

유도 전동기 가변속 제어를 위한 고정도 퍼지제어에 관한 연구

송 호신⁰, 이 오걸, 이 준탁, 우 정인
 동아 대학교 전기 공학과

A study on the Fuzzy Controller with High Accuracy for Variable Speed control of an Induction Motor

Ho-Shin Song⁰, Oh-Geul Lee, Joon-Tark Lee, Jung-In Woo
 Dept. of Electrical Engineering, Dong-A Univ.

Abstract

In this paper, we design the high accuracy speed controller of an induction motor by the Fuzzy control algorithms, which recently is invoking the remarkable interest.

In order to improve the dynamic responses such as the steady state error, the reaching time and the overshoot, the adjustment techniques for optimization of three scale factors are presented. Comparing with conventional PID control, the usefulness of proposed Fuzzy controller will be proved by the simulations.

1. 서론

유도 전동기는 최근 고성능 슬립 주파수제어 방식의 개발과 함께 종래의 직류기가 사용되고 있는 분야에도 그 활용이 확산되고 있다. 슬립 주파수형 벡터 제어방식은 전류를 여자 성분과 토오크 성분으로 분리하여 제어하고 있으며, 또한 토오크 설정치와 슬립 주파수를 비례시키므로서 고속의 진동없는 응답을 얻을 수 있다.

따라서, 유도전동기의 가변속 제어에는 여자성분 전류를 일정하게 두고 토오크 성분 전류를 PI혹은 PID제어기에 의해 가변시키는 방법이 일반적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 PI및 PID제어기는 외란이나 부하변동에 따라 제어상수를 조정해야 하는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로써 최적제어, 적응제어등이 있지만 많은 계산시간과 복잡한 이론이 부가되어야 하는 결점이 있으므로 고정도 정밀제어에서는 실용상의 문제점으로 대두되고 있다.¹⁻³⁾

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 종래의 PID제어기 대신에 최근 언어적 제어로 그 유용성이 입증된 퍼지제어 알고리즘을 이용하여 유도전동기의 견실한 속도제어를 실현하고자 한다. 그러나 퍼지 제어는 고전적 제어기에 비해 강인한 외란적응 특성 및 유연한 제어 성능을 가지는 반면에 최적 Rule설정 및 제어 변수의 양자화 Level 선정등에 있어서 많은 문제점이 있으며, 또한 퍼지 제어시 정상상태에서 잔류 편차가 존재하는 결점이 있다.^{4,5)} 따라서, 퍼지 Rule의 선정은 유도 전동기의 일반적인 동특성을 기초로 하여 구하며, 외란에 대한 강인한 속응성을 가지게 하고 또한, 퍼지제어에서 문제가 되고 있는 정상상태 잔류편차를 감소시키는 방안으로서 평가함수를 이용한 최적 스케일 팩터 선정법을 제시한다.

이를 시스템 구성이 간단한 전압제어형 유도전동기 속도 제어 시스템에 적용하였을때의 정상상태 편차 및 목표점 도달시간, 오버슈트등의 동특성을 종래의 PID제어기와 비교 고찰하여 그 우수성을 입증하고자 한다.

2. 퍼지 제어기

퍼지 소속함수는 삼각형, 종형 또는 사다리꼴 등이 있는데 일반적으로 널리 사용되고 있는 삼각형 소속함수를 사용하였다. 입력 변수로서는 오차 E 및 오차의 변화량 ΔE로 하고, 출력 변수로서 제어량의 변화량을 ΔU로 둘 경우에 각 변수에 대한 멤버십 함수는 그림 1과 같다.

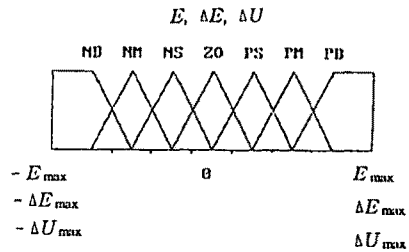


그림 1. E, ΔE 및 ΔU의 멤버십 함수
 Fig. 1. Membership Functions for E, ΔE and ΔU

여기서, NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB 는 언어적인 변수로서 각각 다음과 같다.

