

직접 토크 제어 구동 IPMSM의 최대 토크 운전

박내춘, 김상훈
강원대학교

Maximum Torque control for IPMSM Drive Systems based on Direct Torque Control

Nae Chun Park, Sang Hoon Kim
Kangwon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 직접 토크 제어(Direct Torque Control, DTC) 방식을 이용한 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)의 운전 영역을 자속 평면에서 분석하고, 약자속 제어를 포함한 전 운전 영역에서의 최대 토크 운전 기법을 제안하였다.

1. 서 론

IPMSM은 큰 출력밀도, 높은 효율, 고속 운전의 유리함으로 인해 고성능 제어가 요구되는 분야에 적용이 확대되고 있다.^[1] IPMSM의 고성능 순시 토크 제어기법은 크게 벡터 제어기법과 직접 토크 제어 기법으로 나눌 수 있다. DTC 기법은 자속과 토크를 직접 제어하여 벡터 제어기법보다 동특성이 빠르고, 제어구조가 단순하며, 토크의 제어특성이 전동기의 정수변화에 영향이 적고, 센서리스 운전이 유리하여 최근 관심이 늘어나고 있다.^[2] IPMSM의 응용 분야 중에서, 전기 자동차와 같은 넓은 운전 영역과 기저속도 이하에서 큰 토크를 요구하는 분야에서는 약자속 운전이 필요하다.

본 논문에서는 전압과 전류 제한 조건을 모두 고려한 최적의 고정자 자속 벡터의 궤적을 자속 평면에서 해석하여 IPMSM의 직접 토크 제어기법에 적합한 약자속 제어기법을 제안한다. 제안한 기법은 일정 토크 영역부터 일정 출력 영역까지 최대 토크를 발생하는 최적의 운전점을 구할 수 있으며, 무한 속도 제한을 갖는 IPMSM의 특성 영역까지 운전이 가능하다. 제안된 기법은 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 직접 토크 제어

직접 토크 제어 기법은 고정자 쇄교 자속과 토크를 두 개의 제어기를 사용하여 독립적으로 제어한다. 직접 토크 제어 기법은 식(1)에 보이듯이 고정자 자속의 크기 $|\lambda_s|$ 와 부하각 δ 을 조절하여 출력 토크를 빠르게 제어한다.

$$T_e = K|\lambda_s| [2\lambda_{pm}L_q \sin\delta - (L_q - L_d) \sin 2\delta] \quad (1)$$

여기서 $K = \frac{3}{4} \frac{P}{2} \frac{1}{L_d L_q}$ 이고, $\delta = \tan^{-1}(\frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}})$ 이다.

3. 자속 평면에서 운전 영역 해석

IPMSM 구동시 고려해야할 고정자 전압과 전류 제한 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^2 + v_{qs}^2 &\leq V_{smax}^2 \\ i_{ds}^2 + i_{qs}^2 &\leq I_{smax}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

전압과 전류 제한 조건을 고정자 자속 평면에서 해석하기 위하여 고정자 자속에 대하여 정리하면 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} (\frac{\lambda_{ds} - \lambda_{pm}}{L_d})^2 + (\frac{\lambda_{qs}}{L_q})^2 &\leq I_{smax}^2 \\ (\omega_r \lambda_{qs})^2 + (\omega_r \lambda_{ds})^2 &= V_{smax}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

자속 평면에서 전압과 전류 제한 조건을 유한 속도 제한과 무한 속도 제한 IPMSM에 대해 나타내면 그림 1과 같다.

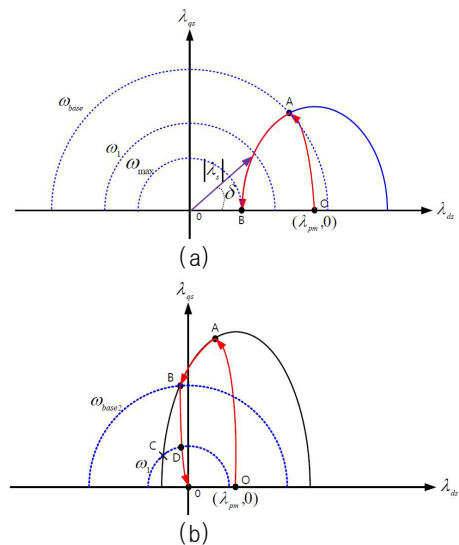


그림 1 자속 평면에서 IPMSM의 운전 영역
(a) 유한 속도 제한의 IPMSM (b) 무한 속도 제한의 IPMSM
Fig. 1 Operation region in the flux plane for the IPMSM
(a) IPMSM with a finite speed limit
(b) IPMSM with a infinite speed limit

전압 제한 조건은 중심이 원점에 있고 반지름이 V_{smax}/ω_r 인 원으로 표현되고, 전류 제한 조건은 중심이 $(\lambda_{pm}, 0)$ 인 타원이 된다. 속도가 증가함에 따라 전압 제한원의 반지름은 점점 감소하게 된다.

