

미지의 회전자 저항을 갖는 유도기의 적응 자속 관측자 설계

김 도우*, 양 해원*, 윤 지섭**, 박 병석**, 김 흥필***
한양 대학교 전기공학과*, 한국 원자력 연구소**, 경일 대학교***

An Adaptive Flux Observer of Induction Motors with Unknown Rotor Resistance

Do-woo Kim*, Hai-won Yang*, Ji-sup Yoon**, Byung-suk Park**, Hong-phil Kim***
Dept. of Elec. Eng., Hanyang University*, KAERI**, Kyungil University***

Abstract - In this paper, we propose an adaptive flux observer to estimate initial values of rotor fluxes and unknown rotor resistance. The error system between the model of induction motor and a proposed observer is divided as a fast subsystem and a slow one by a singular perturbation system. The fast subsystem is exponentially convergent on a boundary-layer. And the overall error system is reduced to a quasi-steady-state system. The adaptive law for an unknown rotor resistance is designed to stabilize the approximate error system. As computer simulation results show, the proposed adaptive flux observer estimates fast initial values of rotor fluxes and unknown rotor resistance.

1. 서 론

일반적으로 유도전동기는 신뢰성이 높고, 비교적 비용이 저렴하여 산업 현장에서 널리 사용된다. 그러나 유도전동기 제어문제는 매우 까다롭다고 알려져 있는데, 그 원인으로는 비선형 미분방정식으로 기술되는 유도전동기의 동특성, 측정하기 어려운 상태변수(회전자 자속 및 전류), 동작 중에 대폭적으로 변할 수 있는 회전자 저항 등을 들 수 있다. 따라서 부하에서 요구하는 용답특성과 속도를 제공할 수 있는 좋은 성능을 지닌 유도전동기 시스템을 구성하기 위해서는 내부의 비선형 요소인 회전자 저항과 회전자 자속 초기치 추정이 선결과제이다. 참고문헌 [2]에서는 회전자 자속과 비선형 요소인 미지 회전자 저항을 추정하기 위한 자속 관측자를 제시하였다. 그러나, 이 자속 관측자는 두번의 Lyapunov 안정도 증명과 보조변수를 도입하는 매우 복잡한 과정을 거쳐 설계된다. 본 논문에서는 특이접근에 의한 근사기법을 이용하여 구조가 간단하고, 성능이 양호한 자속 관측자 설계 기법을 제시하고자 한다. 먼저 특이접근(singular perturbation)을 이용하여 유도전동기 모델과 자속 관측자 간의 오차상태를 빠른 시스템(fast subsystem)과 느린 시스템(slow subsystem)으로 분리한다. 그리고 매우 작은 상수 ϵ 를 적절하게 설정하여 빠른 시스템이 경계면(boundary layer)에서 지수적으로 수렴하게 하여 오차시스템을 느린 시스템만으로 구성되는 의사정상 상태(quasi-steady-state) 오차시스템으로 근사화한다. 여기에 Lyapunov 직접법을 써서 오차시스템이 안정하도록 하는 적응칙을 유도하고, 자속의 초기값과 미지 회전자 저항을 추정한다.

2절에서는 선형 자기회로를 갖는 비선형 유도기를 모델링하고, 3절에서는 [2]의 관측자를 개선한 적응 자속 관측자를 제시한다. 4절에서는 컴퓨터 모의실험을 통하여 제안한 관측자의 성능을 [2]의 관측자 성능과 비교한다.

2. 유도기의 비선형 모델

선형 자기회로를 갖는 유도전동기의 동특성은 다음과 같이 모델링된다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= (n_p M / J L_r)(\phi_a i_b - \phi_b i_a) - T_L / J \\ \dot{\phi}_a &= -(R_{RN} + \theta) / L_r \phi_a - n_p \omega \phi_b + [(R_{RN} + \theta) M / L_r] i_a \\ \dot{\phi}_b &= -(R_{RN} + \theta) / L_r \phi_b + n_p \omega \phi_a + [(R_{RN} + \theta) M / L_r] i_b \\ \dot{i}_a &= -(R_s / L_s) i_a + [((R_{RN} + \theta) M) / L_s^2 L_r] \phi_a + (n_p M / L_s L_r) \omega \phi_b \\ &\quad - [(R_{RN} + \theta) M^2 / L_s^2 L_r] \phi_b + (1 / L_s) u_a \\ \dot{i}_b &= -(R_s / L_s) i_b + [((R_{RN} + \theta) M) / L_s^2 L_r] \phi_b - (n_p M / L_s L_r) \omega \phi_a \\ &\quad - [(R_{RN} + \theta) M^2 / L_s^2 L_r] \phi_a + (1 / L_s) u_b \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 상태변수 및 파라미터들은 다음과 같다.

