

PMSM 고속운전 시 토크리플 저감 알고리즘

김중현*, 조관열*, 김학원*, 남명준* 임병국*, 진중학**, 이종훈**
한국교통대학교 제어계측학과*, (주)만도**

Torque Ripple Reduction Algorithm of PMSM at High Speed Operation

Jong Hyun Kim*, Kwan Yuhl Cho*, Hag Wone Kim*, Byung Kuk Lim*, Myung Joon Nam*
Jong Hag Jin**, Jong Hoon Lee**

*Department of Control & Instrumentation Engineering, Korea University of Transportation

**Mando Corporation

ABSTRACT

왜곡된 역기전력을 갖는 매입형 영구자석동기전동기를 정현파 전류로 제어할 경우 역기전력의 왜곡으로 인해 발생하는 토크리플은 전동기의 진동, 소음, 효율 저하의 요인이 된다. 저속운전의 경우 토크리플을 상쇄할 수 있는 고조파전류를 인가하여 전류제어에 의해 토크리플을 줄일 수 있다. 그러나 고조파전류제어에 의한 토크리플 저감은 전류제어기의 대역폭에 의해 전류제어 특성이 좌우되므로 고조파 보상전류의 주파수가 높은 경우 적절한 보상이 되지 않는다. 본 논문에서는 전동기의 고속운전 시 고조파 전류에 해당되는 고조파 전압을 보상함으로써 역기전력에 의한 토크리플을 저감한다. 제안된 토크리플 저감 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1, 서론

최근 모터산업이 발전함에 따라 많은 분야에서 고효율 모터 사용이 증가하고 있다. 이 중 냉장고, 에어컨, (하이브리드)전기자동차, 모터구동 파워 스티어링, 전기자전거 등 사람과 밀접한 관계가 있는 제품들은 소음과 진동에 매우 민감하다. 소음과 진동의 원인은 매우 다양하나 모터의 토크리플도 주요한 하나의 요인이다. 영구자석동기전동기의 역기전력에 고조파가 있는 경우 정현파 전류로 제어 시 역기전력의 고조파에 의해 토크리플이 발생한다. 역기전력의 고조파에 의한 토크리플을 저감하기 위해 토크리플을 상쇄할 수 있는 6차 또는 12차 고조파 전류를 전류지령에 추가하는 방법이 저속운전에서 사용되고 있다.^{[1][2]} 그러나 고속운전 시 토크리플 보상전류의 주파수가 전류제어기의 대역폭에 근접하거나 대역폭보다 높아질 경우 토크리플 보상을 위한 고조파 전류제어가 어렵게 된다. 본 논문에서는 고속운전 시 역기전력의 고조파에 의한 토크리플을 저감하기 위해 토크리플 저감 전압을 전압지령에 보상하고 전압제어를 통하여 토크리플을 저감하는 알고리즘을 제안한다.

2. 본론

2.1 역기전력 고조파 성분을 고려한 PMSM 모델링

영구자석동기전동기의 역기전력이 고조파를 포함할 경우 dq 축 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[1]

$$v_d = r_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q - \omega_r \lambda_{qf_har} \quad (1)$$

$$v_q = r_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \psi_f \omega_r + \omega_r \lambda_{df_har}$$

여기서 $\lambda_{df_har}, \lambda_{qf_har}$ 는 각각 영구자석에 의한 d축 및 q축 쇠교자속의 고조파를 나타내며 6차 및 12차의 고조파를 고려할 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_{df_har} &= -\lambda_{df6} \cos 6\theta_r + \lambda_{df12} \cos 12\theta_r \\ \lambda_{qf_har} &= \lambda_{qf6} \sin 6\theta_r - \lambda_{qf12} \sin 12\theta_r \end{aligned} \quad (2)$$

또한 영구자석동기전동기의 토크 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3P}{4} (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) + \frac{3P}{4} (\lambda_{df_har} i_q - \lambda_{qf_har} i_d) \quad (3)$$

그림 1은 자동차 조향장치용 영구자석동기전동기의 상 역기전력과 FFT 분석 결과이다. FFT분석 결과 5차 및 7차 고조파가 크게 나타나며 이러한 고조파는 dq축에서 6차 고조파로 나타난다.

