

## T-S Fuzzy Modeling of Synchronous Generator in a Power System

李熙鎭\* · 白承默\*\* · 朴正旭†  
(Hee-Jin Lee · Seung-Mook Baek · Jung-Wook Park)

**Abstract** - The dynamic behavior of power systems is affected by the interactions between linear and nonlinear components. To analyze those complicated power systems, the linear approaches have been widely used so far. Especially, a synchronous generator has been designed by using linear models and traditional techniques. However, due to its wide operating range, complex dynamics, transient performances, and its nonlinearities, it cannot be accurately modeled as linear methods based on small-signal analysis. This paper describes an application of the Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy method to model the synchronous generator in a single-machine infinite bus (SMIB) system. The T-S fuzzy model can provide a highly nonlinear functional relation with a comparatively small number of fuzzy rules. The simulation results show that the proposed T-S fuzzy modeling captures all dynamic characteristics for the synchronous generator, which are exactly same as those by the conventional modeling method.

**Key Words** : LMI, Nonlinearity, Power system, Synchronous generator, T-S fuzzy

### 1. 서 론

사회가 복잡해지고 발전함에 따라 부하가 증가하고, 설비가 늘어나 전력계통의 규모가 커지고 동작점이 광대역화 되고 있다. 또한 거대화된 전력계통 안에서 각각의 구성요소들이 유기적으로 연동되어 운전되므로 일부에서의 사고가 전체 시스템에 심각한 문제를 야기할 수도 있다. 그 결과 정상상태에서의 운전뿐만 아니라, 고장이나 외란의 발생시 계통의 동적인 안정성을 유지하는 것이 점점 중요한 문제가 되고 있다. 외란의 크기는 계통 해석을 위해 선형화 방법의 적용이 가능하면 소규모 외란이라 하고, 그 외의 경우를 대규모 외란이라 한다. 하지만 대규모 외란의 경우, 직접적으로 시스템을 해석하기 어렵기 때문에 몇가지 가정을 세워 선형화 분석을 통해 전력계통의 안정도를 해석하는 방법이 일반적으로 사용되어져 왔다. 선형화 분석은 해석의 편의성은 존재하지만 광역 운전점에서 전압이 크게 변하거나 큰 상정사고가 발생할 경우, 해석의 정확도가 떨어지는 문제점이 있다.

한편, Takagi-Sugeno(T-S) 퍼지모델링은 IF-THEN 규칙을 사용하여, 비선형 시스템을 어떤 일정범위 안에서 선형 입출력 관계로 설정하여 시스템의 해석을 가능하게 한다 [1]~[9]. 이 범위는 기존의 선형화 방법들에서 가졌던 미소 범위보다 넓어 광역 운전점에서 전압이 크게 변하거나, 큰

상정사고가 발생하였을 경우에도 시스템의 정보의 손실 없이 전역에서 동일한 특성을 갖는 모델링이 가능하다[10]. 또한, Lyapunov condition을 적용하였을 때 선형행렬부등식 (Linear Matrix Inequality)을 이용하여 쉽게 안정도 해석을 할 수 있다. T-S 퍼지모델링 기법은 선형화로 인한 해석의 편리성이라는 장점과 비선형 시스템 해석기법의 정확성이라는 장점을 모두 가지고 있으며, 비선형 시스템 분석방법의 단점인 초기조건이나 상정사고의 종류 등에 따라 해석 결과가 달라지는 문제를 해결할 수 있다. 또한 시스템의 안정도 해석과 제어기 설계의 문제를 선형행렬부등식의 문제로 변형할 수 있기 때문에 해석이 편리하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 국내의 최초로 T-S 퍼지모델링 기법을 전력시스템 동기발전기 모델링에 적용하여 성능평가를 하려고 한다. 먼저, 도립전자에 적용한 예를 바탕으로 비선형 시스템에 대한 T-S 퍼지모델링의 정확성을 확인한 후, 전력계통에 적용하기 위하여 가장 기본적이고 확장성이 용이한 7차 동기발전기 일기무한모선(Single-machine Infinite Bus) 시스템 모델을 선정하였다. 시스템의 운전점 변화에 상응하는 전압변동과 큰 상정사고가 발생했을 때 발전기의 동작을 살펴보기 위하여 두가지 상황을 가정하여 모의실험을 하였다. 첫번째는 무한모선으로 들어가는 전력량을 조절하기 위하여 계자전압을 조절하였을 때 단자전압이 변하는 모습을 관찰하는 것이고, 두번째는 전송선로에 3상지락사고 발생시켜 동기발전기 회전자의 위상각 변화를 살펴보는 것이다. 최종적으로 비선형 모델과 T-S 퍼지모델의 모의실험 결과를 비교하여 전력시스템에 적용한 T-S 퍼지모델링의 유효성을 확인한다.

\* 學生會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 工學碩博士課程  
 \*\* 學生會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 工學博士課程  
 † 교신저자, 正會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 助教授 · 工博  
 E-mail : jungpark@yonsei.ac.kr  
 接受日字 : 2008年 3月 24日  
 最終完了 : 2008年 8月 13日

## 2. T-S Fuzzy 모델링기법

### 2.1 Takagi-Sugeno 퍼지 모델

대규모 외란이 발생하였을 때 시스템 안정도 해석을 보다 정확히 하기 위해서는 기존의 선형화 모델과 다른 새로운 모델이 필요하다. 여기서는 비선형 특성을 해석할 수 있는 다음과 같은 T-S 퍼지모델을 고려한다. 퍼지시스템은 IF-THEN 규칙의 결합으로 구성되어 있다.

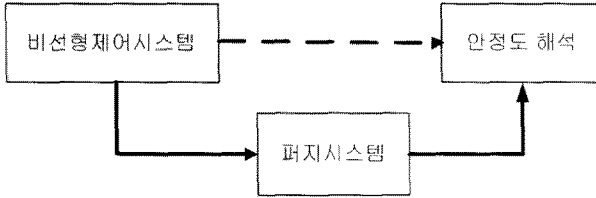


그림 1 T-S 퍼지모델링의 접근방법

Fig. 1 Approach based on the T-S fuzzy modeling

비선형제어시스템의 안정도 해석을 위하여 그림 1과 같은 접근 방법으로 비선형시스템을 T-S 퍼지로 모델링한다. 전통적으로 T-S 퍼지 모델은 아래와 같이 IF-THEN 규칙을 이용하여 표현 된다.

