

유도전동기의 효율 최적화를 위한 강인 적응제어

황영호*, 박기광*, 김홍필**, 한홍석***, 양해원*
 한양대학교*, 경일대학교**, 태덕대학***

Robust Adaptive Control for Efficiency Optimization of Induction Motors

Young-Ho Hwang*, Ki-Kwang Park*, Hong-Pil Kim**, Hong-Seok Han***, Hai-Won Yang*
 Hanyang University*, Kyungil University**, Taeduk College***

Abstract - In this paper, a robust adaptive backstepping control is developed for efficiency optimization of induction motors with uncertainties. The proposed control scheme consists of efficiency flux control(EFC) using a sliding mode adaptive flux observer and robust speed control(RSC) using a function approximation for mechanical uncertainties. In EFC, it is important to find the flux reference to minimize power losses of induction motors. Therefore, we proposed the optimal flux reference using the electrical power loss function. The sliding mode flux observer is designed to estimate rotor fluxes and variation of inverse rotor time constant. In RSC, the unknown function approximation technique employs nonlinear disturbance observer(NDO) using fuzzy neural networks(FNNs). The proposed controller guarantees both speed tracking and flux tracking. Simulation results are presented to illustrate the effectiveness of the approaches proposed.

1. 서 론

일반적인 유도전동기의 자속은 최대 토크를 발생하기 위한 정격치로 유지한다. 그래서 불필요한 토크로 인한 에너지 손실이 발생하게 된다. 그러므로 최소 요구되는 토크만큼의 자속 에너지를 공급함으로써 에너지 손실을 줄일 수 있다. 직접벡터제어 방식은 유도전동기의 자속을 직접 측정하거나 자속관측기를 이용하여 제어를 구성한다. 그러나 일반적으로 자속을 직접 측정하는 것은 매우 어려움으로 대부분 자속관측기를 이용하고 있다. 그러므로 자속관측기에 대하여 깊이 있게 연구되고 있다[1]. [2]은 간접벡터 방식의 유도전동기 효율의 최적화를 위한 적응 퍼지제어기를 소개하고 있다.

본 논문은 유도전동기 효율의 최적화를 위하여 슬라이딩 모드 자속관측기를 기반으로 한 적응 제어를 제안하였다. 최적의 기준자속을 정의함으로써 자속제어를 최적화 하였다. 제안된 슬라이딩 모드 자속관측기는 유도전동기의 속도추종과 동시에 전력효율을 향상시키기 위하여, 변동하기 쉬운 회전자저항을 포함하는 회전자 역시정수와 같은 전기적 불확실성을 추정하였다. 그리고 부하토크 외란, 마찰력, 관성모멘트 등과 같은 기계적 불확실성은 NDO를 이용하여 보상하였다.

2. 본 론

2.1 유도전동기의 수학적 모델[3]

유도전동기의 계자지향 모델식은 다음과 같다.

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

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

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

여기서 $L = \Delta\mu\psi_d \dot{i}_q - T_L / J - B / J$ 이다. 토크상수는 $\mu = \mu_N + \Delta\mu$ 로

정의하였는데, μ_N 은 공칭치이고, $\Delta\mu$ 는 미지의 불확실성을 나타낸다. L 은 관성모멘트, 부하토크와 마찰력을 모두 포함한 불확실 성분이다.

2.2 최적의 기준자속 설계[4]

유도전동기의 전체 손실 성분은 다음과 같다.

$$P_{loss} = P_{cus} + P_{cur} + P_{fe} \quad (3)$$

여기서 $P_{cus} = R_s(i_q^2 + i_d^2)$, $P_{cur} = R_r(i_q^2 + i_d^2)$ 는 각각 고정자, 회전자동 손이고 $P_{fe} = \omega_e^2 / R_{fe}$ 은 철손이다. 식(3)은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{loss} = (a_1 + a_2\omega^2)\psi_d^2 + a_3\frac{T_e^2}{\psi_d^2} \quad (4)$$

