

상태 관측기 기반 비선형 동기기의 고정자 쇄교자속 추정

Stator Flux Linkage Estimation of Nonlinear Synchronous Machines Based on the State Observer

○장 승 훈¹, 최 경 환^{1*}

¹광주과학기술원 기계공학부 (TEL: 062-715-3249; E-mail: shjang7071@gm.gist.ac.kr, khchoi@gist.ac.kr)

Abstract This paper presents a stator flux linkage estimation from the integration result of the stator flux linkage dynamics described in the stationary frame for nonlinear synchronous machines (SMs). The key idea is to estimate the integration error and rotating flux linkages including nonlinearity using the linear state observer and to subtract the estimated integration error from the integration result. The proposed method is validated by MATLAB simulation results obtained using a 35-kW SM drive.

Keywords Nonlinear synchronous machines, stator flux linkage, state observer

1. 서론

동기기(Synchronous Machines)를 모델예측제어 기법과 같은 모델기반 최적제어하기 위해서는 동기기의 전기적 매개변수에 대한 정확한 정보가 필요하다. 일반적으로 동기기의 매개변수는 각 운전점마다 실험을 통하여 얻지만 동기기의 제조 공차 및 노화로 인한 영향들이 매개변수에 변동을 발생시키기 때문에 실시간 추정 기법이 필요하다.

본 논문에서 동기기의 고정자 쇄교자속을 실시간으로 추정하는 방법을 제시한다. 제안하는 방법은 정지 좌표계(α - β 축)에서 고정자 쇄교자속 동역학식을 적분할 때 발생하는 적분 오차와 비선형 쇄교자속을 선형 상태 관측기로 추정하고, 적분 값에서 추정된 오차를 보상하여 쇄교자속을 추정한다. 제안된 추정 방법은 MATLAB/Simulink의 35kW IPMSM Drive 모델을 사용한 시뮬레이션으로 타당성을 검증한다.

2. 쇄교자속 추정 모델

2.1 동기기 모델

정지좌표계에서 동기기 고정자 쇄교자속의 동역학은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \lambda_{\alpha\beta} = \mathbf{v}_{\alpha\beta} - \mathbf{R}_s \mathbf{i}_{\alpha\beta}, \quad (1)$$

여기서 $\lambda_{\alpha\beta} := [v_\alpha \ v_\beta]^T$, $\mathbf{v}_{\alpha\beta} := [v_\alpha \ v_\beta]^T$, $\mathbf{i}_{\alpha\beta} := [i_\alpha \ i_\beta]^T$ 는 각각 고정자 쇄교자속, 전압과 전류벡터이며, \mathbf{R}_s 는 고정자 저항을 나타낸다. 식 (1)을 간단히 시간에 대하여 적분을 하여 정리하면 식 (2)와 같게 된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{\alpha\beta, \text{int}} &= \int (\mathbf{v}_{\alpha\beta} - \mathbf{R}_s \mathbf{i}_{\alpha\beta}) dt + \lambda_{\alpha\beta}(0) \\ &= \lambda_{\alpha\beta} + \mathbf{O}_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{O}_{\alpha\beta} := [O_\alpha \ O_\beta]^T$ 는 입력과 초기 오차에 의해 누적된 적분 오차 [1] 벡터를 나타낸다. 만약 적분 오차를 적분 오차가 포함된 쇄교자속벡터 $\lambda_{\alpha\beta, \text{int}}$ 에서 보상해 준다면 실제 쇄교자속을 추정할 수 있게 된다.

