

퍼지제어기를 이용한 엘리베이터 구동용 영구자석형 동기전동기의 속도제어

황선모*, 유재성*, 원충연*, 김규식**, 최세완***
성균관대학교*, 서울시립대학교**, 서울산업대학교***

Speed Control for PMSM in Elevator Drive System Using Fuzzy Controller

S.M Hwang* , J.S Yu* , C.Y Won* , K.S Kim** , S.W Choi***
Sunkyunkwan University*, The University of Seoul**, Seoul National University of Technology***

ABSTRACT

This paper proposes a fuzzy logic based vector control for the gearless traction machine drive systems using a permanent-magnet synchronous motor (PMSM). The performance of the proposed Fuzzy Logic Control(FLC)-based PMSM drive are investigated and compared to those obtained from the conventional PI controll-based drive system. We have confirmed theoretically and experimentally at different dynamic operating conditions such as step change in command speed, step change in load, etc. The comparative experimental results show that the FLC is more robust and, hence, found to be a suitable replacement of the conventional PI controller for the high-performance elevator drive system.

1. 서론

기존의 엘리베이터 시스템의 구동원으로는 유도전동기가 주로 사용되고 있다. 그러나 유도전동기의 특성상 여자전류로 인한 낮은 효율과 토크부족 때문에 기어를 사용한다.

기어를 사용하므로 기계실의 부피가 커지고 소음이 커지는 문제점이 있다. 따라서 엘리베이터를 고효율, 고성능으로 운전하기 위해 영구자석형 동기전동기가 채택된다.^[1]

벡터제어를 사용한 엘리베이터용 구동시스템은 보통 PI제어기를 사용한다. 그러나 PI제어기를 적용한 방식은 파라미터의 변화와 외란등의 영향에 민감하다는 단점이 있다. 이러한 점을 개선하기 위

하여 Model Reference Adaptive Control (MRAC), Sliding-Mode Control (SMC), Variable Structure Control (VSC), Self-tuning PI controllers 와 같은 기법이 제안되었다.

그러나 위에 기술한 제어기법은 정확한 시스템의 수학적 모델이 필요하다는 단점을 가진다.

따라서 이러한 점을 극복하기 위하여 최근 퍼지제어기가 모터제어와 DC/DC 컨버터에 적용되고 있다.^{[2][4]}

본 논문에서는 벡터제어 알고리즘의 속도 및 전류 제어기에 퍼지제어기를 사용하여 PSIM 시뮬레이션과 실험을 통하여 결과를 확인하였다.

2. 본론

2.1 퍼지 제어기의 구성

2.1.1 입출력 변수

그림 1은 퍼지제어기의 블록도를 나타낸다.

퍼지제어기는 그림1과 같이 Fuzzifier, Fuzzy Inference Engine, Knowledge Base, Defuzzifier로 구성된다.

퍼지제어기의 설계는 퍼지제어기의 입출력 변수와 언어값, 수치적 입력 변수의 퍼지화 방법, 퍼지 제어 규칙, 추론법, 비퍼지화 방법등을 결정한다.

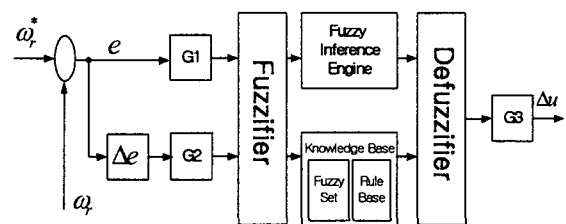


그림 1 퍼지제어기 블록도

Fig. 1 Block diagram of Fuzzy Controller

퍼지제어기의 설계를 위하여 먼저 입 · 출력 변수를 결정해야 한다. 입력변수는 오차(e)와 오차의 변화량(Δe)이며, 출력변수는 조작량의 변화량(Δu)이다.

$$e(k) = ref - real(k) \quad (1)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

$$U(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (3)$$

속도제어기에서 오차는 속도지령과 실제속도의 차이가 되며, 출력변수는 토크의 변화량이 된다
전류제어기에서 오차는 전류지령과 실제전류의 차이가 되고, 출력변수는 PMSM에 인가하는 전압지령치의 변화량이 된다.

2.1.2 언어값과 소속함수

입출력 변수가 결정이 되면 적절한 언어값을 선택해야 한다. 본 논문에서는 다음과 같은 7개의 언어값을 선택하였다.

