

태양광 발전 시스템의 Deadbeat 제어방식을 적용한 Double Loop 제어기설계

장한준, 한준혁, 김일송

한국교통대학교

Design of Double Loop Controller applying Deadbeat Control Method of Photovoltaic Power Generation System

Han-Joon Jang, jun-hyeok Han, Il-Song Kim

KOREA NATIONAL UNIVERSITY OF TRANSPORTATION

ABSTRACT

In this paper, the application of the MPPT (P&O) algorithm that can stably track the maximum power point and In order to have fast response characteristics, a 3-level solar boost converter with deadbeat control method was proposed. In addition, the unstable aspect in the transient response section has been improved, It is demonstrated through simulation that it is possible to increase the tracking speed for the maximum power point.

1. 서론

태양전지는 온도와 입사량의 변화에 따라 최대 출력을 얻어내기 위해 최대전력추적(MPPT : Maximum Power Point Tracking) 알고리즘이 사용되고 있다. 또한 대부분의 상용제품에서는 Hill Climbing Method(Perturb & Observation)이 적용되고 있다. 이 알고리즘은 단순하면서도 매우 안정적인 동작을 보이는 장점이 있지만, 일정한 Step으로 기준값을 변화시키기 때문에 최대전력점에 추종하는 시간이 길어질 수 있다는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해 빠른 추적 속도를 가지는 알고리즘들이 연구되고 발표되어왔다. 하지만 개선된 알고리즘들은 빠른 추적속도를 가지지만 시스템 구성이 복잡하고 안정성이 저하된다는 단점도 역시 가지고 있다.

기존 형태의 Double loop의 제어기 구조는 Cascade 구조로 내부의 전압제어기와 기준 전압값을 발생시키는 MPPT제어기로 구성되어 있다. 이로 인해 내부제어기의 응답속도에 따라 전체 시스템의 응답특성이 결정되기 때문에 MPPT 제어기의 추적속도가 빠르더라도 내부제어기의 속도가 충분히 빠르지 않으면 MPPT제어기와 전압제어기의 간섭이 발생한다.

이 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 내부제어기에 매우 빠른 응답속도를 가지는 Dead-beat 전류제어기를 설계하는 방법을 서술한다. MPPT는 전류 기반의 P&O 알고리즘을 사용하여 안정성을 가지면서 빠른 시간 내에 최대전력점에 추종할 수 있는 장점을 가지고있다.

또한 태양광 발전 시스템이 대전력화가 됨에 따라 효율이 우수하고, 높은 정전압에서 사용되기 위해서는 기존의 Boost Converter보다는 높은 전력밀도와 효율성이 우수한 Three Level Boost Converter를 선정하여 제어기법을 적용하였다. 그림 1에 Solar Three Level Boost Converter 구성을 나타내었다.

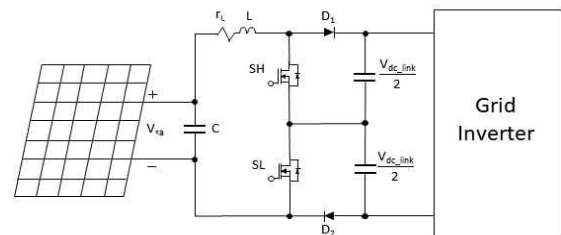


Fig 1. Solar Three level boost converter configuration

2. 태양광 발전 시스템의 제어기설계

2.1 태양전지의 선형화 모델

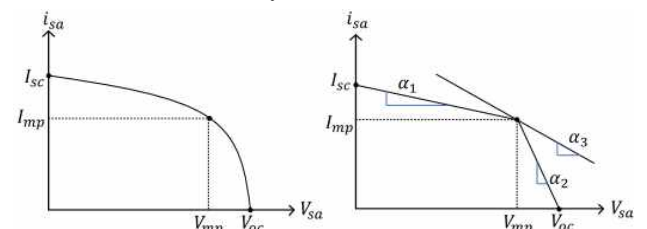
제어기설계 시 태양전지의 동작범위에 따라 선형화 방정식을 세울 수 있다. 일반적으로 첫 동작 시 개방전압($v_{sa} > v_{mp}$ 의 영역)에서 시작하므로 식(3)번을 적용하고, 정상상태에 도달하게 되면 MPPT의 동작을 위해 식(4)번을 적용하면 된다.

