

유전 알고리즘을 이용한 전력시스템 안정화 장치의 최적 파라미터 선정

論 文
48A-6-4

Optimal Parameter Selection of Power System Stabilizer using Genetic Algorithm

鄭亨煥* · 王龍泌** · 鄭東一*** · 鄭文圭§
(Hyeng-Hwan Chung · Yong-Peel Wang · Dong-Il Chung · Mun-Kyu Chung)

Abstract - In this paper, it is suggested that the selection method of optimal parameter of power system stabilizer(PSS) with robustness in low frequency oscillation for power system using Real Variable Elitism Genetic Algorithm(RVEGA). The optimal parameters were selected in the case of power system stabilizer with one lead compensator, and two lead compensator. Also, the frequency responses characteristic of PSS, the system eigenvalues criterion and the dynamic characteristic were considered in the normal load and the heavy load, which proved usefulness of RVEGA compare with Yu's compensator design theory.

Key Words : Real Variable Elitist Genetic Algorithm(RVEGA), Power System Stabilizer(PSS)

1. 서 론

최근 전력 수요의 증가와 산업의 고도화에 따라 전력시스템의 신뢰도와 안정도 향상 대책 수립은 앞으로 해결해야 할 필수 과제로 부각되고 있다. 특히, 대용량 원자력 및 양수식 발전소의 비중 증대로 저주파 진동(Low Frequency Oscillation) 현상, 경부하 심야 운전 중의 전압 상승 등 시스템 안정도에 관련된 문제는 시급히 해결해야 할 기술적 난제이다. 따라서, 시스템 안정 운용을 위하여 발전기 제어장치인 조속기, 전압 조정 장치, 여자기 및 안정화 장치 등의 적정 파라미터 값을 설정하는 실제적 방법에 관한 연구가 요청되고 있다[1,2].

특히, 전력 시스템 안정화 장치 즉 PSS는 저주파 진동 억제 및 안정도 향상에 중요한 부분을 차지하고 있다. 발전기 제어계 파라미터 선정을 위한 방법론은 1970년대부터 시작되어 초기에는 주로 1기 무한대 모선에 적용될 수 있는 이론들이 발표되었다.

K. Bollinger[3] 등은 위상 보상 회로의 시정수에 따른 근례적용을 구하여 PSS의 계수를 구하는 방법, R. J. Fleming[4] 등은 동요 모드의 고유치를 지정하는 극배치 방법, O. H. Abdalla[5] 등은 고유치의 감도를 이용하는 방법 등을 제안하였다. 최근 P. Kundur[6] 등에 의한 미소 신호 안정도 해석과 위상 보상법의 개발은 PSS 설계에 중요한 전기를

제공하였으며, A. Ghosh[7] 등은 자기 동조 제어기법을 이용하여 각 동작점을 추적하는 방식을 제안하였다. 그러나 PSS는 그 구조가 다양하고 설계방법이 복잡하여 이의 사용에 고도의 전문성이 요구된다.

본 논문에서 발전기 제어계인 안정화 장치의 최적 파라미터 선정을 위한 방법은 자연 생태계의 진화를 모의한 유전 알고리즘(GA : Genetic Algorithm)을 이용하였다. 유전 알고리즘은 고전적 방법으로는 최적화 하기 어려운 목적 함수의 최적화, 신경 회로망의 학습, 퍼지 멤버십 함수의 동조, 기계 학습, 시스템 식별 및 제어 등에 널리 응용되고 있다 [8-9]. 또한, 유전 알고리즘은 목적 함수의 미분 가능성 및 연속성에 관계없이 최적해를 구할 수 있고, 해 집단(solution population)을 동시에 탐색하는 전역적 탐색 방법이므로 국부 수렴할 가능성이 적고 복잡한 과정이 필요없이 주어진 문제를 간단한 알고리즘으로 구현할 수 있으며, 제약 조건이 추가되는 경우에도 소프트웨어의 큰 변화없이 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나, 기존의 유전 알고리즘은 많은 장점에도 불구하고, 변수들을 유한 길이의 2진 스트링(string)으로 코딩(coding)하므로 다변수인 경우 많은 계산 시간을 필요로 하고 정확성을 상실할 수도 있다. 또한 구조적인 문제점으로 인해 국부값에서 조기 수렴하는 현상이 발생한다.

따라서, 이러한 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 첫째, 변수의 코딩 절차 없이 실 변수(Real Variable)로 최적화 함으로써 코딩 시간을 감소하고 정확성을 유지하는 방법과 둘째, 양질의 유전자를 보존하며 열성 유전자를 제거하여 보다 적은 반복 횟수로도 좋은 해를 찾아 나갈 수 있는 엘리트주의(Elitism)를 이용하였다. 즉 이상의 두 가지 방법을 결합한 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘(RVEGA : Real Variable Elitism Genetic Algorithm)을 이용하였다.

본 논문에서는 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘 이용하

* 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
** 正 會 員 : Dept. of Electrical & Electronic Eng., Univ. of Canterbury(New Zealand), Post-Doc. · 工博
*** 正 會 員 : 東亞大 工大 情報通信研究所 特別研究員 · 工博
§ 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣工學科 碩士課程
接受日字 : 1998年 11月 20日
最終完了 : 1999年 5月 11日

여 1기 무한대 모선 전력 시스템에 있어서 1개의 진상 보상기를 가지는 경우와 2개의 진상 보상기를 가지는 PSS의 최적 파라미터를 선정하는 방법을 제안하였다. 또한 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 시스템의 고유치 판별과 PSS의 주파수 응답특성을 통하여 안정도를 해석하였다. 그리고 시스템 운용 조건을 정상부하와 중부하로 선정하여 시스템 동특성을 비교·고찰함으로써 유전 알고리즘을 이용한 전력시스템 안정화 장치의 최적 파라미터 선정의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘

1970년 John Holland는 집단이 가진 염색체(chromosome)가 세대(generation)에 따라 그들이 처한 환경에 대하여 생존과 번식의 적합한 활동을 위한 자연 선택(natural selection) 때문에 진화된다는 다윈의 진화 이론을 토대로 한 자연의 유전 원리를 모방하여 유전 알고리즘(GA : Genetic Algorithm)을 도입하기 시작했다. 이 유전 알고리즘은 최근 최적화 문제를 해결하는데 적용하고 있으며 해를 구하는 방법에서 종래의 방법과 비교할 때 강인한 탐색 방법이다[10-16].

