

태양광 발전 시스템의 노이즈 감소와 상태추정을 위한 비선형 제어기 설계

金一松[†]

Nonlinear Controller Design for Noise Reduction and State Estimation in the Photovoltaic Power Generation System

Il-Song Kim

요 약

최대전력점 추적기는 태양광 발전시스템의 대표적인 기능이다. 최대 전력점을 추종하기 위해서는 태양전지의 전압과 전류의 측정을 필요로 한다. 만약 측정 신호에 노이즈가 포함되어 있으면 발생하는 전력이 감소되어 태양광 발전의 효율이 감소하게 된다. 노이즈가 포함된 신호에 확장 칼만 필터 이론을 적용하여 최적의 추정된 신호를 얻어 낼 수 있다. 칼만 필터는 랜덤 노이즈가 포함된 신호에서 최적의 신호를 얻어내는데 사용된다. 또한 칼만 필터의 적용결과로 인덕터 전류와 같은 측정하지 않는 신호도 센서리스 추정이 가능하다. 본 논문에서는 시스템 모델링 방법과 확장 칼만 필터 설계 방법이 소개된다. 실험 결과로서 제안된 제어기의 성능을 확인하였다.

ABSTRACT

Due to the measurement noise or system noise, the performance of photovoltaic power generation system can be degraded. If this noise is contained in the solar array voltage measurement signal, the correct operation of the maximum power point tracker can not be guaranteed. The application of the extended Kalman filter to the photovoltaic system can obtain enhanced states estimation result. The Kalman filter provides a recursive solution to optimally estimate from random noise signals. Additionally, as a consequence of Kalman filter, the unmeasurable state such as inductor current can be estimated without current sensor. The methods for system modeling and extended Kalman filter design are presented and the experimental results verify the validity of the proposed system.

Key Words : Photovoltaic system, Maximum power point tracker, Kalman filter, Extended Kalman filter

1. 서 론

화석연료의 사용으로 야기되는 환경오염과 고갈로 인해 대체에너지에 대한 관심은 점점 높아지고 있다. 태양 에너지는 대표적인 대체 에너지원으로서 배터리

충전이나 위성 전원시스템 등의 많은 분야에서 사용되고 있다. 독립형 태양광 시스템은 태양전지와 전력 변환기 그리고 배터리로 이루어져 있다. 태양전지는 많은 셀이 직-병렬 조합을 이루어 원하는 전압과 전류를 생성한다^[1]. 전력 변환기는 최대 전력점을 추적하거나 배터리 충전 전류 제어를 하기 위해서 태양전지의 전압을 원하는 전압으로 변환한다. 태양전지의 출력이 온도나 입사량과 같은 외부 환경 요인에 의해서 변화하기 때문에, 변화량을 추적할 수 있는 시스템이 필요

[†]교신저자 : 정회원, 총주대 전기공학과 조교수

E-mail : iskim@cjnu.ac.kr

접수일자 : 2009. 4. 6

2차 심사 : 2009. 5. 20

1차 심사 : 2009. 4. 30

심사완료 : 2009. 5. 27

하다. 이를 최대 전력 추적기라 하고 동작점을 순차적으로 변화시키면서, 발생하는 전력의 변화를 관찰하는 방식을 Perturb & Observe (P&O) 방법이라 한다. 이 방법은 간단하면서도 신뢰성이 높아 가장 많이 사용되고 있으며 태양전지의 전압과 전류의 측정을 필요로 하게 된다^[1-7]. 또한 인덕터 전류 측정도 배터리 충전 제어를 위해서 필요로 하게 된다.

