

파라미터 변동을 고려한 3상 4선식 인버터 Neutral Leg의 상태궤환제어

한정호, 김흥규, 이영일, 송중호
서울과학기술대학교

State Feedback Control of the Neutral Leg in Three-Phase Four-Wire Inverter Considering Parameter Variations

Jungho Han, Heungkyu Kim, Youngil Lee, Joongho Song
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

3상 4선식 인버터에서 불평형 부하는 중성선 전류를 증가시키고, 이는 직류링크 전압 불평형을 야기한다. 이러한 이유로, neutral leg을 추가하여 불평형 부하에서 중성선전류와 직류링크전압 불평형을 제어방법이 제안되었다. 본 논문은 상태궤환 제어를 이용하여 중성선전류와 직류링크전압 불평형을 제어하는 neutral leg 제어기설계 방법을 제안한다. 제안한설계 방법은 neutral leg의 파라미터 변동에도 우수한 특성을 가진다. 시뮬레이션을 통하여 본 논문이 제안한 제어방법의 타당성과 실효성을 증명한다.

1. 서론

최근 단상 부하의 수요가 급증함에 따라 3상 4선식 인버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 3상 4선식 인버터는 중성선이 존재하므로 별도의 변압기 없이 단상부하를 연결 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 단상부하가 연결됨에 따라서 각 상에 부하 불평형이 존재하게 되고, 부하 불평형은 중성선 전류 증가의 원인이 된다. 이러한 중성선 전류 증가는 직류링크전압의 불균형을 초래하게 되고, 이로 인해 3상 전압 불균형 및 출력 전압에 직류성분이 포함되는 등에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 이유로 그림 1과 같이 중성선 전류를 제어하는 neutral leg을 추가함으로써 중성선 전류를 효과적으로 제어하는 방법이 제안되었다.^[1] 그러나 참고문헌의 제어기 설계 방법은 파라미터 변동에 대한 보상이 제어기설계에 포함되지 않았기 때문에 파라미터 변동시 제어기의 성능을 보장할 수 없는 단점을 가지고 있다. 그러므로 본 논문은 파라미터 변동을 고려한 neutral leg 제어기 설계 방법을 제안한다.

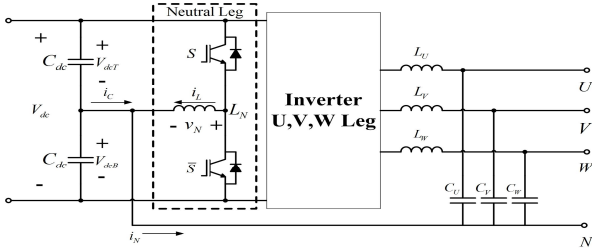


그림 1 Neutral leg가 포함된 3상 4선식 인버터
Fig. 1 Three phase four wire inverter including the neutral leg

2. 파라미터 변동을 고려한 neutral Leg 상태궤환제어기 설계

2.1 Neutral leg 모델

직류링크전압 양단 오차는 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$v_{err} = V_{dcT} - V_{dcB} \quad (1)$$

식(1)과 그림1에 나타낸 neutral leg의 전압, 전류관계를 이용하면 식(2)~(3)으로 나타낼 수 있다.

$$i_L = \frac{1}{L_N} v_N \quad (2)$$

$$\dot{v}_{err} = \frac{1}{C_{dc}} (i_N - i_L) \quad (3)$$

식(2)를 통하여 나타낸 neutral leg 모델은 그림 2와 같다.

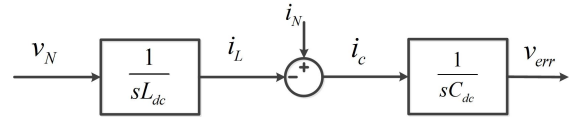


그림 2 Neutral leg 모델
Fig. 2 Neutral leg model

그림 2에서 neutral leg은 double integrator 시스템인 것을 알 수 있다. 따라서 2.2절에서는 이러한 특성에 적절한 제어기 형태를 제안한다.

2.2 상태궤환제어기 설계

2.1절의 모델링을 기반으로 식(4)~(5)와 같은 제어기 형태를 제안한다.

$$v_N = K_1 i_L + K_2 v_{err} + K_3 \sigma \quad (4)$$

$$\dot{\sigma} = v_{err}^* - v_{err} \quad (5)$$

여기서, K_1 , K_2 , K_3 각 상태변수의 제어게인값을 의미하고, σ 는 직류링크전압 양단오차 에러의 적분값이다.

