병렬 타부 탐색법을 이용한 발전기 기동정지계획

김형수* · 문경준* · 조덕환** · 황기현*** · 박준호****
*부산대학교 전기공학과 박사과정, **부산대학교 전기공학과 석사과정,
***부산대 컴퓨터 및 정보통신연구소 연구전담 조교수, ****부산대학교 전기공학과 교수

Unit Commitment Using Parallel Tabu Search

H. S. Kim* · K. J. Mun* · D. H. Cho** · G. H. Hwang*** · 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 parallel tabu search (PTS). The TS is efficient optimization method using meta-heuristic. In this paper, to reduce the computation time for evaluating the neighborhoods, an evaluating method only on changed part and a path relinking method as diversification strategy are proposed. To show the usefulness of the proposed method, we simulated for 10 units system and 110 units system. Numerical results show improvements in the generation costs and the computation time compared with conventional methods. Numerical results show improvements in the generation cost and the computation time compared to previously obtained results.

1. 서 론

발전기 기동정지계획(unit commitment)은 주어진 부하 수요에 대해 발전기의 여러가지 제약조건을 만족시키면서 운전 비용을 최소화하는 문제이다[1]. 이러한 기동정지계획 문제를 해결하기 위해 우선순위법, 동적계획법, 라그랑지 미정 계수법[2-4] 등이 제안되었으며, 최근에는 지능적 탐색 기법인 유전 알고리즘[5], 타부 탐색법[6-8] 등이 적용되었다. 유전 알고리즘의 전역탐색 능력은 기존의 국부 수렴 알고리즘의 단점을 보완할 수 있는 방법으로 제시되었으나 확률적 탐색방법으로 인해 전역해 근처에서는 느린 수렴속도를 가지는 단점이 있다. 반면, 경험적 탐색 방법인 타부 탐색법은 문제에 대한 특성을 고려한 탐색이 용이하여 보다 빠른 수렴특성을 가질 수 있으나 초기 탐색 지점에 따라 해의 수렴값이 크게 영향을 받는 문제점을 가지고 있다. 이러한 방법의 문제점을 해결하기 위해 최근에는 병렬 컴퓨터를 이용한 방법[9]이 제시되고 있다. 병렬 프로세서에 의한 탐색 방법은 단일 프로세서에 의한 방법의 느린 탐색 속도와 국부 수렴 등의 문제점을 해결하기위한 가능성을 보여주고 있다.

본 논문에서는 병렬 프로세서를 이용한 병렬 타부 탐색법을 발전기 기동정지계획 문제에 적용하였다. 다수의 프로세스를 가진 시스템에서 각 프로세서마다 서로 다른 초기값에 의해 타부 탐색법을 수행함으로써 초기값에 의한 영향을 줄였으며, 일정 횟수마다 주변의 프로세스 결과를 공유함으로써 보다 새로운 영역의 탐색이 가능하도록 하였다. 제안한 방법의 유용성을 평가하기 위해 참고문헌[5]의 사례에 대해 각 프로세서 수에따른 성능의 비교 및 기존의 방법과도 비교하였다. 사례연구 결과, 제안한 방법은 단일 프로세스에 의한 결과 및 기존의 방법보다 더욱 빠른 시간에 보다 낮은 발전 비용을 구할 수 있는 효율적인 방법임을 알 수 있었다.

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.

2. 1 목적함수

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

여기서, T : 발전기 기동정지계획 시간[h]
N : 총 발전기 수

- 발전기 연료비용함수

$$F_{i,t} = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2)$$

여기서, a_i, b_i, c_i : i번째 발전기의 비용함수의 계수

- 기동비용

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

여기서, $\sigma_i, \tau_i, \delta_i$: 기동비용 계수
$T_{off,i}$: i번째 발전기가 연속으로 off된 시간

- 정지비용($SD_{i,t}$)

2. 2 제약조건

- 부하 제약조건(load demand)

$$\sum_{i=1}^{N} P_i = P_d \quad i = 1, 2, 3.... T \tag{4}$$

여기서, P_i : i 번째 발전기 발전량[MW]