- | | |
|----------------------|----------------------|
| NB : negative big | PS : positive small |
| NM : negative medium | PM : positive medium |
| NS : negative small | PB : positive big |
| ZO : zero | |

또한, 퍼지제어기의 입출력 관계는 [E, ΔE] → ΔU로 표현되며, U의 시간 미분 즉 속도에 상당하는 ΔU를 출력하므로서 일반적으로 속도형 퍼지 알고리즘이라고 하며, 따라서, 시점 n에서의 실제 제어기 입력은 식(1)로 표현 된다.

$$U_n = U_{n-1} + \Delta U_n \quad (1)$$

먼저, 제어 규칙을 생성하기 위하여 유도 전동기의 폐 루프 제어시에 나타난 속도 오차와 오차의 변화량에 대한 위상면 제어를 기초로 하여 표 1과 같은 제어규칙을 얻었다.

다음은 외란에 대한 견실성 또는 정상상태의 잔류편차 등의 문제점을 보상하는 방법으로 퍼지 제어기의 입출력 변수에 스케일 팩터를 적용하였으며, 입출력 변수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E_{max} &= (\text{setpoint of error}) * SF_E \\ \Delta E_{max} &= (\text{setpoint of error change}) * SF_{\Delta E} \\ \Delta U_{max} &= (\text{setpoint of U change}) * SF_{\Delta U} \end{aligned} \quad (2)$$

표-1. 퍼지 제어 규칙표
Table-1. Rule Table for Fuzzy control

E	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ΔE/ΔU	PB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	PM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO
	PS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
	NS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM
	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
	NB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB

여기서, $0 < SF_E, SF_{\Delta E}, SF_{\Delta U} \leq 1$ 이고, 제어기 설계시에 각 변수에 대한 설정치는 아래와 같이 두었다.

- setpoint of error = 1000 (rpm)
- setpoint of error change = 12 (rpm)
- setpoint of U change = 6 (A)

각 스케일 팩터 $SF_E, SF_{\Delta E}, SF_{\Delta U}$ 는 퍼지 제어가 시스템의 최적한 성능을 발휘하도록 식(3)과 같은 3가지 평가지수를 이용할 수 있다.

$$Q_1 = (1 \max \omega(t) - \omega^* / \omega^*)$$

$$Q_2 = \min [t \mid \omega(t) = \omega^*]$$

$$Q_3 = \int_0^t E^2(t) dt$$

여기서, Q_1 은 시스템의 목표점에서의 상대적인 오버슈터링, Q_2 는 시스템의 응답이 목표점과 동일한 시점까지의 시간을 나타내며, Q_3 는 정상상태시에 시스템 출력과 목표점 사이의 제곱오차의 합이다.

과도상태 응답특성을 개선하기 위하여 SF_E 와 $SF_{\Delta E}$ 및 $SF_{\Delta U}$ 를 가변했을때 평가 지수의 변화율 그림 2에 나타내었다.

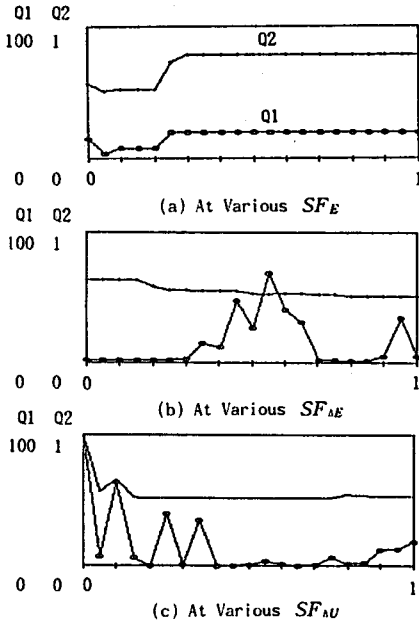


그림 2. $SF_E, SF_{\Delta E}, SF_{\Delta U}$ 의 변화에 대한 Q_1 과 Q_2 곡선
Fig. 2. Q_1 and Q_2 Curves at Various $SF_E, SF_{\Delta E}, SF_{\Delta U}$

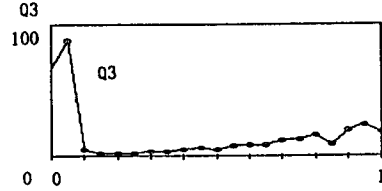


그림 3. 선정된 $SF_E, SF_{\Delta E}, SF_{\Delta U}$ 의 백분율 변화에 대한 Q_3 곡선
Fig. 3. Q_3 Curve at Various Percentage of $SF_E, SF_{\Delta E}$ and $SF_{\Delta U}$

그림 2(a)에서는 오버슈트에 대한 평가지수 Q_1 의 값이 0.1부근에서 최소값으로서 거의 일정함을 보이고, 도달시간에 대한 평가지수 Q_2 는 0.05 부근에서 최소가 되었다. 따라서, SF_E 의 값은 0.05으로 선택하였다. 그림 2(b)에서는 오버슈트량이 최소가 되도록 하기 위하여 Q_1 의 값이 최소가 되는 값으로서 $SF_{\Delta E}$ 을 0.8로 선택하였다. 그림 2(c)에서는 과도상태시의 강한 스위칭 특성을 얻기 위하여 $SF_{\Delta U}$ 를 0.85로 큰 값을 선택하였다.