ω : 회전자 각속도

ϕ_a, ϕ_b : a상, b상의 회전자 자속

i_a, i_b : a상, b상의 고정자 전류

u_a, u_b : 제어입력 (a상, b상의 고정자 전압)

R_s : 고정자 저항, R_r : 회전자 저항

L_s : 고정자 인덕턴스, L_r : 회전자 인덕턴스

M : 상호 인덕턴스, J : 회전자 관성모멘트

T_L : 부하 토크

$\theta = R_s - R_{RN}$: 미지의 매개변수 (R_{RN} : 회전자 저항의 공칭값)

$\sigma = [1 - M^2 / (L_s L_r)]$, $n_p = 1$ 극수로 가정

간단히 하기위해 $1 / L_s = \alpha$, $M / L_s = \beta$, $1 / L_r = \gamma$, $M / J L_r = \mu$ 로 정의하면, 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= n_p \mu (\phi_a i_b - \phi_b i_a) - T_L / J \\ \dot{\phi}_a &= -(R_{RN} + \theta) \alpha \phi_a - n_p \omega \phi_b + (R_{RN} + \theta) \beta i_b \\ \dot{\phi}_b &= -(R_{RN} + \theta) \alpha \phi_b + n_p \omega \phi_a + (R_{RN} + \theta) \beta i_a \\ \dot{i}_a &= -R_s \gamma i_a + (R_{RN} + \theta) \alpha \beta \gamma \phi_a + n_p \beta \gamma \omega \phi_b - (R_{RN} + \theta) \beta^2 \gamma i_a + \gamma u_a \\ \dot{i}_b &= -R_s \gamma i_b + (R_{RN} + \theta) \alpha \beta \gamma \phi_b - n_p \beta \gamma \omega \phi_a - (R_{RN} + \theta) \beta^2 \gamma i_b + \gamma u_b \end{aligned} \quad (2)$$

(2)식에서 회전자 각속도, a상, b상의 고정자 전류 ω , i_a, i_b 는 측정이 가능하지만, a상, b상의 회전자 자속인 ϕ_a, ϕ_b 는 측정하기가 어렵다. 다음 절에서는 비선형 요소인 미지의 회전자 저항과 회전자 자속의 초기상태를 추정하기 위한 적응자속 관측자를 제시한다.

3. 적응 자속관측자와 의사정상상태 오차시스템의 지수적 안정

이 절에서는 자속추정을 위한 적응자속 관측자를 제시하는데, 자속관측자의 추정오차가 매우 작은 상수값 ϵ 에 의한 빠른 시간 분할의 경계면에서 지수적으로 수렴되도록 하고, 근사화된 의사정상상태 오차시스템이 지수적으로 안정하게 하여 미지의 회전자 저항과 회전자 자속의 초기상태를 추정한다.

3-1. 적응 자속 관측자

유도전동기와 적응 자속 관측자에 대해서 다음과 같은 가정을 한다.

[가정] 회전자 각속도, a상, b상의 고정자 전류의 측정은 가능하다. 관측자 상태변수 $\hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b$ 는 유체이다. 그리고 미지의 회전자 저항 $R_r = R_{rN} + \theta$ 을 제외한 자속 관측자의 모든 매개변수 값은 안다.

미지의 회전자 저항과 회전자 자속의 초기상태를 추정하기 위한 적응 자속 관측자는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\hat{\psi}_a &= -(R_{rN} + \theta)\alpha\hat{\psi}_a - n_p\omega\hat{\psi}_a + (R_{rN} + \theta)\beta i_a \\ \hat{\psi}_b &= -(R_{rN} + \theta)\alpha\hat{\psi}_b + n_p\omega\hat{\psi}_b + (R_{rN} + \theta)\beta i_b \\ \hat{i}_a &= -R_r i_a + (R_{rN} + \theta)\alpha\beta\gamma\hat{\psi}_a + n_p\beta\gamma\omega\hat{\psi}_a - (R_{rN} + \theta)\beta^2 i_a + \gamma u_a + v_a \\ \hat{i}_b &= -R_r i_b + (R_{rN} + \theta)\alpha\beta\gamma\hat{\psi}_b - n_p\beta\gamma\omega\hat{\psi}_b - (R_{rN} + \theta)\beta^2 i_b + \gamma u_b + v_b\end{aligned}\quad (3)$$

