

---

# 3Hz 이하의 저속영역에서 유도 모터의 센서리스벡터 제어를 위한 줌잉 퍼지논리 제어기

한상수\* · 최승헌\*\*

Zooming fuzzy logic controller for sensorless vector control of an induction  
motor in low speed region under 3Hz

Sang-soo Han\* · Sung-horn Choi\*\*

---

이 논문은 2012년도 가천대학교 연구비를 지원받았음 (GCU - 2012 - R228)

---

## 요 약

유도 모터의 센서리스 벡터 제어시스템은 모터의 시정수를 이용하여 자극의 위치를 추정하는 제어시스템으로 중고속 영역의 경우 제어가 잘 구현된다. 그러나 저속 영역의 경우 모터로부터 얻는 전압 정보가 작아 센서리스 벡터 제어 구현이 어렵다. 본 논문에서는 3Hz이하의 저속영역에서 센서리스 벡터제어의 문제점을 개선시키기 위한 줌잉 알고리즘을 이용한 퍼지 논리 제어기를 제시하였으며 제어기 성능이 향상됨을 실험을 통하여 확인하였다.

## ABSTRACT

A sensorless vector control of an induction motor provides a good performance in the middle and high speed region. However, in the low speed region, it is very difficult to implement the sensorless vector controller because the feeding voltage measured by the motor is very low. In this paper, to improve the performance of a sensorless vector control of an induction motor in the low speed region under 3Hz, we proposed the fuzzy logic controller using the zooming algorithm. To verify the performance of the proposed controller, an experiment has been performed.

## 키워드

센서리스 벡터제어, 유도 모터, 저속 영역, 퍼지논리 제어기, 줌잉 알고리즘

## Key word

sensorless vector control, induction motor, low speed region, fuzzy logic controller, zooming algorithm

---

\* 정회원 : 가천대학교 (교신저자, sshan@gachon.ac.kr)

접수일자 : 2012. 09. 05

\*\* 정회원 : 가천대학교

심사완료일자 : 2012. 10. 16

## I. 서 론

센서리스 벡터제어를 구현하는 방법은 크게 선형제어기와 비선형제어기로 나눌 수 있으며[1],[2] 선형제어기를 이용한 방법으로는 슬립주파수 검출방법과 상태방정식을 이용한 속도추정방식, 공극 하모닉 전압에 기초한 평가방법, 자속벡터에 기인한 자속으로부터 속도를 추정하는 방법, 옵저버를 이용한 속도추정방식, 자속과 토크를 직접 제어하는 직접자속제어 방식 등이 있으며 비선형제어기를 이용한 방식으로는 유도전동기의 모델을 기초로 한 MRAS방식, 칼만 필터를 이용한 제어방식, Neural Network을 이용한 방식 등이 있다[3],[4]. 이와 같은 제어 방식은 제어 방식에 따라 성능의 차이는 있지만 고속영역의 경우 벡터제어가 잘 구현된다. 그러나 저속영역의 경우 유도전동기의 변수 변동에 따른 시스템 시정수 변동으로 인한 시스템 불안정과 제어의 어려움이 발생한다.

본 논문에서는 이러한 센서리스 벡터제어의 저속에서의 문제점을 해결하고자 비선형제어기인 퍼지제어기를 적용하여 저속운전에서 수식적으로 얻을 수 없는 유도전동기의 속도정보를 전문가의 경험에 기초한 퍼지룰 베이스를 이용하여 저속영역에서 유도전동기를 성공적으로 제어할 수 있는 퍼지제어기를 제안하고자 한다. 설계된 퍼지제어기는 특정영역 특히 3Hz 미만의 저속영역 운전 구간을 좀 더 세분화하여 제어규칙을 적용할 수 있는 줌잉(zooming) 퍼지제어기를 설계하여 센서리스 벡터제어기가 3Hz 이하로는 제어되지 않는 영역에서 제어 될 수 있도록 제어기를 설계하였다.

