

적응진화 알고리즘을 이용한 초고압 직류계통의 퍼지제어기 설계

論 文

49A-5-2

Design of Fuzzy Logic Controller of HVDC using an Adaptive Evolutionary Algorithm

崔在坤* · 黃琪鉉** · 朴俊潑***

(Jae-Kon Choi · Gi-Hyun Hwang · June-Ho Park)

Abstract - This paper presents an optimal design method for fuzzy logic controller (FLC) of HVDC using an Adaptive Evolutionary Algorithm (AEA). We have proposed the AEA which uses a genetic algorithm (GA) and an evolution strategy (ES) in an adaptive manner in order to take merits of two different evolutionary algorithms. The AEA is used for tuning fuzzy membership functions and scaling constants. Simulation results show that disturbances are well damped and the dynamic performances of FLC have better responses than those of PD controller when AC system load changes suddenly.

Key Words : HVDC, FLC, Adaptive Evolutionary Algorithm

1. 서 론

초고압 직류(high voltage direct current : HVDC) 송전방식은 정류기에서 교류전력을 직류전력으로 변환하고 송전선로를 통하여 직류전력을 수송한 후 인버터에서 직류전력을 교류전력으로 재변환하여 전력을 공급하는 송전방식이다. 직류송전은 교류송전에 비해 전압, 전류 및 송전전력에 대한 빠른 제어가 가능하므로 외란에 대하여 강인하고, 교류계통의 동특성을 향상시킬 수 있고, 송전용량을 증가할 수 있으며 단락용량이 감소하는 등의 많은 장점을 가지고 있다.

이러한 직류계통의 동특성 향상을 위해 사용된 기존의 제어기[1-4]는 특정한 동작점에서 선형화된 모델을 이용하여 근계적과 Bode 선도 방법으로 설계된 진·지상제어기와 비례-적분(proportional-integral : PI) 제어기 등이 사용되었다. 이러한 제어기는 선형제어이론과 특정한 동작점에서 선형화된 계통모델을 이용하여 제어기를 설계하였기 때문에 특정 동작점에서는 좋은 제어성능을 나타내지만, 부하의 변동이나 계통의 고장 등과 같은 계통운전 조건이 변했을 경우에는 좋은 제어성능을 얻기가 어렵다. 그리고 적응제어이론(adaptive control theory)을 도입하여 전력계통의 비선형성(nonlinear)과 시변성에 대하여 적응능력을 부여하고자 하는 방법이 제안되었다[5-7]. 이 방법은 전력계통의 동특성을 향상시켰지만, 매주기마다 계산시간이 많이 소요됨으로 실시간으로 제어하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 최근에는 직류계통의 동특성을 향상시키기 위해서 퍼지제어기와 신경회로망제어기 등과 같은 지능제어기법이 직류계통의 제어기로 많이 제안되고 있다[8].

본 논문에서는 진화연산의 탐색성능을 개선한 적응진화 알고리즘(adaptive evolutionary algorithms : AEA)[9]을 이용하여 초고압 직류계통의 퍼지제어기 설계 방법을 제안하였다. 제안한 퍼지제어기의 유용성을 평가하기 위하여 교류/직류 병행 모델 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 사례연구 결과, 퍼지제어기 설계에 사용된 계통 외란에 대해서 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 우수한 제어 성능을 나타내었다. 그리고 제안한 퍼지제어기의 강인성을 평가하기 위해 퍼지제어기 설계에 사용되지 않은 계통 외란에 대해 비선형 시뮬레이션 해본 결과, 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 뛰어난 강인성을 나타내었다.

2. 계통 모델

본 논문에서 적응진화 알고리즘을 이용하여 퍼지제어기(fuzzy logic controller : FLC)의 설계와 유용성 평가에 사용된 교류/직류 병행 모델 계통을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 송전단측은 발전중심지로 고려하였으며 송전단측에서 발전된 전력을 선로를 통하여 원거리의 수전단측 부하중심지로 송전하는 계통이다. 그리고 수전단측을 대규모 복잡계통으로 가정하여 수전단측을 무한대 모선으로 가정하였다. 그림 1에서 발전기는 2축 모델[14]을 사용하였으며, 여자기는 IEEE-Type II를 사용하였다. 동기기의 터빈/조속기 동특성은 시정수가 길며 변동폭이 상대적으로 적기 때문에 고려하지 않았다.

1) 직류송전계통: 직류계통의 전력방정식이 교류계통의 전력방정식에 포함되어 대수방정식의 형태로 나타나고 직류선로를 R-L선로로 모의하면 식 (1) ~ 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 표기법 및 기호는 참고문헌[10,11]에 정의되어 있다.

