

Hybrid-PI 제어기를 이용한 유도전동기의 고성능 제어

High performance Control of Induction Motor using Hybrid-PI Controller

최정식*, 고재섭*, 김길봉*, 정동화**
 (Jung-Sik Choi, Jae-Sub Ko, Kil-Bong Kim, Dong-Hwa Chung)

Abstract - This paper presents Hybrid-PI controller of induction motor drive using fuzzy control. In general, PI controller in computer numerically controlled machine process fixed gain. They may perform well under some operating conditions, but not all. To increase the robustness, fixed gain PI controller, Hybrid-PI controller proposes a new method based self tuning PI controller.

Hybrid-PI controller is developed to minimize overshoot and settling time following sudden parameter changes such as speed, load torque, inertia, rotor resistance and self inductance. The results on a speed controller of induction motor are presented to show the effectiveness of the proposed gain tuner. And this controller is better than the fixed gains one in terms of robustness, even under great variations of operating conditions and load disturbance.

Key Words : induction motor drive, fuzzy control, Hybrid-PI controller, fuzzy self tuning PI controller

1. 서 론

산업계에서는 최근에도 유도전동기의 드라이브 시스템을 제어할 경우에 일반적으로 종래의 PI 제어기를 많이 사용하고 있다.[1]-[2] 이는 PI 제어기가 간단하게 구현할 수 있고 파라미터와 시스템의 응답설정 사이에 존재하는 관계가 명확하기 때문이다.[2] PI 속도 제어기는 간접벡터에 의해 유도전동기를 제어할 경우에 부하 인가, 관성 증가 및 회전자 저항의 변화 등으로 인한 고성능 및 강인성에 주로 취약점으로 나타난다.[4]

본 논문에서는 퍼지제어를 이용하여 유도전동기의 드라이브 시스템의 속도제어를 위하여 Hybrid-PI 제어기를 제시한다. 본 논문에서 제시한 Hybrid-PI 제어기를 종래에 많이 사용되었던 PI 제어기와 성능을 비교한다. 속도, 부하토크, 관성, 회전자 저항 및 자기 인덕턴스 등 다양한 파라미터의 변동에도 강인성 및 고성능 제어가 가능한 Hybrid-PI 제어기의 양호한 성능을 확인한다. 다음은 ANN을 이용하여 유도전동기 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다. 2층 구조를 가진 신경회로망에 BPA(Back Propagation Algorithm)를 적용하여 유도전동기 드라이브의 속도를 추정한다. 추정속도의 타당성을 입증하기 위하여 시스템을 구성하여 제어특성을 분석한다. 그리고 추정된 속도를 지령속도와 비교하여 전류제어와 공간벡터 PWM을 통하여 유도전동기의 속도를 제어한다. 본 연구에서 제시한 알고리즘의 성능과 추정특성을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. 유도전동기의 모델링

SV(Space Vector) PWM 인버터에 의해 구동되는 벡터제

자자 소개

* 최정식 : 順天大學 電氣工學科 碩士課程

* 고재섭 : 順天大學 電氣工學科 碩士課程

* 김길봉 : 順天大學 電氣工學科 碩士課程

** 정동화 : 順天大學 電氣工學科 正教授 · 工博

어 유도전동기의 속도제어 방식은 그림 1과 같다.

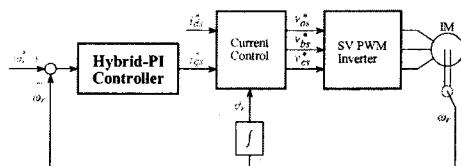


그림 1 속도제어를 위한 벡터제어 유도전동기의 블록도
 Fig. 1 Block diagram of vector controlled induction motor for speed control

유도전동기의 동특성은 동기축 (d, q)에서 비선형 미분 방정식으로 표현할 수 있다.[5]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ \phi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} v_s = Ax + Bv_s \quad (1)$$

$$i_s = Cx \quad (2)$$

여기서,

$$\tau_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (3)$$

$$i_s = [i_{ds} \quad i_{qs}]^T$$

$$\phi_r = [\phi_{dr} \quad \phi_{qr}]^T$$

$$v_s = [v_{ds} \quad v_{qs}]^T \quad (4)$$

$$A_{11} = \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{1}{\tau_r} \right) I = a_{r11} I$$

$$A_{12} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \left(\frac{1}{\tau_r} I - \omega_r J \right) = a_{r12} I + a_{i12} J$$

$$A_{21} = \frac{L_m}{\tau_r} I = a_{r21} I$$

$$A_{22} = -\frac{1}{\tau_r} I + \omega_r J = a_{r22} I + a_{i22} J \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_1 = \frac{1}{\sigma L_s} \mathbf{I} = b_1 \mathbf{I}, \quad \mathbf{C} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}]$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ 이다.