Model Rule  $i$ :

IF  $z_1(t)$  is  $M_{i1}$  and  $\dots$  and  $z_p(t)$  is  $M_{ip}$ ,

THEN  $\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \\ y(t) = C_i x(t), \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r.$

여기서  $M_{ij}$ 는 비선형 변수  $z_i(t)$ 가 변형되는 Fuzzy set 이고  $r$ 은 모델 물의 개수를 의미한다.  $x(t) \in R^n$ 은 상태벡터,  $u(t) \in R^m$ 은 입력벡터,  $y(t) \in R^q$ 는 출력벡터이다. 각각의 행렬은  $A_i \in R^{n \times n}$ ,  $B_i \in R^{n \times m}$ ,  $C_i \in R^{q \times n}$  차원에 속해있다. 모델규칙  $i$ 는 퍼지의  $i$  번째 규칙,  $z_i(t)$ 는  $i$  번째 비선형 변수를 의미한다.  $z_1(t), \dots, z_p(t)$ 는 비선형 변수로 상태변수들로 구성된 값이다. 각각의 선형방정식  $A_i x(t) + B_i u(t)$ 는 종속시스템이고, 전역 동특성은 식(1)과 같이 표현된다[10].

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \\ &= \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\} \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서 사용된 변수는 식(2)에 정리되어있으며, 주어진 식은 모든 시간  $t$ 에 대해서 성립한다.

$$z(t) = [z_1(t) \quad z_2(t) \quad \dots \quad z_p(t)]$$

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_j^i(z_j(t))$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) > 0 \\ w_i(z(t)) \geq 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r$$

$$h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \quad (2)$$

다시,  $M_j^i(z_j(t))$ 는  $z_j(t)$ 에 대한 Fuzzy set이다. 식(1)과 (2)로부터 퍼지합의 계수  $h_i(z(t))$ 에 대한 조건 식(3)이 성립함을 알 수 있다.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1 \\ h_i(z(t)) \geq 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (3)$$

### 2.2 시스템 안정도 조건

T-S 퍼지모델의 안정도 해석 및 제어기 설계를 위해서 Lyapunov안정도 조건을 이용한다. 시스템 해석에 사용되는 Lyapunov함수  $V = x^T P x$ 를 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \quad (4)$$

여기서 위의 (1)식을 (4)식에 적용하기 위해서 다음과 같은 Parallel distributed compensation(PDC)를 고려한다.

$$u = \sum_{i=1}^r h_i K_i x \quad (5)$$

이를 (1)의 식에 대입하여 정리하면 아래와 같은 시스템 함수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^r h_i \{A_i x + B_i u(t)\} \\ &= \sum_{i=1}^r h_i \left\{ A_i x + B_i \left( \sum_{j=1}^r h_j K_j x \right) \right\} \\ &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j (A_i + B_i K_j) x \end{aligned} \quad (6)$$

위에서 구한 식(6)을 식(4)에 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j x^T (A_i + B_i K_j) P x \\ &\quad + x^T P \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j (A_i + B_i K_j) x \\ &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i h_j x^T \{ (A_i + B_i K_j)^T P + P (A_i + B_i K_j) \} x \end{aligned}$$

Lyapunov의 안정도 조건은  $\dot{V} < 0$  이므로 위의 식에 적용하면 식(3)에 의해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$(A_i + B_i K_j)^T P + P (A_i + B_i K_j) < 0 \quad (7)$$

따라서 선형행렬부등식  $\dot{V} < 0$ 을 만족시키는 positive definite 행렬 P와  $K_j$ 가 존재하면 시스템을 안정화시킬 수 있는 제어를 설계할 수 있다. 결과적으로 전력시스템에 T-S 퍼지모델을 적용하면 시스템 안정도 해석문제가 선형행렬부등식의 문제로 바뀌기 때문에 비선형 제어 시스템 설계가 가능하다[2].

### 2.3 사례연구 : 독립진자 시스템

퍼지모델링의 간단한 예제로 그림 2에 나타나있는 직류전동기로 제어되는 독립진자 시스템에 T-S퍼지를 적용시켜보도록 하겠다[11]. 직류전동기는 전압으로 제어되고, 전동기의 관성은 진자의 관성과 비교하여 무시할만하다고 가정한다. 직류전동기는 그림 3과 같이 모델링 될 수 있으며, 직류전동기에서 제공하는 토크는 식(8)과 같다.

$$T_m = K_m I \quad (8)$$

이때 기어비(10:1)에 의해 진자에 전달되는 토크의 크기는 식(9)와 같다.

$$T_p = 10 T_m = 10 K_m I \quad (9)$$

그림 3의 회로도에서 키르히호프 법칙을 적용하면 식(10)을 얻을 수 있다.

$$V = L\dot{I} + RI + K_b 10\dot{\theta} \quad (10)$$

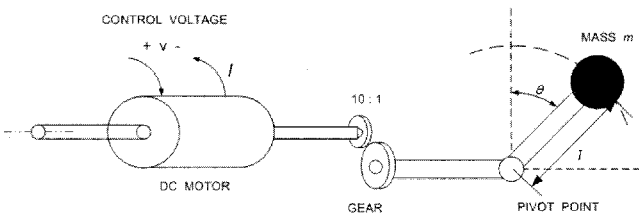


그림 2 직류전동기로 제어되는 독립진자  
Fig. 2 Inverted pendulum controlled by a DC motor

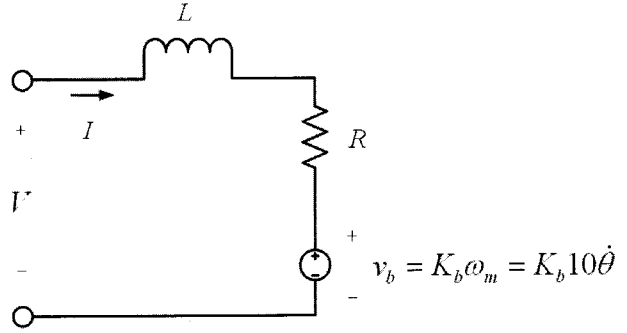


그림 3 직류전동기의 제어 모델  
Fig. 3 Model of an armature-controlled DC motor

진자에 작용하는 운동 토크는 운동에너지에 대한 토크와 중력에 대한 토크의 합으로 식(11)과 같이 정의된다. 여기서, 음(-)의 부호는 운동에너지에 대한 토크가 중력과 반대 방향으로 정의된 것을 의미한다.