* 準 會 員 : 釜山大 電氣工學科 碩師課程

** 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 · 工博

*** 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 11月 29日

最終完了 : 2000年 3月 29日

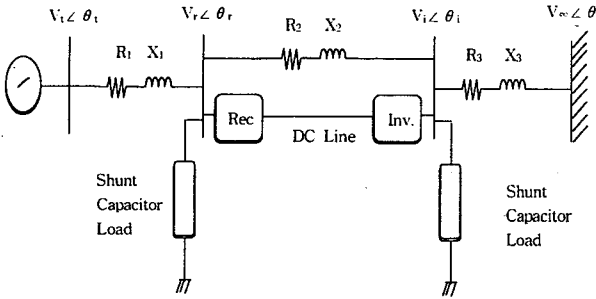


그림 1 HVDC 모델 계통
Fig. 1 HVDC model system

$$L_{dc} \frac{dI_{dc}}{dt} = V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \beta - \left(\frac{3}{\pi} X_r B_r + R_{dc} + \frac{3}{\pi} X_i B_i \right) I_{dc}$$

$$V_{dr} = V_{doi} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_{dc} B_r$$

$$V_{di} = V_{doi} \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_i I_{dc} B_i$$

$$\gamma = \arccos \left(\frac{2V_{di} - V_{doi} \cos \beta}{V_{doi}} \right)$$

$$\phi_r = \arccos \left(\frac{V_{dr}}{V_{doi}} \right)$$

$$\phi_i = \arccos \left(\frac{V_{di}}{V_{doi}} \right)$$

$$P_{dr} = V_{dr} I_{dc}$$

$$P_{di} = V_{di} I_{dc}$$

$$Q_{dr} = P_{dr} \tan(\phi_r)$$

$$Q_{di} = P_{di} \tan(\phi_i)$$

2) 전압전류제어 특성 곡선: 그림 2는 전압전류제어 특성 곡선을 나타내었다. 정상상태에서는 정류기의 정전류 제어(AD)와 인버터의 정여유각 제어(BC)로 운전하다가 전압강하와 같은 외란이 발생하면 정류기에서는 제어가 불가능하여 인버터측에서 정전류제어(BA*)를 수행한다. 전압의존형 전류제한(voltage dependant current limits :VDCL)은 외란에 의해 변환기의 AC측 전압의 크기가 과도하게 낮아진 경우 직류전류의 지령치를 낮춘다.

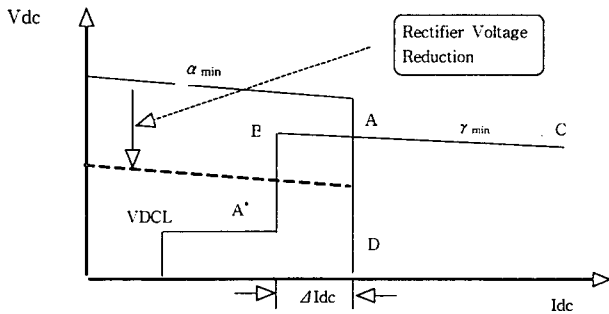


그림 2 전압전류제어 특성 곡선
Fig. 2 HVDC control characteristic

3) 정류기 제어 방식: 정전류 제어는 직류선로의 전류를 일정하게 유지하는 제어 동작이다. 직류전류는 계통의 상황에 따라 크게 영향을 받아 급격히 변화할 수 있다. 이러한 직류전류의 급격한 변동은 계통에 큰 영향을 미치므로 주로 약한 교류계통에 연결된 변환기에서 정전류 제어를 수행하게 된다. 그리고 직류계통의 유효전력과 무효전력을 제어함으로써 교류계통의 발전기 각속도를 제어할 수 있다[4]. 따라서, 그림 3에서와 같이 발전기 각속도의 오차와 변화분을 입력으로 하는 퍼지제어기의 출력을 정전류 제어기의 보조 신호로 사용하였다.

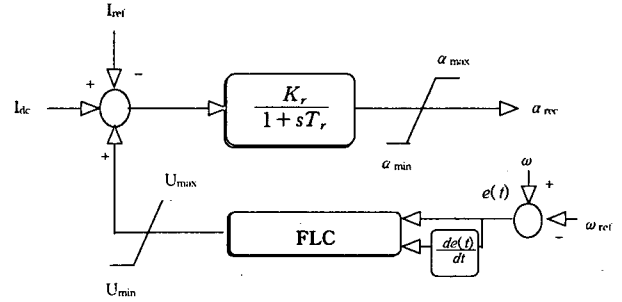


그림 3 정류기 제어방식
Fig. 3 Block diagram of the rectifier controller

4) 인버터 제어 방식: 정여유각 제어는 인버터에서만 수행하는 제어방식으로 전류실패를 방지함과 동시에 고역률로 운전하기 위한 제어방식이다. 인버터에서는 정전류 제어(BA*)와 정여유각 제어(BC)의 두 가지중 한가지가 선택되는데, 두 제어기에 의한 점호각중 작은 값이 선택되는 최소선택기(minimum value selector)가 사용된다.