P_d : 부하량[MW]

- 발전 예비력 제약조건(spinning reserve)

$$\sum_{i=1}^{N} P_i^{Max} u_i = P_d + R_t \tag{5}$$

여기서, P_i^{Max} : i번째 발전기 최대발전용량[MW]

R_t : 예비발전기 용량[MW]

$u_{i,t}$: 발전기 on/off 상태

- 발전량 제약조건(generation limit)

$$P_i^{Min} \le P_i \le P_i^{Max} \tag{6}$$

여기서, P_i^{Min} : i번째 발전기 최소발전용량[MW]

- 최소발전기 기동/정지 시간

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

여기서, MUT_i : i 번째 최소발전기 기동 시간[h]

MDT_i : i 번째 최소발전기 정지 시간[h]

3. 병렬 타부 탐색법

3.1 병렬 프로세서

본 논문에서 사용된 병렬 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 16개의 PowerPC 604 프로세서를 가지며, 각 프로세서는 독립적인 메모리를 가지고 있다. 프로세서간의 연결은 2차원 망구조를 사용하였으며, 각 프로세서는 주위의 4개의 프로세서와 통신이 가능하다. 각 프로세서에 대한 입출력은 임의로 선택한 Entry Node 프로세서에 의해 가능하다.

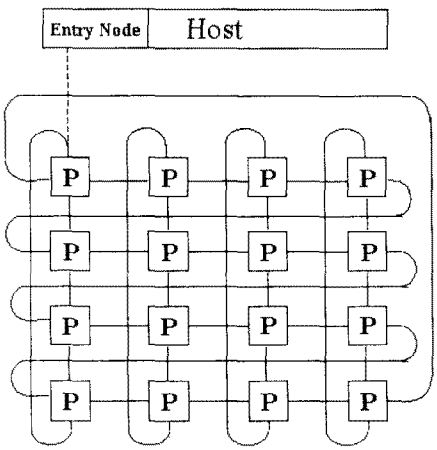


그림 1 병렬 프로세서 구조

3.2 병렬 타부 탐색법의 구성

본 논문에서는 독자적인 실행 단위를 가지는 병렬 프로세서에 보다 효과적인 병렬 타부 탐색법을 구현하였다. 그림 2에서는 독립적인 초기해를 갖는 병렬 타부 탐색법에 의한 탐색 과정을 도식화한 것이다. 이러한 방법으로 국부 탐색 방법인 타부 탐색법은 전역 탐색 능력을 가지게 된다.

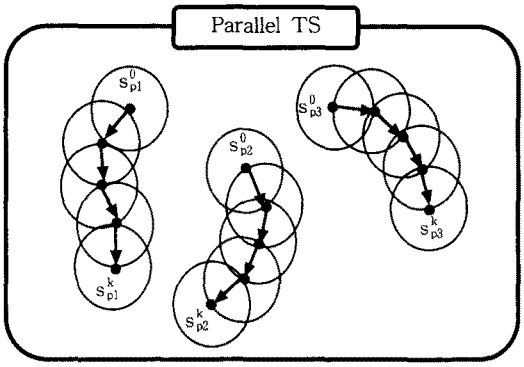


그림 2 병렬 타부 탐색법의 개요

3.2.1 병렬 타부 탐색법의 구조

본 논문에서 사용된 병렬 타부 탐색법의 구조를 그림 3에 나타내었다. 각 프로세서는 주변의 4개의 프로세서와 일정 조건을 만족할 경우 탐색 결과를 공유하게 된다. 즉, 단일 프로세서에 의한 실행시 발생하는 국부수렴 문제를 주변 프로세서 결과에 의한 다양화 전략을 수행함으로서 효과적으로 극복할 수 있도록 하였다. 다양화 전략은 일정 조건이 만족할 경우에만 수행하도록 함으로서 각 프로세서간의 정보 교환시 발생하는 시간지연을 최소화하도록 하였다.

