

PMSM 드라이브의 고성능 속도제어를 위한 적응 퍼지제어기

정동화, 이정철, 이홍균, 정택기
 순천대학교 정보통신공학부

Adaptive Fuzzy Control for High Performance Speed Controller in PMSM Drive

Dong-Hwa Chung, Jung-Chul Lee, Hong-Gyun Lee, Tack-Gi Jung
 School of Information & Communication Engineering, Suncheon National University

Abstract - This paper develops a adaptive fuzzy controller based fuzzy logic control for high performance speed controller in permanent magnet synchronous motor(PMSM) drives. In the proposed system, fuzzy control is used to implement the direct controller as well as the adaptation mechanism. The operation of the direct fuzzy controller and the fuzzy logic based adaptation mechanism is studied. A model reference adaptive scheme is proposed in which the adaptation mechanism is executed by fuzzy logic based on the error and change of error measured between the motor speed and output of a reference model. The control performance of the adaptive fuzzy controller is evaluated by simulation for various operating conditions. The validity of the proposed adaptive fuzzy controller is confirmed by performance results for PMSM drive system.

1. 서 론

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)는 토크밀도가 크고 고 효율이며 규격이 작은 장점을 가지고 있다. 최근 PMSM은 로봇 및 전기자동차와 같은 고성능이 요구되는 분야에 적용되고 있으며 고 품질 및 고 생산성이 필요로 하는 자동화 제어기기에 한층 매력을 끌고 있다.

PMSM 드라이브의 벡터제어를 위한 속도제어기는 일반적으로 PI 알고리즘을 사용하여 개발한다. PI 알고리즘에 플랜트의 동적 특성을 동정하기 위하여 연속적인 측정을 할 수 있는 플랜트의 파라미터의 자동동조 또는 적응 알고리즘을 추가하여 사용한다. 그러나 PI 제어기는 플랜트의 변동으로부터 연속적인 적응을 해야할 경우에는 계산이 매우 복잡하고 응답특성이 저하된다. 이러한 시스템에 양호한 성능을 얻기 위한 연구로 적응제어가 연구되었으며 적응제어는 종래의 PI 제어기에 비해 매우 양호한 성능을 얻을 수 있었다. 최근 적응제어는 STC(Self Tuning Control), MRAC(Model Reference Adaptive Control), SMC(Sliding Mode Control) 및 EKF(Extended Kalman Filter) 등의 다양한 기법들이 제시되었다. 이러한 적응제어 기법은 수학적인 모델링에 기초를 두고 있으며 다량의 알고리즘 때문에 매우 복잡하다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 종래의 PI 제어를 퍼지제어로 교체하여 사용하거나[1,3], PID 제어기에 퍼지제어를 혼합하여 사용하였다. 퍼지동작은 기준 근방의 동작점을 근사화시키고 PID 동작은 채터링 퍼지의 영향에 의한 오차를 제거하기 위하여 사용하였다. 또한, 부동 소수점, 퍼지를 변화 및 초안정도 이론에 의한 시스템의 이득변화[2]의 기법이 제시되었다. 이러한 적응기법은 MRAC에 기초하며 프로세서에 적응제어하

기 위하여 단지 퍼지제어기만을 사용하였다.

본 연구에서는 MRAC 기법을 이용하여 고성능 PMSM 드라이브를 위한 적응 퍼지제어기를 제시한다. 종래의 직접 퍼지제어기와 본 연구에서 제시한 적응 퍼지제어기의 응답특성의 결과를 비교한다. 본 연구에서 제시한 적응 퍼지제어기는 종래의 직접 퍼지제어기 보다 응답특성이 매우 양호하게 나타났으며 그 결과들을 제시한다.

2. PMSM 드라이브 시스템

본 논문에서는 공간벡터 PWM 인버터에 의해 구동되는 고성능 PMSM의 벡터제어 시스템을 고려한다. 이러한 시스템 구성은 로봇, 항공기 및 전기자동차 등의 드라이브와 같은 고성능 제어 시스템에 응용된다.

그림 1은 공간벡터 PWM 인버터에 의하여 구동되는 PMSM 드라이브의 벡터제어 시스템을 나타낸다.

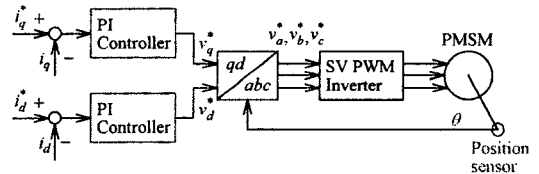


그림 1 PMSM의 벡터제어 시스템

i_q^* 와 i_d^* 는 지령 토크 및 자속 성분의 전류를 나타내며 실제전류 i_q 와 i_d 와 비교하여 종래의 PI 제어기를 이용하여 제어한다. PI 제어기의 출력은 v_q^* 와 v_d^* 이며 이는 좌표변환에 의해 v_a^*, v_b^*, v_c^* 로 변환하여 공간벡터 PWM 인버터에 의해 PMSM을 제어한다. 회전자의 위치정보 θ 는 좌표변환에 이용한다.

