실변수 유전알고리즘을 이용한 전력계통 안정화장치 설계

論 文
49A-10-2

A Study on the Design of Power System Stabilizer using Real Variable Genetic Algorithm

李 尙 根*
(Sang-Keun Lee)

Abstract - This paper presents a analysis method for dynamic characteristics of power system using a Genetic-based Power System Stabilizer(PSS). The proposed PSS parameters are optimized using Genetic Algorithm(GA) in order to maintain optimal operation of generator under the various operating conditions. To decrease the computational time, real variable string is adopted. The results tested on a single machine infinite bus system verify that the proposed controller has better dynamic performance than conventional controller.

Key Words : genetic algorithm, real variable, power system stabilizer

1. 서 론

최근 산업이 고도화함에 따라 전력수요가 증가하여 전력계통의 규모가 대형화되고 그 구조가 복잡해짐에 따라서 전력계통의 효과적인 제어에 많은 어려움이 있다. 특히, 대용량 원자력발전소 증대 및 지역 편중화 현상은 분당 수 사이클의 단위로 움직이는 저주파 진동 현상을 야기시킬 수 있다. 이러한 전력계통의 저주파진동을 억제하고 계통의 동,과도특성을 향상시키기 위해서 발전기 제어장치인 전력계통안정화장치(Power System Stabilizer : P.S.S)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2,3,4].

이러한 전력계통안정화장치들은 특정 운전조건에서 결정된 이득값을 이용함으로서 계통의 운전조건이 급격히 변화한 경우 우수한 제동특성을 갖는 것이 문제로 대두되고 있다. 이와 같은 문제점들을 개선하기 위해 운전조건의 변화를 추정하여 안정기의 이득을 온라인으로 자동 조절하는 적응제어 및 자기동조 알고리즘을 이용한 안정화장치에 대한 연구 및 설계가 진행되고있다[5,6].

그러나 이러한 알고리즘을 이용한 안정화장치들은 마이크로프로세서를 이용해야하며, 또한 잡음 효과로 인한 제반문제와 마이크로프로세서의 속도한계로 인해 실용화하는데 어려운 문제점들을 갖고 있다. 최근에는 퍼지집합이론, 신경회로망, 전문가시스템과 같은 인공지능기법을 이용한 안정화장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

* 正 會 員 : 原州大 電氣科 助敎授 · 工博
接受日字 : 2000年 3月 8日
最終完了 : 2000年 10月 15日

·또한 유전알고리즘은 전력계통의 여러 수치해석 문제에 적용되고 있으며, 이 방법은 자연선택과 진화에 근거하여 세대가 변함에 따라서 전역적 최적해를 탐색할 수 있는 전역적 탐색 기법이다[7,8,9,10]. 그러나 유전알고리즘은 변수들을 유한 길이의 2진 스트링으로 코딩함으로서 다 변수인 경우 많은 계산시간이 소요되고, 정확도 및 수렴성에 문제가 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 유전알고리즘 단점을 개선한 실변수 유전알고리즘을 이용하여 제어기를 구성함으로써 광범위하고 복잡한 계통에 대해서도 안정적이고 효율적인 제어성능을 유지하도록 하였다.

이러한 개선된 유전알고리즘을 이용한 안정화장치를 1기 무한대 모선계통에 적용하여 여러가지 운전조건에 대해 전력계통의 안정도를 해석하여 기존의 안정화장치를 적용한 경우와 비교함으로써 효용성을 입증하였다.

2. 실변수 유전 알고리즘

2.1 유전알고리즘

유전알고리즘(Genetic Algorithms : GAs)은 자연선택과 자연유전학의 원리에 근거한 전역적 최적점탐색 알고리즘으로서 1970년대에 도입되기 시작하였다. 이 유전알고리즘은 최적화문제의 목적함수로부터 적합도를 구해 적합도의 값에 따라 다음 세대에 생존과 소멸을 결정하는 것으로 종래의 방법과 비교할 때 강인한 탐색 방법이다[9]. 전력계통에서 대부분의 문제들은 복잡한 비선형의 다극점 최적화이므로

유전알고리즘을 적용하면 전역적인 최적점을 찾는데 효과적이다.

