

## 영구자석 동기전동기의 강인한 센서리스 속도제어

이동희, 손문경, 권영안  
부산대학교 전기공학과

### Robust Speed Control of Sensorless PMSM

D. H. Lee, M. K. Son and Y. A. Kwon  
Pusan National University, Email : yakwon@hyowon.pusan.ac.kr

**Abstract** - Recently sensorless PMSM is much studied for the industrial applications and home appliances. Most of sensorless algorithm are based on the motor equations of which coefficients are motor parameters. However, uncertainty of motor parameter effects the accuracy of speed estimation of PMSM. This paper investigates the robust speed control of sensorless PMSM which has robustness to parameter uncertainty or variation. The parameter compensation is performed through PI control of the speed error between the estimated speed and the real speed obtained from the measured current. The proposed algorithm is verified through the experiment.

센서리스 제어알고리즘을 구현한다.

### 2. PMSM의 수학적모델

PMSM에서 영구자석을 그림 1과 같이 일정전류가 흐르는 원선으로 대치하는 경우에 동기 각속도  $\omega_r$ 로 회전하는  $d_r - q_r$  좌표계에서 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{qdr} = R_s i_{qdr} + \omega \lambda_{qdr} + p \lambda_{qdr} \quad (1)$$

단,  $V_{qdr}$  :  $d_r - q_r$  축 전압 벡터

$i_{qdr}$  :  $d_r - q_r$  축 전류 벡터

$\lambda_{qdr}$  :  $d_r - q_r$  축 자속 쇄교 벡터

$R_s$  : 고정자 저항,  $p$  : 미분 연산자

### 1. 서론

PMSM은 높은 전력밀도와 제어정도로 인하여 많은 산업현장과 가전기기에 광범위하게 응용되고 있으며 최근에는 위치 및 속도센서를 사용하지 않는 센서리스방식의 연구가 많이 이루어지고 있다.[1-4] 회전자의 위치 및 속도 검출을 위한 센서를 설치하는 경우에는 안정성을 확보하기 위하여 전동기의 설계 및 가공공정이 복잡해지고, 센서부착에 대한 정밀성의 문제로 대량생산이 어려우며, 부착된 센서는 사용환경에 영향을 받기 때문에 주위 온도가 높거나 습기가 심한 곳 또는 진동이 심한 환경에서 센서의 신뢰도가 감소한다. 대부분의 센서리스 방식은 전동기의 수식화된 방정식을 이용하므로, 속도의 추정정도는 전동기 파라메타의 정확도에 의존한다. 본 논문에서는 PMSM의 전압방정식에서 가상축과 실제축의 전압차를 보상하여 회전자의 위치를 추정하는 센서리스 방식에 측정전류로부터 구한 실제 전동기의 속도와 추정속도와의 오차로부터 전동기 파라메타의 지속적인 보상을 추가하여 전동기 파라메타의 오차 및 변동에 강인한

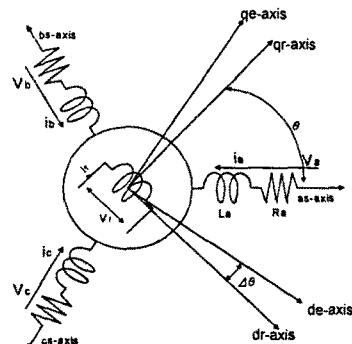


그림 1. PMSM의 모델

식(1)을  $d_r - q_r$  성분으로 나타내면,

$$V_{qr} = R_s i_{qr} + L_s \frac{d}{dt} i_{qr} + \omega_r i_{dr} + K_E \omega_r \quad (2)$$

$$V_{dr} = R_s i_{dr} + L_s \frac{d}{dt} i_{dr} - \omega_r L_s i_{qr}$$

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

PMSM의 토오크 방정식은 다음과 같다.