여기서 $a_1 = R_s / M^2$, $a_2 = 1 / (R_r + R_{fe})$, $a_3 = \frac{L_r^2}{n_p^2 M^2} (R_s + \frac{R_r R_{fe}}{R_r + R_{fe}})$ 이다. 모터 전체의 효율은 다음과 같이 정의 된다.

$$\epsilon = \frac{\omega T_e}{P_{loss} + \omega T_e} = \frac{\omega T_e}{(a_1 + a_2\omega^2)\psi_d^2 + a_3\frac{T_e^2}{\psi_d^2} + \omega T_e} \quad (5)$$

식(4)부터 효율을 최대도 만드는 최적의 기준자속은 다음과 같이 정의 된다.

$$\psi_d^* = \psi_{opt} = \sqrt{\frac{a_3}{a_1 + a_2\omega^2}} T_e \quad (6)$$

ψ_{opt} 은 토크 T_e 와 속도 ω 에 대한 함수이다.

2.3 자속 관측기 설계

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

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\psi}_a}{dt} &= -(\alpha_N + \hat{\theta})\hat{\psi}_a - n_p\omega\hat{\psi}_b + (\alpha_N + \hat{\theta})M\hat{i}_a - \frac{w_{aeq}}{\beta} - \frac{k_o}{\beta} \text{sat}(\tilde{i}_a / \Phi) \\ \frac{d\hat{\psi}_b}{dt} &= n_p\omega\hat{\psi}_a - (\alpha_N + \hat{\theta})\hat{\psi}_b + (\alpha_N + \hat{\theta})M\hat{i}_b - \frac{w_{beq}}{\beta} - \frac{k_o}{\beta} \text{sat}(\tilde{i}_b / \Phi) \\ \frac{d\hat{i}_a}{dt} &= (\alpha_N + \hat{\theta})\beta\hat{\psi}_a + n_p\beta\omega\hat{\psi}_b - [(a_N + \hat{\theta})\beta M + \eta]i_a + \frac{1}{\sigma}u_a \\ &\quad + v_{aeq} + k_o \text{sat}(\tilde{i}_a / \Phi) \\ \frac{d\hat{i}_b}{dt} &= -n_p\beta\omega\hat{\psi}_a + (a_N + \hat{\theta})\beta\hat{\psi}_b - [(a_N + \hat{\theta})\beta M + \eta]i_b + \frac{1}{\sigma}u_b \\ &\quad + v_{beq} + k_o \text{sat}(\tilde{i}_b / \Phi) \end{aligned} \quad (7)$$

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.

다음과 같은 새로운 미지의 오차변수를 도입한다.

$$z_a = \tilde{i}_a + \beta\hat{\psi}_a, \quad z_b = \tilde{i}_b + \beta\hat{\psi}_b \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} v_{aeq} &= (\alpha_N + \hat{\theta})\hat{z}_a, \quad v_{beq} = (\alpha_N + \hat{\theta})\hat{z}_b \\ w_{aeq} &= (\alpha_N + \hat{\theta})\hat{z}_a + n_p\omega\hat{i}_b, \quad w_{beq} = (\alpha_N + \hat{\theta})\hat{z}_b - n_p\omega\hat{i}_a \end{aligned} \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}}_a &= \dot{z}_a - \dot{z}_a = \gamma_3 \tilde{i}_a + n_p\omega\tilde{i}_b, \quad \dot{\hat{z}}_b = \dot{z}_b - \dot{z}_b = \gamma_3 \tilde{i}_b - n_p\omega\tilde{i}_a \\ \dot{\hat{\theta}} &= \gamma_2 \{ [\hat{z}_a + \beta(\hat{\psi}_a - M\hat{i}_a)]\tilde{i}_a + [\hat{z}_b + \beta(\hat{\psi}_b - M\hat{i}_b)]\tilde{i}_b \} \end{aligned} \quad (10)$$

2.4 비선형 외란 관측기 설계

새로운 상태 변수 z 를 다음과 같이 정의한다.

$$z = \hat{L}(\omega, z) - G\omega \quad (11)$$

식(11)을 이용하여 NDO를 다음과 같이 제안한다.

