

적응진화연산을 이용한 퍼지-전력계통안정화장치 설계

A Design of Fuzzy Power System Stabilizer using Adaptive Evolutionary Computation

黃 璣 鉉* · 朴 俊 籲**

(Gi-Hyun Hwang · June Ho Park)

Abstract - This paper presents a design of fuzzy power system stabilizer (FPSS) using adaptive evolutionary computation (AEC). We have proposed an adaptive evolutionary algorithm which uses a genetic algorithm (GA) and an evolution strategy (ES) in an adaptive manner in order to take merits of two different evolutionary computations. FPSS shows better control performances than conventional power system stabilizer (CPSS) in three-phase fault with heavy load which is used when tuning FPSS. To show the robustness of the proposed FPSS, it is applied to damp the low frequency oscillations caused by disturbances such as three-phase fault with normal and light load, the angle deviation of generator with normal and light load and the angle deviation of generator with heavy load. Proposed FPSS shows better robustness than CPSS.

Key Words : Power System Stabilizer, Adaptive Evolutionary Algorithm, Genetic Algorithm, Evolution Strategy

1. 서 론

전력계통이 정상 운전 중 갑작스런 부하변동이나 발전기 및 송전선로에서의 고장발생 등의 크고, 작은 교란에 대해서 발전기가 새로운 평형점을 찾아 동기상태를 유지하면서 운전할 수 있는 능력을 안정도(stability)라 한다. 따라서 전력계통의 안정도 문제는 계통 교란이 발생하더라도 전력수요에 대해 원활히 전력을 공급해야 하므로 계통의 계획 및 운용에 있어서 중요한 문제이다.

전력계통의 안정도 문제를 개선하기 위한 전력계통 안정화장치 (power system stabilizer : PSS)에 관한 연구가 1960년대 후반부터 진행되어 왔다. 기존에는 전력계통 안정화장치로 진·지상제어기가 많이 사용되는데, 진·지상제어기의 계수들을 결정하기 위해서 근궤적과 Bode 선도를 이용하는 방법[1~3], 근궤적과 준최적화 레귤레이터 방법 (suboptimal regulator method)를 이용하여 비례-적분 이득을 최적화한 비례-적분 전력계통 안정화 장치[4] 등이 사용되었다. 이런 방법들은 특정 동작점에서 선형화된 계통모델을 이용하여 전력계통 안정화장치를 설계하였기 때문에 특정 동작점에서는 좋은 제어성능을 나타내지만, 부하의 변동이나 계통의 고장과 같은 계통운전 조건이 변했을 경우에는 최적의 제어성능을 얻기가 어렵다. 그리고 적응제어 이론(adaptive control theory)을 도입하여 전력계통의 비선형성과 시변성에 대하여 전력계통 안정화장치에 적응능력을 부여하고자 하는 방법이 제안되었다[5]. 이 방법은 전력계통의 동특성을 향상시켰지만, 매주기마다 계산시간이 많이 소요됨으로 실시간으로 제어하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

최근에는 전력계통의 동특성을 향상시키기 위한 전력계통 안정화장치로 퍼지제어기와 신경회로망제어기 등과 같은 지능제어방법이 많이 연구되고 있다[6,7]. 그러나 퍼지제어기가 좋은 제어성능을 얻기 위해서는 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 조정해야하는데, 종래에는 전문가의 경험과 시행착오법에 바탕을 두었기 때문에 시스템에 대한 전문적인 지식없이 시스템에 적합한 소속함수를 결정하기가 어려웠다. 최근에는 자연의 유전학과 진화이론에 바탕을 둔 확률적인 최적화 알고리즘인 진화연산을 이용하여 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수모양을 동조하여 좋은 성능을 얻고 있다[8,9].

그러나, 이러한 진화연산의 성능은 해집단의 크기, 적합도 함수, 교배 및 돌연변이 확률 등의 파라메타에 영향을 크게 받는다. 이런 파라메타들을 적절히 선정하지 못하면 계산시간이 아주 길어지거나 국부최소값으로 조기수렴하는 경우가 발생한다. 이런 문제점을 해결하기 위해 유전알고리즘에서는 매 세대마다 해집단의 크기를 변화시키는 방법[10]과 적합도에 따라 교배 및 돌연변이 확률을 변화시키는 방법[11]이 제안되었고, 진화 전략 및 진화 프로그래밍에서는 국부최소값에 조기수렴하지 않기 위해 정규난수 발생시 표준편차를 조정하는 방법[12]이 제안되었다. 이런 방법들은 초기세대에서는 표준편차를 크게 하거나, 교배 및 돌연변이 확률을 다소 높게 하여 탐색영역을 넓히고 어느 정도 세대가 진행된 후에는 표준편차 또는 교배 및 돌연변이 확률을 낮추어 세대간 변화를 줄이는 방법이며 이를 적응 알고리즘이라고 한다[13,14]. 기존의 적응알고리즘은 해집단의 크기, 교배 및 돌연변이 확률과 교배방법 등의 파라메타와 연산자들을 적용적으로 변경시키거나 정규난수에서 표준편차를 적용적으로 변경시켰다.

본 논문에서는 해집단을 다음 세대로 진화시킬 때 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하며 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 적응진화연산 (adaptive evolutionary computation : AEC)을 개발하였다. 이를 이용하여 퍼지-전력계통 안정화 장치

* 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 釜山大 電子·電氣·通信工學部 教授·工博

接受日字 : 1999年 1月 4日

最終完了 : 1999年 5月 3日

(fuzzy power system stability : FPSS)의 소속함수 모양 및 입·출력 이득을 동조하였다. 제안한 FPSS의 유용성을 평가하기 위하여 1기 무한대 모선 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 사례연구 결과, FPSS의 동조에 사용된 중부하시의 3상 고장에 대해 FPSS가 기존의 전력계통 안정화 장치 [1]보다 더 우수한 제어 성능을 나타내었다. 그리고 제안한 FPSS의 강인성을 평가하기 위해 중부하시의 발전기 위상각 변화와 정상부하 및 경부하시의 3상 고장과 발전기 위상각 변화에 대해서도 FPSS가 기존의 전력계통 안정화 장치보다 더 뛰어난 강인성을 나타내었다.

