
T-S Fuzzy Identification을 이용한 유도전동기 구현에 관한 연구

이승택* · 이동광** · 안호균** · 박승규**
· 안종건*** · 윤태성**** · 곽군평*****

The study on Induction motor of 'T-S Fuzzy Identification'

Seung-Taek Lee* · Dong-Kwang Lee** · Ho-Kyun Ann** · Seung Kyu Park**
· Jong-Keon Ahn*** · Tae-Sung Yun**** · Gun-Pyong Kwak*****

이 논문은 2011년도 2단계 BK21 사업, 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03]의 연구비를 지원받았음

요 약

본 논문에서는 비선형 시스템에 대하여 Takagi-sugeno(T-S) 퍼지 Identification을 이용하여 유도전동기의 비선형 다변수 시스템을 선형화 할 수 있는 새로운 방법을 제안한다. T-S 퍼지 모델의 선형화는 퍼지 규칙들 및 소속 함수들의 산술적인 계산으로 인해 선형화가 쉽지 않다. 그러므로 T-S 퍼지 Identification을 이용하여 퍼지 규칙 및 소속 함수들의 추정을 통해 높은 정확도를 가지는 선형 모델로 제공한다.

ABSTRACT

In this paper, it suggest that nonlinear multivariable system control of induction motor using 'T-S Fuzzy Identification' 'T-S Fuzzy model of linearization' is not easy because of that arithmetic is difficult in computation of the function. Therefore 'T-S Fuzzy Identification' is suggested that the rules and functions through the estimation of high accuracy provides linearized model

키워드

T-S 퍼지, T-S Fuzzy Identification, 유도전동기, 비선형

Key word

T-S Fuzzy, T-S Fuzzy Identification, Induction motor, Nonlinear System

* 준회원 : 창원대학교 전기공학과

접수일자 : 2012. 03. 07

** 정회원 : 창원대학교 전기공학과

심사완료일자 : 2012. 03. 24

*** 정회원 : (주)인더스콘 대표이사

**** 종신회원 : 창원대학교 전기공학과

***** 종신회원 : 창원대학교 전기공학과 (교신저자, kwak@changwon.ac.kr)

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.5.973>

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

오늘날 유도전동기는 산업화된 국가에서 전기에너지의 소비가 가장 많은 것으로 알려져 있으며 유도전동기는 정격속도 및 토크에서 높은 효율을 가진다. 이러한 유도전동기는 모델링에서 비선형성을 가지는 변수들이 있기 때문에 제어하기가 상대적으로 어렵다.[1-3]

비선형 시스템의 제어 기법으로 널리 사용되고 있는 피드백 선형화기법은 시스템의 비선형요소를 제거함으로써 페루프 시스템을 통해 선형구조를 갖도록 동작한다. 그러나 피드백 선형화제어기를 설계할 때 복잡한 비선형요소를 표현하는데 있어서 많은 어려움이 있게 되며, 이러한 문제점은 T-S 퍼지 모델을 이용하여 시스템의 비선형요소를 여러 동작점을 기초로 하는 여러 개의 퍼지결함으로 보다 쉽게 나타내고 제거할 수 있게 되었다.[4-7] 하지만 여러 개의 퍼지결함으로 구성된 T-S 퍼지를 사용하기 위해서는 매개변수 및 Membership function의 산술적인 계산이 필요하게 된다. [8]

논문의 주요 목적은 유도전동기를 쉽게 제어 할 수 있는 새로운 효율적인 방법을 제안하는 것이다. T-S Fuzzy Identification을 이용하여 예상된 모델의 입출력 데이터를 가지고 산술적인 계산 없이 매개변수 값의 추정과 Membership function, 선형 동적 방정식의 정확한 시스템을 제공하며 이를 위해 Fuzzy c-regression models(FCRM) 클러스터링 알고리즘이 이용되었다.[9-13]

