碩士學位論文

SPSA에 의한 Taylor 모델 근사화와 전력계통 안정화 시스템 적용

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

金 正 爀

2005年 6月

SPSA에 의한 Taylor 모델 근사화와 전력계통 안정화 시스템 적용

指導敎授 金 豪 贊

金 正 爀

이 論文을 電氣工學 碩士學位 論文으로 提出함

2005年 6月

金正爀의 電氣工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 ______________ 印

委　　員 ______________ 印

委　　員 ______________ 印

濟州大學校 産業大學院

2005年 6月

SPSA Based Taylor Model Approximation and Its Application to Power System Stabilization

Jung-Hyuk Kim

(Supervised by professor Ho-Chan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

2005. 6.

DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES i

LIST OF TABLES ii

SUMMARY iii

Ⅰ. 서 론 1

Ⅱ. SPSA에 의한 Taylor 모델 근사화 3

1. Taylor 모델 근사화 3

2. SPSA에 의한 Taylor 모델 근사화 6

Ⅲ. 상태공간 모델과 LQR 제어기 9

Ⅳ. 전력계통 안정화 장치 설계 12

Ⅴ. 컴퓨터 시뮬레이션 20

Ⅵ. 결 론 24

참고문헌 25

LIST OF FIGURES

Fig. 1 One machine infinite bus power system ········· 12

Fig. 2 Governor model ········· 14

Fig. 3 Turbine model ········· 14

Fig. 4 Block diagram of static exciter ········· 17

Fig. 5 Block diagram of AVR ········· 18

Fig. 6 Conventional power system stabilizer ········· 18

Fig. 7 Synchronous machine control scheme with PSS ········· 19

Fig. 8 Comparison between the system output and the taylor model output (data n=100, order N=2) ········· 20

Fig. 9 Outputs of the CPSS and TMBPSS in the normal loading condition ········· 22

Fig. 10 Outputs of the CPSS and TMBPSS in the heavy loading condition ········· 22

Fig. 11 Outputs of the CPSS and TMBPSS in the three-phase fault condition ········· 23

LIST OF TABLES

Table 1 Transmission line data ········· 13

Table 2 The parameter of generator(e_q' model) ········· 15

Table 3 The parameter of PSS ········· 18

Table 4 Parameters of synchronous machine control scheme with PSS ········· 19

SPSA Based Taylor Model Approximation and Its Application to Power System Stabilization

Jung-Hyuk Kim

Department of Electronic and Electrical Engineering
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

Supervised by professor Ho-Chan Kim

SUMMARY

This paper presents a Taylor model approach for a closed-loop system identification using input and output data and its application to design a power system stabilizer(PSS). The Taylor model concept is introduced as an alternative intelligent system technique to design a controller for an unknown system with input and output data only, and without the detailed knowledge of mathematical model for the system. In the Taylor model, the data used has incremental forms using backward difference operators.

The parameters of the Taylor model can be obtained by the

simultaneous perturbation stochastic approximation(SPSA) method. The feasibility of the proposed method is demonstrated in a one-machine infinite-bus power system. The linear quadratic regulator(LQR) method is applied to the Taylor model to design a PSS for the system, and compared with the conventional PSS in different loading conditions and system failures such as the outage of a major transmission line or a three phase to ground fault which causes the change of the system structure.

Ⅰ. 서 론

전력이 먼 거리에 있는 발전소에서 공급된다는 사실에도 불구하고 믿을 수 있고 안전한 최상의 전력품질(power quality)을 전기사용자들은 요구한다. 전력계통은 전력을 생산하여 수용가에 전송・소비되는 과정에 이르기까지 관련된 제반설비 즉, 송・배전선로, 변압기, 개폐기, 부하 등 운용설비들이 유기적으로 연결 되어 있는 결합체이다. 전력계통 제어의 주목적은 전기를 공급 하는데 있어 변화하는 부하조건을 충족(quantity)시켜야 하며 신뢰성(reliability)과 안정성(security)을 목표로 하여 모든 전기사용자들의 요구를 만족시키기 위함이다. 전통적으로, 대부분의 제어기들은 계통과 그 계통의 선형화된 모델의 수학적 기술에 바탕을 두고 설계 된다(DeMello and Concordia, 1969). 따라서 수학적 모델에 바탕을 둔 제어기들을 실제의 시스템 특히 전력계통과 같은 복잡하고 비선형 시스템에 적용하기는 어렵다(Doi, 1984).

본 논문에서는 입출력 데이터만을 사용하여 시스템식별을 위한 Taylor 모델 개념과 전력계통 안정화 장치(power system stabilizer, PSS)에의 적용 방법에 대해 살펴본다. Taylor 모델의 개념은 입력과 출력된 데이터를 이용하여 미지의 동적 시스템을 대상으로 제어기를 설계하는 새로운 지능시스템 설계기법으로 생각할 수 있으며 시스템식별을 위한 수학적 모델은 필요로 하지 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 SPSA (simultaneous perturbation stochastic approximatin)(Spall, 2003) 방법을

사용하여 얻으며 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.

