

## 영구자석 동기전동기를 위한 퍼지 제어기법 기반의 부하 토크관측기에 관한 연구

(A Study on the Load Torque Observer based on Fuzzy Logic Control  
for a PM Synchronous Motor)

정진우\* · 이동명\*\*

(Jin-Woo Jung · Dong-Myung Lee)

### Abstract

This paper proposes a new load torque observer based on the Takagi-Sugeno fuzzy method for a permanent magnet synchronous motor(PMSM). A Linear Matrix Inequality(LMI) parameterization of the fuzzy observer gain is given, and the LMI conditions are derived for the existence of the fuzzy load torque observer guaranteeing  $\alpha$ -stability and linear quadratic performance. In this paper, a nonlinear speed controller is employed to validate the performance of the proposed fuzzy load torque observer, and various simulation results are presented under motor parameter and load torque variations.

Key Words : Fuzzy Load Torque Observer, Permanent Magnet Synchronous Motor, Speed Control

### 1. 서 론

영구자석 동기전동기(PMSM)는 고효율, 저소음, 저관성, 강인성 등의 장점 때문에 산업분야에서 속도 및 위치 제어 응용에 많이 사용되고 있다. 그러나 PMSM은 비선형이고 부하 토크 변동에 매우 민감하므로 속도 제어가 쉽지 않다. 그래서 많은 엔지니어들은 외란관측기(Disturbance Observer)를 사용하여

부하 토크 변동을 억제하기 위한 다양한 설계방식을 제안하였다[1-3]. 대부분의 기존방식은 부하 토크 변동을 추정하기 위해서 선형관측기와 선형화된 모델을 사용하였으므로, 모터 파라미터와 부하 토크값을 정확히 모른다면 PMSM의 강인한 제어가 보장될 수 없다. 반면에 Takagi-Sugeno(T-S) 퍼지 모델은 기존의 제어 기법에서는 해결하기 힘든 복잡한 비선형 또는 불확실한 시스템을 성공적으로 제어할 수 있었다[4-5].

본 논문에서는 PMSM의 속도 제어를 위하여 T-S 퍼지 모델을 이용한 비선형 부하 토크관측기를 제안한다. 각 국부 서브시스템(Local Subsystem)을 위하여 국부적인 선형관측기(Local Linear Observer)가 설계되며, 이들은 표준 퍼지추론법(Standard Fuzzy

\* 주저자 : 동국대(서울캠퍼스) 전자전기공학부 조교수  
\*\* 교신저자 : 홍익대 전자전기공학부 조교수  
Tel : 02-320-3047, Fax : 02-320-1193  
E-mail : dmlee@hongik.ac.kr  
접수일자 : 2010년 5월 18일  
1차심사 : 2010년 5월 25일  
심사완료 : 2010년 9월 7일

Inference Method)을 사용함으로써 전역적인 비선형 관측기(Global Nonlinear Observer)로 구현된다. 또한 퍼지 관측기의 해가 존재하기 위한 선형 행렬 부등식(LMI, Linear Matrix Inequality) 조건을 유도하며, 이로부터 퍼지 관측기 이득을 계산한다.  $\alpha$ -안정도( $\alpha$ -stability)와 LQ 성능지수(Linear Quadratic Performance)를 보장하는 퍼지 관측기의 LMI 존재 조건도 제시한다. 제안된 퍼지 관측기의 성능을 검증하기 위하여 파라미터 변동 및 부하 변동 등 다양한 조건하에서 시뮬레이션 결과가 주어진다.

