

## 전력계통의 환경적·경제적운용을 위한 진화기법의 응용

이원주<sup>°</sup>, 박창주<sup>·</sup>, 김규호<sup>·</sup>, 유석구<sup>·</sup>

<sup>°</sup> 한양대학교, <sup>·</sup> 안산공업전문대학

### Optimal Environmental and Economic Operation using Evolution St

Lee Won-Ju<sup>°</sup>, Park Chang-joo<sup>·</sup>, Kim Kyu-Ho<sup>·</sup>, You Seok-ku<sup>·</sup>

<sup>°</sup>Han-Yang Univ., <sup>·</sup>Ansan Tech. College

**Abstract** - This paper presents an effective methodology of optimal environmental and economic operation using evolution strategy. In power systems, evolution strategy, based on natural selection and genetics, can analyze non-linear and discontinuous functions in global search techniques. The formulation using this search techniques is multi-objective function, which consists of fuel cost and environmental effects concerning the pollution of the Earth's atmosphere caused by the emission of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from thermal generator plants. The proposed algorithms are applied on system with 6 generator.

#### 1. 서 론

최근 전기에너지 산업이 발달함에 따른 환경적 공해문제가 발생됨에 따라 발전소로부터의 공해를 줄이고자 하는 여러 가지 형태의 시도가 있었으며, 이러한 환경문제에 관심이 고조됨에 따라 여러 가지 방법들이 제안되고 새로운 방법들이 제시되었다.

기존의 경제급전은 단순히 발전비용의 최소화만을 목적으로 하였지만, 이제는 환경적인 영향을 고려하지 않을 수 없다. 환경적 문제를 야기시키는 오염물질의 배출량을 줄이는 방법으로는 첫째 공해배출량이 적은 연료로 대체하거나 연료혼합법을 달리하는 방법이 있고, 둘째 오염물질을 걸러내는 정화장치를 설치하는 법이 있으며, 셋째 발전소의 전력생산을 환경적인 요인을 고려하여 부하배분을 하는 방법등이 있다[1]. 이들중에는 SO<sub>2</sub> 배출량수만을 고려하여 연료비함수에 비례한 목적함수로 구성하여 경제급전문제와 같은 방법으로 배분하거나 이를 방출허용치 미만으로 제약조건을 만들어 배분한 방법이 있다. 또는 NO<sub>x</sub> 배출량수만을 고려하여 연료비함수와는 상관없이 비선형적인 지수함수를 정식화하여 2차 목적함수로 만들어 배분한 방법이 제시되었다.

본 연구는 전력계통의 최적 환경 및 경제운용을 위하여 진화기법을 이용한 방법을 제시하였다. 최적 환경 및 경제운용을 하는데 있어서, 목적함수로는 화력발전소의 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>의 환경적인 영향을 고려한 다중목적함수로 정식화하였다.

#### 2 최적환경 및 경제운용

#### 2.1 최적환경 및 경제운용을 위한 정식화

전력계통의 최적 환경 및 경제운용을 위하여 경제적인과 환경적요인을 고려한 다중목적함수를 이용한 경제적 부하배분(Economic Load Dispatch) 방안을 다음과 같이 구성한다. 경제적 요인으로는 발전비용최소화로 기존의 경제부하배분문제를, 환경적인 요인으로는 화력발전소로부터 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>의 방출로 인한 대기오염문제를 고려한 경제적인 부하배분을 한다. 최적화 방안으로는 진화연산의 종류인 진화기법을 이용하였다.

#### 경제적 요인(ELD)

$$\text{Min } C_T = \sum_{j=1}^N C_j(P_j) \quad (1)$$

$$H_j(P_j) = (a + bP_j + cP_j^2)$$

$$C_j(P_j) = fc \cdot H(P_j)$$

여기서 H<sub>j</sub>(•) 연료소비함수

C<sub>j</sub>(•) 연료비용함수

fc 연료단가

N 화력 발전기의 수

#### 환경적 요인(EED)

EED(Economic-Environmental Dispatch)는 경제급전 문제에 있어서 환경적인 문제를 목적함수 또는 제약조건으로 포함시켜 발전량을 경제적으로 배분하는 과정을 말한다.

