

무효전력 보상을 이용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어

김규태, 박수종, 한정호, 김영삼, 권영안
부산대학교

Speed Sensorless Control of PMSM Using Reactive Power Compensation

K T Kim, S J Park, J H Han, Y S Kim and Y A Kwon
Pusan National University

Abstract - Speed and torque controls of permanent magnet synchronous motors are usually attained by the application of position and speed sensors. However, speed and position sensors require the additional mounting space, reduce the reliability in harsh environments and increase the cost of a motor. Therefore, many studies have been performed for the elimination of speed and position sensors. This paper investigates a novel speed sensorless control of a permanent magnet synchronous motor. The proposed control strategy compensates a speed error through the difference between the calculated and measured reactive power. The proposed algorithm is verified through the simulation and experimentation.

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 높은 전력밀도와 제어의 정밀성으로 인하여 많은 산업현장과 가전기에 광범위하게 응용되고 있다. 특히 종래의 직류전동기가 사용되는 가변속 구동을 위한 서보시스템에서 활용도가 높아지고 있다. 영구자석 동기전동기는 정확한 속도 및 토크 제어를 위해서는 회전자의 속도뿐만 아니라, 회전자의 위치정보가 반드시 요구된다. 회전자의 위치 및 속도 센서로서는 홀 소자, 레졸버 및 엔코더와 같은 센서 등이 사용되고 있다. 그러나 이러한 센서들은 경제적인 문제점과 센서의 안정성을 확보하기 위한 전동기의 설계 및 가공 공정이 복잡해지는 단점이 있으며, 주위 온도가 높거나 습기가 심한 곳 또는 진동이 심한 환경에서는 센서의 신뢰도가 감소한다. 최근에는 이러한 경제성 및 신뢰성 향상을 위하여 속도 및 위치 센서를 사용하지 않는 센서리스 제어방식의 연구가 많이 이루어지고 있다.

센서리스 제어 방식으로는 구형파형 BLDC 전동기의 경우, 역기전력을 이용한 위치검출 방식, 고정자 상권선에서 제 3고조파를 이용하여 위치를 구하는 방식, 프리휠링 다이오드의 도전구간을 검출하여 회전자의 위치를 구하는 방식 등이 있다. 이러한 방식들은 비교적 간단하게 센서리스 제어를 수행할 수 있는 장점이 있지만 정형파형 영구자석 동기전동기에는 적용이 어렵고 정밀한 속도제어를 구현하기가 어렵다. 영구자석 동기전동기의 경우에는 고정자전압 및 전류 값을 측정하여 전동기 방정식으로부터 속도를 추정하는 방식, 관측기에 의해 자속 및 역기전력을 추정하고 속도정보를 얻는 방식, 무효전력을 추정하고 속도하고 속도정보를 얻는 방식, 입출력 및 시스템이 잡음의 영향을 받을 경우에 최적의 필터링 알고리즘인 칼만 필터를 이용하는 방식, 가변구조제어를 활용하는 방식, 기계적 구조에 의한 전압 및 전류 고조파를 분석하여 속도를 추정하는 방식, 인공지능을 활용하는 제어 방식 및

직접토크제어를 활용하는 방식 등이 있다[1]-[7].

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어 방식으로서 무효전력 보상을 이용하여 속도정보를 개선하는 방식을 연구한다. 본 방식은 축소 차수 상태관측기를 이용하여 자속을 추정하여 이 자속과 전류로부터 무효전력을 추정하고 추정된 무효전력과 실제 무효전력과 비교하여 속도를 보상하는 방식이다. 본 방식은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한다.

2. 영구자석 동기전동기의 수학적 모델

그림 1은 본 논문에서 사용하는 3상 원통형 영구자석 동기전동기의 등가모델이다. 또한 전동기의 3상 실축, 2상 고정자 및 회전자 기준 좌표축의 상관관계를 그림 1에 나타낸다.