## 2. PMSM 모델링

표면 부착형 영구자석 3상 동기전동기의 동적인 모델은 토크 및 전압방정식으로 부터 식 (1)과 같이 dq 축 수식으로 표현된다.

$$\dot{\omega} = k_1 i_{qs} - k_2 \omega - k_3 T_L \quad (1)$$

$$\dot{i}_{qs} = -k_4 i_{qs} - k_5 \omega + k_6 V_{qs} - \omega i_{ds}$$

$$\dot{i}_{ds} = -k_4 i_{ds} + k_6 V_{ds} + \omega i_{qs}$$

여기서  $k_i$ 는 모터 파라미터에 의존하는 상수들이며,  $T_L$ : 부하토크,  $\theta$ : 전기적인 회전자 각도,  $\omega$ : 전기적인 회전자 각속도,  $i_{qs}$ : q축 전류,  $i_{ds}$ : d축 전류,  $V_{qs}$ : q축 전압,  $V_{ds}$ : d축 전압이다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 영구자석 동기전동기는 정확한 속도 제어를 위해서 속도( $\omega$ ) 및 전류( $i_{ds}, i_{qs}$ )의 정보뿐만 아니라 부하 토크( $T_L$ )의 정보도 필요함을 알 수 있다. 특히 속도 제어가 부하 토크의 변동을 적절하게 고려하지 않는다면, 시스템의 제어 성능은 현저히 저하될 수 있다.

## 3. 비선형 제어기 설계

폐환 선형화 방법[6]을 이용하면 영구자석 동기전동기의 비선형 제어 입력( $V_{qs}, V_{ds}$ )은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{qs} = \frac{1}{k_6} (k_4 i_{qs} + k_5 \omega + \omega i_{ds}) + \frac{k_2}{k_1 k_6} \left( k_1 i_{qs} - k_2 \omega - k_3 T_L + \frac{1}{k_2} \ddot{\omega}_d \right) - \frac{K_1}{k_1 k_6} (\omega - \omega_d) - \frac{K_2}{k_1 k_6} (k_1 i_{qs} - k_2 \omega - k_3 T_L - \dot{\omega}_d) \quad (2)$$

$$V_{ds} = \frac{1}{k_6} (k_4 i_{ds} - \omega i_{qs}) - \frac{K_3}{k_6} i_{ds}$$

여기서  $\omega_d$ 는 속도 지령치이다. 위의 식 (2)에서 제어 입력( $V_{qs}, V_{ds}$ )은 d축 및 q축 전류( $i_{ds}, i_{qs}$ ), 속도( $\omega$ ) 그리고 부하 토크( $T_L$ )의 정보를 필요로 하며, 또한 선형화 제어기는 다음의 선형 시불변(LTI, Linear Time-Invariant) 오차 방정식으로 표현된다.

$$\dot{x}_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -K_1 - K_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_3 \end{bmatrix} x_e \quad (3)$$

여기서  $x_e = [\omega - \omega_d, \dot{\omega} - \dot{\omega}_d, i_{ds}]^T$ . 만약에  $K_1 > 0, K_2 > 0, K_3 > 0$ 이면 오차 방정식은 지수적으로 안정함을 알 수 있다.

## 4. 퍼지 토크관측기 설계 및 해석

대부분의 속도 제어기는 부하 토크의 변동을 적절하게 고려하지 않는다면, 시스템의 제어 성능은 현저히 저하될 수 있으므로, 부하 토크를 추정할 필요가 있다 [1-3]. 본 논문에서는 퍼지 부하 토크관측기를 설계하기 위하여 대부분의 논문에서 사용하고 있는 다음의 가정을 설정한다.

**A1** :  $\omega, i_{ds}, i_{qs}$ 는 측정 가능하다.

**A2** :  $T_L$ 의 정확한 값을 알 수는 없으나,  $\dot{T}_L$ 은 무시할 수 있다. 즉,  $\dot{T}_L = 0$ 으로 정할 수 있다.

**A3** : 속도 지령치( $\omega_d$ )는 2차 미분이 가능하다. 그리고  $\omega_d, \dot{\omega}_d, \ddot{\omega}_d$ 는 유한하다.

T-S 퍼지 모델링 기법[4-5]을 이용하면, 비선형 토크관측기 설계 시에 식 (1)과 A2에 의해서 4차 *r-rule* 퍼지 모델로 근사화 할 수 있다. 따라서 T-S 퍼지 모델의 *i*번째 플랜트 규칙은 다음과 같이 주어진다.