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

측정된 입력값이 외란의 영향을 받아서 불확실하다고 간주될 때 입력값의 확실적인 특성을 적절한 퍼지숫자로 변환시켜주는 퍼지화 작업을 수행한다. 본 논문에서는 언어값의 소속함수로서 이등변 삼각형을 채택하여 입력변수인 오차(e), 오차의 변화량(Δe), 출력변수인 조작량의 변화량(Δu)에 대하여 퍼지화작업을 수행하였다.

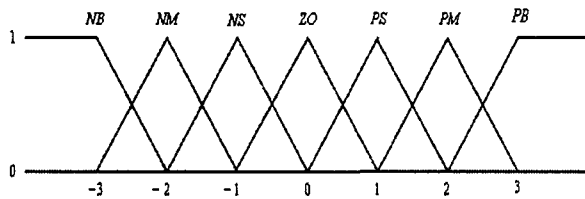


그림 2 $e, \Delta e, \Delta u$ 의 소속 함수
Fig. 2 Membership function of $e, \Delta e, \Delta u$

2.1.3 제어규칙

퍼지 제어기 설계에서 제어규칙을 작성하는 것이 중요하다. 제어규칙은 합성에 의한 추론법을 사용할 때, 'If x is A then y is B'의 형식으로 기술된다.

퍼지제어기에서 제어규칙의 전제 조건 변수 x 는

오차(e)와 오차의 변화량(Δe)을 사용하고, 출력 변수 y 는 조작량의 변화량(Δu) 사용한다. A와 B는 언어값이다.

그림 3은 전동기 스텝속도 명령에 대한 응답특성을 관찰하여 위상공간에 표현한 그림이다
제어 규칙을 작성하기 위해 그림3의 e 와 Δe 의 위상 공간에서의 응답 특성을 관찰하여 스텝 응답의 특징점들 $a_i, b_i, c_i, d_i, i = 1, 2, 3, ..$ 에서 필요한 제어 규칙을 얻을 수 있다.

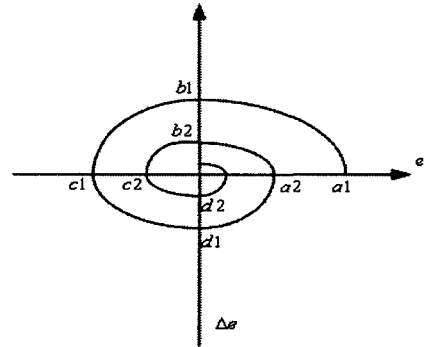


그림 3 전동기 속도의 스텝응답 특성
Fig. 3 Step response of motor speed

예를 들어 a_1 점 부근에서는 오차 $e = \text{positive}$ 이고, 오차의 변화량 $\Delta e = 0$ 이기 때문에 다음과 같은 제어규칙을 작성할 수 있다.

- If $e = \text{PB}$ and $\Delta e = \text{ZE}$ then $\Delta u = \text{PB}$
- If $e = \text{PM}$ and $\Delta e = \text{ZE}$ then $\Delta u = \text{PM}$
- If $e = \text{PS}$ and $\Delta e = \text{ZE}$ then $\Delta u = \text{PS}$
- If $e = \text{ZE}$ and $\Delta e = \text{ZE}$ then $\Delta u = \text{ZE}$

나머지 b_i, c_i, d_i 점에 대해서도 동일한 방법으로 제어규칙을 작성할 수 있다.

본 논문에서는 표 1과 같이 49개의 제어 규칙을 작성하였다.

표 1 퍼지를 집합
Table 1 Fuzzy rule base matrix

$\Delta e \backslash e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

입력변수 e 와 Δe 의 퍼지화 방법으로 Mamdani의 추론법을 채택하였다.

2.1.4 비퍼지화

퍼지 추론한 결과를 제어기에 입력하기 위해서는 보통집합(Crisp set) 값으로 변환해야 한다.

삼각형의 무게 중심법을 사용하여 표 3-1에 있는 49개의 제어 규칙에 의한 비퍼지화된 추론 결과를 식(4)로 구한다.

$$\Delta u = \frac{\sum_{i=1}^4 \omega_i \Delta u_i}{\sum_{i=1}^4 \omega_i} \quad (4)$$

2.2 퍼지제어기를 이용한 구동시스템

그림4는 퍼지제어기를 이용한 전체 제어 시스템의 블록도를 나타낸다.