$$i_{sc} = -\alpha \cdot v_{sa} + \beta \quad (1)$$

$$\text{if } (v_{sa} < v_{mp}) \rightarrow \alpha_1 = \frac{i_{sc} - i_{mp}}{v_{mp}}, \beta_1 = i_{sc} \quad (2)$$

$$\text{if } (v_{sa} > v_{mp}) \rightarrow \alpha_2 = \frac{i_{mp}}{v_{oc} - v_{mp}}, \beta_2 = \frac{v_{oc} \cdot i_{mp}}{v_{oc} - v_{mp}} \quad (3)$$

$$\text{if } (v_{sa} = v_{mp}) \rightarrow \alpha_3 = \frac{i_{mp}}{v_{mp}}, \beta_3 = i_{mp} \quad (4)$$



(a) Functional model (b) Piecewise linear model
Fig 2. Solar cell piecewise linear modeling

2.2 태양광용 컨버터 모델링

기존의 DC-DC컨버터는 출력전압을 제어하도록 설계하지만, 인버터 Type 중 PCS모드의 동작을 하기 위해서는 DC-DC컨버터의 출력전압이 고정되어 있어야 하므로 기존의 컨버터 제어방식이 맞지 않는다. 따라서 이 모델링에서는 태양전지의 출력전압을 상태 변수로 놓고, 컨버터의 출력전압인 DC-Link 값을 고정시킨 모델을 구성해야 한다.

2.2.1 Duty ratio에 따른 동작모드

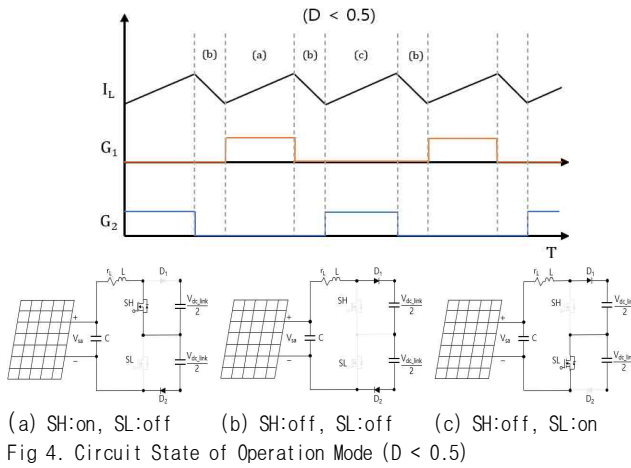
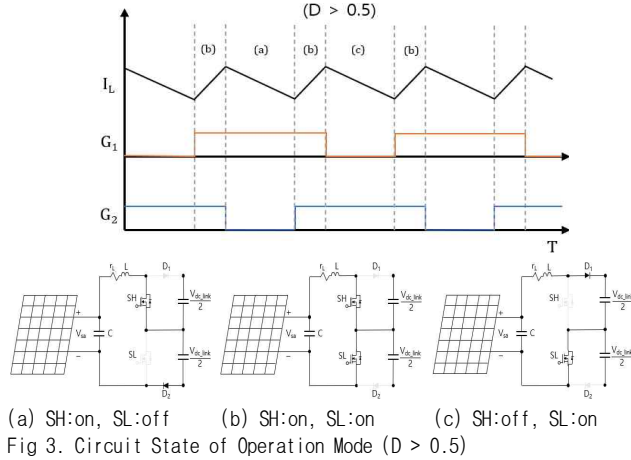


그림 5와 같이 Duty가 0.5 이상일 경우, (a)구간에서는 하단의 DC-Link를 충전시키고 상단의 DC-Link는 방전시키며 인덕터는 전원과 함께 부하에 에너지를 공급한다. 그리고 (b)구간에서의 인덕터는 전원에 의해 충전되고 상·하단의 DC-Link는 방전한다. 마지막으로 (c)구간에서는 상단의 DC-Link를 충전시키고 하단의 DC-Link는 방전시키며 이전에 충전되었던 인덕터는 전원과 함께 부하에 에너지를 공급한다.

