

슬라이딩 모드 축차 관측기를 이용한 유도 전동기 속도 추정

論文

53D-3-2

A Rotor Speed Estimation of Induction Motors Using Sliding Mode Cascade Observer

金應錫*
(Eung-Seok Kim)

Abstract - A nonlinear adaptive speed observer is designed for the sensorless control of induction motors. In order to design the speed observer, the measurements of the stator currents and the estimates of the rotor fluxes are used. The sliding mode cascade observer is designed to estimate the time derivatives of the stator currents. The open-loop observer is designed to estimate the rotor fluxes and its time derivatives using the stator current derivatives. The adaptive observer is also designed to estimate the rotor resistance. Sequentially, the rotor speed is calculated using these estimated values. It is shown that the estimation errors of the corresponding states and the parameters converge to the specified residual set. It is also shown that the speed controller using these estimates is performed well. The simulation examples are represented to investigate the validity of the proposed observers for the sensorless control of induction motors.

Key Words : 축차 관측기, 속도추정, 전류도함수, 자속도함수

1. 서론

최근 몇 년간 유도전동기에 대하여 엔코더나 타코미터 등을 사용하지 않는 속도제어에 대한 활발한 연구가 수행되고 있다. 이는 잘 알려진 바와 같이 속도센서를 사용하지 않으므로 얻을 수 있는 이익이 크기 때문이다. 지금까지 발표된 연구결과들은 전동기의 동특성 모델을 이용한 관측기를 설계하여 자속을 추정하고 이를 통해 속도를 추정하는 방법([2]-[4],[6]-[9])들이 대부분이다. 전동기 모델에 대한 정보없이 자속 및 속도를 추정하는 지능형 알고리즘(Artificial Intelligence)을 이용한 관측방법[5]도 발표되고 있지만 과다한 계산시간, 경험적 지식의 필요성 등이 구현상의 한계로 남아있다. 이제까지 발표된 대부분의 연구결과를 토대로 하면 고정자 전류의 정확한 측정 및 회전자 자속의 정확한 추정 결과가 속도추정의 정확성에 영향을 미친다고 할 수 있다. 관측기를 이용한 방법[2]-[4]의 경우 고속운전 영역에서 좋은 성능을 보이고 있다. 관측 알고리즘도 상대적으로 간단하여 DSP를 이용한 제어시스템의 구현이 수월하다. 그러나 저속운전 영역 및 파라미터 변동에 대해 취약한 면이 있다. 그 이유는 이들 논문에서는 회전자 속도의 시간변화율이 전동기의 전기적 상태들의 시간변화율에 비해 상대적으로 느려서 무시할 수 있다는 가정을 토대로 하고 있기 때문으로 판단된다. 파라미터 적응 관측기를 이용한 방법[6]-[8]의 경우 파라미터 변동에 의한 영향을 줄일 수 있으며 비교적 알고리즘도 간단하여 구현이 수월하다. 회전자 속도를 파라미터로 간주

한 전동기 모델로부터 자속을 추정한다. 이제까지 언급한 기존의 방법들은 대부분 전동기의 다른 상태들(전류변화율, 자속변화율 등)에 비해 상대적으로 느린 회전자 속도의 변화율이 '0'이라 가정하고 Lyapunov 설계기법을 이용해 속도를 추정하고 있다. 그러나 회전자 속도를 파라미터로 간주할 경우, 다른 파라미터들에 비해 회전자 속도 파라미터가 상대적으로 빠르게 변하므로 속도 추정의 정확성에 한계가 있다. 더구나 회전자 속도에 비해 상대적으로 그 변화율이 느린 회전자 저항 파라미터의 시변성 및 파라미터 불확실성도 회전자 속도 추정의 정확성에 영향을 미친다는 점을 고려할 때 회전자 속도의 변화율이 '0'이라는 가정은 해소해야할 문제라고 판단된다.

따라서 본 논문에서는 회전자 속도의 변화율이 전동기의 전기적인 상태 변화율에 비해 상대적으로 무시할 수 있다는 가정을 하지 않고 회전자 속도 관측기를 설계하고자 한다. 회전자 자속의 정확한 추정을 위해 [11]에서 제안한 슬라이딩 모드 축차 관측기(Sliding Mode Cascaded Observer: SMCO)를 이용한다. SMCO는 관측 대상의 수학적 모델에 대한 어떠한 정보도 필요로 하지 않는다. 고정자 전류는 회로적인 구성을 통해 측정이 가능하므로, 측정된 고정자 전류의 1계 도함수(시간변화율)를 SMCO로 추정한다. 이때 전동기의 내부 파라미터에 대한 정보는 필요치 않다. SMCO로부터 얻어진 고정자 전류 변화율의 추정치를 이용하여 회전자 자속에 대한 개 루프 관측기를 설계함으로써 회전자 자속 추정치를 얻을 수 있다. 고정자 전류의 변화율 및 회전자 자속의 변화율은 전동기의 다른 상태에 비해 상대적으로 급격히 변하는 상태이다. 반면에 회전자 속도는 상대적으로 느린 변화율을 갖는다. 그러나 유도 전동기의 모든 운전 영역에서 정확한 속도를 추정하기 위해서는 회전자속도의 변화율을 무시할 수 없다. 따라서 회전자 자속 동특성을 회전자 속도에 관한 역 모델 방정식으로 재구성하고 이를 이용해 속도를 추정하는 방법을 제안한다.

正 會 員 : 漢學大 電氣·電子·制御工學部 副教授·工博
接受日字 : 2003年 10月 10日
最終完了 : 2004年 1月 26日

2. 유도전동기 모델

본 논문에서 관측대상으로 고려한 유도전동기의 수학적 모델 [1,8,9]은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \omega = -\mu \lambda_r^T J i_s - T_l / J_m \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_r = \left(-\frac{R_r}{L_r} I + p \omega J \right) \lambda_r + \frac{R_r}{L_r} L_m i_s \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} i_s = \beta \left(\frac{R_r}{L_r} I - p \omega J \right) \lambda_r - \left(a_s \eta + \frac{R_r}{L_r} \beta L_m \right) i_s + v v_s \quad (3)$$

여기서 $I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $\lambda_r = [\Psi_a \ \Psi_b]^T$, $i_s = [i_a \ i_b]^T$, $v_s = [v_a \ v_b]^T$ 이다. 변수 λ_r 은 고정자를 기준축으로 볼 때의 회전자 자속이며, i_s 와 v_s 는 각각 고정자 전류 및 고정자 전압이다. 파라미터 a_s , β , v , η 및 μ 는 각각 $a_s = R_r/L_s$, $\beta = L_m/\sigma L_s L_r$, $v = 1/\sigma L_s$, $\eta = 1/\sigma$, 및 $\mu = p L_m / J_m L_r$ 로 정의된다. 여기서 L_r , L_s 및 L_m 은 회전자, 고정자 및 상호 인덕턴스이다. $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ 이고, R_r 과 R_s 는 회전자 및 고정자 저항, J_m 은 회전자의 관성모멘트, p 는 극수이다. 고정자 전류 i_s 는 직접 측정하고, 회전자 자속 λ_r 과 1계 도함수 $\frac{d}{dt} \lambda_r$, 그리고 고정자 전류의 1계 도함수 $\frac{d}{dt} i_s$ 를 SMCO[11]를 이용하여 추정한다. 회전자 속도추정 식에서 사용할 회전자 저항 R_r 은 미지의 파라미터로 간주하여 기존의 표준형 파라미터 적응법을 이용하여 추정한다. 회전자 속도 ω 는 $\frac{d}{dt} i_s$, λ_r , $\frac{d}{dt} \lambda_r$ 과 R_r 의 추정치들을 이용하여 추정한다. 이때, $\frac{d}{dt} \omega = 0$ 이라는 가정은 필요치 않다. 고정자 전류는 직접 측정하고, 회전자 자속 및 속도를 가능한 한 정확하게 추정하기 위한 관측기 설계가 본 논문의 목적이다.

