

영구자석 동기전동기의 역기전력 기반 센서리스 알고리즘 분석

이광운*, 이용재**, 하정익**

*목포해양대학교, **서울대학교

Analysis of Sensorless Algorithms Based on EMF for PMSM

Kwang Woon Lee*, Yongjae Lee**, Jung Ik Ha**

*Mokpo National Maritime University, **Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 역기전력 기반 센서리스 알고리즘들에 대해 세부적인 구성을 살펴보고, 각각에 대해 전달함수를 구하여 주파수 응답을 분석함으로써 각 알고리즘들의 특성을 비교하고자 한다.

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 넓은 운전 영역에 걸쳐 높은 효율을 유지하고 출력 밀도가 높은 장점 때문에 산업용에서 가전에 이르기까지 널리 사용되어지고 있다. 영구자석 동기전동기의 구동을 위해서는 회전자 위치 정보가 필수적으로 요구되는데, 위치 센서의 사용은 비용 상승 및 신뢰성 저하의 원인이 된다. 이러한 문제를 해결할 목적으로 다양한 센서리스 제어 기법들이 제안되어 왔으며, 실제로도 다양한 분야에서 상용화 실적이 보고되고 있다.^[1-3] 본 논문에서는 역기전력에 기반한 센서리스 제어 알고리즘들의 구성을 살펴보고, 전달함수를 구하여 주파수 응답을 분석함으로써 산업계에서 센서리스 알고리즘을 선택하는 데 필요한 기준을 제시하고자 한다.

2. 역기전력 기반 센서리스 알고리즘

역기전력 기반 센서리스 알고리즘의 일반적인 구성은 그림 1과 같다. 인버터의 지령 전압(v^*), 상전류(i) 및 영구자석 동기전동기의 수학적 모델을 이용하여 추정된 역기전력(\hat{e})을 이용하여 회전자 위치($\hat{\theta}_r$) 및 각속도($\hat{\omega}_r$)를 추정한다.

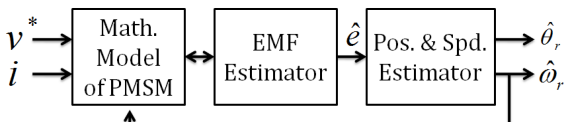


그림 1 역기전력 기반 센서리스 알고리즘들의 일반적 구성
Fig. 1 General configuration of sensorless algorithms based on EMF

2.1 영구자석 동기전동기의 수학적 모델

확장 유기전력(Extended EMF)을 이용하면 매입형 영구자석 동기전동기의 경우 수학적 모델 간략화를 위해 일부 모델 변수들의 영향을 무시할 필요가 없어지기 때문에 최근에는 확장 유

기전력 기반의 영구자석 동기전동기 수학적 모델이 주로 사용되고 있다. 확장 유기전력(E_{ex})을 이용한 영구자석 동기전동기의 정지 및 가상의 회전 좌표계 수학적 모델은 다음과 같다.

$$E_{ex} = \omega_r [(L_d - L_q)i_d + \lambda_{PM}] - (L_d - L_q)p i_q \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & \omega_r(L_d - L_q) \\ -\omega_r(L_d - L_q) & R + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin\theta_r \\ \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_q & R + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix} + (\hat{\omega}_r - \omega_r)L_d \begin{bmatrix} -i_\delta \\ i_\gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

정지 좌표계 모델의 경우 수학적 모델에서 회전자 위치(θ_r)가 포함된 확장 유기전력을 구하고, 가상의 회전 좌표계에서는 수학적 모델로부터 위치 오차($\Delta\theta = \theta_r - \hat{\theta}_r$)가 포함된 확장 유기전력을 구하게 된다. 정지 좌표계 모델에는 회전자의 추정 각속도와 실제 각속도의 오차 항이 포함되지 않기 때문에 인버터의 비선형 오차가 적절히 보상될 경우 과도 상태에서 추정 각속도의 오차에 의한 영향을 받지 않는 장점이 있으나, 교류를 추정해야 하므로 고속 운전영역에서 확장 유기전력의 추정 성능이 저하될 수 있다.

