

## Taylor 모델을 사용한 전력계통의 안정화

(Power System Stabilizer Using Taylor Model)

김호찬\* · 김세호

(Ho - Chan Kim · Se - Ho Kim)

### 요 약

제안한 Taylor 모델 개념은 단지 입출력 데이터만을 이용하여 제어기를 설계하기 위해 사용되는데, Taylor 모델의 매개변수는 입출력 데이터들을 사용하여 추정되고 제어기는 Taylor 모델을 통하여 얻어진다. Taylor 모델 근사화의 정확성은 관측창의 크기와 Taylor 모델의 차수가 커짐에 따라 좋아진다. Taylor 모델을 이용한 전력계통의 안정화를 위해 LQR 제어기가 제안되고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 기존의 방법과의 성능을 비교한다.

### Abstract

The Taylor model concept is introduced to design a controller with input and output data only. The parameters in Taylor model can be estimated using the input and output data and a controller can be designed based on Taylor model. The accuracy of Taylor model approximation can be improved by increasing the observation window and the order of Taylor model. The LQR method is applied to Taylor model to design power system stabilizers (PSS), and compared with the conventional PSS.

Key Words : Taylor model, Intelligent control, Power system stabilization, Linear quadratic regulator

### 1. 서 론

전력계통 제어의 주 목적은 모든 소비자에게 전기를 공급하는데 있어 부하 변동에 관계없이 안정된 주파수와 전압을 제공하기 위함이다. 소비자들은 전력계통이 광범위한 라인, 케이블 그리고 변압기 네트워크로 구성되어 있고 전력은 먼 거리에 있는 발전소에서 공급된다는 사실에도 불구하고 믿을 수 있

고 안전한 전기 에너지 공급을 기대한다. 전통적으로, 대부분의 제어기들은 계통과 그 계통의 선형화된 모델의 수학적 기술에 바탕을 두고 설계된다. 따라서 수학적 모델에 바탕을 둔 제어기들을 실제의 시스템, 특히 전력계통과 같은 복잡하고 비선형 시스템에 적용하기는 어렵다.

본 논문에서는 입출력 데이터만을 사용하여 시스템식별을 위한 Taylor 모델 (Taylor model) 개념과 전력계통 안정화 장치 (power system stabilizer, PSS)에의 적용방법에 대해 살펴본다. Taylor 모델 개념은 단지 입력과 출력 데이터를 이용하여 미지의 동적 시스템을 대상으로 제어기를 설계하는 새로운 지능시스템 설계기법으로 생각할 수 있으며 시스템

\* 주저자 : 제주대학교 전기전자공학부 부교수

Tel : 064-754-3676, Fax : 064-756-5281

E-mail : hckim@cheju.ac.kr

접수일자 : 2003년 7월 14일

1차심사 : 2003년 7월 21일

심사완료 : 2003년 8월 22일

조명 · 전기설비학회논문지 제17권 제5호, 2003년 9월

## Taylor 모델을 사용한 전력계통의 안정화

식별을 위한 수학적 모델은 필요하지 않는다. Taylor 모델은 Taylor 급수로부터 유도할 수 있는데 위치, 속도 및 가속도와 같은 데이터를 이용하여 시스템의 출력을 쉽게 예측할 수 있다. Taylor 모델에서의 매개변수는 입출력 데이터를 이용하여 계산되고 제어기는 이런 Taylor 모델에 기초하여 설계된다. 제어기 설계를 위해서 Taylor 모델은 선형 상태공간 모델 (state space model)로 변형되고 LQR (linear quadratic regulator)에 의해 안정화된다. Taylor 모델의 정확성은 예측을 위한 관측창 (observation window)의 크기와 Taylor 모델의 차수를 증가시킴으로써 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 제안한 방법의 실현 가능성을 살펴 보기 위해 1기무한대모선 전력계통을 대상으로 TMBPSS (Taylor model based PSS)와 CPSS (conventional PSS)의 성능을 비교하였다. 비록 선형 상태공간 모델이 제어기 설계를 위해 사용되었지만, TMBPSS는 여러 가지의 부하조건과 주변환선의 정전 혹은 3상 지락 사고와 같은 계통 사고에 대해 강인성 (robust)을 보여준다.