## II. 줌잉 퍼지 제어기 설계

퍼지제어기는 입출력관계가 비선형이고 큰 오차에 대해 처리능력이 뛰어나기 때문에 비선형특성을 나타내는 시스템에 적합하나 오차가 매우 작을 경우 처리능력이 떨어진다. 또한 PI제어기가 갖고 있는 적분능력이 없기 때문에 정상상태 에러가 크다[5]. 이와 같이 퍼지제어기의 오차가 작은 경우 정상상태 응답특성을 개선하기 위하여 줌잉 퍼지제어기를 사용한다. 그러나 줌잉 퍼지 제어기는 영역을 세분화하여 제어하기 때문에 많은 퍼지 제어규칙을 필요로 하고 그에 따른 연산 량의 증

가로 인하여 속도가 빠른 CPU를 요구하게 된다.

또한 zero-crossing영역을 벗어난 선형구간의 경우 퍼지 제어규칙이 많지 않으면 제어출력이 급변하여 모터 속도에 리플성분이 존재하게 되기 때문에 이를 줄이기 위해서 세분화 된 퍼지 룰 베이스가 필요하다. 그림1은 줌잉 퍼지 제어기 구조이다. 퍼지화 방법은 퍼지 싱글톤 방법(Fuzzy Singleton Method)을 적용하였고 멤버쉽함수(Membership Functions)는 이등변삼각형법을, 퍼지추론은 Min-Max법을, 비퍼지화기는 무게중심(Center of Gravity)법을 사용하였다. 본 논문에서 사용된 퍼지제어기는 오차에러가 큰 구간에서 동작하는 제어규칙과 오차에러가 작은 정상상태 영역에서 동작하는 줌잉 방법을 이용한 퍼지제어기를 사용하였으며, 줌잉 제어규칙에는 모터속도 에러, 모터속도 에러의 변화율뿐만 아니라 추정된 모터의 슬립속도  $\hat{\omega}_{sl}$ 을 입력으로 하였다. 또한 추정된 모터의 슬립속도  $\hat{\omega}_{sl}$ 을 입력받아 3Hz 이하의 저속영역, 또는 정상상태 영역내인지를 판단하여 세부적인 퍼지룰을 설정하였다.

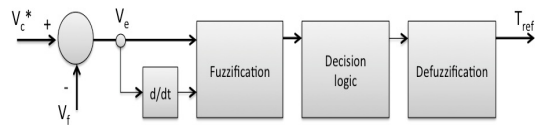


그림 1. 줌잉 퍼지 논리 제어기의 구조  
Fig. 1 The structure of a zooming fuzzy logic controller

퍼지논리 제어기의 입력은 모터속도의 오차 및 모터속도의 오차의 변화율로 주어지며 식 (1)과 (2)로 정의된다.

$$V_e(k) = V_c^*(k) - V_f(k) \quad (1)$$

$$\Delta V_e(k) = (V_e(k) - V_e(k-1))/T \quad (2)$$

단,  $V_e(k)$ : 모터 속도 편차,  $\Delta V_e(k)$ : 모터 속도 오차 변화율, T: 샘플링 시간

모터 속도 오차  $V_e(k)$ 는 모터 속도 지령치  $V_c^*(k)$ 와 귀환된 실제 모터 속도치  $V_f(k)$ 와의 편차이며 모터 속도 오차 변화율  $\Delta V_e(k)$ 는 k-1차 샘플링 속도 오차

와 k차 샘플링 속도 오차와의 변화율이다. 줌핑 퍼지 제어기의 입력 변수인 모터의 추정 슬립 속도는 식(3)과 같다.

$$\hat{\omega}_{sl} = \frac{\omega_e R_r i_{qs}^e}{\hat{e}_{qs}^e - \omega_e L_s \sigma i_{ds}^e} \quad (3)$$

단,  $\omega_e$ : 동기 속도,  $R_r$ : 회전자 저항,  $i_{ds}^e$ : d축 전류,  $i_{qs}^e$ : q축 전류,  $\hat{e}_{qs}^e$ : q축 기준전압,  $L_s$ : 고정자 인덕턴스,  $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ ,  $L_m$ : 상호인덕턴스,  $L_r$ : 회전자 인덕턴스

