

PMSM의 전압각 제어

고태훈, 김상훈
강원대학교 전기전자공학과

Voltage angle control of a PMSM

Tae Hoon Ko, Sang Hoon Kim
Kangwon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)의 전압각 제어 시에 최대 토크 운전에 필요한 전압각(Optimal Voltage Angle)을 얻기 위해 IPMSM의 설계에 따른 최적 전압각을 속도 영역에 따라 분석하였다.

1. 서론

IPMSM의 벡터제어 시에는 단위 전류당 최대토크 운전을 위한 전류 지령을 추종하기 위해 d와 q축 전류제어기를 사용한다.^[1] 하지만 전압이 부족한 고속영역에서는 이러한 두 개의 전류 제어기를 사용하는 경우 제어기의 포화와 제어기 간에 충돌이 발생할 수 있어 시스템이 불안정해 질 수 있다는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 고속영역에서는 전압벡터의 각을 제어하는 하나의 제어기를 사용하는 전압각 제어(Voltage Angle Control) 기법이 연구되었다.^[2]

전압각 제어 기법에서는 기존의 d와 q축 전류 제어기와 다르게 제어기의 출력이 전동기에 인가되는 전압의 크기가 아닌 전압각이 되는데 지금까지 운전 속도와 IPMSM의 설계에 따른 최적 전압각(Optimal Voltage Angle)에 대한 연구가 부족했다. 본 논문에서는 IPMSM의 전압각 제어를 위한 운전 속도와 IPMSM의 설계에 따른 최적 전압각을 고정자 전압 평면에서 분석하고 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 최적 전압각 분석

IPMSM에서 단위전류당 최대토크를 출력하기 위한 최적 전압각의 궤적은 속도 영역에 따라 달라진다. 일정 토크 영역에서의 최적 전압각은 IPMSM의 토크 식을 고정자 전압 V_s 와 전압각 α 로 표현한 식(1)을 통해 구할 수 있다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \left[-\phi_f \frac{V_s \cos \alpha}{\omega_r L_{qs}} - \frac{L_{ds} - L_{qs}}{\omega_r^2 L_{ds} L_{qs}} V_s \cos \alpha (V_s \sin \alpha - \omega_r \phi_f) \right] \quad (1)$$

식(1)을 전압각 α 로 미분하여 풀면 식(2)와 같이 되고 일정 토크 영역에서의 최적 전압각 α_{opt} 은 식(3)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial T_e}{\partial \alpha} = \phi_f V_s \sin \alpha - A [-V_s^2 \sin^2 \alpha + \omega_r \phi_f + V_s^2 \cos^2 \alpha] = 0$$

$$(2) \quad \alpha_{opt} = \sin^{-1} \left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 8AC}}{4V_s A} \right)$$

$$(3) \quad A = \frac{L_{ds} - L_{qs}}{\omega_r L_{ds}}, \quad B = \phi_f \left(1 - \frac{(L_{ds} - L_{qs})}{L_{ds}} \right)$$

$$C = -\frac{(L_{ds} - L_{qs})}{\omega_r L_{ds}} V_s^2$$

그러나 실질적으로 일정 토크 영역에서 식(3)의 최적 전압각은 전류 제한 조건에 의해 그 값이 제한되며 일정하게 유지된다.

역기전력이 커지는 약자속 영역에서는 전동기의 속도가 증가함에 따라 전류와 전압 제한이 모두 운전 영역을 제한하게 되므로 최적 전압각은 속도에 따라 변동하게 된다. 약자속 영역에서 최적 전압각은 이용 가능한 전압이 V_{smax} 로 제한되는 전압 제한 식(4)과 전압으로 표현된 전류 제한 식(5)를 통해 구할 수 있다.

$$v_{ds}^{r2} + v_{qs}^{r2} = V_{smax}^2 \quad (4)$$

$$\left(\frac{v_{ds}^r}{\omega_r L_{qs}} \right)^2 + \left(\frac{v_{qs}^r - \omega_r \phi_f}{\omega_r L_{ds}} \right)^2 = I_{smax}^2 \quad (5)$$