3. 관측기 설계

3.1 슬라이딩모드 축차 관측기

고정자 전류의 1계 도함수 $\frac{d}{dt} i_s$ 는 [11]에서 제안한 SMCO를 이용하여 얻을 수 있다. $\frac{d}{dt} i_s$ 에 대한 SMCO는 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$\hat{x}_{ij} = \hat{x}_{ij-1} + k_{ij} (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}) \beta_{ij} S_g (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}) \quad (4)$$

$$S_g(\zeta_{ij}) = \begin{cases} 1, & \zeta_{ij} > \delta_{ij} \\ -1, & \zeta_{ij} < -\delta_{ij} \\ \zeta_{ij} / \delta_{ij}, & |\zeta_{ij}| \leq \delta_{ij} \end{cases} \quad (5-a)$$

$$S_w(\zeta_{ij}) = \begin{cases} 1, & \zeta_{ij} > 0 \\ -1, & \zeta_{ij} < 0 \end{cases} \quad (5-b)$$

여기서 $j(=1, 2, \dots)$ 는 축차 관측기의 단 수를 나타내며, $i(=a, b)$ 는 고정자의 상을 표시한다. SMCO를 이용한 추정치의 수렴수렴적인 수렴성에 대한 고찰은 [11]에 주어졌다. 따라서 식(5-a)의 포화함수를 사용할 경우 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

정리 1-1: 초기시간 $t=t_0$ 에서 초기치 집합

$$D_S = \{ e_{ij}, \tilde{x}_{ij} : |e_{ij}| \leq \beta_{ij}, |\tilde{x}_{ij}| \leq \beta_{ij} \} \quad (6)$$

에 속한 식(4)-(5-a)의 모든 해에 대한 추정오차 $\tilde{x}_{ij} = \hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}$ 와 보조오차 $e_{ij} = \hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij-1}$ 를 시간 $t=t_1$ 에서 잔여 집합

$$D_R = \left\{ e_{ij}, \tilde{x}_{ij} : |e_{ij}| \leq \frac{\beta_{ij}}{k_{ij}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2\beta_{ij}}{\delta_{ij} k_{ij}}}}, |\tilde{x}_{ij}| \leq \frac{\beta_{ij}}{k_{ij}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2\beta_{ij}}{\delta_{ij} k_{ij}}}} \right\} \quad (7)$$

에 속하도록 하는 양의 상수 β_{ij} , k_{ij} 및 δ_{ij} 들이 존재한다. ■

증명: Lyapunov 함수후보를 $V_{ij} = \frac{1}{2} (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij})^2$ 과 같이 설정하고 시간에 관한 1계 도함수를 구하면,

$$\dot{V}_{ij} \leq -k_{ij} (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij})^2 - (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}) [\beta_{ij} S_g (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}) - \hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij-1}] \quad (P-1)$$

와 같이 쓸 수 있다. 위의 식(P-1)에 식(5-a)를 이용해서 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_{ij} \leq -k_{ij} (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij})^2 - \frac{\beta_{ij}}{\delta_{ij}} (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij})^2 + |\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}| |\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij-1}| \quad (P-2)$$

식(P-2)의 우변 첫 항을 이등분해서 정리하면,

$$\dot{V}_{ij} \leq -\frac{k_{ij}}{2} (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij})^2 - a_{ij} \left(|\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}| - \frac{\beta_{ij}}{2a_{ij}} \right)^2 + \frac{\beta_{ij}^2}{4a_{ij}} \quad (P-3)$$

이 된다. 여기서 $a_{ij} = \frac{k_{ij}}{2} + \frac{\beta_{ij}}{\delta_{ij}}$ 이다. 식(P-3)의 우변 두 번째 항을 소거하더라도 부등 관계는 만족되므로 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\dot{V}_{ij} \leq -k_{ij} V_{ij} + \frac{\beta_{ij}^2}{4a_{ij}} \quad (P-4)$$

이제 식(P-4)를 적분하면 다음 관계를 만족한다.

$$V_{ij}(t) \leq \frac{\beta_{ij}^2}{4a_{ij} k_{ij}} + c_{ij} \epsilon_t \quad (P-5)$$

여기서 상수 $c_{ij} = \left| V_{ij}(t_0) - \frac{\beta_{ij}^2}{4a_{ij} k_{ij}} \right| e^{k_{ij} t_0} \geq 0$ 이고, $\epsilon_t = e^{-k_{ij} t}$ 이다. 따라서 각 단의 추정오차 $\tilde{x}_{ij} = \hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}$ 와 보조오차 $e_{ij} = \hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij-1}$ 에 대해 잔여 집합을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$D_R = \left\{ e_{ij}, \tilde{x}_{ij} : |e_{ij}| \leq \frac{\beta_{ij}}{k_{ij}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2\beta_{ij}}{\delta_{ij} k_{ij}}}}, |\tilde{x}_{ij}| \leq \frac{\beta_{ij}}{k_{ij}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2\beta_{ij}}{\delta_{ij} k_{ij}}}} \right\} \quad (P-6)$$

식(P-6)을 유도하기 위한 보다 자세한 내용은 참고문헌 [11]에 있으므로 본 논문에서는 생략한다. ■

정리 1-1의 식(7)에 주어진 잔여집합 D_R 은 δ_{ij} 를 '0'에 가깝게 설정할수록 오차들은 원점에 가까워지게 됨을 알 수 있다. 즉, $\delta_{ij}=0$ 으로 설정할 경우 오차는 모두 원점에만 존재하게 되며, 이는 식(5-b)의 스위칭 함수를 사용한 경우에 해당된다. 식(5-a)의 포화함수 대신에 식(5-b)의 스위칭 함수를 이용할 경우에는 추정 오차가 잔여집합 D_R 에 포함될 뿐만 아니라 지수함수적인 빠르기로 '0'으로 수렴하게 된다. 따라서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

정리 1-2: 초기시간 $t=t_0$ 에서 초기치 집합

$$D_S = \{e_{ij}, \hat{x}_{ij} : |e_{ij}| \leq \beta_{ij}, |\hat{x}_{ij}| \leq \beta_{ij}\} \quad (6)$$

에 속한 식(4) 및 식(5-b)의 모든 해에 대한 추정오차 $\tilde{x}_{ij} = \hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}$ 와 보조오차 $e_{ij} = \hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij+1}$ 가 지수함수적인 빠르기로 '0'으로 수렴하도록 하는 양의 상수 β_{ij} , k_{ij} 들이 존재한다. ■

