

NonConvex 비용함수를 가진 전력경제급전 문제에 적응진화 알고리즘의 적용

論 文

50A - 11 - 4

Application of Adaptive Evolutionary Algorithm to Economic Load Dispatch with Nonconvex Cost Functions

文景俊* · 黃琪鉉** · 朴俊灝***

(Kyeong-Jun Mun · Gi-Hyun Hwang · June Ho Park)

Abstract - This paper suggests a new methodology of evolutionary computations - an Adaptive Evolutionary Algorithm (AEA) for solving the Economic Load Dispatch (ELD) problem which has piecewise quadratic cost functions and prohibited operating zones with many local minima. AEA uses a genetic algorithm (GA) and an evolution strategy (ES) in an adaptive manner in order to take merits of two different evolutionary computations: global search capability of GA and local search capability of ES. In the reproduction procedure, proportions of the population by GA and the population by ES are adaptively modulated according to the fitness. Case studies illustrate the superiority of the proposed methods to existing conventional methods in power generation cost and computation time. The results demonstrate that the AEA can be applied successfully in the solution of ELD with piecewise quadratic cost functions and prohibited operating zones

Key Words : Economic Load Dispatch, Adaptive Evolutionary Algorithm, Piecewise Quadratic Cost Functions, Prohibited Operating Zones

1. 서 론

전력경제급전의 목적은 높은 신뢰도를 유지하면서 발전소의 부하배분을 적절히 행하여 연료비를 최소화하는데 있다. 이러한 전력경제급전 문제에서 최적해를 구하기 위한 종래의 수치해석적 방법은 각 발전소의 비용함수를 미분가능한 이차함수로 근사화하여 해를 구하고 있다. 그러나 각 발전소의 실제 비용함수는 밸브의 개폐 또는 연료의 변화에 따라 불연속성 함수로 나타나므로, 비용함수를 이차함수로 근사화할 경우 오차가 발생하게 된다. 또, 화석연료의 사용이 증가함에 따라 실제 비용함수의 정확한 모델링이 필요하게 되었고, 구분적인 2차 비용함수를 모델링한 것도 비용함수를 정확하게 표현하기 위한 방법이다. 구분적인 2차 비용함수를 가진 전력경제급전 문제를 해결하기 위해서 계층적 구조의 수치해석적 방법이 제안 [1,2]되었다. 이 방법은 알고리즘이 매우 복잡하였고, 국부적인 최소값이 빠지기 쉬운 단점을 가진다.

실제의 경우에는, 각 발전기의 물리적인 한계 때문에 각 발전기의 운전범위 내에서 발전이 불가능한 구간이 발생할 수 있다. 이러한 구간을 가지는 발전기 입출력 특성은 발전금지 구간을 가지는 불연속의 비용곡선으로 표시

된다. 발전금지 구간이 존재하는 비용함수를 가진 경제급전 문제를 해결하기 위해서 λ -반복법에 의해 초기해를 구한 후, 발전금지 구간 제약조건을 만족하지 않는 발전기에 대해 경험적인 규칙(heuristic rule)을 사용하여 제약조건을 만족하도록 탐색영역을 변경시키는 방법이 제안[4]되었으나 국부적인 최소값이 빠지기 쉬운 단점을 가지며 제약조건이 증가할 경우에는 적용하기 힘든 단점을 가진다. 최근에는 이러한 구분적인 2차 비용함수 및 발전금지 구간(prohibited operating zones)이 존재하는 전력경제급전 문제에 진화연산 및 타부 탐색법(tabu search : TS)을 적용하는 방법이 제안되고 있다[5-9]. 진화연산을 이용한 방법[6-8]은 초기에는 유전알고리즘을 이용하여 전역탐색을 수행하고 특정한 세대 후, 진화전략을 이용하여 국부탐색을 수행함으로써 최적해 탐색 성능을 향상시켰지만, 유전알고리즘으로 구한 해가 전역 최적해 근처로 도달했는지를 알기가 어렵고, 몇 세대 이후에 진화전략을 적용해야 하는지 결정하기가 힘든 문제점을 가진다. 그러나 본 논문에서 제안하고자하는 알고리즘은 해집단을 다음 세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘의 전역탐색과 진화전략의 국부탐색을 동시에 적용함으로써 위 문제점을 해결하고자 하였다.

최근에는 자연생태계의 진화를 모의한 확률적인 최적화 탐색 알고리즘인 진화연산(evolutionary computation : EC)이 많은 분야에 적용되고 있다[10-13]. 이러한 진화연산의 성능은 해집단의 크기, 적합도 계산방법, 교배 및 돌연변이 확률 등의 파라미터에 영향을 크게 받는다. 이런 파라미터들을 적절히 선정하지 못하면 실행시간이 아주 길어지거나 국부최소값으로 조기수렴하는 경우가 발생한다.

* 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 博士科程

** 正 會 員 : 釜山大 컴퓨터 및 情報通信研究所 基金教授

*** 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 教授 · 博士

接受日字 : 2001年 9月 12日

最終完了 : 2001年 10月 9日

다. 이런 문제점을 해결하기 위해, 유전알고리즘에서는 적합도에 따라 교배 및 돌연변이 확률을 변화시키는 방법 [13]과 매세대마다 해집단의 크기를 변화시키는 방법이 제안되었고[10], 진화전략 및 진화프로그래밍에서는 국부 최소값에 조기수렴하지 않기 위해 정규난수 발생시 표준편차를 조정하는 방법이 제안되었다[10]. 이런 방법들은 초기세대에서는 표준편차를 크게 하거나, 교배 및 돌연변이 확률이 다소 높게 하여 탐색영역을 넓히고 어느 정도 세대가 진행된 후에는 표준편차 또는 교배 및 돌연변이 확률은 낮추어 세대간 변화를 줄이는 방법으로 이를 적응 알고리즘(adaptive algorithm)이라고 한다[12, 13].