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

단,  $P$ 는 극수,  $K_T = M I_f$

### 3. 센서리스 속도제어 알고리즘[3]

그림 1에서 실제 회전자 자속방향을 기준으로 하는  $d_r - q_r$  회전좌표계와 제어기가 가상한 회전자 축 자속방향을 기준으로 하는  $d_e - q_e$  회전좌표계에서, 실제의 회전자의 위치를  $\theta_r$ , 가상의 회전자의 위치를  $\theta_e$ 라하면 실제와 가상축과의 상차  $\Delta\theta$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \theta_e - \theta_r \quad (4)$$

식(3)과 식(5)로 부터 가상 회전축의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{de} = R_s i_{de} + L_s \frac{di_{de}}{dt} - L_s \omega_e i_{qe} + K_E \omega_e \sin \Delta\theta \quad (5)$$

$$V_{qe} = L_s \omega_e i_{de} + R_s i_{qe} + L_s \frac{di_{qe}}{dt} + K_E \omega_e \cos \Delta\theta$$

만약, 이상적으로 속도 및 위치를 추정하여 동작한다면  $\theta_r = \theta_e$ 이므로  $\Delta\theta = 0$ 가 된다. 이 경우에 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{de} = R_s i_{de} + L_s \frac{di_{de}}{dt} - L_s \omega_e i_{qe} \quad (6)$$

$$V_{qe} = L_s \omega_e i_{de} + R_s i_{qe} + L_s \frac{di_{qe}}{dt} + K_E \omega_e$$

실제 전압  $V_{dr}$ 와 가상 전압  $V_{de}$ 의 차이를  $\Delta V_{de}$ 라 하면, 식(6)과 식(7)의 차이로 부터 다음과 같아 된다.

$$\Delta V_{de} = V_{dr} - V_{de} = \omega K_E \sin \Delta\theta \quad (7)$$

여기에서  $\Delta\theta \approx 0$ 라 하면  $\Delta V_{de}$ 는  $\Delta\theta$ 에 비례관계를 가지게 된다. 따라서 가상축과 실제축과의 위치오차는 가상 전압과 실제 전압과의 차에 비례함을 알 수 있으며, 가상 전압과 실제 전압과의 차를 보상함으로써 추정위치의 오차를 보상할 수 있음을

알 수 있다. 이러한 추정속도 및 위치에 대한 보상은 가상 전압과 실제 전압의 차에 대하여 PI제어기를 통한 속도차를 추정속도에 더함으로써 속도 보상을 한다. 식(5)에서 추정속도는  $\Delta\theta \approx 0$ ,  $\omega_e \approx \omega$ 인 경우에 다음과 같다.

$$\hat{\omega} = \frac{V_{qe} - (R_s + L_s \frac{d}{dt}) i_{qe}}{K_E + L_s i_{de}} \quad (8)$$

그리고 PMSM의 시계방향 회전에서 가상축이 실제축보다 앞서거나 ( $\Delta\theta > 0$ ) 뒤지게 되는 경우 ( $\Delta\theta < 0$ )가 발생하는 데 이에 비례하는 만큼을 보상속도에 의해 보상을 하게 된다. 시계방향으로 회전할 때  $\Delta\theta = 0$ 가 되기 위해서는 보상속도는 다음을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \Delta\theta > 0 (\Delta V_{de} > 0) \text{ 이면, } \omega_c > 0 \\ \Delta\theta < 0 (\Delta V_{de} < 0) \text{ 이면, } \omega_c < 0 \end{aligned} \quad (9)$$

이상에서 위치오차를 줄이기 위한 보상속도는 PI제어기를 통해 보상하면 다음과 같다.

$$\omega_c = (K_{sp} \Delta V_{de} + K_{st} \cdot \int \Delta V_{de} dt) \operatorname{sgn}(\omega_e) \quad (10)$$

따라서, 가상속도는 추정속도에 보상속도  $\omega_c$ 를 더한 값으로 다음과 같다.

$$\omega_e = \hat{\omega} + \omega_c \quad (11)$$

회전자의 위치는 제어기의 가상속도로 부터 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_e = \theta_0 + \int \omega_e \cdot dt \quad (12)$$

### 4. 파라메타 보상 알고리즘

전동기의 단자전압과 전류를 측정하여 전동기의 회전자위치를 추정하는 센서리스 알고리즘에서 추정속도의 계산식은 전동기 파라메타를 포함한다. 따라서 전동기 파라메타가 실제 값과 차이가 있을 경우에 추정속도는 실제속도와 오차를 가지게 된다. 오차의 원인은 측정치의 오차와 운전영역 및 온도변동에 의한 파라메타의 변동에 기인한다. 한편, 측정치의 오차는 순시적이고, 노이즈에 매우 민감하게 반응하므로 고려하기가 어렵고 PMSM의 공극은 비교적 커서 자속포화의 영향은 거의 무시된다. 따라서 본 논문에서는 온도변동에 의한 역기전력상수와 고정자저항의 변동을 보상대상으로 한

