

### 유도전동기의 속도제어를 위한 유전-퍼지 제어기

권태석\*, 김창선\*\*, 김영태\*\*\*, 오원석<sup>1</sup>, 신태현<sup>1</sup>, 김희준<sup>1</sup>  
현대엘리베이터기술연구소\*, 목포대학교\*\*, 국립원주대학교\*\*\*, 유한대학<sup>1</sup>, 한양대학교<sup>1</sup>

### Genetic-Fuzzy Controller for Induction Motor Speed Control

Tae-Seok Kwon\*, Chang-Sun Kim\*\*, Young-Tae Kim\*\*\*, Won-Seok Oh<sup>1</sup>, Tae-Hyun Sin<sup>1</sup>, Hee-Jun Kim<sup>1</sup>  
Hyundai Elevator Inst. of Tech.\*, Mokpo Univ.\*\*, Wonju College\*\*\*, Yuhan College<sup>1</sup>, Hanyang Univ.<sup>1</sup>

**Abstract** - In this paper, an auto-tuning method for fuzzy logic controller based on the genetic algorithm is presented. In the proposed method, normalization parameters and membership function parameters of fuzzy controller are translated into binary bit-strings, which are processed by the genetic algorithm in order to be optimized for the well-chosen objective function (i.e. fitness function). To examine the validity of the proposed method, a genetic algorithm based fuzzy controller for an indirect vector control of induction motors is simulated and experiment is carried out. The simulation and experimental results show a significant enhancement in shortening development time and improving system performance over a traditional manually tuned fuzzy logic controller.

#### 1. 서 론

산업계에서 널리 쓰이는 유도 전동기는 보수 유지면과 경제성 등에서 직류 전동기보다 우수하고, 벡터제어 이론의 발전으로 어느 정도 높은 정밀도의 제어를 요구하는 시스템에도 적용이 가능하게 되었다. 하지만, 유도 전동기는 심한 비선형성을 나타내므로 PID제어기와 같은 기존의 선형제어기로는 만족할 만한 제어특성을 기대하기 힘들다. 따라서 유도 전동기를 제어하기 위한 새로운 제어 방식에 관한 연구가 진행되고 있는데, 이 중 퍼지제어기는 시스템의 수학적 모델링 없이 설계자의 경험적 지식만으로도 설계가 가능하다는 것 등의 많은 장점을 지니고 있어 퍼지제어기에 의한 유도전동기의 제어에 관해 많은 연구가 있어 왔다. [1,5]

퍼지제어기는 불확실하고 애매한 상태를 퍼지변수들로 표현하며 이러한 퍼지변수 입력에 대해 설계자의 직관이나 경험에 의한 법칙을 적용하여 역시 퍼지변수로 나타내어지는 출력을 발생하는 제어기이다. 이 이론은 다른 고전적인 제어이론에 비하여 쉽고 비교적 좋은 성능을 얻을 수 있는 반면, 제어기의 체계적인 설계 절차가 없어 오랜 시간에 걸친 시행착오에 의한 설계를 해야 한다는 단점을 가지고 있다. 또한 설계자의 직관이나 경험에 의해 얻어진 제어기의 제어 상수가 최적 또는 최적에 가까운 값이라는 보장도 없다. 따라서 퍼지제어기의 최적화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. [5,6]

유전알고리즘은 최근 최적화 탐색 문제에서 점차 중요한 알고리즘으로 자리잡혀 가고 있다. 이것은 자연의 진화 과정을 인공 시스템에 적용하는 것으로 다른 최적화 기법에 비하여 다음과 같은 특징을 지닌다. 먼저 파라미터 영역의 연속성이나 미분 가능과 같은 수학적 조건이 필요하지 않고, 국부 탐색이 아닌 전역 탐색을 하므로 국부 수렴의 확률이 적으며, 알고리즘 수행을 위한 보조정보가 필요하지 않다. [4]

본 논문에서는 유도전동기의 속도제어를 위해 퍼지제어기와 유전알고리즘을 합성한 방법을 제안한다. 퍼지제어기는 정규화, 퍼지화, 추론, 비퍼지화, 비정규화의 과정을 갖는데, 정규화 및 비정규화 상수, 그리고 퍼지변수의 소속함수 파라미터를 유전알고리즘을 이용하여 반복학습의 형태로 동조한다. 고전적인 방법으로는 위의 파라미터들을 긴 시간의 시행착오를 거쳐 조정해야 하지만, 제안한 방법으로는 이러한 과정이 생략되고 최적 또는 최적에 가까운 제어특성을 얻을 수 있다. 제안된 방법의 타당성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 입증한다.

