誘導電動機 驅動을 위한 自動同調 퍼지 PID制御 앨고리즘의 적용

(Application of Auto-tunning Fuzzy PID control Algorithm for Drive System of Induction motor)

尹炳道* · 鄭載倫** · 蔡洙珩 · ***
(Byung-Do Yoon · Jae-Ruon Jung · Su-Hyung Chae)

요 약

본 연구에서는 자동동조 퍼지 PID제어 앨고리즘을 사용하여 유도전동기 구동방법을 제안하였다.

퍼지제어에서는 수학적인 모델링이 없이 경험적인 정보를 이용하면 제어가 가능하며 퍼지룩업 테이블을 적절히 이용하면 實時間 制御도 가능한 것이 特徵이라 볼 수 있다.

또한, 퍼지규칙을 몇개의 영역으로 구획하여 시스템의 安定을 양호하게 하고 應答特性을 改善할 수 있었다.

유도전동기가 주변 환경에 따라 파라미터의 변화가 발생되고 또, 파라미터의 변화가 誘導 電動機 驅動特性에 크게 영향을 주는 것을 감안, 본 시스템의 고성능, 高精度제어를 위하여 퍼지 앨고리즘을 적용하여 파라미터가 자동동조 기능을 갖는 유도전동기의 구동 시스템을 설계, 제작하였으며 그 特性을 旣存의 PID 制御方式과 比較하였다.

Abstract

This paper was proposed drive strategy Induction Motor using the fuzzy algorithm of auto-tuning PID control.

In fuzzy control, the IM driving system is controlled in trial and error without the mathematical modeling and using fuzzy lookup table the real time control is possible.

Also, dividing the fuzzy rules in several zone, the stability and response of the IM driving system is improved.

The parameters of IM are varying according to the environmental conditions, the variance of the parameters

*正會員 : 中央 大學校 電氣工學科 敎授. 工博
**正會員 : 柳韓 專門 大學 電子科 敎授. 工博
***正會員 : 瑞逸 專門 大學 電氣科 敎授. 工博
接受日字 : 1993年 6月17日

is affected with the driving characteristics of IM. Using the fuzzy algorithm of the driving system which has the auto tuning control function for high performance, high accuracy of the driving system, a designed and proposed through the comparision with the PID control method and the driving characteristics is reviewed and analyzed.

1. 서 론

최근, 퍼지제어는 퍼지집합의 응용 분야로서 가장 각광 받고 있는 분야로 입출력관계의 정량적인 분석이 어려운 다변위 공정의 제어 시스템에서 모델을 기준으로 한 기존제어기의 부적합한 점을 보완 대체하고, 기존의 제어 이론으로 제어하기 어려운 대상들을 성공적으로 제어하고 있다.

디지털 제어 앨고리즘은 시스템의 전달함수로부터 도출[1]하거나, 상태변수 공간에서의 시스템 설계방법인 플랜트의 수학적 모델링에 의하여 도출된다. 그러나, 실제에 있어서는 이 전달함수나, 플랜트의 수학적인 모델링이 쉽게 얻어지지 않을 경우나, 비선형이거나 구해져도 매우 복잡하여 실시간제어가 불가능할 때가 많다. 퍼지제어에서는 이와 같은 수학적인 모델링이 없이 경험적인 정보를 이용하면 제어가 가능하며, 퍼지 룩업 테이블(Look-up Table)을 적절히 이용하면 실시간 제어도 가능한 것이 퍼지제어의 특징이라 볼 수 있다.

퍼지 논리(Fuzzy Logic)를 직류 서보 모터구동에 적용한 예는 Y.F.Li와 C.C.Lau[2]에 의하여 제안된 바 있고 유도전동기의 퍼지 논리적용은 J. Cleland와 W.Turner에 의하여 시뮬레이션된 바 있다.[3] 또한 T.J. Procyk와 E.H. Mamdani[4]에 의하여 퍼지 집합이론을 기초로 하여 비선형, 다변수 프로세서에 적응 제어기를 적용하여 고속응답이 가능할 수 있음을 보여 주기도 하였다.

본 연구에서는 유도전동기의 고성능, 고정밀도 제어를 위하여 유도전동기가 주변 환경에 따라 파라미터의 변화가 발생되고 또, 파라미터의 변화가 유도전동기 구동특성에 크게 영향을 주는 것을 감안, 퍼지앨고리즘을 적용하여 파라미터가 자동동조 기능을 갖는 유도전동기의 구동 시스템을 설계, 제작하였으며 그 특성을 기존의 PID 제어방식과 비교하여 평가분석하였다.

