

전압 평면에서 PMSM의 운전 영역 해석

박내춘* 김상훈*
강원대학교*

Analysis of Operating Region for PMSM in a Voltage Plane

Nae Chun Park * Sang Hoon Kim *
Kangwon National University.*

ABSTRACT

본 논문에서는 전압평면에서 표면 부착형 영구자석 동기전동기(Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)의 전압과 전류 제한에 따른 운전 영역을 분석하고, 무한 속도 제한을 갖는 SPMSM에 적용 가능한 전압 계획을 이용한 약자속 제어 기법을 제안한다. 제안된 기법은 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

영구 자석 동기는 효율이 높고, 단위 체적당 토크 및 과회전 성능이 우수하며, 우수한 동특성을 가지고 있기 때문에 여러 응용분야에서 사용되고 있다^[1]. 영구 자석 동기 응용 분야 중에서, 고속 압축기나 세탁기와 같은 넓은 속도 범위에서의 동작이 필요한 응용 분야에서는 약자속 운전이 반드시 필요하게 된다. SPMSM에 경우, 넓은 일정 출력영역을 요구하는 응용분야에서 상대적으로 큰 공극의 영향으로 고려 대상에서 제외되어왔다. 하지만 최근 SPMSM에서도 큰 인덕턴스 값을 얻을 수 있는 설계 기술이 발표되어, 무한 속도 제한을 가지는 기기의 설계 및 제작이 가능하게 되었다. 또한 SPMSM은 대량 생산에 유리하다는 장점이 있어, 무한 속도 제한을 필요로 하는 응용에서도 SPMSM의 적용이 점차 확대될 것으로 기대된다^[2].

영구자석 동기의 고속 운전을 위한 약자속 제어에는 여러 방식들이 있는데, 정상 상태의 전동기 방정식으로부터 최대 토크를 발생시키는 전류 지령을 구하는 전향 방식과 전압이나 전류의 계획을 이용하여 전류 지령을 구하는 방식, 그리고 이 두 가지 방식이 조합된 방식으로 크게 구분된다^[3]. 전향 방식은 기기의 제정수 변동에 매우 민감하고, 전압 계획 방식은 전향 방식의 약자속 운전에 비해 제정수 변동에 둔감하지만, 전압 제한원의 중심이 전류 제한원 안에 존재하는 경우에 대한 고려가 부족하며, 약자속 II 영역이 존재하는 경우에는 적용이 힘들다.

본 논문에서는 전압평면에서 SPMSM의 전압과 전류 제한에 따른 운전 영역을 분석하고, 무한 속도 제한을 가지는 SPMSM에 적용 가능한 전압 계획을 이용한 약자속 제어 기법을 제안한다. 제안된 기법은 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 검증하였다.

2. SPMSM 모델링

SPMSM의 동기좌표계 전압 방정식은 식(1)과 같다.

$$v_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^r - \omega_r L_s i_{qs}^r \quad (1)$$

$$v_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^r + \omega_r (L_s i_{ds}^r + \phi_f)$$

역기전력이 큰 고속영역에서 고정자 저항의 전압 강하 성분은 무시할 만큼 작기 때문에 정상상태에서 전압 방정식은 식(2)와 같다.

$$v_{ds}^r \approx -\omega_r L_s i_{qs}^r \quad (2)$$

$$v_{qs}^r \approx \omega_r L_s i_{ds}^r + \omega_r \phi_f$$

3. 전압 평면에서 운전 영역 해석

전동기의 속도가 증가하여 약자속 운전영역에 들어 갈 경우 전동기의 운전 영역은 식 (3)의 전압과 전류 제한 조건에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^{r2} + v_{qs}^{r2} &\leq V_{smax}^2 \\ i_{ds}^{r2} + i_{qs}^{r2} &\leq I_{smax}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

이 경우 전압제한에 의해 전동기에 공급할 수 있는 전류의 영역은 식 (4)와 같다.

$$v_{ds}^{r2} + (v_{qs}^r - \omega_r \phi_f)^2 = (\omega_r L_s I_{smax})^2 \quad (4)$$

식(3)과 식(4)의 제한 조건을 전압 평면에 나타내게 되면 그림 1과 같이 전압 제한 조건은 반지름이 V_{smax} 인 원으로 표현되고, 전류 제한 조건은 중심이 $(0, \omega_r \phi_f)$ 이고 반지름이 $\omega_r L_s I_{smax}$ 인 원으로 나타낼 수 있다. 속도가 증가함에 따라 전류 제한원의 중심은 q축 방향으로 이동하게 되고, 반지름은 점점 증가하게 된다.

일정 토크 영역에서는 전압 제한 원이 전류 제한 원을 포함하게 되어 전류 제한만이 기기의 운전 영역을 제한하며 운전점

은 속도가 증가함에 따라 O점에서 A점으로 이동하게 된다. 전동기의 속도가 증가하면 전류 제한 원의 크기가 증가하여 전류 제한과 전압 제한이 모두 운전 영역을 제한하게 되며, 무한 속도 제한을 갖는 경우($L_s I_{smax} > \phi_f$) 운전점은 A점에서 B점으로 전압 제한원을 따라 이동한다. 속도가 더 증가하면 운전점은 B점에 이르게 되고 이 속도가 약자속 II영역 시작 속도가 된다. 약자속 II영역에서 최대 출력을 얻으려면 운전점을 속도와 관계없이 언제나 B점으로 유지해야 한다.

