

碩士學位論文

프리모델을 사용한 전력계통의 안정화

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科



金 玆 鍾

2002年 6月

프리모델을 사용한 전력계통의 안정화

指導教授 金 豪 贊

金 玆 鍾

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2002年 6月

金玆鍾 工學 碩士學位 論文을 認准함



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 産業大學院

2002年 6月

목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 프리모델의 수학적 고찰	4
III. 프리모델을 이용한 제어기 설계	7
IV. 전력계통 안정화 장치의 설계와 컴퓨터 시뮬레이션	10
1. 전력계통 안정화 장치의 설계를 위한 동기발전기 모델의 선정 ..	10
2. 컴퓨터 시뮬레이션	18
3. 프리모델의 견실성	21
V. 결 론	24
참고문헌	25

LIST OF FIGURES

Fig. 1 One machine infinite bus power system	10
Fig. 2 Governor model	12
Fig. 3 Turbine model	12
Fig. 4 The block diagram of static exciter	15
Fig. 5 The block diagram of AVR	15
Fig. 6 Conventional power system stabilizer model	15
Fig. 7 Synchronous machine control scheme with PSS	16
Fig. 8 Comparison between the system output and the free model output	18
Fig. 9 Outputs of the CPSS and FMBPSS in the normal loading condition	20
Fig. 10 Outputs of the CPSS and FMBPSS in the heavy loading condition	20
Fig. 11 Outputs of the CPSS and FMBPSS in the three-phase fault condition	21
Fig. 12 Robustness of the FMBPSS for heavy loading condition.	22
Fig. 13 Robustness of the FMBPSS for three-phase fault condition	23

LIST OF TABLES

Table 1 Transmission line data	11
Table 2 Parameters of Generator	13
Table 3 Parameters of PSS	16
Table 4 Parameters of synchronous machine control scheme with PSS	17
Table 5 Rms error of the free model	19



Power System Stabilizer Using the Free Model

Hyun-Jong Kim

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

Supervised by professor Ho-Chan Kim



The free model concept is introduced as an alternative intelligent system technique to design a controller with input and output data only. The idea of free model comes from the Taylor series approximation, where an output can be estimated when such data as position, velocity, and acceleration are known. The parameters in the free model can be estimated using the input and output data and a controller can be designed based on the free model. The free model thus developed is shown to be controllable, observable, and robust.

The accuracy of the free model approximation can be improved

by increasing the observation window and the order of the free model. The LQR method is applied to the free model to design power system stabilizers (PSS), and compared with the conventional PSS.



I. 서 론

전력계통 제어의 주 목적은 모든 소비자에게 전기를 공급하는데 있어 부하 변동에 관계없이 안정된 주파수와 전압을 제공하기 위함이다. 소비자들은 전력계통이 광범위한 선로, 케이블 그리고 변압기 네트워크로 구성되어 있고 전력은 먼 거리에 있는 발전소에서 공급된다는 사실에도 불구하고 믿을 수 있고 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 프리모델 (free model) 개념과 전력계통 안정화 장치 (power system stabilizer, PSS)에의 적용방법에 대해 살펴본다. 프리모델 개념은 단지 입력과 출력 데이터를 이용하여 미지의 동적 시스템을 대상으로 제어기를 설계하는 새로운 지능시스템 설계기법으로 생각할 수 있으며 시스템식별을 위한 수학적 모델은 필요하지 않는다. 프리모델은 Taylor 급수로부터 유도할 수 있는데 위치, 속도 및 가속도 정도의 데이터만을 이용하여 시스템의 출력을 쉽게 예측할 수 있다. 프리모델에서의 매개변수는 입출력 데이터를 이용하여 계산되고 제어기는 이런 프리모델에 기초하여 설계된다. 제어기 설계를 위해서 프리모델은 기존의 이산시간 선형 상태공간 모델 (state space model)로 변형되고 선형 시스템 모델을 바탕으로 하는 LQR (linear quadratic regulator) 제어기에 의해 안정화된다. 프리모델의 정확성은 예측을 위한 관측창 (observation window)의 크기와 프리모델의 차수를 증가시킴으로써 향상시킬 수 있다. 제

안한 제어기는 프리모델을 바탕으로 하여 설계되었기에 대상 시스템이 선형 이건 비선형이건 무관하게 제어를 한다는 것이 특징이라 할 수 있다. 따라서 비선형시스템에 대한 적용이 기존의 선형시스템을 기반으로 하는 제어기보다 더 효과적이라 할 수 있으며 모델의 불확실성이 존재하고 심한 외란에 노출되어 있는 경우에도, 기존의 모델에 기반하는 제어기법 (model based control scheme) 보다는 유리한 입장에 있다고 할 수 있다. 따라서 비선형 시스템이고 모델의 불확실성이 존재하며 심한 외란에 노출되어 있는 전력계통의 제어 문제의 적용이야 말로 대상 시스템에 제안한 제어기의 타당성을 검증하기 용이하므로 PSS의 설계에 제안한 프리모델을 이용하였다.