여기서

\hat{i}_a, \hat{i}_b : 고정자 전류의 추정치

$\hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b$: 회전자 자속의 추정치

v_a, v_b : 보조 제어입력

θ : 미지의 매개변수 θ 의 추정치

보조 제어입력 v_a, v_b 는 추후에 결정된다. 이 자속관측자의 구조는 기존 관측자의 구조와 동일한 것인데, 본 논문에서는 여기에 특이 섭동(singular perturbation) 시스템을 추가하여 미지의 회전자 저항과 회전자 자속의 초기상태를 보다 빠르게 추정한다.

3-2. 경계면에서의 오차상태의 지수적 수렴

자속관측자 상태변수와 유도기모델 상태변수의 오차상태가 이중 시간 분할(two-time-scale)의 경계면(boundary layer)에서 지수적으로 수렴되도록 하기 위한 추정오차를 정의한다.

$$\begin{aligned}\tilde{\psi}_a &= \psi_a - \hat{\psi}_a, \quad \tilde{\psi}_b = \psi_b - \hat{\psi}_b, \quad \tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta} \\ \tilde{i}_a &= i_a - \hat{i}_a, \quad \tilde{i}_b = i_b - \hat{i}_b\end{aligned}\quad (4)$$

$t_0 \geq 0$ 의 시점에서 고정자 전류 i_a, i_b 의 추정오차와 회전자 자속 $\hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b$ 의 추정오차를 영으로 빠르게 수렴하도록 하기 위하여 (4)식에서 정의한 전류오차를 그림 1의 특이 섭동 시스템에 초기치로 입력한다. 이 때 고정자 전류 추정치는 빠른 시스템(fast subsystem)으로, 회전자 자속의 추정치는 느린 시스템(slow subsystem)으로 분리한다. 만일 빠른 시스템이 빠르게 0으로 수렴한다면 고정자 전류가 추정되고, 전체 특이 섭동 시스템은 차수가 줄어 저차시스템이 되고, 회전자 자속을 추정할 수 있다.

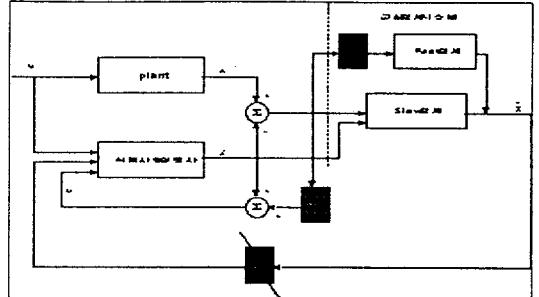


그림 1 적응 자속 관측자

고정자 전류의 추정치를 빠른 시스템으로 분리한다는 것은 식 (5)와 같이 작은 상수 ϵ 를 고정자 전류의 추정치에 곱하는 것이다. 상수 ϵ 은 임의의 설정값이며 오차 시스템을 이중 시간 분할하기 위한 것으로 그 값이 작을수록 빠른 시스템은 더 빠르게 감쇄한다.

$$\epsilon \hat{i}_a = i_a - \hat{i}_a, \quad \epsilon \hat{i}_b = i_b - \hat{i}_b \quad (5)$$

따라서, 특이 섭동 시스템의 동특성은 다음과 같이 된다.

$$\dot{\hat{i}}_a = -R_r \alpha \hat{\psi}_a - n_p \omega \hat{\psi}_b - \theta (\alpha \hat{\psi}_a - \beta i_a) \quad (6)$$

$$\dot{\hat{i}}_b = -R_r \alpha \hat{\psi}_b + n_p \omega \hat{\psi}_a - \theta (\alpha \hat{\psi}_b - \beta i_b) \quad (6)$$

$$\epsilon \dot{\hat{i}}_a = R_r \alpha \beta \gamma \hat{\psi}_a + n_p \beta \gamma \omega \hat{\psi}_b + \theta (\alpha \beta \gamma \hat{\psi}_a - \beta^2 i_a) - v_a \quad (6)$$

$$\epsilon \dot{\hat{i}}_b = R_r \alpha \beta \gamma \hat{\psi}_b - n_p \beta \gamma \omega \hat{\psi}_a + \theta (\alpha \beta \gamma \hat{\psi}_b - \beta^2 i_b) - v_b \quad (6)$$

