

유도전동기 속도 제어를 위한 뉴로 자기 동조 퍼지 제어기 개발

김도한*, 한진욱**, 이창구*

*전북대학교, **한국전자통신연구원

Development of a self-Tuning fuzzy controller for the speed control of an induction motor

Do-Han Kim*, Jin-wook Han**, Chang-Goo Lee

*Chonbuk Natioinal University, **Electronics and Telecommunications Research Institute

Abstract : This paper has a control method proposed for the effective self-tuning fuzzy speed control based on neural network of the induction motor indirect vector control. The vector control of an induction motor provides the decoupled control of the rotor flux magnitude and the torque producing current to performance is desirable. But, the drive performance often degrades for the machine parameter variations and its condition give rise to coupling of flux and torque current. The fuzzy speed control of an induction motor has the robustness about machine parameter variations compared with conventional PID speed control in a way. That proved to be some way from the true. The purpose of this paper is to improve the adaptation by offering self-turning function to fuzzy speed controller. In this paper, the adaptive mechanism of fuzzy speed control is used ANN(Artificial Neural Network) technique is applied in an IFO induction machine drive, such that the machine can follow a reference model (an ideal field oriented machine) to achieve desired speed. In this paper proved the self-turning method of fuzzy controller has the robustness about parameter variation and the wide range of adaptation by simulation

1. Introduction

유도전동기의 간접 벡터 제어방식은 저가이며, 실제적인 구현이 용이하기 때문에 대부분의 산업 분야에서 많이 찾아 볼 수 있다.[1] 일반적으로 유도전동기의 속도 제어계는 크게 2부분의 케이스로 나눌 수 있다. 먼저, 내부계는 전류제어계로서, 동기전류 제어기[2], 또는 피드포워드 전류제어기 등

을 사용한다[3]. 외부 속도 제어계에는 명령속도가 다양하게 변화할 때, 명령 속도를 잘 추종할 수 있도록, PI제어기가 사용된다. 이것은 PI제어기가 구현이 쉽고, 비교적 간단하기 때문이다.

유도전동기의 간접 벡터 제어에서 정확한 슬립의 계산은 자1 속과 토크의 독립적인 제어를 가능하게 한다. 하지만, 제어기의 동특성은 PI제어기의 성능과 슬립계산의 정확성에 많이 의존하는 것이 실제 밝혀졌다. 불행히도, 슬립의 계산은 운전 조건에 따라서 연속적으로 변화하는 회전자 시정수에 의존한다. 이 슬립의 계산은 회전자 시정수에 따라 변화하며, 회전자시정수는 동작조건에 따라 연속적으로 변화한다. 회전자 시정수의 변화로 인한 이러한 관계는 유도전동기의 간접벡터 제어에서 가장 큰 문제점 중 하나이기도 하다. 고전적 PI제어기는 한번 설치된 공정에서의 파라미터 변화에 대해 보상하지 못하는 단점을 가지고 있다. 근간의 연구는 전동기 구동분야에서 퍼지 제어기의 잠재력을 꾸준히 연구해왔다. S.kim과 B.Lee는 정확하게 설계된 직접 퍼지 제어기의 운전 능력이 고전적인 PI제어기에 비하여 좋을 수 있다는 것을 보였다[4]. 하지만, 동특성은 전동기 파라미터의 급격한 변화에 대해서는 여전히 불만족스러울 수 있다. 이것은 PI 제어 알고리즘이 복잡한 시스템을 대해 학습능력이 부족하기 때문이다. 본 논문에서는 뉴로 퍼지 모델 기준 학습 제어기(NFMRLC) 기법을 간접벡터 제어방식의 유도전동기구동 시스템을 위하여 설계하였다. 즉, 간접 벡터제어방식의 구동 시스템의 속도제어기로 사용한 퍼지제어기의 출력측 소속함수를 뉴럴 네트워크가 학습시켜, 오버슈트, 정상상태 오차, 부하외란의 감쇠 그리고, 다양한 속도 추종 같은 항목들에서 좋은 응답을 얻었다.

제안된 제어기의 성능을 검증하기 위해서 MATLAB/SIMULINK시뮬레이션을 통하여 보인다.

