유전 알고리즘을 이용한 대규모의 발전기 기동정지계획에 관한 연구

*김 형 수, *문 경 준, *황 기 현, *박 준 호, ** 정 정 원 *** 김 성 학
* 부산대학교 전기공학과 ** 경성대학교 전기공학과 *** 한국전력공사

A Study on Large Scale Unit Commitment Using Genetic Algorithm

*H. S. Kim, *K. J. Mun, *G. H. Hwang, *J. H. Park, **J. W. Jung *** S. H. Kim
Department of Electrical Engineering, *Pusan National University

Abstract - This paper proposes a unit commitment scheduling method based on hybrid genetic algorithm(GA). When the systems are scaled up, conventional genetic algorithms suffer from computational time limitations because of the growth of the search space. So greatly reduce the search space of the GA and to efficiently deal with the constraints of the problem, priority list unit ordering scheme are incorporated as the initial solution and the minimum up and down time constraints of the units are included. The violations of other constraints are handled by integrating penalty factors. To show the effectiveness of the proposed method, test results for system of 10 units is compared with results obtained using other methods.

1. 서 론

UC(unit commitment) 문제는 다양한 제약조건과 운용비용 등을 고려하여 단기 발전운용계획을 세우기 위해서 발전기의 조합을 결정하는 문제이다. 최근에는 전력 수요가 급증하여 전력계통은 복잡화, 거대화되었고 이에 따라 제반조건을 충분히 고려한 경제적 운용방법의 필요성이 더욱 높아졌다. 이러한 문제를 해결하기 위해 종래에는 dynamic programming, Largrangian Relaxation, simulated annealing 등이 제안[1-3] 되었으나 계산시간이 많이 소요되거나 국부최소값에 수렴하는 문제점을 가지고 있다.

근래에는 확률적인 최적점 탐색방법인 유전알고리즘[4]이 사용되어 비교적 좋은 결과를 얻고 있다. 이러한 방법은 해집단을 이용한 확률적 탐색 방법이며 발전기의 기동 및 정지상태를 모의함으로써 제약조건을 고려하기가 용이하다. 그러나 역시 계통이 커짐에 따라 탐색영역이 기하급수적으로 늘어나 최적해를 찾기가 어려우며 탐색시간이 증가하게 되는 문제점이 있다.

본 논문에서는 유전알고리즘의 전역적 탐색기법을 이용하면서 특히, 대규모 발전기 계통에서의 효율적 탐색을 위해 우선순위법 및 탐색영역 제한방법을 도입하였다. 사례연구를 통하여 제안한 방법의 유용성을 입증하였고, 그 성능을 비교, 검토하였다.

2. 발전기 기동정지계획(UC) 문제

UC 문제의 목적은 일간 또는 수일간의 발전계획을 수립하기 위한 대상 발전기의 조합을 결정하여 총 발전비용을 최소화하는 것이다. 총 발전비용은 식 (1)과 같이 연료 비용, 기동비용, 정지 비용으로 구성된다.

$$F_T = \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N} FC_{i,t} + SC_{i,t} + SD_{i,t} \quad (1)$$

여기서, $FC_{i,t}$: t 시간, i 발전기의 연료비용

$SC_{i,j}$: 기동비용

$SD_{i,j}$: 정지비용

연료비용은 열 소비율과 연료 가격에 의해 계산되며 식 (2)와 같이 나타낼수 있다.

$$FC_i = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2)$$

여기서, a_i, b_i, c_i : 비용 계수

P_i : i 발전기의 발전출력

기동비용은 발전기가 정지한 시간에 대한 함수로 표현되며 식 (3)과 같다.

$$SC_i = \sigma_i + \delta_i\left[1 - \exp\left(\frac{-T_{off,i}}{\tau_i}\right)\right] \quad (3)$$

여기서, σ_i : hot start up cost

δ_i : cold start up cost

τ_i : 냉각시간 상수

$T_{off,i}$: 발전기가 정지한 시간

정지비용은 각 발전기에 대해 보통 일정한 값으로 주어진다.

UC 문제를 해결하는데 있어서 고려해야 할 제약조건은 다음과 같다.

(1) 계통의 부하 평형(부하수요+손실)

$$\sum_{i=1}^{N} P_i u_i - (P_D + P_L) = 0 \quad (4)$$

여기서, P_D : 부하 수요

P_L : 계통 손실

u_i : i 발전기의 기동 및 정지상태 [0,1]

