

인버터의 왜곡전압을 고려한 PMSM의 약자속 제어

박내춘 서인범 김상훈
강원대학교

Flux-Weakening Control of PMSM Considering Inverter Nonlinearity

Nae Chun Park In Bum Seo Sang Hoon Kim
Kangwon National University.

ABSTRACT

결정된다.

본 논문에서는 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)의 약자속 운전 영역에서 인버터의 비이상적인 특성에 의한 왜곡 전압의 영향을 분석하였고, 이를 고려한 약자속 제어 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 적용한 경우 약자속 영역에서 출력 토크가 향상됨을 실험을 통해 입증하였다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^r{}^2 + v_{qs}^r{}^2 &\leq V_{smar}^2 \\ i_{ds}^r{}^2 + i_{qs}^r{}^2 &\leq I_{smar}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

전압 제한 영역은 속도가 증가함에 따라 점점 작아지게 되고 이에 따라 최대 토크를 얻기 위한 최적의 운전점은 그림 1의 'B₁'과 같이 전압 제한과 전류 제한의 교점이 된다.

1. 서론

영구 자석 동기기는 효율이 높고, 단위 체적당 토크 및 출력이 높으며, 우수한 동특성을 가지고 있기 때문에 속도나 토크 제어가 필요한 많은 응용분야에서 그 사용이 증가하고 있다^[1].

고속 압축기나 전기차 등과 같은 넓은 속도 범위에서의 동작이 필요한 응용 분야에서는 약자속 운전이 반드시 필요하다. 약자속 제어 방법으로는 전향 보상 방법, 전압 제한 방법, Look up table을 이용한 방법 등이 있다^[1]. 이 중에서 전압 제한 방법은 파라미터 변동에 둔감하고 전압을 효율적으로 사용할 수 있어서 약자속 제어기법으로 많이 사용된다.

전압 제한 방식의 약자속 제어에서 실제 전동기에 인가되는 전압을 측정하기 어렵기 때문에, 일반적으로 전류제어의 출력, 즉 지령전압을 약자속 제어기의 제한 전압으로 사용한다. 하지만 실제 전동기 구동 시스템에서 데드 타임(dead time)이나 스위칭 소자의 전압강하, on/off time delay 등의 인버터의 비이상적인 특성 때문에 지령전압과 실제 전동기의 인가되는 전압 사이에는 오차가 존재한다. 이 왜곡 전압 때문에 약자속 영역에서 d와 q축 전류지령이 잘못되고, 이로 인하여 출력 토크가 감소하게 된다.

본 논문에서는 인버터의 비이상적인 특성 때문에 발생하는 왜곡전압을 추정하여 지령 전압에 보상함으로써 실제 전동기의 인가되는 전압을 제한 전압으로 사용하는 약자속 제어기법을 제안하였다. 제안된 기법은 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

2. PMSM 약자속 제어^[2]

전동기의 속도가 증가하여 약자속 운전을 시작하는 경우 전동기의 운전 영역은 식 (1)의 전압과 전류 제한 조건에 의해

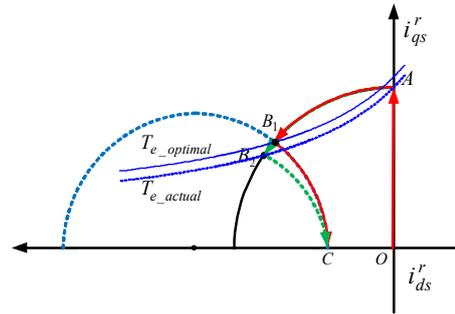


그림 1 전압과 전류 제한
Fig. 1 Voltage and current constraints

3. 인버터 왜곡 전압의 영향

인버터 비이상적인 특성에 의한 왜곡 전압을 Δv_{dq} 라고 하면 지령전압 v_{dqs}^{r*} 와 실제 전동기의 인가되는 전압 v_{dqs}^r 의 관계는 식(2)와 같이 된다.

$$v_{dqs}^r = v_{dqs}^{r*} - \Delta v_{dq} \quad (2)$$

이 왜곡 전압 때문에 실제 전동기에 인가되는 전압은 지령 전압보다 작게 되고, 이로 인하여 약자속 운전시에 d축 전류를 더 많이 필요로 하게 되고 출력 토크는 감소하게 된다.

예를 들어, 그림 1과 같이 제한 전압이 실제 전동기 인가전압보다 큰 경우 왜곡전압의 영향으로 운전점은 최대토크를 발생하는 'B₁'가 아닌 'B₂'에서 운전하게 되고, 이 경우에 d축 전류를 더 많이 요구하게 되어 출력 토크가 감소하게 된다.

4. 인버터 왜곡전압을 고려한 약자속 제어기

본 논문에서는 인버터의 비이상적인 특성 때문에 발생하는 왜곡 전압을 고려한 약자속 제어기법을 제안한다. 그림 2에 제안한 약자속 제어기법의 블록도를 나타내고 있다. 제안된 약자속 제어기법은 기존의 전압 궤환 방법을 사용하는 약자속 제어기와 인버터 왜곡 전압을 추정하는 왜곡 전압 관측기로 구성되어 있다. 왜곡 전압 관측기를 이용하여 인버터의 왜곡 전압을 추정하고, 추정된 왜곡 전압 $\Delta \hat{v}_{dq}$ 을 지령 전압에 보상하여 약자속 제어기의 궤환 전압으로 사용하게 된다. 궤환 전압 $v_{dq}^{r'}$ 은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{dq}^{r'} = v_{dq}^{r*} - \Delta \hat{v}_{dq} \quad (3)$$

