

IPMSM 드라이브의 성능 향상을 위한 하이브리드 PI 제어기

남수명, 이정철, 이흥균, 최정식, 고재섭, 박기태, 정동화
 순천대학교 전기제어공학과

Hybrid PI Controller for Performance Improvement of IPMSM Drive

Su-Myeong Nam, Jung-Chul Lee, Hong-Gyun Lee, Jung-Sik Choi, Jae-Sub Ko, Gi-Tae Park, Dong-Hwa Chung
 School of Information & Communication Engineering . Sunchon National Univ

ABSTRACT - This paper presents Hybrid PI controller of IPMSM drive using fuzzy adaptive mechanism(FAM) control. 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 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

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 연구들은 간접 벡터에 의한 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 양호한 성능을 얻을 수 있었다. 그리고 이 연구들은 고속 및 저속의 속도변화, 부하 변동, 관성 변화 및 정역회전 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.

드라이브의 센서리스 제어를 위하여 다양한 적응제어 기법이 제시되었다.[5] 적응제어는 부하토크 및 부하관성과 같은 광범위한 동작변화에도 양호한 속도응답을 얻을 수 있는 우수한 기법으로 평가를 받았다. 그러나 수학적 모델링에 기초하고 계산시간이 많이 소요되는 알고리즘이기 때문에 매우 복잡하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 최근에 많이 연구가 되고 있는 ANN(Artificial Neural Network)을 적용하여 센서리스를 제어를 한다.

본 논문에서는 FAM(Fuzzy Adaptive Mechanism) 제어기를 이용하여 IPMSM의 드라이브 시스템의 속도제어를 위하여 하이브리드 PI 제어기를 제시한다. 본 논문에서 제시한 하이브리드 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 하이브리드 PI 제어기의 양호한 성능을 확인한다. 다음은 ANN을 이용하여 IPMSM 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다.

2. 하이브리드 PI 제어기

간접 벡터제어로 구동되는 IPMSM의 속도제어를 위한 하이브리드 PI 제어기의 설계는 그림 1과 같다.

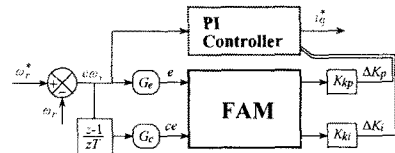


그림 1. 하이브리드 PI 제어기의 구조.

PI 제어기의 두 개의 이득이 잘 알려진 종래의 방법을 이용하여 초기화한다. 그러나 이 이득은 정적 동작조건에서 IPMSM의 추정모델에 의존한다.

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.

FAM에서 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 나타난다. 퍼지집합은 같은 쪽으로 증폭된 삼각형 함수를 사용한다.

표 1. 이득 K_i 를 경신하기 위한 룰 베이스.

$\frac{e\omega_r}{ce\omega_r}$	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 룰 베이스

$\frac{e\omega_r}{ce\omega_r}$	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.

$$K_p = K_p + K_{kp}f_1(e_n, \Delta e_n) \quad (1)$$

$$K_i = K_i + K_{ki}f_2(e_n, \Delta e_n) \quad (2)$$

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 방향으로를 경우에는 증가시키고 부 방향으로 작을 경우에는 감소시킨다. 이는 속도의 오버슈트와 정상상태의 오차를 감소시킨다.

3. ANN에 의한 속도 추정

ANN은 인간 두뇌의 간단한 모델에 의해 사고하는 구조로 이루어진 컴퓨팅 시스템이다. ANN은 비선형 동적 시스템의 파라미터를 추정 및 제어를 하는데 사용한다.

ANN을 위한 이상적인 적용은 비선형 시스템의 추정분야에 있다. 실질적으로 어떤 이산 비선형 시스템은 자연 입출력에서 시스템을 표현할 수 있는 NARMAX (Nonlinear AutoRegressive Moving Average with eXogenous inputs) 모델에 의해서 나타낼 수 있다. 일반적으로 NARMAX 모델은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-d_y), u(k), \dots, u(k-d_u)) \quad (3)$$

여기서 d_u 와 d_y 는 입력과 출력 벡터 u 와 y 에서 최대 지연을 나타낸다. 이 모델의 형태는 모델이 전적으로 기지 양으로 표현되기 때문에 시스템의 추정을 추구하는데 이상적이다.