$$T_p = -l^2 m \dot{\theta} + l m g \sin \theta \quad (11)$$

상태변수를 아래와 같이  $x_1$ 은 진자의 각도,  $x_2$ 는 진자의 각속도,  $x_3$ 는 모터로 흘러들어오는 전류의 크기로 설정한다.

$$x_1 = \theta, \quad x_2 = \dot{\theta} = \omega, \quad x_3 = I$$

식(8)~(11)을 통하여, 식(12)와 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

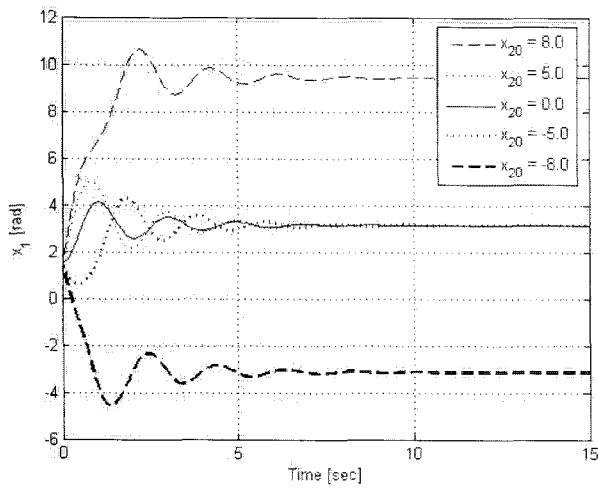
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{g}{l} \sin x_1 + \frac{10 K_m}{l^2 m} x_3 \\ -\frac{10 K_b}{L} x_2 - \frac{R}{L} x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u \quad (12)$$

여기서 각 시스템상수( $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ )를 아래와 같이 정의하면 식(12)는 식(13)과 같이 간단히 정리된다.

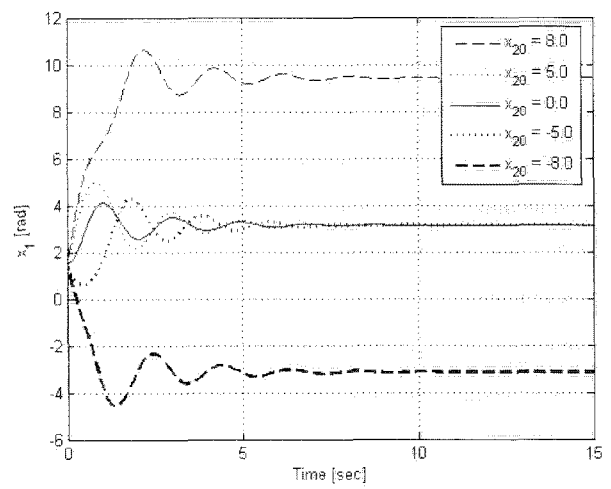
$$K_1 = \frac{g}{l}, \quad K_2 = \frac{10 K_m}{l^2 m}, \quad K_3 = -\frac{10 K_b}{L}, \quad K_4 = -\frac{R}{L}, \quad K_5 = \frac{1}{L}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ K_1 \sin x_1 + K_2 x_3 \\ K_3 x_2 + K_4 x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_5 \end{bmatrix} u \quad (13)$$

이때  $u$ 는 독립진자의 제어 신호이지만, 본 논문에서는 제어를 감안하지 않기 때문에 제어입력  $u$ 의 값은 0이다 [12]. 모의실험을 위하여  $l=1\text{m}$ ,  $m=1\text{kg}$ ,  $g=9.8\text{m/s}^2$ ,  $J=1\text{Nm s}^2/\text{rad}$ ,  $K_m=0.1\text{Nm/A}$ ,  $K_b=0.1\text{Vs/rad}$ ,  $R=1\Omega$ ,



(a)



(b)

그림 4 진자의 위치 ( $u=0, x_1=1.5, x_3=10$ ) (a) 비선형 모델 (b) 퍼지 모델

Fig. 4 Pendulum position ( $u=0, x_1=1.5, x_3=10$ ) (a) Nonlinear model (b) Fuzzy model

$L=100\text{mH}$ 와 같이 설정하여 시스템 상수값을 구하면 아래 표 1과 같다.

표 1 도립진자 모델의 상수값

Table 1 Constant values of the inverted pendulum

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$
9.8	1.0	-10	-10	10

식(13)에서 비선형항( $\sin x_1$ )이 1개이기 때문에 모델규칙 ( $r = 2^n$ ,  $n$ 은 비선형항의 개수)에 의해서 두 개의 시스템행렬로 분리가 된다. 퍼지모델로 변환을 하기 위하여 식(13)을  $\dot{x} = Ax + Bu$  꼴로 바꾸면 식(14)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ K_1 \frac{\sin x_1}{x_1} & 0 & K_2 \\ 0 & K_3 & K_4 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_5 \end{bmatrix} u \quad (14)$$

여기서  $X$ 는  $[x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ 이다. 식(14)의 비선형 항인  $\frac{\sin x_1}{x_1}$  대신에 임의의 값  $M_1$  또는  $M_2$ 를 넣고 두가지 경우에 대해 각각의 시스템행렬을 구하면 식(15)와 같다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ K_1 M_1 & 0 & K_2 \\ 0 & K_3 & K_4 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ K_1 M_2 & 0 & K_2 \\ 0 & K_3 & K_4 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_5 \end{bmatrix}, \quad C_1 = C_2 = [1 \ 0 \ 0] \quad (15)$$

위의 식(14)는 T-S 퍼지모델을 적용하기 위한 기본 식이 되며, T-S 퍼지모델링시 식(15)와 같이 선형행렬로 분리가 된다. 여기에 IF-THEN 규칙을 적용하여 기술하면 다음과 같다.

