

슬라이딩 모드 제어를 사용한 계통연계형 태양광 발전시스템의 강인한 최대전력점 제어기 설계

김일송, 박진식, 정신명, 윤명중
한국과학기술원 전자전산학과

Robust maximum power point tracker using sliding mode controller for the single-stage grid-connected photovoltaic system

iL-Song Kim, Jin-Sik Park, Sin-Myung Jung, Myung-Joong Youn
KAIST Electrical Engineering

ABSTRACT

A sliding mode controller for the grid-connected photovoltaic system has been presented. This controller is constructed from the time-varying sliding surface in order to control the sinusoidal inductor current and solar array power simultaneously. The proposed controller can achieve the tight regulation of current and power under the parameter variation environment.

1. 서 론

일반적인 단상 계통연계형 태양광 발전시스템의 구성은 그림 1에 나타난 것처럼 태양전지, 입력 커패시터 C , 필터 인덕터 L , 단상 인버터 그리고 계통 전압 $e_s(t)$ 로 이루어져 있다[1]. 태양전지 셀은 원하는 태양전지 전압과 전류를 만족하기 위해 직-병렬 조합으로 연결되어 있다. 입력 커패시터는 전압원 인버터를 위해서 태양전지 전압을 유지한다. 필터 인덕터를 포함한 단상 인버터는 입력 태양전지 전압을 AC 정현파의 형태로 바꾼다. 단상 인버터는 단위 역률로 전력을 전송하기 위해서 계통전압과 필터 인덕터 전류가 동상이 되도록 적절한 스위치 신호로 제어된다. 일반적인 제어기 구성은 태양전지의 최대전력점을 추적하기 위해 기준전압을 발생시키는 최대전력점 제어기, 태양전지 전압제어를 위한 전압제어기와 인덕터 전류 제어를 위한 전류제어기로 구성된다. 보통 전압제어기로는 PI-제어기가 많이 사용되고 전류제어기로는 예측제어기가 제어의 용이성 때문에 많이 사용된다. 하지만 이 시스템은 PI-gain tuning의 어려움과 적분기로 인해 제어입력이 급격히 바뀔 경우 출력전류에 overshoot를 발생시킬 수 있다는 것과 예측 제어기의 경우 정확한 회로상수를 알아야 한다는 단점이

있다.

이런 문제점들은 제안된 슬라이딩 모드 제어를 사용함으로써 제거될 수 있다. 최대전력점 추적기에서 기준 전압 대신 기준 전류에 대한 정보를 내보내고, 입출력 전류 관계식에서 기준전류에 대한 식을 얻어내어 슬라이딩 모드제어기로 인덕터 전류를 제어하게 된다. 제안된 제어기는 파라미터 변화나 외란하에서 제어의 강인성을 보장할 수 있고, 모든 동작점 범위에서 모든 상태의 엄정한 제어를 할 수 있게 된다.

2. 슬라이딩 모드 제어기 설계

그림 1에 나타난 단상 계통연계형 태양광 발전시스템의 동적모델은 아래와 같은 상태방정식에 의해 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{v}_{sa} &= \frac{1}{C_n}(-i_L \cdot \gamma + i_{sa}) + \Delta f_1 \\ \dot{i}_L &= \frac{1}{L_n}(v_{sa} \cdot \gamma - e_s(t)) + \Delta f_2 \end{aligned} \quad (1)$$

v_{sa} 는 커패시터 전압, i_L 은 인덕터 전류, $e_s(t)$ 는 계통 전압이다. 회로 상수 C_n 과 L_n 은 각각 공칭값에 해당하며 그 값들은 정확하게 알고 있다고 가정한다. 불확실성 $\Delta f_1, \Delta f_2$ 는 모델링 에러와 공칭값에서 벗어난 커패시턴스와 인덕턴스로 인해 생기는 변위량이며, 최대범위들은 각각 η_1, η_2 로 제한되어 있다. 단상인버터의 스위치 상태는 γ 로 표시하며 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = \begin{cases} +1 \rightarrow S_1, S_4 : on, S_2, S_3 : off \\ -1 \rightarrow S_1, S_4 : off, S_2, S_3 : on \end{cases} \quad (2)$$

제어 입력 $u(t)$ 는 한 스위칭 구간의 γ 의 평균값으로 구해진다.

