

IPMSM 드라이브의 고성능 제어를 위한 Multi-PI 제어기

고재섭* · 박기태 · 최정식 · 박병삼 · 정동화
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Multi-PI Controller for High Performance Control of IPMSM Drive

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

Abstract - This paper presents multi-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, Multi-PI controller proposes a new method based fuzzy and neural-network. Multi-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. And this controller is better than the fixed gains one in terms of robustness, even under great variations of operating conditions and load disturbance.

1. 서 론

IPMSM 드라이브를 제어하기 위하여 아직도 산업현장에서는 일반적으로 PI 제어기를 많이 사용하고 있다. [1] 산업 프로세서의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 적응 퍼지제어[2], 파라미터 변동을 고려한 퍼지제어[3], 새로운 퍼지제어[4] 및 적용 FNN(Fuzzy-Neural Network)[5] 등의 연구가 되었다. 이러한 연구들은 간접벡터에 의한 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 양호한 성능을 얻을 수 있었다. 그리고 이 연구들은 고속 및 저속의 속도변화, 부하 변동, 관성 변화 및 정·역회전 운전 등 다양한 동작에도 우수한 특성을 얻을 수 있었다. 그러나 이러한 기법들은 종래의 PI 제어기를 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 Multi-PI 제어기를 제시한다. 본 논문에서 제시한 Multi-PI 제어기는 종래에 많이 사용되었던 PI 제어기와 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 방정식은 다음과 같다.

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

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

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

여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

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

3. Multi-PI 제어기

3.1 FAM 제어기

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

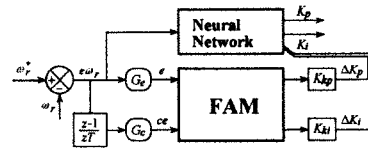


그림 1 하이브리드 PI 제어기의 구조

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.

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 나타낸다. 퍼지집합은 같은 쪽으로 중복된 삼각형 함수를 사용한다.

표 1 이득 HK_i 를 경신하기 위한 룰 베이스								표 2 이득 HK_p 를 경신하기 위한 룰 베이스							
$\frac{ce}{e}$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	$\frac{ce}{e}$	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	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	PM	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
PM	PS	ZE	NS	NM	NS	ZE	PS	PS	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PL	ZE	NS	NM	NL	NM	NS	ZE	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.

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

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

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

3. 2 신경회로망에 의한 자기동조 Multi-PI 제어기

그림 2는 신경회로망에 의한 PI 제어기의 블록도를 나타낸다.

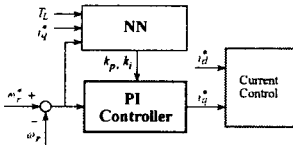


그림 2 신경회로망에 의한 PI 제어기

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} 를 가지는 최적치를 찾는다.

NN의 구조는 입력, 은닉 및 출력 노드가 각각 3, 40 및 2인 3층 피드포워드 신경회로망이다.

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.

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

$\text{switch} \geq 1$ 에서 단계 I은 나타나지 않는다. 제어기는 마지막에서 모든 방법으로 플랜트를 제어하기 위하여 처음 k_p 및 k_i 가 NN에 의하여 발생한다. 만약 $\text{switch} = 0$ 이면 단계 II는 나타나지 않는다. 이는 매 샘플링 시간에서 동적 이득에 의한 PI 제어기를 제공한다. 다양한 동작 조건에 따른 동적 이득은 PI 제어기의 성능을 개선시킨다. 빠른 영역인 단계 I 주기 동안 동적 이득은 플랜트의 속도를 가속시킨다. 그러나 단계 II 동안 동적 이득은 상대적으로 짧은 응답 시간 때문에 오버슈트를 야기시킨다. 0.5-0.7은 스위치를 위한 적절한 범위이다.