유전 알고리즘은 평가 함수(evaluation function), 유전 연산자(genetic operator), 그리고 문제의 해를 표현하는 염색체(chromosome)로 구성되며, 이 염색체들을 점진적으로 개선시켜 나감으로써 최적의 해를 얻게 된다. 유전 알고리즘의 유전 연산자는 복제(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)등이 있다. 교배는 두 염색체간의 임의의 난수 발생에 의해 구한다. 돌연변이는 부모의 염색체 중 임의의 비트가 현재 비트 값이 대립되는 값으로 바뀌는 것이다. 즉 선택된 비트 값이 0이면 1로, 1이면 0으로 변환된다. 이와 같은 탐색 방법을 사용하는 유전 알고리즘은 다 변수의 제약 조건이 많은 복잡한 비선형 최적화 문제에 특히 유용하다.

그러나 기존의 유전 알고리즘은 변수들을 유한 길이의 2진 스트링으로 코딩해야 한다. 코딩할 스트링의 길이와 변수의 해는 trade-off 관계에 있다는 것을 알 수 있다. 더욱 정확한 해를 요구한다면 스트링의 길이는 매우 길어야 한다. 긴 스트링에 대한 코딩 절차는 많은 계산 시간을 필요로 하고 수렴 정도를 감소시킨다. 따라서 본 연구에서 변수를 유한 길이로 코딩하는 절차가 필요없이 변수 그 자체로 최적화 하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 변수의 코딩 절차 없이 실 변수로 최적화 함으로써 코딩 시간을 감소하고 정확성을 유지할 수 있다.

또한 기존의 유전 알고리즘의 문제점과 더불어 구조적인 문제점이 따르고 있다. 즉 세대가 어느 정도 지나면 더 좋은 해가 도출되지 못하고 멈추어 버리는 조기 수렴(early convergence)의 문제가 종종 발생한다. 이 문제점은 돌연변이(mutation) 확률을 높임으로써 어느 정도 극복할 수 있으나, 이를 극복하는 데에는 한계점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 엘리트주의 유전 알고리즘은 이 후손의 목적 함수 값이 원래의 집단 안에서 가장 열성인 유전자의 적합도 값(즉 원 집단 내의 최소 적합도 값)과 비교하여 그 값보다 크면 그 집단에 가입시키고 이전 유전자는 버린다. 따라서 엘리트주의(Elitism)는 기존 알고리즘의 문제점 중 선택과 교배시의 한계점을 극복하고자 하는 시도이다. 이러

한 과정을 통하여, 좋은 유전 배열을 가진 해들은 계속 보존되므로 이들이 선택 과정시 탈락되는 것을 방지하며, 교배시에 더 열성의 후손이 생성될 경우 이를 배제시키는 것이다. 이상의 두 가지 방법을 결합한 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘(RVEGA)의 흐름도는 그림 1과 같다.

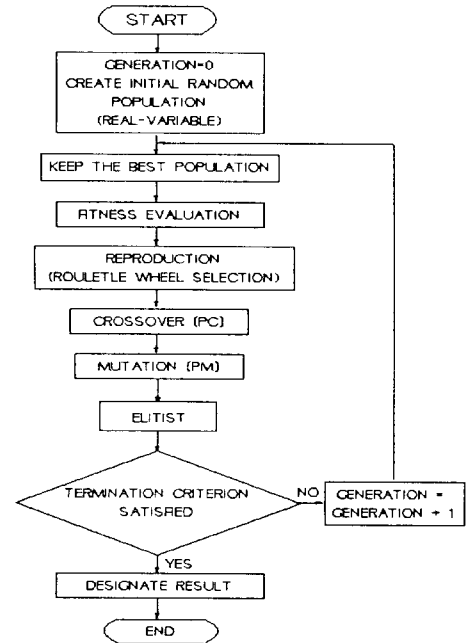


그림 1 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘의 흐름도
Fig. 1 Flowchart of real variable elitism genetic algorithm

3. 전력 시스템의 수학적 모델

본 연구에서 고찰하고자 하는 전력 시스템 모델은 그림 2와 같다.[18-20].

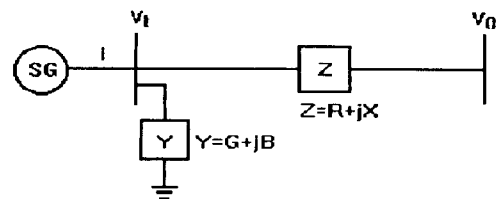


그림 2 1기 무한대 모선의 전력 시스템
Fig. 2 A one machine infinite bus power system

3.1 동기기 및 여자기 모델

발전기의 동적인 운동 방정식은 식(1), (2)와 같다.

$$M \frac{d\Delta\omega}{dt} + D\Delta\omega = \Delta T_m - \Delta T_e \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (2)$$

여기서, $\Delta\omega$ 는 각속도[rad/sec], $\Delta\delta$ 는 회전자각[rad], M은 동기기의 관성 상수[p.u.], D는 동기기의 제동 상수[p.u.], ΔT_m 와 ΔT_e 는 동기기의 기계적 및 전기적 토오크[p.u.]이다.

