

LCL 필터를 사용한 계통 연계형 3-레벨 인버터의 소신호 모델링 및 제어

정홍주, 구남준, 김래영
한양대학교 전기공학부

Small-Signal Modeling and Control of Three-Phase Grid-Connected 3-Level Neutral-Point-Clamped Inverter with a LCL Filter

Hong Ju Jung, Nam Joon Ku, Rae Young Kim
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 LCL 필터를 사용한 계통 연계형 3 레벨 인버터의 소신호 등가모델을 유도하는 과정과 이 모델을 이용한 계통 전류 및 중성점 전류 제어를 설계하는 내용을 소개한다. 소신호 등가모델은 평균화 과정, 변동과 선형화 과정을 통해 유도하였다. 특히, 중성점 전류 제어기 설계를 위한 DC 링크 단의 소신호 모델은 새로운 스위칭 함수를 적용시킴으로써 유도하였다.

제안된 방식의 검증을 위하여 시뮬레이션을 실시하였고 또한, 소용량 프로토타입을 제작하여 실험 결과를 통해 본 논문에서 제안한 모델링 및 제어기설계의 타당성을 입증하였다.

1. 서론

최근 신재생 에너지에 대한 관심이 많아지면서 고 전압, 고용량 에너지 변환 시스템에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이다. 이러한 관점에서 멀티 레벨 인버터는 매우 적합한 전력변환 시스템이다.^[1] 멀티 레벨 인버터 중 3 레벨 NPC 인버터는 구조적 특성에 기인한 중성점 전압 변동 문제^[2]가 있지만 뛰어난 특성으로 인해 가장 널리 쓰이고 연구된 토폴로지이다.^[3]

인버터의 동작 특성을 분석하고 제어하기 위해서는 시스템의 정확한 모델링이 필수적이다. 하지만 3상 계통 연계형 3 레벨 인버터에 대한 자세한 모델링은 아직까지 이루어지지 않았다. 기존의 스위칭 모델링이나 스위칭 함수 모델링을 이용하면 시스템의 동작 및 과도응답에 대해 자세하고 정확하게 예측할 수 있지만, 이 모델링 방법들은 매우 복잡하여 모델을 유도하는데 많은 시간이 소요된다. 소신호 평균화 모델은 실제 스위칭 모델에 대한 근사화로 인해 스위칭 모델링과 스위칭 함수 모델링과 비교해 매우 간단한 모델이다. 모델 해석이 정확하고 신속하기 때문에 소신호 평균화 모델을 많이 사용한다.

소신호 평균화 모델링은 시스템의 회로 방정식에 대한 평균화 과정, 변동과 선형화 과정을 통해 유도된다. 유도된 모델은 제어 시스템을 구성하고 출력에 대한 제어 전달함수와 출력에 대한 입력 전달함수는 구하는데 이용된다.

본 논문에서는 LCL 필터를 사용한 3상 계통 연계형 3 레벨 인버터에 대한 소신호 평균화 모델을 유도하고, 유도된 모델을 기반으로 중성점 전류와 계통 전류 제어 시스템을 제안한다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하여 유도된 소신호 평균화 모델과 제어 시스템의 타당성을 입증한다.

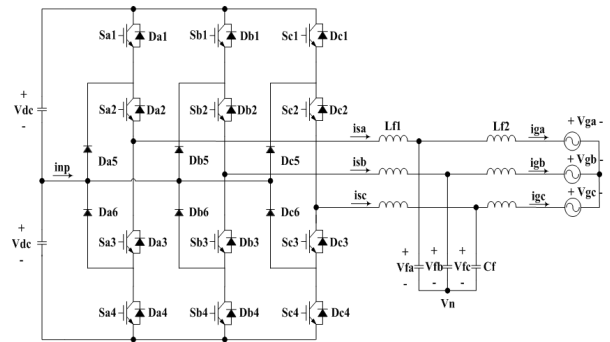


그림 1 3-레벨 NPC 인버터
Fig. 1 The NPC 3-level inverter

2. 소신호 평균화 모델링

전력전자 분야에서 대부분의 소자들은 비선형 특성을 가진다. 반도체 소자는 비선형 소자이다. 따라서 그림 1의 LCL 필터를 사용한 3상 계통 연계형 3 레벨 NPC 인버터의 동작과 특성에 대한 연구를 위해서는 동작점에서 선형화된 소신호 평균화 모델이 필요하다. 회로 방정식에 대한 평균화, 변동 그리고 선형화 단계를 거쳐 소신호 평균화 모델이 유도된다.