2. 계통 모델

본 논문에서 사용한 모델계통은 그림 1과 같은 1기 무한대 모선 계통을 사용하였다. 전력계통의 해석시 가장 중요한 요소인 발전기와 여자기의 미분방정식(differential equations)은 식 (1)~(4)에서 나타내었고, 고정자(stator) 및 회로망(network)의 대수방정식(algebraic equations)은 식(5)~(10)와 같고, 여기에서 사용된 표기법은 부록에 나타내었다. 그러나, 동기기의 터빈과 조속기 특성은 시정수가 길며 변동폭이 상대적으로 작기 때문에 고려하지 않았다.

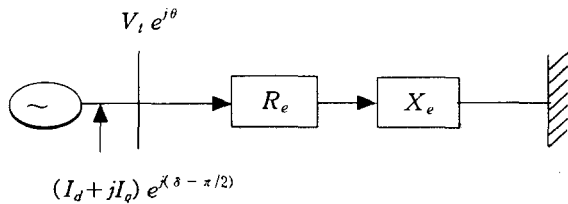


그림 1 1기 무한대 모선
Fig. 1 Single-machine infinite-bus system

1. 발전기 방정식

$$\frac{dE_{di}'}{dt} = -\frac{1}{T_{doi}'} [E_{di}' + (X_{di} - X_{di}')I_{di} - E_{fdi}] \quad (1)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_{ref} \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\omega_{ref}}{2H_i} (T_{Mi} - E_{qi}'I_{qi} - (X_{qi} - X_{di}')I_{di}I_{qi}) \quad (3)$$

$$\frac{dE_{fdi}}{dt} = \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} [V_{refi} - V_{si} + V_{si}] - \frac{1}{T_{Ai}} E_{fdi} \quad (4)$$

여기서, $i = 1, \dots, m$

m : 발전기의 수

2. 고정자 방정식

$$E_{di}' - V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - R_{si}I_{di} + X_{qi}'I_{qi} = 0 \quad (5)$$

$$E_{qi}' - V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - R_{si}I_{qi} - X_{di}'I_{di} = 0 \quad (6)$$

여기서, $i = 1, \dots, m$

m : 발전기의 수

3. 회로망 방정식

$$I_{di}V_i \sin(\delta_i - \theta_i) + I_{qi}V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + P_{Li}(V_i) + \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (7)$$

$$I_{di}V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - I_{qi}V_i \cos(\delta_i - \theta_i) + Q_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (8)$$

$$P_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (9)$$

$$Q_{Li}(V_i) - \sum_{k=1}^n V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) = 0 \quad (10)$$

여기서, $i = m+1, \dots, n$

n : 모선의 수

3. 적응진화연산

본 논문에서 제안한 적응진화연산은 해집단을 다음 세대로 진화시킬 때 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 적용하고 세대의 진행과정에서 유리한 진화연산기법이 다음 세대의 해집단을 형성하는데 우위를 점하도록 하였다. 본 논문에서 사용한 유전알고리즘은 실변수형 코딩방식으로 해집단을 이진수의 스트링이 아닌 실변수로 부호화하였다. 이는 유전알고리즘과 진화전략사이의 정보손실을 방지와 적응진화연산의 연산효율을 높이기 위함이다. 진화전략은 돌연변이와 선택과정만을 가지는 무성생식의 진화를 모의한 알고리즘인데, 본 논문에서는 Schwefel 제안한 방법 중에서 부모해집단으로부터 자손해집단을 생성한 후 부모는 모두 제거되고 자손해집단을 다음 세대의 부모해집단으로 선택하는 방법을 사용하였으며, 표준편차를 세대별로 변화시키는 방법[10]을 적용하였다.

3.1 적응진화연산의 개요

본 논문에서는 해집단을 다음세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 알고리즘을 제안하였고, 적응진화연산의 구성도는 그림 2와 같다. 적응진화연산의 과정은 초기 해집단을 구성할 때 각 스트링에 대해서 태그변수 0(유전알고리즘의 개체) 또는 1(진화전략의 개체)을 임의로 대응시킨 후, 각 개체의 적합도를 계산하고 룰렛휠(roulette wheel)를 사용하여 적합도에 따라 복제한다. 복제된 개체는 태그변수에 따라 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단을 분리한 후, 유전알고리즘의 해집단에 대해 교배 및 돌연변이를 수행하고 진화전략의 해집단에 대해 돌연변이를 수행한다. 이때 부모해집단에서 적합도가 가장 높은 개체는 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하는 엘리트즘을 사용하였다.

1. 개체의 구분(초기화) : 초기해집단을 구성할 때 각 스트링에 대해서 태그변수 0 또는 1을 임의로 대응시킨다. 태그변수 0은 유전알고리즘을 적용할 개체이고 태그변수 1은 진화전략을 적용할 개체이다.

2. 평가 및 복제 : 각 스트링을 평가함수에 따라 적합도를 평가한다. 복제방법은 적합도에 비례하여 복제하는 룰렛휠을 사용하였다. 복제후 태그변수가 0인 개체들은 유전알고리즘의 교배 및 돌연변이 과정을 적용하여 자손을 생성하고 그 자손에는 태그변수 0을 대응시킨다. 그리고 태그변수가 1인 개체들은 진화전략을 적용하여 자손을 생성하고 그 자손에는 태그변수 1을 대응시킨다.