기존의 적응알고리즘은 해집단의 크기, 교배 및 돌연변이 확률과 교배방법 등의 파라미터와 연산자들을 적응적으로 변경시키거나 정규난수에서 표준편차를 적응적으로 변경시켰다. 본 논문에서는 방법론에서 상이한 두 개의 진화연산기법을 적응적으로 이용하는 방법을 제안하였다. 유전알고리즘은 진화전략에 비해 다양한 영역을 탐색함으로써 전역최적해 근처까지는 빨리 수렴하나 확률적인 특성상 전역최적해를 찾는 데 많은 실행시간이 요구되는 반면에, 진화전략은 유전알고리즘보다 국부탐색능력이 우수하다. 본 논문에서는 해집단을 다음세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 사용하고, 적합도에 따라 복제하는 과정에서 유전알고리즘과 진화전략이 적용될 해집단의 비율이 적응적으로 변경되는 적응진화 알고리즘(adaptive evolutionary algorithm : AEA)을 제안하였다. 제안한 적응진화 알고리즘을 구분적인 2차 비용함수 및 발전금지 구간이 존재하는 전력경제급전 문제에 적용하여 종래의 방법[1,5]에 의해 구한 결과와 비교·분석하였다.

2. 전력경제급전 문제

전력 경제급전 문제는 주어진 부하에 대하여 전체 발전비용이 최소로 되도록 개별 발전기의 발전출력을 찾는 최적화 문제이다[1-9]. 그리고 보통 발전기의 비용함수는 발전 출력의 2차 함수로 근사화되지만, 그림 1에서 보는 바와 같이 실제로 발전기의 비용함수는 밸브의 개폐 또는 연료의 변화에 따른 불연속성을 가진다. 따라서 실제 비용함수를 이차함수로 모델링하면 오차가 크기 때문에 구분적인 이차함수로 모델링하는 것이 바람직하며, 이를 식 (1)~(2)에 나타내었다.

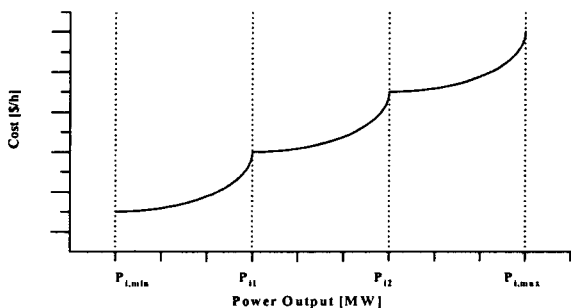


그림 1 구분적인 2차 비용함수
Fig. 1 Piecewise Quadratic Cost Function

$$C = \sum_{i=1}^N C_i(P_i) \tag{1}$$

$$C_i(P_i) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1} P_i + c_{i1} P_i^2 & \text{if } P_i^{MIN} \leq P_i < P_{i1} \\ a_{i2} + b_{i2} P_i + c_{i2} P_i^2 & \text{if } P_{i1} \leq P_i < P_{i2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{im} + b_{im} P_i + c_{im} P_i^2 & \text{if } P_{i,m-1} \leq P_i < P_i^{MAX} \end{cases} \tag{2}$$

여기서, C, N : 총 발전비용 [\$/h] 및 총 발전기 수
 $C_i(P_i)$: i 번째 발전기의 발전 비용
 a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} : j 번째 구간에서 i 번째 발전기의 비용계수
 P_i : i 번째 발전기의 발전출력 [MW]
 P_i^{MAX} : i 번째 발전기의 최대발전 출력[MW]
 P_i^{MIN} : i 번째 발전기의 최소발전 출력 [MW]

발전비용을 최소화하고자 할 때, 다음과 같은 제약조건을 만족시켜야 한다.

- 등호 제약조건 : 전체 발전출력의 합은 총 수요와 송전손실을 더한 것과 같아야 한다.

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_L + P_{TL} \tag{3}$$

여기서, P_L : 총 수요 [MW]
 P_{TL} : 송전 손실 [MW]

- 부등호 제약조건 : 각 발전기는 발전출력의 최대 및 최소 한계를 가진다.

$$P_i^{MIN} \leq P_i \leq P_i^{MAX} \tag{4}$$

실제의 경우에는, 각 발전기의 물리적인 한계 때문에 각 발전기의 운전범위 내에서 발전이 불가능한 구간이 발생할 수 있다. 예를 들면 발전기 및 부속장비에 사고(fault)가 발생한 경우 또는 특정 운전영역에서 축 베어링의 진동이 심해지는 경우에는 해당 발전기에 대해 운전 불가능한 영역이 발생할 수 있다. 이런 현상이 발생한 경우에는 해당 운전 불가능한 영역에서 운전하면 계통 상태가 불안정해지게 된다. 따라서 이런 경우의 발전기 입출력 특성은 발전이 금지된 구간을 가지는 불연속의 비용곡선으로 표시할 수 있으며 이를 그림 2에 나타내었다. 이러한 발전 금지 구간이 존재하는 전력경제급전 문제에서는 위에서 고려한 식 (1)~(4)의 목적함수 및 제약조건 이외에도 식 (5)와 같은 새로운 제약조건이 추가된다.

$$\begin{aligned} P_i^{MIN} &\leq P_i < P_{i1}^L \\ &\vdots \\ P_{i,k-1}^U &< P_i < P_{i,k}^L \quad k=2, \dots, n_i \\ &\vdots \\ P_{i,n}^U &< P_i \leq P_i^{MAX} \end{aligned} \tag{5}$$

