

유도전동기의 속도 센서리스 제어를 위한 지능형 속도 추정기의 설계

박진수*, 최성대, 김상훈, 고봉운, 남문현, 김낙교
건국대학교

Design of Intelligent Speed Estimator for Speed Sensorless Control of Induction Motor

Jin Su Park*, Sung Dae Choi, Sang Hoon Kim, Bong Woon Ko, Moon Hyon Nam, Lark Kyo Kim
Konkuk University

Abstract - This paper proposes an Intelligent Speed Estimator in order to realize the speed-sensorless vector control of an induction motor. Intelligent Speed Estimator used Model Reference Adaptive System which has Fuzzy-Neural adaptive mechanism as Speed Estimation method. The Intelligent Speed Estimator estimates the speed of an induction motor with a rotor flux of a reference model and adjustable model in MRAS. The Intelligent Speed Estimator reduces the error of the rotor flux between the voltage flux model and the current flux model using the error and the change of error as input of the Estimator. The computer simulation is executed to verify the propriety and the effectiveness of the proposed speed estimator.

하고, 이를 사용하여 만족할 만한 성능을 얻을 수 있는 속도 추정기를 설계하려 한다. 또한 센서를 사용하여 속도를 측정하는 시스템과의 비교를 통하여 제안한 알고리즘의 타당성과 유효성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 일반적인 모델 기준 적응 시스템

모델 기준 적응 시스템(Model Reference Adaptive System, MRAS)은 플랜트 및 제어기 내에 값을 모르는 파라미터나 시변 파라미터에 대한 추정에 널리 사용되어 왔다. 그림 2.1은 MRAS의 기본적인 구조를 나타낸 것으로, 여기서 기준 모델(Reference Model)은 어떤 입력에 대해 플랜트와 가장 유사한 출력을 보이는 모델 또는 그 자체 플랜트를 의미하며, 조정 모델(Adjustable Model)은 변동되는 파라미터를 포함하여 그 변동에 의해 영향을 받는 모델을 의미한다.[8],[9]

1. 서 론

최근의 산업용분야에서는 벡터제어 이론에 의한 유도전동기의 운전이 널리 응용되고 있다. 유도 전동기의 고성능 속도 제어를 원활하게 실현하기 위해서는 회전자 의 정확한 속도 정보가 필요하며, 이를 위해 Pulse generator나 encoder 등의 속도센서를 이용한다. 그러나 유도전동기에 속도 센서를 부착하는 것은 우선 유도 전동기가 가지는 본래의 강인함을 약화시키고, 추가적인 센서의 부착으로 인하여 가격이 상승하며 전기적인 노이즈를 고려하여야 하는 단점을 가지게 한다. 따라서 이와 같은 사용상의 한계점을 극복하기 위해 속도 센서의 정보 대신 적합한 알고리즘에 의해 추정된 속도를 제어에 사용하는 속도 센서리스 제어에 대한 연구가 1980년대 후반에 들어 본격적으로 진행되기 시작했다.[1],[2]

유도 전동기의 여러 가지 속도 센서리스 제어 방식 중 모델 기준 적응 시스템은 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이하며 비교적 폭넓게 사용되는 제어구조의 하나이다. 이 방식은 기준 모델과 조정 모델로부터 회전자 자속을 추정하고, 추정된 자속의 오차가 영(零)이 되도록 적응 규칙을 설계하는 방식이다. 그러나 이 방식을 이용한 유도전동기의 속도 센서리스 제어에 사용되는 파라미터들이 모두 추정된 값 또는 비선형성을 가지는 값이므로 기존의 적응 규칙을 개선하려는 연구가 많이 시도되고 있으며 특히, 인공 지능을 이용한 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다. [3],[4]

본 논문에서는 속도 추정을 위해 인공 지능을 이용한 지능형 속도 추정기를 설계하려 한다. 속도 추정방식으로는 모델 기준 적응 시스템을 사용하였으며 적응규칙으로 퍼지-뉴럴 시스템을 사용하여 회전자의 속도를 추정

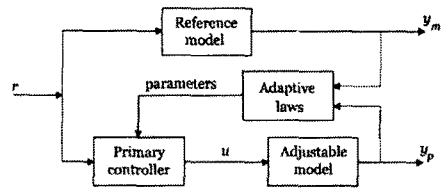


그림 2.1 일반적인 모델 기준 적응 시스템
Fig. 2.1 Ordinary Model Reference System

적응 규칙(Adaptive Laws)은 두 모델의 출력의 오차를 통해 추정 모델의 출력이 기준 모델의 출력을 따라가도록 파라미터의 값을 적응시켜 주는 역할을 한다. 즉, 기준 모델과 조정 모델의 출력 오차에 적응 기법을 적용해 그 오차를 영(零)으로 만들어 주는 파라미터 값을 추정해 내는 것이다.