**Inverted Pendulum Model Rule**

IF  $x_1(t)$  is  $M_1$   
 THEN  $\begin{cases} \dot{x}(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) \\ y(t) = C_1 x(t) \end{cases}$   
 IF  $x_2(t)$  is  $M_2$   
 THEN  $\begin{cases} \dot{x}(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t) \\ y(t) = C_2 x(t) \end{cases}$

도립진자 시스템에 대한 비선형 상태방정식인 식(10)과 동일한 특성을 갖는 T-S 퍼지모델이 되기 위해서는 식(1)~(3)에 의해 식(16)과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^2 h_i(x) A_i x = h_1 A_1 x + h_2 A_2 x, \quad h_1 + h_2 = 1 \quad (16)$$

식(16)에 식(15)의 값을 대입하여 정리하면 식(17)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 h_1 K_1 M_1 + h_2 K_1 M_2 &= K_1 \frac{\sin x_1}{x_1} \\
 h_1 M_1 + (1 - h_1) M_2 &= \frac{\sin x_1}{x_1} \\
 h_1 (M_1 - M_2) + M_2 &= \frac{\sin x_1}{x_1} \\
 h_1 &= \frac{\frac{\sin x_1}{x_1} - M_2}{M_1 - M_2} \quad (17)
 \end{aligned}$$

식(17)은 어떤  $M_1, M_2$ 에 대해서 항상 성립하므로, 편의상  $M_1 + M_2 = 1, M_1 = 1, M_2 = 0$  로 설정하면 식(18)과 같은 관계함수값을 구할 수 있다.

$$h_1 = \frac{\sin x_1}{x_1}, \quad h_2 = 1 - h_1 \quad (18)$$

그림 4는 직류전동기로 제어되는 도립진자의 시스템에서 진자의 초기 각속도( $x_{20}$ )에 대한 진자의 위치( $x_1$ )를 시간축에 대해서 보여주고 있다. 그림 4(a)는 식(13)을 이용한 비선형 모델로, 진자의 각도가 진자의 초기 각속도에 따라 각기 다른 위치에서 안정화됨을 알 수 있다. 그림 4(b)는 식(15), (16), (18)을 이용한 퍼지모델로 동일한 진자의 초기 각속도에 대해 비선형 모델과 동일한 궤적을 따라 움직임을 확인할 수 있다. 따라서 본 예제에 대한 T-S 퍼지 모델링이 유효함을 알 수 있다.

### 3. 동기발전기 모델링 적용

#### 3.1 동기발전기 모델링 개요

그림 5는 일기무한모선 시스템을 보여주고 있다. 일기무한모선 시스템은 전력계통을 해석하는데 가장 많이 사용되며, 이에 대한 해석은 쉽게 다단계계통으로 확장될 수 있다 [13]. 본 논문에서는 국내의 최초로 일기무한모선 시스템의 비선형 7차 동기발전기 모델링을 위해 T-S 퍼지기법을 적용하였으며, 여기서 사용된 변수는 동기발전기의 전류, 속도, 회전자 각도로 설정하였다[14], [15]. 정상상태에서 동기발전기는 그림 6의 페이저 다이어그램과 같이  $d-q$ 축 방정식을 이용하여 표현할 수 있다[16], [17].

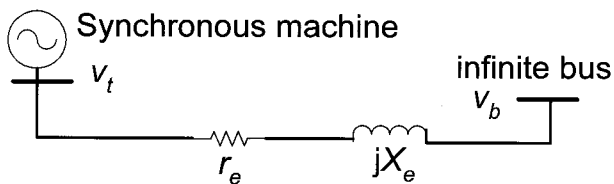


그림 5 일기무한모선 시스템  
Fig. 5 Single-machine infinite bus(SMIB) system

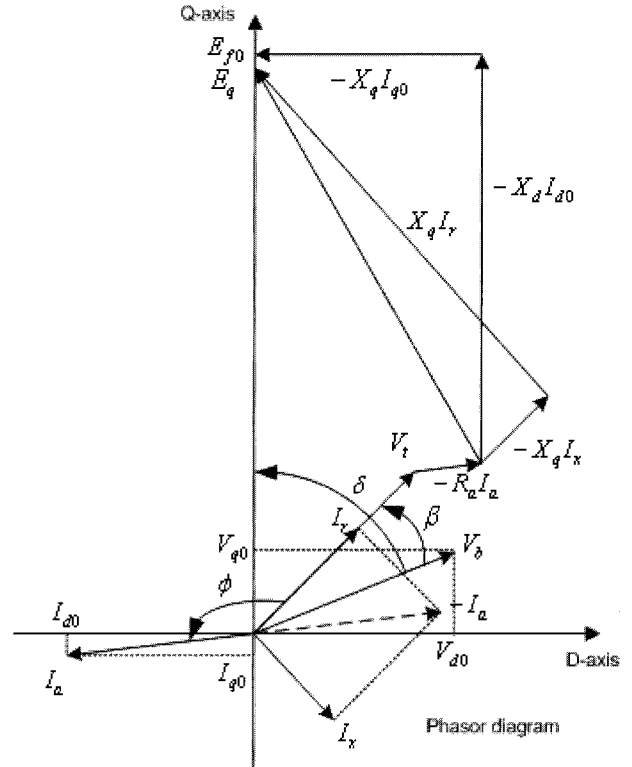


그림 6 일기무한모선 시스템의 정상상태 페이저 다이어그램  
Fig. 6 Steady-state phasor diagram of the SMIB system

그림 6의 페이저 다이어그램을 이용하여 동기발전기를 모델링하면 5차의 식(19)~(23)을 얻을 수 있다. 여기서, 식(19)와 (20)은 무한모선의 전압  $V_d, V_q$ 와 발전기에서 출력되는 전류인  $i_d, i_q$ 에 대한 식이고, (21)은 동기발전기의 회전자 전압( $V_f$ )과 전류( $i_f$ )에 관한 식이다. 식(22)와 (23)은 동기발전기가 과도상태에서 동작할 때 발생하는 댐핑을 줄여주는 역할을 하는  $d-q$ 축 댐핑권선에 대한 식이다[17].

$$V_d = R_a i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - w\lambda_q \quad (19)$$

$$V_q = R_a i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + w\lambda_d \quad (20)$$

$$V_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (21)$$

$$V_{kd} = 0 = R_{kd} i_{kd} + \frac{d\lambda_{kd}}{dt} \quad (22)$$

$$V_{kq} = 0 = R_{kq} i_{kq} + \frac{d\lambda_{kq}}{dt} \quad (23)$$

이때  $\lambda_d, \lambda_q, \lambda_f, \lambda_{kd}, \lambda_{kq}$ 의 값은 해당 전류에 의해 유도되는 자속을 나타내며 아래의 식(24)와 같이 정의할 수 있다.

