

T-S Fuzzy Identification을 이용한 PMSM의 T-S Fuzzy 제어

백승호, 김태규, 곽군평, 박승규
 창원대학교 전기공학과

T-S Fuzzy Control of PMSM Based on T-S Fuzzy Identification

Seung-Ho Baek, Tae-Kue Kim, Gun-Pyong Kwak, Seung-kyu Park
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - 본 논문은 T-S Fuzzy Identification을 이용하여 PMSM를 모델링하고 T-S Fuzzy 제어로 PMSM을 제어하는 것 제안합니다. 시스템을 모델링을 위해서는 기존에는 파라미터를 알아야 가능했지만 시스템의 입출력 데이터를 가지고 T-S Fuzzy Identification을 하게 되면 쉽게 시스템을 모델링 할 수 있다. 논문에서는 T-S Fuzzy Identification을 통하여 모델링을 하고 T-S Fuzzy 제어를 통해서 PMSM을 제어 할 수 있는 것을 보여주고 한다.

1. 서 론

영구자석형 동기전동기(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)는 비선형 요소를 가지는 비선형 시스템이며 두 가지 타입이 있다. 두 타입으로는 표면부착형 영구자석 동기전동기와 매입형 영구자석 동기전동기이다.[1] 두 가지 타입 중에서 표면부착형 동기전동기를 제어 할 때는 d축 전류를 0으로 제어하게 되면 DC모터와 같이 제어할 수 있다.[2] 그러나 매입형 영구자석 동기전동기는 단위 전류당 최대 토크 운전을 하게 되면 d축 전류를 0이 아닌 값으로 제어하기 때문에 많은 어려움을 가진다.[3] 또한 매입형 영구자석 동기전동기의 파라미터를 얻는 것 통한 어려움이 있다. 하지만, 기존에는 시스템의 파라미터가 있어야 시스템을 모델링을 할 수 있지만 T-S Fuzzy Identification은 시스템의 입·출력 데이터만으로도 시스템의 모델링이 가능하게 되며 제어에 용이하다.[4][5]

한편, T-S 퍼지 모델은 비선형 모델의 근사화에 유용하고, 여러 개의 선형 모델들의 결합을 통해서 구성된다. T-S 퍼지 제어기는 각각 선형 모델을 제어할 수 있는 선형 제어기들의 퍼지결합으로 구성된다.[6]

본 논문에서는 비선형 시스템인 PMSM의 입·출력 데이터를 T-S Fuzzy Identification을 이용하여 PMSM를 모델링하고 T-S Fuzzy 제어를 이용하여 PMSM 제어하는 것을 제안하고 한다.

2. 본 론

2.1 PMSM의 동특성 방정식

PMSM의 동특성 방정식은 다음과 같다.[6]

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{I}_q \\ \dot{I}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J_m} - \frac{3P\lambda_m}{2J_m} & \frac{3P}{2J_m}(L_d - L_q)I_q \\ -\frac{P\lambda_m}{L_q} & -\frac{R}{L_q} & -\frac{L_d P}{L_q}\omega \\ 0 & \frac{L_q}{L_d}\omega & -\frac{R}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ I_q \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} - \frac{1}{J_m} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} T_L \quad (1)$$

PMSM의 입력은 V_q, V_d 두 개로 구성 되고, $B_m, J_m, \lambda_m, L_q, L_d, P, R$ 는 파라미터 값으로 일정한 값을 가지는 선형요소이고, ω, I_q 는 일정한 값이 없는 비선형 요소로 구성된다.

2.2 PMSM의 T-S 퍼지

PMSM을 여러 개의 선형모델의 Fuzzy 결합을 나타내기 위한 퍼지 룰은 다음과 같다.

Plant Rule i : if $w_1(t)$ is F_{i1} and \dots and $w_r(t)$ is F_{ir}
 Then $\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \quad i = (1, 2, \dots, r) \quad (2)$
 (F_i :퍼지함수, $w_j(t)$:하중함수, $u(t) \in R^m$:입력벡터)

표준 퍼지 추론 방법을 사용하면, 식(1) 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^L \mu_i(\omega(t)) A_i x(t) + B_i u(t)}{\sum_{i=1}^L \mu_i(\omega(t))} = \sum_{i=1}^L h_i(\omega(t)) A_i x(t) + B_i u(t) \quad (3)$$

($i = 1, 2, \dots, L, L$: 퍼지 룰 개수, F_{ij} : 퍼지함수, $w_j(t)$: 하중함수 $u(t) \in R^m$: 입력 벡터, $\mu_i(\omega(t)) = \prod_{j=1}^r F_{ij}(\omega_j(t))$)