*Plant Rule i* : IF  $\omega$  is  $F_i$ , THEN

$$\begin{aligned} \dot{T}_L &= 0 \\ \dot{\omega} &= k_1 i_{qs} - k_2 \omega - k_3 T_L \\ \dot{i}_{qs} &= -k_4 i_{qs} - k_5 \omega + k_6 V_{qs} - W_i i_{ds} \\ \dot{i}_{ds} &= -k_4 i_{ds} + k_6 V_{ds} + W_i i_{qs} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $F_i$  ( $i=1, \dots, r$ ): 퍼지 집합(Fuzzy Set),  $r$ : 퍼지 규칙 수,  $W_i$ :  $i$ 번째 동작점이다. 각 퍼지 집합  $F_i$ 는  $i$ 번째 *Plant Rule*에 대한 소속 함수  $m_i(\omega)$ 에 의해서 특성화되며,  $i$ 번째 동작점에서는  $\omega = W_i$ 이다. 그러므로 표준 퍼지추론법을 사용함으로써 다음과 같은 전역적인 비선형 모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{T}_L &= 0 \\ \dot{\omega} &= k_1 i_{qs} - k_2 \omega - k_3 T_L \\ \dot{i}_{qs} &= -k_4 i_{qs} - k_5 \omega + k_6 V_{qs} - \sum_{i=1}^r h_i(\omega) W_i i_{ds} \\ \dot{i}_{ds} &= -k_4 i_{ds} + k_6 V_{ds} + \sum_{i=1}^r h_i(\omega) W_i i_{qs} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $m_i: \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ ,  $h_i(\omega) = m_i(\omega) / \sum_{j=1}^r m_j(\omega)$ ,  $h_i$ 는 각 IF-THEN 규칙의 정규화 된 가중치를 의미한다. 위의 식 (5)는 아래 상태방정식 (6)으로 단순화 될 수 있다.

$$\dot{x}_o = \sum_{i=1}^r h_i(\omega) A_{oi} x_o + u_o \quad (6)$$

여기서  $x_o = [T_L, \omega, i_{qs}, i_{ds}]^T$ 이며

$$A_{oi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_3 & -k_2 & k_1 & 0 \\ 0 & -k_5 & -k_4 & -W_i \\ 0 & 0 & W_i & -k_4 \end{bmatrix}, \quad u_o = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_6 V_{qs} \\ k_6 V_{ds} \end{bmatrix}$$

T-S 퍼지 모델을 이용한 부하 토크관측기는 다음의 선형관측기를 이용하여 국부적인 관측기를 표현할 수 있다.

*Observer Rule i* : IF  $\omega$  is  $F_i$ , THEN

$$\dot{\hat{x}}_o = A_{oi} \hat{x}_o + L_i (y_o - C_o \hat{x}_o) + u_o, \quad \hat{T}_L = C_T \hat{x}_o \quad (7)$$

여기서  $L_i \in \mathbb{R}^{4 \times 3}$ 은 관측기 이득 행렬이며  $\hat{x}_o = [\hat{T}_L, \hat{\omega}, \hat{i}_{qs}, \hat{i}_{ds}]^T$ 는  $x_o$ 의 추정치이다. 그리고

$$y_o = C_o x_o, \quad C_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C_T = [1, 0, 0, 0].$$

그러므로 전역적인 비선형 퍼지관측기는 각각의 국부적인 관측기의 가중평균에 의해서 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\hat{x}}_o = \sum_{i=1}^r h_i(\omega) ([A_{oi} - L_i C_o] \hat{x}_o + L_i y_o) + u_o, \quad \hat{T}_L = C_T \hat{x}_o \quad (8)$$

따라서 (1)과  $\dot{T}_L=0$ 의 확대행렬은 (6)과 (8)에 의해서 다음의 오차방정식이 주어진다.

$$\dot{\bar{x}}_o = \sum_{i=1}^r h_i(\omega) [A_{oi} - L_i C_o] \bar{x}_o \quad (9)$$

여기서  $\bar{x}_o = x_o - \hat{x}_o$ 이다.