3. 적응진화 알고리즘을 이용한 초고압 직류계통의 퍼지제어기 설계

3.1 적응진화 알고리즘[9]

본 논문에서는 해집단을 다음세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 알고리즘을 제안하였다. 적응진화연산의 과정은 초기해집단을 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 유전알리즘의 해집단과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하는 엘리티즘을 사용하였다. 적응진화연산의 주요 과정은 개체의 구분(초기화), 평가 및 복제, 최소해집단 보장, 유전알고리즘과 진화전략의 연산, 엘리티즘으로 구성되어 있으며, 각각의 특성은 아래와 같다.

- 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.
- 3. 최소 해집단수의 보장 :** 세대가 진행됨에 따라 유전알고리즘 혹은 진화전략중 어느 하나의 역할이 너무 커지는 것을 방지하기 위해 유전알고리즘과 진화전략의 해집단은 전체 해집단에 대해 일정비율 이상의 개체를 대응시키도록 하였다.
- 4. 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation) :** 교배는 부모염색체의 유전자 정보를 서로 교환하여 새로운 정보를 가진 자손염색체를 생성하는 과정이며 돌연변이는 부모염색체 유전자의 형태변화로 새로운 유전정보를 발생하는 메커니즘이다. 본 논문에서는 실행시간이 단축되고 수학적 기법이 첨가될 수 있는 실변수형 유전알고리즘을 이용하였다[12]. 본 논문에서는 사용한 진화전략은 부모해집단으로부터 자손해집단을 생성한 후 부모는 모두 제거되고 자손해집단을 다음세대의 부모해집단으로 선택하는 방법을 사용하였다[13].
- 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.

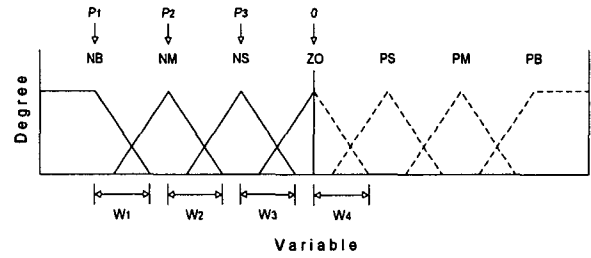


그림 4 대칭형 삼각형 소속함수
Fig. 4 Symmetrical membership function

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,12}	SF _{n,1}	...	SF _{n,3}	*

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

그림 5 해집단의 구조
Fig. 5 Structure of population

그리고 해집단의 각 스트링을 평가하기 위하여 사용된 적합도 함수는 식 (11)과 같이 발전기 각속도의 절대치 편차와 직류전류의 절대치 편차의 합을 사용하였다. 여기서, a(=1)와 b(=10)는 가중치로써 각속도 편차와 전류편차 부분에 대한 비중을 조정하기 위해 사용하였고, 제어기 튜닝에 사용된 데이터 수는 기계적인 토오크가 0.2 [pu] 증가했을 때 8[sec] 동안 0.005 [sec] 간격으로 샘플링하여 취득한 발전기 각속도 및 직류전류를 사용하였다.

$$\text{적합도} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^T (a \cdot |\omega_{ref} - \omega(t)| + b \cdot |I_{ref} - I_{dc}(t)|)} \quad (11)$$

여기서, $\omega(t)$: 발전기의 실제 각속도 [rad/sec]
 ω_{ref} : 발전기의 기준 각속도 [rad/sec]
 $I_{dc}(t)$: 직류전류 [pu]
 I_{ref} : 기준 직류전류 [pu]
 T : 특정한 시간 동안 획득한 데이터의 개수
 a, b : 상수

본 논문에서 제안한 적응진화 알고리즘을 이용하여 초고압 직류계통의 퍼지제어기 설계 과정은 아래와 같고, 전체 흐름도는 그림 6에 나타내었다.