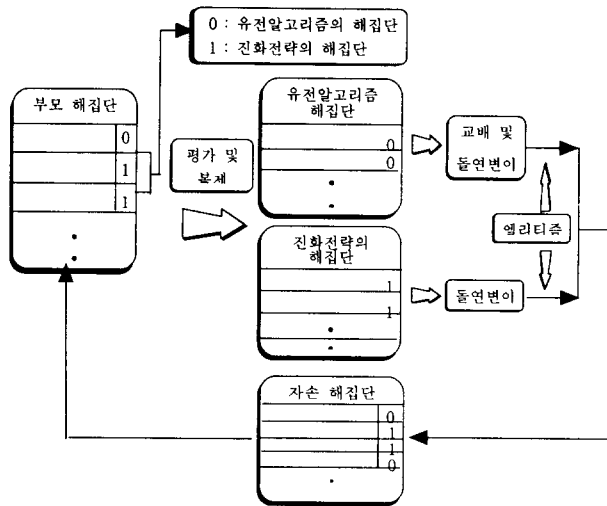


그림 2 적응진화연산의 구성도
Fig. 2 Configuration of adaptive evolutionary computation

3. 최소 해집단수의 보장 : 세대가 진행됨에 따라 유전알고리즘 혹은 진화전략중 어느 하나의 역할이 너무 커지는 것을 방지하기 위해 유전알고리즘과 진화전략의 해집단은 전체 해집단에 대해 일정비율이상의 개체를 대응시키도록 하였다.

4. 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation) : 교배는 부모 염색체의 유전자 정보를 서로 교환하여 새로운 정보를 가진 자손염색체를 생성하는 과정이며 돌연변이는 부모염색체 유전자의 형태변화로 새로운 유전정보를 발생하는 매커니즘이다. 본 논문에서는 실행시간이 단축되고 수학적 기법이 첨가될 수 있는 실변수형 유전알고리즘을 이용하였으며, 복제방법으로 롤렛휠, 교배 및 돌연변이 방법으로 변경된 단순교배(modified simple crossover)와 균일 돌연변이(uniform mutation)를 사용하였다[10]. 본 논문에서는 사용한 진화전략은 부모해집단으로부터 자손해집단을 생성한 후 부모는 모두 제거되고 자손해집단을 다음세대의 부모해집단으로 선택하는 방법을 사용하였고, 돌연변이 방법은 식 (11)과 같이 가우시안 정규난수(gaussian random variable)를 이용하여 자손해집단을 생성하는 방법을 사용하였다. 이때 표준편차는 돌연변이를 적용한 후 적합도의 개선율이 δ 보다 적으면 다음 세대의 표준편차는 표준편차의 감소율(c_d)에 비례하여 감소하고, 반면에 적합도의 개선율이 δ 보다 크면 표준편차의 증가율(c_i)에 비례하여 증가하도록 식 (12)와 같이 선정하였다. 여기서, $N(0, \sigma')$ 는 정규난수, v_k^t 는 t세대에서의 k번째 변수값, σ^t 는 t세대에서의 표준편차, $\phi(t)$ 는 t세대에서 돌연변이 연산자의 적용 후 적합도의 개선율, c_d, c_i 는 표준편차의 감소율과 증가율, δ 는 0과 1사이의 상수를 나타낸다.

$$v_k^{t+1} = v_k^t + N(0, \sigma^t) \tag{11}$$

$$\sigma^{t+1} = \begin{cases} c_d \times \sigma^t & \text{if } \phi(t) < \delta \\ c_i \times \sigma^t & \text{if } \phi(t) > \delta \\ \sigma^t & \text{if } \phi(t) = \delta \end{cases} \tag{12}$$

5. 엘리티즘 : 본 논문에서는 전체해집단에서 적합도가 가장 높은 개체를 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하였다. 이때 유전알고리즘의 해집단에 대해서는 태그변수를 0으로, 진화전략의 해집단에 대해서는 태그변수를 1로 두었다.

4. 적응진화연산을 이용한 퍼지-전력계통 안정화 장치의 설계

4.1 퍼지제어기

일반적으로 퍼지제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고, 불확실한 경우에 우수한 제어성능을 나타낸다. 또한 기존의 수학적 모델링을 기초로한 제어기와는 달리 시스템의 입·출력 관계만으로도 제어기를 설계할 수 있다. 퍼지제어기는 일반적으로 퍼지화, 퍼지추론, 비퍼지화의 과정으로 구성되어 있다. 퍼지화는 퍼지의 도입부에서 하나의 명확한 값으로 측정된 입력 변수 값을 적절한 퍼지 값으로 바꾸어주는 부분이며, 퍼지추론은 퍼지규칙을 사용하여 출력을 계산하는 과정으로 본 논문에서는 표 1과 같이 비례-미분형태의 퍼지 규칙을 사용하였다. 그리고 비퍼지화는 퍼지값인 퍼지추론 결과 값을 명확한 값의 제어조작량으로 변환시켜주는 과정으로 본 논문에서는 식 (13)과 같이 무게중심법을 사용하였다.

표 1 비례-미분 형태의 퍼지규칙

Table 1 Fuzzy rules of proportional-differential type

e	de	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PM	PM	PB	PB	PB

$$U_{cog} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(u_i) \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)} \tag{13}$$

여기서, $\mu(u_i)$: 퍼지변수의 소속정도

u_i : 퍼지변수의 입력

4.2 적응진화연산을 이용한 FPSS 설계 방법

퍼지제어기가 뛰어난 제어성능을 가지기 위해서는 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 적절히 결정해야 하는데, 종래에는 전문가의 경험과 지식 또는 시행착오법을 이용하였다. 그리고 최근에는 진화연산을 이용하여 퍼지규칙과 퍼지변수의 소속함수 모양을 동조하는 방법들이 많이 제안되고 있다[8,9]. 그러나, 이러한 진화연산의 성능은 해집단의 크기, 적합도 함수, 교배 및 돌연변이 확률 등의 파라메타에 영향을 크게 받는다.