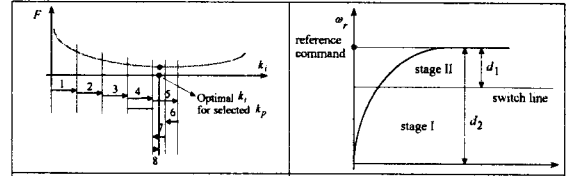


그림 3 k_i 의 결정 과정

그림 4 스위칭 라인의 도식적 설명

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

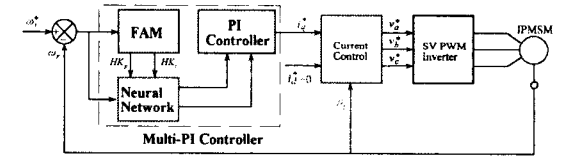


그림 5 제시한 IPMSM의 드라이브 시스템

4. 시스템의 성능결과

그림 6은 0.1[sec]에서 지령속도를 1800[rpm]으로 운전시키고 0.5-0.7[sec]에서 부하토크를 5[N·m]으로 인가했을 경우에 나타나는 응답특성이다. 그림 6(a)는 지령속도와 실제속도이며 본 논문에서 제시한 M-PI(Multi-PI) 제어기를 종래의 PI 제어기를 비교하였다. 그림 (b)와 (c)는 M-PI 제어기에서 구한 이득 k_p , k_i 를 나타낸다. 그리고 그림 (d)는 q 축 전류를 나타낸다.

그림 7은 더욱 명확하게 검토하기 위하여 그림 7의 초기와 부하가 인가된 상태를 확대한 결과이다. M-PI 제어기가 PI 제어기 보다 오버슈트가 작고 상승시간도 빠르며 빠르게 안정화되고 정상상태에 빠르게 추종한다.

그림 8은 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 M-PI 제어기는 PI 제어기 보다 양호한 성능이 나타난다.

그림 9는 0.1[sec]에서 지령속도를 1800[rpm]을 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 M-PI 제어기는 PI 제어기 보다 성능이 양호하게 나타난다.

