이용하기 위해서는 비선형 제어이득의 적용을 필요로 하게 된다.

그림 7은 $dG+G-V$ 의 관계곡선을 나타내고 있다. 그림 6에 비하여 전압원 영역 및 전류원 영역에서의 최대 출력점과 동작점의 오차에 대하여 선형적인 특성을 가지며 크기도 유사한 형태를 가지고 있다. 따라서 $dG+G-V$ 의 관계를 이용하면 비교적 쉽고 안정적으로 최대 출력점과 동작점의 거리를 판단할 수 있다.

이러한 점을 이용하여 최대 출력점에서 동작점이 먼 경우 기준입력의 변화분을 크게하고 가까운 경우 작게하는 입력을 선정할 수 있다. 하지만 최대 출력점에서 dP/dV 가 영이 되어 최대 출력점 검출에 어려움이 있으므로 최대 출력점 동작에서도 최소 전압 변화분(β)을 유지하여야 한다. 또한 완전히

dP/dV가 영이 되는 점을 검출하는 것은 매우 어려워서 동작점이 일정한 오차범위(E) 이내로 수렴할 때 최대 출력점에서 동작하는 것으로 가정하게 된다.

이러한 조건을 만족하는 전압변화분은 식 (12)로 나타낼 수 있으며, 이를 제어입력에 적용한다.

$$M = |\alpha(G + dG) + \beta| \tag{12}$$

식(12)에서 α 및 β 는 양의 상수이며, α 는 이득이고 β 는 최소 변화분이다.

6. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문에서 제시한 새로운 최대 출력점 추종제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 Matlab의 simulink를 이용하였으며 MPPT 제어기 및 전압 제어기는 S-function을 이용하여 디지털화하고, 컨버터 회로 및 필터로 구성된 아날로그부분은 선형으로 해석하여 시뮬레이션의 정확도를 향상시켰다. 실험으로 위하여 태양전지 모듈, 프로그램 및 데이터의 입출력을 위한 컴퓨터, 알고리즘 구현을 위한 프로세서로 TMS320C31, 가변저항 장치, DC-DC 컨버터(buck type), 센서 등으로 실험장치를 구성하였다.

표 1 사용한 태양전지의 사양
Table 1 Specification of used solar cell

구분명	GMG 01530
Rated Peak Power	53Wp
Open Circuit Voltage	21.7V
Short Circuit Current	3.35A
Max Operating Voltage	17.4V
Max Operating Current	3.05A

6.1 시뮬레이션 결과

그림 8은 일사량 변화시 증분컨덕턴스를 사용한 시뮬레이션 결과로 일사량 변화에 따라 최대 출력점 제어기의 오동작에 의하여 최대 출력점을 벗어나고 있음을 보여주고 있다.

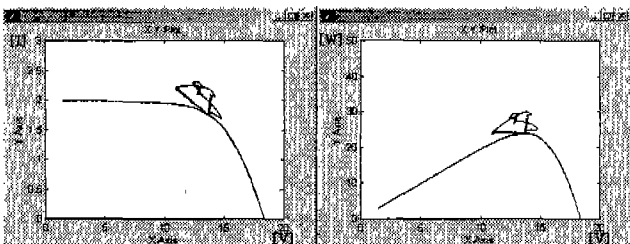


그림 8 증분컨덕턴스 이용한 MPPT 제어 결과
Fig. 8 Result of IncCond MPPT control

그림 9은 일사량 변화시 본 논문에서 제시한 MPPT 제어기를 사용한 시뮬레이션 결과로 테스트 신호 주입에 의해 최대 출력점 판단시 일사량 변동분이 제거되어 최대 출력점과 동작점 간의 오차가 줄어들었음을 알 수 있다.

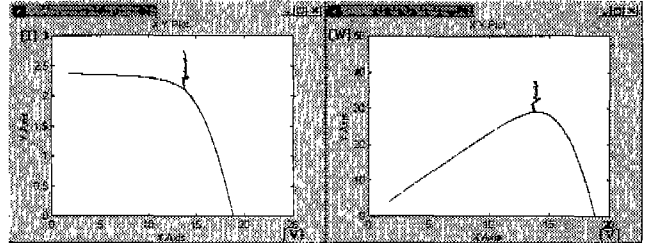


그림 9 테스트 신호를 이용한 MPPT 제어결과
Fig. 9 Results of MPPT control using test signal

6.2 실험 결과

그림 10~14, 그림 16의 실험 결과에 대한 파형의 단위 표기는 전력[W], 전압[V], 기준전압[V], 전류[100mA/div]이며, 기준전압 변화량은 $M \times 100 + 20$ 으로 dG+G는 10배의 크기를 조절하여 나타내었다.

