

# 낮은 주파수 변조 지수 운전 시 인버터 선형 최대 출력 전압 크기의 변화 분석

김영웅, 이욱진  
충남대학교

## Analysis of Variations in Linear Maximum Output Voltage of Inverter Due to Low Frequency Modulation Index Operation

Yeong-Ung Kim, Wook-Jin Lee  
Chungnam National University

### ABSTRACT

인버터의 PWM은 정지좌표계의 유효 전압 벡터들을 이용하여 한 스위칭 주기 내에서 동기좌표계 지령 전압 벡터와 평균적으로 동일한 전압이 되도록 합성하는 방식이다. 그러나 주파수 변조 지수가 낮아질 경우, 즉 전압 합성 시간 동안 회전자의 회전각이 클 경우 동기좌표계 지령 전압과 실제 출력 전압에 차이가 발생하며 동시에 최대 출력 가능한 동기좌표계 전압의 크기는 점점 감소한다. 본 논문은 주파수 변조 지수가 낮아질수록 줄어드는 선형적으로 출력이 가능한 인버터의 최대 출력 전압 크기의 변화를 동기좌표계에서 분석한다.

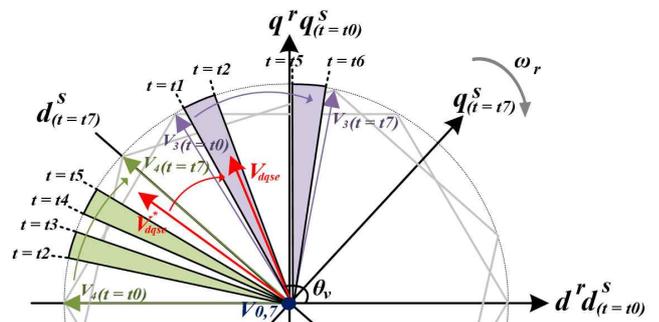


그림 1 섹터 3의 회전자 이동을 고려한 전압 합성 과정

### 1. 서론

고속 전동기는 소형화, 경량화가 가능하며 고효율 특성으로 인해 다양한 분야에 적용되고 있다. 고속 전동기의 회전 속도가 상승할수록 인버터 출력 기본파 주파수는 증가한다. 반면 스위칭 소자의 한계로 인해 인버터의 스위칭 주파수는 제한되고 있다. 이러한 이유로 인버터 출력 전압의 기본파 주파수가 스위칭 주파수에 비해 높아지며 주파수 변조 지수는 낮아진다.

인버터의 PWM은 동기좌표계 전류제어기의 출력 지령 전압에 의해 결정된 정지좌표계의 유효 전압 벡터들을 이용하여 한 스위칭 주기 내에서 동기좌표계 지령 전압과 평균적으로 동일한 전압이 되도록 합성하는 방식이다. 그러나 전동기의 운전 속도가 증가하여 주파수 변조 지수가 낮아질 경우 전압 합성 시간 동안 회전자가 이동하는 회전각이 커진다. 전동기가 회전함에 따라 유효 전압 벡터들은 원호를 그리며 인가되며 이로 인해 동기좌표계 지령 전압과 실제 출력 전압 사이에 오차가 발생한다. 이러한 오차 때문에 실제 동기좌표계상에서 바라본 전압 제한 육각형의 크기는 감소하며 인버터의 최대 출력 전압 크기도 줄어든다. 동시에 선형적으로 얻을 수 있는 최대 고정자 상전압을 의미하는 전압 제한 원의 크기도 감소한다.

본 논문은 주파수 변조 지수가 낮아질수록 줄어드는 선형적으로 출력이 가능한 인버터의 최대 출력 전압 크기의 변화를 동기좌표계에서 분석한다.