## 2. 전력계통의 모델링

과도 안정성 (transient stability)은 발전 또는 변환 시설의 손실, 갑작스럽거나 지속적인 부하 변화 혹은 계통 사고로부터 초래된 주 왜란동안 동기속도를 유지하기 위한 전력계통의 적응성에 관련된 정보를 제공해주는데, 특히 전력계통에서 기기의 속도와 토오크의 변화와 전압, 선전류와 전력의 변동에 대한 것을 알려준다 [1]. 과도 안정성 해석은 미분방정식의 해를 통해 네트워크간의 관계를 나타내는 대수 방정식을 조합함으로써 수행될 수 있다 [1,2]. 네트워크 방정식의 해를 통해 각 시스템의 특성을 파악할 수 있으므로, 전력계통의 모델링을 통해 과도상태 동안의 시스템의 전압과 전류에 관한 정보를 얻을 수 있다. 동적 전력계통 해석에서, 고정자 (stator)와 네트워크 방정식은 대수방정식으로 주어지고, q축 및 d-q축 발전기 (generator) 모델은 수정된 전력 흐름 방정식으로 나타낼 수 있다 [1,2].

## 3. Taylor 모델

다음과 같은 비선형 시불변 이산시간 시스템을 고려하자.

$$\begin{aligned} y(k+1) &= f(y(k), y(k-1), \dots, y(k-N), \\ &u(k), u(k-1), \dots, u(k-M)) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $y(k-i)$ 와  $u(k-j)$ ,  $i=0, 1, \dots, N$ ,  $j=0, 1, \dots, M$ 는 각각 지연된 입력과 출력 신호들을 나타낸다. 식 (1)에서 나타난 지연된 신호들을 다음과 같은 후진 차분 연산자(backward difference operator) [3,4]를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta^n f(k) &= \Delta^{n-1} f(k) - \Delta^{n-1} f(k-1), n \geq 1 \\ \Delta^0 f(k) &= f(k) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 차분 연산자를 이용하여 이산시간 시스템 (1)을 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y(k+1) &= f(y(k), \Delta y(k), \dots, \Delta^N y(k), u(k), \\ &u(k-1), \Delta u(k-1), \dots, \Delta^M u(k-1)) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 1차 Taylor 급수로 확장하여 나타내면

$$\begin{aligned} y(k+1) &= f(y(k), \Delta y(k), \dots, \Delta^N y(k), u(k), \\ &u(k-1), \Delta u(k-1), \dots, \Delta^M u(k-1)) \\ &= y(k) + \sum_{i=1}^N a_i \Delta^i y(k) + b_0 \Delta u(k) \\ &\quad + \sum_{i=1}^M b_i \Delta^i u(k-1) + O(k) \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 여기서,  $a_i = \frac{\partial f}{\partial \Delta^i y(k-1)}$ ,  $b_0 = \frac{\partial f}{\partial u(k-1)}$ .

$b_i = \frac{\partial f}{\partial \Delta^i u(k-2)}$  이고  $O(k)$ 는 고차항을 나타낸다. 식 (4)에서  $y(k)$ 를 좌변으로 이동하면

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= \sum_{i=1}^N a_i \Delta^i y(k) + b_0 \Delta u(k) \\ &\quad + \sum_{i=1}^M b_i \Delta^i u(k-1) + O(k) \end{aligned}$$

인데, 여기서 고차항  $O(k)$ 을 무시하면, Taylor 모델은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta \hat{y}(k+1) = \sum_{i=1}^N a_i \Delta^i y(k) + b_0 \Delta u(k) + \sum_{i=1}^M b_i \Delta^i u(k-1) \quad (5a)$$

또는  $\Delta$ 으로 양변을 나누면

$$\hat{y}(k+1) = \sum_{i=1}^N a_i \Delta^{i-1} y(k) + b_0 u(k) + \sum_{i=1}^M b_i \Delta^{i-1} u(k-1) \quad (5b)$$

