

병렬 타부 탐색법을 이용한 대규모의 발전기 기동정지계획

論 文

50A-11-5

Large Scale Unit Commitment Using Parallel Tabu Search

金亨洙* · 文景俊* · 趙德桓** · 黃琪鉉*** · 朴俊灝§

(Hyung-Su Kim · Kyeong-Jun Mun · Deok-Hwan Cho · Gi-Hyun Hwang · June Ho Park)

Abstract - This paper proposes a method of solving a unit commitment problem using parallel tabu search(PTS) approach. Tabu search is a heuristic optimization method that has the tabu list to control the search process. To improve the searching ability of a global solution, we used a method of exchanging solutions among connected processors as a diversification strategy, and to reduce the computation time, a new evaluating method was proposed which evaluates only a changed part. 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 other conventional methods.

Key Words : Unit Commitment, Parallel Tabu Search, Diversification Strategy

1. 서 론

발전기 기동정지계획은 다양한 제약조건을 만족하면서 일간, 또는 수일간의 총 발전비용을 최소화하는 발전기의 기동 및 정지 계획을 수립하는 목표로 한다[1]. 이것은 전력계통 운용계획에 있어 매우 중요한 문제로서, 최근에는 전력시장의 수요 증대, 발전원의 다변화와 함께 전력시장의 개방 및 환경 문제와 같은 외부적 요인이 부가됨으로서 이러한 제반조건들을 충분히 고려한 경제적인 기동정지계획의 필요성이 더욱 높아졌다.

이러한 발전기 기동정지계획 문제는 많은 변수를 포함하는 대규모의 최적화 문제로 볼 수 있으며, 지금까지 다양한 제약조건을 만족하면서 효율적으로 풀기 위한 많은 방법들이 제안되었다. 기존의 방법으로는 우선 순위법, 동적 계획법, 라그랑지 미정 계수법[2-4] 등이 제안되었으나, 근사적 또는 비효율적인 탐색방법으로 계산 시간이 많이 소요되거나 탐색해의 질이 떨어지는 문제를 가지고 있다. 최근에는 이러한 문제점을 해결하고자 유전 알고리즘[5-6], 타부 탐색법[7-8, 12] 등과 같은 지능적 탐색 기법이 제안되었다. 그러나 유전 알고리즘의 경우 확률적인 탐색기법으로 최적해 근처까지는 빨리 수렴하나 최적해를 찾는 데는 많은 계산시간이 소요되어 실질적으로 적용하기

가 어려운 문제점이 있다. 타부 탐색법의 경우에는 경험적 탐색 방법으로 문제의 특성을 고려한 탐색이 용이하여 빠른 수렴특성을 가지는 반면에, 탐색과정이 초기해의 영향을 크게 받으며, 국부수렴한 경우 새로운 영역을 탐색하기 위해서는 매우 많은 계산시간이 요구되므로 탐색을 다양화하기 위한 방법이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 문제점들을 해결하고 빠른 계산시간과 전역탐색능력을 가질 수 있도록 새로운 병렬 타부 탐색법[9-11]을 이용하여 대규모의 발전기 기동정지계획 문제를 해결하는 방법을 제안하였다. 병렬 프로세서로는 최근에 컴퓨터 기술의 발달에 힘입어 점차 이용이 확대되고 있는데, 주로 단일 프로세서에 의한 속도 개선을 위해 많이 이용되고 있다. 제안한 방법은 분산 메모리를 가진 병렬 시스템을 이용하여 병렬 타부 탐색법은 구현함으로써 속도 및 전역탐색 능력을 개선할 수 있도록 하였다. 병렬 시스템을 구성하는 각 프로세서마다 서로 다른 초기해로부터 독립적으로 타부 탐색법을 실행함으로써 단일 지점에 의한 타부 탐색법의 국부수렴 가능성을 감소시켰으며, 각 프로세서의 타부 탐색이 국부수렴한 경우에는 주변 프로세서와 정보를 교환하여 새로운 영역의 탐색이 가능하도록 하는 다양화 전략을 사용하였다. 또한 대규모 계통의 기동정지계획 문제에 타부를 적용할 경우 이웃해 영역이 크게 증가하는데, 본 논문에서는 새로운 이웃해 평가알고리즘을 제안하여 탐색시간을 크게 감소시킴으로써 대규모 계통에서도 이웃해 영역의 축소없이 탐색가능하도록 하였다. 제안한 방법의 유용성을 평가하기 위해 참고문헌[6]의 사례에 대해서 기존의 방법들과 성능을 비교하였으며, 이때 제안한 방법은 기존의 어떠한 방법보다도 계산시간 및 최소비용 면에서 크게 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

* 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 博士科程

** 準 會 員 : 釜山大 電氣工學科 碩士科程

*** 正 會 員 : 釜山大 컴퓨터 및 情報通信研究所 基金教授

§ 正 會 員 : 釜山大 電氣工學科 教授 · 博士

接受日字 : 2001年 9月 19日

最終完了 : 2001年 10月 16日

2. 문제의 정식화

발전기 기동정지계획 문제의 목적은 일간 또는 수일간의 발전계획을 수립하기 위해 제반의 제약조건을 만족하면서 총 발전비용을 최소화하는 발전기의 조합을 결정하는 것이다. 총 발전비용은 연료비용, 기동비용, 정지비용으로 구성되며, 제약조건으로는 경제급전 해석시에 고려해야 하는 부하수급조건, 발전출력 제약을 비롯하여 발전기의 기동정지 결정시 고려할 최소운전 및 정지시간, 운전 예비력 조건 등이 있다. 본 논문에서 사용한 목적함수와 제약조건은 다음과 같다.

- (1) 목적함수: 목적함수는 발전기 연료비용함수($F_{i,t}$), 기동비용(SC_i) 및 정지비용($SD_{i,t}$)으로 구성되어 있으며 다음과 같다.

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

여기서, T : 발전기 기동정지계획 시간[h]

N : 총 발전기 수

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

a_i, b_i, c_i : i 번째 발전기의 비용함수 계수

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

$\sigma_i, \tau_i, \delta_i$: 기동비용 계수

$T_{off,i}$: i 번째 발전기가 연속으로 off된 시간

- (2) 제약조건: 본 논문에서 사용한 제약조건은 부하 제약조건(load demand), 발전량 제약조건(generation limit), 발전 예비력 제약조건(spinning reserve) 및 최소발전기 기동/정지 시간으로 구성되며, 식 (2)~(5)에 나타내었다.