또한, 정상상태시에 잔류편차를 줄이기 위하여 선정된 SF_E 와 $SF_{\Delta E}$ 및 $SF_{\Delta U}$ 의 스케일 팩터를 평가지수 Q_3 를 이용하여 재조정 하였다. 그림 3은 정상상태 운전시, 이미 선정된 스케일을 0%에서 100%까지 가변했을때 상승오차에 대한 평가지수 Q_3 의 변화를 나타내었다. 선정된 스케일의 20% 부근에서 평가지수 Q_3 가 최소로 되는것을 알 수 있다. 이상의 평가 지수를 이용하여 구한 최적 스케일 팩터값을 표 2에 나타내었다.

표-2. 최적 스케일 팩터
Table-2. Optimal Scale Factors

Operating State	Optimal Values		
	SF_E	$SF_{\Delta E}$	$SF_{\Delta U}$
Transient State	0.06	0.8	0.85
Steady State	0.012	0.16	0.17

3. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 장에서는 퍼지 제어기의 성능을 종래의 PID제어기의 경우와 비교 고찰한다. 시뮬레이션에 사용한 제어 블록도는 그림 4와 같으며, 유도 전동기 제정수는 표 3에 나타 내었다.

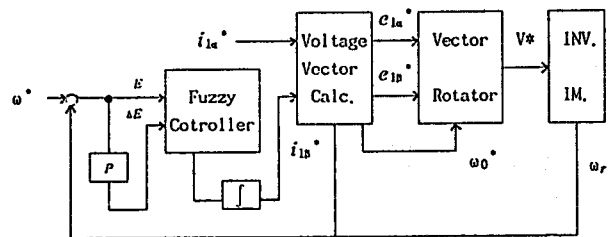


그림 4. 유도 전동기의 퍼지 속도 제어 블록도
Fig. 4. Fuzzy Speed Control Block Diagram of Induction Motor.

표-3. 유도 전동기 정수
Table-3. Parameters of Induction Motor

220 V, 3 Poles, 2 HP, Delta Connection	
r_1 : 1.67 (Ω)	r_2 : 1.52 (Ω)
L_1 : 102 (mH)	L_2 : 102 (mH)
M : 96 (mH)	J : 0.02 (Kg m^2)
B : 0.004 ($\text{Kg m}^2/\text{sec}$)	

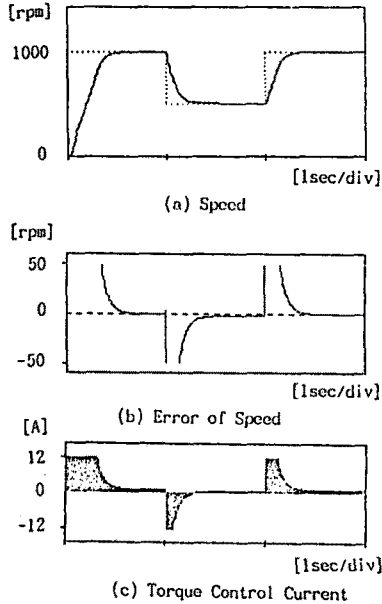


그림 5. 무부하시 PID 속도제어 시뮬레이션 결과.
Fig. 5. Simulation Results of PID Speed Control at No Load.

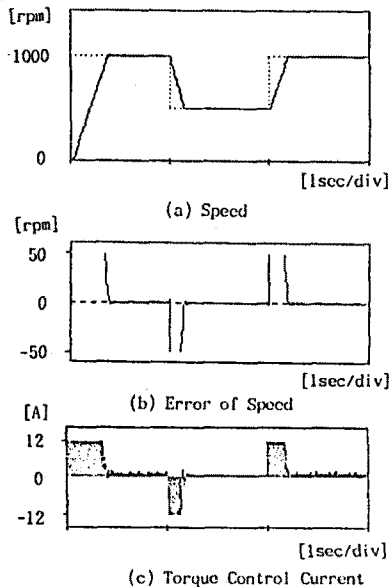


그림 6. 무부하시 Fuzzy 속도제어 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation Results of Fuzzy Speed Control at No Load.