다음의 LMI 조건을 고려하자.

$$P_o > 0, P_o A_{oi} + A_{oi}^T P_o - Y_{oi} C_o - C_o^T Y_{oi}^T < 0, \forall i \quad (10)$$

여기서  $P_o \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ ,  $Y_{oi} \in \mathbb{R}^{4 \times 3}$ 은 결정 변수들이며, 이는 Matlab의 LMI Toolbox를 이용하여 쉽게 얻어진다. 부하 토크관측기의 이득( $L_i$ )은 LMI (10)의 해 ( $P_o, Y_{oi}$ )를 이용하여 다음 공식에 의해 계산된다.

$$L_i = P_o^{-1} Y_{oi} \quad (11)$$

만약에 식 (10)을 만족하는 해( $P_o, Y_{oi}$ )가 존재한다면, 아래 식 (12)를 만족하는  $Q_o$ 가 존재한다.

$$P_o A_{oi} + A_{oi}^T P_o - Y_{oi} C_o - C_o^T Y_{oi}^T \leq -Q_o < 0, \forall i \quad (12)$$

Lyapunov 함수를  $V_o(\bar{x}_o) = \bar{x}_o^T P_o \bar{x}_o$ 으로 정의를 하면,  $\dot{V}_o$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_o(\bar{x}_o) &= \frac{d}{dt} \bar{x}_o^T P_o \bar{x}_o \\ &= 2\bar{x}_o^T \sum_{i=1}^r h_i(\omega) P_o [A_{oi} - L_i C_o] \bar{x}_o \\ &= 2\bar{x}_o^T \sum_{i=1}^r h_i(\omega) [P_o A_{oi} - Y_{oi} C_o] \bar{x}_o \leq -\bar{x}_o^T Q_o \bar{x}_o \end{aligned} \quad (13)$$

따라서 식 (9)에서 주어진 오차( $\bar{x}_o$ )는 지수적으로 0에 수렴하므로 식 (10)의 LMI 조건을 만족하는 관측기는 안정함을 알 수 있다.

**정리 1:** LMI (10)을 만족시키는 해 ( $P_o, Y_{oi}$ )가 존재하고 관측기 (8)의 이득  $L_i$ 가 (11)처럼 주어지면 오차  $\bar{x}_o$ 는 0으로 수렴한다.

본 논문에서 제안된 방법은 LMI에 기반하였기 때문에 설계 시 다양한 성능을 쉽게 고려할 수 있다. 단순히 해당하는 성능을 위한 LMI 형태의 구속조건을 부가적으로 포함함으로써 쉽게 해당 성능을 보장하는 관측기를 설계할 수 있음에 유의해야 한다. 본 논문에서는 예로  $\alpha$ -안정도와 LQ 성능지수를 다룬다[4,7].

-  $\alpha$ -안정도: 양수  $\alpha$ 에 대하여 아래 식 (14)를 만족시키는 ( $P_o, Y_{oi}$ )를 이용하여 관측기 이득 (11)을 얻었다고 가정하자.

$$P_o > 0, P_o(A_{oi} + \alpha I) + (A_{oi} + \alpha I)^T P_o - Y_{oi} C_o - C_o^T Y_{oi} < 0, \forall i \quad (14)$$

여기서  $I \in R^{3 \times 3}$ : 단위 행렬이다. 식 (13)에 의해서 아래 식 (15)가 유도된다.

$$\frac{d}{dt} \bar{x}_o^T P_o \bar{x}_o \leq -2\alpha \bar{x}_o^T P_o \bar{x}_o \leq 0 \quad (15)$$

따라서 추정 오차( $\bar{x}_o$ )는 최소 감쇠율( $\alpha$ )을 가지고 0에 수렴함을 알 수 있다.