증명: Lyapunov 함수후보를 $V_{ij} = \frac{1}{2} (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij})^2$ 과 같이 설정하고 시간에 관한 1계 도함수를 구하면,

$$\dot{V}_{ij} \leq -k_{ij} (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij})^2 - (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}) [\beta_{ij} S_u(\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}) - |\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij+1}|] \quad (P-7)$$

와 같이 쓸 수 있다. 위의 식(P-7)에 식(5-b)를 이용해서 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_{ij} \leq -k_{ij} (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij})^2 - |\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij}| [\beta_{ij} - |\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij+1}|] \quad (P-8)$$

여기서 β_{ij} 는 정리1-2의 초기치 집합 D_S 를 만족하므로 위의 부등식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{V}_{ij} \leq -k_{ij} (\hat{x}_{ij-1} - \hat{x}_{ij})^2 = -2k_{ij} V_{ij} \quad (P-9)$$

식(P-9)를 적분하면 $V_{ij}(t) = V_{ij}(t_0) e^{-2k_{ij}(t-t_0)}$ 가 되어 지수 함수적으로 안정하여 $V_{ij} \rightarrow 0$, $\dot{V}_{ij} \rightarrow 0$ 이 만족된다. 따라서 양의 상수 k_{ij} 및 초기치 집합 D_S 에 속하는 양의 상수 β_{ij} 에 대해 추정오차 및 보조오차가 모두 지수함수적인 빠르기로 '0'으로 수렴함을 알 수 있다. 보다 자세한 내용은 참고문헌 [11]을 참조하기 바라며 본 논문에서는 간략하게 설명을 마치기로 한다. ■■

식(4)와 식(5-b)를 이용한 전류 추정 식을 정리해서 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{i}}_{a1} &= \hat{i}_{a2} + k_{a1}(i_a - \hat{i}_{a1}) + \beta_{a1} S_u(i_a - \hat{i}_{a1}) \\ \dot{\hat{i}}_{a2} &= k_{a2}(\hat{i}_{a1} - \hat{i}_{a2}) + \beta_{a2} S_u(\hat{i}_{a1} - \hat{i}_{a2}) \end{aligned} \quad (4-a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{i}}_{b1} &= \hat{i}_{b2} + k_{b1}(i_b - \hat{i}_{b1}) + \beta_{b1} S_u(i_b - \hat{i}_{b1}) \\ \dot{\hat{i}}_{b2} &= k_{b2}(\hat{i}_{b1} - \hat{i}_{b2}) + \beta_{b2} S_u(\hat{i}_{b1} - \hat{i}_{b2}) \end{aligned} \quad (4-b)$$

식(4)로부터 시간이 지남에 따라 $\hat{i}_{a2} = \frac{d}{dt} \hat{i}_{a1} = \frac{d}{dt} i_a$ 및 $\hat{i}_{b2} = \frac{d}{dt} \hat{i}_{b1} = \frac{d}{dt} i_b$ 이 만족되며, 이에 따라 축차적으로 $\hat{i}_{a1} = i_a$ 및 $\hat{i}_{b1} = i_b$ 가 만족되어 고정자 전류 및 전류의 변화율에 대한 추정치를 얻을 수 있다. 전류 변화율에 대한 추정치로 \hat{i}'_{a1} 과 \hat{i}'_{b1} 대신에 \hat{i}_{a2} 와 \hat{i}_{b2} 를 사용하는 것이 추정된 자속의 부드러운(smooth) 값을 얻을 수 있다. 위의 식(4)로부터 고정자 전류 $i_s = [i_a, i_b]^T$ 및 고정자 전류 변화율 $\frac{d}{dt} i_s = [\frac{d}{dt} i_a, \frac{d}{dt} i_b]^T$ 의 추정치 $\frac{d}{dt} \hat{i}_s = [\frac{d}{dt} \hat{i}_a, \frac{d}{dt} \hat{i}_b]^T$ 를 얻기 위해서 전동기의 내부 파라미터 또는 동특성에 대한 정보가 필요치 않다는 것을 알 수 있다.

3.2 회전자 자속 관측기

이제 $\frac{d}{dt} \hat{i}_s$ 를 이용하여 회전자 자속에 대한 개루프 관측기를 설계하기로 한다. 식(2)의 회전자 자속 미분방정식을 $p \omega J \lambda_r$ 에 관해 정리하면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$p \omega J \lambda_r = \frac{d}{dt} \lambda_r + \frac{R_r}{L_r} (\lambda_r - L_m i_s) \quad (8)$$

이를 식(3)으로 주어진 전류 미분방정식에 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} i_s = -a_s \eta i_s - \beta \frac{d}{dt} \lambda_r + \gamma v_s \quad (9)$$

윗 식을 회전자 자속 λ_r 과 1계 도함수 $\frac{d}{dt} \lambda_r$ 에 관해 정리하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \lambda_r = \frac{1}{\beta} \left\{ -a_s \eta i_s - \frac{d}{dt} i_s + \gamma v_s \right\} \quad (10)$$

윗 식에서 만일 $\frac{d}{dt} i_s$ 를 알 수 있다면 i_s 와 v_s 는 아는 값이므로 자속 및 자속 변화율을 계산할 수 있음을 알 수 있다. $\frac{d}{dt} i_s$ 는 직접 구하기 어려운 상태 값이므로 추정치 $\frac{d}{dt} \hat{i}_s$ 를 이용하기로 한다. 자속추정치 $\hat{\lambda}_r$ 와 1계 도함수 추정치 $\frac{d}{dt} \hat{\lambda}_r$ 를 구하기 위한 개루프 관측기를 식(10)에 근거하여 다음과 같이 설계한다.

$$\frac{d}{dt} \hat{\lambda}_r = \frac{1}{\beta} \left\{ -a_s \eta \hat{i}_s - \frac{d}{dt} \hat{i}_s + \gamma v_s \right\} \quad (11)$$

회전자 자속의 시간 변화율(1계 도함수)의 추정치는 위의 식(11)로부터 직접 얻을 수 있으며, 자속의 추정치는 식(11)을 적분함으로써 얻어진다. 전류의 변화를 추정오차에 대한 자속 및 자속 변화율 추정오차의 종속 관계를 알아보기로 한다. 식(11)에서 식(10)을 빼면 다음의 자속 추정오차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \widehat{\lambda}_r - \frac{d}{dt} \lambda_r = -\frac{1}{\beta} \left\{ \left(\frac{d}{dt} \widehat{i}_s - \frac{d}{dt} i_s \right) + \alpha_s \eta (\widehat{i}_s - i_s) \right\} \rightarrow 0 \quad (12)$$

[정리 1-2]로부터 고정자 전류의 추정오차 $(\widehat{i}_s - i_s)$ 및 그 1계 도함수의 추정오차 $\left(\frac{d}{dt} \widehat{i}_s - \frac{d}{dt} i_s\right)$ 가 모두 지수함수적인 빠르기로 '0'으로 수렴한다는 것을 알고 있다. 따라서 자속의 1계 도함수 추정오차 $\left(\frac{d}{dt} \widehat{\lambda}_r - \frac{d}{dt} \lambda_r\right)$ 역시 시간이 지남에 따라 점근적인 빠르기로 '0'으로 수렴하고, 이에 따라 $(\widehat{\lambda}_r - \lambda_r)$ 역시 '0'으로 수렴하게 된다.

