

출력궤환에 의한 PSS의 최적계수 선정에 관한 연구

A Study on The Optimal Parameter Selection of PSS Using Output Feedback

朴 永 文* · 李 興 載** · 權 泰 遠§
(Young-Moon Park · Heung-Jae Lee · Tae-Won Kwon)

요 약

전력계통이 대형화 됨에 따라 정상적인 운전상태하에서 계통조건이 변화할 때 얼마간의 동요현상이 관측되었으며 이 동요 현상을 제거하기 위하여 전력계통 안정화 장치(PSS)에 대한 연구가 1960년대 후반부터 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 안정화 장치의 최적계수를 상태의 이차 평가 함수의 계수에 대한 감도행렬을 사용함으로써 구하는 새로운 알고리즘을 제안하였으며 서천화력 발전소에 적용하여 그 효용성을 검증하였다.

Abstract- Since the late 1960s, the selection of the parameters of power system stabilizer (PSS) to damp out sustained low frequency oscillation of power generators in the steady state has been an active research area. This paper presents a new approach to select the optimal PSS parameters using the sensitivity of the quadratic performance with respect to the PSS parameters. The proposed algorithm has been applied to Seo-Cheon fossil power plant.

1. 서 론

전력계통이 대형화됨에 따라 정상적인 운전상태하에서 부하변동이나 선로상태의 변화등 계통조건이 변화하였을 때 특정 발전기에 얼마간의 동요현상이 관측되었다. 이 현상은 발전기의 기계적 모드에 제동토크 성분이 부족하기 때문이며 계

*正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 教授 · 工博
**正 會 員 : 서울대 大學院 電氣工學科 博士課程
§正 會 員 : 韓電技術研究院 系統研究室 責任研究員
接受日字 : 1988年 6月 10日
一次修正 : 1989年 4月 10日

통의 안정운정을 크게 위협하고 있으므로 전력계통 안정화장치(Power System Stabilizer: PSS)를 설치하여 안정도 문제를 개선하기 위한 연구가 1960년대 후반부터 진행되어 오고 있다.

PSS의 계수를 선정하기 위한 방법은 대개 네 가지로 대별되는데 Yu²⁾, Gooi³⁾ 등이 제안한 방법에서는 기계적 모드의 고유진동 주파수에서 발전기 및 여자기 부분의 위상지연을 보상하기 위한 위상앞섬회로(Phase lead circuit)를 구성하고 감쇄 크기의 조정을 PSS의 이득으로 조절하는 관점에서 구하였고, Busby³⁾, Bollinger⁴⁾는 위상 보상회로의 시정수를 바꿔가며 근궤적(Root Locus)을 구하여 구하였고, 동요모드의 고유치를 지정하는 극지정방법(Pole Assignment)⁵⁾도 시도 되었으며 고유치의 감도를 이용하여 구하는 방법⁶⁻⁷⁾도 발표되었다.

본 논문에서는 이차평가함수(Quadratic Performance)에 대한 파라미터의 감도를 구하여 PSS의 최적계수를 선정하는 방식을 제시한다.

2. 정식화

계통의 모형은 기계적 입력을 고정시킨 후 평형상태(Equilibrium State)에서 선형화한 1기무한모선모형을 사용하였으며 저주파 진동의 해석을 위해 흔히 사용하는 1기 무한모선 4차 모형의 블록선도는 다음과 같다²⁾.

여기서 $\frac{K_3}{1+sT_{do}K_3}$ 는 Field circuit 부분이고 $\frac{K_A}{1+sT_A}$ 는 여자기의 모형이다.