PSS는 전력계통에 발생하는 저주파 동요의 감쇠를 목적으로 하며 안정성 유지 측면에서 매우 중요한 장치이다. 저주파 동요는 일반적으로 0.2[Hz]에서 2.5[Hz]에 이르며 크게 지역간 저주파 동요 (interarea oscillation)와 국지적 저주파 동요 (local oscillation)로 구분되고 지역간 저주파 동요는 둘 이상의 대규모 전력 푸울들을 연결선로를 통하여 접속시킬 때 발생하는 저주파 동요를 의미하며, 국지적 저주파 동요는 발전소에 인접한 송전선로에서 순간적으로 발생한 지락사고나 단락사고, 혹은 그 이외의 원인에 의하여 일어나는 저주파 동요를 의미한다. 이러한 저주파 동요 발생의 가장 주된 원인은 발전시스템의 과도 안정도를 향상시키기 위하여 설치된 자동 전압 조절 장치 (automatic voltage regulator, AVR)과 여자시스템 (exciter system)으로 인하여 감쇄토크 (damping torque)가 부족하게 되었기 때문이다. 이러한 저주파 동요는 그 진동이 점차 증가하여 결국에는 전력계통의 붕괴현상과 같은 상황이 일어나는 경우도 있다.

본 논문에서는 제안한 방법의 실현 가능성을 살펴보기 위해 1기-무한대모선 전력계통을 대상으로 FMBPSS (free model based PSS)와 CPSS (conventional PSS)의 성능을 비교하였다. 비록 선형 상태공간 모델이 제어

기 설계를 위해 사용되었지만, FMBPSS는 여러 가지의 부하조건과 정전 혹은 3상 단락 사고와 같은 계통 사고에 대해 견실성 (robust)을 보여준다.



II. 프리모델의 수학적 고찰

다음과 같은 비선형 시불변 이산시간 시스템을 고려하자.

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-N), u(k), \dots, u(k-M)) \quad (1)$$

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) (Phillips and Nagle, 1997; Ogata, 1995)를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

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

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

$$y(k+1) = y(k) + \sum_{i=1}^N a_i \Delta^i y(k) + b_0 \Delta u(k) + \sum_{i=1}^M b_i \Delta^i u(k-1) + O(k) \quad (4)$$

이다. 여기서,

$$a_i = \frac{\partial f}{\partial \Delta^i y(k-1)}, \quad b_0 = \frac{\partial f}{\partial u(k-1)}, \quad b_i = \frac{\partial f}{\partial \Delta^i u(k-2)}$$

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

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

여기서 고차항 $O(k)$ 을 무시하면, 프리모델은 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 Δ 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 프리모델의 차수이다. 프리모델은 위의 두 가지 형태로 공식화할 수 있다. 일반적으로 프리모델 차수는 $N=M$ 으로 가정하고 매개변수 a_i, b_0, b_i 는 최소자승법 (least squares method)등을 이용하여 결정할 수 있다 (Phillips and Nagle, 1997; Ogata, 1995). 최소자승 문제는 다음과 같은 목적함수 (object function) J 를 최소화하는 것이다.

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

여기서 $y(i)$ 와 $\hat{y}(i)$ 은 각각 플랜트 출력과 계산된 프리모델의 출력을 나타낸다. 식 (6)을 최소화시키는 프리모델의 매개변수들은 다음의 관계식에서 구할 수 있다 (Phillips and Nagle, 1997; Ogata, 1995).

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

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 $\overline{P} \in R^{(n+1) \times (2N+1)}$ 이고

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

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

이다. 이때 N 은 프리모델의 차수이고 n 은 매개변수를 구하기 위해 사용된 데이터의 수를 나타낸다. 이때 프리모델의 매개변수 \overline{X} 는 다음 식으로부터 얻어진다.



