

마이크로 프로세서를 이용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어

최재영, 김성환, 신정기, 권영안
부산대학교

MICROPROCESSOR BASED SENSORLESS SPEED CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

J.Y.Choi, S.H.Kim, J.K.Shin, and Y.A.Kwon
Pusan National University

Abstract - Permanent magnet brushless motor is widely used in industrial drive applications due to high efficiency, high power ratio, and easy maintenance. Position and speed sensors required in this motor increase the drive cost, and reduce the application range. Some papers present the sensorless speed control using DSP with a high processing performance. However, DSP increases the cost, and makes the implementation difficult. This study has performed the sensorless speed control with a microprocessor system which can be easily accessed.

전류가 흐르는 권선으로 대체하는 경우에 실속 순시 전압 방정식은 다음과 같이된다.

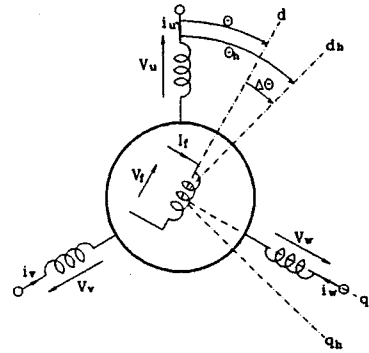


그림 1. 영구자석 동기전동기의 모델

1. 서론

영구자석 브러쉬리스 전동기는 그 구조 및 제어방법에 따라 구형과형 브러쉬리스 전동기와 정현과형 브러쉬리스 전동기(영구자석 동기전동기)로 나누어지며, 효율 및 출력비가 높아 서보용에서 동력용으로까지 사용범위가 매우 넓어지고 있다. 그러나 브러쉬리스 전동기의 속도제어를 위해서 일반적으로 사용되는 속도 및 위치 센서는 가격상승뿐만 아니라 사용범위를 상대적으로 축소시키고 있다. 이에 대한 대책으로서 센서없는 구동시스템이 많이 연구되고 있으며 여러 논문에서 고속 프로세서인 DSP를 이용한 센서리스 제어를 제시하고 있다.[1-3] 그러나 DSP는 고가이고 사용법을 추가로 알아야 한다. 본 연구는 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어에 관한 연구로서 가상속과 실제속과의 위치오차는 가상 권선전압과 실제 권선전압과의 차이에 비례함을 이용하는 알고리즘을[2] 기본으로 하여 많은 사용자에게 익숙한 마이크로프로세서(180486) 시스템으로 센서리스 속도제어를 구현하였다.

$$\begin{bmatrix} v_f \\ v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f + \frac{d}{dt} L_f & \frac{d}{dt} M \cos \theta \\ \frac{d}{dt} M \cos \theta & R_a + \frac{d}{dt} L_a \\ \frac{d}{dt} M \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{d}{dt} L_a \cos \frac{4\pi}{3} \\ \frac{d}{dt} M \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{d}{dt} L_a \cos \frac{2\pi}{3} \\ \frac{d}{dt} M \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{d}{dt} M \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{d}{dt} L_a \cos \frac{4\pi}{3} & \frac{d}{dt} L_a \cos \frac{2\pi}{3} \\ R_a + \frac{d}{dt} L_a & \frac{d}{dt} L_a \cos \frac{2\pi}{3} \\ \frac{d}{dt} L_a \cos \frac{4\pi}{3} & R_a + \frac{d}{dt} L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

전동기의 상전류는 식(1)에서 다음과 같이된다.

2. 전동기 모델

영구자석 동기전동기에서 영구자석을 그림 1과 같이 일정

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_u &= \frac{2}{3L_a} (v_u - R_a i_u + M I_f \omega \sin \theta) \\ \frac{d}{dt} i_v &= \frac{2}{3L_a} \left\{ (v_v - R_a i_v + M I_f \omega \sin(\theta - \frac{2\pi}{3})) \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

전동기의 발생토크 및 운동방정식은 다음과 같다.

$$T = PMI_f \left\{ i_u \sin \theta + i_v \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) - (i_u + i_v) \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right\} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{P}{J} (T - T_L - D\omega_m) \quad (4)$$