이다. 여기서  $N$ 과  $M$ 은 각각 입력과 출력을 위한 Taylor 모델의 차수이다. Taylor 모델은 위의 두 가지 형태로 공식화할 수 있다. 일반적으로 Taylor 모델 차수는  $N=M$ 으로 가정하고 매개변수  $a_i, b_0, b_i$ 는 최소자승법 (least squares method)등을 이용하여 결정할 수 있다 [3,4,5]. 최소자승 문제는 다음과 같은 목적함수 (object function)  $J$ 를 최소화하는 것이다.

$$J = \min \sum_{i=1}^M (y(k-i+1) - \hat{y}(k-i+1))^2 \quad (6)$$

여기서  $y$ 와  $\hat{y}$ 은 각각 플랜트 출력과 계산된 Taylor 모델의 출력을 나타낸다. 식 (6)을 최소화시키는 Taylor 모델의 매개변수들은 다음의 관계식에서 구할 수 있다 [3,4,5].

$$\bar{Y} = \bar{P} \bar{X}, \quad \bar{P} = [P_1 \ P_2] \quad (7)$$

여기서

$$P_1 = \begin{bmatrix} \Delta^0 y(k) & \cdots & \Delta^{N-1} y(k) \\ \vdots & & \vdots \\ \Delta^0 y(k-n) & \cdots & \Delta^{N-1} y(k-n) \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} u(k) & \Delta^0 u(k-1) & \cdots & \Delta^N u(k-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u(k-n) & \Delta^0 u(k-n-1) & \cdots & \Delta^N u(k-n-1) \end{bmatrix}$$

그리고  $\bar{P} \in R^{[(n+1) \times (2N+1)]}$ 이고

$$X = [a_1 \ \dots \ a_N \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_N]^T \in R^{[(2N+1) \times 1]}$$

$$\bar{Y} = [y(k+1) \ \dots \ y(k+1-n)]^T \in R^{[(n+1) \times 1]}$$

이다. 이때  $N$ 은 Taylor 모델의 차수이고  $n$ 은 매개변수를 구하기 위해 사용된 데이터의 수를 나타낸다. 이때 Taylor 모델의 매개변수  $\bar{X}$ 는 다음 식으로부터 얻어진다.

$$\bar{X} = (\bar{P}^T \bar{P})^{-1} \bar{P}^T \bar{Y} \quad (8)$$

#### 4. 상태공간 모델과 LQR 제어기

Taylor 모델을 상태공간 모델로 나타낼 수 있으면 기존의 제어기 설계방법을 쉽게 적용할 수 있다. 본 논문에서는 Taylor 모델을 LQR에 적용한 TMBOC (Taylor model based optimal controller) 제어기를 설계하도록 한다. 먼저 Taylor 모델을 선형 상태공간 모델로 변환하기 위해 다음과 같은 선형 변환이 소개되고 다음으로 LQR 설계 방법이 적용된다 [6,7]. 상태변수를 다음과 같이 정의하자.

$$x_1(k) = \Delta y(k)$$

$$x_2(k) = \Delta^2 y(k) + \beta_1 \Delta u(k-1)$$

$$x_3(k) = \Delta^3 y(k) + \beta_2 \Delta u(k-1) + \beta_1 \Delta^2 u(k-1)$$

$$\vdots$$

$$x_N(k) = \Delta^N y(k) + \beta_{N-1} \Delta u(k-1) + \beta_1 \Delta^{N-1} u(k-1) \quad (9)$$

식 (9)에서 정의된 상태변수를 사용하면 Taylor 모델은 다음과 같은 선형 상태공간 모델로 나타낼 수 있다.

$$x(k+1) = Ax(k) + B \Delta u(k)$$

$$\Delta y(k) = Cx(k) \quad (10)$$

여기서

Taylor 모델을 사용한 전력계통의 안정화

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_N \\ a_1 - 1 & a_2 & \cdots & a_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1 - 1 & a_2 - 1 & \cdots & a_N \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_0 + \beta_1 \\ \vdots \\ b_0 + \beta_1 + \dots + \beta_{N-1} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$$

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 & a_3 & \cdots & a_N \\ a_3 & a_4 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_N & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{N-1} \end{bmatrix}$$

이다. 식 (10)에서 입력 및 출력 쌍인  $(u(k), y(k))$ 와  $(\Delta u(k), \Delta y(k))$ 는 같은 변환 함수를 가지므로 제어입력  $u(k)$ 를 구하기 위한 제어기는 Taylor 모델의 상태공간 모델  $(A, B, C)$ 로부터 설계할 수 있다.