#### 2. 퍼지 제어이론

퍼지이론은 Zadeh(1965)[5]에 의해 소개되어, 최근 그 응용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 퍼지논리를 이용한 제어는 제어상의 수학적 모델링이 필요 없고, 설계자의 직관이나 경험에 의한 제어이론으로써 모델링이 어렵고 복잡한 비선형 플랜트를 제어하기에 적합하다. 또한, 다른 고전적인 이론에 비하여 쉽고 비교적 우수한 성능을 얻을 수 있다. 하지만, 제어기 성능에 필수적인 소속함수와 제어 규칙등의 선정에 체계적인 절차가 없이 오랜 시간에 걸친 시행착오에 의해 설계를 해야 하고, 정확한 계산에 의한 제어가 아니기 때문에 안정도에 문제가 있다는 단점이 있다. 본연구는 유전알고리즘으로 이를 해결하려 한다.

#### 3. 유전 알고리즘

유전 알고리즘은 John Holland[4]에 의해 처음 도입되어 최적화 탐색 알고리즘으로 점차 중요해지고 있다. 이는 자연의 진화과정을 인공시스템에 적용한 것으로 이진수의 문자열로 표현되는 개체(individual)들로부터 출발한다. 이들 개체들은 모여서 하나의 세대(generation)를 이루며 복제(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)등과 같은 과정을 거쳐 다음 세대를 형성한다. 유전 알고리즘이 적용되는 목적에 따라 적합도(fitness value)를 판별하는 함수가 정의되고 각 세대들은 이 적합도가 큰 방향으로 진화되어 나간다. 유전 알고리즘은 탐색 영역의 미분가능과 같은 수학적인 조건이 필요하지 않고 국부 수렴을 피할 수 있다는 점에서 다른 최적화 기법에 비하여 우수하다.

그림1은 유전 알고리즘의 적용과정을 나타낸 흐름도이다. 본 논문에서는 SGA(Simple Genetic Algorithm)를 사용하였으며, 최대 적합도의 개체를 다음 세대에 그대로 살리는 엘리트즘(elitism)을 가미하였다. 흐름도에 따른 유전 알고리즘의 진행을 살펴보면 다음과 같다.

- i) 0 세대를 초기화한다. 즉, 초기 세대내의 각 개체들을 임의의 값으로 정하고 그 적합도를 계산한다.
- ii) 각 개체들에 대해서 엘리트즘과 복제, 교배, 돌연변이 등의 연산을 행한다.
- iii) 세대내의 각 개체들의 적합도를 계산한다.
- iv) 종료 조건에 부합할 때까지 ii) ~ iii)의 과정을 반복한다. 본 논문에서 교배 확률과 돌연변이 확률은 각각

0.85, 0.002로 하였으며, 세대수는 100세대, 한 세대내의 개체의 수는 20개로 하였고, 하나의 개체는 72개의 bit로 구성하였다. 이는 연산과정이 너무 오랫동안 지속되지 않도록 적절히 선택한 것이다.

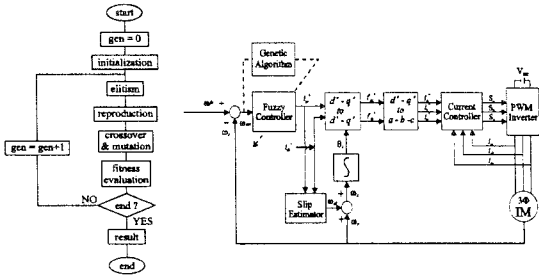


Fig.1.Flow chart of SGA Fig.2.Indirect control of IM using genetic-fuzzy controller

#### 4. 유전알고리즘과 퍼지제어기를 이용한 속도제어기

그림2는 본 논문에서 제안한 속도 제어기를 유도전동기의 간접벡터제어 시스템에 응용한 것이다. 제안된 제어기에서 퍼지 제어기는 유전알고리즘을 통하여 구한 제어상수들을 이용하여 토크성분의 전류 지령치  $i_{qs}^*$ 를 만들어 낸다.