퍼지 제어기는 기준속도 ω^* 와 실제속도 ω_r 과의 오차 E 및 오차의 변화량 ΔE 를 입력 신호로 하여 비퍼지한 값인 토오크 성분 지령전류 i_d^* 의 변화량 Δi_d^* 를 출력한다. 이 신호는 적분기를 거쳐 전압 벡터 연산기의 입력신호가 되며, 기동 전류를 고려하여 지령 전류의 최대값을 12[A]로 제한하였다. 전압 벡터 연산기는 전류 지령치를 슬립 주파수 지령치 및 제어 전압 지령치를 생성하고, 이 신호는 벡터 회전을 거쳐 인버터의 지령 전압으로 주어진다. 본 알고리즘의 시뮬레이션을 위한 제어주기는 2(msec)로 하였다.

먼저, 그림 5와 6은 무부하시에 속도 지령을 1000(rpm)으로 기동 후, 1초 시점에서 속도지령을 500(rpm)으로 변경하고, 2초 시점에서 1000(rpm)으로 복귀 시킬 때의 종래의 PID제어 및 퍼지 제어기에 의한 속도 추종특성을 보이고 있다.

여기서, PID제어의 비례상수는 제어특성을 고려하여 각각 $K_p = 0.1$, $K_i = 0.07$, $K_d = 0.5$ 로 설정하였으며, (a), (b), (c)는 각각 속도 궤적 과 $\pm 50(\text{rpm})$ 내의 속도오차 궤적 및 토오크 지령 전류를 나타내었다.

속도 지령을 1000(rpm)으로 기동 할때, 퍼지제어는 PID제어에 비하여 지령치의 약 $\pm 0.1\%$ 내의 미소한 오버슈트 및 정상상태 잔류 편차가 존재하는 반면에 지령치 도달 시간은 PID제어에 비하여 약 0.2(sec)이상 빠른 특성을 나타내고 있다. 지령속도를 500(rpm)으로 변경할 경우에 PID제어는 지령치에 도달하지 못하고 약 0.5% 이상의 잔류 편차가 존재하지만, 퍼지 제어는 약간의 오버슈트만 존재 할 뿐, 약 0.15(sec)의 빠른 지령치 추종성을 가지며, 정상상태 편차는 속도지령 변경전과 유사한 $\pm 0.1\%$ 이내에 있음을 알 수 있다.

즉, PID제어는 지령 속도 변경에 따라 계수를 조정해야 하는 문제점이 있지만, 퍼지제어에서는 이러한 결점을 해결할 수 있으며, 또한 지령치 도달시간이 종래의 PID제어에 비하여 약 30%이상 단축되어서 속응성 있는 추종특성을 보이고 있다.

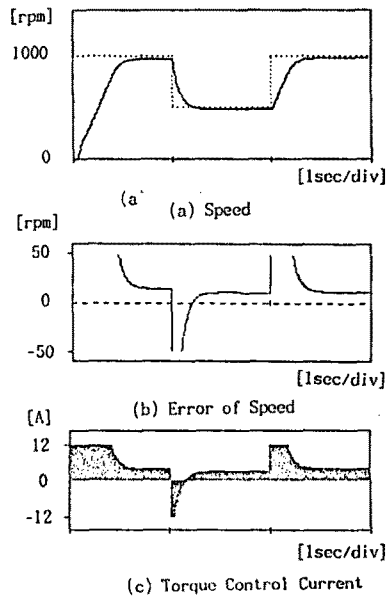


그림 7. 부하시 PID 속도제어 시뮬레이션 결과.
Fig. 7. Simulation Results of PID Speed Control at Load.
($T_l = 0.306 (\text{Kg.m})$)