$$\hat{L}(\omega, z) = z + G\omega, \quad \dot{z} = -Gz - G(\mu_N \psi_d i_q + G\omega) \quad (12)$$

NDO 오차는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$e_L = L - \hat{L}(\omega, z) \quad (13)$$

식(13)의 시간에 대한 미분 식은 다음과 같이 유도 된다.

$$\dot{e}_L = \dot{L} + [G_z + G(\mu_N \psi_d i_q + G\omega) - G\dot{\omega}] = -e_L + \dot{L} \quad (14)$$

식(14)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.

$$\dot{\hat{\omega}} = \mu_N \psi_d i_q + \hat{L}(\omega, z) + e_L + \zeta(\omega - \hat{\omega}) \quad (15)$$

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.

$$\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}, \quad e_\omega = \omega - \omega_r \quad (16)$$

여기서 ω_r 은 기준 속도이다.

e_L 을 근사화하기 위한 최적의 FNN은 다음과 같이 정의된다.

$$e_L = W^T \phi(e_\omega, \tilde{\omega}) + \epsilon \quad (17)$$

여기서 ϵ 은 구성 오차(reconstruction error)이다.

HONN을 통한 e_L 의 근사식은 다음과 같다.

$$\hat{e}_L = \hat{W}^T \phi(e_\omega, \tilde{\omega}) \quad (18)$$

식(18)을 이용하면 불확실 함수 L 은 다음과 같이 표현된다.

$$L = \hat{L}(\omega, z) + e_L = \hat{L}(\omega, z) + \hat{e}_L - \hat{W}^T \phi(e_\omega, \tilde{\omega}) + \epsilon \quad (19)$$

여기서 $\tilde{W} = \hat{W} - W^*$ 이다.

상태 관측기 식(15)은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\hat{\omega}} = \mu_N \psi_d i_q + \hat{L}(\omega, z) + \hat{e}_L + \zeta(\omega - \hat{\omega}) \quad (20)$$

2.4 최적 적응제어기 설계

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

$$e_\omega = \omega - \omega_r, \quad e_\psi = \hat{\psi}_d - \psi_{opt} \quad (21)$$

그 추정값을 사용한 안정화 함수는 다음과 같다.

$$\alpha_\omega = -k_\omega e_\omega + \dot{\omega}_r - \hat{L}(\omega, z) - \hat{e}_L, \quad \alpha_\psi = -k_\psi e_\psi + \dot{\psi}_{dr} + (\alpha_N + \hat{\theta}) \hat{\psi}_d \quad (22)$$

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

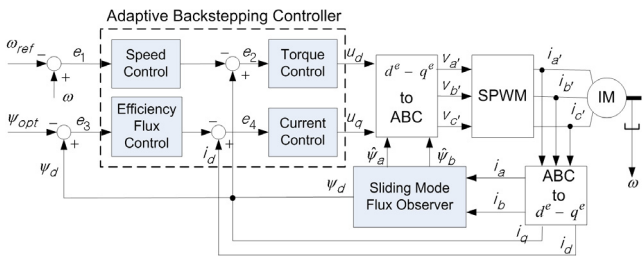
$$e_\tau = \mu_N \hat{\psi}_d i_q - \alpha_\omega, \quad e_i = (\alpha_N + \hat{\theta}) M i_d - \alpha_\psi \quad (23)$$

제어칙(control law)을 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$u_q = -\frac{\sigma}{\mu_N \hat{\psi}_d} (e_\omega + k_\tau e_\tau + \xi_1), \quad u_d = -\frac{\sigma}{(\alpha_N + \hat{\theta}) M} (e_\psi + k_i e_i + \xi_2) \quad (24)$$

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

$$\xi_2 = k_\psi (-k_\psi e_\psi + e_i) - \ddot{\psi}_{dr} - \hat{\theta} (\hat{\psi}_d - M i_d) + (\alpha_N + \hat{\theta}) M (n_p \omega i_q - \eta i_d) + (\alpha_N + \hat{\theta})^2 ((\hat{\psi}_d - M i_d)(1 + \beta M) + M^2 i_q^2 / \hat{\psi}_d)$$

