

센서리스 PMSM의 저속영역에서 성능 개선

이 동희, 신 성락, 권 영안
부산대학교 전기공학과

Performance Improvement in Low Speed Range of Sensorless PMSM

D. H. Lee, S. L. Shin and Y. A. Kwon

Department of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract - Sensorless PMSM is much studied for the industrial applications and home appliances because a mechanical sensor reduce reliability and increases cost. Most of sensorless algorithm have poor performances in a low speed range. This paper investigates performance improvement in a low speed range of PMSM. The proposed control scheme is based on the optimization of ratio between the command and dc-link voltages. The experiment is performed in this study, and the result shows the improved performance in a low speed range.

터의 인가시간과 지령전압의 관계로부터 직접 계산된다. 지령전압과 유효벡터의 인가시간은 다음과 같다.

$$\int_0^{T_s} V^* = \int_0^{T_1} V_n dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} V_{n+1} dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} V_o dt \quad (1)$$

단, T_s : Sampling period

T_1, T_2 : 유효전압 벡터의 인가시간

V_n, V_{n+1}, V_o : 유효전압벡터 및 영전압벡터

3상 대칭의 가정에서 식(1)을 각 상에 인가되는 전압으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_{MAX}^* = \frac{1}{3} V_{dc} \frac{T_1}{T_s} + \frac{2}{3} V_{dc} \frac{T_2}{T_s}$$

$$V_{MID}^* = \frac{1}{3} V_{dc} \frac{T_1}{T_s} - \frac{1}{3} V_{dc} \frac{T_2}{T_s} \quad (2)$$

$$V_{MIN}^* = -\frac{2}{3} V_{dc} \frac{T_1}{T_s} - \frac{1}{3} V_{dc} \frac{T_2}{T_s}$$

$$V_{MAX}^* + V_{MID}^* + V_{MIN}^* = 0 \quad (3)$$

단, $V_{MAX}^*, V_{MID}^*, V_{MIN}^*$ 은 각 상에 걸리는 전압의 크기를 비교하여 차례로 나타낸 전압이다.

식(2)로부터 계산되는 유효전압벡터 및 영전압벡터의 인가시간은 다음과 같다.

$$T_1 = -(V_{MAX}^* + 2V_{MIN}^*) \frac{T_s}{V_{dc}}$$

$$T_2 = (2V_{MAX}^* + V_{MIN}^*) \frac{T_s}{V_{dc}} \quad (4)$$

$$T_o = T_s - (T_1 + T_2)$$

중래의 SVPWM에서 전류리플을 억제하기 위한 방편으로서 영전압벡터 인가시간 T_o 를 분할하고 유효전압벡터의 양편으로 재구성하는 알고리즘을 제시한다. 본 논문에서는 직류 링크 전압을 가변 제어하여 유효 전압의 인가시간을 적절히 제어함으로써 실제 영전압벡터 인가시간이 거의 영에 근접하게 제어하는 방식을 제안한다. 이 방식은 영전압벡터의 분할 및 재구성이 불필요한 장점을 가지며 각 상의 지령전압 중 최소 전압 지령치는 다른 두 상의 유효전압벡터 인가에 의해서 생성된다. 이 경우에 각 상의 스위칭 시간은 다음과 같다.

$$T_{MAX}^* = T_1 + T_2$$

$$T_{MID}^* = T_1 \quad (5)$$

$$T_{MIN}^* = 0$$

1. 서 론

PMSM은 높은 전력밀도와 고 정밀 제어 특성으로 많은 산업현장과 가전기에 광범위하게 응용되고 있으며, 최근에는 위치 및 속도 센서를 사용하지 않는 센서리스 방식의 연구가 많이 이루어지고 있다.[1,2] 대부분의 센서리스 제어 알고리즘은 저속 영역에서 상대적으로 저하된 성능을 나타낸다.

