

회전자 시정수 오차에 강인한 유도전동기의 센서리스 운전을 위한 전차원 관측기 설계

유지원, 이주현, 설승기
서울대학교

Design of Full-Order Flux Observer for Sensorless Control of Induction Motor Robust to Rotor Time Constant Variation

Ji-Won Yoo, Joohyun Lee, Seung-Ki Sul
Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 유도전동기의 회전자 시정수 오차에 강인한 센서리스 전차원(Full-Order) 자속(Flux) 관측기(Observer)를 제안하였다. 이 관측기는 고정자 자속과 회전자 자속을 동기좌표계상에서 추정한다. 고정자 자속에서 누설 자속을 뺀 공극 자속을 기준으로 제어를 수행하며, 동기좌표계가 공극 자속을 빠르게 따라갈 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 적용할 때, 기존의 회전자 자속을 직접 이용하는 방법보다 중-고속 영역에서 회전자 시정수 오차의 영향이 감소함을 확인하였다. 또한 기존 관측기와 달리 제안된 관측기에서 적응제어기(Adaptive Controller)는 전동기의 회전 주파수가 아닌, 전동기의 슬립 주파수만을 추정하므로, 회전자 자속 오차에 민감한 적응제어기의 역할을 축소하였다. 시뮬레이션 및 실험으로 이론의 타당성 및 효과를 검증하였다.

1. 서론

속도 검출 센서가 없는 유도전동기의 벡터 제어는 기계적으로 강인한 구조와 범용성으로 인해 오늘날 널리 사용되고 있다. 일반적으로 유도전동기의 센서리스 벡터제어를 위해서는 전류와 회전자 자속을 추정하는 적응제어 상태 관측기가 널리 사용되어왔다.^[1] 하지만, 전동기의 회전 속도 추정을 위해 상태관측기의 비선형적 특성을 이용하므로, 전 운전영역에서 안정적인 이득을 구하기가 쉽지 않다는 문제가 있다.

한편, 제어에 사용되는 전동기의 제정수(Parameters)에 오차가 있을 경우, 자속의 추정 값에도 영향을 끼치게 된다. 자속 추정 방법은 추정에 사용하는 제정수에 따라, 고정자 저항 및 전압을 사용하는 전압 모델과 회전자 시정수 및 고정자 전류를 이용하는 전류 모델로 분류될 수 있다. 특히 회전자 시정수 및 회전자 저항 값은 온도 및 운전 조건에 따라 크게 변할 수 있으므로, 인버터 비선형성 및 고정자 저항 오차가 미치는 영향이 적어지는 중-고속 영역에서는 전류 모델을 적게 사용하는 제어 방식이 선호된다.^[2]

본 논문에서는 전류와 회전자 자속을 추정하는 기존 방법^[3]을 변형하여, 고정자 자속과 회전자 자속을

추정하는 상태 관측기를 설계하고, 고정자 자속에서 누설 자속을 뺀 공극 자속을 기준으로 제어를 수행하는 방법을 제안하였다. 또한 공극 자속 동기좌표계를 사용하여, 기존 적응제어기의 역할을 회전자 회전속도 추정에서 슬립 속도 추정으로 축소하였다. 제안된 방법에서 전류 모델 오차가 공극자속 추정에 미치는 영향을 분석하였으며, 기존 방법에 비해서 전류 모델 오차가 제어 성능에 미치는 영향이 적어짐을 확인하였다.

