

## 퍼지 PI 제어를 이용한 유도전동기 속도제어

조정민\*°, 합년근\*, 이상집\*, 이승환\*\*, 이훈구\*\*\*, 김용주\*\*\*\*, 한경희\*

\*명지대학교, \*\*대덕대학, \*\*\*용인송담대학, \*\*\*\*동양공전

### Speed control of induction motor using Fuzzy PI controller

Jeong-Min Jho, Nyun-Kun Hahm, Sang-Chip Lee, Seung-Hwan Lee, Hoon-Goo Lee, Young-Ju Kim, Kyung-Hee Han

\*Myongji Univ, \*\*TaeDok College, \*\*\*Yong in song dam College, \*\*\*\*Dong yang technical College

#### Abstract

The conventional PI controller are fragile in parameter variation and load-variation. Therefore, in this paper, a speed control algorithm based on the Fuzzy PI controller is proposed for the high performance speed control of a voltage-source inverter to drive 3-phase induction motors. The computer simulation results show that the proposed controller are more excellent control characteristics than conventional PI controller in transient-state and steady-state response.

#### 1. 서론

고성능 제어를 위한 유도전동기(IM)는 벡터제어를 이용하여 타여자 전동기처럼 동작시킬 수 있다. 일반적으로, 고성능 구동장치는 동적 지령속도 추종과 부하 왜란 억압특성이 좋아야 하고, 구동관성의 변화 및 시스템 파라미터의 변동에도 강인한 특성을 유지할 수 있는 시스템을 요구하고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위하여 퍼지기법을 이용한 여러 가지 연구가 있어왔다. [1][2]

일반적인 제어규칙에 의한 퍼지제어기는 전문가의 경험과 직관으로부터 언어적인 제어규칙을 구성하는 과정으로 부하변동에 따른 강인성 또는 속도편차 등이 발생되어진다.

본 논문에서는 유도전동기의 속도 및 부하왜란에 양호한 특성을 얻도록, 퍼지추론이 가지고 있는 장점

중, 제어대상에 대한 정확한 모델화 없이 추론에 의해 제어동작을 결정하는 퍼지추론 알고리즘(Fuzzy Inference Algorithm)을 기초로 하였다. 다음으로 산업공정제어에 가장 많이 활용되고있는 제어기로서 구조가 간단하지만 좋은 제어성능을 제공하는 것으로 알려져 있는 PI제어기 특성<sup>[2][3]</sup>을 이용하여, 유도전동기에 PI요소로 룩업 테이블이 구성된 퍼지 PI제어기를 설계하였다.

#### 2. 시스템 제어구조

전체 시스템 제어 구성도를 그림 1에 나타내었다. 마이크로 컴퓨터는 전동기로부터 두상의 전류와 현재 속도를 검출 받는다. 입력된 값을 멤버쉽 함수로 바꾸고, 언어변수를 퍼지로직에서 퍼지 추론하며 제어기의 입력으로 사용할 수 있도록 비퍼지화하여 인버터에 지령치를 입력하게 된다.

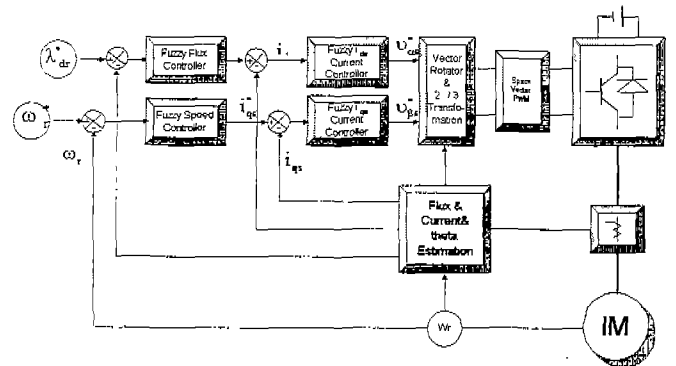


그림 1 전체 시스템 제어 구성도  
Fig. 1 Schematic diagram of the system

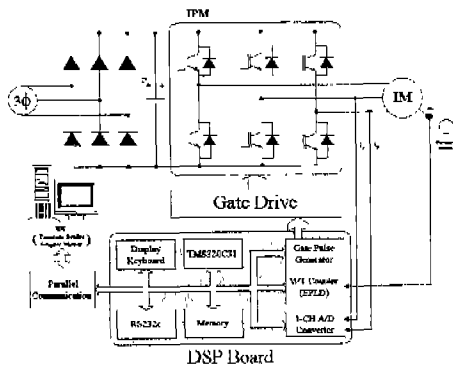


그림 5.1 하드웨어 시스템 구성도

본 연구에서는 2.2kW급 서보용 유도전동기 구동 시스템을 이용하여 일정속 및 가변속 구동에 대한 실험을 행하고 그 결과를 고찰한다. 인버터의 스위칭 주파수는 8kHz로 동작한다. 실험은 시뮬레이션과 마찬가지로 기준속도 1000, 500, 50[rpm]에서 행하였으며, 그림 5.2, 5.3, 5.4는 500[rpm]에서의 결과이다.