기존의 모든 연구는 시스템 모델링이 완벽하고 관측 신호에 외란이 존재하지 않는다는 가정 하에서 이루어졌다. 보통 태양전지는 넓은 야외에 설치되고 전력 변환기는 실내에 설치된다. 두 시스템의 연결은 긴 선들로 이루어지고, 이것은 관측신호에 노이즈 성분을 유기시키고 비선형의 기생요소들을 발생시킬 수 있다. 또한 너무나 계통에서 유입되는 원하지 않는 노이즈 성분들은 시스템 성능을 감소시키고, 동작시 문제를 야기시킬 수 있다. 본 연구에서는 칼만 필터와 같은 상태추정기를 사용하여 외란을 포함한 신호에서 신호 대 잡음비를 높이는 기법에 대해 논의한다^[8-12]. 또한 인덕터 전류를 직접 측정하지 않고 상태 추정기에 의해서 알아내는 방법에 대해서도 논의한다.

2. 태양전지 셀과 어레이의 전기적인 등가모델

태양전지 셀의 전기적인 등가모델은 빛에 의해서 생성된 전류원, 등가 다이오드, 직렬 저항과 병렬저항으로 이루어져 있으며 회로 구성은 그림 1에 표시되어 있다. 셀 단자 전압과 전류 방정식은 아래와 같이 이루어져 있다.

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

수식 (1)에서 상수값들의 정의는 다음과 같다.

$$k_o \equiv \frac{AKT}{q}$$

I, V : 셀 단자 전류, 전압

I_{ph} : 입사광에 의해 생성된 전류원 [A]

I_{sat} : 다이오드 역방향포화전류 [A]

A : 공정계수

K : 볼츠만 상수 1.38×10^{-23} [Nm/K]

T : 셀 표면 온도 [K]

q : 전자의 전하량 1.6×10^{-16} [C]

R_s : 등가 직렬 저항 [Ω]

R_{sh} : 등가 병렬 저항 [Ω]

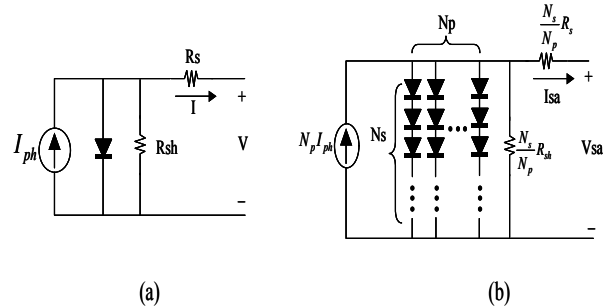


그림 1 태양전지 셀/어레이의 전기적 등가 회로
Fig. 1 Solar cell/array electrically equivalent circuit
(a) single cell circuit
(b) solar array circuit (N_s -series, N_p -parallel)

원하는 전압-전류를 얻기 위해서 태양전지 셀들을 직-병렬 조합 연결하여 사용하게 된다. 이 경우 N_p -개의 병렬 연결과 N_s -개의 직렬 연결을 가진 태양전지 어레이의 전압-전류 관계식은 아래와 같이 주어진다.

$$I_{sa} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left\{ \exp\left(\frac{V_{sa}}{N_s k_o} + \frac{I_{sa} R_s}{N_p k_o}\right) - 1 \right\} - \frac{N_p}{R_{sh}} \left(\frac{V_{sa}}{N_s} + \frac{I_{sa} R_s}{N_p} \right) \quad (2)$$

식 (2)에서 $N_p I_{ph}$ 는 태양전지 어레이의 단락전류 (short circuit current : I_{sc})에 해당한다.

태양전지의 전압-전류와 전력 특성 커브가 그림 2에 표시되어 있다. 이 커브들에서 알 수 있듯이 전압-전류는 최대 전력점 부근에서 심한 비선형 특징을 보이고 있음을 알 수 있다.

