

# 극점배치기법을 이용한 계통 연계형 인버터의 사인입력 기준전압 추적 상태궤환 전류제어기

배현수, 이성준, 최규식, 조보형  
 서울대학교 전기공학부

## Sine Reference Tracking State Feedback Current Controller for the Grid-connected Inverter using the Pole Placement Technique

H. S. Bae, S. J. Lee, K. S. Choi, B. H. Cho  
 Department of Electrical Engineering, Seoul National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 태양광 발전 및 연료전지 시스템에서 사용되는 계통 연계형 인버터에 적용 가능한 새로운 전류제어기 설계 방법을 제안한다. 제안된 상태궤환 전류제어기는 극점배치기법을 이용하여 주어진 시스템 요구사항에 따른 체계적인 제어기 설계가 가능하며, 계통 전압과 동상을 가지도록 계통 주입전류를 제어한다. 이에 따라, 사인입력 기준전압을 추적할 수 있는 상태궤환 제어 알고리즘을 인버터의 대신호 평균 모델을 이용하여 설계하고, 200W급 계통 연계형 2단 구조 태양광 발전 전력변환 축소 시스템의 실험을 통하여 그 성능을 검증한다.

### 1. 서 론

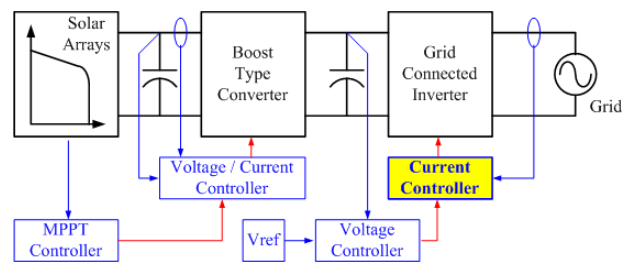
최근 화석연료 및 석유등 천연자원들의 부족으로 인한 대체 에너지에 대한 관심이 크게 증가되고 있다. 그 중 태양전지나 연료전지의 경우 환경오염이 없는 에너지원으로서 하나의 중요한 해로 고려되어지고 있다. 이들 대체에너지를 이용한 전력계 시스템은 크게 독립 운전형 시스템과 계통 연계형 시스템으로 분류할 수 있다. 현재 많은 분야에서 그 구조 및 구현의 용이성으로 인해 계통 연계형 전력시스템의 구현에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup> 이들 계통 연계형 전력시스템에서는 기본적으로 상용 계통라인 전압에 동상을 가지는 계통 주입전류를 생성하기위한 계통 연계형 인버터를 포함하고 있다. 본 논문에서는 이들 인버터의 계통 주입전류를 제어할 수 있는 새로운 내부 전류제어기 설계방법에 대하여 논의한다.

본 논문에 사용된 상태궤환제어기는 일반적으로 단상 인버터 시스템의 전류제어에 많이 사용되는 PI제어기와 달리 주파수 영역의 보드선도 해석을 통한 방법이 아니라, 시간영역에서의 페루프 극점배치 방법을 사용한다. 이에 제안되어진 제어기 설계방법은 주어진 시스템 사양에 따른 시간영역 해석으로 체계적인 제어기 설계가 가능하다. 본 논문에서는, 연료전지 및 태양전지 등에 사용되는 계통 연계형 인버터의 주입전류 제어를 위한 사인입력 기준전압 추적제어를 위한 상태궤환 제어기를 소개하고, 200W급 계통 연계형 2단 구조 단상 태양광 발전 전력변환 축소 시스템의 실험을 통하여 그 성능을 검증한다.