PSS는 형태에 따라 $\Delta\omega$ 또는 $\Delta\delta$ 를 입력으로 취

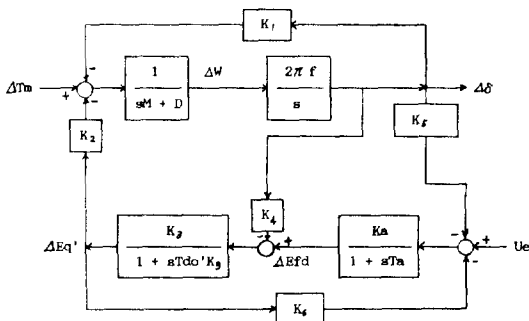


그림 1 1기 무한모선모형
Fig. 1 One-Machine infinite bus model

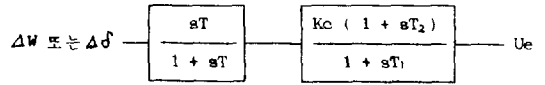


그림 2 PSS의 모형
Fig. 2 PSS model

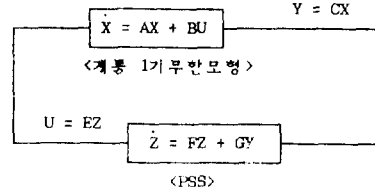


그림 3 PSS가 첨가된 1기 무한모선 모형의 구성도
Fig. 3 Block diagram of one machine infinite bus model with PSS

하지만 $\Delta\omega$ 를 입력으로 취하는 경우에는 윗그림 3. 과 같으며 일반적으로 PSS의 모형은 그림2와 같은 형태를 취한다.

여기서 $\frac{sT}{1+sT}$ 는 signal의 reset블럭이고 Kc는 gain, $\frac{1+sT_2}{1+sT_1}$ 는 위상보상 회로이다.

<그림1>을 재구성하여 보면 그림3과 같이 표시할 수 있다.

여기서 A,B는 계통에 의하여 결정된 값이고 결정해야 할 PSS의 계수는 F,G,E 내에 포함되어 있으므로 전체적인 상태방정식과 목적함수는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & BE \\ GC & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$J = 1/2 \int_0^{\infty} (X^T Q_1 X + U^T R_1 U + Z^T Q_2 Z + Y^T R_2 Y) dt$$

$$= 1/2 \int_0^{\infty} \begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Q_1 + C^T R_2 C & 0 \\ 0 & Q_2 + E^T R_1 E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} dt \tag{2}$$

다음과 같이 정의하면 최적의 PSS 계수를 구하는 문제는 3, 4, 5식으로 표시한다.

$$\begin{aligned} \bar{X} &\triangleq \begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix}, \quad \bar{A} \triangleq \begin{bmatrix} A & BE \\ GC & F \end{bmatrix} \\ \bar{Q} &\triangleq \begin{bmatrix} Q_1 + C^T R_2 C & 0 \\ 0 & Q_2 + E^T R_1 E \end{bmatrix} \\ \min_P J &= 1/2 \int_0^\infty \bar{X}^T \bar{Q} \bar{X} dt \end{aligned} \quad (3)$$

subject to $\dot{\bar{X}} = \bar{A}\bar{X}$ (4)

$P_{min} \leq P \leq P_{max}$ (5)

(단 P는 PSS의 계수 벡터임)

여기서 목적함수 J는 P의 함수이므로 P에 대한 J의 Gradient를 구할 수 있다면 위 문제는 다음과 같이 전형적인 Gradient Projection 문제로 귀착된다.

min J(P) (6)

s.t. $\begin{bmatrix} I \\ -I \end{bmatrix} P \leq \begin{bmatrix} P_{max} \\ -P_{min} \end{bmatrix}$ (7)

3. 감도행렬의 유도

PSS의 계수에 대한 평가함수의 gradient $\frac{\partial J}{\partial P}$ 를 구하기 위해서는 우선 $\frac{\partial J}{\partial \bar{A}}$ 를 구하는데 이 과정은 다음 두 개의 정리에 근거한다^{10,11)}.

Lemma 1 (Kleinman)

Let $f(X)$ be a trace function and if one can write $f(X + \epsilon \Delta X) - f(X) = \epsilon \text{tr}[M(X)\Delta X]$ as $\epsilon \rightarrow 0$ where $M(X) : n \times r$ matrix, $X : r \times n$ matrix then $\frac{\partial f}{\partial X} = M^T(X)$

Lemma 2 (Bellman)

Let $F(X) = \exp[(A + BX)t]$ where $A : n \times n$ matrix, $B : n \times r$ matrix, $X : r \times n$ matrix then to first order in ϵ ,

$$F(X + \epsilon \Delta X) = \exp[(A + BX)t] + \epsilon \int_0^t \exp[(A + BX)(t - \sigma)] B \Delta X \cdot \exp[(A + BX)\sigma] d\sigma$$