2. 고정자 자속을 이용한 공극 자속 추정

2.1 상태 관측기 설계

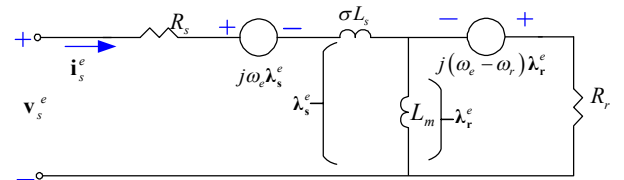


그림 1 유도기 등가 모델 (Inverse Gamma Model)

유도전동기의 등가 모델이 그림 1 과 같을 때, 전동기의 상태방정식은 다음과 같이 표현된다. 이를 이용하여 동기좌표계의 고정자 자속, λ_s^e 와 회전자 자속, λ_r^e 를 상태로 하는 관측기를 설계할 수 있다. 이때 (5)는 슬립 주파수를 추정하는 적응제어기이다. 식 (4) 에서 \hat{x} 는 x 의 추정 값을 의미하며 α_r 은 R_r / L_m 을 의미한다.

$$v_s^e = R_s i_s^e + p \lambda_s^e + j \omega_e \lambda_s^e. \quad (1)$$

$$p \lambda_r^e = \left(j \omega_{sl} + \frac{R_r}{L_m} \right) \lambda_r^e + R_r i_s^e. \quad (2)$$

$$\lambda_s^e = \lambda_r^e + \sigma L_s i_s^e. \quad (3)$$

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A} \hat{x} + \hat{u} + K (i_s^e - \hat{i}_s^e). \quad (4)$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{\lambda}_s^e \\ \hat{\lambda}_r^e \end{bmatrix}, \hat{A} = \begin{bmatrix} -j \omega_e & 0 \\ 0 & -\alpha_r - j \omega_{sl} \end{bmatrix}$$

$$\hat{u} = \begin{bmatrix} v_s^e - \hat{R}_s i_s^e \\ \hat{R}_r i_s^e \end{bmatrix}, \hat{i}_s^e = \begin{bmatrix} 1 \\ \hat{\sigma} \hat{L}_s \end{bmatrix} \hat{x}, K = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix}$$

$$\dot{\omega}_{sl} = \int k_i (i_{qs}^e - \hat{i}_{qs}^e) dt. \quad (5)$$

설계된 관측기의 안정화 이득 행렬, K 가 0일 경우

$\hat{\lambda}_s^e$ 는 전압 모델로 추정된 고정자 자속을 의미하며, $\hat{\lambda}_r^e$ 는 전류 모델로 추정된 회전자 자속을 의미한다. 하지만, $K=[0 \ 0]^T$ 일 경우 관측기는 0에서 극점을 가지므로, 관측기를 안정화 하기 위해선 적절한 K 를 설정해 주어야한다. $K=[\hat{R}_s \ -\hat{R}_r]^T$ 인 경우 기존의 방법에서 이득이 0 인 경우와 같은 극점을 가지며, 기존의 관측기에서 사용된 이득, K_i 가 있다면, 다음과 같은 변환 과정을 통해 동일한 극점을 가지도록 설계 할 수 있다.

$$K = MK_i + [\hat{R}_s \ -\hat{R}_r]^T, M = \begin{bmatrix} \hat{\sigma} \hat{L}_s & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

본 관측기는 임의의 동기좌표계에서 동작 가능하나, 전류 모델의 영향을 최소화하고 또 적응제어기의 역할을 줄이기 위해 다음과 같이 공극 자속, $\hat{\lambda}_m^e$ 를 정의하여, $\hat{\lambda}_m^e$ 를 기준으로 하는 동기좌표계 상에서 제어한다.

$$\hat{\lambda}_m^e \square \hat{\lambda}_s^e - \hat{\sigma} \hat{L}_s i_s^e, \hat{\lambda}_{qm}^e = 0. \quad (7)$$

식 (4)의 관측기 중 $\hat{\lambda}_r^e$ 는 기존 방법에서 추정된 자속과 동일하다. 그러므로 위의 관측기에서 $\hat{\lambda}_r^e$ 를 기준으로 좌표계를 동기시킬 경우 기존 방법과 동일한 특성을 가진다.

반면, $\hat{\lambda}_m^e$ 은 추정 제정수의 추정에 오차가 없을 경우엔 $\hat{\lambda}_r^e$ 와 동일하지만, 제정수의 오차가 있을 경우 $\hat{\lambda}_r^e$ 와 차이가 발생하게 된다. 이는 2.3 절에서 자세히 설명한다.

