

# 태양광 발전 시스템의 강인 적응형 컨버터 제어 알고리즘

조현철\*, 김남호\*\*, 이권순\*\*\*, 유수복\*\*\*\*

\*울산과학대학 전기전자학부 조교수

\*\*부경대학교 제어계측공학과 교수

\*\*\*동아대학교 전기공학과 교수

\*\*\*\*울산과학대학 전기전자학부 교수

## Robust Adaptive Converter Control Algorithm for Photovoltaic Generator Systems

Hyun Cheol Cho\*, Nam Ho Kim\*\*, Kwon Soon Lee\*\*\*, Soo Bok You\*\*\*\*

\*Ulsan College, School of Electrical and Electronic Engineering, Assistant Professor

\*\*Pukyong National University, Dept of Control and Instrument Engineering, Professor

\*\*\*Dong-A University, Dept of Electrical Engineering, Professor

\*\*\*\*Ulsan College, School of Electrical and Electronic Engineering, Professor

E-mail : hcjo@uc.ac.kr

### 요 약

본 논문은 태양광 발전시스템에 적용되는 컨버터의 과도응답상태를 개선시키는 적응 강인 제어시스템을 제안한다. 우선, 컨버터 시스템을 평균 상태공간 모델을 구한 후 리셋 제어시스템 모델과 함께 augment 형태의 새로운 상태공간 모델링을 실시한다. 적응 강인 제어 알고리즘은 잘 알려진 Lyapunov 이론을 이용하여 도출한다. 본 논문에서 제안한 컨버터 시스템의 제어성능을 검증하기 위하여 컴퓨터 모의실험을 실시하였으며 기존의 제어방식과 비교 검토하여 성능의 우수성 및 타당성을 입증하였다.

### ABSTRACT

This paper presents a novel adaptive control method for DC-DC converters applied in PV generator systems. We derive an state-space average model of the converter system and then propose a adaptive control methodology to enhance transient response performance for time-varying PV systems. A well-known Lyapunov theory is utilized for constructing our control algorithm. Numerical simulation demonstrates reliability of our control methodology and its superiority by comparison to a traditional control strategy.

### 키워드

photovoltaic (PV) generator, DC-DC boost converter, adaptive robust control

## 1. 서 론

태양광 발전시스템은 과거의 대규모 발전시스템을 비롯하여, 최근에는 소규모 구조의 발전시스템이나 특수목적용을 갖는 임베디드 형태의 시스템으로도 많이 적용되고 있다[1-3]. 이러한 시스템의 경우 부하측에 도달하는 전기적 특성이 보다 더 효율적이어야 하며 또한 정밀한 전기적 및 제어성능을 요구하고 있다. 이러한 사양을 만족하기 위하여 태양광 발전시스템과 부하측 간의 고성능 DC-DC 컨버터 시스템의 개발이 불가피한 실정이다[4-6]. 하지만 대부분의 컨버터 시스템에 관한 연구는 태양광 발전의 최대전력추종 기법에만 거의 초점을 맞추고 있으며 이러한 컨버터의 제어성능을 개선하기 위한 연구는 현재까지 거의 미비한 실정이다[7].

본 논문은 태양광 발전시스템에 적용되는 컨버터의 과도응답상태를 개선시키는 적응 강인 제어 시스템을 제안한다. 우선, 컨버터 시스템을 평균

상태공간 모델을 구한 후 강인 적응형 제어시스템 모델과 함께 augment 형태의 새로운 상태공간 모델링을 실시한다. 적응 강인 제어 알고리즘은 잘 알려진 Lyapunov 이론을 이용하여 도출한다. 본 논문에서 제안한 컨버터 시스템의 제어성능을 검증하기 위하여 컴퓨터 모의실험을 실시하였으며 기존의 제어방식과 비교 검토하여 성능의 우수성 및 타당성을 입증하였다.