$$\lambda_d = L_d i_d + L_{md} i_f + L_{md} i_{kd}$$

$$\begin{aligned}
 \lambda_f &= L_{md}\dot{i}_d + L_{ff}\dot{i}_f + L_{md}\dot{i}_{kd} \\
 \lambda_{kd} &= L_{md}\dot{i}_d + L_{md}\dot{i}_f + L_{kkd}\dot{i}_{kd} \\
 \lambda_q &= L_q\dot{i}_q + L_{md}\dot{i}_{kq} \\
 \lambda_{kq} &= L_{mq}\dot{i}_q + L_{kkq}\dot{i}_{kq}
 \end{aligned} \tag{24}$$

그 외 세부적인 변수 및 파라미터에 대한 설명은 다음과 같다.

- $i_d$  : Park변환 후 고정자에 유도되는 전류의  $d$ 축 값
- $i_q$  : Park변환 후 고정자에 유도되는 전류의  $q$ 축 값
- $i_f$  : 계자전류
- $i_{kd}$  : 댐퍼 권선에 유도되는 전류의  $d$ 축 값
- $i_{kq}$  : 댐퍼 권선에 유도되는 전류의  $q$ 축 값
- $\delta$  : 회전자의 각도
- $w$  : 회전자의 회전 각속도
- $w_0$  : 회전자 속도의 동기속도 값
- $V_{f0}$  : 계자전압의 초기값
- $V_{kd0}$  :  $d$ 축 댐퍼권선에 걸리는 전압의 초기값
- $V_{kq0}$  :  $q$ 축 댐퍼권선에 걸리는 전압의 초기값
- $R_a$  : 전기자 저항
- $R_f$  : 계자저항
- $R_e$  : 전송선로의 저항
- $R_{kd}$  :  $d$ 축 댐퍼권선의 저항
- $R_{kq}$  :  $q$ 축 댐퍼권선의 저항
- $X_d$  :  $d$ 축 리액턴스
- $X_q$  :  $q$ 축 리액턴스
- $X_{md}$  :  $d$ 축 상호리액턴스
- $X_{mq}$  :  $q$ 축 상호리액턴스
- $X_{ff}$  :  $X_f + X_{md}$
- $X_{kkd}$  :  $X_{kd} + X_{md}$
- $X_{kkq}$  :  $X_{kq} + X_{md}$

아래의 식(25)는 동요방정식을 나타내며, 여기서  $\delta$ 는 회전자의 각도이고 무한모션에서의 값을 기준으로 삼는다.  $w_0$ 는 정상상태에서의 동기속도이고,  $T_s$ 와  $T_e$ 는 터빈에서 공급되는 토크와 발전기에 작용하는 전자기적 토크이다. 그리고  $J$ 는 관성상수를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \frac{d\delta}{dt} &= w - w_0 \\
 \frac{dw}{dt} &= \frac{1}{J}(T_s - T_e) \\
 T_e &= \left(-\frac{w_0}{2}\right)[i_d\dot{i}_q(L_d - L_q) + i_f\dot{i}_qL_{md} + i_q\dot{i}_{kd}L_{md} - L_{mq}\dot{i}_{kq}\dot{i}_d]
 \end{aligned} \tag{25}$$

### 3.2 T-S 퍼지모델링 적용

T-S 퍼지모델링 기법을 적용하기 위해서는 앞에서 설명한 식(19)~(25)의 식을 식(26)과 같은 상태방정식으로 나타내어야 한다. 위에서 언급되었듯이, 여기서 사용되는 상태변수  $x$ 를 식(27)과 같이 각 전류의 크기와 회전자의 각도, 회전자의 속도로 설정한다. 본 논문에서는 제어기 설계를 다루지 않으므로 입력  $u$ 의 제어전압의 크기는 상수로 식(28)과 같이 정상상태의 값으로 설정한다. 식(19)~(23)에 식(24)를 대입하여 상태변수  $x$ 에 관해 정리하면,  $\dot{x} = -M_2^{-1}M_1x + M_2^{-1}M_3u$ 와 같은 5차 상태방정식을 얻을 수 있다. 여기서  $M_1$ ,  $M_2$  및  $M_3$ 는 식(29)에 제시되어진다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{26}$$

$$x = [i_d \ i_q \ i_f \ i_{kd} \ i_{kq} \ \delta \ w]^T \tag{27}$$

$$u = [1 \ 1 \ V_{f0} \ V_{kd0} \ V_{kq0} \ 1 \ 1]^T \tag{28}$$

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \begin{bmatrix} R_a - w\frac{X_q}{w_0} & 0 & 0 & -w\frac{X_{mq}}{w_0} \\ w\frac{X_d}{w_0} & R_a & w\frac{X_{md}}{w_0} & w\frac{X_{md}}{w_0} & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix}, \\
 M_2 &= \frac{1}{w_0} \begin{bmatrix} X_d & 0 & X_{md} & X_{md} & 0 \\ 0 & X_q & 0 & 0 & X_{mq} \\ X_{md} & 0 & X_{ff} & X_{md} & 0 \\ X_{md} & 0 & X_{md} & X_{kkd} & 0 \\ 0 & X_{mq} & 0 & 0 & X_{kkq} \end{bmatrix}, \\
 M_3 &= \begin{bmatrix} \sqrt{2} V_b \sin \delta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2} V_b \cos \delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{29}$$

여기에 식(25)의 동요방정식을 더하여 정리하면 식(30)에 나타나있는 7차 시스템행렬  $A$ 와  $B$ 를 얻을 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} & & & & & & 0 \\ & & & & & & 0 \\ & & & & & & 0 \\ & & & & & & 0 \\ & & & & & & 0 \\ & & & & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2J}X_{md}\dot{i}_q & \frac{1}{2J}X_{md}\dot{i}_q & -\frac{1}{2J}X_{mq}\dot{i}_d & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

