

# 퍼지 논리 제어를 이용한 영구자석 동기전동기의 강인성 제어

윤병도, 김운호, 채수형, 김춘삼, 유보민  
 중앙대학교 전기공학과

## Robust Control of Permanent Magnet Synchronous Motor using Fuzzy Logic Controller

Byung-Do Yoon, Yoon-Ho Kim, So-Hyung Chae, Chun-Sam Kim, Bo-Min Yoo  
 Dept. of Electrical Eng., Chung-Ang Univ.

### ABSTRACT

The permanent magnet synchronous motor(PMSM) is receiving increased attention for servo drive applications in recent years because of its high torque to inertia ratio, superior power density and high efficiency. By vector-control method, PMSM has the same operating characteristics as separately excited dc motor.

The drive system of servo motor is requested to have an accurate response for the reference input and a quick recovery for the disturbance such as load torque. However, when the unknown disturbances and parameter variations are imposed on the permanent magnet synchronous motor(PMSM), the drive system is significantly effected by them. As a result, the drive system with both a fast compensation and a robustness to a parameter variations is requested. This paper investigates the possibility of applying the fuzzy logic controller(FLC) using Multi-Rule Base in a servo motor control system.

In this paper, The five Rule Bases(1 to 5) are selected to recover the state error caused by the disturbance in steady state. In the initial operating mode, Rule Base 0 is used. To show the validity of the proposed fuzzy logic control system, the computer simulation results are provided.

### 1. 서론

영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 회전자가 영구자석으로 구성되어 있으며 인버터에 의한 전기적 정류회로를 구성하므로써 기계적 정류로 인한 단점이 없을 뿐만 아니라 유도전동기 또는 권선계자형 동기전동기와 비교하여 높은 토크대 관성비와 고효율을 갖고 있어 고성능 서보 전동기에 적합하다.[1]

일반적으로 서보전동기의 구동시스템은 기준속도에 대한 정확한 응답과 외란에 대한 강인성을 필요로 한다. 그러나 영구자석 동기 전동기의 동특성은 외란 및 파라미터의 변화에 대하여 크게 영향을 받으며 일정한 이득을 갖는 PI 제어기 만으로는 비선형 시스템과 변화하는 제어환경에서 높은 성능을 얻는데 충분하지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 기준모델 적응제어(Model Reference Adaptive control)와 상태관측기(State Observer)등의 제어이론이 보고된 바 있으나 이 방법들은 많은 장점에도 불구하고 복잡한 수학적 모델링을 필요로 하고 복잡한 알고리즘으로 인하여 실시간 제어에 어려움이 따른다.[8]

최근에는 이러한 복잡한 수학적 모델링 보다는 전문가의 지식이나 경험을 바탕으로한 퍼지 제어 기법의 응용에 대한 연구가 다수 보고되고 있으며, 1965년 Zadeh 교수가 퍼지 집합 이론을 제안한 이래 1973년 이 이론이 시스템 자동제어에 응용될수 있다는 의견을 피력하였다.[5] 또한 1974년 Mamdani 교수는 스칼라제어에 퍼지이론을 최초로 응용하여 실용성의 가능성을 보였다.[6] 이러한 FLC(Fuzzy logic controller)는 전문가의 지식을 기반으로 하며 종래의 고전

적 제어기에 비하여 수학적 모델링이 불가능하거나 비선형 특성을 갖는 계통의 제어에서 특히 우수하다.[7]

현재에는 서보계통 제어에도 많이 응용되어 지고 있으며 대표적 사례로는 직류 서보 전동기의 제어에 대한 Li와 Lau의 연구와 Kiyoshi Ohishi의 연구등이 있으며[8][9]. 국내에서도 직류 서보 전동기 및 브러쉬리스 직류 전동기(Brushless DC Motor, BLDC)등의 서보 제어에 대한 연구가 다수 보고된 바 있다.