다. 역기전력 상수는 페라이트 계열의 자석을 사용하는 경우, 일반적으로 동작온도가 100°C 상승하는 경우에 초기치의 약 18~20% 정도의 감소되는 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다[4]. 실제 운전에 있어서도 전동기의 내부온도가 상당히 상승하고 부하에 따른 온도변동으로 역기전력 상수가 변동하게 된다. 따라서 정밀 속도제어를 위해서는 이러한 역기전력상수의 변동에 대한 보상이 요구된다. 본 논문에서는 전동기의 상전류를 측정하고 카운터회로를 통하여 전동기의 실제 평균속도를 계산하여 역기전력 상수의 보상을 다음과 같이 수행한다.

$$\hat{K_E} = K_E(1 + \alpha) \quad (13)$$

$$a = Kp_{Ke} \cdot \Delta\omega_{error} + Ki_{Ke} \int \Delta\omega_{error} \cdot dt \quad (14)$$

단,  $\Delta\omega_{error} = \omega_{measured} - \omega_{estimated}$

그리고 온도변동에 따른 고정자저항 변동의 보상 방식으로서 전동기의 수식적인 모델로부터 계산된 모델전류와 측정전류가 동일해지도록 전동기의 저항을 보상하는 방식을 강구한다. 실제 전동기의 저항과 전동기 모델의 저항값이 일치하지 않으면 전류의 위상 오차가 발생하게 되며, 이 오차를 감소시키는 방향으로 전동기의 저항을 수정시킨다. 이상에서 제시한 전체 시스템의 블록도는 그림 2와 같다.

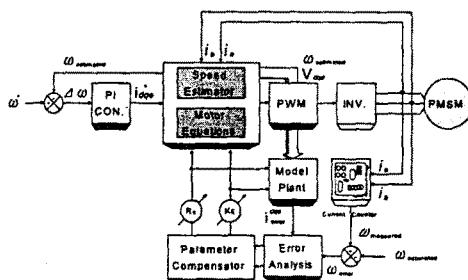


그림2. 파라메타 보상기를 가지는 시스템 블록도

## 5. 실험결과 및 검토

제시된 알고리즘을 검증하기 위하여 실험장치를 제작하고 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 전동기는 3상 8극, 600W의 영구자석전동기이다. 그림 3과 그림 4는 각각 속도명령치 100, 500(rpm)에서 부하변동시의 속도응답으로서 양호한 속도응답을 나타내고 있다.

## 6. 결론

본 논문은 센서리스 PMSM의 강인한 속도제

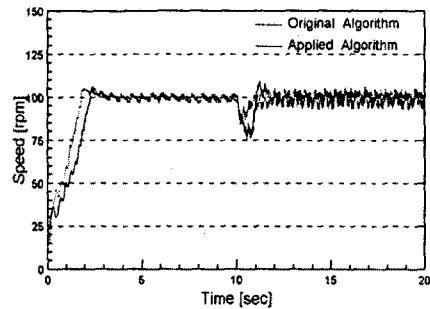


그림 3. 속도명령 100(rpm)에서의 속도응답

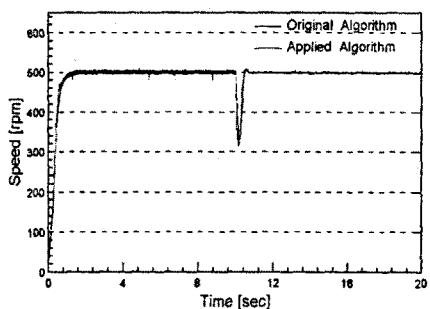


그림 4. 속도명령 500(rpm)에서의 속도응답

어에 관한 연구이다. 본 연구에서 구현한 알고리즘은 속도오차로부터 파라메타를 보상하는 방식으로서 파라메터 변동에 강인한 속도제어방식이다. 제시한 알고리즘의 실험결과에서 나타난 바와 같이 양호한 속도제어가 이루어졌다.

## [참고문헌]

- [1] Nesimi Ertugrul and Paul Acarnley, "A new Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors", IEEE, IA-30, No.1, pp126-133, 1994.
- [2] Y.Nakamura, T.Kudo and F.Ishibashi, "High Efficiency Drive Due to Power Factor Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE, PE-10, No. 2, pp247-253, 1995
- [3] N.Matsui and M.Shigo, "Brushless dc Motor Control Without Position and Speed Sensors", IEEE, IA-28, No.1, pp120-127, 1992.
- [4] Y.Dote, S. Kinoshita, " Brushless Servo-motors," from CLARENDON PRESS, OXFORD, 1990