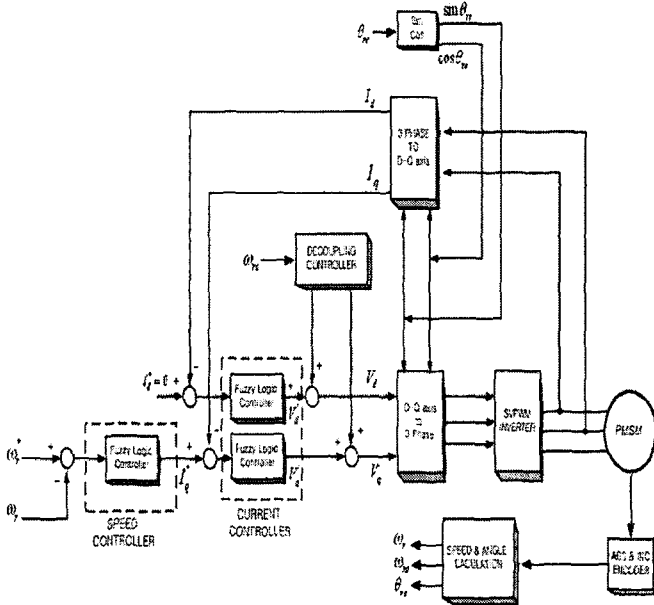


그림 4 벡터제어 블록도
Fig. 4 Block diagram of vector control

엘리베이터 구동 시스템은 안락한 승차감을 위해서 정밀한 토크제어를 필요로 하기 때문에 벡터제어 알고리즘을 사용한다.^[6]

벡터제어는 그림과 같이 두개의 제어루프로 구성된다. 첫 번째는 속도제어를 위한 퍼지제어기이고, 두 번째는 전류제어를 위한 퍼지제어기이다.

첫 번째 제어기는 속도 오차에 해당하는 양을 퍼지제어기를 통해 전류 지령치 I_q^* 를 만든다.

두 번째 제어기는 첫 번째 속도제어기인 퍼지 제어기의 출력을 기준값으로 입력 받고 실제 측정된 I_q 축 전류와의 오차량을 퍼지 제어기를 통해 PMSM으로 인가할 수 있는 전압지령치 V_q^* 를 생성한다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 시뮬레이션

기존의 벡터제어에 사용된 PI 제어기와 제안한 퍼지 제어기의 속도응답 및 부하응답 특성을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

시뮬레이션 툴은 컨버터 및 모터 드라이브 전용 툴인 PSIM6.0을 사용하여 전력 변환부는 회로도로 작성하고, 퍼지 제어기 및 PI 제어기는 DLL(Dynamic Link Library)를 이용하여 ANSI C 언어로 코딩하였다.

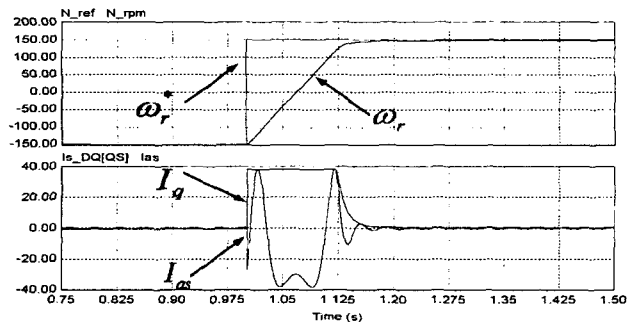
시뮬레이션과 실험에 사용한 영구자석형 동기전동기의 사양은 표2와 같다.

표 2 13.3 kW SMPMSM 사양
Table 2 Specification of 13.3kW SMPMSM

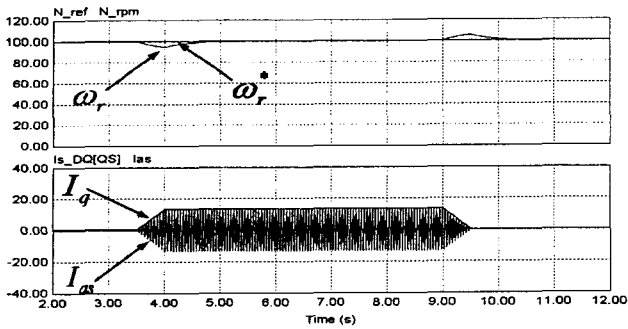
파라미터 항목	값
Rated Power	13.3 kW
Torque	670 Nm
Speed	190 rpm
Current	27.2 A
Efficiency	87 %
Frequency	38 Hz
Pole	24 극
Rs	0.466 Ω
Ls	8.65 mH
Ke	2135 Vpk/krpm
Jm	2.8 Kg-m ²

무부하시 속도응답특성은 속도지령을 -150[rpm]에서 +150[rpm]로 인가하여 관찰하였다.

