

파라미터 변동을 고려한 유도전동기의 퍼지제어

이영실, 이정철, 이홍균, 정택기, 정동화
 순천대학교 정보통신공학부

Fuzzy Control of Induction Motor Drive with Considering Parameter Variation

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

Abstract - This paper proposes a speed control system based on a fuzzy logic approach, integrated with a simple and effective adaptive algorithms. And this paper attempts to provide a thorough comparative insight into the behavior of induction motor drive with PI, direct and improved fuzzy speed controller. A indirect vector controlled induction motor is simulated under varying operating condition. The validity of the comparative results is confirmed by simulation results for induction motor drive system.

1. 서 론

산업용 드라이브 시스템에서 속도제어를 위하여 PI 제어를 많이 사용한다. 최근에는 퍼지제어기가 개발되어 PI 속도제어기의 교체로 사용이 가능하였으며 퍼지제어기에 관한 연구가 관심의 대상이 되고 있다.[1] 전동기의 속도 및 위치제어를 위하여 퍼지제어의 적용은 종래의 제어기[2]보다 대부분의 성능이 개선된다. Masmoudi는 DFSM(Doubly fed Synchronous machine)의 고정자 자속을 제어하기 위하여 퍼지논리를 적용시켰다.[3] 그러나 직접 퍼지제어기를 사용하여 속도의 변화, 부하 및 관성의 변화 등에는 고속으로 추종하는 만족할만한 응답성을 얻을 수 없었다.

본 연구에서는 직접 퍼지제어에 적응 메카니즘을 추가하여 응답성을 더욱 향상시킬 수 있는 개선된 퍼지제어기를 제시한다. 퍼지논리는 드라이브의 물리적인 구조를 이용하여 시스템의 미지의 파라미터 변동을 보상하는데 사용한다. 개선된 퍼지제어기는 직접 퍼지제어에 기초하며 퍼지제어기의 출력은 적응블록의 입력이 된다. 종래의 PI, 직접 퍼지제어기와 본 연구에서 제시한 개선 퍼지제어기의 성능결과를 비교한다. 본 연구에서 제시한 개선 퍼지제어기가 PI 및 직접 퍼지제어기 보다 성능이 매우 우수하게 나타났으며 그 결과들을 제시한다.

2. 드라이브 시스템

Fig.1은 간접 벡터제어에 의한 유도전동기 드라이브의 제어 블록도를 나타낸다.

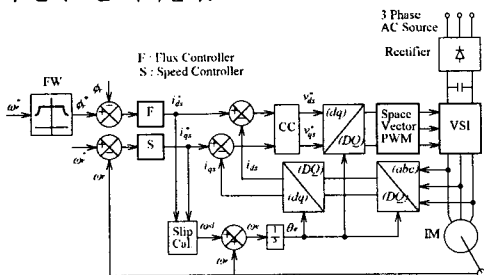


Fig.1 Block diagram of indirect vector controlled IM drive

VSI는 광범위한 전압의 이용률과 전동기 전류의 고조파가 작게 나타나는 공간벡터 PWM 방식을 적용한다. 인버터의 입력 DC 전압은 220[V]의 일정한 값으로 설정하고 정격 속도와 최대 토크에서 양호한 전류제어를 수행하기 위하여 충분한 전압을 제공해준다. 고정자 9축 전류는 최대 허용 고정자전류의 실효치에 의해서 제한된다. 속도제어기는 PI 및 직접 퍼지제어기를 적용하여 응답특성을 구하고 개선 퍼지제어기는 블럭도를 개선하여 새롭게 구성한다. 속도 및 자속제어기의 출력인 i_d^* 와 i_q^* 는 실제전류와 비교하여 CC(Current Controller)에서 제어하여 전압 v_d^* 와 v_q^* 를 얻는다. 슬립 각속도와 실제속도를 합하여 동기 각속도를 구하고 이를 적분하여 동기각을 구한다. 이 동기각은 좌표변환에 이용한다.

