

## Thermal Unit Commitment using Tabu Search

千 熙 周\* · 金 亨 洙\*\* · 黃 琪 鉉\*\* · 文 景 俊\*\* · 朴 俊 灝\*\*\*

(Hee-Ju Chun · Hyung-Su Kim · Gi-Hyun Hwang · Kyeong-Jun Mun · June Ho Park)

**Abstract** - This paper proposes a method of solving a unit commitment problem using tabu search (TS) which is heuristic algorithm. TS is a local search method that starts from any initial solution and attempts to determine a better solution using memory structures. In this paper, to reduce the computation time for finding the optimal solution, changing tabu list size as intensification strategy and 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 priority list, genetic algorithm(GA), and hybrid GA.

**Key Words** : Tabu Search, Unit Commitment, Tabu List

### 1. 서 론

발전기의 기동정지계획은 전력시스템의 운용계획에 있어 매우 중요한 문제로서, 일간 또는 수일간의 총 발전비용을 최소화하는 발전기의 기동 및 정지계획을 수립하는 것이다. 최근에는 전력 수요가 급증하여 전력시스템은 복잡화 및 거대화됨으로써 이에 따라 제반조건을 충분히 고려한 경제적 운용방법의 필요성이 더욱 높아졌다. 또한 효율적인 발전계획은 신뢰도를 향상시켜 불시의 사고 발생시 시스템의 붕괴를 막을 수 있으며, 화석연료의 사용을 줄여 근래에 주로 제기되는 환경문제에도 효과적으로 대처할 수 있다.

이러한 발전기의 기동정지계획문제를 해결하기 위해서 우선순위법, 동적계획법, Branch and Bound, Benders Decomposition, 혼합 정수법(mixed integer programming), 라그랑지 미정계수법(Lagrangian relaxation method) 등과 같은 수치해석적 방법[1-5]이 제안되었다. 그러나 이러한 방법들은 다양한 제약조건을 고려하기가 힘들며 전역최적해를 구하기 어려운 단점이 있다. 최근에는 최적화 기법으로서 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing), 전문가 시스템, 신경회로망 등을 이용한 방법[6-8]들이 제안되었지만, 많은 계산시간이 소요되거나 국부 최적해에 수렴하는 문제점이 있다. 또한 유전알고리즘을 이용한 방법[9]이 비교적 좋은 결과를 얻고 있지만, 스트링의 구성 및 제약조건 고려시 경험적 방법이 요구되며 전역최적해로 수렴하는데 많은 계산

시간이 요구된다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 경험적인 탐색방법인 Tabu 탐색법[10-11]을 이용하여 발전기 기동정지계획문제를 해결하였다. Tabu 탐색법은 국부탐색 알고리즘으로 주어진 초기해를 기점으로 하여 탐색한 지점을 메모리에 기억시킴으로써 효과적으로 새로운 영역을 탐색해 나가는 방법이다. Tabu 탐색법의 주요 탐색전략으로는 현재 해 주변을 보다 세밀하게 탐색함으로써 국부탐색을 수행하는 강화전략과 전역탐색을 하기 위해 탐색하지 않은 새로운 영역으로 탐색지점을 변경하는 다양화전략이 있다. 본 논문에서는 강화 및 다양화 전략으로 Tabu list 크기 변경 및 Path relinking 방법을 도입하여 보다 빠른시간내에 전역 최적해를 구할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안한 방법에 대한 유용성을 입증하기 위해서 10대 및 110대 발전기 시스템[12]에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며 이때 제안한 방법이 수렴속도 및 최소비용의 관점에서 우선 순위법, GA 및 hybrid GA 보다 우수한 특성을 나타냄을 보였다.

### 2. 문제의 정식화

발전기 기동정지계획문제는 일간 또는 수일간의 발전계획을 수립하기 위하여 여러 제약조건을 만족하면서 총 발전비용을 최소화하는 발전기의 조합을 결정하는 것이다. 총 발전비용은 연료비용, 기동비용, 정지비용 등으로 구성된다. 연료비용은 열 소비율과 연료 가격에 의해 계산되며, 기동비용은 발전기가 정지한 시간에 대한 함수로 표현된다. 그리고 정지 비용은 각 발전기에 대해 일정한 값으로 주어진다. 기동정지계획에서 고려해야 할 제약조건으로는 시스템의 수급균형조건, 운전 예비력, 발전기의 발전량, 최소 운전 및 정지시간 등의 제약을 만족해야 한다. 본 논문에서 사용한 목적함

\* 準 會 員 : 釜 山 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 碩 士 課 程

\*\* 正 會 員 : 釜 山 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程

\*\*\* 正 會 員 : 釜 山 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1999 年 11 月 29 日

最 終 完 了 : 1999 年 12 月 20 日

수 및 제약조건은 다음과 같다.