표 2 일기무한모션시스템의 퍼지모델 상수

Table 2 Fuzzy model parameters of the SMIB system

비선형변수	비선형변수의 값		Membership function	
	최대값	최소값	최대값	최소값
$i_d$	$M_1^1 = i_{dmax}$	$M_1^2 = i_{dmin}$	$\Gamma_1^1 = \frac{id - M_1^2}{M_1^1 - M_1^2}$	$\Gamma_1^2 = \frac{M_1^1 - id}{M_1^1 - M_1^2}$
$i_q$	$M_2^1 = i_{qmax}$	$M_2^2 = i_{qmin}$	$\Gamma_2^1 = \frac{iq - M_2^2}{M_2^1 - M_2^2}$	$\Gamma_2^2 = \frac{M_2^1 - iq}{M_2^1 - M_2^2}$
$w$	$M_3^1 = w_{max}$	$M_3^2 = w_{min}$	$\Gamma_3^1 = \frac{w - M_3^2}{M_3^1 - M_3^2}$	$\Gamma_3^2 = \frac{M_3^1 - w}{M_3^1 - M_3^2}$
$\sin\delta$	$M_4^1 = 1$	$M_4^2 = 0$	$\Gamma_4^1 = \sin\delta$	$\Gamma_4^2 = 1 - \Gamma_4^1$
$\cos\delta$	$M_5^1 = 1$	$M_5^2 = 0$	$\Gamma_5^1 = \cos\delta$	$\Gamma_5^2 = 1 - \Gamma_5^1$

$$B = \begin{bmatrix} & & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 \\ & M_2^{-1}M_3 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 - w_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T_s}{J} \end{bmatrix} \quad (30)$$

일기무한모션의 시스템행렬 식(30)에서 비선형변수가 5개 ( $i_d, i_q, w, \sin\delta, \cos\delta$ )이기 때문에 모델규칙에 의해서 32개의 선형 시스템행렬로 분리가 된다. 퍼지 변환전의 비선형 시스템 식(26)은 식(31)과 같은 규칙을 통해 퍼지함으로 표현된다. 분리된 행렬의 비선형변수 자리에 표 2의 비선형변수의 값이 들어가게 되며, 비선형변수의 유효 범위를 사용자가 임의로 설정할 수 있다. 각각의 비선형변수마다 2개의 값을 가지며 본 논문에서는 최대값과 최소값으로 정의한다. 비선형변수의 값이 최대값일 경우 비선형계수  $h_i$ 를 구성하는 Membership function의 값도 최대값이 된다. 아래에 제시된 모델규칙의 정의대로 시스템을 구성하면, 32개의 서로 다른 시스템행렬과  $h_i$ 를 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^{32} h_i(A_i x + B_i u), \quad 0 \leq h_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^{32} h_i = 1 \quad (31)$$

표 2의 값을 이용하여 식(31)을 통해 일기무한모션시스템을 IF-THEN 규칙으로 작성하면 다음과 같다.

**SMIB Model Rule**

IF  $i_d$  is  $M_1^1$ ,  $i_q$  is  $M_2^1$ ,  $w$  is  $M_3^1$ ,  $\sin\delta$  is  $M_4^1$  and  $\cos\delta$  is  $M_5^1$

THEN  $\dot{x} = A_1 x + B_1 u$ ,  $h_1 = \Gamma_1^1 \times \Gamma_2^1 \times \Gamma_3^1 \times \Gamma_4^1 \times \Gamma_5^1$

IF  $i_d$  is  $M_1^1$ ,  $i_q$  is  $M_2^1$ ,  $w$  is  $M_3^1$ ,  $\sin\delta$  is  $M_4^1$  and  $\cos\delta$  is  $M_5^2$

THEN  $\dot{x} = A_2 x + B_2 u$ ,  $h_2 = \Gamma_1^1 \times \Gamma_2^1 \times \Gamma_3^1 \times \Gamma_4^1 \times \Gamma_5^2$

⋮  
⋮  
⋮

IF  $i_d$  is  $M_1^2$ ,  $i_q$  is  $M_2^2$ ,  $w$  is  $M_3^2$ ,  $\sin\delta$  is  $M_4^2$  and  $\cos\delta$  is  $M_5^2$

THEN  $\dot{x} = A_{32} x + B_{32} u$ ,  $h_{32} = \Gamma_1^2 \times \Gamma_2^2 \times \Gamma_3^2 \times \Gamma_4^2 \times \Gamma_5^2$

예를 들어 위의 IF-THEN 규칙 중, 선형행렬  $A_1$ 을 구하기 위해서는 식(30)의 행렬  $A$ 에 존재하는 상태변수의 값  $i_d$ 의 자리에  $M_1^1$ 의 값인  $i_{dmax}$ 를,  $i_q$ 의 자리에  $M_2^1$ 의 값인  $i_{qmax}$ 를,  $w$  자리에  $M_3^1$ 의 값인  $w_{max}$ 를 넣는다. 선형행렬  $B_1$ 을 구하기 위해서는 식(30)의 행렬  $B$ 에 존재하는 상태변수의 값  $\sin\delta$ 의 자리에  $M_4^1$ 의 값인 1을,  $\cos\delta$ 의 자리에  $M_5^1$ 의 값인 0을 넣는다. 비선형 변수가 5개이고 각 변수에 대해 값이 2개이므로 이들의 조합으로 32개의 선형  $A_i, B_i$ 행렬을 구할 수 있다.

한편 이때의  $h_1$ 의 값은 식(32)와 같이 상태변수들의 곱으로 이루어져있다.

$$h_1 = \frac{id - M_1^2}{M_1^1 - M_1^2} \times \frac{iq - M_2^2}{M_2^1 - M_2^2} \times \frac{w - M_3^2}{M_3^1 - M_3^2} \times \sin\delta \times \cos\delta \quad (32)$$

여기서도 Membership function들의 조합으로 32개의 비선형계수  $h_i$ 를 얻을 수 있다. 이때 식(31)의 조건  $0 \leq h_i \leq 1$ 에 의하여  $\sin\delta, \cos\delta$ 가 동시에 양의 값을 가져야 하므로 동기발전기의 회전자의 각도( $\delta$ )는 다음과 같은 범위 내에서 존재 하여야 한다.

$$0 \leq \delta \leq \pi/2 \quad (33)$$

위의 조건을 벗어날 경우 T-S 퍼지모델은 성립하지 않는다.