퍼지제어기를 구성하기 위해 설계자는 정규화 및 비정규화 상수, 퍼지 변수 각각의 소속함수 형태, 그리고 제어 규칙 등을 정해야 한다. 이는 매우 오랜 시간을 통한 시행착오를 거쳐야 만족할 만한 성능의 제어기를 구성할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 퍼지제어기의 정규화 및 비정규화 상수와 소속함수의 형태를 유전 알고리즘을 통하여 시스템에 알맞게 동조시킨다. 하나의 개체는 72개의 2진 bit로 구성하였으며, 속도오차에 관한 정규화상수 8bit, 오차 변화에 관한 정규화상수 8bit, 제어기 출력에 관한 비정규화상수 8bit, 그리고 소속함수 형태에 관한 상수 48bit등으로 구성하였다. 퍼지제어기에 유전 알고리즘의 문자열을 합성하는 방법은 다음의 식(1)과 같다.

$$p(k) = cp(k) + gap(k) \quad (1)$$

여기서,  $p(k)$ 는 소속함수의 파라미터값이고,  $cp(k)$ 는 일반적으로 얻을 수 있는 파라미터값,  $gap(k)$ 는 GA를 통해 얻은 파라미터값이다. 이와 같이 퍼지제어기의 파라미터들을 유전알고리즘에서 얻은 값만으로 정의하지 않은 것은 소속함수들이 퍼지 개념을 벗어난 형태를 갖는 것을 방지하기 위해서이다. 예를 들면 '조금 적다(NS)'의 소속함수가 양의 퍼지 영역에 존재하게 된다면 이는 퍼지 개념을 벗어나는 것이다. 따라서 본 논문에서는  $gap(k)$ 의 값이  $\pm 0.2$ 이내의 값을 갖도록 제한하였다.

각 개체의 적합도를 판별하기 위해 오차의 절대값의 합과 상승시간을 이용하였으며 식(2)와 같다.

$$fitness\ value = \frac{1}{1 + \alpha \cdot t_r + \beta \cdot \sum |e|} \quad (2)$$

여기서  $e$ 는 속도오차값이고  $t_r$ 는 상승 시간이며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 상수 값이다. 이 값이 크면 한 세대 내에서 우성임을 나타내며 작으면 열성임을 나타낸다.

#### 5. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 제안한 제어기의 우월성을 입증하기 위하여 고전적인 시행착오 과정을 통해 구성된 퍼지제어기와 유전알고리즘을 적용한 퍼지제어기를 시뮬레이션을 통하여 비교하고, 또한 전동기를 교체하는 경우에도 제안된 방법으로 제어기를 구성할 수 있음을 보이기로 한다. 시뮬레이션에서 사용된 전동기의 파라미터들을 다음의

표 1에 나타내었다.

Table 1. Parameters of motors

	$R_s(\Omega)$	$R_r(\Omega)$	$L_s(H)$	$L_r(H)$	$L_m(H)$
전동기 1	0.435	0.816	0.071	0.071	0.069
전동기 2	0.294	0.156	0.4194	0.4187	0.418
	$J(kg\cdot m^2)$	P	출력 [Hp]	정격토크[Nm]	
전동기 1	0.089	4	3	11.9	
전동기 2	0.4	6	10	61.2	

퍼지제어기는 입력 변수를 속도오차와 그 변화로 하였고 출력 변수를 토크 지령치의 변화율로 하였다. 입·출력 변수들은 모두 7개(NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB)의 퍼지변수로 나누었고, 각각의 퍼지변수들은 삼각형 모양의 소속함수를 갖는다. 추론 방법으로는 SUP-MIN법을 사용하였고, 비퍼지화는 무게중심법을 사용하였다.

본 논문의 시뮬레이션에 사용된 유전 알고리즘 상수들은 교배확률 0.85, 돌연변이 확률 0.002, 세대수 100세대, 세대내 개체수 20개, 개체의 길이 72bit로 하였다.

고전적인 시행착오과정을 통해 전동기 1에 대한 퍼지제어기를 구성하여 스텝의 속도 지령치에 대한 추종성을 살펴 보았다. 표 2와 그림3(a)는 이와같이 설계된 퍼지제어기의 제어 규칙과 소속 함수의 모양을 나타낸 것이다.

