

퍼지 제어를 이용한 영구 자석 교류 전동기의 센서리스 속도 제어

Sensorless Speed Control of Permanent Magnet AC Motor using Fuzzy Logic Controller

최성대*, 고봉운, 김낙교

Sung Dae Choi, Bong Woon Ko, Lark Kyo Kim

건국대학교 전기공학과

Abstract : This paper proposes speed control system using a Fuzzy Logic Controller(FLC) in order to realize the speed control of Permanent Magnet AC Motor with no sensor. FLC based MRAS(Model Reference Adaptive System) estimates the speed of Permanent Magnet AC Motor. Using the estimated speed, speed control is performed. The experiment is executed to verify the propriety and the effectiveness of the proposed system.

Keywords : Speed Control, AC Motor, Fuzzy, Sensorless

1. 서론

교류 전동기는 구조가 간단하여 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. 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 종전의 직류 전동기의 역할을 대신할 수 있게 되었다. 구조가 간단하고 값이 싼 교류전동기는 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 공작 기계 구동장치 등에도 적용이 확대되고 있는 추세이다[1][2].

교류전동기의 구동 시스템은 불확실성과 사변성이 매우 큰 특징을 가지므로 전체 구동 시스템의 고성능화를 실현하기 위해서는 이상적인 전류 제어뿐만 아니라, 넓은 속도 영역에서의 견실한 속도 제어가 보장되어야 한다. 일반적인 속도 제어 알고리즘으로는 구현이 용이하고 비교적 성능이 우수한 PI제어 방식이 주로 이용되고 있다. 교류전동기의 고성능 속도 제어를 원활하게 실현하기 위해서는 회전자의 정확한 속도 정보가 필요하며, 이를 위해 pulse generator나 encoder 등의 속도 센서를 이용한다. 그러나 교류전동기에 속도 센서를 부착하는 것은 여러 가지 면에서 단점을 가지게 된다. 교류전동기가 가지는 본래의 강인함을 약화시키고, 추가적인 센서의 부착으로 가격이 상승하며 전기적 노이즈를 고려하여야 한다. 따라서 이와 같은 사용상의 한계점을 극복하

기 위해 속도 센서의 정보 대신 적합한 알고리즘에 의해 추정된 속도를 제어에 사용하는 센서리스 제어에 대한 연구가 필요하게 되었다[3][4].

교류 전동기의 여러 가지 속도 센서리스 제어 방식 중 기준 모델 적용 시스템은 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이하여 비교적 폭넓게 사용되는 제어구조의 하나이다. 이 방식은 기준 모델과 추정 모델로부터 전류를 추정하고, 추정된 전류의 오차가 영(零)이 되도록 적용 규칙을 설계하는 방식이다. 그러나 이 방식을 이용한 교류 전동기의 속도 센서리스 제어에 사용되는 파라미터들이 모두 추정된 값 또는 비선형성을 가지는 값이므로 기존의 적용 규칙을 개선하려는 연구가 많이 시도되고 있으며 특히, 인공 지능을 이용한 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다.[5]-[6]

본 논문에서는 기준 모델 적용 시스템의 적용 규칙으로 퍼지 제어를 사용하여 회전자의 속도를 추정하고, 이를 이용하여 만족할 만한 성능을 얻을 수 있는 센서리스 제어 시스템을 제안하고자 한다.

2. 영구자석 교류전동기의 등가 모델

(1) 영구자석 교류전동기의 3상 모델링

영구 자석 교류 전동기의 3상에서의 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p(L_s + M) & -\frac{1}{2} pM & -\frac{1}{2} pM \\ -\frac{1}{2} pM & R_s + p(L_s + M) & -\frac{1}{2} pM \\ -\frac{1}{2} pM & -\frac{1}{2} pM & R_s + p(L_s + M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix}$$

일반적으로 3상의 전류의 합이 영이므로, 이 조건을 이용하면 위의 전압방정식은 다음과 같이 간단해진다.

$$V_{abc} = R_s I_{abc} + L_s \frac{d}{dt} I_{abc} + E_{abc} \quad (2.1)$$

영구 자석 계자의 3상 전기자 권선의 쇠교 자속수를 각각 ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c 라고 하고, 그 최대값을 ϕ_f 라고 하면 a상 쇠교 자속수를 기준으로 하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_a &= \phi_f \cos \theta \\ \phi_b &= \phi_f \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \phi_c &= \phi_f \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

그러므로, 속도 기전력 e_{as}, e_{bs}, e_{cs} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_{as} &= p\phi_a = -\omega_r \phi_f \sin \theta \\ e_{bs} &= p\phi_b = -\omega_r \phi_f \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ e_{cs} &= p\phi_c = -\omega_r \phi_f \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