2. 퍼지 PID제어 시스템의 자동동조

2.1 퍼지 PID 파라미터

이 장에서는 퍼지제어기의 동조방법을 구체적으로 서술하였다. 퍼지제어기의 동조는 종래의 제어기를 동조하는 것보다 어려운 것이므로 퍼지제어기의 동조방법을 구체화 시키기 위하여 퍼지 파라미터와 제어기 성능과의 관계를 정의 하였다. 즉, 임의의 파라미터를 변경시키면 제어기 성능이 어떻게 변화되는가를 구체적으로 분석하여, 퍼지 파라미터의 동조에 이용하였고, 퍼지제어 시스템이 쉽고 빠르게 동조할 수 있도록 플랜트의 지식을 기초로 하였다.

2.2 파라미터의 정의와 특성

삼각형 소속함수를 갖는 퍼지 PID제어기를 검토하여 보면 이것은 일반적인 PI제어와 근사하다. 왜냐하면, 입출력이 기존의 PI제어기와 동일하기 때문이다. 퍼지 PID제어기는 그림 1과 같은 파라미터로 동조된다.

(1) 환산계수

IF/THEN부 퍼지변수의 환산계수(Scaling Factor)는 그림 1에서의 퍼지변수의 전체집합(Universe of Discourse)으로 정의되는 최대 피크치와 같은 환산계수로 정의한다.

(2) 피크치

피크치는 그림 1과 같이 소속함수의 값이 0인 점에서 1.0을 지나 다시 0인 점의 구간으로 정의한다.

(3) 소속함수 폭

소속함수 폭(Width value of membership function)은 0.0에서 시작한 소속의 한점에서 피크값(1.0)까지의 구간으로 정의 한다.

(4) 소속함수의 규칙

소속함수의 규칙(Rule of membership function)은 소속함수의 규칙의 THEN-후건부내의 퍼지 레벨로 정의 한다.

2.3 파라미터 변화의 영향

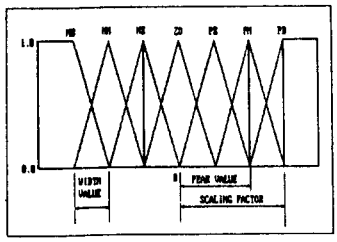
본 절에서는 각 파라미터가 퍼지 제어시스템의 성능에 어떤 영향을 미치는지 고려해 본다.

(1) 환산계수의 영향

퍼지변수의 환산계수가 변화하면 각 소속함수의 정의도 같은 비율로 변화된다고 가정한다. 어떤 환산계수의 변화는 표1과 같이 어떤 규칙내의 한개의 조건부 THEN 조건부의 의미를 변화시킬 수 있다. 따라서, 어떤 환산계수의 변화는 퍼지 규칙표내의 모든 제어규칙에 영향을 준다.

(2) 피크치의 영향

피크치가 변화할 때 오직 한개의 퍼지 레벨로 정의한 것과 같이 변화한다. 그런 까닭에 피크치의 변화는 변화된 퍼지 레벨를 이용하여 그 규칙에 영향을 미친다. 표2(a)와 (b)는 각각 IF 전건부와 THEN후건부 변수의 피크치가 변화할 때 퍼지규칙의 영향을 나타낸 것이다.



PB=Positive Big
PM=Positive Medium
PS=Positive Small
ZO=Zero
NS=Negative Small
NM=Negative Medium
NB=Negative Big

그림 1. 소속함수의 환산계수
Fig 1. Scaling factor of membership function

표 1. 환산계수의 변화의 영향
Table 1. Effect of change a scaling factor

de / e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

(3) 소속함수 폭의 영향

소속함수 폭의 변화는 2개의 피크(Peak)치 사이의 중첩부분만이 영향을 미친다. IF전건부의 소속함수의 폭이 중첩부분에 어떠한 영향을 미치는지를 생각해보기 위해 입력이 a1이면 출력이 b1이고 입력이 a2이면 출력은 b2인 경우를 고려해 보자.

입력이 a1에서 a2로 연속적으로 변화할 때 역퍼지화와 퍼지추론에 의해 얻어진 출력을 그림 2(a)와 (b)에서 보여준다.