1) 목적함수 : 발전기의 조합에 의한 발전비용을 최소화 하는데 있어서 목적함수는 여러 가지 방법으로 선정할 수 있으나 본 연구에서는 연료비용, 기동비용, 정지비용으로 구성된 비용함수를 이용하여 식 (1)과 같이 목적함수를 선정 하였다.

$$\text{목적함수} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [F_{i,t}(P'_i) + SC_{i,t} + SD_{i,t}] \quad (1)$$

여기서,  $F_{i,t}(P'_i) = a_i + b_i P'_i + c_i (P'_i)^2$

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

$$SD_{i,t} = \delta$$

$F_{i,t}$  : t 시간에서 i 번째 발전기의 연료비용

$SC_{i,t}$  : t 시간에서 i 번째 발전기의 기동비용

$SD_{i,t}$  : t 시간에서 i 번째 발전기의 정지비용

$P'_i$  : t 시간에서의 i 번째 발전기의 발전출력 [MW]

$a_i, b_i, c_i$  : i 번째 발전기의 비용함수의 계수

$\sigma_i, \tau_i, \delta_i$  : i 번째 발전기의 기동비용 계수

$T_{off,i}$  : i 번째 발전기가 연속으로 정지된 시간

$\delta$  : 정지비용 상수

N : 총 발전기 수

T : 발전계획 시간

2) 제약조건 : 부하, 발전출력, 발전기 최소 운전/정지 시간 및 운전 예비력 등의 제약조건을 고려하였다.

a) 부하 조건

$$\sum_{i=1}^N P'_i = PD_t, \quad t=1, 2, 3, \dots, T \quad (2)$$

여기서,  $PD_t$  : t 시간의 부하 [MW]

b) 발전출력 제약조건 : 각 발전기는 발전출력의 최대 및 최소 한계를 가진다.

$$P_i^{MIN} \leq P'_i \leq P_i^{MAX} \quad (3)$$

여기서,  $P_i^{MIN}$  : i 발전기의 최소 발전출력 [MW]

$P_i^{MAX}$  : i 발전기의 최대 발전출력 [MW]

c) 발전기 최소 운전/정지 시간 : 발전기의 운전시간은 최소운전시간(minimum up time : MUT)보다 크거나 같아야 하고, 발전기의 정지시간은 최소정지시간(minimum down time : MDT)보다 크거나 같아야 한다.

$$T_{on,i} \geq MUT_i, \quad 1 \leq i \leq N \quad (4)$$

$$T_{off,i} \geq MDT_i, \quad 1 \leq i \leq N \quad (5)$$

여기서,  $T_{on,i}$  : 발전기 i 가 연속으로 기동된 시간

$T_{off,i}$  : 발전기 i 가 연속으로 정지된 시간

$MDT_i$  : i 번째 발전기 최소 정지 시간

$MUT_i$  : i 번째 발전기 최소 기동 시간

d) 운전 예비력 조건(spining reserve)

$$\sum_{i=1}^N P_i^{Max} u_{i,t} = PD_t + R_t, \quad t=1, 2, 3, \dots, T \quad (6)$$

여기서,  $P_i^{Max}$  : i 번째 발전기의 최대발전용량 [MW]

$R_t$  : t 시간에서의 운전 예비력 [MW]

$u_{i,t}$  : 발전기가 기동상태이면 1, 정지상태이면 0

### 3. Tabu 탐색법

1980년대 중반에 Glover에 의해서 연구되기 시작한 Tabu 탐색법은 경험적인 최적화 알고리즘으로 일반적인 수치적 방법에 비해 국부 최소값에 빠질 위험이 적으면서 유전 알고리즘이나 시뮬레이트 어닐링과 같은 전역 최적해 탐색방법에 비해 대상 문제에 관한 지식을 활용하기가 유리한 탐색기법이다. 기존의 최적화 알고리즘은 대상 문제의 복잡도가 높고 탐색공간이 클 경우 최적해에 수렴하기 위해 많은 계산시간이 소요된다는 단점을 가진다. 이에 비해 Tabu 탐색법은 후보해의 생성에 직접 관여함으로써 복잡한 문제에 대해 효율적인 탐색을 가능하게 함으로써 빠른 수렴속도를 가진다. 그리고 다른 최적화 알고리즘과 결합하기 쉬운 특성 때문에 근래에는 여러 분야에서 활발히 연구되고 있다 [10-11].

