

# 전압 제한 근처에서 원호형 전압지령을 통한 매입형 영구자석 동기 전동기의 토크 리플 저감

채원담, 임규철, 황철민, 박병량 하정익  
서울대학교 전기·정보공학부

## Torque Ripple Reduction in IPMSM Through Circular Voltage Command Near Voltage Limits

Won tom Chae, Gyu Cheol Lim, Cheol min Hwang, Byung ryang Park Jung-Ik Ha  
Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

본 논문은 매입형 영구자석 동기 전동기가 전압 제한 근처에서 동작하는 경우 원호형 전압 지령을 통해 토크 리플을 최소화하는 방법을 제안한다. 전동기 사용 시 외란 토크에 의해 토크 리플이 발생할 수 있다. 이를 저감하기 위해 고조파 전압 주입과 단위 전류당 최대 토크 (MTPA) 제도를 이용해 최소 전류를 사용하는 토크 리플 저감 연구가 진행되었다. 하지만 전압 제한 근처에서 전동기가 동작하는 경우 전압 지령이 전압 제한을 벗어날 수 있다. 이 경우 평균 전압 지령의 왜곡이 발생하여 평균 토크의 오차가 발생한다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 원호형 전압 지령 방식을 제안한다. 제안된 방식의 구조를 설명하고 시뮬레이션을 통해 전압 제한 근처에서 전동기가 동작하는 경우에도 평균 토크 오차 없이 토크 리플을 최소화할 수 있음을 검증했다.

### 1. 서론

매입형 영구자석 동기 전동기는 영구자석을 사용해 자속을 생성하므로 높은 자속밀도와 효율을 갖는다. 이러한 이점에 의해 매입형 영구자석 동기 전동기는 자동차, 엘리베이터 등 많은 산업 분야에서 사용되고 있다. 전동기 운전 시 외란 토크에 의해 토크 리플이 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고조파 전압 주입을 통한 토크 리플 저감<sup>[1]</sup>과 단위 전류당 최대 토크 (MTPA) 제도를 이용해 최소 전류를 사용하는 토크 리플 저감<sup>[2]</sup> 연구가 진행되었다. 그러나 해당 연구들은 전동기가 전압 제한 근처에서 동작하는 경우 전압 제한에 의한 전압 지령의 왜곡을 고려하지 않았다. 이는 고려하지 않는 경우 전동기의 평균 토크의 오차를 발생시킬 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문은 동기 좌표계 전압 지령 크기를 일정하게 유지하며 토크 리플을 저감하는 원호형 전압 지령 기법을 제안한다. 먼저 최소 전류를 사용하는 토크 리플 저감 기법을 설명한다. 그 후 원호형 전압 지령을 통한 토크 리플 저감 기법을 상세히 설명한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 두 기법을 비교 분석한다.

### 2. 최소 전류를 사용하는 토크 리플 저감 기법

그림 1-(a)은 최소 전류를 사용하는 토크 리플 저감 기법 시스템의 제어 블록 다이어그램이다. 해당 시스템은 토크 지령과 외란 토크를 고려해 MTPA 곡선에서 전류 지령을 생성한다. 해당 시스템은 동기 좌표계에서 d축과 q축 전류를 직류로 제어하기 위해 복소 벡터 전류 제어기를 사용했다. 외란 토크의 주파수 ( $\omega_0$ )가 전류 제어기의 대역폭 ( $\omega_{cc}$ )보다 큰 경우를

대비하여 공진 제어기를 추가하여 최종 전류 지령을 생성한다. 사용된 복소 벡터 전류 제어기와 공진 제어기는 각각 식 (1)과 식 (2)와 같이 표현된다. 해당 수식에서 위 첨자 \*는 지령 값을 의미한다. 아래 첨자 0은 회전 좌표계에서의 직류 값을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} V_{d0}^{*r}(s) \\ V_{q0}^{*r}(s) \end{bmatrix} = \omega_{cc} \begin{bmatrix} L_d + \frac{1}{s}R_s & -\frac{1}{s}\omega_r L_q \\ \frac{1}{s}\omega_r L_d & L_q + \frac{1}{s}R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{d0}^{*r}(s) - i_{d0}^r(s) \\ i_{q0}^{*r}(s) - i_{q0}^r(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{2K_r s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2)$$