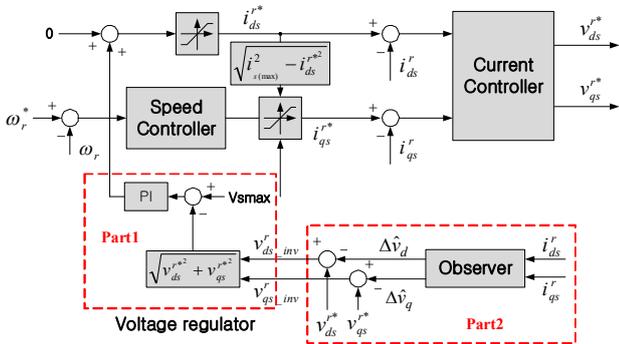


그림 2 제어 블록도
Fig. 2 Control Block Diagram

3. 왜곡 전압 관측기^[3]

인버터 왜곡 전압이 전류 제어주기 동안 일정하다고 가정했을 때, 인버터 왜곡 전압을 고려한 PMSM의 상태 방정식은 식(4)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dq}^r \\ \Delta v_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & -1 \\ L_s & L_s \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq}^r \\ \Delta v_{dq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ L_s \end{bmatrix} (v_{dq}^{r*} - v_{dq}^{r-ff}) \quad (4)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dq}^r \\ \Delta v_{dq} \end{bmatrix}$$

여기서, $v_{dq}^{r-ff} = \begin{bmatrix} -\omega_r L_s i_{qs}^r \\ \omega_r (L_s i_{ds}^r + \phi_f) \end{bmatrix}$ 이다.

식(4)의 상태 방정식으로부터 식(5)와 같이 관측기를 구성하였다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{dq}^r \\ \Delta v_{dq} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_{dq}^r \\ \Delta v_{dq} \end{bmatrix} + B i_{dq}^r + C (v_{dq}^{r*} - v_{dq}^{r-ff}) \quad (5)$$

여기서 $A = \begin{bmatrix} -(G_1 + \frac{R_s}{L_s}) & -\frac{1}{L_s} \\ -G_2 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$,

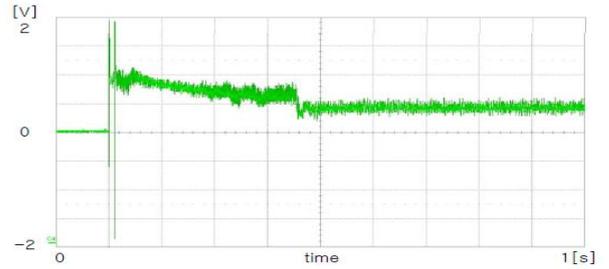
$G_1 = -(R_s/L_s + \gamma_1 + \gamma_2)$, $G_2 = L_s \gamma_1 \gamma_2$, 이고, γ_1 과 γ_2 는 관측

기의 극점이다.

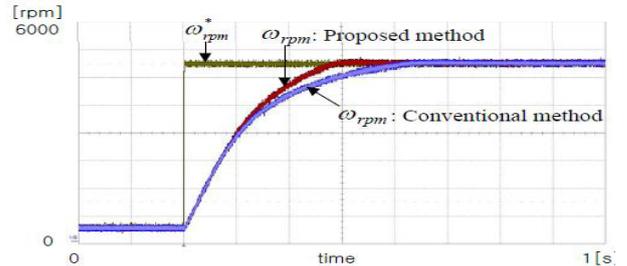
5. 실험 결과

제안한 약자속 제어의 타당성을 검증하기 위해서 실험을 수행하였다. 제어기는 TI(Texas Instruments)사의 DSP TMS320F28335를 사용하였고, 스위칭 주파수는 10[kHz]이다. 인버터는 MOSFET(IR640N)을 이용하여 구성하였고, 실험에 사용한 100[W] PMSM 전동기의 파라미터는, $R_s = 0.128[\Omega]$, $L_s = 0.3[mH]$, $\lambda_\phi = 0.0074[Wb]$ 이며, DC 전압은 24[V]이다.

그림 3(a)는 추정된 왜곡 전압으로, 속도에 따라 그 크기가 달라짐을 알 수 있다. 그림 3(b)는 기존의 전압 궤환 방식과 제안한 기법의 속도 응답 특성을 나타내고 있다. 왜곡 전압을 보상함으로써 기존의 방법에 비해 더 큰 토크 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다.



(a) 추정된 왜곡 전압



(b) 속도 응답 비교

그림 3 실험 결과
Fig 3. Experiment Results

4. 결론

본 논문에서는 인버터의 비이상적인 특성을 고려한 약자속 제어기법을 제안하였다. 인버터의 왜곡 전압이 보상된 제안된 방법이 기존의 전압 궤환 방법에 비해 더 큰 토크를 발생시킬 수 있다는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Dongyun Lu, Kar N.C, "A review of flux weakening control in permanent magnet synchronous machines," in *Proc. IEEE VPPC*, pp. 1~6, 2010.
- [2] 김상훈, DC, AC, BLDC 모터 제어, 북두출판사, 2010.
- [3] Urasaki. N, Senjyu. T, Uezato. K, Funabashi. T, "Adaptive dead time compensation strategy for permanent magnet synchronous motor drive," *IEEE Trans on Energy Conversion*, Vol.22 ,pp.271~280, 2007.