(2) 운전 예비력 조건

$$\sum_{i=1}^{N} P_i^{max} u_i \geq P_D + P_L + R \quad (5)$$

여기서, R : 운전 예비력

(3) 발전기의 초기 조건

(4) 발전기의 최대, 최소 발전량

$$P_i^{min} \leq P_i \leq P_i^{max} \quad (6)$$

(5) 최소 운전 및 정지시간

$$(T_{t-1,i}^{on} - MUT_i)(u_{t-1,i} - u_{t,i}) \geq 0 \quad (7)$$

$$(T_{t-1,i}^{off} - MDT_i)(u_{t,i} - u_{t-1,i}) \geq 0 \quad (8)$$

여기서, T_{on}/T_{off} : 발전기의 운전/정지 시간

(6) 기타 발전기의 제약조건

3. 유전알고리즘을 이용한 UC 문제

3.1 문제의 표현

유전알고리즘으로 UC문제를 해결하기 위해서는 먼저 발전기의 기동, 정지상태를 나타내는 스트링의 구성방법이 필요한데, 본 논문에서는 2진수의 0, 1로써 각 발전기의 기동, 정지상태를 부호화하는 방법을 사용하였다. 계획시간동안 모든 발전기의 기동 및 정지상태를 표현함으로써 전체 스트링의 길이는 N(발전기수)×T(계획시간) 비트가 된다. 이에 따른 탐색 영역의 조합수는 $2^{N\times T}$개가 되므로 발전기수가 늘어남에 따라 탐색영역은 기하급수적으로 늘어남을 알 수 있다. 이러한 부호화 방법은 제약조건을 만족하지 않는 스트링이 많이 발생함으로 탐색 효율이 저하된다. 그리하여 근래에는 제약조건을 포함하는 부호화방법들이 도입되기도 하였다. 그러나 매우 큰 규모의 발전기 계통에서는 어떤 부호화 방법을 선택하더라도 매우 큰 탐색영역으로 인하여 최적해를 찾기 위해 오랜시간이 소요되며 또한 지역최적값에 수렴하기도 한다. 여기서는 초기해를 우선순위법에 의해 구한후 탐색영역을 제한하여 탐색함으로써 과도한 계산 시간을 줄이도록 하였다.

3.2 적합도 함수

유전알고리즘을 이용하여 기동, 정지 계획을 해결하는데 있어서 본 논문에서 사용한 적합도 함수는 총 운전비용인 목적함수와 제약조건을 포함하여 식 (9)와 같이 적합도 함수를 구성하였다.

$$\text{fitness} = \frac{\alpha}{\sum_{t=1}^{T} F_T(t) + \sum_{i=1}^{N} PF_i + \beta} \quad (9)$$

여기서, $F_T(t)$: t 시간에서의 총 발전비용

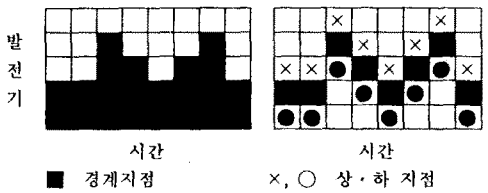
PF_i : i 제약조건의 위반 지수

N : 제약 위반수

α, β : 상수

3.3 혼합형 방법(Hybrid GA)

먼저 모든 발전기를 우선순위법에 따라 나열을 한 후 부하수요에 따라 발전기의 기동 및 정지를 결정하여 기준해를 구성한다. 구성된 발전계획의 기동 및 정지상태가 바뀌는 경계지점을 기준으로 하여 상·하로 각각 n, m 비트를 선택하면 전체 스트링의 길이는 (n+m+1) × T 비트의 스트링을 갖게 된다. 이때 선택된 각 비트의 상태가 최소 운전 및 정지시간 조건을 만족하도록 수정되어야 한다면 그 비트는 제약조건을 만족하도록 수정되고 탐색 지점은 다음 비트로 이동한다. 이러한 과정에 의해 스트링은 매 시간에 대해 임의로 기동, 정지상태의 변화가 가능한 (n+m+1) 비트의 탐색공간을 항상 갖게 된다. 그림 1은 n, m이 각각 1일때의 스트링 구성도이다.



(a) 우선순위법에 의한 초기상태 (b) 탐색영역 설정

그림 1 기동정지계획의 스트링 구성방법

유전알고리즘을 이용하여 그림 1에서 구성된 스트링에 대해서 탐색을 수행하고, 이러한 방법은 실제 발전기 계통에 대해 탐색공간을 조절함으로써 실질적인 시간에 원하는 정확도의 해를 효율적으로 구할 수 있다. 그림 2는 전체 과정을 순서도로 나타낸 것이다.