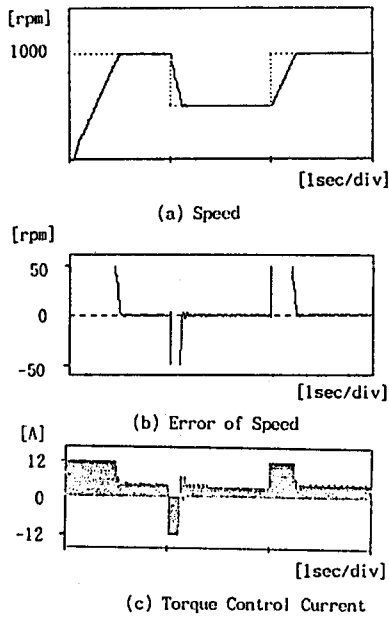


그림 8. 부하시 Fuzzy 속도제어 시뮬레이션 결과
 Fig. 8. Simulation Results of Fuzzy Speed Control at Load.
 ($T_l = 0.306$ (Kg.m))

그림 7과 8은 $T_l = 0.306$ (Kg.m)의 부하를 인가한 상태에서 PID 및 퍼지 제어의 기동 특성 및 속도 추종특성 결과를 나타내고 있다. PID제어는 기동시에 지령치에 도달하지 못하고 약 1.5% 정도의 지령치 오차가 잔류편차로서 계속 존재하지만, 퍼지제어는 목표치 도달 시간은 무부하시와 유사한 0.5(Sec)이 내이며, 정상상태 편차도 약 $\pm 0.1\%$ 내로 미소함을 알 수 있다. 또한, 속도지령을 500(rpm)으로 변경한 경우에도 PID제어는 역시 정상상태에 도달하지 못하고, 지령치의 약 2%의 잔류편차가 존재하지만 퍼지제어는 무부하시와 거의 동일한 결과를 보인다.

이상의 결과로부터 퍼지제어는 제어기 특성상 미소한 오버슈트 및 잔류편차가 존재하는 점을 제외하고는 종래의 PID제어에 비하여 지령 속도에 대한 추종성이 뛰어나며, 가변속 운전 및 부하에 대해서도 강인한 제어특성을 나타냄을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 퍼지 제어의 기본 알고리즘을 제시하고 제어 성능상의 취약성으로 인하여 실용상의 문제로 대두되고 있는 유도 전동기의 고정도 서보 운전의 가능성을 제시하였으며, 이를 제어 시뮬레이션을 통하여 입증하였다. 퍼지 제어를 설계하기 위하여 먼저, 위상면 궤적에 기초를 두고 직접 제어규칙을 생성하였으며, 퍼지 제어기의 건설한 제어성능 및 정상상태 편차를 줄이는 방안으로서 평가 함수를 이용한 최적 스케일 팩터 선정법을 제시하였다. 이를 기초로 하여 유도전동기의 속도 제어 시스템에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 첫째, 퍼지제어는 종래의 PID제어에 비하여 목표치 도달시간을 현저하게 감소시킬 수 있었다.
- 둘째, 가변속 운전 및 부하를 부가한 경우, PID제어에서는 정상상태 편차가 존재하기 때문에 이를 보상하는 방법으로 P, I, D 계수를 조정해야 하는 문제점이 있지만 퍼지 제어로서 이러한 점을 해결할 수 있었다.

세째, 부하를 부가한 경우, PID제어에서는 정상상태 편차가 과도하게 존재하지만, 퍼지제어에서는 지령치 도달시에 약간의 오버슈트만 나타날 뿐, 곧 지령치로 복귀하는 부하에 대한 건실성이 입증되었다.

향후 본 알고리즘에 의한 산업용 제어기의 실현과 학습에 의한 최적 스케일 선정등에 관한 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

參考文獻

1. 専門委員會, "可變速誘導電動機驅動 시스템의 高性能化技術", 日本 電氣學會技術報告, vol. 416-2, pp. 3-7, June, 1992.
2. E.H.Mandani, "Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning using Linguistic Synthesis", IEEE Trans. Comput., vol. c-26, pp. 1182 - 1191, Dec. 1977.
3. Witold Pedryca, "Fuzzy Control and Fuzzy Systems", John Wiley and Sons, N.Y., 1989.
4. Chuen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part 1", IEEE Trans., vol 20, no. 2, pp. 404-417, March /April, 1990.
5. Y.F.Li and C.C.Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE Control Systems Magazine, pp. 65 - 72, April, 1989.
6. Shin-ichi Yamada and Hideji Fujikwa, Atsushi Fuji, Junichi Yamakawa, "Tuning Method For A Fuzzy Controller", Pro. on Fuzzy logic Neural Networks, pp. 397-400, July, 1990.
7. 大西公平, 官地邦夫, 寺山島正之, "制御電壓原のよる 誘導機驅動の一方式", 日本 電學論 B, vol. 104, no. 11, pp. 727 - 732, 1985.