- 단계 1) 해집단 구성 :** 그림 5와 같이 퍼지제어기의 꼭지점과 폭 및 입·출력 변수의 스케링 상수를 이용하여 해집단 구성하고, 각 스트링이 유전알고리즘의 개체인지 진화전략은 개체인지를 판단하기 위한 태그변수를 임의로 설정한다.
- 단계 2) 평가 :** 식 (11)의 적합도 함수를 이용하여 단계 1)에서 생성된 각 스트링을 평가하기 위한 해석과정은

3.2 적응진화 알고리즘을 이용한 HVDC 계통의 퍼지 제어기 설계

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 튜닝하는 방법들이 많이 제안되고 있다[10].

본 논문에서는 방법론에서 상이한 탐색과정을 가지고 있는 유전알고리즘과 진화전략을 적용적으로 이용하는 적응진화 알고리즘을 퍼지제어기의 소속함수 모양과 입·출력 이득을 튜닝하였다. 그림 4는 본 논문에서 사용한 삼각형 소속함수를 나타내었으며, 제로(ZO) 소속함수의 모든 꼭지점을 영점에 고정시켰고, 각 소속함수의 폭은 모두 대칭으로 두었으며, 영점을 기준축으로 하여 모든 소속함수들을 대칭으로 구성하였다. 여기서, NB는 Negative Big, NM는 Negative Medium, NS는 Negative Small 등을 나타내는 언어적인 변수이다. 따라서 퍼지제어기의 입·출력변수의 소속함수를 튜닝하는데 필요한 적응진화 알고리즘의 해집단의 구성은 그림 5와 같다. 그림 5에서 보는 것처럼 각 입·출력 변수에 대해서 삼각형 소속함수의 꼭지점이 3개, 폭이 4개가 필요하므로 총 21개의 변수와 입·출력 이득을 포함해서 총 24개로 스트링을 구성하였다.

다음과 같다.

- ① 변환기의 점호각을 이용하여 직류계통의 유효전력과 무효전력을 계산한다
- ② 직류계통의 유효전력과 무효전력을 이용하여 교류계통의 조류계산을 수행한다.
- ③ 조류계산 결과를 이용하여 발전기의 미분 방정식의 해석시 필요한 초기치를 계산한다.
- ④ 계통 외란인가 : 발전기의 기계적인 토오크 변화, 발전기 위상각 변화, 발전기 기준전압 등과 같은 외란을 인가한다.
- ⑤ 발전기 각속도의 오차 및 오차의 변화분을 이용하여 퍼지제어기의 출력을 계산한다.
- ⑥ 변환기의 점호각을 계산한다.
- ⑦ 직류계통의 동특성을 해석한다.
- ⑧ 직류계통의 유효전력과 무효전력을 이용하여 교류계통의 조류계산을 수행한다.
- ⑨ 비선형 미분방정식의 해법으로 발전기의 미분방정식을 푼다.
- ⑩ 시뮬레이션 시간 8sec 동안 ④~⑨를 반복한다.

- 단계 3) 복제 : 적합도에 비례하여 복제하는 룰렛휠 방법을 사용하여 복제한 후, 태그변수가 0인 개체는 유전알고리즘을 해집단에 편입하고 1인 개체는 진화전략의 해집단에 편입을 한다.
- 단계 4) 최소해집단 수의 보장 : 유전알고리즘 또는 진화전략 중 어느 하나의 역할이 우세하여 나머지 방법에 의해서 자손이 소멸되는 것을 방지하기 위해 최소해집단 수를 보장하였다.
- 단계 5) 유전알고리즘 및 진화전략의 연산 : 태그변수가 0인 개체에 대해서는 유전알고리즘의 연산자인 교배와 돌연변이를 수행하여 자손을 생성하고, 태그변수가 1인 개체에 대해서는 진화전략의 연산자인 돌연변이를 수행하여 자손을 생성한다.
- 단계 6) 엘리티즘 : 적합도가 가장 높은 개체를 유전알고리즘과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하는 엘리티즘을 사용하였다.
- 단계 7) 수렴조건 : 특정한 세대수를 만족할 때까지 단계 2 ~ 단계 6)을 반복한다.

4. 사례 연구

제안한 방법의 성능을 검증하기 위해 그림 1의 교류/직류 병행 모델 계통에 대해 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 초고압 직류계통의 퍼지제어기 설계에 사용된 적응진화 알고리즘의 시뮬레이션 계수는 표 1과 같다. 적응진화 알고리즘에 의해서 튜닝된 퍼지제어기의 소속함수 모양은 그림 7에 나타내었고, 이때 오차의 스케링 상수값은 0.45, 오차 변화분의 스케링 상수값은 14.28, 출력부의 스케링 상수값은 0.40이다. 그림 8은 매 세대별 적합도 수렴특성 및 적응진화 알고리즘에서의 유전알고리즘과 진화전략의 개체 수를 나타내었다. 그림 8의 (b)에서 보는 바와 같이 초기 세대에서는 유전알고리즘의 개체 수가 진화전략의 개체 수보다 더 많이 나타나고 세대수가 증가함에 따라 진화전략의 개체 수가 더 많아짐을 알 수 있다. 이것은 초기세대에서는 유전알고리즘에 의해 전역탐색을 행하고, 세대수가 증가함에 따라 진화전략에 의해 국부탐색을 적응적으로 수행함을 나타낸다. 본 논문에서 제

