

단상 계통 연계 태양광 인버터의 소신호 모델링 및 제어기 설계

이성준, 배현수, 최규식, 조보형
서울대학교 전기·컴퓨터공학부

Small Signal Modeling and Control Design of a Single-Phase Grid-Connected Inverter for the Photovoltaic System

S.J. Lee, H.S. Bae, K.S. Choi, B.H. Cho
School of Electrical Engineering and Computer Science
Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 단상 계통 연계 태양광 인버터의 소신호 모델링을 통한 체계적인 제어기 설계 방법을 제안한다. 계통 연계 태양광 인버터의 내부 전류제어기는 계통 전압과 동상이 되도록 계통 주입 전류를 제어하고, 외부 전압제어기의 태양전지 안정화 제어를 통해 태양전지의 최대전력점 추적제어를 수행한다. 태양전지의 전 동작 영역에서 안정적인 동작 수행과 계통 주입 전류 제어를 위한 태양전지 전압 제어기 및 인버터 전류 제어기의 안정도 해석 및 설계 방법을 소신호 모델링을 통해 제시한다. 본 연구에 제안된 방법은 200W급 태양전지를 이용한 축소 시스템을 이용하여 검증한다.

1. 서론

최근 대체 에너지에 대한 관심이 더욱 부각되고 있는 상태에서 신재생에너지 발전 시스템의 이용에 대한 관심이 더 증대되고 있다. 이 중에서 태양광 발전은 태양빛으로부터 무공해의 에너지를 얻을 수 있는 환경 친화적인 발전 시스템으로 신재생 에너지 분야에서 각광받고 있다. 지금까지 태양전지로부터 최대 전력을 얻을 수 있는 알고리즘, 전력변환기의 효율 향상을 위한 토폴로지 및 구조에 대한 연구^[1] 및 태양광 발전 시스템을 안정적으로 구축하기 위한 제어 방법에 대한 연구가 계속 진행되고 있지만 체계적인 제어기 설계 방법에 대한 연구는 잘 알려져 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 계통 연계형 태양광 단상 인버터의 소신호 분석을 통해 계통 전류 제어 및 태양 전지의 안정적 동작을 위한 직류단 전압 제어기의 설계 방법을 제시한다.

2. 단상 인버터 모델링 및 제어기 설계

2.1 단상 인버터 소신호 모델링

단상 인버터의 제어기 설계 및 안정도의 판별을 위해 그림 1과 같은 계통 연계형 단상 인버터 시스템의 소신호 모델링을 수행한다. 인버터 각 레그의 스위치는 캐리어와의 비교를 통해 스위칭 함수인 S_a 와 S_b 로 제어된다. 이때 그림 2와 같이 단극성 PWM(Unipolar Pulse Width Modulation) 방법의 경우에 삼각파 캐리어(V_{carr})의 주파수가 변조 신호인 V_{ca} 와 V_{cb} 의 주파수보다 충분히 높다면 한 스위칭 주기 동안(T_{sw}) 스위칭 함수

는 평균된 값으로 나타낼 수 있고 이 값은 각 레그의 듀티비가 된다. 따라서 이 듀티비를 이용한 전압형 단상 인버터의 평균 상태 방정식은 식 (1)-(2)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 모델링의 단순화를 위해 전력단 회로는 손실이 없는 이상적인 소자로 고려한다.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{(2d-1)}{L} v_{dc} - \frac{1}{L} v_g \quad (1)$$

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{i_i}{C} - \frac{(2d-1)}{C} i_L \quad (2)$$

인버터의 동적인 특성 분석 및 제어기 설계를 위해 평균화된 상태 방정식으로부터 임의의 동작점에서 작은 섭동 ($i_i = I_i + \hat{i}_i$, $i_L = I_L + \hat{i}_L$, $v_{dc} = V_{dc} + \hat{v}_{dc}$, $v_g = V_g + \hat{v}_g$, $d = D + \hat{d}$)에 대한 선형화 과정을 통해 전압형 인버터의 소신호 전달 함수를 유도할 수 있다.

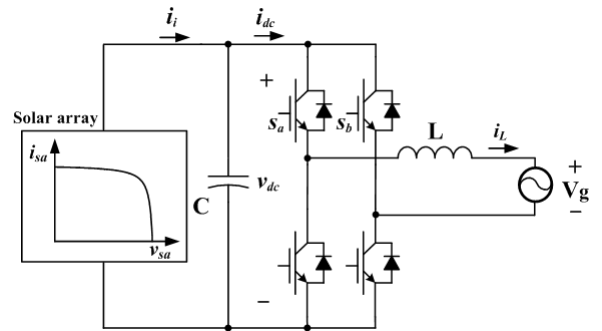


그림 1 계통연계 전압형 단상 인버터
Fig. 1 Grid-connected single-phase voltage source inverter

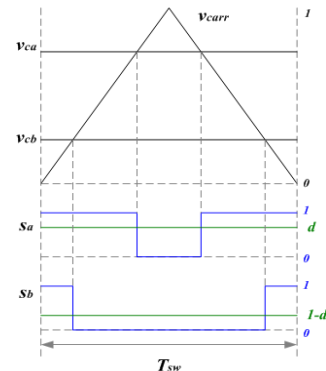


그림 2 스위칭 함수와 평균화된 듀티와의 관계
Fig. 2 Relationship of Switching function and duty ratio

