

# 3상 계통연계형 태양광 T-type 인버터의 모델링 및 제어기 설계

장한준, 고병수, 김일송  
한국교통대학교

## Modeling and Controller Design of Three-Phase Grid-Connected T-Type Solar Power Inverter

Han-Joon Jang, Il-Song Kim  
KOREA NATIONAL UNIVERSITY OF TRANSPORTATION

### ABSTRACT

This paper proposes a modeling approach based on circuit operation equations and suggests a controller design method for a 3-level T-type inverter to maximize reliability, efficiency, and compatibility with grid systems, in accordance with recent trends in power conversion devices.

### 1. 서론

오늘날 최근 급속도로 증가하는 재생에너지와 전기차, 스마트 그리드 등에 인버터는 필수적으로 쓰이고 있다. 이러한 추세에 맞게 고효율화를 향해 나아가는 것이 오늘날의 주요 관심사 중 하나이다. 여기서 기존의 2-레벨 인버터는 낮은 비용과 신뢰성이 높기 때문에 가장 많이 사용되어왔다. 하지만 3-레벨 인버터보다 낮은 효율성 및 전력 품질이 낮고, 고조파 왜곡, THD 등 좋지 못하다.

따라서 본 논문은 최근 추세에 맞게 많은 연구가 이루어지고 있는 태양광 3-레벨 인버터의 제어 대한 동작 Sequence와 모델링 설계 내용을 다룬다.

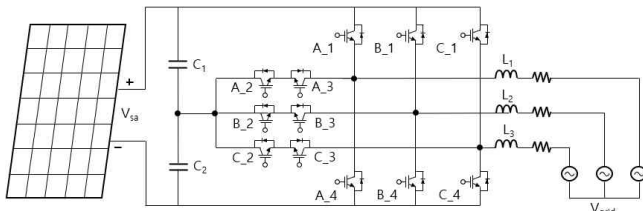


Fig 1. Solar 3-Level T-type Inverter Configuration

## 2. 계통연계형 T-type 태양광 인버터 제어기 설계

### 2.1 계통연계형 태양광 T-type 인버터 모델

3상 계통연계형 태양광 3-레벨 T-type 인버터는 양방향 태양광 Buck 컨버터에서 3개의 브릿지를 병렬로 연결해 놓은 2-레벨 인버터의 제어방식은 같다. 하지만 제한된 토폴로지는 상태 방정식을 나타낼 때 6구간으로 나타낼 수 있고, 기존의 2-레벨 인버터의 경우, 2구간으로 나타낸다는 차이점이 존재한다.

태양광 3-레벨 인버터의 A상에 대한 구간별 동작 Sequence는 아래 그림 2와 같다.

### 2.1.1 평균화 모델링

태양광 3-레벨 인버터의 구간별 스위치의 동작만을 놓고 보았을 때, A<sub>1</sub> & A<sub>2</sub> turn on, A<sub>2</sub> & A<sub>3</sub> turn on, A<sub>3</sub> & A<sub>4</sub> turn on으로 크게 3가지로 나타낼 수 있다. 하지만 실제 태양광 3레벨 인버터의 동작 구간은 다음 그림 2번과 같이 A<sub>1</sub> & A<sub>2</sub> turn on에서 A<sub>3</sub> & A<sub>4</sub> turn on으로 바뀌기까지 중성점과 연결되어있는 스위치 A<sub>2</sub> & A<sub>3</sub>가 2배 정도 더 많이 동작 구간이 나타난다는 것을 알 수 있다.

하지만 태양광 3-레벨 인버터의 동작 구간에 따른 상태 평균화 방정식은 2-레벨 인버터와 같기 때문에 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