$$\text{Min } E_T = X \sum_{j=1}^N E_{j,NO}(P_j) + (1-X) \sum_{j=1}^N E_{j,SO}(P_j) \quad (2)$$

$$SO_2 : E_{j,SO}(P_j) = e_{SO} \cdot H(P_j)$$

$$NO_x : E_{j,NO}(P_j) = e_{NO} \cdot H(P_j)$$

여기서 e<sub>SO</sub> SO<sub>2</sub>배출량상수

e<sub>NO</sub> NO<sub>x</sub>배출량상수

X SO<sub>2</sub>배출량의 가중치

1-X NO<sub>x</sub>배출량의 가중치

#### 가중치 법(Weight Method)

경제적 환경적 목적함수를 모두 총연료비와 배출량의 함수로 나타내었다. 송전손실을 무시할 경우, 환경비용이라는 개념을 사용하여 배출량을 비용으로 환산하여서 이를 가중치를 가지는 목적함수로 최적화하여 다음과 같이 결합될 수 있다 [2].

$$\text{Min } F = WC_T + (1-W)E_T \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^N P_j = P_D \quad (\text{전력수급 제약})$$

s.t.  $P_{i, \min} < P_i < P_{i, \max}$  (발전출력상하한 제약)  
 여기서  $W$  총연료비의 가중치  
 $1-W$  총배출량의 가중치

## 2.2 환경적, 경제적 운동을 위한 진화기법의 응용

진화기법은 정규분포에 의해 돌연변이를 하고 자식개체와 부모개체를 동시에 경쟁시키는 방법을 취함으로써 전역적인 최적해를 찾을 수 있다[3,4]. 함수  $f(p_n), \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 을 최소화할 경우, 진화기법 알고리즘의 다음과 같다[5].

### step 1. 데이터 입력

발전기 상수, 배출량 상수 등 데이터를 입력받는다.

### step 2. 벡터 표현

$p_n$ 는 해집단의 총 개체수  $N$ 개중  $n$ 번째 개체로서, 결정되어야 할 변수, 즉 유전자의 수가  $M$ 개일때  $p_n$ 은  $M$ -차원 벡터이다.

### step 3. 초기화

계통운영자가 운전하고자 하는 특성에 따라 변수들과 가중치 상수를 초기화한다. 초기세대 각 개체  $p_n$ 의 유전자는 각 변수의 상하한치 내에서 랜덤하게 발생시킨다. 초기세대 개체의 분포는 균일한 특성을 갖는다.

### step 4. 환경비용의 초기화

환경비용은 0으로 초기화한다. (최적경제 배분)

### step 5. 교차 및 돌연변이 과정

부모  $p_n$ 에 평균이 영이고 표준편차가  $\sigma_n, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 인 가우스확률 분포를 갖는 난수를 사용하여 자식  $\hat{p}_n, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 을 생성한다.  $\hat{p}_n$ 의 표현식은 다음과 같다.

$$\hat{p}_n = p_n + \alpha \cdot \sigma_n \cdot z \cdot k(z) \quad (4)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\beta_n / F(p_n) + \gamma_n}$$

이때 적합도  $F(p_n)$ 은 목적함수 값의 역수이며 표준 편차  $\sigma_n$ 는 파라미터  $\beta_n$ 과  $\gamma_n$ 에 의하여 선형변형된 목적함수의 제곱근이다. 각 열색체에 상응하여  $\sigma_n$ 이 변화할 수 있도록  $\beta_n$ 과  $\gamma_n$ 을 정해준다.  $\alpha$ 는 크기조정 파라미터 (scaling factor)이다.  $z$ 는 아래와 같은 가우스 정규확률 분포를 갖는 난수이다.

$$d(z) = 1/\sqrt{2\pi} \exp(-z^2) \quad (5)$$

$$k(z) = \begin{cases} \cos 2\pi z & i = 1 \\ \sin 2\pi z & i = -1 \end{cases} \text{이며, } i = (-1)^k$$

$k = 0, 1, 2, \dots$  (random 성향을 가지게 하는 변수)

이 때 돌연변이와 교차에 의해 생성된 자식개체들은 부모개체들과 함께 임시개체군  $s_t \equiv p_n \cup \hat{p}_n, \forall t \in \{1, 2, \dots, 2N\}$ 을 형성한다. 이러한 임시개체군은 competing pool이라 불린다.

### step 6. 경쟁과 선택

모든  $2N$ 개, 즉 competing pool의 개체들 사이에서 각각의 해에 대하여 10개의 무작위 추출된 상대가 동등한 가능성으로 모든 부모들과 자손들 사이에서 선택된다. 각각의 비교에서 조건 해가 적어도 무작위로 추출된 상대만큼 좋은 적합도를 갖는다면 그것은 승을 받는다. 가장 많은 승을 가진  $p_n, \hat{p}_n, \forall n \in \{1, \dots, N\}$ 중에서 다음 세대의 부모들이 되기 위해서  $N$ 개의 해로 선택된다.