그림 2(a)에서 소속함수의 폭이 2개의 인접한 피크치 사이의 구간과 같으며 입력이 a1에서 a2로 변화하는 동안 출력은 b1에서 b2로 유연하게 연속적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 반면 그림 2(b)의 소속함수의 폭은 2개의 인접 피크치 사이의 구간보다 작으면 그때 출력은 스텝형태가 됨을 알 수 있다. 일반적으로 전자는 중첩부분의 기대결과이고 후자는 2진 논리와 근사한 것을 알 수 있다. 그래서 소속함수의 폭은 그림 2(a)의 형태로 사용하는 것이 좋다.

표 2. 피크치 변화의 영향
Table 2. Effect of variation peak value

(a) 일행으로 변화한 경우

de / e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

(b) 대각선으로 변화한 경우

de / e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

THEN－후건부의 소속함수의 폭을 검토해 보면 그림 3(a)는 비대칭 소속함수를 사용하였을 때의 출력값을 보여준다. 그 출력값이 피크치와 같지 않다는 것을 알 수 있다. 왜냐하면 비대칭이기 때문이다. 이 경우는 합리적이라고 생각할 수 없다.

또한, 그림 3(b)는 THEN－후건부 소속함수가 2개의 서로 다른 소속함수의 폭을 사용할 때의 출력을 보여주고 있다. 이 출력은 2개의 피크값의 중간이 아니다. 그러나 넓은 소속 함수를 갖는 퍼지레벨과 가깝다.

(4) 퍼지 규칙변화의 영향

퍼지 규칙(fuzzy rule)의 변화에 대해서는 표 3에서 볼 수 있는 바와 같이 변화된 규칙이 포함된 그 규칙만 변화된다.

2.4 동조순서

퍼지제어기를 동조할 때 가장 중요한 것은 파라미터를 동조해야 한다. 이러한 파라미터에는 전체적으로 영향을 미치는 파라미터와 부분적으로 영향을 미치는 파라미터가 있다. 앞에서 추론한 것을 기본으로 하여 퍼지제어기를 동조하기 위해서는 아래 4가지 사항을 고려해야 좋은 결과를 얻을수 있다.

(1) 퍼지변수의 환산계수(scaling factor)

(2) 소속함수의 피크치(peak value)

(3) 퍼지 규칙(Rules)

(4) 소속함수의 폭(width value)

IF－전건부 소속함수내의 함수폭의 동조는 2개의 인접한 피크치의 간격으로 정의하는 것이 좋으며, 대칭적으로 사용하기 위해 If－전건부의 소속 함수폭과 Then－후건부의 소속 함수폭을 같게한 대칭인 소속함수를 사용하는 것이 좋다.

2.4.1 소속함수의 동조

(1) 퍼지 PI제어기와 PI제어기

표 4에서 보여준 규칙집합은 표준 규칙집합과 그림 1의 표준 소속함수를 보여준 구간 피크치가 동등한 소속함수로 정의한다.

표준규칙과 표준소속함수가 퍼지 제어기와 같은 PI로 사용될 때 출력변수 u와 입력 변수 e사이의 관계를 식(2.1)과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$du(t)/Su = de(t)/Sd + e(t)/Se, (-Se < e(t) < Se, -Sd < de(t) < Sd) \quad (2.1)$$

$$u(t) = (Su/Sd)[e(t) + Sd/Se \int e(t)]$$

여기서 Se, Sd와 Su는 각각 오차와 오차 변화분의 환산 계수및 증분 출력변수이다. 종래의 PI 제어기는 다음식으로 주어진다.

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt] \quad (2.2)$$

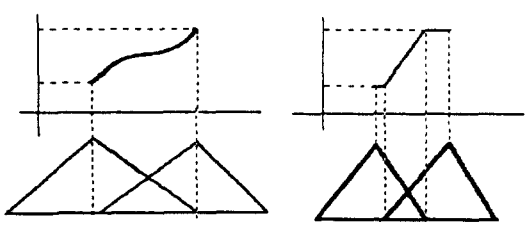
여기서 K_p는 비례 이득계수이며 T_i는 PI제어기의 적분시간이며 식(2.1)과 식(2.2)를 서로 비교하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$K_p = Su/Sd \quad (2.3)$$

$$T_i = (\frac{Se}{Sd})T \quad (2.4)$$

여기서 T는 샘플링 시간이다.