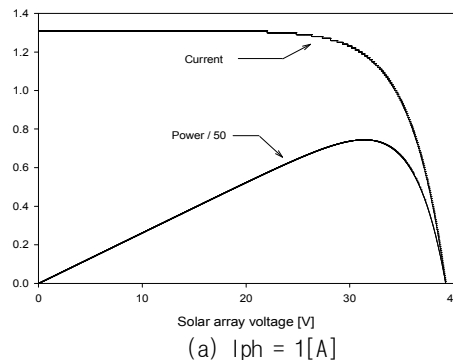


그림 2 태양전지 전압, 전류, 전력 특성 커브
Fig. 2 Voltage-current and power characteristics of solar array

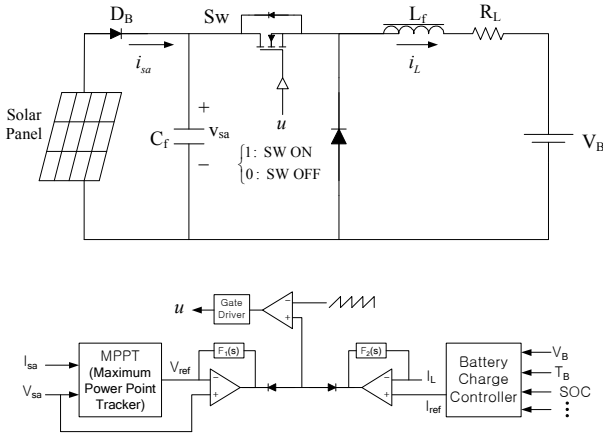


그림 3 태양광 배터리 충전기의 기본 구성
Fig. 3 Typical configuration of solar battery charger

3. 시스템 모델링

독립형 태양광 시스템의 가장 일반적인 응용분야는 배터리 충전시스템이고, 회로와 제어기 구성이 그림 3에 나타나 있다. 제어기는 두 기능을 수행하는데 1) 태양전지의 최대 전력점을 찾아서 추종하는 기능 2) 배터리 충전상태를 유지하기 위한 배터리 충전 제어 기능이다.

강압형 토폴로지 (Buck converter)를 갖는 연속시간 영역의 상태방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{v}_{sa} &= \frac{1}{C_f}(i_{sa} - ui_L) \\ \dot{i}_L &= \frac{1}{L_f}(-R_L i_L - V_B + uv_{sa}) \end{aligned} \quad (3)$$

v_{sa} , i_L 은 커패시터 전압과 인덕터 전류이고, R_L 은 인덕터 저항 그리고 u 는 스위치 입력이고 0 (switch open) or 1 (switch close)의 이산 값을 갖는다.

상태 공간 평균화법을 사용하여 스위치 함수 u 는 평균 입력함수 u_{avg} 로 정의된다.

$$u = \begin{cases} 1 & \text{for } t_k < t < t_k + u_{avg} T_s \\ 0 & \text{for } t_k + u_{avg} T_s < t < t_k + T_s \end{cases} \quad (4)$$

위 식에서 $t_k + T_s = t_{k+1}$ 로 주어진다.

샘플링시간 동안 평균입력함수 u_{avg} 가 일정하다고 가정하면 u 로 정의되고, 오일러 방법을 사용한 이산 상태 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} v_{sa}(k+1) &= v_{sa}(k) + \frac{T(s)}{C_f}[i_{sa}(k) - u(k)i_L(k)] \\ i_L(k+1) &= i_L(k) + \frac{T(s)}{L_f}[-R_L i_L(k) - V_B(k) + u(k)v_{sa}(k)] \end{aligned} \quad (5)$$

T_s 는 샘플링 주기이고 k 는 시퀀스 번호이다.

측정된 출력 $y(k)$ 는 태양전지 전압 v_{sa} 이고 인덕터 전류 i_L 은 측정 불가능한 상태로 제어 알고리즘에 의해 추정해야 하는 상태로 정의한다. 출력 방정식은

$$y(k) = x_1(k) = v_{sa}(k) \quad (6)$$

시스템이 화이트 가우시안 노이즈에 의해 오염 (corrupt) 되었을 때, 즉 시스템 외란 노이즈 $w(k)$ 와 측정 노이즈 $v(k)$ 가 추가되었을 경우의 시스템 모델링은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f(x(k), u(k)) + w(k) \\ y(k) &= x_1(k) + v(k) = v_{sa}(k) + v(k) \end{aligned} \quad (7)$$

이와 같이 외란을 포함한 신호에서 원래 신호를 얻어내기 위해서는 상태 관측기를 필요로 하는데, 화이트 가우시안 노이즈를 포함한 시스템의 경우 칼만 필터가 가장 좋은 성능을 보여주고 있다. 상태 관측기로 확장 칼만 필터를 사용한 노이즈를 포함한 이산 상태 방정식은 다음과 같다.