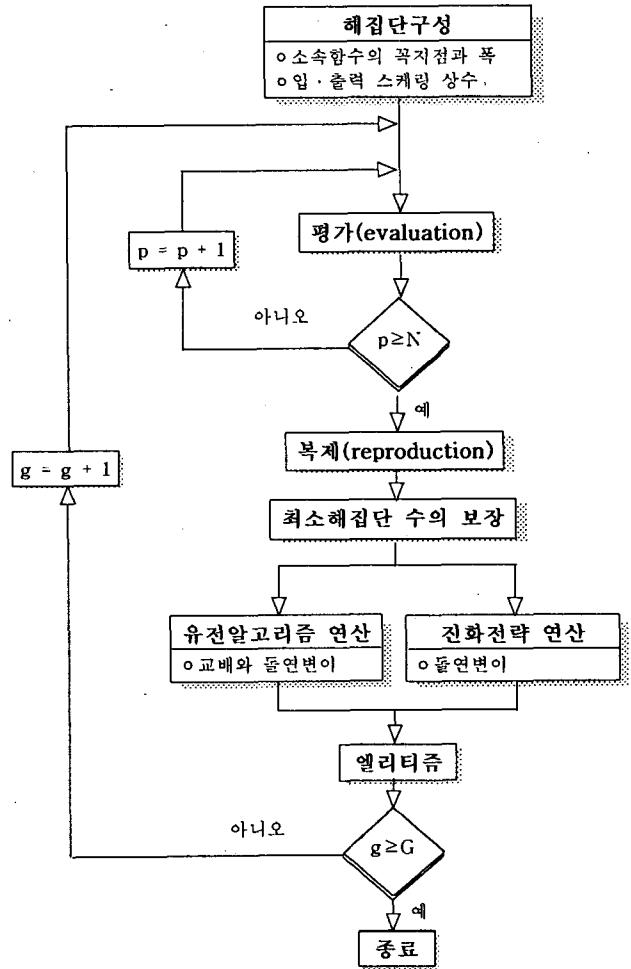


그림 6 적응진화 알고리즘을 이용한 초고압 직류계통의 퍼지 제어기 설계

Fig. 6 A design of FLC for HVDC using AEA

안한 퍼지제어기와 성능을 비교하기 위해 PD제어기를 사용하였고, PD 제어기의 이득은 적응진화 알고리즘에 의해서 최적화 하였다.

표 1 적응진화 알고리즘의 시뮬레이션 계수

Table 1 Coefficients of simulation for adaptive evolutionary algorithm

적용방법	해집단 수	교배 확률	돌연변이 확률	δ	C_d	C_i
AEA	50	0.95	0.005	0.5	0.95	1.05

해석조건은 퍼지제어기의 설계에 사용된 계통운전 조건과 퍼지제어기의 강인성 평가에 사용된 계통운전 조건으로 분류한다. 퍼지제어기의 설계에 사용된 계통운전 조건은 기계적인 토오크가 0.2 pu 증가한 경우를 이용하였다. 퍼지제어기의 강인성 평가에 사용된 계통운전 조건은 부하증가 및 발전기 위상각 변화를 사용하였다.