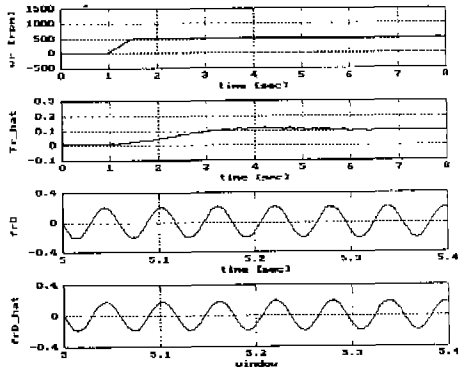


그림 5.2. Tr의 추정 500[rpm]

(a) 속도 응답 (b) 추정된 Tr  
(c) 기준 자속의 크기 (d) 추정 자속의 크기

그림 5.3은 기준 속도를 가변할 때 발생하는 회전자 자속의 변화 및  $T_r$ 의 추정이 올바르게 됨을 나타낸다. 그림 5.4에서는 직접 벡터 제어를 행하면서 기준이 되는 자속으로부터 계산한 실제 슬립의 크기와 운전중에 추정된  $T_r$ 을 이용하여 계산한 슬립의 추정치,  $T_r$ 의 공정값을 이용하여 계산한 슬립의 크기를 비교하였다. 그 결과  $T_r$ 의 추정값을 이용하여 계산한 슬립의 크기가 보다 정확함을 알 수 있었고, 그러므로 추정된  $T_r$ 의 값이 정확함을 확인할 수 있었다.

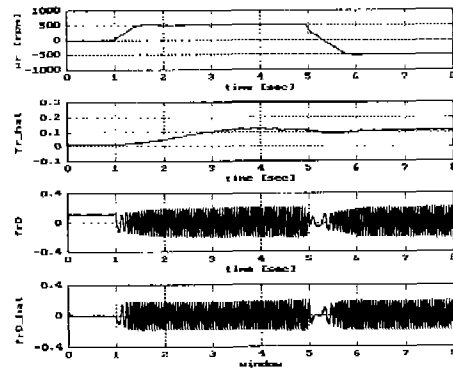


그림 5.3 가변속시 Tr의 추정 ±500[rpm]

(a) 속도 응답 (b) 추정된 Tr  
(c) 기준 자속의 크기 (d) 추정 자속의 크기

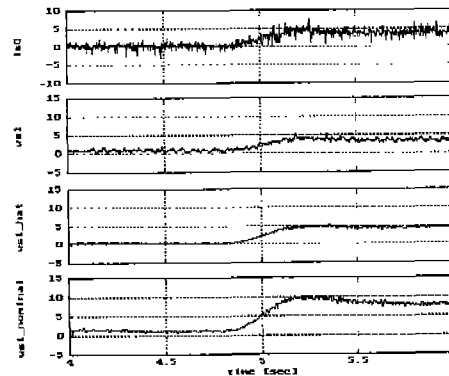


그림 5.4. 추정된 Tr값의 검증 500[rpm]

(a) 토크 전류  
(b) 직접 벡터 제어에 사용된 실제 슬립크기  
(c) 추정된 Tr을 이용하여 계산한 슬립의 크기  
(d) Tr의 공정값으로 계산한 슬립의 크기

## 6. 참고 문헌

- [1] D.W.Novotny, T.A.Lipo, Vector Control and Dynamics of AC Drives, Clarendon Press, Oxford, 1996.
- [2] Laurene Fausett, Fundamentals of Neural Networks, Prentice-Hall, 1994.
- [3] Lazhar Ben-Brahim, Toshiaki Kudor, Kazuo Shimane, Haruo Naitoh, "Implementation of an Induction Motor Speed Estimator using Neural Networks", IPEC-Yokohama '95 pp.52-57, 1995.
- [4] 김남정, "적응기법을 이용한 유도전동기 속도 센서리스 벡터제어", 고려대학교 대학원 전기공학과 공학박사 학위 논문. 1996년 6월.