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

III. 프리모델을 이용한 제어기 설계

프리모델을 이용하여 제어기를 설계하는 방법은 기존의 선형 최적 제어기 설계 방법을 수정없이 사용할 수 있다. 상태변수를 적절히 정의하면 프리모델을 선형 상태공간 모델로 나타낼 수 있으면 기존의 제어기 설계방법을 쉽게 적용할 수 있다. 본 논문에서는 프리모델을 LQR에 적용한 FMBOC (free model based optimal controller) 제어기를 설계하도록 한다. 먼저 프리모델을 선형 상태공간 모델로 변환하기 위해 다음과 같은 선형 변환이 소개되고 다음으로 LQR 설계 방법이 적용된다 (Yu et. al, 1970; Anderson and Moore, 1990). 상태변수를 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned}
 x_1(k) &= \Delta y(k) \\
 x_2(k) &= \Delta^2 y(k) + \beta_1 \Delta u(k-1) \\
 x_3(k) &= \Delta^3 y(k) + \beta_2 \Delta u(k-1) + \beta_1 \Delta^2 u(k-1) \\
 &\vdots \\
 x_N(k) &= \Delta^N y(k) + \beta_{N-1} \Delta u(k-1) + \dots + \beta_1 \Delta^{N-1} u(k-1)
 \end{aligned} \tag{9}$$

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

$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= Ax(k) + B\Delta u(k) \\
 \Delta y(k) &= Cx(k)
 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_N \\ a_1 - 1 & a_2 & \cdots & a_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1 - 1 & a_2 - 1 & \cdots & a_N \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_0 + \beta_1 \\ \vdots \\ b_0 + \beta_1 + \cdots + \beta_{N-1} \end{bmatrix}$$

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

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

이다. 식 (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 프리모델의 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. 궤환 이득 K 는 다음과 같이 계산되어질 수 있으며 폐루프 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 Riccati 방정식의 해로부터 얻어진 게환 이득 상수이다.

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

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



IV. 전력계통 안정화 장치 설계와 컴퓨터 시뮬레이션

1. 전력계통 안정화 장치의 설계를 위한 동기발전기 모델의 선정

본 논문에서는 제안한 프리모델 제어기를 이용한 전력계통 안정화 장치(FMBPSS)의 타당성을 검증하기 위하여 선정된 계통전력은 일반적으로 많이 인용되고 있는 1기-무한대모선 (one machine infinite bus, OMIB) 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. 1과 같은 1기-무한대모선의 간략한 시스템으로 표현할 수 있다 (Kunder, 1994; Sauer and Pai, 1998).

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

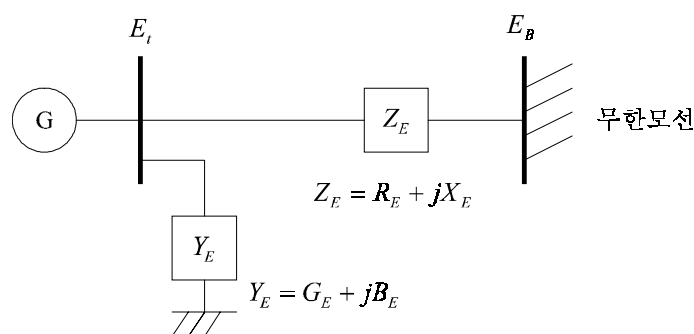


Fig. 1 One machine infinite bus power system.

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 불리는 다음과 같은 비선형 3차모델을 선정하였다.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} \{ T_m - T_e(\delta, e_q') - T_D \} \text{ [pu/s]} \quad (12)$$

$$\dot{\delta} = \omega_b(\omega - 1) \text{ [rad/s]} \quad (13)$$

$$\dot{e}_q' = \frac{1}{T_{do}'} \{ e_{fd} - (x_d - x_d') i_d(\delta, e_q') - e_q' \} \quad (14)$$

식 (12)와 (13)은 발전소의 토크의 평형상태를 표현하는 동요방정식이고, 식 (14)는 발전기 회전자의 계자 전압 (field voltage)의 동특성을 표현하는 식이다. 각 식에서 사용된 상태변수들, ω , δ , e_q' 이 의미하는 바는 다음과 같다. ω 는 발전기 회전자의 각속도 [pu]를 의미하고 δ 는 q축과 무한대모선 사이의 토크각의 차이 [rad]를 나타내며 e_q' 과도 리액턴스 배후전압의 q축 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_b 는 기준 각속도로 그 값은 120π (rad/s)이다.