2.2 퍼지제어

퍼지 제어 시스템은 전문가의 경험 및 지식에 근거한 언어 제어전략을 자동제어 전략으로 변환하는 기능을 수행하며, 퍼지 추론과 퍼지 명제의 개념이 결합된 언어 제어규칙의 집합으로 구성된다. 일반적인 퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller, FLC)는 퍼지화(Fuzzification), 퍼지추론(Fuzzy Inference), 비퍼지화(Defuzzification)의 3단계로 구성된다. 첫 번째 단계인 퍼지화 과정에서 입력 값은 삼각형 소속 함수를 이용하여 퍼지 변수로 변환된다. 그림 2.2에 일반적인 퍼지 제어기의 구조를 나타내었다.

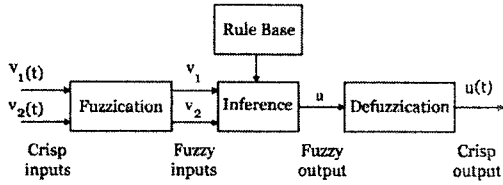


그림 2.2 일반적인 퍼지 제어기
Fig. 2.2 General Structure of a fuzzy logic controller

두 번째 단계에서는 퍼지 변수 e 와 ce 가 퍼지규칙 (Rule Base)을 사용한 추론 엔진을 이용하여 추론 과정을 거친다. 각각의 규칙들은 IF-THEN의 형식으로 표현된다.

세 번째 단계인 비퍼지화 과정에서 주로 사용되는 방법은 최대값 방법, 최대 평균법, 무게 중심법 등이 있다. 이중 최대 평균법은 과도기간의 응답이 좋고 보고된 바 있고, 무게 중심법은 다른 방법들에 비해서 우월한 성능을 보이는 경향이 있고 일반적인 PI 제어기와 비슷한 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 무게 중심법을 이용하였다.

2.3 신경 회로망

인공 신경회로망은 외부로부터 데이터를 입력받는 뉴런들로 이루어진 입력층과 신경회로망 내부의 신호를 주고받는 은닉층, 그리고 계산한 값을 외부로 출력하는 출력층의 3부분으로 되어 있다. 각층의 뉴런들은 다음 층의 뉴런들과 각각 연결되어 있고, 이 연결고리에 가중치를 부여하고 또한 조정함으로써 학습의 효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 출력층의 오차를 역으로 전파하여 중간층의 오차로 반영시키는 개념인 오차 역전파 알고리즘을 사용하였다. 그림 2.3은 2층 뉴럴 네트워크의 구성을 보이고 있다.

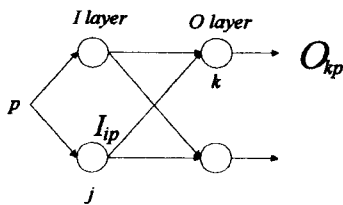


그림 2.3 2층 뉴럴 네트워크의 구성
Fig. 2.3 Configuration of 2-layer Neural Network

2.4 지능형 속도 추정기의 설계

본 논문에서는 지능형 속도 추정기의 속도 추정 방식으로 모델 기준 적응 시스템을 이용하였으며, 기준 모델은 전압 방정식으로 하였고, 조정 모델은 전류 방정식으로 구성하였다. 제안한 MRAS를 이용한 속도 추정기는 그림 2.4에서와 같이 두 개의 독립적인 모델로 구성되고, ω_r 성분이 포함되지 않은 전압 방정식을 기준 모델로, ω_r 성분이 포함된 전류 방정식을 조정 모델로 정의한다. 여기에서 전압 방정식은 식(2.1), 전류 방정식은 식(2.2)을 의미한다. 두 모델에 의해 구한 추정치의 차이를 적응 메커니즘 (Adaptation Mechanism)에 적용하여 조정 모델 및 제어기를 위한 속도 추정 값을 구할 수 있다.