슬라이딩 모드 제어기 설계는 슬라이딩 평면을 설계하는

것부터 시작한다. 일반적으로 슬라이딩 평면은 상태변수들과 기준값들과의 차의 선형조합에 의해 구성된다. 따라서 식 (1)로부터 슬라이딩 평면은 태양전지 전압과 인덕터 전류의 오차의 조합으로 구성되어 질 수 있다. 태양전지 기준 전압은 최대전력점 추적이기에서 발생된 DC 전압이지만, 태양전지 전압은 정현파의 인덕터 전류로 인해서 계통주파수의 2배로 공진하게 된다. 따라서 슬라이딩 평면에 태양전지 전압을 포함할 경우 원하는 특성을 얻어낼 수 없게 된다.

계통연계형 태양광 발전 시스템의 목적은 태양전지의 최대 전력을 계통에 단위역률로 전송하는 것이다. 따라서 슬라이딩 평면은 인덕터 전류와 태양전지의 전력을 동시에 제어할 수 있게 설계되어야 한다. 이 조건은 슬라이딩 평면을 인덕터 전류만으로 정하고, 기준전류값이 태양전지의 전력으로 표시되면 만족시킬 수 있다.

계통에 전송되는 전력은 평균 태양전지 전력과 동일하며 그 수학적인 관계식은 아래와 같이 주어진다.

$$P_{sa_avg} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} e_s(t) \cdot i_L dt = \frac{V_{EP} I_{pk}}{2} \quad (3)$$

$e_s(t) = V_{EP} \sin \omega t$, $i_L = I_{pk} \sin \omega t$, $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ 로 주어지며 계통주파수 $f = 60[Hz]$ 이다. 따라서 기준 전류값은 아래의 식으로 표시된다.

$$I_{ref} = \frac{2 \cdot P_{sa_avg}}{V_{EP}} \sin \omega t \quad (4)$$

최대전력점 제어가 주기적으로 기준전류값을 갱신함으로써 P_{sa_avg} 가 P_{ref} 를 따라 가도록 제어하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$I_{ref} = \frac{2 \cdot P_{sa_avg}}{V_{EP}} \sin \omega t = \frac{2 \cdot P_{ref}}{V_{EP}} \sin \omega t \quad (5)$$

제안된 시변 슬라이딩 평면은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma(x, t) = i_L - I_{ref} = i_L - \frac{2 \cdot P_{ref}}{V_{EP}} \sin \omega t \quad (6)$$

제어 입력은 다음과 같은 구조를 갖는다.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t) \quad (7)$$

$u_{eq}(t)$ 는 슬라이딩 평면 위를 따라가게 하는 등가 입력이고, $u_n(t)$ 는 파라미터 변화나 외란하에서도 강인한 제어특성을 갖게 하는 비선형 스위칭 입력이다. 등가입력은 아래의 조건에서 얻어진다.

$$\sigma(x, t) = 0 \quad \text{and} \quad \dot{\sigma}(x, t) = 0 \quad (8)$$

$$\dot{\sigma}(x, t) = \frac{1}{L_n} (v_{sa} \cdot u_{eq}(t) - e_s(t)) - I_{pk} \omega \cos \omega t = 0 \quad (9)$$

따라서 등가입력은 아래 식으로 주어진다.

$$u_{eq}(t) = \frac{e_s(t) + I_{pk} L_n \omega \cos \omega t}{v_{sa}} \quad (10)$$

스위칭 입력 $u_n(t)$ 는 다음과 같이 선택된다.