유전알고리즘은 특성상 최적화문제에서 변수들의 집합을 유한길이의 2진 스트링으로 코딩한 후, 이것으로부터 코딩할 스트링의 길이와 변수의 해는 trade-off 관계가 있다는 것을 알 수 있다. 즉 더욱 정확한 해를 요구한다면 스트링의 길이는 매우 길고, 긴 스트링에 대한 코딩절차는 많은 계산시간을 필요로 하고 수렴성도 감소할 수 있다.

2.2 실변수 유전알고리즘을 이용한 PSS

실변수로 코딩하는 실변수 유전알고리즘의 기본요소는 탐색할 각각의 변수를 실제값으로 구성한다. 즉 스트링은 모든 변수를 포함하는 벡터로서 표현할 수 있다. 함수 $f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 를 최소화하는 경우에 변수들은 스트링 $X = (x_1, x_2, \cdots, x_n) \in R^n$ 로 나타낼 수 있고, 여기서 R^n 은 n차원 탐색공간을 의미한다. 스트링 X를 하나의 개체(individual)라고 하며 개체들의 집합을 개체군이라 한다. 실변수 유전알고리즘은 최적해를 탐색하기 위한 작용자로서 복제(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)와 같은 3개의 기본적인 유전연산자가 있고, 이를 이용한 안정화장치 설계절차를 나타내면 다음과 같다.

1) 초기화

개체들의 유전자는 안정화장치의 매개변수를 랜덤하게 발생시킨다. 그림 1은 유전알고리즘의 개체군 구성도이며, x_{ii} 는 i번째 개체의 i번째 유전자를 나타낸다.

$x_{11}, x_{12}, \cdots, x_{1n}$
$x_{21}, x_{22}, \cdots, x_{2n}$
$x_{31}, x_{32}, \cdots, x_{3n}$
$\cdots$
$x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{in}$

그림 1 개체군 구성도
Fig. 1 Population Configuration

2) 적합도 함수(fitness)

적합도 함수는 목적함수를 최소화하면서 최대화되도록 설정하였으며 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Fitness} = \left[\frac{\beta}{(\alpha + objective)} \right] \tag{1}$$

여기서, α와 β는 적합도 함수를 조절하기 위한 매개변수이다

3) 재생산(reproduction)

재생산은 적합도 평가에서 구한 적합도에 비례하여 개체를 생존시키는 연산자로서 비선형이고 불연속적인 양의 값을 갖는 함수를 적합도 함수로 정의한다. 정규화된 적합도는 다음 세대에 생존할 확률로서 적합도가 큰 개체는 다음 세대에 더 많은 자손을 발생시킬 가능성이 크다. 즉 우성개체는 다음세대로 넘어가고 열성인 개체는 소멸된다. 본 연구에서는 다음 세대로 넘어갈 개체를 선택하기 위해서 적합도에 의해서 슬롯의 크기가 결정되는 룰렛 휠(roulette wheel) 을 사용하였다.

4) 교배(crossover)

새롭게 복제된 개체들 중에서 교배확률에 따라 교배할 개체를 선정한다. 새로운 개체군을 이루는 각각의 개체들에는 재결합 작용자인 교배연산자를 적용한다. 본 연구에서는 산술연산자인 컨벡스 교배연산자를 이용하였다. 이 연산자는 두 벡터의 일차결합으로서 정의되고, 두 개체 X_i^t 와 X_j^t 를 교배시키면 자손 X_i^{t+1} 와 X_j^{t+1} 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_i^{t+1} &= a \cdot X_j^t + (1-a) \cdot X_i^t \\ X_j^{t+1} &= a \cdot X_i^t + (1-a) \cdot X_j^t \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, 난수 a는 $a \in [0,1]$ 이고, 이런 관계는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2에서 X_i^{t+1} 와 X_j^{t+1} 는 부모인 X_i^t 와 X_j^t 사이의 직선영역에서 발생한다.

