

기준 모델 적응 퍼지 시스템을 이용한 유도전동기의 속도 센서리스 제어

최성대\*, 강성호, 곽봉운, 남운현, 김낙교  
 건국대학교 전기공학과

Speed-Sensorless Control of an Induction Motor  
 using Model Reference Adaptive Fuzzy System

Sung-Dae Choi, Sung-Ho Kang, Bong-Woon Ko, Moon-Hyon Nam, Lark-Kyo Kim  
 Department of Electrical Engineering, Konkuk University

**Abstract** -This paper proposes Model Reference Adaptive Fuzzy System(MRAFS) using Fuzzy Logic Controller(FLC) as a adaptive laws in Model Reference Adaptive System(MRAS) in order to realize the speed-sensorless control of an induction motor. MRAFS estimates the speed of an induction motor with a rotor flux of a reference model and adjustable model in MRAS. Fuzzy logic controller reduces the error of the rotor flux between the reference model and the adjustable model using the error and the change of error as the input of FLC. The computer simulation is executed to verify the propriety and the effectiveness of the proposed system.

1. 서 론

교류 전동기는 구조가 간단하고 가격이 싼 반면에 구동을 실현하기 위해서는 필수적으로 전력 변환 장치가 요구되고, 이에 따른 전체 구동 시스템의 가격 상승 및 관련 기술의 개발 부진 등의 이유로 종래에는 널리 사용되지 못하였다. 그러나, 최근 전력용 반도체 소자의 발달과 고성능 프로세서의 등장으로 전력 전자 기술이 비약적으로 발전하여 저 가격, 고 신뢰성의 전압 및 주파수 변환 장치들이 개발됨에 따라 교류 전동기가 중전력의 직류 전동기의 역할을 대신할 수 있게 되었다. 특히 유도전동기는 직류 전동기가 지닌 정기적인 보수 및 최대 회전수 제한 등의 구조적인 문제점들을 극복할 수 있고, 운전 특성도 직류 전동기에 상응하는 응답을 얻을 수 있어 빠른 가감속과 고속 운전이 요구되는 서보 시스템 및 공장 기계 구동장치 등에도 적용이 확대되고 있다[1].

유도전동기의 고성능 속도 제어를 원활하게 실현하기 위해서는 회전자의 정확한 속도 정보가 필요하며, 이를 위해 pulse generator나 encoder 등의 속도 센서를 이용한다. 그러나 유도전동기에 속도 센서를 부착하는 것은 여러 가지 면에서 단점을 가지게 된다. 우선 유도전동기가 가지는 본래의 강인함을 약화시키고, 추가적인 센서의 부착으로 가격이 상승하며 전기적 노이즈를 고려하여야 한다. 따라서 이와 같은 사용상의 한계점을 극복하기 위해 속도 센서의 정보 대신 적합한 알고리즘에 의해 추정된 속도를 제어에 사용하는 속도 센서리스 제어에 대한 연구가 본격적으로 진행되기 시작했다[2].

유도전동기의 여러 가지 속도 센서리스 제어 방식 중 기준 모델 적응 시스템은 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이하여 비교적 폭넓게 사용되는 제어구조의 하나이다. 그러나, 이 방식을 이용한 유도전동기의 속도 센서리스 제어에 사용되는 파라미터들이 모두 추정된 값 또는 비선형성을 가지는 값이므로 기존의 적응 규칙을 개선하려는 연구가 시도되고 있다[3][4].

본 논문에서는 기준 모델 적응 시스템의 적용 규칙으로 퍼지 제어를 사용하여 회전자의 속도를 추정하고,

이를 사용하여 전 속도 영역에서 만족할 만한 성능을 얻을 수 있는 제어 시스템을 제안하고자 한다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘의 타당성과 유효성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 유도전동기의 등가 모델

유도전동기의 동특성은 고정자와 회전자 상호간의 결합효과로 인하여 매우 복잡하며 회전자의 시변계수를 가지는 복잡한 연립 미분방정식으로 표현된다. 또한, 계반방정식이 비선형이므로 직류전동기의 경우처럼 간단한 몇 개의 시정수로 쉽게 분리할 수 없다. 그러므로, 정확하고 간단하며 실제적인 수학적 모델이 필요하다. 이 모델은 과도 및 정상상태 모두를 고려해야 하므로 균일한 공극과 함께 3상 대칭의 정현적 권선 분포를 가정하여 복소 변수(Complex variable)를 도입함으로써 전동기 회전각에 의한 고정자와 회전자 사이의 간섭 항을 포함하는 d-q 등가 모델(d-q equivalent model)을 널리 사용한다[5].

