

# 영구자석 동기 전동기의 제정수 오차가 센서리스 운전에 미치는 영향

박용순, 설승기

서울대학교 공과대학 전기·컴퓨터공학부

## Effects of Parameter-Errors on Sensorless Operation of PMSM

Yongsoon Park, Seung-Ki Sul

School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

본 논문에서는 영구자석 동기 전동기의 센서리스 운전 시 제정수 오차와 각 편차의 관계를 중심으로, 제정수 오차의 영향을 분석하였다. 각 오차 정보를 부호 요인과 이득 요인으로 나누어, 부호 요인으로 반영되는 제정수 중 인덕턴스와 저항의 오차가 추정 각의 실제 각에 대한 편차로 반영됨을 보였다.

### 1. 서론

최근 들어 공조기에 사용되는 압축기용 전동기로 효율 및 출력 밀도가 우수한 영구자석 동기 전동기가 주목을 받고 있다.<sup>[1]</sup> 이러한 응용분야에 있어 위치 센서의 동작 온도 제한 및 가격 부담을 이유로 위치 센서가 없는 센서리스 운전에 대한 관심이 커지고 있다. 압축기 구동용 전동기의 센서리스 운전에는 통상적으로 전압 방정식을 이용한 방법이 사용되는데, 이 경우 전압 방정식의 계수로 사용되는 전동기의 제정수를 정확히 알아야 한다.

다양한 운전 영역에서 변화하는 실제 제정수를 오차 없이 제어에 반영하는 것은 한계가 있으므로, 센서리스 제어에 사용되는 제정수에 오차가 있을 때 그 오차가 운전에 어떠한 영향을 미치는지 분석해야 할 필요가 있다.

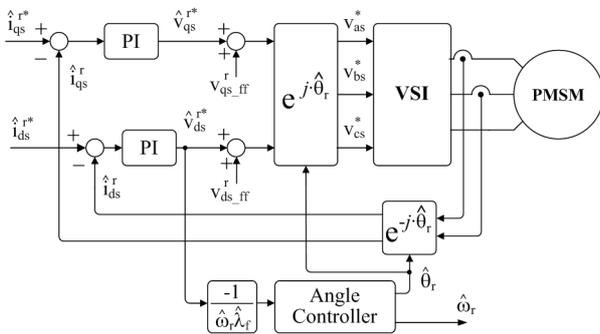


그림 1 제어기 출력을 이용한 센서리스 운전 기법

본 논문에서는 그림 1과 같이 d축 PI 제어기 출력을 이용한 센서리스 기법을 기준으로 분석한다.<sup>[2]</sup> d축 전향 보상에는 역기전력 성분 외에도, 저항에 의한 전압 강하 성분을 포함하였다. 본 논문에서는 각도 및 속도를 추정하는 부분을 각 제어기라 지칭한다.

### 2. 제정수 오차의 영향

#### 2.1 각 오차 정보

각 오차 정보는 그림 1의 각 제어기 입력으로, 그림 2와 같이 부호 요인과 이득 요인으로 나눌 수 있다.

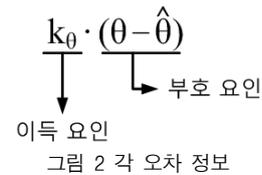


그림 2 각 오차 정보

이득 요인은 각 제어기의 추정 각 변화량에 영향을 주고, 부호 요인은 각도 추정의 여부 및 방향을 결정한다. 특히 부호 요인에 발생한 오차는 추가적인 각 추정을 유도하여 각 편차를 발생시킨다. 그림 1의 센서리스 기법에서 부호 요인은 d축 PI 제어기 출력으로 나타난다. 본 논문에서는 d축 PI 제어기 출력을 통해 각 편차로 반영되는 제정수 오차에 대해 분석하였다.