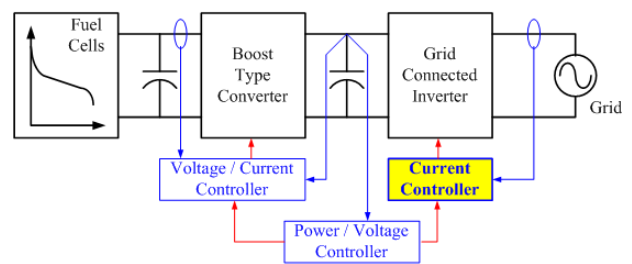
### 2. 연료전지 및 태양광 발전 시스템

수 kW급에 주로 적용되는 2단 구조 계통 연계형 태양전지

및 연료전지 발전 시스템은 그림 1과 같이 일반적으로 부스트 컨버터와 계통 연계형 인버터 시스템으로 구성되어 있다. 60Hz 저주파와 트랜스포머를 제거함과 동시에 DC링크 전압을 높임으로서 저 전류 시스템 구현됨으로 시스템 효율을 증대시킬 수 있는 장점으로 인해 현재 주로 채택되어지고 있다. 그림 1의 일반적인 제어시스템 구조에서 알 수 있듯이 서로 다른 여러 가지 제어 방식을 요구하나 두 시스템 모두 공통적으로 대체 에너지원에서 발생된 DC전력을 최종 출력단 계통라인에 주입하기 위한 전류제어루프를 가지고 있다. 일반적으로 PI제어기나 공진형제어기, D-Q변환을 이용한 제어기 등이 제안되어져 왔으나, 이들 제어방식은 모두 주파수영역 해석을 통해 설계되어져 왔다. 본 논문에서는 시간영역 설계 및 해석을 통해 페루프 극점을 결정하는 상태궤환 제어기 설계방법을 논의한다. 제안된 극점배치기법을 이용한 제어기 설계방법은 주어진 시스템의 성능 요구조건에 따른 체계적인 제어기 설계가 용이한 장점을 가진다.



(a) Typical 2-stage Photovoltaic Power Conditioning System



(b) Typical 2-stage Fuel Cells Power Conditioning System

그림 1 일반적인 태양전지 및 연료전지 발전 시스템  
 Fig. 1 Conventional 2-stage Grid-connected type Power Conditioning System (PCS)

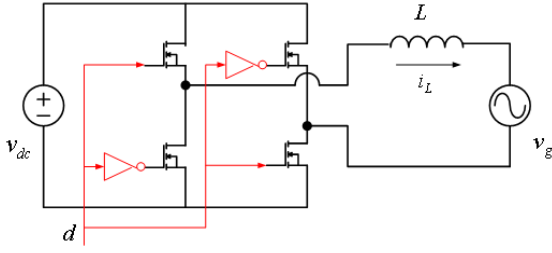


그림 2 계통 연계형 인버터 모델  
Fig. 2 Grid-connected Inverter Model

### 3. 사인입력 기준전압 추적 제어를 위한 상태궤환 제어 알고리즘

계통 연계형 인버터의 전류제어기는 계통라인 전압과 동상인 전류 형태인 사인입력 기준전압( $I_{ref} = a \cdot \sin(\omega t)$ )을 입력으로 받아 출력 인덕터 전류를 제어한다. 그림 2의 인버터 모델은 쌍극성(bi-polar) 스위칭 방식으로 제어될 경우의 예이며, 단극성(uni-polar) 스위칭 방식도 거의 동일한 방식으로 구현되어질 수 있다. 인버터의 대신호 평균 모델은 한 스위칭 주기 내에서 인버터 입력단에 걸리는 전압으로 그림 2를 통해 아래와 같이 구할 수 있다.

