

## 파라미터 변동을 고려한 PMSM의 센서리스 속도제어

이동희, 신규재, 권영안  
부산대학교 전기공학과

### Sensorless Speed Control of PMSM Considering Parameter Variation

D. H. Lee, K. J. Shin, and Y. A. Kwon  
Pusan National University, email: yakwon@hyowon.cc.pusan.ac.kr

**Abstract** - Most of sensorless algorithms are based on motor equations including electrical and mechanical parameters. However, parameter variation and uncertain error decrease the accuracy of speed estimation of PMSM. This paper investigates the sensorless speed control of PMSM considering parameter variation. The proposed algorithm use the speed compensator which is robust in parameter variation and error. The simulation and experimental results indicate good performances.

#### 1. 서론

PMSM은 높은 전력밀도와 제어정도로 인하여 많은 산업현장과 가전기에 광범위하게 응용되고 있으며 최근에는 위치 및 속도센서를 사용하지 않는 센서리스 제어의 연구가 많이 이루어지고 있다. [1,2] 대부분의 센서리스 제어는 전동기 방정식에 근거하므로, 추정 속도의 정도는 전동기의 전기적, 기계적 파라미터의 정도에 의존하게 된다. 전동기 모델로부터 추정된 회전자 속도 및 위치의 오차는 전동기의 모델링 오차 및 전류와 전압의 측정 오차로부터 발생한다. 전동기의 모델링 오차로서 파라미터 오차로 인한 추정속도의 오프셋은 전동기의 속도제어의 정도를 감소시킬 뿐만 아니라 추정 위치의 오차가 지속적으로 누적되면 전동기의 운전이 불안정해지는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 전동기의 전기적 파라미터 오차와 추정속도의 영향을 분석하고, 새로운 보상기의 도입으로 파라미터 오차로 인한 추정속도와 추정위치의 오차를 보상하고 파라미터 추종을 수행하는 센서리스 속도제어방식을 제시한다.

#### 2. PMSM의 수학적 모델

본 연구에서 사용한 전동기는 3상 평형 PMSM으로서 영구자석을 일정전류가 흐르는 권선으로 대치하는 경우, 회전자를 기준으로 하는 회전좌표계에서의 전압 방정식은 다음과 같이 된다.

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

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_r L_s i_{qs}$$

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

$I_f$  : 회전자 가상권선 전류

PMSM의 토크 방정식은 다음과 같다.

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} P K_T i_{qs} \quad (2)$$

$$\text{단, } P \text{는 쌍극수, } K_T = M I_f$$

#### 3. 센서리스 속도제어

##### 3.1 속도추정

본 연구에서는 PMSM의 센서리스 속도추정을 전동기 파라미터, 단자전압 및 전류를 이용하여 전압방정식으로부터 직접 계산하여 수행한다. 이 방식에서 회전자의 속도 및 위치는 다음과 같이 된다.

$$\omega_r = \frac{v_{qs} - (R_s + L_s \frac{d}{dt}) i_{qs}}{K_E + L_s i_{ds}} \quad (3)$$

$$\theta_r = \theta_0 + \int \omega_r \cdot dt \quad (4)$$

따라서 전압방정식을 이용한 속도 추정에서 추정정

도는 전동기 파라미터의 정도에 의존하므로 전동기의 파라미터 오차로 인한 추정 속도 및 추정 위치의 보상이 필요하다.

### 3.2 파라미터 변동의 영향

식(3)에서 전동기 파라미터가 오차를 가지는 경우에 파라미터를 다음과 같이 표기한다.

$$\begin{aligned} \widehat{R}_s &= R_s + \Delta R_s \\ \widehat{L}_s &= L_s + \Delta L_s \\ \widehat{K}_E &= K_E + \Delta K_E \end{aligned} \quad (5)$$

정상상태에서 직축전류 성분이 영으로 제어되는 경우에 파라미터 오차를 고려한 추정속도는 다음과 같이 된다.

$$\widehat{\omega} = \frac{v_{qs} - R_s i_{qs} - \Delta R_s i_{qs}}{K_E + \Delta K_E} \quad (6)$$

정상상태에서 파라미터 오차를 고려한 추정속도에는 인덕턴스 오차에 대해서는 오차가 발생하지 않고, 고정자 저항 오차 및 역기전력 상수 오차에 의해서 추정속도 오차가 발생한다. 고정자 저항 및 역기전력상수는 부하 및 온도에 따라 변동이 되는 파라미터이므로 이에 대한 보상이 필요하다. 여기에서 고정자저항은 냉각구조 및 송풍에 의하여 권선의 온도억제가 비교적 용이하고 식(6)에서 추정속도 오차에도 역기전력 상수에 비해서 영향이 비교적 작은 항이 된다. 따라서 본 연구에서는 역기전력상수의 오차에 대한 보상을 수행하여 파라미터 변동을 추종한다.