2.3 T-S Identification

i 번째 T-S Fuzzy Identification 출력은 다음과 같이 표현한다.

$$\hat{y} = a_{i1}x_{k1} + a_{i2}x_{k2} + \dots + a_{iM}x_{kM} + b = X_k \cdot \theta_i^T \quad (i = 1, 2, \dots, c) \quad (4)$$

($\theta_i = [a_{i1}, \dots, a_{iM}]$, c : 룰의 개수 M 변수 $X_k = [x_{k1}, \dots, x_{kM}]$ X_k, y_k : N 개 데이터쌍) 비선형 시스템의 출력과 퍼지 법칙을 적용 출력의 차이를 $d_{ik}(\theta_i)$ 라 하며, $d_{ik}(\theta_i)$ 의 i 번째 T-S Fuzzy 법칙의 출력과 목적함수 J 와 제약 조건 μ_{ik} 을 가진다. 또한 Lagrange 승수 이론과 조건을 최소화하는 제약 함수 J 를 Lagrangian에 적용하면 다음과 같다.

$$F(\lambda, \mu_{ik}) = \sum_{i=1}^c (\mu_{ik})^m (d_{ik}(\theta_i))^2 - \lambda (\sum_{i=1}^c \mu_{ik} - 1) \quad (k = 1, \dots, N) \quad (5)$$

(λ : Lagrange 승수 m : 정수 상수).

식(5)의 계산식을 이용하게 되면 membership 함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{i=1}^c [d_{ik}(\theta_i)/d_{jk}(\theta_j)]^{2/(m-1)}}, d_{jk} \neq 0 \quad \text{or} \quad \mu_{ik} = s_{ik}, d_{jk} = 0$$

and $\sum_{i=1}^c s_{ik} = 1 \quad (6)$

θ_{ij} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{ik})^m (y_k - \sum_{t=1, t \neq j}^{M+1} \theta_{x_{kt}}) x_{kj}}{\sum_{k=1}^N (\mu_{ik})^m x_{kj}^2} \quad (i = 1, 2, \dots, c \quad j = 1, 2, \dots, M) \quad (7)$$

클러스터 센터를 Identification위해서 programming을 하면 클러스터 할당, 퍼지요소 설정, 클러스터 센터의 파라미터벡터를 초기화 하고 programming이 끝나는 종료 조건을 설정한다. 이때 종료 조건을 만족 하지 않으면 반복 색인을 통하여 반복하도록 한다.[7][8]

이러한 단계로 인하여 μ_{ik} 는 목적함수 J 가 점점 최소화 될 수 있다. 그 후에 다음과 같이 퍼지함수 센터 ν_{ij} 을 구 할 수 있다.

$$\nu_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_{ik} x_{kj}}{\sum_{k=1}^N \mu_{ik}}, \quad (i = 1, 2, \dots, c \quad j = 1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

클러스터 센터와 트레이닝 입력에 차이 $d_{ik}^{(j)}$ 를 가지며, Membership 함수 $\mu_{ik}^{(j)}$ 의 소속정도는 식(6)에서 j 변수를 추가 되며, $\mu_{ik}^{(j)}$ 를 구하는 방법은 식(6)와 유사하며, j 변수는 k 번째 입력의 j 번째 구성 요소이다.

Membership 함수 $\mu_{ik}^{(j)}$ 은 소속정도는 트레이닝 클러스터 센터를 구하는 과정과 비슷한 programming 방식으로 구할 수 있다.

j 변수에 관한 membership 함수 ω_{ik} 와 전체 퍼지 룰의 membership 함수 β_{ik} 를 가지며, 모든 θ_i 는 식(4)에 의해 정의 되며, $\hat{\theta}$ 은 다음과 같다.

$$\hat{\theta} = [p_{11} \dots p_{c1} \dots p_{1M} \dots p_{cM}]^T \quad (p_{ij} = a_{ij}, j = 1, \dots, M, i = 1, \dots, c) \quad (9)$$

따라서 k 번째 출력은 다음과 같다.

$$\hat{y}_k = \varphi \theta = \sum_{i=1}^c \beta_{ik} \hat{y}_{ik} = \sum_{i=1}^c \beta_{ik} (p_{i1}x_{k1} + \dots + p_{iM}x_{kM}) \quad (10)$$

$$(\varphi = [\beta_{1k}x_{k1} \dots \beta_{ck}x_{k1} \dots \beta_{1k}x_{kM} \dots \beta_{ck}x_{kM}])$$