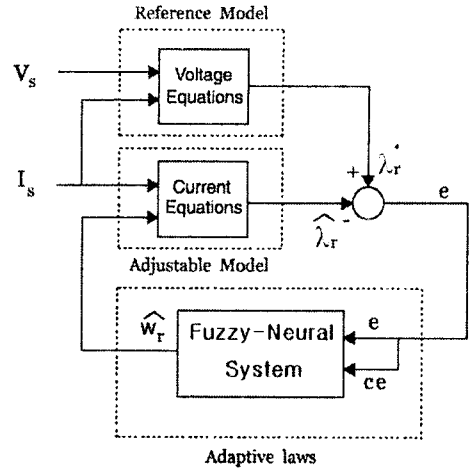


그림 2.4 지능형 속도 추정기의 구조
Fig. 2.4 Structure of Intelligent Speed Estimator

$$p \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^s \\ \lambda_{qr}^s \end{bmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \begin{bmatrix} v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s + \sigma L p & 0 \\ 0 & R_s + \sigma L p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$p \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^s \\ \lambda_{qr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_r & -\omega_r \\ \omega_r & -1/T_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{dr}^s \\ \lambda_{qr}^s \end{bmatrix} + \frac{L_m}{T_r} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

본 논문에서는 적응 메커니즘으로 퍼지-뉴럴 시스템을 이용하였으며, 두 모델에서 추정된 자속의 오차와 그 오차의 변화를 지능형 속도 추정기의 입력으로 사용하여 회전자의 각속도를 추정하고, 이 값을 이용하여 기준 모델에서 추정된 자속과 조정 모델에서 추정된 자속이 서로 같아지도록 그 오차를 영(零)으로 만드는 기능을 수행한다. 그림 2.5에 퍼지-뉴럴 시스템의 구조를 나타내었다.

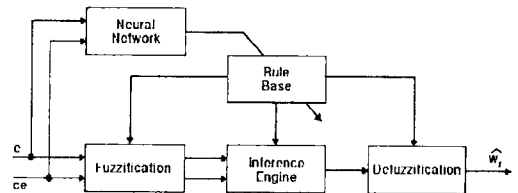


그림 2.5 퍼지-뉴럴 시스템의 구조
Fig. 2.5 Structure of Fuzzy Neural System

두 모델로부터 추정된 자속의 오차와 오차의 변화가 그림 2.5의 퍼지-뉴럴 시스템의 입력으로 사용되었으며, 퍼지화를 거쳐 추론과정을 거치고 다시 비퍼지화를 거쳐 속도 추정값($\hat{\omega}_r$)이 출력되어진다. 이 과정에서 퍼지 제어기의 퍼지규칙(Rule base)을 신경 회로망을 이용하여 최적화 하였다.

3. 시뮬레이션

3.1 전체 시스템의 구성

본 논문에서 설계한 지능형 속도 추정기의 성능을 고찰하기 위하여 그림 3.1과 같은 유도전동기 제어 시스템을 구성하였다. 전체 시스템은 회전자 자속 기준 간접 벡터 제어 방식을 기반으로 하였으며, 일반적인 PI 제어기를 사용한 속도 제어기, 전류 제어기, 퍼지-뉴럴 시스템을 이용한 지능형 속도 추정기 등으로 구성되었다. 시뮬레이션에 사용된 유도전동기의 정격과 파라미터 값들은 표3.1에 나타내었다.

표 3.1 유도전동기의 정격 및 파라미터
Table 3.1 Ratings and parameters of an induction Motor

| | | | |
|--------|------------|-------|-----------------------------|
| 정격 전압 | 150 [V] | R_s | 0.385 [Ω] |
| 정격 주파수 | 50 [Hz] | R_r | 0.342 [Ω] |
| 정격 전류 | 14 [A] | L_s | 0.03257 [H] |
| 정격 속도 | 1500 [rpm] | L_r | 0.03245 [H] |
| 정격 토크 | 14 [Nm] | L_m | 0.03132 [H] |
| 극수 | 4 | J | 0.0088 [Kg m ²] |

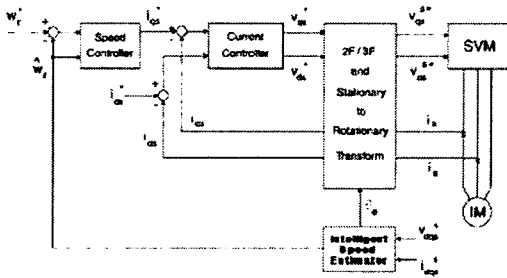


그림 3.1 시스템 구성도
Fig. 3.1 System configuration

3.2 결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 지능형 속도 추정기의 성능을 고찰하기 위하여 기준 속도 1500rpm에 대하여 무부하시와 정격 부하시의 속도 응답을 시뮬레이션 하였다. 그림 3.2와 그림 3.3에는 무부하시의 속도 응답을 나타내었고, 그림 3.4와 그림 3.5에는 정격 부하인가시 속도 응답을 나타내었다. 무부하시 추정 속도는 1502[rpm]으로 약 -0.1%의 추정 오차를 나타내었으며, 부하 인가시 추정 속도는 1494[rpm]으로 약 0.4%의 추정오차를 나타내었다. 무부하시와 부하시 모두 오차가 발생하였으나 이는 모두 허용 오차 범위 안의 값으로 유도전동기의 속도를 정확히 추정하였다고 할 수 있다.

