

# 自動同調 퍼지 알고리즘을 사용한 誘導電動機 驅動에 관한 研究

윤병도, 김윤호, 정재훈, 김춘삼, 채수형

중앙대학교 전기공학과

## The Study on IM Drive using a Auto-Tuning Fuzzy PID Control Algorithm

Byung-Do yoon, Yoon-Ho Kim, Jae-Ruon Jung, Chun-Sam Kim, Su-Hyung Chae

Dept. of Electrical Eng., Chung-Ang University

### ABSTRACT

This Paper deals with a Auto-Tuning Fuzzy PID Controller used in real time and its application for induction motor.

The control strategy of the controller is able to develop and improve automatically.

The new Auto-Tuning Fuzzy PID Control algorithm which modifies the fuzzy control decision table is presented in this paper. It can automatically refine an initial approximate set of fuzzy rules.

The possibility of applying fuzzy algorithms in faster response, and more accurate was compared with other industrial processes, such as AC Motor driver.

The performance of Proportional-Integral-Derivative(PID) control and this fuzzy controllers is compared in terms of steady-state error, settling time, and response time.

And then, Limitations of fuzzy control algorithms are also described.

Key Words : Auto-Tuning Fuzzy PID Control, Fuzzy PID Control, Fuzzy Control, Fuzzy Induction Motor Control.

### 1. 序論

최근, 퍼지제어를 이용한 제품들이 국내외적으로 활발히 연구되고 있으며, 또한 실용화 되어 사용되는 분야도 점점 증가 되어가고 있다. 선진외국에서는 항만설비, 지하철제어, 항공기, 폐수처리, 가전제품등에 다각적으로 응용되고 있다.

퍼지제어의 특징은, 보통의 디지털 制御 알고리즘에서는 시스템의 傳遞函數로부터 導出(1)하거나, 상태변수공간에서의 시스템 설계방법인 플랜트의 수학적 모델링에 의하여 導出된다. 그러나, 實際에 있어서는 이 傳遞函數나, 플랜트의 수학적 모델링이 쉽게 얻어지지 않을 경우나, 비線形이거나, 구해져도 매우 複雜하여 實 時間 制御가 不可能할 때가 많으나, 퍼지제어에서는 이와같은 수학적 모델링이 없어도 경험적인 정보를 이용하면 제어가 가능하며, 퍼지 특이 데이터를 적절히 이용하면 실시간제어도 가능한 것이 특징이라 볼수 있다.

이를 위하여 본 연구에서는 시스템의 高精度를 위하여 유도전동기가 주변 환경에 따라 파라미터의 변화가 발생되고, 파라미터의 변화가 유도전동기 구동특성에 크게 영향을 줄수 있음을 착안하여, 퍼지이론을 사용하여 파라미터의 자동동조기능을 갖는 유도전동기의 Driver를 설계, 제작하고 그 특성을 既存의 PID制御方式과 比較하여 그 특성을 비교 평가해 보고자 한다.

### 2. Fuzzy 추론에 의한 PID제어 알고리즘

먼저 PID의 개념은 이미 잘 알려진 바와 같이 오차 e, 오차의 변화분 de, 오차의 적분성분 ie 을 서로 어떠한 가중치에 의하여 조합시켜 새로운 제어신호로 사용한다.

가장 합리적인 제어신호를 얻기위해서 現在의 誤差成分과 未來에 誤差가 어떻게 변화 할지의 變化推移成分 de 과 過去の 誤差의 總歷成分 ie 을 어떠한 비율로 조합하여 다음

신호로 하는 것이 가장 합당 한지를 그 제어대상의 특성에 따라 결정짓는 것이 합리적일 것이다.