드라이브의 기계적인 모델링은 다음 식과 같다.

$$p\omega_r = \frac{1}{J}(-B\omega_r + T_e - T_L) \quad (7)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (8)$$

3. Hybrid-PI 제어기

간접 벡터제어로 구동되는 유도전동기의 속도제어를 위한 Hybrid-PI 제어기의 설계는 그림 2와 같다.

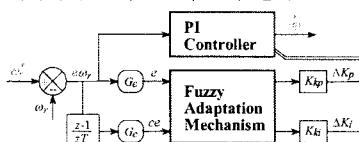


그림 2 Hybrid-PI 제어기의 구조

Fig. 2 The structure of Hybrid-PI controller

PI 제어기의 두 개의 이득이 잘 알려진 종래의 방법을 이용하여 초기화된다. 그러나 이 이득은 정격 동작조건에서 유도전동기의 추정모델에 의존한다.[3]

PI 제어기의 두 개의 이득을 동조하기 위한 퍼지 알고리즘은 파라미터가 변동할 경우에 양호한 성능을 유지하기 위하여 사용한다. 이는 ΔK_p 와 ΔK_i 를 발생시키기 위하여 퍼지 룰을 사용한다. 이 룰의 설계는 정량적인 지식에 기초하며 여러 동작조건에서 K_p 와 K_i 의 다양한 값을 위한 종래의 PI 제어기를 해석하여 구한다.

퍼지적용 메카니즘에서 입력은 속도 오차 e 와 속도 오차의 변화 ce 이고 출력은 두 개의 이득 K_p 와 K_i 이다. K_p 와 K_i 를 경신하기 위한 퍼지 룰은 표 1과 표 2에 나타낸다. 퍼지집합은 같은 폭으로 중복된 삼각형 함수를 사용한다.

표 1 이득 K_i 를 경신하기 위한 풀 베이스

Table 1 Rule base to update gain K_i

e_{n0}	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	ZE	NS	NM	NL	NM	NS	ZE
NM	PS	ZE	NS	NM	NS	ZE	PS
NS	PM	PS	ZE	NS	ZE	PS	PM
ZE	PL	PM	PS	ZE	PS	PM	PL
PS	PM	PS	ZE	NS	ZE	PS	PM
PM	PS	ZE	NS	NM	NS	ZE	PS
PL	ZE	NS	NM	NL	NM	NS	ZE

표 2 이득 K_p 를 경신하기 위한 풀 베이스

Table 2 Rule base to update gain K_p

e_{n0}	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL

퍼지 동조기는 두 개의 출력 언어변수의 비퍼지화를 위하여 무게중심법을 사용하여 PI 제어기의 이득의 적절한 변화를 얻는다. 이 두 개의 이득은 다음과 같이 경신한다.

$$K_p = K_p + K_{kp} f_1(e_n, \Delta e_n) \quad (9)$$

$$K_i = K_i + K_{ki} f_2(e_n, \Delta e_n) \quad (10)$$

드라이브의 안정화를 위하여 이득 K_p 와 K_i 는 정상상태에

도달하면 제한하고 지령속도가 변화할 경우에는 초기화한다.

첫 번째는 추론 룰 표에서 이득 K_i 는 속도오차를 정 방향으로 크게 하거나 부 방향일 경우에는 더욱 증가시키고 속도의 오차변화를 정 방향으로 크게 하거나 부 방향일 경우에는 더욱 감소시킨다. 이는 속도의 상승시간이 개선되지만 오버슈트에 의한 속도응답이 지연된다.

두 번째는 이득 K_p 는 오차와 오차변화가 정 방향으로 클 경우에는 증가시키고 부 방향으로 작을 경우에는 감소시킨다. 이는 속도의 오버슈트와 정상상태의 오차를 감소시킨다.

4. ANN에 의한 속도추정

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 최종 추정속도는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta \hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \left\{ \frac{1}{c} [i_{qm}(k) - \hat{i}_{qm}(k)] \hat{i}_{dm}(k-1) \right. \\ &\quad \left. - c [i_{dm}(k) - \hat{i}_{dm}(k)] \hat{i}_{qm}(k-1) \right\} - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 T 는 샘플링 주기를 나타내며 η 는 학습계수이며 학습과정에서 학습율을 나타낸다. 이 계수가 크면 하중 변화가 크다. 실제 구현을 위하여 학습율은 전동이 유발되지 않는 범위에서 큰 값으로 설정한다. 계수 α 는 현재 하중에서 변동하는 과거 하중의 영향을 결정한다.