최소 자승 계산을 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\theta = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T Y \quad (\text{트레이닝 출력 } Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]^T) \quad (11)$$

시스템을 T-S Fuzzy Identification을 통하여 모델링하기 위해서는 선행되어야 하는 것은 시스템을 구동하기 위해서 제어기와 데이터를 측정하기 위한 계측기 등을 갖추어야 한다. T-S Fuzzy Identification을 하게 되면 시스템의 파라미터를 필요 없고 시스템을 Open Loop 구동을 통하여 입·출력 데이터를 측정하여 T-S Fuzzy Identification에 데이터를 입력하게 시스템을 모델링을 할 수 있다. 본 논문에서 PMSM의 T-S Fuzzy Identification을 적용하기 위해서는 PMSM을 Open Loop 구동을 통하여 입력 신호를 chirp 또는 random 신호를 입력을 PMSM의 출력 데이터를 받아서 T-S Fuzzy Identification의 이산화한 비선형 시스템 모델링을 한다. 다음으로는 사인신호를 입력으로 출력 데이터를 받아서 T-S Fuzzy Identification 트레이닝 출력을 통하여 PMSM을 모델링을 한다. T-S Fuzzy Identification을 통하여 모델링하여 출력 신호와 비선형 시스템의 출력 비교함으로써 PMSM 모델링 되었는지를 확인 할 수 있다.

2.4 T-S Fuzzy 제어기

PDC(Parallel Distributed Compensation)제어기법은 T-S Fuzzy 모델의 후반부 선형 모델에 대하여 각각 선형 제어이론을 이용하여 선형 제어기를 설계하고 이를 소속 함수의 곱과 합을 이용하여 전체 비선형 모델에 대한 제어기를 결정하는 방법이다.

일반적으로 퍼지법칙 i ;

$$\begin{aligned} & \text{If } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } z(t) \text{ is } M_{ip} \\ & \text{Then } u(t) = -K_i x(t), \quad i = 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 전체적인 퍼지 제어기는 다음과 같다.

$$u(t) = -\frac{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t)) K_i x(t)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z(t))} = -\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) K_i x(t) \quad (13)$$

식(12)를 식(3)에 대입하게 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t)) h_j(z(t)) [A_i - B_j K_j] x(t) \quad (14)$$

선형행렬부등식(LMIs)을 만족하는 공통의 양 정의 행렬 P 가 존재한다면, 식(13)의 T-S Fuzzy 시스템의 점근적으로 안정하다.

$$G_{ii}^T P + P G_{ii} < 0 \quad (i = 1, \dots, r) \quad (15)$$

$$G_{ij}^T P + P G_{ij} < 0 \quad (i < j < 0) \quad \left(G_{ij} = \frac{(A_i - B_j K_j) + (A_j - B_i K_i)}{2} \right) \quad (16)$$

Matlab LMI tool 박스를 통하여 식(15)은 식(17)과 같고 식(16)은 식(18)과 같이 tool 박스로 계산할 수 있다.

$$P^{-1} A_i^T + A_i P^{-1} - M_i^T B_i^T - B_i M_i < 0, \quad (i = j) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & P^{-1} A_i^T + A_i P^{-1} + P^{-1} A_j^T + A_j P^{-1} \\ & - M_j^T B_i^T - B_i M_j - M_i^T B_j^T - B_j M_i < 0, \quad (i < j) \end{aligned} \quad (18)$$

이때, $x(t) = P^{-1}$ 이고 $M_i = F_i x(t)$ 이다. 따라서 $P = x^{-1}(t)$ 이므로 식(13)에서 게인 K_i 는 $K_i = M_i x^{-1}(t)$ 으로 구할 수 있다.

2.5 Simulation

식(1)을 기본으로 PMSM을 이산화한 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega(t) = & (1 - \frac{TB_m}{J_m})\omega(t-1) + \frac{3TP\lambda_m}{2J_m}I_q(t-1) \\ & + \frac{3TP}{2J_m}(L_d - L_q)I_q(t-1)I_d(t-1) \end{aligned} \quad (19)$$

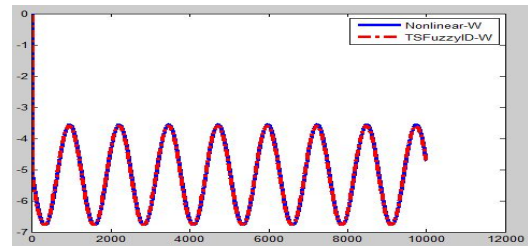
식(19)을 이용하여 T-S Fuzzy Identification 시뮬레이션을 하면 <표1>, <표2>와 같은 결과를 얻을 수 있다.