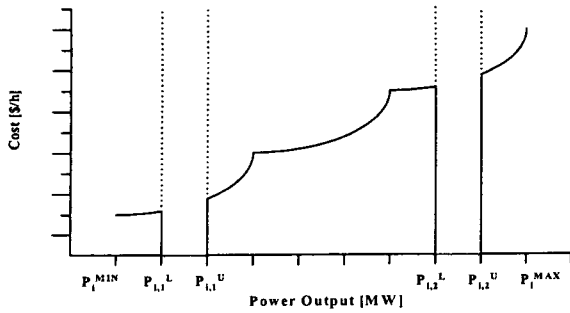


그림 2 발전 금지 구간을 가지는 2차 비용함수
Fig. 2 Cost function with prohibited operating zone network

여기서, n_i : i 번째 발전기의 발전 금지 구간 수
 $P_{i,k}^L$: i 번째 발전기의 k 번째 발전 금지 구간의 하한치
 $P_{i,k}^U$: i 번째 발전기의 k 번째 발전 금지 구간의 상한치

3. 적응진화 알고리즘을 이용한 전력경제급전 문제

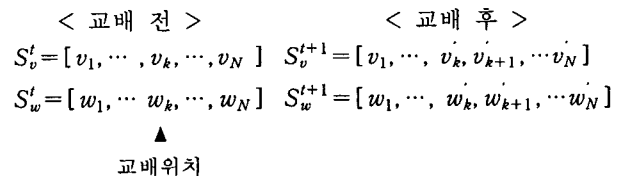
3.1 적응진화 알고리즘

본 논문에서 제안한 적응진화 알고리즘은 한 세대에서도 다음 세대로 진화시킬 때 유전 알고리즘과 진화전략을 동시에 적용하고, 세대의 진행과정에서 유리한 진화연산기법이 다음 세대의 해집단을 형성하는데 우위에 있도록 하였다. 이를 위해 적응진화 알고리즘의 초기해집단을 구성할 때 각 스트링에 대해서 태그변수 0(유전알고리즘의 개체) 또는 1(진화전략의 개체)을 임의로 대응시킨 후, 각 개체의 적합도를 계산하고 료울렛휠(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 엘리트즘을 사용하였다. 적응진화 알고리즘의 주요 과정은 개체의 구분(초기화), 평가 및 복제, 최소해집단 수의 보장, 유전알고리즘과 진화전략의 연산, 엘리트즘으로 구성되어 있으며, 각각의 특징은 아래와 같다.

- (1) 개체의 구분 (초기화) : 주어진 문제의 제약조건을 고려하여 임의로 각 스트링을 생성하여 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 평가하기 위해서 본 논문에서 사용한 적합도 함수는 목적함수가 최소가 되면 적합도가 최대가 되도록 선정하였다. 복제방법은 적

도에 비례하여 복제하는 료울렛휠을 사용하였다. 복제 후 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. 다음 세대의 각 개체는 0 또는 1의 태그변수에 대응되고 이를 통해 각 개체가 유전알고리즘으로부터 파생되었는지 또는 진화전략에 의해 파생되었는지를 알 수 있다. 그리고 태그변수는 현 세대에서 어떤 진화연산기법이 적합도를 더 많이 개선시키는지 알 수 있는 지표가 되고, 다음 세대에서 유전알고리즘과 진화전략의 해집단 수를 결정할 때 사용된다.

- (3) 최소해집단 수의 보장 : 세대가 진행됨에 따라 어떤 경우에는 유전알고리즘 또는 진화전략 중 어느 하나의 역할이 너무 커져서 나머지 방법에 의한 자손이 소멸될 수 있다. 이를 방지하기 위해서 유전알고리즘과 진화전략의 해집단에 대해 전체 해집단의 일정비율 이상의 개체를 대응시킬 필요가 있다. 본 논문에서는 료울렛휠에 의해서 복제된 유전알고리즘의 해집단이 전체 해집단의 일정비율 이하가 되면 상대 해집단인 진화전략의 해집단으로부터 임의로 선택된 개체를 유전알고리즘의 해집단에 편입한다. 유전알고리즘의 해집단이 전체 해집단의 최소비율이 될 때까지 이런 과정을 반복한다. 복제 후 진화전략의 해집단이 전체 해집단의 일정비율 이하이면 유전알고리즘의 해집단에서 임의로 편입하여 최소비율을 맞추어 준다. 본 논문에서 최소해집단의 수를 보장하기 위해 사용한 일정비율은 전체 해집단의 20[%]로 설정하였다.
- (4) 유전 알고리즘과 진화전략 연산 : 본 논문에서는 실행시간이 단축되고 수학적 기법이 첨가될 수 있는 실변수형 유전알고리즘을 이용하였으며, 복제방법으로 료울렛휠, 교배 및 돌연변이 방법으로 단순교배와 균일 돌연변이를 사용하였다. 변경된 단순교배 방법은 부모 해집단에서 두 개의 스트링을 임의로 선택하여 그림 3과 같이 자손 해집단을 생성하는 방식이다. 그림 3에서 보는 것처럼 t 세대에서 두 개의 스트링 $S_v^t=[v_1, \dots, v_k, \dots, v_N]$ 와 $S_w^t=[w_1, \dots, w_k, \dots, w_N]$ 를 임의로 선택하였을 때, k 번째 변수의 위치에서 교배가 발생했다면 $t+1$ 세대의 자손은 그림 3과 같다.



여기서, $v_j = a_1 \times v_j + a_2 \times w_j$
 $w_j = a_1 \times w_j + a_2 \times v_j$
 a_1, a_2 : 0과 1사이의 임의의 수
 v_j, w_j : 각 변수의 상한치와 하한치사이의 값
 N : 각 스트링을 구성하는 변수의 개수

그림 3 변경된 단순교배 방법
Fig. 3 Modified simple crossover method

균일 돌연변이 방법은 t 세대의 해집단 중에서 하나의 스트링 $S_v^t = [v_1, \dots, v_k, \dots, v_N]$ 의 k 번째 변수가 돌연변이를 수행한다면, $t+1$ 세대의 자손은 그림 4와 같다.