또한, 여자기는 동기 발전기의 단자 전압이 기준 전압보다 강하할 때는 여자를 증가시키고 단자 전압이 기준 전압보다 상승할 때는 여자를 감소시키는 부계환 작용을 한다. 이로써 여자 시스템은 저주파 진동시 시스템의 제동을 향상시킬 뿐만 아니라 외란시도 시스템의 안정도를 향상시키는 역할을 한다. 여자기는 식(3)과 같은 전달 함수로 나타낸다.

$$\Delta E_{FD} = \frac{K_A}{1 + sT_A} (\Delta u_E - \Delta V_t) \quad (3)$$

여기서, ΔE_{FD} 는 고정자 유기 기전력, K_A 와 T_A 는 여자기 이득 상수 및 시정수, ΔV_t 는 단자 전압, Δu_E 는 PSS의 출력 신호이다.

그림 3은 이와 같은 동기기 및 여자기 모델을 종합한 블록 선도이다. 이 모델은 기계적 입력을 고정시킨 후 ($\Delta T_m = 0$) 평형 상태에서 선형화한 것이다. 일반적으로 다가 시스템 안정도 해석에 사용되며, 특히 저주파수 진동을 해석하기 위한 모델이다.

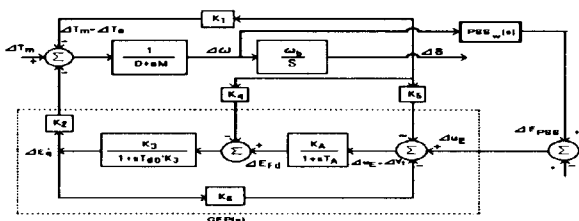


그림 3 선형화한 1기 무한대 모선의 전력 시스템
Fig. 3 Linearized model of a one machine infinite bus power system

그림 3을 기초로 한 상태 변수는 각속도 $\Delta\omega$, 회전자각 $\Delta\delta$, 발전기 유기 전압 $\Delta E_q'$, 고정자 유기 기전력 ΔE_{FD} 이며, 상태 방정식은 식(4) 및 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ \omega_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T_{d0}} & -\frac{1}{T_{d0}} & \frac{1}{T_{d0}} \\ 0 & -\frac{K_A K_5}{T_A} & -\frac{K_A K_6}{T_A} & \frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} u \quad (5)$$

3.2 전력 시스템 안정화 장치의 구조

그림 4는 PSS 한 모델이다[13]. 전달 함수 $GEP(s)$ 는 동기기의 회전자각이 일정할 때, 여자기 입력에 대한 전기적 토오크간의 전달 함수를 나타내고, 동기기와 여자기 특성에 의해 결정된다.

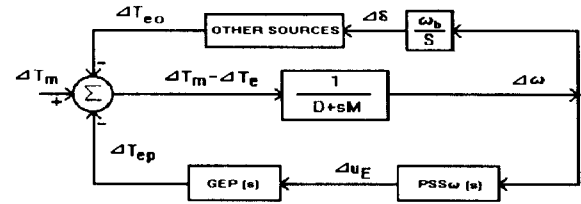


그림 4 회전자 속도를 입력으로 하는 PSS
Fig. 4 Functional representation of PSS with rotor speed as input

여기에서 ΔT_{ep} 는 PSS에 의해 발생하는 토오크 성분이고, 그 밖의 요소들에 의해 발생하는 토오크 성분은 ΔT_{eo} 이다. 이때 PSS 신호에 의한 토오크 성분은 식(6)과 같다.

$$\frac{\Delta T_{ep}}{\Delta\omega} = PSS_{\omega}(s)GEP(s) \quad (6)$$

4. 실 변수 엘리트주의 유전 알고리즘을 이용한 전력 시스템 안정화 장치의 설계

RVEGA를 이용하여 1개의 진상 보상기를 가지는 경우와 2개의 진상 보상기를 가지는 PSS의 최적 파라미터를 구하기 위하여, 목적 함수는 선형 2차 평가 함수로 식(7)과 같이 표현한다.

$$\min_{K_c, T, T_1, T_2} \left\{ J = \int_{t_0}^{t_f} [x^T(t)Qx(t)]dt \right\} \quad (7)$$

단, Q : 상태 가중치 행렬(n×n)

평가 함수의 최소화를 위한 각 PSS의 최적 파라미터를 구하는 문제는 제약 조건도 많고 계산량도 많은 복잡한 최적화 문제이다. 그러나, RVEGA는 단지 어떤 해에 대한 적합도만 계산하면 확률적인 방법으로 최적해, 즉 평가 함수가 최소가 되는 최적 파라미터를 구할 수 있다.

평가 함수를 최소화하는 문제를 위한 스트링을 각 PSS에 따라 구성하면 그림 5와 같다.

string 1	K_c	T	T_1	T_2
string 2	K_c	T	T_1	T_2

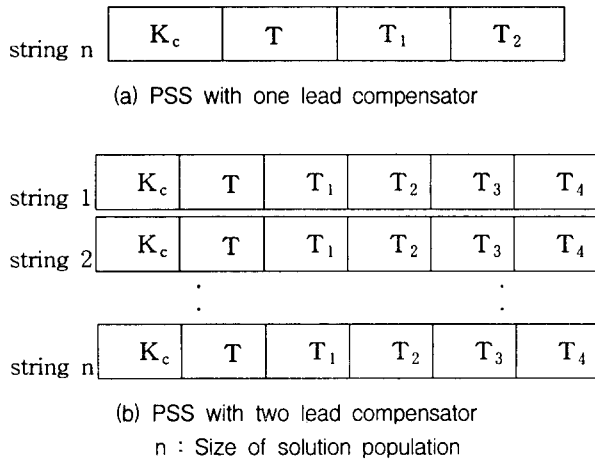


그림 5 해 집단의 구조
Fig. 5 Population Structure

따라서 각 스트링을 평가할 때 위에서 전술한 조건을 만족하도록 적합도를 식(8)과 같이 선정하였다.

$$\text{Fitness} = \frac{1.0}{1.0 + \min J} \quad (8)$$

4.1 1개의 진상 보상기를 가지는 경우

본 논문에서 고찰하고자 하는 PSS의 구조는 회전자 속도를 입력으로 사용하는 PSS이다. 그림 6은 고성능 여자기의 경우에 1개의 진상 보상기가 연결된 형태의 PSS이며, 전달 함수는 식(9)와 같다.