### 3. 퍼지 PI 제어기의 설계

퍼지 폐루프 제어시스템의 일반적인 구조는 그림 2와 같다. 최종 제어신호 U는 2가지 상태변수 오차(e)와 오차의 변화(ce)로부터 유추된다. 식(1)은 e와 ce는 실제값 E와 CE와 각각의 이득계수 GE와 GC를 나누어 얻어진 단위 입력신호이다. 다음으로 출력변화량 DU는 출력에 환산계수(scale factor) GU를 단위 출력에 곱하여 얻어진다. 이것을 식(1)에 나타내었다. 단위입력값으로 받는 이점은 이와 같은 계열의 모든 플랜트에 같은 제어를 적용할 수 있다는 장점이 있다. 여기에 이득값은 고정 또는 수정할 있다.[4]

$$e(p.u.) = \frac{E(n)}{GE}$$

$$ce(p.u.) = \frac{CE(n)}{GC} \quad (1)$$

$$pu(p.u.) = \frac{pU(n)}{GU}$$

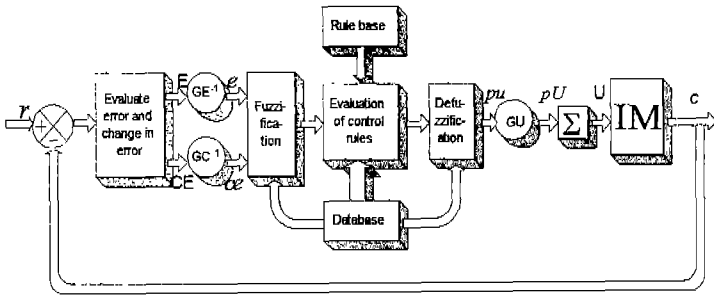


그림 2 페루프 시스템에서 퍼지 제어의 구조  
Fig 2 Structure of Fuzzy control in feedback system

#### (a) 퍼지화

제어기에 대한 입력변수는 매 샘플링 시점마다의 오차(e)와 오차의 변화량(ce)으로부터 결정되고 "IF~THEN 형식"의 언어적인 규칙으로 표현된다. 이러한 규칙은 주로 전문가의 지식이나 경험에 의해서 얻어진다.[5]

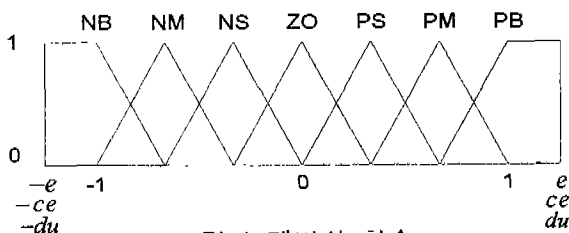


그림 3 멤버십 함수  
Fig. 3 Membership function

각 변수에 대한 소속 함수는 그림 3과 같다. 여기서 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB는 언어적인 변수로서 다음과 같다.

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

#### (b) 퍼지 PI 제어기 구성

퍼지 PI 제어기를 구성하기 위하여 PI제어기의 입력 출력 관계를 나타내면 식 (2)와 같다.

$$U(t) = Kp \cdot e(t) + Ki \int e(t) dt \quad (2)$$

e(t)를 ce 라 표시하면,  $e = \int e(t)$ 가 되기 때문에

$$pU = Kp \cdot ce + Ki \cdot e \quad (3)$$

라고 표현될 수 있다. 또한, 입력 r에 대한 e와 ce의 관계는 그림 4 처럼 나타난다.

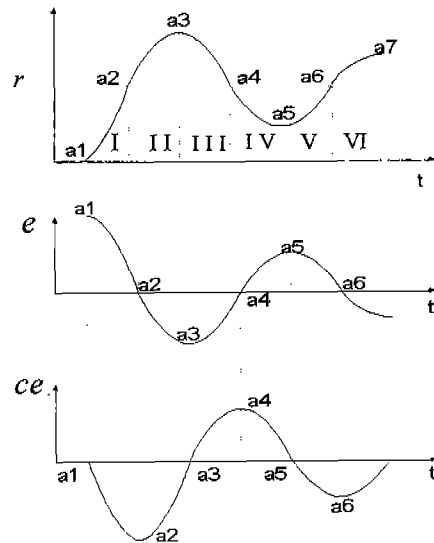


그림 4 시간 응답

Fig. 4 Time response of the unit step

따라서, 입력에 대한 e와 ce를 특정구간으로 n개로 나누어 언어변수로 나타내면, 다음과 같다.

