

예측제어 기반의 T-타입 3-레벨 인버터에서 파라미터 오차에 따른 성능 분석

윤종태, 이귀준
한국교통대학교

Performance analysis with parameter errors in predictive control based T-type 3-level inverter

JongTae Yoon, KuiJun Lee
Korea National University of Transportation

ABSTRACT

본 논문은 3상 T type 3 레벨 인버터의 모델예측제어에 관한 연구이다. 모델예측제어는 시스템의 모델링을 통한 최적의 성능을 제공하는 제어기법으로 PI 제어보다 빠른 동특성을 갖지만, 정확한 파라미터 값이 요구된다. 본 논문에서는 시스템 파라미터 오차가 3상 T type 3 레벨 인버터의 예측제어에서 어떤 영향을 주는지 알아보고 출력 파형을 분석한다.

1. 서 론

T type 3 레벨 인버터는 3 레벨의 전압을 갖기 때문에 2 레벨 인버터에 비해 큰 고조파 저감효과, 스위칭 손실 저감, 전압 변동률 저감 등의 장점을 가지고 있다. 최근 연구 동향으로는 중성점 전압제어에 대한 방법 연구, 효율 향상에 관한 연구, PWM 기법에 관한 연구 등이 이루어지고 있다.

모델예측제어기법은 물리적 상태를 고려하여 최적의 성능을 제공할 수 있는 제어기법으로서 인버터의 출력전압 제어, 3 레벨 인버터의 중성점 제어 등 많은 연구가 진행 되었다. 이러한 예측제어는 기본적으로 인버터의 제정수인 저항, 인덕턴스 및 커패시터를 정확히 알고 있음을 전제로 하므로 예측제어에 사용되는 시스템의 파라미터에 대한 오차는 출력성능의 저하를 초래할 수 있다.

본 논문에서는 파라미터의 오차에 따른 인버터의 성능변화를 시뮬레이션을 통해 알아보고 안정적인 파라미터 오차범위를 알아보고자 한다.

2. 본 론

2.1 3상 T-type 3-레벨 인버터의 예측제어 모델링

3상 T type 3 레벨 인버터에서 지령전압을 인가하기 위해서는 d q축 전압, 전류 예측제어의 모델링을 필요로 하며 모델링 과정은 다음과 같다.

상 전압 v_{gabc} 의 수식은 (1)과 같으며 상 전압을 통하여 수식 (2)인 v_{oabc} 을 계산할 수 있다. 수식 (2)을 알파베타 변환을 해주어 수식 (3)을 만들어주고 (3)을 d q 변환해주면 (4)와같이 된다.

$$v_{gabc} = L \frac{di_{abc}}{dt} + Ri_{abc} + v_{oabc} \quad (1)$$

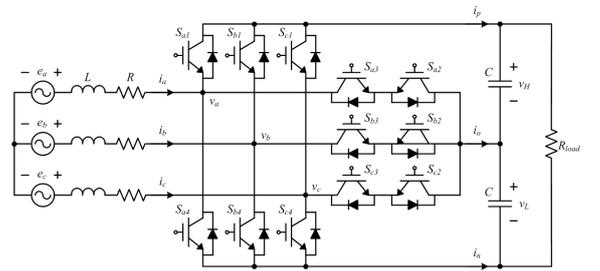


그림 1 3상 T-type 3-레벨 인버터의 회로도
Fig. 1 3Phase T-type 3-level inverter schematic

$$v_{oabc} = -L \frac{di_{abc}}{dt} - Ri_{abc} + v_{gabc} \quad (2)$$

$$v_{o\alpha\beta} = -L \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} - Ri_{\alpha\beta} + v_{g\alpha\beta} \quad (3)$$

$$v_{odq} = -j\omega L \cdot i_{dq} - L \frac{di_{dq}}{dt} - Ri_{dq} + v_{gdq} \quad (4)$$

수식(4)에서 Euler method를 사용하면

$$L \frac{di_{dq}}{dt} \approx L \frac{i_{dq}(t_{k+1}) - i_{dq}(t_k)}{T_s} \quad (5)$$

수식 (4)의 $v_{odq}(t_k)$ 을 Euler method를 사용하면 d q축 전압의 예측 값 수식 (6)을 구할 수 있게 되며 수식 (4)와 (5)를 이용하여 d q축 전류의 예측 값 수식 (7)을 구할 수 있다.

$$v_{odq}(t_{k+1}) = -j\omega L \cdot i_{dq}(t_{k+1}) - L \frac{i_{dq}(t_{k+2}) - i_{dq}(t_{k+1})}{T_s} - Ri_{dq}(t_{k+1}) + f_{dq}(t_{k+1}) \quad (6)$$

$$i_{dq}(t_{k+1}) = \frac{T_s}{L} (-v_{odq}(t_k) + f_{dq}(t_k) - j\omega L \cdot i_{dq}(t_k)) + (1 - \frac{RT_s}{L}) \cdot i_{dq}(t_k) \quad (7)$$

2.2 3상 T-type 3-레벨 인버터의 중성점 전압 제어

그림 1은 3상 T type 3 레벨 인버터의 회로도이다. DC link 단의 커패시터가 두 개의 단으로 구성되어 있고 스위치 Sa2, Sb2, Sc2와 Sa3, Sb3, Sc3가 중성점에 연결되어 있기 때문에 DC link의 중성점 전압 불균형 문제가 발생할 수 있다.