Tabu 탐색법은 경험적인 최적화 알고리즘으로써 다른 최적화 탐색 알고리즘에 비해 최적해 탐색속도가 비교적 빠르고 알고리즘이 단순하여 쉽게 프로그램화 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 Tabu 탐색법의 최적해 탐색성능은 초기해, 이웃해 선정, Tabu List의 크기 등의 영향을 받는다. 초기해를 잘못 선정하면 국부 최소값에 수렴할 가능성이 있기 때문에 일반적으로 전문가의 경험, 또는 수치적 방법으로 초기해를 선정한다. 이웃해의 정의 및 크기는 대상 문제나 탐색 전략에 따라 달라지는데, 이웃해를 잘못 선정할 경우 불필요한 탐색으로 인해 탐색영역이 증가하고 수행시간이 많이 소요된다. 새로운 이웃해를 탐색하는 동안에 이전에 탐색한 영역을 다시 탐색하는 것을 방지하기 위해 Tabu List를 사용한다. Tabu List는 이전에 탐색했던 해의 속성을 저장하며 Tabu List의 크기는 탐색의 진행 방향과 밀접한 관계가 있다. Tabu List의 크기가 클수록 이전에 탐색되었던 해가 오랫동안 재탐색되지 않게 함으로써 다양한 탐색을 하도록 하는 역할을 하며, 반면에 Tabu List의 크기가 작으면 이런 제약이 약해지므로 한번 탐색했던 곳이라도 재탐색될 확률이 높아 같은 탐색공간을 반복적, 세부적으로 탐색하게 된다. 즉 Tabu List의 사용을 통해 한번 방문되었던 국부 최적해를 재방문하는 것을 방지할 수 있으며 탐색공간을 다양하게 또는 한곳을 집중적으로 탐색할 수 있다. 그러나 Tabu List에 있는 해라 할지라도 평가 결과가 설정된 조건을 만족할 경우에는 이를 새로운 이웃해로 선정할 수 있는데 이를 열망 조건(aspiration criterion)이라고 한다. 일반적으로 현재까지의 최적해보다 Tabu List에 속한 해의 평가 결과가 더 좋은 경우에는 열망 조건이 만족된다.

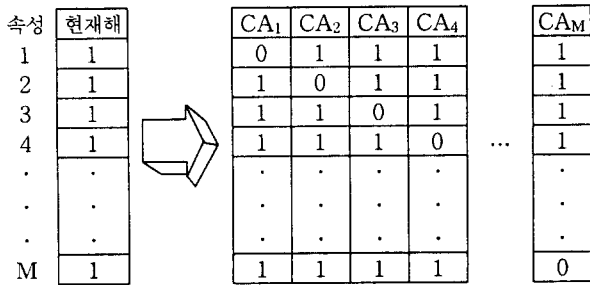
4. Tabu 탐색법을 이용한 발전기의 기동정지계획

본 논문에서는 발전기 기동정지계획문제에 Tabu 탐색법을 적용하는데 있어, 소규모 발전기계통과 대규모 발전기계통으로 나누어 각각 이웃해의 선정 및 다양화 방법을 달리 설정하였다. 대규모 발전기 계통에 있어서는 탐색영역이 매우 넓기 때문에 소규모 계통과 동일한 이웃해 선정방법을 적용할 경우 탐색속도를 느리게 할 뿐만 아니라 최적해로 수렴하기가 매우 어려워진다. 계통규모에 따라 본 논문에서 적용한 이웃해 선정방법과 다양화 방법은 다음과 같다.

4.1 이웃해 선정방법

1) 소규모 계통에서의 이웃해 선정

소규모 계통에서 이웃해를 선정하기 위한 방법은 그림 1과 같다. 먼저 모든 발전기의 일간 계획을 하나의 스트링으로 구성한 후 이를 현재해로 설정하며, 현재해를 이용하여 각 발전기의 on/off 상태를 순차적으로 바꾸어 후보해를 생성하게 된다. 만일 발전기 수가 10대이고 24시간 동안의 기동정지계획을 풀면 후보해 수는 240개가 된다. 후보해 중에서 제약조건을 모두 만족하는 경우를 이웃해로 선정하였다.



여기서, CA<sub>i</sub> : 현재해에 대한 i 번째 후보해  
 M : 속성  
 소규모 계통일 경우 : M = 발전기 수 × 계획시간  
 대규모 계통일 경우 : M = 발전기 수

그림 1 후보해 결정방법

Fig. 1 Determining method a candidate solution

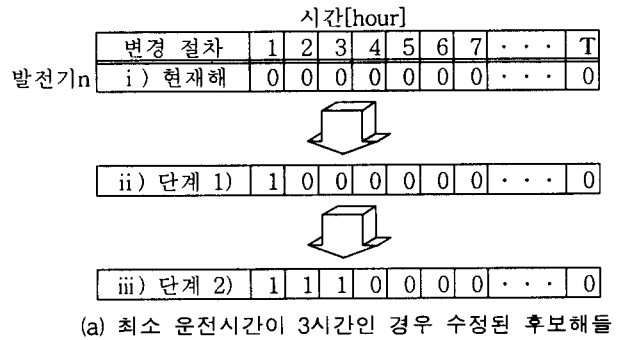
2) 대규모 계통에서의 이웃해 선정

대규모 계통에서는 소규모 계통과 같은 방법으로 이웃해를 선정할 경우 탐색영역이 매우 넓기 때문에 전역최적해를 찾기가 어려울 뿐만 아니라 계산시간이 많이 소요된다. 이런 문제점을 해결하기 위해서, 일간 24시간에 대한 발전 계획을 시간대별로 나누어 이웃해를 생성함으로써 한번에 고려해야 할 탐색 영역을 감소시켰다. 발전기의 최소 운전 및 정지시간 제약조건을 포함하면서 이웃해를 선정하기 위한 과정은 다음과 같다.