- a1 : IF e=PB AND ce=ZO THEN du=PB
- a2 : IF e=ZO AND ce=NB THEN du=NB
- : : : :
- a(n-1) : IF e=... AND ce=... THEN du=...
- an : IF e=... AND ce=... THEN du=...

이것을 표 1과 같이 나타내었다.

표 1 룩업 테이블  
Table 1 Look-up table

$e$	$ce$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB		0	0	0	NB	NM	0	0
NM		0	0	0	NM	0	0	0
NS		0	0	0	NM	ZO	0	PM
ZO		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS		NM	0	ZO	PM	0	0	0
PM		0	0	0	PM	0	0	0
PB		0	0	PM	PB	0	0	0

(c) 비퍼지화(defuzzification) 방법

비퍼지화는 무게중심법(Center of area method)을 이용하였다. 이 방법은, 합성된 출력 퍼지집합의 무게 중심을 구하여, 그 해당하는 제어 값을 제어입력으로 사용한다.[6] 출력값  $pU$ 는 식(4)로 표현할 수 있다.

$$pU = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(u_j) \cdot u_j}{\mu(u_j)} \quad (4)$$

n = 제어변수 전체집합의 이산화 준위

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서 제시한 퍼지 PI제어기를 검증하기 위한 시뮬레이션 모델은 정격출력 2.2[kW], 4극, 정격전압 220[V], 정격전류 8.5[A], 정격부하 12[Nm]의 유도전동기를 이용하였다.

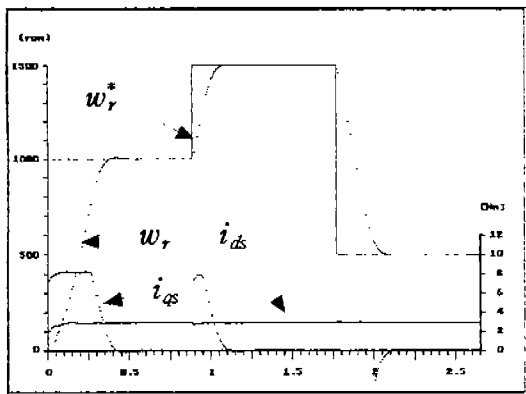


그림 5 PI 제어기를 이용한 속도 응답 특성  
Fig. 5 Speed response characteristics using PI controller

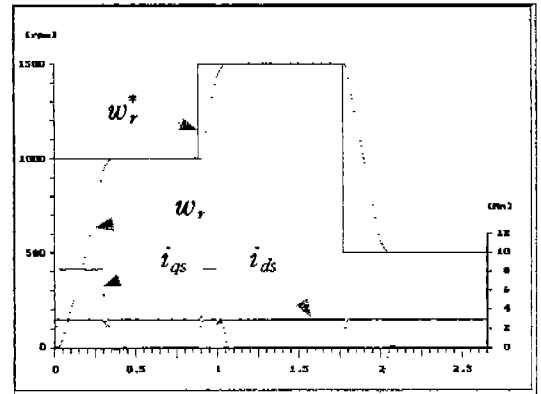


그림 6 퍼지 PI제어기를 이용한 속도응답 특성  
Fig. 6 Speed response characteristics using Fuzzy PI controller

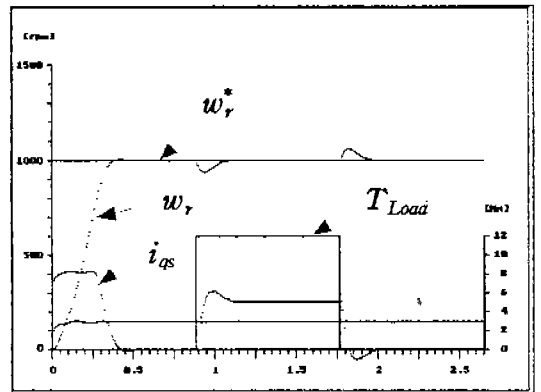


그림 7 PI 제어기를 이용한 외란 억압 특성  
Fig. 7 Disturbance suppression characteristics using PI controller

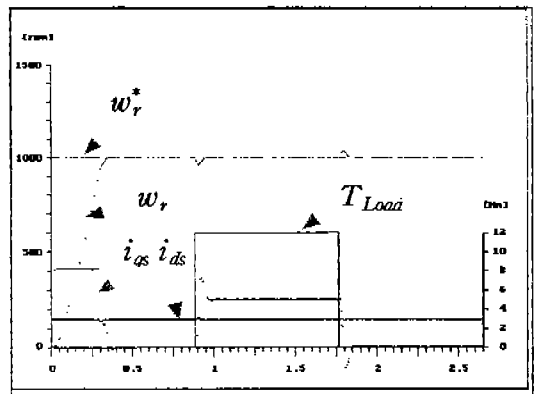


그림 8 퍼지 PI제어기를 이용한 외란 억압 특성  
Fig. 8 Disturbance suppression characteristics using Fuzzy PI controller

