

전력계통 안정도 향상을 위한 GA적용 LQ-PSS 설계

정영민 · 이석오 · 김형수 · 박준호 · 황기현 · 이화석  
 부산대학교 전기공학과 · 부산대학교 컴퓨터 및 정보통신연구소 · 거제대학 전기전자계열

Design of LQ-PSS for Power System Stability Enhancement using GA

Young-min Jung · Seok-oh Lee · Hyung-su Kim · June-ho Park · Gi-hyun Hwang · Hwa-seok Lee  
 Department of Electrical Engineering, Pusan National University  
 Research Institute of Computer, Information and Communication at Pusan National University  
 Department of Electrical Engineering, Koje College

**Abstract** - This paper proposes the design of LQ-PSS(linear quadratic power system stabilizer) for improving power system stability using genetic algorithm(GA). We are tuned weighting matrices of LQ-PSS using GA.

To evaluate the usefulness of the proposed method, we performed the nonlinear simulation on a single machine infinite system. As results of the simulation, the proposed method shows the better control performance than CPSS(conventional power system stabilizer) in terms of settling time and damping effects.

1. 서론

전력계통의 저주파 진동 및 외란시 동기발전기의 여자 시스템에 보조신호를 제공하여 소신호 안정도를 개선하기 위한 전력계통 안정화장치(power system stabilizer : PSS)에 대한 연구는 1960년대 후반부터 진행되어 왔다. 기존의 안정화 장치는 진·지상 보상기가 많이 사용되고 있으며, 진·지상 보상기의 계수들을 결정하기 위해서 위상 보상개념, 극배치 기법 등을 이용하였다[1,2]. 이런 방법들은 특정한 운전점에서 선형화된 계통모델을 이용하여 제어를 설계하기 때문에 특정한 운전점에서는 좋은 제어성능을 나타내지만, 부하변동이나 고장 등과 같은 계통 운전조건이 변했을 때에는 좋은 제어성능을 기대하기 어렵다. 이러한 문제점으로 인해 좋은 안정성 여유와 강인성을 가진 선형 최적 전력계통 안정화 장치(linear optimal power system stabilizer)는 지난 수십년간 큰 주목을 받고 있다[3]. 따라서 본 논문에서는 우수한 안정성과 강인성을 가진 전력계통 안정화 장치로 유전 알고리즘을 이용한 LQ 제어기로 제안하였다. 자연생태계의 진화 원리를 모의하여 확률적인 방법에 의해 진역해를 탐색하는 유전 알고리즘을 이용하여 LQ 제어기의 최적 가중행렬을 선정하였다. 제안한 방법의 유용성을 검증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며, 제안한 방법이 댐핑 효과면에서 기존의 전력계통 안정화 장치보다 더 우수한 성능을 보였다.

2. 발전기 모델링 및 선형화

본 논문에서 사용한 발전기의 미분방정식은 식 (1)~(3)에 나타내었고, 여자는 속응성이 좋은 정지형 여자

시스템을 사용하였으므로, 식 (4)와 같이 여자를 제외한 AVR(automatic voltage regulator)만으로 모델링 하였다. 여기서 사용한 표기법은 참고문헌[4]에 언급되어 있다.

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T_{do}} [E'_q + (X_d - X'_d) I_d - E_{fd}] \quad (1)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_{ref} \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{\omega_{ref}}{2H} [T_M - E'_q I_q - (X_q - X'_d) I_d I_q] \quad (3)$$

$$\frac{dE_{fd}}{dt} = \frac{K_A}{T_A} (V_{ref} - V) - \frac{1}{T_A} E_{fd} \quad (4)$$

유전 알고리즘을 이용한 LQ-PSS의 설계를 위해 식 (1)~(4)의 발전기 미분방정식을 특정 동작점에 대해서 상태 변수  $\Delta\omega$ ,  $\Delta\delta$ ,  $\Delta E'_q$ , 및  $\Delta E_{fd}$ 에 대해서 선형화하면 그림 1과 같은 계통 모델을 얻을 수 있다.

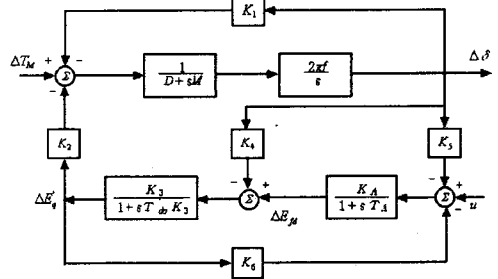


그림 1. 선형화된 계통모델의 블록 다이어그램

3. 유전 알고리즘을 이용한 가중 행렬 선정

3.1 LQ 제어(Linear Quadratic Control)

선형 최적 제어 시스템을 설계하기 위해서 그림 1의 선형화된 계통모델에 대한 상태공간 방정식은 다음과 같다. 식 (5)의 선형화된 모델에 대해서 식 (6)의 성능지수(performance index)를 최소화시키는 최적제어 이득 행렬 K는 먼저 Q, R를 결정한 후에 식 (7)의 제어 대수 Riccati 방정식의 해인 행렬 P를 구한 다음, 이를 식 (8)에 적용하여 구한다. 여기서, Q는 양의 반한정 대칭