퍼지논리 제어기의 출력은 모터에 인가되는 토크전압 지령치이며 이 출력전압의 최대출력범위는 모터의 정격 전압으로 제한하였다. 퍼지논리 제어기의 세 입력인 속도 오차, 속도 오차 변화율과 추정 슬립 속도 변수 그리고 출력인 출력 토크 변수의 각 언어 변수는 식(4),(5),(6),(7)과 같다.

$$V_e = [NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB] \quad (4)$$

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

$$\Delta V_e = [ENB, ENM, ENS, EZO, EPS, EPM, EPB] \quad (5)$$

단, ENB:Negative Big ENM:Negative Medium  
ENS:Negative Small EZO:Zero EPS:Positive Small  
EPM:Positive Medium  
EPB : Positive Big

$$\omega_{sl} = [ZN, ZZO, ZP] \quad (6)$$

단, ZN:Negative speed ZZO:Zero ZP:Positive Speed

$$T_{ref} = [ONB, ONM, ONS, OZO, OPS, OPM, OPB] \quad (7)$$

단, ONB:Negative Big ONM:Negative Medium  
ONS:Negative Small OZO:Zero OPS:Positive Small  
OPM:Positive Medium OPB : Positive Big

각 입력 퍼지 변수들과 출력 퍼지 변수의 소속 함수는 그림 2와 같다.

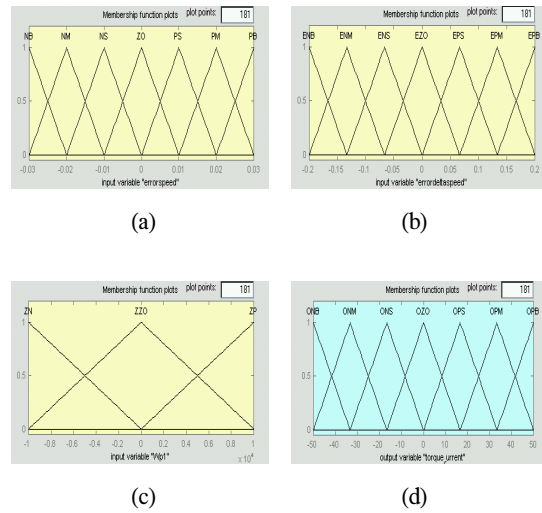


그림 2. 퍼지 논리 제어기의 두 입력 퍼지 변수와 출력 퍼지 변수의 소속 함수: (a) 속도 오차 퍼지 변수, (b) 속도 오차 변화율 퍼지 변수, (c) 추정 슬립 속도 퍼지 변수, (d) 토크 퍼지 변수

Fig. 2 Membership functions of three input and one output fuzzy variables: (a) input motor speed error, (b) input change variable of motor speed error, (c) input estimated slip speed error, (d) output torque variable

퍼지 제어 규칙은 모터의 슬립속도  $\hat{\omega}_{sl}$ 의 추정치로 3Hz 이하의 저속영역, 또는 정상상태 영역내인지를 판단하여 세부적인 퍼지룰을 설정하였다. 퍼지 제어 규칙은 표 1에, 줌핑 퍼지 제어규칙은 표 2에 나타났다. 표 1와 표 2의 퍼지 제어 규칙은 PI속도제어기로 제어할 경우에 모터속도 오차 및 오차의 변화율, 추정된 모터의 슬립 속도를 토대로 제어규칙을 설정하였다.