퍼지 속도제어기는 Fig.2에 나타내고 속도오차와 속도오차 변화분을 입력으로 하는 구조이다.

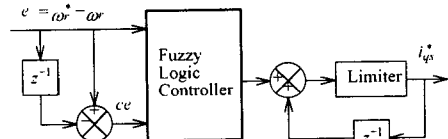


Fig.2 Fuzzy speed controller

고정 좌표축에서 PI 제어기는 위상지연 때문에 정상 상태 오차를 발생시키므로 전류제어는 동기 좌표축으로 변환한다.

3. 직접 퍼지제어기

Fig.3은 직접 퍼지제어기를 사용한 속도제어 시스템의 블럭도를 나타낸다. 퍼지제어기로 선정되어 입력되는 가장 중요한 변수는 속도오차와 속도오차의 시간 변화분이다. 퍼지제어기의 출력은 지령전류의 변화이다.

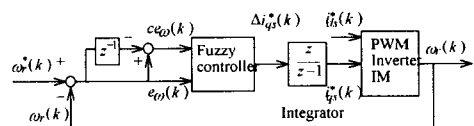


Fig.3 Block diagram of Fuzzy speed controller for IM drive

두 개의 입력변수 $e\omega_r(k)$ 와 $e\omega_r(k)$ 이며 매 샘플링 순간에서 다음과 같이 계산된다.

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

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

여기서 $\omega_r^*(k)$ 는 지령속도이며 $\omega_r(k)$ 는 실제 회전자 속

도이다.

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.

입력변수 $e\omega_r$ 와 $ce\omega_r$ 의 전체집합은 해석의 반복수행으로 설정한 (-1800, 1800)[rpm]와 (-8, 8)[rpm]이다.

출력변수 Δi_{qs}^* 의 전체집합은 (-2, 2)[A]이다. 각 퍼지변수는 0에서 1[pu]까지 변화하는 소속 μ 의 정도에 따라 부 집합수가 있다.

변수 $e\omega_r$ 와 $ce\omega_r$ 는 Table1에서 49(7×7)개의 규칙을 수행하는 추론에 의해 처리된다. 비 퍼지화 단계에서 출력변수 $\Delta i_{qs}^*(k)$ 의 보통 값을 얻는다.

간접 벡터제어 시스템에 적용하는 지령전류 $i_{qs}^*(k)$ 는 다음과 같다.

$$i_{qs}^*(k) = i_{qs}^*(k-1) + \Delta i_{qs}^*(k) \quad (3)$$

속도제어기와 유사한 방법으로 자속제어기도 구성한다. 자속오차 $e\phi_r(k)$ 와 자속오차의 변화분 $ce\phi_r(k)$ 은 다음과 같다.

$$e\phi_r(k) = \phi_r^*(k) - \phi_r(k) \quad (4)$$

$$ce\phi_r(k) = e\phi_r(k) - e\phi_r(k-1) \quad (5)$$

여기서 $\phi_r^*(k)$ 는 속도와 자속의 관계에서 얻을 수 있는 지령 회전자속이며 $\phi_r(k)$ 는 실제자속이다. $e\phi_r$ 와 $ce\phi_r$ 의 전체집합은 해석의 반복수행으로 설정한 (-0.3, 0.3)[Wb]와 (-0.001, 0.001)[Wb]이다. 출력변수 Δi_{ds}^* 의 전체집합은 (-1.5, 1.5)[A]이다. 제어 시스템에 적용하는 지령전류 $i_{ds}^*(k)$ 는 다음과 같다.

$$i_{ds}^*(k) = i_{ds}^*(k-1) + \Delta i_{ds}^*(k) \quad (6)$$

4. 개선된 퍼지제어기

본 논문에서 제시한 개선된 퍼지제어기는 유도전동기 드라이브의 속도제어에 적용을 한다. 최대 속도 ω_r^* 와 최대 가속도 a_r^* 는 유도전동기의 기계적인 정격에 의해 설정된다. 속도제어는 다양한 위치로부터 이동하는 시간을 최소화하는 로봇분야 등에 광범위하게 적용된다.