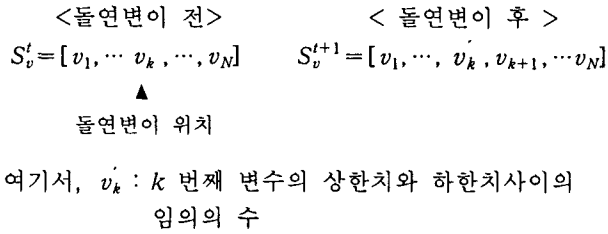


그림 4 균일 돌연변이 방법
Fig. 4 Uniform mutation method

본 논문에서는 사용한 진화전략은 부모 해집단으로부터 자손 해집단을 생성한 후 부모는 모두 제거하고 자손 해집단을 다음 세대의 부모 해집단으로 선택하는 방법을 사용하였고, 돌연변이 방법은 식 (6)과 같이 가우시안 정규난수를 이용하여 자손 해집단을 생성하는 방법을 사용하였다. 이때 표준편차는 진화전략의 해집단에 대해 돌연변이 연산자의 적용한 후 개선된 개체수의 비가 δ 보다 적으면 다음 세대의 표준편차는 표준편차의 감소율(c_d)에 비례하여 감소하고, 반면에 개선된 개체수의 비가 δ 보다 크면 표준편차의 증가율(c_i)에 비례하여 증가하도록 식 (7)과 같이 선정하였다.

$$v_k^{t+1} = v_k^t + N(0, \sigma^t) \quad (6)$$

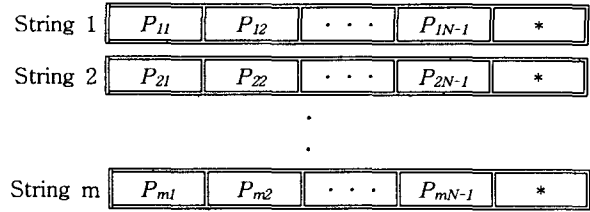
$$\sigma^{t+1} = \begin{cases} c_d \times \sigma^t & \text{if } \phi(t) < \delta \\ c_i \times \sigma^t & \text{if } \phi(t) > \delta \\ \sigma^t & \text{if } \phi(t) = \delta \end{cases} \quad (7)$$

여기서, $N(0, \sigma^t)$: 정규난수
 v_k^t : t 세대에서의 k 번째 변수
 σ^t : t 세대에서의 표준편차
 $\phi(t)$: t 세대에서 진화전략의 해집단에 대한 돌연변이 연산자의 적용 후 개선된 개체수의 비
 c_d, c_i : 표준편차의 감소율과 증가율
 δ : 0과 1사이의 상수

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

3.2 전력경제급전 문제에 적응진화 알고리즘 적용

제한한 적응진화 알고리즘을 이용하여 구분적인 2차 비용함수 및 발전 금지 구간이 존재하는 전력경제급전 문제를 해결하기 위해 그림 5와 같이 해집단을 구성하였다. 그림 5에서 보는 것처럼 총 N 대의 발전기 중에서 $N-1$ 대



여기서, P_{ij} : i 번째 스트링에서 j 번째 발전기의 발전 출력[MW]
 $*$: 유전알고리즘 또는 진화연산의 개체를 나타내는 태그변수
 N : 총 발전기 수

그림 5 해집단 구성
Fig. 5 Configuration of population

의 발전기의 발전출력을 실 변수로 부호화하였다. 즉, $N-1$ 대의 발전기에 대한 발전출력은 적응진화 알고리즘에 의해 결정되고, 나머지 한 대의 발전기에 대한 발전출력은 총 부하를 만족하도록 결정하였다. 만일 나머지 한 대의 발전기가 최대로 발전하여도 총 부하를 만족하지 않으면 적합도 함수 평가시 벌점(penalty)을 부과하였다.

본 논문에서 제안한 적응진화 알고리즘을 이용하여 전력경제급전 문제를 해결하기 위한 과정은 아래와 같고, 전체 흐름도는 그림 6에 나타내었다.

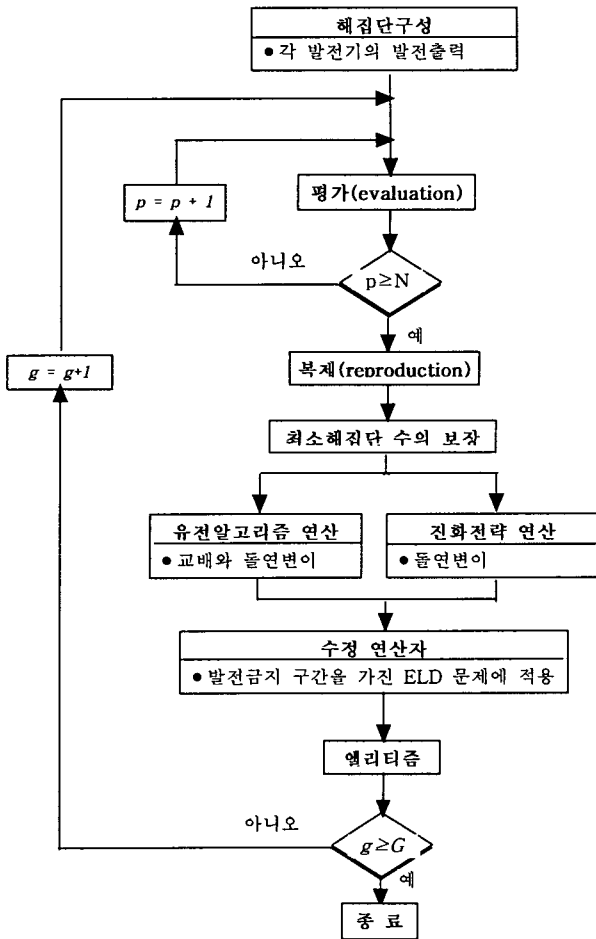
- 단계 1) 해집단 구성 : 그림 5와 같이 각 발전기의 발전출력을 이용하여 해집단을 구성하고, 각 스트링이 유전알고리즘의 개체인지 진화전략의 개체인지를 판단하기 위한 태그변수를 임의로 설정한다. 이때, i 번째 스트링에서 j 번째 발전기의 발전출력(P_{ij})은 식 (4)의 부등호 제약조건을 이용하여 랜덤하게 발생하였다.
- 단계 2) 평가 : 식 (8)의 적합도 함수를 이용하여 단계 1)에서 생성된 각 스트링을 평가한다. 식 (8)은 각 발전기의 발전 비용의 합과 벌점 항으로 구성되어 있고, 벌점 항은 적응진화 알고리즘으로 구한 $N-1$ 대의 발전기에 대한 발전출력과 나머지 한 대의 발전기에 대한 발전출력 합이 총 부하를 만족하지 못하면 벌점을 부과하였다.

