

비선형 외란 관측기를 이용한 유도전동기의 적응 속도제어기 설계

황영호*, 이선영*, 정기철**, 한병조*, 양해원*
한양대학교*, 대덕대학**

Design of an Adaptive Speed Controller for Induction Motors Using Nonlinear Disturbance Observer

Young-Ho Hwang*, Sun-Young Lee*, Kee-Chull Chung**, Byoung-Jo Han*, Hai-won Yang*
Hanyang University*, Taeduk College**

Abstract - In this paper, we propose a robust adaptive controller for induction motors with uncertainties using nonlinear disturbance observer(NDO). The proposed NDO is applied to estimate the time varying lumped uncertainty which are derived from unknown motor parameters and load torque, but NDO error does not converge to zero since the derivate of lumped uncertainty is not zero. Then the high order neural networks(HONN) is presented to estimate the NDO error such that the rotor speed to converge to a small neighborhood of the desired trajectory. Rotor flux and inverse time constant are estimated by the sliding mode adaptive flux observer. Simulation results are provided to verify the effectiveness of the proposed approach.

1. 서 론

백스테핑 제어[1][2]의 기본개념은 가상제어입력을 사용하여 복잡한 비선형제어 문제를 간단하고 작은 것들로 체계적으로 분해하여 여러 설계단계로 나뉘며, 각 단계에서는 더 쉬운 단계로 분해하여 여러 설계문제를 다루고 다음 설계단계에 대한 기준을 제공함으로써 제어를 반복적으로 설계한다. 또한, 백스테핑제어의 중요한 특징은 적응제어기법과 쉽게 결합되어 시스템의 파라미터 불확실성을 보상할 수 있다는 것이다. 이러한 적응 백스테핑제어 기법을 유도전동기에 적용한 연구도 많이 이루어지고 있다[3]. 모델의 파라미터의 변화나 외부 외란에 대한 강인성을 보장하기 위한 방법으로 NDO를 이용한 제어 기법이 연구되고 있다. 그러나 이러한 연구에서는 전체 불확실 성분의 미분 값이 영이 되어야 한다는 가정이 요구되었다. 최근에 불확실 성분의 미분 값이 영이 되어야 하는 가정이 필요 없는 일반비선형 시스템에서의 NDO[4]가 소개되었다.

본 논문에서는 유도전동기의 속도추종과 동시에 자속추종의 제어 목적을 달성하기 위하여, 변동하기 쉬운 회전자저항을 포함하는 회전자 역시정수와 같은 전기적 불확실성을 보상할 수 있는 적응 자속관측기와 부하토크 외란, 마찰력, 관성모멘트 등과 같은 기계적 불확실성을 추정할 수 있는 NDO를 각각 설계하였다. 그리고 NDO 오차를 HONN을 이용하여 근사화 함으로써 NDO의 오차가 영이 되어야 한다는 가정을 없앨 수 있었다. 모의실험을 통하여 NDO의 성능과 그 추정값을 이용한 강인 제어기의 효과를 보여주었다.

2. 관측기 설계

2.1 유도전동기 모델

유도전동기의 계자지향 모델식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \mu\psi_d i_q - \frac{T_L}{J} - \frac{B}{J}\omega \\ \frac{di_d}{dt} &= -[(\alpha_N + \theta)\beta M + \eta]i_d - n_p\beta\omega\psi_d - n_p\omega i_d - (\alpha_N + \theta)M\frac{i_q i_d}{\psi_d} + \frac{1}{\sigma}u_q \\ \frac{d\psi_d}{dt} &= -(\alpha_N + \theta)\psi_d + (\alpha_N + \theta)M i_d \\ \frac{di_q}{dt} &= -[(\alpha_N + \theta)\beta M + \eta]i_q + (\alpha_N + \theta)\beta\psi_d + n_p\omega i_q \\ &\quad + (\alpha_N + \theta)M\frac{i_q^2}{\psi_d} + \frac{1}{\sigma}u_d \\ \frac{d\rho}{dt} &= n_p\omega + (\alpha_N + \theta)M\frac{i_q}{\psi_d} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, ω, i, ψ, u 는 유도전동기의 회전속도, 고정자전류, 회전자자속, 고정자전압을 나타낸다. 계수는 $\alpha_N = R_r N_s / L_r$, $\beta = M / \sigma L_r$, $\eta = R_s / \sigma$, $\mu = n_p M / J L_r$, $\sigma = L_s (1 - M^2 / L_s L_r)$ 로 정의하였다. 모터 파라미터 n_p 는 극쌍의 수이고, R_s, R_r 는 각각 고정자, 회전자 저항, L_s, L_r 는 각

