

표면 부착형 영구자석 전동기의 역기전력 관측 오차 분석 및 센서리스 기동 전략

김재석, 설승기
서울대학교 전력전자 연구실

Analysis of Back-EMF Observation Error and Starting Strategy for Sensorless Drive of PMSM

Jae-Seok Kim, Seung-Ki Sul
Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 전동기의 역기전력을 이용한 센서리스 운전에서 제정수 오차 및 데드타임 등에 의한 입력 전압 오차에 따른 역기전력 관측오차를 분석 하였고 그 결과를 토대로 전동기의 센서리스 기동을 위한 전략을 제시 하였다. 고의적으로 저항을 작게 추정하면 기동 특성이 개선됨을 확인하였다.

1. 서론

전동기 모델을 기반으로 센서리스 운전 방법 중 하나로 역기전력 관측기를 이용한 방법이 여러 산업 분야에서 사용되고 있다. 역기전력 관측기는 전동기의 모델과 전압, 전류 정보를 이용하여 역기전력을 관측한다. 이렇게 관측된 역기전력을 기반으로 회전자 위치를 추정하여 센서리스 운전을 하게 된다. 하지만, 일반적으로 모델을 이용한 센서리스는 저항오차, 인덕턴스 오차, 데드타임에 의한 입력 전압오차 등에 의해 역기전력 관측 오차가 반드시 나타난다. 특히 저속에서의 역기전력은 그 크기가 작기 때문에 이러한 전동기 제정수 오차 및 입력 전압 오차에 의한 영향에 매우 민감하게 된다. 그렇기 때문에 역기전력 관측기를 이용한 전동기의 센서리스 기동은 매우 어려운 과제로 알려져 있다. 그래서 모델 기반 센서리스 운전의 기동은 개루프 제어를 이용하여 기동하게 되고, 그 이후 센서리스 운전으로 전환하게 된다.^[1]

본 논문에서는 전동기 제정수 오차 및 입력 전압 오차에 따른 역기전력 관측 오차가 어떻게 나타나는지 분석한다. 이를 기반으로 센서리스 기동에 유리한 조건을 찾은 후 실제 실험에 적용하여 기동성능이 개선됨을 검증한다.

2. 표면부착형 영구자석 전동기 모델^[2]

연속 시간 영역의 추정 각 동기 좌표계에서 표면부착형 영구자석 전동기의 모델은 다음과 같다.

$$\vec{v}_{\gamma\delta} = R_s \vec{i}_{\gamma\delta} + L_{\gamma\delta} \frac{d}{dt} \vec{i}_{\gamma\delta} + w_r \mathbf{J} L_{\gamma\delta} \vec{i}_{\gamma\delta} + \vec{E}_{\gamma\delta} \quad (2.1)$$

$$L_{\gamma\delta} = L_s \mathbf{1}, \mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

여기서 $\vec{i}_{\gamma\delta}$, $\vec{v}_{\gamma\delta}$, $\vec{E}_{\gamma\delta}$ 는 각각 동기 좌표계 전류벡터, 전압벡터, 역기전력 벡터를 의미한다. ω_r 은 회전자의 전기 각속도를 λ_f 는 영구자석의 고정자 쇄교 자속을 의미한다.

식 (2.1)을 이용하여 전동기 상태방정식을 표현하면 식 (2.3), (2.4)와 같다.

$$\dot{x}^T = \mathbf{A}^T x^T + \mathbf{B}^T u^T \quad (2.3)$$

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} -R_s / L_s \mathbf{I} - w_r \mathbf{J} & -1 / L_s \mathbf{I} \\ 0 & (w_r - w_f) \mathbf{J} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} 1 / L_s \mathbf{I} \\ 0 \end{bmatrix}, x^T = \begin{bmatrix} \vec{i}_{\gamma\delta} \\ \vec{E}_{\gamma\delta} \end{bmatrix}, u^T = \begin{bmatrix} \vec{v}_{\gamma\delta} \end{bmatrix}$$

3. 루엔버거 역기전력 관측기 설계^[3]