유도전동기 권선의 3상 대칭 정현 분포를 가정하고, 슬롯에서 비롯되는 자기회로의 비선형성과 자속의 고조파 성분 등을 무시하면 3상 대칭 유도전동기의 등가 모델은 아래 그림과 같다.

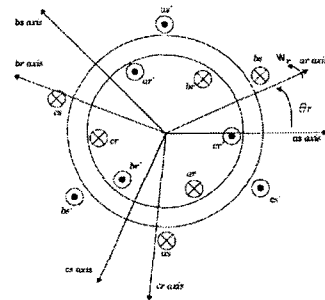


그림 2.1 3상 대칭 유도전동기의 등가 모델  
 Fig. 2.1 Equivalent model of 3-phase symmetrical induction motor

유도전동기의 고정자 및 회전자에 대한 전압 방정식은 다음 식과 같다.

$$\underline{V}_{abc} = (R_s + \rho L_s) \underline{I}_{abc} + L_m (\rho \underline{I}_{abc}) e^{j\theta} + j\omega_r L_m \underline{I}_{abc} e^{j\theta} \tag{2.1}$$

$$\underline{V}_{abc} = (R_r + \rho L_r) \underline{I}_{abc} + L_m (\rho \underline{I}_{abc}) e^{j\theta} - j\omega_r L_m \underline{I}_{abc} e^{j\theta} \tag{2.2}$$

위의 두 식을 이용하여 정리하면 유도전동기 d-q 등가 모델은 아래 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s I_{ds} + p \lambda_{ds} - j \omega_e \lambda_{qs} \\ &= (R_s + pL_s) I_{ds} + L_m p I_{dr} \\ &\quad - j \omega (L_s I_{dr} + L_m I_{ds}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} V_{dr} &= R_r I_{dr} + p \lambda_{dr} - j(\omega_e - \omega_r) \lambda_{ds} \\ &= (R_r + pL_r) I_{dr} + L_m p I_{ds} \\ &\quad - j(\omega_e - \omega_r)(L_r I_{dr} + L_m I_{ds}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\omega = p\theta$$

## 2.2 유도전동기에 대한 기준 모델 적응 시스템

일반적으로 유도전동기에서 기준 모델 적응 시스템에 의한 속도 센서리스 제어는 두 추정기의 출력을 비교함으로써 회전자 속도를 얻는 방식이다. 두 개의 독립적인 모델을 구성하여 회전자 속도가 포함되지 않은 전압 방정식을 기준 모델로 사용하고, 회전자 속도가 포함된 전류 방정식을 조정모델로 사용한다. 여기에서 전압 방정식은 식(2.5)를 의미하고, 전류 방정식은 식(2.6)을 의미한다. 두 모델에 의해 구한 추정치의 차이를 적응 메커니즘에 적용하여 조정 모델 및 제어를 위한 속도 추정값을 구할 수 있다(6).

$$p \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^* \\ \lambda_{qr}^* \end{bmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \begin{bmatrix} v_{ds}^* \\ v_{qs}^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s + \sigma L_s & 0 \\ 0 & R_s + \sigma L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr}^* \\ i_{qr}^* \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$p \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^* \\ \lambda_{qr}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_r & -\omega_r \\ \omega_r & -1/T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^* \\ \lambda_{qr}^* \end{bmatrix} + \frac{L_m}{T_r} \begin{bmatrix} i_{dr}^* \\ i_{qr}^* \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

## 2.2 기준 모델 적응 퍼지 시스템의 설계

### 2.2.1 개요

본 논문에서는 기준 모델 적응 시스템의 기준 모델인 전압 방정식과 추정 모델인 전류 방정식을 이용하여 추정된 자속을 비교하여 그 오차를 퍼지 제어기의 입력으로 사용하는 방식을 제안하고자 한다. 기준 모델 적응 시스템의 적응 규칙으로 사용된 퍼지 제어기는 두 모델에서 추정된 자속의 오차와 그 오차의 변화를 제어기 입력으로 사용하여 회전자의 각속도를 추정하며, 이 값을 이용하여 기준 모델에서 추정된 자속과 추정 모델에서 추정된 자속이 서로 같아지도록 그 오차를 영(零)으로 만드는 기능을 수행한다. 본 논문에서 제안한 기준 모델 적응 퍼지 시스템(Model Reference Adaptive Fuzzy System)을 아래 그림에 나타내었다