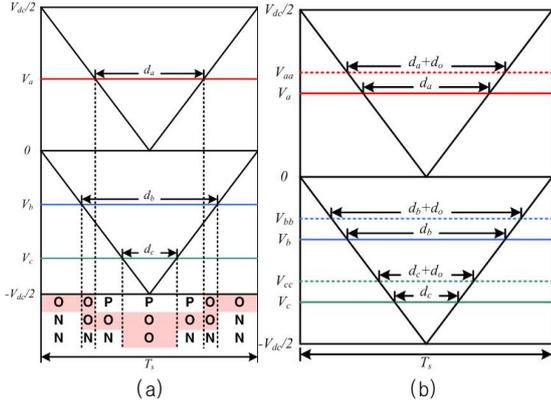


그림 2 전압 벡터 인가시간과 offset 주입 방법

Fig. 2 Offset injection method and voltage vector time

본 논문에서는 중성점 전압 불균형을 제어하기 위해 중성점 전류를 제어하여 오프셋 전압을 인가하는 방식으로 전압 불균형 문제를 해결하는 방법을 제시한다. 그림 2(a)는 전압벡터에 대한 인가시간을 나타내었으며 그림 2(b)는 전압벡터와 전압 벡터에 ottset을 더한 벡터를 나타내었다. 그림 2(a)에서 중성점 전류 i_o 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_o = (1 - d_a)i_a + d_b i_b + d_c i_c \quad (8)$$

그림 2(b)에서 전압벡터에 ottset이 추가된 중성점 전류 i_{o-ref} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{o-ref} = [(1 - (d_a + d_o))]i_a + (d_b + d_o)i_b + (d_c + d_o)i_c \quad (9)$$

또한 수식 (8)과 수식 (9)을 통하여 ottset 만큼 늘어난 시간 d_o 를 구할 수 있으며, 그림 1에서 커패시터에 대한 회로 방정식을 세우면 수식 (11)을 얻을 수 있다. i_{o-ref} 는 중성점 전압이 불균형해지면 중성점 전압의 변동을 제어하기 위해 i_o 를 0으로 만들어주기 위한 지령 전류로 수식(12)이 된다. 인가된 지령전류로 인해 계산된 duty는 ottset으로 환산되어 다음 지령 전압에 더해져서 중성점 전압의 불균형을 제어해준다.

$$d_o = \frac{i_{o-ref} - i_o}{-i_a + i_b + i_c} \quad (10)$$

$$i_o = -c \frac{dv_H}{dt} + c \frac{dv_L}{dt} = -c \frac{d}{dt}(v_H - v_L) = -c \frac{V_{dcerr}}{T_s} \quad (V_{dcerr} = v_H - v_L) \quad (11)$$

$$i_{o-ref} = -c \frac{V_{dcerr-ref} - V_{dcerr}}{T_s} * 0.5 \quad (12)$$

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 PSIM 시뮬레이션을 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 3상 T type 3 레벨 인버터의 회로도도 그림 1과 같이 구성하였다. 교류 입력전압은 3상, 380Vrms, 60Hz이며 v_H 와 v_L 은 정상상태에서 각각 375Vdc이다. 출력전압은 750Vdc이며, 커패시터는 1000uF, 인덕턴스는 5mH, 저항 부하로는 200Ω을 사용하였고, 스위칭 주파수는 10kHz이다.

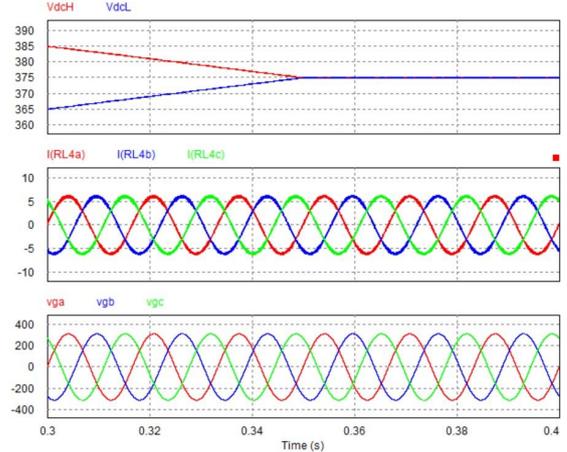


그림 3 모델예측제어 시뮬레이션

Fig. 3 Predictive control simulation

표 1은 파라미터에 오차에 따른 부하전류의 고조파 왜율 변화를 기록하였다.

표 1 파라미터 오차에 대한 고조파 왜율

Table 1 THD for parameter error

cap(uF)	i_a THD	L(mH)	i_a THD
1500	4.78%	10	2.5%
1000	4.73%	7.5	3.2%
900	4.69%	5	4.7%
800	5.44%	4	5.96%
700	9.70%	3.5	7.34%
600	14.40%	3	8.4%
500	21.20%	2.5	9.7%

4. 결론

본 논문에서는 모델예측제어에서 파라미터의 오차에 따른 인버터의 성능변화를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 파라미터 오차가 커질수록 부하전류의 고조파 왜율이 높아지는 것을 알 수 있다. 커패시터의 경우 고조파 왜율이 눈에 띄게 상승하며, 인덕터의 경우 10%의 파라미터 오차를 주었을 때 고조파 왜율이 5%이상으로 넘어가지만 계단적으로 증가함을 알 수 있다. 고조파 왜율 및 전압 전류의 리플을 고려하여 안정적인 예측제어를 하기 위해서는 커패시터의 경우 15%이내의 오차범위를 가져야 하며 인덕턴스의 경우 78%이내의 오차범위를 가져야 한다.

이 성과는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1C1B5016982).

참고 문헌

- [1] M. Schweizer and J. W. Kolar, "Design and implementation of a highly efficient three level T type converter for low voltage applications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 2, pp. 899-907, Feb. 2013.