2.2 역기전력의 추정

본 논문에서는 PI state filter, 외란 관측기 및 최소차원 관측기를 이용한 역기전력 추정기에 대해 분석하였다.

2.2.1 PI State Filter를 이용한 역기전력 추정^[1]

가상의 회전 좌표계에서 PI state filter를 이용한 역기전력 추정기의 구성은 그림 2와 같다.

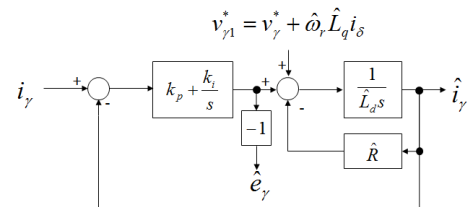


그림 2 PI state filter를 이용한 역기전력 추정
Fig. 2 EMF estimation using PI state filter

역기전력 추정을 위한 이득을 다음과 같이 설정하면

$$k_p = L_d \omega_c, k_i = R \omega_c \quad (4)$$

실제 역기전력과 추정 역기전력의 관계는 식 (5)와 같다.

$$\hat{e}_r = \frac{\omega_{\alpha}(\hat{L}_d s + \hat{R})}{(s + \omega_{\alpha})(L_d s + R)} e_r + \frac{\omega_{\alpha}}{s + \omega_{\alpha}} \left(\frac{(L_d - \hat{L}_d)s + (R - \hat{R})}{L_d s + R} v_{\gamma 1} + \Delta v \right) \quad (5)$$

식 (5)에서 $\Delta v = v_{\gamma 1}^* - v_{\gamma 1}$ 으로 γ 축에서 지령 전압과 실제 전압의 오차를 의미한다. 식 (5)로부터 전동기 제정수 오차 추정 역기전력과 실제 역기전력(\hat{e}_r/e_r), 추정 역기전력과 γ 축 전압($\hat{e}_r/v_{\gamma 1}$)의 전달함수에 미치는 영향을 살펴보기 위해 아래의 조건에 대해 보드선도를 그리면 그림 3과 같다. 그림 3으로부터 추정 역기전력은 인덕턴스 오차보다는 저항 오차의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 또한, 식 (5)로부터 인버터의 비선형성, 제정수 오차 및 각속도 추정 오차에 의한 Δv 의 영향은 1차 저역통과필터에 의해 저감되나, 낮은 주파수 영역에서는 추정 역기전력에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

$\omega_{\alpha} = 628$

black : $R = \hat{R} = 4.2, L_d = \hat{L}_d = 0.069$

blue : $R = 4.2, \hat{R} = R/1.5, L_d = \hat{L}_d = 0.069$

red : $R = \hat{R} = 4.2, L_d = 0.069, \hat{L}_d = L_d/0.9$

green : $R = 4.2, \hat{R} = R/1.5, L_d = 0.069, \hat{L}_d = L_d/0.9$

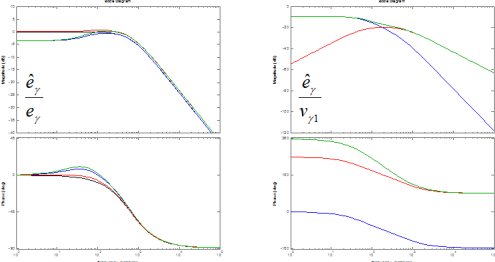


그림 3 PI state filter를 이용한 역기전력 추정기 보드선도
Fig. 3 Bode plot of EMF estimator using PI state filter

2.2.2 외란 관측기를 이용한 역기전력 추정^[2]

그림 4는 회전 좌표계에서 외란 관측기를 이용하여 역기전력을 추정하는 경우로, 전달함수를 구하면 식 (5)와 동일한 형태로 나온다. 따라서 역기전력 추정을 위한 저역통과필터의 대역폭(g_{γ})은 PI state filter의 역기전력 추정을 위한 대역폭(ω_{α}) 설정과 동일한 기준으로 설정할 수 있다.