$$i_L = \frac{2V_{dc}}{L}d - \frac{v_g}{L} - \frac{V_{dc}}{L} \quad (1)$$

단, 여기서 입력 DC링크 전압은 한 스위칭 주기 동안 변하지 않고 유지된다( $v_{dc} = V_{dc}(const.)$ )고 가정한다. 수식(1)을 상태방정식 표현으로 다시 수식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B_1d + B_2v_g + B_3, \quad y = Cx \quad (2)$$

$$\text{where } A = 0, B_1 = \frac{2V_{dc}}{L}, B_2 = -\frac{1}{L}$$

$$B_3 = -\frac{V_{dc}}{L}, C = 1$$

여기서, 상태와 입력전압은 각각  $x = i_L$ ,  $v_g = b \cdot \sin(\omega t)$ 이다. 주어진 제어 목적은 시스템 계수값의 변동이나 외란이 존재하더라도 주어진 사인입력 기준전압을 추적할 수 있어야 한다. 이를 위해 확장 상태변수를 아래와 같이 다시 정의한다.

$$\ddot{x} = A\dot{x} + B_1\dot{d} + B_2\dot{v}_g, \quad z = w^2x + \ddot{x} \quad (3)$$

$$u = w^2d + \ddot{d} + \frac{B_3}{B_1}w^2, \quad e = I_{ref} - y$$

확장 상태변수를 이용하여 정리하면 다음과 같이 상태방정식을 재정리할 수 있다.

$$\dot{z} = Az + B_1u \quad (\because w^2v_g + \ddot{v}_g = 0) \quad (4)$$

$$\ddot{e} = -w^2e - Cz \quad (\because w^2e + \ddot{e} = -Cz)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \ddot{e} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ -w^2 & 0 & -C \\ 0 & 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_1 \end{bmatrix} u, \quad u = -\mathbf{K}^{3 \times 1} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \\ z \end{bmatrix}$$

확장된 상태방정식이 가제어성을 가진다면, 확장된 시스템을 안정하도록 하는 상태궤환 이득( $[K_1 K_2 K_3]$ )이 존재한다. 이는 에러가 없어짐을 이야기함으로 주어진 사인입력 기준전압을 추적함을 나타낸다. 또한, 극점배치기법을 이용하여 전체 제어시스템의 성능을 결정하여 줄 수 있다. 극점이 3개이기에 주요극점 배치방법을 사용한다면, 2개의 극점을 2차계 시스템의 성능지수를 이용하여 원하는 성능에 맞게 배치할 수 있고 나머지 하나의 극점은 3-5배 밖에 위치시키면 된다. 단, 스위칭 주파수의 1/2이상에서는 모델의 타당성을 잃어버리게 되므로 그 이하에 위치시켜야하며, 디지털 구현이라면 샘플링 및 연산지연을 고려해서 위치시켜야 한다.<sup>[2]</sup>

실제 인버터의 제어입력은 시비율( $d$ )이므로, 수식(3)의 확장변수 제어입력을 역변환하여야 한다. 이는 선형시스템의 원리를 이용하여 간단히 아래와 같이 계산할 수 있으며, 전체 제어시스템 개념도를 그림 3에서 나타내었다.

$$u = -K_1e - K_2\dot{e} - K_3w^2x - K_3\ddot{x} = w^2d + \ddot{d} - \frac{w^2}{2}$$

Using  $\mathcal{L} - \text{Trans.}$

$$D(s) = -\frac{K_2s + K_1}{s^2 + w^2}E(s) - \frac{K_3X(s)}{D_2(s)} + \frac{w^2}{2} \frac{1}{s(s^2 + w^2)}$$

$$D_1(s) \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \ddot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -w^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e$$

$$d_1(t) = [-K_1 - K_2] \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \end{bmatrix}$$

$$D_2(s) \Leftrightarrow d_2(t) = -K_3x$$

$$D_3(s) \Leftrightarrow d_3(t) = 0.5(1 - \cos(\omega t)) \quad (5)$$

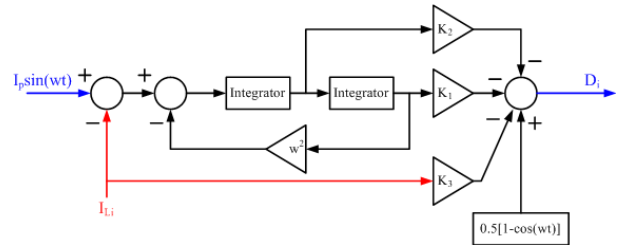


그림 3 사인입력 기준전압 추적 상태궤환 전류 제어기  
Fig. 3 Sine Reference Tracking State Feedback Current Controller