(3)식을 전개하면

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \bar{X}^T \bar{Q} \bar{X} dt \\ &= \frac{1}{2} \int_0^\infty X_0^T e^{\bar{A}^T t} \bar{Q} e^{\bar{A} t} X_0 dt \quad (\text{단 } X_0 \text{는 } \bar{X} \text{의 초기치}) \end{aligned}$$

Lemma 2. 에 의하여

$$\begin{aligned} J(\bar{A} + \epsilon \Delta \bar{A}) &= \frac{1}{2} \text{tr} \int_0^\infty X_0 X_0^T e^{(\bar{A} + \epsilon \Delta \bar{A})^T t} \bar{Q} e^{(\bar{A} + \epsilon \Delta \bar{A}) t} dt \\ &= \frac{1}{2} \text{tr} \int_0^\infty X_0 X_0^T \left[e^{\bar{A}^T t} + \epsilon \int_0^t e^{\bar{A}^T \sigma} \Delta \bar{A}^T e^{\bar{A}^T (t - \sigma)} d\sigma \right] \end{aligned}$$

$\bar{Q} \cdot$

$$\begin{aligned} &\left[e^{\bar{A}^T t} + \epsilon \int_0^t e^{\bar{A}^T (t - \sigma)} \Delta \bar{A} e^{\bar{A} \sigma} d\sigma \right] dt \\ &= J(A) + \frac{1}{2} \epsilon \text{tr} \int_0^\infty X_0 X_0^T e^{\bar{A}^T t} \bar{Q} \int_0^t e^{\bar{A} (t - \sigma)} \Delta \bar{A} e^{\bar{A} \sigma} d\sigma \end{aligned}$$

dt

$$\begin{aligned} &+ \frac{1}{2} \epsilon \text{tr} \int_0^\infty X_0 X_0^T \int_0^t e^{\bar{A}^T t} \Delta \bar{A}^T e^{\bar{A}^T (t - \sigma)} d\sigma \bar{Q} e^{\bar{A} t} dt \\ \therefore \Delta J &= J(\bar{A} + \epsilon \Delta \bar{A}) - J(\bar{A}) \end{aligned}$$

$$= \epsilon \text{tr} \int_0^\infty \int_0^\infty X_0 X_0^T e^{\bar{A}^T t} \bar{Q} e^{\bar{A} (t - \sigma)} \Delta \bar{A} e^{\bar{A} \sigma} d\sigma dt$$

$\tau = t - \sigma$ 로 놓으면 $d\tau = dt$, $t = \sigma$ 일때 $\tau = 0$, $t = \infty$ 일때 $\tau = \infty$ 이므로

$$\begin{aligned} \Delta J &= \epsilon \text{tr} \int_0^\infty \int_0^\infty X_0 X_0^T e^{\bar{A}^T (\tau + \sigma)} \bar{Q} e^{\bar{A} \tau} \Delta \bar{A} e^{\bar{A} \sigma} d\sigma d\tau \\ &= \epsilon \text{tr} \int_0^\infty \int_0^\infty e^{\bar{A} \sigma} X_0 X_0^T e^{\bar{A}^T \sigma} e^{\bar{A}^T \tau} \bar{Q} e^{\bar{A} \tau} d\sigma d\tau \Delta \bar{A} \\ &= \epsilon \text{tr} \int_0^\infty e^{\bar{A} \sigma} X_0 X_0^T e^{\bar{A}^T \sigma} d\sigma \cdot \int_0^\infty e^{\bar{A}^T \tau} \bar{Q} e^{\bar{A} \tau} dt \cdot \Delta \bar{A} \end{aligned}$$

다음과 같이 정의하면 L, K는 대칭행렬 이므로

$$\int_0^\infty e^{\bar{A} \sigma} X_0 X_0^T e^{\bar{A}^T \sigma} d\sigma \triangleq L$$

$$\int_0^\infty e^{\bar{A}^T \tau} \bar{Q} e^{\bar{A} \tau} dt \triangleq K$$

$$\Delta J = \epsilon \text{tr}[LK \Delta \bar{A}]$$

Lemma 1에 의하여 $\frac{\partial J}{\partial \bar{A}} = [LK]^T = KL$

여기서 K, L은 다음 Liapunov 방정식의 해로써 주어진다¹²⁾.