추정속도와 실제 속도의 차이가 크지 않다는 $w_r \approx w_f$ 의 가정을 이용하여 역기전력 관측기를 설계하면 다음과 같다.

$$\dot{x}^T = \mathbf{A}^T x^T + \mathbf{B}^T u^T + \hat{L}^T (y - \hat{y}) \quad (3.1)$$

$$\hat{\mathbf{A}}^T = \begin{bmatrix} -\hat{R}_s / \hat{L}_s \mathbf{I} - w_r \mathbf{J} & -1 / \hat{L}_s \mathbf{I} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{B}}^T = \begin{bmatrix} 1 / \hat{L}_s \mathbf{I} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [\mathbf{I} \quad 0] \quad (3.2)$$

$$\hat{L}^T = \begin{bmatrix} \left(-\frac{\hat{R}_s}{\hat{L}_s} + 2\zeta\omega_{bw} \right) \mathbf{I} + (-w_r) \mathbf{J} \\ -\omega_{bw}^2 \hat{L}_s \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

여기서 이득 행렬 \hat{L}^T 은 $(\hat{\mathbf{A}}^T - \hat{L}^T \mathbf{C})$ 의 고유값이 식 (3.4)의 값을 가지도록 설계 하였다.

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_{bw} + j\omega_{bw}\sqrt{1-\zeta^2}, \lambda_{3,4} = -\zeta\omega_{bw} - j\omega_{bw}\sqrt{1-\zeta^2} \quad (3.4)$$

4. 역기전력 관측기의 관측 오차 분석

식 (2.3)의 실제 시스템과 식 (3.1)의 관측기 시스템을 이용하여 오차 상태 방정식을 만들면 다음과 같다.

$$\dot{e}_{\gamma\delta} = \mathbf{A}^T x - \hat{\mathbf{A}}^T \hat{x} + \mathbf{B}^T u - \hat{\mathbf{B}}^T \hat{u} - \hat{L}^T C e_{\gamma\delta} \quad (4.1)$$

$$= (\hat{\mathbf{A}}^T - \hat{L}^T \mathbf{C}) e_{\gamma\delta} + \left\{ (\mathbf{A}^T - \hat{\mathbf{A}}^T) x + \mathbf{B}^T u - \hat{\mathbf{B}}^T \hat{u} \right\}$$

$$e_{\gamma\delta} \equiv x - \hat{x} = \begin{bmatrix} e_{i_{\gamma\delta}} \\ e_{E_{\gamma\delta}} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

식 (4.1)은 중괄호의 입력이 존재하는 오차 상태 방정식이라 할 수 있다. 이 상태 방정식의 시스템 행렬 $(\hat{\mathbf{A}}^T - \hat{L}^T \mathbf{C})$ 은 3장에서 설정했던 고유값에 따른 동특성을 보이게 되고, 중괄호 입력항의 동특성보다 오차 상태 방정식의 동특성이 빠르게 설계 되었다고 가정 한다면 정상상태에서의 관측 오차는 다음과 같다.

$$e_{\gamma\delta} = -(\hat{\mathbf{A}}^T - \mathbf{L}\mathbf{C})^{-1} \left\{ (\mathbf{A}^T - \hat{\mathbf{A}}^T) x + \mathbf{B}^T u - \hat{\mathbf{B}}^T \hat{u} \right\} \quad (4.3)$$

식 (4.3)을 이용하여 정상상태 관측 오차를 식 (2.3), (3.1)을 이용하여 나타나면 식 (4.4)와 같다.

$$e_{\gamma\delta} = \begin{bmatrix} e_{i_{\gamma\delta}} \\ e_{E_{\gamma\delta}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(w_r - w_f) / (\omega_{bw}^2 \hat{L}_s) \mathbf{J} \vec{E}_{\gamma\delta} \\ \hat{L}_s \vec{H} + 2\zeta (w_r - w_f) / \omega_{bw} \mathbf{J} \vec{E}_{\gamma\delta} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\vec{H} \equiv (-R_s / L_s + \hat{R}_s / \hat{L}_s) \vec{i}_{\gamma\delta} + (-1 / L_s + 1 / \hat{L}_s) \vec{E}_{\gamma\delta} + 1 / L_s \vec{v}_{\gamma\delta} - 1 / \hat{L}_s \vec{v}_{\gamma\delta} \quad (4.5)$$

여기서 \vec{H} 는 식 (4.5)와 같다.