일반적인 제어의 개념적인 측면에서 보면, Fuzzy 제어에서는 오차 e 와, 오차의 변화분 de 만의 비율배분의 조합으로 구성되므로, 결국 이 두 성분에 의해 u값이 결정되게하므로 PID와 비교하면, PD제어에 상당한다. 즉,

$$u = \sum_{i=1}^k (\mu(e_i) \cap \mu(de_i)) \quad \langle \text{Fuzzy 제어} \rangle \quad (2-1)$$

$$u(k) = k_p e(k) + k_d \frac{de}{dt} \quad \langle \text{PD 제어} \rangle \quad (2-2)$$

와 대응 되므로 PID제어에서 「오차의 적분항」이 무시되었다.

이 때문에 정상상태 특성이 좋지 않게 된다. 이를 보완하기 위하여 퍼지제어에서는 coarse control, fine control로 분할하여 제어하고, 정상상태 근처에서는 fine control을 한다(s).

그러나 본 논문에서는 적분항을 추가하여 2分割 제어를 하지 않고 근본적으로 퍼지제어의 결점을 補完하고자 한다. 즉, 퍼지 추론에 의한 PID제어의 개념 도입은 다음과 같이 표현된다.

$$du = K_p \cdot e + K_i \cdot ie + K_d \cdot de \quad (2-3)$$

여기서, 오차 e는 그 최대값을  $e_m$ , 최소값을  $e_0$ 이라 할때 그림 1(a)와 같이 표현 할수 있다(s).

$$e_0 \leq e \leq e_m \quad (2-4)$$

또, 오차의 변화분 de의 최대값을  $de_m$ , 최소값을  $de_0$ , 오차의 적분성분 ie의 최대값을  $ie_m$ , 최소값을  $ie_0$ 라 하면 각각 그림 1(b), (c)와 같이 표현 할수 있다.

$$de_0 \leq de \leq de_m \quad (2-5)$$

$$ie_0 \leq ie \leq ie_m \quad (2-6)$$

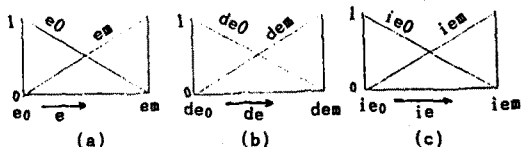


그림 1. e, de, ie의 퍼지세트  
Fig. 1. Fuzzy set of e, de, ie.

따라서, SFRM에 의하여 다음과 같이 PID 제어기의 Rule을 Fuzzy Rule로 나타낼수 있다.

- Rule 1 : e0 AND de0 AND ie0 ⇒ u1
- Rule 2 : e0 AND de0 AND iem ⇒ u2
- Rule 3 : e0 AND dem AND ie0 ⇒ u3
- Rule 4 : e0 AND dem AND iem ⇒ u4
- Rule 5 : em AND de0 AND ie0 ⇒ u5
- Rule 6 : em AND de0 AND iem ⇒ u6
- Rule 7 : em AND dem AND ie0 ⇒ u7
- Rule 8 : em AND dem AND iem ⇒ u8
- Fact : e de ie

Cons : u'

그림2는 이를 나타내는 설명도 이다. 여기서, u1, u2, ..., u8은 실수로서 다음과 같이 나타낼수 있다.

- u1 = kp e0 + kd de0 + ki ie0
- u2 = kp e0 + kd de0 + ki iem
- u3 = kp e0 + kd dem + ki ie0
- u4 = kp e0 + kd dem + ki iem
- u5 = kp em + kd de0 + ki ie0
- u6 = kp em + kd de0 + ki iem
- u7 = kp em + kd dem + ki ie0
- u8 = kp em + kd dem + ki iem

퍼지 제어기 출력추정치 u는 다음과 같이 표현될수 있다.