### 3.3 추정속도 및 파라미터 보상

본 연구에서는 전동기의 상전류를 측정하여 상전류 주기로부터 구한 전동기의 평균속도를 이용하여 전압방정식으로부터 계산된 추정속도 및 추정위치의 오차를 보상하고 파라미터 변동을 추종한다. 이에 의한 추정속도의 보상은 전동기의 평균 속도와 추정속도의 오차로부터 다음과 같이 이루어진다.

$$\omega_e = \widehat{\omega} + K_{sp} \cdot \Delta \widehat{\omega} + K_{si} \int \Delta \widehat{\omega} \cdot dt \quad (7)$$

$$\Delta \widehat{\omega} = \omega_s - \widehat{\omega} \quad (8)$$

파라미터의 보상은 전술한 바와 같이 고정자 권선의 저항은 역기전력 상수에 비해서 영향이 작으므로 본 연구에서는 역기전력 상수를 지속적으로

보상한다. 역기전력상수의 보상은 추정속도의 오차로부터 다음과 같이 수행한다.

$$K_E = K_E + K_{pp} \cdot \Delta \widehat{\omega} + K_{pi} \int \Delta \widehat{\omega} \cdot dt \quad (9)$$

## 4. 시뮬레이션

그림 1은 이상에서 기술한 센서리스 속도제어 방식의 전체시스템 블록도이다.

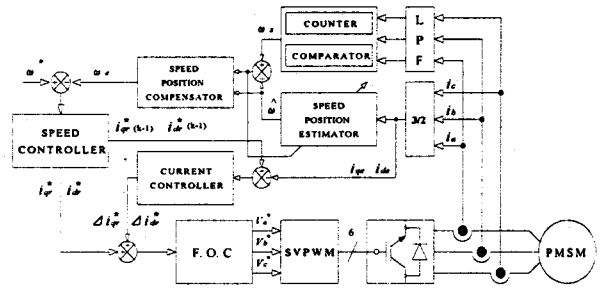


그림 1. 전체 시스템 블록도

본 연구에서 제시한 알고리즘을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서 사용하는 PMSM은 정격출력 1hp, 3상 4극 전동기이다. 그림 2는 1000rpm에서 상전류파형과 카운터의 주기신호를 나타낸다.

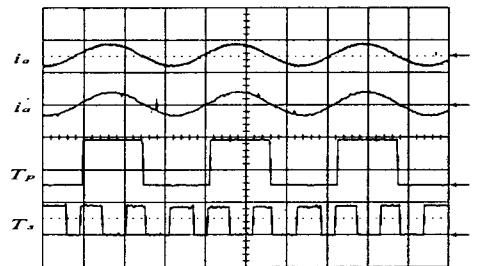


그림 2. 상전류와 주기신호 (2A, 5V/div, 10ms/div)

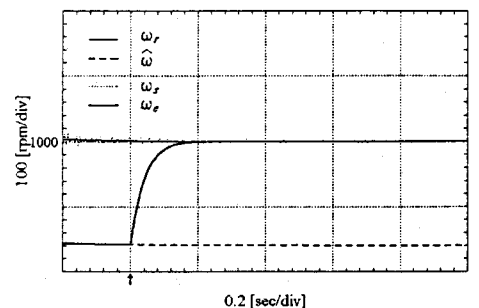
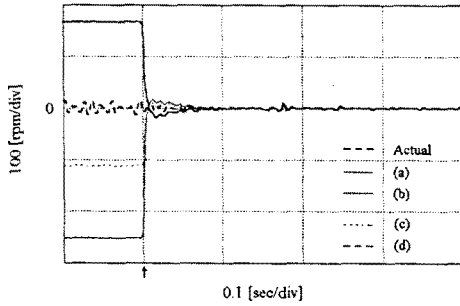


그림 3. 속도응답(1000rpm)