본 논문에서는 전력계통 안정화를 위해 제어기를 LQR을 이용하여 설계한다. LQR 설계는 목적함수의 값을 최소화시키면서 시스템의 초기상태에서부터 최종상태까지 변환할 수 있는 최적제어  $u$ 를 결정하는 것이다. 목적함수는 다음과 같은 2차식의 형태로 주어진다.

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (x^T(k) Q(k) x(k) + u^T(k) R(k) u(k))$$

여기서  $Q(k)$ 는 양의 반 정부호 (positive semidefinite)이고  $R(k)$ 는 양의 정부호 (positive definite)이다. LQR 제어기를 설계하기 위해서, 첫 번째 단계는 중요한 행렬  $Q, R$ 을 선택하는 것이다.  $R$  값은 시스템의 상태보다 제어 입력에 더 비중을 두도록 조절하는 반면에  $Q$ 는 입력보다 상태에 더 많은 비중을 두도록 한다. 케환 이득  $K$ 는 다음과 같이 계산되어질 수 있으며 페루프 시스템 응답은 시뮬레이션을 통해 찾을 수 있다. LQR 제어기는 다음과 같이 주어진다.

$$u(k) = -Kx(k) \quad (11)$$

여기서  $K$ 는 다음과 같은 이산 대수 Ricatti 방정식의 해로부터 얻어진 케환 이득 상수이다.

$$K = (B^T S B + R)^{-1} B^T S A$$

$$S = A^T S A - A^T S B K + (C^T Q C)$$

## 5. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서는 제안한 TMBPSS의 타당성을 검증하기 위하여 선정된 계통전력은 일반적으로 많이 인용되고 있는 1기무한대모선 (one machine infinite bus, OMIB) 계통에서의 전력계통 안정화 장치를 선정하였다 [8]. 본 모델은 전형적인 비선형 시스템이며 외란이 존재하며 q축 발전기 모델, 정적여자기 (static excitation), 터빈과 조속기 (governor) 모델로 구성된다 [1,8,9,10]. 본 논문에서는 발전기 회전자 각속도편차를 출력변수로 선정하여 전력계통 안정화 장치를 설계하였다. 그림 1은 일반적인 부하 조건하에서의 계통 출력과 Taylor 모델 출력의 차이를 보여준다. 샘플링 시간은 0.01[sec]이고 첫 번째 100개의 샘플을 사용하여 2차 Taylor 모델의 매개변수를 최소자승법을 사용하여 다음과 같이 추정하였다:

$$a_1 = 0.9961, \quad a_2 = 0.9987, \quad b_0 = 2.7261 \times 10^{-4},$$

$$b_1 = -3.3148 \times 10^{-4}.$$

Taylor 모델이 실제 전력계통을 얼마나 정확하게 모델링하였는지를 살펴보기 위하여, 오차 (error)의 실효값 (root mean square, rms)은 다음과 같이 정의한다.

$$Error = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y(i) - \hat{y}(i))^2} \quad (12)$$

여기서  $n$ 은 샘플링한 숫자이고  $y(i)$ 와  $\hat{y}(i)$ 는 각각 전력계통 출력과 Taylor 모델 출력을 나타낸다. 표 1은 여러 가지의 Taylor 모델 차수에 대한 에러와 데이터 값을 보여준다. 오차의 실효값은 Taylor 모델의 차수와 데이터 값이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

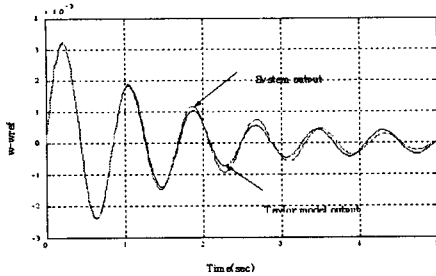


그림 1. 전력계통 출력과 Taylor 모델 출력  
 Fig. 1. Comparison between the system output and the Taylor model output (data  $n=100$ , order  $N=2$ )

