

Fuzzy-Neuro PI 제어를 이용한 IPMSM 드라이브의 고성능 속도제어

고재섭, 최정식, 박기태, 박병상, 정동화
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

High Performance Speed Control of IPMSM Drive using Fuzzy-Neuro PI Controller

Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Ki-Tae Park, Byung-Sang Park, Dong-Hwa Chung
 School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

Abstract - This paper presents Fuzzy-Neuro PI controller of IPMSM drive using fuzzy and neural-network. In general, PI controller in computer numerically controlled machine process fixed gain. To increase the robustness, fixed gain PI controller, Fuzzy-Neuro PI controller proposes a new method based fuzzy and neural-network. Fuzzy-Neuro 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 IPMSM are presented to show the effectiveness of the proposed gain tuner.

1. 서 론

산업 프로세서의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 적응 퍼지제어[1], 파라미터 변동을 고려한 퍼지제어[2], 새로운 퍼지제어[3] 및 적응 FNN(Fuzzy-Neural Network)[4] 등의 연구가 되었다. 이러한 기법들은 종래의 PI 제어를 대체하여 사용하였으며 PI 제어기 이득을 조절하여 양호한 성능을 얻을 수 있는 기법은 제시하지 않았으며 IPMSM 드라이브에는 적용하지 않았다. 본 논문에서는 FAM(Fuzzy Adaptive Mechanism) 제어기와 신경회로망을 이용하여 IPMSM의 드라이브 시스템의 속도제어를 위하여 Fuzzy-Neuro PI 제어를 제시한다. 본 논문에서 제시한 Fuzzy-Neuro PI제어기는 종래에 많이 사용되었던 PI 제어기의 속도, 부하토크, 관성, 회전자 저항 및 자기 인덕턴스 등 다양한 파라미터의 변동에 대한 성능 비교를 통하여 타당성을 입증한다.

2. IPMSM의 모델링

동작특성을 분석하기 위한 IPMSM의 미분 방정식 및 발생토크는 다음과 같다.

$$p i_d = (v_d - R i_d + \omega_r L_q i_q) / L_d \quad (1)$$

$$p i_q = (v_q - R i_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \phi_{af}) / L_q \quad (2)$$

$$p \omega_r = (T_e - T_L - B \omega_r) / J \quad (3)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P [\phi_{af} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

3. Fuzzy-Neuro PI 제어기

3.1 FAM 제어기

신경회로망에 입력되는 HK_p 와 HK_i 를 위한 FAM 제어기의 설계는 그림 1과 같다.

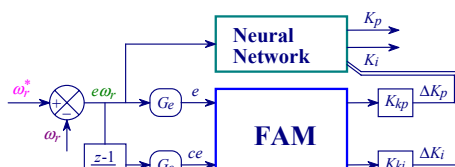


그림 1 Fuzzy-Neuro PI 제어기의 구조

PI 제어기의 두 개의 이득을 동조하기 위한 퍼지 알고리즘은 파라미

터가 변동할 경우에 양호한 성능을 유지하기 위하여 사용한다. 이는 ΔK_p 와 ΔK_i 를 발생시키기 위하여 퍼지 룰을 사용한다.

FAM에서 입력은 속도 오차 e 와 속도 오차의 변화 ce 이고 출력은 두 개의 이득 HK_p 와 HK_i 이다. HK_p 와 HK_i 를 경신하기 위한 퍼지 룰은 표 1과 표 2에 나타난다. 퍼지 집합은 같은 쪽으로 중복된 삼각형 함수를 사한다.