그림 10과 그림 11은 증분컨덕턴스를 이용한 최대 출력점 제어 알고리즘을 실험한 결과로 최대 출력점으로 수렴하는 과정을 보여주고 있다. 기준전압 변화량(M)이 증가함에 따라 최대 출력점 추종 속도가 향상되고 있으나, 최대 출력점에서의 진동이 증가하고 있음을 보여주고 있다.

그림 12는 식(12)를 이용하여 가변이득을 적용하였을 때 최대 출력점 추종제어기 성능을 나타내고 있다. 가변이득을 적용함으로써 최대 출력점 추종속도의 저하 없이 최대 출력점에서의 진동을 저감할 수 있음을 보여주고 있다. 하지만, 최대 출력점에서 판단 오차가 아직 존재하고 있으며 이에 의한 전압 및 전류 변동이 발생하고 있음을 알 수 있다.

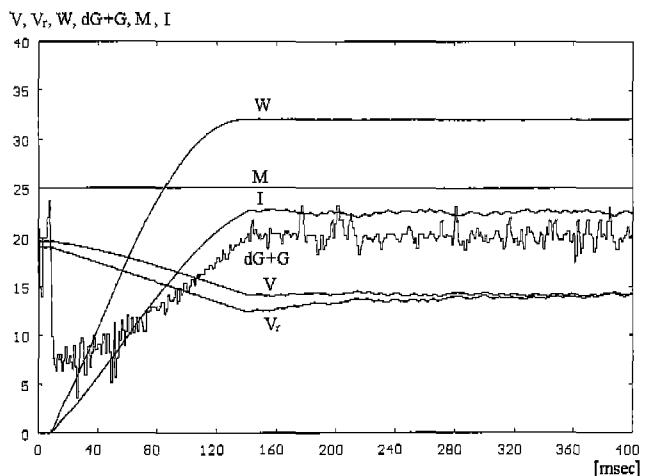


그림 10 증분컨덕턴스를 사용한 MPPT 결과(M=0.05 V)
Fig. 10 Result of IncCond MPPT control(M=0.05 V)

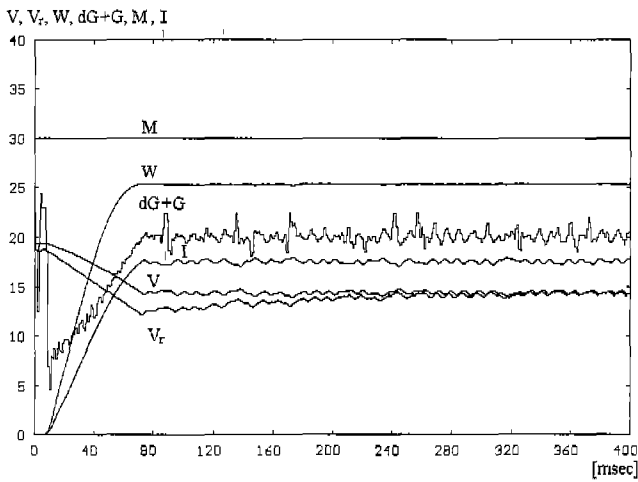


그림 11 중분컨덕턴스를 사용한 MPPT 결과(M=0.1 V)
 Fig. 11 Result of IncCond MPPT control(M=0.1 V)