### step 7. 적합도 평가와 수렴 판정

다중목적함수의 적합도를 평가하여 최적값을 가지는 세대이면 환경비용을 증가시키고 step 5로 간다. 최적값이

아니면 환경비용의 변화없이 step 5로 가서 다시 전력을 재분배한다. 이 과정을 분석하고자 하는 환경비용의 범위까지 적용한다. 또 대기오염물질의 가중치를 조정하고자 한다면 step 3으로 가서 다시 전력재분배를 한다.

## 3. 사례연구

본 연구에서는 진화기법을 환경적인 목적함수를 가지는 경제급전문제에 적용하고, 그 효용성을 입증하기 위하여 다음과 같은 총수요 5000MW의 6기 화력발전소의 모델 계통에 적용하였다.

표1 시험계통의 연료비상수와 배출량상수

Unit	fuel	$P_{\max}$ (MW)	$P_{\min}$ (MW)	fuel cost (\$/GJ)	Heat Rate Curve (GJ/MW)		Emission Coefficients (kg/GJ)	
					$b_j$	$c_j$	(SO <sub>2</sub> ) $e_{SO_2}$	(NO <sub>x</sub> ) $e_{NO_x}$
1	Coal	1000	300	1.42	10.5343	0.000064	1.214	0.352
2	Coal	1000	300	1.71	10.5343	0.000064	0.543	0.062
3	Oil steam	1000	300	2.56	10.1887	0.000797	0.447	0.116
4	Oil steam	1000	300	2.89	10.1887	0.000797	0.331	0.079
5	Gas steam	1000	300	2.61	8.54642	0.000996	0.0	0.111
6	Gas steam	500	150	2.61	8.54642	0.000996	0.0	0.111

진화기법적용시 개체는 50개이며 세대수는 적합도의 변화가 없을 때까지 실행하였다. 또 페널티법을 썼으며 이에 따라 발생한 후반부의 잉여분(mismatch)은 람다 반복법을 써서 각발전기로 재분배하여 그 정확성을 도모하였다.

발전비용을 최소화 하는 경제급전(ELD)과 오염물질(SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>)의 배출량을 최소화 하는 최소배출량급전(MED)은 다음과 같다.

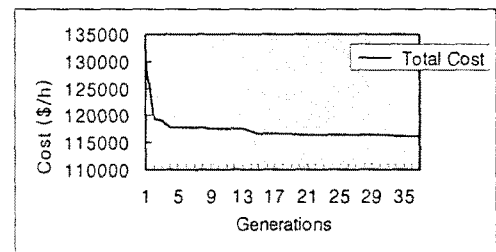


그림 1 최소연료비 전력배분

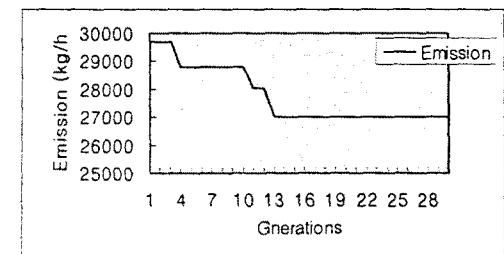


그림 2 최소배출량 전력배분

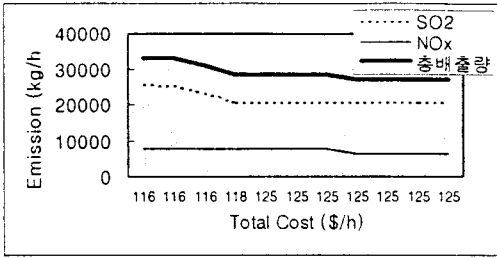


그림 3 연료비와 오염물질과의 관계

위의 그림으로부터 총수요가 같은 상황에서 총배출량을 18.4% 감소시켰지만 이에 따라 연료비가 7.6% 증가하는 trade-off 관계를 보여주고 있다. 이 모델계통에서는 SO<sub>2</sub>의 경우에는 18.6% 정도 감량이 되고 NO<sub>x</sub>의 경우에는 18.1% 감량이 되어 시험계통에서는 최종적으로 SO<sub>2</sub>의 경우가 약간 저감효과가 약간 큰 것을 알 수 있다. 하지만 NO<sub>x</sub>의 경우에는 초반에 환경비용에 따른 저감량이 적기 때문에 NO<sub>x</sub>의 배출량 감소는 SO<sub>2</sub>와는 다르게 초반의 배출량 감량에는 불이익을 가져올 수도 있다. 전체적인 배출량은 14.4%가 감소함을 알 수 있다. 다음은 가중치법을 사용하여 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub>의 감량 중요치를 고려하여 결정하기 위한 곡선이다.

