

적분 오차 추정 기반 동기 전동기의 쇄교 자속 추정 기법

Stator Flux Linkage Estimation Method of Synchronous Machines Based on Integration Error Estimation

○장 승 훈¹, 최 경 환^{2*}

¹광주과학기술원 기계공학부 (TEL: 02-000-0000; E-mail: shjang7071@gm.gist.ac.kr)

²광주과학기술원 기계공학부 (TEL: 062-715-2413, E-mail:khchoi@gist.ac.kr)

Abstract This paper presents a stator flux linkage estimation method for synchronous machines (SMs) using a finite control set model predictive control (FCS-MPC). The key idea is that the integration error in a circular motion in the stationary frame is estimated and leverages the stator flux linkages by subtracting the estimation of the integration error from the integration result. The integration error can be directly calculated by this motion equation in the time domain. The proposed method is verified through MATLAB simulation results obtained using a 35-kW SM drive.

Keywords Integration error, Stator flux linkage estimation, Synchronous machines (SMs)

1. 서론

유한 제어 요소 모델 예측 제어(FCS-MPC) 기법으로 동기 전동기를 제어하기 위해서 정확한 고정자 쇄교 자속의 데이터가 필요하다. 하지만 센서를 통해 자속을 측정하기 매우 어렵기 때문에 실험을 통해 자속 정보를 구하거나 자속을 추정하여 사용한다. 자속 추정 방법으로 SM의 전기적 동특성을 나타내는 미분방정식을 적분하고, High-pass filter를 추가하여 적분 오차를 제거하는 방식을 사용한다 [1]. 하지만 다른 주파수 응답에서 추정값의 크기와 위상에 왜곡을 발생시켜 FCS-MPC의 제어 성능을 낮추게 된다.

본 논문에서 FCS-MPC 방식을 이용하여 시간 영역에서 실시간으로 고정자 쇄교 자속을 추정하는 방법을 제시한다. 제안하는 방법은 α - β 평면에 원운동 하는 자속의 적분 오차를 시간 영역에서 추정하고, 적분 값에서 오차를 보상하여 자속을 추정한다. 제안된 추정 방법은 Matlab/Simulink 35kW PMSM을 사용하여 시뮬레이션으로 타당성을 검증했다.

2. 자속 추정 모델

2.1 SM 모델

정지 좌표계 (α - β 축)에 대한 SM의 전기적 동특성을 나타내는 모델은 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{\lambda}_\alpha(t) &= -R_s i_\alpha(t) + u_\alpha(t) \\ \dot{\lambda}_\beta(t) &= -R_s i_\beta(t) + u_\beta(t)\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 R_s 는 고정자 권선의 저항을 나타내며, $\lambda_{\alpha(\beta)}(t)$, $i_{\alpha(\beta)}(t)$, $u_{\alpha(\beta)}(t)$ 는 각각 α, β 축 고정자 쇄교 자속, 전류, 입력 전압을 나타낸다.

2.2 고정자 쇄교 자속 추정

고정자 쇄교 자속은 식(1)을 적분하여 얻을 수 있으며 정리하면 식(2)와 같다.

$$\lambda_\alpha(t) = \int_0^t (u_\alpha(\tau) - R_s i_\alpha(\tau)) d\tau + \lambda_\alpha(0) \quad (2)$$

$$\lambda_\beta(t) = \int_0^t (u_\beta(\tau) - R_s i_\beta(\tau)) d\tau + \lambda_\beta(0)$$

$u_{\alpha(\beta)}(t)$, $\lambda_{\alpha(\beta)}(0)$ 는 측정 되는 값이 아니기 때문에 추정값으로 사용되며, 식(2)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{\lambda}_{\alpha,i}(t) = \int_0^t (\hat{u}_\alpha(\tau) - R_s i_\alpha(\tau)) d\tau + \hat{\lambda}_\alpha(0) \quad (3)$$

$$\hat{\lambda}_{\beta,i}(t) = \int_0^t (\hat{u}_\beta(\tau) - R_s i_\beta(\tau)) d\tau + \hat{\lambda}_\beta(0)$$

$\hat{u}_{\alpha(\beta)}(t)$ 는 FCS-MPC에서의 비용함수를 최소화하는 스위칭 상태이며, 인버터의 제어 입력이다. $\hat{\lambda}_{\alpha(\beta)}(0)$ 는 고정자 쇄교 자속의 초깃값이고 추정값이다.

3. 제안하는 고정자 쇄교 자속 추정 기법

α - β 평면에서 고정자 쇄교 자속 $\lambda_{\alpha\beta}(t)$ 는 원운동하므로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\lambda}_\alpha(t) \\ \dot{\lambda}_\beta(t) \end{bmatrix} &= \mathbf{W}_r \times \begin{bmatrix} \lambda_\alpha(t) \\ \lambda_\beta(t) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\omega_r \lambda_\beta(t) \\ \omega_r \lambda_\alpha(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{W}_r 는 크기가 ω_r 인 벡터이며, 정지 좌표계에 대해 수직인 방향을 갖는다. 식(4)를 이산 시간에 대하여 나타내어 적분 오차 추정값을 나타내면 식(5)와 같게 된다.