그림 6과 그림 5는 (b)구간이 다르다. Duty가 0.5 이하일 경우, (b)구간에서는 전원에 의해 상·하단의 DC-Link의 에너지가 충전되고, 인덕터의 에너지는 방전된다.

2.3 태양광 시스템의 Dead-beat 제어 구조

그림 5에 제안하는 제어기 구조를 나타내었다. Inner loop에 Dead-beat 전류제어기와 Outer loop에 기준 전류(reference current)값을 출력하는 MPPT 알고리즘으로 구성되어 있다. 이 구조의 장점은 1-Step에 전류 오차를 0으로 만들 수 있어서 전체 시스템의 응답특성을 매우 빠르게 만들 수 있다는 장점이 있다.

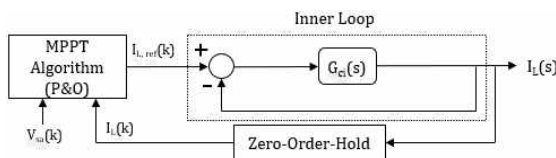


Fig 5. The configuration of the MPPT by current control

2.3.1 상태 공간 평균화 방정식 모델링

그림 3의 (b)구간에서 상태 공간 표현식은 다음과 같다. KVL에 의해

$$V_{sa} = V_L \rightarrow v_{sa} = r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} \quad (5)$$

KCL에 의해 [(1)식 적용]

$$I_{sa} = I_L + I_C \rightarrow -\alpha \cdot v_{sa} + \beta = i_L + C \frac{dv_{sa}}{dt} \quad (6)$$

따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_{sa}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{\alpha}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ v_{sa} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\beta}{C} \end{pmatrix} \quad (7)$$

그림 3의 (c)구간에서 상태 공간 표현식은 다음과 같다.

KVL에 의해

$$V_{sa} = V_L + \frac{V_{dcLink}}{2} \rightarrow v_{sa} = r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} + \frac{V_{dcLink}}{2} \quad (8)$$

KCL에 의해 [(1)식 적용]

$$I_{sa} = I_L + I_C \rightarrow -\alpha \cdot v_{sa} + \beta = i_L + C \frac{dv_{sa}}{dt} \quad (9)$$

따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_{sa}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{\alpha}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ v_{sa} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{V_{dcLink}}{2L} \\ \frac{\beta}{C} \end{pmatrix} \quad (10)$$

두 구간에서의 표현식을 이용하여 상태 공간 평균화 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_{sa}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{\alpha}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ v_{sa} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_{dcLink}}{2L} \\ \frac{\beta}{C} \end{pmatrix} d + \begin{pmatrix} -\frac{V_{dcLink}}{2L} \\ \frac{\beta}{C} \end{pmatrix} \quad (11)$$

이때 위와 같은 방식으로 D 가 0.5 이하일 때의 상태 공간 방정식을 세워 상태 평균화 방정식으로 변환시키면, 동일함으로 Full duty range에서 동작 가능한 상태공간 표현식을 얻을 수 있다.