(6)식에서 작은 상수의 곱으로 구성된 전류 오차 미분식을 이중시간 분할방식으로 이용하기 위해 고정자 전류 i_a, i_b 의 추정치는 $i_a = \hat{i}_a + \tilde{i}_a, i_b = \hat{i}_b + \tilde{i}_b$ 라 하고, (6)의 오차 미분식에 대입한다. 그리고, 양의 상수 k 를 갖는 보조 제어입력 v_a, v_b 를 다음과 같이 정한다.

$$v_a = \theta (\alpha \beta \gamma \hat{\psi}_a - \beta^2 \gamma \hat{i}_a) - \theta \beta^2 \gamma \hat{i}_a + \frac{1}{k} \tilde{i}_a \quad (7)$$

$$v_b = \theta (\alpha \beta \gamma \hat{\psi}_b - \beta^2 \gamma \hat{i}_b) - \theta \beta^2 \gamma \hat{i}_b + \frac{1}{k} \tilde{i}_b \quad (8)$$

따라서, (6)의 오차 미분식에 보조 제어입력을 대입하면 페루프 오차 상태식이 된다.

이중시간분할 시변수 $\tau = (t - t_0)/\epsilon$ 에서 $\epsilon \rightarrow 0$ 이라면 $\tau \rightarrow \infty$ 이 된다. 따라서, $[t_0, t_1]$ 의 시간에서 $\epsilon \rightarrow 0$ 일때 변수 \hat{i}_a, \hat{i}_b 는 $\hat{i}_a = \tilde{i}_a - \overline{\tilde{i}}_a, \hat{i}_b = \tilde{i}_b - \overline{\tilde{i}}_b$ 인 경계면 교정오차 $\overline{\tilde{i}}_a, \overline{\tilde{i}}_b$ 로 지수적 수렴을 한다. 따라서, 페루프 오차 상태식에서 $\epsilon \rightarrow 0$ 으로 정하면, 변수 \hat{i}_a, \hat{i}_b 의 의사정상상태는

$$\overline{\hat{i}}_a = k R_r \alpha \beta \gamma \hat{\psi}_a + k n_p \beta \gamma \omega \hat{\psi}_b \quad (9)$$

$$\overline{\hat{i}}_b = k R_r \alpha \beta \gamma \hat{\psi}_b - k n_p \beta \gamma \omega \hat{\psi}_a \quad (10)$$

이 되고, t_0 에서 $\omega(t_0), \hat{\psi}_a(t_0), \hat{\psi}_b(t_0)$ 가 고정이면 의사정상상태 $\overline{\hat{i}}_a, \overline{\hat{i}}_b$ 는 상수이다. 그리고, 경계면 교정오차 $\overline{\hat{i}}_a = \tilde{i}_a - \overline{\tilde{i}}_a, \overline{\hat{i}}_b = \tilde{i}_b - \overline{\tilde{i}}_b$ 를 시변수 $\tau = (t - t_0)/\epsilon$ 의 빠른 경계면 대하여 미분하고, (9),(10)식의 의사정상상태를 대입하면 경계면 교정은 다음과 같이 지수적으로 수렴한다.

$$\frac{d\overline{\hat{i}}_a}{d\tau} = -\frac{1}{k} \overline{\hat{i}}_a, \quad \frac{d\overline{\hat{i}}_b}{d\tau} = -\frac{1}{k} \overline{\hat{i}}_b \quad (11)$$

(11)식을 통해 $t_1 > t_0$ 에서 시변수 τ 에 의한 경계면(boundary layer)에서 전류오차 \tilde{i}_a, \tilde{i}_b 는 의사 정상상태

전류오차 \tilde{i}_a, \tilde{i}_b 와 같게 된다.