2.4.2 소속함수의 피크치 동조

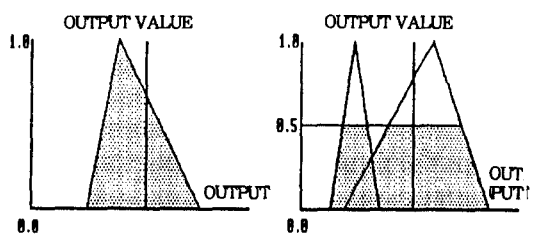


(a) 제어의 유연성이 있는 소속함수의 폭

(b) 소속함수 폭이 좁은 경우

그림 2. If전건부 소속함수의 다른 폭

Fig 2. The different width values in IF－Part membership function



(a) 비대칭 소속함수 폭

(b) 2개의 다른 소속 함수 폭

그림 3. 소속함수의 대칭과 비대칭

Fig 3. Symmetrical and Asymmetrical of Membership Function

(1) 규칙의 기능(Function of rules)

표 5와 같이 5영역으로 규칙을 분배하여 각 영역에서의 특성을 고찰해 본다.

영역 0 : 이 영역에서는 오차와 오차 변화분 모두 작은 값이므로 제어변수는 안정상태에 가깝다. 그러므로 이 영역에서의 규칙은 제어시스템의 안정성과 깊은 관계의 영역이다. 여기서 제어시스템의 평가기준은 오버슈트와 상승기간으로 평가 된다.

영역 1 : 이 영역의 NB이고 제어변수는 안정상태와 거리가 멀다.
그러므로 이 영역에서의 규칙은 제어시스템의 응답성과 관계가 있다.

영역 2 : 이 영역은 오차가 0에 가깝거나 정(+)일지라도 제어변수는 아직도 더 감소되어야 한다. 이 규칙은 정상상태에서는 좀처럼 사용되지 않는다.

영역 3 : 이 영역은 영역 1과 비슷하면 기준점이 정(+)으로 변화할 때 응답성에 관계된다.
일반적으로 상승시간에 의해 측정된다.

영역 4 : 이 영역은 영역 2와 비슷하며, 영역 2, 영역 4 규칙은 제어시스템의 성능에 영향을 미치지 않는다. 왜냐면 점호주파수가 낮기 때문이다.

(2) 점호규칙의 이동경로

점호규칙의 이동경로(Shifting route of firing rules)가 인접한 퍼지 제어 시스템의 정(+) 스텝적 변화입력 후 이 규칙표에서 점호규칙을 관찰해 보면 점호규칙의 궤도는 안정점을 향해 이동하고 있음을 알 수 있다. 여기서, 안정점은 표 6에서 보여준 것과 같이 오차와 오차 변화분이 0인 중앙점이다.

또한, 영역 1을 통과한 점호 규칙은 영역 0으로 들어간다. 이때 시스템의 동작은 더 안정한 점을 향하여 이동하도록 동작시키며, 안정점에 접근할수록 이동경로는 점점 더 짧아진다.

표 3. 퍼지 규칙변화에 대한 영향
Table 3. Effect of a rule change

de / e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

표 4. 표준 규칙 집합
Table 4. Standard rule set

de / e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

3. 퍼지추론에 의한 PID제어 앨고리즘

3.1 제어 앨고리즘

PID제어기의 제어동작 개념은 이미 잘 알려진 바와 같이 오차(e), 오차의 변화분(de), 오차의 적분성분(ie)을 서로 어떠한 가중치에 의하여 조

표 5. 퍼지규칙표내의 영역
Table 5. Zone in a fuzzy rule table

de / e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB					영	역	1
NM							
NS							
ZO							
PS							
PM							
PB		영	역	3			

표 6. 퍼지 규칙표내의 영역 이동 동작
Table 6. Zone shift operation in a fuzzy rule table

de / e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB					영	역	1
NM				→	→		
NS							
ZO							
PS							
PM		↑	영역	3			
PB		←	←	←			