본 논문에서 제안한 방법의 실현 가능성을 살펴보기 위해 1기무한대모선(one machine infinite bus, OMIB) 전력계통(Sauer and Pai, 1998), (Stagg and El-Abiad, 1968)을 대상으로 TMBPSS(Taylor model based PSS)와 CPSS(conventional PSS)의 성능을 비교 분석 하도록 한다.

Ⅱ. SPSA에 의한 Taylor 모델 근사화

1. Taylor 모델 근사화

다음과 같은 비선형 시불변 이산시간 시스템을 고려하자.

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), \cdots, y(k-N),\ u(k), u(k-1), \cdots, u(k-M)) \tag{1}$$

여기서 $u(k-j)$ 와 $y(k-i)$, $i=0,1,\cdots,N$, $j=0,1,\cdots,M$ 은 각각 지연된 입력과 출력 신호들을 나타낸다. 식 (1)에서 나타난 지연된 신호들을 다음과 같은 후진 차분 연산자(backward difference operator)(Phillips and Nagle, 1997), (Ogata, 1995)를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

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

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

$$y(k+1) = f(y(k), \triangle y(k), \cdots, \triangle^{N} y(k), u(k),\ u(k-1), \triangle u(k-1), \cdots, \triangle^{M} u(k-1)) \tag{3}$$

식 (3)을 1차 Taylor 급수로 확장하여 나타내면

$$y(k+1\ ) = f(y(k), \triangle y(k), \cdots, \triangle^{N} y(k), u(k), u(k-1),\ \triangle u(k-1), \cdots, \triangle^{M} u(k-1))$$

$$=y(k)+\sum_{i=1}^{N}a_i\triangle^i y(k)+b_0\triangle u(k)+\sum_{j=1}^{M}b_j\triangle^j u(k-1)+O(k) \qquad (4)$$

이다. 여기서

$$a_i=\frac{\partial f}{\partial\triangle^i y(k-1)},\ b_0=\frac{\partial f}{\partial u(k-1)},\ b_j=\frac{\partial f}{\partial\triangle^j u(k-2)}$$

이고 $O(k)$는 고차항을 나타낸다. 식 (4)에서 $y(k)$를 좌변으로 이동하면, 위식은 다음과 같이 표현된다.

$$\triangle y(k+1)=\sum_{i=1}^{N}a_i\triangle^i y(k)+b_0\triangle u(k)+\sum_{j=1}^{M}b_j\triangle^j u(k-1)+O(k)$$

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

$$\triangle\hat{y}(k+1)=\sum_{i=1}^{N}a_i\triangle^i y(k)+b_0\triangle u(k)+\sum_{j=1}^{M}b_j\triangle^j u(k-1) \qquad (5a)$$

또는 $\triangle$으로 양변을 나누면

$$\hat{y}(k+1)=\sum_{i=1}^{N}a_i\triangle^{i-1}y(k)+b_0u(k)+\sum_{j=1}^{M}b_j\triangle^{j-1}u(k-1) \qquad (5b)$$

이다. 여기서

N과 M은 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_j는 다음과 같은 목적 함수(object function) $E(\theta)$를 최소화하도록 결정하면 된다.

$$E(\theta)=\sum_{i=1}^{n}(y(k-i+1)-\hat{y}(k-i+1))^2 \tag{6}$$

여기서 $\theta=[a_1\cdots a_N b_0\cdots b_M]$는 Taylor 모델의 매개변수 백터이고 $y(k)$와 $\hat{y}(k)$는 각각 플랜트 출력과 계산된 Taylor 모델의 출력을 나타낸다.
본 논문에서는 식 (6)을 최소화시키는 Taylor 모델의 매개변수들은 SPSA 방법을 통해 구하도록 한다.

2. SPSA에 의한 Taylor 모델 근사화

확률적 근사화(stochastic approximation, SA)는 외부잡음 등이 존재할 때 목적함수를 최적화시키는 문제에 많이 적용되어 진다. Spall (2003)에 의해 제안된 SPSA 방법은 동시인자변환(simultaneous perturbation)을 통해 그레디언트를 근사화시키는 방법으로 구현이 간단하고 쉽게 적용할 수 있다. 일반적인 SA에서 그레디언트를 근사화 시키기 위해서는 추정하려는 매개변수 개수의 2배에 해당하는 목적함수 값을 계산하여야 하는데, SPSA 방법의 가장 큰 특징은 추정하려는 매개변수의 수에 관계없이 두 번의 목적함수 값을 계산하도록 한다. 이 SPSA 방법의 두드러진 특징은 폭넓은 응용 가능성과 최상에 가까운 해답을 얻을 수 있으나 그레디언트를 직접 계산하는 경우보다 수렴시간이 길다는 단점이 존재한다. SPSA 방법에서 입력 매개변수 벡터 θ를 스칼라 값으로 전달해 주는 목적함수를 다음과 같이 놓는다.

$$E(\theta) = L(\theta) + \omega_k \tag{7}$$

여기서 θ 는 Taylor 모델의 매개변수 벡터, ω_k는 외부잡음을 나타낸다.
ω_k가 존재하지 않는 경우 Newton-Raphson 방법같이 그레디언트를 직접 계산 할 수도 있으나 그레디언트가 직접적으로 계산되지 못하거나 ω_k가 존재하는 경우에는 근사화된 그레디언트 값을 사용해야 한다. 함수 $L(\theta)$가 미분 가능한 경우에 그레디언트 다음과 같이 주어진다.