식(4)과 (5)로부터 식(6)과 같이 v_{qs}^r 에 대한 2차식을 얻을 수 있고, 식(6)을 약자속 영역에서 최적 전압각 α_{opt} 은 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$A v_{qs}^{r2} - 2B v_{qs}^r + C = 0 \quad (6)$$

$$\alpha_{opt} = \sin^{-1} \left(\frac{B - \sqrt{B^2 - AC}}{V_{smax} A} \right) \quad (7)$$

$$A = (L_{qs}^2 - L_{ds}^2), \quad B = \omega_r \phi_f L_{qs}^2$$

$$C = (\omega_r \phi_f L_{qs})^2 + (L_{ds} V_{smax})^2 - (I_{smax} \omega_r L_{ds} L_{qs})^2$$

3. IPMSM의 설계에 따른 최적 전압각

앞 절에서 구한 최적 전압각은 IPMSM의 설계에 따라 그 궤적이 다르게 나타난다. $\phi_f > \omega_r L_{ds}$ 인 IPMSM의 경우에 최적 전압각은 속도에 증가에 따라 $\pi/2$ 로 감소하는데 반하여, $\phi_f \leq \omega_r L_{ds}$ 인 IPMSM의 경우에는 속도에 따라 π 까지 계속 증가하는 특성을 보인다.

3.1 $\phi_f > \omega_r L_{ds}$ 인 IPMSM의 경우

그림 1은 전압평면에서 전류 제한 조건(타원)과 전압 제한 조건(원)의 영역을 보인다. $\phi_f > \omega_r L_{ds}$ 인 IPMSM의 경우에는 속도가 증가함에 따라 전류 제한 타원이 전압 제한 원을 벗어나게 된다. 일정토크 영역에서 최적 전압각은 속도가 증가함에 따라 A점의 α_1 로 일정하지만 약자속 영역에서는 대부분의 경우에 속도 증가에 따라 최적 전압각은 감소하게 되는데, A점 α_1 에서 B점 $\pi/2$ 로 전압 제한 원을 따라 이동하게 된다. 그러나 특별하게 ϕ_f 가 $\omega_r L_{ds}$ 보다 약간 큰 경우에는 최적 전압각이 약자속 영역의 초기 속도에서는 증가하다가 다시 감소하게 되는 궤적이 나타난다.

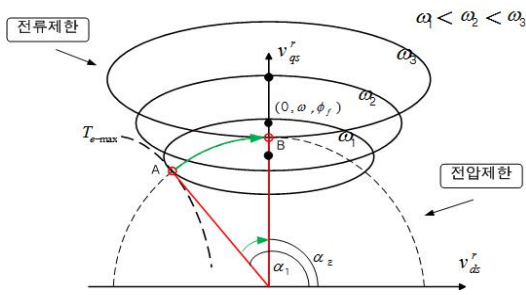


그림 1 전압 평면에서의 최적 전압각의 궤적($\phi_f > \omega_r L_{ds}$)
Fig. 1 Optimal voltage angle in a voltage plane ($\phi_f > \omega_r L_{ds}$)

3.2 $\phi_f \leq \omega_r L_{ds}$ 인 IPMSM의 경우

$\phi_f \leq \omega_r L_{ds}$ 인 IPMSM의 경우에는 속도가 증가함에 따라 그림 3과 같이 전류 제한 타원이 전압 제한 원을 포함하게 된다. 따라서 전압 제한 조건이 최적의 전압각을 결정하게 된다. 일정토크 영역에서 최적 전압각은 C점의 α_3 로 일정하지만 약자속 영역에서는 속도 증가에 따라 전압 제한 원을 따라 점차 증가하며 최종적으로 π 에 이르게 된다.