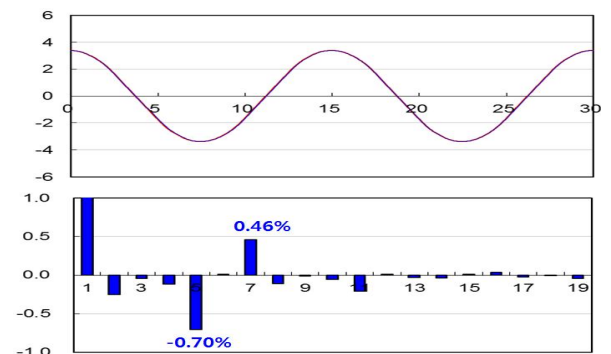


Fig. 1 Back emf and FFT analysis

2.2 고속운전 시 토크리플 저감 알고리즘

고조파 쇠교자속에 의한 토크리플을 저감하기 위한 고조파 전류를 보상할 경우 마그네틱 토크(Magnetic torque)는 식 (3)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{mag} + T_{mag_har} = \frac{3P}{4} ((\psi_f + \lambda_{df_har})(i_{qo} + i_{qh}) - \lambda_{qf_har}(i_{do} + i_{dh})) \quad (4)$$

여기서 i_{do}, i_{qo} 는 전류지령, i_{dh}, i_{qh} 는 토크리플 보상전류이다. 식 (4)에서 마그네틱 토크의 고조파 성분은 식 (5)와 같이 되며 마그네틱 토크를 0(Zero)으로 하기 위한 q축 보상전류는 상대적으로 크기가 작은 고조파 쇄교자속과 고조파 전류의 곱을 무시하면 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{mag_har} = \frac{3P}{4} (\lambda_{df_har} i_{qo} + \psi_f i_{qh} - \lambda_{qf_har} i_{do}) = 0 \quad (5)$$

$$i_{qh} = \frac{-\lambda_{df_har} i_{qo} + \lambda_{qf_har} i_{do}}{\psi_f} \quad (6)$$

$$= \frac{1}{\psi_f} \sqrt{(\lambda_{df_har} i_{qo})^2 + (\lambda_{qf_har} i_{do})^2} \sin(6\theta_r + \alpha_6)$$

식 (4)에서 토크리플 토크는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며 토크리플 토크를 0(Zero)으로 하기 위한 d축 보상전류는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{rel} + T_{rel_har} = \frac{3P}{4} (L_d - L_q)(i_{do} i_{qo} + i_{qo} i_{dh} + i_{do} i_{qh} + i_{dh} i_{qh}) \quad (7)$$

$$i_{qh} = -\frac{i_{do}}{i_{qo}} i_{qh} \quad (8)$$

$$= -\frac{i_{do}}{i_{qo} \psi_f} \sqrt{(\lambda_{df_har} i_{qo})^2 + (\lambda_{qf_har} i_{do})^2} \sin(6\theta_r + \alpha_6)$$

고속운전 시 식 (6)과 식 (8)의 고조파 전류를 모터에 인가하기 위한 dq축 전압은 식 (2)에서 고조파 전류에 대한 고조파 성분의 전압만을 고려하면 다음과 같다.