3.3 회전자 저항 R_r 의 추정

식(3)을 회전자 저항 R_r 관해 정리하면 회전자 저항 R_r 의 추정모형을 얻는다.

$$\frac{d}{dt} i_s = R_r \frac{\beta}{L_r} (\lambda_r - L_m i_s) - \beta p \omega J \lambda_r - \alpha_s \eta i_s + \gamma v_s, \quad (13)$$

위의 회전자 저항 추정모형으로부터 다음과 같은 적용모형을 설계한다.

$$\frac{d}{dt} \widehat{i}_s = \widehat{R}_r \frac{\beta}{L_r} (\widehat{\lambda}_r - L_m \widehat{i}_s) - \beta p \omega J \widehat{\lambda}_r - \alpha_s \eta \widehat{i}_s + \gamma v_s + \xi_1 + \xi_2 \quad (14)$$

여기서 $\xi_1 = -K_s (\widehat{i}_s - i_s) = -K_s \widehat{i}_s$ 이고 $K_s = K_s^T > 0$ 이고, $\overline{\omega}$ 는 회전자 저항 R_r 의 기준값을 이용해서 뒤에서 언급할 속도계산식을 이용해 매번 계산하는 값이다. $\overline{\omega}$ 에 관한 좀더 자세한 설명은 다음절에서 속도계산식을 다룰 때 하기로 한다. ξ_2 는 스위칭 함수로서 설계에 관한 내용은 이 절의 후반부에서 자세히 언급하기로 한다. $\xi_1 = \frac{\beta}{L_r} (\lambda_r - L_m i_s)$ 의 추정치를 $\widehat{\xi}_1 = \frac{\beta}{L_r} (\widehat{\lambda}_r - L_m \widehat{i}_s)$ 로 정의하고 파라미터 적용 오차 $\widehat{i}_s = \widehat{i}_s - i_s$ 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \widehat{i}_s = \widehat{R}_r \widehat{\xi}_1 - R_r \xi_1 - \beta p \omega J \widehat{\lambda}_r + \beta p \omega J \lambda_r - \alpha_s \eta (\widehat{i}_s - i_s) + \xi_1 + \xi_2 \quad (15)$$

여기서 $\widehat{R}_r = \widehat{R}_r - R_r$ 로서 파라미터 추정 오차이다. 윗 식에 $R_r \widehat{\xi}_1 - R_r \xi_1$ 과 $\beta p \omega J \widehat{\lambda}_r - \beta p \omega J \lambda_r$ 를 더해서 정리하면 적용오차 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \widehat{i}_s = \widehat{R}_r \widehat{\xi}_1 - R_r \xi_1 - \beta p [\overline{\omega} - \omega] J \widehat{\lambda}_r - \beta p \omega J \widehat{\lambda}_r - \alpha_s \eta \widehat{i}_s - K_s \widehat{i}_s + \xi_2 \quad (16)$$

여기서 $\xi_1 = \widehat{\xi}_1 - \xi_1$, $\widehat{\lambda}_r = \widehat{\lambda}_r - \lambda_r$ 이고 $\widehat{i}_s = \widehat{i}_s - i_s$ 이다.

Lyapunov function candidate를 다음과 같이 설정한다.

$$V = \frac{1}{2} \widehat{i}_s^T \widehat{i}_s + \frac{1}{2g} \widehat{R}_r^2 \quad (17)$$

이제 식(17)을 한번 미분해서 정리하면 다음의 관계를 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\widehat{i}_s^T K_s \widehat{i}_s - R_r \widehat{i}_s^T \xi_1 + \widehat{R}_r \widehat{\xi}_1^T \widehat{i}_s + \frac{1}{g} \widehat{R}_r \dot{\widehat{R}}_r \\ & - \alpha_s \eta \widehat{i}_s^T \widehat{i}_s - \beta p \omega \widehat{\lambda}_r^T J \widehat{i}_s \\ & - \beta p [\overline{\omega} - \omega] \widehat{\lambda}_r^T J \widehat{i}_s + \xi_2^T \widehat{i}_s \end{aligned} \quad (18)$$

윗 식을 부등관계로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\widehat{i}_s^T K_s \widehat{i}_s + \|R_r \xi_1^T + \alpha_s \eta \widehat{i}_s^T\| \|\widehat{i}_s\| \\ & + \widehat{R}_r \left\{ \widehat{\xi}_1^T \widehat{i}_s + \frac{1}{g} \dot{\widehat{R}}_r \right\} \\ & - \beta p [\overline{\omega} - \omega] \widehat{\lambda}_r^T J + \omega \widehat{\lambda}_r^T J \|\widehat{i}_s\| + \xi_2^T \widehat{i}_s \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 ξ_1 , $\widehat{\lambda}_r$ 및 \widehat{i}_s 는 모두 지수함수적인 빠르기로 잔여값 D_R 혹은 '0'으로 수렴하는 값이다. 따라서

$$\dot{V} \leq -\widehat{i}_s^T K_s \widehat{i}_s + \varepsilon_{1r} \|\widehat{i}_s\| + \widehat{R}_r \left\{ \widehat{\xi}_1^T \widehat{i}_s + \frac{1}{g} \dot{\widehat{R}}_r \right\} - \beta p [\overline{\omega} - \omega] \widehat{\lambda}_r^T J + \omega \widehat{\lambda}_r^T J \|\widehat{i}_s\| + \xi_2^T \widehat{i}_s \quad (20)$$

와 같이 정리할 수 있다. 여기서, ε_{1r} 는 지수함수적으로 감소하는 값으로서 $\varepsilon_{1r} = \|R_r \xi_1^T + \alpha_s \eta \widehat{i}_s^T\|$ 이다. 위의 식(20)에서 회전자 저항 추정오차 \widehat{R}_r 을 소거하기 위해서 파라미터 적용칙을 아래 식과 같이 구성한다.

$$\dot{\widehat{R}}_r = -g \widehat{\xi}_1^T \widehat{i}_s \quad (21)$$

그러면 식(20)은 아래의 부등 관계를 만족한다.

$$\dot{V} \leq -\widehat{i}_s^T K_s \widehat{i}_s + \varepsilon_{1r} \|\widehat{i}_s\| + \beta p \|\overline{\omega} - \omega\| \widehat{\lambda}_r^T J + \omega \widehat{\lambda}_r^T J \|\widehat{i}_s\| + \xi_2^T \widehat{i}_s \quad (22)$$

시변 이득 $k_\xi > 0$ 에 대해서 스위칭 함수 ξ_2 를 다음과 같이 설계한다.

$$\xi_2 = \begin{cases} k_\xi \widehat{i}_s > 0 \\ -k_\xi \widehat{i}_s < 0 \end{cases} \quad (23)$$

이를 식(22)에 대입해서 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{V} \leq -\widehat{i}_s^T K_s \widehat{i}_s + \varepsilon_{1r} \|\widehat{i}_s\| - \{k_\xi - \beta p \|\overline{\omega} - \omega\| \widehat{\lambda}_r^T J + \omega \widehat{\lambda}_r^T J\} \|\widehat{i}_s\| \quad (24)$$

만일 $k_\xi \geq \beta p \|\overline{\omega} - \omega\| \widehat{\lambda}_r^T J + \omega \widehat{\lambda}_r^T J$ 을 만족하는 시변 이득 $k_\xi > 0$ 를 설계할 수 있다면, 위의 부등식은

$$\dot{V} \leq -\frac{k_\xi}{2} \|\widehat{i}_s\|^2 - \frac{k_\xi}{2} \left\{ \|\widehat{i}_s\| - \frac{\varepsilon_{1r}}{k_\xi} \right\}^2 + \frac{\varepsilon_{1r}^2}{2k_\xi} \quad (25)$$

와 같이 정리할 수 있다. k_s 는 행렬 K_s 의 최소 고유값이다.