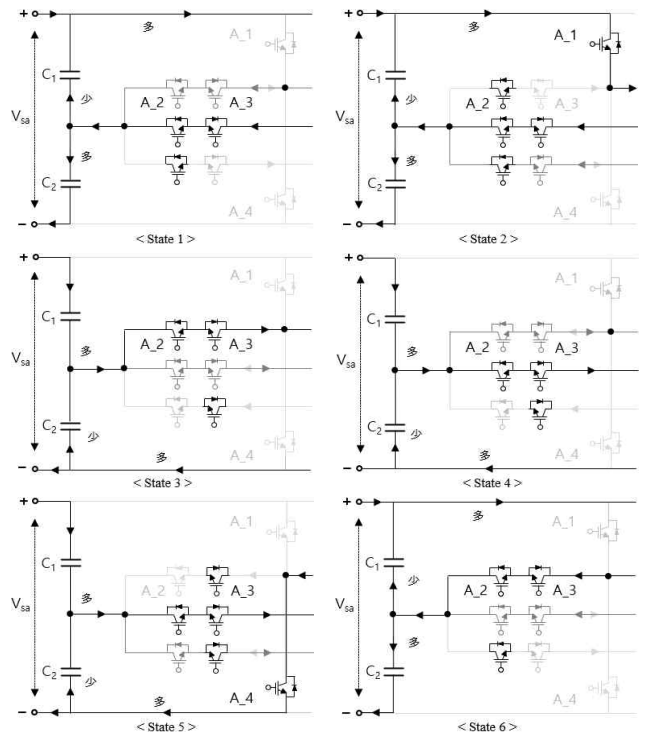


Fig 2. Operational Sequence of Solar 3-Level T-type Inverter

태양전지의 특성에 의한 선형화 출력 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{sa} = -\alpha \cdot v_{sa} + \beta \tag{1}$$

그림 2에서 a상에 대한 상태 공간 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

i) A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> turn ON (= State 2) 일 때,

KVL에 의해

$$V_{sa} = V_{L_a} + V_{grid} \rightarrow \frac{v_{sa}}{2} = r_{L_a} i_{L_a} + L_a \frac{di_{L_a}}{dt} + V_{grid} \quad (2)$$

KCL에 의해

$$I_{sa} = I_C + I_S \rightarrow -\alpha \cdot v_{sa} + \beta = C \frac{dv_{sa}}{dt} + D \cdot i_{L_a} \quad (3)$$

따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \frac{di_{L_a}}{dt} \\ \frac{dv_{sa}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_{L_a}}{L_a} & \frac{1}{2L_a} \\ -\frac{d}{C} & -\frac{\alpha}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{L_a} \\ v_{sa} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{V_{grid}}{L_a} \\ \frac{\beta}{C} \end{pmatrix} \quad (4)$$

ii) A\_3, A\_4 turn ON (= State 5) 일 때,

KVL에 의해

$$V_{sa} = V_{L_a} + V_{grid} \rightarrow -\frac{v_{sa}}{2} = r_{L_a} i_{L_a} + L_a \frac{di_{L_a}}{dt} + V_{grid} \quad (5)$$

KCL에 의해

$$I_{sa} = I_C + I_S \rightarrow -\alpha \cdot v_{sa} + \beta = C \frac{dv_{sa}}{dt} + D \cdot i_{L_a} \quad (6)$$

따라서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \frac{di_{L_a}}{dt} \\ \frac{dv_{sa}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_{L_a}}{L_a} & -\frac{1}{2L_a} \\ -\frac{d}{C} & -\frac{\alpha}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{L_a} \\ v_{sa} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{V_{grid}}{L_a} \\ \frac{\beta}{C} \end{pmatrix} \quad (7)$$

iii) 위의 표현식을 이용하여 상태 평균화 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \frac{di_{L_a}}{dt} \\ \frac{dv_{sa}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_{L_a}}{L_a} & \frac{(d-0.5)}{L_a} \\ -\frac{d}{C} & -\frac{\alpha}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{L_a} \\ v_{sa} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{V_{grid}}{L_a} \\ \frac{\beta}{C} \end{pmatrix} \quad (8)$$

a, b, c 상에 대한 전체 상태 평균화 방정식은 (8) 식과 똑같이 나타낼 수 있다. 또한 이러한 식은 시비율(d)에 따라 변화하기 때문에 비선형이다.

### 2.1.2 소신호 모델링

위 식 (8)과 같이 비선형적으로 나타나는 식을 적용할 경우, 시스템이 불안정해질 수 있다. 따라서 소신호 모델링을 통해 작은 변화의 범위에서 선형시스템으로 모델링을 해야 한다.