(2) 영구자석 교류전동기의 정좌표계 d-q 모델링
정좌표계에서의 영구 자석 교류 전동기의 d-q 전압방정식을 구하기 위해 식 (2.1)의 양변에 $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$ 을 곱하면 다음과 같다.

$$V_{dq}^s = R_s I_{dq}^s + L_s \frac{d}{dt} I_{dq}^s + E_{dq}^s \quad (2.2)$$

즉, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^s \\ V_{qs}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 \\ 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ds}^s \\ e_{qs}^s \end{bmatrix}$$

(3) 영구자석 교류전동기의 동기좌표계 d-q 모델링
동기좌표계에서의 영구 자석 교류 전동기의 d-q 전압방정식을 구하기 위해 식 (2.2)의 양변에 $\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 를 곱하면 다음과 같다

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ds}^e \\ e_{qs}^e \end{bmatrix}$$

여기서 동기좌표계 속도기전력은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} e_{ds}^e \\ e_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\omega_r \phi_f \sin \theta \\ \omega_r \phi_f \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix}$$

여기서 주목할 것은 영구 자석 계자에 의해 유기되는 자속 쇠교수는 동기좌표계에서 d 축에 집중되고 또 이로 인해 발생하는 속도기전력은 q 축에만 집중한다는 사실이다. 또, 속도기전력 ($= \omega_r \phi_f$)은 속도가 증가할수록 커지는데 ϕ_f 를 속도기전력 상수 혹은 역기전력 상수라고 하고 'K_e'라고도 표현한다.

최종적으로 영구 자석 교류 전동기의 동기좌표계 d-q 축 전압방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix}$$

(4) 영구자석 교류전동기의 토크

영구 자석 교류 전동기의 출력 전력은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= \frac{3}{2} (V_{ds}^e i_{ds}^e + V_{qs}^e i_{qs}^e) \\ &= \frac{3}{2} R_s (i_{ds}^e{}^2 + i_{qs}^e{}^2) + \frac{3}{2} \frac{L_s}{2} \frac{d}{dt} (i_{ds}^e{}^2 + i_{qs}^e{}^2) \\ &\quad + \frac{3}{2} \omega_r \phi_f i_{qs}^e \end{aligned}$$

우변의 첫 번째 항은 고정자 동손이고, 두 번째 항은 자기에너지 변화에 해당하는 전력으로서 무효전력성분이다. 우변의 마지막 항이 기계적인 출력이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{3}{2} \omega_r \phi_f i_{qs}^e = T_e \omega_{rm}$$

여기서, 기계각속도는 전기각속도와 $\omega_r = \frac{p}{2} \omega_{rm}$ (p :극수)인 관계가 있으므로 다음과 같이 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi_f i_{qs}^e = K_T i_{qs}^e$$

즉, 토크는 동기좌표계 q축 전류와 비례하게 되고, 그 비례이득 $K_T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi_f$ 를 토크 상수라고 한다.

3. 영구 자석 교류전동기의 속도 추정

(1) 속도 추정 방식

본 논문에서는 기준 모델 적용 시스템의 기준 모델과 추정 모델을 이용하여 추정한 전류를 비교하여 그 오차를 퍼지 제어기의 입력으로 사용하는 방식을 제안하고자 한다. 기준 모델 적용 시스템의 적용 규칙으로 사용된 퍼지 제어기는 두 모델에서 추정한 전류의 오차와 그 오차의 변화를 퍼지 입력으로 사용하여 회전자각의 각속도를 추정하며, 이 값을 이용하여 기준 모델에서 추정한 전류와 추정 모델에서 추정한 전류가 서로 같아지도록 그 오차를 영(零)으로 만드는 기능을 수행한다. 본 논문에서 제안한 기준 모델 적용 시스템을 그림 3.1에 나타내었다.

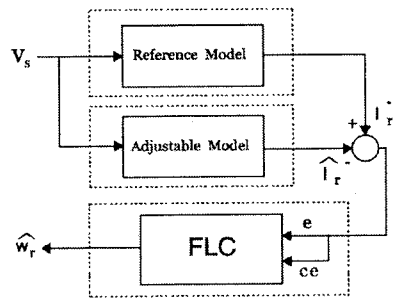


그림 3.1 제안한 기준 모델 적용 시스템

Fig. 3.1 Proposed Model Reference Adaptive System

(2) 퍼지 제어기

일반적인 퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller)는 퍼지화(Fuzzification), 퍼지추론(Fuzzy Inference), 비퍼지화(Defuzzification)의 3단계로 구성된다. 먼저 입력 변수가 언어 변수를 이용하여 퍼지 값으로 변환되고, 이 값들을 룰 베이스를 이용하여 추론하여 출력 값에 대한 퍼지 집합으로 만들고, 최종적으로 비퍼지화를 통해 제어기 출력으로 변환된다.