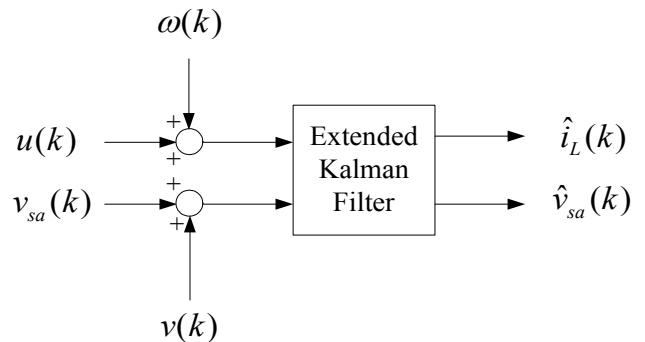


그림 4 이산구조를 가지는 칼만 필터 모델
Fig. 4 Kalman filter Discrete system model

확장 칼만 필터의 출력은 신호대 잡음비가 개선된 태양전지 전압과 추정된 인덕터 전류이다. 제안된 제어기는 이 신호들을 사용하여 시스템의 성능을 높일 수 있도록 구성되었다. 그림 5에 제안된 제어기의 구

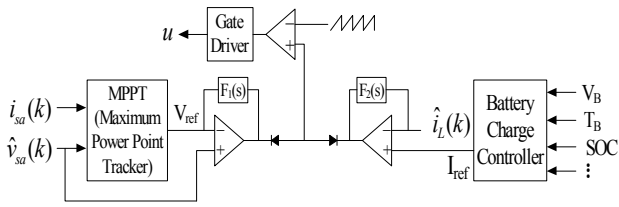


그림 5 제안된 제어기 구조
Fig. 5 Proposed controller configuration

성도가 나타나 있다. 제안된 시스템에서는 실제 신호 대신에 칼만필터를 사용하여 S/N비가 향상된 신호인 태양전지 추정 전압과 인덕터 추정 전류를 사용하고 있다.

최대전력점 추적기는 측정된 태양전지 전압 대신 S/N비가 개선된 추정값을 사용하고 있고, 배터리 충전 제어기는 측정된 인덕터 전류 대신 노이즈가 감소된 추정값을 사용하고 있다. 제안된 제어기 구성은 외란이 존재하는 환경하에서 사용될 수 있으며, 또한 센서리스 시스템 구성이 가능하여 시스템의 저 가격화와 복수의 Redundant 시스템 구성이 가능하여 신뢰성을 높일 수 있는 장점이 있다.

4. 확장 칼만 필터 설계

위에서 주어진 시스템 모델이 비선형 모델이기 때문에 확장 칼만 필터를 사용한다. 확장 칼만 필터 설계는 상태들의 초기값과 에러 Covariance를 결정하는 것으로 시작된다. 초기값(k=0)은

$$\hat{x}_0^+ = E(x_0), P_0^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+)]^T \quad (8)$$

태양광 시스템의 초기 조건은 스위치가 Open되어 태양전지 개방전압으로 커패시터가 충전되어 있는 경우

$$\hat{x}_0^+ = (V_{oc} \quad 0)^T \quad (9)$$

초기화 후에 칼만 필터는 각 측정간격(k interval)에 두 개의 단계로 수행된다. 먼저 현재의 상태값을 예측(state estimate update) 하고, 다음 실제 측정값을 이용하여 예측된 값을 보정(measurement update)하는 것이다. 주어진 시스템이 비선형이기 때문에 테일러 공식을 이용하여 시스템 행렬 A 를 선형화 하면

$$\hat{A}(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}_{x=\hat{x}_k^+} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{T_s}{C_f} u_{avg}(k) \\ \frac{T_s}{L_f} u_{avg}(k) & 1 - \frac{T_s}{L_f} R_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

선형화된 시스템 행렬을 이용하여 확장 칼만 필터 구성은 다음과 같이 주어진다.