$$u = \frac{u11 + u22}{h11 + h22}$$

$$= u11 + u22$$

$$= Kp \cdot e + Kd \cdot de + Ki \cdot ie$$

여기서,

$$u11 = abc \cdot u1 + ab(1-c) \cdot u2 + a(1-b)c \cdot u3 + a(1-b)(1-c) \cdot u4$$

$$u22 = (1-a)bc \cdot u5 + (1-a)b(1-c) \cdot u6 + (1-a)(1-b)c \cdot u7 + (1-a)(1-b)(1-c) \cdot u8$$

$$h11 = abc + ab(1-c) + a(1-b)c + a(1-b)(1-c)$$

$$h22 = (1-a)bc + (1-a)b(1-c) + (1-a)(1-b)c + (1-a)(1-b)(1-c)$$

$$h11 + h22 = 1$$

$$a = \mu_{e0}(e) = \frac{em - e}{em - e0}$$

$$b = \mu_{de0}(de) = \frac{dem - de}{dem - de0}$$

$$c = \mu_{ie0}(ie) = \frac{iem - ie}{iem - ie0}$$

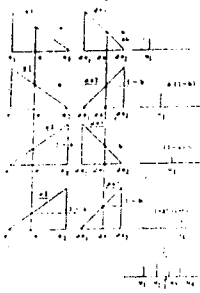


그림 2. 식(2-7)의 퍼지 추론 설명도  
Fig. 2. illustration of Fuzzy reasoning of (2-7).

### 3. 퍼지 補外 推定

Fuzzy set의 적합정도 a, b, c는 0과 1 사이에 존재하고, 그러나 미분치들은 그 이의 값 -∞, +∞사이의 任意的 값으로 될 수가 있다. 이 문제는 그림 3의 설명으로 알수 있다.

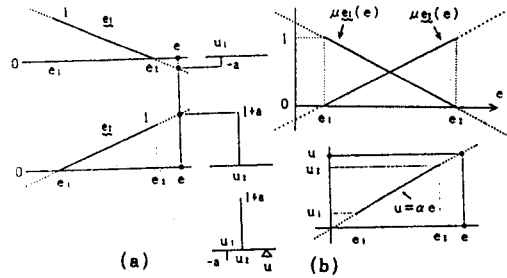


그림 3. (a) 보외추론과 (b)결과 설명도  
Fig. 3. (a) illustration of extrapolative reasoning, (b) Result of extrapolation.

### 4. 유도 전동기의 自動調節 퍼지제어 시스템의 구성

아래 그림 4는 서브모터 自動調節퍼지제어기의 블록선도를 나타낸 것이다.

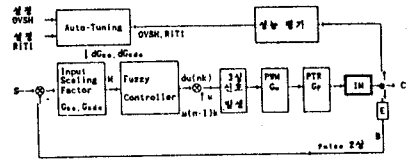


그림 4. 自動調節 퍼지제어기의 블록선도  
Fig. 4. Block Diagram of Auto-Tuning Fuzzy Controller.

위 블록선도에서 S는 설정치, B는 엔코어드 피드백치이다. OVSH는 출력의 오버 슈터, RITI는 상승시간, G<sub>so</sub>는 오차 계수이득, G<sub>sde</sub>는 오차계수의 변화율의 계수이득이며, dG<sub>so</sub>, dG<sub>sde</sub>는 각각 이득값의 변화율 이다.

$$e = S - B$$

$$de = e_1 - e_2$$

여기서 e<sub>1</sub> = e(nT<sub>s</sub>), e<sub>2</sub> = e((n-1)T<sub>s</sub>)를 의미 하고 T<sub>s</sub>는 sampling time이다.

속도보정출력 f는 속도 피드백B에 의하여 결정되고, 이 속도보정출력 f는 주파수로 표현된다. 이 주파수를 正 回轉時 60[Hz], 逆 回轉時는 -60[Hz]범위의 출력 주파수를 발생하도록 Lookup Table에 표 1과 같이 量子化된 값으로 표현한다. 이때 AC 서브 속도 검출용 엔코더는 1000[pulse/rev], 3상 (A, B, Z)인 오픈콜렉터 타입(Open Collector Type)을 사용했다.

오차 e는 -1000에서 +1000, de는 -100에서 +100, 신호 주파수는 -60[Hz]에서 +60[Hz]범위의 값으로 한다.