첫 번째 단계인 퍼지화 과정에서 입력 값은 그림 3.2에서와 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 함수로 결정되며 0에서 1사이의 값을 가진다.

두 번째 단계에서는 퍼지 변수 e와 ce가 표 3.1에 있는 규칙을 사용하는 추론 엔진을 이용하여 추론 과정을 거친다. 표 3.1에 있는 규칙들은 전문가의 경험이나 시스템의 동작을 이용하여 얻을 수 있다. 각각의 규칙들은 IF-THEN의 형식으로 표현된다.

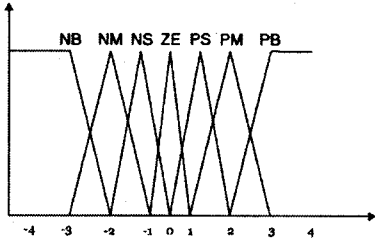


그림 3.2 퍼지 변수의 소속 함수

Fig. 3.2 Membership function of the fuzzy variables

표 3.1 퍼지 규칙
Table 3.1 Rule base

| | | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|
| ce \ 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 |

출력 퍼지 변수를 결정하기 위한 퍼지 집합을 만드는 추론 방법에는 Mamdani의 min 연산, Larsen의 product 연산, 단조형 소속함수로 언어 변수 표현, 결론부가 조건부 변수의 선형식으로 표현하는 방법들이 주로 이용되고 있으며, 본 연구에서는 Mamdani의 min 연산을 이용하여 추론 과정을 수행하였다.

세 번째 단계인 비퍼지화 과정에서 주로 사용되는 방법

은 최대값 방법, 최대 평균법, 무게 중심법 등이 있다. 본 논문에서는 무게 중심법을 사용하였으며, 이 방법은 식(3.3)에 나타난 것과 같이 합성된 출력 퍼지 집합의 무게 중심(center of gravity)을 구하여, 그 해당하는 제어 값을 제어 입력으로 사용하는 방법이다.

$$u_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(u_j) \cdot u_j}{\mu(u_j)} \quad (3.3)$$

여기서 n은 제어 변수 전체 집합의 양자화 준위(quantization level) 또는 등급을 나타낸다.

4. 실험 및 고찰

(1) 전체 시스템의 구성

본 논문에서 제안한 기준 모델 적용 시스템의 퍼지 제어를 이용하여 속도를 추정하고, 속도 제어기는 일반적인 PI 제어기를 사용한다. 전체 시스템의 구성은 그림 4.1에 나타내었고, 실험에 사용한 영구 자석 교류 전동기의 파라미터는 표 4.1에 나타내었다.

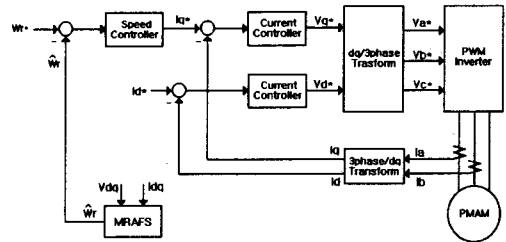


그림 3.1 속도 제어 시스템의 구성

Fig. 3.1 Configuration of Speed Control System

표 3.1 영구 자석 교류 전동기의 파라미터

Table 3.1 Parameters of Permanent Magnet AC Motor

| | | | |
|--------|-------------|-------------|---------------------------|
| 정격출력 | 800 W | R_s | 0.425 Ω |
| 정격회전속도 | 3,000 rpm | L_s | 0.00378 H |
| 정격토크 | 3.82 N·m | ϕ_{fo} | 0.233 V·s/rad |
| 전기적시정수 | 0.00889 sec | p | 2 |
| 기계적시정수 | 0.00499 sec | J_M | 0.00255 kg·m ² |

(2) 결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 시스템의 성능을 고찰하기 위하여 정격 속도 3000[rpm]에서 무부하시와 정격 부하시의 속도 응답을 시뮬레이션 하였다. 그림 4.2와 4.3에는 무부하시의 속도 응답을 나타내었고, 그림 4.4와 4.5에는 정격 부하시의 속도 응답을 나타내었다.