본 논문에서는 3장에서 제안한 방법, 즉 방법론에서 상이한 탐색과정을 가지고 있는 유전알고리즘과 진화전략을 적응적으로 이용하는 적응진화연산으로 FPSS의 소속함수 모양과 입·출력 이득을 동조하였다. 그림 3은 적응진화연산을 이용하여 FPSS의 소속함수 모양과 입·출력 이득을 동조하기 위한 구성도를 나타낸다. 일반적으로 전력계통 안정화 장치의 입력으로 유효전력, 주파수 및 각속도가 많이 사용되고 있는데, 본 논문에서는 그림 3에서 보는 것처럼 FPSS의 입력으로 발전기 각속도의 오차와 오차의 변화분을 사용하였다.

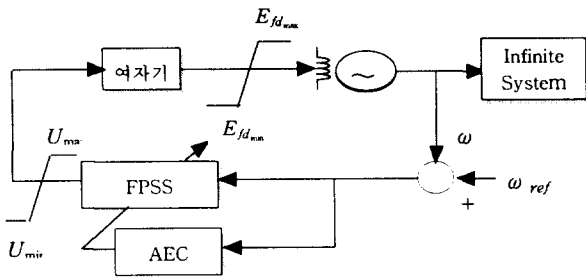


그림 3 적응진화연산 이용한 FPSS의 구성도
Fig. 3 Configuration of FPSS using AEC

그림 4는 본 논문에서 사용한 삼각형 소속함수를 나타내었으며, 퍼지제어기의 입·출력변수에 각각 7개의 퍼지변수를 사용하였으므로, 전체 소속함수는 21개가 되고, 모든 소속함수의 꼭지점과 폭을 동조하려면 63개의 변수가 필요하다. 그러나 63개의 변수를 적응진화연산을 이용하여 동조하려면 탐색시간이 많이 걸릴 뿐만 아니라, 수렴특성이 나쁘고, 컴퓨터 메모리 면에서도 많은 부담이 생긴다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 제로(ZO) 소속함수의 모든 꼭지점을 영점에 고정시켰고, 각 소속함수의 폭은 모두 대칭으로 두었으며, 영점을 기준축으로 하여 모든 소속함수들을 대칭으로 구성하였다. 따라서 퍼지제어기 입·출력변수의 소속함수를 동조하는데 필요한 적응진화연산의 스트링은 그림 5와 같이 삼각형 소속함수의 꼭지점이 세 개씩 필요하며, 폭이 네 개씩 필요하므로 21개의 변수와 입·출력 이득을 포함해서 총 24개로 스트링을 구성하였다. 여기서, NB는 Negative Big, NM는 Negative Medium, NS는 Negative Small 등을 나타내는 언어적인 변수이다.

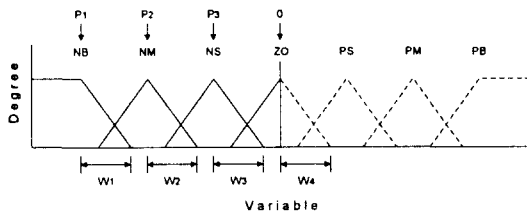


그림 4 대칭형 삼각형 소속함수
Fig. 4 Symmetrical membership function

S ₁	P _{1,1}	...	P _{1,9}	W _{1,1}	...	W _{1,12}	SF _{1,1}	...	SF _{1,3}	*
S ₂	P _{2,1}	...	P _{2,9}	W _{2,1}	...	W _{2,12}	SF _{2,1}	...	SF _{2,3}	*
...
S _n	P _{n,1}	...	P _{n,9}	W _{n,1}	...	W _{n,16}	SF _{n,1}	...	SF _{n,3}	*

여기서, P_{ii} : 소속함수의 꼭지점
W_{ii} : 소속함수의 밑변길이의 1/2
SF_{ii} : 입·출력 이득
n : 스트링 개수
* : 태그변수

그림 5 해집단의 구조
Fig. 5 Structure of population

그리고 해집단의 각 스트링을 평가하기 위하여 사용된 적

합도 함수는 식 (14)와 같이 발전기 각속도의 절대치편차의 합을 사용하였다.

$$fitness = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^N |\omega_{ref} - \omega_k|} \quad (14)$$

여기서, ω_k : 발전기의 실제 각속도[rad/sec]
 ω_{ref} : 발전기의 기준 각속도[rad/sec]
N : T시간 동안 획득한 데이터의 개수

본 논문에서 제안한 적응진화연산을 이용하여 FPSS를 설계하는 과정은 그림 2의 적응진화연산의 구성도에 따라 FPSS를 최적화하는데, 이때 그림 2에서 평가(evaluation)부분과 관련된 해석과정은 다음과 같이 단계 1)~단계 6)으로 구성되어 있다.

- 단계 1) Newton-Raphson 방법을 이용하여 조류계산을 수행한다.
- 단계 2) 조류계산 결과를 이용하여 발전기의 미분 방정식의 해석시 필요한 초기치($I_d, I_q, E_d', E_q', \delta, V_{ref}$)를 계산한다.
- 단계 3) 발전기 각속도의 오차 및 오차의 변화분을 이용하여 퍼지추론과 비퍼지화 과정을 거쳐서 FPSS의 출력(V_f)를 계산한다.
- 단계 4) 비선형 미분방정식의 해법으로 발전기와 여자기의 미분방정식인 식(1)~식(4)를 푼다.
- 단계 5) Newton-Raphson 방법을 이용하여 고정자 및 회로망의 비선형 대수방정식인 식(5)~식(10)을 푼다.
- 단계 6) 시뮬레이션 시간 10[sec] 동안 단계 3)~단계 5)를 반복한다.