만약 식 (4.5)의 가정이 성립 한다면 식 (4.4)는 식 (4.6)과 같이 간략히 표현 될 수 있다.

$$|\omega_{bw}| \approx |w_r - w_r^*| \quad (4.5)$$

$$e_{\gamma\delta} = \begin{bmatrix} e_{I\gamma\delta} \\ e_{E\gamma\delta} \end{bmatrix} \cong \begin{bmatrix} \vec{0} \\ \vec{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s \frac{\dot{I}_s}{L_s} + \dot{R}_s \vec{I}_s + \left(-\frac{\dot{L}_s}{L_s} + 1 \right) \vec{E}_{\gamma\delta} + \left(\frac{\dot{L}_s}{L_s} \vec{V}_{\gamma\delta} - \vec{V}_{\gamma\delta} \right) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

식 (4.6)에서 알 수 있듯이, 정상상태에서 전류상태 오차는 없으며 역기전력벡터 상태 오차만이 나타난다. 이 역기전력 상태 오차를 전동기 방정식 식 (2.1)을 이용하여 회전자 동기 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{e_{Edq}}{\|\vec{E}_{dq}\|} \cong \frac{(\hat{R}_s - R_s) \vec{I}_{dq} + \left(\frac{\dot{L}_s - L_s}{L_s} \right) \frac{d}{dt} \vec{I}_{dq} + \left(\frac{\dot{L}_s - L_s}{L_s} \right) \frac{w_r}{\lambda^{pm}} \vec{J}_{dq} + \frac{1}{|w_r| \lambda^{pm}} \Delta \vec{V}_{dq}}{\lambda^{pm}} \quad (4.7)$$

여기서 $\Delta \vec{V}_{dq} \equiv \vec{V}_{dq} - \vec{V}_{dq}^*$ 이다.

식 (4.7)은 역기전력 상태 오차를 현재 역기전력 벡터의 크기로 나누어 정규화 시킨 관측 오차를 나타낸다.

저속에서 가장 영향력 있는 항은 마지막 항인 입력 전압의 오차이며, 고속에서는 세번째 항인 인덕턴스 오차 이다.

5. 추정 저항을 이용한 기동 전략

역기전력을 이용한 센서리스 기동 시, 데드타임 등에 의한 입력 전압오차가 가장 크게 나타나며, 이 때문에 제정수를 아무리 잘 알고 있더라도 기동에 실패 할 수 있다.

하지만 식 (4.7)의 첫번째 항을 보면, 저항 오차에 따라 전류벡터가 역기전력 추정에 미치는 영향을 조정 할 수 있으며, 이 영향은 저속에서는 크게 작용하지만, 속도가 증가하면 감소하는 경향이 있다.

이를 이용하여 관측기가 알고 있는 저항을 추정 저항보다 의도적으로 작게 설정하면, 저속구간에는 관측한 역기전력이 전류벡터의 방향으로 보이며, 속도가 증가할수록, 이러한 영향은 작아져 모델에 기반한 페루프 센서리스 운전으로 자연스럽게 전환 될 수 있다.

특히 표면부착형 영구자석 전동기의 경우 역기전력 벡터와 전류벡터가 일치하도록 제어하기 때문에 위와 같은 전략은 매우 유효 할 것이다.