합시켜 새로운 제어신호로 사용한다. 가장 합리적인 제어신호를 얻기 위해서 현재상태의 오차성분과 다음 상태의 오차가 어떻게 변화할 지의 변화추이성분(de)과 전상태 오차의 성분(ie)을 어떠한 비율로 조합하여 다음 신호로 하는 것이 가장 합당한 지를 그 제어대상의 특성에 따라 결정하는 것이 합리적일 것이다. 일반적인 제어의 개념적인 측면에서 보면, 퍼지 제어에서는 오차 e와, 오차의 변화분 de만의 비율배분의 조합으로 구성되므로, 결국 이 두 성분에 의해 출력변수 u값이 결정되므로 기존의 PID 제어와 비교하면, PD 제어에 상당한다. 즉, 다음과 같이

$$u=\sum_{i=1}^{k}\mu(ei)\cap\mu(de_i)\langle\text{Fuzzy 제어}\rangle \qquad (3.1)$$

$$u(k)=kp\ e(k)+kd\ \frac{de}{dt}\ \langle\text{PD 제어}\rangle \qquad (3.2)$$

$$du=kp\ e+ki\cdot ie+kd\cdot de \qquad (3.3)$$

대응되므로 PID제어에서 「오차의 적분항」이 무시된 것과 같다.

이 때문에 정상상태 특성이 좋지 않게 된다. 이를 보완하기 위하여 퍼지 제어에서는 과도분

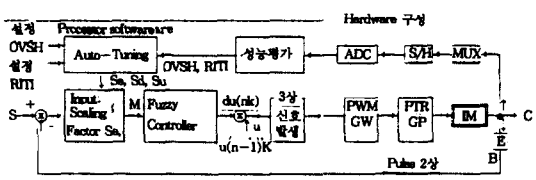


그림 4. 자동동조 퍼지 제어기의 블럭선도
Fig. 4. Block diagram of auto-tuning fuzzy controller

표 7. 양자화 값
Table 7. Quantized value

양자화값	e(t)	de(t)	ie(t)	f(Hz)
−5	−1000	−100	−50	−60
−4	− 800	− 80	−40	−40
−3	− 600	− 60	−30	−36
−2	− 400	− 40	−20	−24
−1	− 200	− 20	−10	−12
0	0	0	0	0
1	200	20	12	12
2	400	40	24	24
3	600	60	36	36
4	800	80	48	48
5	1000	100	60	60

제어, 정밀제어로 分割하여 초기상태에서는 과도분으로 제어하고, 정상상태 근처에서는 정밀제어로 하는 것이 바람직하다.

3.2 퍼지 PID 제어 시스템의 적용방법

(1) 자동동조 퍼지 제어기의 블럭선도

그림 4는 서보모터 자동동조 퍼지제어기의 블록선도를 나타낸 것이다. 아래 블록선도에서 S는 회전속도의 설정치, B는 인코더 피드백치이다. OVSH는 출력의 오버 슈트, RITI는 상승기간, Se, Sd와 Su는 각각 오차와 오차 변화분의 환산계수 및 증분 출력변수의 환산계수이다. 관계식은 식 (3.4), (3.5)로 표현할 수 있다.

$$Se=S-B \qquad (3.4)$$

$$Sd=(e_1-e_2)/T \qquad (3.5)$$

여기서 $e_1=e(nT)$, $e_2=e\{(n-1)T\}$를 의미한다.

또, 시스템의 성능평가를 위하여 오버 슈트와 상승시간의 측정을 위하여 MUS, S/H, ADC가 필요하게 된다.

여기서, 멀티플렉스MUX(Multiplexer)를 통하여 측정신호를 선택하고, 샘플러와 홀더 S/H를 통

표 8. e/de에 따른 제어출력(u)의 결정표
Table 8. Decision table of control output (u) to e/de

de \ e	NB -6	-5	NM -4	-3	NS -2	-1	ZO 0	1	PS 2	3	4	5	PB 6
NB -6							■						
-5							■						
NM -4							■						
-3							■						
NS -2					NS(5)		■						
-1							■						
ZO 0					NS(4)		ZO(3)		ZO(2)				
1							■						
PS 2							■		PS				
3							■						
PM 4							■						
5							■						
PB 6							■						

표 9. 소속함수의 행렬표
Table 9. Matrix of membership function

L \ Q		양자화 레벨											
언어 세트	PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1
	PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
	PS	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0
	ZO	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0
	NS	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0
	NM	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	NB	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

하여 아날로그-디지털 변환기 ADC에 인가된다. 결국 측정신호는 ADC를 통하여 디지털치로 변환되어 제어용 마이크로프로세서에 입력된다.