식 (12)에서 T_m 은 기계적 토크 입력이며 터빈에서 공급된다. 하나의

발전시스템 내에는 식 (12)~(14) 이외에도 Fig. 2와 3과 같이 주어지는 조속기와 터빈 등은 다음과 같은 동특성을 만족한다.

$$T_m = \frac{1}{T_c}(F_{hp}u_g - T_m) \quad (15)$$

$$\dot{u}_g = \frac{1}{T_g}[K_g(\omega_r - \omega) - u_g] \quad (16)$$

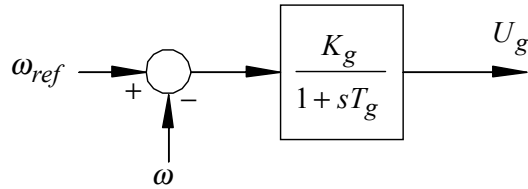


Fig. 2 Governor model.

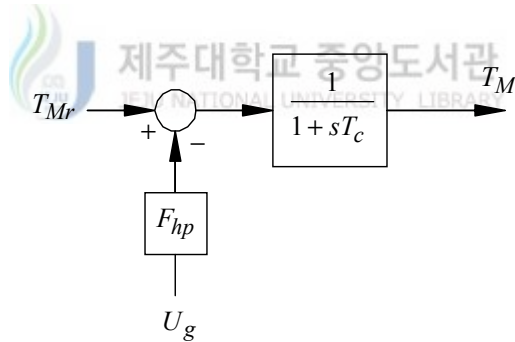


Fig. 3 Turbine model.

식 (12)에서 T_e 는 전기적 토오크 출력이며 per unit 단위를 사용할 경우 $T_e = P_e / \omega$ 의 관계식이 성립하지만, $\omega \approx 1$ 이라는 가정하에 $T_e = P_e$ 로 간략화 하였고 P_e 의 값은 다음과 같이 결정된다.

$$T_e \approx P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (17)$$

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.

$$\begin{aligned}
 i_d &= Y_d e_{q'} - \frac{v_o}{Z_e^2} (R_2 \sin \delta + X_1 \cos \delta) \\
 i_q &= Y_q e_{q'} - \frac{v_o}{Z_e^2} (-X_2 \sin \delta + R_1 \cos \delta) \\
 v_d &= x_q i_q \\
 v_q &= e_{q'} - x_d' i_d \\
 v_t &= \sqrt{v_d^2 + v_q^2}
 \end{aligned} \tag{18}$$

위 식들에서 사용된 각종 상수들은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 1 + ZY &= C_1 + jC_2 \\
 Z_e^2 &= R_1 R_2 + X_1 X_2 \\
 Y_d &= (C_1 X_1 - C_2 R_2) / Z_e^2 \\
 Y_q &= (C_1 R_1 + C_2 X_2) / Z_e^2
 \end{aligned} \tag{19}$$

이고

$$R_1 = R - C_2 x_d'$$

$$R_2 = R - C_2 x_q$$

$$X_1 = X + C_1 x_q$$

$$X_2 = X + C_1 x_d'$$

그리고, Z 와 Y 는 Fig. 1의 Z_E 와 Y_E 를 의미하며, 마찬가지로 R 와 X 는 각각 R_E 와 X_E , G 와 B 는 각각 G_E 와 B_E 를 나타낸다.

식 (12)에서 T_D 는 감쇄토오크를 나타내고 이는 $D(\omega-1)$ (D 는 감쇄상수로 주어지며, 식 (14)에서 사용된 e_{fd} 는 AVR 및 여자기의 출력인데, 앞에서 사용한 식 (12)~(14)이 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 범위안에 있는 경우에는 다음과 같은 동특성으로 표현된다. 식 (20)과 Fig. 4에서 u_{pss} 는 전력계통 안정화 장치의 출력을 의미한다.

$$\dot{e}_{fd} = \frac{1}{T_e} \{K_e(v_{ref} - v_t - u_{pss}) - e_{fd}\} \quad (20)$$

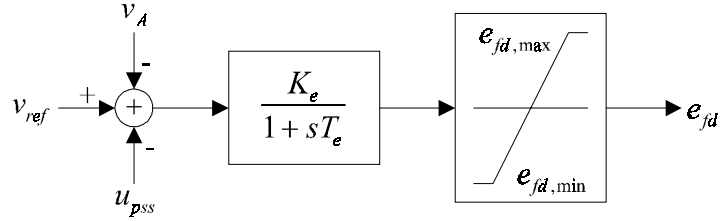


Fig. 4 The block diagram of static exciter.

Fig. 5와 같은 형태의 AVR을 시뮬레이션에서 사용하였다.

$$u_A = \frac{1 + T_A s}{1 + T_B s} (v_r - v_t) \quad (21)$$

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.