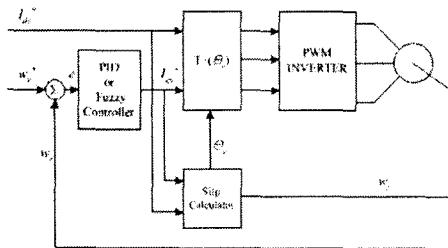


그림 1. 간접벡터 제어 블록 다이어그램

2. FMRLC BASED INDUCTIN MACHINE DRIVE

2-1. Reference Model

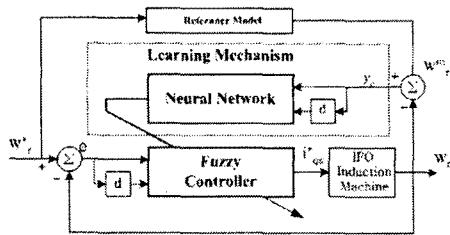


그림2. 자기동조 퍼지 속도 제어기

그림 1과 그림 2에서 보인 자기 동조 퍼지 속도 제어기에서 실제 전동기속도는 기준모델의 출력을 추종한다. 기준 모델의 조건은 다양한 속도명령에 대한 이상적인 응답을 보여야 한다. 더욱이, 이것은 다양한 운전 조건에서도 안정하여야 하고, 강인한 모델이어야 한다.

본 논문에서는 이상적인 벡터제어 유도전동기를 기준 모델로써 사용하였다. 이렇게 선택된 모델은 2차 시스템으로 표현할 수 있다[5]. 동기기준축에서, 기준모델은 그림 3과 같이 표현한다.

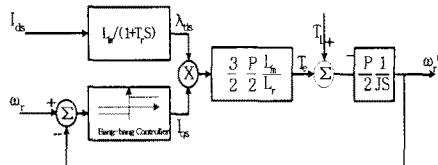


그림 3. 기준 모델

속도 제어기의 구현을 위해서는, 기준모델이 속도 명령을 포함하여 수정되어야 한다. 제어기는 그림 3에 나타난 bang-bang 제어기로 구현되는, 이상적인 토크명령 전류를 만드는 모델이어야 하는 조건을 가진다.

2-2. The Fuzzy Speed Controller

퍼지 속도 제어기는 이상적인 속도 응답에 필요한 토크 전류를 만든다. 기존의 퍼지제어기와의 차이점은 신경 회로망에 포함되어 있는 학습 메커니즘이 퍼지 제어기를 학습시켜 퍼지 속도 제어기에 적용성을 부여한다.

2-3 Fuzzification, Inference engine

본 논문에서는 입력과 출력의 양 소속함수에 균일한 분포의 삼각형 형태의 소속함수를 사용하였다. 퍼지속도제어기의 입력으로는 속도오차, $e(k)$ 가 사용되며, 이 속도오차 정보로부터 속도오차의 변화량, $\Delta e(k)$ 이 계산되어 또 다른 입력으로 사용된다. 추론에는 Zadeh의 추론 합성법칙이 사용되었으며, 비퍼지화에는 COG (Center of Gravity Method)의 방법을 사용하였다.

3. The Fuzzy Rule Base.

퍼지제어기의 강점은 바로 제어기 자체의 지식기반이다. 지식기반을 신중하게 설계함으로써, 설계자의 경험적인 지식이 제어기에 스며들어가는 것이다 [10]. 이 경험적인 지식은 입-출력 소속함수의 선택과 룰베이스에 통합된다. 룰베이스는 표 1에 나타나 있다. 앞에서 밝힌 바와 같이 본 논문에서는 초기에 입력과 출력의 소속함수에 균일한 분포의 삼각형태의 소속함수를 사용하였다. 입력의 범위는 그림 3과 같이 입-출력 소속함수의 범위는 각각 G_1, G_2, G_u 에 의하여 증가하거나 감소한다. 이득 G_1, G_2, G_u 를 조정하는데 우선되어야 할 조건은 퍼지 제어기 소속함수 위치는 각각 자신의 중심에 위치하고 있다는 것이다. 이렇게 중심을 잡고 있는 소속함수를 기반으로 이득을 조정하게 된다. G_u 를 먼저 1로 고정시키고, 다음에 G_1 과 G_2 를 만족 할 만한 응답이 얻어질 때까지 조정한다.