논문의 본문에서는 비선형성을 가지는 유도전동기의 동특성 방정식을 선형화 모델링 식으로 변환하기 위해 PI제어기를 이용해 자속 값을 제어 하여 제어를 용이하게 할 수 있다. 하지만 여전히 비선형 요소가 남아있기 때문에 좀 더 손쉬운 제어를 위해 T-S 퍼지를 적용한다. 적용된 T-S 퍼지 모델에 관한 Identification을 위하여 Chirp signal 및 Sine signal을 통한 입출력 데이터를 가지고 T-S 퍼지 Identification을 적용하면 클러스터링 알고리즘에 따라 적절한 모델의 매개변수 값 및 Membership function의 계산 및 추정이 가능하다. 결론에서는 Matlab을 통한 비선형성을 포함하는 유도전동기의 동특성 방정식에 T-S Fuzzy Identification을 적용하여 Training된 출력과 비선형성을 가지는 모델을 비교하고 각 변수들에 관한 오차범위를 나타낸다.

II. 본 론

2.1. 유도전동기의 동특성 방정식

유도전동기의 동특성은 고정자와 회전자 상호간의 결합효과 때문에 비선형성을 가지는 시스템으로 볼 수 있다. 유도전동기의 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= \frac{PL_m}{JL_r}(\psi_{ra}i_{sb} - \psi_{rb}i_{sa}) - \frac{T_L}{J} \\ \frac{d\psi_{ra}}{dt} &= -\frac{R_r}{L_r}\psi_{ra} - Pw\psi_{rb} + \frac{R_r}{L_r}L_m i_{sa} \\ \frac{d\psi_{rb}}{dt} &= Pw\psi_{ra} - \frac{R_r}{L_r}\psi_{rb} + \frac{R_r}{L_r}L_m i_{sb} \\ \frac{di_{sa}}{dt} &= \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2}\psi_{ra} + \frac{PL_m}{\sigma L_s L_r}w\psi_{rb} \\ &\quad - \frac{L_M^2 R_r + L_r^2 R_s}{\sigma L_s L_r^2}i_{sa} + \frac{1}{\sigma L_s}u_{sa} \end{aligned} \quad (1)$$

i, ψ, u_s 는 각각 전류와 자속 그리고 고정자 전압이다. a 와 b 는 고정 2상을 의미하며, $\sigma = 1 - (L_m^2 / L_s L_r)$ 이다. (2)식과 같이 벡터의 상태를 설정 한다.

$$x = [w, \psi_a, \psi_b, i_a, i_b]^T \quad (2)$$

T_L 은 부하토크, R_r 은 회전자 저항을 나타낸다.

2.2. 유도전동기 선형화 모델링.

$|\psi| = \sqrt{\psi_a^2 + \psi_b^2}$, $\cos \rho = (\frac{\psi_a}{|\psi|})$, $\sin \rho = (\frac{\psi_b}{|\psi|})$ 로 정의 하고 전류와 자속을 새롭게 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{\psi_a i_a + \psi_b i_b}{|\psi|}, i_q = \frac{\psi_a i_b - \psi_b i_a}{|\psi|}, \\ \psi_d &= \sqrt{\psi_a^2 + \psi_b^2} = |\psi|, \psi_q = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

비선형상태 피드백을 사용하여 제어시스템을 간단한 구조로 바꿀 수 있다.

$$w = w, \psi_d = \sqrt{\psi_a^2 + \psi_b^2}, \rho = \arctan \frac{\psi_b}{\psi_a}, \quad (4)$$

$$i_d = \frac{\psi_a i_a + \psi_b i_b}{|\psi|}, i_q = \frac{\psi_a i_b - \psi_b i_a}{|\psi|}$$

비선형 상태 피드백은 고정자 전류 **a-b**축에 대하여 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \sigma L_s |\psi| \begin{bmatrix} \psi_a & \psi_b \\ -\psi_b & \psi_a \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} -Pw i_q - \frac{R_r}{L_r} L_m \frac{i_q^2}{\psi_d} - \frac{R_r}{L_r} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \psi_d + v_d \\ P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} w \psi_d + Pw i_d + \frac{R_r}{L_r} L_m \frac{i_d i_q}{\psi_d} + v_q \end{pmatrix}$$