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 IPMSM의 최종 추정속도는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta \hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} [\{\hat{\phi}_q(k) - \hat{\phi}_q(k)\} \hat{\phi}_\alpha(k-1)] \\ &\quad - [\hat{\phi}_d(k) - \hat{\phi}_d(k)] \hat{\phi}_q(k-1) - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (4)$$

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

추정속도를 이용한 회전자 자속의 위치는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_r(k+1) = \hat{\theta}_r(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (5)$$

그림 2는 본 연구에서 제시한 방식으로 ANN를 이용하여 속도를 추정하고 하이브리드 PI 제어기를 이용하여 속도를 제어한다.

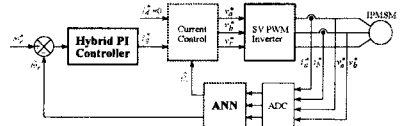


그림 2. 제시한 IPMSM의 드라이브 시스템

4. 시스템의 성능결과

본 연구에서 사용한 IPMSM의 파라미터는 표 3과 같다.

표 3 IPMSM의 파라미터

극수 R_p	4
전기자 저항 ϕ_a	0.57 [Ω]
영구자석 쇄교자속	0.108 [Wb]
정격 주파수	60 [Hz]
d 전기자 인덕턴스 L_d	8.72 [mH]
q 전기자 인덕턴스 L_q	22.8 [mH]
정격 토크	3.5 [N·m]
정격 속도	1800 [rpm]

그림 3은 정격속도 1800[rpm]으로 운전 중, -1800[rpm]으로 역회전 시켰을 경우에 나타나는 응답특성을 나타낸다. 속도의 변화에도 하이브리드 PI가 종래의 PI보다 응답특성이 양호하다.

그림 4는 정격속도 1800[rpm]으로 운전 중, 0.6-0.8[sec] 동안 부하토크 5[Nm]를 인가 할 경우 응답특성을 나타낸다. 동일한 조건에서 부하토크의 변동에도 하이브리드 PI가 PI보다 속도변화가 적게 나타나며 응답특성이 양호하다는 것을 알 수 있다.

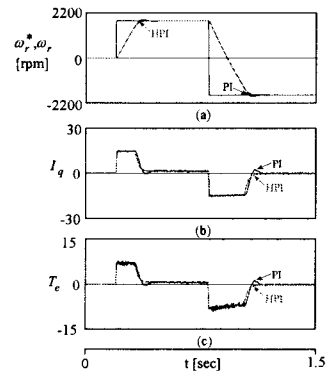


그림 3. 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답비교

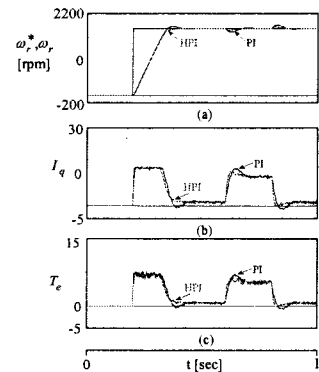


그림 4. 부하토크의 변화에 대한 응답비교

그림 5-7은 파라미터 변동에 대한 응답 특성을 나타낸다. 그림 5(a)는 R_s 의 정격치, 그림 5(b)는 R_s 정격의 1.5배, 그림 5(c)는 R_s 정격의 0.5배일 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림 6(a)는 L_q 의 정격치, 그림 6(b)는 L_q 정격의 1.5배, 그림 6(c)는 L_q 정격의 0.5배일 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림 7(a)는 J_n 의 정격치, 그림 7(b)는 J_n 정격의 1.5배일 경우의 응답특성을 나타낸다. 파라미터가 변동하더라도 하이브리드 PI 제어가 종래의 PI 제어기보다 양호한 응답특성이 나타난다.

