

# 반도체 변압기용 단상 계통 연계형 인버터의 소신호 모델링 및 제어기 설계에 관한 연구

김보경, 최현준, 정지훈  
UNIST(울산과학기술대학교)

## A Research on Small Signal Modeling and Controller Design of a Single-Phase Grid-Connected Inverter for a SST

Bogyong Kim, Hyunjun Choi, Jeehoon Jung  
UNIST(Ulsan National Institute of Science and Technology)

### ABSTRACT

본 논문에서는 반도체 변압기(Solid State Transformer; SST)를 구성하는 단상 계통 연계형 인버터의 소신호 모델링과 이를 통한 효과적인 제어기 설계 방법을 제안한다. 평균화, 선형화 및 주파수 영역으로의 변환 단계를 거쳐 소신호 모델링을 수행하여 인버터 시스템의 전달함수를 얻을 수 있다. 이를 이용해 다양한 변동에 대한 인버터의 안정도와 동작 특성을 파악하고, 전압 제어기 및 전류 제어기를 설계하여 동작 영역에서 인버터의 안정적인 동작과 적절한 동특성이 확보되도록 한다. 본 논문에서 제안된 모델링과 제어 방법은 시뮬레이션을 통해 유효성을 검증하였다.

### 1. 서 론

최근 신재생 에너지가 각광받고 있어 반도체 변압기에 대한 관심 또한 증가하고 있다. 기존의 변압기를 대체할 소자인 반도체 변압기는 양방향 전력 변환이 가능하므로 신재생 에너지 발전원을 포함한 스마트 그리드를 구성하는데 필요하다.

본 논문에서는 반도체 변압기를 이루는 계통 연계형 인버터의 안정적인 동작을 위한 제어기 설계를 위해 소신호 분석을 수행하고, 제어기를 설계하여 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 단상 계통 연계형 인버터의 소신호 모델링

그림 1은 단상 계통 연계형 인버터를 보여준다. 인버터의 4개 스위치는 그림 2와 같이 수정된 양극성 PWM(Modified Bipolar Pulse Width Modulation) 방법으로 스위칭 한다. 이 경우에 입력 계통 전압의 반주기 동안 인버터 한 쪽 레그의 스위치는 삼각파와의 비교를 통해 제어되고, 다른 한 쪽 레그는 스위칭을 하지 않는다. 삼각파의 주파수가 변조 신호인  $v_{con}$ 의 주파수보다 충분히 높다면 스위칭 함수는 평균화되어 표현 가능하며, 이 값은 스위치의 듀티비가 된다<sup>[1]</sup>. 그러므로 식 (1), (2)와 같이 단상 계통 연계형 인버터의 평균 상태 방정식을 표현할 수 있다. 회로의 소자들은 이상적이라고 가정하였다. 식 (1), (2)를 이용하여 단상 계통 연계형 인버터의 전달 함수를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

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

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

$$G_{PS}(s) = \frac{\widehat{v_{dc}}}{\widehat{d}} = \frac{V_{ac} - 2DV_{dc}}{D^2} \frac{1 + \frac{sLI_a}{V_{ac} - 2DV_{dc}}}{1 + \frac{s^2LC}{D^2}} \quad (3)$$

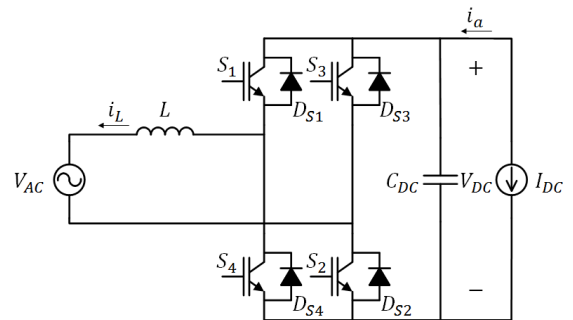


그림 1 단상 계통 연계형 인버터  
Fig. 1 Single-Phase Grid-Connected Inverter

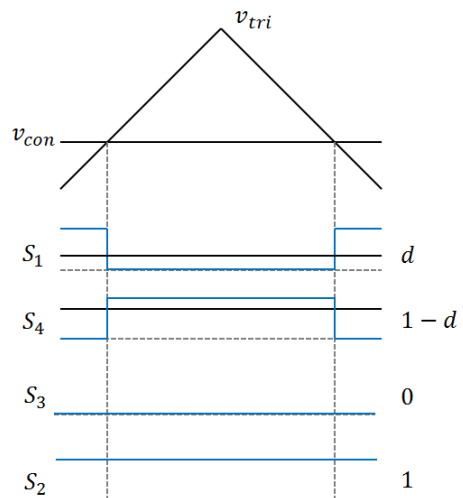


그림 2 수정된 양극성 PWM 스위칭 방법  
Fig. 2 Modified Bipolar Pulse Width Modulation Switching

## 2.2 제어기 설계

단상 계통 연계형 인버터에는 입력 전류와 출력 전압을 제어하기 위한 전력제어 알고리즘이 요구된다. 그림 3과 4는 각각 전압과 전류 제어기를 나타낸다. 전압 제어기에서는 출력 DC 전압과 기준 출력 DC 전압을 비교한다. 두 값의 차이는 PI 제어기의 입력이 되는데, PI 제어기는 이 값을 오차로 받아들이고 오차를 최소화시킨다. Feedforward 항인 입력 AC 전류는 제어 속도를 빠르게 만들고, 입력 전류의 변화를 출력에 반영하기 위하여 사용된다. PI 제어기의 출력과 Feedforward 항은 더해져 기준 전류를 만들어낸다.