그림 4와 그림 5는 환경비용을 증가시키며 따라 오염물질들의 가중치에 따라 연료비와 SO<sub>2</sub>의 배출량 저감을 살펴본 그림이다.

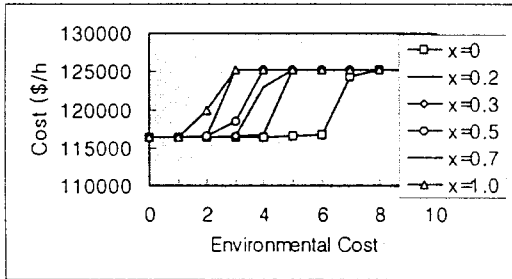


그림 4 환경비용이 증가함에 따라 총연료비의 가중치에 따른 변화

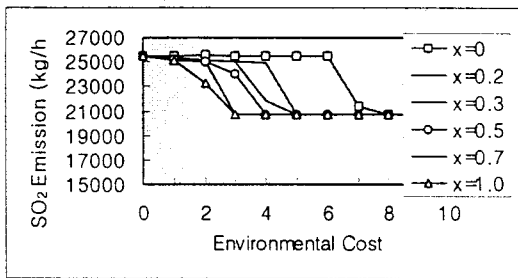


그림 5 환경비용이 증가함에 따라 SO<sub>2</sub> 배출량의 가중치에 따른 변화

그림 6은 부하요구치가 변할 때에 방출량과 총연료비와의 상관 관계이다. 여기서 4000MW(100%)을 기준부하로 잡고 이에 따라 중부하시 5000MW(125%) 경부하시 3000MW (75%)시의 환경적, 경제적 운용곡선을 나타냈다.

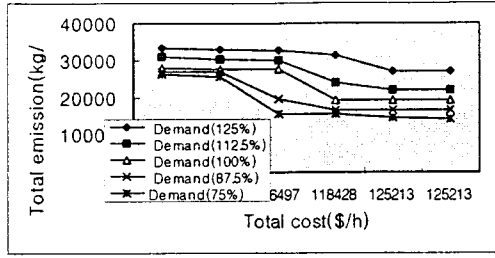


그림 6 전력요구량이 변함에 따라 방출량과 총연료비의 변화

#### 4. 결 론

본 연구에서는 환경적, 경제적 운용을 위해 진화기법을 응용하여 최적운용문제를 푸는 방법을 제시하였다. 목적함수는 연료비함수와 오염물질들의 배출량함수와와의 가중합을 이용하여 정식화하였으며 이 둘간의 상호 trade-off 관계를 설명할 수 있었다. 환경적인 영향이 고려되어 다양한 제약조건과 목적함수가 복잡하게 정식화될 때 진화기법은 그 목적함수의 특성을 고려하면 효과적인 최적화수단이 될 것이다. 또한 이러한 분석은 전력계통의 운용자에게 여러 가지 목적함수를 가지는 문제에서 보다 더 유용한 정보를 제공할 수 있다.

향후 진화기법후반부의 수렴속도 저하를 막기위해 국부적이지만 정확한 특성을 갖는 신경망이론을 결합하여 전역적이고도 정확한 최적해를 탐색하는 2단계 탐색방안의 개발이 필요하다고 사료된다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] J.H.Talaq, Ferial and M.E. El-Hawary. "A summary of environmental/economic dispatch algorithms", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No.3 August 1992.
- [2] Terje Gjengedai, Stale Johnsen, Oddbjorn Hansen, "A qualitative approach to economic environmental dispatch treatment of multiple pollutants", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No.3 September 1992.
- [3] Thomas Back, Gunter Rudolph, Hans-Paul Schwefel, "Evolutionary Programming and Evolution Strategies: similarities and differences", proceedings of the Second Annual Conference on Evolutionary Programming, 1993.
- [4] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", Second Edition, Springer Verlag, 1992
- [5] 유석구, 박창주, 김규호, 이재규, "진화연산을 이용한 대규모 전력계통의 최적화 방안" 대한전기학회 하계학술대회 B권 pp 714-716, 1996.7