각 고정자, 회전자의 자기 인덕턴스, M 는 상호 인덕턴스, J 는 회전자의 관성모멘트, T_L 는 부하토크, B 는 마찰계수를 나타낸다.

식(1)의 첫 번째 속도 방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \mu\psi_d i_q - \frac{T_L}{J} - \frac{B}{J}\omega = \mu_N \psi_d i_q + L \quad (2)$$

여기서 $L = \Delta\mu\psi_d i_q - T_L / J - B\omega / J$ 이다. 토크상수는 $\mu = \mu_N + \Delta\mu$ 로 정의하였는데, μ_N 은 토크상수의 공칭치이고, $\Delta\mu$ 는 미지의 토크상수의 불확실성을 나타낸다. L 은 관성모멘트, 부하토크 외란과 마찰력을 모두 포함한 불확실 성분이다.

2.2 자속 관측기 설계

고정자전류 추정오차를 사용한 고정자 좌표계에서의 슬라이딩모드 자속 관측기를 다음과 같이 설계한다.

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\psi}_a}{dt} &= -(\alpha_N + \hat{\theta})\hat{\psi}_a - n_p\omega\hat{\psi}_b + (\alpha_N + \hat{\theta})M\hat{i}_a - \frac{w_{aeq}}{\beta} - \frac{k_o}{\beta} \text{sat}(\tilde{i}_a / \Phi) \\ \frac{d\hat{\psi}_b}{dt} &= n_p\omega\hat{\psi}_a - (\alpha_N + \hat{\theta})\hat{\psi}_b + (\alpha_N + \hat{\theta})M\hat{i}_b - \frac{w_{beq}}{\beta} - \frac{k_o}{\beta} \text{sat}(\tilde{i}_b / \Phi) \\ \frac{d\hat{i}_a}{dt} &= (a_N + \hat{\theta})\beta\hat{i}_a + n_p\beta\omega\hat{\psi}_b - [(a_N + \hat{\theta})\beta M + \eta]i_a + \frac{1}{\sigma}u_a \\ &\quad + v_{aeq} + k_o \text{sat}(\tilde{i}_a / \Phi) \\ \frac{d\hat{i}_b}{dt} &= -n_p\beta\omega\hat{\psi}_a + (a_N + \hat{\theta})\beta\hat{i}_b - [(a_N + \hat{\theta})\beta M + \eta]i_b + \frac{1}{\sigma}u_b \\ &\quad + v_{beq} + k_o \text{sat}(\tilde{i}_b / \Phi) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $(\hat{\psi}_a, \hat{\psi}_b, \hat{i}_a, \hat{i}_b, \hat{\theta})$ 는 $(\psi_a, \psi_b, i_a, i_b, \theta)$ 의 추정치이고, k_o 는 슬라이딩모드의 양의 설계상수이다. 이 때 미지의 회전자 역시정수의 변동 θ 는 유계이며, 추정하는 동안에는 상수인 것으로 가정한다.