## 2. 태양광 컨버터 모델

태양광 발전시스템의 DC-DC 컨버터 시스템은 boost 방식의 컨버터로서 그림 1과 같은 전기회로를 갖는다. 여기서  $L$ ,  $C$ ,  $R_L$ 은 인덕턴스, 캐패시턴스, 그리고 부하저항을 각각 나타내며, 태양광 발전시스템으로부터의 출력전압  $V_{pv}(t)$ 는 컨버터에서는 시변 입력변수로 간주할 수 있다. 그림 1의

스위칭 상태는 두 가지 형태로서  $s=0$ 과  $s=1$ 로 구분되어지며 이 때 각각의 폐회로가 구성된다. 이상적인 스위칭 동작의 가정 하에, 그림 1의 전체전류 및 출력전압의 동특성은 평균 상태공간 방정식으로 표현할 수 있으며 다음과 같다.

$$\dot{X}(t) = (1-u(t))\dot{X}_0(t) + u(t)\dot{X}_1(t) \quad (1)$$

여기서  $\dot{X}_j = [\dot{i}_j \ \dot{v}_j]^T$ ,  $i=0,1$ , 그리고  $u \in [0,1]$ 은 duty 비율을 나타낸다. 또한 식 (1)은 다음의 미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{i}(t) = \frac{V_{pv}(t)}{L} - \frac{v(t)}{L} + \frac{v(t)}{L}u(t) \\ \dot{v}(t) = \frac{i(t)}{C} - \frac{v(t)}{CR_L} - \frac{i(t)}{C}u(t) \end{cases} \quad (2)$$

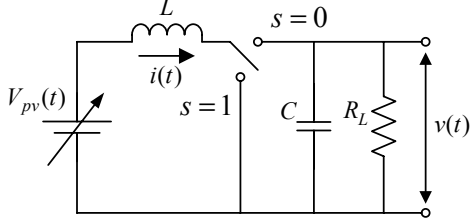


그림 1. 태양광 DC-DC 컨버터 모델

### 3. 적응형 리셋 제어시스템

식 (2)를 상태공간 및 출력방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B(t)u(t) + WV_{pv}(t) \\ y(t) &= Gx(t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 시스템 상태벡터는  $x(t) = [i(t) \ v(t)]^T$ 로 정의되며 각각의 행렬은  $W = [1/L \ 0]^T$ ,  $G = [0 \ 1]$ , 그리고 상태 및 입력행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_L} \end{bmatrix}, \quad B(t) = \begin{bmatrix} \frac{v(t)}{L} \\ -\frac{i(t)}{C} \end{bmatrix}$$

직관적으로, 시스템 상태행렬  $A$ 는 선형이며  $B(t)$ 는 시스템 상태변수를 포함하는 비선형 요소들로 구성되는 시변행렬로 주어지며,  $V_{pv}(t)$ 는 외부입력 변수로 간주할 수 있다. 식 (3)의 제어규칙은 다음과 같이 정의한다.

$$u(t) = 1 - \frac{V_{pv}(t)}{V_r} - \delta(t) \quad (4)$$

여기서  $V_r$ 는 설정치 전압을 나타내며,  $\delta(t)$ 는 보조 제어입력변수를 나타내며,  $u \in [0,1]$ 의 조건을 만족하기 위하여  $\delta(t)$ 의 범위는  $[-V_{pv}(t)/V_r, 1 - V_{pv}(t)/V_r]$ 이어야 한다. 식 (4)의 제어규칙은  $1 - V_{pv}(t)/V_r$  부분과  $\delta(t)$  부분으로 나눌 수 있으며,  $1 - V_{pv}(t)/V_r$ 는 컨버터의 입력전압과 설정치 전압과의 비율로서, 컨버터 시스템의 정상상태응답을 위한 제어규칙으로 적용된다. 반