2.2 전류 제어기 설계

인버터의 전류 제어기의 설계는 AC 전류 제어 방법과 d-q 동기 좌표계에서의 설계 방법이 있다. 일반적으로 d-q 동기 좌표계에서의 제어는 정지좌표계인 AC 전류 제어 방법에 비해 정상상태 오차의 관점에서 향상된 특성을 얻을 수 있지만 좌표 변환에 따른 연산량이 많다는 단점이 있으므로 본 연구에서는 듀티의 전향 보상을 이용한 AC 전류 제어 방법을 적용한다. 이때, 전압제어기에 의해 전류 제어의 정상 상태 오차가 보상되어 계통 전류 제어를 할 수 있다.

인버터의 전류 제어기는 식 (1)의 소신호 모델을 이용하여 전류 루프제어의 차단주파수에서 이득여유 및 위상여유를 고려한 비례-적분 전류 제어기를 설계한다. 앞서 언급한 전류 제어기의 소신호 블록 다이어그램은 그림 3, 각 전달 함수는 식 (3)에 나타내었다. 그림 3의 블록 다이어그램은 디지털 제어를 위해 ZOH를 이용한 이산 시간 전달 함수로 변환된 소신호 전달 함수이며 전류 제어기 설계를 위한 직류단 커패시터와 태양 전지를 고려하지 않은 전달 함수이다. z^{-1} 은 샘플링 시점부터 듀티가 업데이트 되는 시점까지의 연산 지연을 나타낸다. 또한 외란에 대한 시스템의 응답 특성을 향상시키기 위해 듀티의 전향 보상을 사용하며, 이때 전향되는 듀티의 값은 식 (4)로 나타낼 수 있고 전향 보상의 소신호 전달 함수는 (5)과 같이 나타낼 수 있다. 듀티의 전향 보상을 이용할 경우, 소신호 전달 함수에서 계통 전원에 대한 영향을 크게 감소시킬 수 있으므로 계통 전류 제어의 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

$$G_{ivg}' = \hat{i}_L / \hat{v}_g = -1 / sL \quad (3)$$

$$G_{id}' = \hat{i}_L / \hat{d} = 2V_{dc} / sL$$

$$G_{ivdc}' = \hat{i}_L / \hat{v}_{dc} = (2D-1) / sL$$

$$d_{ff} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_g}{V_{dc}} \right) \quad (4)$$

$$\hat{d}_{ff} = -\frac{1}{2} \frac{V_g}{V_{dc}^2} \hat{v}_{dc} + \frac{1}{2} \frac{1}{V_{dc}} \hat{v}_g \quad (5)$$

2.3 전압 제어기 설계

인버터의 전압 제어기는 앞서 설계된 전류 제어기를 이용해서 그림 4의 전류 루프를 닫은 인덕터 전류에서 태양 전지 전압까지의 전달 함수를 안정화시키는 제어기를 설계한다. 이때 소신호 블록 다이어그램의 전달함수는 2.1절의 소신호 모델 유도 과정을 통해 얻을 수 있으며 식 (6),(7)과 같이 유도된다. 이때 r_{sa} 는 태양 전지의 소신호 저항으로써 식 (8)과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다. 계통 전류 제어를 위해 전류 루프를 닫은 경우에 태양 전지는 전류원 영역에서 대신호적으로 불안정하게 되고,^[2] 소신호 적으로는 전류 루프가 닫힌 전달 함수는 저주파의 우반면 극점을 갖는 불안정한 시스템이 된다. 따라서 전압