다음과 같은 새로운 미지의 오차변수를 도입한다.

$$z_a = \tilde{i}_a + \beta\hat{\psi}_a, \quad z_b = \tilde{i}_b + \beta\hat{\psi}_b \quad (4)$$

z_a, z_b 가 미지이므로 그들의 추정치 \hat{z}_a, \hat{z}_b 를 사용하여 등가제어 성분을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} v_{aeq} &= (\alpha_N + \hat{\theta})\hat{z}_a, \quad v_{beq} = (\alpha_N + \hat{\theta})\hat{z}_b \\ w_{aeq} &= (\alpha_N + \hat{\theta})z_a + n_p\omega\hat{i}_b, \quad w_{beq} = (\alpha_N + \hat{\theta})z_b - n_p\omega\hat{i}_a \end{aligned} \quad (5)$$

다음과 같은 $\hat{z}_a, \hat{z}_b, \hat{\theta}$ 에 대한 적응칙을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_a &= \hat{z}_a - \hat{z}_a = \gamma_3 \tilde{z}_a + n_p\omega\tilde{i}_b, \quad \dot{\hat{z}}_b = \hat{z}_b - \hat{z}_b = \gamma_3 \tilde{z}_b - n_p\omega\tilde{i}_a \\ \dot{\hat{\theta}} &= \gamma_2 \{ [\hat{z}_a + \beta(\hat{\psi}_a - M\hat{i}_a)]\tilde{i}_a + [\hat{z}_b + \beta(\hat{\psi}_b - M\hat{i}_b)]\tilde{i}_b \} \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 비선형 외란 관측기 설계

새로운 상태 변수 z 를 다음과 같이 정의한다.

$$z = \hat{L}(w, z) - Gw \quad (7)$$

식(7)을 이용하여 NDO를 다음과 같이 제안한다.

$$\hat{L}(w, z) = z + Gw, \quad \dot{z} = -Gz - G(\mu_N \psi_d i_q + Gw) \quad (8)$$

NDO 오차는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$e_L = L - \hat{L}(w, z) \quad (9)$$

식(9)의 시간에 대한 미분 식은 다음과 같이 유도 된다.

$$\dot{e}_L = \dot{L} + [G_z + G(\mu_N \psi_d i_q + G_w) - G\dot{w}] = -e_L + \dot{L} \quad (10)$$

식(10)에서 $G > 0$ 이고 $\dot{L} = 0$ 이면 e_L 은 영으로 수렴한다. 그러나 $\dot{L} \neq 0$ 이므로 e_L 은 영으로 수렴하지 못한다.

식(2)에 대한 상태 관측기를 고려해 보자.

$$\dot{\hat{\omega}} = \mu_N \psi_d i_d + \hat{L}(w, z) + e_L + \zeta(w - \hat{w}) \quad (11)$$

여기서 상태 관측기 이득 $\zeta > 0$ 이다.

상태 관측기 오차($\tilde{\omega}$)와 회전자 속도 출력에 대한 추적 오차(e_ω)는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}, \quad e_\omega = \omega - \omega_r \quad (12)$$

여기서 ω_r 은 기준 속도이다.

e_L 을 근사화하기 위한 최적의 HONN은 다음과 같이 정의된다.

$$e_L = W^T \phi(e_\omega, \tilde{\omega}) + \epsilon \quad (13)$$

여기서 ϵ 은 구성 오차(reconstruction error)이다.

HONN을 통한 e_L 의 근사식은 다음과 같다.

$$\hat{e}_L = \hat{W}^T \phi(e_\omega, \tilde{\omega}) \quad (14)$$

식(14)를 이용하면 불확실 함수 L 은 다음과 같이 표현된다.

$$L = \hat{L}(\omega, z) + e_L = \hat{L}(\omega, z) + \hat{e}_L - \hat{W}^T \phi(e_\omega, \tilde{\omega}) + \epsilon \quad (15)$$

여기서 $\tilde{W} = \hat{W} - W^*$ 이다.