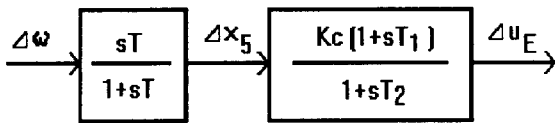


그림 6 1개의 진상 보상기를 가지는 PSS의 블록선도
Fig. 6 Block diagram of PSS with one lead compensator

$$\text{PSS}_\omega(s) = K_c \frac{sT}{1+sT} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \quad (9)$$

여기서, K_c 는 PSS의 이득이고 T 는 washout 시정수, $T_1 \sim T_2$ 는 PSS의 특성을 결정하는 시정수이다.

회전자 진동을 감쇄시키기 위하여 PSS는 속도 변화에 비례하는 전기 토오크를 발생해야 하는데, 이를 위해서는 PSS에서 여자기 입력과 전기 토오크간의 전달 함수의 위상 지연을 보상해 주면 된다. 동기기와 여자기 및 PSS를 포함하는 상태 방정식은 식(10)과 같이 표현된다.

$$\dot{X} = A_1 X + B_1 U_E = A_{C1} X \quad (10)$$

따라서 진상 보상기를 1개만 가지는 PSS인 경우의 상태 변수는 $X = [\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta E_q', \Delta E_{FD}, \Delta x_5, \Delta u_E]^T$ 이다.

4.2 2개의 진상 보상기를 가지는 경우

그림 7은 반응 속도가 느린 여자기의 경우에 사용되는 2개의 진상 보상기가 연결된 형태의 PSS이며, 전달함수는 식(11)과 같다.

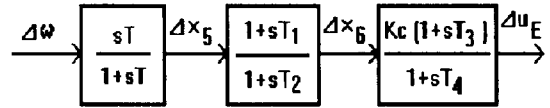


그림 7 2개의 진상 보상기를 가지는 PSS의 블록선도
Fig. 7 Block diagram of PSS with two lead compensator.

$$\text{PSS}_\omega(s) = K_c \frac{sT}{1+sT} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \frac{1+sT_3}{1+sT_4} \quad (11)$$

여기서, K_c 는 PSS의 이득이고 T 는 washout 시정수, $T_1 \sim T_4$ 는 PSS의 특성을 결정하는 시정수이다.

동기기와 여자기 및 PSS를 포함하는 상태 방정식은 식(12)와 같이 표현된다.

$$\dot{X} = A_2 X + B_2 U_E = A_{C2} X \quad (12)$$

따라서, 진상 보상기를 2개 가지는 PSS인 경우의 상태 변수는 $X = [\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta E_q', \Delta E_{FD}, \Delta x_5, \Delta x_6, \Delta u_E]^T$ 이다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

RVEGA를 이용하여 전력 시스템 안정화 장치를 1개의 진상 보상기를 가진 PSS의 경우와 2개의 진상 보상기를 가진 PSS의 경우, 각각에 대하여 최적 파라미터를 선정하였다.

본 논문에서 사용한 동기기, 여자기 및 선로 정수와 시스템 초기 상태는 표 1과 같다. 또한 각 경우에 대하여 정상 부하와 중부하시에 전력 시스템 안정화 장치의 파라미터 선정을 위한 RVEGA의 계수는 표 2와 같다.

표 1 1기 무한대 모선 시스템의 초기치 및 각종 상수

Table 1 Initial values and constants of one machine infinite bus

발전기 정수	$M=9.26$ [p.u.] $D=0.0$ [p.u.] $T_{d0}'=7.76$ [p.u.]	$X_d=0.973$ [p.u.] $X_d'=0.190$ [p.u.] $X_q=0.550$ [p.u.]
여자기 정수	$K_A=50.0$ [p.u.]	$T_A=0.05$ [p.u.]
선로 정수	$R=-0.034$ [p.u.] $G=0.249$ [p.u.]	$X=0.997$ [p.u.] $B=0.262$ [p.u.]
초기 상태	$P_{e0}=1.0$ [p.u.] $V_{u0}=1.05$ [p.u.]	$Q_{e0}=0.015$ [p.u.]

표 2 RVEGA의 정수

Table 2 Parameter of RVEGA

		string 수	해집단의 크기	교배 확률	돌연변이 확률
정상 부하시	1개의 진상보상기	4	100	0.85	0.01
	2개의 진상보상기	6	100	0.85	0.01
중부하시	1개의 진상보상기	4	100	0.85	0.01
	2개의 진상보상기	6	100	0.85	0.01

5.1 1개의 진상 보상기를 가지는 전력 시스템 안정화 장치인 경우

1개의 진상 보상기를 가지는 PSS인 경우 상태 변수는 $X = [\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta E_q', \Delta E_{FD}, \Delta x_5, \Delta u_E]^T$ 이며, 이때의 상태 가중치는 $Q = \text{diag}[1, 1, 1, 1, 1, 1]^T$ 로 하였다. 또한, 샘플링 주기는 0.01[sec]이다. 이때의 PSS의 출력 신호 극한값으로 $u_{E \max} = 3.0 \times E_{FD0}$, $u_{E \min} = -3.0 \times E_{FD0}$ 로 설정하였다.