1) State estimate time update

$$\hat{v}_{sa}^-(k) = \hat{v}_{sa}^+(k-1) + \frac{T_s}{C_f} \{i_{sa}(k-1) - u_{avg}(k-1) \cdot \hat{i}_L^+(k-1)\}$$

$$\hat{i}_L^-(k) = \hat{i}_L^+(k-1) + \frac{T_s}{L_f} \{-R_L \cdot \hat{i}_L^+(k-1) - V_B(k-1) + u_{avg}(k-1) \cdot \hat{v}_{sa}^+(k-1)\}$$

2) Error covariance time update

$$P^-(k) = \hat{A}(k-1) \begin{bmatrix} P_{11}^+(k-1) & P_{12}^+(k-1) \\ P_{21}^+(k-1) & P_{22}^+(k-1) \end{bmatrix} \hat{A}^T(k-1) + S_w$$

3) Kalman gain matrix

$$\begin{bmatrix} L_1(k) \\ L_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_{11}^-(k)}{P_{11}^-(k) + S_v} \\ \frac{P_{21}^-(k)}{P_{11}^-(k) + S_v} \end{bmatrix}$$

4) State estimate measurement update

$$\hat{v}_{sa}^+(k) = \hat{v}_{sa}^-(k) + L_1(k)[y_v(k) - \hat{v}_{sa}^-(k)]$$

$$\hat{i}_L^+(k) = \hat{i}_L^-(k) + L_2(k)[y_v(k) - \hat{v}_{sa}^-(k)]$$

5) Error covariance measurement update

$$P^+(k) = \begin{bmatrix} (1-L_1(k))P_{11}^-(k) & (1-L_1(k))P_{12}^-(k) \\ -L_2(k)P_{11}^-(k) + P_{21}^-(k) & -L_2(k)P_{12}^-(k) + P_{22}^-(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

위 식에서 - 는 상태변수들의 시간 갱신을 의미하여 +는 관측된 신호를 이용하여 추정된 신호의 보정을 의미한다. P 행렬은 오차의 공분산을 의미한다.

5. 실험 결과

제안된 시스템의 성능을 입증하기 위해 시뮬레이션과 실험을 하였다. 표 1에 시뮬레이션과 실험에 사용된

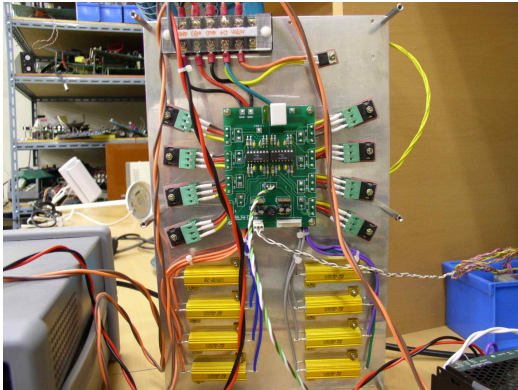


그림 6 태양전지 시뮬레이터
Fig. 6 Solar array simulator

태양전지 파라미터와 회로 시상수들에 대한 값이 표시되어 있다. 태양전지의 특성을 모사하기 위한 태양전지 시뮬레이터가 실험에 사용되었다. 태양전지 시뮬레이터(그림 6)는 FET를 이용한 current source와 제어단으로 구성되어 있다. 기본 동작원리는 다음과 같다. 전류원으로 구성된 8개의 소스를 결합하여 최대 8A의 단락전류(short current)를 생성하고, 제어단에서 주어진 파라미터 값을 만족시킬 수 있도록, 전압에 따라서 제어되는 기준 전류값을 생성한 후, PI 제어기를 사용하여 기준전류와 출력전류가 일치하도록 제어한다.