- 부하 제약조건

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

여기서, P_i : i 번째 발전기 발전량[MW]

P_d : 부하량[MW]

- 발전량 제약조건

$$P_i^{Min} \leq P_i \leq P_i^{Max} \quad (3)$$

여기서, P_i^{Max} : i 번째 발전기 최소발전용량[MW]

- 발전 예비력 제약조건

$$\sum_{i=1}^N P_i^{Max} u_{t,i} = P_d + R_t \quad (4)$$

여기서, P_i^{Max} : i 번째 발전기 최대발전용량[MW]

R_t : 예비발전기 용량[MW]

$u_{t,i}$: 발전기 on/off 상태

- 최소발전기 기동/정지 시간

$$\begin{aligned} (T_{i-1,i}^{on} - MUT_i)(u_{t-1,i} - u_{t,i}) &\geq 0 \\ (T_{i-1,i}^{off} - MDT_i)(u_{t,i} - u_{t-1,i}) &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, MUT_i : i 번째 최소발전기 기동 시간[h]

MDT_i : i 번째 최소발전기 정지 시간[h]

3. 병렬 타부 탐색법

타부 탐색법은 하나의 초기해로부터 최근의 방문지점을 금지하면서 탐색하는 경험적인 탐색방법이다. 적절한 이웃해 구성과 메모리의 사용으로 효율적인 탐색이 가능하므로 일반적으로 빠른 수렴이 가능하지만, 초기지점이 전역해로부터 멀리 있거나 탐색 영역이 클 경우에는 오히려 전역해를 탐색하는데 많은 시간이 요구되기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 타부 탐색법의 성능 개선 및 병렬 프로세서를 이용한 병렬 타부 탐색법이 제안되고 있다[9-11].

일반적으로 병렬 프로세서를 이용한 경우 두가지의 측면을 생각할 수 있다. 첫째로는 각 프로세서가 일정부분만큼 작업량을 분담하여 실행함으로써 전체 계산시간을 단축하는 방법이다. 둘째로는 다수의 프로세서에 의해 독립적으로 실행함으로써 전역 탐색능력이 향상시키는 방법이다. 분산메모리를 가진 병렬 시스템에서는 독립성이 강조되므로 두 번째의 방법이 더욱 효과적이다. 이러한 병렬 프로세서를 이용하여 병렬 타부 탐색법을 구현하는 방법은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫째, 그림 1과 같이 동일한 초기해로부터 각 프로세서마다 타부 리스트 크기, 이웃해 생성 방법 등을 달리함으로써 서로 다른 영역으로 탐색하도록 하는 방법, 둘째, 전체 탐색 영역을 몇 개의 작은 문제 또는 영역으로 분할하여 각 프로세서마다 일정영역을 탐색하도록 하는 방법, 그리고 셋째로는 그림 2와 같이 각 프로세서가 서로 다른 초기해로부터 독립적으로 타부 탐색을 실행하는 방법으로 나누어 볼 수 있다.

첫 번째 방법은 문제를 다각도로 해석할 수 있으므로 보다 심도 있는 탐색이 가능하지만, 단일 지점으로부터 시작하므로 다양한 영역을 탐색하기 위해서는 보다 많은 반복횟수가 필요하다. 두 번째 방법의 경우에는 보다 넓은

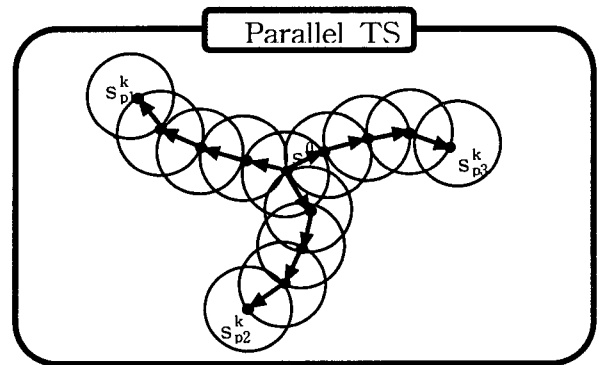


그림 1 동일한 초기해로 탐색하는 병렬 타부 탐색법
Fig. 1 Parallel TS with a same initial solution

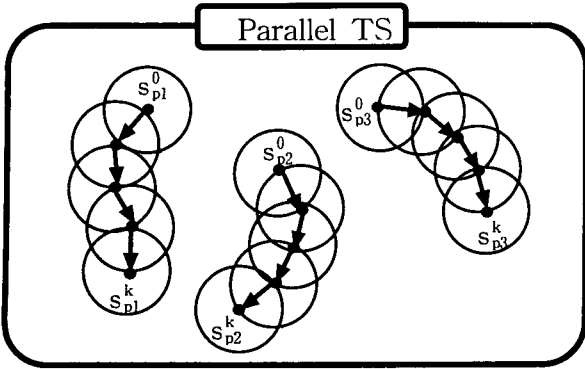


그림 2 서로 다른 초기해로 탐색하는 병렬 타부 탐색법
Fig. 2 Parallel TS with different initial solutions

은 영역을 동시에 탐색함으로써 탐색속도를 개선하기가 용이하다. 그러나 각 영역간의 연관성을 고려하기가 어려우며, 영역별로의 결과를 동기화해야 함으로 프로세서간의 통신부하가 증가하는 문제점을 가지고 있다. 세 번째 방법의 경우는 서로 독립적으로 실행가능 하므로 구현이 용이하고 병렬 프로세서에 의해 단일 프로세서에 의한 국부수렴의 가능성을 줄일 수 있으며, 프로세서간의 통신부담도 적다. 특히 근래에 많이 사용되고 있는 분산 시스템 구조의 병렬 프로세서에 적합한 구조이다. 그러나 문제규모가 클 경우에는 단일 프로세서에서와 동일하게 이웃해 영역의 증가에 의한 계산시간이 커지는 문제를 갖는다.

