

SPMSM의 직접 토크 제어를 위한 자속 평면에서의 해석 및 제어

박내춘, 김상훈
강원대학교

Analysis and Control in Flux Plane for SPMSM Drive Systems based on Direct Torque Control

Nae Chun Park, Sang Hoon Kim
Kangwon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 직접 토크 제어 방식(Direct Torque Control, DTC)을 이용하는 표면 부착형 영구자석 동기 전동기(Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)의 전압과 전류 제한에 따른 운전 영역을 자속 평면에서 분석하고, 운전 영역에 따른 최대 토크 운전을 위한 최적의 자속 벡터 선정기법을 제안하였다.

1. 서 론

SPMSM은 효율이 높고, 단위 체적당 토크 및 출력이 높으며, 우수한 동특성을 가지고 있기 때문에 여러 고성능 전동기 응용분야에서 사용되고 있다^[1]. SPMSM의 고성능 순시 토크 제어기법으로는 벡터 제어기법과 DTC 기법이 있다. DTC 기법은 자속과 토크를 직접 제어하므로 벡터 제어기법보다 동특성이 빠르고, 제어구조가 단순하며, 제어특성이 전동기의 정수 변화에 영향이 적고, 센서리스 운전이 유리하여 최근 관심이 늘어나고 있다. SPMSM의 응용 분야 중에서, 고속 압축기나 세탁기와 같은 넓은 속도 범위에서의 동작이 필요한 응용 분야에서는 약자속 운전이 필요하게 된다.

본 논문에서는 SPMSM의 직접 토크 제어기법에 필요한 최적의 고정자 자속 지령을 자속 평면에서 전압과 전류 제한 조건을 모두 고려하여 해석하고 이에 따른 약자속 제어기법을 제안한다. 제안한 기법은 일정 토크 영역부터 일정 출력 영역까지 최대 토크를 발생하는 최적의 운전점을 구할 수 있으며, 무한 속도 제한을 갖는 SPMSM의 특성 영역까지의 운전도 가능하다. 제안된 기법은 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 직접 토크 제어

직접 토크 제어기법은 고정자 쇄교 자속과 토크를 두 개의 제어기를 사용하여 독립적으로 제어한다^[2]. 직접 토크 제어기법은 식(1)에 보이듯이 고정자 자속의 크기 $|\lambda_s|$ 와 부하각 δ 를 이용하여 출력 토크를 제어할 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{L_s} \lambda_{pm} |\lambda_s| \sin \delta \quad (1)$$

3. 자속 평면에서 운전 영역 해석

SPMSM 구동시 고려해야할 고정자 전압과 전류 제한 조건은 다음과 같다.

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

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

$$(\lambda_{ds} - \lambda_{pm})^2 + \lambda_{qs}^2 = (L_s I_{smax})^2 \quad (3)$$

$$(\omega_r \lambda_{qs})^2 + (\omega_r \lambda_{ds})^2 = V_{smax}^2$$

고정자 자속 평면에서 전압과 전류 제한 조건을 나타내면 그림 1과 같다. 전압 제한원의 중심이 전류 제한원 안에 있는 경우 무한 속도 제한 시스템이 된다.

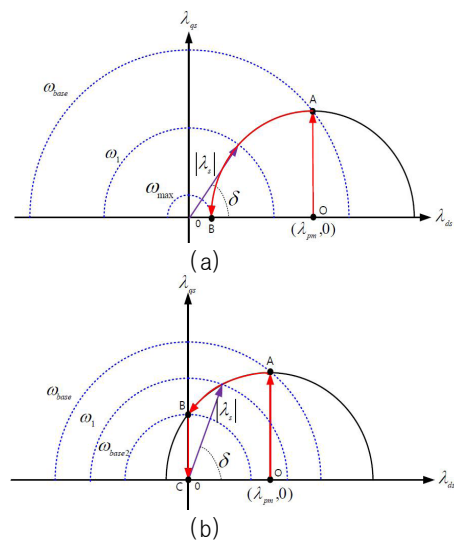


그림 1 자속 평면에서 SPMSM의 운전 영역
(a) 유한 속도 제한의 SPMSM (b) 무한 속도 제한의 SPMSM
Fig. 1 Operation region in the flux plane for the SPMSM
(a) SPMSM with a finite speed limit
(b) SPMSM with a infinite speed limit

전압 제한 조건은 중심이 원점에 있고 반지름이 V_{smax}/ω_r 인 원으로 표현되고, 전류 제한 조건은 중심이 $(\lambda_{pm}, 0)$ 이고 반지름이 $L_s I_{smax}$ 인 원으로 나타낼 수 있다. 속도가 증가함에 따라 전압 제한 원의 반지름은 점점 감소하게 된다.