실제의 전력 시스템 시스템은 부하의 변동에 따라 선형화 계수가 변하는 비선형 시스템이기 때문에, 상태가 변함에 따라 비선형 시뮬레이션을 수행하여야 하지만, 본 논문에서는 정상부하시 $\Delta\delta$ 의 초기치를 0.1[p.u.]를 변화시킨 경우와 운전 조건 변화시, 즉 부하 조건의 변화로 유효 전력이 $P_{e0} = 1.0$ [p.u.]에서 $P_{e0} = 1.3$ [p.u.]으로 30% 증가한 중부하시에 $\Delta\delta$ 의 초기치를 0.1[p.u.] 변화시킨 경우로 시스템 운용 조건을 설정하고, 각 운전점에서 선형화된 모형을 이용하여 Yu의 보상기 설계 이론에 의한 파라미터 선정 방법과 RVEGA를 사용하였을 때를 비교하여 동특성을 검토하였다. 또한, 선형화한 $K_1 \sim K_6$ 은 시스템 조건에 따라 변하는 정수이기 때문에 시스템 조건에 따라 각각 계산하였고, 그에 따른 시스템 고유치를 판별하여 안정도를 해석하였다.

Yu의 방법과 RVEGA를 이용한 전력 시스템 안정화 장치의 최적 파라미터는 표 3과 같이 나타났다.

표 3 Yu와 RVEGA에 사용한 PSS의 최적 파라미터

Table 3 Optimal parameter of PSS using Yu and RVEGA

부하 조건		Optimal parameter	K_c	T	T_1	T_2
정상 부하시	Yu 방법		7.0900	3.0000	0.6850	0.1000
	RVEGA		8.8338	3.9986	1.9816	0.3748
중부하시	Yu 방법		7.0900	3.0000	0.6850	0.1000
	RVEGA		8.9302	3.9986	1.9042	0.3893

정상 부하와 중부하시의 시스템 선형화 계수 ($K_1 \sim K_6$)

는 표 4와 같이 나타났고, 시스템 고유치는 표 5와 같다. 또한 Yu의 방법과 RVEGA를 이용한 전력 시스템 안정화 장치의 최적 파라미터를 갖는 PSS의 주파수 응답특성을 그림 8, 9에 나타내었고, 정상 부하시 및 중부하시의 동특성은 그림 10, 11에 나타내었다.

표 4 $K_1 \sim K_6$ 의 파라미터

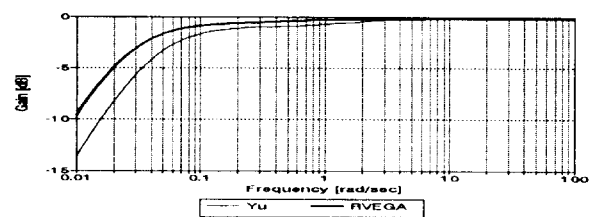
Table 4 Parameter $K_1 \sim K_6$

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
정상부하시	0.5441	1.2067	0.6584	0.6981	-0.0955	0.8159
중부하시	0.4563	1.4477	0.6584	0.8705	-0.1675	0.7747

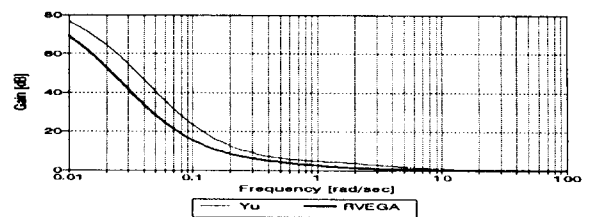
표 5 A_{C1} 의 시스템 고유치

Table 5 System eigenvalues of A_{C1}

		Yu	RVEGA
정상 부하시	Mechanical	$\lambda_1 = -1.181 - j5.023$ $\lambda_2 = -1.181 + j5.023$	$\lambda_1 = -1.613 - j2.141$ $\lambda_2 = -1.613 + j2.141$
	Electrical	$\lambda_3 = -3.637 - j5.363$ $\lambda_4 = -3.637 + j5.363$	$\lambda_3 = -1.184 - j7.868$ $\lambda_4 = -1.184 + j7.868$
	Control	$\lambda_5 = -16.739 + j0.000$ $\lambda_6 = -0.338 + j0.000$	$\lambda_5 = -17.170 + j0.000$ $\lambda_6 = -0.252 + j0.000$
중부하시	Mechanical	$\lambda_1 = -1.157 - j4.288$ $\lambda_2 = -1.157 + j4.288$	$\lambda_1 = -1.596 - j2.130$ $\lambda_2 = -1.596 + j2.130$
	Electrical	$\lambda_3 = -4.518 - j7.626$ $\lambda_4 = -4.518 + j7.626$	$\lambda_3 = -1.469 - j7.992$ $\lambda_4 = -1.469 + j7.992$
	Control	$\lambda_5 = -18.842 + j0.000$ $\lambda_6 = -0.337 + j0.000$	$\lambda_5 = -16.733 + j0.000$ $\lambda_6 = -0.252 + j0.000$



(a) Gain



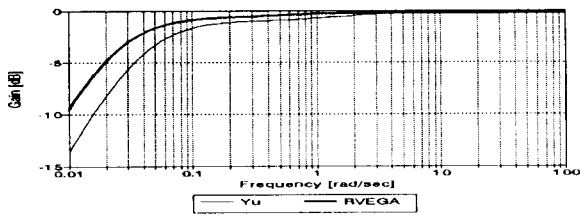
(b) Phase

그림 8 PSS의 주파수 응답

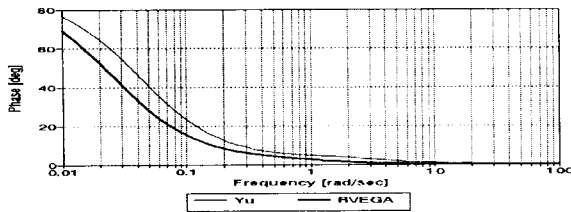
($P_{e0} = 1.0$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.])