4. 병렬 타부 탐색법을 이용한 발전기 기동정지계획

본 논문에서는 빠른 시간내에 전역 최적해를 탐색할 수 있는 병렬 타부 탐색법을 제안하여 발전기 기동정지계획 문제에 적용하였다. 제안한 방법은 각 프로세서마다 서로 다른 초기해로부터 독립적으로 타부 탐색법을 실행함으로써 서로 다른 영역을 효과적으로 탐색, 단일 프로세서에서 실행시에 문제가 되는 초기해의 영향을 감소시켰으며, 국부수렴시에는 주변 프로세서와 정보를 교환하여 새로운 영역을 탐색할 수 있도록 다양화 전략을 도입하여 전역 탐색능력을 높였다. 그림 3과 같이 각 프로세서는 국부수렴시 주변의 프로세서와 탐색결과를 공유함으로써 현재해를 변화시켜 새로운 영역의 탐색을 시도하게 된다.

제안한 방법은 각 프로세서가 독립적으로 타부 탐색을 수행하므로 문제규모가 커질 경우에는 고려할 이웃해의 영역도 증가하여 단일 프로세서에서와 동일하게 계산시간이 증가하는 문제가 발생한다. 따라서 이웃해 검토 영역을 줄이는 방법 등이 요구되는데, 본 논문에서는 이웃해 검토 영역을 감소시키지 않고 새로운 평가방법을 사용하여 전체 계산시간을 크게 줄이는 방법을 제안하였다. 특히, 제안한 방법은 발전기 규모가 클 경우 또는 계획시간이 길 경우에는 더욱 효과적인 결과를 얻는다. 본 논문에서 사용한 타부 탐색법의 초기해 설정, 이웃해 생성, 이웃해 평가, 타부 리스트 및 열망조건, 그리고 다양화 조건의 적용 과정은 다음과 같다.

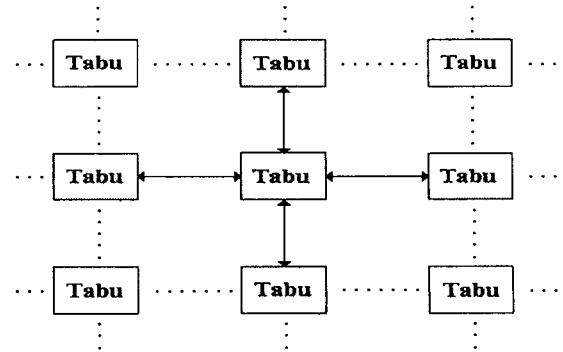


그림 3 병렬 타부 탐색법의 다양화 방법
Fig. 3 Diversification in PTS

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 그림 4와 같은 방법으로 변경하였다. 그림에서 보듯이 임의의 기준 발전기(A)를 선택한 후, 일정 범위이내에서 교환할 순위의 발전기(B)를 선택하여 서로의 순위를 바꾸게 된다. 이러한 방법으로 변경된 우선순위에 의해 초기해를 생성함으로써 각 프로세서는 서로 다른 초기해를 가지게 된다.

기준 우선순위	발전기	±2 ↔	변경된 우선순위	발전기
1	1		1	1
2	2		2	2
3	3		3	3
4	4(A)		6(B)	4
5	5		5	5
6	6(B)		4(A)	6
7	7		7	7
8	8		8	8
9	9		9	9
10	10	10	10	

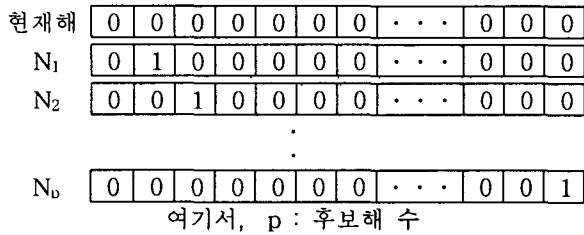
그림 4 우선순위 변경 방법

Fig. 4 Exchanging method of priority orders

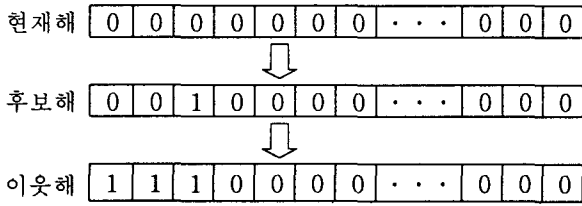
4. 2 이웃해 생성

타부 탐색시의 이웃해를 생성하기 위해서 우선, 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 초기해로부터 각 발전기의 on/off 상태를 순차적으로 1비트씩 변경시켜 후보해를 생성한다. 만일 10대의 발전기에 대해 24시간의 기동정지계획을 풀면 후보해의 수는 240개이다. 여기서 제약조건을 만족하는 것만 이웃해로 설정하게 되는데, 이렇게 할 경우 너무 많은 것이 이웃해에서 제외되어 탐색영역이 감소하므로 국부 최소값에 빠지기 쉽고, 탐색해의 질이 나빠질 수가 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 5(b)와 같이 후

보해 중에서 발전기 운전 및 정지시간 제약을 만족하지 못하는 것은 제약조건을 만족하도록 변경함으로써 이웃해가 될 수 있도록 하였다.



(a) 후보해 집합



(b) 최소 운전시간이 3시간인 경우 수정된 이웃해

그림 5 이웃해 생성 방법
Fig. 5 Creation method of neighbors

4. 3 이웃해 평가

생성된 이웃해를 평가하여 목적함수 값이 가장 좋은 해를 다음 탐색의 현재해로 설정하게 된다. 이때 계통의 크기가 작은 경우에는 그다지 문제가 되지 않으나, 대규모의 발전기 계통에 있어서는 탐색영역이 넓어 많은 이웃해가 존재하므로 이를 모두 평가하기 위해서 많은 계산시간이 요구된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 이웃해 평가시에 중복된 계산을 줄이는 방법을 사용하여 전체 평가시간을 크게 단축하였다.