### 3.3 모의실험 결과 및 검증

일기무한모션 시스템의 T-S 퍼지모델링의 유효성을 판별하기 위해서는 비선형 모델과 T-S 퍼지모델이 동일한 동적 특성을 갖는지 비교하여야 한다. 이를 위해 표 3의 시스템 상수값을 가지고 모의실험을 수행하였다.

표 3 일기무한모션시스템 모델의 상수값  
Table 3 Constant values of the SMIB system

Parameter	Value	Parameter	Value
$f_e$	60	$R_a$	0.022
$X_{md}$	1.86	$R_f$	0.00107
$X_{mq}$	1.86	$R_{kd}$	0.00318
$X_a$	0.18	$R_{kq}$	0.00318
$X_f$	0.14	$R_e$	0.02
$X_{lf}$	0.14	$X_e$	0.4
$X_{kd}$	0.04	$X_d$	2.04
$X_{kq}$	0.04	$X_q$	2.04
$H$	5.3	$X_{ff}$	2
$w_0$	$120\pi$	$X_{kkd}$	1.9
$J$	$2H/w_0$	$X_{kkq}$	1.9

본 논문은 T-S 퍼지모델링을 통하여 동기발전기의 단자전압이 특정 운전점에서 계단 방식으로 변화할때와 전송선로에 큰 사고가 발생했을 때에도 유효한 모델링을 하는 것이 목표이므로 다음과 같은 두가지 상황을 가정하여 모의실험을 한다. 첫 번째는 전력시스템의 운전점 변화시 동적특성을 보기위하여 계자전압의 기준값이 계단식으로 바뀔 때 동기발전기의 단자전압이 변하는 모습을 관찰하는 것이고, 두 번째는 큰 상정사고에 대한 시스템의 동적특성을 확인하기 위하여 전송선로에 3상지락사고 발생시켜 동기발전기 회

전자의 위상각의 변화를 살펴보는 것이다. 구체적으로 다음의 두가지 경우를 상정하여 모의실험을 수행하였다.

- 5초에서  $V_{f0}$ 의 기준값의  $\pm 5\%$  계단증가 및 감소
- 전송선로에서 0.1초간  $V_b$ 에 3상지락사고 발생

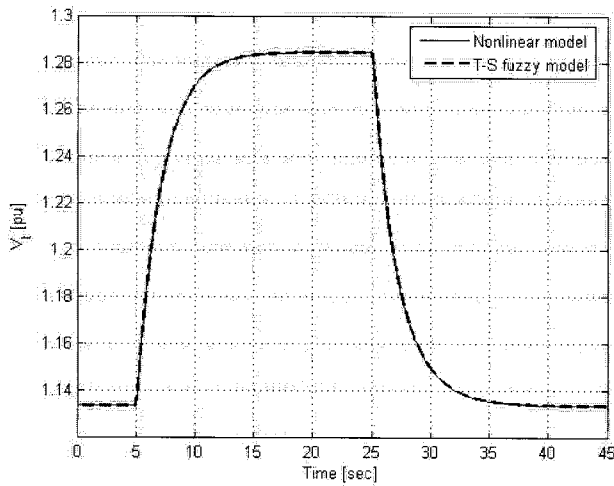
그림 7(a)는 계자전압을 변화시켰을 때 동기발전기의 단자전압이 변하는 모습을 보여주고 있다. 5초에서 계자전압을 증가시켰을 때 단자전압이 따라서 증가하고, 25초에서 계자전압을 초기치의 값으로 되돌리면서 단자전압이 초기치 값으로 돌아오는 것을 확인할 수 있다. 이때 실선으로 표현되는 비선형 모델과 점선으로 표현되는 T-S 퍼지모델이 동일한 경로를 따라 움직임을 확인할 수 있다. 이를 통하여 동기발전기가 특정 운전점에서 다른 운전점으로 변동될 때 T-S 퍼지모델의 유효성을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 무한모션에 0.1초간 3상지락사고를 상정한 모의실험의 결과이다. 사고가 발생하면 시스템이 불안정해지기 때문에 위와 같이 뎀핑이 발생한다. 또한 회전자의 각도의 움직임이 식(33)에서 제시된 T-S 퍼지모델의 제약조건 하에서 실선으로 표현되는 비선형 모델과 점선으로 표현되는 T-S 퍼지모델이 동일한 경로를 따라 움직임을 확인할 수 있다. 이를 통하여 큰 상정사고에서도 T-S 퍼지모델의 유효성을 확인할 수 있다. 모의실험 결과 그림 7(a)와 7(b)에서 비선형 모델의 실선과 T-S 퍼지모델의 점선이 완전히 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서 일기무한모션의 동기발전기 모델링을 위해 적용된 T-S 퍼지기법의 유효성이 검증되었다.

### 4. 결 론

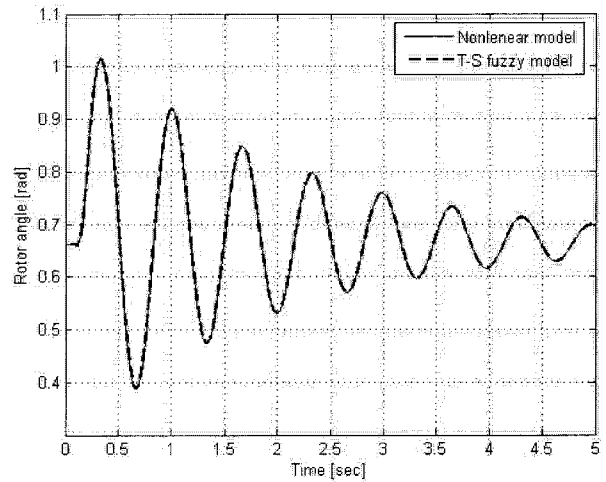
동기발전기의 광범위한 동작범위와 복잡한 동적특성, 비선형성에 의하여 기존의 선형 모델을 이용한 전력시스템의 안정도 해석은 전력시스템의 비선형 특성을 정확하게 반영하지 못한다는 단점이 있었다. 반면에 T-S 퍼지모델을 동기발전기 모델에 적용할 경우 기존의 선형화 방법들에서 사용되었던 미소 범위보다 넓은 광역 운전점에서 시스템의 정보의 손실 없이 전역에서 동일한 특성을 갖는 모델링이 가능하다. 또한, Lyapunov condition을 적용하였을 때 선형행렬 부동식을 이용하여 쉽게 안정도 해석을 할 수 있는 장점이 있다. 결과적으로 비선형 모델의 특징을 동일하게 반영하기 때문에 선형화모델 보다 정확한 안정도 해석 결과를 얻을 수 있다. 이러한 장점에도 불구하고 T-S 퍼지 모델링 기법에는 식(33)에서 제시된 제약조건이 존재한다. 이 조건으로 인해 T-S 퍼지 모델링 기법은 앞에서 제시한 도립전자예제와 같은 단순한 시스템에 적용되어져 왔고 전력계통과 같은 복잡한 시스템에는 사용되어지지 못하였다.