유도전동기 드라이브에서 지령속도의 제적은 다음과 같이 모델링이 가능하다.

$$p\omega_r^* = \frac{K_T}{J} i_{qs}^* - \frac{T_L}{J} \quad (7)$$

$$p\omega_r^* = a_r^* \quad (8)$$

여기서 a_r^* 는 지령 가속도를 나타낸다. 만약 전류 i_{qs}^* 가 다음과 같다면 두 모델은 같은 동적 동작상태로 나타난다.

$$i_{qs}^* = \frac{J}{K_T} a_r^* + \frac{T_L}{K_T} \quad (9)$$

관성 모멘트, 부하토크 및 토크가 일정하다고 가정하면 식(9)에서 요구되는 동특성을 얻을 수 있다. 파라미터 값은 동작조건에 의해 결정되며 제어법칙을 이용하여 사용할 수 있다.

$$i_{qs}^* = K_p a_r^* + i_{ql}^* \quad (10)$$

K_p 와 i_{ql}^* 은 정격조건에서 각각 J^*/K_T 와 T_L^*/K_T 에 일치하는 적절한 제어 파라미터이다. 이러한 관계가 만족하면 제어기의 출력에서 오차는 영이며 식(9)과 (10)은 일치하게 되고 속도제어는 요구하는 방법으로 실현될 수 있다. 지령속도와 실제속도 사이에서 오차가 발생하면 속도를 정밀하게 하기 위하여 지령속도에서 Δi_{qs}^* 를 퍼지제어기로 조절한다. 이러한 변화분은 K_p^* 와 i_{ql}^* 를 사용하여 정밀하게 제어할 수 있다. 식(10)을 미분하면 파라미터 변화의 영향을 고려할 수 있다.

$$\Delta i_{qs}^* = \Delta K_p^* a_r^* + \Delta i_{ql}^* \quad (11)$$

Δi_{qs}^* 는 퍼지제어기의 출력이며 오차를 보상하는데 필요한 특정 전류의 변화분을 의미한다. 식(3), (10)과 (11)의 관계에서 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} i_{qs}^*(k) &= i_{qs}^*(k-1) + \Delta i_{qs}^*(k) \\ &= [K_p^*(k-1) + \Delta K_p^*(k)] a_r^*(k) \\ &\quad + i_{ql}^*(k-1) + \Delta i_{ql}^*(k) \end{aligned} \quad (12)$$

퍼지제어기에서 출력된 지령전류 변화분은 증분 K_p^* 와 i_{ql}^* 을 결정하는데 사용되며 이는 식(10)과 (11)의 값과 같다. 그러나 식(11)는 미지의 K_p^* 와 i_{ql}^* 를 위한 고정된 값이 아니므로 가능한 해는 Moore-Penrose 알고리즘에 의해 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta K_p^*(k) = \frac{h_p a_r^*(k)}{1 + a_r^{*2}(k)} \Delta i_{qs}^*(k) \quad (13)$$

$$\Delta i_{ql}^*(k) = \frac{h_{ql}}{1 + a_r^{*2}(k)} \Delta i_{qs}^*(k) \quad (14)$$

식(13)와 (14)는 제어 시스템에 적용할 수 있는 동작상태를 물리적으로 해석할 수 있다. 지령속도가 일정할 경우에 나타나는 오차는 단지 부하변동에 의해 나타나므로 정확한 동작은 Δi_{ql}^* 에 의해 결정된다. 지령속도를 매우 가속으로 변화하면 관성이 부하토크 보다 매우 크게 되어 오차는 크게 나타난다. 이러한 경우에는 ΔK_p^* 를 조절하여 정확한 동작을 얻을 수 있다. 특수한 경우인 부하토크와 관성이 연속적으로 변화하는 경우에 부하토크는 관성과 상호 연관되어 있으므로 J^*/K_T 의 추종성능은 악화된다. 그러나 지령전류가 퍼지제어기에 의해 출력되므로 시스템은 강인성 제어의 성능을 유지할 수 있다. 일정속도에서 운전 중, 일정 가속도로 증가하는 경우에 J^*/K_T 가 연속적으로 조정하기 위하여 전류성분 i_{ql}^* 을 정확하게 동정한다. 어떠한 파라미터의 변동이 없을 경우에는 K_p^* 와 i_{ql}^* 는 정확하게 설정되고 다음 과도상태에서 요구되는 성능을 얻기 위하여 정확한 전류 값을 파라미터 오차의 변화가 나타나지 않는 식(10)에 고정된다. 개선 퍼지제어기의 속도제어를 위한 블록은 Fig.4과 같다.