Fig. 8 Frequency response of PSS

($P_{e0} = 1.0$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.])



(a) Gain



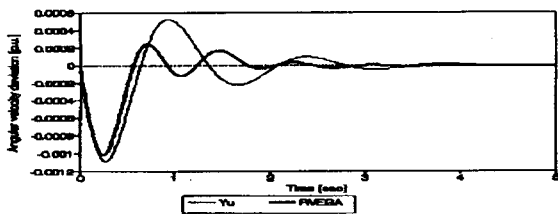
(b) Phase

그림 9 PSS의 주파수 응답

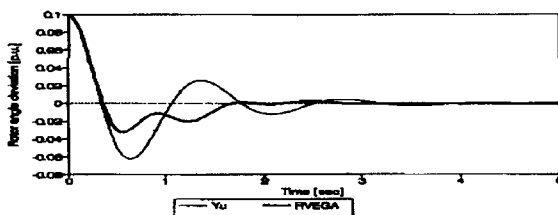
$$(P_{e0} = 1.3[\text{p.u.}], Q_{e0} = 0.015[\text{p.u.}])$$

Fig. 9 Frequency response of PSS

$$(P_{e0} = 1.3[\text{p.u.}], Q_{e0} = 0.015[\text{p.u.}])$$



(a) Angular velocity $\Delta\omega$

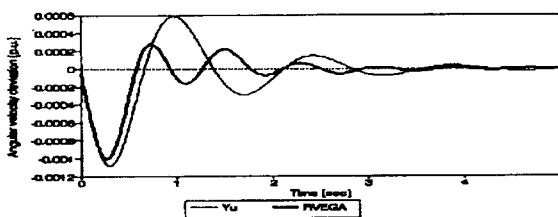


(b) Rotor angle $\Delta\delta$

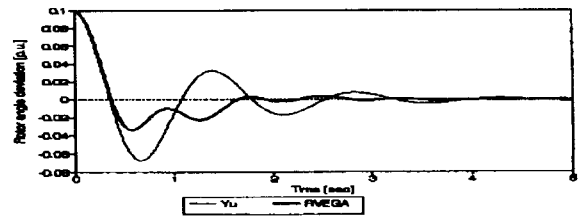
그림 10 초기치에 회전자각 편차를 증가한 경우의 응답

$$(P_{e0} = 1.0[\text{p.u.}], Q_{e0} = 0.015[\text{p.u.}])$$

Fig. 10 Response to increasing rotor angle deviation in initial point ($P_{e0} = 1.0[\text{p.u.}], Q_{e0} = 0.015[\text{p.u.}]$)



(a) Angular velocity $\Delta\omega$



(b) Rotor angle $\Delta\delta$

그림 11 초기치에 회전자각 편차를 증가한 경우의 응답

$$(P_{e0} = 1.3[\text{p.u.}], Q_{e0} = 0.015[\text{p.u.}])$$

Fig. 11 Response to increasing rotor angle deviation in initial point ($P_{e0} = 1.3[\text{p.u.}], Q_{e0} = 0.015[\text{p.u.}]$)

위의 결과 RVEGA를 이용한 PSS의 주파수 특성은 주요 동요 모드의 감쇠율이 증가하고 주파수 영역 성능도 증가함을 알 수 있다. 그리고 정상 부하시나 중부하시의 동특성을 고찰함으로써 Yu의 보상기 설계 이론에 의한 방법보다 성능이 우수한 특성을 보이고 있다. 따라서, RVEGA를 이용한 PSS의 최적 파라미터 선정이 유용함을 알 수 있었다. 그리고 시스템 고유치를 고찰함으로써 부가적으로 전력 시스템 안정화에 효과적임을 알 수 있었다.

5.2 2개의 진상 보상기를 가지는 전력 시스템 안정화 장치인 경우

2개의 진상 보상기를 가지는 PSS인 경우 상태 변수는 $X = [\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta E_q', \Delta E_{FD}, \Delta x_5, \Delta x_6, \Delta u_E]^T$ 이며, 이때의 상태 가중치는 $Q = \text{diag}[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]^T$ 로 하였다. 또한 샘플링 주기는 0.01[sec]이다.

Yu의 방법과 RVEGA를 이용한 PSS의 최적 파라미터는 표 6과 같이 나타났다.

표 6 Yu와 RVEGA에 사용한 PSS의 최적 파라미터

Table 6 Optimal parameter of PSS using Yu and RVEGA

부하 조건		Optimal parameter					
		K_c	T	T_1	T_2	T_3	T_4
정상 부하시	Yu 방법	20.0000	3.0000	0.1250	0.0500	0.1250	0.0500
	RVEGA	29.9175	4.9966	0.4853	0.2284	0.5084	0.5687
중부하시	Yu 방법	20.0000	3.0000	0.1250	0.0500	0.1250	0.0500
	RVEGA	28.7535	4.9966	0.9426	0.1861	0.3196	0.7443

정상 부하와 중부하시의 시스템 선형화 계수 ($K_1 \sim K_6$)는 표 7과 같이 나타났고, 시스템 고유치는 표 8과 같다. 또한 각 경우에 대한 PSS의 주파수 응답특성을 그림 12, 13에 나타내었고, 정상 부하시 및 중부하시의 동특성은 그림 14, 15에 나타내었다.