속도 보정출력 f는 속도 피드백 B에 의하여 결정되고, 이 속도 보정출력 f는 주파수로 표현된다. 이 주파수를 정 회전시 60[Hz], 역 회전시는 -60[Hz]범위의 출력 주파수를 발생하도록 룩업 테이블의 표7과 같이 양자화된 값으로 한다.

이때 AC 서보 속도 검출용 인코더는 1000 [pusle/rev], 기준점을 갖는 2상의 오픈콜렉터 타입(Open Collecter Type)을 사용 했다.

오차 e는 -1000에서 +1000, de는 -100에서 +100, ie는 -50에서 +50, 신호 주파수 f는 -60[Hz]에서 +60[Hz]범위의 값으로 한다.

3.3 퍼지 PID제어 2파라미터 규칙의 경우

오차 e는 -1200에서 +1200, de는 -120에서 +120, 신호 주파수 f는 -60[Hz]에서 +60[Hz] 범위의 값으로 한다. 퍼지 PID제어 2 파라미터 Kp, Ki동조의 경우는 3 파라미터와 같이 6가지 법칙으로 선정하였다.

(1) 만약 e가 PB이고 de/dt가 ZO근처이면 f는 PB이다.

(2) 만약 e가 PS이고 de/dt가 PS혹은 ZO이면 f는 PS이다.

(3) 만약 e가 ZO이고 de/dt가 PS이면 f는 ZO이다.

(4) 만약 e가 ZO이고 de/dt가 NS이면 f는 NS이다.

(5) 만약 e가 NS이고 de/dt가 NS이면 f는 NS이다.

(6) 만약 e가 NB이고 de/dt가 ZO근처이면 f는 NB이다.

따라서, 이들 법칙을 조합하여 보면 표 8과 같으며 이 결정표는 제어기 출력과 오차 및 오차 변화분이 직접 관련되어 제어기가 동작하기 전에 제어규칙으로부터 미리 계산된다. 특히 오차가 취하는 값에는 설정점 바로 위와 바로 아래를 구분하기 위해 두개의 0값이 포함되어 있다.

표 9는 제어정도를 높이기 위하여 양자화 레벨을 13단계로 한 것이다. 그러나 이 표는 최적 정밀제어를 위해서는 설정위치 근처에서 진동의 소지가 있으므로 오차의 0(ZO)근처에서 안정한 제어를 위해서는 자동동조가 필요하게 되며 이를 위하여 앞의 2.4절에서 언급한 자동 동조방법을 채택하였다.

표 10은 속도오차 e(t), 속도오차의 도함수 de(t)및 퍼지제어기 출력을 양자화한 것이다.

표 10. 양자화 시킨 값
Table 10. Quantized value

양자화값	e(t)	de(t)	f(u)
-6	-1200	-120	-60
-5	-1000	-100	-50
-4	- 800	- 80	-40
-3	- 600	- 60	-30
-2	- 400	- 40	-20
-1	- 200	-20	-10
0	00	00	0
1	20	20	10
2	400	40	20
3	600	60	30
4	800	80	40
5	1000	100	50
6	1200	120	60

표 11. 실험에 사용된 퍼지 行列
Table 11. Fuzzy matrix in experiment

de / e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO							
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

표 12. 퍼지 PID 2 파라미터 제어용 룩업 테이블
Table 12. Look-up table for Fuzzy PID 2 parameter controller

de		NB		NM		NS		ZO		PS		PM		PB	
		00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	0A	0B	0C	Add-L
e		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
NB	20	-6	-6	-6	-6	-6	-6		-5	-4	-3	-2	-1	0	
:	21	-5	-6	-6	-6	-6	-6		-4	-3	-2	-1	0	1	
NM	22	-4	-6	-6	-6	-6	-6		-3	-2	-1	0	1	2	
:	23	-3	-6	-6	-6	-6	-6		-2	-1	0	1	2	3	
NS	24	-2	-6	-6	-6	-6	-6		-1	0	1	2	3	4	
:	25	-1	-6	-6	-6	-6	-2		0	1	2	3	4	5	
ZO	26	0	-6	-6	-6	-6	-1	0	1	2	3	4	5	6	
:	27	1	-5	-4	-3	-2	-1	0	2	6	6	6	6	6	
PS	28	2	-4	-3	-2	-1	0	1	6	6	6	6	6	6	
:	29	3	-3	-2	-1	0	1	2	6	6	6	6	6	6	
PM	2A	4	-2	-1	0	1	2	3	6	6	6	6	6	6	
:	2B	5	-1	0	1	2	3	4	6	6	6	6	6	6	
PB	2C	6	0	1	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	
	Add-H														

이와 같이 하여 제어규칙은 표 11과 같이 퍼지 행렬을 사용하여 제어용 룩업 테이블을 작성하면 표12와 같다.