표 1. Taylor 모델에 대한 실효치 오차  
 Table 1. rms error of Taylor model ( $\times 10^{-4}$ )

	Data	N=2	N=3	N=3	N=4
Case a	100	1.0030	0.9690	0.8440	0.7870
Case b	180	0.2674	0.2593	0.2464	0.2459
Case c	260	0.2334	0.2270	0.2221	0.2218
Case d	340	0.2230	0.2172	0.2148	0.2146
Case e	420	0.2186	0.2130	0.2115	0.2114

또한 Taylor 모델은 중부하 (heavy load)와 3상 사고 (three phase fault)와 같은 운전 조건하에서 시험하여 보았다. Taylor 모델을 이용하는 주된 목적이 그 자체의 간단함 (simplicity)이기 때문에, 표 1에서 가장 간단한 조건에서, 즉 Taylor 모델은 차수가  $N=2$ 이고 데이터의 개수가  $n=100$ , 제어기를 설계하도록 하였다. 2차 Taylor 모델에  $R=0.000475$ 와  $Q=1$ 의 값을 갖는 LQR를 적용하였다. 일반적인 부하 조건하에서, 계산된 최적 이득은  $K=[-44.0 \quad -2154.9]$  이다.

그림 2, 3과 4는 Taylor 모델에 기초한 전력계통 안정화 장치 (TMBPSS)의 응답과 기존의 PSS (CPSS)의 응답을 나타내고 있다. 그림 2는 일반적인 부하 조건하에서  $-10\%$ 에 의한 토오크각 편차 (torque angle deviation)가 존재할 때의 결과이고, 그림 3은 중부하 조건하에서의 같은 토오크각 편차가 존재할 때 결과이다. 그리고 그림 4는 3상 사고 조건하에서의 응답을 보여준다. 3가지 경우 모두 TMBPSS가 CPSS 보다 훨씬 우수한 성능을 보여주는 것을 볼 수 있다.

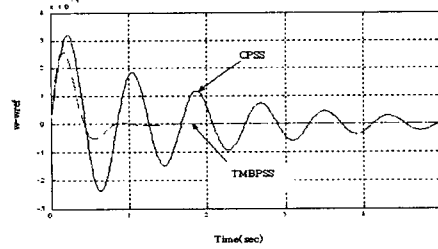


그림 2. 정상적인 부하에서 CPSS와 TMBPSS 출력  
 Fig. 2. Outputs of the CPSS and TMBPSS in the normal loading condition

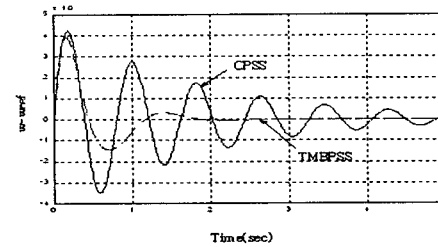


그림 3. 중부하 조건하에서 CPSS와 TMBPSS 출력  
 Fig. 3. Outputs of the CPSS and TMBPSS in the heavy loading condition

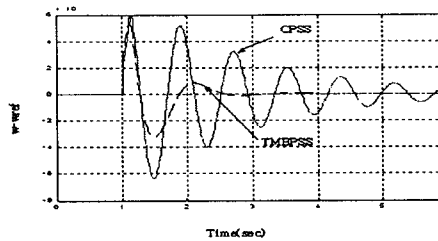


그림 4. 3상사고 조건하에서 CPSS와 TMBPSS 출력  
 Fig. 4. Outputs of the CPSS and TMBPSS in the three-phase fault condition

## 6. Taylor 모델의 견실성

위에서 얻어진 시뮬레이션 결과는 여러 가지 조건 중에서 한 경우가 잘못된 상황을 다루었다. 그러나 여러 가지 운전 조건을 갖는 모든 경우에 대해서 동작 가능한 제어기를 설계하는 것이 바람직하다. 이를 위해, 일반적인 부하 조건에서 설계된 TMBPSS 제어기를 중부하 조건과 3상 단락 사고가 발생한 경우에 적용하였다. 그림 5와 6은 제안한

## Taylor 모델을 사용한 전력계통의 안정화

TMBPSS의 강인성을 보여준다. 그림 5에서 응답 ①은 중부하 조건하에서 설계된 TMBPSS를 나타내고 응답 ②는 일반적인 부하 조건하에서 설계된 TMBPSS 경우를 나타내는 결과이다. 또한 그림 6에서 응답 ①은 3상사고 조건하에서 설계된 TMBPSS를 나타내고 응답 ②는 일반적인 부하 조건하에서 설계된 TMBPSS 경우를 나타내는 결과이다. 이 두 경우로부터, Taylor 모델은 여러 가지 운전 조건에 대해 강인할 수 있다는 것을 보여준다.