그림 8은 관성을 5배로 증가시키고 4상한 운전을 할 경우 두 방식을 비교한 응답특성의 결과이다. 그림 8(a)는 종래의 PI 제어기의 속도응답이며 그림 8(b)는 본 논문에서 제시한 하이브리드 PI 제어기의 속도응답이다. 종래의 PI 제어기는 오버슈트가 크고 상승시간 및 안정화 시간이 길어지게 되어 성능이 양호하게 나타나지 않는다. 그러나 본 논문에서 제시한 하이브리드 PI 제어기는 이러한 문제점이 해결되며 성능결과는 양호하게 나타난다. 그리고 속도추정의 결과도 양호하게 나타나며 속도오차도 1% 미만으로 추정하였으므로 본 논문에서 제시한 하이브리드 PI 제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

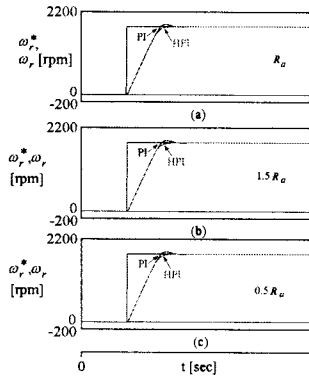


그림 5. 파라미터 변동에 대한 응답비교(R_s 변화)

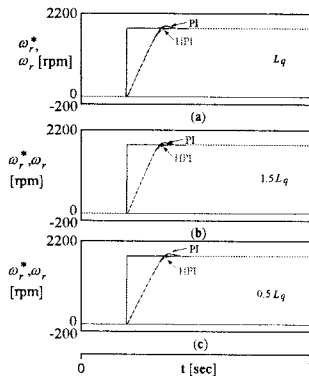


그림 6. 파라미터 변동에 대한 응답비교(L_q 변화)

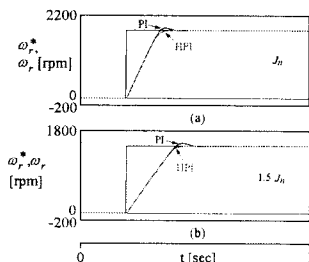


그림 7. 파라미터 변동에 대한 응답비교(J_n 변화)

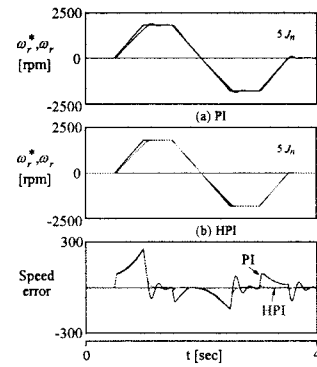


그림 8. 4상한 운전에서 파라미터 변동에 대한 응답비교

6. 결 론

본 논문에서는 IPMSM 드라이브의 고성능 제어를 위하여 FAM을 이용하여 하이브리드 PI 제어기를 제시하였다. 하이브리드 PI 제어기는 퍼지논리와 종래의 PI 제어기를 혼합한 형태이며 기준 모델을 사용하지 않고 간단한 퍼지논리 적용 메커니즘을 사용하였다. 종래의 PI제어기에서 고정된 이득을 하이브리드 PI 제어기에서는 퍼지 룰베이스를 이용하여 파라미터의 변동에 따라 자동 조절하게 하였다.

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

속도의 변화에 대한 ANN에 의한 추종성능도 양호하게 나타났으며 속도 오차가 1[%] 이내로 매우 우수한 추종성능을 보여 주었다.

본 논문에서 제시한 하이브리드 PI 제어기는 강인성과 고성능의 응답특성을 얻을 수 있었고 ANN에 의한 추종성능도 만족할만한 결과를 얻을 수 있었으므로 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. C. Lee and D. H. Chung, "MRAC fuzzy control for high performance of induction motor drive," The Trans. of KIEE, vol. 7, no. 3, pp. 215-223, 2002.
- [2] H. G. Lee, J. C. Lee and D. H. Chung, "Design of fuzzy controller induction drive considering parameter change," The Trans. of KIEE, vol. 51P, no. 3, pp. 111-119, 2002.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] K.J. Astron and B. Wittenmark, "Adaptive control," Addison-Wesley, 1989.