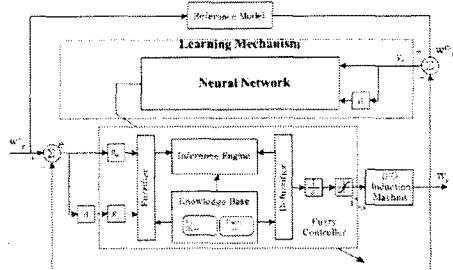


그림 4. 학습알고리즘과 퍼지 속도제어기

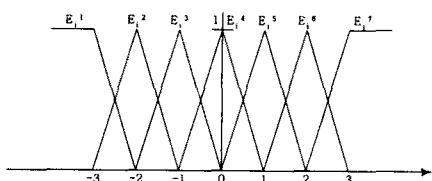


그림 5. 입력측의 소속함수 $\mu_{E_i}(e_i)$

표 1. 퍼지 룰 테이블

Rule Base	$Y_{el}^j(y_e)$							
	P	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
$Y_{el}^j(y_e)$	NB	PB	PB	PB	PM	PM	PM	PS
	NM	PB	PB	PM	PM	PM	ZE	NB
	NS	PB	PM	PM	PS	NS	NB	
	ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
	PS	PB	PS	NS	NM	NM	NM	NB
	PM	PB	ZE	NM	NM	NM	NB	NB
	PB	NS	NM	NM	NM	NB	NB	NB

NB : Negative Big

PS : Positive Small

NM : Negative Medium

PM : Positive Medium

NS : Negative Small

PB : Positive Big

ZE : ZERO

제시한 표에서는 실제 속도가 되도록 빨리 명령 속도를 추종할 수 있도록 오버슈트 없이 자속과 토크가 서로 독립되는 모든 이점을 획득 할 수 있도록 설계되었다. 일반적인 퍼지제어기는 양의 출력으로부터 음의 출력으로까지 분리를 위해 룰베이스 안에 zero의 대각 행을 가지고 있다 (i.e : 출력이 "0"이 되도록). 하지만 제시한 퍼지제어기의 룰베이스는 그렇지 않다. 테이블에 중심에서의 제로가 나타나있고, 오차와 그 변화가 "0"이 된다 $\Delta I_{qs}^* = 0$. 어느 방향으로든지 중심으로부터 멀리 벗어나기 시작하면, 퍼지제어기는 I_{qs}^* 의 증가와 감소를 초래한다. 예를 들면 법칙이

IF " e " is "-3" and " \dot{e} " is "3" THEN ΔI_{qs}^* is "1"
 w , 이 w^* 보다 훨씬 작은 경우에 해당한다면, w ,
 w^* 에 최대한 빨리 접근하려고 가속하게 된다.
 일반적인 퍼지제어기는 $\Delta I_{qs}^* = 0$ 이라는 결론에 도

달하게 된다. 하지만, 이 제안된 퍼지제어기는 비록 빠르게 가속하더라도 전동기의 토크는 천천히 증가하는 것으로 결정한다. 제동은 오차가 -2가 될 때 얻어져야 하는 값으로 다음 규칙에 적용된다.

IF " e " is "-2" and " \dot{e} " is "3" THEN ΔI_{qs}^* is "-3"
 그러므로 전류 명령은 속도가 명령 속도를 오버슈트하지 않도록 빠르게 감소하게 된다. 전동기의 자속과 토크가 서로 독립되어 비간섭이라면, 거의 순간적으로 오슬레이션 없이 토크가 변화하게 된다. 그러므로, 결과적인 퍼지 속도 제어기는 갑작스러운 변화에 대해서 안정적이도록 설계되어야 한다. 두 번째 법칙을 보도록 하자. (예를 들어, 전류 명령이 양의 "1"로부터 음의 "3"으로 변화한다.) 전형적인 퍼지제어기의 룰베이스는 제한범위 부분에서의 반응은 좀더 부드러운 것을 알 수가 있다. 결과적으로 갑작스러운 변화에 대한 룰베이스의 설계는 운전 시스템의 순발력을 증진시킨다. 특히, 중심 근처의 를 또한 전형적인 퍼지제어기와는 많이 다르다. $e = -1$ 과 $\dot{e} = 1$ 때와 $e = 1$ 과 $\dot{e} = -1$ 일 때의 법칙은 전형적인 퍼지제어기라면 출력으로 "0"의 값을 가질 것이다. 하지만 제안된 제어기는 각 경우에 해당하여, "1" or "-1"의 출력을 가질 것이다. 전류명령의 이러한 변화는 시스템을 제로의 출력을 보이기는 것 보다 빠르게 제로의 오차를 보일 것이다. 당연히 중심 근처의 이러한 법칙은 오차를 좀더 효과적으로 감소시킴으로써 정상상태의 운전 능력을 향상시키게 된다. 요약하자면, 오차와 오차의 변화가 크게 변할 때, 전류명령이 크게 변하는 것을 대비해서 설계되었다. 이러한 작업들은 FOC 운전의 토크능력을 좀 더 좋게 한다. 오차와 오차의 변화가 제로("0")일 때는 퍼지제어기는 속도명령에 도달한 것으로, 그 때의 속도를 그대로 유지해야 한다. 만일 어떠한 왜란이 발생하더라도, 중심근처의 를이 명령속도에 실제속도를 맞추기 위해서 전류명령을 재빠르게 바꿔준다.