일정 토크 영역(O A)에서는 전류 제한만이 전동기의 출력 토크를 제한하며 최적의 운전점은 다음과 같은 조건으로 결정된다.

$$\frac{\partial T_e}{\partial \lambda_{ds}} \frac{\partial I_{smax}^2}{\partial \lambda_{qs}} - \frac{\partial T_e}{\partial \lambda_{qs}} \frac{\partial I_{smax}^2}{\partial \lambda_{ds}} = 0 \quad (4)$$

속도가 증가하게 됨에 따라 전압과 전류 제한 조건이 모두 출력 토크 발생에 영향을 주게 된다. 이 경우 최대 토크 운전점은 다음과 같이 전압과 전류 제한의 교점(A B)이 된다.

$$\lambda_{ds} = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5)$$

$$\lambda_{qs} = L_q \sqrt{I_{smax}^2 - ((\lambda_{ds} - \lambda_{pm})/L_d)^2}$$

여기서, $a = L_d^2 - L_q^2$, $b = 2\lambda_{pm}L_q^2$
 $c = (L_dL_qI_{smax})^2 - L_q^2\lambda_{pm}^2 - L_d^2(V_{smax}/\omega)^2$ 이다.

그림 1(b)와 같이 전압 제한원의 중심이 전류 제한원 안에 있는 무한 속도 제한의 IPMSM의 경우, 전압 제한만이 출력 토크 발생에 영향을 주는 특성영역이 존재한다. 이때에 최대 토크를 얻기 위해서는 MTPV(Maximum Torque Per Voltage)의 궤적(B C)으로 운전하여야 한다. 이때의 운전점은 전압 제한 조건만으로 식(6)과 같이 결정된다. 이때의 운전점은 식(7)과 같다.

$$\frac{\partial T_e}{\partial \lambda_{ds}} \frac{\partial V_{smax}^2}{\partial \lambda_{qs}} - \frac{\partial T_e}{\partial \lambda_{qs}} \frac{\partial V_{smax}^2}{\partial \lambda_{ds}} = 0 \quad (6)$$

$$\lambda_{ds} = \frac{-\frac{\lambda_{pm}}{L_d} + \sqrt{(\frac{\lambda_{pm}}{L_d})^2 + 8(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d})^2 (\frac{V_{smax}}{\omega_r})^2}}{4(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d})} \quad (7)$$

$$\lambda_{qs} = \sqrt{(V_{smax}/\omega)^2 - \lambda_{ds}^2}$$

앞에서 구한 최적의 d q축 고정자 자속을 이용하여 식(8)과 같이 고정자 자속 크기 지령과 토크 지령을 생성한다.

$$|\lambda_s|^* = \sqrt{\lambda_{ds}^2 + \lambda_{qs}^2} \quad (8)$$

$$T_e^* = K|\lambda_s|^* [2\lambda_{pm}L_q \sin(\delta^*) - (L_q - L_d) \sin(2\delta^*)]$$

3. 실험 결과

제안한 기법의 타당성을 검증하기 위하여 유한 속도 제한을 갖는 800[W] IPMSM에 대하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 전동기의 파라미터는 $L_d = 7.8[mH]$, $L_q = 12.5[mH]$, $\lambda_{pm} = 0.13[Wb]$ 이고 직류단 전압은 300[V]로 하였다. 전동기

의 기저속도는 약 2300[rpm]이다.

그림 2은 1000[rpm]에서 3000[rpm]으로 속도 지령을 스텝으로 인가한 경우의 응답특성이다. 전압과 전류 제한 조건에 의해 자속 평면에서 구한 최적의 자속 지령에 따라 약자속 운전이 원활하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

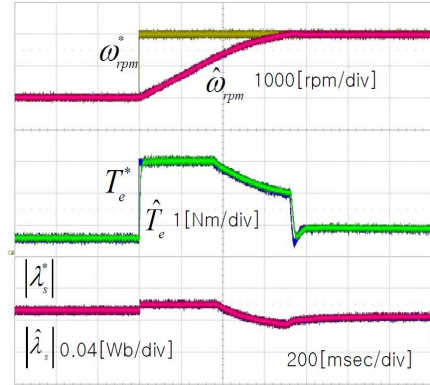


그림 2 스텝 속도 지령에 대한 실험 결과
 Fig. 2 Experimental results for step speed reference

그림 3은 자속 평면에서 고정자 자속 벡터의 궤적을 나타내고 있다. 자속 벡터는 기저 속도 이하에서는 MTPA 궤적으로 운전하고, 기저 속도 이상에서는 전류 제한 타원을 따라 운전하는 것을 확인할 수 있다.

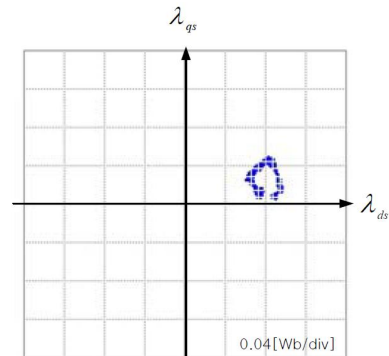


그림 3 고정자 자속 벡터 궤적
 Fig. 3 Trajectory of stator flux vector

4. 결론

본 논문에서는 DTC 기법에 적합한 IPMSM의 최대 토크 운전을 위한 운전점을 자속 평면에서 분석하고 최적의 기준 자속 벡터 따른 운전 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 김상훈, *DC, AC, BLDC 모터 제어*, 복두출판사, 2010.
- [2] Y.Inoue, S.Morimoto, M.Sanada, "Control method suitable for direct torque control based motor drive system satisfying voltage and current limitations," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no.3, pp. 970-976, 2012.