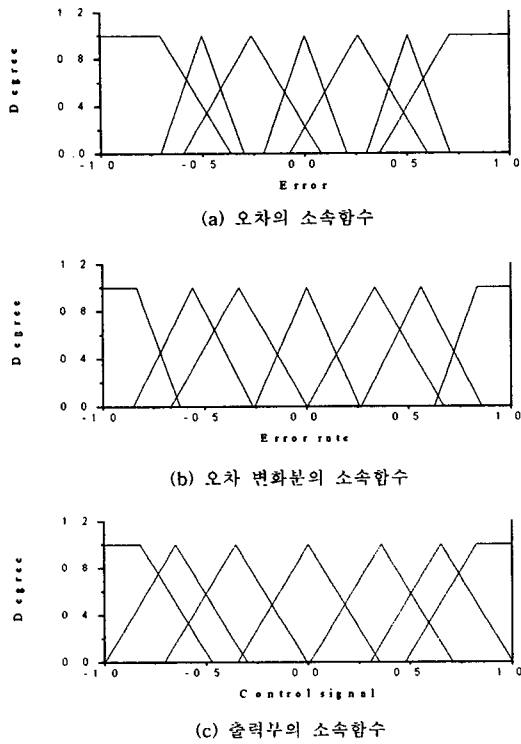


그림 7 튜닝된 FLC의 소속함수
Fig. 7 Tuned membership functions of FLC

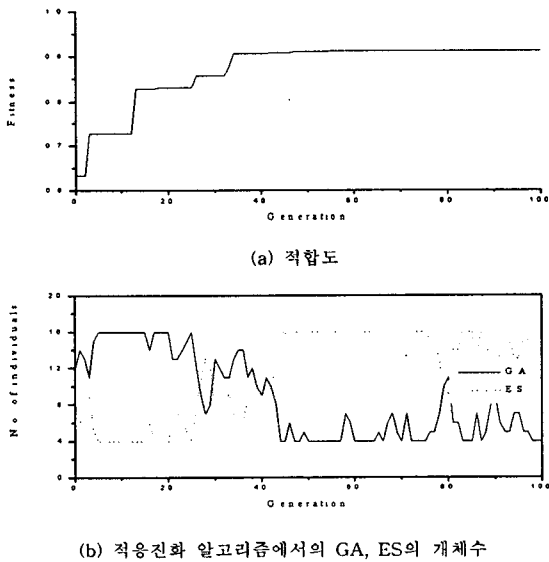


그림 8 매 세대별 적합도 수렴특성 및 GA, ES의 개체 수
Fig. 8 Fitness and number of individuals of GA and ES in each generation

그림 9는 적응진화 알고리즘을 이용하여 퍼지제어기 튜닝에 사용된 발전기 기계적인 토오크가 0.2 pu 증가하였을 때, 발전기 각속도 및 위상각, 직류전류 및 전력과 인버터 여유각을 나타내었다. 그림 9(a)의 발전기 각속도 변화에서 보는 것처럼 제안한 퍼지제어기가 정정시간과 댐핑 효과면에서 PD 제어기보다 더 나은 제어 성능을 나타내었다. 그림 9의 (c)와 (e)는 직류전류와 여유각의 변화를 나타내었는데, 제안한 퍼

지제어기가 PD제어기보다 변동폭은 크지만 교류계통이 더 빨리 정상상태에 도달함에 따라 직류계통의 직류전류와 여유각도 더 빨리 정상상태에 도달함을 볼 수 있다.

퍼지제어기의 강인성을 검증하기 위해 튜닝에 사용되지 않은 계통상태인 발전기단의 부하증가 및 발전기 위상각 변화에 대해 성능을 평가하였다. 그림 10은 발전기단의 부하가 0.2 pu 증가하였을 때 발전기 각속도, 직류전류 및 인버터 여유각을 나타내었고, 그림 11은 발전기 위상각이 0.1 rad 증가하였을 때 발전기 각속도, 직류전류 및 인버터 여유각을 나타내었다. 그림 10과 그림 11에서 보는 것처럼 제안한 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 나은 제어 성능을 나타내었다. 또한, 교류계통이 더 빨리 정상상태에 도달함에 따라 직류계통의 직류전류와 여유각도 더 빨리 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