$$g(\theta) = \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} \tag{8}$$

이때 목적함수를 최소화시키는 매개변수를 찾는 것은 $g(\theta^*)=0$ 를 만족하는 θ^* 를 구하는 것이다. 그레디언트를 직접 구하지 못하는 경우에는 다음과 같은 SPSA 알고리즘을 통해 매개변수를 추정하도록 한다.

$$\theta_{k+1} = \theta_k - a_k g_k(\theta_k) \tag{9}$$

$$g_k(\theta_k) = \frac{E(\theta_k + c_k \triangle_k) - E(\theta_k - c_k \triangle_k)}{2c_k} \begin{bmatrix} \triangle_{k1}^{-1} \\ \triangle_{k2}^{-1} \\ \vdots \\ \triangle_{kp}^{-1} \end{bmatrix} \tag{10}$$

여기서 a_k 와 c_k 는 SPSA에서 사용되는 이득이고 $\triangle_{ki}$ 는 p 차원의 벡터 $\triangle_k$ 의 i 번째 원소의 값으로서 확률 0.5 로 1 또는 -1 값만을 갖는다. 따라서 p 차원의 매개변수를 취하는 경우에도 두개의 목적함수 값만을 구하면 그레디언트의 근사치를 쉽게 구할 수 있다.

SPSA 방법을 사용한 Taylor 모델의 매개변수는 다음과 같은 단계로 추정할 수 있다.

단계 1 : 매개변수 벡터의 초기값을 결정해야 하는데, SPSA 방법에서 사용되는 $a_k = \frac{a}{(A+k+1)^{\alpha}}$ 와 $c_k = \frac{c}{(k+1)^{\gamma}}$ 의 계수 a, c, A, α, γ 값들을 결정한다. 반복계수 k 를 1로 둔다.

단계 2 : 계수가 k 일 때 추정한 Taylor 모델 매개변수 θ_k, 동시인자변환 $\triangle_k$ 와 변수 c_k 값을 이용하여 실제 출력값과 매개변수가 $\theta_k + c_k \triangle_k$ 와 $\theta_k - c_k \triangle_k$ 일 때 Taylor 모델을 사용한 추정치를

이용하여 두 개의 목적함수값 $E(\theta_k+c_k\triangle_k)$ 와 $E(\theta_k-c_k\triangle_k)$ 을 계산 한다. 이때 동시인자변환에 사용되는 평균이 0인 p 차원의 불규칙 벡터 $\triangle_k$는 각 원소가 확률이 0.5 로서 ±1 값만을 갖는 Bernoulli분포를 가지도록 한다.

단계 3 : 단계 2에서 구한 두개의 목적함수를 이용하여 그레디언트 $g_k(\theta_k)$를 계산하고 계수 $k+1$ 에서 사용될 새로운 매개변수 θ_{k+1}를 기본적인 SA방법으로 추정한다.

단계 4 : 단계 2로 가서 k의 값을 증가와 반복을 하고, 연속적인 반복에서 변화가 작다거나 최대의 반복 계수값에 도달하면 수행을 중단시킨다.

Ⅲ. 상태공간 모델과 LQR 제어기

Taylor 모델을 상태공간 모델로 나타낼 수 있으면 기존의 제어기 설계 방법을 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(Yu et al., 1970), (Anderson and Moore, 1990).

Taylor 모델을 상태공간으로 나타내기 위해 상태변수를 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned}
x_1(k) &= \triangle y(k) \\
x_2(k) &= \triangle^2 y(k) + \beta_1 \triangle u(k-1) \\
x_3(k) &= \triangle^3 y(k) + \beta_2 \triangle u(k-1) + \beta_1 \triangle^2 u(k-1) \\
&\vdots \\
x_N(k) &= \triangle^N y(k) + \beta_{N-1} \triangle u(k-1) + \cdots \\
&\quad + \beta_1 \triangle^{N-1} u(k-1)
\end{aligned} \tag{11}$$

식 (11)에서 정의된 상태변수를 사용하면 Taylor 모델은 다음과 같은 선형 상태공간 모델로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
x(k+1) &= Ax(k) + B\triangle u(k) \\
\triangle y(k) &= Cx(k)
\end{aligned} \tag{12}$$

여기서

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

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

$$C=[\,1 \;\; 0 \;\; \cdots \;\; 0]$$

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

이다.

식 (12) 에서 입력 및 출력쌍인 $(u(k), y(k))$ 와 $(\triangle u(k), \triangle y(k))$는 같은 변환 함수를 가지므로 제어입력 $u(k)$를 구하기 위한 제어기는 Taylor 모델의 상태 공간 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.