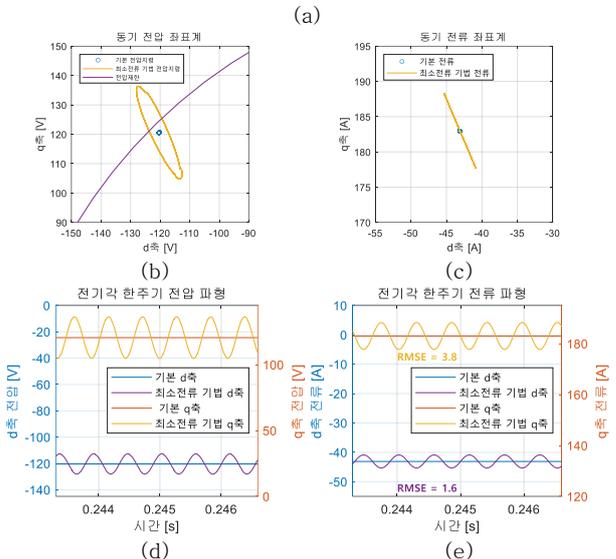
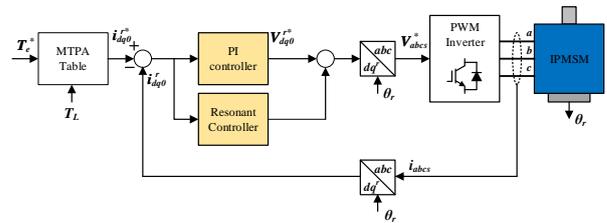


그림 1 최소 전류를 사용하는 토크 리플 저감 기법: (a) 제어 블록 다이어그램 (b) 동기 전압 좌표계, (c) 동기 전류 좌표계, (d) 전기각 한주기 전압 파형, (e) 전기각 한주기 전류 파형  
Fig. 1 Torque Ripple Reduction Method Using Minimum Current: (a) block diagram, (b) synchronous voltage reference frame, (c) synchronous current reference frame, (d) voltage waveform at one electrical angle, (e) current waveform at one electrical angle

그림 1-(c)를 통해 최소 전류를 사용하는 토크 리플 저감 기법은 전류 지령이 외란 토크에 따라 MTPA 곡선 내에서 움직이는 것을 알 수 있다. MTPA란 단위 전류당 최대 토크를 생성하는 전류의 궤도이므로 해당 기법을 사용하는 경우 전류 리플이 작다. 이에 따라 d, q축 전류의 리플이 작음을 그림 1-(e)의 파형과 표기된 평균 제곱근 오차(RMSE) 값을 통해 확인할 수 있다.

그림 1-(b)를 통해 운전점이 전압 제한과 가까운 경우 해당 전류를 생성하기 위한 전압은 전압 제한을 벗어남을 알 수 있다. 이는 MTPA 곡선내의 전류를 생성하기 위한 d, q축 전압의 위상각이 일치하지 않아 전압지령의 크기가 변동하기 때문이다. 이를 그림 1-(d)를 통해 확인할 수 있다. 이에 따라 해당 기법을 전압 제한 근처에서 사용할 경우 전압지령의 왜곡으로 인해 평균 토크가 낮아질 수 있다.

### 3. 원호형 전압 지령을 통한 토크 리플 저감 기법

그림 2-(a)은 원호형 전압 지령을 통한 토크 리플 저감 기법 시스템의 제어 블록 다이어그램이다. 해당 시스템 역시 복소 벡터 전류 제어기를 사용했다. 원호형 전압 지령 시스템의 경우 먼저 d-q축 직류전압 지령으로부터 직류전압 지령 크기(M)와 직류전압 지령 각도( $\theta$ )를 구한다. 그 후 원점을 기준으로 직류전압 지령 크기를 반지름을 갖는 원호를 직류전압 지령 각도에서 진폭 각도( $m'$ )만큼 흔들어 고조파 전압을 포함한 최종 전압 지령을 생성한다. 직류전압 지령 크기(M)와 직류전압 지령 각도는 각각 식(3)과 식(4)과 같이 표현된다. 최종 전압 지령은 식(5)와 같이 표현된다.