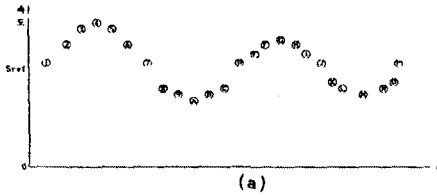
따라서, 다음과 같이 6가지 법칙으로 귀착된다.

- (1) E가 LP이고, dE가 ZE근처이면, f는 LN이다(그림5(a) ㉑참조).
- (2) E가 SP이고, dE가 SP 혹은 ZE이면, f는 SN이다(그림5(a) ㉒㉓참조).
- (3) E가 ZE이고, dE가 SP이면, f는 SN이다(그림5(a) ㉔참조).
- (4) E가 ZE이고, dE가 SN이면, f는 SP이다(그림5(a) ㉕참조).
- (5) E가 SN이고, dE가 SN이면, f는 SP이다(그림5(a) ㉖참조).
- (6) E가 LN이고, dE가 ZE근처이면, f는 LP이다(그림5(a) ㉗참조).

법칙(1)은 속도오차가 +로 큰(LP) 경우일때 일반적으로 적용되는 법칙이므로, 이때는 가능한 빨리 설정 속도로 이동하여야 시스템의 응답이 향상된다. 따라서 매우낮은 신호 주파수(LN)를 출력시켜 설정속도 부근으로 급속히 되도록 한다.

법칙(2)는 오차가 감소(SP)되기 시작할때, 설정속도근처에 있을 경우에 적용되며, 이 때는 낮은 주파수(SN)가 출력시켜 저속으로 되도록 한다.

법칙(3)은 전동기의 속도는 설정위치에 거의와 있어도(ZE), 전동기의 관성 때문에 최저속도에서 오우버 슈우터 되는 순간이므로, 주파수를 낮게지명(SN)을 줄 필요가 있다(f=S/N).



		E				
		LP	SP	ZE	SN	LN
LP	①	①	②	③	④	⑤
SP	②	③	③	④	⑤	⑥
ZE	③	④	④	⑤	⑥	⑦
SN	④	⑤	⑤	⑥	⑦	⑧
LN	⑤	⑥	⑦	⑧	⑧	⑨

그림 5. (a) 속도의 계단 응답과 퍼지 행렬과의 關係.  
(b) 퍼지 행렬.  
Fig. 5. (a) Relation of Step Response of Speed and Fuzzy Matrix  
(b) Fuzzy Matrix

법칙(4)는 속도는 설정속도에 도달한 순간이나 관성에 의하여 계속 회전 방향으로 회전하여 언더슈터로 이행될 경향이 있으므로(법칙(3)의 역의 경우이므로)주파수를 조금 증가시켜 주어야 한다( $f=SP$ ).  
법칙(5)는 언더 슈우터(Undershoot)가 일어날때 적용되는 법칙이다. 즉 역 방향의 제동이 필요한 경우( $f=LP$ )이다.  
법칙(6)는 법칙(1)의 역 조건이다. 따라서, 이들 법칙을 조합하여, 표2의 Lookup Table을 결정 할수 있다.

표 1. 양자화 시간값  
Table 1. Quantized Value

양자화 값	e(i)	de(i)	f
5	-1000	-100	60
4	-800	-80	48
3	-600	-60	36
2	-400	-40	24
1	-200	-20	12
0	0	0	0
1	200	20	12
2	400	40	24
3	600	60	36
4	800	80	48
5	1000	100	60

표 2. 오차/오차변화분에 따른 제어면적의 결정표  
Table 2. Decision Table of Control Area to Error/Change of Error