표 1 0득 HK_i 를 경신하기 위한 룰 베이스									표 2 0득 HK_p 를 경신하기 위한 룰 베이스								
$\begin{matrix} e\omega_r \\ ce\omega_r \end{matrix}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL		$\begin{matrix} e\omega_r \\ ce\omega_r \end{matrix}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	
NL	ZE	NS	NM	NL	NM	NS	ZE		NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	
NM	PS	ZE	NS	NM	NS	ZE	PS		NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	
NS	PM	PS	ZE	NS	ZE	PS	PM		NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	
ZE	PL	PM	PS	ZE	PS	PM	PL		ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	
PS	PM	PS	ZE	NS	ZE	PS	PM		PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	
PM	PS	ZE	NS	NM	NS	ZE	PS		PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	
PL	ZE	NS	NM	NL	NM	NS	ZE		PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL	

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

$$HK_p = K_p + K_{kp} f_1(e_n, \Delta e_n) \quad (5)$$

$$HK_i = K_i + K_{ki} f_2(e_n, \Delta e_n) \quad (6)$$

드라이브의 안정화를 위하여 이득 HK_p 와 HK_i 는 정상상태에 도달하면 제한하고 지령속도가 변화할 경우에는 초기화한다.

3. 2 신경회로망에 의한 자기동조 Fuzzy-Neuro PI 제어기

그림 2는 신경회로망에 의한 PI 제어기의 블록도를 나타낸다.

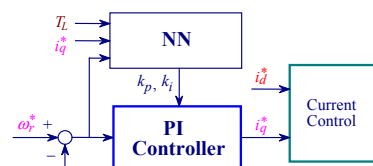


그림 2 신경회로망에 의한 PI 제어기

각 학습 패턴은 $e\omega_r = (\omega_r^* - \omega_r)$, i_q^* , T_L , k_p 및 k_i 의 5개 파라미터가 포함되도록 설계한다. 제시한 시스템에서는 입력은 $e\omega_r$, i_q^* 및 T_L 이며 출력은 k_p 와 k_i 이다. $e\omega_r$, i_q^* 및 T_L 의 구성은 다음과 같다.

$e\omega_r$ 를 0-40[rpm]까지 모두 5개의 동일한 구간으로 나눈다. i_q^* 는 0-1[A]까지 5개의 구간으로 동일하게 나누고 T_L 은 0-0.4[N·m] 까지 5개의 동일한 구간으로 나눈다. 성능지수 F 는 다음 식과 같이 정의한다.

$$F = F(\text{overshoot, rise_time, steady_state_error}) = k_1 \cdot \text{overshoot} + k_2 \cdot \text{rise_time} + k_3 \cdot \text{steady_state_error} \quad (7)$$

각 입력벡터 $e\omega_r$, i_q^* 및 T_L 에 대하여 최적인 k_p 및 k_i 를 구하는 효율적인 방법을 제시한다. k_p 및 k_i 를 결정하는 과정은 다음과 같다.

단계 1) $k_p(k_{pmin} < k_p < k_{pmax})$ 및 $k_i(k_{imin} < k_i < k_{imax})$ 를 각각 7개의 구간으로 나눈다.

단계 2) 각 k_p 의 결정을 위하여 다음 단계가 필요하다.

- $F(t+1) < F(t)$ 의 조건 동안 한 구간에서 k_i 를 점차적으로 증가시킨다.
- $F(t+1) > F(t)$ 의 조건이 검출되면 $F(t+1) > F(t)$ 의 조건까지 1/2 구간까지 점차적으로 k_i 를 점차적으로 감소시킨다.
- $F(t+1) > F(t)$ 의 조건이 다시 검출될 때까지 1/4 구간까지 k_i 를 증가시킨다.
- 선정된 k_i 에 대한 k_{iopt} 는 $k_{iopt} = (k_i(t) + k_i(t+1))/2$ 이다. 선정된 k_p 와 k_{iopt} 에 대한 F_{opt} 는 $F_{opt} = (F(t+1) + F(t))/2$ 이다. 단계 2)를 위한 과정은 그림 3과 같다.

단계 3) 단계 2)에서 구한 모든 k_p 및 k_i 중에서 최소 F_{opt} 을 가지는 최적치를 찾는다.