5. 모의 실험 결과 및 검토

제안한 FPSS의 성능을 검증하기 위하여 그림 1의 1기 무한대 모선 계통에 대해 3장에서 설명한 방법을 사용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. FPSS의 동조에 사용된 초기 상태는 중부하시($P_e=1.3, Q_e=0.015$)에 3상 고장이 40[msec] 동안에 지속되다가 계통구성 변경없이 제거되는 경우를 이용하였으며, 이때 적응진화연산의 시뮬레이션 계수는 표 2와 같고, 발전기 및 여자기의 정수는 표 3과 같다. 표 2와 같은 조건에서 적응진화연산을 이용하여 FPSS를 동조하는데 소요되는 계산시간은 PC 586 300[MHz]로 약 30분이 소요된다. 제안한 방법에 의해서 동조된 FPSS의 소속함수 모양은 그림 6에 나타내었고, 이때 오차의 스케링 상수값은 0.24, 오차 변화분의 스케링 상수값은 3.50, 출력부의 스케링 상수값은 2.75이다. 본 논문에서 제안한 FPSS의 성능을 비교하기 위해 위상 보상회로를 구성하여 감쇄크기를 전력계통안정화장치의 이득으로 조정하는 기존의 전력계통안정화장치 (conventional power system stabilizer : CPSS)[1]와 비교·검토하였다.

표 2 적응진화연산의 시뮬레이션 계수

Table 2 Coefficients of simulation for AEC

적용방법	해집단 수	교배 확률	돌연변이 확률	δ	C_d	C_i	계산 시간
AEC	100	0.85	0.01	0.5	0.95	1.05	30분

표 3 1기 무한대 모선의 각종 정수 및 초기상태

Table 3 Constants of one-machine infinite-bus system

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

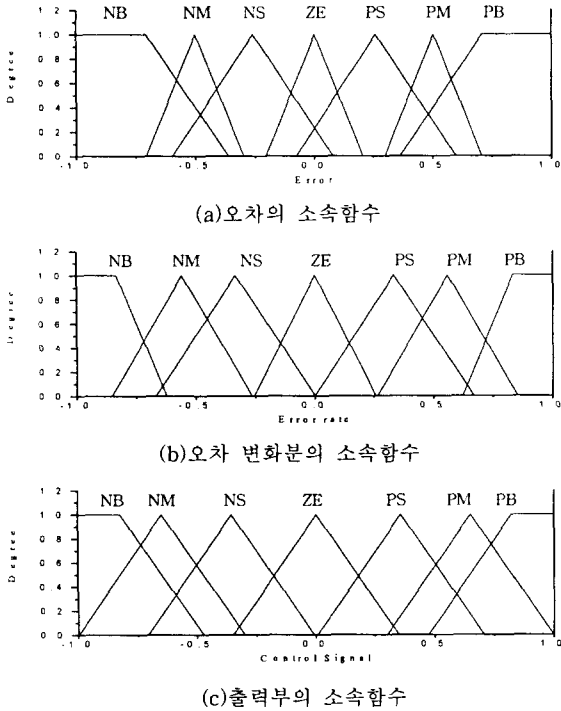


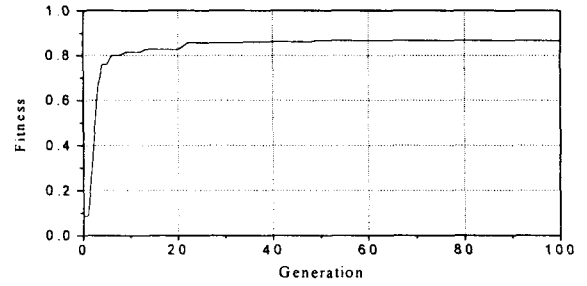
그림 6 동조된 FPSS의 소속함수

Fig. 6 Tuned membership functions of FPSS

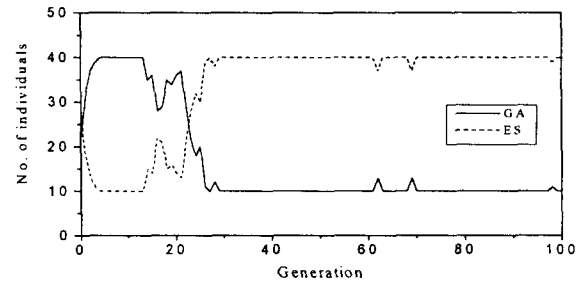
그림 7은 매세대마다의 목적함수와 유전알고리즘과 진화전략의 해집단 수를 나타내었다. 그림 7의 (b)에서 보는 바와 같이 초기 세대에서는 유전알고리즘의 해집단 수가 진화전략의 해집단 수보다 더 많이 나타나고 세대수가 증가함에 따라 진화전략의 해집단 수가 더 많아짐을 알 수 있다. 이것은 초기세대에서는 유전알고리즘에 의해 전역탐색을 행하고 세대수가 증가함에 따라 진화전략에 의해 국부탐색을 적응적으로 수행함을 나타낸다.