$$M = \sqrt{V_{d0}^2 + V_{q0}^2} \quad (3)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{V_{q0}}{V_{d0}}\right) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_d^{r*} \\ V_q^{r*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \cos(\theta + m' \sin(6\omega_r t + \phi')) \\ M \sin(\theta + m' \sin(6\omega_r t + \phi')) \end{bmatrix} \quad (5)$$

최종 전압 지령에 포함된 고조파 전압에 의해 전동기의 전류에 고조파 전류 성분이 추가된다. 고조파 전류 성분을 제거하지 않고 전류 제어기의 입력으로 사용하는 경우 전류 제어기가 전류를 직류로 제어하려는 특성에 의해 직류 전압 지령의 왜곡이 발생한다. 이를 방지하기 위해 notch 필터를 사용해 측정 전류에서 고조파 전류 성분을 제거한 후 전류 제어기의 입력으로 사용한다. 사용한 notch 필터는 식 (6)과 같다. notch 필터에 의해 전류 제어기 입력으로 사용되는 전류는 식(7)와 같다.

$$G(s) = \frac{s^2 + \omega_{cc}^2}{s^2 + 2\zeta\omega_{cc}s + \omega_{cc}^2} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_{d0}^{r*}(s) \\ i_{q0}^{r*}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^{r*}(s) \\ i_q^{r*}(s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{dk}^{r*}(s) \\ i_{qk}^{r*}(s) \end{bmatrix} \quad (7)$$

그림 2-(b)를 통해 원호형 고조파 전압 지령 기법을 사용하는 경우 운전점이 전압 제한과 가까운 경우에도 전압 지령이 전압 제한을 벗어나지 않음을 확인할 수 있다. 이는 d, q축 전압지령의 위상각( $m' \sin(6\omega_r t + \phi')$ )이 일치하여 고조파 전압의 위상각이 일치하기 때문이다. 이를 그림 2-(d)를 통해 확인할 수 있다. 이에 따라 해당 기법을 사용하는 경우 전압 제한 근처에서도 전압 지령의 왜곡이 발생하지 않는다.

해당 기법은 전류 리플을 고려하지 않았으므로 전류 리플의

크기가 MTPA 기법에 비해 증가하는 것을 그림 2-(c)를 통해 확인할 수 있다. 이에 따라 d, q축 전류의 리플 또한 증가하는 것을 그림 2-(e)의 파형과 표기된 RMSE 값을 통해 확인할 수 있다. 따라서 해당 기법을 사용할 경우 전동기의 손실은 증가한다.