빠른 응답에서 각 제어과정은 그림 4에서 2 단계로 나눈다. 스위칭 라인 이전에 NN은 매 샘플링 점에서 k_p 및 k_i 를 발생한다. 이는 스위칭 라인 이전에 매 샘플링 구간에서 k_p 및 k_i 는 변한다. 스위칭 라인 후, NN에 의해 발생한 마지막 고정 k_p 및 k_i 는 마지막 단계에서 모든 방법을 이용한다. 스위칭 라인은 다음과 같이 정의한다.

$$\text{switch} = \frac{d_1}{d_2} \quad (8)$$

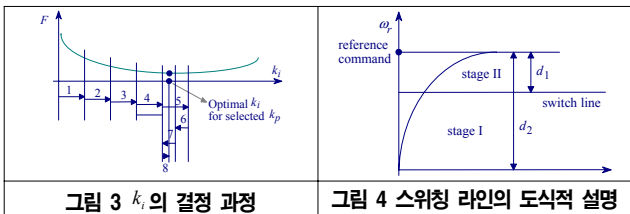


그림 3 k_i 의 결정 과정

그림 4 스위칭 라인의 도식적 설명

그림 5는 본 연구에서 제시한 방식으로 실제속도와 지령속도를 비교하여 그 오차를 Fuzzy-Neuro PI 제어기에 입력한다. Fuzzy-Neuro PI 제어기에서 지령 q 축 전류를 구한다. 전류제어에 의하여 지령전압을 구한 다음, SV PWM 인버터를 구동시켜 IPMSM을 제어한다.

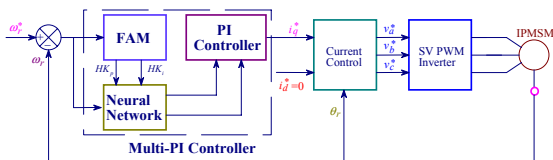


그림 5 제시한 IPMSM의 드라이브 시스템

4. 시스템의 성능결과

그림 6은 0.1[sec]에서 지령속도를 1000[rpm], 0.4[sec]에서 지령속도를 -1500[rpm], 그리고 0.8[sec]에서 지령속도를 0[rpm]으로 속도를 다양하게 변화시켰을 경우의 응답특성이다. 다양한 속도변화에도 Fuzzy-Neuro PI 제어기는 PI 제어기 보다 양호한 성능이 나타난다.

그림 7은 0.1[sec]에서 지령속도를 1800[rpm]를 주고 0.5[sec]에서 부하토크 5[N·m]으로 인가한 후, 0.7[sec]에서 지령속도를 -500[rpm]으로 감소시켰을 때 나타나는 응답특성이다. 속도와 부하 변화에도 Fuzzy-Neuro PI 제어기는 PI 제어기 보다 성능이 양호하게 나타난다.

그림 8은 0.1[sec]에서 지령속도를 1800[rpm], 0.7[sec]에서 부하토크 5[N·m] 인가하고 관성을 정격의 2배로 증가시켰을 경우에 나타나는 응답특성이다.

그림 9는 0.1[sec]에서 지령속도를 1800[rpm], 0.7[sec]에서 부하토크 5[N·m] 인가하고 전기자저항을 정격의 2배로 증가시켰을 경우에 나타나는 응답특성이다. 관성과 전기자저항의 파라미터의 변동이 있을 경우에는 Fuzzy-Neuro PI 제어기의 성능이 더욱 효율을 발휘하며 양호하게 나타난다.