본 논문은 센서리스 PMSM의 저속 운전 영역에서의 성능개선을 위한 구동시스템 구성과 알고리즘에 관한 연구이다. 본 논문에서는 전압형 PWM 인버터의 출력전압과 지령전압의 오차에 대한 원인을 분석하고, 인버터 출력전압의 지령전압에 대한 추종 정도를 개선하기 위하여 보다 효율적인 공간전압벡터 펄스폭변조방식을 제시한다. 이 방식은 유효 전압을 인가하는 유효시간의 관점에서 SVPWM을 재구성하고 낮은 전압이 인가되는 저속 운전영역에서 출력전압의 정도를 높이기 위해서 인가되는 유효전압벡터의 스위칭 시간을 한 샘플링 시간 내에서 최적화하는 방식이다. 본 방식에 의하여 구동되는 인버터 시스템을 센서리스 PMSM의 저속운전에 적용하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증한다.

2. SVPWM 인버터의 해석 및 성능개선

2.1 개선된 SVPWM

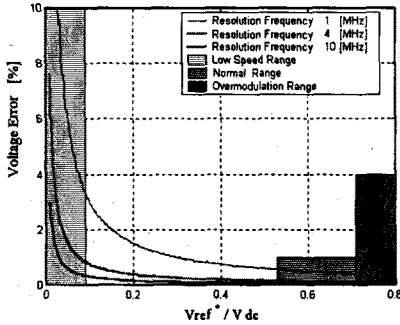
SVPWM 방식은 일반적으로 널리 사용되는 삼각파 비교 PWM 방식에 비해 정상상태에서의 전류 고조파 성분을 크게 억제할 수 있는 방식이다.[3] 그러나 기존의 SVPWM 방식은 인버터의 출력이 가능한 8개의 벡터에 기준하여 실제 스위칭 시간을 결정하므로 스위칭 시간을 결정하기 위해서는 지령전압벡터에 인접한 2개의 벡터를 선정하고 각각의 벡터가 인가되는 시간을 산출 한후 다시 각 상의 스위칭 시간을 재배열하는 구조를 가진다. 본 논문에서는 이러한 계산을 단순화하기 위하여 각 상의 스위칭시간을 전압이 인가되는 유효시간의 관점에서 SVPWM을 구성하는 방식을 연구한다.

본 논문에서 구현한 SVPWM의 스위칭 시간은 유효백

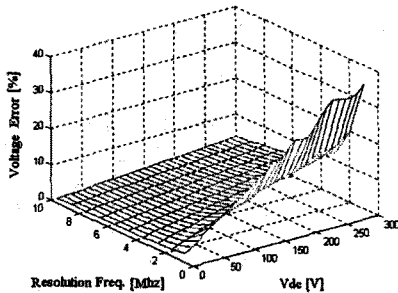
2.2 저속 영역에서의 개선 효과

SVPWM 방식으로 구동되는 인버터 시스템의 정도는 스위칭 패턴의 해상도 주파수, 샘플링시간, 지령전압과 직류 링크전압의 비율 V_{ref}^*/V_{dc} 에 따라 결정된다. 한편, PMSM의 저속 운전영역에서는 낮은 지령전압이 인가되므로 직류 링크전압이 일정한 경우에 인버터의 출력전압의 정도가 저해된다. 본 논문에서는 가변 링크전압에 의해 이 문제를 극복하며 제한된 SVPWM의 스위칭 방식을 활용한다.

인버터 스위칭 소자가 이상적이라는 가정에서 SVPWM 인버터의 출력전압 오차와 해상도 주파수 및 V_{ref}^*/V_{dc} 의 상관 관계는 그림 1과 같다. 그림 1(a)는 샘플링시간이 100 μ s인 경우에 해상도 주파수 및 V_{ref}^*/V_{dc} 와 출력전압 오차와의 상관 관계를 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 저속이 아닌 운전영역에서 SVPWM 인버터의 출력전압 오차는 매우 작지만 저속 운전영역 즉, V_{ref}^*/V_{dc} 비율이 낮은 영역에서는 출력전압 오차가 급격히 증가한다. 그림 1(b)는 V_{MAX} 가 5V인 경우에 출력전압 오차와 해상도 주파수 및 직류 링크전압의 상관 관계를 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 직류 링크전압을 적절히 조정한다면 지령전압이 낮은 저속영역에서 출력전압 오차가 크게 개선됨을 보이고 있다. 본 연구에서 구성한 가변 링크전압 구동시스템은 그림 2와 같다.