태양전지 시뮬레이터에서 발생하는 전압-전류 파형은 그림 2에서 나타난 실제 태양전지의 출력특성과 동일하다. 태양전지 시뮬레이터의 출력 파라미터는 표 1과 같다. S_v 와 S_w 는 $V(k)$ 와 $W(k)$ 의 Covariance matrix이다.

표 1 시뮬레이션과 실험을 위한 파라미터 값
Table 1 Parameters for simulation and experiment

Solar array Parameter		Circuit Parameter	
R_s	0.1 [W]	C_f	1000 [uF]
R_{sh}	200 [W]	L_f	1.2 [mH]
N_p	1	R_L	0.5 [W]
N_s	60	V_B	12 [V]
I_{ph}	2.5 [A]	T_s	500 [us]
T	295 [K]	S_v	1
V_{mp}	39.0 [V]	S_w	1
V_{oc}	48.0 [V]	vk	randn(n)*
I_{mp}	2.0 [A]		
I_{sc}	2.2 [A]		
P_{mp}	78.0 [W]		

*randn(n) : normally distributed random noise level from n [V] to +n [V].

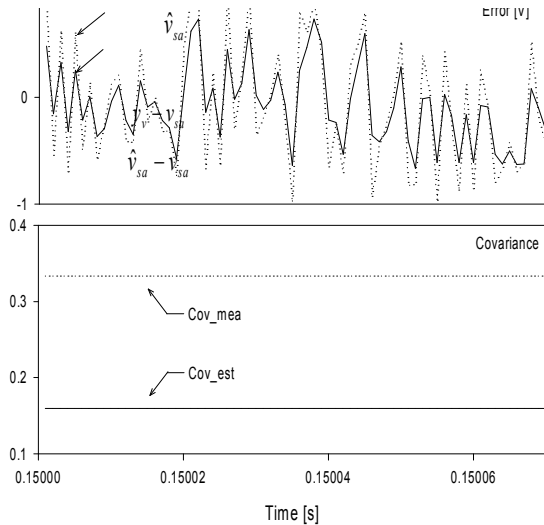


그림 7 칼만필터를 이용한 추정기의 시뮬레이션 파형
Fig. 7 Simulation result for Kalman filter

태양전지 전압에 $\pm 1[V]$ 의 랜덤 노이즈가 부가되었을 때 제안된 시스템의 출력특성은 아래 그림 7에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 추정된 신호의 공분산값이 실제 측정된 값보다 적게 나타남을 알 수 있다. 이것은 추정된 신호의 S/N비가 측정 신호보다 높아서 보다 신뢰성 있는 값을 얻을 수 있는 것을 의미한다.

칼만 필터의 상관 매트릭스(covariance matrix) S_v 영향을 알아보기 위해 S_v 값을 1에서 1000 그리고 0.001로 변화시키면서 추정값들을 표시하였다. 아래 그림에서 보는 것처럼, 적절한 S_v 의 선정은 추정값들의 정확도를 높이는데 아주 중요한 역할을 하고 있다.

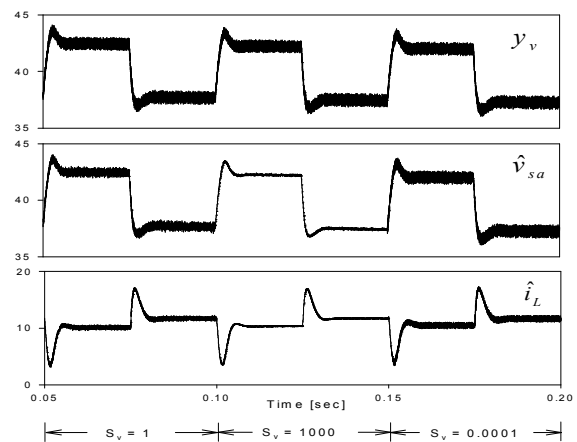


그림 8 칼만필터 출력에 대한 상관 행렬 S_v 의 영향
Fig. 8 Impact of covariance S_v on the states of the Kalman filter