본 논문에서는 벡터제어에 의해 구동되는 표면자석형 영구자석 동기전동기(Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)를 대상으로 외란에 대한 신속한 보상을 위하여 외란의 변화에 따라 적절한 규칙기반(Rule base)이 선택되도록 다수개의 규칙기반을 선정하여 상태오차를 신속하게 보상함으로써 강인한 속도제어 시스템을 구현 하였다. 본 시스템에서 규칙기반은 총 7개로서 규칙기반의 선택을 위한 규칙기반 및 초기 동작 모드의 규칙기반과 상태오차에 따라 적절한 제어입력을 발생시키는 5개의 규칙기반으로 이루어지며 추론 과정의 시간을 줄이기 위해 각 규칙기반은 오프-라인(off-line) 방식으로 구성하였다. 이상 본 연구의 타당성은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

### 2. 퍼지제어시스템의 설계

#### 2-1. 퍼지제어기의 구성도

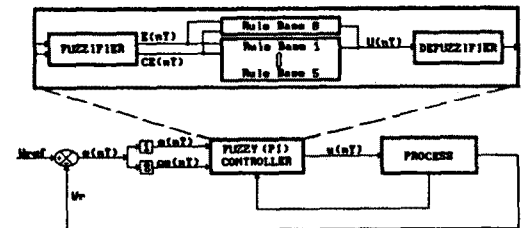


그림 1. 퍼지제어기의 구성도  
 Fig. 1. Block diagram of fuzzy controller configuration.

본 논문에서 제안된 퍼지제어기는 측정된 데이터의 퍼지화를 위한 퍼지화기와 규칙기반으로부터 얻어진 결과를 크리소프한 값으로 변환하기 위한 비퍼지화기 및 프로세스(Process)의 동특성을 고려하여 설계한 6개의 규칙기반(Rule Base 0, ..., Rule Base 5)과 프로세스의 동특성에 따라 적당한 규칙기반을 선택하기 위한 규칙기반 선택기(Rule Base Selector)로 이루어 진다.

#### 2-2. 제어규칙의 설계

현재 국내에 발표되고 있는 퍼지 제어기는 통상 2개 이하의 규칙기반을 사용하고 있으나 이것만으로는 부하외란에 대한 효과적 보상에 미흡한 면이 있다. 따라서 본 논문에서는 정상상태에서 부하외란의 정도에 따라 적절한 제어입력을 발생시키는 다수개의 규칙기반을 선정하여 영구자석 동기전동기의 정상상태 부하외란에 대한 효과적 보상을 하도록 설계 하였다.

여기서 규칙기반 0 은 목표치 인접영역까지 동작하며 규칙기반(4~5)는 정상상태에서 부하인가지 + 오차를 보상하고 규칙기반(1~2)는 - 오차를 보상하도록 설계하였다.

일반적으로 퍼지제어기의 제어규칙은 다음과 같은 if - then 문 의 조합 및 언어적 표현을 사용하며 전문가의 경험이 나 지식에 의해 유도된다.

본 논문에서 퍼지제어기의 입력 변수는 제어 목표값과 출력값의 오차  $e(nT)$ 와 전시간 오차에 대한 변화율  $ce(nT)$ 이고 출력 변수는 제어입력  $u(nT)$ 이다. 이것은 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} e(nT) &= Wref(nT) - Wr(nT) & (1) \\ ce(nT) &= e(nT) - e(nT-T) & (2) \\ u(nT) &= u(nT-T) + G_u \cdot dU(nT) & (3) \end{aligned}$$

여기서  $Wref(nT)$ 와  $Wr(nT)$  및  $T$ 는 각각  $n$ 번째 기준속도와 출력속도 및 샘플링 시간이며,  $G_u$ 는 퍼지추론에서 구해진 퍼지값을 실제 제어입력으로 사용될 수 있는 크리스프한 값으로 변환하기 위한 스케일 팩터(Scale factor)이다.