단, P : 쌍극수, T : 발생 토크, T_L : 부하토크,

D : 마찰계수, $\omega_m = \frac{\omega}{P}$: 회전자 속도

3. 제어 알고리즘

그림 1에서 실제 회전자 자속 방향을 기준으로 하는 d-q회전좌표계와 제어가 가상하는 회전자 자속 방향을 기준으로 하는 d_h - q_h 회전좌표계를 고려하고, 실제의 회전자의 위치를 θ , 회전자의 가상 위치를 θ_h 라 하면 실제와 가상속과의 상차 $\Delta\theta$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \theta_h - \theta \quad (5)$$

실속 3상 성분을 d_h - q_h 회전 좌표계로 변환하는 변환행렬은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} a_h \\ b_h \\ c_h \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_h \cos(\theta_h - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_h + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_h \cos(\theta_h - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_h + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(1), (5), (6)으로부터 d_h - q_h 회전좌표계에서 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{dh} \\ v_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L \frac{d}{dt} & -L\omega_h \\ L\omega_h & R + L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} + K_E \omega \begin{bmatrix} \sin \Delta\theta \\ \cos \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

단, $R = R_a$, $L = \frac{3}{2} L_a$, $K_E = \sqrt{\frac{3}{2}} M I_f$,

$$\omega_h = \frac{d\theta_h}{dt}, \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

만약 이상적인 상태에서 속도 및 위치를 추정하여 동작한다면 $\theta_h = \theta$ 가 된다. 이 경우에 전압방정식은 다음과 같다. 여기에서 v_{dh}' 와 v_{qh}' 는 가상의 전압이며, 이 값은 실제의 전류로부터 계산된다.

$$\begin{bmatrix} v_{dh}' \\ v_{qh}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L \frac{d}{dt} & -L\omega_h \\ L\omega_h & R + L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} + K_E \omega_h \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

실제 전압 v_{dh} 와 가상 전압 v_{dh}' 와의 차이를 Δv_{dh} 라 하면 식(7)과 (8)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\Delta v_{dh} = v_{dh} - v_{dh}' = K_E \omega \sin \Delta\theta \quad (9)$$

여기에서 $\Delta\theta \approx 0$ 라 하면 Δv_{dh} 는 $\Delta\theta$ 에 비례관계를 가지게 된다. 따라서 가상속과 실제속과의 위치오차는 가상전압과 실제 전압과의 차에 비례함을 알 수 있으며, 이 가상전압과 실제 전압과의 차를 보상함으로써 추정위치의 오차를 보상할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 추정속도 및 위치에 대한 보상은 가상전압과 실제전압의 차에 대하여 PI제어를 통한 속도차를 추정속도에 더함으로써 속도 보상을 한다. 식(7)에서 추정속도는 $\Delta\theta \approx 0$, $\omega_h \approx \omega$ 인 경우와 다음과 같다.

$$\hat{\omega} = \frac{v_{dh} - (R + L \frac{d}{dt}) i_{dh}}{K_E + L i_{dh}} \quad (10)$$

그리고, 그림 1과 같은 회전방향에서 $\Delta\theta > 0$ 이면 가상속이 실제속에 대하여 앞서게 되므로 이에 비례하는 보상속도에 의해 보상을 하게 된다. 따라서, 보상속도 ω_c 는 다음과 같다.

$$\omega_c = \omega_h - \hat{\omega} \quad (11)$$

시계방향으로 회전할 때 $\Delta\theta = 0$ 가 되기 위해서는 식(12)를 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} \Delta\theta > 0 (\Delta v_{dh} > 0) \text{ 이면, } \omega_c > 0 \\ \Delta\theta < 0 (\Delta v_{dh} < 0) \text{ 이면, } \omega_c < 0 \end{aligned} \quad (12)$$

이상에서 위치오차를 줄이기 위한 보상속도는 PI알고리즘을 사용하면 다음과 같다.

$$\omega_c = (K_p \Delta v_{dh} + K_i \int \Delta v_{dh} dt) \operatorname{sgn}(\omega_h) \quad (13)$$

4. 시스템구성 및 실험 결과

그림 2는 본 연구에서 구성된 구동시스템을 나타낸다. 전계구동알고리즘을 디지털화 하였으며 많은 사용자에게 익숙한 PC-486 시스템으로 구현하였다. 여기에서 상전압은 직류전압과 스위칭 패턴에 의해 구하였으며 지령치 전류제어는 히스테리시스 전류제어를 행하였다. 전류제어는 150 μ s 간격으로 수행되고 속도제어는 1.5ms 간격으로 수행하였다.