$$\begin{aligned} \hat{O}_\alpha[k] &= \hat{\lambda}_{\alpha,i}[k] - \frac{\hat{\lambda}_{\beta,i}[k] - \hat{\lambda}_{\beta,i}[k-1]}{\omega_r T_s} \\ \hat{O}_\beta[k] &= \hat{\lambda}_{\beta,i}[k] - \frac{\hat{\lambda}_{\alpha,i}[k] - \hat{\lambda}_{\alpha,i}[k-1]}{\omega_r T_s} \end{aligned} \quad (5)$$

$\hat{O}_\alpha[k], \hat{O}_\beta[k]$ 는 적분 오차 추정값이며 T_s 는 샘플링 주기이다. 식(5)의 노이즈 성분을 제거하기 위해 필터링하여 고정자 쇄교 자속 추정 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_\alpha[k] &= \hat{\lambda}_{\alpha,i}[k] - \hat{O}_{\alpha,LPF}[k] \\ \hat{\lambda}_\beta[k] &= \hat{\lambda}_{\beta,i}[k] - \hat{O}_{\beta,LPF}[k] \end{aligned} \quad (6)$$

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는 자속 추정 기법은 MATLAB Simulink를 사용하여 35kW SM (PMSM)에서 검증하였다. PMSM의 사양 및 매개 변수는 표 1과 같다.

SM의 기계 각속도가 500 RPM으로 제어되도록 PI 속도제어기를 설계하고, 샘플링 주기가 40 kHz인 FCS-MPC 전류제어기에 MTPA 알고리즘을 적용하면 180 Nm에 해당되는 전류 지령이 결정된다 [2].

Base Speed	2000 [RPM]
Maximum torque	180 [Nm]
DC-link voltage	325 [V]
Maximum stator current	350 [A]
Sampling time(T_s)	25 [μ s]
Number of pole pairs (P)	8
Stator resistance (R_s)	10.9 [$m\Omega$]

표 1 PMSM 모델 사양

그림 1은 정지 좌표계에서 PMSM의 실제 고정자 쇄교 자속과 추정한 자속을 나타낸다. 원운동 식으로 적분 오차를 실시간으로 보상해준 결과에서 실제 값에 가깝게 자속을 추정한다는 것을 알 수 있다.

그림 2는 정지 좌표계에서 PMSM 적분 오차 추정값과 회전 좌표계에서의 고정자 쇄교 자속 추정값을 나타낸다. 적분 오차를 실제 오차와 같도록 추정하고 오차를 보상해준다면 회전 좌표계로 변환 시에

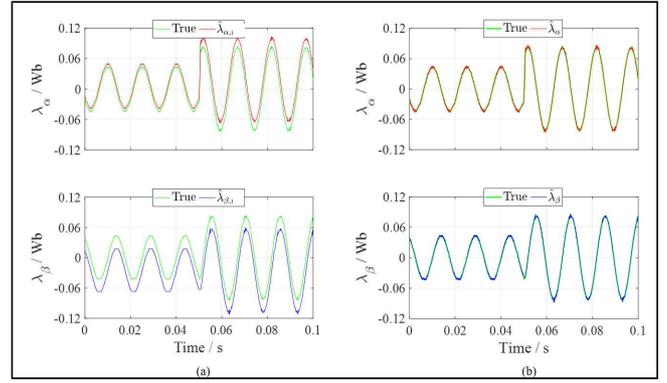


그림 1. α - β 축 고정자 쇄교 자속 (a) 적분 오차를 포함한 추정값 (b) 적분 오차를 보정한 추정값

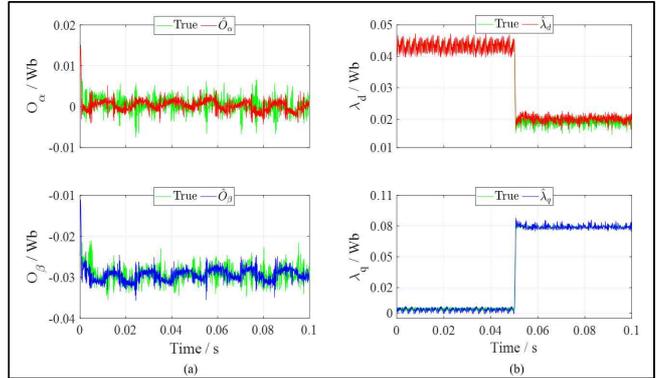


그림 2. (a) α - β 축 고정자 쇄교 자속 적분 오차 추정값 (b) d - q 축 고정자 쇄교 자속 추정값

실제 자속과 일치하게 추정한다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 α - β 평면에서 원운동 하는 자속의 추정값에 존재하는 적분 오차를 추정하고, 자속 적분값에서 오차를 보상하여 고정자 쇄교 자속을 추정하는 방법을 제안한다. 추정된 자속은 실제 자속 데이터와 근사하다는 것을 Matlab/Simulink 35kW PMSM을 사용하여 시뮬레이션을 통해 검증했다.

참고문헌

- [1] M. Hinkkanen and J. Luomi, "Modified integrator for voltage model flux estimation of induction motors," IEEE Transactions on Power
- [2] K. Choi, Y. Kim, K.-S. Kim, and S.-K. Kim, "Real-time optimal torque control of interior permanent magnet synchronous motors based on a numerical optimization technique," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 29, no. 4, pp. 1815-1822, 2020.