3. 퍼지제어기

그림 2는 벡터제어 PMSM 드라이브의 퍼지 속도제어기의 블록도를 나타낸다.

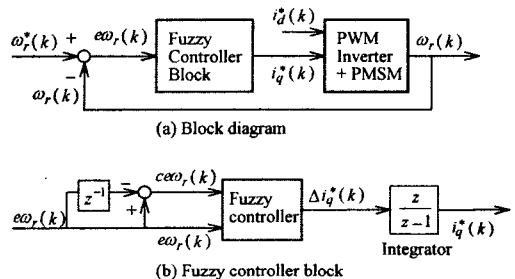


그림 2 벡터제어 PMSM의 퍼지 속도제어기

퍼지제어기로 선정되어 입력되는 가장 중요한 변수는 속도오차와 속도오차의 시간 변화분이다. 두 개의 입력 변수 $e\omega_r(k)$ 와 $ce\omega_r(k)$ 이며 매 샘플링 순간에서 다음과 같이 계산된다.

$$e\omega_r(k) = \omega_r^*(k) - \omega_r(k) \quad (1)$$

$$ce\omega_r(k) = e\omega_r(k) - e\omega_r(k-1) \quad (2)$$

여기서 $\omega_r^*(k)$ 는 지령속도이며 $\omega_r(k)$ 는 실제 회전자속도이다.

퍼지제어기는 퍼지화, 룰 평가 및 비퍼지화의 3단계로 나눈다. 퍼지화 단계에서 보통변수 $e\omega_r(k)$ 와 $ce\omega_r(k)$ 는 삼각형 소속함수를 사용하여 퍼지변수 $e\omega_r$ 와 $ce\omega_r$ 로 변환한다.

비 퍼지화 단계에서 출력변수 $\Delta i_q^*(k)$ 의 보통 값을 얻는다. 간접 벡터제어 시스템에 적용하는 지령전류 $i_q^*(k)$ 는 다음과 같다.

$$i_q^*(k) = i_q^*(k-1) + \Delta i_q^*(k) \quad (3)$$

출력변수 $\Delta i_q^*(k)$ 의 보통 값은 중심 비퍼지화의 방법을 이용하여 구할 수 있다.

$$\Delta i_q^*(k) = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta i_q^*)_i \mu[(\Delta i_q^*)_i]}{\sum_{i=1}^n \mu[(\Delta i_q^*)_i]} \quad (4)$$

4. 적응 퍼지제어기

적응 퍼지제어기는 그림 3에 나타난 특정 수학적 기준모델의 출력으로서 제어 시스템의 예측성능을 파악할 수 있다.

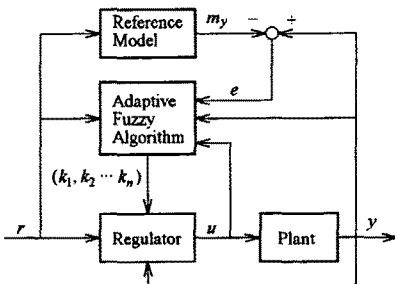


그림 3 적응 퍼지제어기의 블록도

입력 r 는 지령속도 $\omega_r^*(k)$ 이며 플랜트는 PWM 인버터와 PMSM이다. 그리고 플랜트의 출력 y 는 $\omega_r(k)$ 이며 기준모델의 출력은 m_y 는 $\omega_m(k)$ 이다. 적응 시스템의 적응과정은 2개의 퍼지제어기로 동작한다. 하나의 퍼지제어기는 그림 2의 종래의 직접 퍼지의 속도제어기가 사용되며 퍼지 알고리즘에 의한 출력은 $\Delta i_{q1}^*(k)$ 이다. 다른 하나의 퍼지제어기는 기준모델을 사용하며 플랜트의 출력 y 는 기준모델의 출력 m_y 와 비교하여 오차 e 는

적응퍼지 메카니즘에 의해 수행된다. 기준모델은 안전화 시간 및 오버슈트와 같은 설계기준을 만족하는 요구 성능을 충족시키기 위하여 사용하며 1차 시스템을 사용한다. 동일한 지령입력인 r 가 종래의 퍼지제어기와 기준모델에 공급된다. 기준모델의 출력은 지령신호에 요구되는 응답인 y_m 이다. 이 출력은 적응신호를 발생하는 시스템의 실질적인 응답 y 와 비교하여 오차를 감소하는 방향으로 적응 퍼지 메카니즘에 의해 동작된다. 그림 4는 기준모델에 의한 적응 퍼지 메카니즘을 나타낸다. 적응 퍼지 메카니즘의 루프는 종래의 퍼지제어기 루프와 병렬로 연결된다.