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

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

$$u(k) = -Kx(k) \qquad (13)$$

여기서 K는 다음과 같은 이산 대수 Ricatti 방정식의 해로부터 얻어진 궤환이득 상수이다.

$$K = (B^T SB + R)^{-1} B^T SA$$
$$S = A^T SA - A^T SBK + (C^T QC)$$

Ⅳ. 전력계통 안정화 장치 설계

본 논문에서 제안한 Taylor 모델 제어기를 이용한 전력계통 안정화 장치(TMBPSS)의 타당성을 검증하기 위하여 선정한 전력계통은 일반적으로 많이 인용되고 있는 1기무한대모선 계통으로 비선형 시스템이며 외란이 존재하는 시스템이다. 먼저 계통에 대한 설명을 하기 위하여 대형 전력계통에 송전선로를 통하여 연결되어 동작하는 발전기를 살펴볼 때, 전체 전력계통의 규모가 발전시스템의 규모에 비하여 매우 크다고 가정하면 해당 발전시스템의 동작에 의해 전체 전력시스템이 거의 영향을 받지 않는다고 가정하여 Fig. 1 과 같은 1기무한대모선의 간략한 시스템으로 표현할 수 있다(Kunder, 1994), (Sauer and Pai, 1998).

Fig. 1 과 같은 1기무한대모선의 전력계통 모델은 전력계통 안정화 장치의 설계를 위해 널리 사용되어 온 모델로써 본 논문에서는 선로 상수들이 Table 1과 같이 주어져 있다고 가정한다.

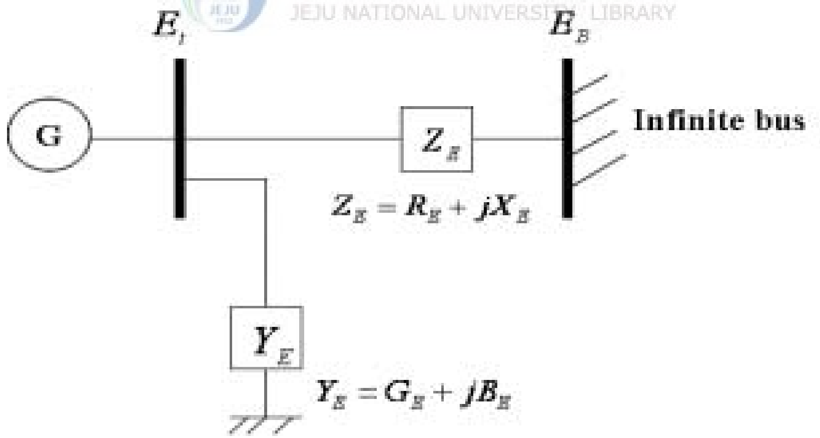

Fig. 1 One machine infinite bus power system

Table 1 Transmission line data

	Variable	Parameter
Impedance	R_E	0.03
	X_E	0.5
Admittance	G_E	0.249
	B_E	0.262

Fig. 1의 전력계통을 표현하는 수학적 모델은 그 사용목적에 따라 매우 다양하게 존재하는데(Kunder, 1994), 본 논문에서는 일반적으로 e_q' 모델이라고 불려지는 다음과 같은 비선형 3차모델을 선정하였다.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M}\{T_m - T_e(\delta, e_q') - T_D\}\ [pu/s] \tag{14}$$

$$\dot{\delta} = \omega_b(\omega - 1)\ [rad/s] \tag{15}$$

$$\dot{e}_q' = \frac{1}{T_{do}'}\{e_{fd} - (x_d - x_d')i_d(\delta, e_q') - e_q'\} \tag{16}$$

식 (14)와 (15)는 발전소의 토오크의 평형상태를 표현하는 동요방정식이고, 식 (16)은 발전기 회전자의 계자 전압(field voltage)의 동특성을 표현하는 식이다. 각 식에서 사용된 상태변수들, ω, δ, e_q'이 의미하는 바는 다음과 같다. ω는 발전기 회전자의 각속도 [pu]를 의미하고 δ는 q 축과 무한대 모선 사이의 토오크각의 차이 [rad]를 나타내며 e_q'은 과도리액턴스 배후 전압의 q 축 성분 [pu]을 나타낸다. 그리고 위 식들에서 사용된 각종 상수들

M, T_{do}', x_d, x_d'의 의미와 본 논문에서 사용된 값들은 Table 2에 나타나 있으며 ω_b는 기준 각속도로 그 값은 120π [rad/s]이다.

식 (14)에서 T_m은 기계적 토오크 입력이며 터어빈에서 공급된다. 하나의 발전시스템 내에는 식 (14)~(16) 이외에도 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 주어지는 조속기와 터어빈 등은 다음과 같은 동특성을 만족한다.