<표 1> Premise Parameter

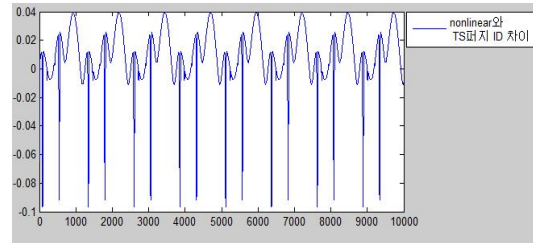
	v_{i1}	v_{i2}	v_{i3}	v_{i4}
Rule 1	-5.19412	0.06228	-0.00168	0.01591
Rule 2	-3.89785	-0.25089	0.00277	-0.30554
Rule 3	-5.82595	0.29119	-0.00185	0.88438
Rule 4	-6.57053	0.50248	-0.00891	0.84914

<표 2> Consequent Parameter

	P_{i0}	P_{i1}	P_{i2}	P_{i3}	P_{i4}
Rule 1	13.906	43.280	-27.915	-1.820	64.344
Rule 2	0.987	-0.301	37.567	0.331	-0.059
Rule 3	6.938	15.805	-198.037	0.207	29.672
Rule 4	1.328	0.715	22.981	0.359	1.689



<그림 1> 속도 ω 에 대한 비교



<그림 2> 속도 ω 에 차이 비교

<그림1>은 T-S Fuzzy Identification을 통하여 모델링과 비선형 모델링한 PMSM에 입력으로 사인파를 넣을 때 출력인 속도 ω 비교한 그림이다. 또한 <그림2>은 <그림1>에서 나온 출력의 차이를 나타낸다. 따라서 T-S Fuzzy Identification을 통한 모델링은 기존 파라미터를 이용한 모델링과 차이가 거의 없다는 것을 확인 할 수 있다.

3 결 론

본 논문에서 제안된 PMSM의 Open Loop구동을 통하여 얻은 입·출력 데이터를 T-S Fuzzy Identification 통하여 시스템을 모델링 할 수 있으며, 기존의 파라미터를 측정하여 모델링 하는 것에 비해 쉽게 모델링 할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 또한, 이렇게 모델링 되어진 시스템을 T-S Fuzzy 제어기를 적용 할 수 있다. 기존의 시스템 모델링보다 쉬우며, 이를 효과적으로 제어가 가능하다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 창원대학교 연구비와 지방기술혁신사업(RT004-10-03)지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Nasir Uddin and M. Azizur Rahma, "High-Speed Control of IPMSM Drives Using Improved Fuzzy Logic Algorithms," IEEE transactions on industrial electronics, vol. 54, no. 1, Feb. 2007
- [2] Boldea, L., Paicu, M. C., Andreescu, G. D. and Blaabjerg, F., "Active flux orientation vector sensorless control of IPMSM," Proc. Of IEEE Optimization of Electrical and Electronic Equipment 2008, pp. 161-168, May 2008.
- [3] M. Nasir Uddin and M. Azizur Rahma, "High-Speed Control of IPMSM Drives Using Improved Fuzzy Logic Algorithms," IEEE transactions on industrial electronics, vol. 54, no. 1, pp. 190-199, Feb. 2007
- [4] Kim, E., Park, M., Ji, S., Park, M., "A new approach to fuzzy modeling," IEEE Trans. Fuzzy Syst. vol. 5, pp. 328-337, 1997
- [5] Kim, E., Park, M., Kim, S., Park, M., "A transformed input-domain approach to fuzzy modeling," IEEE Trans. Fuzzy Syst. vol. 6, pp. 596-604, 1998.
- [6] H. O. Wang, K. Tanaka, M. F. Griffin, "Parallel distributed compensation of nonlinear system by Takagi-Sugeno fuzzy model," Proceedings of the Fuzzy-IEEEIFES vol. 95, pp. 531-538, 1995
- [7] Chaoshun Li, Jianzhong Zhou, Xiuqiao Xiang, Qingqing Li, Xue li An, "T-S fuzzy model identification based on a novel fuzzy c-regression model clustering algorithm," Engineering Applications of Artificial Intelligence vol. 22, pp. 646-653, 2009.
- [8] Fa Guang Wang; Seung Kyu Park; Taesung Yoon; Ho Kyun Ahn; "T-S fuzzy modeling of interior permanent magnet synchronous motor," Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 2010 10th International Conference on, vol., no., pp.182-186, Nov. 29 2010-Dec. 1 2010