그림3(b)는 이 경우 속도의 스텝 명령에 대한 응답을 나타낸 것이며  $t=0.6(sec)$ 에서 부하 변동을 주었다. 부하 변동의 양은 정격 부하의 1/2로 하였고, 이와 같은 조건을 모든 시뮬레이션에 적용하였다. 그림4(a)는 유전 알고리즘을 사용하여 퍼지제어기를 100세대 학습시킨 후 같은 조건에서 시뮬레이션하고 역시 속도의 스텝 응답을 나타낸 것인데 고전적인 방식으로 설계된 제어기보다 상승시간이 줄어들고 정상상태의 오차도 줄어들었음을 알 수 있다. 또한 그림4(b)는 최대적합도와 평균적합도를 나타내며 세대가 증가할수록 퍼지제어기의 파라미터들이 최적에 가깝게 동조되어 감을 알 수 있다. 다시 말해서, 세대가 증가할수록 최대 적합도의 값과 평균 적합도의 값이 증가하여 감을 알 수 있다.

그림5(a)와 5(b)는 각각 초기의 소속 함수의 모양과 유전알고리즘으로 동조된 이후의 소속 함수 모양이다. 동조 이전과 이후에 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

그림6(a)는 위에서 고전적인 방법으로 설계한 퍼지제어기로 다른 정격의 전동기 2의 속도응답을 나타낸 것인데, 상승시간이나 정상상태 오차, 정착시간 등의 측면에서 볼 때 그림3(a)의 경우와 비교해서 크게 차이 남을 알 수 있다. 그러므로 다시 긴 시간의 시행착오를 거쳐서 제어기를 설계해야만 할 필요가 있음을 알 수 있다. 그러나 유전알고리즘으로 바뀐 전동기에 대해 학습시킨 후 역시 스텝의 속도지령을 주면 그림6(b)에서 보듯이 시스템은 빠른 상승시간과 작은 정상상태오차를 갖는다. 따라서 제안한 방법으로 전동기가 교체된 경우에도 시행착오의 과정을 생략하고 제어기를 동조시킬 수 있음을 알 수 있다.

Table 2. Decision table of fuzzy controller

		속도 오차 변화						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
속도 오차	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	PS	PM
	NS	NB	NB	NB	NS	PS	PS	PM
	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
	PS	NM	NS	PS	PM	PB	PB	PB
	PM	NM	NS	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

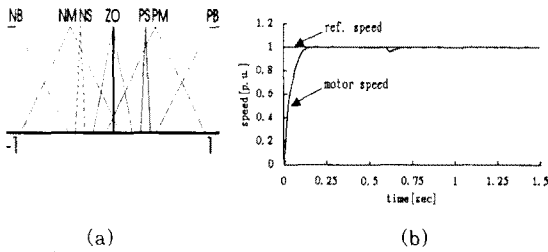


Fig.3. (a)Membership function of fuzzy variable(b) Step response of fuzzy controller designed by conventional method

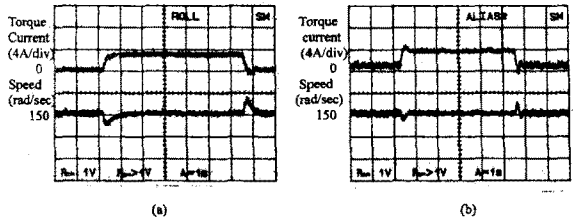


Fig.8 Load variation characteristics 2 (a) conventional fuzzy (b) GA-fuzzy

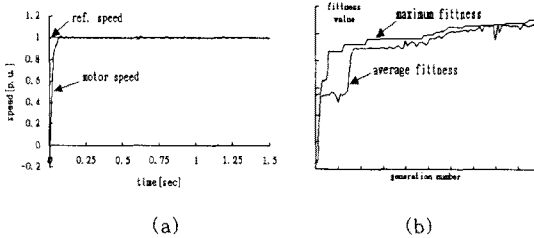


Fig.4 (a)Step response with fuzzy controller tuned by GA (b) Maximum and average fitness values

## 6. 실험 결과

본 연구의 실험을 위해서 DSP TMS320C32를 이용하고, 30A, 600V IPM을 사용한 인버터를 제작하였다. 샘플링시간은 0.1 ms, 데드타임은 8  $\mu$ s로 하였다. 그림7은 전동기1일 때, 그림8은 전동기2일 때의 부하변동에 관한 속도 특성이다. 속도 명령은 150[rad/sec]로 하였다. 시뮬레이션과 유사하게 유전-퍼지 제어가 양호한 응답특성을 보이고 있다. 기존의 퍼지 제어기보다 유전-퍼지 제어가 전동기 교체를 비롯한 파라미터 변동에 적응적으로 대처함을 알 수 있다.