우선 일반적인 평가방법에 의한 계산시간을 알아보자. 주어진 발전기 기동정지계획을 평가하기 위해서는 총 발전비용의 계산이 필요하다. 총 발전비용은 각 발전기의 기동 및 정지비용과 매시간대별로 경제급전해석에 의해 산출되는 각 발전기의 연료비용의 합으로 구할 수 있다. 경제급전해석을 위한 방법으로는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 계산과정이 간단하고 빠른 계산시간을 갖는 λ-반복법을 사용하였다. 이러한 방법에 의한 각 이웃해의 평가시간은 식 (6)과 나타낼 수 있다. M 개의 이웃해에 대해 g 반복횟수만큼 타부 탐색을 진행할 경우의 전체 평가시간은 식 (7)과 같다.

$$\text{평가시간} = E \cdot t + C \cdot n \tag{6}$$

여기서, E : 각 시간대별 경제급전 해석시간
 C : 각 발전기의 기동비용 해석시간
 t : 계획시간
 n : 발전기 수

$$\begin{aligned} \text{전체 평가시간} &= (E \cdot t + C \cdot n) \cdot M \cdot g \\ &= Et \cdot Mg + Ct \cdot Mg \end{aligned} \tag{7}$$

발전기 계통의 규모가 커질수록 평가해야 할 이웃해의 수는 증가하므로 일반적인 평가방법을 그대로 적용할 경우에는 전체 계산시간이 크게 늘어나게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존에는 탐색영역을 제한하여 소규모의 이웃해를 생성함으로써 평가시간을 단축하는 방법을 사용하였다. 그러나 이러한 방법은 탐색영역을 제한함에 따라 국부수렴의 가능성이 증가, 전역탐색능력이 떨어지는 문제를 가지고 있다.

본 논문에서는 대규모 계통에 대해서도 탐색 영역을 제한하지 않고 가능한 모든 이웃해를 평가할 수 있도록 하기 위해 빠른 평가방법을 제안한다. 제안한 방법은 2 단계의 평가방법 개선에 의해 평가시간을 획기적으로 단축함으로써 대규모 발전기 계통에 대해서도 매우 빠른 속도로 보다 전역적인 타부 탐색을 수행할 수 있게 한다.

단계 1) 현재해로부터의 중복계산 감소 방법: 모든 이웃해는 기본적으로 현재해로부터 1비트 변화시켜 생성한다. 따라서 생성된 이웃해는 변경된 비트를 제외한 모든 값이 현재해와 동일하므로 전체 평가과정을 시간별, 발전기별로 분리하여 변경된 부분만 재계산하도록 함으로써 평가시간을 크게 줄일 수 있다. 예를 들면 표 1에서 보는 바와 같이 11시의 5번 발전기의 on/off 상태가 변경된 경우, 다른 시간대의 경제급전 해석결과는 현재해와 동일하다. 단지 변경된 상태가 포함되어있는 시간대만 다시 경제급전해석을 하면 된다. 따라서 각 이웃해의 경제급전 계산시간은 24시간에 대한 계획일 경우 1/24로 줄어들음을 알 수 있다. 기동 및 정지비용 계산도 마찬가지로 5번 발전기에 대해서만 재계산이 요구된다. 따라서 10대의 발전기일 경우 계산량은 1/10로 줄어들게 된다. 식 (8)에서 보듯이 전체 이웃해의 평가시간은 현재해의 평가시간(①)과 각 이웃해의 평가시간(②)을 이웃해 수만큼 곱한 시간의 합으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \text{단계1의 전체평가시간} &= [\underset{\text{①}}{Et} + \underset{\text{②}}{Cn} + \underset{\text{②}}{(E+C)M}] \cdot g \\ &= E(t+M)g + C(n+M)g \end{aligned} \tag{8}$$

단계 2) 이전해로부터의 중복계산 감소 방법 : 타부 탐색법의 탐색과정은 현재해로부터 생성된 이웃해 중 가장 나은 해를 다음 탐색의 현재해로 설정하며 탐색을 진행하게 된다. 이때 현재해의 변화는 기본적으로 이웃해와 동일하게 한 비트만 변화게 된다. 따라서 이전 반복시에 생성된 이웃해 정보를 저장하고 있다면 새로이 생성되는 이웃해들의 평가값은 기존에 평가된 이웃해로부터 현재해의 변동분만큼 갱신함으로써 구할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 표 2에서 보는바와 같이 현재해가 11시의 5번 발전기로부터 9시의 4번 발전기로 변경된 경우 동일 시간대 또는 동일 발전기의 영향을 받지 않는 나머지의 이웃해들은 단지 현재해의 변동분만큼 갱신함으로써 이웃해를 평가할 수 있으며, 9시와 4번 발전기의 상태 변화를 갖는 이웃해만 다시 평가하면 된다. 따라서 단계 1에서의 이웃해 평가횟수에 비해서 경제급전해석시간은 최고 1/24만큼 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 식 (9)는 단계 2에 의한 평가시간을 나타낸 것이다. ①과 ②항은 첫 번째 반복시

표 1 단계 1에 의한 이웃해의 평가 부분
Table 1 Evaluation part by step 1

[h] unit	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																									

의 평가시간을 나타내며, ③항은 첫 번째 반복 이후의 평가시간을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{전체평가시간} &= \frac{Et+Cn}{\text{①}} + \frac{(E+C) \cdot M}{\text{②}} + \frac{(En+Ct)(g-1)}{\text{③}} \quad (9) \\ &= E[t+M+n(g-1)] + C[n+M+t(g-1)] \end{aligned}$$

표 2 현재해 변경에 따른 이웃해 평가 부분
Table 2 Evaluation parts of neighborhoods by change of current solution

[h] unit	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																									

평가시간은 크게 경제급전해석 부분과 기동 및 정지비용의 계산부분으로 나눌 수 있으나, 기동 및 정지비용 계산에 비해 경제급전 해석시간이 훨씬 많이 소요된다. 표 3은 평가시간의 대부분을 차지하는 경제급전 해석시간에 대해 제안한 평가방법과 일반적인 방법과의 계산량을 비교하여 나타낸 것이다. 표 2에서 보듯이 제안한 방법은 일반적인 평가 방법에 비해 계통의 크기와 계획시간이 클수록 더욱 효과적으로 계산량을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 4 타부 리스트 및 열망조건