(1)번식, (2)번식, (3)번식을 이용하면 다음과 같은 새로운 페루프 시스템으로 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= \frac{PL_m}{JL_r} \psi_d i_q - \frac{T_L}{J} \quad (6) \\ \frac{di_q}{dt} &= -\left(\frac{L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma L_s}\right) i_q + v_q \\ \frac{d\psi_d}{dt} &= -\frac{R_r}{L_r} \psi_d + \frac{R_r}{L_r} L_m i_d \\ \frac{di_d}{dt} &= -\left(\frac{L_m^2 R_r}{\sigma L_s L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma L_s}\right) i_d + v_d \\ \frac{d\rho}{dt} &= Pw + \frac{R_r}{L_r} L_m \frac{i_q}{\psi_d} \end{aligned}$$

페루프 시스템에서 i_q 와 i_d 에는 비선형 요소들을 제거하였으나 속도 제어에 있어서 ψ_d 는 여전히 비선형 요소를 포함하고 있다. 식을 간단히 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= \mu \phi_d i_q - \frac{T_L}{J} \quad (7) \\ \frac{di_q}{dt} &= -\gamma i_q + v_q \\ \frac{d\phi_d}{dt} &= -\alpha \phi_d + \alpha L_m i_d \\ \frac{di_d}{dt} &= -\gamma i_d + v_d \end{aligned}$$

ϕ_d, i_d 는 비선형 요소를 가지는 시스템 이므로 이러한 비선형 요소를 선형화하기 위해 PI제어를 사용하여 제어를 용의하게 할 수 있으나 여전히 비선형 요소인 w, i_q 가 존재한다.

2.3. T-S 퍼지 모델

T-S 퍼지 모델은 비선형 시스템의 국부적인 선형 동특성 관계를 나타내기 위하여 Takagi와 Sugeno에 의하여 제안되었다.[4] 비선형 모델은 퍼지 IF-Then 규칙들에 의하여 표현되며 이것은 비선형 시스템의 제어 설계 문제를 다루기 위하여 채택된다. 퍼지 모델의 I번째 규칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{If } w_1(k) \text{ is } F_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } w_g(k) \text{ is } F_{ig} \quad (8) \\ \text{Then } x(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k) \\ \text{For } i = 1, 2, \dots, L \end{aligned}$$

여기서 $w_1(k), w_2(k), \dots, w_g(k)$ 는 전건부 변수 (prmise variable)이며, F_{ig} 는 퍼지집합 이고 $A_i \in R^{n \times n}$, $B_i \in R^{n \times m}$, L 은 If-Then 규칙의 개수이다. 일반적인 퍼지 추론법을 사용하여 식(8)와 같은 T-S 퍼지 모델을 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \frac{\sum_{i=1}^L \mu_i(w(k)) \{A_i x(k) + B_i u(k)\}}{\sum_{i=1}^L \mu_i(w(k))} \quad (9) \\ &= \sum_{i=1}^L h_i(w(k)) \{A_i x(k) + B_i u(k)\} \end{aligned}$$

여기서 $w(k) = [w_1(k), w_2(k), \dots, w_g(k)]$, 이며 $F_{ij}(w(t))$ 는 $w_j(t)$ 의 소속 정도이다. 그리고 $u_i(w(t)) = \prod_{j=1}^g F_{ij}(w(t))$ 이다.

본 논문에서는 모든 시간에 대해서 $i = 1, 2, \dots, L$, $\mu_i(w(t)) \geq 0$ 이면 다음과 같이 $\sum_{i=1}^L \mu_i(w(t)) > 0$ 이고, $h_i(w(t)) \geq 0, i = 1, 2, \dots, L$ 일 때 식(10)을 만족한다.

$$\sum_{i=1}^L h_i(w(t)) = 1 \quad (10)$$

위와 같이 정의된 T-S 퍼지를 이용하여 유도전동기의 T-S퍼지 모델에서 국부적인 선형모델을 다음과 같이 구할 수 있다.