$$\dot{T}_m = \frac{1}{T_c}(F_{hp}u_g - T_m) \tag{17}$$

$$\dot{u}_g = \frac{1}{T_g}[K_g(\omega_r - \omega) - u_g] \tag{18}$$

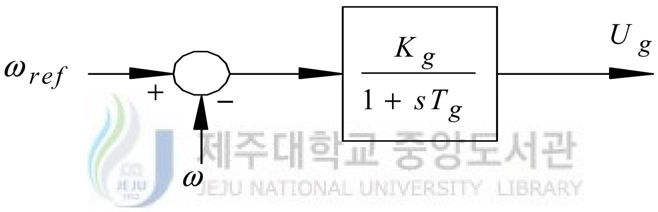

Fig. 2 Governor model

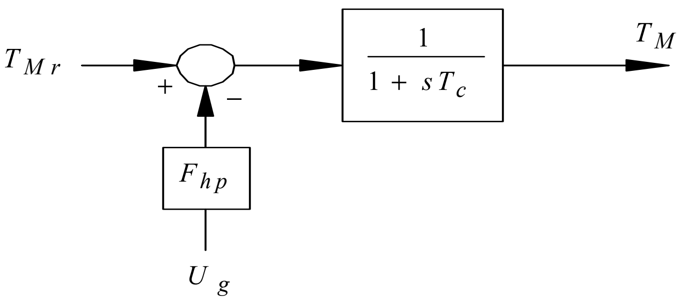

Fig. 3 Turbine model

식 (14)에서 T_e는 전기적 토오크 출력이며 per unit 단위를 사용할 경우 $T_e = P_e/\omega$의 관계식이 성립하지만, $\omega \approx 1$이라는 가정 하에 $T_e = P_e$로 간략화 하였고 P_e의 값은 다음과 같이 결정된다.

$$T_e \approx P_e = v_d i_d + v_q i_q \tag{19}$$

Table 2 Parameters of Generator

	Variable	Parameter
Moment constant	M	9.26
Damping coefficient	D	0.01
d-axis transient open-circuit time constant	T_{do}'	7.76
d-axis component of machine reactance	x_d	0.973
q-axis component of machine reactance	x_q	0.55
q-axis transient reactance	x'_d	0.19

여기서 $v_d,\ v_q,\ i_d,\ i_q$는 각각 단자전압 v_t 및 단자 전류의 d축 및 q축 성분을 나타내고, 이들을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
i_d &= Y_d e_{q'} - \frac{v_o}{Z_e^2}(R_2 \sin\delta + X_1 \cos\delta) \\
i_q &= Y_q e_{q'} - \frac{v_o}{Z_e^2}(-X_2 \sin\delta + R_1 \cos\delta) \\
v_d &= x_q i_q \\
v_q &= e_q' - x_d' i_d \\
v_t &= \sqrt{v_d^2 + v_q^2}
\end{aligned} \tag{20}$$

위 식들에서 사용된 각종 상수들은 다음과 같이 정의된다.

$$
\begin{aligned}
&1+ZY=C_1+jC_2 \\
&Z_e^2=R_1R_2+X_1X_2 \\
&Y_d=(C_1X_1-C_2R_2)/Z_e^2 \\
&Y_q=(C_1R_1+C_2X_2)/Z_e^2
\end{aligned} \tag{21}
$$

여기서

$$
\begin{aligned}
&R_1=R-C_2x_d' \\
&R_2=R-C_2x_q \\
&X_1=X+C_1x_q \\
&X_2=X+C_1x_d'
\end{aligned}
$$

이고 Z와 Y는 Fig. 1의 Z_E와 Y_E를 의미하며, 마찬가지로 R과 X는 각각 R_E와 X_E, G와 B는 각각 G_E와 B_E를 나타낸다.

식 (14)에서 T_D는 감쇄토오크를 나타내고 이는 $D(\omega-1)$ (D는 감쇄상수)로 주어지며, 식 (16)에서 사용된 e_{fd}는 AVR 및 여자기의 출력인데, 앞에서 사용한 식 (14)~(16)은 거의 대부분의 동기발전기에 공통적으로 적용되는 식인데 반하여 e_{fd}의 동특성을 표현하는 식은 발전소에 설치된 AVR 및 여자기의 종류에 따라 각각 다른 형태의 식을 가지게 된다. 본 논문에서는 Fig. 4와 같이 표현되는 가장 간단한 형태의 사이리스터

(thyristor) 타입의 여자시스템인 IEEE type 1의 여자시스템(IEEE Standard Board, 1990)을 사용한다고 가정하였다. Fig. 4에서는 여자시스템의 출력단에 제한기(limiter)가 부착되어 있으며, 출력이 제한기의 범위 안에 있는 경우에는 다음과 같은 동특성으로 표현된다. 식 (22)와 Fig. 4에서 u_{pss}는 전력계통 안정화 장치의 출력을 의미한다.

$$\dot{e}_{fd} = \frac{1}{T_e}\{K_e(v_{ref} - v_t - u_{pss}) - e_{fd}\} \tag{22}$$

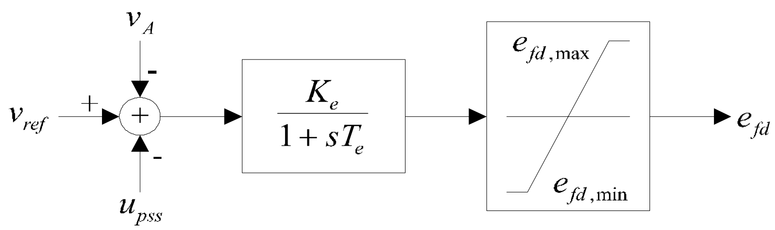

Fig. 4 Block diagram of static exciter

Fig. 5와 같은 형태의 AVR을 시뮬레이션에서 사용하였다.

$$u_A = \frac{1+T_A s}{1+T_B s}(v_r - v_t) \tag{23}$$

일반적으로 많이 사용되는 PSS는 Fig. 6과 같이 주어지는 진-지상 보상기(lead-lag compensator)이고 사용된 매개변수들은 Table 3과 같다. Fig. 7은 시뮬레이션을 위하여 사용된 동기발전기의 제어시스템의 구조를 나타내고 사용된 각종 상수들은 Table 4에 주어진다.