- **LQ 성능지수:** 양수  $\gamma$ 에 대하여 아래 식 (16)을 만족시키는 ( $P_o, Y_{oi}$ )를 이용하여 관측기 이득 (11)을 얻었다고 가정하자.

$$P_o > 0, P_o A_{oi} + A_{oi}^T P_o - Y_{oi} C_o - C_o^T Y_{oi} < -Q_1 \leq 0, \quad (16)$$

$$\bar{x}_o^T(0) P_o \bar{x}_o(0) \leq \gamma, \forall i$$

위의 식 (16)에 의해서 아래 식 (17)이 유도된다.

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \bar{x}_o^T Q_1 \bar{x}_o dt &= \int_0^\infty \left[ \bar{x}_o^T Q_1 \bar{x}_o + \frac{d}{dt} \bar{x}_o^T P_o \bar{x}_o \right] dt \\ &= \bar{x}_o^T(\infty) P_o \bar{x}_o(\infty) + \bar{x}_o^T(0) P_o \bar{x}_o(0) \\ &\leq \bar{x}_o^T(0) P_o \bar{x}_o(0) \leq \gamma \end{aligned} \quad (17)$$

따라서 퍼지관측기 식 (8)은 LQ 성능지수가 유한한 값  $\int_0^\infty \bar{x}_o^T Q_1 \bar{x}_o dt \leq \gamma$ 을 갖도록 보장함을 알 수 있다.

## 5. 시뮬레이션 결과

제안된 퍼지 부하 토크관측기의 성능을 검증하기 위하여 Matlab/Simulink를 이용하여 다양한 조건하에서 시뮬레이션 하였으며, 본 연구에서 사용된 표면 부착형 영구자석 동기전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 영구자석 동기전동기의 파라미터  
Table 1. PMSM Parameters

정격 전력( $P_{rated}$ )	1[HP]
정격 토크( $T_{rated}$ )	3.87[N·m]
정격 속도( $\omega_{rated}$ )	1850[RPM]
극수(p)	12
고정자 저항( $R_s$ )	0.99[Ω]
고정자 인덕턴스( $L_s$ )	5.82[mH]
영구자석 자속( $\lambda_m$ )	0.079153[V·sec/rad]
등가 관성(J)	0.00120754[kg·m <sup>2</sup> ]
점성 마찰 계수(B)	0.0003[N·m·sec/rad]

표 1에서 주어진 파라미터와 부하 토크 추정치( $\hat{T}_L$ )를 이용하면 (2)의 비선형 제어 입력은 다음처럼 얻어진다.

$$V_{qs} = \frac{1}{171.8}(170.1i_{qs} + 13.6\omega + \omega i_{ds}) + \frac{0.2484}{608103.3}(3539.6i_{qs} - 0.2484\omega - 4968.8\hat{T}_L) + \frac{1}{0.2484}\ddot{\omega}_d - \frac{K_1}{608103.3}(\omega - \omega_d) - \frac{K_2}{608103.3} \cdot (3539.6i_{qs} - 0.2484\omega - 4968.8\hat{T}_L - \dot{\omega}_d) \quad (18)$$

$$V_{ds} = \frac{1}{171.8}(170.1i_{ds} - \omega i_{qs}) - \frac{K_3}{171.8}i_{ds}$$

여기서  $K_1 = 70792$ ,  $K_2 = 424.75$ ,  $K_3 = 1000$ 이 선정되었다. 위의 식 (18)에서 부하 토크( $T_L$ )를 추정하기 위하여 식 (14)를 이용하여 최소 감쇠율( $\alpha=140$ )을 보장하는 퍼지 관측기를 설계하고자 한다. 본 논문에서는 현재까지의 경험과 지식을 통하여 다음의 2-rule 퍼지 모델을 선정하였다.