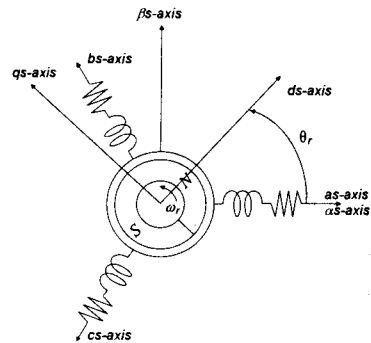


그림 1. 영구자석 동기전동기의 등가모델

영구자석 동기전동기의 실축 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{as} &= R_a i_{as} + \frac{d\psi_{as}}{dt} \\ &= R_a i_{as} + \frac{3}{2} L_a \frac{i_{as}}{dt} + e_{as} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} v_{bs} &= R_a i_{bs} + \frac{d\psi_{bs}}{dt} \\ &= R_a i_{bs} + \frac{3}{2} L_a \frac{i_{bs}}{dt} + e_{bs} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_{cs} &= R_a i_{cs} + \frac{d\psi_{cs}}{dt} \\ &= R_a i_{cs} + \frac{3}{2} L_a \frac{i_{cs}}{dt} + e_{cs} \end{aligned} \quad (3)$$

단, R_α, L_α : 상권선의 등가저항, 등가 인덕턴스

여기서 각 상권선의 역기전력은 상권선에 쇄교하는 영구자석의 자속으로부터 다음과 같다.

$$e_{as} = \frac{d\Psi_{af}}{dt} = -\omega_r K_E \sin \theta_r \quad (4)$$

$$e_{bs} = \frac{d\Psi_{bf}}{dt} = -\omega_r K_E \sin \left(\theta_r - \frac{2}{3} \pi \right) \quad (5)$$

$$e_{cs} = \frac{d\Psi_{cf}}{dt} = -\omega_r K_E \sin \left(\theta_r - \frac{4}{3} \pi \right) \quad (6)$$

단, θ_r : 회전자의 전기 위치각

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: 회전자속의 전기 각속도

K_E : 역기전력 상수

식(1)-(3)에서 좌표변환에 의하여 2상 고정자 기준 좌표계 $\alpha s - \beta s$ 축의 전압방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + L_s \frac{di_{\alpha s}}{dt} + e_{\alpha s} \quad (7)$$

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + L_s \frac{di_{\beta s}}{dt} + e_{\beta s} \quad (8)$$

$$\text{단, } R_s = R_\alpha, L_s = \frac{3}{2} L_\alpha$$

여기서 $\alpha s - \beta s$ 축의 역기전력은 다음과 같다.

$$e_{\alpha s} = \frac{d\Psi_{af}}{dt} = -\omega_r K_e \sin \theta_r \quad (9)$$

$$e_{\beta s} = \frac{d\Psi_{bf}}{dt} = \omega_r K_e \cos \theta_r \quad (10)$$

$$\text{단, } K_e = \sqrt{\frac{3}{2}} K_E$$

식(1)-(3)에서 좌표변환에 의하여 2상 회전자 기준 좌표계 $ds - qs$ 축의 전압방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_s i_{qs} \quad (11)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r L_s i_{ds} + \omega_r K_e \quad (12)$$

3. 무효전력 보상에 의한 속도 개선

고정자 기준 좌표계에서 역기전력을 적분하여 자속을 구하면 식(9), (10)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\Psi_s = [\Psi_{\alpha s} \ \Psi_{\beta s}]^T = [K_e \cos \theta_r, K_e \sin \theta_r]^T \quad (13)$$

고정자 기준 좌표계에서 영구자석 동기전동기의 전압방정식을 고정자전류와 자속을 상태변수로 하는 상태방

정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \Psi_s \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \Psi_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \mathbf{v}_s \\ &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{v}_s \end{aligned} \quad (14)$$