대로, 보조입력변수인  $\delta(t)$ 는 과도응답상태의 개선을 위하여 추가적으로 적용되는 제어규칙이다. 식 (4)를 식 (3)의 상태공간방정식에 적용하여 전개하면

$$\dot{x}(t) = \tilde{A}(t)x(t) - B(t)\delta(t) + WV_{pv}(t) \quad (5)$$

와 같으며 여기서 새로운 시변 상태행렬은 다음과 같다.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{V_{pv}(t)}{LV_r} \\ \frac{V_{pv}(t)}{CV_r} & -\frac{1}{CR_L} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (5)의 제어변수  $\delta(t)$ 는 적응 강인형 리셋 제어규칙을 적용하여 구성한다. 리셋 제어시스템은 정상상태에서 제어오차가 0일 경우 제어입력을 0으로 리셋 시키며 그렇지 않은 경우 주어진 제어규칙을 수행하게 된다. 이러한 제어규칙은 과도응답 특성을 개선시키는데 주로 사용되고 있다. 본문에서 구성하는 리셋 제어규칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}(t) &= \alpha\zeta(t) + e(t) \\ \delta(t) &= \begin{cases} \beta\zeta(t) & \text{if } e(t) \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\zeta \in R$ 은 리셋 시스템의 상태변수,  $\alpha, \beta \in R$ 은 시스템 파라미터로 주어지며, 시스템 오차는  $e = V_r - y = V_r - Gx$ 로 정의된다. 식 (7)의 리셋 제어시스템의 구현은 파라미터  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 값을 제어목적에 적합한 최적의 값으로 설정하는 것이다. 식 (7)과 (5)를 조합하여 augment 형태의 상태공간방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \Phi(t)\tilde{x}(t) + \tilde{W}V_{pv}(t) + FV_r \quad (8)$$

여기서 augment 상태벡터는  $\tilde{x} = [x \ \zeta]^T$ 이며 각각의 행렬은  $\tilde{W} = [W \ 0]^T$ ,  $F = [0 \ 1]^T$ , 그리고 상태행렬은

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{V_{pv}(t)}{LV_r} & -\frac{v(t)}{L}\beta \\ \frac{V_{pv}(t)}{CV_r} & -\frac{1}{CR_L} & \frac{i(t)}{C}\beta \\ 0 & -1 & \alpha \end{bmatrix} \quad (9)$$

와 같다. 주어진 제어 목적을 달성하는 것은 식 (9)의 시스템 상태행렬의 고유치를 원하는 값으로 선정하는 것이며, 다시 말해, 상태행렬의 특성방정식을 원하는 다항식으로 추종하기 위하여 제어 파라미터의 규칙을 결정하는 것과 동일하다.

## VII. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 구성한 태양광 발전 시스템에 대하여 Matlab 소프트웨어를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였으며 그 결과를 검토 분석하였다. 시뮬레이션은 본 논문에서 제안한 컨버터 시스템의 설정치에 대한 추종응답을 검토하여 성능의 타당성을 입증한다. 시뮬레이션에 사용한 태양광 모

들은 Siemens 사의 M55 모듈을 36개 직렬 연결한 모델로 하였으며 주요 사양은 표 1과 같다. 이러한 사양을 태양광 모델 방정식에 적용하여 일사량과 온도의 변화에 따른 출력전압을 산출한 후 컨버터의 입력으로 인가하였다. 그림 1의 컨버터 시스템 모델에서  $L=1.5[mH]$ ,  $C=500[\mu F]$ 으로 하였으며 부하저항은 시변특성의 변수로 정의하였다.

그림 2는 이러한 시뮬레이션 시나리오에 대한 두 제어시스템의 시뮬레이션 결과를 각각 나타낸다. 두 파형은 초기에 오버슈트 응답을 보이고 있으며, 기존 제어시스템 응답의 경우, 부하저항의 값이 변하는 구간에서도 비교적 큰 오버슈트 특성을 나타내고 있다. 반면, 제안한 제어시스템의 경우 초기시간에 큰 오버슈트가 발생하지만 그 외의 구간에서는 현저히 작은 크기의 오버슈트가 발생되며 기존 전압에 거의 동일한 응답을 보이고 있다. 또한 정상상태 도달 시간의 경우, 제안한 제어시스템은 기존의 제어방식에 비해 현저히 빠르며 약 85%의 개선도를 보여주고 있다. 한편, 두 파형이 정상상태에서도 약간의 리플현상이 발생하는 것은 부하저항이 랜덤한 값을 가지기 때문에 나타나는 일반적인 현상으로 간주된다. 이 두 파형의 비교를 통해서도 제안한 제어시스템이 기존의 제어방식에 비해 그 성능이 월등히 우수하다는 것을 입증한다. 그림 3은 두 제어시스템의 제어입력을 각각 보여주며, 마찬가지로 제안한 제어시스템의 입력 값이 적응형 형태로 산출됨을 볼 수 있다.