(a) 출력전압 오차



(b) V_{MAX} = 5V인 경우에 출력전압 오차
그림 1. 인버터 출력전압 오차의 상관 관계

3. 센서리스 속도제어

본 논문에서 적용한 PMSM의 센서리스 알고리즘은

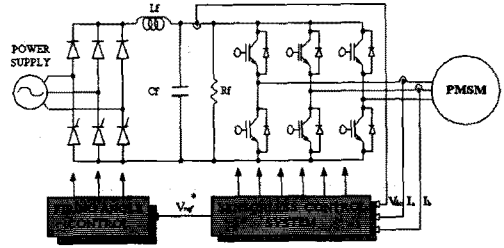


그림 2. 가변 링크전압 구동시스템

전동기의 전기적인 파라미터만을 이용하여 속도 및 위치를 추정하는 축소차수 상태관측기에 의한 방식이다.

PMSM의 영구자석을 일정전류가 흐르는 권선으로 대체하는 경우, 고정자기준 좌표계에서의 전압방정식은 다음과 같다.

$$v_{as} = R_s i_{as} + L_s \frac{di_{as}}{dt} - K_e \omega_r \sin \theta, \quad (6)$$

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + L_s \frac{di_{\beta s}}{dt} + K_e \omega_r \cos \theta,$$

$$\text{단, } K_e = \sqrt{\frac{3}{2}} M I_f, \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

PMSM의 전기적 파라미터를 이용한 전차수 상태관측기는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Br + L(y - \hat{y}) \quad (7)$$

$$\hat{i}_s = C\hat{x} \quad (8)$$

$$\text{단, } \hat{x} = [\hat{i}_{as}, \hat{i}_{\beta s}, \hat{E}_{as}, \hat{E}_{\beta s}]^T, \quad \hat{y} = [\hat{i}_{as}, \hat{i}_{\beta s}]^T$$

$$r = [v_{as}, v_{\beta s}]^T, \quad y = [i_{as}, i_{\beta s}]^T$$

$$[E_{as} \ E_{\beta s}]^T = [-K_e \omega_r \sin \theta, \ K_e \omega_r \cos \theta]^T$$

$$A_{11} = -(R_s/L_s)I, \quad A_{12} = -(1/L_s)I$$

$$A_{21} = B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \omega_r J$$

$$B_1 = (1/L_s)I, \quad I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

식(7)에서 $i_{as}, i_{\beta s}$ 를 측정치로 대체하는 축소차수 상태관측기를 구성하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{z}} = A_{22}\hat{z} + A_{21}y + B_2r + L(\dot{y} - \hat{y}) \quad (9)$$

식(9)에서 피드백 보정항에 전류의 미분이 포함되어 노이즈에 민감하므로 상태변수 $\hat{w} = \hat{z} - Ly$ 를 정의하여 구성한 축소차수 상태관측기는 다음과 같다.

$$\dot{\hat{w}} = F\hat{w} + Dy + Gr \quad (10)$$

$$\text{단, } F = A_{22} - LA_{12}$$

$$D = FL + A_{21} - LA_{11}$$

$$G = B_2 - LB_1$$

식(10)에서 추정된 역기전력으로부터 추정속도 및 위치는 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\omega}_r = \text{sign}(\omega_r) \cdot \frac{1}{K_e} \sqrt{(\hat{E}_{\alpha s})^2 + (\hat{E}_{\beta s})^2} \quad (11)$$

$$\hat{\theta}_r = \tan^{-1}(-\hat{E}_{\alpha s} / \hat{E}_{\beta s}) \quad (12)$$

단, $\text{sign}(\omega_r)$: 속도의 방향

이상에서 기술한 상태관측기의 블록도는 그림 3과 같다.