ε_{1t} 가 지수 함수적인 빠르기로 감소하는 값이므로 \dot{V} 는 $\|\hat{i}_s\|$ 가 '0'보다 크면 $V(= \frac{1}{2} \hat{i}_s^T \hat{i}_s + \frac{1}{2g} \hat{R}_r^2)$ 가 감소하는 방향으로 변화하게 된다. 그러므로 V 는 $\|\hat{i}_s\|$ 가 '0'이 될 때까지 계속 감소하는 방향으로 변화하게 됨을 알 수 있다. 따라서 $\|\hat{i}_s\|$ 는 ε_t 보다는 느린 속도거나 점근적인 속도로 '0'으로 수렴한다. 결국 V, \dot{V} 가 유계(bounded)이므로 파라미터 추정오차 \hat{R}_r 및 \hat{R}_r , 또한 유계이다. 만일 식(25)의 추정치 벡터 $\hat{\xi}_5$ 가 충분여기조건(Persistently exciting condition)을 만족한다면 추정오차는 시간이 지남에 따라 $\hat{R}_r \rightarrow 0$ 을 만족할 것이다. 만일, $|\omega|$ 의 상한을 매 시간구간 마다 안다면 시변이득 $k_t (> 0)$ 를 설계할 수 있다. 이는 부하토크 $|T_L|$ 의 상한을 알 수 있다면 해결할 수 있다. 즉, 회전자 자속 λ_r 과 고정자 전류 i_s 는 식(11)과 식(4)를 이용하여 추정할 수 있고 관련 파라미터들도 알 수 있다. 따라서 부하토크 $|T_L|$ 의 상한을 안다면 $|\omega|$ 의 매시간 상한을 식(1)로부터 구할 수 있으므로 $k_t \geq \beta p [|\bar{\omega} - \omega| \lambda_r^T J + \omega \lambda_r^T J]$ 을 만족하는 시변이득 $k_t > 0$ 를 설계할 수 있다.

3.4 회전자 속도의 추정

회전자 속도추정 방법은 여러 가지([2]-[10])가 있으나 본 논문에서는 식(8)을 재구성하여 계산식을 얻기로 한다.

3.4-1. $\bar{\omega}$ 의 추정

우선, 식(14)의 회전자 저항 추정모델에서 사용하는 $\bar{\omega}$ 를 구한다. 식(8)의 양변에 $\lambda_r^T J^{-1}$ 을 곱하면 다음과 같다.

$$p \lambda_r^T J^{-1} J \lambda_r = \lambda_r^T J^{-1} \left\{ \frac{d}{dt} \lambda_r + R_r \left(\frac{1}{L_r} \lambda_r - \frac{L_m}{L_r} i_s \right) \right\} \quad (26)$$

윗 식에서 $\lambda_r^T J^{-1} \lambda_r = 0$ 이므로 회전자 속도 ω 에 관해 정리하면 아래의 관계를 얻을 수 있다.

$$\omega = \frac{1}{p \lambda_r^T J^{-1} J \lambda_r} \lambda_r^T J^{-1} \left\{ \frac{d}{dt} \lambda_r - R_r \frac{L_m}{L_r} i_s \right\} \quad (27)$$

위의 식(27)의 관계를 이용해서 회전자 속도 추정 계산치 $\bar{\omega}$ 를 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{\omega} = \frac{1}{p \hat{\lambda}_r^T J^{-1} J \hat{\lambda}_r} \hat{\lambda}_r^T J^{-1} \left\{ \frac{d}{dt} \hat{\lambda}_r - \hat{R}_r \frac{L_m}{L_r} \hat{i}_s \right\} \quad (28)$$

여기서 \hat{R}_r 은 회전자 저항 R_r 의 설정값이다. $\xi_4 = \lambda_r^T J^{-1} \frac{d}{dt} \lambda_r$, $\xi_5 = \lambda_r^T J^{-1} i_s$, $\xi_6 = \lambda_r^T J^{-1} J \lambda_r$ 으로 정의하고 $\bar{\omega} - \omega$ 를 구하면

$$[\bar{\omega} - \omega] - \left[\frac{\hat{\xi}_6}{\xi_6} - 1 \right] = \frac{1}{p \xi_4} \left\{ (\hat{\xi}_4 - \xi_4) - \hat{R}_r \frac{L_m}{L_r} \hat{\xi}_5 + R_r \frac{L_m}{L_r} \xi_5 \right\} \quad (29)$$

이 된다. 여기서 $\hat{\xi}_{4,5,6} \rightarrow \xi_{4,5,6}$ 이므로 다음 관계가 성립한다.

$$|\bar{\omega} - \omega| \leq \left| \frac{L_m}{L_r p \xi_4} \right| \|R_r \xi_5 - \hat{R}_r \hat{\xi}_5\| + \varepsilon_{2t} \leq c_1 |R_r - \hat{R}_r| + \varepsilon_{3t} \quad (30)$$

여기서 $c_1 \geq \left| \frac{L_m \xi_5}{L_r p \xi_4} \right|$ 이고 ε_{2t} 와 ε_{3t} 는 모두 지수함수적으로 '0'으로 수렴하는 항들이다. 식(30)에서 R_r 이 시간에 따라 변하더라도 유계인 값이고, \hat{R}_r 역시 미리 지정하는 상수이므로 $|\bar{\omega} - \omega|$ 의 크기는 $|\hat{R}_r - R_r|$ 에 비례한다.

3.4-2. $\hat{\omega}$ 의 추정

식(28)에서 회전자 저항 설정치 \bar{R}_r 을 추정치 \hat{R}_r 로 대체하면 회전자 속도 추정치 $\hat{\omega}$ 를 얻을 수 있다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{p \hat{\lambda}_r^T J^{-1} J \hat{\lambda}_r} \hat{\lambda}_r^T J^{-1} \left\{ \frac{d}{dt} \hat{\lambda}_r - \hat{R}_r \frac{L_m}{L_r} \hat{i}_s \right\} \quad (31)$$

회전자 속도 추정오차 $\tilde{\omega} (= \hat{\omega} - \omega)$ 에 대한 관계식은 식(31)에서 식(27)을 빼면 구할 수 있다.

$$\omega - \hat{\omega} = \frac{1}{p \xi_4} \left\{ (\xi_1 - \hat{\xi}_1) + \frac{R_r}{L_r} (\xi_2 - L_m \xi_3) - \frac{\hat{R}_r}{L_r} (\hat{\xi}_2 - L_m \hat{\xi}_3) + \hat{\omega} p (\xi_4 - \hat{\xi}_4) \right\} \quad (32)$$