$$v_{qh} = r_s i_{qh} + L_q \frac{d}{dt} i_{qh} + \omega_r L_d i_{dh} \quad (9)$$

$$v_{dh} = r_s i_{dh} + L_d \frac{d}{dt} i_{dh} - \omega_r L_q i_{qh}$$

식 (9)의 고조파 보상전압에서 고속운전의 경우 미분항의 영향도가 가장 크게 나타난다. 따라서 dq 보상전압에 미분항만 포함할 경우 dq 보상전압은 식 (6), (8), (9)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{qh} = L_q \frac{6\omega_r}{\psi_f} I_{har} \cos(6\theta_r + \alpha_6)$$

$$v_{dh} = -L_d \frac{6\omega_r}{\psi_f} \frac{i_{do}}{i_{qo}} I_{har} \cos(6\theta_r + \alpha_6) \quad (10)$$

$$I_{har} = \sqrt{(\lambda_{df_har} i_{qo})^2 + (\lambda_{qf_har} i_{do})^2}$$

$$\alpha_6 = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{df_har} i_{qo}}{\lambda_{qf_har} i_{do}} \right)$$

2.3 모의 해석

본 연구의 영구자석동기전동기는 모터구동 파워스티어링용으로 8극, 영구자석 매립형 구조를 가지며, DC 링크전압은 12V, PWM 주파수는 16kHz, 모터의 속도는 1,200RPM으로 구동하였다. 그림 2는 쇄교자속의 6차 고조파에 의한 토크리플을

보상하기 위한 dq축 보상전압을 나타낸다. d축 보상전압에 비해 q축 보상전압이 크게 나타난다. 그림 3은 보상전압이 없을 경우, 그림 4는 보상전압을 인가할 경우 토크리플과 토크의 고조파 성분을 나타낸다. 6차 성분의 보상전압에 의해 6차 토크리플이 1.32%에서 0.19%로 감소함을 알 수 있다.

Table. 1 Parameter of PMSM

Phase resistance (R_s)	14.0 mΩ
d axis inductance (L_d)	52.0 uH
q axis inductance (L_q)	59.0 uH
Back emf constant (ψ_f)	8.1 mVsec
Number of poles (P)	8

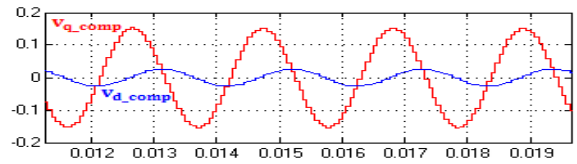


Fig. 2 d-q axis compensation voltage

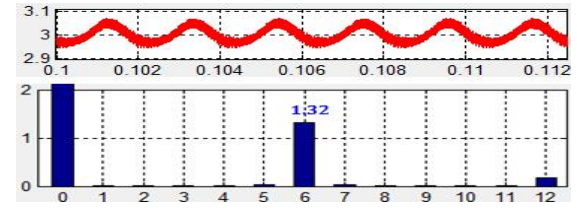


Fig. 3 Torque ripple and FFT without compensation

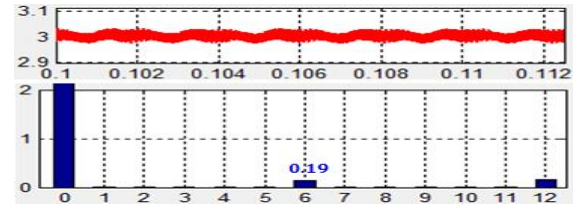


Fig. 4 Torque ripple and FFT with compensation

3. 결론

본 논문에서는 고속운전 시 영구자석동기전동기의 역기전력의 고조파에 의한 토크리플을 저감하기 위해 전압보상 알고리즘을 제안하였다. 모의해석을 통해 토크리플이 저감됨을 확인하였고 향후 실험으로 검증할 예정이다.

이 논문은 (주)만도의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Y. S. Jin, K. Y. Cho, H. W. Kim, B. K. Lim, and B. M. Han, "Torque ripple reduction based on flux linkage harmonics observer for an interior PM synchronous motor including back EMF harmonics," Transaction of Korean Institute of Power Electronics, Vol. 18, No. 4, pp. 367-375, August 2013.
- [2] S. H. Lee, I. P. Hong, S. J. Park, and C. U. Kim, "Torque ripple minimization for IPMSM with non sinusoidal back EMF." Transaction of Korean Institute of Power Electronics, Vol. 7, No. 1, pp. 91-100, Feb. 2002.