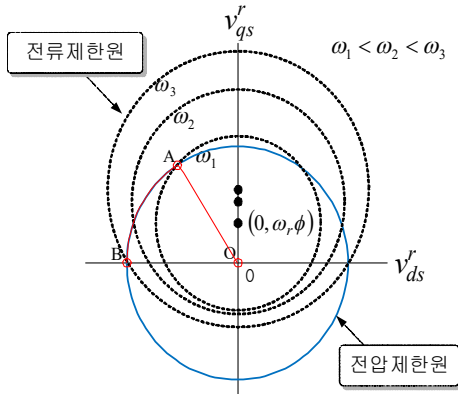


그림 1 전압 평면에서 전압과 전류 제한
Fig. 1 Voltage and current constraints in a voltage plane

4. 약자속 제어기

본 논문에서는 무한 속도 제한을 갖는 SPMSM에 적용 가능한 전압 제한을 이용한 약자속 운전 기법을 제안하였다. 그림 2에 나타난 것과 같이 약자속 I 영역에서는 전류 제어기의 출력의 크기가 특정 값(V_{smax})을 넘지 않도록 유지하고, 약자속 II영역에서는 동기좌표계 q축 전압이 0을 유지하도록 전류 지령치를 생성한다.

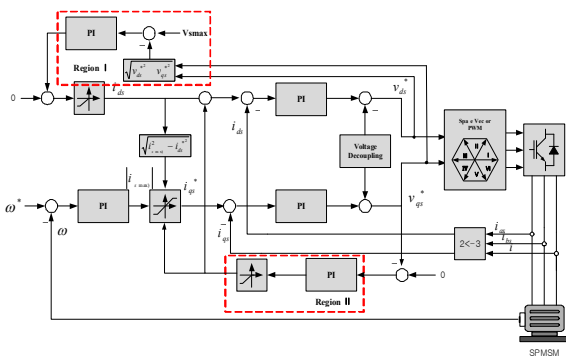


그림 2 제어 블럭도
Fig. 2 Control Block Diagram

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

제한한 약자속 제어의 타당성을 검증하기 위해서 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 대상으로는 표 1과 같은 제한의 영구 자석 기기에 직류로 인덕

턴스를 연결하여 무한 속도 제한을 갖도록 하였으며, 직류단 전압은 12[V]로 하였다.

표 1 전동기 파라미터
Table 1 Motor parameter

정격전류	6.2 [A_{rms}]
L_s	0.3 [mH]
λ_{PM}	0.0074 [Wb]

3.2 시뮬레이션 결과

0[rpm]에서 3500[rpm]으로 전동기를 가속시켰을 경우 전압과 전류 파형은 그림 3과 같다. 약자속 I 영역에서는 전압의 크기가 V_{smax} 가 되고, 약자속 II영역에서 q축 전압은 0으로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

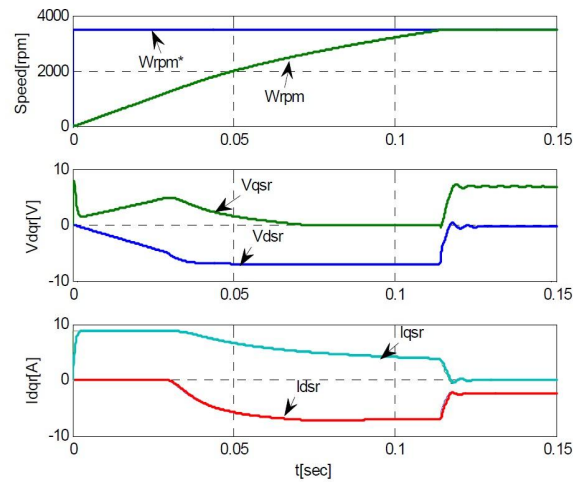


그림 3 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation result

4. 결론

본 논문에서는 전압평면에서 SPMSM의 전압과 전류 제한에 따른 운전 영역을 분석하고, 무한 속도 제한을 갖는 SPMSM에 적용 가능한 전압 제한을 이용한 약자속 제어 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 전압 제한을 이용하여 약자속 II영역까지 제어가 가능하며 시뮬레이션을 통하여 이를 증명하였다.

참고 문헌

- [1] T. S. Kwon and S. K. Sul, "Novel Antiwindup of a Current Regulator of a Surface Mounted Permanent Magnet Motor for Flux Weakening Control," *IEEE Trans on Industry Applications*, vol. 42, no. 5, pp1293-1300, 2006.
- [2] 권태석, "영구자석동기기의 출력토크 향상을 위한 새로운 약자속 제어기," 서울대학교 공과대학 전기공학부 박사학위 논문, 2007.
- [3] 김상훈, *DC, AC, BLDC 모터 제어*, 북두출판사, 2010