$$Fitness = \frac{\alpha}{\beta + \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + Penalty} \quad (8)$$

여기서, $C_i(P_i)$: i 번째 발전기의 발전 비용
 $Penalty$: 벌점 항
 α, β : 상수

- 단계 3) 복제 : 적합도에 비례하여 복제하는 룰렛휠 방법을 사용하여 복제한 후, 태그변수가 0인 개체는 유전알고리즘의 해집단에 편입하고 1인 개체는 진화전략의 해집단에 편입한다.
- 단계 4) 최소 해집단 수의 보장 : 유전알고리즘 또는 진화전략 중 어느 하나의 역할이 우세하여 나머지 방법에 의해서 자손이 소멸되는 것을 방지하기 위해 최소 해집단 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) 수정 연산자 (repairing operator) : 발전금지 구간을 가진 전력경제급전 문제에 대해서 유전알고리즘 및 진화전략의 연산자를 실행하면, 발전금지 구간 제약조건을 만족하지 않는 해가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 해가 발전금지 구간에 존재하면 해가 발전금지 구간에 존재하면 0 또는 1의 난수를 발생시켜 발생된 난수 값이 1이면 발전금지 구간의 최대값, 0이면 발전금지 구간의 최소값으로 변경시켜 제약조건을 만족시켰다.
- 단계 7) 엘리티즘 : 적합도가 가장 높은 개체를 유전알고리즘과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하는 엘리티즘을 사용하였다.
- 단계 8) 수렴조건 : 특정한 세대수를 만족할 때까지 단계 2) ~ 단계 7)을 반복한다.



여기서, N : 해집단의 크기
 G : 특정한 세대수

그림 6 적응진화 알고리즘을 이용한 전력경제급전 문제의 흐름도

Fig. 6 A flowchart of ELD using AEA

4. 사례 연구

4.1 구분적인 2차 비용함수를 갖는 전력경제급전

본 논문에서는 제안한 적응진화 알고리즘의 유용성을 검토하기 위하여 참고문헌[1,5]에 있는 구분적인 2차 비용함수를 갖는 전력경제급전 문제에 적용하여 종래의 방법과 성능을 비교·검토하였다. 성능평가에 사용된 참고문헌[1]에서 총 발전기의 수는 10대이고, 총 부하는 2400 [MW]의 경우를 고려하였으며 송전손실은 무시하였다. 표 1은 구분적인 2차 비용함수를 가진 전력경제급전 문제에 사용된 적응진화 알고리즘의 시뮬레이션 계수를 나타내었다. 적응진화 알고리즘의 수렴조건은 총 비용이 481.72[\$/h]에 도달하면 알고리즘을 종료하였다. 적응진화 알고리즘의 성능은 참고문헌[1,5]에 있는 종래의 방법에 대해서 총 비용 및 실행시간으로 비교하였다. 그리고 적응진화 알고리즘은 같은 초기 해집단에서 시작해도 실행할 때마다 결과가 달라지므로 동일한 초기 해집단에 대해 100번씩 실행한 후 평균시간을 실행시간으로 정하였고, 성능평가에 사용된 컴퓨터는 PC 586 600[MHz]이다.

표 1 적응진화 알고리즘에 사용된 시뮬레이션 계수
 Table 1 Coefficients of simulation for AEA

방법	해집단 수	교배 확률	돌연변이 확률	표준편차		적합도 계수	
				감소율 (C_d)	증가율 (C_i)	α	β
AEA	30	0.85	0.01	0.95	1.05	20	1

그림 7은 총 부하가 2400[MW]일 때 매 세대마다의 총 발전비용과 매 세대별 유전알고리즘 및 진화전략의 개체수를 나타내었다. 그림 7(a)에서 보는 것처럼 세대가 증가함에 따라 총 비용이 감소하여 약 280세대에서 최적해인 총 발전비용이 481.72[\$/h]에 수렴함을 알 수 있다. 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 초기세대에서는 유전알고리즘의 개체수가 진화전략의 개체수보다 더 많이 나타나고, 세대수가 증가함에 따라 진화전략의 개체수가 더 많아짐을 알 수 있다. 이것은 초기세대에서는 유전 알고리즘에 의해 전역탐색을 행하고, 세대수가 증가함에 따라 진화전략에 의해 국부탐색을 적용적으로 수행함을 나타낸다. 그림 8은 같은 초기 해집단에 대해서 100번 반복했을 때 수렴조건을 만족하는 해를 구하는데 필요한 세대수를 나타내었다. 그림 8에서 보는 것처럼 최적해를 구하는데 최소 230세대에서 최대 290세대내에서 최적해를 구하였다. 또한 적응진화 알고리즘은 초기해집단에 대해서 100번 반복했을 때 100[%]로 해를 찾음을 알 수 있다.