경우 1) 중부하시 제어

표 3과 같은 발전기 및 여자기 상수를 이용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였고, 그림 8은 적응진화연산을 이용하여 FPSS의 동조에 사용된 중부하시($P_e=1.3$ $Q_e=0.015$) 3상 고장이 40[msec]동안에 지속되다가 계통구성 변경없이 제거되었을 때, PSS가 없는 경우, CPSS 및 제안한 FPSS가 있는 경우에 대해 발전기 각속도, 위상각 변화 및 제어입력을 나타내었다. 그림 8의 (a)에서 외란인가 후 CPSS의 정정시간은 약 4.5[sec]이고, FPSS의 정정시간은 약 2.0[sec]로 FPSS가 CPSS보다 약 2.5[sec]정도 더 빨리 정상상태에 도달함을 알



(a) 적합도



(b) GA와 ES의 개체수

그림 7 매 세대마다 적합도 추이 및 GA, ES의 해집단 수
Fig. 7 Fitness and number of individuals of GA and ES in each generation

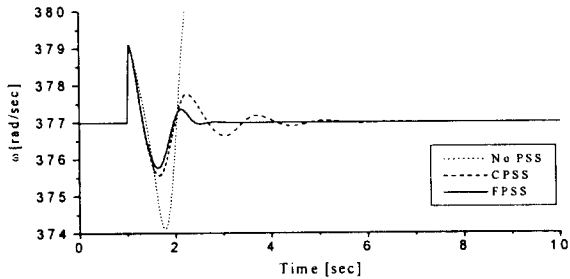
수 있다. 그림 9는 FPSS의 강인성을 평가하기 위해 동조에 사용되지 않은 계통상태인 과부하시 발전기 위상각을 0.1[rad]만큼 변화시켰을 때, PSS가 없는 경우, CPSS 및 제안한 FPSS가 있는 경우에 대해 발전기 각속도와 위상각 변화를 나타내었다. 그림 9의 (a)에서 외란인가 후 CPSS의 정정시간은 약 4.2[sec]이고, FPSS의 정정시간은 약 1.2[sec]로 FPSS가 CPSS보다 약 3[sec]정도 더 빨리 정상상태에 도달하였다. 따라서, 그림 8과 그림 9에서 보는 바와 같이 제안한 FPSS가 정정시간, 상승시간 및 오버슈트면에서 CPSS보다 더 우수한 제어성능과 강인함을 보였다.

경우 2) 정상부하시 제어

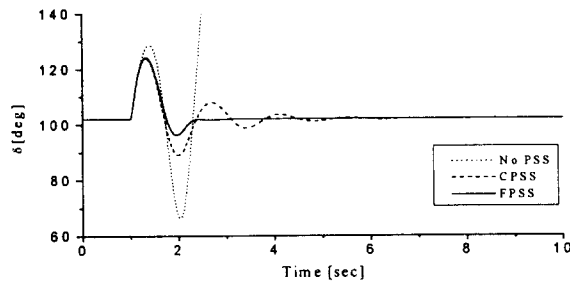
제안한 FPSS의 강인성을 평가하기 위해 그림 10과 같이 정상부하시($P_e=1.0$ $Q_e=0.015$) 3상 고장이 40[msec]동안에 지속되다가 계통구성 변경없이 제거되었을 때, PSS가 없는 경우, CPSS 및 제안한 FPSS가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 보였다. 그림 10의 (a)에서 외란인가 후 CPSS의 정정시간은 약 4[sec]이고, FPSS의 정정시간은 약 2.7[sec]로 FPSS가 CPSS보다 약 1.3[sec]정도 더 빨리 정상상태에 도달함을 알 수 있다. 그림 11은 정상부하시 발전기 위상각을 0.1[rad]만큼 변화시켰을 때, PSS가 없는 경우, CPSS 및 제안한 FPSS가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 나타내었다. 그림 11의 (a)에서 외란인가 후 CPSS의 정정시간은 약 4[sec]이고, FPSS의 정정시간은 약 1.2[sec]로 FPSS가 CPSS보다 약 2.8[sec]정도 더 빨리 정상상태에 도달하였다. 따라서, 그림 10와 그림 11에서 보는 것처럼 정상부하에서도 제안한 FPSS가 정정시간, 상승시간 및 오버슈트면에서 CPSS보다 더 강인함을 보였다.

경우 3> 경부하시 제어

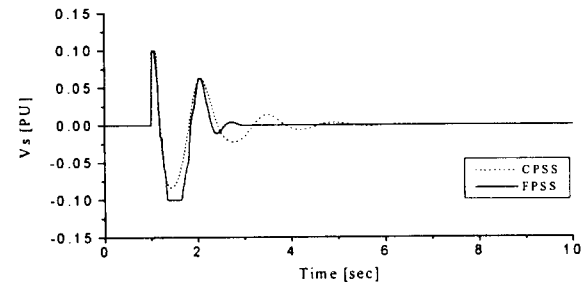
제안한 FPSS의 강인성을 평가하기 위해 그림 12와 같이 경부하시($P_e=0.7$ $Q_e=0.015$) 3상 고장이 40[msec]동안에 지속되다가 계통구성 변경없이 제거되었을 때, PSS가 없는 경우, CPSS 및 제안한 FPSS가 있는 경우에 대해 발전기 응답 특성을 나타내었다. 그림 12의 (a)에서 외란인가 후 CPSS의 정정시간은 약 4.2[sec]이고, FPSS의 정정시간은 약 2.0[sec]로 FPSS가 CPSS보다 약 2.2[sec]정도 더 빨리 정상상태에 도달하였다. 그림 13은 경부하시 발전기 위상각이 0.1[rad]만큼 변화시켰을 때, PSS가 없는 경우, CPSS 및 제안한 FPSS가 있는 경우에 대해 발전기 응답특성을 나타내었다. 그림 13의 (a)에서 외란인가 후 CPSS의 정정시간은 약 4.2[sec]이고, FPSS의 정정시간은 약 1.4[sec]로 FPSS가 CPSS보다 약 2.8[sec]정도 더 빨리 정상상태에 도달하였다. 따라서, 그림 12와 그림 13의 경부하시에도 제안한 FPSS가 정정시간, 상승시간 및 오버슈트면에서 CPSS보다 더 강인함을 보였다.