$$\frac{d\hat{i}_{gdq}}{dt} = -\frac{R_{Lp}}{L_{f2}}\hat{i}_{gdq} - \frac{1}{L_{f2}}\hat{v}_{gdq} + \frac{1}{L_{f2}}\hat{v}_{fdq} - \begin{bmatrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{bmatrix}\hat{i}_{gdq} \quad (1)$$

$$\frac{d\hat{i}_{sdq}}{dt} = -\frac{R_{Ln}}{L_{f1}}\hat{i}_{sdq} - \frac{1}{L_{f1}}\hat{v}_{fdq} + \frac{1}{L_{f1}}(d_{pdq} - d_{npq})\hat{v}_{dc} + \frac{1}{L_{f1}}(\hat{d}_{pdq} - \hat{d}_{ndq})v_{dc} - \begin{bmatrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{bmatrix}\hat{i}_{sdq} \quad (2)$$

$$\frac{d\hat{v}_{fdq}}{dt} = \frac{1}{C_f}\hat{i}_{sdq} - \frac{1}{C_f}\hat{i}_{gdq} - \begin{bmatrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{bmatrix}\hat{v}_{fdq} \quad (3)$$

$$\hat{i}_{np} = D_{odq}\hat{i}_{sdq} + I_{sdq}\hat{d}_{opq} \quad (4)$$

계통 전류와 중성점 전류의 제어를 위해 새로운 제어 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{d}_{md} = \hat{d}_{pd} - \hat{d}_{nd} \quad (5)$$

$$\hat{d}_{mq} = \hat{d}_{pq} - \hat{d}_{nq} \quad (6)$$

새로운 제어 변수를 이용하여 소신호 평균화 방정식을 다시

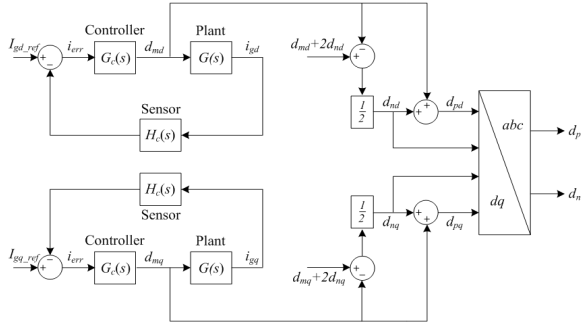


그림 2 계통 전류와 중성점 전류 제어 시스템
Fig. 2 Control scheme for the control of the grid current and the neutral-point current
표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d\hat{i}_{sdq}}{dt} = -\frac{R_{L_{f1}}}{L_{f1}}\hat{i}_{sdq} - \frac{1}{L_{f1}}v_{fdq} + \frac{1}{L_{f1}}D_{mdq}v_{dc} + \frac{1}{L_{f1}}V_{dc}\hat{d}_{mdq} - \begin{bmatrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{bmatrix}\hat{i}_{sdq} \quad (7)$$

$$\frac{d\hat{i}_{gdq}}{dt} = -\frac{R_{L_{f2}}}{L_{f2}}\hat{i}_{gdq} - \frac{1}{L_{f2}}v_{gdq} + \frac{1}{L_{f2}}v_{fdq} - \begin{bmatrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{bmatrix}\hat{i}_{gdq} \quad (8)$$

$$\frac{dv_{fdq}}{dt} = \frac{1}{C_f}\hat{i}_{sdq} - \frac{1}{C_f}\hat{i}_{gdq} - \begin{bmatrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{bmatrix}v_{fdq} \quad (9)$$

$$\hat{i}_{np} = -(D_{mdq} + 2D_{ndq})\hat{i}_{sdq} + I_{sdq}(\hat{d}_{mpq} + 2\hat{d}_{ndq}) \quad (10)$$