표 2는 총 부하가 2400[MW]일 때 참고문헌[1]에 있는 종래의 방법 및 적응진화 알고리즘으로 구한 각 발전기의 발전출력, 총 발전 출력 및 총 비용을 나타내었다. 표 3은 참고문헌[1,5]의 종래의 방법과 본 논문에서 제안한 적응진화 알고리즘으로 구한 총 비용, 평균세대수, 실행시간을 나타내었다. 표 3에서 보는 것처럼 제안한 방법은 EP[5], GA[5], EP+ES[5] 및 GA+ES[5]보다 총 비용이 더 낮고, ETQ[5], EQ[5] 및 TQ[5]과 동일한 총 비용을 구함을 알 수 있다. 그리고 평균 세대수면에서 제안한 방법이 EP[5], GA[5], 및 EP+ES[5]보다 약 5~60세대 더 빨리 해를 찾

표 2 각 발전기의 발전출력 및 총 비용

Table 2 Power output of each generator and total cost

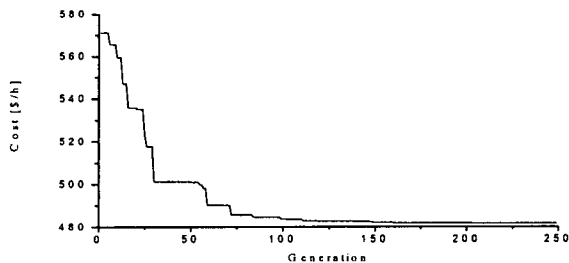
발전기 방법	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	총 발전전력 [MW]	총 비용 [\$/h]
Hierarchical method	193.2	204.1	259.1	234.3	249.0	195.5	195.5	260.1	234.3	325.3	2401.2	488.50
AEA	189.7	202.3	254.4	233.0	242.0	232.9	232.9	320.4	239.4	253.0	2400.0	481.72

표 3 총 부하가 2400[MW]일 때 종래의 방법과 제안한 방법과 비교

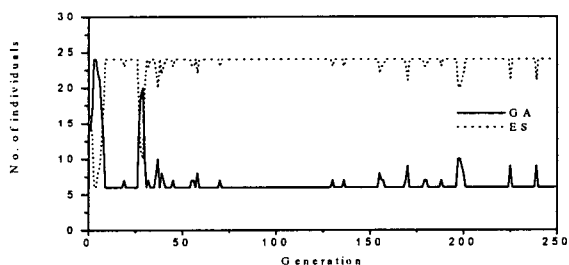
Table 3 Comparison of various methods with 100 trial test for 2400 MW load

방법 종류	AEA	ETQ[5]	EQ[5]	TQ[5]	EP[5]	GA[5]	EP+ES[5]	GA+ES[5]	Hierarchical method [1]
총 발전비용 [\$/h]	481.72	481.72	481.72	481.72	481.80	481.36	481.75	481.77	488.50
해집단 수	30	30	30	30	100	100	100	100	-
평균 세대수	279	56.2	74.9	51.1	324.8	334.4	284.2	269.1	-
실행시간 [sec]	2.79	86.3	114.8	75.1	194.7	308.7	174.6	255.8	1.08
컴퓨터 기종	PC 586 600[Mhz]								VAX 11/780

왔고, ETQ[5], EQ[5], TQ[5] 및 GA+ES[6]보다 더 많은 세대이후 최적해에 수렴하였다. 그러나 실행시간 면에서는 제안한 방법이 최적해를 찾은 ETQ[5], EQ[5] 및 TQ[5]보다 약 25배 더 빨리 최적해로 수렴하였다.



(a) 총 발전비용



(b) 적응진화 알고리즘에서의 GA, ES의 개체수

그림 7 세대별 총 발전비용[\$/h] 및 GA, ES의 개체수
Fig. 7 Total Generation Cost [\$ /h] and No. of individuals of GA, ES in each generation

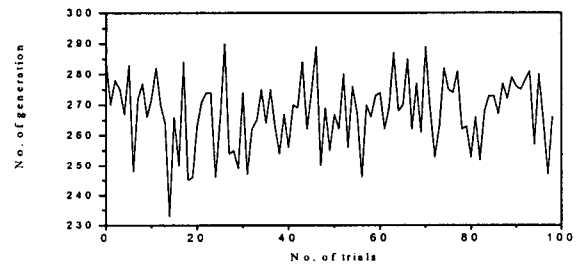


그림 8 실행횟수와 세대수의 비교
Fig. 8 Comparisons of runs versus No. of generation

4. 2 발전 금지 구간을 가진 전력경제급전 문제

본 논문에서는 제안한 적응진화 알고리즘을 발전 금지 구간을 가진 전력경제급전 문제[5]에 적용하여 기존의 방법과 성능을 비교·검토하였다. 표 4는 전력경제급전 문제에 사용된 적응진화 알고리즘의 시뮬레이션 계수를 나타내었다. 수렴조건은 앞의 구분적인 2차 비용함수를 가진 경우와 유사하게 참고문헌[9]에서 동적 계획법(Dynamic Programming(Discretization Step 1 [MW]) : DP)에 의해 구한 총 비용이 32506.2[\$/h]에 도달했을 때 알고리즘을 종료하였다. 적응진화 알고리즘의 성능은 참고문헌[5,9]에 있는 종래의 방법에 대해서 총 비용 및 실행시간으로 비교하였다. 그리고 적응진화 알고리즘은 같은 초기 해집단에서 시작해도 실행할 때마다 결과가 달라지므로 동일한 초기 해집단에 대해 100번씩 실행한 후 평균시간을 실행시간으로 정하였고, 성능평가에 사용된 컴퓨터는 PC 586 600[MHz]이다. 표 5는 각 발전기의 최소 및 최대발전출력, 2차 비용함수 및 발전 금지구간을 나타