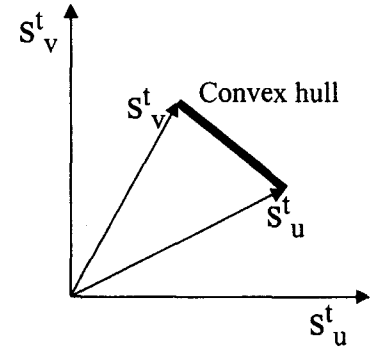

그림 2 컨벡스 교배연산자
Fig 2 Convex crossover

5) 돌연변이(mutation)

돌연변이는 불균등 돌연변이(non-uniform mutation)를 사용하였다. 주어진 부모 X에 대하여 유전자 X_{ii} 가 선택되어지면 돌연변이는 유전자의 값을 다음 식의 X_{ii}' 와 같이 변형시킨다.

$$X_{ii}' = \begin{cases} X_{ii} + \triangle(t, X_{ii}^{\max} - X_{ii}) \\ X_{ii} - \triangle(t, X_{ii} - X_{ii}^{\min}) \end{cases} \quad (3)$$

어떤 개체에 대한 돌연변이 적용여부 및 X_{ii}' 의 선택은 난수에 따라 결정된다. 함수 $\triangle(t, y)$ 는 다음 식과 같이 [0,y]의 값을 갖게되고, t(세대수)가 증가할수록 0에 접근한다. 이러한 성질은 연산자 탐색작업이 초기에는 비교적 넓은 범위에 대해 균등하게 행해지다가, 점차 지역적이 되도록 해준다.

$$\triangle(t, y) = y \cdot r \cdot (1 - \frac{t}{T})^b \quad (4)$$

여기서, $r \in [0,1]$ 이고, t는 세대수, T는 총 세대수, b는 불균등 정도를 결정하는 매개변수이다.

3. 계통의 정식화

실변수 유전알고리즘을 이용한 안정화장치를 설계하기 위해서 적용한 모델계통은 1기무한대 모선계통을 선정하였고, 이 모델계통에서 이용한 발전기는 Park 모델을 사용하였다[3]. 선형화한 1기 무한대 모선 계통을 상태방정식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$\dot{X} = A X + B U \quad (5)$$

여기서,

X = 상태변수 벡터
U = 제어변수 벡터
A = 계통행렬
B = 제어행렬

발전기의 제동특성을 향상시키기 위해서 사용하는 안정화장치는 각속도 입력방식으로서 이의 블록선도를 나타내면 그림 3과 같고, 출력은 식 (6)과 같다.

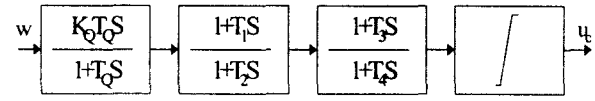

그림 3 각속도 입력방식 안정화장치 블럭선도
Fig. 3 Block diagram of PSS model with angular velocity input

$$U_C = K_Q \frac{T_Q S}{1+T_Q S} \frac{1+T_1 S}{1+T_2 S} \frac{1+T_3 S}{1+T_4 S} \triangle w \quad (6)$$

여기서, K_Q는 안정화장치의 이득이고 T_Q는 washout 시정수, $T_1 \sim T_4$ 는 PSS의 특성을 결정해 주는 시정수이다.

식 (5)의 동기발전기와 여자기를 포함하는 1기 무한대 모선계통의 상태방정식에 PSS를 추가할 경우의 상태방정식은

$$\dot{X} = A_{C1} X + B U_C = A_{C2} X \quad (7)$$

와 같이 되고, 여기서 상태변수 벡터는 $X = [\ \Delta w,\ \Delta\delta,\ \Delta E_q',\ \Delta E_{fd},\ \Delta x_5,\ \Delta x_6,\ \Delta u_c\ ]^T$ 이다.