### 4. 계통 연계형 단상 2단 구조 태양광 발전 전력변환 시스템 예제

제안되어진 전류제어기를 검증하기 위해 계통 연계형 단상 2단 구조 태양광 발전 전력변환 시스템에 그림 4와 같이 적용시켜 보았다. 실제 구성상의 이유로 인해 1/10 축소 시스템으로 제작되어졌으며, 200W급 실제 태양전지와 TMS320F2812 디지털 프로세서를 이용하여 구현하였다. 앞단 부스트 컨버터는 태양전지의 동작점이 주변 환경의 변화에 따라 태양전지의 최대 전력 출력점이 되도록 제어하며, 뒷단 인버터는 출력 전류를 계통 전압과 동상이 되도록 제어함과 동시에 DC링크단의 전압을 일정전압으로 고정시키는 제어를 수행한다.

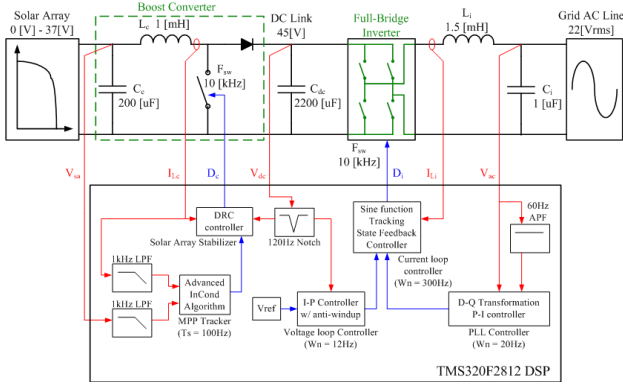


그림 4 계통 연계형 2단 구조 태양광 발전 축소 시스템  
Fig. 4 Prototype Grid-connected 2-Stage Photovoltaic Power Conditioning System

그림 5는 제안되어진 축소 태양광 발전 시스템의 초기 기동 파형을 보여준다. 실내 실험 및 동일 조건의 다양한 실험을 위해 HID램프를 이용하여 태양을 묘사하였으며, 태양전지가 발전을 시작하여 DC링크 전압이 계통라인에 전류를 주입할 수 있는 최소 전압이 되는 순간에 전체 시스템이 기동되도록 설계하였다. 초기 기동 후 일사량과 온도의 변화가 안정화되는 기간동안에도 최대 전력점 추적제어가 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 태양전지에서 일정 전력으로 발전을 하는 도중에 일사량을 1/2로 급감을 시켜보았다. 그림 6에서 알 수 있듯이 여전히 태양전지의 최대전력점을 잘 추적하면서 DC링크 전압 및 인버터 출력전류를 잘 제어함을 확인할 수 있다. 그림 7은 정상상태에서의 확대 파형으로 제안되어진 사인입력 기준전압 추적 전류제어기가 인버터 출력전류를 계통전압과 동상이 되도록 잘 제어하고 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

계통 연계형 태양전지 및 연료전지 발전 시스템에서 사용되는 계통 연계 인버터의 출력전류를 제어할 수 있는 새로운 전류제어기를 제안하였다. 계통전압과 동상이 되도록 하기 위한