표 7 $K_1 \sim K_6$ 의 파라미터

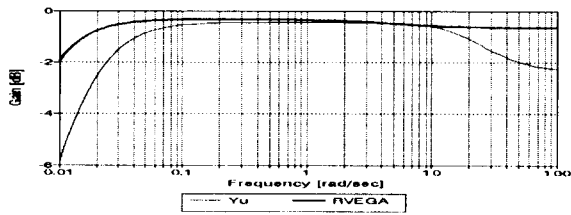
Table 7 Parameter $K_1 \sim K_6$

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
정상부하시	0.5441	1.2067	0.6584	0.6981	-0.0955	0.8159
중부하시	0.4563	1.4477	0.6584	0.8705	-0.1675	0.7747

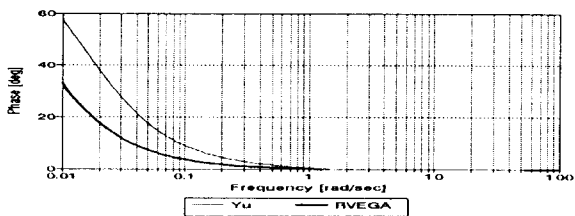
표 8 A_{C2} 의 시스템 고유치

Table 8 System eigenvalues of A_{C2}

		Yu	RVEGA
정상부하시	Mechanical	$\lambda_1 = -1.591 - j4.884$ $\lambda_2 = -1.591 + j4.884$	$\lambda_1 = -2.270 - j2.174$ $\lambda_2 = -2.270 + j2.174$
	Electrical	$\lambda_3 = -8.579 - j8.150$ $\lambda_4 = -8.579 + j8.150$	$\lambda_3 = -1.311 - j8.463$ $\lambda_4 = -1.311 + j8.463$
	Control	$\lambda_5 = -29.409 + j0.000$ $\lambda_6 = -10.435 + j0.000$ $\lambda_7 = -0.348 + j0.000$	$\lambda_5 = -17.425 + j0.000$ $\lambda_6 = -1.736 + j0.000$ $\lambda_7 = -0.208 + j0.000$
중부하시	Mechanical	$\lambda_1 = -1.388 - j4.938$ $\lambda_2 = -1.388 + j4.938$	$\lambda_1 = -2.325 - j2.076$ $\lambda_2 = -2.325 + j2.076$
	Electrical	$\lambda_3 = -8.552 - j8.531$ $\lambda_4 = -8.552 + j8.531$	$\lambda_3 = -1.092 - j8.898$ $\lambda_4 = -1.092 + j8.898$
	Control	$\lambda_5 = -30.033 + j0.000$ $\lambda_6 = -10.265 + j0.000$ $\lambda_7 = -0.349 + j0.000$	$\lambda_5 = -18.587 + j0.000$ $\lambda_6 = -1.484 + j0.000$ $\lambda_7 = -0.208 + j0.000$



(a) Gain



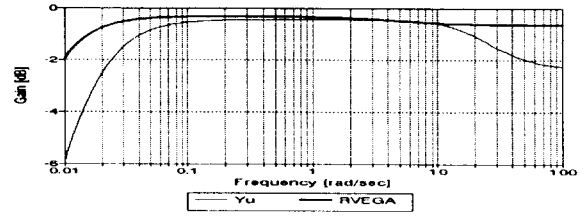
(b) Phase

그림 12 PSS의 주파수 응답

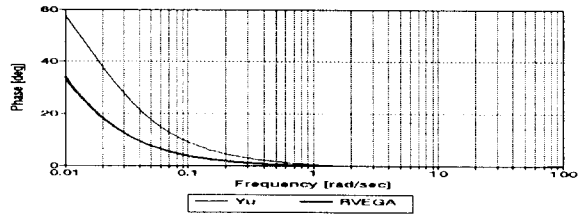
($P_{e0} = 1.0$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.])

Fig. 12 Frequency response of PSS

($P_{e0} = 1.0$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.])



(a) Gain



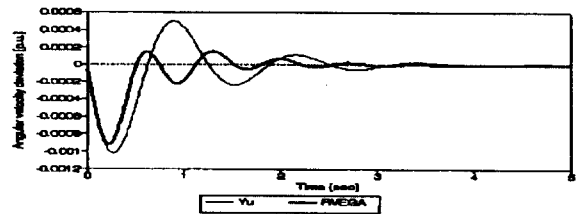
(b) Phase

그림 13 PSS의 주파수 응답

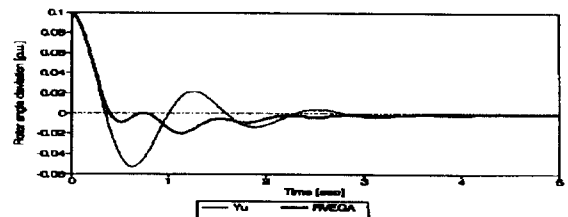
($P_{e0} = 1.3$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.])

Fig. 13 Frequency response of PSS

($P_{e0} = 1.3$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.])



(a) Angular velocity $\Delta\omega$

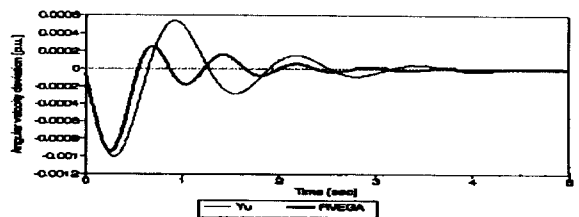


(b) Rotor angle $\Delta\delta$

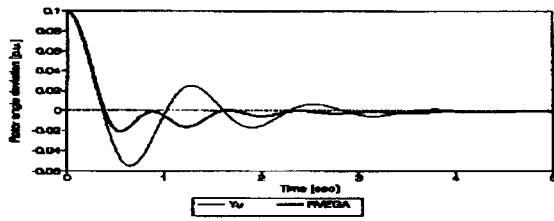
그림 14 초기치에 회전자각 편차를 증가한 경우의 응답

($P_{e0} = 1.0$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.])