4. 시스템 구성

4.1 하드웨어의 構成

본 연구에서 사용된 시스템으로 컨버터(Converter)부, 인버터(Inverter)부, 속도검출부, 제어회로부로 구성되며 특히 제어부는 마이크로

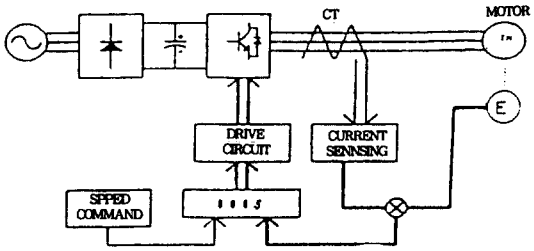


그림 5. 시스템 구성도
Fig. 5. Configuration of system

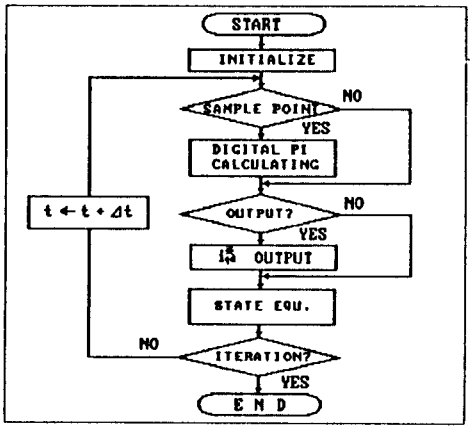


그림 6. 자동동조 퍼지 PID제어기의 흐름도
Fig. 6. Flowchart of Auto-Tuning fuzzy PID controller

표 13. 실험용 유도 전동기의 제정수
Table 13. Parameters of tested induction motor

정격출력 : 1/2[HP]
정격속도 : 1750[RPM]
고정자저항 R1 : 20.72[Ω]
회전자저항 R2 : 9.579[Ω]
고정자 인덕턴스 L1 : 17.755[H]
회전자 인덕턴스 L2 : 17.755[H]
정격 전부하전류 : 2.4[A]
정격 전류 : 1.5[A]
정격 전압 : 220[V]
극수 P : 4극
관성모멘트 J : 0.018[kg. m sqr]

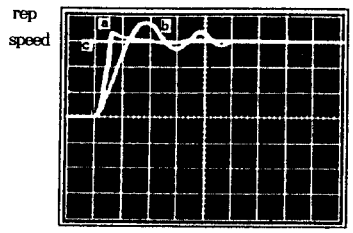
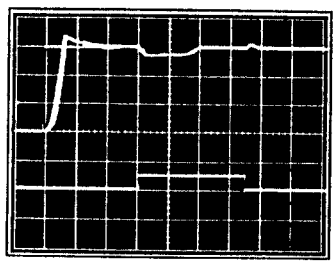
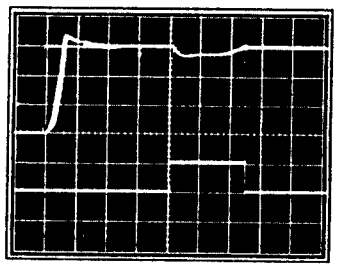


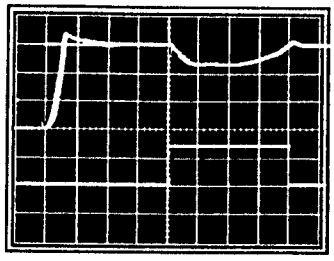
그림 7. 종래의 PID제어와 퍼지 PID제어의 계단응답 특성
Fig. 7. Step response of conventional PID and Fuzzy PID control



(a) 50[%] 부하 인가시 응답특성



(b) 정격부하시 응답특성



(c) 125[%] 부하인가시 응답특성

그림 8. 부하실험 결과(전부하시)
Fig. 8. Experimental results of load test

프로세서(8085)를 사용하여 퍼지제어를 실현하였고 구성도는 그림 5와 같다. 실험용 전동기는 극수가 4극인 3상 유도전동기를 사용하였다. 퍼지 PID제어기의 구현은 3개의 곱셈, 6개의 나눗셈, 7개의 덧셈, 1개의 룩셈의 연산을 필요로 한다. 8085마이크로프로세의 총 실행시간은 약 1[msec]정도 요구된다.