## 7. 결론

본 논문에서는 유도전동기의 속도제어를 위한 방법으로 퍼지제어기에 유전알고리즘을 합성한 방법을 제안하였고, 시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성을 평가하여 보았다. 기존의 방법대로 오랜 시간의 시행착오를 거쳐 설계한 퍼지제어기와 유전알고리즘을 이용하여 학습시킨 퍼지제어기에 같은 형태의 스텝입력과 부하변동을 주어 비교하는 형태를 취하였다. 그 결과를 통하여, 제안된 방법이 상용 시간이나, 정상상태오차 등의 측면에서 더 우수함을 알 수 있었다. 다시 말하여, 유전알고리즘의 세대가 증가할 수록 제어기의 파라미터가 시스템에 적절한 형태로 동조됨을 확인하였다. 또한, 전동기를 교체하여 사용하는 경우, 기존의 퍼지제어기의 경우에는 다시 시행착오를 거쳐서 제어상수를 결정해야 하지만, 제안된 알고리즘을 이용하면 이러한 과정이 생략되고, 약간의 학습시간만으로 우수한 성능의 제어를 얻을 수 있음을 확인하였다.

## [참고 문헌]

- [1] F. Ashrafzadeh, E. P. Nowicki, and J. C. Salmon, "A Self-Organizing and Self-Tuning Fuzzy Logic Control of Induction Motor Drives", 30th IAS vol.2 pp.1656-1662, 1995.
- [2] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives," Prentice-Hall, 1986.
- [3] Andrej M. Trzynadlowski, "The Field Orientation Principle in Control of Induction Motors," Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [4] David E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, 1989.
- [5] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," information and control, vol. 8, pp.338-353, 1965.
- [6] Wing-Chi so, Chi K. Tse, and Yim-Shu Lee "Development of a Fuzzy Logic Controller for DC/DC Converters: Design, Computer Simulation, and Experimental Evaluation", IEEE trans. on power electronics, vol 11, no1, Jan 1996
- [7] H. J. Kim, W. S. Oh, Y. T. Kim "Dead time compensation of current controlled inverter using space vector modulation method," PEDS 95, pp374-378, 1995

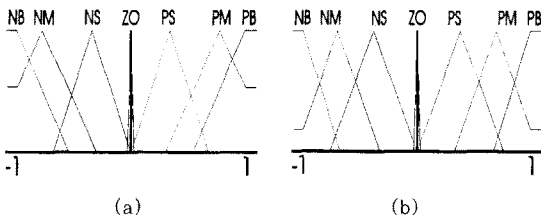


Fig.5 Membership function (a) before tuning (b) after tuning (GA).

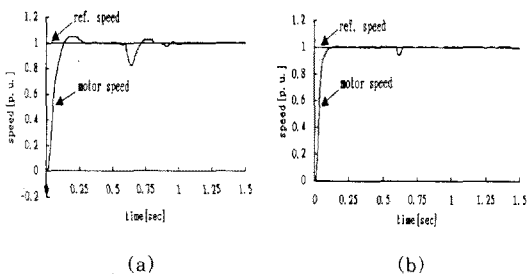


Fig.6 Step response for changed motor in (a) conventional fuzzy controller (b) GA-tuned fuzzy controller

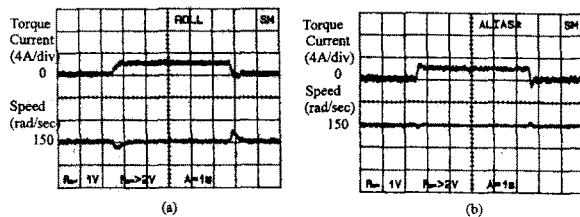


Fig.7 Load variation characteristics 1 (a) conventional fuzzy (b) GA-fuzzy