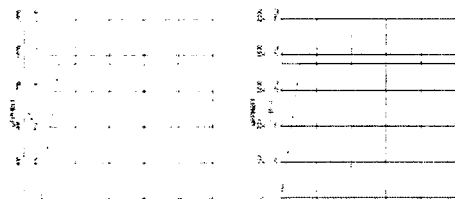


그림 3.2 무부하시의 유도전동기 모델 회전자 속도
Fig. 3.2 Induction motor modeling rotor speed with no load
그림 3.3 무부하시의 추정된 회전자 속도
Fig. 3.3 Estimated rotor speed with no load

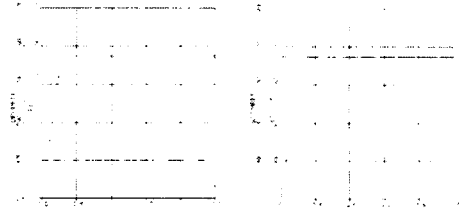


그림 3.4 부하 인가시의 유도전동기 모델 회전자 속도.
Fig. 3.4 Induction motor modeling rotor speed with load

그림 3.5 부하 인가시의 추정된 회전자 속도.
Fig. 3.5 Estimated rotor speed with load

4. 결론

본 논문에서는 유도 전동기 제어시 속도 센서를 사용함으로 인해 발생하는 여러 가지 문제점을 해결하기 위해서 속도 센서를 사용하지 않고 속도를 추정하는 지능형 속도 추정기를 설계하였고, 설계한 지능형 속도 추정기에서 추정한 속도를 이용하여 유도 전동기의 속도 센서리스 제어를 수행하였다. 본 논문에서 제안한 지능형 속도 추정기는 모델 기준 적응 시스템 방식을 사용하였으며, 고정자의 전압 방정식을 기준 모델로 사용하고 회전자의 전류 방정식을 조정 모델로 사용하여 두 모델에서 추정된 자속의 오차를 퍼지-뉴럴 시스템의 입력으로 사용하여 두 모델에서 추정된 자속을 서로 일치시킴으로써 속도를 추정하는 방식이다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이 기준 입력으로 1500 rpm을 인가하여 무부하시와 부하시 모두 제안한 방식으로 추정한 속도가 유도전동기 모델 속도와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 향후 연구 과제로는 정격 속도 뿐만 아니라 전 속도 영역에 걸쳐 본 논문에서 제안한 지능형 속도 추정기의 성능을 검증하여야 할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] 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.
- [2] J. Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives", Conf. Proc. of IECON, pp. 649 654, 1993.
- [3] 손재현, "동적 시스템을 위한 모델 기준 적응 퍼지 제어기의 설계, 건국 대학교 대학원 박사학위 논문, 1995.
- [4] K. S. Narendra and K. Parthasarathy, "Identification and Control of dynamical systems using neural networks", IEEE Trans. Neural Networks, vol. 1, pp. 4 27, Mar 1990.
- [5] 임영도, 이상부, "퍼지.신경망.유전진화" pp.129 134, 1998.
- [6] 이광형, 오길록 공저, "퍼지 이론 및 응용", 홍릉과학출판사, pp. 5.1 5.7, 1992.
- [7] Seong Hwan Kim, Tae Sik Park, Ji Yoon Yoo, "Speed Sensorless Vector Control of an Induction Motor Using Neural Network Speed Estimation", Industrial electronics, IEEE Transactions on, Volume:48 Issue:3, June 2001., pp.609 614
- [8] 박태식, "MRAS를 이용한 유도전동기의 속도 센서 없는 벡터 제어", 고려 대학교 대학원 석사학위논문, 1996.
- [9] Young Ahn Kwon, Dae Won Jin, "A Novel MRAS based Speed Sensorless Control of Induction Motor", Industrial Electronics Society, 1999. IECON '99 Proceedings. The 25th Annual Conference of the IEEE, Volume:2, 1999. pp.933 938 vol.2.