2.2 공극 자속 속도 추정기 설계

제안된 관측기는 공극 자속, $\hat{\lambda}_m^e$ 에 동기되므로, $\hat{\lambda}_{qs}^e = \hat{\sigma} \hat{L}_s i_s^e$ 를 만족해야한다. 식 (4)에서 $\hat{\lambda}_{qs}^e$ 에 대한 항을 정리하면 식 (8) 과 같다. 이때 모든 운전 상황에서 λ_{qm}^e 를 0으로 빠르게 감쇠할 수 있도록 동기 속도를 식 (9)과 같이 설계한다. 이때 g_q 는 감쇠 속도를 결정하는 설계 상수이며 $\hat{\lambda}_{qs}^e$ 는 식 (10)와 같이 $\hat{\sigma} \hat{L}_s i_s^e$ 에 수렴한다.

일반적으로 동기좌표계를 사용하는 관측기에서는 별도의 위상동기회로(PLL)를 사용하여 동기 속도를 추정하지만, 제안된 방법에서는 별도의 적분 제어를 사용하지 않고 기존의 자속 관측기의 적분기 만을 사용하여 자연스럽게 동기 속도를 추정한다.

$$\dot{\hat{\lambda}}_{qs}^e = -\omega_e \hat{\lambda}_{ds}^e + v_{qs}^e - \hat{R}_s i_{qs}^e + \text{Im}(K_1 \tilde{i}_s^e). \quad (8)$$

$$\omega_e = \frac{g_q (\hat{\lambda}_{qs}^e - \hat{\sigma} \hat{L}_s i_{qs}^e) + v_{qs}^e - \hat{R}_s i_{qs}^e + \text{Im}(K_1 \tilde{i}_s^e)}{\hat{\lambda}_{ds}^e}. \quad (9)$$

$$\hat{\lambda}_{qs}^e = \frac{g_q}{s + g_q} \hat{\sigma} \hat{L}_s i_{qs}^e. \quad (10)$$

식 (9)의 우변은 정상상태에서 q축 역기전력을 d축 고정자 자속으로 나눈 형태이다. 이는 전압에서 직접 자속 속도를 구하는 형태이므로, 전류 모델의 영향이 적어, 회

전자 시정수의 변화에 덜 민감하다. 또한, 설계 상수 g_q 는 추정 동기좌표계가 얼마나 $\hat{\lambda}_m^e$ 의 벡터에 빠르게 수렴하는가를 결정하며, 그 관계가 선형적이기 때문에 원하는 대역폭으로 설계가 용이하다.

2.3 전동기 제정수 오차의 영향 분석

전압 모델과 전류 모델의 자속 추정 오차, \tilde{x}_0 는 식 (11) 과 같으며, 이득 행렬 K 에 0을 대입하였을 때의 관측기 추정 오차와 같다. 임의의 K 에 대해서 자속 추정 오차를 \tilde{x}_0 에 대해 나타내면 전압 모델 오차와 전류 모델 오차가 자속 추정에 미치는 영향을 분석할 수 있으며, 그 결과는 식 (12) 과 같다. 여기서 K_1^σ 와 K_2^σ 는 각각 $K_1 / \hat{\sigma} \hat{L}_s$ 와 $K_2 / \hat{\sigma} \hat{L}_s$ 를 의미한다.

$$\tilde{x}_0 = \tilde{x} |_{K=0} = \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_{s0}^e \\ \tilde{\lambda}_{r0}^e \end{bmatrix} = (sI - A)^{-1} (\tilde{A} \tilde{x} + \tilde{u})$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\tilde{R}_s i_s^e}{s + j\omega_e} \\ \frac{-(\tilde{\alpha}_r + j\tilde{\omega}_{sl}) \hat{\lambda}_r^e + \tilde{R}_r i_r^e}{s + j\omega_{sl} + \tilde{\alpha}_r} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} \tilde{\lambda}_s^e \\ \tilde{\lambda}_r^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 - F(s) \\ 1 - G(s) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J(s)F(s)\tilde{\lambda}_{s0}^e \\ J(s)G(s)\tilde{\lambda}_{r0}^e \end{bmatrix}. \quad (12)$$