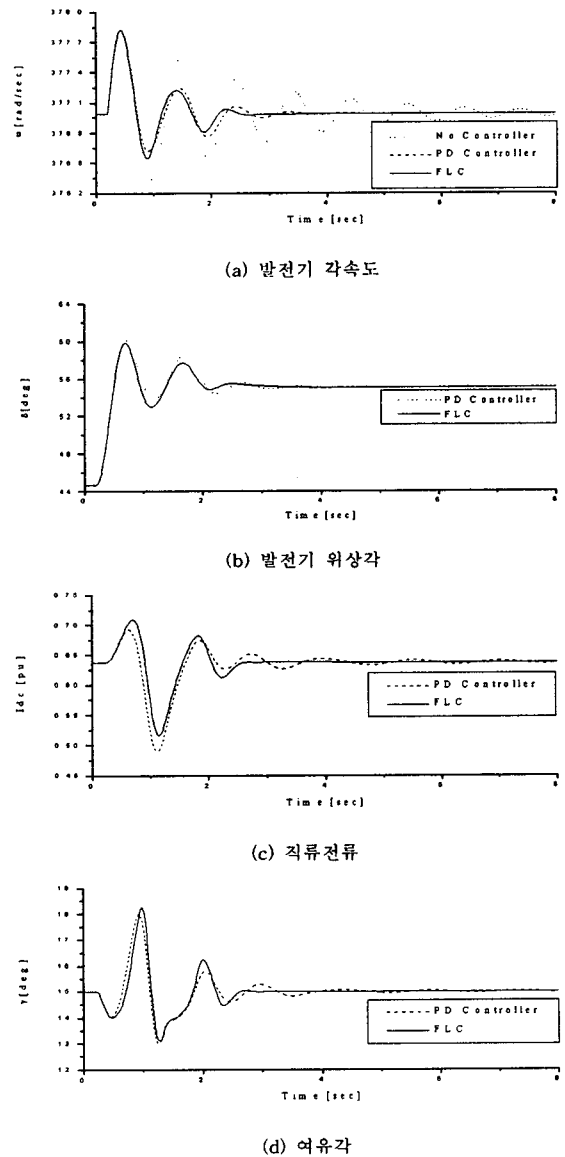
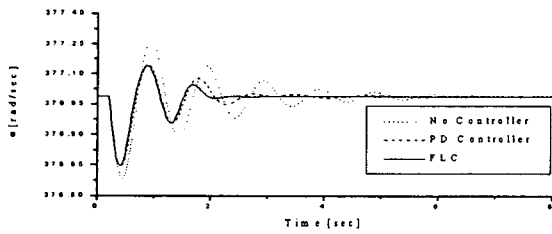
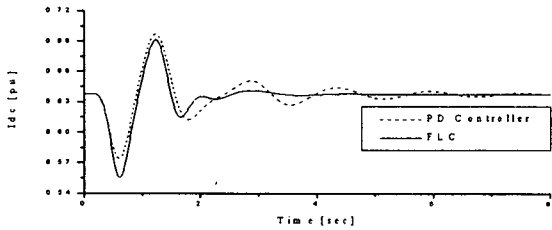


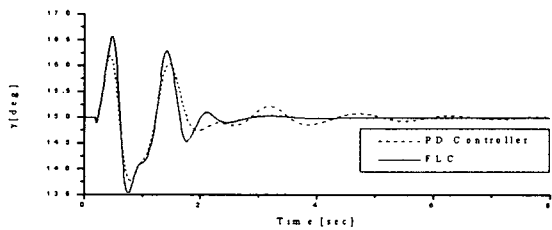
그림 9 기계적인 토오크가 0.2 pu 증가했을 때 교류/직류계통의 응답 특성
Fig. 9 Responses of AC/DC system when mechanical torque increased 0.2 [pu]



(a) 발전기 각속도



(b) 직류전류



(c) 여유각

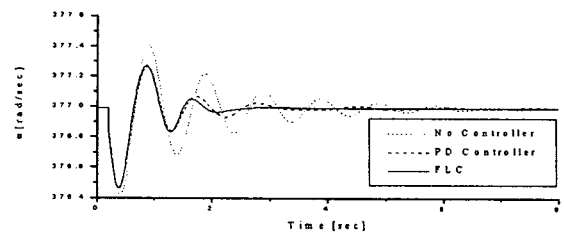
그림 10 발전기단의 부하가 0.2 pu 증가했을 때 교류/직류 계통의 응답 특성

Fig. 10 Responses of AC/DC system when load increased 0.2 [pu]

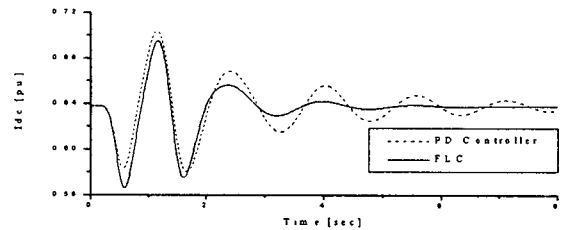
5. 결 론

본 논문에서는 진화연산의 탐색성능을 개선한 적응진화 알고리즘을 이용하여 초고압 직류계통의 퍼지제어기 설계 방법을 제안하였다. 적응진화 알고리즘을 이용하여 퍼지제어기의 소속함수 모양 및 입·출력 이득을 튜닝하였다. 제안한 퍼지제어기와 PD제어기와 성능을 비교하기 위해 교류/직류 병행 모델 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션 해본 결과, 제안한 퍼지제어기가 PD제어기 보다 더 나은 제어성능을 나타내었다. 본 논문의 연구 결과 및 성과를 요약하면 다음과 같다.