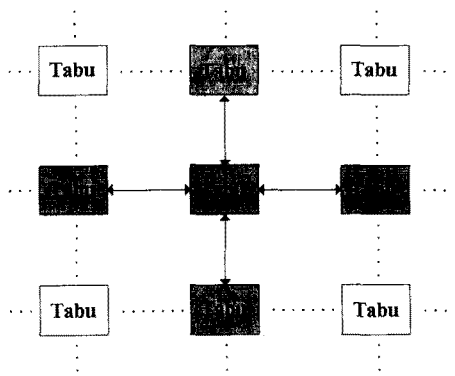


그림 3 병렬 타부 탐색법

3.2.2 병렬 타부 탐색법의 수행 절차

각 프로세서마다 독립적으로 실행되는 병렬 타부 탐색법의 순서도를 그림 4에 나타내었다. 먼저 임의의 초기해를 설정한 후, 초기해로부터 이웃해를 생성하게 된다.

생성된 이웃해를 평가하여 가장 좋은 값을 모의해로 설정한 후, 그 값이 타부 리스트에 포함되지 않거나 포함된 경우라도 열망조건을 만족할 경우에는 다음 탐색을 위한 현재해로 설정하여 탐색을 진행한다. 만약 최적해가 임의 반복횟수 동안 개선되지 않는다면 국부 수렴한 것으로 판단하여 다양화 전략을 수행함으로써 새로운 탐색영역으로 이동하도록 하며, 이러한 연산을 종료 조건이 만족할 때까지 반복하였다.

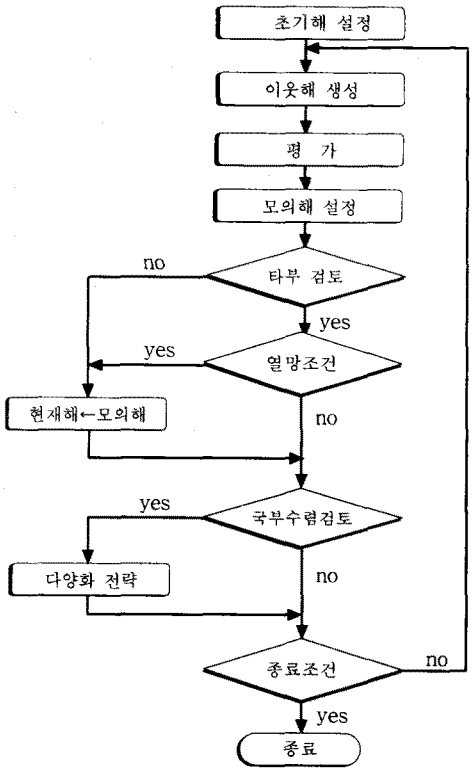


그림 4 타부 탐색법의 순서도

4. 타부 탐색법을 이용한 발전기의 기동정지계획

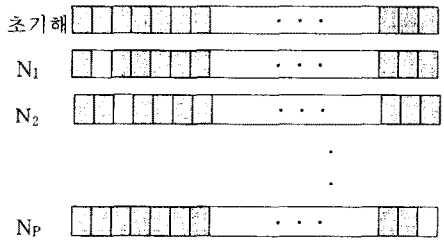
4.1 초기해 설정

타부 탐색법의 초기해를 설정하기 위해 최대부하출력시의 평균비용을 구한 후, 비용이 낮은 것에 큰 우선순위를 부여하는 우선순위법을 사용하였다. 그러나 동일한 우선순위를 이용할 경우 모든 병렬 프로세서의 초기해가 동일하므로 탐색 진행 방향이 같아지게 된다. 따라서 구해진 우선순위를 우선순위가 높은 것부터 확률적으로 변경함으로써 새로운 우선순위에 의해 초기해가 생성되도록 하여 모든 프로세서의 초기해를 다르게 하였다.