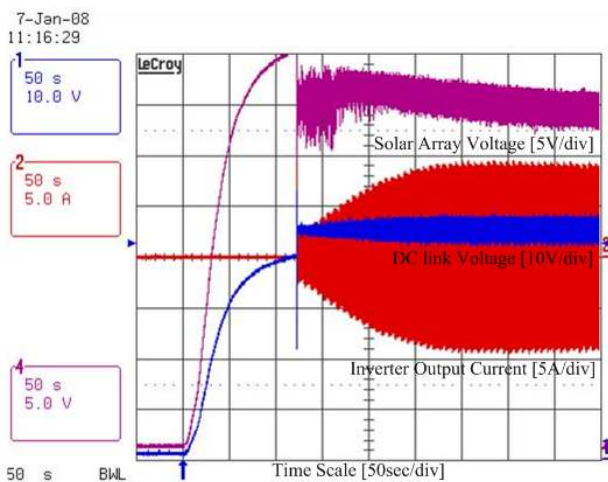


그림 5 제안된 시스템의 초기 기동 파형  
Fig. 5 Startup Transient Waveform of Proposed Control System

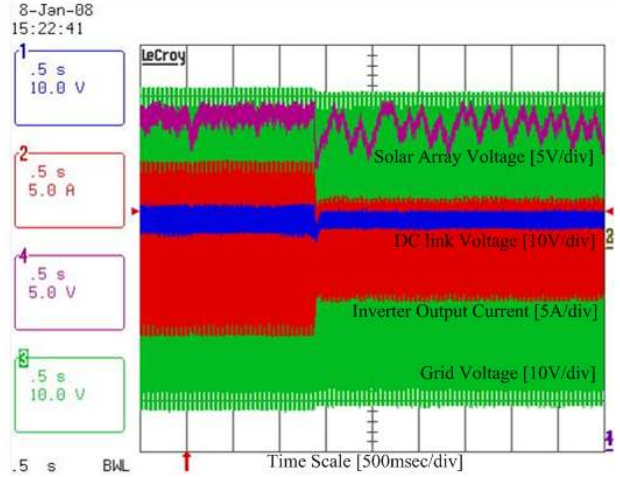


그림 6 제안된 시스템의 태양전지 일사량 급변 시 성능  
Fig. 6 Performance of Proposed Control System during Illumination Step Change

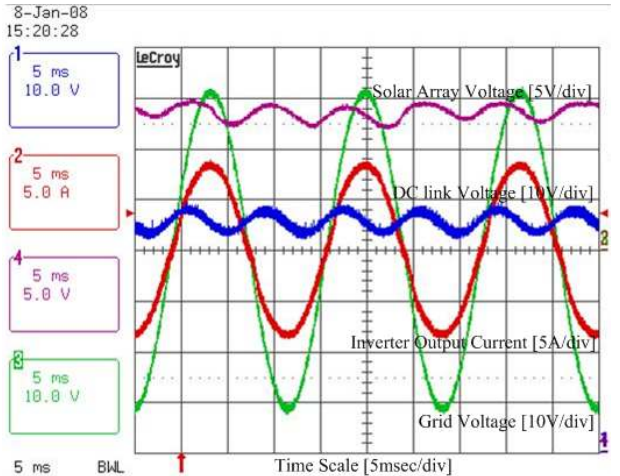


그림 7 제안된 시스템의 정상상태 확대 파형  
Fig. 7 Enlarged Steady State Waveform of Proposed Control System

사인입력 기준전압 추적제어가 가능한 상태제한 전류제어기를 설계하였으며, 극점배치기법을 이용하여 체계적으로 설계할 수 있음을 보였다. 태양전지를 이용한 축소 모델 계통 연계 시스템 실험을 통해 제안된 제어방법을 검증하였다.

이 논문은 효성중공업연구소의 연구비 부분지원에 의하여 연구되었음

## 참고 문헌

- [1] R. Thibault, K. Al-haddad, and L. A. Dessaint, Three Phase Grid Connected converter with an Efficient Power Flow Control Algorithm: Experimental Validation, IEEE ISIE 2006, pp. 1305-1310, 2006, July.
- [2] C.-T. Chen, Linear System Theory and Design, Third ed. Oxford university press, 1999.