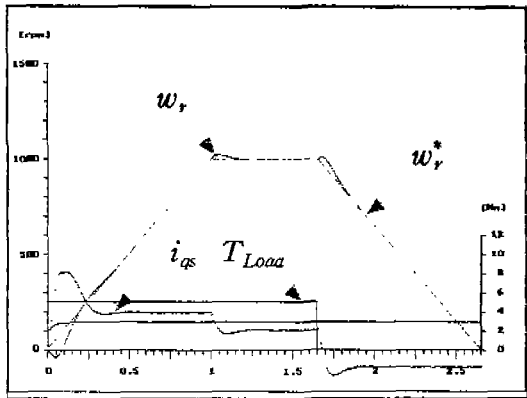


그림 9 PI 제어를 이용한 경사 응답 특성  
Fig. 5 Ramp response characteristics using PI controller

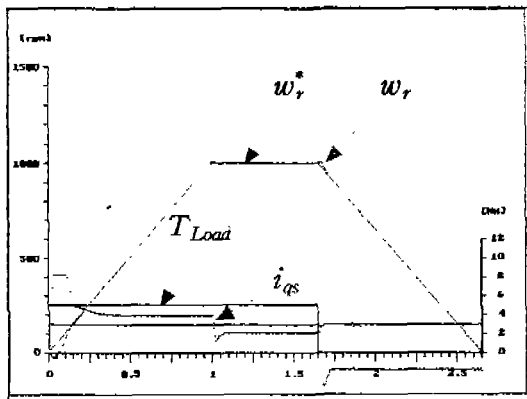


그림 10 퍼지 PI제어를 이용한 경사 응답 특성  
Fig. 10 Ramp response characteristics using Fuzzy PI controller

본 논문에서 제시한 퍼지 PI제어의 우수성을 입증하기 위하여 시뮬레이션을 행하였다. 그림 5와 그림 6은 무부하시 속도지령에 따른 부하의 속도추종으로 제안한 제어기가 빠르게 지령속도에 도달함을 알 수 있다. 그리고, 그림 7과 그림 8은 부하왜란 억압특성으로, 무부하로 운전중 정격부하 12[Nm]가 인가된 경우이다. 만일 압연기에 각각의 제어기를 적용한다면, 속도리플이 적은 퍼지 PI제어기가 보다 양호한 제어를 기대할 수 있다. 그림 9와 그림 10은 경사 응답 특성시험으로, 부하 5[Nm]를 인가하였을 때, 순시적으로 변하는 지령속도를 제안한 제어기가 양호하게 추종해 나가는 것을 볼 수 있다.

위와 같이 시뮬레이션을 통하여 제안한 제어기가 장인성 및 속도 추종이 빠름을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 퍼지 PI제어를 이용하여 유도전동기의 속도 제어한 결과, ① 속도지령에 따른 부하의 속도추종이 양호하고, ② 부하 왜란에 대하여 속도리플이 적으며, ③ 경사응답 특성과 같은 순시적으로 변하는 지령속도에도 양호하게 추종함을 확인하였다. 그러므로, 퍼지 PI제어를 설계할 경우에 경험이나 직관이 부족한 설계자도 퍼지 제어기를 쉽게 결정할 수 있도록 하였다.

## 참고문헌

- [1] Minh Ta-Cao and Hoang Le-Huy , " Model Reference Adaptive Fuzzy Controller and Fuzzy Estimator for High Performance Induction Motor Drive " IEEE Industry Applications society, vol. 1, October ,1996
- [2] 위석오 외 4명, " 퍼지논리를 이용한 유도전동기의 VVVF형 속도제어 ", '전력전자 학회논문지, pp81 - 85, 1998년도 춘계
- [3] 정형환 외 4명, " 전력계통의 안정화를 위한 퍼지 PID 제어기의 적용과 제어특성 ", 전기학회논문지, Vol. 47, pp 143-149, 1998
- [4] Bimal K.Bose, 「 Power Electronics and Variable Frequency Drives 」, pp 577-593
- [5] 임영도, 이상부, 「 퍼지·신경망·유전진화 」, pp77-97, 1997
- [6] 이광형, 오길록, 「 퍼지 이론 및 응용 II 」, pp 5-3 ~ 6-36, 1997