#### 2.2 제정수 오차와 각 편차

추정 속도와 실제 속도가 거의 일치한다고 가정할 때, 추정 회전자 좌표계의 전압 방정식은 식 (1)이 되고, 식을 간단히 표시하기 위하여 위해 식(1)을 식 (2)로 대신하였다. 식에서 각 오차  $\theta_d$ 는  $\theta - \hat{\theta}$ 이고, d-q의 인덕턴스 차이  $\Delta L$ 은  $L_d - L_q$ 이다.

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{ds}^r \\ \hat{V}_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s - \omega_r \Delta L \sin \theta_d \cos \theta_d & -\omega_r (L_q + \Delta L \sin^2 \theta_d) \\ \omega_r (L_q + \Delta L \cos^2 \theta_d) & R_s + \omega_r \Delta L \sin \theta_d \cos \theta_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds}^r \\ \hat{i}_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_q + \Delta L \cos^2 \theta_d & \Delta L \sin \theta_d \cos \theta_d \\ \Delta L \sin \theta_d \cos \theta_d & L_q + \Delta L \sin^2 \theta_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \hat{i}_{ds}^r \\ p \hat{i}_{qs}^r \end{bmatrix} + \omega_r \lambda_f \begin{bmatrix} -\sin \theta_d \\ \cos \theta_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{ds}^r \\ \hat{V}_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds}^r \\ \hat{i}_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \hat{i}_{ds}^r \\ p \hat{i}_{qs}^r \end{bmatrix} + \omega_r \lambda_f \begin{bmatrix} -\sin \theta_d \\ \cos \theta_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 d축의 전류 제어 블록 선도를 도시하면 그림 3과 같다.

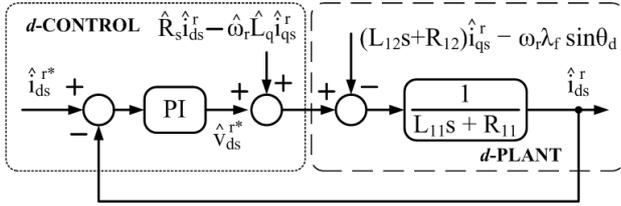


그림 3. 추정 d축 전류 제어

그림 1의 각 제어기는 각 오차 정보의 부호 요인인 d축 PI 제어기 출력이 0이 되도록 추정 각을 제어한다. 전류의 미분 성분을 무시할 때 그림 3의 관계로부터 d축 PI 제어기 출력을 구하여, 각 제어기의 입력은 식 (3)과 같이 표시 될 수 있다. 식 (3)에서 좌변이 0일 때, 각 편차가 충분히 작아  $\sin\theta_d \approx \theta_d$ 와  $\cos\theta_d \approx 1$ 가 성립한다고 가정하면, 각 편차에 대해 식 (4)가 성립한다.

$$-\frac{\hat{v}_{ds}^*}{\omega_r \hat{\lambda}_f} \approx \frac{\hat{R}_s - R_s + \omega_r \Delta L \sin\theta_d \cos\theta_d}{\omega_r \hat{\lambda}_f} \cdot \hat{i}_{ds}^* + \frac{L_q - \hat{L}_q + \Delta L \sin^2\theta_d}{\hat{\lambda}_f} \cdot \hat{i}_{qs}^* + \frac{\lambda_f}{\hat{\lambda}_f} \sin\theta_d \quad (3)$$

$$\theta_d \approx \frac{(\hat{L}_q - L_q) \cdot \hat{i}_{qs}^* - (\hat{R}_s - R_s) \cdot \hat{i}_{ds}^*}{\Delta L \cdot \hat{i}_{ds}^* + \lambda_f} \quad (4)$$

식 (4)에 의해 각 편차는 인덕턴스 오차와 저항 오차에 각각 비례하는 것을 알 수 있다. 식 (4)의 결과는 데드타임의 영향을 고려하지 않을 때, 역기전력 관측기를 이용한 센서리스 기법에서 분석된 각 편차에 대한 제정수의 영향과 일치한다.<sup>[3]</sup>

### 2.3 실험 결과

식 (4)의 경향성을 확인하기 위해 표면 부착형 영구자석 동기기를 시험 전동기로 사용하였다. 표면 부착형 영구자석 동기 기이므로, 식 (4)에서  $L_d = L_q = L_s$ 이고  $\Delta L = 0$ 이다. 그림 4는 d축 전류가 0이어서 저항 오차의 영향이 없을 때, 각 편차가 0인 인덕턴스를 기준으로 약 10%씩 인덕턴스를 변화시키면서 각 오차를 관찰한 결과이다.