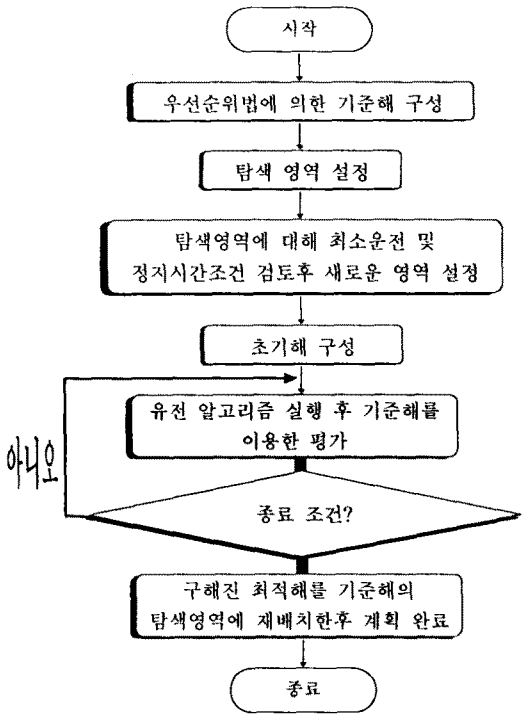


그림 2 혼합형 유전알고리즘을 이용한 UC계획의 순서도

4. 사례 연구

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해서 참고 문헌[6]에 있는 예제 데이터를 이용하여 그 성능을 비교하였다. 표 1에는 UC 문제에 사용된 각 발전기에 대한 파라메터를 나타내었고 시간별 부하 수요 및 운전 예비력은 표 2에 나타내었다. 유전 알고리즘으로는 SSGA(steady state GA)가 사용되었고 균일교배가 사용되었다. 탐색영역으로는 n과 m을 각각 3으로 설정하였다.

표 1 UC 문제에 사용된 시뮬레이션 파라메터

발전기	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_{max}[MW]	60	80	100	120	150	280	520	150	320	200
P_{min}[MW]	15	20	30	25	50	75	250	50	120	75
최소운전 시간 [h]	3	3	4	3	1	6	10	3	7	6
최소정지 시간 [h]	2	4	4	3	3	3	4	2	5	6
초기상태	3	3	4	3	-3	-3	10	3	7	6
a [$]	15	25	40	32	29	72	105	100	49	82
b[$/MW]	1.40	1.50	1.35	1.4	1.54	1.350	1.395	1.329	1.264	1.214
c [10^{-2} $/MW^2]	0.51	0.4	0.39	0.38	0.21	0.26	0.13	0.14	0.29	0.15
σ [$]	15	15	25	12	30	30	60	80	50	70
δ [$]	123	123	110	110	130	146	207	202	137	157
r	5	5	5	5	5	6	11	11	7	9

표 2 시간별 부하 수요

시간	부하수요 (MW)	운전예비력 [MW]	시간	부하수요 (MW)	운전예비력 [MW]
1	1167.0	350.0	13	923.0	280.0
2	1097.0	329.0	14	910.0	270.0
3	1039.0	329.0	15	900.0	270.0
4	1028.0	300.0	16	876.0	260.0
5	1017.0	300.0	17	853.0	260.0
6	1051.0	300.0	18	829.0	250.0
7	1098.0	300.0	19	794.0	240.0
8	1051.0	300.0	20	782.0	240.0
9	1017.0	300.0	21	770.0	240.0
10	993.0	300.0	22	818.0	240.0
11	958.0	280.0	23	864.0	260.0
12	946.0	280.0	24	1167.0	350.0

UC 문제에 유전 알고리즘을 적용하여 매 세대마다 구한 총 비용을 그림 3에 나타내었다. 표 3에는 제안한 방법과 기존의 방법에 의해서 구해진 결과와 비교하였다.

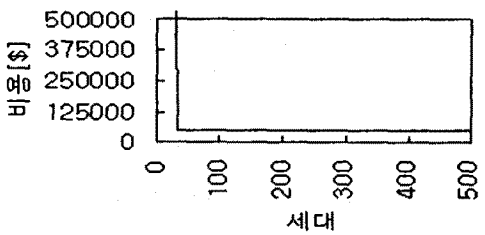


그림 3 각 세대에서 총비용

표 3 결과 비교

방법	비용[$]	우선순위법에 대한 개선비율[%]
LR	47511	3.19
Normal GA	47596	3.06
신경망	48203	3.02
제안한방법(HGA)	47444	3.33
우선순위법	49079	-

5. 결 론

본 논문에서는 UC문제를 해결하기 위해 유전알고리즘을 적용하는 방법을 제안하였다. 특히 큰 계통에 대해 효과적으로 문제를 해결하기 위하여 우선순위법과 탐색영역 제한기법을 도입하였다.

제안한 방법을 이용하여 사례연구에 적용해 본 결과 유용한 결과를 얻을 수 있었다. 향후 과제로서는 실제 계통과 같이 매우 큰 발전 계통에 대해 유용성을 좀더 검토할 것이다.

6. 참고 문헌

[1] Pang, C.K. and Chen, H.C. "Optimal short-term thermal unit commitment, IEEE Trans., 1976, PAS-95, pp. 1336-1346

[2] Zhuang, F. and Galiana, F.D. "Towards a more rigorous and practical unit commitment by Lagrangian relaxation", IEEE Trans., 1988, PWRS-3, no. 2, pp. 763-773

[3] Zhuang, F. and Galiana, F.D. "Unit commitment by simulated annealing", IEEE Trans., 1990, PWRS-5, no. 1, pp. 311-317

[4] David E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC. , 1989

[5] S.A. Kazarlis, A.G. Bakirtzis, V. Petridis, "A genetic algorithm solution to the unit commitment problem", IEEE Trans., 1996, PWRS-11, no. 1, pp. 83-92

[6] EPRI TR-103697 Optimization of the unit commitment problem by a coupled gradient network and by a genetic algorithm. Technical report 1994