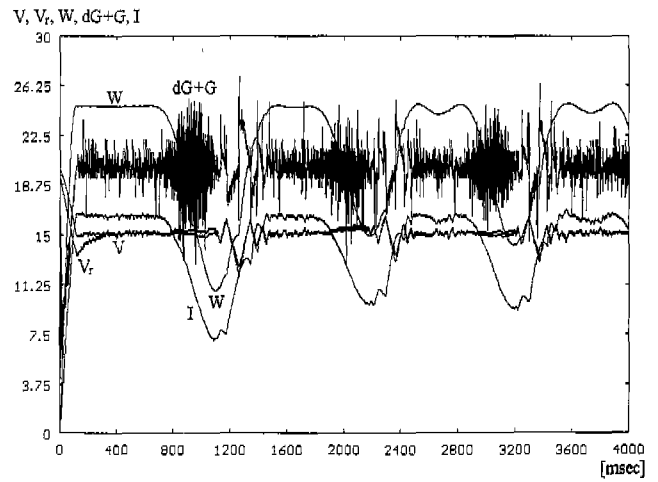


그림 14 중분컨덕턴스를 사용한 MPPT 제어(M=0.05 V)
 Fig. 14 IncCond MPPT control(M = 0.05 V)

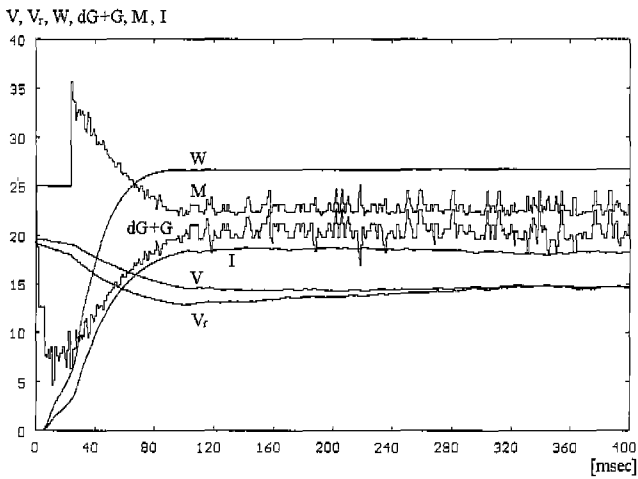


그림 12 가변 이득을 적용한 MPPT 실험 결과
 Fig. 12 MPPT control with adaptive gain

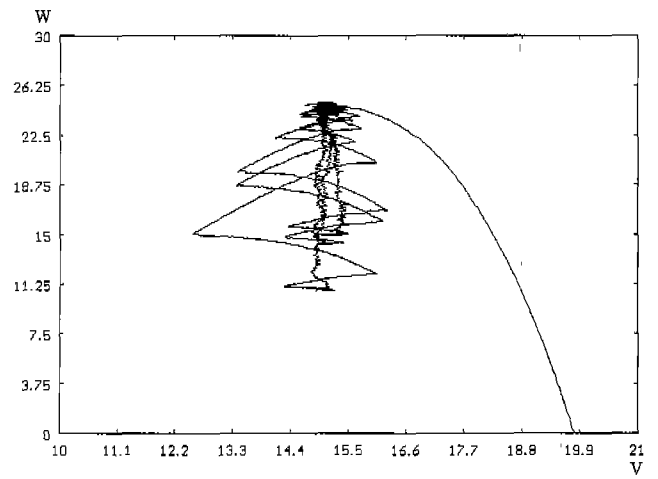


그림 15 그림 14의 V-P 특성 곡선
 Fig. 15 V-P characteristic curve of Fig. 14

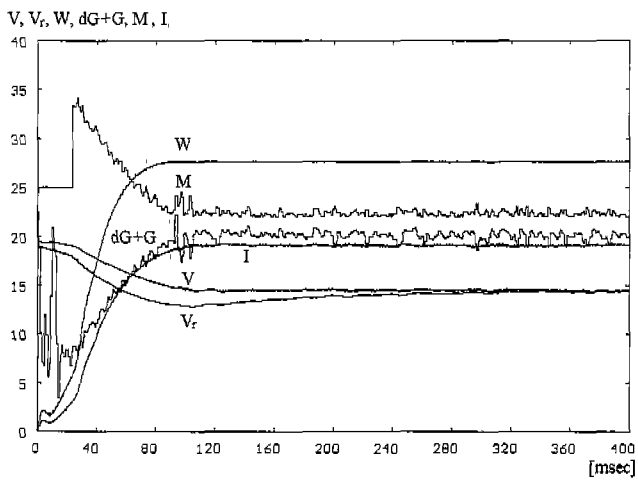


그림 13 테스트 신호를 이용한 MPPT 실험 결과
 Fig. 13 MPPT control using test signal

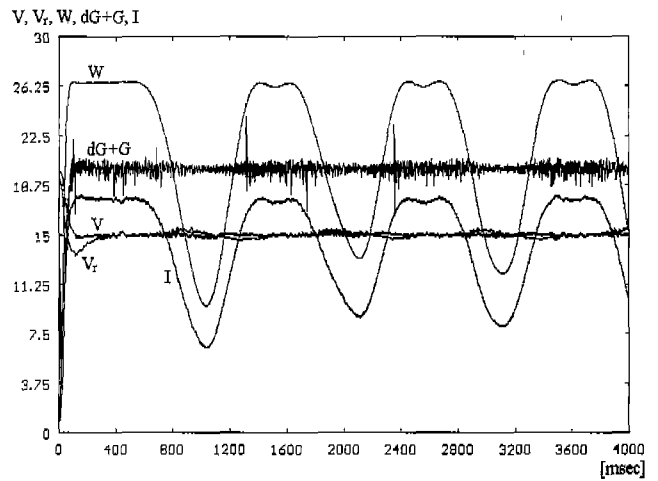


그림 16 테스트신호와 가변이득을 사용한 MPPT제어
 Fig. 16 IncCond MPPT control using adaptive gain and test signal

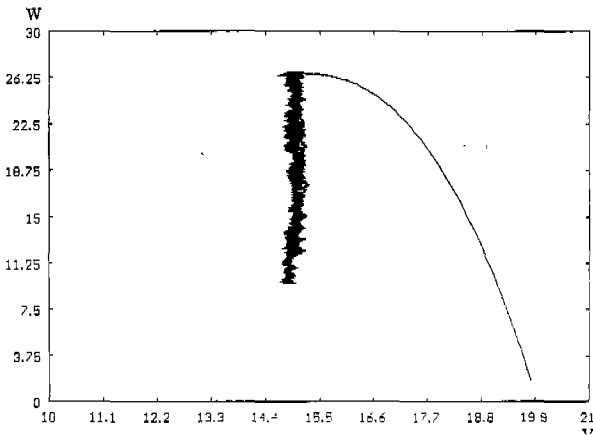


그림 17 그림 16의 V-P 특성 곡선

Fig. 17 V-P characteristic curve of Fig. 16