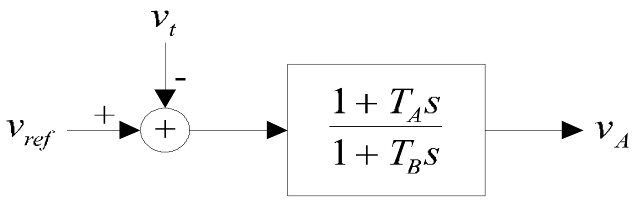

Fig. 5 Block diagram of AVR

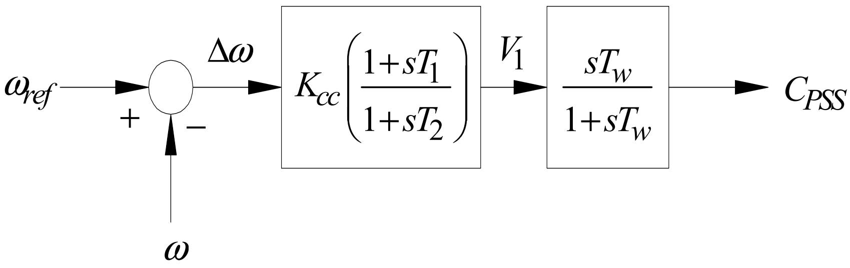

Fig. 6 Conventional power system stabilizer

Table 3 Parameters of PSS

	Variable	Parameter
Time constant [sec]	T_1	0.685
Time constant [sec]	T_2	0.1
Wash-out Time constant [sec]	T_w	3
Gain	K_{cc}	7.091

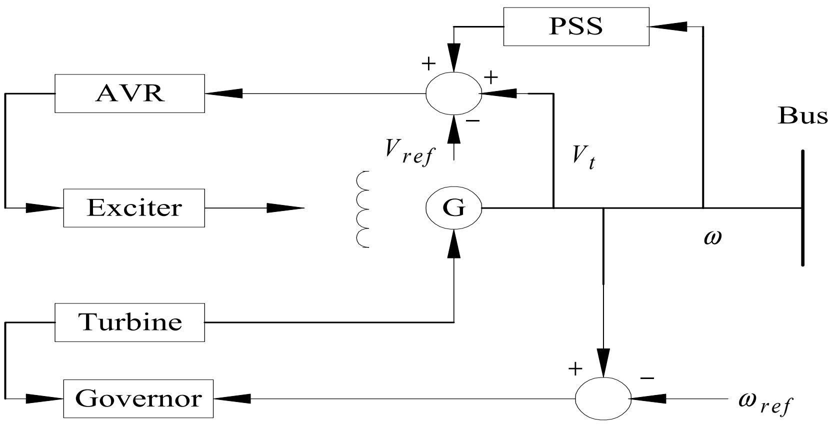

Fig. 7 Synchronous machine control scheme with PSS

Table 4 Parameters of synchronous machine control scheme with PSS

Control scheme		Variable	Parameter
Exciter	Exciter time constant	T_e	0.05
	Exciter gain	K_e	25.0
	Output upper bound	$e_{fd,\max}$	4.0
	Output lower bound	$e_{fd,\min}$	-4.0
Turbine	Turbine time constant	T_c	0.1
	Turbine gain	F_{hp}	1.0
Governor	Governor time constant	T_g	0.1
	Governor gain	K_g	10.0
AVR	AVR time constant	T_A	0.1
	AVR time constant	T_B	0.2
PSS	Output upper bound	$u_{\max}$	0.2
	Output lower bound	$u_{\min}$	-0.2

V. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서는 제안한 TMBPSS의 타당성을 검증하기 위하여 선정한 계통 전력은 일반적으로 많이 인용되고 있는 1기무한대모선 계통에서의 전력계통 안정화 장치를 선정하였다. 본 모델은 전형적인 비선형 시스템이며 외란이 존재하며 q축 발전기 모델, 정지형여자기(static exciter), 터빈(turbine)과 거버너(governor) 모델로 구성 된다(Sauer and Pai, 1998), (Srivastava and Srivastava, 1997), (Larsen and Swann, 1981).

Fig. 8은 일반적인 부하 조건하에서의 계통 출력과 Taylor 모델 출력의 차이를 보여주는데 제한한 방법으로 근사화한 출력이 실제 계통출력과 거의 일치함을 알 수 있다. 이때 샘플링 시간은 0.01[sec]이고 첫 번째 100 개의 샘플을 사용하여 2차 Taylor 모델의 매개변수를 SPSA 방법을 사용하여 다음과 같이 추정하였다:

$$a_1 = -0.9977,\quad a_2 = 0.6570,\quad b_0 = -0.5331 \text{ 그리고 } b_1 = 0.5826.$$