타부 탐색법은 탐색 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 일정횟수만큼 금지하였다. 이때 열망조건을 이용하여 타부상태인 경우에도 이제까지 탐색한 해보다 더 좋은 값이 나온 경우에는

표 3 평가방법에 따른 경제급전 해석 비교
(반복횟수 g=100일 경우)

Table 3 Calculation times of economic dispatch according to evaluation methods

파라미터		평가횟수			평가횟수비			
계획시간 (t)	발전기수 (n)	이웃해수 (M)	일반적 방법 (A)	단계 1 (B)	단계 2 (C)	A/B	B/C	A/C
24	10	100	240,000	12,400	1,114	19.4	11.1	215.4
	110	1000	2,400,000	10,2400	11,914	23.4	8.6	201.4
48	10	100	480,000	14,800	1,138	32.4	13.0	421.8
	110	1000	4,800,000	104,800	11,938	45.8	8.8	402.1

다음 탐색시의 현재해가 될 수 있도록 하였다. 이러한 열망 조건은 타부 리스트에 의한 수렴속도 저하를 보완하여 보다 빠르게 수렴하도록 한다.

4. 5 다양화 전략

일정 반복횟수 동안 해가 개선이 되지 않으면 새로운 탐색 영역으로 이동할 수 있도록 다양화 과정을 수행한다. 그림 6은 병렬 시스템에서 각 프로세서의 안내해(guiding solution)를 이용한 다양화 과정을 보여주고 있다. 대상 프로세서는 연결된 각 프로세서의 최적해를 안내해로 설정한 후, 안내해의 일부 발전계획을 대상 프로세서의 발전기 계획으로 대체함으로써 탐색 경로를 재설정한다. 이러한 방법에 의해 국부수렴값에 수렴한 대상 프로세서의 현재해는 새로운 영역을 탐색할 수 있다.

그림 7은 본 논문에서 제안한 병렬 타부 탐색법의 전체 순서도를 나타낸 것이다. 각 프로세서는 우선순위 변

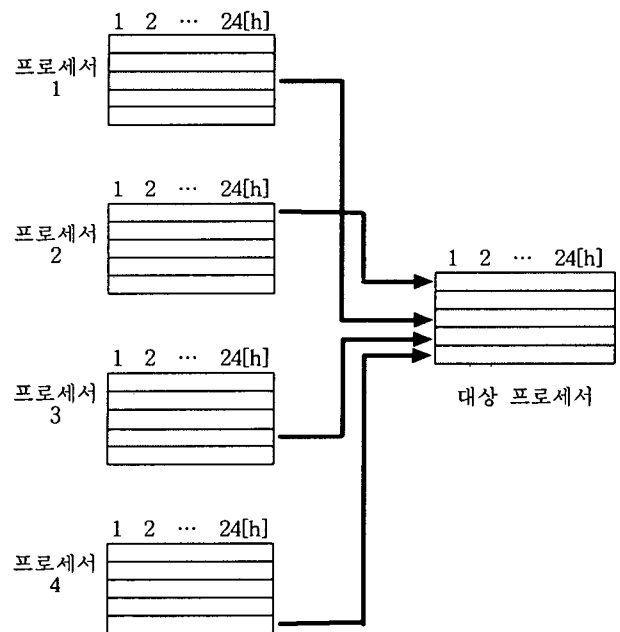


그림 6 각 프로세서의 안내해를 이용한 다양화 방법
Fig. 6 Diversification method with guiding solutions from each processor

경에 의해 서로 다른 초기해로부터 종료조건을 만족할때 까지 독립적으로 타부 탐색을 수행한다. 각 프로세서의 결과 중 가장 좋은 값을 이용함으로써 새로운 발전기 기동정지계획을 수립하게 된다.

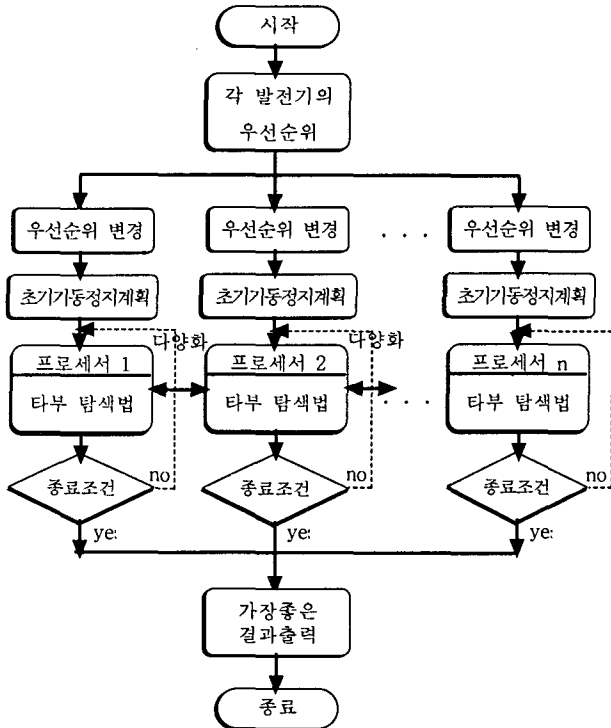


그림 7 병렬 타부 탐색법의 전체 순서도
Fig. 7 Flowchart of parallel tabu search

5. 사례 연구

본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해서 참고문헌[6]의 발전기 계통에 대해서 16개의 병렬 프로세서 (PowerPC 604 100MHz)를 가지는 분산처리형 병렬 시스템을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 프로세서의 연결구조는 하이퍼 큐브 구조를 사용하였으며, 이때 각 프로세서는 최대 4개의 프로세서와 직접 통신이 가능하다. 제안한 방법은 10대의 소규모 발전기 계통과 110대의 대규모 발전기 계통에 대해 수행하였으며, 다른 방법들과 결과를 비교·검토하였다.