ϕ_d 의 값을 동작 점에 따라서 고정 시킴으로써 속도에 관한 방정식을 선형으로 만들 수 있다. 여기서 ϕ_d 의 값을 자속의 최대점을 ϕ_{max} , 최소점을 ϕ_{min} 으로 치환하여 선형화 시킨다. 또한 자속값에 따른 선형화모델 A_1, A_2 로 나눈다. $f(0) = 0$ 이 되도록 하기 위해 i_q 를 좌표변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu\phi_d i_q - \frac{T_L}{J} &= \mu\phi_d i_{qn} \quad (11) \\ i_{qn} &= i_q - \frac{T_L}{\mu\phi_d J} \end{aligned}$$

따라서 ϕ_d 값에 따른 유도전동기 모델링 방정식을 구분하면 다음과 같다.

model1)

$$\begin{bmatrix} \frac{dw}{dt} \\ \frac{di_{qn}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \Phi_{max}\mu \\ 0 & -\Upsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ i_{qn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_q \quad (12)$$

model2)

$$\begin{bmatrix} \frac{dw}{dt} \\ \frac{di_{qn}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \Phi_{min}\mu \\ 0 & -\Upsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ i_{qn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_q \quad (13)$$

2.4. T-S Fuzzy Identification

기존의 T-S 퍼지 모델의 경우 Membership function 및 rule의 수를 계산해서 사용하였기 때문에 계산과정에 대한 어려움과 이에 따라 생길 수 있는 오차가 존재하지만, Identification을 사용하면 Chirp Signal 및 Sine Signal을 통한 입출력 data를 가지고 Membership function의 복잡한 계산 없이 T-S 퍼지 모델을 구성할 수 있다.

전체적인 흐름을 보면 먼저 Chirp Signal을 통한 입출력 값으로 클러스터링 센터의 Identification의 단계를 거쳐 μ, θ, ν 가 구해지고, 다시 μ, θ, ν 와 Sin Signal을 통한 입출력 값으로 Membership function의 Identification의 단계를 거쳐 β 가 구해진다. 이 β 값을 이용하면 최종적으로 T-S Fuzzy Identification 통한 Training된 출력 Y를 얻을 수 있다. 입출력 데이터 쌍이 N이라고 가정하면 $(X_k, y_k) (k = 1, \dots, N)$ 이며 $X_k = [x_{k1}, \dots, x_{kM}]$ 에서 M은 변수의 수를 가리킨다.

i-th T-S 퍼지의 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{y} &= a_{i1}x_{k1} + a_{i2}x_{k2} + \dots + a_{iM}x_{kM} + b \quad (14) \\ &= [X_k \ 1] \cdot \theta_i^T, \quad i = 1, 2, \dots, c \end{aligned}$$

시스템의 변수는 $\theta_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iM} + b]$ 이고 c와 함께 rule의 숫자가 된다.

데이터 간의 예러와 i-th T-S 퍼지 rule의 출력은 다음과 같다.

$$d_{ik}(\theta_i) = |y_k - [X_k \ 1] \cdot \theta_i^T| \quad (15)$$

조건을 최소화하기 위한 식은 다음과 같다.

$$J = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^c (u_{ik})^m (d_{ik}(\theta_i))^2 \quad (16)$$

또한 Fuzzy weighting의 지수는 m이며 보통 2로 정의된다. $u_{ik} \in [0, 1]$ 는 Fuzzy membership degree인 k-th 데이터 쌍은 i-th 클러스터에 속한다. 또한 Membership function은 다음과 같이 억제될 수 있다.

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1 \quad (17)$$

Lagrange multiplier 방법과 조건을 최소화하는 기능의 J를 Lagrangian을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\lambda, u_{ik}) = \sum_{i=1}^c (u_{ik})^m (d_{ik}(\theta_i))^2 - \lambda \left(\sum_{i=1}^c u_{ik} - 1 \right) \quad (18)$$

$k = 1, \dots, N$

위의 식을 가지고 계산을 하면 다음과 같이 Membership function을 구할 수 있다. 식(18)에서 $d_{ik}(\theta_i) > 0$ 이라고 가정했을 때 J 를 최소화하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \frac{\delta F(\lambda, \mu_{1k}, \dots, \mu_{ck})}{\delta \mu_{1k}} = (\mu_{1k})^{m-1} (d_{1k}(\theta_1))^2 - \lambda = 0 \\ \frac{\delta F(\lambda, \mu_{1k}, \dots, \mu_{ck})}{\delta \mu_{ck}} = (\mu_{ck})^{m-1} (d_{ck}(\theta_c))^2 - \lambda = 0 \end{cases} \quad (19)$$