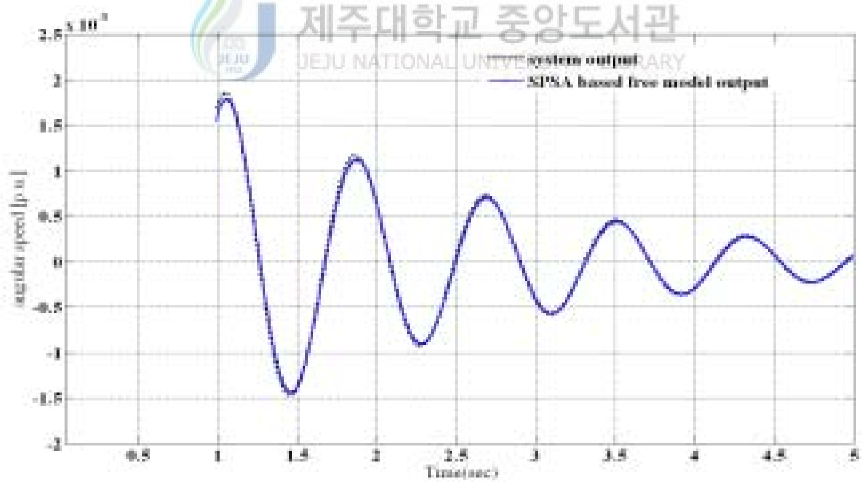

Fig. 8 Comparison between the system output and the taylor model output (data n=100, order N=2).

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

$$Error=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y(i)-\hat{y}(i))^2} \tag{24}$$

여기서 n은 샘플링한 숫자이고 $y(i)$ 와 $\hat{y}(i)$는 각각 전력계통 출력과 Taylor 모델 출력을 나타낸다.

또한 Taylor 모델은 중부하(heavy load)와 3상사고(three phase fault)와 같은 운전 조건하에서 시험하여 보았다. Taylor 모델을 이용하는 주된 목적이 그 자체의 간단함(simplicity)이기 때문에 Taylor 모델의 차수가 $N=2$, 데이터의 개수가 $n=100$ 제어기를 설계하도록 하였다. 2차 Taylor 모델에 $R=10^{-1}$와 $Q=\mathrm{diag}\{q_{11},q_{22}\}$, $q_{11}=10^6$, $q_{22}=1$의 값을 갖는 LQR 제어기를 설계하였다.

Fig. 8~Fig. 11은 Taylor 모델에 기초한 전력계통 안정화 장치(TMBPSS)의 응답과 기존의 PSS(CPSS)의 응답을 나타내고 있다.

Fig. 9는 일반적인 부하 조건 하에서 -10[%]에 의한 토오크각 편차(torque angle deviation)가 존재할 때의 결과이고, Fig. 10은 중부하 조건하에서의 같은 토오크각 편차가 존재할 때 결과와 Fig. 11은 3상사고 조건하에서의 응답을 보여준다.

3가지 경우 모두 본 논문에서 제한한 TMBPSS가 CPSS 보다 훨씬 우수한 성능을 보여주는 것을 확인 할 수 있다.