(symmetric positive-semidefinite)인 상태 변수 가중행렬이며,  $R$ 은 양의 한정 대칭(symmetric positive-definite)인 제어 입력 가중행렬이다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5)$$

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Qx + u^T Ru) dt \quad (6)$$

$$A^T P + PA + Q - PB R^{-1} B^T P = 0 \quad (7)$$

$$u = -Kx = -R^{-1} B^T P x \quad (8)$$

### 3.2 유전 알고리즘을 이용한 가중 행렬 선정

본 논문에서 유전 알고리즘을 이용하여 LQ-PSS 설계를 위한 해집단 구성은 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 유전알고리즘으로 LQ-PSS의 가중행렬의 설계식식 (9)~(10)과 같이 실변수 대각성분만 고려하여 해집단을 구성하였다[5].

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R = rI \quad (10)$$

여기서,  $I$  :  $4 \times 4$ 의 단위행렬

$r$  : 상수

$S_1$	$q_{11}$	$q_{12}$	$q_{13}$	$q_{14}$	$r_1$
$S_2$	$q_{21}$	$q_{22}$	$q_{23}$	$q_{24}$	$r_2$
$\vdots$			$\vdots$		
$S_n$	$q_{n1}$	$q_{n2}$	$q_{n3}$	$q_{n4}$	$r_n$

그림 2. 가중행렬  $Q, R$ 의 스트링 구성

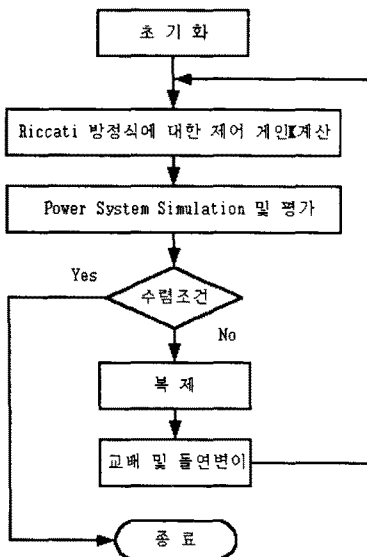


그림 3. 유전 알고리즘을 이용한 가중행렬 선정 절차

그림 2의 각 스트링을 평가하기 위한 유전 알고리즘은 적합도 함수 선정은 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 시스템의 제동(damping) 및 정정시간(settling time)을 고려한 절대오차 시간곱 적분(integral of time multiplied by the absolute error : ITAE)을 적합도 함수로 사용하였고[6], 식 (11)에 나타내었다. 유전 알고리즘을 이용하여 LQ-PSS의 가중행렬 선정에 대한 과정은 그림 3과 같다.

$$fitness = \int_0^{\infty} t |\Delta x| dt \quad (11)$$

여기서,  $\Delta x$  = 상태변수 변화분

### 4. 사례 연구

제한한 LQ-PSS의 성능을 검증하기 위해 사용된 1기 무한대 계통은 그림 4에 나타내었고, 그림 4의 시스템에 대해서 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 1기 무한대 계통의 정수 및 초기 상태는 표 1과 같으며, LQ-PSS의 튜닝에 사용된 유전 알고리즘의 시뮬레이션 계수는 표 2와 같다. 유전알고리즘으로 가중행렬 튜닝시  $Q, R$ 의 범위는  $0 < q_{11} < 100000, 0 < q_{22} < 10, 0 < q_{33} < 10, 0 < q_{44} < 10, 1 < r < 10$ 이다.

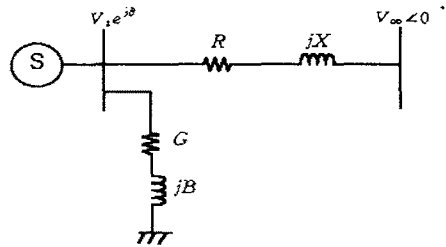


그림 4. 성능평가에 사용된 1기 무한대 계통

표 1. 1기 무한대 계통의 기기 및 선로정수

발전기 정수	$M=9.26, D=0, T_{d0}=7.76$ $X_q=0.55, X_d=0.973, X'_d=0.19$
여자기 정수	$K_A=50, T_A=0.05$
선로 정수	$R=-0.034, X=0.997$ $G=0.249, B=0.262$

표 2. 유전 알고리즘의 시뮬레이션 계수

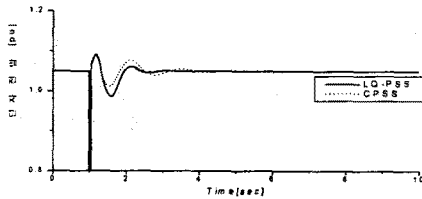
해집단수	교배확률	돌연변이확률	세대수
20	0.95	0.05	100

유전 알고리즘으로 설계된 LQ-PSS와 기존의 전·지상보상기[7]와의 성능을 비교하기 위해 사용된 해석 조건은 표 3과 같다. 유전 알고리즘으로 LQ-PSS의 설계에 사용된 계통 운전조건은 정상부하시 발전기 위상각의 변화를 이용하였다. 표 3의 경우 1~3은 LQ-PSS의 강인성을 평가하기 위해 사용되었다.