(a) 발전기 각속도

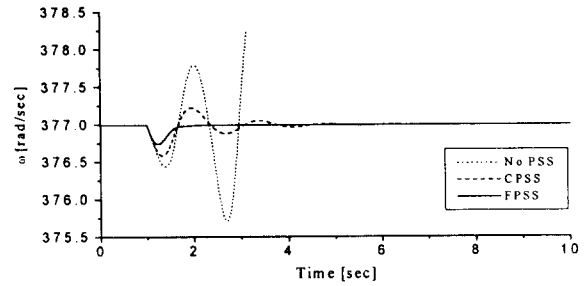


(b) 발전기 위상각

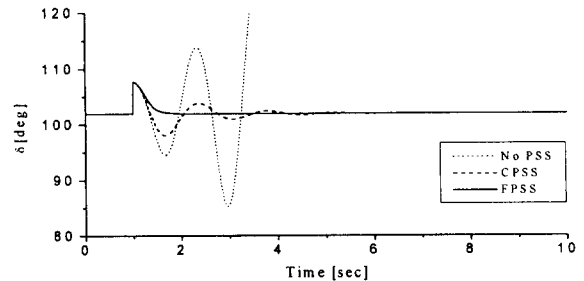


(c) 제어입력

그림 8 중부하시 3상 고장이 발생했을 때 발전기 응답
Fig. 8 Responses of generator when three-phase fault was generated in heavy load

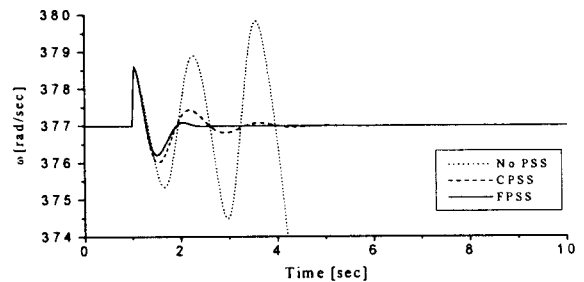


(a) 발전기 각속도

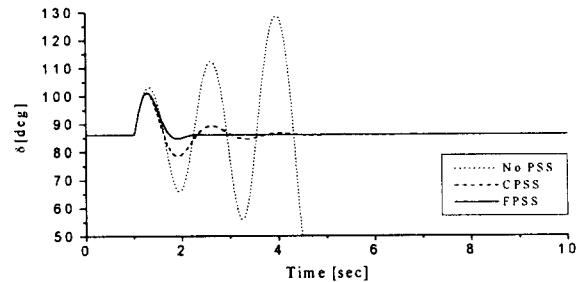


(b) 발전기 위상각

그림 9 중부하시 발전기 위상각이 0.1[rad]만큼 변화했을 때 발전기 응답
Fig. 9 Responses of generator when the angle of generator changed 0.1[rad] in heavy load

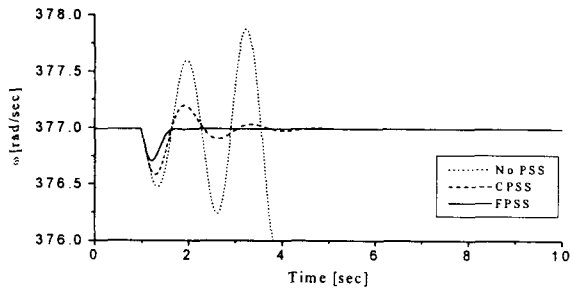


(a) 발전기 각속도

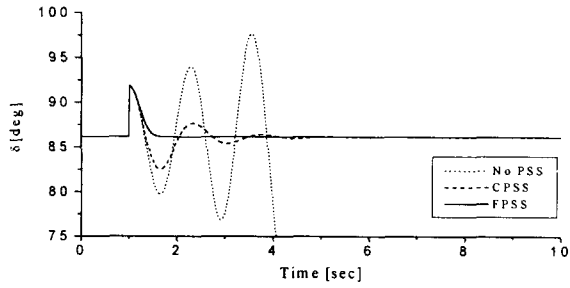


(b) 발전기 위상각

그림 10 정상부하시 3상 고장이 발생했을 때 발전기 응답
Fig. 10 Responses of generator when three-phase fault was generated in normal load

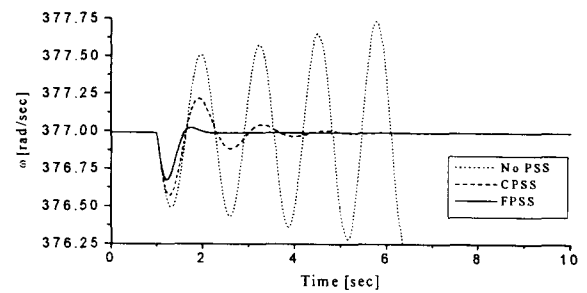


(a) 발전기 각속도

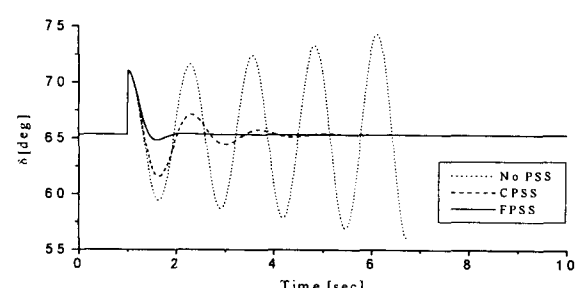


(b) 발전기 위상각

그림 11 정상부하시 발전기 위상각이 0.1[rad]만큼 변화했을 때 발전기 응답
Fig. 11 Responses of generator when the angle of generator changed 0.1[rad] in normal load



(a) 발전기 각속도



(b) 발전기 위상각

그림 13 경부하시 발전기 위상각이 0.1[rad]만큼 변화했을 때 발전기 응답
Fig. 13 Responses of generator when the angle of generator changed 0.1[rad] in light load

6. 결론

본 논문에서는 해집단을 다음 세대로 진화시킬 때 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하며, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 적응진화연산을 제안하였고, 이를 이용하여 FPSS의 소속함수 모양 및 입·출력 이득을 동조하였다.