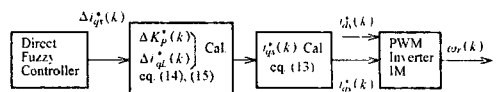


Fig. 4 Block diagram of improved fuzzy controller

직접 퍼지제어기의 출력에서 $\Delta i_{qs}^*(k)$ 를 얻고 식(13)과 식(14)에서 $\Delta K_f^*(k)$ 와 $\Delta i_{qs}^*(k)$ 를 계산한다. 이를 이용하여 식(12)에서 $i_{qs}^*(k)$ 를 계산하며 $i_{qs}^*(k)$ 와 자속제어기에서 퍼지제어기의 출력으로 얻은 $i_{ds}^*(k)$ 는 Fig.1에 나타난 전류제어기 및 공간벡터 PWM 인버터에 의해 유도전동기를 제어한다.

제시한 제어방법은 적응제어의 특수한 경우와 유사하며 퍼지시스템의 출력은 제어 파라미터를 새로운 값으로 변화시킨다. 제시된 방법은 지령분과 시스템의 동특성 사이에 오차분을 최소화하기 위해 이득을 새로운 값으로 변화시키는 제어기와 지령속도를 포함한 적응제어의 특수구조로 구성된다.

5. 해석 결과

Fig.5는 PI 제어기를 적용하며 지령속도의 2승에 비례하는 팬 부하를 인가한 상태에서 0.5(sec)에서 스텝 지령속도를 1800[rpm]으로 운전하다가 1.2(sec)에서 부하토크를 1(p.u)로 인가하여 운전하고 1.5(sec)에서 지령속도를 1600[rpm]으로 감소시켰을 경우의 응답특성이다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도, (b)는 q 축 전류, (c)는 a상 전류 및 (d)는 발생토크를 나타낸다. Fig.6과 Fig.7은 Fig.5와 같은 조건에서 종래의 직접 퍼지제어기 및 본 연구의 개선 퍼지제어기의 응답특성을 나타낸다.

Fig.8은 Fig.5~7의 응답성능을 명확하게 비교하기 위하여 지령속도의 변화 및 부하토크 인가한 구간을 확대하여 나타낸다. 그림 (a)는 지령속도가 정격속도에 도달할 경우의 응답속도이며 그림 (b)는 12[N·m]를 인가했을 경우의 응답속도를 나타내고 그림 (c)는 지령속도를 10% 정도 감소시켰을 경우의 응답속도를 나타낸다.