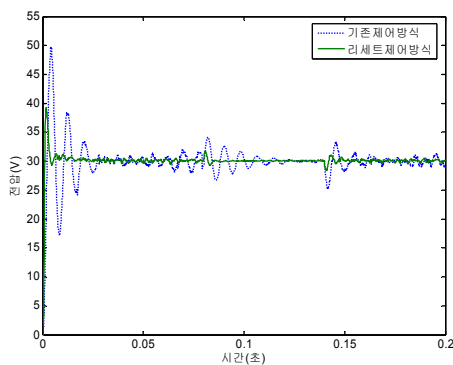


그림 2. 컨버터 시스템의 응답(시변  $R_L$ )

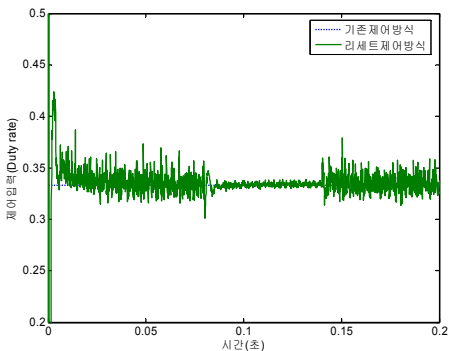


그림 3. 제어입력(시변  $R_L$ ).

VIII. 결론

본 논문은 태양광 발전시스템에 사용되는 boost 컨버터 시스템의 새로운 제어방식을 제안하였으며, 제안한 제어규칙은 기존의 제어방식에 리셋제어시스템을 조합한 새로운 적응제어 메커니즘으로 구성된다. 향후 연구로는 제안한 제어시스템의 실적용 가능성을 면밀히 검토하기 위하여, 실시간 태양광 발전시스템의 시뮬레이터에 제안한 제어기법으로 구성된 컨버터 시스템을 적용하여 실험을 실시하고자 한다. 실시간 실험을 통하여 컴퓨터 모의실험에서 예상치 못한 요인으로 인한 제어기 성능의 저하가 발생할 경우 이를 보완하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 전망이 된다. 최종적으로 이러한 문제점을 보완한 후 실제 태양광 발전시스템이 가동되고 있는 장소에 본 논문의 제어기법을 적용하여 현장실험을 실시할 예정이며 그 실험성을 분석할 계획이다.

참고문헌

- [1] R. Leyva, C. Alonso, I. Queinnec, A. Cid-Pastor, D. Lagrange, L. Martinez-Salamero, "MPPT of photovoltaic systems using extremum-seeking control," *IEEE Trans. Aerospace & Electronic Systems*, vol. 42, no. 1, pp. 249-258, 2006.
- [2] C. Larbes, S. M. Ait-Cheikh, T. Obeidi, A. Zerguerras, "Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power tracking in photovoltaic system," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2093-2100, 2009.
- [3] I.-S. Kim, "Sliding mode controller for the single-phase grid-connected photovoltaic system," *Applied Energy*, vol. 83, pp. 1101-1115, 2006.
- [4] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963-973, 2005.
- [5] A. Sozen, E. Arcakcioglu, M. Ozalp, N. Caglar, "Forecasting based on neural network approach of solar potential in Turkey," *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1075-1090, 2005.
- [6] T. Hove, "A method for predicting long-term average performance of photovoltaic systems," *Renewable Energy*, vol. 21, pp. 207-229, 2000.

- [7] G. Vijayakumar, M. Kummert, S. A. Klein, W. A. Beckman, "Analysis of short-term solar radiation data," *Solar Energy*, vol. 79, pp. 495–504, 2005.