여기서 $\xi_1 = \lambda_r^T J^{-1} \dot{\lambda}_r$, $\xi_2 = \lambda_r^T J^{-1} \lambda_r$, $\xi_3 = \lambda_r^T J^{-1} i_s$, $\xi_4 = \lambda_r^T J^{-1} J \lambda_r$ 이다. ($\hat{\cdot}$)는 해당하는 각각의 변수의 추정치를 의미한다. $\hat{\xi}_k = \xi_k - \hat{\xi}_k (k=1, 2, 3, 4)$ 로 정의하고 식(32)을 다시 정리하면

$$|\omega - \hat{\omega}| = R_r \left| \frac{(\xi_2 - L_m \xi_3)}{p \xi_4 L_r} \right| + |\hat{R}_r| \left| \frac{(\hat{\xi}_2 - L_m \hat{\xi}_3)}{p \xi_4 L_r} \right| + L_r (\xi_1 + \hat{\omega} p \xi_4) \quad (33)$$

와 같이 쓸 수 있다. 그런데 시간이 지남에 따라 $\hat{\xi}_1 \rightarrow \xi_1$, $\hat{\xi}_2 \rightarrow \xi_2$, $\hat{\xi}_3 \rightarrow \xi_3$, $\hat{\xi}_4 \rightarrow \xi_4$ 이 만족된다. 따라서 회전자 속도 추정오차 $\tilde{\omega} (= \omega - \hat{\omega})$ 는 다음의 부등 관계를 만족한다.

$$|\tilde{\omega}| \leq c_2 + \varepsilon_{4t} \quad (34)$$

여기서 ε_{4t} 는 시간이 지남에 따라 지수함수적인 빠르기로 '0'으로

수렴하는 값이다. $\epsilon_{41} = R_r \left| \frac{(\hat{\xi}_2 - L_m \hat{\xi}_3)}{p \hat{\xi}_4 L_r} \right| + L_r (\hat{\xi}_1 + \hat{\omega} p \hat{\xi}_4)$ 이고, $c_2 = |\hat{R}_r| \left| \frac{(\hat{\xi}_2 - L_m \hat{\xi}_3)}{p \hat{\xi}_4 L_r} \right| \geq 0$ 이다. 따라서 회전자 속도 추정오차의 크기는 자속 추정오차에 비례하여 지수함수적인 빠르기로 감소하여, 회전자 저항 추정오차 \hat{R}_r 의 크기에 비례한다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 관측기의 타당성을 알아보기 위해 수치 예를 통한 시뮬레이션을 수행한다. 예로 사용한 유도 전동기 모델의 파라미터는 다음의 표1과 표2에 나타내었다. 전체 시스템 블록선도를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 블록 내에 [ab/dq]는 ab 상에서 dq 상으로의 변환을 의미하며, [dq/123]은 dq 상에서 123 상으로의 변환을 의미한다.

표 1. 유도전동기 파라미터

Table 1. The parameters of induction motor

Rated Power	10 [hp]
Rated Voltage	320 [V LL]
Rated Speed	1740 [rpm]
Number of Poles	4
Stator Resistance (R_s)	0.1695 [Ω]
Rotor Resistance (R_r)	0.161 [Ω]
Mutual Inductance (L_m)	22.77 [mH]
Stator Leakage Inductance (L_s)	1.2 [mH]
Rotor Leakage Inductance (L_r)	1.79 [mH]

표 2 각 제어기 및 관측기 실행 주기

Table 2 The execution period of each controller and observer

Inverter PWM	1.850[msec] : 0.540 kHz
Speed & Vector Controller	0.463[msec] : 2.160 kHz
Speed & R_r Observer	0.100[msec] : 10.00 kHz
Flux Observer	0.010[msec] : 100.0 kHz
SMCO	0.010[msec] : 100.0 kHz

표 3 제안한 관측기 수식

Table 3 The equations of the proposed observers

전류 및 변화율	$\hat{i}_{a1} = \hat{i}_{a2} + k_{a1}(i_a - \hat{i}_{a1}) + \beta_{a1} S_w(i_a - \hat{i}_{a1}) \quad (4-a)$ $\hat{i}_{a2} = k_{a2}(\hat{i}_{a1} - \hat{i}_{a2}) + \beta_{a2} S_w(\hat{i}_{a1} - \hat{i}_{a2})$ $\hat{i}_{b1} = \hat{i}_{b2} + k_{b1}(i_b - \hat{i}_{b1}) + \beta_{b1} S_w(i_b - \hat{i}_{b1}) \quad (4-b)$ $\hat{i}_{b2} = k_{b2}(\hat{i}_{b1} - \hat{i}_{b2}) + \beta_{b2} S_w(\hat{i}_{b1} - \hat{i}_{b2})$
자속	$\frac{d}{dt} \hat{\lambda}_r = \frac{1}{\beta} \left\{ -\alpha_r \eta \hat{i}_s - \frac{d}{dt} \hat{i}_s + \gamma v_s \right\} \quad (11)$
회전자 저항	$\frac{d}{dt} \hat{R}_r = \hat{R}_r \frac{\beta}{L_r} (\hat{\lambda}_r - L_m \hat{i}_s) - \beta p \hat{\omega} \hat{\lambda}_r - \alpha_r \eta \hat{i}_s + \gamma v_s + \xi_1 + \xi_2 \quad (14)$ $\hat{R}_r = -g \hat{\xi}_1^T \hat{i}_s \quad (21)$
회전자 속도	$\hat{\omega} = \frac{\hat{\lambda}_r^T \hat{J}^{-1}}{p \hat{\lambda}_r^T \hat{J}^{-1} \hat{\lambda}_r} \left\{ \frac{d}{dt} \hat{\lambda}_r - \hat{R}_r \frac{L_m}{L_r} \hat{i}_s \right\} \quad (31)$

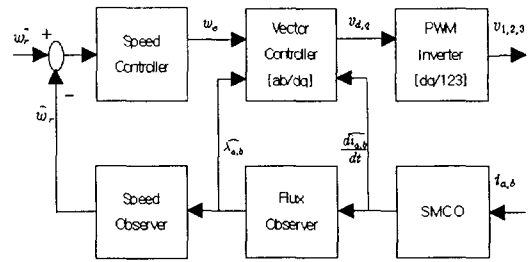


그림 1 전체 시스템 블록선도.

Fig. 1 The block diagram of the overall system.

그림 1의 전체 시스템 블록선도에 나타난 각각의 제어기 및 관측기의 실행 주기는 표 2에 정리하여 표시하였으며, 유도전동기 모델의 미분방정식 연산 주기는 1[usec]로 하였다. 각 제어기 및 관측기의 연산 주기를 달리한 것은 실제 시스템 구현 시 마이크로컴퓨터의 연산부담을 줄이고자 한 것이다. 이에 입각해서 유도전동기 모델의 미분방정식은 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하여 해(solution)를 구했으며, 나머지 제어기 및 관측기는 EULER 방법으로 해를 구했다. 그림 2-1과 그림 2-2는 각각 a, b 상전류 및 추정치를 나타내고 있다. 그림에서는 추정치와 실제 값과의 차이가 구분 안 될 정도로 추정이 잘되고 있음을 알 수 있다. 그림 2-3과 그림 2-4는 각 상 전류의 추정오차를 나타내고 있다. 추정오차의 크기는 $[x 10^{-3}]$ 으로 상전류 크기에 비해 상대적으로 매우 작음을 볼 수 있다. 전류는 본문의 식(4)와 식(5)의 SMCO를 이용해 추정하고 이는 식(11)의 자속 추정을 위한 관측기에서 이용하게 된다.