$$u_n(t) = -\alpha \cdot \text{sgn}(\sigma), \quad \alpha > 0 \quad (11)$$

다음 단계는 $\sigma \dot{\sigma} < 0$ 을 만족시키는 α 의 범위를 결정하기 위하여 식 (6)을 전개하면,

$$\begin{aligned} \sigma \dot{\sigma} &= \sigma \left(\frac{v_{sa}}{L_n} (u_{eq}(t) + u_n(t)) - \frac{e_s(t)}{L_n} + \Delta f_2 - I_{pk} \omega \cos \omega t \right) \\ &= \sigma \left(-\frac{v_{sa}}{L_n} \alpha \cdot \text{sgn}(\sigma) + \Delta f_2 \right) < 0 \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 스위칭 이득 범위는 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha > \frac{L_n |\Delta f_2|}{v_{sa}} = \frac{L_n}{v_{sa}} \eta_2 \quad (13)$$

다음 단계는 최대전력추적기의 추적 알고리즘을 설계하는 것이다. 최대 전력점은 태양전지 전력이 기준전압보다 작은 지점에서 발견되며, 아래의 수식에 의해서 결정된다.

$$\begin{cases} P_{ref} > P_{sa_avg} & \Rightarrow P_{ref} = \text{Hold previous value} \\ P_{ref} \leq P_{sa_avg} & \Rightarrow P_{ref} = P_{ref} + \Delta \end{cases} \quad (14)$$

Δ 는 이전 단계로부터의 천이값이고, P_{ref} 는 태양전지의 주변 환경변화에 대응하기 위해서 주기적으로 reset된다.

3. 실험 결과

다음의 파라미터를 이용하여 실험을 하였다. $L_n = 2.5[mH]$, $C_n = 1000[\mu F]$, $\alpha = 3$, $T_s = 100[\mu s]$ (T_s : sampling time). 계통의 피크 전압은 25[V] 이다. $P_{ref} = 50[W]$ 일 때, 식 (4)로부터 최대 기준 전류는 4[A]로 주어진다. 그림 2에 제안된 제어기의 실험결과를 보여주고 있다. 태양전지 평균전압은 44[V]이고 태양전지 평균 전류는 1.2[A]이다. 따라서 태양전지 평균 전력은 52.8[W]이다. 전력손실 2.8[W]를 감안하면 태양전지 전력은 기준전력 50[W]에 정확히 제어되고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 3에 인덕턴스 값이 변화하였을 때 기존의 제어기와 제안된 제어기의 추적성능 비교파형을 보여주고 있다. 태양전지 전압이 리플이 있기 때문에 인덕턴스 값이 변화하였을 때 기존의 제어기는 리플 오차를 가지게 되지만 제안된 슬라이딩 모드 제어기는 강인한 추적특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 강인한 인덕터 전류제어를 할 수 있다.

4. 결론

계통 연계형 태양광 발전시스템을 위한 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였다. 슬라이딩 표면은 인덕터 전류와 태양전지 전력으로 표시되는 기준전류를 가지고 설계된다. 제안된 슬라이딩 모드 제어기로 외란에 강한 제어기를 설계할 수 있다.

이 논문은 한국과학기술원 인간친화복지로봇센터 (HWRS-ERC)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] A.Kotsopoulos and et al, "A predictive control scheme for DC voltage and AC current in grid-connected photovoltaic inverters with minimum dc link capacitance", IECON'01, P1994-P1969
- [2] Domingo Biel, Enric Fossas and et al, "Application of sliding-mode control to the design of a buck-based sinusoidal generator", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 48, No.3, June, 2001, P563-P571
- [3] Mauro Carpita and Mario Marchesoni, "Experimental study of a power conditioning system using sliding mode control", IEEE Trans. Power Electronics, Vol.11, No.5, Sep., 1996, P731-P742