실변수 유전알고리즘을 이용한 PSS를 설계하기 위해서 식 (6)의 PSS 출력에서 PSS 특성에 영향을 많이 주는 매개변수인 $K_Q,\ T_1, T_3$ 를 최소화하도록 목적함수를 선정하면 다음과 같다.

$$Min. \left\{ J = \int_{t_0}^{t_f} (\ t\, e(t)\ )^2\, dt \right\} \quad (8)$$

여기서, $e(t)$ 는 각속도 편차 Δw를 나타내고, 적합도함수는 목적함수를 최소화하면서 최대화가 되도록 다음 식과 같이 선정하였다.

$$Fitness = \left[\frac{\beta}{\alpha + J} \right] \quad (9)$$

여기서, α와 β는 적합도 함수를 조절하기 위한 매개변수를 나타낸다.

지금까지 실변수 유전알고리즘을 이용한 전력계통 안정화장치의 설계 순서도를 나타내면 그림 4와 같다.

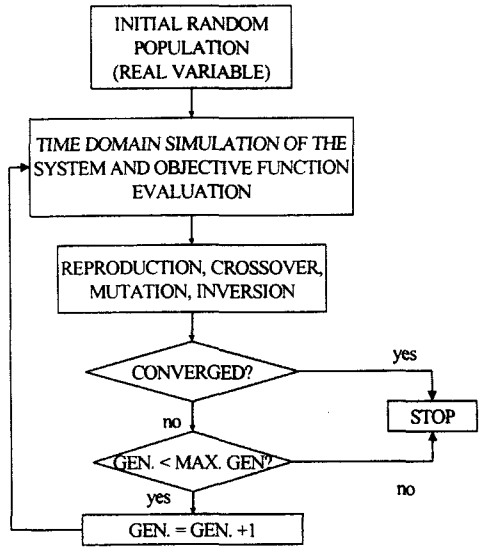

그림 4 실변수 유전알고리즘을 이용한 PSS설계 흐름도

Fig 4 Flowchart for PSS Design using RVGA

4. 사례연구

4.1 모델계통과 데이터

실변수 유전알고리즘을 이용하여 설계한 안정화장치를 적용해 전력계통의 안정도를 해석하기 위해 선정한 1기 무한대 모선 모델계통은 그림 5와 같다.

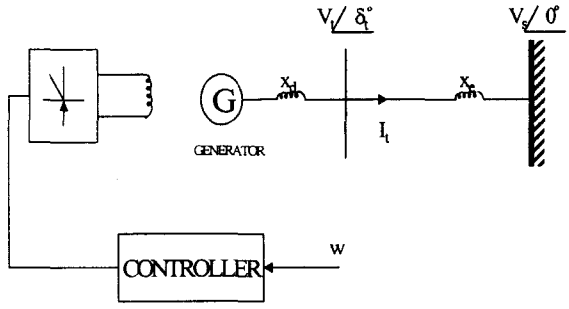

그림 5 1기 무한대 모선 모델계통

Fig 5 Single machine infinite bus model system

그림 5의 모델계통에서 적용한 여자기는 IEEE TYPE 1 모델에 각속도 입력방식 안정화장치를 추가한 것이고, 앞으로 이용되는 기존의 제어기는 이 모델을 사용하였다[5].

그림 5 와 안정화장치의 모델에서 이용한 데이터는 표 1과 같다.

표 1 1기 무한대 모선 모델계통의 데이터

Table 1 The data of single machine infinite bus model system

발전기	$X_d = 1.7\ p.u.\ X_q = 1.6\ p.u.$ $X_e = 0.6\ p.u.\ H = 2.37\ p.u.$ $D = 0.\ w_b = 377\ rad/\sec$ $X_d' = 0.245\ p.u.$ $T_{d0}' = 5.9\ \sec$ $T_{q0}' = 0.54\ \sec.\ V_t = 1.0\ p.u$
여자기	$K_a = 100.\ T_a = 0.1\ \sec.$ $V_R\min = -1.0\ p.u.$ $V_R\max = 1.0\ p.u$ $K_E = -0.05.\ T_E = 0.05\ \sec.$ $K_F = 0.04.\ T_F = 0.715\ \sec$ $K_R = 1.\ T_R = 0.01\ \sec$
안정화 장치	$K_Q = 5.\ T_Q = 10\ \sec.$ $T_1 = T_3 = 0.5\ \sec.$ $T_2 = T_4 = 0.05\ \sec.$ $E_S\min = -0.05\ p.u.$ $E_S\max = 0.05\ p.u$

실변수 유전알고리즘에서 사용되는 매개변수의 설정치는 다음과 같다.