무부하시 센서가 있는 경우와 센서가 없는 경우 모두 같은 응답 속도를 나타내었다. 부하를 인가한 경우 센서가 있는 경우와 센서가 없는 경우가 최대값에서 2[rpm]

(약 0.1%) 정도의 차이를 나타내고 있으며 정착 시간에 서 약 1ms의 차이를 보이고 있으나 거의 동일한 응답을 나타내고 있는 것으로 볼 수 있다. 정상 상태에서는 모두 기준 속도인 3000[rpm]의 정격 속도로 안정적인 응답을 보이고 있다.

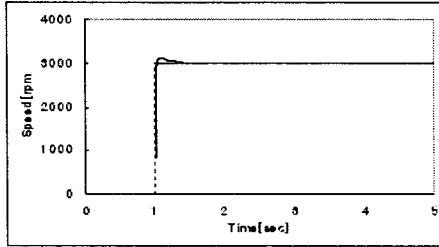


그림 3.2 무부하시 센서가 있는 경우의 속도 응답
Fig. 3.2 Speed Response with no load and sensor

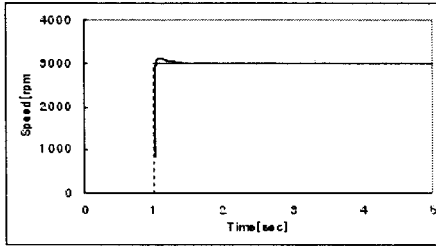


그림 3.3 무부하시 센서가 없는 경우의 속도 응답
Fig. 3.3 Speed Response with no load and no sensor

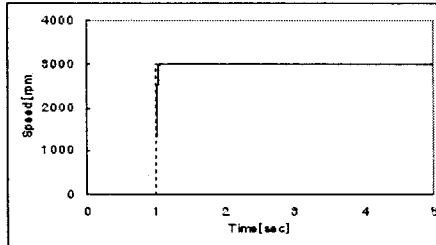


그림 3.4 부하 인가시 센서가 있는 경우의 속도 응답
Fig. 3.4 Speed Response with load and sensor

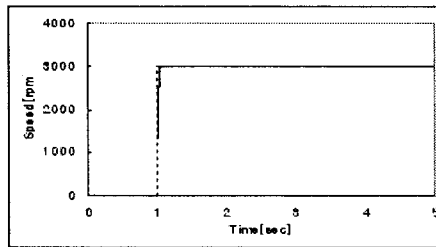


그림 3.5 부하 인가시 센서가 없는 경우의 속도 응답
Fig. 3.5 Speed Response with load and no sensor

5. 결론

본 논문에서는 영구 자석 교류전동기의 속도 제어시 센서를 사용함으로써 인해 발생하는 여러 가지 문제점을 해결하기 위해서 속도 센서를 사용하지 않고 속도를 추정하는 방식에 대해 제안하였고, 제안한 방식으로 추정된 속도를 이용하여 영구 자석 교류전동기의 속도 제어를 수행하였다.

실험 결과에서 알 수 있듯이 기준 입력으로 정격 속도 3000[rpm]을 인가하였을 때, 속도 센서를 부착하지 않은 경우에도 속도 센서를 부착한 경우와 거의 동일한 응답 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

향후 연구과제로는 저속 영역과 가변속 구간 등에 있어서 속도 추정 성능을 검증하고, 추정된 속도를 이용하여 전 속도 영역에서 영구 자석 교류 전동기의 속도 제어를 수행해야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] B. K. Bose, "Technology Trends in Microcomputer Control of Electrical Machines IEEE Trans. Ind Elect., vol.35, No.1, pp. 160-177, 1988.
- [2] K. Kenzo, O. Tsutomu and S. Takashi, "Application Trends in AC Motor Drives", IEEE IECON'92, pp. 31-36, 1992.
- [3] J. Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives", Conf. Proc. of IECON, pp. 649-654, 1993.
- [4] C. Ias, A. Bettini, L. Ferraris, G. Griva, and F. Profumo, "Comparison of Different schemes without shaft sensor for field oriented control drives", Conf. Proc. of IECON, pp. 1579-1588, 1994.
- [5] Li Ying; Ertugrul, N., "A novel position sensorless control for permanent magnet AC motors", Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. PIEMC 2000. The Third International , Volume: 1 , 2000, Page(s): 169 -174 vol.1
- [6] Consoli, A.; Scarcella, G.; Testa, A., "Sensorless control of AC motors at zero speed", Industrial Electronics, 1999. ISIE '99. Proceedings of the IEEE International Symposium on , Volume: 1 , 1999, Page(s): 373 -379 vol.1