오차 변화분	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
오차	5	5	5	4	4	3	0	1	1	2	2
-4	5	5	5	4	4	3	0	0	1	1	2
-3	5	5	5	4	4	3	0	0	1	1	2
-2	5	5	5	4	4	3	0	0	1	1	2
-1	5	5	5	4	4	3	0	0	1	1	2
0	5	5	5	4	4	3	0	0	1	1	2
1	5	5	5	4	4	3	0	0	1	1	2
2	5	5	5	4	4	3	0	0	1	1	2
3	5	5	5	4	4	3	0	0	1	1	2
4	5	5	5	4	4	3	0	0	1	1	2
5	5	5	5	4	4	3	0	0	1	1	2

### 5. 시뮬레이션 및 결과

위의 그림 4와 같이 시스템을 구성하고 제작실현전에 시뮬레이션 결과를 보고한다. 먼저 Ziegler-Nichols방법에 의한 PID제어방식과 본 논문의 Fuzzy PID제어를 비교한 결과를 그림 6에 나타낸다. 그림 6(a)는 Ziegler-Nichols PID결과를 그림 6(b)은 본 논문의 Auto-Tuning Fuzzy PID방식을 비교 했다. 그림 6은 미리 파라미터는 Tuning후에 계단 응답특성을 나타낸 것이다.

여기서 Ziegler-Nichols방법에 비하여 응답특성이 우수함이 확인되었다.

또, 그림 7은 Fuzzy PID의 Auto-Tuning과정을 보인 것이다. 그림 7(a)는 Tuning전의 계단응답을, 그림 7(b)는

Auto-Tuning후의 계단응답특성을 나타낸 것이다. 여기서는 Tuning시간이 0.2[S]안에 이루어 지고 있는 우수한 특성을 얻을 수 있었다.

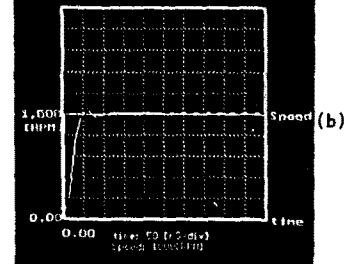
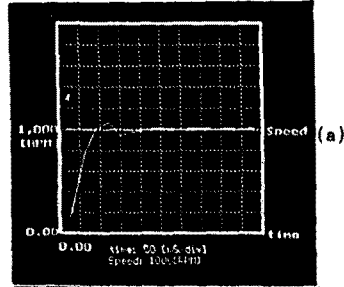


그림 6 (a)Ziegler-Nichols와 (b)Fuzzy PID와의 계단응답  
Fig. 6. Step response with (a)Ziegler-Nichols and (b) Fuzzy PID

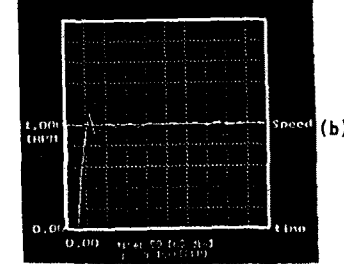
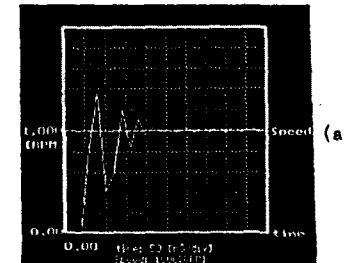


그림 7. Auto-Tuning PID의 계단응답.  
Fig. 7. Step response of Auto-Tuning PID.

### 참 고 문 헌

1. Bart Kosko, "Neural Networks and Fuzzy System", Prentice-Hall International Edition, 1992.
2. Walter C. Dagherity, Balaji Rathakrishnan, John Yen, "Performance Evaluation of a Self-Tuning Fuzzy Controller", IEEE Department of Computer Science Texas A and M University College Station, TX 77843, PP 389-397, 1992.
3. C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control System: Fuzzy Logic Controller-Part 1", IEEE Trans. on SMC., Vol. 20, NO. 2, Mar/Apr., PP 404-418, 1990.
4. C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control System: Fuzzy Logic Controller-Part 2", IEEE Trans. on SMC., Vol. 2, Mar./Apr., pp 419-435, 1990.