4. The Learning Mechanism

신경회로망을 사용한 학습메커니즘은 폐루푸 시스템이 마치 기준모델처럼 행동 할 수 있도록, 퍼지 속도제어기 출력의 소속함수들의 중심의 위치를 학습시킨다. 신경회로망은 많은 수의 기본적인 처리요소들이 모여 이루어진 것으로, 그 성능은 네트워크의 구조, 연결강도 및 뉴런에서 행해지는 연산에 의해 결정되며, 병렬처리가 가능하다. 본 논문에

서는 그림 7과 같이 3층 구조를 갖는 백프로퍼게이션 알고리즘을 사용하여 퍼지속도제어기 소속함수의 위치를 학습한다. 백프로퍼게이션 학습알고리즘의 단점을 보완하고 수렴속도를 빠르게 하기 위해 바이어스항을 추가하고 적응학습률 기법을 적용하였으며 활성함수로는 시그노모이드함수를 사용하였다.

$$y_e(KT) = \omega_r(KT) - \omega_r''(KT) \quad (1)$$

그림 5에서 신경회로망의 입력값으로는 기준모델의 출력, ω_r'' 과 실제전동기의 출력, ω_r , 사이의 오차 y_e 과 오차의 변화량 Δy_e 이 사용된다. (1)식, 여기에서 KT 는 K 번째 샘플링값을 나타낸다. 오차 $y_e(KT)$ 는 이상적인 속도 응답이 보일 때까지 매 샘플링 시간마다 측정된다. 이상적인 속도응답이 나타나면, 학습매커니즘은 더 이상의 학습을 하지 않게 된다. 신경회로망의 출력은 퍼지제어기 소속함수의 기준 위치를 변경시키는 변경함수 $t_n(KT)$ ($n = 1, 2, 3, \dots, 6$)이 된다. 이 함수와 각 소속함수의 기준들이 서로 계산하여 출력 소속함수의 위치를 결정하게 된다.

$$\text{Center}^i(KT) = \text{Center}^i(KT - T) + t(KT) \quad (2)$$

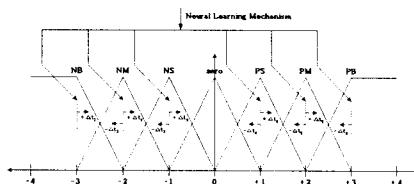


그림 6. 퍼지 소속함수의 학습

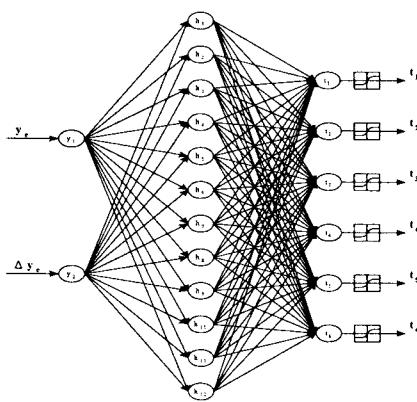


그림 7. 뉴럴 네트워크의 구조

5. Simulation Results

본 논문에서 제안한 자기동조 퍼지 속도제어기의 동특성은 MATALB/SIMULINK를 사용하여 검증하였다. 전동기의 모델로는 3상 유도전동기를 사용하였고, 퍼지 속도제어기를 적용하였다. 전동기의 파라미터는 표 2와 같다. 그의 동특성은 자속과 토크가 정확히 서로 독립적일 때와 상호간의 간섭현상이 발생하였을 때의 결과를 관찰하였다.