다음 식 (9)는 소신호 모델링을 적용시킨 선형화 방정식이다.

$$\begin{pmatrix} \frac{d\hat{i}_{L_a}}{dt} \\ \frac{d\hat{v}_{sa}}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_{L_a}}{L_a} & \frac{(D-0.5)}{L_a} \\ -\frac{d}{C} & -\frac{\alpha}{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{i}_{L_a} \\ \hat{v}_{sa} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{V_{sa}}{L} \\ -\frac{I_L}{C} \end{pmatrix} \hat{d} \quad (9)$$

위 식에 대한 전압, 전류의 전달함수는 라플라스 변환을 통해 유도할 수 있다.

$$(sI-A)X(s) = BU \quad (10)$$

### 2.2 계통연계형 태양광 T-type 인버터 제어기 구조

3-레벨 태양광 인버터의 제어기 구조는 MPPT P&O 알고리즘을 통해 태양전지에서 최대전력점의 전압값을 찾아 제어기의 Middle Loop에 적용시킨다. Inner Loop는  $G_v(s)$ 를 통해 나온 Err값을 3상 전류의 DQ변환을 한 전류 Reference D값에 적용시킨다. 이때 실제 전류 D값은 Feedback Loop를 해주어 보상해주었다.

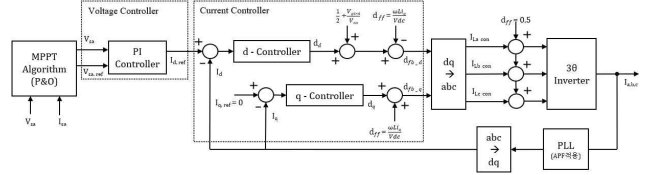


Fig 3. Controller Structure of Solar Power Generation System

### 2.3 태양광 T-type 인버터 제어기 설계

아래 그림 4와 같이 전압제어기 같은 경우 대역폭 150[rad/s]와 여유 위상 80[deg], 전류제어기 같은 경우 대역폭 19200[rad/s], 여유 위상 50[deg]를 주었다. 이때, Step Response는 오버슈트가 발생되어 설계된다.

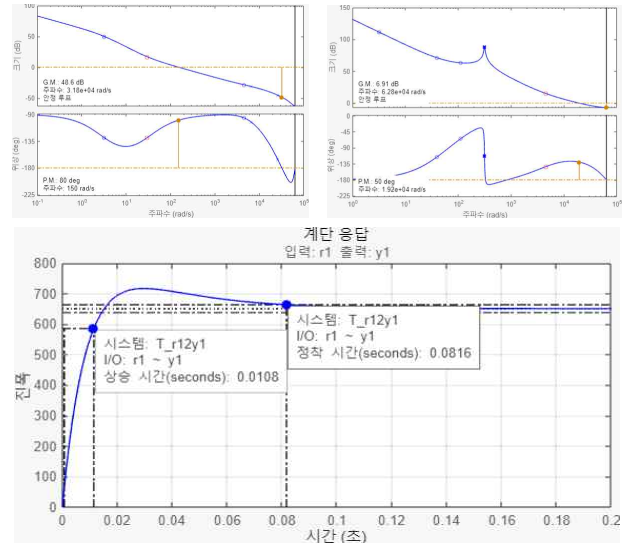


Fig 4. Bode diagram & Step response

### 3. 결론

본 논문에서는 재생에너지에 대한 필요성이 높아짐에 따라 그리드 시스템과 호환성이 더 좋은 T-type 인버터를 선정하였다. 또한 2-레벨 인버터보다 동작이 복잡한 3-레벨 인버터에 대한 동작 Sequence를 나타내어 보다 더 정확한 상태 방정식을 세우고, 제어기 설계 과정을 간략하게 정리했다는 점에 초점을 두었다.

이 논문은 2024년 한국교통대학교의 연구비 지원과 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력 기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(2021RIS-001(1345370811)) 받아 작성되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] A. Zoring, M. Belkheiri, S. Barkat "Control of Three-level T-type inverter based grid connected PV system" IEEE International Multi-Conference on System, Signals & Devices(SSD), pp. 415~420, May, 2016.
- [2] T. H. Park, H. W. Kim "A study to stable power to a load in case of neutral point voltage unbalanced of grid tied three-level t-type inverter" The Transaction of the Korean Intitute of Power Electronics, Vol. 2021, No. 11, pp. 121~122, November, 2021.