또한 식 (1), (2)에서 구한 크리스프한 입력값은 퍼지추론을 위한 퍼지변수로 변환되어야 하는데 이것은 스케일 팩터  $G_e$  및  $G_{ce}$ 와 양자화  $Q$ 로 이루어지며 식(4), (5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E(nT) &= G_e \cdot Q \cdot e(nT) & (4) \\ CE(nT) &= G_{ce} \cdot Q \cdot ce(nT) & (5) \end{aligned}$$

퍼지집합의 형태는 전문가의 경험과 지식에 의하여 주관적으로 정의되며 규칙기반 0 에서는 언어변수에 대한 언어치를 다음과 같이 7단계로 정의하였다.

- PB: positive big
- PS: positive small
- NS: negative small
- NB: negative big
- PM: positive medium
- ZO: zero
- NM: negative medium

이 언어치들은 전체집합 상에서 퍼지부분집합을 이루며 앞에서 언급한  $E$ (error),  $CE$ (change of error) 및  $dU$ (output) 등의 언어변수에 대한 용어집합  $T$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$T(E), T(CE), T(dU) = \{ NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB \}$$

입력변수  $E$ ,  $CE$  및 출력변수  $dU$ 의 멤버십함수는 그림 2와 같이 정의하며 IF - THEN rule에 따라 완성된 퍼지제어규칙은 표 1과 같다.

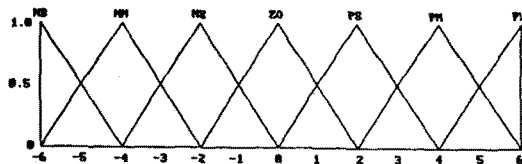


그림 2. 규칙기반0의 멤버십함수  
Fig. 2. Membership function of Rule Base 0.

표 1. 언어적 제어규칙 0  
Table 1. Linguistic control Rule 0.

		Change of error						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E P C O	E	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
	P	NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO
	C	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
	O	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
		PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
		PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
		PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB

퍼지추론은 퍼지화 된 오차  $E(nT)$ 와 오차의 변화율  $CE(nT)$ 에 부여된 멤버십 함수에 대한 제어입력  $U(nT)$ 의 멤버십 함수를 구하는 과정이며 본 논문에서는 최소-최대합성(Min-Max composition)법칙을 사용하였다.

한편 비퍼지화는 퍼지추론에서 구한 제어입력  $U$ 의 멤버십 함수를 이용하여 실제 전동기에 입력될 제어입력  $u(nT)$ 를 구하는 것으로서 본 논문에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 무게중심법(Center of gravity method)을 사용하며 이것은 식(6)과 같이 표현된다.

$$u(nT) = \frac{\sum_{k=1}^n \mu(U_k) \cdot U_k}{\sum_{k=1}^n \mu(U_k)} \quad (6)$$

이러한 과정을 통하여 모든 입력상에 대한 퍼지제어기의 룩업(Look-up) 테이블을 만들면 표 2와 같다.

표 2. 퍼지제어기의 룩업 테이블 0  
Table 2. Lookup table 0 of fuzzy controller.

		Change of error						
		-6	-4	-2	0	2	4	6
E P C O	E	-6	-4	-2	0	2	4	6
	P	-6	-4	-2	0	2	4	6
	C	-4	-2	0	2	4	6	6
	O	-2	0	2	4	6	6	6
		0	2	4	6	6	6	6
		2	4	6	6	6	6	6
		4	6	6	6	6	6	6

규칙기반 선택기는 정상상태에서 부하의란의 정도에 따라 규칙기반 1 에서 부터 규칙기반 5 까지를 선택하며 선택된 제어기의 출력값이 전동기의 제어입력이 되며 언어적 제어규칙은 표 3과 같다.

표 3. 언어적 제어규칙 S  
Table 3. Linguistic control Rule S.

		Change of error			
		CE	NS	ZO	PS
E P C O	E	NB	NB	NM	ZO
	P	NS	NB	NM	ZO
	C	ZO	NM	ZO	PM
	O	PS	ZO	PM	PB

여기서  $T(dU)$ 의 NB, NM, ZO, PM, PB는 각각의 규칙기반에 다음과 같이 대응된다.