2.3.2 Discrete State Space Equation 변환

식(11)의 Continuous Time equation을 Forward Conversion을 이용하여 Discrete Time Equation으로 변환하면 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + Bu + v$$

$$\rightarrow x(k+1) = e^{AT}x(k) + A^{-1}(e^{AT} - I)[Bu + v] \\ = (I + AT)x(k) + T[Bu + v] \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} I_L(k+1) \\ V_{sa}(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{r_L T}{L} & \frac{T}{L} \\ -\frac{T}{C} & 1 - \frac{\alpha T}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_L(k) \\ V_{sa}(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{TV_{dcLink}}{2L} \\ 0 \end{pmatrix} D(k) + \begin{pmatrix} -\frac{TV_{dcLink}}{2L} \\ \frac{\beta T}{C} \end{pmatrix} \quad (13)$$

2.3.3 Deadbeat 제어 설계

태양광 발전 시스템의 컨버터는 출력전압이 고정되어 있어야 하며, 시스템의 응답속도가 가장 빠른 전류제어를 Inner loop로 설정해야 한다.

$$I_L(k+1) = (1 - \frac{r_L T}{L})I(k) + \frac{T}{L}V_{sa} + \frac{TV_{dcLink}}{2L}D(k) - \frac{TV_{dcLink}}{2L} \quad (14)$$

Input : $D(k) = d_{ff}(k) + d_{fb}(k)$

Feedforward : $d_{ff}(k) = \frac{V_{dcLink} - 2*V_{sa}(k)}{V_{dcLink}}$

PI제어 [pole-1, zero-1] : $d_{fb}(k)$

$$G(z) = \frac{u_{fb}(z)}{e(z)} = \frac{K_p(z - K_z)}{z - K_i} \Rightarrow u_{fb}(z) = \frac{K_p(z - K_z)}{z - K_i} e(z) = d_{fb}(z)$$

위 (14)식을 정리하면 [z-변환]

$$zI_L(z) = (1 - \frac{r_L T}{L})I_L(z) + \frac{TV_{dcLink}}{2L} \left[\left(\frac{K_p(z - K_z)}{z - K_i} \right) (I_{ref}(z) - I_L(z)) \right] \quad (15)$$

따라서

$$\frac{I_L(z)}{I_{ref}(z)} = \frac{TV_{dcLink}K_p(z - K_z)}{2L \left(z^2 + \left(\frac{r_L T}{L} - 1 - K_i + \frac{TV_{dcLink}K_p}{2L} \right) z + \left(1 - \frac{r_L T}{L} \right) K_i - \frac{TV_{dcLink}}{2L} K_p K_z \right)} \quad (16)$$

Dead-beat 특성을 가지기 위해서 특성방정식의 분모를 z^2 로 만들어야 한다. 결과식은 다음과 같다. 이때 K_i 는 $0 < K_i < 1$ 범위에서 값을 갖는다.

$$\frac{r_L T}{L} - 1 - K_i + \frac{TV_{dcLink}}{2L} K_p = 0 \Rightarrow K_p = \frac{2L}{TV_{dcLink}} (1 - \frac{r_L T}{L} + K_i) \quad (17)$$

$$\left(1 - \frac{r_L T}{L} \right) K_i - \frac{TV_{dcLink}}{2L} K_p K_z = 0 \Rightarrow K_z = \frac{2L}{K_p TV_{dcLink}} \left\{ K_i \cdot \left(1 - \frac{r_L T}{L} \right) \right\} \quad (18)$$

3. 시뮬레이션 및 해석

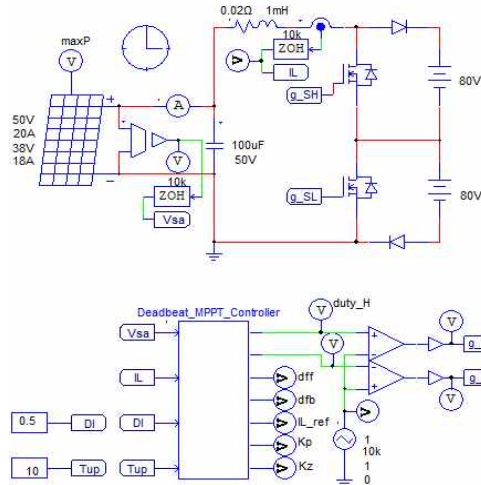


Fig 6. Solar Three Level Boost Converter simulation circuit

그림 6에 제안된 시스템의 simulation schematic을 나타내었다.

