

Tabu Search를 이용한 발전기 기동정지계획

천희주* · 김형수** · 문경준** · 황기현** · 이화석*** · 박준호****

*부산대학교 전기공학과 석사과정, **부산대학교 전기공학과 박사과정, ***거제대학 전기공학과 전임강사
****부산대학교 전기공학과 교수

Unit Commitment Using Tabu Search

H. J. Chun* · H. S. Kim** · K. J. Mun** · G. H. Hwang** · H. S. Lee*** · J. H. Park****

Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract - This paper proposes a method of solving a unit commitment problem using tabu search (TS). The TS is efficient optimization method using meta-heuristic. To improve the diversification properties of TS, path relinking method is introduced. To show the usefulness of the proposed method, we performed an experiment for the system of 10 units. Numerical results show improvements in the generation cost and the computation time compared to previously obtained results.

2. 문제의 정식화

발전기 기동정지계획 문제의 목적은 일간 또는 수일간의 발전계획을 수립하기 위해 대상 발전기의 조합을 결정하여 총 발전비용을 최소화하는 것이다. 총 발전비용은 연료비용, 기동비용, 정지비용으로 구성된다. 연료비용은 열효율과 연료 가격에 의해 계산되며, 기동비용은 발전기가 정지한 시간에 대한 함수로 표현된다. 그리고 정지비용은 각 발전기에 대해 일정한 값으로 주어진다. 발전기 기동정지계획 문제의 목적함수 및 기동비용은 다음과 같다.

1. 서론

발전기 기동정지계획 (unit commitment)은 여러 가지 등호 및 부등호 제약조건을 만족하면서 비용이 최소화되도록 하는 조합 최적화문제이다[1]. 이러한 기동정지계획 문제를 해결하기 위해서 기존에는 우선 순위법, 동적 계획법, 라그랑지 미정 계수법[2-4] 등이 제안되었으나, 계산시간이 많이 소요되거나 국부 최소값에 수렴하는 단점이 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 최근에는 확률적인 최적화 알고리즘인 유전알고리즘[5]과 경험적인 탐색방법인 Tabu Search (TS)[6-8]를 발전기 기동정지계획문제에 적용하여 좋은 결과를 얻고 있다. 따라서 본 논문에서 빠른 시간 안에 해를 탐색할 수 있고, 알고리즘이 단순하여 쉽게 프로그램 할 수 있는 TS를 발전기 기동정지계획 문제에 적용하였다.

TS는 경험적인 탐색방법으로 크게 국부 탐색성능을 가진 intensification과 전역 탐색 성능을 가진 diversification으로 나눌 수 있다. Intensification은 short term memory를 이용하여 한번 탐색한 영역은 일정기간 동안 탐색을 금지시켜 최근에 탐색하지 않은 다른 이웃영역을 탐색하는 과정이다. Diversification은 전역해를 탐색하기 위한 과정으로써 path relinking과 strategic oscillation 방법 등이 있다.

본 논문에서는 경험적인 최적화 알고리즘인 TS를 발전기 기동정지계획 문제에 적용하였다. 제안한 방법의 유용성을 평가하기 위하여 참고문헌[5]의 연구사례와 비교하였다. 사례연구 결과, 제안한 방법이 기존 방법보다 빠른 시간 내에 더 낮은 발전 비용을 구함을 알 수 있었다.

● 목적함수

- 발전기 연료비용함수

$$F_{it} = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (1)$$

여기서, a_i, b_i, c_i : i 번째 발전기의 비용함수의 계수

- 기동비용

$$SC_i = \sigma_i + \delta_i [1 - \exp(-\frac{T_{off,i}}{\tau_i})] \quad (2)$$

여기서, $\sigma_i, \tau_i, \delta_i$: 기동비용 계수

$T_{off,i}$: i 번째 발전기가 연속으로 off된 시간

- 정지비용($SD_{i,t}$)

- 전체 비용함수

$$F_T = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T F_{i,t} + SC_{i,t} + SD_{i,t} \quad (3)$$

여기서, T : 발전기 기동정지계획 시간[h]

N : 총 발전기 수

● 제약조건

- 부하 제약조건(load demand)

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_d \quad i = 1, 2, 3, \dots, T \quad (4)$$

여기서, P_i : i 번째 발전기 발전량[MW]

P_d : 부하량[MW]

- 발전 예비력 제약조건(spinning reserve)

$$\sum_{i=1}^N P_i^{Max} u_i = P_d + R_i \quad (5)$$

여기서, P_i^{Max} : i 번째 발전기 최대발전용량[MW]

R_i : 예비발전기 용량[MW]

$u_{i,t}$: 발전기 on/off 상태

- 발전량 제약조건(generation limit)

$$P_i^{Min} \leq P_i \leq P_i^{Max} \quad (6)$$

여기서, P_i^{Min} : i번째 발전기 최소발전용량[MW]