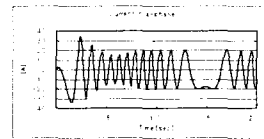


그림 2-1(a). a상전류.
Fig. 2-1(a). Current in a-phase.

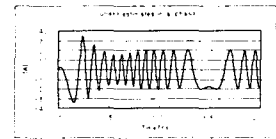


그림 2-1(b). 추정치.
Fig. 2-1(b). Its estimates.

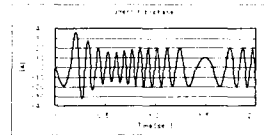


그림 2-2(a). b상전류.
Fig. 2-2(a). Current in b-phase.

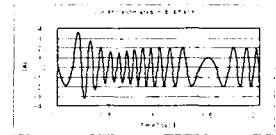


그림 2-2(b). 추정치.
Fig. 2-2(b). Its estimates.

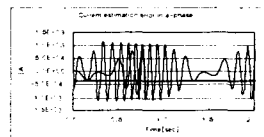


그림 2-3. a상 전류 추정오차.
Fig. 2-3. Current estimation error in a-phase.

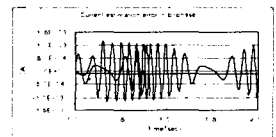


그림 2-4. b상 전류 추정오차.
Fig. 2-4. Current estimation error in b-phase.

아래의 그림 3-1과 3-2는 각각 a상 및 b상 자속과 그 추정치를 나타내고 있다. 그림 3-3과 그림 3-4의 추정오차 결과로부터 자속 추정오차는 거의 '0'에 가까운 것을 볼 수 있다.

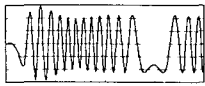


그림 3-1(a). a상 자속.
Fig. 3-1(a). Flux in a-phase.

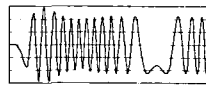


그림 3-1(b) 추정치.
Fig. 3-1(b). Its estimates.

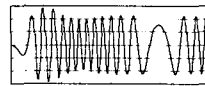


그림 3-2(a). b상 자속.
Fig. 3-2(a). Flux in b-phase.

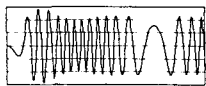


그림 3-2(b) 추정치.
Fig. 3-2(b). Its estimates.

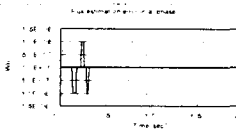


그림 3-3. a상 자속 추정오차.
Fig. 3-3. Flux estimation error in a-phase.

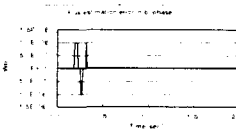


그림 3-4. b상 자속 추정오차.
Fig. 3-4. Flux estimation error in b-phase.

아래의 그림 4는 상전류의 1계 도함수에 대한 추정치 및 추정오차 결과를 보여주고 있다. 그림 4-1과 그림 4-2는 각각 a상 및 b상 전류 1계 도함수 및 그 추정치를 나타내고 있다. 본문의 식(4)와 식(5)로 주어진 SMCO를 이용해서 전류와 함께 추정하게 된다. 전류 1계 도함수의 크기가 $[x 10^{-4}]$ 배 임을 감안하면 각각의 추정오차(그림 4-3, 4-4)는 상대적으로 무시할 수 있을 만큼 작다고 할 수 있다. 식(4)와 식(5)로 주어진 SMCO를 이용하여 추정된 전류 및 그 1계 도함수는 식(11)의 자속추정 관측기에서 이용된다.

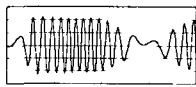


그림 4-1(a). a상전류 미분치.
Fig. 4-1(a). Current derivative in a-phase.

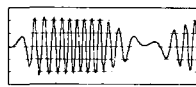


그림 4-1(b) 추정치.
Fig. 4-1(b). Its estimates.

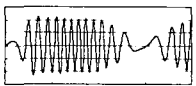


그림 4-2(a). b상전류 미분치.
Fig. 4-2(a). Current derivative in b-phase.

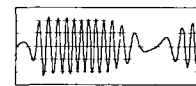


그림 4-2(b) 추정치.
Fig. 4-2(b). Its estimates.



그림 4-3. a 상전류 추정오차.
Fig. 4-3. Current derivative estimation error in a-phase.

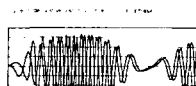


그림 4-4. b 상전류 추정오차.
Fig. 4-4. Current derivative estimation error in b-phase.

다음의 그림 5는 자속의 1계 도함수에 대한 추정 결과이다. 전류의 1계 도함수 추정결과와 마찬가지로 자속도 도함수 추정결과가 양호함을 볼 수 있다. 자속의 1계 도함수는 속도 추정에 직접 사용되는 것은 아니지만 이를 한번 적분한 자속 추정 값이 속도추정에 사용되므로 자속의 1계 도함수 추정이 정확할수록 자속추정 또한 정확하다. 이를 보이기 위해 그림 5에 자속의 1계도함수 추정 결과를 나타내었다.

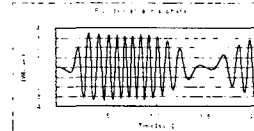


그림 5-1(a). a상 자속 미분치.
Fig. 5-1(a). Flux derivative in a-phase.

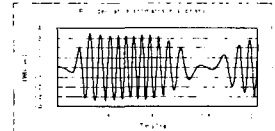


그림 5-1(b). 추정치.
Fig. 5-1(b). Its estimates.

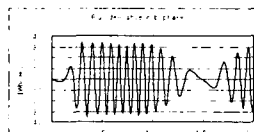


그림 5-2(a). b상 자속 미분치.
Fig. 5-2(a). Flux derivative in b-phase.

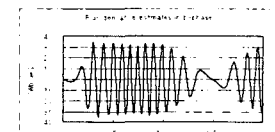


그림 5-2(b). 추정치.
Fig. 5-2(b). Its estimates.

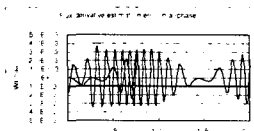


그림 5-3. a상 자속 추정오차.
Fig. 5-3. Flux derivative estimation error in a-phase.

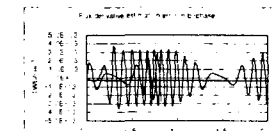


그림 5-4. Flux derivative estimation error in b-phase.

아래의 그림 6은 회전자 저항 및 그 추정치를 보여주고 있다. 회전자 저항은 온도 변화에 따른 시변이지만, 본 논문에서는 시간에 따라 정현파 형태로 변화하는 패턴으로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 실제 온도변화에 따른 저항의 변화 패턴과는 다르지만 본 논문에서 설계한 적응식은 표준형 gradient method이므로 회전자 저항처럼 느리게 변하는 파라미터에 대해서 효과적이다.

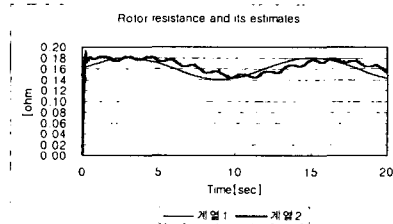


그림 6. 회전자 저항(계열1) 및 추정치(계열2).
Fig. 6. The rotor resistance and its estimates.

