

# 슬라이딩 모드를 이용한 직접전력제어 기반의 계통연계형 태양광 발전 시스템의 성능 개선

이준석, 이병섭, 이교범  
아주대학교

## Performance Improvement of a Grid-Connected Photovoltaic Power Conditioning System Using a Sliding-Mode Based Direct Power Control

June-Seok Lee, Byoung-Seoup Lee, and Kyo-Beum Lee  
Ajou University

### 초록

본 논문은 계통연계형 태양광 발전 시스템에서 유효, 무효 전력 주입 시 성능개선을 위한 슬라이딩 모드가 적용된 직접전력제어 기법을 제안한다. 제안하는 제어 기법은 공간벡터변조 방식이 적용된 직접전력제어에서 적합한 비례-적분제어기의 모델링을 함으로 적절한 제어기의 이득을 설정한다. 직접전력제어의 우수한 응답특성을 유지하기 위하여 가변구조제어의 한 종류인 슬라이딩 모드제어를 적용한다. 제안하는 알고리즘의 검증은 위하여 시뮬레이션을 수행하여 제안하는 제어기법의 타당성을 확인 한다.

### 1. 서 론

최근 계통연계형 발전 시스템의 여러 연구 분야 중 DC/AC 전력변환 시스템에 관한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 이 중 직접전력제어(DPC)는 즉각적으로 전력을 제어하는 방법이다<sup>[1]</sup>. 직접전력제어(DPC)는 우수한 응답속도와 간단한 구조가 장점이며, 스위칭 주파수의 변동 현상을 보완하기 위해서 공간벡터변조(SVM)가 함께 사용 된다<sup>[2]</sup>. 하지만 공간벡터(SVM)의 적용은 직접전력제어(DPC)의 응답 속도를 저감 시킨다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어(Sliding mode control : SMC) 를 이용했으며, 이것은 직접전력제어(DPC)의 장점인 빠른 동적 특성을 유지 할 수 있다. 본 논문에서는 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어(DPC)를 제안 한다.

### 2 태양광 발전 시스템

그림 1은 태양광 발전 시스템이다. PV-셀을 통해서 발전된 에너지는 부스트 컨버터의 최대 전력 전달을 위한 최대전력점 추정 (Maximum Power Point Tracking : MPPT) 알고리즘 동작과 함께 인버터로 전력을 전달한다. 인버터에서는 직접전력제어(DPC)의 유효전력 지령을 계산하여 전력을 계통으로 전달 하게 된다. 인버터 전력지령 식은 다음과 같다.

$$P^* = \frac{3}{2} I_{qe}^* V_{qe} \quad (1)$$

또한, 계통으로 출력되는 전력의 계산은 식 (2)와 같다.

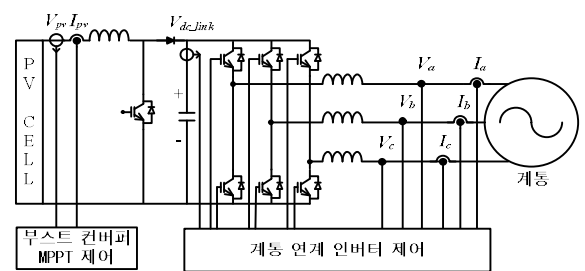


그림 1. 태양광 발전 시스템의 회로도  
Fig 1. The circuit of PCS

$$\begin{aligned} P &= i_{de} V_{de} + i_{qe} V_{qe} \\ Q &= i_{de} V_{qe} - i_{qe} V_{de} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)을 통해서 결정된 전력 지령과 출력전력의 차가 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기의 입력이 된다.

### 3. 슬라이딩 모드(SMC) 기반의 비례-적분 제어기

#### 3.1 직접전력제어(DPC)의 비례-적분 제어기 설계

직접전력제어(DPC)에서 제어기의 입력은 전력의 오차, 출력은 인버터 스위칭 동작을 위한 지령전압이다. 전체제어시스템의 블록도는 그림 2와 같다.

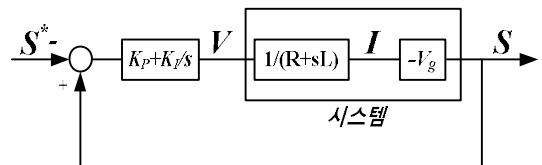


그림 2. 비례-적분 제어기 블록도  
Fig 2. PI power controller

시스템의 출력전력은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$S = P_s + jQ_s = \frac{3}{2} (i_{gd} v_{gd} + i_{gq} v_{gq}) + j(i_{gd} v_{gq} - i_{gq} v_{gd}) \quad (3)$$

식 (3)에서 계통전압  $v_g$ 의 전압변동은 실제로 작다고 할 수

있다. 따라서 계통전압  $V_g$ 를 상수로 계산하여 전달함수를 구하면 비례-적분 제어기의  $K_P$ ,  $K_I$  값을 설계 할 수 있다.