내었다. 표 5에서 보는 바와 같이 총 발전기의 수는 15대 이고, 총 부하는 2650[MW]의 경우를 고려하였으며 송전 손실은 무시하였다. 또한 2, 5, 6, 12의 4대의 발전기가 각각 3, 3, 3, 2개의 불연속구간을 가지므로 192개(4×4×4×3)의 서로 다른 불연속의 탐색 영역을 형성하게 된다. 여기서, *Min*, *Max*은 발전기의 최소 및 최대 발전출력이고, *a*, *b*, *c*는 각 발전기의 비용계수이다.

표 4 적응진화 알고리즘에 사용된 시뮬레이션 계수
Table 4 Coefficients of simulation for AEA

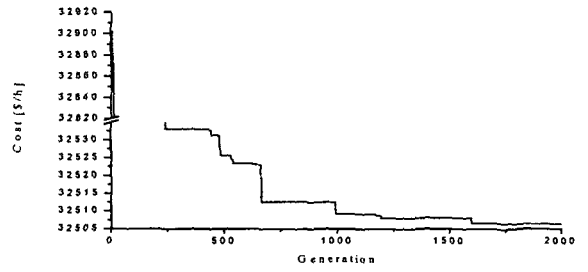
방법	해집단 수	교배 확률	돌연변이 확률	표준편차		적합도 계수	
				감소율 (C_d)	증가율 (C_i)	α	β
AEA	30	0.85	0.01	0.9995	1.035	2000	5

표 5 각 발전기의 최소 및 최대 발전출력, 2차 비용함수 계수 및 발전 금지구간

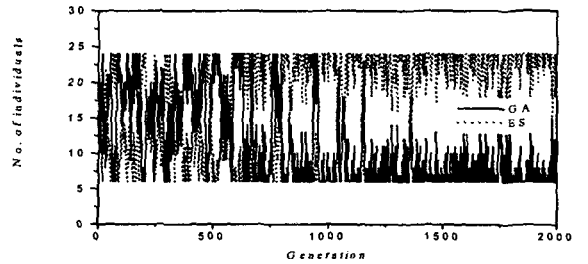
Table 5 Minimum and maximum power output, coefficients of cost function and prohibited operating zones

발전기	발전기		비용계수			발전 금지구간		
	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	영역 1	영역 2	영역 3
1	150	455	671.03	10.07	0.000299	-	-	-
2	150	455	574.54	10.22	0.000183	[185,225]	[305,335]	[420,450]
3	20	130	374.59	8.80	0.001126	-	-	-
4	20	130	374.59	8.80	0.001126	-	-	-
5	105	470	461.37	10.40	0.000205	[180,200]	[260,335]	[390,420]
6	135	460	630.14	10.10	0.000301	[230,255]	[365,395]	[430,455]
7	135	465	548.20	9.87	0.000364	-	-	-
8	60	300	227.09	11.21	0.000338	-	-	-
9	25	162	173.72	11.21	0.000807	-	-	-
10	20	160	175.95	10.72	0.001203	-	-	-
11	20	80	186.86	10.21	0.003586	-	-	-
12	20	80	230.27	9.90	0.005513	[30,55]	[65,75]	-
13	25	85	225.28	13.12	0.000371	-	-	-
14	15	55	309.30	12.12	0.001929	-	-	-
15	15	55	323.79	12.41	0.004447	-	-	-

그림 9는 총 부하가 2650[MW]일 때 매 세대마다의 총 비용과 매 세대별 유전알고리즘 및 진화전략의 개체 수를 나타내었다. 그림 9(a)에서 보는 것처럼 세대가 증가함에 따라 총 비용이 감소하여 약 1947세대에서 총 발전비용이 DP[9]과 동일한 값인 32506.2[\$/h]에 수렴함을 알 수 있다. 그림 9(b)에서 보는 바와 같이 앞의 구분적인 2차 비용함수를 가진 경우와 유사하게 초기세대에서는 유전 알고리즘에 의해 전역탐색을 행하고, 세대수가 증가함에 따라 진화전략에 의해 국부탐색을 적응적으로 수행함을 알 수 있다. 그림 10은 같은 초기 해집단에 대해서 100번 반복했을 때 수렴조건을 만족하는 해를 구하는데 필요한 세



(a) 총 발전비용



(b) 적응진화 알고리즘에서의 GA, ES의 개체수

그림 9 세대별 총 발전비용[\$/h] 및 GA, ES의 개체수
Fig. 9 Total Generation Cost [\$/h] and No. of individuals of GA, ES in each generation

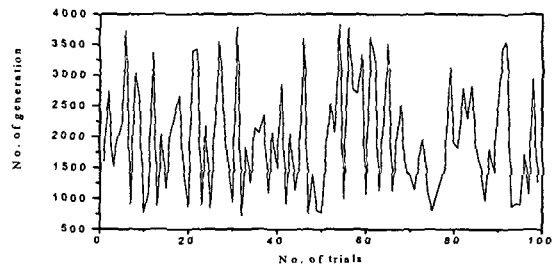


그림 10 실행횟수와 세대수의 비교
Fig. 10 Comparisons of runs versus No. of generation

대수를 나타내었다. 그림 10에서 보는 것처럼 최적해를 구하는데 최소 500세대에서 최대 3750세대 내에서 최적해를 구하였고, 제안한 알고리즘으로 발전금지 구간을 가진 전력경제급전 문제를 해결하는데 필요한 평균 세대수는 약 1947세대이고, 같은 초기해집단에 대해서 100번 반복했을 때 기존의 방법 중에서 가장 우수한 성능을 가진 DP[9] 방법으로 구한 총 발전비용과 동일한 값을 100[%]로 구함을 알 수 있다.