식(4)~(5)를 식(2)~(3)에 대입하면, 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ v_{err} \\ \dot{\sigma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1/L_N & K_2/L_N & K_3/L_N \\ -1/C_{dc} & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_{err} \\ \sigma \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/C_{dc} \\ 0 \end{bmatrix} i_N \quad (6)$$

제안한 제어기의 목표는 $v_{err} \rightarrow 0$, $i_L \rightarrow i_N$ 이다. 하지만 식 (3)에서 $v_{err} \rightarrow 0$ 이 되면, i_L 이 i_N 가 같게 됨을 알 수 있다. 그러므로 식(6)에서 $v_{err} \rightarrow 0$ 을 만족하는 K_1 , K_2 , K_3 를 구하면, i_L 이 i_N 을 추종하게 된다. 최종적으로, 식(7)과 같은 제어목표를 만족하는 비용함수 $J(k)$ 의 최소값을 참고문헌[2]에서 이용한 최적화 문제 해법 MATLAB, YALMIP을 이용하여 구할 수 있다.

$$\min_{K_1, K_2, K_3} J(k) \quad (7)$$

그림 3은 제안한 neutral leg 제어기 블록을 나타낸다. 각 상태변수들과 식(7)로부터 구한 제어게인값을 이용하여 neutral leg 상전압 기준치 v_N^* 을 출력한다.

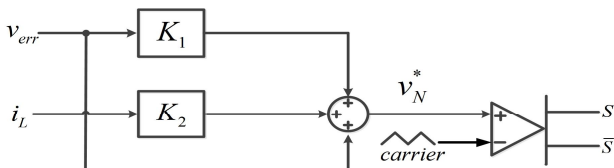


그림 3 제안한 neutral leg 제어기 블록
Fig. 3 Proposed neutral leg control block

3. 시뮬레이션

제안한 알고리즘의 성능 확인을 위하여 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameter

인버터 용량	100kVA
스위칭 주파수	5kHz
입력 직류전압	700V
출력 선간전압	380Vrms
$L_{U,V,W}$	230uH
$C_{U,V,W}$	600uF
L_N	1mH
C_{dc}	6000uF
K1, K2, K3	-6.1, 14.1, -30

그림 4는 neutral Leg 적용 전과 적용 후 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 0.1초에서 인버터가 동작하기 시작하고, 0.2초에서 U N상에 약 60A의 중성선전류가 발생하는 R 부하를 공급한다. 마지막으로 0.3초에서 neutral leg을 동작 시킨다. 시뮬레이션 결과에서 나타난 것과 같이 neutral leg

을 동작시켰을 때 직류링크커패시터를 통해 흐르는 중성선전류가 neutral leg을 통해 흐름으로써 직류링크전압 양단 오차가 감소하는 것을 알 수 있다.

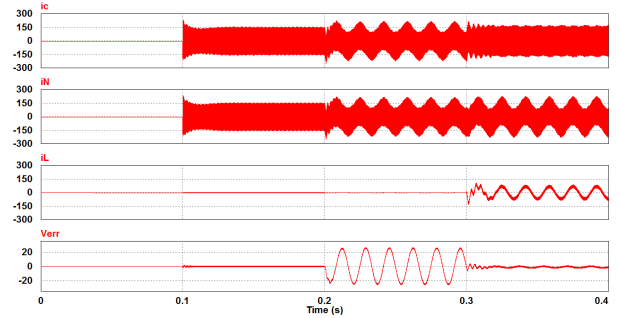


그림 4 Neutral leg 성능 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Neutral leg performance simulation result

그림 5는 파라미터 변동시 직류링크전압 양단 오차 제어 성능을 보여준다. 시뮬레이션 조건은 그림 4의 조건과 같다. 시뮬레이션 결과에서 나타난 것과 같이 L_N 과 C_{dc} 의 파라미터 변동에도 제안한 제어기 성능이 파라미터 미변동시와 비교하였을 때 우수한 특성을 유지함을 알 수 있다.

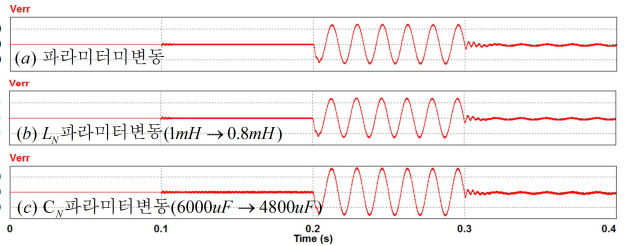


그림 5 파라미터 변동에 따른 직류링크전압 양단 오차
Fig. 5 DC link voltage error according to parameter variation

4. 결론

본 논문은 상태궤환제어를 이용하여 직류링크전압 불평형을 제어하는 neutral leg 제어기설계 방법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 제어기는 neutral leg의 파라미터 변동에도 우수한 특성을 가지는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20110029233).

참고 문헌

- [1] Q. C. Zhong, L. Hobson and M. G. Jayne, "Classical Control of the Neutral Point in 4 wire 3 phase DC AC Converters," Electrical Power Quality and Utilisation Journal, vol. 11, no. 2, pp. 111-119, 2005.
- [2] Jae Sik Lim, Changreung Park, Jungho Han, Young Il Lee, "Robust Tracking Control of a Three Phase DC AC Inverter for UPS Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 8, August, 2014, pp.4141-4151.