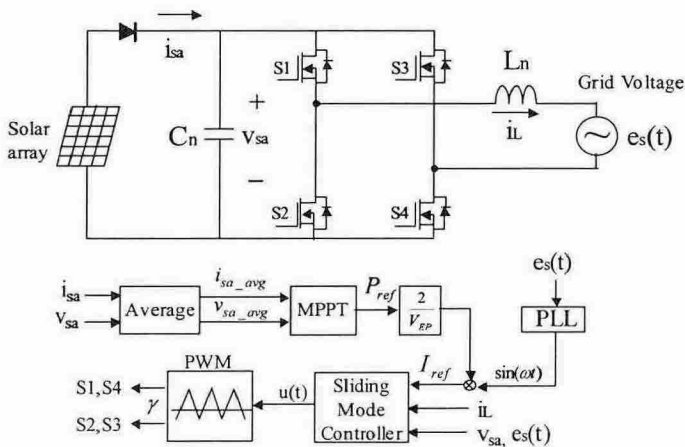


그림 1. 제안된 제어기 구성도

Fig. 1. Proposed configuration of controller for the single-stage grid-connected PV system

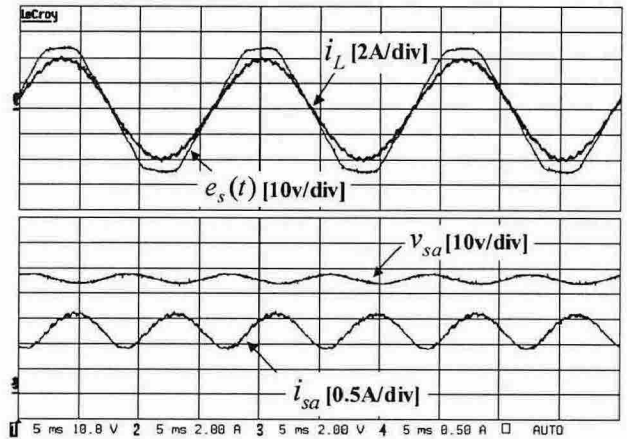


그림 2. 전압 전류 실험 파형

Fig. 2. Experimental waveforms of voltage and current

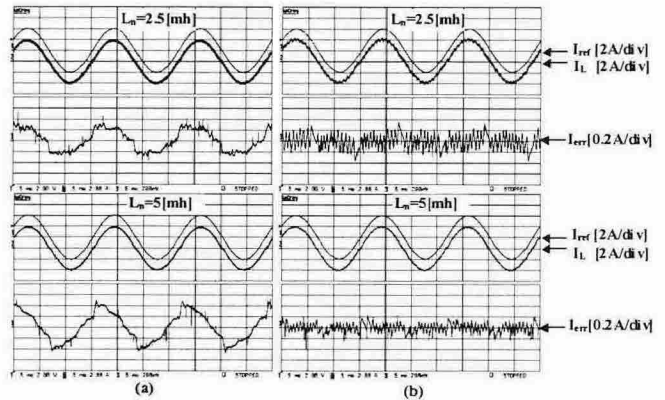


그림 3. Ln의 변화에 대한 추적 성능 비교

Fig.3 Tracking performance for a change in Ln

(a) PI+Predictive controller (b) Sliding mode controller

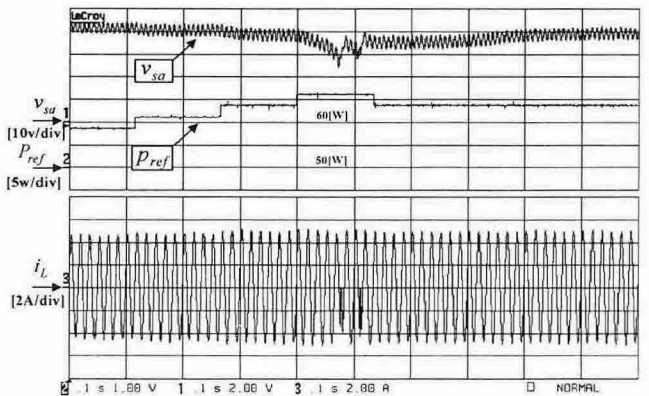


그림 4 최대전력 추적기 추적 성능

Fig. 4 MPPT tracking performance