3-3. 의사정상상태 오차시스템의 지수적 안정

3-2절에서와 같이 시간 t_0 에서 $\epsilon \rightarrow 0$ 일 때의 시변수 τ 에 의한 경계면 교정에서 고정자 전류오차 \tilde{i}_a, \tilde{i}_b 가 의사정상상태 오차 \tilde{i}_a, \tilde{i}_b 와 같아짐으로서 자속오차 $\tilde{\phi}_a, \tilde{\phi}_b$ 에 대한 근사 오차 미분식은 다음과 같이 된다.

$$\dot{\tilde{\phi}}_a = -R_a \tilde{\phi}_a - n_a \omega \tilde{\phi}_a - \theta(\alpha \tilde{\phi}_a - \beta \tilde{i}_a) + \theta k(R_a \alpha \beta \gamma \tilde{\phi}_a + k n_a \beta \gamma u \tilde{\phi}_a) \quad (12)$$

$$\dot{\tilde{\phi}}_b = -R_b \tilde{\phi}_b - n_b \omega \tilde{\phi}_b - \theta(\alpha \tilde{\phi}_b - \beta \tilde{i}_b) + \theta k(R_b \alpha \beta \gamma \tilde{\phi}_b - k n_b \beta \gamma u \tilde{\phi}_a) \quad (13)$$

[2]에서는 오차방정식에서 보조오차변수를 도입하였다. 그러나 본 논문에서는 이러한 보조 오차변수를 사용하지 않고 특이설동 개념을 이용하여 오차방정식을 식(12), (13)의 오차 폐루프 시스템으로 근사화하였다. Tikhonov 정리[1]에 의하면 만일 특이설동에 의해 근사화된 의사정상상태 오차시스템이 지수적으로 안정하면 $\epsilon \rightarrow 0$ 의 적절한 작은 상수값에 의한 의사정상상태의 근사식은 T시간에서도 성립한다.

식 (12), (13)의 근사화된 회전자 자속 오차방정식이 지수적으로 안정하도록 하는 미지 상수 θ 의 추정치 $\hat{\theta}$ 에 대한 적응칙을 구하기 위해 Lyapunov 함수 후보 V 를 다음과 같이 설정한다.

$$V = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\delta_1} (\tilde{\phi}_a^2 + \tilde{\phi}_b^2) + \frac{1}{\delta_2} \hat{\theta}^2 \right) > 0 \quad (14)$$

여기서 δ_1, δ_2 는 설계 파라미터이다.

(14)식을 시간 t 에 관해 미분하면

$$\dot{V} = \frac{1}{\delta_1} \tilde{\phi}_a \dot{\tilde{\phi}}_a + \frac{1}{\delta_2} \tilde{\phi}_b \dot{\tilde{\phi}}_b + \frac{1}{\delta_2} \hat{\theta} \dot{\theta} < 0 \quad (15)$$

가 되고 $\dot{\theta} = -\hat{\theta}, R_r = R_{rN} + \hat{\theta}$ 을 대입하여 정리하면 θ 의 추정치에 대한 적응칙은 다음과 같이 구해진다.

$$\dot{\theta} = -\frac{\delta_2}{\delta_1} (\alpha \tilde{\phi}_a \tilde{\phi}_b - \beta \tilde{i}_a \tilde{\phi}_a - k R_a \alpha \beta^2 \gamma \tilde{\phi}_a^2 + \alpha \tilde{\phi}_a \tilde{\phi}_b - \beta \tilde{i}_b \tilde{\phi}_b - k R_b \alpha \beta^2 \gamma \tilde{\phi}_b^2) \quad (16)$$

(16)식의 적응칙을 통해 미지의 회전자 저항을 추정할 수 있다. 그리고, 식 (12), (13)은 $R_{rN} + \hat{\theta} > 0$ 이고, $\forall t \geq 0$

일 때 L_2 신호이므로 $\int_0^T \tilde{V}(t) dt = V(t) - V(0)$ 이 되고

$$\int_0^T (\tilde{\phi}_a^2(t) + \tilde{\phi}_b^2) dt = \frac{\delta_1}{R_a} (V(0) - V(t)) \leq \frac{\delta_1}{R_a} V(0)$$

이 된다. 따라서, Barbalat의 보조정리에 의해

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\phi}_a(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\phi}_b(t) = 0$$

이 되므로, 자속오차 $\tilde{\phi}_a, \tilde{\phi}_b$ 에 대한 근사 의사정상상태 오차방정식 (12), (13)은 지수적으로 안정하다. 따라서, Tikhonov 정리에 의해 t_0 에서의 (12), (13)식의 의사정상상태는 시간 T 에서도 성립한다.