- 스트링 표현 : 실수 , 개체군의 크기 : 200 , 세대수 : 200
- 교배확률 : 0.9 , 돌연변이확률 : 0.02
- 불균등 정도용 매개변수 b = 5

4.2 시뮬레이션 결과

전력계통의 안정도 해석을 여러 가지 부하조건 및 외란 형태에 대해서 시뮬레이션하여 기존의 안정화장치 (Conventional lead-lag power system stabilizer : CPSS)와 실변수 유전알고리즘을 이용한 안정화장치(Genetic-based power system stabilizer : GPSS)를 비교하였다.

그림 5의 1기 무한대모선 모델계통에 대해 전력계통의 안정도를 해석하기 위한 부하 및 외란의 형태는 표 2와3과 같다. 먼저, 표 2의 외란 형태에 대해서 안정도를 해석하면 다음과 같다.

표 2 안정도해석용 부하형태 및 외란형태(Case 1)
Table 2 The type of system load and disturbance

[100MVA Base]

	부 하 형 태		외 란 형 태	비고
Case 1	중 부 하	P = 1.0 p.u Q = 0.62 p.u	기계적 입력 0.1 p.u 감소	미소 외란
Case 2	경 부 하	P = 0.5 p.u Q = 0.0 p.u	기계적 입력 0.1 p.u 증가	미소 외란

표 3 안정도해석용 부하형태 및 외란형태(Case 2)
Table 3 The type of system load and disturbance

[100MVA Base]

	부 하 형 태		외 란 형 태	비고
Case 1	중 부 하	P = 1.0 p.u Q = 0.62 p.u	발전기 단자 3상단락 고장	급격한 외란(계통 임피던스 : 0.4 p.u)
Case 2	경 부 하	P = 0.5 p.u Q = 0.0 p.u	발전기 단자 3상단락 고장	급격한 외란(계통 임피던스 : 0.4 p.u)

표 2의 Case 1에 대해서 시뮬레이션한 경우의 동요각특성을 도시하면 다음과 같다. 그림 6은 기계적입력이 0.1 p.u 만큼 감소하였을 경우의 동요각특성 나타낸 것으로, 1초인 순간에 외란을 가해 0.1초후에 제거한 경우에 대해 시뮬레이션하였다.

이 경우 CPSS는 점선과 같은 출력특성을 나타내었고, 동일한 운전조건하에서 본 논문에서 제시한 GPSS는 직선과 같은 동요각 특성을 나타낸다.

여기서, 발전기의 동요각 특성은 제시한 GPSS를 적용한 경우가 CPSS에 비해서 첫번째 동요폭이 약 10%정도로 줄었고, 수렴시간도 22% 정도 단축됨으로서 제동특성이 개선되어 전력계통의 동특성이 향상됨을 알수 있다.

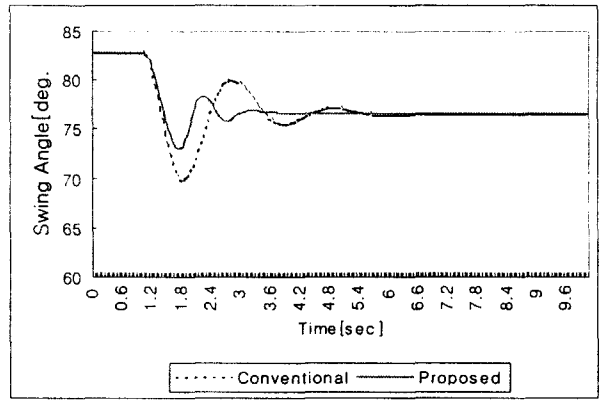

그림 6 동요각특성(Case 1)
Fig. 6 Swing angle characteristics

그림 7은 경부하 조건에서 기계적 입력이 0.1 p.u 증가한 경우(표 2의 Case 2)의 동요각특성을 표시한 것으로, 외란은 1초인 순간에 가해져 0.1초 후에 제거된 것으로 하였다. 이 경우도 표 2의 Case 1 과 마찬가지로 CPSS(점선)에 비해서 본 연구에서 제시한 방식 (직선)의 제동특성이 개선됨을 알수 있다.