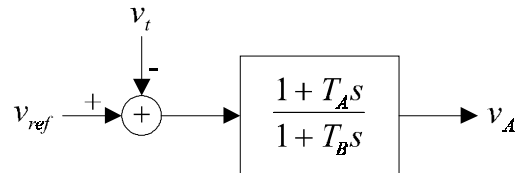


Fig. 5 The block diagram of AVR.

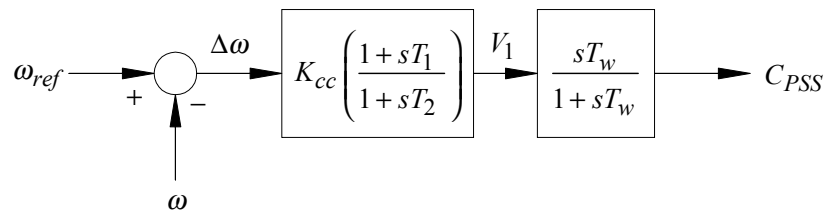


Fig. 6 Conventional power system stabilizer model.

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

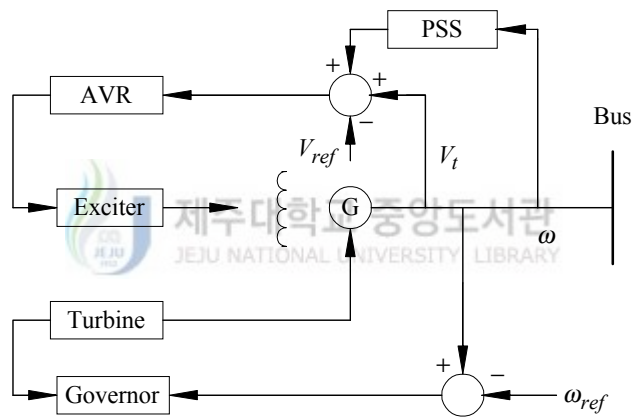


Fig. 7 Synchronous machine control scheme with PSS.

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

2. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서는 제안한 FMBPSS의 타당성을 검증하기 위하여 선정된 계통 전력은 일반적으로 많이 인용되고 있는 1기-무한대모선 계통에서의 전력계통 안정화 장치를 선정하였다. 본 모델은 전형적인 비선형 시스템이며 외란이 존재하며 q축 발전기 모델, 정적여자기, 터빈과 조속기 모델로 구성된다 (Sauer and Pai, 1998; Srivastava and Srivastava, 1997; Larsen and Swann, 1981). Fig. 8은 일반적인 부하 조건하에서의 계통 출력과 프리모델 출력의 차이를 보여준다. 샘플링 시간은 0.01[sec]이고 첫 번째 100 개의 샘플을 사용하여 2차 프리모델의 매개변수를 최소자승법을 사용하여 다음과 같이 추정하였다:

$$a_1 = 0.9961, \quad a_2 = 0.9987, \quad b_0 = 2.7261 \times 10^{-4}, \quad b_1 = -3.3148 \times 10^{-4}.$$

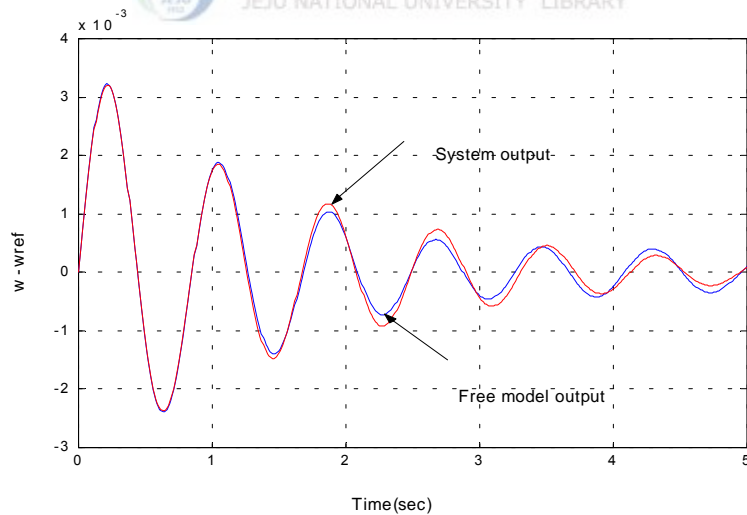


Fig. 8 Comparison between the system output and the free model output (data n=100, order N=2).