6. 실험 결과

실험에 사용한 인버터는 311V의 15kHz의 스위칭, 3μsec의 dead time을 가지고 있다. 이를 산술적으로 계산하면 입력 전압의 오차는 약 14V이며 이를 이겨내기 위한 저항 오차는 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\frac{\left| (\hat{R}_s - R_s) \right|}{|w_r| \lambda^{pm}} |I_q| \geq \frac{1}{|w_r| \lambda^{pm}} |\Delta \vec{V}_{dq}| \times k_1 \quad (6.1)$$

여기서 k_1 는 안전 계수이며 대략 1.5~3사이의 값을 사용한다. I_q 은 기동전류를 뜻하며 과도상태를 고려하여 최대 전류의 반을 사용한다. 저항오차의 상한은 식 (6.2)를 이용한다.

$$\frac{\left| (\hat{R}_s - R_s) \vec{I}_{dq} \right| - |\Delta \vec{V}_{dq}|}{|w_r| \lambda^{pm}} \leq k_2 \quad (6.2)$$

여기서 k_2 는 한계 허용 계수이며 역기전력 오차에 미치는 영향의 한계를 의미한다. 실험에는 4를 사용했으며 이 값은 시스템에 따라 변동 할 수 있다. w_r^* 는

속도 제어의 지령 속도 이다.

그림 6.1과 같은 제어 블록도에 따라 제어 했을 때, 추정 저항을 전동기 실제 저항보다 -2.25, -5.25, -8.25Ω 작게 설정했을 때 기동성능을 나타내었다. 그림 6.2 에서와 같이 식(6.1),(6.2)에서 제안한 범위의 의도적인 저항오차가 기동 성능을 항상 시킴을 확인 할 수 있다.

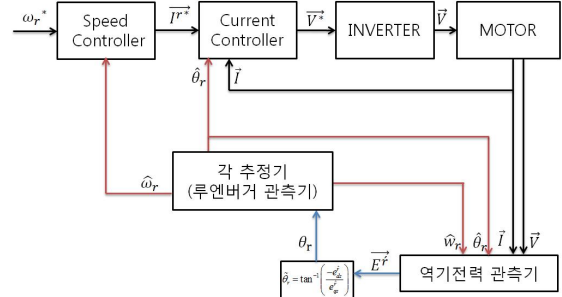


그림 6.1 센서리스 제어 블록도

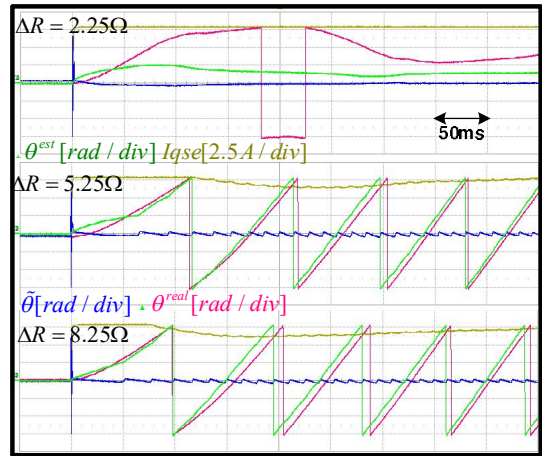


그림 6.2 의도적인 저항 오차를 준 기동 실험 파형

7. 결론

본 연구에서는 역기전력 관측기에 의한 센서리스 운전시 표면 부착형 영구자석 전동기의 역기전력 관측 오차를 분석하였다. 분석 결과 저속구간에는 입력 전압 오차의 영향이 가장 컸고, 고속에서는 인덕턴스 오차의 영향이 가장 컸다.

분석 결과를 토대로 의도적인 저항 오차가 기동에 도움이 될 수 있음을 발견하였고, 이를 실험을 통하여 증명하였다.

참고 문헌

- [1] P. Kshirsagar, R. P. Burgos, J. Jang, A. Lidozzi, F. Wang, D. Boroyevich, and S.-K. Sul, "Implementation and Sensorless Vector-Control Design and Tuning Strategy for SMPM Machines in Fan-Type Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 6, pp. 2402-2413, Nov. 2012.
- [2] S.-K. Sul, "Control of Electric Machine Drive Systems," WILEY, 2011
- [3] 장지훈, "영구자석 동기전동기 센서리스 제어의 운전 영역 확장에 관한 연구," 박사 학위 논문, 2005