$$\bar{A}^T K + K \bar{A} + \bar{Q} = 0$$

$$\bar{A} L + L \bar{A}^T + X_0 X_0^T = 0$$

이상의 결과로써 PSS의 임의의 계수를 P_k 라 하면

$$\frac{\partial J}{\partial P_k} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial J}{\partial \bar{a}_{ij}} \cdot \frac{\partial \bar{a}_{ij}}{\partial P_k} \quad (\text{단 } \bar{a}_{ij} \text{는 } \bar{A} \text{의 } ij \text{번째 요소})$$

(6), (7)식을 이용하여 최적 PSS 계수를 선정하는 알고리즘의 구성도는 다음과 같다.

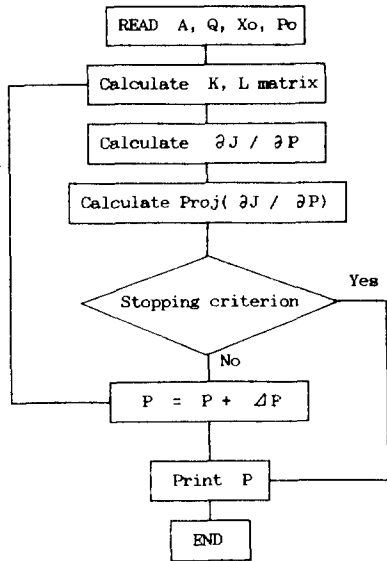


그림 4 최적 PSS 계수선정 알고리즘 흐름도
 Fig. 4 Flowchart of the optimal parameter selection algorithm

4. 사례연구 : 서천 화력발전소에의 적용

서천 T/P의 PSS는 각속도의 변화 (ΔW)를 입력으로 하고 있으며 그 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{K_c T_1 s (1 + T_2 s) (1 + T_4 s)}{(1 + T_1 s) (1 + T_3 s) (1 + T_5 s)}$$

- 단 $1 \leq K_c \leq 100$
- $0.1 \leq T_1 \leq 50$
- $0.2 \leq T_2, T_4 \leq 1.5$
- $0.02 \leq T_3, T_5 \leq 0.1$

서천 화력 발전소의 여자기를 포함한 1기 무한 모선모형은 그림 5 와 같으며 사용된 정수는 표 1. 과 같다.

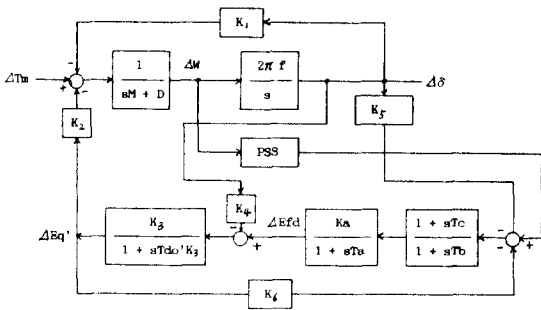


그림 5 서천화력 발전소 모형
 Fig. 5 Model of the Seo-Chun F/P.

II 1 서천 화력발전소의 제 정수 및 초기치 (246 MVA BASE)

Table 1 Initial Values and Parameters of Seo-Chun F/P

K1 - K6	K1=1.609	K2=1.665
	K3=0.323	K4=2.535
	K5=0.025	K6=0.285
발전기 정수	M=3.2	Tdδ=5.27
	D=1.35	Xd=1.801
	Xd'=0.278	Xq=1.726
여자기 정수	Ka=150.	Ta=0.05
	Tb=10.	Tc=1.
선로 정수	XL=0.1458	
초기 상태	Peo=0.65	Qeo=0.315
	Vto=1.0	

이 시스템에 대하여 PSS의 계수 벡터를 $P=[T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, K_c]$ 로 놓고 시스템의 상태벡터 $X=[\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta Eq', \Delta E_{fd}, X_s, P_{ss1}, P_{ss2}, P_{ss3}]$ 에 대한 가중행렬 Q를 변화시켜가며 제안한 알고리즘을 수행하였다.