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (15)$$

단, $\mathbf{i}_s = [i_{\alpha s} \ i_{\beta s}]^T$, $\Psi_s = [\Psi_{\alpha s} \ \Psi_{\beta s}]^T$, $\mathbf{v}_s = [v_{\alpha s} \ v_{\beta s}]^T$,

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -R_s/L_s & 0 \\ 0 & -R_s/L_s \end{bmatrix}, A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} -\omega_r/L_s & 0 \\ 0 & \omega_r/L_s \end{bmatrix}, A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1/L_s & 0 \\ 0 & 1/L_s \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

자속 추정을 위하여 측정전류 피이드백을 가지는 전차수 관측기의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B} \mathbf{v}_s + \mathbf{L} (\mathbf{i}_s - \hat{\mathbf{i}}_s) \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{i}}_s = \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}} \quad (17)$$

단, $\hat{\cdot}$: 상태관측기 추정치, \mathbf{L} : 관측기 이득

식(16)에서 시스템 계수행렬은 시변계수인 회전자 속도 항을 포함하며, 추정된 회전자 속도에 의해 가변하는 적응관측기를 구성한다. 여기서 전류상태변수는 측정 가능한 상태변수이므로 이를 제외시킨 축소차수 관측기의 구성이 가능하며 본 논문에서는 다음과 같은 축소차수 적응관측기를 적용한다.

$$\dot{\hat{\mathbf{w}}} = \mathbf{F} \hat{\mathbf{w}} + \mathbf{D} \mathbf{i}_s + \mathbf{G} \mathbf{v}_s \quad (18)$$

$$\hat{\mathbf{w}} = \hat{\mathbf{z}} - \mathbf{L} \mathbf{i}_s \quad (19)$$

단, $\hat{\mathbf{w}} = [\hat{w}_1 \ \hat{w}_2]^T$, $\hat{\mathbf{z}} = [\Psi_{\alpha s} \ \Psi_{\beta s}]^T$

$$\mathbf{F} \equiv \mathbf{A}_{22} - \mathbf{L} \mathbf{A}_{12}, \mathbf{D} \equiv \mathbf{F} \mathbf{L} + \mathbf{A}_{21} - \mathbf{L} \mathbf{A}_{11}$$

$$\mathbf{G} \equiv \mathbf{B}_2 - \mathbf{L} \mathbf{B}_1$$

그리고 추정 무효전력은 추정 자속과 측정 전류로부터 다음과 같이 된다.

$$\hat{Q}_m = \frac{3}{2} (i_{ds} \cdot \hat{\Psi}_{qs} + i_{qs} \cdot \hat{\Psi}_{ds}) \quad (20)$$

측정 전류로부터 구한 실제 무효 전력은 다음과 같이 된다.

$$Q_m = \frac{3}{2} (i_{ds} L_s \frac{di_{qs}}{dt} + i_{qs} L_s \frac{di_{ds}}{dt}) \quad (21)$$

무효전력 오차를 이용하여 속도를 보상하는 센서리스 속도제어 시스템의 전체구성도는 그림 2와 같다.

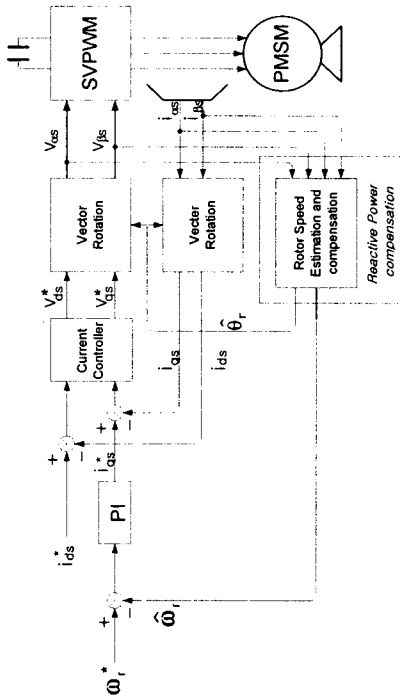


그림 2. 전체시스템 구성도

4. 실험결과 및 검토

그림 2와 같은 영구자석 동기전동기 센서리스 제어 구동시스템을 제작하고 실험을 수행하였다.