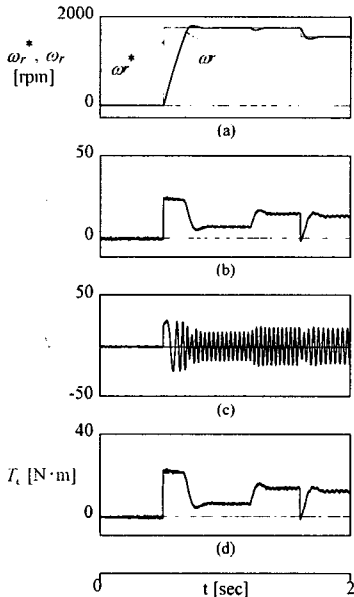


Fig. 5 Response characteristics of PI controller

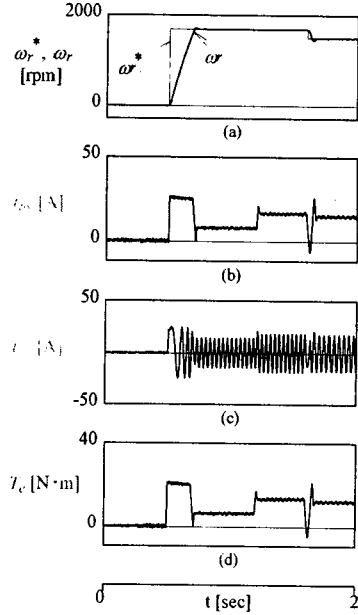


Fig. 6 Response characteristics of direct fuzzy controller

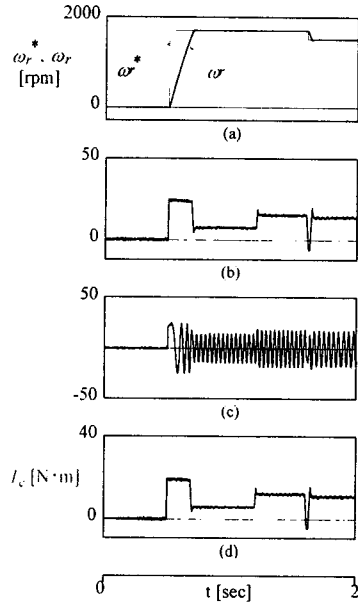


Fig. 7 Response Characteristics of improved fuzzy controller

Fig.8(a)에서 직접 퍼지제어기와 개선 퍼지제어기는 PI 제어기의 속도응답 보다 매우 양호한 성능으로 나타나며 개선 퍼지제어기는 직접 퍼지제어기 보다 오버슈트도 작게 나타나고 추종성능이 빠르게 나타난다. Fig.8(b)에서 PI 제어기는 속도변화가 크고 안정화 시간이 길어지며 직접 퍼지제어기와 개선 퍼지제어기의 성능은 유사하게 나타나지만 개선 퍼지제어기의 성능이 직접 퍼지제어기 보다 약간 우수하다. Fig.8(c)에서도 PI 제어기는 정상상태에 도달하는 속도가 느리며 직접

퍼지제어기는 오버슈트가 약간 크게 나타나며 개선 퍼지 제어기는 응답성능이 양호하게 나타난다.

Fig.9은 무부하 상태에서 관성의 변화에 대한 속도 응답의 비교를 나타낸다. 관성이 증가함에 따라 PI 제어기와 직접 퍼지제어기는 오버슈트가 증가하고 안정화 시간이 길어진다. 그러나 개선 퍼지제어기는 상승시간은 길어지지만 오버슈트는 감소하고 빠르게 안정화된다.

Fig.10은 무부하와 부하의 두 조건에 대한 속도 응답의 비교를 나타낸다. 무부하 조건에서는 정상상태에 추종하는 시간은 부하 12[N·m]의 조건에서 보다 매우 고속 성능이 나타난다. 그러나 부하 12[N·m]의 조건에서는 정상상태에 추종하는 시간은 느리지만 오버슈트는 감소하고 빠르게 안정화된다. 개선 퍼지제어기는 종래의 PI 및 직접 퍼지제어기 보다 성능이 우수하게 나타난다.

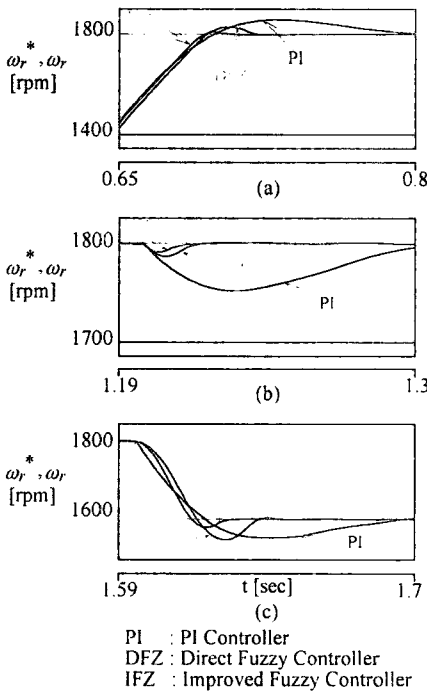


Fig. 8 Comparison of responses with PI, direct and improved fuzzy controller

- (a) Response to step speed $\omega_r^* = 1800 [rpm]$
- (b) Response to step load torque $T_L = 12 [N \cdot m]$
- (c) 10% change of ω_r^*