여기서,

$$J(s) = \frac{(s + j\omega_{sl} + \alpha_r - K_2^\sigma)(s + j\omega_e + K_1^\sigma)}{(s + j\omega_e + K_1^\sigma)(s + j\omega_{sl} + \alpha_r - K_2^\sigma) + K_1^\sigma K_2^\sigma},$$

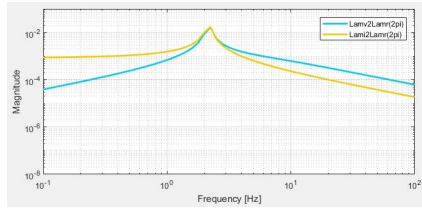
$$F(s) = \frac{s + j\omega_e}{s + j\omega_e + K_1^\sigma}, G(s) = \frac{s + j\omega_{sl} + \alpha_r}{s + j\omega_{sl} + \alpha_r - K_2^\sigma}.$$

식 (13),(14)는 전류 모델의 자속 추정 오차가 $\tilde{\lambda}_m^e$ 과 $\tilde{\lambda}_r^e$ 에 미치는 영향을 보여준다. 0이 아닌 이득 K_1^σ 에 대하여 $1 - F(s)$ 는 저역 통과 필터의 특성을 가지므로, $\hat{\lambda}_m^e$ 를 기준으로 제어할 때 속도가 높아지면 $\hat{\lambda}_r^e$ 를 기준으로 제어할 때보다 $1 - F(s)$ 만큼 회전자 자속 오차의 영향을 줄일 수 있다.

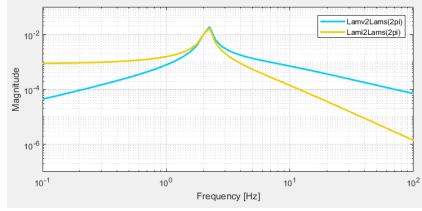
$$\frac{\tilde{\lambda}_s^e}{\tilde{\lambda}_{r0}^e} = (1 - F(s))J(s)G(s). \quad (13)$$

$$\frac{\tilde{\lambda}_r^e}{\tilde{\lambda}_{r0}^e} = J(s)G(s). \quad (14)$$

앞서 2.1절에서 설명한 바와 같이 $\hat{\lambda}_r^e$ 는 기존 방법에서 추정된 자속과 동일하므로, $\hat{\lambda}_s^e - \hat{\sigma} \hat{L}_s i_s^e$ 와 $\hat{\lambda}_r^e$ 를 비교하면, 제안된 방법과 기존 방법에서 제정수 오차에 의한 영향을 비교할 수 있다. (12) 에서 $s=0$ 을 대입하고, ω_{sl} 이 1[pu]일 때, ω_e 에 대해 전달함수를 구하면 다음과 같다. 고속 영역에서 전류 모델의 오차가 자속 추정에 미치는 영향이 줄어들음을 확인 할 수 있다.



(a) 기존 방법 ($\circ \tilde{\lambda}_r^e / \tilde{\lambda}_{s0}^e, \circ \tilde{\lambda}_r^e / \tilde{\lambda}_{r0}^e$)



(b) 제안 방법 ($\circ \tilde{\lambda}_m^e / \tilde{\lambda}_{s0}^e, \circ \tilde{\lambda}_m^e / \tilde{\lambda}_{r0}^e$)

그림 2 전압/ 전류 모델 오차가 자속 추정에 미치는 영향

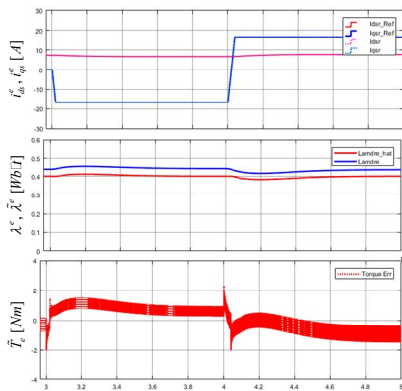
3. 시뮬레이션 및 실험 결과

이론의 검증을 위해 시뮬레이션 및 실험을 진행하였다. 시험 전동기의 사양 및 제정수는 아래 표와 같다.