상태 관측기 식(11)은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\hat{\omega}} = \mu_N \psi_d i_q + \hat{L}(\omega, z) + \hat{e}_L + \zeta(\omega - \hat{\omega}) \quad (16)$$

3. 적응 속도 제어기 설계

Step 1) 먼저 제어 목적을 달성하기 위하여 속도 추종오차(e_ω) 및 자속 추종오차(e_ψ)를 다음과 같이 정의한다.

$$e_\omega = \omega - \omega_r, \quad e_\psi = \hat{\psi}_d - \psi_{dr} \quad (17)$$

그 추종값을 사용한 안정화 함수는 다음과 같다.

$$\alpha_\omega = -k_\omega e_\omega + \dot{\omega}_r - \hat{L}(\omega, z) - e_L, \quad \alpha_\psi = -k_\psi e_\psi + \dot{\psi}_{dr} + (\alpha_N + \hat{\theta}) \hat{\psi}_d \quad (18)$$

Step 2) 토크 및 전류(i_d)를 원하는 값으로 제어하기 위해 새로운 오차 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$e_\tau = \mu_N \hat{\psi}_d i_q - \alpha_\omega, \quad e_i = (\alpha_N + \hat{\theta}) M i_d - \alpha_\psi \quad (19)$$

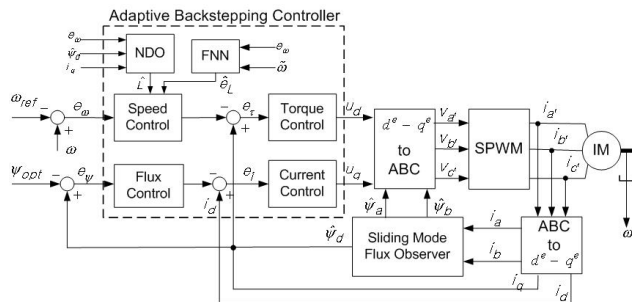
제어칙(control law)을 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$u_q = -\frac{\sigma}{\mu_N \hat{\psi}_d} (e_\omega + k_\tau e_\tau + \xi_1), \quad u_d = -\frac{\sigma}{(\alpha_N + \hat{\theta}) M} (e_\psi + k_i e_i + \xi_2) \quad (20)$$

$$\xi_1 = k_\omega (-k_\omega e_\omega + e_\tau) - \dot{\omega}_r + \hat{L} + \hat{e}_L - \mu_N \hat{\psi}_d n_p \omega (\beta \hat{\psi}_d + i_d) - \mu_N \hat{\psi}_d i_q [(\alpha_N + \hat{\theta})(1 + \beta M) + \eta]$$

$$\xi_2 = k_\psi (-k_\psi e_\psi + e_i) - \dot{\psi}_{dr} - \hat{\theta} (\hat{\psi}_d - M i_d) + (\alpha_N + \hat{\theta}) M (n_p \omega i_q - \eta i_d) + (\alpha_N + \hat{\theta})^2 \left((\hat{\psi}_d - M i_d)(1 + \beta M) + M^2 \frac{k_q^2}{\psi_d} \right)$$

그림 1은 제안한 전체 제어 시스템의 블록선도이다.



<그림 1> 제안한 전체 제어 시스템 블록도

4. 모의실험

기준속도는 0.4초에서 1200[rpm]까지, 3초에 1800[rpm]까지 증가시키고, 기준자속은 처음부터 0.45[Wb]로 시작하여 3초에 0.35[Wb]로 감소시켰다. 부하토크 외란은 2초에서 정격토크 14[Nm]의 약 70%에 해당하는 10[Nm]의 부하토크를 인가하고 3.4초에서 5[Nm]로 감소시켰다.

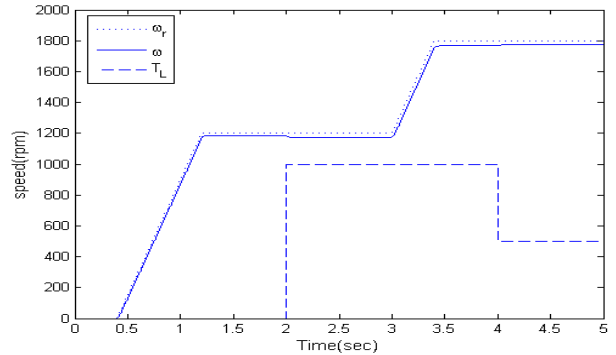
그림 2는 비적응 백스테핑 제어기를 사용한 경우의 속도추종을 보여 주고 있다. 그림 3은 NDO를 포함한 백스테핑 제어기를 사용한 경우이다. 그림 3(a)에서 보이는 바와 같이 그림 2에서 보다 속도추종 오차가 줄어들었음을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 제안된 NDO가 불확실 함수를 매우 정확하게 추정함을 보여주고 있다.