표 2. 유도 전동기 파라미터 공칭값

Rated Power, P_{rated}	2.2[kW]	Rated Current, I_{rated}	8.82[A]
Rated Voltage, V_{rated}	220[V]	Number of Pole Pairs, N_p	2
Stator Resistance, R_s	0.687[Ω]	Rotor Resistance, R_r	0.842[Ω]
Stator Inductance, L_s	83.97[mH]	Rotor Inductance, L_r	85.25[mH]
Magnetizing Inductance, L_m	81.36[mH]	Moment of Inertia, J	0.03[Nm.s ²]
Damping Coefficient, B	0.01[Nm]		

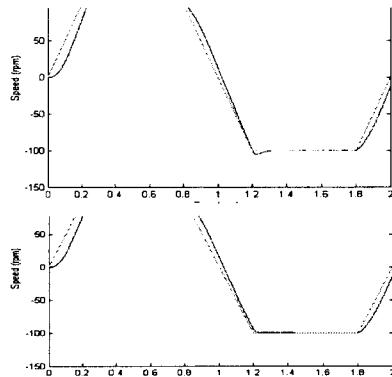


그림 8. IFOC 속도 추정 (detuning)

그림 8은 제안한 제어기의 성능을 검증하기 위하여 디투닝 상황에서 입력으로 Trapezoidal 입력을 가하여, 무 부하일 때의 퍼지제어기와 PID제어기의 파형을 비교한 것이다. 그림에서도 알 수 있는 바와 같이 디튜닝 상황에서 PID의 파형이 5%의 오버슈트를 보인다는 것을 확인하였다.

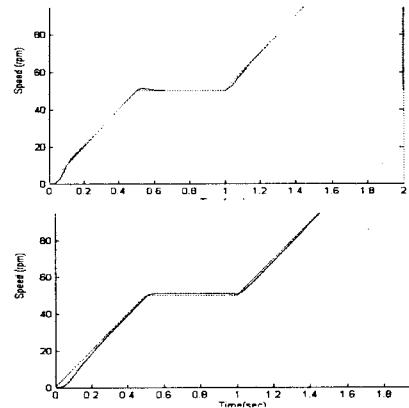


그림 9. IFOC 가변 속도 추정 (deturning)

generating system with a double excited reluctance machine" in Proc. IEEE-PESC, 1994

그림9는 PID와 퍼지속도 제어기의, 디튜닝 상황에서의 순차 가속에 대한 속도 추종 특성을 보인 것이다.

6. Conclusion

퍼지제어기는 외란에 대한 강인함과 디튜닝 상황에서의 강인함을 강점으로 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 퍼지 제어기의 강점에 신경망을 사용한 학습능력을 부여함으로써 퍼지제어기의 적용성을 한층 더 향상 시켰다. 이 적용성은 뉴럴 네트워크가 퍼지 제어기의 출력측 소속함수의 각 함수들의 중앙의 위치를 학습시킴으로 얻을 수 있었다. 제안된 알고리즘은 유도전동기의 간접 벡터 제어시스템에 적용시켜 그 제어 성능을 관찰하였다. 학습하지 않은 퍼지 제어기와 제시한 퍼지 제어기를 비교해 볼 때, 학습되지 않은 퍼지 제어기 단독으로 사용 될 때에도, 어느 정도 외란에 대한 영향과 디튜닝 효과에 대한 강인함을 보이기는 하였지만, 비록 급격한 명령에도 좋은 응답을 보이도록 룰베이스를 설계한 퍼지제어기도 만족스러운 결과는 보이지 못하였다. 하지만 제안된 자기 동조 적용퍼지제어기는 만족스러운 응답을 보인다는 것을 확인하였다.

【참고문헌】

- [1] Paul. C. Krease, Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hill, 1984
- [2] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, A new synchronous current regulator and an analysis of current-regulated PWM inverters, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. IA 22, pp. 678~690, July/Aug. 1986.
- [3] R. D. Lorenz and D. B. Lawson, Performance of feedforward current regulators for field-oriented induction machine controllers, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. IA 23, pp. 597~602, July/Aug. 1987.
- [4] C. won, S. KIM and B. K. Bose, "Robust position control of an induction motor using fuzzy logic control" in IEEE-IAS Meet, 1992, pp.472~481
- [5] T. A. Lipo and D. Novotny, Principles of vector control and field orientation, IEEE-IAS Intro. Field Orientation High Performance Drives, Tutorial Course, Oct. 1985.
- [6] "Adaptive fuzzy control of a variable speed