

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.

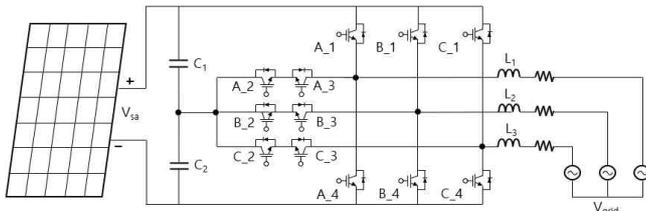


Fig 1. Solar 3-Level T-type Inverter Configuration

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, A₁ & A₂ turn on, A₂ & A₃ turn on, A₃ & A₄ turn on으로 크게 3가지로 나타낼 수 있다. 하지만 실제 태양광 3레벨 인버터의 동작 구간은 다음 그림 2번과 같이 A₁ & A₂ turn on에서 A₃ & A₄ turn on으로 바뀌기까지 중성점과 연결되어있는 스위치 A₂ & A₃가 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.

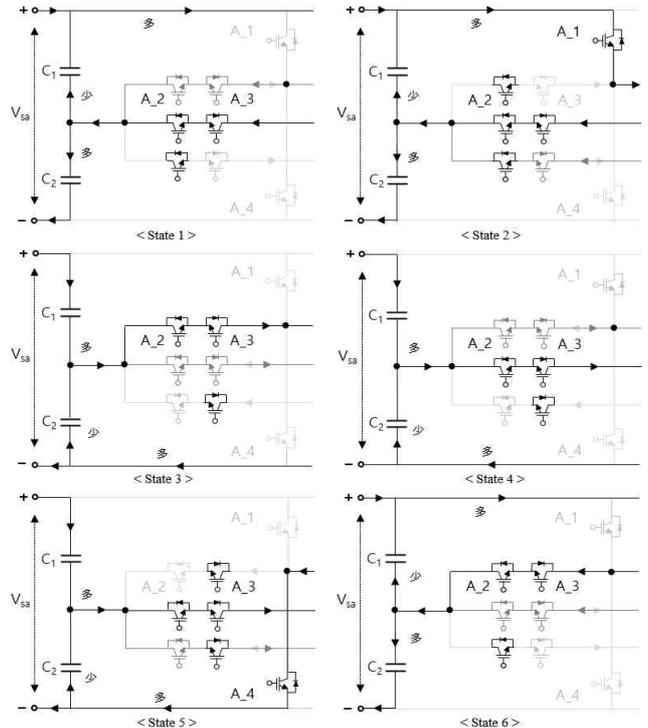


Fig 2. Operational Sequence of Solar 3-Level T-type Inverter

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) A₁, A₂ 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.

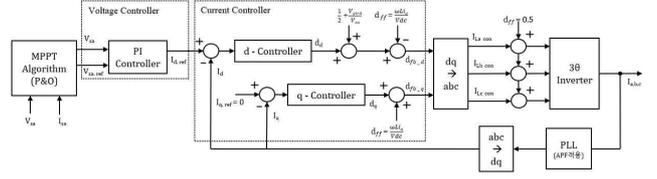


Fig 3. Controller Structure of Solar Power Generation System

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.

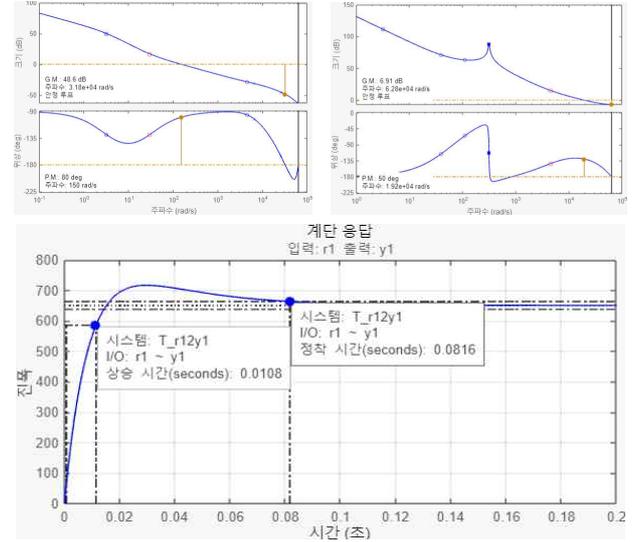


Fig 4. Bode diagram & Step response

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.