

### 구분적인 이차 비용함수를 가진 경제급전 문제에 적응진화연산 적용

문경준\* · 황기현\* · 김형수\* · 박준호\*\* · 정정원\*\*\*

\* 부산대학교 전기공학과 박사과정 \*\* 부산대학교 전기공학과 교수 \*\*\* 경성대학교 전기공학과 부교수

#### Adaptive Evolutionary Computation to Economic Load Dispatch Problem with Piecewise Quadratic Cost Function

K. J. Mun\* · G. H. Hwang\* · H. S. Kim\* · J. H. Park\* · J. W. Jung\*\*

\*Dept. of Electrical Eng. Pusan Nat'l Univ. \*\* Dept. of Electrical Eng. Kyungsung Univ.

**Abstract** - In this study, an adaptive evolutionary computation (AEC), which uses adaptively a genetic algorithm having global searching capability and an evolution strategy having local searching capability with different methodologies, is suggested. This paper develops AEC for solving ELD problem with piecewise quadratic cost function.

Numerical results show that the proposed AEC can provide accurate dispatch solutions within reasonable time for the ELD problem with piecewise quadratic cost function.

### 1. 서 론

진화연산의 성능은 해집단의 크기, 적합도 계산 방법, 교배 및 돌연변이 확률 등의 파라미터에 영향을 크게 받는다. 이런 파라미터들을 적절히 선정하지 못하면 실행시간이 아주 길어지거나 국부최소값으로 조기수렴하는 경우가 발생한다. 이런 문제점을 해결하기 위해, 유전알고리즘에서는 적합도에 따라 교배 및 돌연변이 확률을 변화시키는 방법(1)과 매 세대마다 해집단의 크기를 변화시키는 방법이 제안되었고(3), 진화전략 및 진화프로그래밍에서는 국부최소값에 조기수렴하지 않기 위해 정규난수 발생시 표준편차를 조정하는 방법이 제안되었다(2). 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 적응알고리즘(adaptive algorithm)이라고 한다(1-3).

기존의 적응알고리즘은 해집단의 크기, 교배 및 돌연변이 확률과 교배방법 등의 파라미터와 연산자들을 적응적으로 변경시키거나 정규난수에서 표준편차를 적응적으로 변경시켰다. 본 논문에서는 종래의 진화연산의 문제점을 개선하여 최적해를 빠른 시간 내에 정확하게 찾기 위해서 유전알고리즘의 전역 탐색능력과 진화전략의 국부탐색능력을 적응적으로 이용하는 적응진화연산 알고리즘을 개발하였다. 개발한 적응진화연산을 구분적인 이차비용함수를 가진 경제급전 문제에 적용하였다.

경제급전 문제에서 최적해를 구하기 위한 종래의 수치해석적인 방법은 각 발전소의 비용함수를 미분 가능한 이차함수로 근사화하여 해를 구하고 있다. 그러나 각 발전소의 실제 비용함수는 벨브의 개폐 또는 연료의 변화에 따라 불연속성 함수로 표현된다. 구분적인 이차비용함수를 가진 경제급전 문제를 해결하기 위해서 종래에는 수치해석적 방법이 많이 사용되었으나 알고리즘이 매우 복잡하며 국부최소값으로 수렴할 수 있다는 단점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 국부 최소값을 갖는 구분적인 이차비용함수를 가진 경제급전문제에 제안한 방법을 적용하여 최적해를 구한 후, 이를 종래의 수치해석적인 방법 및 유전알고리즘, 진화연산만을 실행한 결과와 비교·분석하였다. 그 결과, 제안한 방법이 종래의 방법보다 계산시간이 적게 소요되었고 수렴조건과 총비용면에서 더 좋은 해를 구함을 알 수 있었다.

### 2. 적응진화연산

본 논문에서 제안한 적응진화연산은 한 세대에서 다음 세대로 진화시킬 때, 유전알고리즘과 진화전략을 동시에 적용하고, 세대의 진행과정에서 유리한 진화연산기법이 다음 세대의 해집단을 형성하는데 우위에 있도록 하였다. 본 논문에서 실변수형 코딩 방식의 유전알고리즘을 사용하였으며, 진화전략은 Schwefel이 제안한 방법 중에서 부모해집단으로부터 자손해집단을 생성한 후 부모는 모두 제거되고 자손해집단을 다음 세대의 부모해집단으로 선택하는 방법을 사용하였으며, 표준편차를 세대별로 변화시키는 방법(2)을 적용하였다.