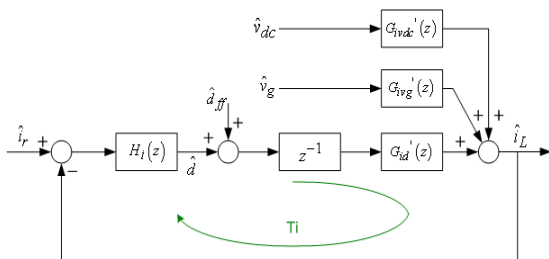


그림 3 인버터 전류 제어루프의 소신호 블록 다이어그램
Fig. 3 Small signal block diagram of current loop

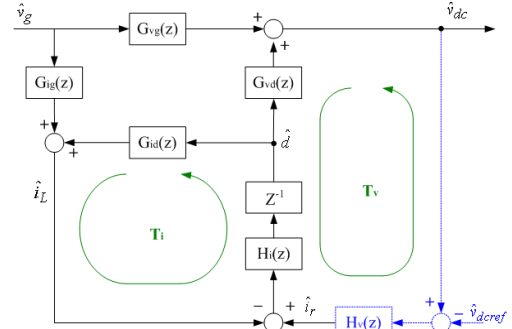


그림 4 계통 연계 인버터 소신호 블록 다이어그램
Fig. 4 Grid-connected VSI small signal block diagram

제어기 설계는 통상 많이 이용하는 보드 선도를 이용하는 방법 보다는 Root-locus나 Nyquist stability criterion을 이용해야 한다. 본 연구에서는 태양 전지의 전 동작 영역에서 안정한 전압 제어기 설계를 위해 Nyquist stability criterion을 이용하여 디자인하며 태양 전지의 전 동작영역에서 안정화시킬 수 있는 비례-적분 제어기를 이용하였다.

$$\frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = -\frac{2[(2D-1)I_L r_{sa} + V_{dc}]}{(2D-1)^2 r_{sa}} \frac{1 - \frac{r_{sa} C V_{dc}}{(2D-1)I_L r_{sa} + V_{dc}} s}{1 - \frac{L}{(2D-1)^2 r_{sa}} s + \frac{LC}{(2D-1)^2} s^2} \quad (6)$$

$$\frac{\hat{v}_{dc}}{\hat{d}} = -\frac{2V_{dc}}{(2D-1)} \frac{1 + \frac{L I_L}{(2D-1) V_{dc}} s}{1 - \frac{L}{(2D-1)^2 r_{sa}} s + \frac{LC}{(2D-1)^2} s^2} \quad (7)$$

$$\hat{v}_{dc} = r_{sa} \hat{i}_i, \quad (r_{sa} < 0) \quad (8)$$

3. 실험 결과

제안된 소신호 분석 및 제어기 설계의 검증을 위해 200W급 태양전지, 1/10로 축소된 계통 전원(22V_{rms}), 1.5mH의 출력 인덕터, 1μF 출력 필터 커패시터, 2200μF 직류단 커패시터를 이용한 단상 인버터 시스템을 구축하여 TMS320F2812 DSP를 이용하여 계통 전류 및 태양전지 전압 제어를 실험하였다.

계통 연계 단상 인버터의 경우 직류단 전압은 계통 전압의 두배 주파수의 리플 전압 성분이 존재하기 때문에 계통 전류의 고조파 및 역률 문제로 통상 10Hz 미만으로 디자인한다. 또한 계통 연계형 태양 전지 인버터는 직류단 전압의 지령치가 최대 전력점 추적제어 알고리즘으로부터 주어지는 가변 전압이므로, 태양 전지의 전 동작 전압 범위 내에서 안정하도록 디자인되어야 한다. 그림 5는 태양전지의 전 동작 영역에서 안정화되도록 설계되지 않은 잘못된 설계의 Nyquist stability criterion을 보인다. 태양 전지의 최대전력점 전압 근처인 62.5V인 경우는 안정하지만 전류원 영역인 45V에서는 불안정함을 알 수 있다. 그림 6은 앞선 분석의 실험으로 설계된 전압 제어기에 의해 62.5V인 경우 안정화되었지만 45V가 되었을 경우에 불안정하게 설계된 제어기로 인해 태양 전지의 전압이 진동하는 현상을 볼 수 있다. 이는 주로 태양 전지가 최대 전력점에서 동작한다고 가정하여 제어기를 설계할 경우, 주변 환경의 급변이나 초기 최대 전력점 추적시 시스템이 불안정해질 수 있음을 나타낸다. 그림 7은 태양 전지 전 동작 영역에서 안정하도록 설계된 제어기의 실험 결과로 태양 전지의 동작 영역에서 모두 안정하게

동작점을 형성하는 것을 확인할 수 있고 그림 7.(c)에서 계통 전압과 동상으로 역률 제어를 하고 있는 것을 알 수 있다.