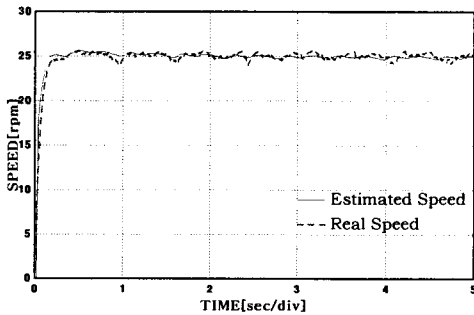


그림 3. 지령속도 25rpm인 경우의 속도응답 실험결과
그림 3과 그림 4는 무부하에서 지령속도가 각각 25, 100rpm인 경우의 실험 결과로서 시뮬레이션 결과와 같이 양호한 속도응답을 나타내고 있다.

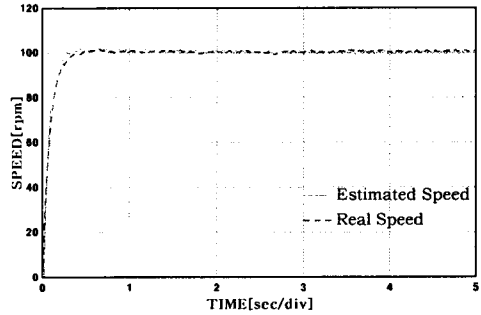


그림 4. 지령속도 100rpm인 경우의 속도응답 실험결과

5. 결 론

영구자석 동기전동기는 높은 전력밀도와 제어의 용이성으로 인하여 많은 산업현장과 가전기에 광범위하게 응용되고 있으며, 최근에는 경제성과 사용 환경에서의 문제점으로 인하여 위치 및 속도센서를 사용하지 않는 센서리스 방식의 연구가 많이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어 방식으로서 무효전력 보상을 이용하여 속도정보를 개선하는 방식을 연구한다. 본 방식은 축소 차수 상태관측기를 이용하여 자속을 추정하고 이 자속과 전류로부터 무효전력을 추정하며 추정된 무효전력과 실제 무효전력과 비교하여 속도를 보상하는 방식이다. 제시된 센서리스 제어방식을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증한 결과, 양호한 속도응답을 나타내었다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Wu and G. R. Slemon, "A Permanent Magnet Motor Drive Without a Shaft Sensor," IEEE IAS Annual Meeting, pp. 553-558, 1990.
- [2] N. Matsui and M. Shigo, "Brushless dc Motor Control Without Position and Speed Sensors," IEEE, IA-28, No. 1, pp. 120-127, 1992.
- [3] L. A. Jones and J. H. Lang, "A State Observer for the Permanent Magnet Synchronous Motor," IEEE IE-36, No. 3, pp. 374-382, 1989.
- [4] K. Tatematsu, D. Hamada, K. Uchida, S. Wakao and T. Onuki, "Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive with Reduced Order Observer," IEEE Proc APEC, Vol. 1, pp. 75-80, 1998.
- [5] H. W. Kim and S. K. Sul, "A New Motor Speed Estimator Using Kalman Filter in Low-Speed Range," IEEE IE-43, No. 4, pp. 498-504, 1996.
- [6] F. Parasiliti, R. Petrella and M. Tursini, "Sensorless Speed Control of a PM Synchronous Motor Based on Sliding Mode Observer and Extended Kalman Filter," IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 1, pp.533-540, 2001.
- [7] M. J. Corley and R. D. Lorentz, "Rotor Position and Velocity Estimation for a Salient pole Permanent Magnet Synchronous Machine at Standstill and High Speeds," IEEE IA-34, No. 4, pp.784-789, 1998.