그리고

$$\frac{\delta F(\lambda, \mu_{1k}, \dots, \mu_{ck})}{\delta \lambda} = -\left(\sum_{i=1}^c \mu_{ik} - 1\right) = 0 \quad (20)$$

$$\mu_{ik} = \left[\frac{\lambda}{m (d_{ik}(\theta_i))^2} \right]^{1/(m-1)} \quad (21)$$

식(20)을 식(21)에 대입하면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\lambda}{m}\right)^{1/m} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c [1/((d_{jk}(\theta_j))^2)]^{1/(m-1)}} \quad (22)$$

식(22)을 식(21)에 대입하면 다음과 같다

$$\mu_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c [d_{ik}(\theta_i)/d_{jk}(\theta_j)]^{2/(m-1)}}, d_{jk} \neq 0 \quad (23)$$

or

$$\mu_{ik} = s_{ik}, d_{jk} = 0 \text{ and } \sum_{i=1}^c s_{ik} = 1$$

θ_{ij} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{ik})^m (y_k - \sum_{t=1, t \neq j}^{M+1} \theta_{kt}) \widehat{x}_{kj}}{\sum_{k=1}^N (\mu_{ik})^m \widehat{x}_{kj}^2}, \quad (24)$$

$$i = 1, 2, \dots, c \quad j = 1, 2, \dots, M+1$$

이를 이용하여 $\widehat{X}_k = [X_k \ 1]$ 를 구할 수 있다.

(1) 클러스터링 센터의 Identification의 단계 [14][15]

Step1

클러스터 c 의 숫자를 할당.

Fuzzy weighting exponent인 m 을 2로 설정.

클러스터 센터의 변수 벡터인 θ_i 를 초기화.

종료경계는 $\varepsilon_1 > 0$ 와 반복색인 $r=1$ 로 설정.

Step2

(15)식을 이용하여 $d_{ik}(\theta_i)$ 를 계산.

(23)식을 가지고 μ_{ik} 를 계산.

(24)식을 가지고 θ_{ij} 를 계산.

Step3

$U = \mu_{ik}$ 로 설정한다.

만약 $\|U^{(r)} - U^{(r-1)}\| < \varepsilon_1$ 이면 멈춤.

그렇지 않다면 $r=r+1$ 을 하여 Step2를 실행.

μ_{ik} 는 J 가 최소화 될 때까지 각 단계를 실행.

위의 Step을 실행하면 클러스터링 센터 v_{ij} 를 쉽게 구할 수 있음.

$$v_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_{ik} x_{kj}}{\sum_{k=1}^N \mu_{ik}} \quad (25)$$

$$i = 1, 2, \dots, c \quad j = 1, 2, \dots, M$$

일련의 과정에서 구한 클러스터링 센터 v_{ij} 와 training 된 입력 사이의 거리는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{jk}^{(j)} = \|x_{kj} - v_{ij}\| \quad (26)$$

Membership function $\mu_{ik}^{(j)}$ 의 소속정도는 다음 식을 이용하여 알 수 있다.

$$\mu_{ik}^{(j)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c [d_{jk}^{(j)}(\theta_i)/d_{jk}^{(j)}(\theta_j)]^{2/(m-1)}}, d_{jk} \neq 0 \quad (27)$$

or

$$\mu_{jk}^{(j)} = s_{ik}^{(j)}, d_{jk}^{(j)} = 0 \text{ and } \sum_{i=1}^c s_{ik}^{(j)} = 1$$

J는 k-th 입력의 j-th 구성요소이다.

Membership function의 소속정도에 관한 training은 클러스터 센터의 training과 절차가 비슷하다.

(2) Membership function의 Identification의 단계

Step1

클러스터 c의 숫자를 할당.

Fuzzy weighting exponent인 m을 2로 설정.

클러스터 센터의 변수 벡터인 μ_{ik} 를 초기화.

종료경계는 $\varepsilon_2 > 0$ 와 반복색인 r=1로 설정.

Step2

(26)식을 이용하여 $d_{ik}^{(j)}$ 를 계산.

(27)식을 가지고 $\mu_{ik}^{(j)}$ 를 계산.

Step3

$U = \mu_{ik}$ 로 설정한다.