4.2 퍼지제어 앨고리즘

본 논문에서 제안한 자동동조 퍼지제어 앨고리즘의 흐름도를 그림 6에 나타냈다.

본 제어에 적용한 앨고리즘은 샘플링주기및 퍼지규칙표를 작성하여 기준입력을 설정한 후 엔코다로 부터 현재속도를 읽어 그에 따른 e, de 연산을 수행한다. 이때 기준입력에 변화가 발생하면 오차보정제어루틴으로 가서 새로운 오차와 오차변화분을 연산하고 주 프로그램으로 복귀해서 제어를 계속 수행하게 하였다.

5. 실험결과

본 실험에서는 논문에서 제시한 자동동조 퍼지 PID방법에 대한 여러가지 특성실험을 통하여 고찰하고자 한다. 본 실험에 사용된 전동기의 제정수는 표 13과 같다.

5.1 종래의 PID 제어와 퍼지 PID 방법과의 응답특성 비교

그림 7에서는 오버슈트와 상승시간의 특성을 종래의 PID방법과 본 논문에서 제시한 퍼지 PID 방법에 의한 계단응답 결과를 보여준다. 그림 7에서는 기존의 PID제어와 본 논문에서 제시한 퍼지 PID제어방법에 의한 계단응답 결과를 비교한 것으로 그림 7(a)는 퍼지 PI제어에 의한 파라미터를 동조한 상태이며 그림 7(b)는 기존의 PID제어방법일 때의 응답을 나타내었다.

5.2 부하변동의 적응실험

그림 8은 본 실험에서 사용한 유도전동기의 부하실험결과로 파라미터의 동조 상태에서 50%부하, 125%부하, 전부하 인가시 응답특성을 나타낸다.

6.결 론

본 논문에서는 퍼지 PID제어기가 파라미터 설정값을 변화시킨 전문가가 운용한 것과 같은 "지능적" 동조특성을 갖도록 자동동조 퍼지 PID 제어 앨고리즘을 제안하였다. 퍼지 PID제어시스템이 동조 파라미터로 인해 시스템 성능에 영향을 미친다는 것을 검토하였다. 이것은 고전적 아날로그 또는 디지탈 PID제어기보다 응답특성및 동조특성이 더 좋은 특성을 갖고 있음을 실험을 통해 입증하였다.

본 논문에서 개선된 자동동조 제어기는 1[%] 정도의 오버슈트만이 발생하므로 외란 및 잡음이 있어도 잘 동작하였다. 또한 오차 발생이 갑자기 크게 증가하여도 퍼지 환산계수, 소속함수폭, 피크치가 자동동조에 의해 설정목표에 빠른 동조가 이루어짐을 알 수 있었다.

비록 전문가의 경험에 의해 파라미터가 잘 동조되었다 해도 운전중에 변화하는 파라미터나 외란, 잡음등에 의해 유도 전동기의 특성이 변화할 수 있다. 그러나 이러한 경우에도 본 연구에서 제안한 자동동조방법에 의하여 양호한 동조특성과 신속한 응답특성을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

1) Benjamin C. Kuo, "Digital Control System," Holt, Rinehart and Winston, 1980.

2) Y.F.Li and C.C.Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," IEEE Control System Magazine, Apr, pp.65-71, 1989.

3) John Cleland and Wayen Turner, "Fuzzy Logic Control of AC Induction Motor", IEEE Research Tringle Institute, PP. 843-850, 1992.

4) T. J Procyk and E.H Mamdani, "A Linguistic Self-Organizing Process Controller", Automatical, Vol.15, PP.15-30, 1979.

5) 尹炳道, "마이크로프로세서에 의한 永久磁石 同期電動機의 驅動", 大韓電氣學會 논문지, Vol.35, Dec, 1986.

6) B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drivers", Prentices-Holl, 1986.

7) L.A.Zadeh, "Fuzzy Sets", Inform. Control 8, PP.338-353, 1965. Magazine, Apr, PP.65-71, 1989.