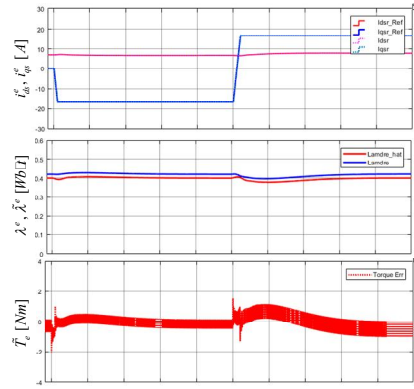
표 1 전동기의 사양 및 제정수

정격 용량	3.7	kW
극수	4	극
정격 전압	220	V
정격 전류	13.8	A
정격 속도	1730	r/min
고정자 저항 (R_s)	0.5	Ω
회전자 저항 (R_r)	0.3	Ω
누설 인덕턴스 (σL_s)	5.8	mH
상호 인덕턴스 (L_m)	55	mH

시뮬레이션은 회전자 시정수에 50%의 오차가 존재할 때 0.3 [pu] 으로 부하가 속도 제어하는 상황 하에서, 정역 1 [pu] 부하를 인가하였을 때 자속 추정 성능 및 토크 오차를 비교하였다. 그 파형은 그림 3과 같다. 제안된 방법을 사용하였을 때, 토크 오차의 평균값이 0에 수렴함을 확인 할 수 있다.



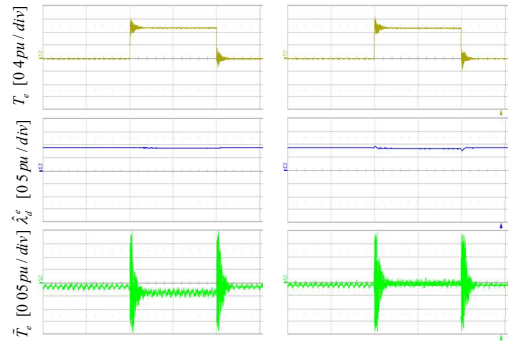
(a) 회전자 자속 추정(기존 방법)



(b) 공극 자속 추정(제안 방법)

그림 3 시뮬레이션 파형(전류, 자속, 토크 오차)

실험에서는 0.3[pu] 속도에서 0.2[pu]의 L_m 오차가 존재할 때, 정격 부하 인가 시 자속 추정 값과 토크 오차를 비교하였다. 토크 오차는 제어기에서 추정된 토크와 토크 센서로 측정된 값의 차를 이용하여 계산하였다. 제안된 방법에서 토크 오차가 3% 정도 개선되었다.



(a) 회전자 자속추정(기존) (b) 공극 자속추정(제안)

그림 4 실험 결과 파형(토크, 추정 자속, 토크 오차)

4. 결론

본 논문에서는 고정자 자속을 추정하는 회전자 시정수 오차에 강인한 센서리스 관측기를 제안하였다. 동기좌표계 상에서 자속을 추정하며, 별도의 PLL없이 동기 속도를 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법과 기존 방법의 회전자 시정수 오차의 영향을 분석하였고, 제안된 방법에서 그 영향이 감소함을 확인하였다. 이를 시뮬레이션과 실험으로 검증하였다.

참고 문헌

- [1] H. Kubota, K. Matsuse and T. Nakano, "DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 2, pp. 344-348, Mar/Apr 1993.
- [2] Jang-Hwan Kim, Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul, "Novel rotor-flux observer using observer characteristic function in complex vector space for field-oriented induction motor drives," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 5, pp. 1334-1343, Sep/Oct 2002.