Plant Rule  $i$ : IF  $\omega$  is  $W_i$ , THEN  $\dot{x}_o = A_{oi}x_o + u_o$

여기서  $i = 1, 2$ 이며

$$A_{oi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4968.8 & -0.2 & 3539.6 & 0 \\ 0 & -13.6 & -170.1 & -W_i \\ 0 & 0 & W_i & -170.1 \end{bmatrix}$$

또한 본 논문에서는 다음과 같은 소속 함수를 사용하였다.

$$m_1(\omega) = e^{-\mu(\omega - W_1)^2}, \quad m_2(\omega) = e^{-\mu(\omega - W_2)^2} \quad (19)$$

여기서  $\mu > 0$ ,  $W_1 = -W_2 = W_R > 0$  식 (19)의 소속 함수에 의해서 다음의 정규화 된 소속 함수를 구할 수 있다.

$$h_1(\omega) = \frac{e^{-\mu(\omega - W_R)^2}}{e^{-\mu(\omega - W_R)^2} + e^{-\mu(\omega + W_R)^2}}, \quad (20)$$

$$h_2(\omega) = 1 - h_1(\omega)$$

식 (19)에서 보여준 소속 함수를 위한 변수는  $W_R = 3000$ ,  $\mu = 55.6 \times 10^{-9}$ 으로 설계 되었다. 식 (14)를 풀어 다음의 부하 토크관측기 이득( $L_1, L_2$ )을 계산할 수 있다.

$$L_1 = \begin{bmatrix} -15.8 & 302.8 & 0.1 \\ 555.9 & -7308.5 & -2.5 \\ -0.3 & 190.7 & 0 \\ -2.5 & 29.6 & 0 \end{bmatrix},$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} -15.8 & 302.8 & -0.1 \\ 555.9 & -7308.5 & 2.5 \\ -0.3 & 190.7 & 0 \\ 2.5 & -29.6 & 0 \end{bmatrix}$$

그림 1은 제안된 퍼지 부하 토크관측기를 갖는 제어 시스템의 전반적인 블록 다이어그램을 보여준다. 본 연구에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 구동시스템을 구현하였다. 본 논문에서는 스위칭 손실과 전류 리플을 고려하여 5[kHz]의 스위칭 주파수가 선정되었으며, 또한 공간전압벡터 PWM 방식이 사용되었다.

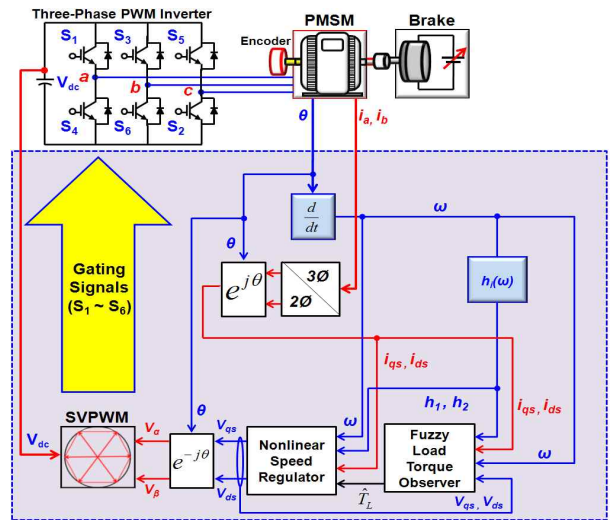


그림 1. 제안된 퍼지관측기를 갖는 제어시스템의 전반적인 블록 다이어그램

Fig. 1. Overall block diagram of control system with proposed fuzzy observer

제안된 제어 알고리즘은 크게 2가지 조건하에서 시뮬레이션 하였다. 즉 첫 번째는 파라미터 무변동시의 속도 변화 및 부하 토크 변화에 대한 응답, 그리고 두

번째는 일부 파라미터( $R_s, L_s$ )의 125[%] 변동시의 속도 변화 및 부하 토크 변화에 대한 응답을 보여준다. 그림 2와 3은 제한한 토크 관측기를 이용하여 전동기 파라미터 무변동시의 속도 변화 및 부하 토크 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