프리모델이 실제 전력계통을 얼마나 정확하게 모델링하였는지를 살펴보기 위하여, 오차의 실효값 (root mean square, rms)은 다음과 같이 정의한다.

$$Error = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y(i) - \hat{y}(i))^2} \quad (22)$$

여기서 n 은 샘플링한 숫자이고 $y(i)$ 와 $\hat{y}(i)$ 는 각각 전력계통 출력과 프리모델 출력을 나타낸다. Table 5은 여러 가지의 프리모델 차수에 대한 오차와 데이터 값을 보여준다. 오차의 실효값은 프리모델의 차수와 데이터 값이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

Table 5 Rms error of the free 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 프리모델은 중부하 (heavy load)와 3상 사고 (three phase fault)와 같은 운전 조건하에서 시험하여 보았다. 프리모델을 이용하는 주된 목적이 그 자체의 간단함 (simplicity)이기 때문에, Table 1에서 가장 간단한 조건에서, 즉 차수 $N=2$ 이고 데이터의 개수 $n=100$ 에서 프리모델을 선정하고 제어기를 설계하도록 하였다. 2차 프리모델에 $R=0.000475$ 와 $Q=1$ 의 값을 갖는 LQR를 적용하였다. 일반적인 부하 조건하에서, 계산된 최적 이득은 $K=[-44.0 \ -2154.9]$ 이다.

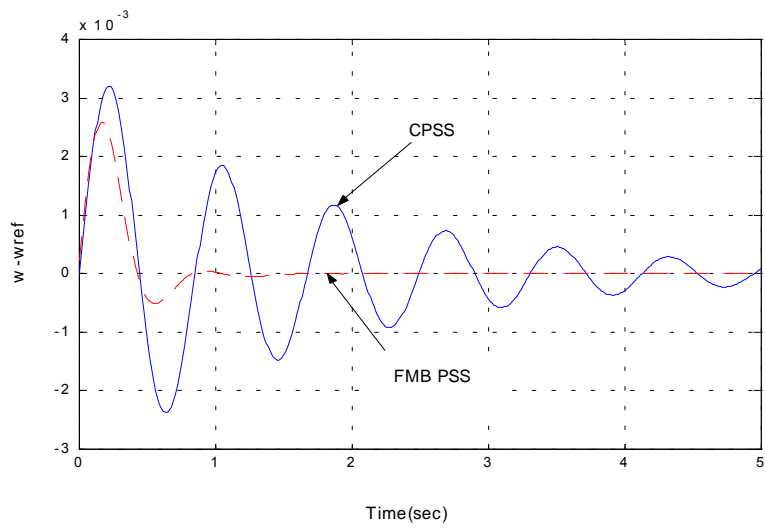


Fig. 9 Outputs of the CPSS and FMBPSS in the normal loading condition.

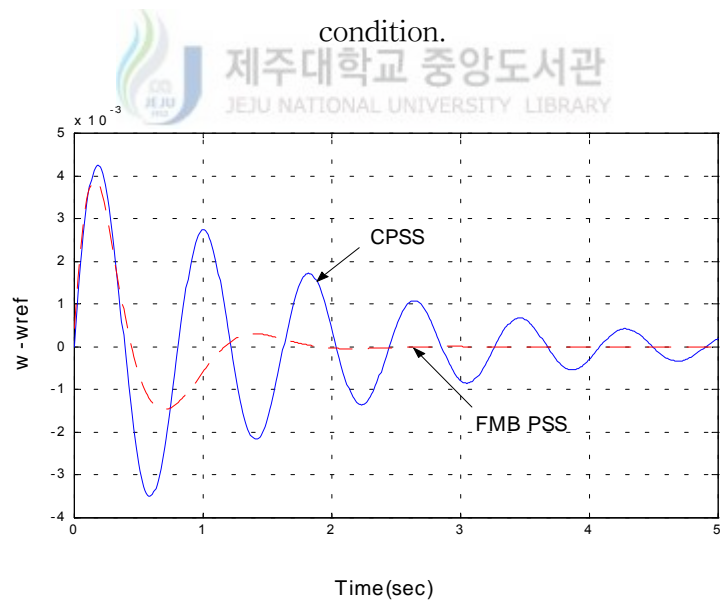


Fig. 10 Outputs of the CPSS and FMBPSS in the heavy loading condition.