4.2 이웃해 생성 및 평가

4.2.1 이웃해의 생성 방법

해의 탐색 영역을 결정하는 이웃해는 그림 5에서 보는 바와 같이 초기해로부터 각 발전기의 on/off 상태를 순차적으로 1비트 변경시킨 것을 이웃해로 설정한다. 만일 발전기 수가 10대이고 24시간동안 기동정지계획을 풀면 이웃해의 수는 240개이다. 그러나 기동정지계획에서는 여러 제약조건이 존재하므로 모든 값을 이웃해로 할 필요는 없다. 따라서 본 논문에서는 최소 운전 및 정지시간과 부하 수요 및 운전 예비력 제약을 만족하는 것을 이웃해를 설정하였다. 따라서 평가해야할 이웃해의 수는 크게 감소한다.



여기서, p : 이웃해 수

그림 5 이웃해 생성 방법

4.2 이웃해 평가

생성된 이웃해를 평가하여 가장 좋은 값을 다음 탐색의 현재해로 설정한다. 발전기 수가 적은 경우에는 평가해야 할 이웃해의 수도 적으나, 발전기 수가 매우 많은 경우에는 이웃해의 수는 상당히 많아지게 되어 평가시간에 의한 전체 탐색시간은 크게 증가한다. 따라서 본 논문에서는 생성된 이웃해의 평가시간을 줄이기 위해 전체해를 다시 계산하지 않고 변경된 부분만 재계산하는 방법을 제시하였다.

발전기 기동정지에 의한 비용계산을 위해서는 각 발전기의 기동시 발생하는 기동비용과 함께 운전중인 발전기에 의한 연료비용이 있다. 연료비용을 계산하기 위해서는 경제급전 문제를 해석해야 하는데, 본 논문에서는 λ-반복법에 의해 경제급전에 의한 비용을 구하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 11시간대의 임의의 상태가 변경된 경우를 보면, 다른 시간대의 경제급전 해석결과는 동일하다. 단지 변경된 상태가 포함되어있는 시간대만 다시 경제급전해석을 하면 된다. 따라서 계산 시간은 24시간에 대한 계획일 경우 $\frac{1}{24}$로 줄일 수 있음을 알 수가 있다.

표 1 발전기 상태 변화에 의한 경제급전 해석 부분

unit \ [h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1																								
2																								
3																								
4																								
5																								
6																								
7																								
8																								
9																								
10																								

4.3 타부 리스트 및 열망조건

탐색을 진행하는 경로를 타부 리스트에 저장해둠으로서 재탐색에 의한 순환(cycling)을 방지할 수 있다. 본 논문에서는 각 발전기의 변경 속성(on/off)를 타부 리스트에 저장하여 동일한 속성의 반복을 금지하였다. 이때 열망조건을 이용하여 타부일지라도 이제까지 탐색한 해보다 더 좋은 값이 나온 경우에는 탐색할 수 있도록 하였다. 이러한 열망 조건은 타부 리스트에 의한 수렴속도 저하를 보완하여 보다 빠르게 수렴할 수 있도록 한다.

4.4 다양화 전략

일정 반복횟수 동안 해가 개선이 되지 않으면 새로운 탐색 영역으로 이동할 수 있도록 다양화 과정을 수행한다. 본 논문에서는 path relinking 방법을 이용하여 다양화 과정을 수행하였다. path relinking 방법은 안내해(guide solution)를 이용하여 지금까지 탐색한 탐색영역과는 다른 영역을 탐색하도록 하는 방법으로서 본 논문에서는 각 프로세서와 연결된 4개의 프로세서로부터 안내해를 생성하였다.

그림 6에서와 같이 다양화 과정이 수행되면 각 프로세서에 의한 최적해를 안내해로 하여 임의로 선택한 발전기의 모든시간 계획을 대상 프로세서의 발전기 계획으로 대처한다. 연결된 모든 프로세서의 결과를 이용하여 현재해를 변경함으로서 새로운 영역으로의 탐색을 진행하게 된다.