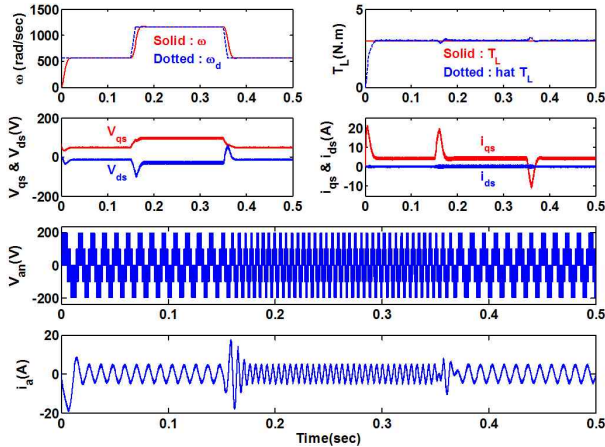


그림 2. 파라미터 무변동시의 속도 변화에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 2. Simulation results about the speed change under no parameter variation

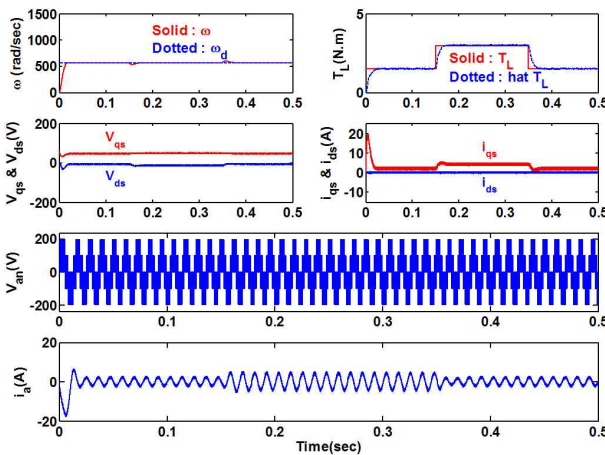


그림 3. 파라미터 무변동시의 부하 토크 변화에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 3. Simulation results about the load torque change under no parameter variation

그림 4와 5는 제안한 토크 관측기의 강인성을 검증하기 위하여 전동기 파라미터 중에서 ( $R_s, L_s$ )의 값이 모델링 오차와 온도 변화 등에 따라서 125[%] 변동시

의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 즉 그림 4는 ( $R_s, L_s$ )의 값이 125[%] 변동시의 속도 변화에 대한 과도응답을 보여주며, 그림 5는 일정속도에서 부하 토크 변화에 대한 과도응답을 보여준다.

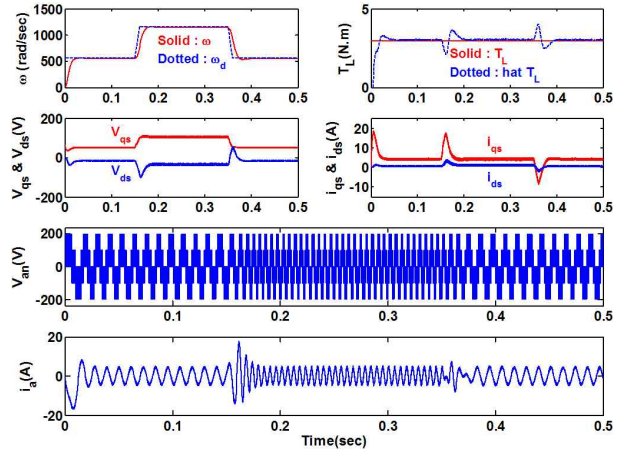


그림 4. 일부 파라미터( $R_s, L_s$ )의 125[%] 변동시의 속도 변화에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 4. Simulation results about the speed change under 125[%] variation of some parameters( $R_s, L_s$ )