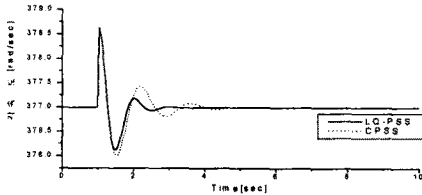
표 3. 제어기 성능평가에 사용된 시뮬레이션 조건

시뮬레이션 사례	동작 조건	외란 종류	고장 시간
경우-1	정상부하시 ( $P=1.0, Q=0.015$ )	3상 지락고장	40[msec]
경우-2	중부하시 ( $P=1.3, Q=0.015$ )		
경우-3	경부하시 ( $P=0.7, Q=0.015$ )		

그림 5는 정상부하시 3상고장이 발생했을 때 발전기 응답 특성을 나타내었고, 그림 6과 그림 7은 중부하 및 경부하시 발전기 응답특성을 나타내었다. 그림 5~그림 7에서 보는 것처럼, 제안한 LQ-PSS가 정정시간 및 제동 효과면에서 CPSS 보다 더 나은 제어성능을 나타내었다.

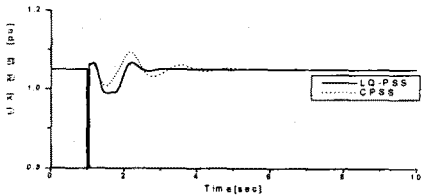


(a) 단자전압

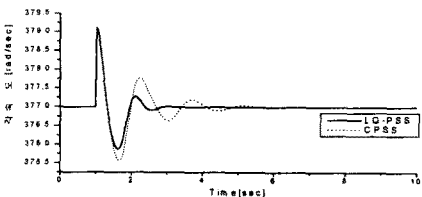


(b) 발전기 각속도

그림 5. 정상부하시 발전기 응답(경우-1)

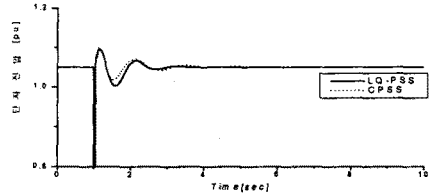


(a) 단자전압

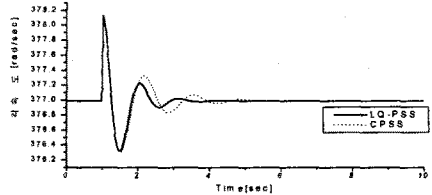


(b) 발전기 각속도

그림 6. 중부하시 발전기 응답(경우-2)



(a) 단자전압



(b) 발전기 각속도

그림 7. 경부하시 발전기 응답(경우-3)

## 5. 결론

본 논문에서는 전력계통 안정도 향상을 위해 유전 알고리즘을 이용한 LQ-PSS를 설계하였다. LQ 제어기의 가중행렬 선정을 위해 유전 알고리즘을 이용하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해 1기 무한대 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 제안한 LQ-PSS가 정상부하, 중부하 및 경부하시 3상 고장이 발생했을 때 기존의 CPSS보다 더 나은 제동 효과를 나타내었다.

## [참고 문헌]

- [1] P.Kundur, "Power System Stability and Control", 1994, McGraw-Hill.
- [2] F. P. Demello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control", IEEE Trans. on PAS, Vol.88, No. 4, pp.189-202, 1969
- [3] Chen, O. P. Malik, Qin and G. Y. Xu, "Optimization technique for the design of a linear optimal power system stabilizer", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.7, No. 3, September, 1992
- [4] P. M. Anderson and A. Fouad, Power System Control and Stability, IEEE Press, 1997
- [5] 김학만, 오태규, 신명철, 손광명, "다기계통에서의 GA를 이용한 TCSC 적용 LQ제어기의 최적 가중행렬 선정 및 제어기 설계", 대한전기학회논문지, 제47권, 제11호, pp.1845-1852, 1998
- [6] Y. L. Abel-Magid and M. M Dawoud, "Tuning of power system stabilizers using genetic algorithms", IEE Electric Power Systems Research 39, 137-143, 1996
- [7] Yao-nan Yu, "Electric Power System Dynamics", Academic Press, 1983