- NB : Rule Base 1
- NM : Rule base 2
- ZO : Rule base 3
- PM : Rule base 4
- PB : Rule base 5

규칙기반 1은 -오차가 더욱 증가할 때 선택되며 입력변수  $E$ ,  $CE$ 의 멤버십함수 및 출력변수  $dU$ 의 멤버십함수는 그림 3과 같이 정의하며 완성된 퍼지제어규칙은 표 4와 같다.

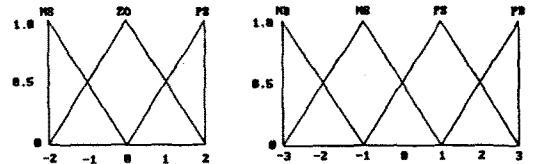


그림 3 E, CE, dU의 멤버십함수  
Fig. 3. Membership function of E, CE and dU.

표 4. 언어적 제어규칙 1  
Table 4. Linguistic control Rule 1.

		Change of error			
		CE	NS	ZO	PS
E P C O	E	NB	NB	NB	NS
	P	NS	NB	NS	NS
	C	ZO	NB	NS	PS
	O	PS	NB	NS	PB

퍼지화 및 퍼지추론과 비퍼지화 과정을 통하여 구하여진 룩업 테이블은 표 5와 같다.

표 5. 퍼지제어기의 룩업 테이블 1  
Table 5. Lookup table 1 of fuzzy controller.

		Change of error						
		E	CE	-2	-1	0	1	2
E P C O	E	-2	-3	-3	-3	-2	-1	
	P	-1	-3	-3	-2	-1	0	
	C	0	-3	-2	-1	0	1	
	O	1	-2	-2	-1	1	2	
		2	-1	-1	-1	1	3	

규칙기반 2 는 -오차를 보상하기 위하여 선택되고 E, CE 및 dU의 멤버십함수는 규칙기반 1의 경우와 동일하게 정의되며 완성된 퍼지제어규칙과 특-업 테이블은 표 6 및 표 7과 같다.

표 6. 언어적 제어규칙 2  
Table 6. Linguistic control Rule 2.

		Change of error				
		E	CE	NS	ZO	PS
E	NS					
	ZO					
	PS					
	PS					

표 7. 퍼지제어기의 특업 테이블 2  
Table 7. Lookup table 2 of fuzzy controller.

		Change of error						
		E	CE	-2	-1	0	1	2
E	-2							
	-1							
	0							
	1							
	2							

규칙기반 3 는 오차 보상이 만족스러울 때 선택되고 E(error), CE(change of error) 및 dU(output)등의 언어변수에 대한 용어집합과 멤버십함수는 규칙기반 1의 경우와 동일하게 정의되며 완성된 퍼지제어규칙과 특-업 테이블은 표 8 및 표 9와 같다.

표 8. 언어적 제어규칙 3  
Table 8. Linguistic control Rule 3.

		Change of error				
		E	CE	NS	ZO	PS
E	NS					
	ZO					
	PS					
	PS					

표 9. 퍼지제어기의 특업 테이블 3  
Table 9. Lookup table 3 of fuzzy controller.

		Change of error						
		E	CE	-2	-1	0	1	2
E	-2							
	-1							
	0							
	1							
	2							

규칙기반 4 는 +오차를 보상하기 위하여 선택되고 E, CE 및 dU의 언어변수에 대한 용어집합과 멤버십함수는 규칙기반 1의 경우와 동일하게 정의되며 완성된 퍼지제어규칙은 표 10과 같다.

표 10. 언어적 제어규칙 4  
Table 10. Linguistic Rule Base 4.

		Change of error				
		E	CE	NS	ZO	PS
E	NS					
	ZO					
	PS					
	PS					

구하여진 특-업 테이블은 표 11과 같다.

표 11. 퍼지제어기의 특업 테이블 4  
Table 11. Lookup table 4 of fuzzy controller.

		Change of error						
		E	CE	-2	-1	0	1	2
E	-2							
	-1							
	0							
	1							
	2							

규칙기반 5 는 + 오차가 더욱 증가할 때 선택되고 방법은 앞의 경우와 동일하다.