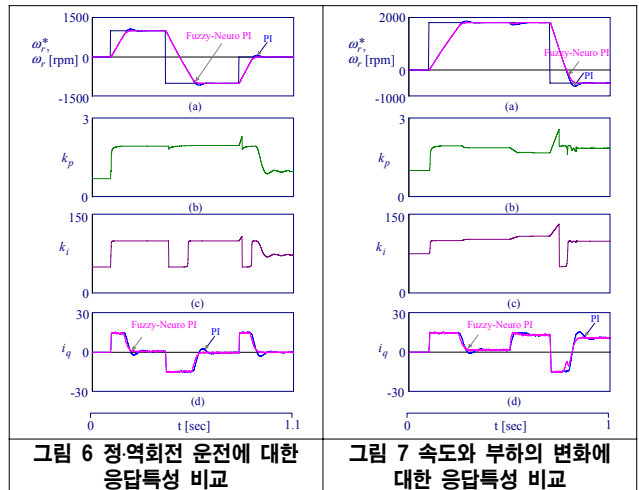


그림 6 정역회전 운전에 대한 응답특성 비교

그림 7 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교

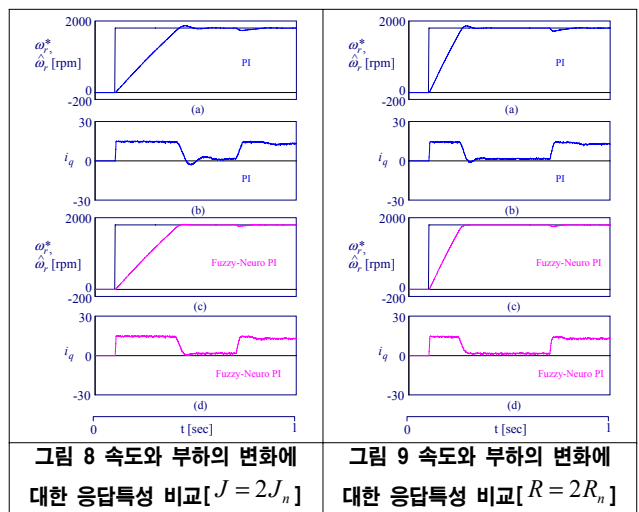


그림 8 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교 [J = 2J_n]

그림 9 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교 [R = 2R_n]

5. 결론

본 논문에서는 IPMSM 드라이브의 고성능 제어를 위하여 신경회로망을 이용하여 Fuzzy-Neuro PI 제어기를 제시하였다. Fuzzy-Neuro PI 제어기는 종래의 고정 이득 PI 제어기의 강인성을 증가시키기 위하여 퍼지제어기와 신경회로망에 기초하여 설계한다. 이 제어기는 부하토크, 지령 q 축 전류 및 속도 오차 등 피드백 동작조건에 따라 퍼지제어기를 통해 1차 이득값을 출력하고 퍼지제어기의 이득값은 양호하게 학습된 신경회로망을 이용하여 적합한 이득을 제공한다.

Fuzzy-Neuro PI 제어기를 IPMSM의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하였다. 속도 및 부하토크 변화에서 Fuzzy-Neuro PI 제어기는 종래의 PI 제어기 보다 오버슈트, 상승시간 및 안정화 시간이 양호하게 나타났다. 그리고 회전자 저항 및 관성 등과 같은 파라미터 변동에도 강인성 및 고성능이 나타났으며 양호한 응답특성을 얻을 수 있었으므로 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] H. G. Lee, J. C. Lee and D. H. Chung, "New fuzzy controller for high performance of induction motor drive," The journal of KIIS, vol. 17, no. 4, pp. 87-93, 2002.
- [2] H. G. Lee, J. C. Lee and D. H. Chung, "Adaptive FNN controller for speed control of IPMSM drive," The Trans. of KIEE, vol. 41-SC, no. 3, pp. 39-46, 2004.
- [3] J. C. Lee, H. G. Lee, Y. S. Lee and S. M. Nam, D. H. Chung, "Speed estimation and control of induction motor drive using hybrid intelligent control," International Conference ICPE'04, no. 3, pp. 181-185, 2004.
- [4] J. C. Lee, H. G. Lee and S. M. Nam, D. H. Chung, "Speed control of induction motor drive using adaptive FNN controller," International Conference ICEMS'04, Conference no. PI-5(430-M09-052), 2004. [CD no. 2]