#### 2.1 적응진화연산의 개요

본 논문에서 제안한 적응진화연산의 구성도는 그림 1과 같다. 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)을 사용하여 적합도에 따라 복제한다. 복제된 개체는 태그변수에 따라 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단을 분리한 후, 유

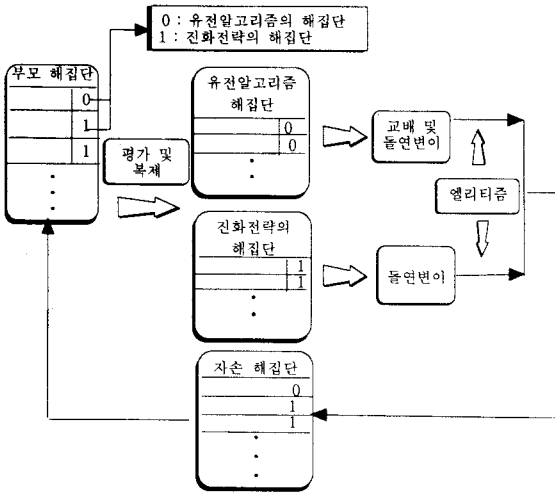


그림 1 적응진화연산의 구성도

진화알고리즘의 해집단에 대해 교배 및 돌연변이를 수행하고, 진화전략의 해집단에 대해 돌연변이를 수행한다. 이때 부모해집단에서 적합도가 가장 높은 개체는 유전알고리즘의 해집단과 진화전략의 해집단에 각각 하나씩 복제하는 엘리트리즘을 사용하였다.

## 2.2 구분적인 이차비용함수를 가진 전력경제급전

실제 발전기의 비용함수는 벨브의 개폐 또는 연료의 변화에 따른 불연속성을 가진다. 따라서 실제 비용함수를 이차함수로 모델링하면 오차가 크기 때문에 구분적인 이차함수로 모델링하는 것이 바람직하며, 이를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

여기서,  $C$  : 총비용[\$/h]  
 $C_i(P_i)$  :  $i$  발전기의 비용  
 $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}$  :  $i$  발전기의  $j$ 구간 비용계수  
 $P_i$  :  $i$  발전기의 발전출력[MW]  
 $N$  : 발전기수

이와 같이 구분적인 이차비용함수를 가지는 경제급전문제에 기존의 수치해석적 방법을 적용할 경우에는 복잡한 알고리즘이 필요하며 국부최소값에 빠지기 쉬운 단점이 있다.

## 2.3 적응진화연산에 의한 전력경제급전

적응진화연산을 전력경제급전문제에 적용하기 위한 해집단은 각 발전기의 발전출력을 나타내며 실변수형으로 부호화하였다. 본 논문에서는 총 발전기수는 10대이며 적응진화연산의 부호화시의 파라메타의 수는 9개로 설정하였다. 즉 9대의 발전기에 대한 발전출력은 적응진화연산에 의해 결정된 후, 나머지만 대의 발전기에 대한 발전출력은 총부하를 만족하도록 설정하였다. 그리고 스트링을 평가하기 위하여 사용된 적합도 함수는 총 발전비용  $C$ 가 최소화되면 적합도가 커지도록 식 (2)와 같이 설정하였다.

$$Fitness = \frac{\alpha}{\beta + C} \quad (2)$$

여기서  $C$  : 총발전비용 ( $C = \sum_{i=1}^N C_i(P_i)$ )

또한, 복제방법으로는 룰렛휠, 교배 및 돌연변이 방법으로는 변경된 단순교배(modified simple crossover)와 균일 돌연변이(uniform mutation)을 사용하였다. 예를 들면,  $t$ 세대에서 두 개의 스트링  $S^t = [v_1, \dots, v_N]$  와  $S^t = [w_1, \dots, w_N]$ 에 대한 교배 결과는 (2)~(3), 돌연변이 결과는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$S_v^{t+1} = [v_1, \dots, v_k, v_{k+1}, \dots, v_N] \quad (2)$$

$$S_w^{t+1} = [w_1, \dots, w_k, w_{k+1}, \dots, w_N] \quad (3)$$

여기서,  $v_j = \alpha_1 \times v_j + \alpha_2 \times w_j$

$$w_j = \alpha_1 \times w_j + \alpha_2 \times v_j$$

$\alpha_1, \alpha_2$  : 0과 1사이의 임의수

$v_j, w_j$  : 각 변수의 상한치와 하한치 사이값

$N$  : 각 스트링의 변수의 개수

$$S_v^{t+1} = [v_1, \dots, v_k, v_{k+1}, \dots, v_N] \quad (4)$$

여기서  $v_k$  :  $k$ 번째 파라미터의 상한치와 하한치 사이의 임의수

## 3. 사례 연구

본 논문에서는 참고문헌 [4]에서 사용한 발전기의 비용함수에 대해 적응진화연산을 적용하였으며, 이를 유전알고리즘, 진화전략만을 적용한 결과와 비교하였다. 이때 유전알고리즘, 진화전략 및 적응진화연산의 시물레이션 계수는 표 1과 같다.

그림 2는 유전알고리즘, 진화전략 및 적응진화연산을 적용한 경우, 매 세대별로 발전비용을 나타내었다. 그림 3은 각 경우에 대한 적합도를 나타내었다. 표 2에서는 수치해석적 방법과 제안된 알고리즘에 의해 구한 각 발전기의 발전출력 및 실행시간을 나타내었다. 그림 2-그림 3에서 보는 바와 같이, 제안한 알고리즘이 종래의 수치해석적인 방법보다 비용면에서 더 빠른 시간에 좋은 해를 구하였다.