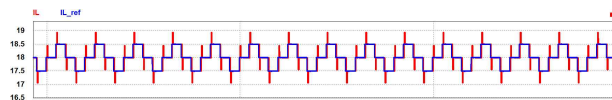


Fig 7. The dead-beat current waveform

그림 7은 Dead-Beat 전류제어의 정상상태를 보여주는 파형이다.

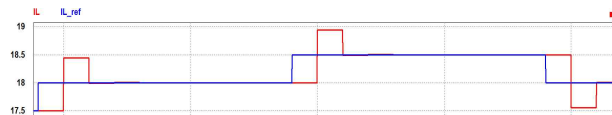


Fig 8. Current error in one cycle is 0

그림 8은 그림 7의 확대한 파형으로 1-Step만에 전류오차를 0으로 만들 수 있음을 보여주는 파형이다.

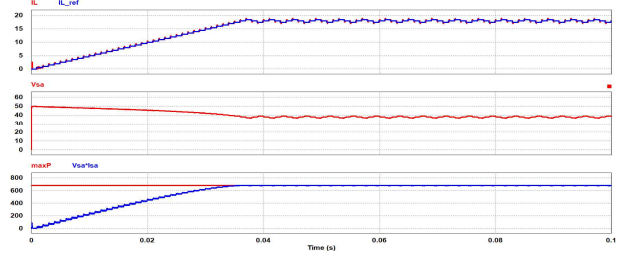


Fig 9. Simulation results of MPPT algorithm(P&O) using the Dead-beat Control

그림 9는 기준전류에 대한 전류 전이 과정을 시뮬레이션 통해 나타내었다. 또한 P&O 알고리즘을 적용하여 최대전력점까지 0.4초 이내에 수렴하는 것을 알 수 있다.

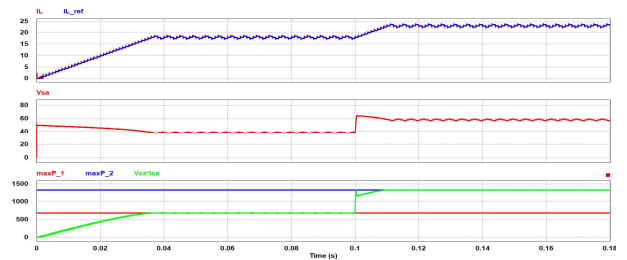


Fig 10. Variation with Temperature and Solar radiation.

그림 10은 온도와 입사량이 급변하였을 때 새로운 최대전력점에 도달하는 시뮬레이션 파형을 보여주고 있다. 동작 조건이 급변하더라도 제안한 제어시스템이 매우 빠른 속도로 최대전력점을 잘 추적하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템을 적용한 3-레벨 Solar Boost 컨버터에서 새로운 제어기 설계방식을 제안하였다. 제안된 제어기는 Double loop 구성으로 전류 기반의 MPPT algorithm(P&O)과 Dead-beat 전류제어기의 구성을 갖는다.

페루프 시스템의 응답특성은 MPPT 제어기의 추적 속도가 아무리 빠를지라도 결국 내부제어기의 응답속도에 의해 제한을 받기 때문에 Inner loop의 응답속도를 빠르게 동작시킬수록 최대전력점에 빠르게 도달함을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

이 논문은 2023년 한국연구재단 기초연구과제(201800870006)와 2023년 산업부 인력 양성 사업(202200490002)의 연구비 지원으로 작성되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] K. M. Lee, I. S. Kim "A Study on the Controller Design of the Three-Level Boost Converter for Photovoltaic Power Conditioning System", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics Vol. 26, No. 3, pp. 227-236, June, 2021.
- [2] C. M. Kim, J. S. Kim "Comparative Analysis of Efficiency and Power Density of Single-Phase and 3-Level Boost Converters for PV System", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 25, No. 2, pp. 127-132, April, 2020.