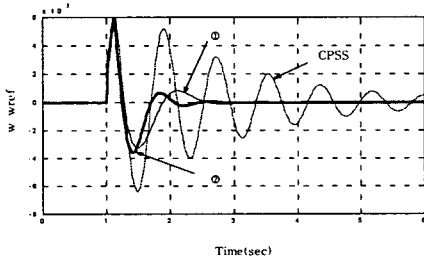


그림 5. 중부하 조건하에서 TMBPSS 견실성  
Fig. 5. Robustness of the TMBPSS for heavy loading condition

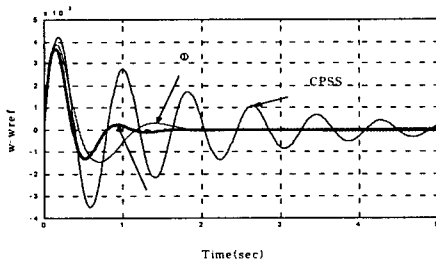


그림 6. 3상사고 조건하에서 TMBPSS 견실성  
Fig. 6. Robustness of the TMBPSS for three-phase fault condition

## 7. 결 론

본 논문에서는 시스템 식별을 위한 Taylor 모델 개념을 살펴보고 전력계통 안정화 장치 (PSS)를 설계할 때 적용하기 위한 방법을 제시하였다. Taylor 모델 개념은 단지 입력과 출력 데이터를 갖는 미지의 동적 계통에서 제어를 설계하기 위한 새로운 지능시스템 설계기법으로 제시하였는데 제안한 방법은 시스템 해석을 위한 수학적인 지식을 필요로 하지 않는다. Taylor 모델은 선형 상태공간 모델로 변형되고 LQR 방법을 이용하여 안정한 PSS 설계를

위해 사용되었다. 측정된 매개변수에 대해 Taylor 모델의 차수가 증가하고 관측창이 확대됨에 따라 Taylor 모델의 정확성이 대략 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나, Taylor 모델의 간단함을 유지하기 위해 낮은 차수의 Taylor 모델과 비교적 적은 관측창이 TMBPSS를 설계하는데 사용되었다.

제안된 TMBPSS는 1기무한대모선 전력계통에 적용하여 다양한 운전 조건하에서 시험되었고 기존의 PSS와 비교하였다. 그 결과 모든 경우에 있어서 TMBPSS는 기존의 PSS보다 우수한 수행능력을 보였다.

## References

- [1] P.W. Sauer and M.A. Pai, Power System Dynamics and Stability, Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [2] G.W. Stagg and A.H. El-Abiad, Computer Methods in Power Systems Analysis, McGraw Hill, Inc., 1968.
- [3] C. Phillips and H.T. Nagle, Digital Control System Analysis and Design, Prentice Hall, 1997.
- [4] K. Ogata, 1995. Discrete-time Control System, Prentice Hall.
- [5] P.J. Afsaklis and A.M. Michel, Linear System, McGraw-Hill, Inc. 1997.
- [6] Y.N. Yu, K. Vongsuriya, and L.N. Wedman, "Application of an optimal control theory to a power system," IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-89, no. 1, pp. 55-62 1970.
- [7] B.D.O. Anderson and J.B. Moore Linear Optimal Control, Prentice Hall, New Jersey, 1990.
- [8] Y.N. Yu, Electric Power System Dynamics, Academic Press, New York 1983.
- [9] K.N. Srivastava and S.C. Srivastava, "Application of Hopf bifurcation theory for determining critical value of a generator control or load parameter," Int. J. Elec. Power Energy Syst., vol. 19, no. 8, pp. 535-540, 1997.
- [10] E.V. Larsen and D.A. Swann, "Applying power system stabilizers: Part 1-3," IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-100, no. 6, pp. 3017-3046, 1981.