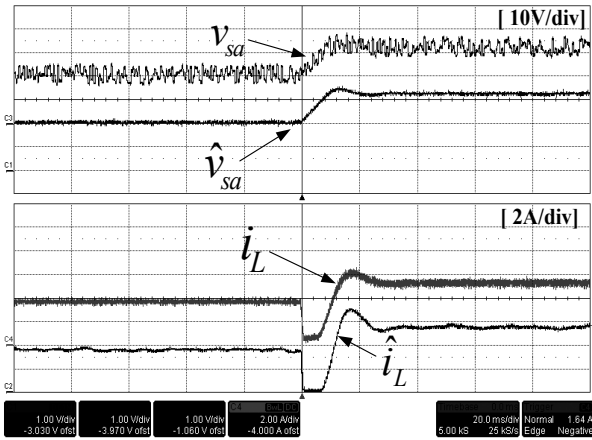
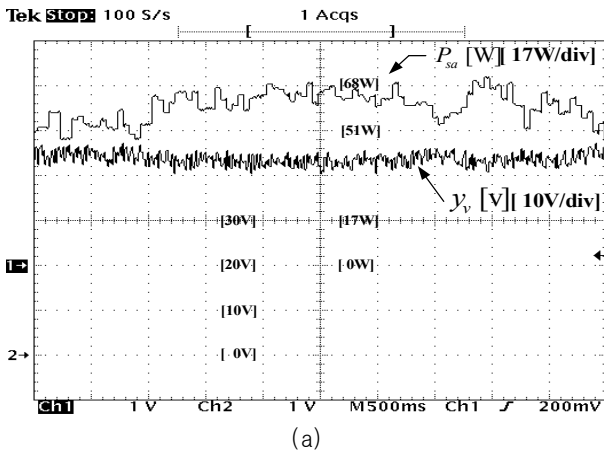


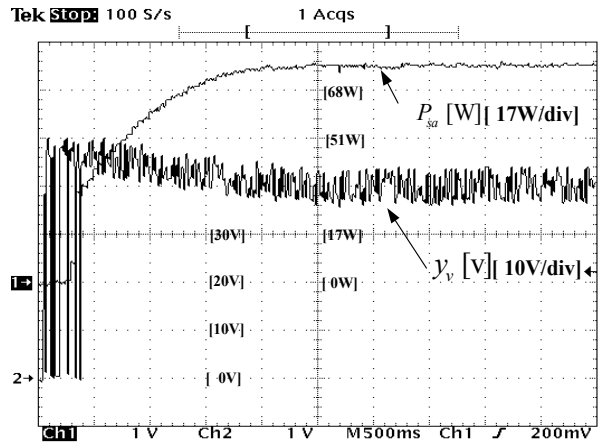
그림 9 노이즈가 포함된 신호에서 추정 신호의 결과
 Fig. 9 State estimation results for noise contained signal

태양전지 시뮬레이터를 사용하여 실험한 결과는 아래 그림에 나타나 있다. 외란을 $\pm 4[V]$ 를 주었을 때, 추정된 태양전지 전압과 인덕터 전류값이 표시되어 있다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 많은 노이즈를 포함한 추정신호에서 거의 완벽에 가까운 태양전지 전압신호를 복원하였고, 추정된 인덕터 전류값도 실제값과 매우 가까운 것을 알 수 있다.