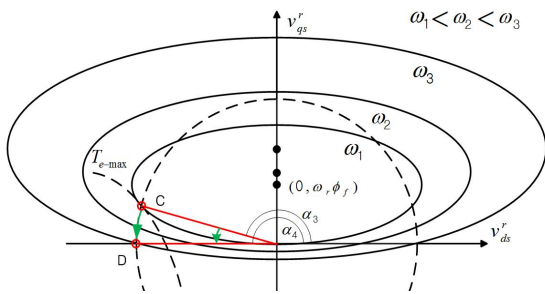


그림 2 전압 평면에서의 최적 전압각의 궤적($\phi_f \leq \omega_r L_{ds}$)
Fig. 2 Optimal voltage angle in a voltage plane ($\phi_f \leq \omega_r L_{ds}$)

4. 시뮬레이션

앞 절에서 해석한 최적 전압각을 사용한 IPMSM의 전압각 제어 특성을 살펴보기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3는 $\phi_f > \omega_r L_{ds}$ 의 특성을 갖는 800W IPMSM($I_s=4A$, $L_{ds}=7.8mH$, $L_{qs}=12.5mH$, $\phi_f=0.114Wb$)에 대해 전압각 제어를 수

행한 시뮬레이션 결과이다. 반면에 그림 4는 $\phi_f \leq \omega_r L_{ds}$ 의 특성을 갖는 4kW IPMSM($I_s=300A$, $L_{ds}=0.05mH$, $L_{qs}=0.5mH$, $\phi_f=0.01Wb$)에 대한 결과이다. IPMSM의 설계에 따라 최적 전압각의 궤적이 속도 증가에 따라 $\pi/2$ 와 π 로 다르게 변동하는 것을 확인할 수 있다.

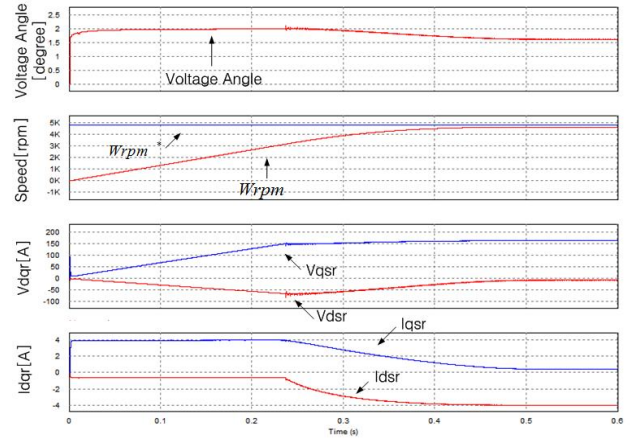


그림 3 $\phi_f > \omega_r L_{ds}$ 인 경우의 특성
Fig. 3 Simulation results for the case of $\phi_f > \omega_r L_{ds}$

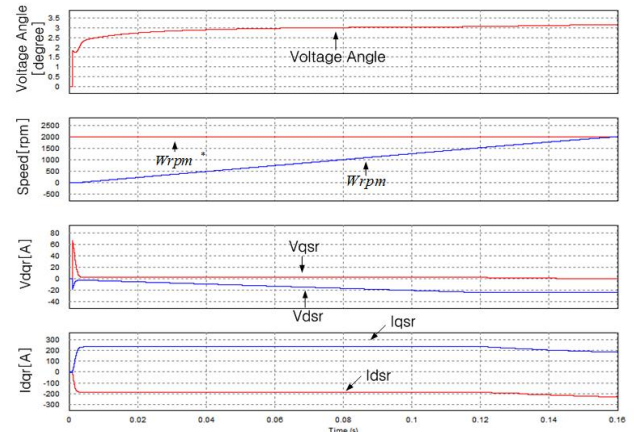


그림 4 $\phi_f \leq \omega_r L_{ds}$ 인 경우의 특성
Fig. 4 Simulation results for the case of $\phi_f \leq \omega_r L_{ds}$

5. 결론

본 논문에서는 IPMSM의 전압각 제어 시에 최대 토크 운전을 위한 최적의 전압각을 얻기 위하여 IPMSM의 설계에 따른 최적 전압각의 궤적을 분석하였고 IPMSM에 전압각 제어를 적용한 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 김상훈, “모터제어 DC, AC, BLDC”, 북두출판사, 2016.
- [2] L. Zhu, S. Xue, X. Wen, Y. Li, and L. Kong, “A New Deep Field Weakening Strategy of IPM Machines based on Single Current Regulator and Voltage Angle Control”, in Proceedings of the ECCE 2010, pp. 1144-1149, 2010.