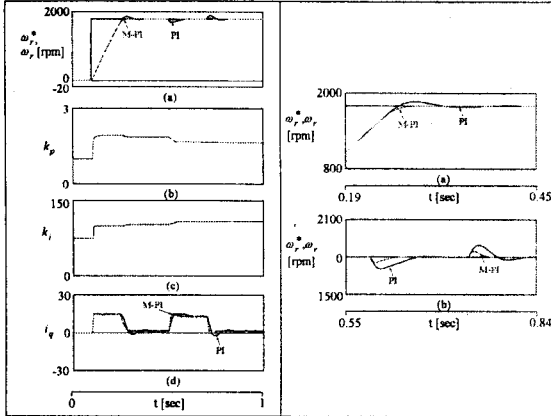


그림 6 PI와 M-PI 제어기의 응답특성의 비교

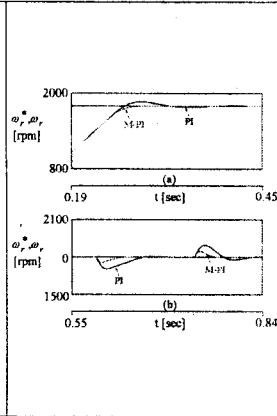


그림 7 PI와 M-PI 제어기의 응답특성의 비교

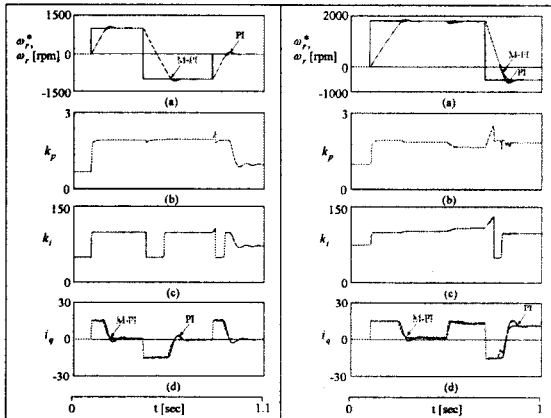


그림 8 정 역회전 운전에 대한 응답특성 비교

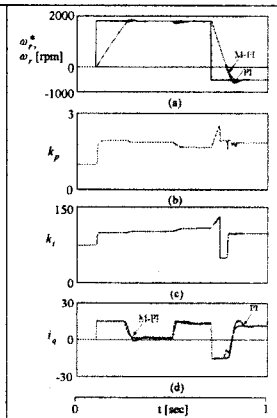


그림 9 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교

그림 10은 0.1sec)에서 지령속도를 1800[rpm], 0.7sec)에서 부하토크 5[N·m)인가하고 관성을 정격의 2배로 증가시켰을 경우에 나타나는 응답특성이다.

그림 11은 0.1sec)에서 지령속도를 1800[rpm], 0.7sec)에서 부하토크 5[N·m)인가하고 전기자저항을 정격의 2배로 증가시켰을 경우에 나타나는 응답특성이다. 관성과 전기자저항의 파라미터의 변동이 있을 경우에는 M-PI 제어기의 성능이 더욱 효능을 발휘하며 양호하게 나타난다.

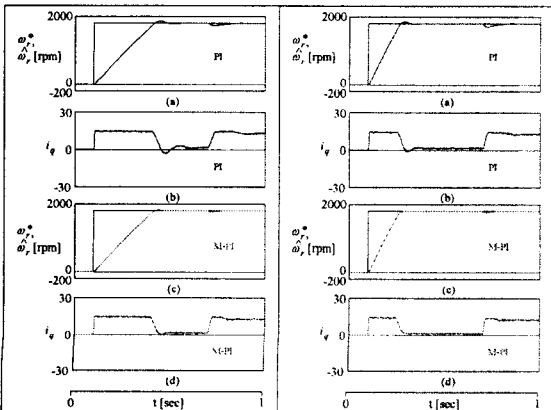


그림 10 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교 [$J = 2J_n$]

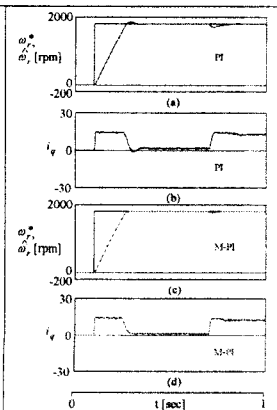


그림 11 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교 [$R = 2R_n$]

그림 12는 관성을 3배로 증가시킨 상태에서 4상한 운전을 시킨 경우에 나타나는 응답특성이다. 4상한 운전에서도 M-PI 제어기는 PI 제어기 보다 속도오차가 작게 나타나며 우수한 성능이 나타나고 있다.

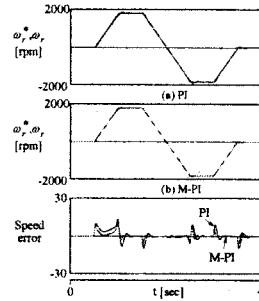


그림 12 4상한 운전에 대한 응답특성 비교 [$J = 3J_n$]

5. 결 론

본 논문에서는 IPMSM 드라이브의 고성능 제어를 위하여 신경회로망을 이용하여 자기동조 PI 제어기를 제시하였다. 자기동조 PI 제어기는 종래의 고정 이득 PI 제어기의 강인성을 증가시키기 위하여 신경회로망에 기초하여 설계한다. 이 제어기는 부하토크, 지령 q축 전류 및 속도 오차 등 피드백 동작조건에 따라 양호하게 학습된 신경회로망을 이용하여 적합한 이득을 제공한다.

자기동조 PI 제어기를 IPMSM의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하였다. 속도 및 부하토크 변화에서 자기동조 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.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Ali Unar, D. J. Murray-Smith and S. F. Ali Shah, "Design and tuning of fixed structure PID controller - A survey," Technical Report CSC-96016, Faculty of Engineering, Glasgow University, Scotland, 1996.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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]