전류 제어기는 전압 제어기로부터 계산된 기준 입력 AC 전류를 입력 AC 전류와 비교하여 오차를 만들며, 만들어진 오차는 PI 제어기를 통과하면서 최소화된다. 입력 측 인덕터에서 일어나는 전압 강하를 보상하고, Feedforward 항을 이용해 제어 속도를 빠르게 만들고 입력 전압의 변화를 출력에 반영한다. 이것들은 모두 더해져 기준 전압을 보상한다. 전압 제어기와 전류 제어기의 전달 함수는 식 (4), (5)와 같다.

$$i_{L_{ref}} = (v_{dc} - v_{dc_{ref}}) \left( K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s} \right) \quad (4)$$

$$d = k(i_{L_{ref}} - i_L) \left( K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \right) \quad (5)$$

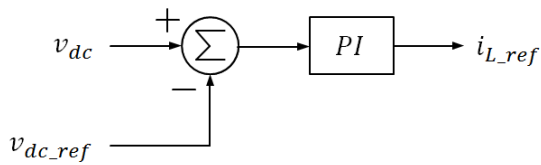


그림 3 전압 제어기  
Fig. 3 Voltage Controller

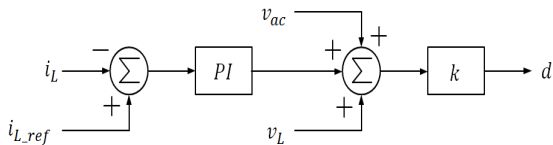


그림 4 전류 제어기  
Fig. 4 Current Controller

## 3. 시뮬레이션 결과

설계된 제어기의 검증을 위해 표 1의 설계 사양을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5는 시뮬레이션 회로도를 보여 준다. 제어기는 C block을 이용해 구현하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 6에 나타내었다.

표 1 회로 설계 사양  
Table 1 Design Specification

변수	값
입력전압	220 VAC
출력전압	380 V
출력전류	1 A (0.25초 후) 11 A (0.5초 후)
인덕터	1.2 mH
커패시터	2 mF
스위칭 주파수	12 kHz

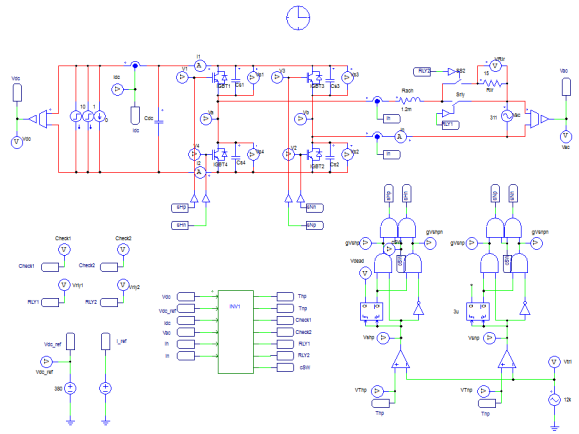
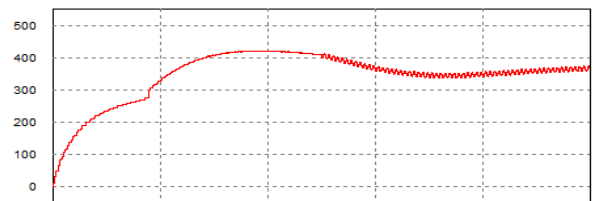
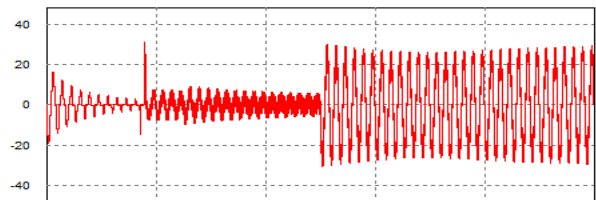


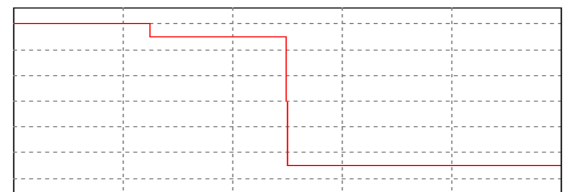
그림 5 시뮬레이션 회로도  
Fig. 5 Simulation Schematic Diagram



(a) 출력 전압



(b) 입력 전류



(c) 출력 전류

그림 6 시뮬레이션 결과 파형  
Fig. 6 Simulation Results

## 3. 결 론

단상 계통 연계형 인버터에는 입력 전류와 출력 전압을 제어하기 위한 제어기가 요구된다. 본 논문에서는 단상 계통 연계형 인버터의 제어기 설계를 수행하고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF 2013R1A1A1009632).

## 참 고 문 헌

- [1] 이성준, 배현수, 최규식, 조보형, "단상 계통 연계 태양광 인버터의 소신호 모델링 및 제어기 설계," 전력전자학회, pp. 606 606, 2008.