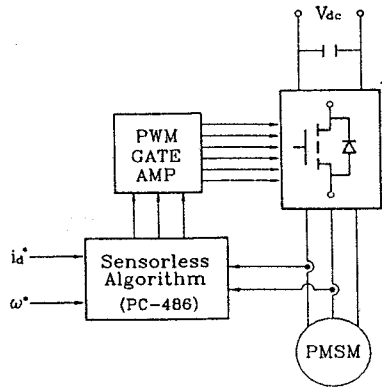


그림 2. 구동시스템 구성도

실험에 사용되는 영구자석 동기전동기는 일진전기(주) 제품(LH06)으로서 전동기사양은 표1과 같다.

표1. 정현파형 브러쉬리스 전동기

극수	8pole
정격출력	600W
정격전류	5.8A
토크상수	0.107Kgm/A
고정자권선저항	1.475 Ω
고정자 인덕턴스	8.05mH
권선방식	Y결선
회전자관성	0.0243Kgm ²
정격속도	1000rpm

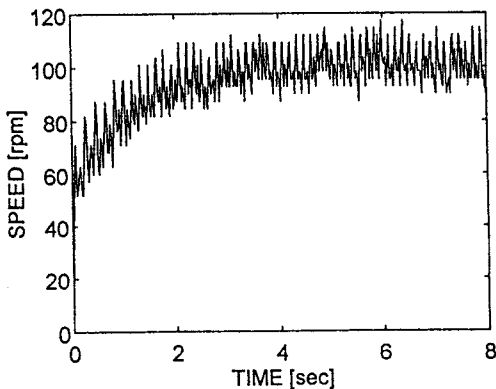


그림3. 속도지령치 100rpm인 경우의 속도응답

그림 3은 속도지령치가 100rpm인 경우의 속도응답을 나타낸다.

그림 4는 속도지령치를 500rpm에서 1000rpm으로 변동한 경우의 속도응답을 나타낸다. 그림 5는 1000rpm에서 전류파형을 나타낸다.

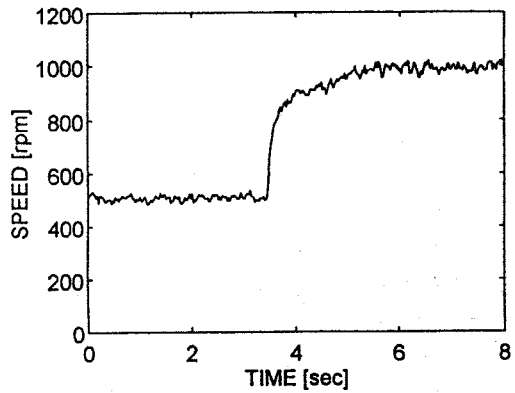


그림4. 속도지령치 500 -> 1000rpm인 경우의 속도응답

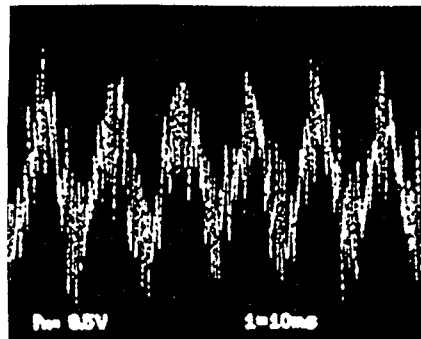


그림5. 속도 1000rpm에서 권선전류파형

5. 결론

영구자석 동기전동기의 속도제어를 위해서 일반적으로 사용되는 속도 및 위치 센서는 가격상승뿐만 아니라 사용범위를 상대적으로 축소시키고 있다. 본 연구는 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어에 관한 연구로서 가상속과 실제속과의 위치오차는 가상 권선전압과 실제 권선전압과의 차이에 비례함을 이용하는 알고리즘을 기본으로 하여 많은 사용자에게 익숙한 마이크로프로세서(180486) 시스템으로 센서리스 속도제어를 구현하였으며 실험결과에서 제시된 바와 같이 DSP를 사용하지 않는 시스템에서도 양호한 속도응답 및 처리능력을 나타내었다.

참고문헌

- [1] Y.Dote, "Servo motor and motion control using digital signal processor", Prentice Hall, 1990
- [2] N.Matsui and M.Shigyo, "Brushless dc motor control without position and speed sensors", IEEE, IA-28, 1, p120,1992
- [3] H.Bausch, K.Kanelis, B.Lange, and W.Zeng, "Torque control of synchronous and asynchronous drives without mechanical sensors", Proc ICEM, vol