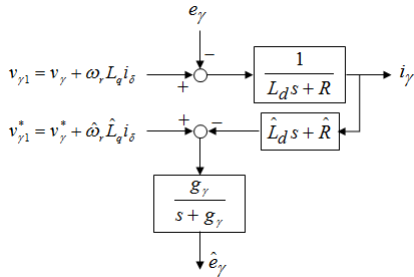


그림 4 외란 관측기를 이용한 역기전력 추정
Fig. 4 EMF estimation using disturbance observer

2.2.3 최소차원 관측기를 이용한 역기전력 추정

회전좌표계에서 최소차원 관측기를 이용한 역기전력 추정기는 그림 5와 같다. 추정기의 이득 L_1 을 $-L_d\omega_{\alpha}$ 로 설정하면 전달함수는 식 (5)와 같다.

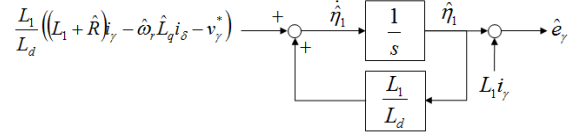


그림 5 최소차원 관측기를 이용한 역기전력 추정
Fig. 5 EMF estimation using least-order observer

2.3 회전자 위치 및 각속도의 추정

추정된 역기전력으로부터 구한 회전자 위치(θ_r) 또는 위치 오차($\Delta\theta$)에 대해 전차원 관측기 또는 PLL 방식의 추정기를 이용하여 회전자 위치 및 각속도를 추정할 수 있다.^[3] 전차원 관측기의 경우 정확한 관성 및 토크 값을 이용하면 PLL 방식 대비 회전자 위치 및 각속도 추정 성능이 우수하다. PLL 방식의 경우 관성 및 토크 값을 필요로 하지 않기 때문에 전동기의 전기 및 기계 제정수를 정확히 알 수 없는 경우에 적합하며, 그림 6에 보인 바와 같이 추정기의 차수를 증가시켜 과도 응답 특성을 개선할 수 있다.^[2]

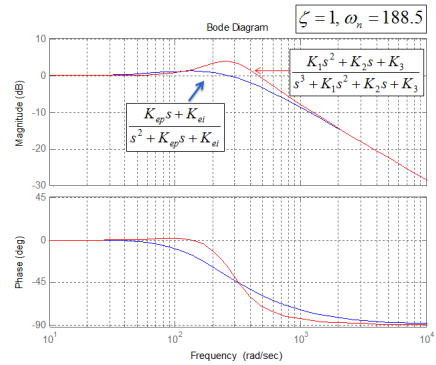


그림 6 PLL 방식 위치 및 속도 추정기의 보드선도
Fig. 6 Bode plot of position & speed estimator using PLL

3. 결론

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 역기전력 기반 센서리스 알고리즘 분석을 통해서 데드타임 등의 전압 오차가 적절히 보상될 경우 정지 좌표계 모델을 사용하면 저속 운전 영역의 과도 상태에서 회전자 위치 정보를 포함하는 역기전력을 보다 정확히 추정할 수 있으며, 역기전력 추정기는 상대적으로 저항의 제정수 오차에 민감함을 확인하였다. 또한, 전차원 관측기 및 PLL 방식의 속도 및 위치 추정 방식을 비교하여 각각의 특성을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] H. Kim, M.C Harke, R.D. Lorenz, "Sensorless Control of Interior Permanent Magnet Machine Drives With Zero Phase Lag Position Estimation," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 39, pp. 1726-1733, Nov./Dec. 2003.
- [2] Shigeo Morimoto, Keisuke Kawamoto, Masayuki Sanada, and Yoji Takeda, "Sensorless Control Strategy for Salient Pole PMSM Based on Extended EMF in Rotating Reference Frame," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 38, no.4, pp. 1054-1061, July/Aug. 2002.
- [3] 설승기, 전기기기 제어론, 브레인코리아, 2002.