2.2 쇄교자속 추정 모델

동기기의 d - q 좌표계에서의 고정자 쇄교자속 λ_d, λ_q 는 일반적으로 d, q 축 정적 인덕턴스(static inductance) L_d, L_q 와 d, q 축 고정자 전류 i_d, i_q 를 사용하여 표현되며, 여기서 전류에 대한 비례상수를 L_q 로만 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= L_q \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_d - L_q) i_d + \Psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 Ψ_m 는 영구자석의 쇄교자속, $\Delta\lambda_d$ 는 L_q 기반 쇄교자속 모델에 의해 발생하는 d 축의 비선형 쇄교자속을 의미한다. 식 (3)을 정지 좌표계로 변환하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_{\alpha\beta} = L_q \mathbf{i}_{\alpha\beta} + \mathbf{R}^{-1}(\theta) \Delta\lambda_d \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{R}(\theta) := [\cos(\theta), \sin(\theta); -\sin(\theta), \cos(\theta)]$ 는 회전 행렬을 나타낸다. 따라서 식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda_{\alpha\beta,\text{int}} = \hat{L}_q \mathbf{i}_{\alpha\beta} + \underbrace{\mathbf{R}(\theta)\Delta\lambda_d + (L_q - \hat{L}_q)\mathbf{i}_{\alpha\beta}}_{:=\Delta\lambda_{\alpha\beta}} + \mathbf{O}_{\alpha\beta} \quad (5)$$

\hat{L}_q 는 공칭 인덕턴스이며, $\Delta\lambda_{\alpha\beta}$ 는 회전하는 비선형 쇄교 자속 벡터를 나타내며 $\Delta\lambda_{\alpha\beta}, \mathbf{O}_{\alpha\beta}$ 들을 상태들로 정의하고 각각의 동역학과 출력을 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\Delta\lambda_{\alpha\beta} = \omega_r \mathbf{J}\Delta\lambda_{\alpha\beta} + \mathbf{d}_\lambda \\ \frac{d}{dt}\mathbf{O}_{\alpha\beta} = \mathbf{d}_0 \\ \lambda_{\alpha\beta,\text{int}} = \hat{L}_q \mathbf{i}_{\alpha\beta} + \Delta\lambda_{\alpha\beta} + \mathbf{O}_{\alpha\beta} \end{cases} \quad (6)$$

$\mathbf{J} := [0, -1; 1, 0]^T$, $\mathbf{d}_\lambda := [d_{\lambda\alpha} \ d_{\lambda\beta}]^T$, $\mathbf{d}_0 := [d_{0\alpha} \ d_{0\beta}]^T$ 는 각각 $\Delta\lambda_{\alpha\beta}$ 의 잔차항과 과도 상태에서 적분 오차에 발생하는 외란 벡터들이며, 모두 정상 상태에서 0이 된다.

3. 상태 관측기 설계

식 (6)을 상태 공간 모델 식으로 표현하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\mathbf{x} = \mathbf{A}(\omega_r)\mathbf{x} + \mathbf{d} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \Psi\theta \end{cases}, \quad (7)$$

$$\left(\begin{array}{l} \mathbf{A}(\omega_r) := \begin{bmatrix} \omega_r \mathbf{J} & \mathbf{O}_2 \\ \mathbf{O}_2 & \mathbf{O}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{C} := [\mathbf{I}_2 \ \mathbf{I}_2], \mathbf{x} := [\Delta\lambda_{\alpha\beta} \ \mathbf{O}_{\alpha\beta}]^T \\ \mathbf{y} := \lambda_{\alpha\beta,\text{int}}, \Psi := \mathbf{i}_{\alpha\beta}, \theta := \hat{L}_q, \mathbf{d} := [\mathbf{d}_\lambda \ \mathbf{d}_0]^T \end{array} \right)$$

여기서 $\mathbf{A}(\omega_r), \mathbf{C}$ 는 각각 시스템과 출력 행렬 나타내며, 가관측성 행렬 ($\mathbf{A}(\omega_r), \mathbf{C}$)의 랭크와 상태들의 수가 같으므로 모든 상태들을 관측할 수 있다. 따라서 상태들을 추정하기 위한 선형 관측기를 설계하면 아래와 같다.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\omega_r)\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{F}(\mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} - \Psi\theta) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} + \Psi\theta \end{cases} \quad (8)$$

여기서 $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{y}}$ 는 각각 상태와 출력의 추정치, $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{4 \times 2}$ 는 관측기의 이득 행렬을 나타낸다. 추정 오차를 $\tilde{\mathbf{x}} := \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ 로 정의하고 식 (7)에서 식(8)을 빼면 추정오차 동역학 식 (9)를 얻게 된다.