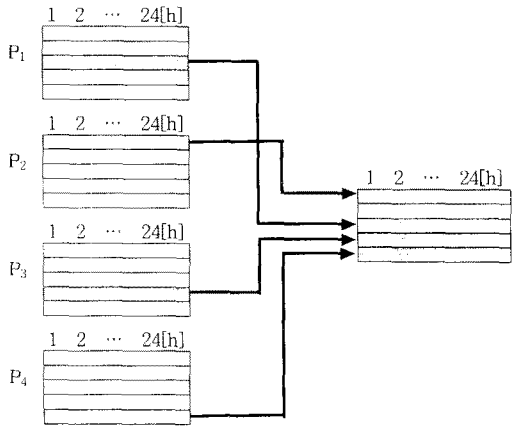


그림 6 병렬 프로세서에 의한 다양화 전략

5. 사례연구

본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해서 참고문헌[5]의 10대 발전기와 110대의 발전기에 대한 데이터를 이용하여 성능을 비교하였다. 표 2는 10대 및 110대의 발전기에 대한 시뮬레이션 계수를 나타내었다. 그림 7은 각 발전기의 상태를 변화시키는 방법에 의해 가능한 총 이웃해와 제약조건을 고려한 경우의 이웃해 수를 발전기 수에 따라 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 제약조건의 고려에 의해 평가해야할 이웃해의 수가 크게 감소함을 알 수 있다. 표 3은 10대 발전기에 대해 각 방법에 의해 구해진 결과를 비교하여 나타내었으며 이때 다른 방법에 비해 동적계획법에 의해 구해진 최적값의 결과에 보다 가까운 것을 알 수 있다. 표 4는 최종적으로 구해진 기동정지계획을 나타낸 것이다. 이러한 결과를 바탕으로 보다 큰 110대의 발전기 계통에 적용하였으며, 표 5에서 각 방법에 의해 구해진 결과와 비교하였다. 표 3과 표 5에서 보는 바와 같이 제안한 방법이 우선 순위법(PR), 유전알고리즘(GA), 라그랑지 미정계수법(LR) 방법 또는 기존의 타부 탐색법에 의한 결과보다 더 낮은 발전비용을 구함을 알 수 있다.

표 2 타부 탐색법의 시뮬레이션 계수

파라메터 \ 대상 규모	10대	110대
Tabu List 크기	15	15
반복횟수	200	500

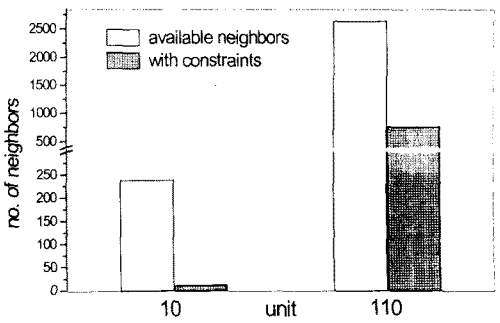


그림 7 제약조건 포함에 따른 이웃해 수의 변화

표 3 각 방법에 의해 구해진 발전 비용(10대 계통)

방법	PR	GA	LR	DP	PGA
발전 비용[$]	48698	47576	47511	47261	47283

표 4 구해진 발전기의 기동 및 정지상태

unit \ [h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1																								
2																								
3																								
4																								
5																								
6																								
7																								
8																								
9																								
10																								

표 5 각 방법에 의해 구해진 발전 비용(110대 계통)

방법	PR	GA	HGA	TS	PTS
발전비용[$]	3854821	3834467	3826775	3817470	3817000

6. 결 론

본 논문에서는 병렬 프로세서를 이용하여 경험적인 최적화 알고리즘인 타부 탐색법을 발전기 기동정지계획문제에 적용하였다. 단일 프로세서에 의한 타부 탐색법의 속도 개선뿐만 아니라 병렬 프로세서의 특성을 이용하여 보다 효율적으로 국부최소값을 벗어나는 방법을 제시하였다. 제안한 방법의 유용성을 평가하기 위하여 참고문헌[5]의 연구사례와 비교하였다. 사례연구 결과, 제안한 방법이 우선순위법, GA, LR 또는 단일 프로세서에 의한 기존의 타부 탐색법보다 더 나은 발전비용을 빠른 시간에 구할 수 있었다.

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 on 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

[9] Mori H., Matsuzaki O., "A parallel tabu search approach to unit commitment in power systems", Man and Cybernetics, 1999. IEEE SMC '99 Conference Proceedings. Vol. 6, pp. 509 -514, 1999