그림 2 블록도의 개루프 전달함수를 구하면 식 (4)와 같다.

$$G_c^o = \frac{S}{S^*} = \frac{K_P (s + K_I/K_P)}{L s(s + R/L)} V_g \quad (4)$$

식 (4)에서 제어기의 영점( $-K_I/K_P$ )이 극점( $-R/L$ )을 상쇄 시키도록 설계하고 전달함수의 이득이 1이 되는 차단 주파수를 구하면 식 (5)와 같다.

$$w_{cc} = K_P V_g / L \quad (5)$$

제어기의  $K_P$ ,  $K_I$  값을 결정 할 수 있다.

$$K_P = L\omega_{cc} / V_g, \quad K_I = R\omega_{cc} / V_g \quad (6)$$

### 3.2 슬라이딩 모드 제어 적용

슬라이딩 평면은 식 (7)과 같이 전력과 전력 지령의 오차 그리고 오차의 미분 형태의 합으로 구성된다.

$$S_{P,Q} = e_{P,Q} + k_{P,Q} \frac{de_{P,Q}}{dt} \quad (7)$$

슬라이딩 모드가 적용된 제어입력 식은 다음과 같다.

$$u_{P,Q} = e_{P,Q} + K_{SP,SQ} \text{sgn}(S_{P,Q}) \quad (8)$$

정상 상태에서는 오차가 0에 가깝기 때문에 슬라이딩 모드 제어는 작은 노이즈에도 민감한 반응을 하게 되어 떨림(chattering)현상을 발생시킨다. 이 문제를 해결하기 위하여 스위칭 함수( $\text{sgn}(S_{P,Q})$ )를 식 (9)와 같이 정의한다.

$$\text{sgn}(S_{P,Q}(t)) = \frac{S_{P,Q}(t)}{|S_{P,Q}(t)| + r} \quad (9)$$

여기서  $r = \begin{cases} 0, & |S_{P,Q}(t)| \geq \delta \\ \lambda, & |S_{P,Q}(t)| < \delta \end{cases}$ 이며,  $\lambda$ 는 큰 양수 값,  $\delta$ 는 작은 양수 값이다.

### 3. 시뮬레이션

알고리즘 검증을 위하여 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 파라미터  
Table 1 Simulation parameter

계통전압	220 [V]
직류단 전압	700 [V]
스위칭주파수	20 [kHz]

그림 3과 그림 4를 비교해 볼 때, 슬라이딩 모드 제어기가 추가 되었을 때, 응답 특성이 개선되는 것을 확인 할 수 있

며, 그림 4의 Sgn함수가 1이 됨에 따라 슬라이딩 모드 제어기 동작했음을 확인 했다.

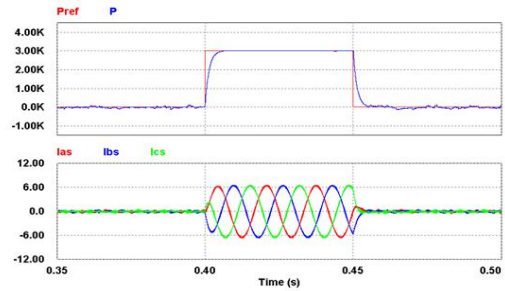


그림 3 DPC를 이용한 유효전력제어  
(a)유효전력지령/유효전력, (b)출력전류  
Fig 3. Active power control with DPC

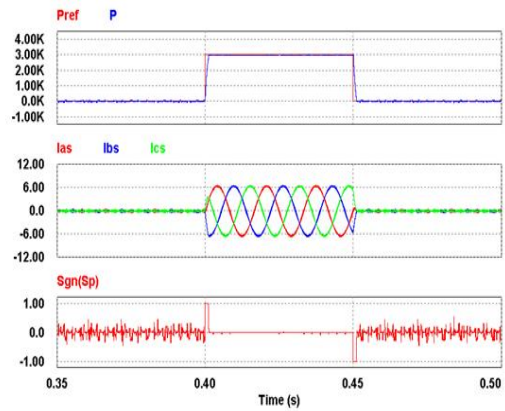


그림 4 DPC-SMC를 이용한 유효전력제어  
(a)유효전력지령/유효전력, (b)출력전류, (c) Sgn(Sp)  
Fig 4. Active power control with DPC-SMC

## 4. 결론

본 논문에서는 출력 전력의 응답 특성 개선을 위한 슬라이딩 모드가 추가된 직접전력제어를 제안하였다. 제안한 방법을 이용했을 경우 응답 특성이 개선됨을 모의 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

본 논문은 2011년도 한국에너지기술평가원(지식경제부)의 재원으로 에너지자원기술개발사업 지원을 받아 수행된 것임(20111020400030-11-1-000).

### 참고 문헌

- [1] S. T. Jou, S. B. Lee, Y. B. Park, and K. B. Lee, "Direct Power Control of a DFIG in Wind Turbines to Improve Dynamic Responses," Journal of Power Electronics, Vol. 9, No. 5, pp. 781-790, Sept. 2009.
- [2] D. K. Chwa and K. B. Lee, "Variable Structure Control of the Active and Reactive Powers for a DFIG in Wind Turbines," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 46, No. 6, pp. 2545-2555, Nov. 2010.