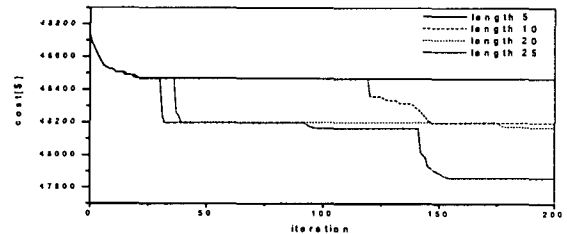
5. 1 소규모 발전기 계통(10대 발전기)

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해 참고문헌[6]에 있는 발전기 파라미터를 이용하였으며, 표 4는 10대 발전기 계통에서 병렬 타부 탐색법 수행시의 시뮬레이션 계수를 나타내었다. 이때 이웃해 수는 매번 다르므로 모든 시뮬레이션을 수행한 후 평균값을 나타낸 것이다. 각 프로세서는 최적해가 일정횟수동안 개선되지 않을 경우에 다양화 전략을 적용하였으며, 모든 프로세서가 최대 반복횟수를 만족할 경우 종료하도록 하였다. 일반적으로 타부 탐색법은 타부 리스트 길이에 따라 수렴특성이 다르므로

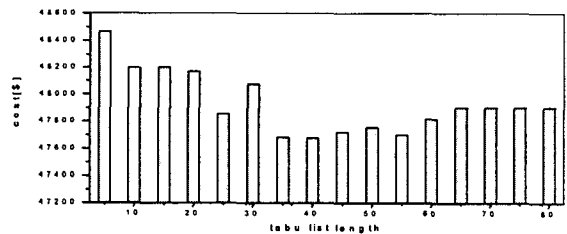
이에 따른 영향을 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 보는 것처럼 동일한 초기해에 대해 타부 리스트 길이를 달리한 결과, 초기에는 수렴특성이 동일하였고, 어느 정도 수렴한 이후에는 서로 다른 수렴특성을 나타내었다. 이때 타부 리스트 길이를 적절히 선정할 경우 수렴값이 가장 우수한 특성을 보였다. 그러나 전체적으로 타부 리스트의 길이의 변동에 대해 수렴특성의 변화는 그다지 크지 않은 것을 알 수가 있었다. 따라서 본 논문에서는 타부 리스트 길이를 표 4처럼 10으로 설정하여 전체 시뮬레이션을 수행하였다.

표 4 병렬 타부 탐색법의 시뮬레이션 계수
Table 4 Simulation parameters of PTS

파라미터	최대반복횟수	우선순위변경		Tabu list 크기	다양화 조건	평균 이웃해 수
		변경횟수	범위			
설정값	200	5	±5	10	30[iter.]	109



(a) 타부 리스트에 따른 총 비용 추이



(b) 타부 리스트에 따른 총 비용

그림 8 타부 리스트 길이에 따른 결과(초기값 48,747[\$])
Fig. 8 Total costs for different tabu list length

표 5는 병렬 프로세서의 수에 따른 병렬 타부 탐색법의 시뮬레이션 결과를 5번 수행한 후 평균하여 나타낸 것이다. 각 프로세서는 변형된 우선순위법을 이용하여 서로 다른 초기해로부터 독립적으로 탐색을 진행하며, 국부 수렴한 경우에는 인접 프로세서와 다양화 과정을 수행하였다. 표 5의 결과로부터 사용 프로세서의 수가 증가함에 따라 인접한 프로세서의 수도 증가하므로 보다 많은 양의 정보를 교환하게 되어, 평균값이 다소 개선되는 것을 알 수가 있다. 그러나 탐색 시간은 인접 프로세서와의 통신 부하 증가로 다소 증가하였다. 또한 가장 좋은 값의 경우 2개의 프로세서를 이용한 경우가 16개의 프로세서를 이용한 경우보다 더 낮은 비용을 얻을 수 있었는데, 소규모 계통의 기동정지 계획 문제일 경우에는 다양화 과정시 인

접 프로세서에 의한 프로세서간의 정보 교환량이 많아질 경우 오히려 국부수렴의 가능성이 증가함을 알 수 있다. 따라서 소규모 발전기 기동정지 계획에 대해서는 각 프로세서간의 정보교환에 의한 전역탐색이 가능하도록 다양화 과정시 프로세서간의 정보교환량을 적절히 제한할 필요가 있다.

표 5 프로세서 수에 따른 시뮬레이션 결과

Table 5 Simulation results for different processor number

프로세서 수	인접 프로세서	비용			평균시간
		초기값	평균값	가장 좋은값	
2	1	48547	47628	47263.1	7.6
4	2	48521	47484	47265.0	8.7
8	3	48612	47449	47263.1	10
16	4	48598	47483	47271.3	12

표 6은 10대 발전기에 대해 기존의 방법[6] 및 제안한 방법에 의해 구해진 발전비용을 나타내고 있다. 표 6에서 보듯이, 제안한 방법은 종래의 방법보다 계산시간 및 총 비용면에서 더 나은 성능을 얻을 수 있었다. 동일한 총 비용을 얻은 동적계획법에 비해서는 제안한 방법이 계산 시간면에서 훨씬 빠른 시간내에 최적해를 찾을 수 있었다. 표 7은 제안한 방법에 의해 구해진 발전기 기동정지 계획을 나타낸 것이며, 그림 9는 제안한 방법의 총 발전 비용 추이를 우선순위법에 의해 구해진 값과 비교하여 나타내었다.

표 6 기존의 방법 및 제안한 방법으로 구해진 총 비용

Table 6 Total generation costs by conventional and proposed method

방법	우선순위법 (PR)	유전 알고리즘 (GA)	Hybrid GA[5]	미정계수법 (LR)	동적계획법 (DP)	병렬 타부 (PTS)
발전 비용[\$]	48698	47596	47576	47511	47263	47263
계산 시간[sec]	0.1	221	3.8	1	20[min]	7.6
우선순위법에 대한 비용 개선비[%]	-	2.26	2.30	2.44	2.95	2.95

표 7 구해진 발전기의 기동 및 정지계획

Table 7 Unit commitment schedule for 10 units by proposed PTS

unit	Hours(1-24)
1	111111111111111111111111111111
2	1111111111110000000000000000
3	1100000000000000000000000000
4	111111111111111111111100000000
5	111111111111111111111111111111
6	000000000000000000000000000001
7	111111111111111111111111111111
8	000000000000000000000000000000
9	111111111111111111111111111111
10	111111111111111111111111111111