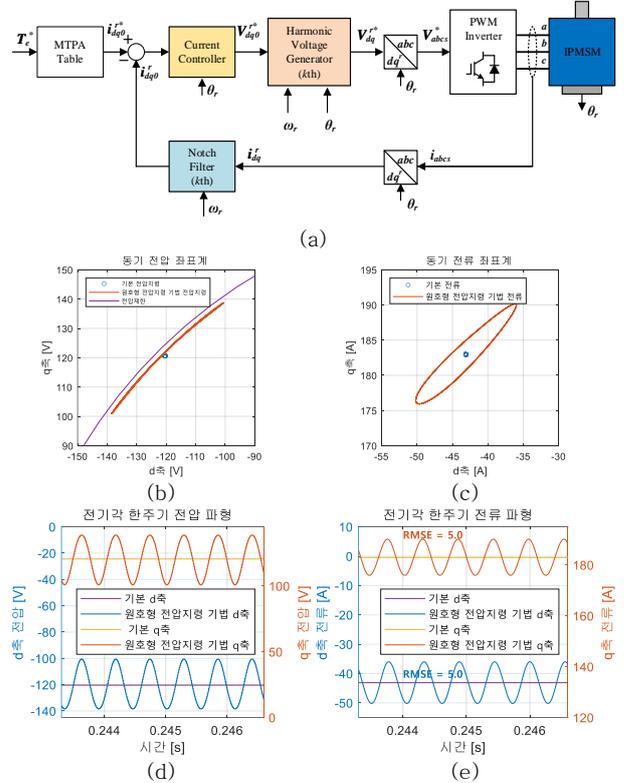


그림 2 원호형 전압 지령을 통한 토크 리플 저감 기법: (a) 제어 블록 다이어그램 (b) 동기 전압 좌표계, (c) 동기 전류 좌표계, (d) 전기각 한주기 전압 파형, (e) 전기각 한주기 전류 파형  
Fig. 2 Torque Ripple Reduction Method Using Circular Voltage Command: (a) block diagram, (b) synchronous voltage reference frame, (c) synchronous current reference frame, (d) voltage waveform at one electrical angle, (e) current waveform at one electrical angle

그림 3과 같이 원호형 전압 지령의 위상각( $\phi$ )과 진폭 각도(m)에 따라 토크의 RMSE 값 즉 토크 리플이 다르게 나타난다. 이는 원호형 전압 지령의 위상각과 진폭 각도에 따라 토크 지령의 파형이 변하기 때문이다. 토크 지령의 위상각이 외란 토크의 위상각과 180도 차이가 나고, 토크 지령의 진폭이 외란 토크의 진폭과 일치하는 경우 토크 리플을 최소화할 수 있다. 따라서 이러한 토크 지령을 생성하는 원호형 전압 지령의 진폭 각도와 위상각을 사용해야 토크 리플을 최소화할 수 있다.

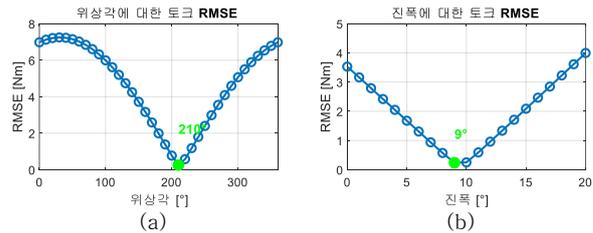


그림 3 원호형 전압지령의 위상각과 진폭각도에 대한 토크 RMSE  
Fig. 3 Torque RMSE with Respect to the Phase Angle and Amplitude Angle of Circular Voltage Command

## 4. 시뮬레이션

표 1. 모터 제정수

Table 1. Motor parameter

제정수	값	제정수	값
극수	16	$\lambda_f$	72.7 mV·s
$V_{dc}$	300 V	$L_d$	318 $\mu$ H
$R_s$	15.46 m $\Omega$	$L_q$	461 $\mu$ H

표 2. 시뮬레이션 운전점 정보

Table 2. Simulation operating point information

운전점	값	운전점	값
$V_{lim}$	173.2 V	$T_L$	5 N·m
$V_{d0}$	-120.3 V	M	170.3 V
$V_{q0}$	120.5 V	$\theta$	135.0°

제안하는 원호형 전압 지령 시스템의 성능을 검증하기 위해 MATLAB Simulink를 사용해 토크 지령 170 N·m, 속도 지령 300 Hz (=2250 r/min)의 운전점에서 회전속도의 6고조파에 해당하는 외란 토크를 감소시키는 시뮬레이션을 진행했다. 모터 제정수는 표 1, 시뮬레이션 운전점에 대한 정보는 표 2와 같다.

표 3. 시뮬레이션 토크 결과값

Table 3. Simulation torque result

방식	평균 토크	평균 토크 오차	토크 RMSE	토크 리플 감소율
기본	170.0 N·m		3.6 N·m	
MTPA	166.2 N·m	3.8 N·m	1.2 N·m	66.7 %
원호형	169.9 N·m	0.1 N·m	0.2 N·m	94.4 %

표 4. 시뮬레이션 전류 결과값

Table 4. Simulation current result

방식	d축 전류 RMSE	q축 전류 RMSE
MTPA	0.6 A	2.6 A
원호형	5.0 A	5.0 A

전압 지령이 선형 변조 영역을 벗어난 경우 동일 위상 과변조 기법을 사용해 전압 지령을 생성했다. 원호형 전압 지령 시스템의 경우 토크 리플을 최소화하는 진폭 각도(9°)와 위상각(210°)을 찾아 사용했다. 기본 방식의 평균 토크와 각 기법의 평균 토크의 차이를 계산하여 평균 토크 오차로 표기했다. 각 방식의 RMSE 값을 계산하여 리플을 수치화 했다. 기본 방식의 토크 RMSE 값과 각 방식의 토크 RMSE 값을 사용하여 토크 리플 감소율을 계산했다. 시뮬레이션 결과 토크 관련 수치는 표 3, 전류 관련 수치는 표 4와 같다.