- 최소발전기 기동/정지 시간

$$\begin{aligned} (T_{i-1,i}^{on} - MUT_i)(u_{t-1,i} - u_{t,i}) &\geq 0 \\ (T_{i-1,i}^{off} - MDT_i)(u_{t,i} - u_{t-1,i}) &\geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, MUT_i : i 번째 최소발전기 기동 시간[h]

MDT_i : i 번째 최소발전기 정지 시간[h]

3. Tabu Search

TS는 경험적인 최적화 알고리즘으로서 다른 최적화 알고리즘보다 더 빨리 해를 탐색할 수 있으며, 알고리즘이 단순하여 쉽게 프로그램 할 수 있는 장점이 있다. TS는 크게 intensification과 diversification으로 구분할 수 있다. 국부탐색 능력을 가진 intensification에는 neighborhood 및 tabu list를 이용하여 해를 탐색하는 방법이고, diversification는 strategic oscillation, path relinking 등을 이용하여 최적해를 탐색하는 방법이다.

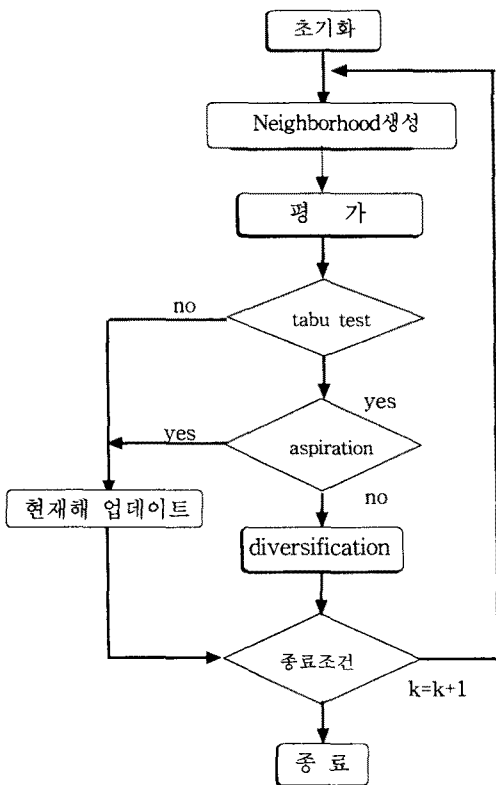


그림 1 Tabu search 흐름도

그림 1에서 일반적인 TS에 관한 흐름도를 보여주고 있다. 먼저 문제의 제약조건을 만족하는 영역에서 하나의 해를 선택한다. 이 해 근처에서 neighborhood를 생성하고, neighborhood평가 후, 가장 좋은 목적함수값 가지는 곳으

로 이동(move)한다. 이때 이동하는 해의 속성(attribute)이 tabu list에 포함이 되어 있으면 이동을 하지 않고, tabu list에 포함이 되어 있고 aspiration기준에 만족하면 tabu 로 설정된 해의 속성이 해제되고, 해는 tabu list에서 제외된다. 그리고 해가 국부 최소값에 수렴한 경우에는 전역 탐색 성능을 가진 diversification을 수행한다.

4. Tabu Search를 이용한 기동정지계획 방법

경험적인 알고리즘인 TS를 발전기 기동정지계획 문제에 적용하기 위한 과정은 다음과 같다. 여기에서 “0”은 발전기가 정지한 상태를 나타내고 “1”은 기동상태를 나타낸다.

단계1) 초기해 선정 : 우선 순위법을 이용하여 초기해를 선정하였다.

단계2) Neighborhood 결정방법 : 해의 탐색 영역을 결정하는 neighborhood는 그림 2에서 보는 바와 같이 초기해에서 각 발전기의 on/off 상태에서 각각의 비트가 순차적으로 on 이면 off로 바꾸고, off이면 on으로 바꾸어 neighborhood를 정한다. 만일 발전기 수가 10대이고 24시간동안 기동정지계획을 풀면 neighborhood의 수는 240개이다.

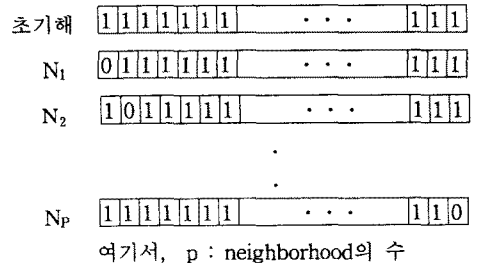


그림 2 Neighborhood 결정 방법

단계3) Tabu Test : 매 반복할 때마다 neighborhood 중 가장 좋은 해를 구하여 해의 변화된 속성을 tabu list에 저장한다. 이때 그 속성이 이미 tabu list에 포함되어 있으면 일정반복횟수 동안 tabu로 설정되고, 그러하지 않으면 이동한다. 이때 tabu list의 크기가 너무 작으면 순환(cycling)하기 쉽고 너무 크면 해의 특성(quality)이 저하되기 때문에 적절하게 tabu list 크기를 선정하여야 한다.