그림 13은 테스트 신호를 PWM 신호에 중첩시켜 인가함으로써 그림 12에 비하여 최대 출력점 판단의 정확도를 향상시킨 결과로 최대 출력점에서의 진동이 거의 발생하고 있지 않음을 보여주고 있다. 하지만 테스트 신호의 인가에 따른 미소 전압 및 전류 변동량이 발생하고 있음을 보여주고 있다.

그림 10~13에서 최대 출력점 판단 신호(dG+G)는 측정된 전압 및 전류를 통해 계산한 값으로 최대 출력점으로부터의 오차를 나타내고 있으며, 최대 출력점 판단 신호(dG+G)의 진동폭이 줄어들어 제어기가 매우 안정적으로 동작하고 있음을 알 수 있다.

최대 출력점 지령치를 직접 PWM Duty로 제어하지 않고 PI 제어기를 이용함으로써 전압지령치 및 출력전압간의 과도상태 오차가 발생하게 되나 시간이 경과함에 따라 오차가 감소하는 것을 그림 10~13에서 볼 수 있다.

그림 14~17은 일사량 변화에 따른 최대 출력점 추종제어의 성능을 나타낸 것이다. 그림 14는 기준전압의 변화량을 0.05로 고정하고 기존의 증분컨덕턴스를 이용한 실험 결과로 최대 출력점 판단 함수인 dG+G의 변화폭이 크며 일사량 변동에 따라 변동폭이 더욱더 커지게 되는 것을 알 수 있다. 또한 전압 및 전류의 변화도 심하여 제어기의 안정성이 저하됨을 알 수 있다. 그림 15는 그림 14의 결과를 V-P의 그래프로 재구성한 것이다.