본 논문에서는 비선형 일기무한모션 시스템의 안정도 해석을 위하여 T-S 퍼지기법을 적용하여 동기발전기를 새롭게 모델링하였다. 적용한 모델의 유효성을 확인하기 위해 두가지 조건을 가정하여 모의실험을 하였다. 첫 번째는 여자전압이 변동하였을 때 단자전압의 움직임을 관찰하였고, 두 번째는 무한모션에서의 3상지락사고가 발생하였을 때 동





(a)



(b)

그림 7 모의실험 결과

(a)  $V_{f0}$ 의 계단변화에 대한 단자전압( $V_t$ ) 응답 (b) 0.1초 3상지락사고시 회전자의 위상각 변화

Fig. 7 Simulation results

(a) The step response of terminal voltage corresponding to  $V_{f0}$  (b) Rotor angle response when a 100 ms three-phase short-circuit fault is applied

기발전기의 회전자 각도의 변화를 살펴보았다. 모의실험 결과 비선형 모델과 T-S 퍼지모델이 동일한 궤적을 따라 움직이는 것을 확인하였고, 이를 통하여 제안하는 동기발전기의 T-S 퍼지모델링이 성공하였음을 확인할 수 있었다. 향후 동기발전기의 T-S 퍼지모델을 사용하여 앞의 2.2에서 제시한 PDC 제어기 설계기법을 이용하면 비선형 시스템의 안정도 해석과 제어기 설계문제의 해결방안을 제시할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 산하 한국에너지자원기술기 획평가원 지원 대학전력연구센터사업을 통한 연세대학교 계통적용 신전력기기 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Kazuo. Tanaka and M. Sugeno, "Stability analysis and design of fuzzy control systems", Fuzzy Sets System, Vol. 45, pp. 136-156, 1992.
- [2] Kazuo Tanaka, Takayuki Ikeda, Hua O. Wang, "Fuzzy Regulators and Fuzzy Observers: Relaxed Stability Conditions and LMI-Based Designs", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 6, No. 2, May 1998.
- [3] Feng Zheng and Qing-Guo Wang, "Robust PI Controller Design for Nonlinear Systems via Fuzzy Modeling Approach", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 31, no.6, pp.666-675, 2001.
- [4] E. Kim and D. Kim, "Stability analysis and synthesis for an affine fuzzy system via LMI and ILMI: Discrete case", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 31, pp.132-140, Feb. 2001.
- [5] E. Kim and S. Kim, "Stability analysis and synthesis for an affine fuzzy system via LMI and ILMI: a continuous case", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 10, pp.391-400, June 2002.
- [6] E. Kim, M. Park and S. Ji, "A new approach to fuzzy modeling", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 5, pp.328-337, Aug 1997.
- [7] F. Cuesta, F. Gordillo, J. Aracil, and A. Ollero, "Stability analysis of nonlinear multivariable Takagi-Sugeno fuzzy control systems", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 7, pp.508-520, Oct. 1999.
- [8] Gang Feng, "Stability analysis of discrete-time fuzzy dynamic systems based on piecewise Lyapunov functions", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 12, pp.22-28, Feb. 2004.
- [9] Chang-Woo Park, Chang-Ho Hyun, Min-Sick Park, Chang-Hun Lee, Jaehun Kim and Mignon Park, "Control of uncertain flexible joint manipulator using adaptive Takagi-Sugeno fuzzy model based controller", IEEE International Conference, Robotics and Automation, Proceedings 2001 ICRA, Vol. 1, pp.985-990 2001.

[10] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 15, no.1, pp.116-132, 1985.

[11] S. H. Zak and C. A. Maccarley, "State-Feedback Control of Nonlinear Systems", International Journal of Control, Vol. 43, No. 5, 1986.

[12] S. Kawamoto, et. al., "Nonlinear Control and Rigorous Stability Analysis Based on Fuzzy System for Inverted Pendulum," In Proc. of FUZZ-IEEE 96, Vol. 2, 1996.

[13] Prabha Kundur, Power system stability and Control, EPRI Editors, McGraw-Hill, Inc. 1993.

[14] P. W. Sauer and M. A. Pai, Power System Dynamics and Stability, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1998.

[15] P. M. Anderson and A. A. Fouad, Power System Control and Stability. New York: IEEE Press, 1994.

[16] Hadi Saadat, Power System Analysis, Second Edition, McGraw-Hill, Inc. 2004, ISBN 007-123955-3.

[17] J. W. Park, G. K. Venayagamoorthy and R. G. Harley, "MLP/RBF Neural-Networks-Based Online Global Model Identification of Synchronous Generator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 6, Dec. 2005.



**박정욱 (朴正旭)**

1999년 연세대 전기공학과 졸업. 2003년 미국 Georgia Institute of Technology 전기컴퓨터공학부 졸업(공학). 2003년~2004년 미국 University of Wisconsin-Madison 박사후 전임연구원. 2004년~2005년 LG전자 선임연구원. 2005년~현재 연세대 전기전자공학부 조교수  
 Tel : 02-2123-5867  
 Fax : 02-313-2879  
 E-mail : jungpark@yonsei.ac.kr

**저 자 소 개**



**이희진 (李熙鎭)**

2008년 연세대 전기전자공학부 졸업.  
 2008년~현재 동 대학원 전기전자공학부 석·박사 통합 과정  
 Tel : 02-2123-7842  
 E-mail : rineze@yonsei.ac.kr



**백승묵 (白承默)**

2006년 연세대 전기전자공학부 졸업.  
 2007년 동대학원 전기전자공학부 졸업(석사) 2007년~현재 동 대학원 전기전자공학부 박사 과정  
 Tel : 02-2123-7839  
 E-mail : sm\_baek@yonsei.ac.kr