아래의 그림 7과 그림 8은 회전자 속도 및 추정치를 나타내고 있다. 기준 속도의 최대 값은 20[rps]로 [rpm]으로 환산하면 1200[rpm]이다. 이에 대한 추정오차의 최대 크기는 약 1.[rps]이다. 회전자 기준속도를 $-20\sin(2\pi/3 t)$ 로 하였다. 정현파 형태의 기준 속도를 설정한 이유는 속도추정이 저속 및 중/고속 구간에서도 잘 이루어짐을 보이기 위함이다. 그림에서 알 수 있듯이 저/중/고속에서 모두 추정이 잘 되고 있음을 알 수 있다.

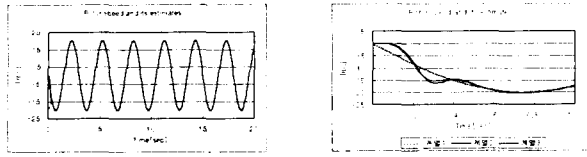


그림 7. 회전자 기준속도(계열1), 실제속도(계열2) 및 추정치(계열3).
Fig. 7. The rotor speed reference, actual speed and its estimates.

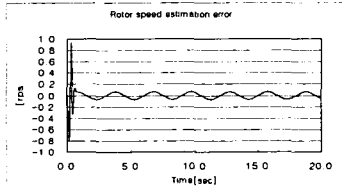


그림 8. 회전자 속도 추정오차.
Fig. 8. The rotor speed estimation error.

4-1. 결과 고찰

시뮬레이션 결과를 보면 전류 및 자속의 시간변화에 대한 추정이 오차가 없이 이루어진다고 볼 수 있다. 그런데 전류·도함수의 절대크기는 유도 전동기의 다른 상태변수들에 비해 상대적으로 매우 크다. 따라서 디지털컴퓨터로 연산을 수행할 때는 컴파일러의 성능 16비트 컴파일러를 사용할 때 보다 32비트 컴파일러를 사용하면 비트연산 시 절 때 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

기존의 적응슬라이딩모드 관측기들[6],[7]의 미분 방정식의 개수는 전류 및 자속 관측기 모델이 4차, 회전자저항 적응칙 1차, 속도 적응칙 1차 등 6차 혹은 7차이다. 반면에 본 논문에서 제안한 관측기의 미분방정식의 개수는 표3에 제시하였듯이 10차이다. 미분방정식의 개수만을 놓고 보면 본 논문에서 제안한 방법이 약 67% 정도의 연산시간이 더 필요하다고 할 수 있다. 이 문제는 표2에 제시한 것과 같이 관측기 및 제어기 각각의 연산주기를 달리 함으로써 어느 정도 완화시킬 수 있을 것이다. 이때 자속 및 전류 도함수 관측기의 연산주기는 마이컴 및 컴파일러의 성능이 허용하는 한 최소한 짧게 하고 나머지 관측기 및 제어기의 연산주기는 최대한 길게 하여 마이컴의 연산부담을 줄일 필요가 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 회전자 자속의 정확한 추정을 위해 관측 대상의 수학적 모델에 대한 어떠한 정보도 필요로 하지 않는 SMCO를 이용하였다. 고정자 전류의 1계 도함수를 SMCO를 이용하여 추정하고, 회전자 자속의 추정은 고정자 전류와 그 1계 도함수 추정치를 이용하여 실현하였다. 본 논문에서 제안하는 회전자 자속 추정 알고리즘은 전동기의 내부 파라미터에 대한 정보가 필요 없는 대신에 고정자 전류의 도함수를 필요로 한다. 적분구간의 크기에 따라 자속 추정치의 정확성이 달라지며 속도 계산치의 정확성 또한 자속 추정치의 적분구간과 밀접한 관계가 있음을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 실험 또는 시뮬레이션을 수행할 경우, 수치해석적 방법으로 미분방정식의 해를 구해야 한다. 예를 들어 실험을 할 경우는 계산시간을 아끼기 위해서 Euler 방법을 많이 사용하고 시뮬레이션을 수행할 때는 RK4 방법 등을 이용해 적분을 하게 된다. 이럴 경우 적분구간의 크기에 따라서 식(11)로부터 구한 자속 추

정치 $\hat{\lambda}_r$ 의 결과가 크게 다를 수 있다. 따라서 만족할 만한 자속 추정치 $\hat{\lambda}_r$ 을 얻기 위해서는 가능한 한 적분 구간을 짧게 해야 한다. 시뮬레이션을 수행할 때는 적분구간을 충분히 짧게 할 수 있지만 실제 시스템을 구현할 경우 적분구간을 충분히 여유를 두고 짧게 하기 위해서는 고속의 고정소수점연산용 DSP를 이용하여 해결해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, Springer, 2nd edition, 1996.
- [2] R. Kim, S. K. Sul, and M. H. Park, "Speed sensorless vector control of induction motors using extended Kalman filter," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 30, pp.1225-1233, Sept./Oct., 1994.
- [3] H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano, "DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 29, pp. 344-348, Mar./Apr. 1993.
- [4] H. Kubota, K. Matsuse, "Speed sensorless field oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 30, pp.1219-1224, Sept./Oct. 1994.
- [5] C. H. Tsai, and H. C. Lu, "Observer-based speed estimation method for sensorless vector control using artificial neural network," *Electric Machines and Power Systems*, vol. 28, pp. 861-873, 2000.
- [6] M. Tursini, R. Petrella, and F. Parasiliti, "Adaptive sliding-mode observer for speed-sensorless control of induction motors," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 36, no. 3, pp.1380-1387, Sept./Oct. 2000.
- [7] J. Maes, and J. A. Melkebeek, "Speed-sensorless direct torque control of induction motors using an adaptive flux observer," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 36, no.3, pp.778-785, May/June 2000.
- [8] B.A. Oliwi, H.K. Khalil and E.G. Strangas, "Robust Speed Control of Induction Motors Using Adaptive Observer," *Proc. of the American Control Conf.*, San Diego, California, June 1999, pp.931-935.
- [9] E.G Strangas, H.K. Khalil, B.A. Oliwi and L. Laubinger, "A Robust Torque Controller for Induction Motors Without Rotor Position Sensor: Analysis and Experimental Results," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 14, no. 4, pp.1448-1458, 1999.
- [10] Teodor Pana, "Sensorless Vector-Controlled Induction Motor Drive System with Rotor Resistance Estimation Using Parallel Processing with Floating Point DSP," *Proc. of the 23rd International Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, vol. 2, Aug. 1997, pp.948-953.
- [11] E.S. Kim, *et al.*, "Cascade Sliding Observer Design For n-th Order Derivatives of Measured Value," *Trans. of KIEE*, vol. 50D, no. 2, pp.80-86, 2001.

저 자 소 개



김응석(金應錫)

1962년 11월 9일생. 1988년 한양대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~1994년 한국과학기술연구원 Post Doc. 1994년~1999년 삼성종합기술원 전문연구원. 1999년~현재 한라대학교 전기전자제어공학부 부교수.

Tel : (033) 760-1248

E-mail : eskim@hit.halla.ac.kr