가중행렬 Q값의 변화에 대한 PSS의 최적 계수 값 및 고유치는 다음과 같다.

1) $Q = \text{diag}(100, 100, 1, 1, 1, 1, 1)$

PSS 계수	$T_1=6.5$	$T_2=0.2$
	$T_3=0.02$	$T_4=0.2$
	$T_5=0.02$	$K_c=1.3$
고유치	$-1.03 \pm j 14.38$	
	$-0.53 \pm j 0.62$	
	-59.14	
	-37.67	
	-21.47	
	-0.15	

2) $Q = \text{diag}(1000, 1000, 1, 1, 1, 1, 1)$

PSS 계수	$T_1=27$	$T_2=0.2$
	$T_3=0.0225$	$T_4=0.2$
	$T_5=0.0225$	$K_c=7.23$
고유치	$-19.27 \pm j 13.68$	
	$-3.91 \pm j 14.79$	
	$-0.52 \pm j 0.60$	
	-62.89	
	-0.04	

3) $Q = \text{diag}(5000, 5000, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$

PSS 계수	$T_1 = 35$	$T_2 = 0.2$
	$T_3 = 0.027$	$T_4 = 0.2$
	$T_5 = 0.027$	$Kc = 20.$
고 유 치	$-8.10 \pm j 25.64$	
	$-7.79 \pm j 8.80$	
	$-0.51 \pm j 0.56$	
	-62.66	
	-0.13	

그림 6. ~그림 9. 에서는 가중 행렬의 변화에 따른 상태의 변화가 표시되어 있으며 각 그림에서의 기호는 다음과 같다.

- (a) : PSS 제어를 하지 않은 경우
- (b) : 가중행렬이 (100, 100, 1, 1, 1, 1, 1, 1)