Fig. 14 Response to increasing rotor angle deviation in initial point ($P_{e0} = 1.0$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.])



(a) Angular velocity $\Delta\omega$



(b) Rotor angle $\Delta\delta$

그림 15 초기치에 회전자각 편차를 증가한 경우의 응답 ($P_{e0} = 1.3$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.])

Fig. 15 Response to increasing rotor angle deviation in initial point ($P_{e0} = 1.3$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.])

RVEGA를 이용한 PSS의 주파수 특성은 주요 동요 모드의 감쇠율이 증가하고 주파수 영역 성능도 증가함을 알 수 있다. 그리고 정상 부하시나 중부하시의 동특성을 고찰함으로써 Yu의 보상기 설계 이론에 의한 방법보다 성능이 우수한 동특성을 보이고 있다. 따라서 RVEGA를 이용한 PSS의 구성이 전력 시스템 안정화에 효과적임을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 전력 시스템의 안정화를 위하여 저주파 진동에 강인성을 가진 PSS의 최적 파라미터를 RVEGA를 이용하여 선정하는 방법을 제안하였다.

PSS를 1개의 진상 보상기로 구성한 경우와 2개의 진상 보상기로 구성한 경우, 각각의 경우에 대하여 최적 파라미터를 선정하였다. 또한, 정상 부하시와 중부하시에서의 동특성 및 시스템 고유치를 고찰하였고, Yu의 보상기 설계 이론에 의한 방법과 비교 검토하여 RVEGA의 유용성을 입증하였다.

중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) RVEGA를 이용한 PSS의 최적 파라미터 선정이 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- (2) RVEGA를 이용한 PSS의 주파수 특성은 주요 동요 모드의 감쇠율이 증가하고 주파수 영역 성능도 증가함을 알 수 있다.
- (3) 정상 부하시와 중부하시에 RVEGA를 이용한 경우가 종전의 방법보다 동특성 및 시스템 고유치 특성이 우수하게 나타났다.
- (4) RVEGA를 이용한 최적 파라미터 선정이 전력 시스템 시스템의 안정도에 크게 기여함을 알 수 있었고, 저주파 진동 해석에 강인성을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

[1] K. Bollinger et al, "Power System Stabilizer Design using Root-Locus Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. 94, No. 5, pp. 1484-1488, 1975

[2] S. ABE and A. DOI, "A New Power System Stabilizer Synthesis in Multimachine Power Systems", IEEE Trans. on PAS, Vol. 102, No. 12, pp. 3910-3918, 1983

[3] R. J. Fleming, M. A. Mohan and K. Parvatisam, "Selection of Parameters of Stabilizers in Multimachine Power System", IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 5, pp. 2329-2333, 1981

[4] O. H. Abdalla, et al, "Coordinated Stabilization of Multimachine Power Systems", IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 3, pp. 483-491, 1984

[5] S. Sivakumar, A. M. Sharaf and H. G. Hamed, "Coordinated Tuning of Power System Stabilizers in Multimachine Power Systems", Int. J. of EPSR, Vol. 8, pp. 275-284, 1985

[6] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers and M. S. zywno, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 2, 1989

[7] C. J. We and Y. Y. Hsu, "Design of Self-Tuning PID Power System Stabilizer of Multimachine Power System", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 3, No. 3, 1988

[8] A. Varsek, T. Vrbancic, and B. Filipic, "Genetic Algorithms in Controller Design and Tuning", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 23, No. 5, pp. 1330-1339, Sept. 10, 1993

[9] J. J. Buckley and Y. Hayashi, "Fuzzy Genetic Algorithms for Optimization", Proc. of 1993 International Joint Conference on Neural Networks, pp. 725-728, 1993

[10] J. J. Grefenstette, "Optimization of control parameters for genetic algorithms", IEEE Trans. on systems, Man and Cybernetic, Vol. SMC-16, 1986

[11] D. E. Goldberg, "Genetic algorithms in search optimization & machine learning", Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1989

[12] Z. Michalewicz, "Genetic algorithm + data structures = evolution program", Second Edition, Springer Verlag, 1992

[13] B. Soucek, and the IRIS group, "Dynamic genetic and chaotic programming", Jon Wiley & Sons, Inc., 1992

[14] K. E. Kinnear, "Advances in genetic programming", The MIT Press, 1994.

[15] J. R. Koza and D. Andre, "Parallel genetic programming on a network of transputers", Computer Science Department Stanford University, 1994.

[16] 嘉數侑昇, "유전알고리즘핸드북", 森北出版社, 1994.

[17] J. R. McDonnell, R. G. Reynolds and D. B. Fogel, "Evolutionary programming IV", The MIT Press, 1995.

- [18] Y. N. Yu, "Electric power system dynamic", Academic Press, 1983
- [19] A. A. Found, "Power system Transient stability analysis using the transient energy function methods", Prentice Hall, 1993
- [20] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc., 1994

저 자 소 개

정 형 환 (鄭亨煥)

전기학회 논문지 제 48A권 3호 참조
Tel : 051-200-7733
E-mail : hhchong@seunghak.donga.ac.kr

왕 용 필 (王龍泌)

전기학회 논문지 제 48A권 3호 참조
Tel : 64-3-3642-987
E-mail : y.wang@elec.canterbury.ac.nz



정 동 일 (鄭東一)

1960년 8월 6일생. 1984년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986~1990년 (주)금성사 창원 전기연구소 연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 동

대학 부설 정보통신연구소 특별연구원
Tel : 051-816-7602
E-mail : cdil@gongo.dit.ac.kr



정 문 규 (鄭文圭)

1971년 11월 16일생. 1998년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 051-200-6747
E-mail : d9134723@seunghak.donga.ac.kr