만약 $\|U^{(r)} - U^{(r-1)}\| < \varepsilon_2$ 이면 멈춤.

그렇지 않다면 r=r+1을 하여 Step2를 실행.

그리하여 전체 퍼지규칙의 Membership function은 다음과 같다.

$$\beta_{ik} = \frac{w_{ik}}{\sum_{q=1}^c w_{qk}} \quad (28)$$

모든 θ_i 를 식 (29)에 의해 새롭게 정의 하면 $\hat{\theta}$ 로서 다음과 같다.

$$\hat{\theta} = [p_{10} \dots p_{c0} \ p_{11} \dots p_{c1} \dots p_{1M} \dots p_{cM}]^T \quad (29)$$

$$p_{i0} = b_i, p_{ij} = a_{ij}, j = 1, \dots, M, i = 1, \dots, c$$

그래서 k-th 출력은 다음과 같다.

$$\hat{y}_k = \varphi\theta = \sum_{i=1}^c \beta_{ik} \hat{y}_{ik} \quad (30)$$

$$= \sum_{i=1}^c \beta_{ik} (p_{i0} + p_{i1}x_{k1} + \dots + p_{iM}x_{kM})$$

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

그 후 Least square method에 근거하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\theta = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T Y \quad (31)$$

최종적으로 Training된 출력은 $Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_N]^T$ 이다.

2.5. 유도전동기 시스템 Simulation

유도전동기 파라미터는 표1과 같이 사용하였다.

표 1. 유도전동기의 파라미터
Table. 1 Parameter of IM

R_s	0.18 [Ω]
R_r	0.15 [Ω]
P	1
L_s	0.0699 [H]
L_r	0.0699 [H]
M	0.068 [H]
J	0.0586 [Kgm ²]

비선형 모델을 Identification한 후의 클러스터링 센터 v_{ij} 는 다음과 같다.

표 2. 클러스터 센터 v_{ij}
Table. 2 Cluster Center v_{ij}

	i	1	2	3	4
j	1	7.851	0.003	0.035	0.325
	2	9.245	0.002	0.027	0.195
	3	14.582	0	0.015	0.071
	4	17.958	0	0.015	0.002

Chirp signal 및 Sine signal을 이용하여 생성된 퍼지 모델에 대한 각각의 상태값(θ)는 다음과 같다.

$$\dot{x} = A_i x + B_i u$$

$$\dot{x}_1 = \begin{bmatrix} 1 & -95.83 & 2.168 \\ 1.003 & -10.845 & 0.587 \\ 1.005 & 0.75 & 0.008 \\ 1.005 & 0.64 & 0.007 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.254 \\ 0.125 \\ -0.009 \\ -0.010 \end{bmatrix} u$$

$$\dot{x}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1.747 & 0.002 \\ 0 & 1.867 & 0.001 \\ 0 & 1.765 & 0 \\ 0 & 1.794 & 0.004 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.010 \\ -0.010 \\ -0.010 \\ -0.010 \end{bmatrix} u$$

$$\dot{x}_3 = \begin{bmatrix} 0.002 & 15.258 & 0.195 \\ 0.001 & 0.042 & 0.068 \\ 0 & -0.269 & 0.985 \\ 0 & -0.303 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.324 \\ 0.001 \\ 0.001 \\ 0.001 \end{bmatrix} u$$

x_1, x_2, x_3 은 Id, Iq, Wn이며 Identification을 적용한 결과 각 상태의 parameter값의 추정 값을 알 수 있다.

Sin-Id, Sin-Iq, Sin-Wn은 비선형 모델에 Sine signal을 입력한 후의 결과 값을 나타내며, Est-Id, Est-Iq, Est-Wn은 T-S fuzzy Identification을 적용하여 비선형 모델을 선형 모델로 교체 후 Sine signal을 입력한 Training 출력된 결과 값이다.