표 1 적응진화연산에 사용된 파라미터

| 적용방법     | GA   | ES   | AEC  |
|----------|------|------|------|
| 해집단 수    | 100  | 100  | 100  |
| 교배확률     | 0.85 | -    | 0.85 |
| 돌연변이 확률  | 0.01 | -    | 0.01 |
| $\alpha$ | 20   | 20   | 20   |
| $\beta$  | 1    | 1    | 1    |
| $\delta$ | -    | 0.5  | 0.5  |
| $c_d$    | -    | 0.85 | 0.85 |
| $c_i$    | -    | 1.15 | 1.15 |

그림 3에서는 적응진화연산 실행시 매세대마다의 유전알고리즘 및 진화전략의 개체수를 나타내었다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 초기 세대에서는 유전알고리즘에 의한 전역탐색을 행한후 일정세대후 진화전략에 의한 개체수가 증가함을 알 수 있다.

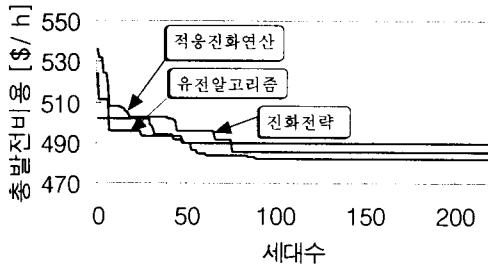


그림 1 각 진화연산에 의한 발전비용

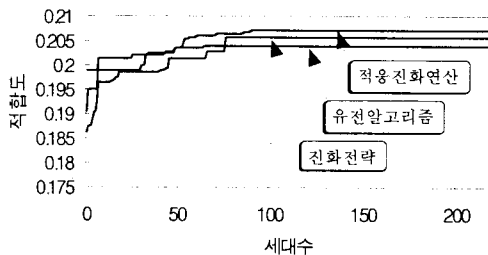


그림 2 각 진화연산에 의한 세대별 적합도

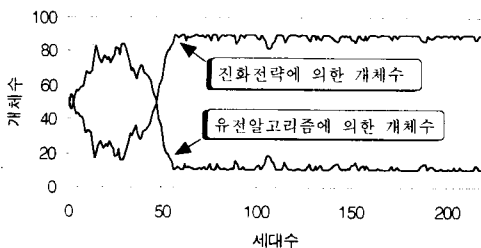


그림 3 유전알고리즘 및 진화전략의 개체수

표 2 수치해석적 방법과 제안된 알고리즘에 의한 각 발전기의 발전출력 및 실행시간

| Unit                    | methods | hierarc-hical method | GA            | ES      | AEC     |
|-------------------------|---------|----------------------|---------------|---------|---------|
| Unit 1                  |         | 193.2                | 197.983       | 189.783 | 189.99  |
| Unit 2                  |         | 204.1                | 211.592       | 202.441 | 202.352 |
| Unit 3                  |         | 259.1                | 252.589       | 464.626 | 204.745 |
| Unit 4                  |         | 234.3                | 239.725       | 233.014 | 232.98  |
| Unit 5                  |         | 249.0                | 249.731       | 241.795 | 241.82  |
| Unit 6                  |         | 195.5                | 239.61        | 233.008 | 233.101 |
| Unit 7                  |         | 195.5                | 274.117       | 253.695 | 253.195 |
| Unit 8                  |         | 260.1                | 214.446       | 233.053 | 233.133 |
| Unit 9                  |         | 234.3                | 317.288       | 320.224 | 320.27  |
| Unit 10                 |         | 325.3                | 219.876       | 239.147 | 239.52  |
| Total power (MW)        |         | 2401.2               | 2400.0        | 2400.0  | 2400.0  |
| Total cost (\$/h)       |         | 488.50               | 486.219       | 481.723 | 481.723 |
| computation time (sec.) |         | 1.08                 | 3.35          | 5.55    | 2.86    |
|                         |         | VAX 11/780           | PC 586 DX-500 |         |         |

#### 4. 결론

본 논문에서는 유전알고리즘의 전역탐색능력과 진화전략의 국부탐색능력을 적응적으로 이용하는 적응진화연산 알고리즘을 개발하였다. 개발한 적응진화연산을 구분적인 이차비용함수를 가진 전력경제급전 문제에 적용하였다.

제안한 방법의 유용성을 입증하기 위해서 본 논문에서는 국부 최소값을 갖는 구분적인 이차비용함수를 가진 경제급전문제에 적응진화연산을 적용하여 최적해를 구한 후, 이를 종래의 수치해석적인 방법 및 유전알고리즘, 진화연산만을 실행한 결과와 비교·분석하였다. 그 결과, 제안한 방법이 종래의 방법보다 계산시간이 적게 소요되었고, 총비용면에서 더 좋은 해를 구함을 알 수 있었다.

#### 참고 문헌

- [1] 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
- [2] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms+Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, 1992
- [3] Robert Hinterding, "Gaussian Mutation and Self-adaption for Numeric Genetic Algorithms", IEEE International Conf. on Evolutionary Computation, 1995
- [4] 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.