추정속도를 이용한 회전자 자극의 위치는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_r(k+1) = \hat{\theta}_r(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (12)$$

그림 3은 Hybrid-PI 제어기에 의해 속도를 제어하고 ANN 제어기를 이용하여 속도를 추정할 수 있는 블록도를 나타낸다. ANN에 의해 속도를 추정하고 추정속도와 지령속도를 비교하여 오차를 구하고 그 오차는 Hybrid-PI 제어기에 입력된다. Hybrid-PI 제어기에서 지령 q 축 전류를 구한다. 전류제어에 의하여 지령전압을 구한 다음, SV PWM 인버터를 구동시켜 유도전동기를 제어한다.

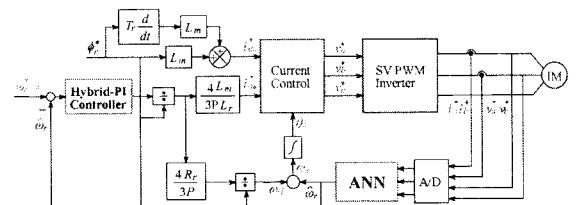


그림 3 Hybrid-PI와 ANN에 의한 유도전동기의 벡터제어 시스템
Fig. 3 Vector control system of induction motor with Hybrid-PI and ANN

5. 시스템의 성능결과

그림 4는 지령속도를 1800[rpm]으로 스텝으로 인가할 경우 종래의 PI 제어기와 본 논문에서 제시한 Hybrid-PI 제어기의 응답특성을 나타낸다. 과도상태에서 K_p 와 K_i 값은 적용 동조하기 때문에 변화하고 있으며 Hybrid-PI 제어기는 종래의 PI 제어기보다 오버슈트, 안정화 시간, 정상 및 과도상태 오차 등 응답특성이 양호하게 나타난다.

그림 5은 정격속도 1800[rpm]으로 운전 중, 0.5~0.8[sec] 동

안 부하토크 $5[N \cdot m]$ 를 인가 할 경우 응답특성을 나타낸다. 동일한 조건에서 부하토크의 변동에도 Hybrid-PI가 PI보다 속도변화가 적게 나타나며 응답특성이 양호하다는 것을 알 수 있다.

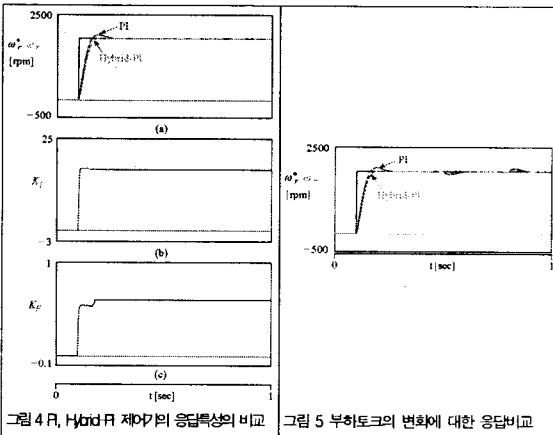


그림 4 PI, Hybrid-PI 제어기의 응답특성의 비교
Fig. 4 The comparison of response characteristics with PI, Hybrid-PI controller

그림 6은 파라미터 변동에 대한 응답 특성을 나타낸다. 그림 6(a)는 관성을 정격의 2배, 그림 6(b)는 회전자 저항을 정격의 2배, 그림 6(c)는 회전자 저항을 정격의 0.5배 그리고 그림 6(d)는 회전자 인덕턴스를 정격의 1.5배로 하였을 경우의 응답특성이다. 전동기의 파라미터 변화에도 Hybrid-PI 제어기가 종래의 PI제어기보다 양호한 응답특성이 나타난다.

그림 7은 그림 5와 같은 조건에서 운전하였을 경우의 응답 특성이다. 그림 7(a)는 실제속도와 추정속도, 그림 7(b)는 실제속도와 추정속도의 오차, 그림 7(c)는 q 축 전류, 그림 7(d)는 발생토크를 나타낸다. 속도 오차가 1% 미만으로 ANN에 의한 추정성능도 양호하게 나타나므로 본 논문의 타당성을 입증 할 수 있다.