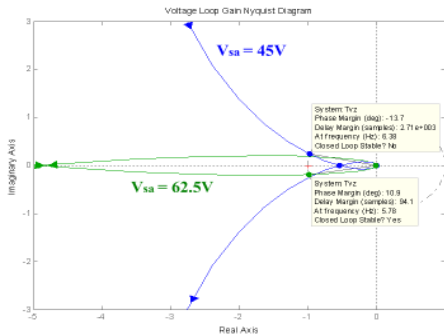
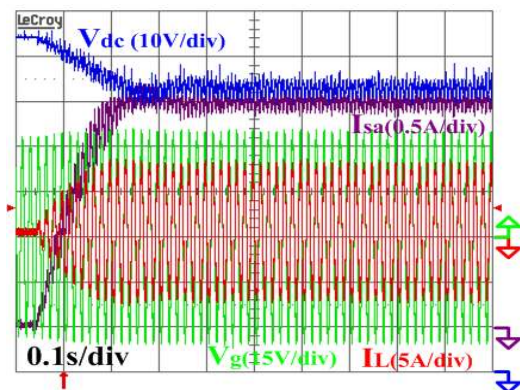
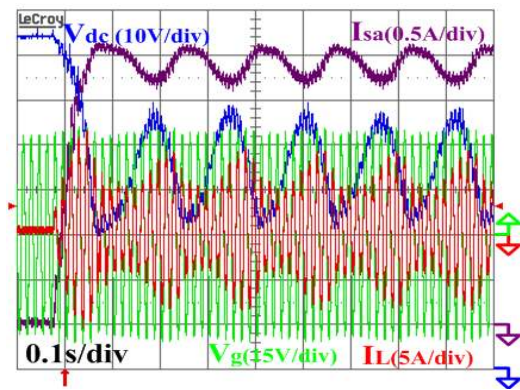


그림 5 전압 루프 게인의 Nyquist stability criterion
Fig. 5 Voltage-loop gain Nyquist stability criterion



(a) 태양 전지의 최대 전력점 부근, Vdc = 62.5V



(b) 태양 전지의 전류원 영역, Vdc = 45V

그림 6 불안정한 직류단 전압 제어기의 실험 결과
Fig. 6 Experimental results designed by unstable controller

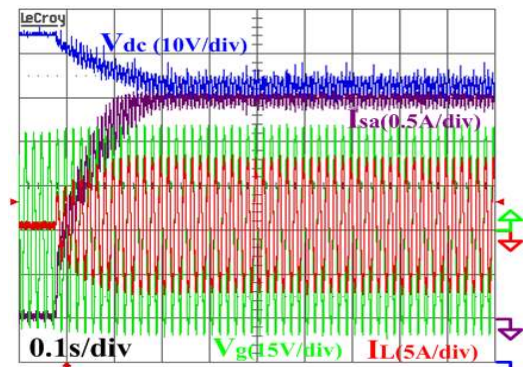
4. 결 론

본 논문에서는 태양광 계통 연계형 단상 인버터 시스템의 제어기 설계 방법을 제시하였다. 인버터가 역률 제어를 위해 계통 전압과 동상으로 전류 제어를 하고 있는 경우 전류원 영역에서 대소신호 관점에서 불안정 시스템이 된다. 따라서 태양 전지의 안정적인 동작점 형성을 위해서 전 동작 영역에서 안정화시킬 수 있는 전압 제어기를 디자인해야 한다.

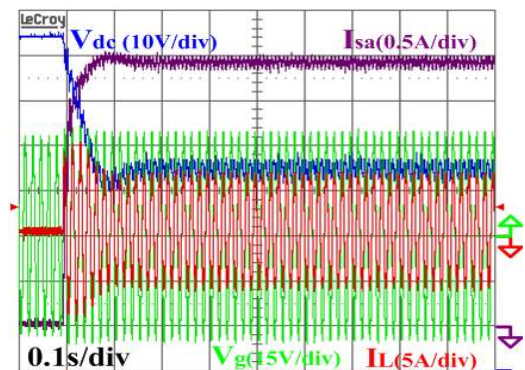
이 논문은 (주)효성중공업의 연구비 부분지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

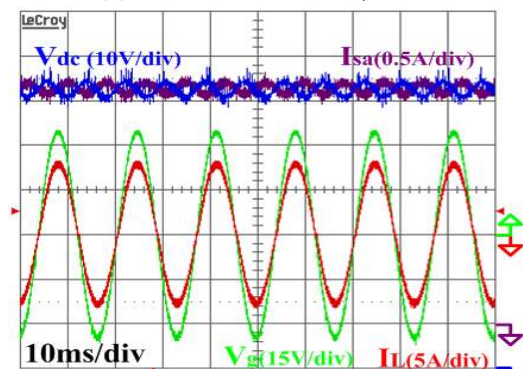
- [1] Soeren Baekhoej Kjaer, John K. Pedersen, Frede Blaabjerg, "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 41, No. 5, pp. 1292-1306, Sep/Oct. 2005.
- [2] Bo H. Cho, Jae R. Lee, Fred C Y Lee, "Large-Signal Stability Analysis of Spacecraft Power Processing Systems", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.5, No. 1, pp. 110-116, Jan. 1990.



(a) 태양 전지의 최대 전력점 부근, Vdc = 62.5V



(b) 태양 전지의 전류원 영역, Vdc = 45V



(c) 정상 상태 확대 파형

그림 7 안정한 직류단 전압 제어기의 실험 결과
Fig. 7 Experimental results designed by stable controller