사례연구 결과, FPSS의 동조에 사용된 중부하시의 3상 고장에 대해서 제안한 FPSS가 CPSS보다 정정시간면에서 약 2.5[sec]정도 더 빨리 정상상태에 도달하였고, 상승시간과 오버슈트면에서도 더 우수한 제어성능을 나타내었다. 그리고 제안한 FPSS의 강인성을 평가하기 위해 중부하시 발전기 위상각 변화와 정상부하 및 경부하시의 3상 고장과 발전기 위상각 변화에 대해 제안한 FPSS가 CPSS보다 정정시간면에서 약 1.3~3[sec]정도 더 빨리 정상상태에 도달하였다. 따라서, 정상부하 및 경부하시에도 제안한 FPSS가 정정시간, 상승시간 및 오버슈트면에서 CPSS보다 더 강인함을 보였다.

본 연구는 부산대학교 기성회재단 학술연구조성비에 의한 연구임

부록

- 1. 표기법
- δ : 발전기 위상각 [deg]
- ω : 발전기 각속도 [rad/sec]

그림 12 경부하시 3상 고장이 발생했을 때 발전기 응답
Fig. 12 Responses of generator when three-phase fault was generated in light load

- ω_{ref} : 발전기 기준 각속도 [rad/sec]
- H : 발전기 관성 정수 [MW · s/MVA]
- T_m : 발전기 기계적 입력 [MW]
- V_t : 발전기 단자 전압 [kV]
- E_{fd} : 발전기 여자 전압 [kV]
- X_d : 발전기 d축 동기 리액턴스 [Ω]
- X_d' : 발전기 d축 과도 리액턴스 [Ω]
- X_q' : 발전기 q축 과도 리액턴스 [Ω]
- T_{do}' : 발전기 d축 과도 시정수 [sec]
- I_d : 발전기 d축 전류 [kA]
- I_q : 발전기 q축 전류 [kA]
- E_d' : 발전기 d축 유효기전력 [kV]
- E_q' : 발전기 q축 유효기전력 [kV]
- K_A : 자동 전압조정 장치의 이득
- T_A : 여자기 시정수 [sec]
- V_s : 전력계통안정화장치의 출력 [kV]
- V_{ref} : 발전기 단자 전압의 기준치 [kV]

- in HVDC Current Control," *IEEE, ISAP*, 1997
- [10] Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer -Verlag, 1992
- [11] M. Srinivas and L. M. Patnaik, "Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 24, No. 4, pp.656-667, April, 1994
- [12] W. M. Spears, *Evolutionary Programming IV*, The MIT Press, 1995
- [13] Robert Hinterding, "Gaussian Mutation and Self-adaption for Numeric Genetic Algorithms", *IEEE International Conf. on Evolutionary Computation*, 1995
- [14] R. Hinterding, Z. Michalewicz and A. E. Eiben, "Adaptation in Evolutionary Computation: A Survey", *IEEE International Conf. on Evolutionary Computation*, 1997
- [15] 황기현, 문경준, 박준호, 정정원, "진화전력과 유전알고리즘을 이용한 적응진화연산", *전기학회논문지 제 47 권 제 8호*, 1998, 8

참 고 문 헌

- [1] Y. N. Yu, *Electric Power System Dynamics*, Academic Press, 1983
- [2] E. V. Larsen and D. A. Swann, "Applying Power System Stabilizers Part I: General Concepts", *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-100, No. 6, pp. 3017-3024, June, 1981
- [3] E. V. Larsen and D. A. Swann, "Applying Power System Stabilizers Part II: Performance Objectives and Tuning Concepts", *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-100, No. 6, pp. 3025-3033, June, 1981
- [4] Y. Hsu and C. Hsu, "Design of a Proportional-Integral Power System Stabilizer", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-1, No. 2, pp. 46-53, May, 1986
- [5] A. A Ghandakly and J. J Dai, "An Adaptive Synchronous Generator Stabilizer Design by Generalized Multivariable Pole shifting Technique," *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 7, No. 3, Aug., 1992.
- [6] T. Hiyama, "Real Time Control of Micro-machine System using Micro-computer based Fuzzy Logic Power System Stabilizer", *IEEE Transactions of Energy Conversion*, Vol. 9, No. 4, pp. 724-730, Dec., 1994
- [7] T. Hiyama and M. Mishiro, "Coordinated Fuzzy Logic Control for Series Capacitor Modules and PSS to Enhance Stability of Power System", *IEEE Transactions of Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, pp. 1098-1104, April, 1995
- [8] M. A Abido and Y. L Abdel-Magid, "Tuning of a Fuzzy Logic Power System Stabilizer Using Genetic Algorithms," *IEEE, ISAP*, 1997
- [9] J. Y Yoon, G. H Hwang, and J. H Park, "A Design of Self Tuning Fuzzy Controllers Using Genetic Algorithm

저 자 소 개

황 기 현(黃 琪 鉉)
 전기학회논문지 제48권 제1호 참조
 Tel : 051-510-3188

박 준 호(朴 俊 瀾)
 전기학회논문지 제48권 제1호 참조