3. 계통 및 중성점 전류 제어기 설계

앞에서 유도한 소신호 평균화 방정식에서 계통 전류와 중성점 전류에 대한 제어 변수 부분만 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{i}_{gd} = V_{dc}\hat{d}_{md} \quad (11)$$

$$\hat{i}_{gq} = V_{dc}\hat{d}_{mq} \quad (12)$$

$$I_{np} = -I_{sd}(d_{md} + 2d_{nd}) - I_{sq}(d_{mq} + 2d_{nq}) \quad (13)$$

계통 전류와 중성점 전류는 각각 d_m 과 $d_n + 2d_n$ 의 d, q성분에 의해 제어된다. 계통 전류와 중성점 전류를 하기 위한 값이 존재하면 계통 전류 제어를 위한 d_{md} 와 d_{mq} , 중성점 전류 제어를 위한 $d_{md} + 2d_{nd}$ 와 $d_{mq} + 2d_{nq}$ 가 결정된다. 일단 d_{nd} 와 d_{nq} 가 정해지면 (5), (6)에 의해 d_{pd} 와 d_{pq} 가 결정된다. 이 dq 좌표계에서의 값을 그림 2과 같이 abc 좌표계의 값으로 변환시켜 주면 d_p , d_o , d_n 값을 구할 수 있고, 따라서 계통 전류 제어와 중성점 전류 제어를 동시에 수행하는 제어 변수값이 정해진다.

4. 실험 설비 제작

제한한 방식의 타당성을 검증하기 위해 3kW의 3 레벨인버터를 그림 3과 같이 제작하였다.

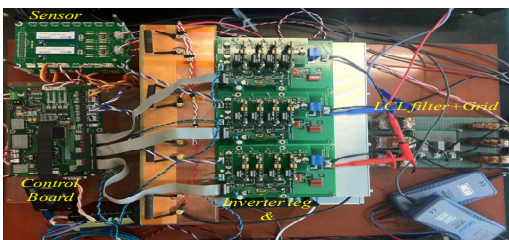


그림 3 제작된 시험 설비(3-레벨 인버터)
Fig 3 Experimental setup of 3-Level inverter

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 4는 시뮬레이션 결과이고 그림5는 실험결과이다. 시뮬레이션 프로그램은 PSIM을 사용하였다. DC 링크 전압은 750V이고 계통 선간 전압은 380V(ac)이다. 계통 기준 전류는 초기 0A에서 3A로 변화시켰다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 통해, 소신호 평균화 모델과 제어 시스템의 타당성을 증명한다.

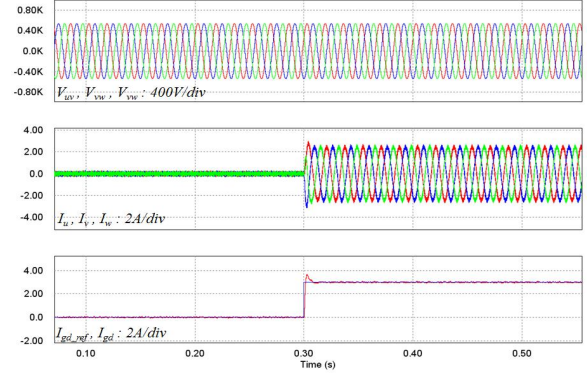


그림 4 PSIM 시뮬레이션 결과

Fig. 4 Simulation results

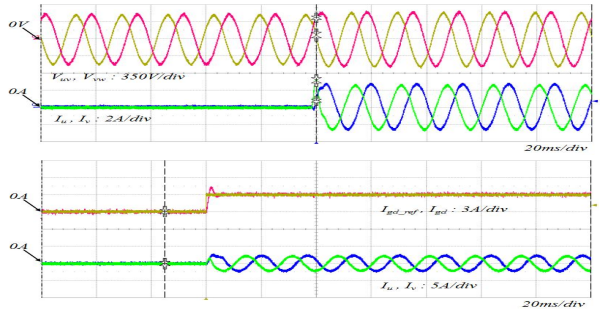


그림 5 실험 결과

Fig. 5 Experiment results

6. 결론

본 논문에서는 LCL 필터를 사용하는 3상 계통 연계형 3 레벨 인버터의 소신호 평균화 모델을 유도하였고 계통 전류와 중성점 전류를 동시에 제어하기 위한 방법을 제시하였다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하여 유도한 소신호 평균화 모델과 전류 제어 시스템의 타당성을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, and Z. Chen, "Power electronics in renewable energy systems," EPE PESC 2006. 12th International, pp. 1 17, 2006.
- [2] N. Celanovic and D. Voroyevich, "A comprehensive study of neutral point voltage balancing problem in three level neutral point clamped voltage source PWM inverters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, no. 2, pp. 242 249, March 2000.
- [3] A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi, "A new neutral point clamped PWM inverter," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 17, no. 1, pp 518 523, September 1981.