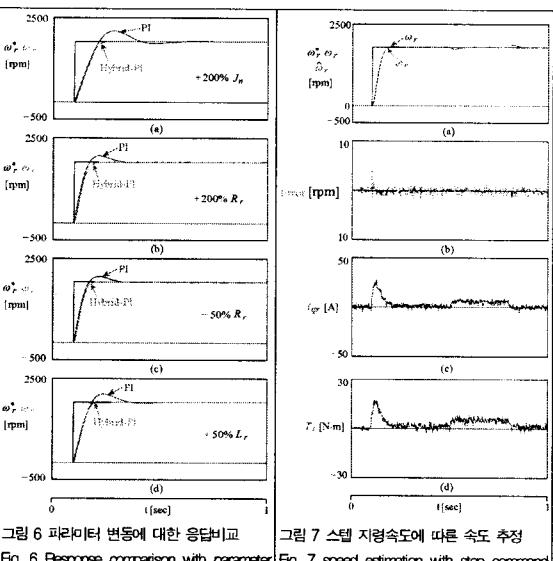


그림 6 파라미터 변동에 대한 응답비교
Fig. 6 Response comparison with parameter changes

6. 결 론

본 논문에서는 유도전동기 드라이브의 강인한 제어를 위하여 퍼지제어를 이용한 유도전동기 드라이브의 Hybrid-PI 제어기를 제시하였다. Hybrid-PI 제어기는 퍼지논리와 종래의 PI 제어기를 혼합한 형태이며 기준 모델을 사용하지 않고 간단한 퍼지논리 적용 메카니즘을 사용하였다. 종래의 PI제어기에서 고정된 이득을 Hybrid-PI 제어기에서는 퍼지 룰베이스를 이용하여 파라미터의 변동에 따라 자동 동조하게 하였다.

Hybrid-PI 제어기를 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하였다. 속도 및 부하토크 변화에서 Hybrid-PI 제어기는 종래의 PI제어기 보다 오버슈트 및 안정화 시간이 양호하게 나타났다. 그리고 관성, 회전자 저항 및 자기 인덕턴스와 같은 파라미터 변동에도 강인성 및 고성능이 나타났으며 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다.

속도와 부하토크의 변화에 대한 ANN에 의한 추종성능도 양호하게 나타났으며 속도 오차가 1[%] 이내로 매우 우수한 추정성능을 보여 주었다.

본 논문에서 제시한 Hybrid-PI 제어기는 장인성과 고성능의 응답특성을 얻을 수 있었고 ANN에 의한 추정성능도 만족할만한 결과를 얻을 수 있었으므로 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

참고문헌

- [1] G. J. Wang, C. T. Fong and K. J. Chang, "Neural network based self tuning PI controller for precise motion control of PMAC motors," IEEE Trans. on IE, vol. 48, no. 2, pp. 408-416, 2001.
- [2] M. Santos and J. M. de la Cruz, "Between fuzzy PID and PID conventional controllers," NAFIPS'96, Berkley, USA, June 1996.
- [3] Z. Ibrahim and E. Levi, "Comparative analysis of fuzzy logic and PI speed control in high performance AC drives using experimental approach," Proc. of IEEE IAS'2000, Rome, Italy, CD-ROM paper 46-3, 2000.
- [4] M. N. Uddin, T. S. Radwan and M. A. Rahman, "Performance of fuzzy logic based indirect vector control for induction motor drive," IEEE Trans. on IA, vol. 38, no. 5, pp. 1219-1225, 2002.
- [5] D. H. Chung, "Power electronics and motor control," Inter Vision Press, 2004.

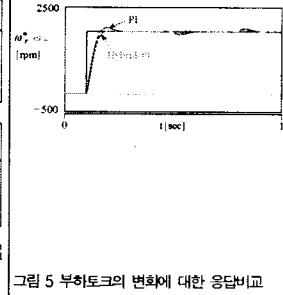


그림 5 부하토크의 변화에 대한 응답비교
Fig. 5 Response comparison with change of load torque

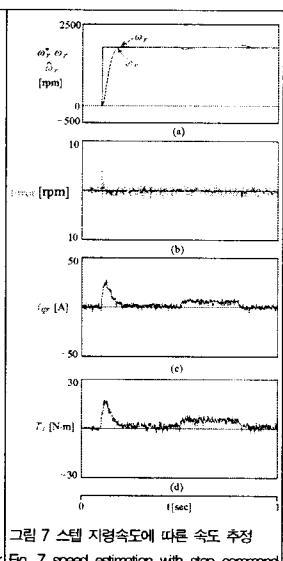


그림 7 스텝 지령속도에 따른 속도 추정
Fig. 7 speed estimation with step command speed