표 6은 참고문헌[5,9]의 종래의 방법 및 제안한 적응진화 알고리즘으로 구한 각 발전기의 발전량, 총 비용 및 실행시간을 나타내었다. 표 6에서 보는 것처럼 제안한 방법은 SGA[9], DCGA[9], ETQ[5]보다 총 비용이 더 낮은 해를 구하였고, DP[9]와 동일한 총 비용을 구함을 알 수 있다. 그리고 실행시간 면에서는 제안한 방법이 SGA[9], DCGA[9] 및 ETQ[5]보다 약 447초, 약 391초, 약 13초 정도 더 빨리 우수한 해를 구하였다.

표 6 각 발전기의 발전출력, 총 발전비용 및 계산시간
Table 6 Power output of each generator, total generation cost and computation time

발전기 \ 방법	SGA[9]	DCGA[9]	ETQ[5]	DP[9] (Discretization Step 1 [MW])	AEA
Unit 1	451.4	406.1	450.0	455.0	454.9
Unit 2	455.0	553.8	450.0	455.0	455.0
Unit 3	130.0	130.0	130.0	130.0	130.0
Unit 4	129.1	130.0	130.0	130.0	130.0
Unit 5	337.1	355.0	335.0	260.0	260.0
Unit 6	429.5	456.8	455.0	460.0	460.0
Unit 7	464.4	459.8	465.0	465.0	465.0
Unit 8	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
Unit 9	26.6	26.6	25.0	25.0	25.0
Unit 10	27.1	21.6	20.0	20.0	20.0
Unit 11	25.7	36.2	20.0	60.0	60.0
Unit 12	59.0	59.0	55.0	75.0	75.0
Unit 13	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
Unit 14	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
Unit 15	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
총 발전전력 [MW]	2649.9	2646.9	2650.0	2650.0	2650.0
총 비용 [\$ /h]	32517	32515	32507.5	32506.2	32506.2
계산시간 [sec]	454.3	398.5	15.8	-	2.7

5. 결 론

본 논문에서는 유전알고리즘의 전역탐색능력과 진화전략의 국부탐색능력을 적용적으로 이용하는 적응진화 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해서 국부 최소값을 갖는 구분적인 2차 비용함수 및 발전 금지 구간을 가진 전력경제급전 문제에 적용하였다. 사례 연구 결과, 구분적인 2차 비용함수를 가진 전력경제급전 문제에 대해서 제안한 방법이 EP[5], GA[5], EP+ES[5] 및 GA+ES[5]보다 총 비용이 더 낮은 해를 구하였고, 실행시간면에서 ETQ[5], EQ[5] 및 TQ[5]보다 약 25배 더 빨리 최적해를 찾았다. 발전 금지 구간이 존재하는 전력경제급전 문제에 대해서는 제안한 방법이 DP[9]과 동일한 해를 구하였고, SGA[9], DCGA[9] 및 ETQ[5]보다 약 13~447초 정도 더 빨리 우수한 해를 찾음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

[1] C.E. Lin and G. L. Viviani, "Hierarchical Economic Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Functions", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-103, no. 6, pp. 1170-1175, June 1984
 [2] J. H Park, Y. S. Kim and K. Y. Lee, "Economic Load Dispatch for Piecewise Quadratic Cost Function Using Hopfield Neural Network", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 8, no. 3, Aug., 1993, pp. 1030-1038
 [3] Fred N. Lee, Artur M. Breipohl, "Reserve Constrained Economic Dispatch with Prohibited Operating Zones", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 8, no. 1, Feb., 1993, pp. 1030-1038
 [4] J. Y. Fan and J. D. McDonald, "A Practical Approach to

Real Time Economic Dispatch considering Unit's Prohibited Operating Zones", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 4, pp. 1737-1743, Nov, 1994
 [5] Whei-Min Lin, Fu-Sheng Cheng, Ming-Tong Tsay, "Non-convex Economic Dispatch by Integrated Artificial Intelligence", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 2, pp. 307-311, May, 2001
 [6] J. H. Park, S. O. Yang, K. J. Mun, "An application of Evolutionary Computations to Economic Dispatch with Piecewise Quadratic Cost Functions", International Conference on Evolutionary Computation, pp. 289-294, 1998
 [7] K. Y. Lee and F. F. Yang, "Optimal Reactive Power Planning Using Evolutionary Algorithms: A Comparative Study for Evolutionary Programming, Evolutionary Strategy, Genetic Algorithm, and Linear Programming", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 101-108, Feb., 1998
 [8] S. O. Yang, K. J. Mun, H. S. Lee and J. H. Park, "Economic Load Dispatch with Piecewise Quadratic Cost Function Using Evolutionary Computations", Journal of Electrical Engineering and Information Science, Vol. 3, NO. 5, Oct., 1998
 [9] S. O. Orero, M. R. Irving, "Economic Dispatch of Generators with Prohibited Operating Zones: A Genetic Algorithm Approach", IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., vol. 143, no. 6, pp. 529-533, Nov, 1996
 [10] D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Edison-Wesley publishing Company, INC., 1989
 [11] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, 1992
 [12] Mitsuo Gen and R. Cheng, Genetic Algorithm & Engineering Design, A Wiley-Interscience Publication, 1997
 [13] 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

저 자 소 개

문 경 준 (文景俊)
전기학회논문지 제 50A권 제 2호 참조
 황 기 현 (黃琪鉉)
전기학회논문지 제 50A권 제 5호 참조
 박 준 호 (朴俊瀾)
전기학회논문지 제 50A권 제 2호 참조