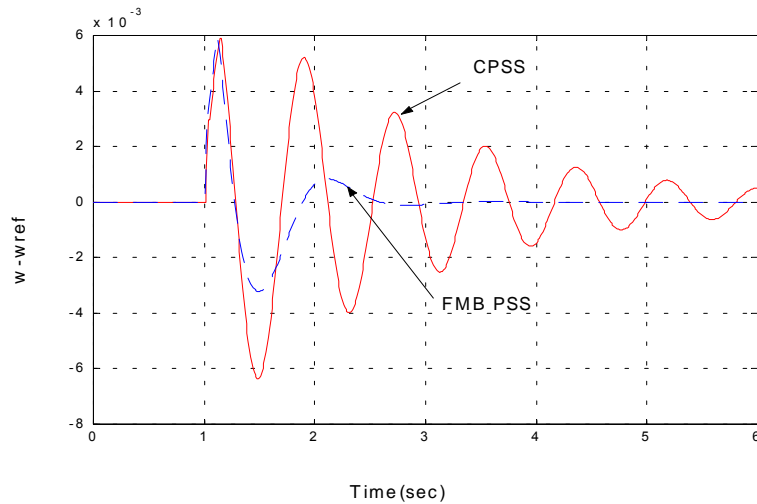


Fig. 11 Outputs of the CPSS and FMBPSS in the three-phase fault condition.



Fig. 9, 10과 11은 프리모델에 기초한 전력계통 안정화 장치 (FMBPSS)의 응답과 기존의 PSS (CPSS)의 응답을 나타내고 있다. Fig. 9는 일반적인 부하 조건하에서 -10% 에 의한 토오크각 편차 (torque angle deviation)가 존재할 때의 결과이고, Fig. 10은 중부하 조건하에서의 같은 토오크각 편차가 존재할 때 결과이다. 그리고 Fig. 11은 3상 단락사고 조건하에서의 응답을 보여준다. 3가지 경우 모두 FMBPSS가 CPSS 보다 훨씬 우수한 성능을 보여주는 것을 볼 수 있다.

3. 프리모델의 견실성

위에서 얻어진 시뮬레이션 결과는 여러 가지 조건 중에서 한 경우가 잘못

된 상황만을 다루었다. 그러나 여러 가지 운전 조건을 갖는 모든 경우에 대해서 동작 가능한 제어기를 설계하는 것이 바람직하다. 이를 위해, 일반적인 부하 조건에서 설계된 FMBPSS 제어기를 중부하 조건과 3상 단락 사고가 발생한 경우에 적용하였다. Fig. 12와 13은 제안한 FMBPSS의 견실성을 보여준다. Fig. 12에서 응답 ①은 중부하 조건하에서 설계된 FMBPSS를 나타내고 응답 ②는 일반적인 부하 조건하에서 설계된 FMBPSS 경우를 나타내는 결과이다. 또한 Fig. 13에서 응답 ①은 3상사고 조건하에서 설계된 FMBPSS를 나타내고 응답 ②는 일반적인 부하 조건하에서 설계된 FMBPSS 경우를 나타내는 결과이다. 이 두 경우로부터, 프리모델은 여러 가지 운전 조건에 대해 견실할 수 있다는 것을 보여준다.

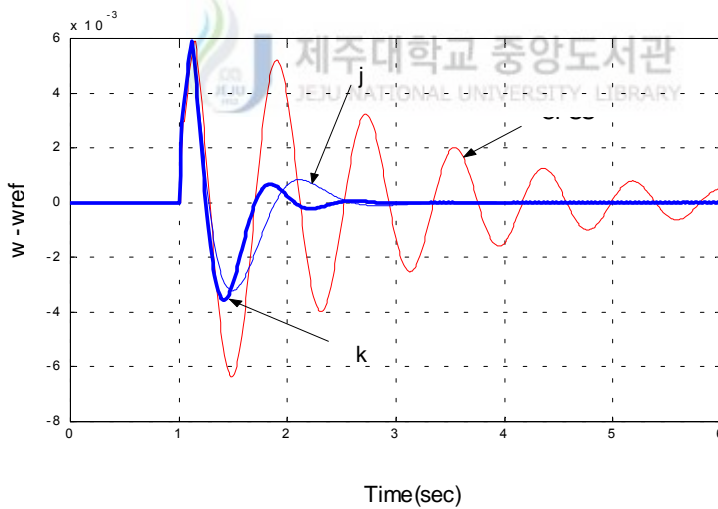


Fig. 12 Robustness of the FMBPSS for heavy loading condition.