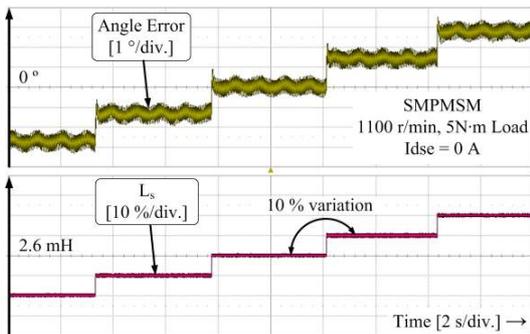


그림 4 인덕턴스 오차에 따른 각 편차

식 (4)에서 표시 된 바와 같이, 그림 4에 보인 실험 결과에서 인덕턴스 오차와 각 오차가 비례하는 관계를 확인할 수 있다. 그림 5는 인덕턴스 오차가 없고 d축 전류를 10A로 제어할 때, 각 편차가 0인 상 저항을 기준으로 약 20% 씩 저항을 변화시키며 각 오차를 관찰한 결과이다.

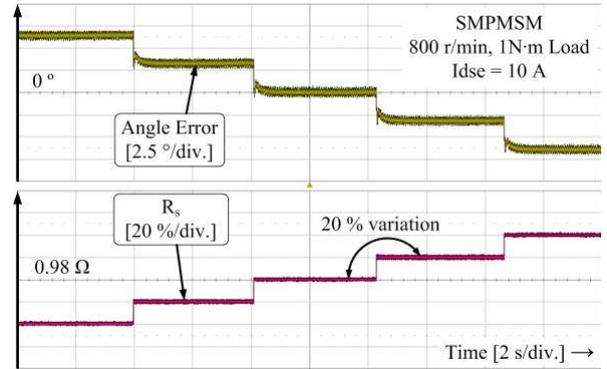


그림 5 저항 오차에 따른 각 편차

d축 전류가 양의 값일 때 식 (4)를 근거로 예상할 수 있듯이, 그림 5에서 상 저항 오차와 각 편차는 서로 음의 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있다.

그림 4와 그림 5의 실험 결과를 통해, 본 논문에서 분석한 식 (4)가 성립함을 확인하였다.

### 3. 결론

본 논문에서는 영구자석 동기 전동기의 센서리스 운전 시 전동기 제정수 오차가 각 편차에 미치는 영향을 수식으로 도출하였고, 실험을 통해 인덕턴스와 저항의 오차가 각 편차와 직접 비례하는 관계를 확인하였다. 따라서 센서리스 운전 중의 각 편차를 줄이기 위해서는, 인덕턴스와 저항을 보다 정확히 추정해야 함을 알 수 있으며 전동기 동작 상태에 따라 제정수가 변할 경우 실시간 추정이 필요함을 알 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] Hiroshi Murakami, Yukio Honda, et al, "The Performance Comparison of SPMSM, IPMSM, and SynRm in Use as Air-conditioning Compressor", in Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting, Oct. 1999, vol. 2, pp. 840-845.
- [2] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, et al, "Implementation of Sensorless Vector Control for Super-High-Speed PMSM of Turbo-Compressor", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 39, Issue 3, pp. 811-818, May/June 2003.
- [3] Yukinori Inoue, Koji Yamada, et al, "Accuracy Improvement of IPMSM Sensorless Drives with On-line Parameter Identification", in Conf. Rec. IEEE PCC, Nagoya, 2007, pp. 860-866.