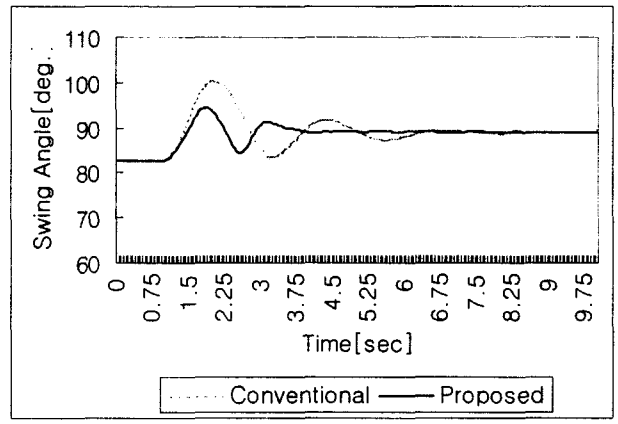

그림 7 동요각 특성(Case 2)
Fig. 7 Swing angle characteristics

다음에 표 3의 외란형태에 대해서 계통의 안정도를 해석하면 다음과 같다.

먼저, 표 3의 Case 1에 대해서 시뮬레이션한 경우의 동요각특성을 도시하면 그림 8과 같다. 그림 8은 발전기 단자에서 3상단락고장이 발생한경우의 동요각특성 나타낸 것으로, 1초인 순간에 외란을 가해 0.1초후에 제거한 경우에 대해 시뮬레이션하였다.

이 경우 CPSS를 적용한 경우는 점선과 같은 출력특성을 나타내었고, 동일한 운전조건하에서 본 논문에서 제시한

GPSS는 직선과 같은 동요각 특성을 나타낸다.

여기서, 발전기의 동요각 특성은 제시한 GPSS를 적용한 경우가 CPSS의 경우에 비해서 첫번째 동요폭이 약 10%정도로 줄었고, 수렴시간도 30% 정도 단축되었다.

따라서, 제시한 GPSS를 사용한 경우의 동요각 특성은 CPSS를 이용한 경우보다 제동특성이 개선되어 전력계통의 안정도가 향상됨을 알 수 있다.

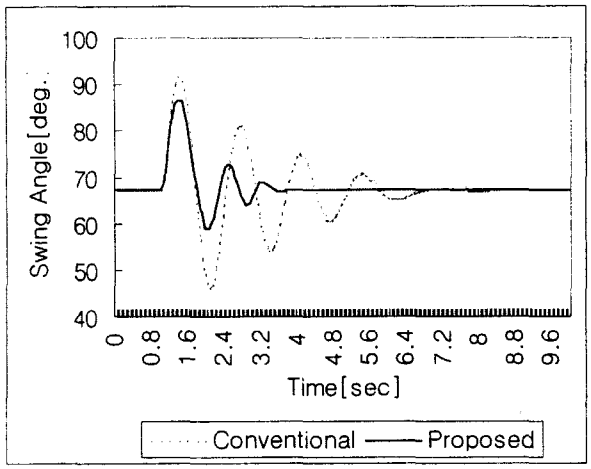

그림 8 동요각특성(Case 1)

Fig. 8 Swing angle characteristics

그림 9는 경부하 조건에서 발전기 단자에 3상 단락이 발생한 경우(표 3의 Case 2)의 동요각특성을 표시한 것으로, 외란은 1초인 순간에 가해져 0.1초후에 제거된 것으로 하였다. 이 경우도 표 3의 Case 1과 마찬가지로 CPSS(점선)에 비해서 본 연구에서 제시한 방식 (직선)의 제동특성이 개선됨을 알수 있다.