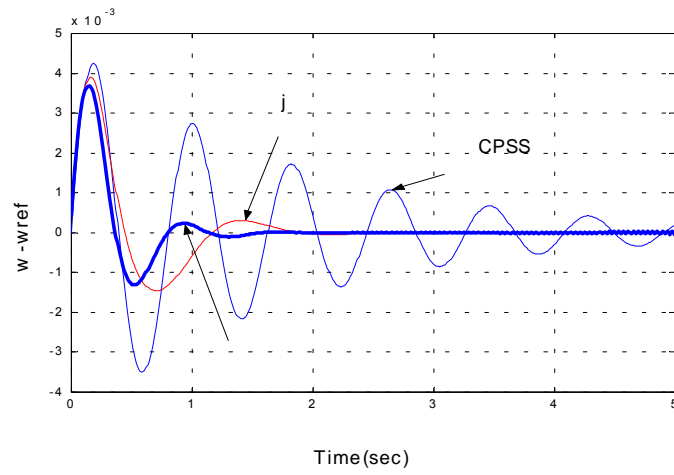


Fig. 13 Robustness of the FMBPSS for three-phase fault condition.

V. 결 론

본 논문에서는 시스템 식별을 위한 프리모델 개념을 살펴보고 전력계통 안정화 장치 (PSS)를 설계할 때 적용하기 위한 방법을 제시하였다. 프리모델 개념은 단지 입력과 출력 데이터를 갖는 미지의 동적 계통에서 제어기를 설계하기 위한 새로운 지능시스템 설계기법으로 제시하였는데 제안한 방법은 시스템 해석을 위한 수학적인 지식을 필요로 하지 않는다. 프리모델은 선형 상태공간 모델로 변형되고 LQR 방법을 이용하여 안정한 PSS 설계를 위해 사용되었다. 측정된 매개변수에 대해 프리모델의 차수가 증가하고 관측창이 확대됨에 따라 프리모델의 정확성이 대략 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나, 프리모델의 간단함을 유지하기 위해 낮은 차수의 프리모델과 비교적 적은 관측창이 FMBPSS를 설계하는데 사용되었다.

제안된 FMBPSS는 1기-무한대모선 전력계통에 적용하여 여러 가지의 부하조건과 정전 혹은 3상 단락 사고와 같은 계통 사고 상황에서 시험되었고 기존의 PSS와 비교하였다. 그 결과 모든 경우에 있어서 FMBPSS는 기존의 PSS보다 우수한 수행능력을 보였고 다양한 운전 조건하에서 견실하다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- B.D.O. Anderson and J.B. Moore, 1990. *Linear Optimal Control*, Prentice Hall, New Jersey.
- P. Kunder, 1994. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York.
- C. H. Houpis, G. B. Lamont, 1992. *Digital Control Systems: Theory, Hardware, Software*, Second Edition, McGraw-Hill, New York.
- IEEE Standard Board, 1990. *IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Extation Control Systems*, IEEE Press.
- E.V. Larsen and D.A. Swann, 1981. Applying power system stabilizers: Part 1-3, *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-100, no. 6, pp. 3017-3046.
- K. Ogata, 1995. *Discrete-time Control System*, Prentice Hall.
- C. Phillips and H.T. Nagle, 1997. *Digital Control System Analysis and Design*, Prentice Hall.
- P.W. Sauer and M.A. Pai, 1998. *Power System Dynamics and Stability*, Prentice Hall, New Jersey.
- K.N. Srivastava and S.C. Srivastava, 1997. Application of Hopf bifurcation theory for determining critical value of a generator control or load paramater, *Int. J. Elec. Power Energy Syst.*, vol. 19, no. 8, pp. 535-540.
- G.W. Stagg and A.H. El-Abiad, 1968. *Computer Methods in Power Systems Analysis*, McGraw Hill, Inc..

Y.N. Yu, 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.



감사의 글

본 논문이 결실을 맺기까지 여러모로 부족한 저를 위하여 세심한 지도와 자상한 가르침을 주신 김호찬 지도교수님께 진심으로 존경과 깊은 감사를 드립니다.

논문의 심사와 많은 조언을 주셨던 오성보교수님, 김세호교수님 그리고 평소 아낌없는 가르침과 격려를 주신 좌종근교수님, 이개명교수님, 김일환교수님께 깊은 감사를 드립니다.



또한 본 논문의 완성되기까지 관련 자료 및 원고정리에 많은 도움을 주신 제어계측 연구실의 대학원생에게도 고마움을 전합니다.

끝으로 오늘이 있기까지 어려운 여건 속에서도 꾸준한 뒷바라지와 사랑을 보내면서 격려해준 아내 오정애에게 고마움과 함께 오늘의 기쁨을 나누고자 합니다.