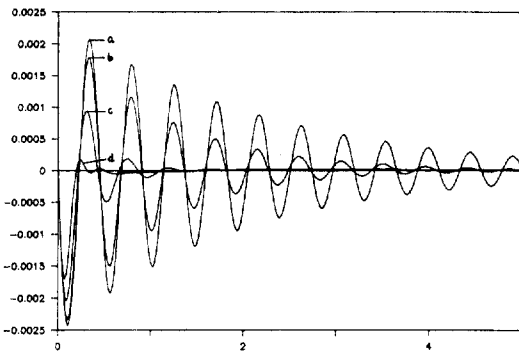


그림 6 $\Delta\omega$ 의 변화
Fig. 6 Trajectory of the frequency deviation

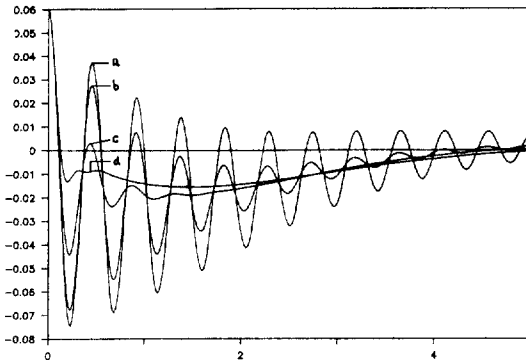


그림 7 $\Delta\delta$ 의 변화
Fig. 7 Trajectory of the angle deviation

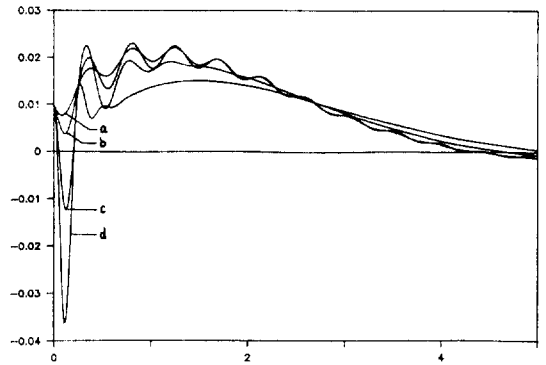


그림 8 $\Delta E'_q$ 의 변화
Fig. 8 Trajectory of the deviation of internal voltage

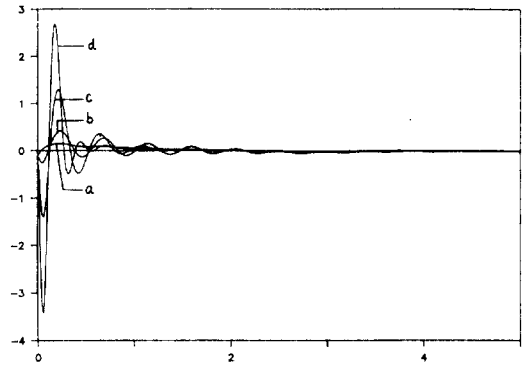


그림 9 ΔE_{fd} 의 변화
Fig. 9 Trajectory of the deviation of field voltage

- (c) : 가중행렬이 (100, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)
- (d) : 가중행렬이 (5000, 5000, 1, 1, 1, 1, 1, 1)

그림 6에서 보면 PSS를 인가하지 않을 경우 약 5초 후에도 진동이 남아있으나 (d)의 경우는 1초만에 진동이 완전히 상쇄된 것을 알 수 있다.

그림 7에서 보면 가중치가 커질수록 진동부분이 사라지면서 약 5초만에 평형 상태에 들어간 것을 알 수 있다.

그림 8에서 보면 내부기전기력의 경우는 가중치가 적으므로 진동 넓이가 크게 변동하지는 않으나 ω , δ 와의 관계로 초기응답이 커지는 것을 알 수 있다.

그림 9에서 보면 계자전압의 경우는 가중치가 커질수록 진동 주파수와 진폭이 크고 빨리 안정됨을 알 수 있으며 목적함수의 감소를 위해 입력이 증대하는

것을 알수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 제시한 알고리즘은 목적함수를 상태들의 2차 가중적분(Quadratic performance)으로 취하여 전체 진동 넓이의 최소화를 시도한 것으로써 이론적으로 기존의 선정 방법보다 체계적이나 각 스텝에서 Lyapunov Equation을 풀어야 하므로 계산 시간이 크다. 실제적으로 계산 시간에 제약을 받는 문제는 아니지만 다기계통의 적용 시에는 Lyapunov Equation의 빠른 해법이 요구된다.

참 고 문 헌

- 1) H.B. Gooi, et al. "Coordinated Multi-machine Stabilizer Settings without Eigenvalue Drift," IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-100, no. 8, Aug. 1981, pp. 3879-3887.
- 2) Yao-Nan. Yu, "Electric Power System," Academic Press, 1983.
- 3) E.L. Busby, "Dynamic Stability Improvement at Monticello Station-Analytical Study and Field Tests," IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-98, no. 3, May/June 1979, pp 889-897.
- 4) K. Bollinger, et al. "Power Stabilizer Design using Root Locus Methods," IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-94, no. 5 Sep./Oct. 1975, pp 1484-1488.
- 5) O.H. Abdalla, et al. "Coordinated Stabilization of Multimachine Power System," IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-103, no. 3 March 1984, pp 483-491.
- 6) A. Doi, S. Abe, "Coordinated Synthesis of System Stabilizers in Multimachine Power Systems," IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-103, no. 6, June 1984, pp 1473-1479.
- 7) Chu Liu, et al. "Using Decoupled Characteristic in the Synthesis of Stabilizers in Multimachine Systems," IEEE trans. on PS vol. PWRS-2, no. 1, Feb. 1987, pp 31-35.
- 8) R.J. Fleming, M.A. Mohan, K. Parvatisam, "Selection of Parameters of Stabilizers in Multimachine Power Systems," IEEE Trans. on PAS vol. PAS-100, no. 5, May 1981, pp 2329-2333.
- 9) Y.N. Yu, C. Siggers, "Stabilization and Optimal Control Signals for a Power System," IEEE Trans. on PAS, July/Aug. 1971, pp 1469-1481.
- 10) R. Bellman, "Introduction to matrix analysis" New York, Mcgraw Hill, 1960.
- 11) W.S. Levine and M. Athans, "On the determination of the optimal constant output feedback gains for linear multivariable systems," IEEE Trans. Automatic Control, vol. AC-15, 1970
- 12) T. Kailath, "Linear Systems," Prentice-Hall, 1980.