5. 결 론

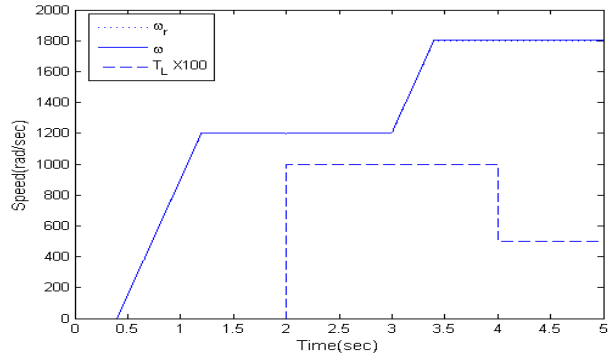
본 논문에서는 불확실성을 갖는 유도전동기의 속도 및 자속 추종의 제어 목적을 달성하기 위하여, 적응 자속관측기와 불확실성을 추정하기

위한 NDO를 설계하여 직접 벡터제어 기법을 이용한 적응 백스테핑 제어기를 제안하였다. 그리고 NDO의 오차를 HONN으로 추정함으로써 NDO의 오차가 임의의 작은 값으로 수렴하게 됨을 보여주었다.

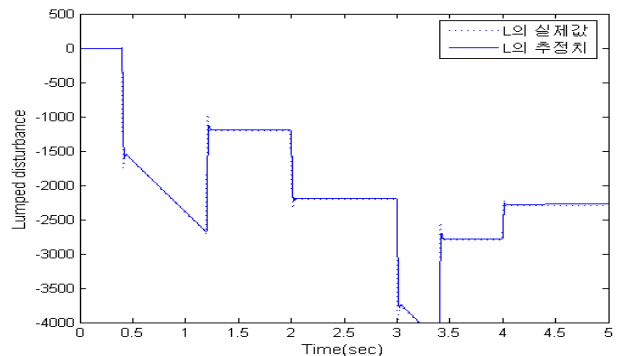
제안한 제어 알고리즘은 회전자 저항의 변동에 대한 전기적 불확실성과 관성모멘트, 부하토크 외란, 마찰력 등과 같은 기계적 불확실성을 실시간으로 추정하여 보상함으로써 모터 파라미터의 변동에 강인함을 보여주었다. 또한 전기적, 기계적 불확실성이 관측기와 제어기에서 별도로 분리되어 추정됨으로써 두 추정치 사이의 간섭이 제거되어 회전자 역시정수를 정확하게 추정할 수 있으므로, 정확한 자속추정 및 벡터 제어기법을 이용한 제어기 설계가 가능하다.



<그림 2> 비적응 백스테핑 제어기를 사용한 경우의 속도추종



(a) 속도추종



(b) 불확실 성분의 적응과정

<그림 3> NDO를 포함한 백스테핑 제어기를 적용한 경우

[참 고 문 헌]

[1] I. Kanellakopoulos, P.T. Krein, and F. Disilvestro, "Nonlinear flux-observer-based control of induction motors," *Proceeding of the American Control Conference*, pp. 1700-1704, 1992.
 [2] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*, John Wiley & Sons, 1995.
 [3] 이은욱, 정기철, 이승학, "신경회로망을 이용한 불확실성을 갖는 유도전동기의 적응 백스테핑 속도제어기 설계," 대한전기학회 논문지, 제 55D권 제 11호, pp. 476-482, 2006.
 [4] 황영호, 한병조, 김홍필, 양해원, "외란 관측기를 이용한 비선형 시스템의 강인 적응제어," 정보 및 제어 학술회의 논문집, pp. 293-294, 2006.