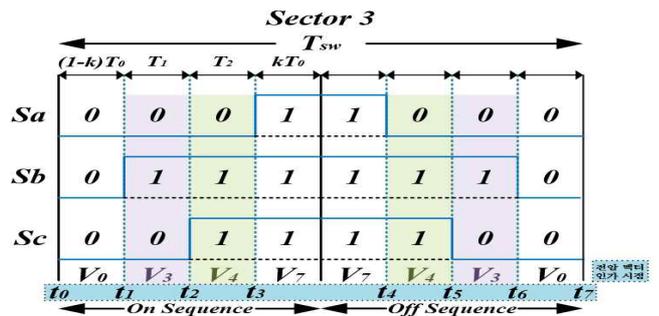


그림 2 섹터 3의 게이팅 출력 파형

### 2. 본론

#### 2.1 회전자 이동을 고려한 전압 합성

그림 1은 전동기의 회전자 이동을 고려한 전압 합성 과정을 나타낸다.  $V_{dqse}^*$ 는 지령 전압 벡터를 의미한다. 이 때 게이팅 출력 파형은 그림 2와 같고 k는 0.5로 가정하였다. 그림 1에서 동기좌표계는 정지 상태이며 정지좌표계는 전동기의 운전 각속도  $\omega_r$ 로 시계 방향으로 회전하고 있다. 따라서 전압 합성 시간 동안 유효 전압 벡터  $V_3$ 와  $V_4$ 는 회전자와 동일한 속도로 원호를 그리며 인가된다. 한 스위칭 주기  $T_{SW}$ 동안의 실제 전동기에 인가되는 동기좌표계 dq축 평균 전압을 식(1), (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$\overline{V_{ds}^r} = \frac{2V_{dc}}{3T_{SW}} \left( \int_{t_1}^{t_2} \cos(-\omega_r t + a - \theta_{r0}) dt + \int_{t_2}^{t_3} \cos(-\omega_r t + b - \theta_{r0}) dt + \int_{t_4}^{t_5} \cos(-\omega_r t + b - \theta_{r0}) dt + \int_{t_5}^{t_6} \cos(-\omega_r t + a - \theta_{r0}) dt \right) \quad (1)$$

$$\overline{V_{qs}^r} = \frac{2V_{dc}}{3T_{SW}} \left( \int_{t_1}^{t_2} \sin(-\omega_r t + a - \theta_{r0}) dt + \int_{t_2}^{t_3} \sin(-\omega_r t + b - \theta_{r0}) dt + \int_{t_4}^{t_5} \sin(-\omega_r t + b - \theta_{r0}) dt + \int_{t_5}^{t_6} \sin(-\omega_r t + a - \theta_{r0}) dt \right) \quad (2)$$

$a$ : 첫번째 인가되는 유효벡터 각,  $b$ : 두번째 인가되는 유효벡터 각,  $\theta_{r0}$ : 회전자 위치( $t=t_0$ )  
(유효벡터 각:  $\angle V_1 = 0^\circ, \angle V_2 = 60^\circ, \angle V_3 = 120^\circ, \angle V_4 = 180^\circ, \angle V_5 = 240^\circ, \angle V_6 = 300^\circ$ )

그림 1의  $V_{dqsc}$ 는 실제 전동기에 인가되는 dq축 평균 전압을 벡터로 표현한 것이다. 주파수 변조 지수가 낮아질수록  $V_{dqsc}$ 의 크기는 감소하며  $V_{dqsc}^*$ 와  $V_{dqsc}$  사이의 오차는 증가한다.

## 2.2. 선형 변조 영역 인버터 최대 출력 전압 분석

공간 전압 벡터 전압 변조 방식(SVPWM)의 선형적으로 출력 가능한 최대 전압은 인버터 전압 제한 육각형의 내접원의 크기이다. 그림 3은 내접원의 크기를 갖는 모든 지령 전압 벡터, 즉 전압 제한 원을 2.1절과 같이 동기좌표계에서 실제 전동기에 인가되는 모든 전압 벡터로 바라본 그림이다. 실제 전동기에 인가되는 모든 전압 벡터의 크기  $|V_{dqsc}|$ 를 동기좌표계 d축을 기준으로 하는 전압각  $\theta_V$ 에 따라 나타내었다. 그림 3에서 PWM 방식과 관계없이 주파수 변조 지수(Fratio)가 낮아질수록  $|V_{dqsc}|$ 가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 k값에 따라 유효 전압 벡터와 영 전압 벡터의 인가 시점이 다르므로 PWM 방식별로  $\theta_V$ 에 대한  $|V_{dqsc}|$ 가 상이한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 전압 제한 원을 실제 전동기에 인가되는 동기좌표계에서 바라보면  $\theta_V$ 에 따라 균일하지 않은 전압으로 보인다는 것을 알 수 있다. 그리고 주파수 변조 지수가 낮아질수록 인버터 출력 전압 기본과 주파수 한 주기 내에서 전압이 변동하는 폭이 커지며 선형적으로 출력 가능한 최대 전압의 크기는 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것의 원인은 전동기의 회전으로 인한 전압 오차이며 이를 보상하여 지령 전압과 동일한 전압을 전동기에 인가할 수 있도록 하는 연구가 있었다.<sup>[1]</sup> 그러나 실제로 스위칭 주파수 대비 출력 기본과 주파수가 낮아지면 선형적으로 출력 가능한 최대 전압은 감소한다. [1]에서 제안한 방법을 통해 전압 오차를 보상할지라도 지령 전압이 선형적으로 출력 가능한 동기좌표계 최대 전압의 크기를 초과한다면 선형적인 전류 제어가 불가능하다.