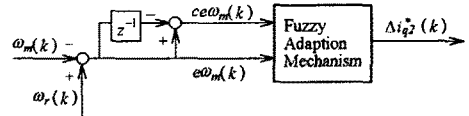


그림 4 기준모델에 의한 적응 퍼지 메카니즘

적응 메카니즘에 의한 출력은 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 를 발생시킨다. $\Delta i_{q1}^*(k)$ 과 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 를 합하여 $\Delta i_q^*(k)$ 를 구하여 이를 적분기를 통해 $i_q^*(k)$ 를 발생시켜 플랜트에 인가한다.

적응 퍼지 메카니즘의 입력은 기준모델의 출력과 실제 속도의 오차($e\omega_m(k)$)와 오차의 변화분($ce\omega_m(k)$)을 사용한다. 오차와 오차의 변화분은 다음과 같다.

$$e\omega_m(k) = \omega_m(k) - \omega_r(k) \quad (5)$$

$$ce\omega_m(k) = e\omega_m(k) - e\omega_m(k-1) \quad (6)$$

위의 두 입력은 적응 퍼지의 룰 베이스에 의해 지령 q 축 전류에 보상되는 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 가 발생되고 $\Delta i_{q1}^*(k)$ 에 추가된다. 그러므로 퍼지제어기의 지령 q 축 전류는 다음과 같다.

$$i_q^*(k) = i_q^*(k-1) + [\Delta i_{q1}^*(k) + \Delta i_{q2}^*(k)] \quad (7)$$

5. 결과 및 고찰

표 1은 PMSM의 파라미터를 나타낸다.

표 1 PMSM의 파라미터

$3(\text{Phase}), 60(\text{Hz}), P = 4, R = 1.4(\Omega), L_d = 6.6(\text{mH}), L_q = 5.8(\text{mH})$ $J = 0.00176(\text{Kg} \cdot \text{m}^2), B = 0.0003881(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec} / \text{rad})$

본 연구에서는 표1과 같은 정적 파라미터를 갖는 PMSM을 사용하였다. 샘플링 주기를 $T_s = 1[\text{msec}]$ 로 하였으며 기준모델에서 1차 지연요소의 시정수는 $\tau = 120[\text{msec}]$ 로 설정하였다.

그림 5는 무부하 상태에서 0.2[sec]에서 스텝 지령속도를 1000[rpm]으로 운전하다가 1.2[sec]에서 부하토크를 1[pu]로 인가하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림 (a)는 PI 제어기, (b)는 종래의 직접 퍼지제어기 및 (c)는 본 연구에서 제시한 적응 퍼지제어기를 나타낸다. 적응 퍼지제어기의 실제속도는 지령속도의 스텝변화와 부하를 인가할 경우에 PI 및 직접 퍼지제어기보다 오버슈트가 매우 작게 나타났으며 추종성능도 양호하게 나타나고 있다. 적응 퍼지제어기의 q 축 전류도 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다.

그림 6은 적응 퍼지제어기를 사용하고 0.25[sec]에서 지령속도의 스텝변화했을 경우 다양한 관성 모멘트에 대

한 응답특성을 나타낸다. 그림 (a)는 정격 관성, (b)는 3배 증가 및 (c)는 6배를 증가시켰을 경우의 응답특성이다. 관성이 증가하면 안정화 시간이 길어지고 정상상태에 추종하는 성능이 매우 느리게 나타난다.