기존 시스템과 제안된 시스템의 최대 전력점 추적능력을 비교 실험하였다. 그림 10에 기존방법과 제안된 방법으로 수행한 시험 결과가 나타나 있다. 태양전지 시뮬레이터의 최대 전력 발생이 78[W]이고 최대 전력 발생 전압은 39[V]이다. 효율은 태양전지에서 생성된 전력 대비 가능한 최대전력의 비로 측정된다. 기존 방법은 최대 77%의 추적능력을 보여주고 있는 반면, 제안된 시스템은 98%의 매우 우수한 능력을 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림 10 최대전력 추적기의 성능 비교
 (a) 기존 방법 (b) 제안된 방법
 Fig. 10 MPPT performance for P&O Method
 (a) Conventional system (b) Proposed system

6. 결 론

본 연구에서는 노이즈를 포함한 태양광 시스템에서 신호의 신호대 잡음비를 향상시킬 수 있는 비선형 제어기 설계 방법을 제시하였다. 시스템 모델링과 확장 칼만 필터 설계 방법이 제시되었고 시뮬레이션과 실험을 통해서 성능을 입증하였다. 제안된 제어기는 최적의 MPPT 설계 뿐만 아니라, 센서리스 전류 제어기 설계도 가능하여 시스템의 신뢰성 향상을 도모할 수 있다. 실험 결과 기존 시스템에 비해 노이즈가 포함된 환경하에서도 매우 우수한 성능을 가짐을 입증하였다.

이 논문은 2007년도 충주대학교 교내 학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임

(The research was supported by a grant from the Academic Research Program of Chung-Ju National University in 2007)

참 고 문 헌

- [1] 서현우, 권정민, 권봉환, “무변압기형 3상 계통연계 PV PCS”, *전력전자학회 논문집*, 제12권, 제5호. pp. 355 - 363 2007. 10.
- [2] J.M Han, B.H. Jeong, J.S. Gho and G.H. Choe: “Analysis of PWM converter for V-I output characteristics of solar cell”, *Journal of Power*

Electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 62-67, 2003. 1.

- [3] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis and et al, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol.16, No.1, Jan., pp. 46-54, 2001.
- [4] 지상근, 권두일, 유철희, 한상규, 노정욱, 이효범, 홍성수, "One switching cycle내에 최대 전력점을 추종하는 태양광 발전의 아나로그 MPPT 제어 시스템", *전력전자학회 논문집*, 제14권, 제2호. pp. 89 - 95 2009. 4.
- [5] I.S.Kim, M.B.Kim and M.J.Youn, "New maximum power point tracker using sliding-mode observer for estimation of solar array current in the grid-connected photovoltaic system", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 53 No. 4, pp. 1027-1035, 2006, Aug.
- [6] B.M. Ho and H.S. Chung: "An integrated inverter with maximum power tracking for grid-connected PV systems", *IEEE Trans.*, PE-20, (4), pp. 953-962, 2005.
- [7] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli: 'Optimization of perturb and observer maximum power point tracking method', *IEEE Trans.*, PE-20, (4), pp. 963-973, 2005.
- [8] K.W.Kim and S.K. Sul, "A new motor speed estimator using Kalman filter in low-speed range", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 4, pp. 498-504, 1996, Aug.
- [9] K.W.Kim and S.K. Sul: "A new motor speed estimator using Kalman filter in low-speed range", *IEEE Trans.*, IE-43, (4), pp. 498-504, 1996.
- [10] J.R. Kim, K.B. Shim and J.H. Kim: "Load modeling of electric locomotive using parameter identification", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2, (2), pp. 145-151, 2007.
- [11] G. L. Plette: "Extended kalman filtering for battery management system of LiPB-based HEV battery packs -Part 1, 2, 3", *Journal of Power Source*, 134, pp. 252-292, 2004.
- [12] H.S Bae, J.H. Yang, J.H. Lee and B.H. Cho: "Digital state feedback current control using the pole placement technique", *Journal of Power Electronics*, Vol. 7, No. 3, pp. 213-221, 2007. 7.

저 자 소 개



김일송(金一松)

1968년 7월 3일생. 1991년 연세대 공대 전자공학과 졸업. 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 2005 동 대학원 졸업(공학박). 2007년 3월 ~ 현재 충주대 전기공학과 조교수.