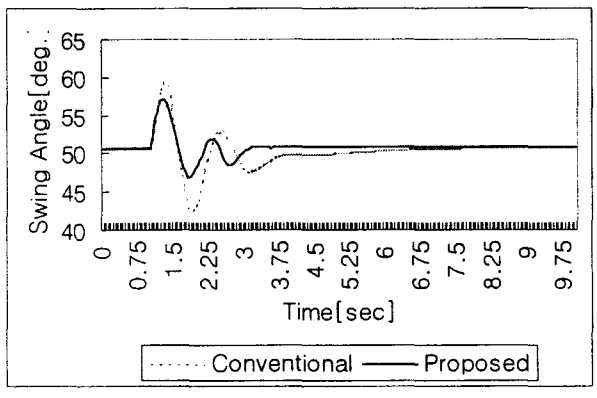

그림 9 동요각 특성(Case 2)

Fig. 9 Swing angle characteristics

5. 결 론

본 연구에서는 실변수 유전알고리즘을 이용하여 전력계통 안정화장치를 설계한 후 이를 1기 무한대모선 모델계통에 적용하여 전력계통의 안정도를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실변수 유전알고리즘을 이용하여 설계한 안정화장치는 광범위하고 복잡한 계통에 대해서도 안정적이고 효율적인 제어성능을 유지함을 알 수 있었다.

2. 실변수 유전알고리즘을 이용하여 안정화장치의 매개변수를 최적으로 선정함으로써 발전기의 제동특성이 향상되어 전력계통의 상태변화에 효과적으로 대응할 수 있음을 알 수 있었다.

3. 실변수 유전알고리즘 안정화장치를 이용한 전력계통의 안정도해석 결과 동요각특성 및 수렴특성이 기존의 안정화장치를 적용한 경우에 비해서 개선됨을 보였다.

마지막으로, 계산속도를 향상시키기 위해 병렬처리를 유전알고리즘에 응용하는 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

[1] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power System Control and Stability, The Iowa State University Press, 1977

[2] F. P. deMello, C. Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control" , IEEE Trans. on PAS, Vol. 88, pp. 316~329, 1969

[3] Y. N. Yu, Electric Power System Dynamics, Acadmic Press, 1983

[4] 관 근 태 차, 전력계통과도해석론, 1984

[5] 김준현, 이상근, "자기동조적응제어를 이용한 전력계통안정화장치의 다기계통적용", 대한전기학회 논문지, Vol. 42, No. 11, 1993

[6] Y. Y. Hsu, C. J. Wu, "Design of Self-Tuning PID Power System Stabilizers for Multimachine Power Systems" , IEEE Trans. Vol. 3, No. 3, pp. 1059~1064, 1988

[7] P. Ju, E. Handschin and F. Reyer, "Genetic Algorithm Aided Controller Design with Application to SVC" , IEE Proc. Gener, Trans, Distrib. Vol. 143, No. 3, pp. 258 - 262, 1996

[8] A. Bakirtzis, V. Petridis and S. Kazarlis, "Genetic Algorithm Solution to The Economic Dispatch Problem" , IEE Proc. Gener, Trans, Distrib. Vol. 141, No. 4, pp. 377 - 382, 1994

[9] Z. Michalewicz, Genetic Algorithm + Data Structure = Evolution Program, Second Edition, Springer - Verlag, 1992

[10] Seok-Ku You, Kyu-Ho Kim and Tae-Kyun Kim. " Optimal Economic Load Dispatch using Parallel Genetic Algorithms in Large Scale Power System", Trans. KIEE, Vol. 48A, No. 4, APR, 1999

저 자 소 개

이 상 근 (李 尙 根)

1961년 4월 13일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1989~1995 한국전력기술(주) 전기기술처 근무. 현재 원주대학 전기과 조교수

Tel : 033-760-8422, Fax : 033-760-8420

E-mail : sklee@sky.wonju.ac.kr