$$\frac{d}{dt}\tilde{\mathbf{x}} = [\mathbf{A}(\omega_r) - \mathbf{F}\mathbf{C}]\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{d} \quad (9)$$

여기서 \mathbf{d} 는 정상상태에 0이 되므로 $\mathbf{A}(\omega_r) - \mathbf{F}\mathbf{C}$ 행렬을 Hurwitz 하게 하는 \mathbf{F} 를 선정한다면, 추정오차는 지수적, 점근적으로 0에 수렴하게 된다. 최종으로, $\lambda_{\alpha\beta,\text{int}}$ 에 식 (9)에서 추정한 적분 오차 $\hat{\mathbf{d}}_{\alpha\beta}$ 를 보상하여 d - q 축 좌표계로 회전변환 해주면 식 (10)과 같아진다.

$$\hat{\lambda}_{dq} = \mathbf{R}(\theta)(\mathbf{y} - \mathbf{C}_1\hat{\mathbf{x}}), \mathbf{C}_1 := [\mathbf{O}_2 \ \mathbf{I}_2]. \quad (10)$$

4. 시뮬레이션 검증

본 논문에서 제안하는 방법을 검증하기 위해 MATLAB Simulink 에서 제공하는 FEM 해석 기반 35kW

IPMSM 시뮬레이션을 사용하였으며 사양 및 매개 변수는 표 1 과 같다. IPMSM 의 기계 각속도는 부하에 의해 500 RPM 으로 유지되며, 180 Nm 에 해당하는 토크는 MTPA 알고리즘 [2]에 의해 전류지령으로 변환되어 샘플링 주기가 40kHz 인 FCS-MPC 전류제어기로 추종한다.

표 1. IPMSM 사양.

Base Speed	DC voltage	Torque
2000 [RPM]	325 [V]	180 [Nm]
Stator current	Pole pairs (P)	Stator resistance (R_s)
350 [A]	8	10.9 [mΩ]

그림 1 은 정지, 회전 좌표계에서 각각 쇄교자속 추정 결과와 실제 자속과의 비교를 보여준다. 그림 1(a)는 적분 오차를 보상하지 않아 모든 좌표계에서 추정 오차를 가지고 있다. 반면에 그림 1(b)은 적분 오차를 실시간으로 보상해 주면서 추정치가 실제 값과 같아지도록 추정하고 있다.

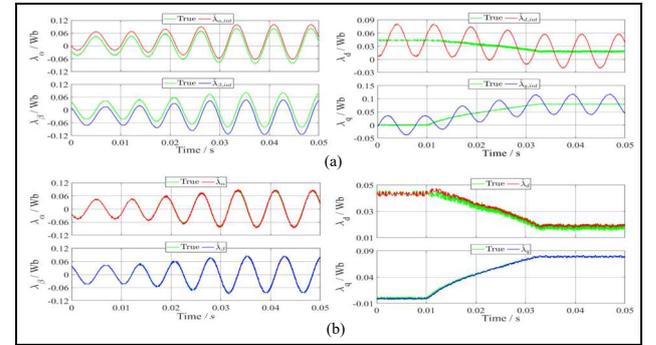


그림 1. 정지, 회전 좌표계에서의 고정자 쇄교 자속 추정치 (a) 적분 오차 포함 (b) 적분 오차 보상

5. 결론

본 논문은 정지 좌표계에서 고정자 쇄교자속식을 적분할 때 발생하는 적분 오차와 회전하는 비선형 자속들을 상태 관측기를 통해 추정하고 적분 값에서 적분 오차를 보상하여 정확한 고정자 쇄교 자속을 추정할 수 있는 방법을 제안하며, Matlab/Simulink 35kW IPMSM 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법의 타당성을 입증하였다.

참고문헌

- [1] Jang, Seunghoon, and Kyunghwan Choi. "Stator Flux Linkage Estimation of Synchronous Machines Based on Integration Error Estimation for Improved Transient Performance." *2023 62nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. IEEE, 2023.
- [2] Choi, Kyunghwan, et al. "Real-time optimal torque control of interior permanent magnet synchronous motors based on a numerical optimization technique." *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 29.4 (2020): 1815-1822.