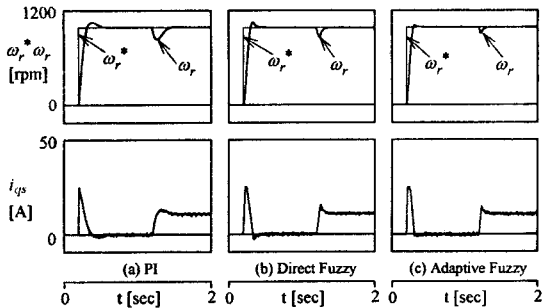


그림 5 지령속도의 스텝변화에 대한 과도응답

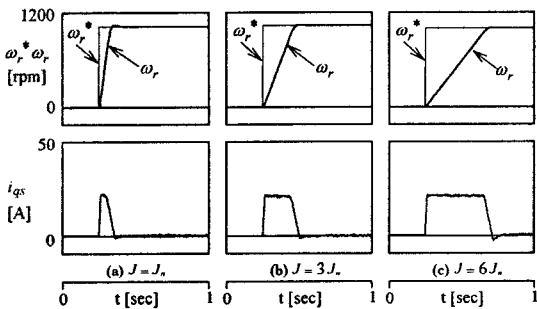


그림 6 다양한 관성 모멘트에 대한 지령속도의 스텝변화의 과도응답

그림 7은 다양한 부하토크에 대한 지령속도의 스텝변화에 대한 응답특성을 나타낸다. 산업계의 제어시스템에서 빈번하게 요구되는 부하토크인 $T_L = K_0 + K_1\omega_r + K_2\omega_r^2$ 를 인가한다. 본 연구의 적응 퍼지제어기를 사용하였으며 부하토크 중 속도에 비례하는 상수 K_1 을 변화시키며 그림 (a) $K_1 = 0.001$, (b) $K_1 = 0.02$ 및 (c) $K_1 = 0.1$ 에 대한 응답특성이다. 부하가 커지면 오버슈트 및 채터링이 거의 나타나지 않지만 안정화 시간은 길어진다.

그림 8은 (a)는 관성 모멘트 $3J_n$, (b)는 부하토크의 정수 $K_1 = 0.1$ 및 (c)는 샘플링 시간 $T_s = 0.4[msec]$ 일 경우의 PI, 직접 퍼지 및 적응 퍼지제어기의 응답특성을 비교한다. 그림 (a)에서 관성이 증가하면 PI와 직접 퍼지제어기에서는 오버슈트와 상승시간이 증가하며 적응 퍼지제어기는 상승시간은 약간 길어지지만 오버슈트가 감소되므로 빠르게 정상상태에 도달한다. 그림 (b)에서 부하가 증가하면 오버슈트는 감소되지만 정상상태에 느리게 정상상태에 도달한다. 그림(c)에서 샘플링 시간이 짧아지면 직접 퍼지 및 적응 퍼지제어기는 정상상태에 빠르게 추종하지만 PI 제어기는 채터링이 증가하여 안정화 시간이 길어진다. 따라서 적응 퍼지제어기가 종래의 PI 및 직접 퍼지제어기 보다 응답특성이 매우 양호하게 나타나고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 PMSM 드라이브의 고성능 제어를 위하여 퍼지추론을 이용한 적응 퍼지제어기를 제시하였다.

제시한 퍼지제어기는 기준모델에 기초한 적응 퍼지제어기를 종래의 직접 퍼지제어기에 추가하고 직접 퍼지제어기에서 사용한 퍼지논리를 응용하였다.

적용 퍼지제어기는 PMSM의 지령속도의 변화와 부하 변화에 대하여 종래의 직접 퍼지제어기 보다 양호한 응답특성이 나타났다. 그리고 관성 증가에 따른 동작조건 변화에 적응 퍼지제어기가 오버슈트 및 채터링이 매우 작게 나타났으며 안정화 시간도 양호하게 나타났다. 본 연구에서 제시한 적응 퍼지제어기를 종래의 PI, 직접 퍼지제어기 보다 응답특성이 매우 우수하게 나타났으며 제시한 적응 퍼지제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

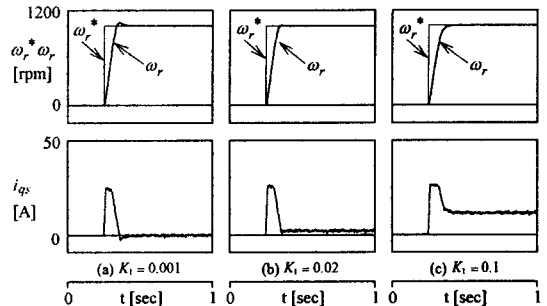


그림 7 다양한 부하토크에 대한 지령속도의 스텝변화에 대한 응답특성

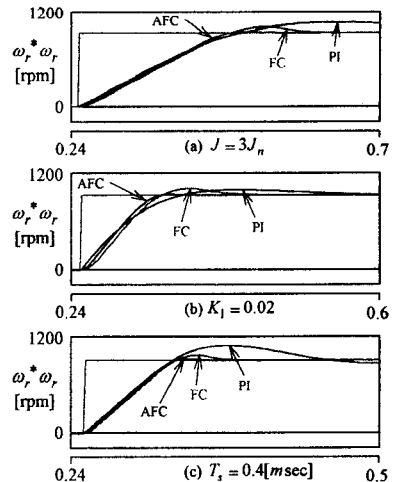


그림 8 다양한 파라미터에 대한 응답특성의 비교

[참 고 문 헌]

- [1] D. H. Chung, et al., "Efficiency optimization control of induction motor system using fuzzy control," KIEE, vol. 50-D, no. 7, pp. 318-324, 2001.
- [2] E. Cerruto, A. Consoil, A. Raciti and A. Testa, "Fuzzy adaptive vector control of induction motor drives," IEEE Trans. on PE, vol. 12, no. 6, pp. 1028-1040, 1997.
- [3] D. H. Chung, "Fuzzy control for high performance vector control of PMSM drive system," KIEE, vol. 47, no. 12, pp. 2171-2180, 1998.