### 3. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 영구자석 동기전동기의 제 정수는 표 12와 같다.

표 12. 영구자석 동기전동기의 제 정수

Table 12. Parameters of PMSM.

정격 출력	200 [W]
정격 속도	261.75 [rad/s]
정격 전압	120 [V]
정격 전류	3.1 [A]
상단 저항	3.61 [ $\Omega$ ]
상단 인덕턴스	15 [mH]
극수	2극

시뮬레이션의 속도지령은 100[rad/sec]로 했으며 무부하 기동후 0.15[sec]에서 0.25[sec]까지 정격부하의 280%정도인 2[N·m]를 인가하였다. 이때 종래의 PI제어기와 2개의 규칙기반을 사용한 퍼지 논리 제어기 및 제한된 퍼지 논리 제어기의 속도응답 파형은 그림 4와 같다. 여기서 PI제어기의 비례 이득(Kp) 및 적분시간(Ti)은 Ziegler-Nichols 방법을 사용하여 구했으며 Kp는 3.20이며 Ti는 0.06이다.

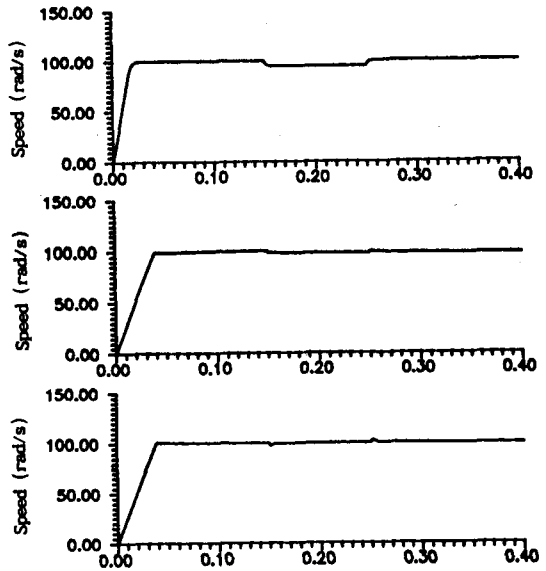


그림 4. 속도응답  
Fig. 4. Speed response.

### 4. 결론

본 연구에서 각 제어기는 기준속도 100(rad/s)에서 부하 외란이 인가 되었으며 PI제어기와 2개의 규칙기반을 사용한 제어기의 경우는 부하외란에 대한 효과적 보상이 이루어 지지 않고 있으나 다수개의 규칙기반을 사용한 경우는 5개의 규칙기반이 정상상태 프로세스의 동특성에 따라 규칙기반 선택기에 의해 적절히 선택되어 종래의 PI제어기 및 2개의 규칙기반을 사용한 제어기만으로는 실현이 어려웠던 부하외란에 의한 정상상태 오차를 효과적으로 보상하였다.

### 참고 문헌

- 윤병도, "마이크로프로세서에 의한 영구자석 동기전동기의 구동", 대한전기학회 논문지, Vol.35, Dec., 1986.
- H.J.Zimmerman, Fuzzy Set Theory and Its Applications, Boston : Kluwer Academic Publishers, 1985.
- Witold Pedrycz, Fuzzy Control and Fuzzy Systems, Research Studies Press LTD, 1989.
- LOTFI A. ZADEH, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Trans. on SMC., Vol.SMC-3, No.1, Jan., pp.28-44, 1973.
- E.H.Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", Proc. IEE, Vol.121, No.12, Dec., pp.1585-1588, 1984.
- C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I, II", IEEE Trans. on SMC., Vol. 20., No.2, Mar./ Apr., pp.404 - 435, 1990.
- Y.F.Li and C.C.Lau, "Development of fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE Contr. Syst. Mag., Vol.9, No.3, Apr., pp.65-72, 1989.
- K. Ohishi, H. Tsuchikawa and S. Matsuda, "Robust Force Control System Based on Fuzzy Acceleration Control Algorithm", IEEE pp.688-693, 1990.