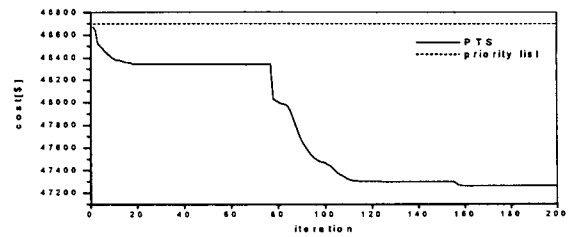


그림 9 제안한 방법에 의한 비용 수렴 특성(10대 발전기)
Fig. 9 Convergence characteristics of proposed method for the 10 unit system

5. 2 대규모 발전기 계통(110대 발전기)

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위하여 110대 발전기의 계통에 대해서도 동일한 방법으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시간별 부하 및 각 발전기의 파라미터는 앞절과 마찬가지로 참고문헌[6]의 값을 이용하였으며, 표 8은 110대 발전기 계통에서 사용된 병렬 타부 탐색법의 시뮬레이션 계수를 나타낸 것이다.

표 8 병렬 타부 탐색법의 시뮬레이션 계수

Table 8 Simulation parameters of PTS

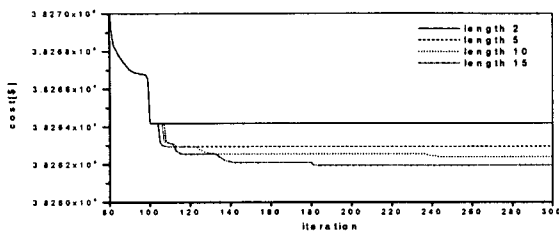
파라미터	최대 반복횟수	우선순위변경		Tabu list 크기	다양화 조건	평균 이웃해 수
		변경 횟수	범위			
설정값	300	10	±20	10	30[iter.]	1393

그림 10은 대규모 계통에서의 타부 리스트 영향을 분석한 것으로, 소규모 계통에서와 마찬가지로 적절한 타부 리스트 길이에 의해 탐색 결과를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 그렇지만, 그림에서 보듯이 타부 리스트의 영향은 탐색 해가 어느 정도 수렴한 이후에 나타날 뿐만 아니라 그 영향도 비교적 적어, 타부 리스트의 변화만으로 전역해를 탐색하기에는 한계가 있음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 소규모 계통에서와 동일하게 타부 리스트 길이를 고정한 후, 시뮬레이션을 수행하였다. 표 9에서는 프로세서 수가 증가함에 따른 탐색 성능의 변화를 나타내고 있는데, 소규모 계통과 달리 프로세서 수와 인접 프로세서수가 증가함에 따라 전역 탐색능력이 크게 개선됨을 알 수 있다. 그러나 평균 탐색 시간은 인접프로세서의 증가에 따라 통신 부하의 증가로 다소 증가하였는데, 이것은 보다 효율적인 다양화 과정의 도입에 의해 통신부하를 감소시킴으로서 개선할 수 있을 것이다.

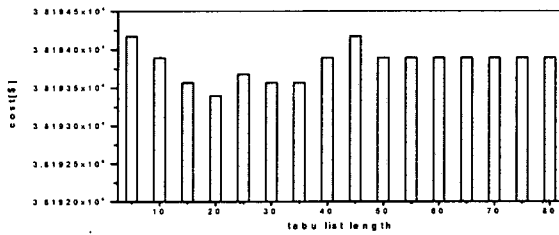
표 9 프로세서 수에 따른 시뮬레이션 결과

Table 9 Simulation results for different processor number

프로세서 수	인접 프로세서	비용			평균시간 [sec]
		초기값	평균값	가장좋은값	
2	1	3,948,555	3,821,249	3,817,648	170
4	2	3,986,842	3,820,293	3,817,542	195
8	3	3,971,007	3,821,835	3,816,627	214
16	4	3,981,848	3,821,051	3,813,465	226



(a) 타부 리스트에 따른 총 비용 추이



(b) 타부 리스트에 따른 총 비용

그림 10 타부 리스트 길이에 따른 결과(초기값 4,000,509[\$])
Fig. 10 Total costs for different tabu list length

대규모 계통에서 병렬 타부 탐색법을 적용할 경우 탐색영역이 넓기 때문에 일반적으로 많은 이웃해 영역이 발생한다. 따라서 많은 이웃해에 의한 과도한 평가시간이 요구되는데, 이러한 문제를 해결하기 위해 일반적으로 이웃해 영역을 줄이는 방법을 사용한다. 그러나 이것은 국부탐색에 의한 국부수렴의 가능성을 높이는 결과를 초래한다. 본 논문에서는 2 단계의 개선된 평가방법을 사용함으로써 이웃해의 평가시간을 획기적으로 줄임으로서 이웃해 영역을 축소하지 않고서도 문제를 해결할 수 있도록 하였다. 제안한 방법에 의한 속도개선의 결과를 표 10에 보였다. 표 10에서 보듯이 발전기 수가 적을 경우에는 평가시간의 비율이 전체 프로그램 수행시간에 비해 상대적으로 적으므로 개선비율이 비교적 낮은 반면, 발전기 수가 많을 경우 일반적인 평가방법에 비해 속도 개선비가 매우 커짐을 알 수 있다. 표 10의 결과는 통신 지연 등의 기타 요인을 제외하기 위해 단일 프로세서에 의한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

본 논문에서 제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해 우선 순위법(PR), 유전알고리즘(GA), 혼합 유전알고리즘(HGA)과 같은 기존의 방법과 비교하였다. 표 11에서 보듯이 제안한 방법은 개선된 평가방법 및 병렬 프로세서에 의한 타부 탐색법을 이용함으로써 기존의 방법보다 보다 빠른 시간에 더 나은 해를 구할 수 있음을 알 수 있다. 특히 제안한 방법에 의해 구해진 발전비용은 우선순위법에 비해 1% 이상의 개선을 가져옴으로서 대규모 계통에서의 발전기 기동정지 계획문제에 있어 매우 효과적인 방법으로 볼 수 있다. 그림 11은 제안한 방법에 의한 총 발전비용의 추이를 우선순위법에 의한 결과와 비교하여 나타내었다. 그림 11에서 보는 것처럼 제안된 방법은 변형된 우선순위에 의한 새로운 초기해로부터 빠르게 최적해 부근으로 수렴해감을 알 수 있다.