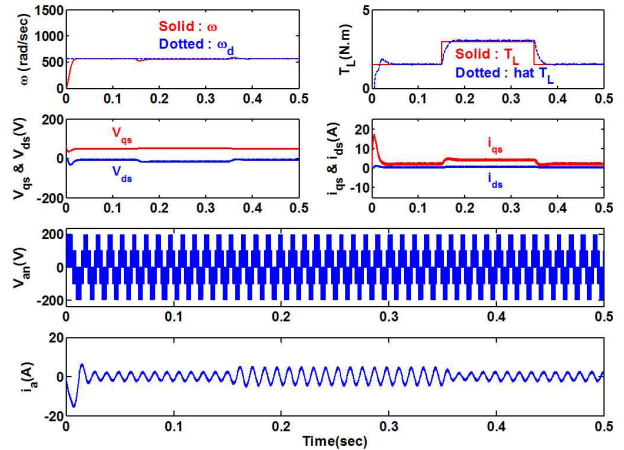


그림 5. 일부 파라미터( $R_s, L_s$ )의 125[%] 변동시의 부하 토크 변화에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 5. Simulation results about the load torque change under 125[%] variation of some parameters( $R_s, L_s$ )

그림 2~ 5에서는 속도 지령치( $\omega_d$ ), 속도 측정치( $\omega$ ), 부하 토크( $T_L$ ), 부하 토크 추정치( $\hat{T}_L$ ), 제어 입력전압

( $V_{qs}, V_{ds}$ ), dq축 전류( $i_{qs}, i_{ds}$ ), 모터 상전압( $V_{an}$ ) 및 상 전류( $i_a$ )를 보여준다. 위에서 보여준 시뮬레이션 결과로부터 본 논문에서 제안된 퍼지 부하 토크 관측기는 기존의 PI 제어기에 비해 가변 속도조건에서는 속도 지령치를 오버슈트가 없이 빠르고 정확하게 추종하며, 일정 속도 하에서 부하토크가 급변하더라도 속도 변화가 없이 매우 안정적인 성능을 알 수 있다. 따라서 제안된 부하관측기를 기존의 비선형 제어기에 적용함으로써 모델 파라미터 변동 시에도 부하 토크를 정확히 추종하므로 속도 지령치를 아주 정확하고 빠르게 추종함을 확인하였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 T-S 퍼지법을 이용하여 우수한 제어 성능을 보여주는 퍼지 부하 토크관측기에 대해 연구하였다. 퍼지 관측기가 존재하기 위한 LMI 조건을 제시하였고, 퍼지 관측기 이득을 계산하였다. 마지막으로 모터 파라미터 변동 및 부하 변동 등 다양한 조건 하에서 보여준 시뮬레이션 결과는 제안된 퍼지 관측기의 성능이 우수함을 확인하였다.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2010-0015428).

## References

- [1] K. B. Lee and F. Blaabjerg, "Robust and stable disturbance observer of servo system for low-speed operation," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 43, no. 3, pp. 627-635, 2007.
- [2] K. H. Kim and M. J. Youn, "A nonlinear speed control for a PM synchronous motor using a simple disturbance estimation technique," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 3, pp. 524-535, 2002.
- [3] Y. Zhang, C. M. Akujubi, W. H. Ali, C. L. Tolliver, and L. S. Shieh, "Load disturbance resistance speed controller design for PMSM," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 53, no. 4, pp. 1198-1208, 2006.
- [4] H. H. Choi, "LMI-based nonlinear fuzzy observer-controller design for uncertain MIMO nonlinear systems," IEEE Trans. Fuzzy Systems, Vol. 15, no. 5, pp. 956-971, 2007.
- [5] T. Tagaki and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems

- and its applications to modeling and control," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. 15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [6] J. J. E. Slotine and W. Li, "Applied Nonlinear Control," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
  - [7] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, "Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory," SIAM, Philadelphia, PA, 1994.

## ◇ 저자소개 ◇



### 정진우 (鄭鎭佑)

1969년 1월 11일생. 1991년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 6월 The Ohio State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997~2000년 LG전자 DA연구소 연구원. 2005년~2008년 삼성SDI 중앙연구소 책임연구원. 2008년~현재 동국대(서울캠퍼스) 전자전기공학부 조교수.



### 이동명 (李東明)

1969년 8월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 2004년 조지아공대 졸업(박사). 1996~2000년 LG전자. 2004~2007년 삼성SDI. 2008년~현재 홍익대 전자전기공학부 조교수.