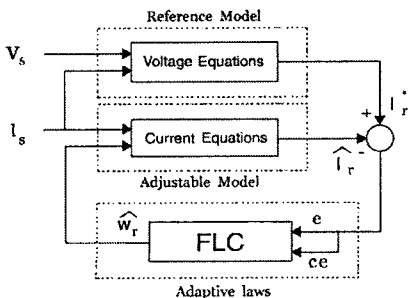


그림 2.2 기준 모델 적응 퍼지 시스템  
Fig. 2.2 Model Reference Adaptive Fuzzy System(MRAFS)

### 2.2.2 퍼지 제어기

일반적인 퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller)는 그림 2.3에서와 같이 퍼지화(Fuzzification), 퍼지추론(Fuzzy Inference), 비퍼지화(Defuzzification)의 3 단계로 구성된다. 먼저 언어 변수를 이용하여 입력 변수를 퍼지 값으로 변환하고, 이 값들을 퍼지 규칙을 이용하여 추론한 출력 값에 대한 퍼지 집합으로 만들고, 최종적으로 비퍼지화를 통해 제어기 출력으로 변환한다. 퍼지화 과정에서 사용되는 언어 변수에는 다음과 같은 7개의 집합이 있다(7).

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

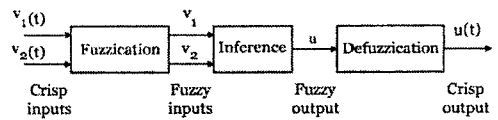


그림 2.3 퍼지 제어기의 일반적인 구조  
Fig. 2.3 General Structure of fuzzy logic controller

첫 번째 단계인 퍼지화 과정에서 입력 값은 그림 2.4에서와 같은 삼각형 소속 함수를 이용하여 퍼지 변수로 변환된다. 각각의 집합은 7개의 퍼지 집합으로 나누어진다. 각각의 퍼지 변수는 소속 정도를 가지고 퍼지 집합에 소속하게 된다. 이때 소속 정도는 소속 함수를 이용하여 결정하며 0에서 1사이의 값을 가진다.

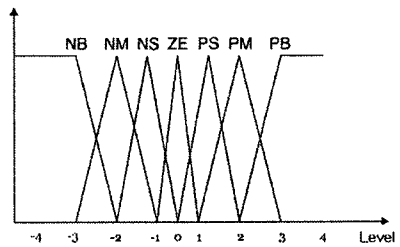


그림 2.4 퍼지 변수의 소속 함수  
Fig. 2.4 Membership function of the fuzzy variables

두 번째 단계에서는 퍼지 변수 e와 ce가 표 2.1의 규칙을 사용하는 추론 엔진을 이용하여 추론 과정을 거친다. 표 2.1에 있는 규칙들은 전문가의 경험이나 시스템의 동작을 이용하여 얻을 수 있다. 각각의 규칙들은 IF-THEN의 형식으로 표현된다.

표 2.1 퍼지 규칙  
Table 2.1 Fuzzy Rules

e \ ce	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

새 번째 단계인 비퍼지화 과정에서는 무게 중심법을 사용하였으며, 이 방법은 식(2.7)에 나타난 것과 같이 합성된 출력 퍼지 집합의 무게 중심을 구하여, 그 해당하는 제어 값을 제어 입력으로 사용하는 방법이다.

$$u_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(u_j) \cdot u_j}{\mu(u_j)} \quad (2.7)$$

### 2.3 시뮬레이션 및 고찰

#### 2.3.1 전체 시스템의 구성

본 논문에서 제안한 기준 모델 적용 퍼지 시스템을 이용하여 속도를 추정하는 전체 제어 시스템의 구성을 아래 그림에 나타내었다.