부하응답특성은 속도가 100[rpm]일 때 정격토크의 35% 부하를 스텝으로 인가하여 특성을 확인하였다.

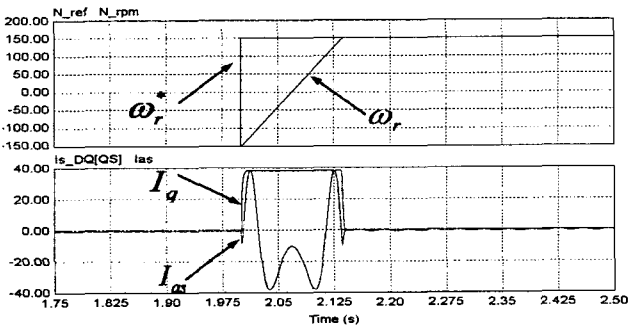


(a) 속도응답특성 (무부하)
(-150[rpm] → +150[rpm])

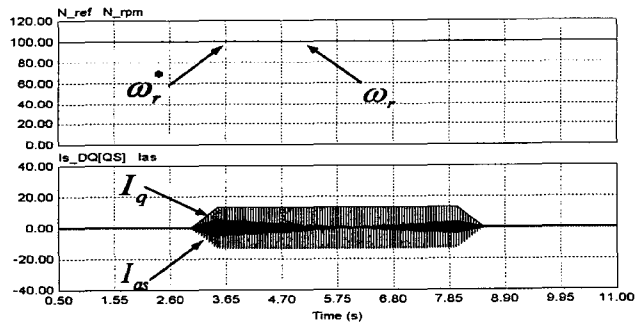


(b) 부하응답특성
(Speed Ref : 100[rpm], Load : 230[Nm])

그림 5 PI제어기의 응답특성
Fig. 5 Response Characteristic of PI controller



(a) 속도응답특성(무부하)
(-150[rpm] → +150[rpm])



(b) 부하응답특성
(Speed Ref : 100[rpm], Load : 230[Nm])

그림 6 퍼지제어기의 응답특성
Fig. 6 Response Characteristic of Fuzzy controller

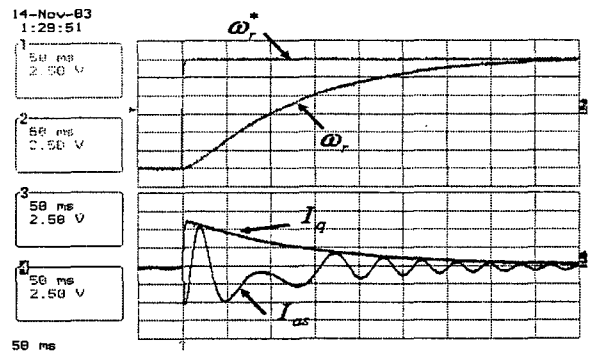
3.2 실험결과

시뮬레이션과 동일한 방법으로 PI제어기와 퍼지 제어기의 속도 및 부하응답특성을 비교하였다.

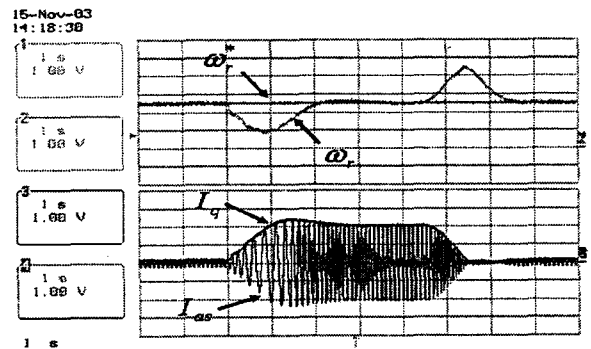
PI 제어기를 사용한 경우에는 속도응답 특성이 퍼지 제어기에 비해서 느리게 응답함을 실험결과를 통해서 확인할 수 있었다. PI 제어기인 경우 좀더 빠르게 응답 특성을 개선할 수는 있으나, 그렇게 하면 속도 응답이 떨어지게 된다.

부하변화에 대한 과도응답 특성은 100[rpm]의 일정속도로 운전하는 동안 무부하에서(실제 MG실험 세트는 부하 대상 타여자 직류전동기의 전기자의 무게만큼 부하가 걸려 있음) 정격의 약 35%부하를 램프 인가하여 실험하였다.

부하변화에 대한 과도응답은 퍼지제어기가 실험결과로 우수함을 알 수 있다.