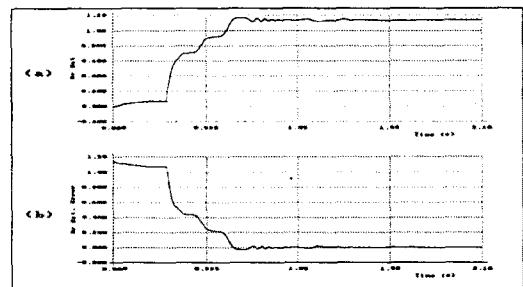
4. 컴퓨터 모의 실험

본 논문에서 제시한 적응 자속관측자를 [2]에서 제시한 관측자와 동일한 조건에서 컴퓨터 모의실험을 통하여 성능을 비교하여 본 결과 미지 회전자 저항과 초기자속이 더 빠르게 추종됨을 확인하였다. 유도기의 각 매개변수 특성값은 표 1과 같다. 관측자의 회전자 자속의 초기조건은

$\hat{\phi}_a(0) = \hat{\phi}_b(0) = 0.001$ [Wb]으로 유도기의 회전자 자속의 초기 조건은 $\phi_a(0) = \phi_b(0) = 0.01$ [Wb]으로 정한다. 그리고 다른 초기 조건은 모두 0으로 설정한다. 본 논문에서 제시한 적응 자속관측자의 이득값은 $k = 100900, \delta_1 = 0.1, \delta_2 = 0.91, \epsilon = 0.3636$ 로 한다.

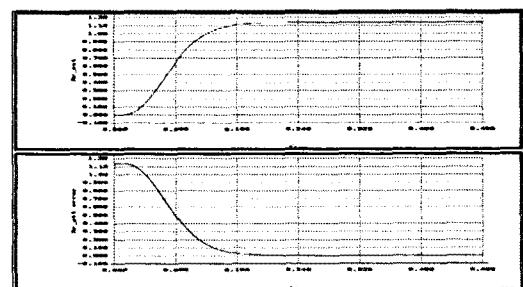
표 1 유도기 매개변수 특성값

정격전력 (W)	200 W	정격토크(Nm)	2 Nm
정격속도(RPM)	1000 rev min ⁻¹	관성 모멘트	0.001
고정자 저항	1.2 Ω	회전자 저항 (nominal value)	1.14 Ω
고정자인덕턴스	0.1 H	회전자인덕턴스	0.1 H
상호 인덕턴스	0.09 H		