표 1. 퍼지 제어규칙  
Table. 1 Fuzzy rule base

$\Delta e(k)$ $e(k)$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	ZOOM	ZOOM	ZOOM	PS	PM
ZO	NB	NM	ZOOM	ZOOM	ZOOM	PM	PB
PS	NM	NS	ZOOM	ZOOM	ZOOM	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

표 2. 줌잉 제어규칙  
Table. 2 Zooming fuzzy rule base

$e(k), \Delta e(k)$	WP(k)	NS	ZO	PS
$e(k)=NS, \Delta e(k)=NS$		NS	NM	NM
$e(k)=NS, \Delta e(k)=ZO$		NS	NS	NM
$e(k)=NS, \Delta e(k)=PS$		NS	NS	NS
$e(k)=ZO, \Delta e(k)=NS$		ZO	NS	NS
$e(k)=ZO, \Delta e(k)=ZO$		ZO	ZO	ZO
$e(k)=ZO, \Delta e(k)=PS$		PS	ZO	ZO
$e(k)=PS, \Delta e(k)=NS$		PS	PS	PS
$e(k)=PS, \Delta e(k)=ZO$		PS	PS	PS
$e(k)=PS, \Delta e(k)=PS$		PM	PM	PS

### III. 센서리스 벡터 제어를 위한 줌잉 퍼지 제어기

일반적으로 유도 모터의 센서리스 벡터 제어를 구현하기 위하여 PI 속도 제어를 많이 사용한다. PI 속도제어를 사용한 유도 모터의 센서리스 벡터제어의 경우 3Hz 이하의 모터 속도 영역에서 무부하시 모터 속도를 잘 추종하나 부하시 귀환되는 모터 정보가 작아 모터 속도를 잘 추종하지 못하고 큰 정상상태 오차를 야기시킨다. 따라서 3Hz 이하의 저속영역에서 유도 모터의 센서리스 벡터 제어를 위한 줌잉 퍼지 제어기를 그림 3과 같이 제시하였다. 센서리스 제어기의 퍼지 제어 알고리즘은 전문가의 경험적인 지식을 토대로 제시하였으며 특히

3Hz 이하의 저속영역 운전구간을 세분화하여 제어규칙을 적용할 수 있는 줌잉(zooming) 퍼지제어기를 설계하였다. 일반적으로 퍼지제어기는 비선형특성을 나타내는 시스템에 효과적으로 적용가능하나 오차가 작을 때에는 퍼지 제어를 세분화하여 적용하여야 되기 때문에 제어기의 연산능력이 매우 커져야 하는 단점이 있다.

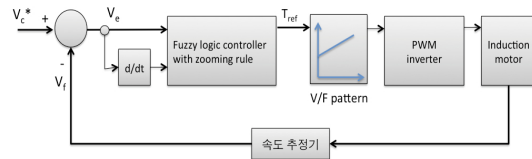


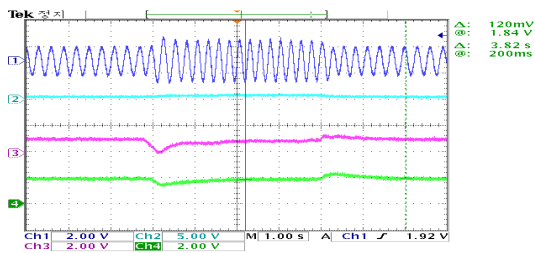
그림 3. 센서리스 벡터제어를 위한 줌잉 퍼지제어기 블록도

Fig. 3 Block diagram of zooming fuzzy controller for sensorless vector control

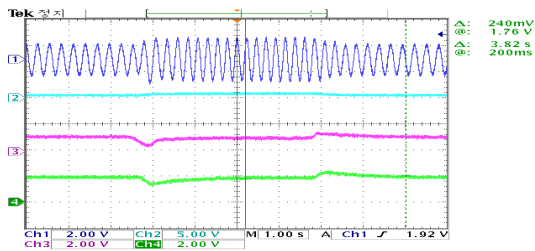
### IV. 실험 및 고찰

그림 4와 그림 5 그리고 그림 6의 (a)는 센서리스 벡터 제어시의 실험한 실제파형을 나타내었고 (b)는 본 논문에서 제안한 줌잉 퍼지 제어시의 실험한 실제파형을 나타낸 것이다. ch1은 모터에 흐르는 실제 전류의 파형을 나타낸 것이며 ch2는 제어기에서 출력되는 q축 토크전류지령치를 나타낸다. ch3는 로터리엔코더로 측정된 실제 속도파형이며 ch4는 제어기에서 추정된 모터의 속도를 나타낸 것이다.