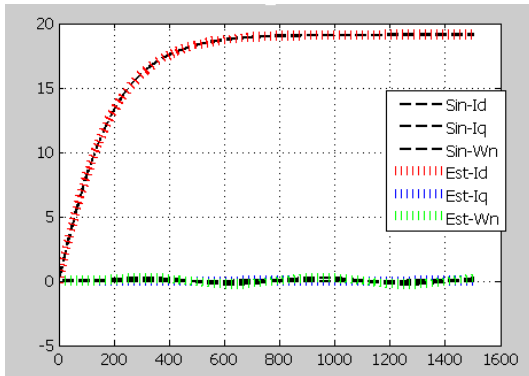


그림 1. Training 출력과 Non_linear 비교
Fig. 1 Contrast with Training output and Non_linear

[그림 1]을 보면 상태인 Id, Iq, Wn은 비선형 모델과 T-S Fuzzy Identification을 적용한 선형 모델은 거의 동일함을 알 수 있다.

[그림 1]을 바탕으로 비선형 모델 출력과 T-S Fuzzy Identification을 이용해 추정된 선형모델 출력 간의 오차 값을 구한 결과는 [그림2]와 같다.

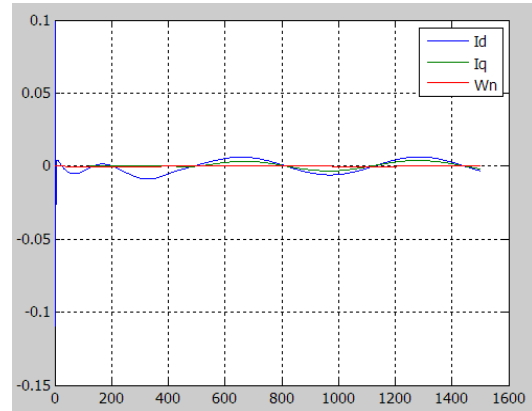


그림 2. Id, Iq, Wn 오차
Fig. 2 Id, Iq, Wn error

III. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 비선형 모델링 식을 제어기가 용이한 선형모델링 식으로 변환하기 위해 T-S Fuzzy Identification을 사용하였다. 이전의 T-S 퍼지 시스템은 비선형 모델링식의 Membership function과 퍼지 모델을 일련의 계산과정을 거쳐야지만 적용할 수 있었으며, 또한 rule의 개수가 많아질 때에는 상대적으로 제어하기 어려운 단점들이 있었다. 하지만 제안된 Identification을 적용하면 일련의 계산과정과 rule의 개수에 상관없이 비선형 모델을 쉽게 선형 모델로 만들 수 있는 특징을 가진다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 2단계 BK21 사업, 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03]의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Jean-Jacques E. Slotine, Applied Nonlinear Control, PRENTICE-HALL, New Jersey, 1991.
- [2] A. Isidori, Nonlinear Control Systems, An Introduction, New York, Springer-Verlag, 1985.
- [3] S. S. Sastry and A. Isidori, "Adaptive control of linearizable system," IEEE Transactions on Automatic Control, vol.AC-34, pp.1123-1131, 1989.
- [4] T. Takagi and M. Sugeno, Fuzzy identification of systems and its applicants to modeling and control", IEEE Trans. Syst., Man, Cybern, Vol.15, pp.116-132, Jan./Feb., 1985.
- [5] K. Tanaka and H. O. Wang, Fuzzy Control Systems Design and Analysis; A Linear Matrix Inequality Approach, JohnWiley&Sons, Inc., 2001.
- [6] C. H. Tseng, B. S. Che, and H. J. Using, "Fuzzy Tracking Control Design for Nonlinear Dynamic Systems via T-S Fuzzy Model", IEEE Trans. Fuzzy Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 381-392, June 2001
- [7] K. Tanaka, T. Ikeda, and H. O. Wang, "Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based design", IEEE Trans. Fuzzy Systems, Vol 6, pp.250-265, May 1998.
- [8] 김태규, 왕범광, 박승규, 윤태성, 안호균, 광균평, "T-S 퍼지모델을 이용한 이산 시간 비선형계통의 상태 궤환 선형화", 한국지능시스템학회, 19호, 865-871, 2009
- [9] Pao-Tsun Lin, Chi-Hsu Wang and Tsu-Tian Lee, "Time-Optimal Control of T-S Fuzzy Models via Lie Algebra," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 17, Issue. 4, pp. 737 - 749, 2009.
- [10] Ho Jae Lee, Hagbae Kim, Young Hoon Joo, Wook Chang and Jin Bae Park, "A new intelligent digital redesign for T-S fuzzy systems: global approach," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 12, Issue. 2, pp. 274 - 284, 2004.
- [11] Chia-Feng Juang and Cheng-Da Hsieh, "A Locally Recurrent Fuzzy Neural Network With Support Vector Regression for Dynamic- System Modeling," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 18, Issue. 2, pp.261 - 273, 2010.
- [12] Zhu, T.X., Tso, S.K. and Lo, K.L., "Wavelet-based fuzzy reasoning approach to power-quality disturbance recognition," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, Issue. 4, pp.1928 - 1935, 2004.
- [13] Moutinho, M.N., Da Costa, C.T. Barra, W. and Barreiros J.A.L., "Identification, digital control and fuzzy logic techniques applied to a synchronous generator," IEEE Latin America Transactions, vol. 7, Issue. 2, pp. 141 - 150, 2009.
- [14] Kung,C.C. and Su,J.Y., "Affine Takagi - Sugeno fuzzy modeling algorithm by fuzzy c-regression models clustering with a novel cluster validity criterion," IET Control Theory Appl., vol.1, pp. 1255 - 1265, 2007.
- [15] Chaoshun Li, Jianzhong Zhou, Xiuqiao Xiang, Qingqing Li, Xue li An, "T-S fuzzy model identification based on a novel fuzzy cregression model clustering algorithm," Engineering Applications of Artificial Intelligence vol. 22, pp. 646 - 653, 2009.
- [16] 이동광, 왕범광, 광균평, 박승규, "T-S Fuzzy모델에 기반한 유도전동기의 제어에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, 1796-1797, 2010
- [17] 이동광, 백승호, 광균평, 박승규, "T-S Fuzzy를 이용한 유도전동기의 Identification", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1856-1857, 2011