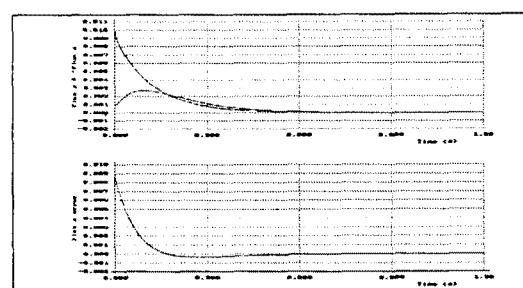
[그림 2] (a) [2]의 적용 관측자에 의한 회전자 저항 추정값

(b) [2]의 회전자 저항 추정 오차



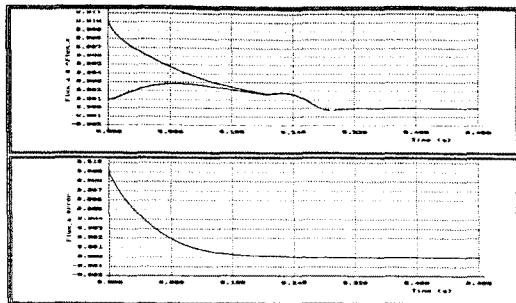
[그림 3] (a) 제시한 적응 자속 관측자에 의한 회전자 저항 추정값

(b) 회전자 저항 추정 오차

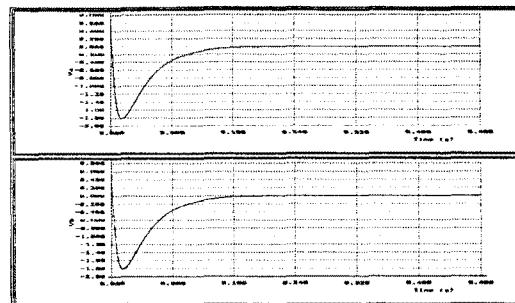


[그림 4] (a) [2]의 적용 관측자에 의한 a상 자속추종

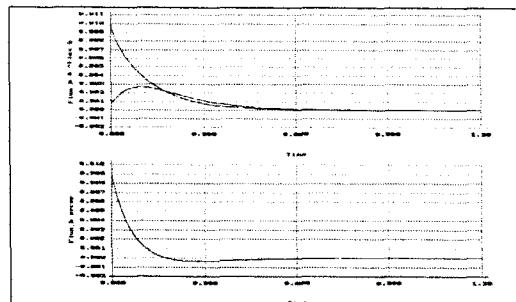
(b) a상 자속추종 오차



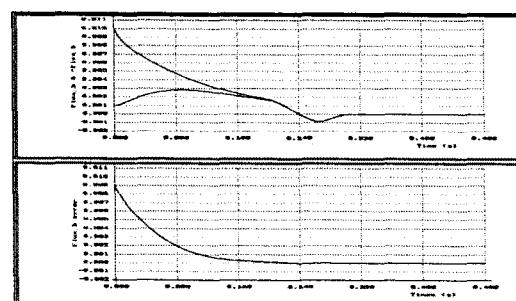
[그림 5](a) 제시한 적용 자속관측자에의한 a상 자속추종
(b) a상 자속추종 오차



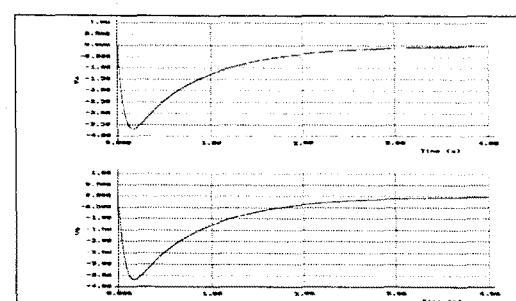
[그림 9](a) 제시한 적용 자속관측자에의한 a상 제어입력
(b) 제시한 적용 자속관측자에의한 b상 제어입력



[그림 6](a) [2]의 적용관측자에의한 b상 자속추종
(b) b상 자속추종 오차



[그림 7](a) [2]의 적용관측자에의한 b상 자속추종
(b) b상 자속추종 오차



[그림 8](a) [2]의 적용관측자에의한 a상 제어입력
(b) [2]의 적용관측자에의한 b상 제어입력

5. 결 론

본 논문에서는 특이설동 개념을 이용하여 유도기의 회전자 자속과 회전자 저항을 빠르게 추정하였다. 전체적인 구조는 기존의 적용관측자에 특이설동 시스템이 조합된 구조이다. 특이설동 시스템에서 비선형 유도기 모델과 제안된 자속 관측자간의 오차시스템을 빠른 시스템과 느린 시스템으로 분리한다. 특이설동 상수 ϵ 를 매우 작게 설정하여 빠른 시스템을 경계면에서 빠르게 지수적으로 수렴하도록 하고, 근사화된 오차방정식이 지수적으로 안정하도록 회전자 저항에 대한 적응률을 설계한다. 컴퓨터 모의 실험 결과를 비교한 결과 본 논문에서 제시한 관측자가 [2]에서 제안한 관측자보다 초기 자속과 미지 회전자 저항을 빠르게 추정함을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1]Peter V. Kokotovic, Hassan K.Khalil and John O'Reilly, "Singular Perturbation Method in Control: Analysis and Design," Academic Press, New York,1986
- [2]Marino ,R., S. Peresada and P.Tomei, "Adaptive observer-based control of induction motors with unknown rotor resistance", Int. Journal of Adaptive,1996. Control and Signal Processing, vol.10, pp.345-363.
- [3]Shuzhi S. Ge, "Adaptive Controller Design for Flexible Joint Manipulator", Automatica, vol.32, pp.273-278,1996.
- [4]Robert E. O'Malley, Jr."Singular Perturbation Methods for Ordinary Differential Equations" Springer-Verlag, New York 1990.
- [5]Peter V. Kokotovic, and Riedle, B. "Stability bounds for slow adaptation: integral manifold approach". Proc. American Control Conf., Seattle, 1986.
- [6]Abed, E, H."A new parameter estimate in singular perturbations". Syst. Control Lett. vol 6,pp.193-198, 1985b.