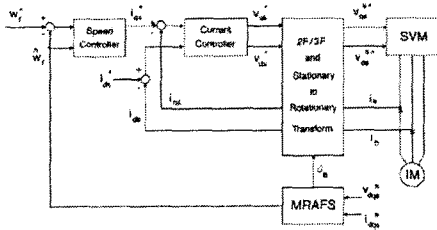


그림 2.5 시스템 구성  
Fig. 2.5 System configuration

#### 2.3.2 결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 기준 모델 적용 퍼지 시스템의 성능을 고찰하기 위하여 기준 속도 1500rpm에 대하여 무부하시와 10(Nm)의 부하시의 속도 응답을 시뮬레이션 하였다. 그림 2.6과 2.7에 속도응답을 나타내었다.

표 2.2 시뮬레이션 결과  
Table 2.2 Results of the simulation

	기준 속도	추정 속도	오차(%)
무부하시[rpm]	1500	1502	- 0.13
부하인가시[rpm]	1500	1489	0.07

표 2.2에 나타낸 결과와 같이 무부하시에는 -1.3% 정도의 오차를 나타내었으며, 부하시에는 0.07% 정도의 오차를 나타내었다. 무부하시와 부하시 모두 오차가 발생하였으며, 이는 퍼지 입력의 양자화 과정과 소속 함수의 전체 집합의 크기를 결정하는 과정에서 발생한 오차로 생각된다.

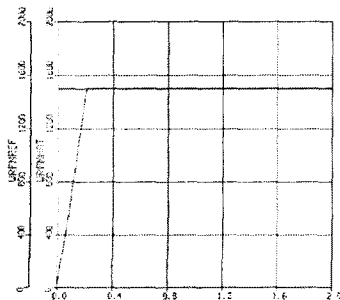


그림 2.6 무부하시에 추정된 회전자 속도  
Fig. 2.6 Estimated rotor speed with no load

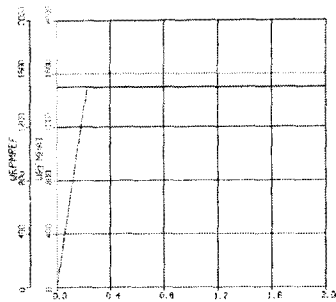


그림 2.7 부하 인가시에 추정된 회전자 속도  
Fig. 2.7 Estimated rotor speed with load

### 3. 결 론

본 논문에서는 유도 전동기의 속도 제어시 속도 센서를 사용함으로써 인해 발생하는 여러 가지 문제점을 해결하기 위해서 속도 센서 사용하지 않고 속도를 추정하는 속도 센서리스 방식에 대해 제안하였고, 제안한 방식으로 추정된 속도를 이용하여 유도 전동기의 속도 센서리스 제어를 수행하였다. 속도 센서리스 제어를 위해 기존의 기준 모델 적용 시스템에 퍼지를 적용하여 유도 전동기가 가지는 복잡성과 비선형성의 문제를 해결하고자 하였다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이 기준 입력으로 1500[rpm]을 인가하여 무부하시와 부하시 모두 제안한 방식으로 추정된 속도가 기준 속도 속도를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 추정된 속도가 기준 속도와 약 0.1%의 오차를 보이고 있으므로, 향후 이를 보상하기 위한 연구가 필요할 것이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] K. Kenzo, O. Tsutomu and S. Takashi, "Application Trends in AC Motor Drives", IEEE IECON'92, pp. 31-36, 1992.
- [2] J. Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives", Conf. Proc. of IECON, pp. 649-654, 1993.
- [3] S. Tamai, H. Sugamoto and M. Yano, "Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motor with Model Reference Adaptive System", IEEE IAS, pp. 189-195, 1987.
- [4] B. Karanayil, M. F. Rahman, C. Grantham, "PI and Fuzzy Estimators for ON-LINE Tracking of Rotor Resistance of Indirect Vector Controlled Induction Motor Drive", Electric Machines and Drives Conference, 2000, IEMDC 2001, IEEE International, 2001., pp.820-825
- [5] Willy Tjanaka, "Modeling of Induction Motor for Speed-Sensorless Vector Control Applications", the Ohio State Univ., 1995.
- [6] T. Ohtani, N. Takada, K. Tanaka, "Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder", Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume:28 Issue: 1 Part:1, Jan.-Feb. 1992., pp.157-164
- [7] M. Ta-Cao, H. Le-Huy, "Model Reference Adaptive Fuzzy Controller and Fuzzy Estimator for High Performance Induction motor drives", Industry Application Conference, 1996, Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, Volume: 1, 1996, pp. 380-387 vol.1.