그림 4는 무부하 상태에서 86rpm의 속도로 구동 중 부하를 인가하였다 제거한 경우의 파형을 보여준다. (a)의 경우 ch1과 ch2의 전류는 부하가 인가된 순간에서부터 제거된 순간까지 증가하는 것을 볼 수 있으며 모터 속도는 ch3과 ch4에서 보듯이 부하인가 시에 속도가 급격하게 감소하였다가 다시 회복되는 것을 볼 수 있다. 그러나 ch3과 ch4의 파형을 비교하여 보면 속도 지령치와 실제 모터 속도가 1/2배 차이가 난다. 따라서 86rpm인 경우 모터가 지령 속도를 추정하지 못하고 있음을 알 수 있다. (b)의 경우 ch3의 실제 모터의 속도가 (a)의 경우에 비해서 더 지령치에 근접하여 있으며 부하인가 시에도 회복 속도가 빠름을 알 수 있다. 따라서 센서리스 벡터 제어보다 줌잉 퍼지 제어가 저속인 경우 더 효율적으로 제어되고 있음을 알 수 있다.



(a)

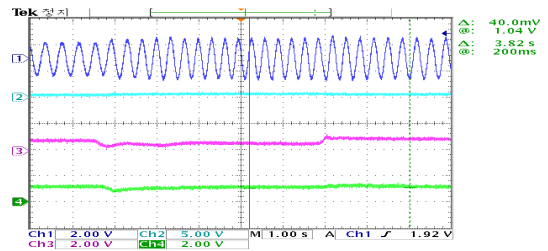


(b)

그림 4. 86rpm인 경우 부하변동에 따른 모터 속도변화  
(a) 센서리스 벡터 제어 (b) 줌잉 퍼지 제어  
ch1: 실제전류(2V/10A), ch2: 토크전류지령(2V/10A), ch3: 모터 속도 지령치(2V/90rpm), ch4: 실제모터속도(2V/90rpm)

Fig. 4 Motor speed change with load change for 86rpm  
(a) Sensorless vector control, (b) Zooming fuzzy control  
ch1: real current(2V/10A), ch2: commanded torque current (2V/10A), ch3: commanded motor speed (2V/90rpm), ch4: real motor speed(2V/90rpm)

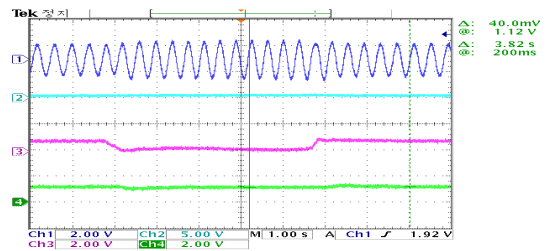
그림 5는 모터의 지령속도가 51rpm인 경우 부하를 인가하였다가 제거한 경우이며 (a)의 경우 실제 모터 속도는 부하 변동에도 거의 변화가 없다. 또한 부하가 인가될 경우 모터는 완전정지하게 된다. 그러나 (b)에서 보듯이 줌잉 퍼지 제어의 경우 제어기가 모터의 속도가 감소했음을 인식하고 제어출력을 높임으로서 모터의 속도가 부하 인가전의 상태로 회복함을 알 수 있다.