그림 16, 17은 제시한 MPPT 제어기를 적용한 실험 결과로 그림 14, 15에 비하여 급격한 일사량 변화에도 최대출력점추종의 정확도가 향상되었으며, 매우 안정적인 출력 특성을 보여주고 있다. 하지만 제어기 속응성에 따른 과도상태오차에 의한 최대출력점(MPOP)과 동작점 전압간에 오차가 발생하고 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 기존의 최대출력점 추종 알고리즘인 증분컨덕턴스법을 디지털 방식으로 구현했을 경우 급격한 일사량 변화에 대한 추종의 실패하는 것에 대한 원인을 일사량 변화에 따른 태양전지 특성방정식의 광전류 변화성분이 최대출력점 판단에 영향을 미치는 것을 식(6)으로 표현하였으며, 올바른 최대출력점 판단이 가능한 조건을 식(7)로 나타내고 식(8)

로 근사화하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 3가지의 가정을 도입하고 식(10)통하여 광전류 성분이 제거될 수 있음을 증명하였다. 제시한 가정을 만족시키기 위해 제어입력에 테스트 신호를 중첩시키는 방법을 제시하였으며, 실험결과 식(8)을 만족하는 범위 내에서 동작점이 결정됨으로 추종오차가 감소하며 제어기의 안정도를 크게 향상시켰다.

본 논문의 실험에서 관찰된 저일사량 상태에서 컨버터의 비선형성 등의 원인에 의한 최대출력점 추종오차가 존재하는 문제점과 초기 기동시 제어의 정확도 및 속응성을 향상시키기 위한 연구를 추후 개선과제로 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] Zweibel K. "Harnessing solar power", Plenum Press, 1990, pp109-111
- [2] Vachtsevanos G. Kalaitzakis K. "A hybrid photovoltaic simulator for utility interactive studies", IEEE Transactions.1987, EC-2,(2), pp.227-231
- [3] K.H. Hussein, "Maximum photovoltaic power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", IEE Proc. vol 142. 1995
- [4] Gottschalg R, Rommel M, Infield DG, Kearney MJ, "The influence of the measurement environment on the accuracy of the extraction of the physical parameters of solar cells", Measurement Science & Technology, V.10 N.9 ,1999-09-01
- [5] Z Ouennoughi, "A simpler method for extraction solar cell parameters using the conductuence method", Solid-State Electronics vol 43, 1999
- [6] Chihchiang Hua, Jongrong Lin, Chihming Shen, "Implementation of a DSP-Controlled Photovoltaic System with Peak Power Tracking" IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol 45, No.1 February 1998
- [7] P. Huynh and B. H. Cho, "Design and analysis of microprocessor controlled peak power tracking system", in Proc. 27th IECEC, 1992, vol. 1, pp. 67-72
- [8] O. Wasynczuk, " Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, pp. 3031-3037, Sept. 1983.
- [9] Chihchiang Hua, Chihming Shen, "Study of Maximum Power Tracking Techniques and Control of DC/DC Converters for Photovoltaic Power System", Proceedings of the Record of the 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference - Volume 1, V.1 ,1998-05-17
- [10] Angelo Brambilla, Marcello Gambarara, Antonio Garutti, Fabrizio Ronchi, "New Approach to Photovoltaic arrays Maximum Power Point Tracking", Proceedings of the 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference-Volume 2, V.2, 1999-06-27

저 자 소 개



김 태 업 (金 兌 燁)

1971년 1월 28일생. 1995년 창원대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2001년~현재

(주)STX 기술연구소 연구원

Tel : 055-266-5929

E-Mail : drkimty@orgio.net



안 호 균 (安 鎬 均)

1958년 1월 14일생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1992~현재 창원대학교 전기공학과 부교수

Tel : 055-279-7516

E-Mail : ahog@sarim.changwon.ac.kr



이 윤 규 (李 允 揆)

1976년 8월 28일생. 2000년 창원대학교 전기공학과 졸업(학사). 2000년~ 현재 창원대학교 전기공학과 석사과정

Tel : 055-546-5917

E-Mail : gomtangi@orgio.net



박 승 규 (朴 勝 圭)

1960년 4월 15일생. 1984년 고려대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1990~현재 창원대학교 전기공학과 정교수

Tel : 055-279-7514

E-Mail : skpark@sarim.changwon.ac.kr