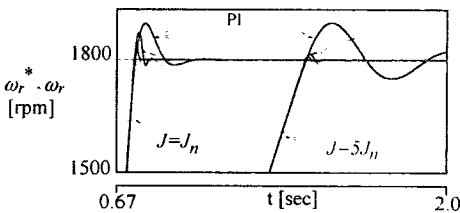


Fig. 9 Comparison of speed response for change Inertia

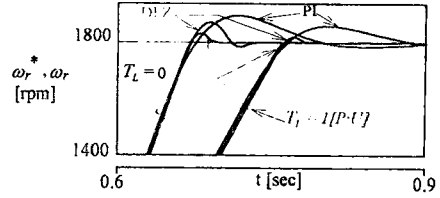


Fig. 10 Comparison of speed response for two load condition

6. 결론

본 연구는 유도전동기 드라이브의 성능향상을 위하여 개선된 퍼지제어기를 제시하였다. 퍼지제어는 미지의 동특성 및 다변 시스템의 요구에 양호하게 만족할 수 있는 특성 때문에 다양하게 적용되고 있다. 개선된 퍼지제어기는 드라이브의 정규동작 동안 변화하는 관성 모멘트와 부하토크의 변동을 보상하기 위하여 적용하였다. 그리고 개선된 퍼지제어기를 종래의 PI 및 직접 퍼지제어기와 비교하여 양호한 성능을 얻을 수 있었으며 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 스텝 지령속도가 정격으로 인가될 경우 직접 퍼지제어기와 개선 퍼지제어기는 PI 제어기의 속도 응답 보다 매우 양호한 성능으로 나타났다. 개선 퍼지제어기는 직접 퍼지제어기 보다 오버슈트도 작게 나타나고 추종성능이 빠르게 나타났다. 부하토크 인가와 속도변화에도 개선 퍼지제어기가 PI 및 직접 퍼지제어기 보다 응답성능이 양호하게 나타났다.
- (2) 관성을 5배로 증가시켰을 경우에는 PI 제어기와 직접 퍼지제어기는 오버슈트가 증가하고 안정화 시간이 길어졌다. 그러나 개선 퍼지제어기는 상승시간은 길어지지만 오버슈트는 감소하고 빠르게 안정화되었다.
- (3) 무부하 조건에서는 정상상태에 추종하는 시간은 부하 조건에서 보다 매우 고속 성능이 나타났다. 그러나 부하 조건에서는 정상상태에 추종하는 시간은 느리지만 오버슈트는 감소하고 빠르게 안정화되었다.
- (4) 관성과 부하토크 등의 파라미터의 변동에서 본 연구에서 제시한 개선 퍼지제어기는 종래의 PI 및 직접 퍼지제어기 보다 전반적인 응답성능이 양호하게 나타났다.

따라서 본 연구에서 제시한 개선 퍼지제어기의 성능이 종래의 PI 및 직접 퍼지제어기 보다는 매우 우수하게 나타났다으며 본 연구의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] B.K. Bose, "Expert systems, fuzzy logic and neural network applications in power electronics and motion control," Proc. of the IEEE, 82, pp.1303-1323, 1994.
- [2] Ichiro Michi, N. Nagai, S. Nishiyama and T. Yamada, "Vector control of induction motor with fuzzy PI controller," IEEE IAS, pp. 341-346, 1991.
- [3] A. Masmoudi, N. Derbel and A. Ouali, "Fuzzy logic based flux oriented control of DFISM," EPE'99, pp. 1-10, 1999.