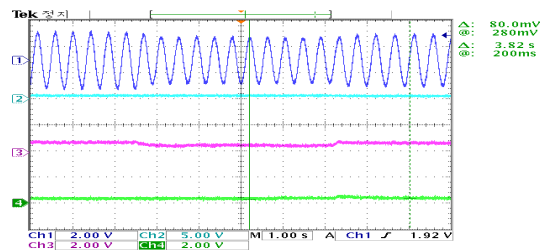
(b)

그림 5. 51rpm인 경우 부하변동에 따른 모터 속도변화  
(a) 센서리스 벡터 제어 (b) 줌잉 퍼지 제어  
ch1: 실제전류(2V/10A), ch2: 토크전류지령(2V/10A), ch3: 모터 속도 지령치(2V/90rpm), ch4: 실제모터속도(2V/90rpm)

Fig. 5 Motor speed change with load change for 51rpm  
(a) Sensorless vector control (b) Zooming fuzzy control  
ch1: real current(2V/10A), ch2: commanded torque current (2V/10A), ch3: commanded motor speed (2V/90rpm), ch4: real motor speed(2V/90rpm)



(a)



(b)

그림 6. 17rpm인 경우 부하변동에 따른 모터 속도변화  
(a) 센서리스 벡터 제어 (b) 줌잉 퍼지 제어  
ch1: 실제전류(2V/10A), ch2: 토크전류지령(2V/10A), ch3: 모터 속도 지령치(2V/90rpm), ch4: 실제모터속도(2V/90rpm)

Fig. 6 Motor speed change with load change for 17rpm  
(a) Sensorless vector control (b) Zooming fuzzy control  
ch1: real current(2V/10A), ch2: commanded torque current (2V/10A), ch3: commanded motor speed(2V/90rpm), ch4: real motor speed(2V/90rpm)

그림 6은 모터의 지령속도가 17rpm인 경우이다. (a)의 경우 부하 인가시 모터가 바로 정지하는 것을 알 수 있다. ch4의 추정속도를 보면 지령치와 똑같고 모터가 정지하는 것을 전혀 감지하지 못하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 (b)의 파형에서는 ch4의 추정속도를 보면 약간의 속도변동을 감지하고 있으며 부하가 인가되어도 실제속도가 여전히 회전하고 있음을 알 수 있다. 3Hz 이하의 저속 영역에서 제안한 줌잉 퍼지제어기의 경우 잘 제어되고 있음을 확인할 수 있었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 센서리스 벡터제어의 저속에서의 문제점을 해결하기 위하여 줌잉 퍼지제어기를 제안하였다. 줌잉 퍼지 제어 알고리즘은 모터속도오차에 따라 인가하는 모터의 전압크기를 제어하게 설계하였고 3Hz 이하의 구간에서는 줌잉 모터의 상태에 따라 전압크기를 좀 더 세분화하여 제어 할 수 있도록 설계하였다. 실험 결과 제안된 줌잉 퍼지 제어기는 3Hz 이하의 저속영역에서 부하를 인가시 제어가 잘되고 있음을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] Elloumi M, Ben-Brahim L, Al-Hamadi MA “Survey of speed sensorless controls for IM drives”. IEEE Industrial Electronics Society. IECON 98. Proceedings of the 24th annual conference of the IEEE, pp 1018-1023, 1998.
- [2] Inanc N “Implementation of a closed loop sliding mode observer for speed sensorless control of an indirect field oriented induction motor drives”. Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik), vol 90, N°r 2 December, 2007.
- [3] Rashed M, Stronach F, Vas P “A stable MRAS-based sensorless vector control induction motor drive at low speeds”, Industry Application Conference, 38th IAS annual meeting conference record 12-16 Oct, vol 2, pp 1181-1188, 2003.

- [4] Carmeli MS, Castelli Dezza F, Iacchetti M, Perini R, “Effect of the inverter non-linearities compensation on a MRAS speed estimator in a double fed induction motor drive”. Electr Eng(Archiv fur Elektrotechnik) 90(4): 283-291, 2008.
- [5] 변중남, 퍼지논리제어, 홍릉과학출판사, pp.175-177, 1997.

## 저자소개



**한상수(Sang-soo Han)**

1995년 홍익대학교 전자공학과  
공학박사  
현재: 가천대학교 교수

※관심분야: 지능 및 퍼지제어, 전력전자제어, 로봇제어



**최승현(Sung-horn Choi)**

1991년 서울대학교 의과대학  
의학박사  
현재: 가천대학교 교수

※관심분야: 의용 공학, 인공지능 시스템, 유비헬스 케어시스템