표 10 제안한 방법에 의한 계산시간 개선비율

Table 10 Reduction of computation time by proposed method

파라미터				계산시간[sec]			계산시간비		
시간	발전기 수	평균 이웃해 수	반복 횟수 [iter.]	일반적 방법 (A)	단계 1 (B)	단계 2 (C)	A/B	B/C	A/C
24	10	109	200	118	22	7	5.4	3.1	16.9
	110	1393	300	16188	1671	157	9.7	10.6	103.1

표 11 각 방법에 의해 구해진 발전 비용(110대 계통)

Table 11 Total generation costs by conventional and proposed method

방법	PR	GA	HGA	PTS
발전비용[\$]	3,854,821	3,834,467	3,826,775	3,813,465
시간	1 [sec]	12 [h]	20 [min]	223 [sec]
우선순위법에 대한 비용개선비[%]	-	0.53	0.73	1.07

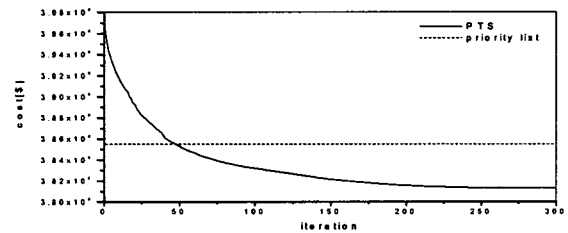


그림 11 제안한 방법에 의한 비용 수렴 특성
Fig. 11 Convergence characteristics of proposed method for the 110 unit system

6. 결론

본 논문에서는 병렬 프로세서에서 병렬 타부 탐색법을 이용한 대규모 발전기 기동정지계획 문제를 해결하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 각 프로세서마다 서로 다른 초기해로부터 독립적으로 타부 탐색을 수행함으로써 초기해로 인한 국부수렴의 가능성을 감소시켰으며, 각 프로세서에 의한 국부수렴시에는 프로세서와의 통신에 의한 다양화 과정을 도입함으로써 보다 전역적인 탐색을 할 수 있도록 하였다. 또한 대규모의 발전기 기동정지 문제에 대해 향상된 평가방법을 사용함으로써 타부 탐색 속도를 크게 개선하였다. 제안한 방법의 유용성을 평가하기 위하여 참고문헌[6]의 연구사례에 대해 시뮬레이션 하였으며, 시뮬레이션 결과, 제안한 방법은 우선순위법, GA, HGA 등과 같은 기존의 방법에 비해 전역탐색능력뿐만 아니라, 보다 빠른 시간에 우수한 해를 구할 수 있음을 알 수 있었다. 특히 제안한 평가방법은 계통의 규모가 커질수록 속도향상의 효과가 증대함으로써 많은 계산을 요구하는 실제 계통 문제에 적용할 경우 큰 효과가 기대된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 정보통신부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 논 문

[1] J. Wood and F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, And Control", pp. 131-170, 1996

[2] Khodaverdia, E., Bramellar, A. and Dunnet, R. M. "Semirigorous thermal unit commitment for large scale electrical power systems", Proceedings IEEE Part C, pp. 157-164, 1986

[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 on PAS, Vol 10, pp. 1212-1218, 1981

[4] Zhuang, F. and Galliana, F. D. "Towards a more rigorous and practical unit commitment by Lagrangian relaxation", IEEE Transactions on PWRs, Vol. 3, pp. 763-773, May 1998

[5] S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis, V. Petridis, "A Genetic Algorithm Solution to the Unit Commitment Problem", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 11, No. 1, pp. 83-92, Feb. 1996

[6] S. O. Orero and M. R. Irving. "Large scale unit commitment using a hybrid genetic algorithm", Elsevier Science Ltd, pp. 45-55, 1996

[7] F. Glover, "Tabu Search - Part I", ORSA Journal on Computing Vol. 1. No. 3, pp. 190-206, 1989

[8] Fred Glover, Manuel Laguna, "Tabu Search", Kluwer Academic Publishers, 1997

[9] E. G. Talbi, Z. Hafidi, J-M. Geib, "A Parallel adaptive tabu search approach", Elsevier Parallel Computing 24, pp. 2003-2019, 1998

[10] Hiroyuki Mori and Takayuki Usami. "Unit Commitment Using Tabu Search with Restricted Neighborhood", Intelligent Systems Application to Power Systems, Proceedings, ISAP '96, International Conference, pp. 422-427, 1996

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

[12] 천희주, 김형수, 황기현, 문경준, 박준호, "Tabu 탐색법을 이용한 화력 발전기의 기동정지계획", 대한 전기학회 논문지, 49A권 2호, pp. 70-78, Feb. 2000

저 자 소 개



김형수 (金亨洙)

1972년 1월 26일 생. 1994년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 연구분야는 지능 시스템 및 전력계통 최적운용 분야

Tel : 051-510-3188

E-mail : kimhsu@hyowon.pusan.ac.kr



문경준 (文景俊)

1972년 10월 25일 생. 1994년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 수료

Tel : 051-510-3188

E-mail : kjmun@hyowon.pusan.ac.kr



조덕환 (趙德桓)

1974년 10월 30일 생. 2000년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 2000년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정. 현재 연구분야는 병렬 알고리즘, 진화연산, Tabu Search, 발전 기기동정지계획 등

Tel : 051-510-3188

E-mail : t2move@hanmail.net



황기현 (黃琪鉉)

1968년 3월 1일 생. 1994년 경성대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 2000년 2월 부산대 일반대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 부산대 컴퓨터 및 정보통신 연구소 기금교수

Tel : 051-510-3188

E-mail : hwanggh@hyowon.pusan.ac.kr



박준호 (朴俊灑)

1955년 9월 17일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1978년~1981년 한국전기 연구소 연구원. 1981년~1984년 충남대 공대 전기공학과 전임강사 및 조교수. 1989년~1990년 Pen. State Univ. Visiting Scholar. 현재 부산대 공대 전기공학과 교수

Tel : 051-510-2370

E-mail : parkjh@hyowon.pusan.ac.kr