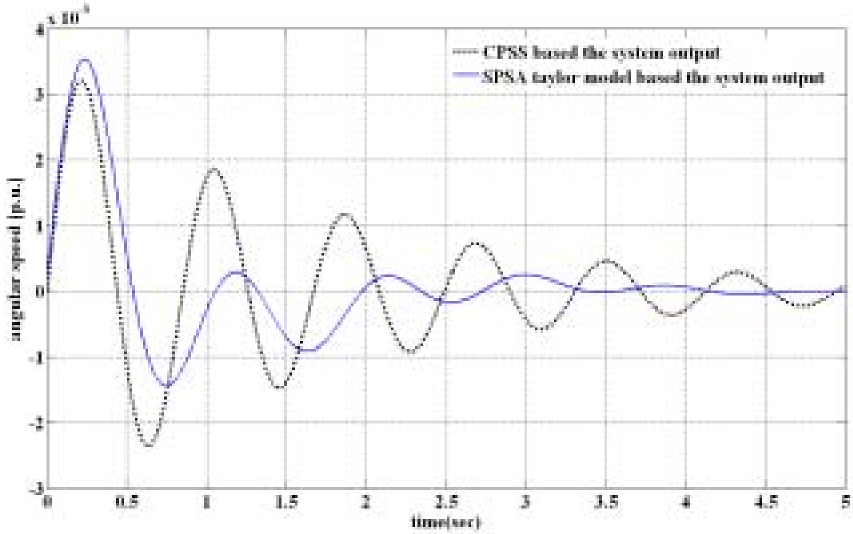

Fig. 9 Outputs of the CPSS and TMBPSS in the normal loading condition

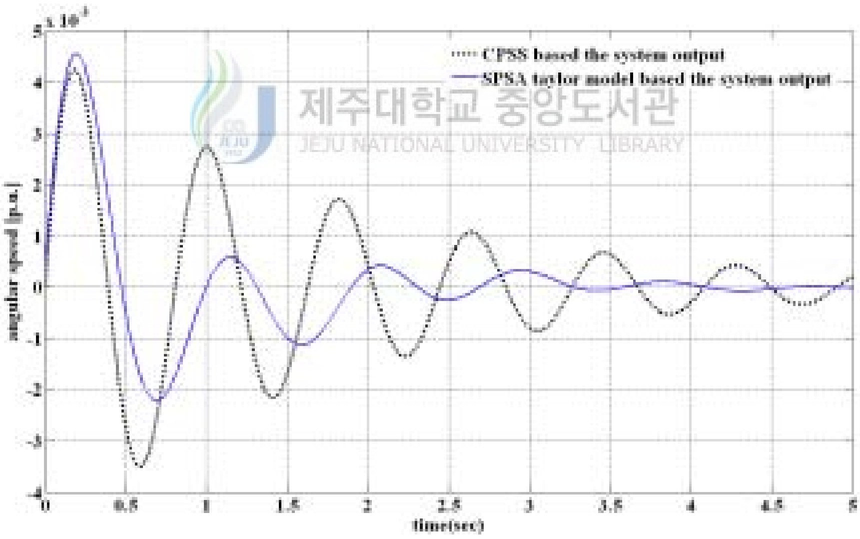

Fig. 10 Outputs of the CPSS and TMBPSS in the heavy loading condition

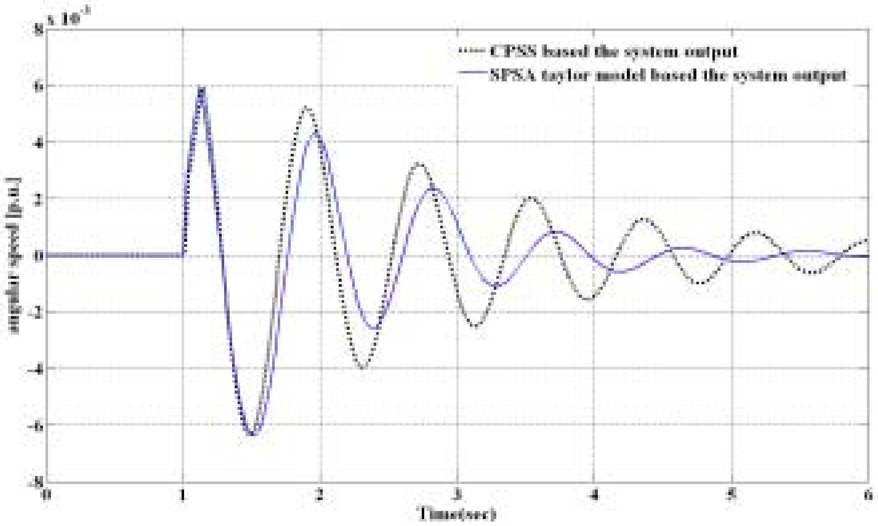

Fig. 11 Outputs of the CPSS and TMBPSS in the three-phase fault condition

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 시스템 식별을 위한 SPSA에 근거한 Taylor 모델 개념을 살펴보고 전력계통 안정화 장치를 설계할 때 적용하기 위한 방법을 제시하였다. Taylor 모델 개념은 입력과 출력된 데이터를 이용하여 미지의 동적 시스템에서 제어기를 설계하기 위한 새로운 지능시스템 설계기법으로 제시하였는데 제안한 방법은 시스템 식별을 위한 수학적인 모델은 필요로 하지 않는다. SPSA에 근거한 Taylor 모델은 선형 상태공간 모델로 변형되고 LQR 방법을 이용하여 안정한 PSS 설계를 위해 사용되었다.

제안된 TMBPSS는 1기무한대모선 전력계통에 적용하여 여러 가지의 부하 조건과 주 변환선의 정전 혹은 3상 지락사고와 같은 계통사고 등, 다양한 운전 조건하에서 시험되었고 기존의 PSS와 비교하였다. 그 결과 모든 경우에 있어서 TMBPSS는 기존의 PSS보다 우수한 수행능력을 보여 주었다.

참고문헌

Anderson, B.D.O. and J.B. Moore, 1990, Linear Optimal Control, Prentice Hall, New Jersey.

DeMello, F.P. and C.A. Concordia, 1969, Concept of synchronous machine stability as affected by excitation control, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-88, pp. 316-319.

Doi, S.A., 1984, Coordinated synthesis of power system stabilizers in multimachine power systems, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-103, pp. 1473-1479.

Kunder, P., 1994. Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York

Larsen, E.V. and D.A. Swann, 1981, Applying power system stabilizers: Part 1-3, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-100, no. 6, pp. 3017-3046.

Ogata, K., 1995, Discrete-time Control System, Prentice Hall.

Phillips, C. and H.T. Nagle, 1997, Digital Control System Analysis and Design, Prentice Hall.

Sauer, P.W. and M.A. Pai, 1998, Power System Dynamics and Stability, Prentice Hall, New Jersey.

Spall, J.C., 2003, Introduction to Stochastic Search and Optimization: Estimation, Simulation, and Control, Wiely- Interscience.

Srivastava, K.N. and S.C. Srivastava, 1997, 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.

Stagg, G.W. and A.H. El-Abiad, 1968, Computer Methods in Power Systems Analysis, McGraw Hill, Inc.

IEEE Standard Board, 1990, IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Extation Control Systems, IEEE Press.

Yu, Y., N.K. Vongsuriya, and L.N. Wedman, 1970, Application of an optimal control theory to a power system, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-89, no. 1, pp. 55-62.