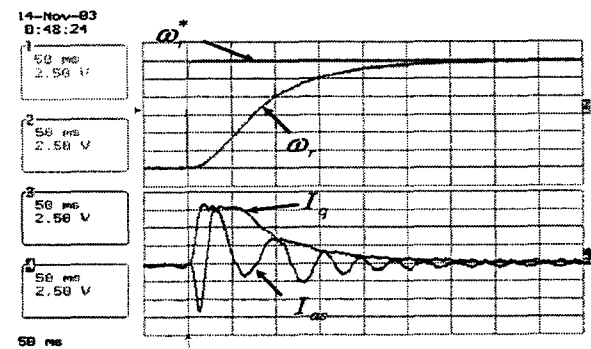


(a) 속도응답특성
(-150[rpm] → +150[rpm])
(Speed : 1[V] → 20[rpm], Current : 1[V] → 7[A])

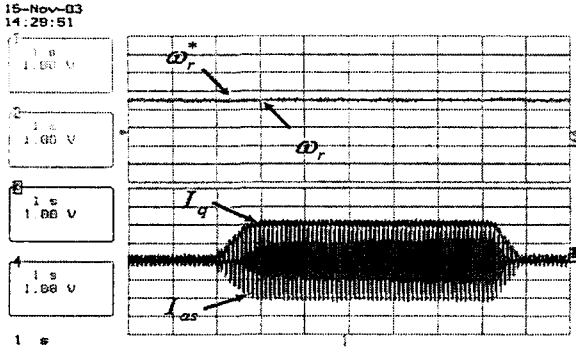


(b) 부하응답특성
(Speed Ref : 100[rpm], Load : 230[Nm])
(Speed : 1[V] → 40[rpm], Current : 1[V] → 7[A])

그림 7 PI제어기의 응답특성
Fig. 7 Response Characteristic of PI controller



(a) 속도응답특성
(-150[rpm] → +150[rpm])
(Speed : 1[V] → 20[rpm], Current : 1[V] → 7[A])



(b) 부하응답특성
 (Speed Ref : 100[rpm], Load : 230[Nm])
 (Speed : 1[V] → 40[rpm], Current : 1[V] → 7[A])

그림 8 퍼지제어기의 응답특성
 Fig. 8. ResponseCharacteristic of FL controller

4. 결 론

본 논문에서는 엘리베이터 구동용 영구자석 표면부착형 동기전동기에 대하여 퍼지제어기를 적용하여 다음의 결과를 얻었다.

제안된 시스템을 13.3[kW]용량의 엘리베이터 구동용 영구자석 동기전동기에 적용하고 이에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 수행한 결과, 제안한 퍼지 제어기가 속도 응답 및 부하 응답에 대한 과도특성이 우수함을 확인하였다.

제안한 퍼지 제어기를 사용해서 실제 엘리베이터 구동용 영구자석 동기 전동기의 드라이브 시스템에 사용하여 훨씬 향상된 고성능 운전을 할 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2001-000-00306-0) 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

[1] D.W. Chung, H.M. Ryu, Y. M. Lee, S. K., Sul, S. J. Kang, J. H. Song, J. S. Yoon, K. H. Lee, J. H. Seo,
 "A new Configuration of drive system for high speed gearless elevator." in IEEE IAS Annu. Rec, 1999, pp.307-310

[2] I. Miki, N. Nagai, S. Nishiyama, and T. Yamada,
 "Vector control of induction motor with fuzzy PI controller," in IEEE IAS Annu. Rec., 1992, pp. 464-471.

[3] Y. Tang and L. Xu, "Fuzzy logic application for intelligent control of a variable speed drive," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 9, pp. 679-685, Dec. 1994.

[4] E. Cerruto, A. Consoli, A. Raciti, and A. Testa,
 "Fuzzy adaptive vector control of induction motor drives," IEEE Trans. Power Electron., vol. 12, pp. 1028-1039, Nov. 1997.

[5] 변중남, "퍼지논리제어," 홍릉과학 출판사

[6] B.K Bose, "Expert system, fuzzy logic and neural network applications in power electronics and motor control," Proc. IEEE, vol.82, no.8, 1994, pp.1303-1323

[7] 유재성, 김이훈, 원충연, 최기준, 윤관철, 정무택, 김연충, 이상식, "엘리베이터구동용 영구자석형 동기전동기의 속도제어에 관한 연구", 전력전자학회 하계학술대회 논문집, pp.461-466, 2003.7