## APPENDIX

기무한대모선 전력계통 [8]

(One machine infinite bus (OMIB) power system)

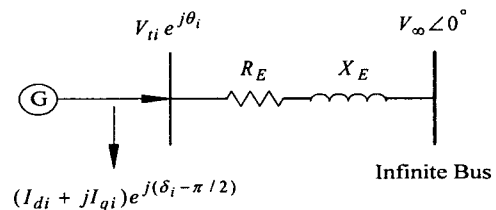


그림 A. 1. 1기무한대모선 전력계통  
Fig. A. 1. One machine infinite bus power system

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_b(\omega_i - \omega_0)$$

$$M_i \frac{d\omega_i}{dt} = (T_{Mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - \omega_0))$$

$$T'_{doi} \frac{dE'_{qi}}{dt} = (E_{fdi} - E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di})I_{di})$$

$$T_{Ai} \frac{dE_{fdi}}{dt} = (K_{Ai}(V_{refi} - V_i + C_{psi}) - E_{fdi})$$

$$T_{Ci} \frac{dT_{Mi}}{dt} = (F_{hpi} U_{gi} - T_{Mi} + T_{Mri})$$

$$T_{gi} \frac{dU_{gi}}{dt} = (K_{gi}(\omega_{refi} - \omega_i) - U_{gi})$$

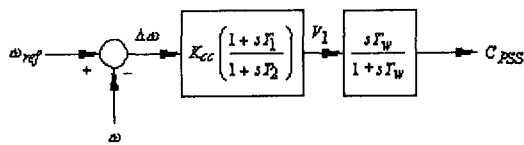


그림 A. 2. 일반적인 전력계통 안정화 모델  
Fig. A. 2. Conventional power system stabilizer model.

표 A. 1. PSS의 매개변수  
Table A. 1. The parameters of PSS

$T_1$	$T_2$	$T_w$	$K_{\infty}$
0.685	0.1	3	7.091

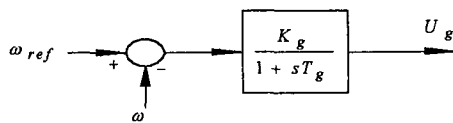


그림 A. 3. 조속기 모델  
Fig. A. 3. Governor model.

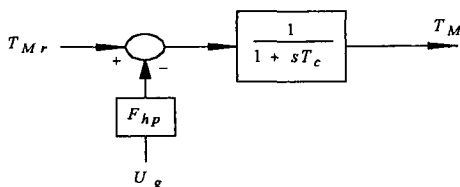


그림 A. 4. 터빈 모델  
Fig. A. 4. Turbine model.

표 A. 2. 발전기, 터빈 및 조속기 모델 (e\_q Model)  
Table A. 2. The parameter of Generator, Turbine, and Governor (e\_q Model)

M	D	$T'_{do}$	$x_d$
9.26	0.01	7.76	0.937
$x_q$	$x'_d$	$T_c$	$F_{hp}$
0.55	0.19	0.1	1
$K_g$	$T_g$		
10	0.1		

표 A. 3. 동작점  
Table A. 3. The operating points

P	Q	$V \angle \theta$	$I \angle \theta$
1	0.2	$1 \angle 29.602^\circ$	$1.0198 \angle 18.292^\circ$

표 A. 4. 전송선 데이터  
Table A. 4. Transmission line data

$R_E$	$X_E$
0.03	0.5

표 A. 5. Exciter 데이터  
Table A. 5. Exciter data

$T_A(\text{sec})$	$K_A(\text{p.u.})$
0.03	0.5

◇ 저자소개 ◇

김호찬 (金豪贊)

1964년 11월 8일생. 1987년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1994년 동대학원 제어계측공학과 졸업(박사). 1995년-현재 제주대학교 전기전자공학부 부교수. 첨단기술연구소 연구원.

김세호 (金世鎬)

1961년 2월 18일생. 1983년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1999년-현재 제주대학교 전기전자공학부 부교수. 첨단기술연구소 연구원.