단계4) Aspiration : 현재의 해가 지금까지 찾은 최적해보다 더 좋으면 aspiration을 수행한다. 따라서 tabu 로 설정된 해의 속성은 tabu list에서 제외되고 이동을 할 수 있다.

단계5) Diversification 전략 : 일정 반복횟수 동안 해가 개선이 되지 않으면 path relinking을 이용한 diversification 과정을 수행한다. 이때 path relinking을 하기 위해서 guide solution을 만들어

야한다. 본 논문에서 제안한 guide solution은 변화된 우선 순위를 이용하여 만든다. 식(8)과 같이 lambda 값을 적절히 변화시켜 각각 변화된 우선 순위를 구하고 그 중 가장 작은 비용을 가지는 것으로 정하였다. 만일 diversification 수행되면 guide solution으로 각각의 발전기 모든 속성이 순차적으로 guide solution로 바뀌고, 이때 이 발전기는 tabu로 설정되고, 다른 발전기를 탐색하게 된다.

$$\text{우선순위} = \text{최대용량} - \text{최대부하평균비용} \times \lambda \quad (8)$$

단계6) 수렴조건 : 반복회수가 만족할 때까지 단계 2)~단계 5)까지 반복한다.

5. 사례연구

본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해서 참고문헌[5]의 10대 발전기의 데이터를 이용하여 성능을 비교하였다. 표 1은 10대 발전기에 대해 기존의 방법에 의해서 구해진 발전비용을 나타내는데, TS를 이용하여 구한 발전 비용을 나타내었다. 표 2에서 tabu list의 크기가 12일 때 발전 비용이 가장 낮음을 알 수 있다. 표 1과 표 2에서 제안한 방법이 우선 순위법(PR), 유전알고리즘(GA), 라그랑지 미정계수법(LR)보다 더 낮은 발전비용을 구했다. 그러나 동적 계획법(DP)보다 약간 더 높은 발전비용을 얻었다. 표 3은 제안한 방법에 의해서 구해진 발전기 기동정지 계획을 나타내었다.

표 1 기존의 방법에 의한 발전 비용

방법	PR	GA	LR	DP
발전 비용[\$]	49079	47576	47511	47261

표 2 Tabu search에 의한 발전 비용

분류 tabu list 크기	시간[sec]	발전비용[\$]
10	26	47514
12	26	47445
15	27	47520

6. 결론

본 논문에서는 경험적인 최적화 알고리즘인 TS를 기동정지계획문제에 적용하였다. 제안한 방법의 유용성을 평가하기 위하여 참고문헌[5]의 연구사례와 비교하였다. 사례연구 결과, 제안한 방법이 우선순위법, GA, LR보다 더 낮은 발전비용을 구할 수 있었다. 향후 과제로는

diversification 전략을 보다 다양화함으로써 전역 최적해의 탐색 능력을 개선할 것이며, 또한 guide solution으로 변화된 우선 순위뿐만 아니라 GA 또는 LR을 이용할 것이 다.

표 3 제안한 방법에 의해 구해진 발전기 기동정지계획

발전기	시 간 [hour]
1	11111111111111111111111111111111
2	000000000000000000000000000000
3	000000000000000000000000000000
4	11111111111111111111110000000000
5	11111111111111111111111111111111
6	111111100000000000000000000001
7	11111111111111111111111111111111
8	000000000000000000000000000000
9	11111111111111111111111111111111
10	11111111111111111111111111111111

참고 논문

- [1] J. Wood and F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, And Control", pp. 131-170
- [2] Khodaverdia, E., Bramellar, A. and Dunnet, R. M. "Semirigorous thermal unit commitment for large scale electrical power systems", Proceedings IEEE Part C 1986, 133, pp. 157-164.
- [3] Pang, C. K, and Sheble, G. B and Albuyeh, F. "Evaluation of dynamic programming based methods and multiple area representation for thermal unit commitments." IEEE Transactions PAS 1981. 100. pp. 1212-1218
- [4] Zhuang. F. and Galliana, F. D. "Towards a more vigorous and practical unit commitment by Lagrangian relaxation. IEEE Transactions PWRS 1988, 3, pp. 763-770
- [5] S. O. Orero and M. R. Irving. "Large scale unit commitment using a hybrid genetic algorithm", Elsevier Science Ltd pp. 45-55 ,1996
- [6] F. Glover, "Tabu Search - Part I," ORSA Journal on Computing Vol. 1. No. 3, pp. 190-206, 1989.
- [7] F. Glover and M Laguna, "Tabu Search" pp. 111-116
- [8] Hiroyuki Mori and Takayuki Usami. "Unit Commitment Using Tabu Search with Restricted Neighborhood", IEEE pp. 422-427, 1996