그림 4는 위와 같은 방법으로 전압 제한 육각형의 모든 모서리 지령 전압 벡터를 실제 전동기에 인가되는 동기좌표계에서 바라본 그림이다. 그림 4에서  $V_{SMAX}^*$ 는 전압 제한 육각형의 내접원의 크기,  $V_{SMAX}$ 는 전압 오차로 인해 감소한 내접원의 크기이다.  $V_{SMAX}$ 는 주파수 변조 지수를 고려한 새로운 선형적으로 출력 가능한 동기좌표계 최대 전압을 의미한다. 그림 4에서 확인할 수 있듯이  $V_{SMAX}$ 는 실제 동기좌표계상의 전압 제한 육각형과 원점의 최소 거리를 의미하며,  $\theta_{r0}$ 에 관계없이 일정한 값을 유지한다. 그림 5는 주파수 변조 지수에 따른  $V_{SMAX}$ 의 크기 변화를 나타낸다. 주파수 변조 지수가 낮아질수록  $V_{SMAX}^*$ 와  $V_{SMAX}$ 의 오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

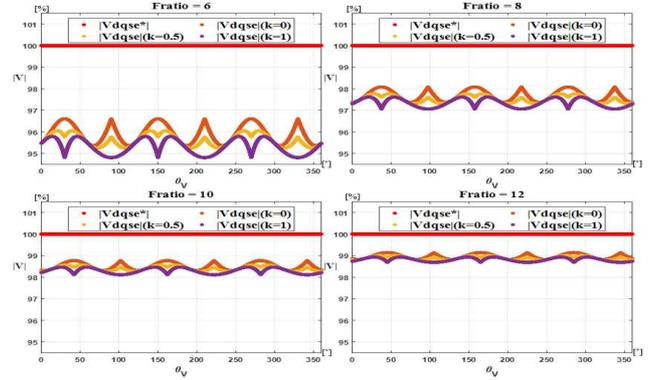


그림 3 동기좌표계에서 바라본 전압 제한원의 크기(Fratio = 6, 8, 10, 12)

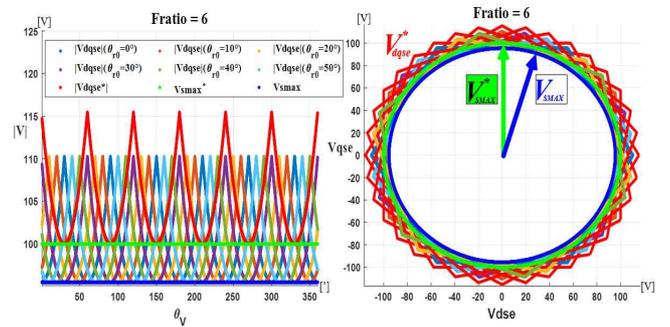


그림 4 동기좌표계에서 바라본 전압 제한 육각형의 크기(Fratio = 6)

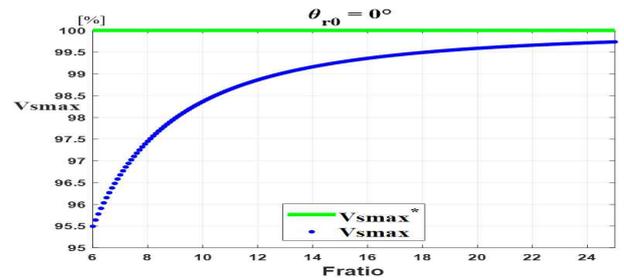


그림 5 주파수 변조 지수에 따른  $V_{SMAX}$ 의 변화( $\theta_r = 0^\circ$ )

## 3. 결론

본 논문은 전동기의 회전으로 인한 전압 오차가 전압 제한 육각형의 내접원에 미치는 영향을 주파수 변조 지수와 PWM 방식에 따라 확인하였다. 또한 주파수 변조 지수가 낮아질수록 선형적으로 출력 가능한 동기좌표계상의 인버터 최대 출력 전압 크기가 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 주파수 변조 지수에 따른 인버터 선형 최대 출력 전압 크기를 전동기 제어에 반영한다면 원활한 선형적인 전류 제어를 할 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] S. Jo and W. Lee, "Compensation method of average current sampling error under the operating condition of low sampling to fundamental frequency ratio," Journal of Power Electronics(2023)