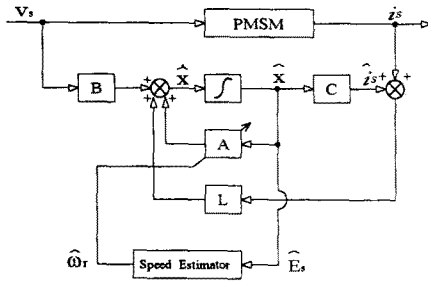
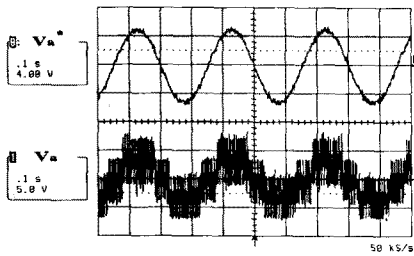
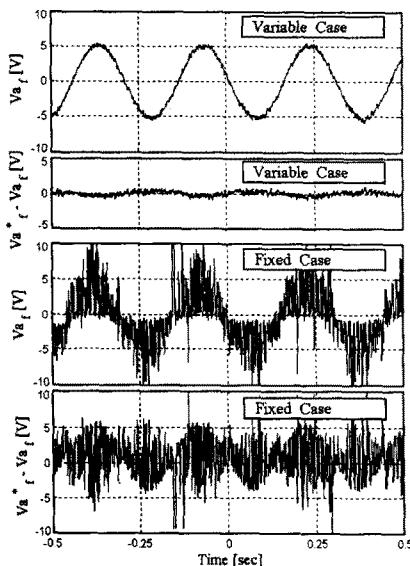


그림 3. 축사차수 상태관측기의 블록도



(a) 지령전압 및 스위칭전압



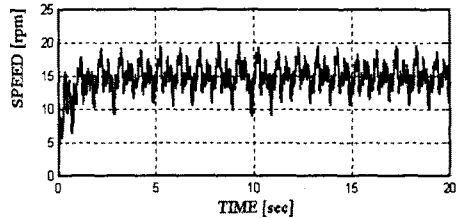
(b) 가변 및 고정 링크전압에서 상호 비교

그림 4. 인버터 출력전압 실험결과

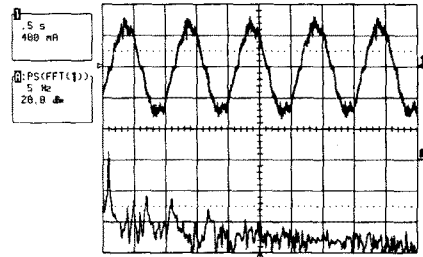
4. 실험 결과 및 검토

그림 4는 본 연구에서 제시한 알고리즘을 지령 전압 5V인 경우에 적용한 결과로서 그림 4(a)는 지령전압과 실제 스위칭 전압을 나타내고 그림 4(b)는 저역통과 필터를 거친 인버터의 출력전압을 나타낸다.

그림 5는 본 연구에서 구성한 전체시스템을 적용한 센서리스 속도제어 응답특성 및 상전류 파형을 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 지령속도 15rpm의 저속 운전에 대해서도 비교적 양호한 속도의 제어가 이루어짐을 보인다.



(a) 속도응답



(b) 상전류파형 및 고조파분석

그림 5. 속도응답 및 상전류파형 실험결과

5. 결론

본 논문은 저속운전영역에서의 센서리스 PMSM의 성능개선에 관한 연구로서 최적의 출력전압을 생성하기 위하여 지령전압에 따라 직류 링크전압을 제어할 수 있는 인버터 시스템을 구현하였다. 그리고 인버터 구동은 SVPWM 방식으로 종래의 SVPWM 스위칭 시간의 계산과정을 개선하여 유효전압벡터의 인가시간으로부터 기준전압벡터에 대한 정보없이 각 상의 스위칭 시간을 직접 계산하는 방식으로 구현하였다. 제안된 SVPWM 인버터 시스템을 PMSM의 센서리스 속도제어에 직접 적용하여 그 성능을 검증하였다. 실험결과에서 제시된 바와 같이 본 논문에서 제안한 알고리즘에 의해 출력전압 오차를 크게 개선하였으며 저속 운전 영역에서 상대적으로 양호한 속도응답을 나타내고 있다.

(참고 문헌)

- [1] K. Rajashekara, A. Kawamura and K. Matsuse, Sensorless Control of AC Motor Drives, IEEE Press, 1996
- [2] J. Holtz, "State of the Art of Controlled AC Drives without Speed Sensors", Int. J. Electronics, vol.80, no.2, pp.249-263, 1996
- [3] H. W. Van der Broeck, H. C. Skudelny, "Analysis and Realization of a Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vectors", IEEE IA-24, No. 1, pp. 142-150, 1988.