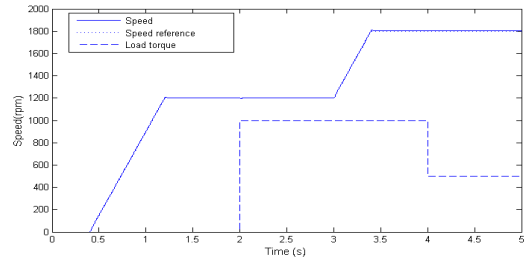


〈그림 1〉 제안된 전체 시스템 블록도

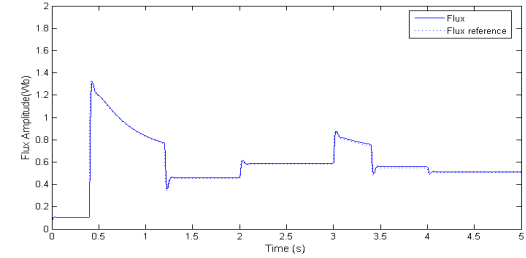
3. 모의 실험

본 모의 실험에서는 제안한 슬라이딩모드 자속관측기와 NDO를 이용한 효율의 최적화를 위한 적응제어기의 타당성을 입증하고 성능을 비교하고자 한다. 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 2(b)는 최적의 기준자속에 대한 슬라이딩 모드 자속관측기의

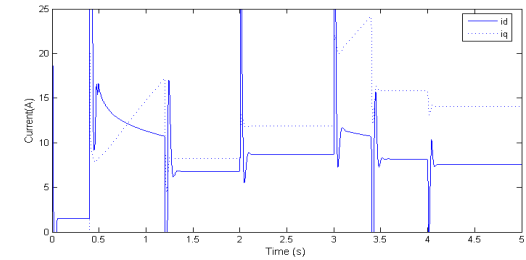
추적 성능을 보여주고 있다. 그림 2(c)는 최적의 기준자속을 적용하였을 경우 d-q축에 인가되는 전류를 나타내고 있다. 그리고 그림 2(d) 제안된 NDO가 불확실 함수를 매우 정확하게 추정함을 보여주고 있다.



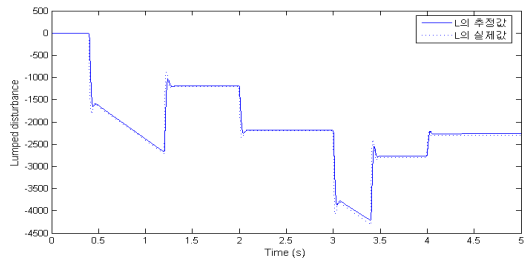
(a) 속도 추종 및 부하토크



(b) 최적기준자속 추종



(c) d-q축 입력 전류



(d) 불확실 성분 추정

〈그림 2〉 제안된 EFC와 RSC를 적용한 경우

4. 결 론

본 논문에서는 유도전동기 효율의 최적화를 위한 적응 제어기를 제안하였다. 자속을 최적화하기 위하여 최적 기준자속을 정의하고 그 기준자속을 정확하게 추적 할 수 있는 슬라이딩 모드 자속관측기와 기계적 불확실성을 추정할 수 있는 NDO를 제안하였다. 또한 제안된 자속관측기와 NDO를 적용 백스테핑 제어기에 이용함으로써 시스템의 불확실성에 대한 강인함을 보여주었다.

[참고 문헌]

- [1] R. Marino, S. Peresada and P. Tomei, "Adaptive observer-based control of induction motors with unknown rotor resistance", Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 10, pp. 346-363, 1996.
- [2] D. A. Souza, W. C. P. A. Filho and G. C. D. Sousa, "Adaptive fuzzy controller for efficiency optimization of induction motors", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 54, no. 4, pp. 2157-2164, 2007.
- [3] R. Marino, S. Peresada, and P. Valigi, "Adaptive input-output linearization control of induction motor," IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 38, pp. 208-221, 1993.
- [4] S. Vaez-Zadeh, F. Hendi, "A continuous optimization controller for induction motor drives", Energy Conversion and Management, no. 46, pp. 701-713, 2005.