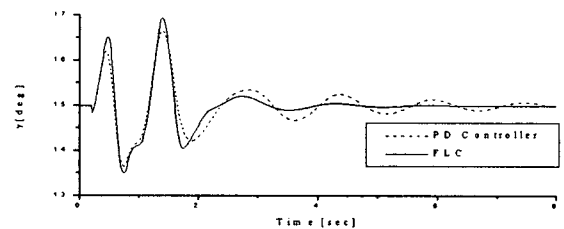
- ① 초기 세대에서는 유전알고리즘의 개체 수가 진화전략의 개체 수보다 더 많이 나타나고 세대수가 증가함에 따라 진화전략의 개체 수가 더 많아짐을 알 수 있다. 이것은 초기 세대에서는 유전알고리즘에 의해 전역탐색을 행하고 세대수가 증가함에 따라 진화전략에 의해 국부탐색을 적응적으로 수행함을 나타낸다.
- ② 교류-직류 병행 계통에 대하여 비선형 시뮬레이션 해본 결과, 튜닝에 사용한 계통외란에 대해 퍼지제어기가 PD제어기 보다 더 나은 제어성능을 나타내었고, 교류계통이 더 빨리 정상상태에 도달함에 따라 직류계통의 직류전류와 여유각도 더 빨리 정상상태에 도달하



(a) 발전기 각속도



(b) 직류전류



(c) 여유각

그림 11 발전기 위상각이 0.1 rad 증가했을 때 교류/직류 계통의 응답 특성

Fig. 11 Responses of AC/DC system when phase angle of generator increased 0.1 [pu]

였다. 퍼지제어기의 강인성을 입증하기 위해 사용된 계통외란에 대해서도 퍼지제어기가 PD제어기보다 더 좋은 성능을 보였다.

감사의 글

“이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제연구비에 의하여 연구되었음”

참 고 문 헌

- [1] C. E. Grund and C. M. Pollard, “Power modulation controls for HVDC systems”, CIGRE 14-03, 1984
- [2] S. Lefebvre, “HVDC controls for system dynamic performance”, IEEE PWR-6, pp. 743-752, 1991
- [3] M. A. Chudhury, A. S. Emarah, K. A. Ellithy and G. D. Gallanos, “Stability analysis of a modulated ac/dc system using the eigenvalue sensitivity approach”, IEEE Trans. PWR-1, pp. 128-137, 1986

- [4] Y. Y. Hsu and L. Wang, "Damping a parallel ac/dc system using PID power system stabilizers and rectifier current regulators", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 3, no. 3, pp. 540-548, 1988
- [5] S. Lefebvre, M. Saad, and A. R. Hurteau, "Adaptive control for HVDC power transmission systems", IEEE Trans. Power Apparatus Syst., vol. PAS-104, no 9, pp. 2329-2335, Sept. 1985
- [6] W. J. Rugh, "Analytical framework for gain scheduling", IEEE Control Syst. Mag., vol. II, no. 1, pp. 79-84, Jan. 1991
- [7] J. Reeve and M. Sultan, "Gain scheduling adaptive control strategies for HVDC systems to accommodate large disturbances", IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 1, pp. 366-372, Feb. 1994
- [8] A. Daneshpooy, A. M. Gole, D. G. Chapman and J. B. Davies, "Fuzzy Logic Control for HVDC Transmission", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, no. 4, pp. 1690-1697, Oct. 1997
- [9] 황기현, 문경준, 박준호, 정정원, "진화전략과 유전알고리즘을 이용한 적응진화연산", 대한전기학회, 47권 8호, pp. 1262-1268, 1998. 8
- [10] 윤재영, 황기현, 박준호, "유전알고리즘을 이용한 HVDC 정전류 제어용 자기동조 퍼지제어기 설계", 대한전기학회, 46권 10호, pp. 1461-1467, 1997. 10
- [11] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill. Inc., 1994
- [12] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, 1992
- [13] Mitsuo Gen and R. Cheng, Genetic Algorithms & Engineering Design, A Wiley-Interscience Publication, 1997
- [14] Sauer and Pai, Power System Dynamics and Stability, Prentice Hall, 1998

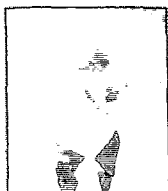
저 자 소 개



최재곤 (崔在坤)
 1974년 3월 8일생. 1998년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
 Tel : 051-510-2370



박준호 (朴俊瀨)
 1955년 9월 17일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1978년~1981년 한국전기연구소 연구원. 1981년~1984년 충남대 공대 전기공학과 전임강사 및 조교수. 1989년~1990년 Pen. State Univ. Visiting Scholar. 현재 부산대 공대 전기공학과 교수



황기현 (黃琪玆)
 1968년 3월 1일생. 1994년 경성대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 부산대 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 수료