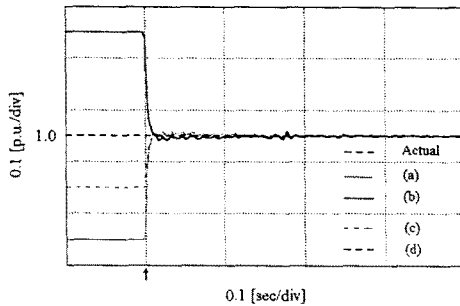
그림 3은 1000rpm의 속도에서 역기전력상수가 실제값에 대해 1.15p.u.로 크게 설정되었을 경우의 추정속도와 보상속도를 나타낸다. 알고리즘이 적용되는 시점에서부터 추정속도는 실제속도에 빠르게 수렴됨을 알 수 있다.

그림 4는 파라미터가 초기 설정오차를 가질 경우의 추정속도 오차와 파라미터 추종특성을 나타낸다. 파라미터의 초기 설정오차는  $\pm 20(\%)$ 로 설정하였다. 그림 4에서 각 파라미터의 초기 설정치는 다음과 같다.

- (a)  $\widehat{R}_s = 0.8 R_s, \widehat{L}_s = 0.8 L_s, \widehat{K}_E = 0.8 K_E$
- (b)  $\widehat{R}_s = 1.2 R_s, \widehat{L}_s = 0.8 L_s, \widehat{K}_E = 1.2 K_E$
- (c)  $\widehat{R}_s = 1.1 R_s, \widehat{L}_s = 0.9 L_s, \widehat{K}_E = 0.9 K_E$
- (d)  $\widehat{R}_s = 0.8 R_s, \widehat{L}_s = 1.2 L_s, \widehat{K}_E = 1.2 K_E$



(a) 추정속도 오차



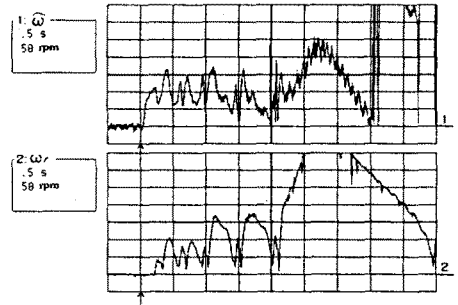
(b) 파라미터 추종 특성

그림 4. 추정속도 오차와 파라미터 추종특성

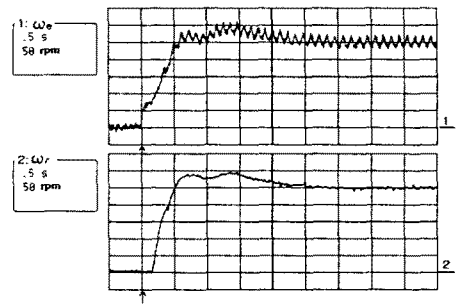
### 5. 실험 결과 및 검토

그림 5는 지령속도 250rpm에서 역기전력 상수를 0.85p.u.로 작게 설정하였을 경우의 속도 응답이다. (a)의 경우는 추정위치 및 속도 보상기가 없는 경우로서 전동기의 운전이 정상적으로 이루어지지 않았다. (b)의 경우는 추정위치 및 속

도 보상기를 가지는 경우의 속도 응답이다.



(a) 보상기 없는 경우



(b) 보상기 있는 경우

그림 5. 속도 응답 실험 결과 (250rpm)

### 6. 결론

대부분의 센서리스 제어는 전동기 방정식에 근거하므로, 추정속도의 정도는 전동기의 파라미터의 정도에 의존하게 된다. 본 연구는 전동기의 파라미터 오차로 인한 추정속도의 오차를 추정위치 및 속도 보상기로 보상하여 전동기의 속도제어의 정도를 높이고 파라미터의 변동에 대해서 강인한 속도제어가 되도록 하였다. 시뮬레이션 및 실험결과에서 제시한 바와 같이 파라미터의 변동시에 강인한 속도제어가 이루어졌다.

### [참고 문헌]

- [1] K.Rajashekara, A.Kawamura and K.Matsuse, *Sensorless Control of AC Motor Drives*, IEEE Press, 1996.
- [2] S.Bolognani, M.Ziglitoto and K.Unterkofler, "On-line Parameter Commissioning in Sensorless PMSM Drives", Proc. of the IEEE Int. Symp. on IE, pp.480-484, 1997.