저자소개



이승택(Seung-Taek Lee)

2011 창원대학교 전기공학과 졸업 (공학사)

2011~현재 창원대학교 전기공학과 석사과정

※ 관심분야: 모션 제어, 모터 제어, T-S퍼지



이동광(Dong-Kwang Lee)

2010 창원대학교 전기공학과 졸업
(공학사)
2012 창원대학교 전기공학과 졸업
(공학석사)

※ 관심분야: 모션 제어, 강인제어, T-S퍼지



윤태성(Tae-sung Yoon)

1978 연세대학교 전기공학과 졸업
(공학사)
1980 연세대학교 전기공학과 졸업
(공학석사)

1988 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)
1994~1995 미국 Vanderbilt대 visiting professor
1989~현재 창원대학교 전기공학과 교수

※ 관심분야: 퍼지제어, 신경회로망, 신호처리



안호균(Ho-Kyun Ahn)

1981 고려대학교 전기공학과 졸업
(공학사)
1989 고려대학교 전기공학과 졸업
(공학석사)

1992 고려대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)
1992~현재 창원대학교 전기공학 교수

※ 관심분야: 전력전자, 모션제어, 대체에너지



곽군평(Gun-Pyong Kwak)

1982 고려대학교 전기공학과 졸업
(공학사)
1985 고려대학교 전기공학과 졸업
(공학석사)

1990 고려대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)
1990~1997 LG산전 연구소 CNC팀 팀장
1998~현재 창원대학교 전기공학과 교수

※ 관심분야: 강인제어, 슬라이딩모드제어, 모션제어



박승규(Seung-Kyu Park)

1984 고려대학교 전기공학과 졸업
(공학사)
1986 고려대학교 전기공학과 졸업
(공학석사)

1990 고려대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)
1995~1996 영국 Starthclyde대 visiting scholar
2003~2004 미국 Wisconsin대 visiting professor
1989~현재 창원대학교 전기공학과 교수

※ 관심분야: 퍼지제어, 강인제어, 비선형제어



안중건(Jong-Keon Ahn)

1988 경북대학교 전자공학과 졸업
(공학사)
1989 창원대학교 전기공학과 졸업
(공학석사)

1988~1994 LS산전 연구소
1995~2000 삼성중공업기전 연구소
2003~현재 (주)인더스콘 대표이사

※ 관심분야: 전동기 및 발전기