그림 4-(b)를 통해 최소 전류 기법은 전압 지령의 왜곡이 발생하지만 원호형 전압 지령 기법은 전압 지령의 왜곡이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

두 기법 모두 토크 리플이 감소하였으나 원호형 전압 지령 기법 사용 시 토크 리플의 감소율이 더 컸다. 또한 최소 전류 기법은 평균 토크 오차 크게 나타났다. 반면 원호형 전압 지령 기법은 평균 토크 오차가 매우 작게 나타났음을 그림 4-(a)를 통해 확인할 수 있다.

최소 전류 기법에서 전압 지령의 왜곡에 의해 전류의 왜도가 MTPA 곡선에서 벗어났음에도 전류 리플은 원호형 전압 지령 기법에서 더 컸다. 이에 따라 d, q축 전류의 리플 역시 원호형 전압 지령 기법에서 더 큰 것을 그림 4-(c, e)를 통해 확인할 수 있다.

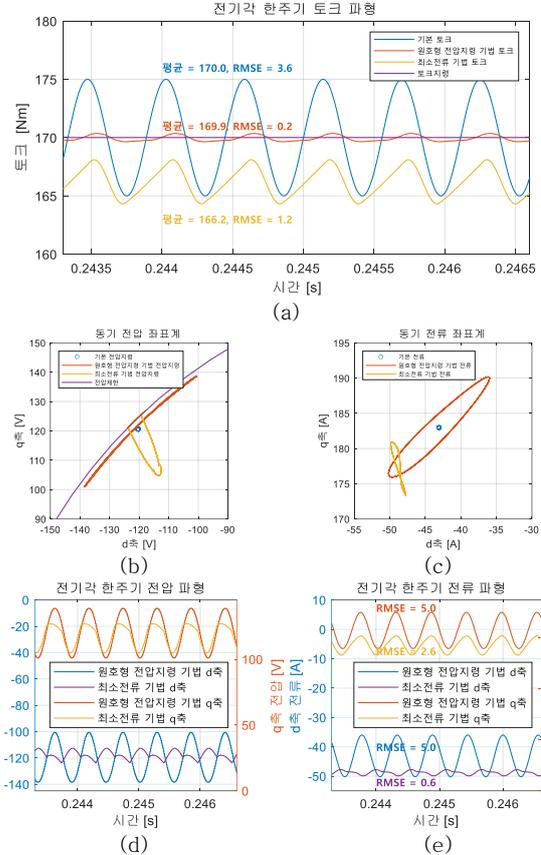


그림 4 최소 전류 기법과 원호형 전압 지령 기법 비교: (a) 전기각 한주기 토크 파형 (b) 동기 전압좌표계, (c) 동기 전류좌표계, (d) 전기각 한주기 전압 파형, (e) 전기각 한주기 전류 파형

Fig. 4 comparison between Minimum Current method and Circular Voltage Command method: (a) torque waveform at one electrical angle, (b) synchronous voltage reference frame, (c) synchronous current reference frame, (d) voltage waveform at one electrical angle, (e) current waveform at one electrical angle

## 5. 결론

본 논문에서는 전압 제한 근처 운전점에서 토크 리플 감소를 위한 원호형 전압 지령 방식을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해 평균 토크를 토크 지령과 동일하게 유지하며 토크 리플이 감소함을 확인하였다.

이 논문은 서울대학교 전력연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

- [1] I. Kärkkäinen and A. Arkkio, "Harmonic torque suppression by manual voltage injection," The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, Italy,
- [2] 2010H. -J. Cho, Y. -C. Kwon and S. -K. Sul, "Torque Ripple-Minimizing Control of IPMSM With Optimized Current Trajectory," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 4, pp. 3852-3862, July-Aug. 2021