일정 토크 영역(O A)에서는 통상 전류 제한만이 전동기의 출력 토크 발생을 제한하는데, 동손을 최소화하는 단위 전류당 최대 토크 운전(Maximum Torque Per Ampere, MTPA)을 위한 운전점은 식(4)와 같이 주어진다.

$$\lambda_{ds} = \lambda_{pm}, \quad \lambda_{qs} = L_s I_{smax} \quad (4)$$

속도가 증가하게 됨에 따라 전압과 전류 제한 조건이 모두 출력 토크 발생에 영향을 주게 된다. 이 경우, 최대 토크의 운전점은 전압과 전류 제한의 교점(A B)으로 식(5)와 같이 된다.

$$\lambda_{ds} = \frac{\lambda_{pm}^2 - (I_{smax} L_s)^2 + \frac{V_{smax}^2}{\omega_r^2}}{2\lambda_{pm}} \quad (5)$$

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

그림 1(b)와 같은 무한 속도 제한을 갖는 SPMSM의 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 다음과 같다.

$$\lambda_{ds} = 0, \quad \lambda_{qs} = V_{smax}/\omega_r \quad (6)$$

(4)~(6)에서 얻어진 최적의 d q축 고정자 자속을 이용하여 다음과 같이 영역에 따라 고정자 자속 크기와 토크 지령을 생성하여 DTC 기법으로 운전한다. 자속과 토크 지령은 그림 2에 보이는 두 개의 제어기를 사용하여 독립적으로 제어한다.

$$|\lambda_s|^* = \sqrt{\lambda_{ds}^{*2} + \lambda_{qs}^{*2}} \quad (7)$$

$$T_e^* = \frac{3}{2} \frac{P}{L_s} \frac{1}{\lambda_{pm}} \lambda_{pm} |\lambda_s|^* \sin(\delta^*)$$

여기서 $\delta^* = \tan^{-1}(\lambda_{qs}^*/\lambda_{ds}^*)$ 이다.

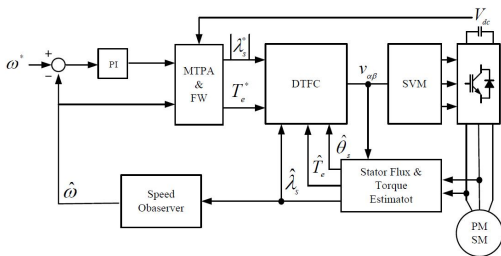


그림 2 시스템 블록도
Fig. 2 System block diagram

3. 실험 결과

제안한 기법의 타당성을 검증하기 위하여 무한 속도 제한을 갖는 SPMSM에 대하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 전

동기의 파라미터는 $L_s = 19[mH]$, $\lambda_{pm} = 0.0925[Wb]$ 이고 직류단 전압은 300[V]이다. 전동기 기저속도는 약 450[rpm]이고, 특성 영역은 약 900[rpm]에서 시작한다.

그림 3은 200[rpm]에서 1200[rpm]으로 속도 지령을 스텝으로 인가한 경우 속도 및 토크, 자속의 응답특성을 나타내고 있다. 약자속 영역에서 속도 증가에 따라 전압과 전류 제한 조건에 의해 주어지는 최적의 자속 지령에 따라 고정자 자속은 감소하고, 출력 토크도 감소한다. 또한 일정 출력 영역과 특성 영역으로의 부드러운 전환이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

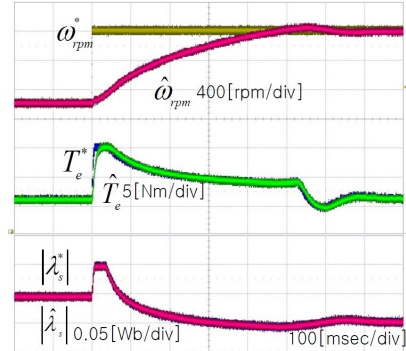


그림 3 스텝 속도 지령에 대한 실험 결과
Fig. 3 Experimental results for step speed reference

그림 4는 자속 평면에서 고정자 자속 벡터의 궤적을 나타내고 있다. 자속 벡터는 일정 토크 영역에서 d축은 일정하고 q축만 증가하며, 일정 출력 영역에서는 전류 제한원을 따라 움직이며, 특성 영역이 시작되는 d축 자속이 0이 되는 시점부터 q축 자속만을 감소시키는 MTPV 궤적을 따라 움직이는 것을 확인할 수 있다.

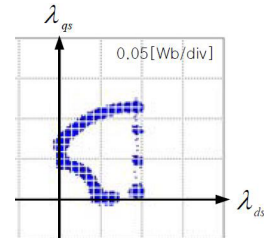


그림 4 고정자 자속 벡터의 궤적
Fig. 4 Trajectory of stator flux vector

4. 결론

본 논문에서는 DTC 기법을 이용한 SPMSM 구동 시스템에서 전압과 전류 제한에 따른 전동기의 운전 영역을 자속 평면에서 분석하고 최적의 자속 벡터 선정을 위한 운전 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 김상훈, *DC, AC, BLDC 모터 제어*, 북두출판사, 2010.
- [2] L. Zhong, M.F. Rahman, W.Y. Hu and K.W. Lim, "A direct torque controller for permanent synchronous motor drives," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 3, pp. 637-642, 1999