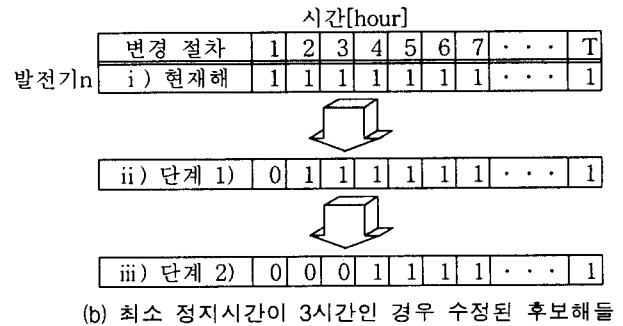
단계 1) 앞의 그림 1에서 보는 것처럼, 일간 발전기 기동정지 계획 중 임의의 시간대에 대해서 발전기의 기동 및 정지상태, 즉 현재해가 주어졌을 때, 그 시간대에 대해서 각각의 발전기 on/off 상태를 순차적으로 바꾸어 N개의 후보해

를 생성한다. 이 후보해 중 발전기 운전 예비력, 최소 운전 및 정지시간을 만족하는 해를 이웃해로 선정한다.

단계 2) 단계 1)에서 이웃해로 선정되지 않은 후보해 중에서 발전기 운전 예비력 제약조건을 만족하는 후보해는 발전기 최소 운전 및 정지시간 제약조건을 만족하도록 변경시켰으며, 이를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)에 나타낸 바와 같이 후보해에 의해 현재해의 발전기 상태가 off에서 on으로 변경된 경우에는 최소운전시간 제약조건을 만족하지 못한다. 따라서 최소운전시간 제약조건을 만족하도록 현재시간부터 최소운전시간만큼 발전기의 상태를 on으로 변경하였다. 그림 2(b)는 (a)의 경우와 반대로 현재해의 발전기 상태가 on에서 off로 변경된 경우를 나타내고 있다. 이 경우에는 최소정지시간 제약을 만족하지 못하기 때문에 제약조건을 만족하도록 현재시간부터 최소정지시간만큼 발전기의 상태를 on에서 off로 변경하였다.



(a) 최소 운전시간이 3시간인 경우 수정된 후보해들



(b) 최소 정지시간이 3시간인 경우 수정된 후보해들

그림 2 단계 2에 의한 이웃해 생성 방법

Fig. 2 Defining method a neighborhood solution by step 2)

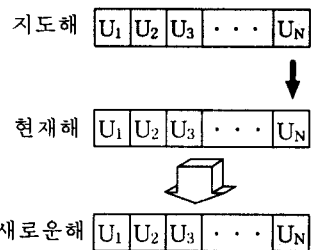
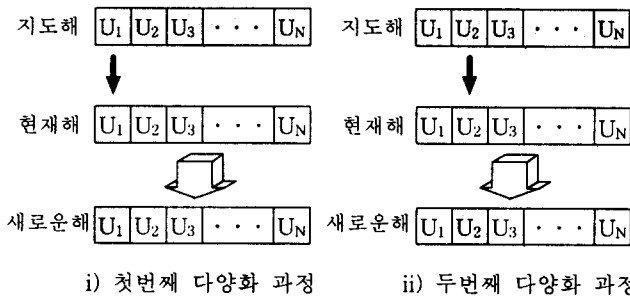
4.2 다양화 전략

1) 소규모 계통에서의 다양화 전략

일정 반복횟수 동안 해가 개선되지 않을 경우 Path relinking을 이용한 다양화 과정을 수행하였다. 본 논문에서 사용한 Path relinking 방법은 변경된 우선순위법에 의해 생성된 해를 지도해로 이용하여 현재해에 반영함으로써 새로운 탐색영역으로 이동할 수 있게 한다. 식 (7)에서 보는 바와 같이 제안된 우선순위법은 발전기 최대용량이 클수록 높은 우선순위를 부여하였고, 발전기의 최대부하 평균비용이 높을수록 낮은 우선순위를 부여하였다. λ값을 조금씩 증가

시킴에 따라 우선순위가 변경되는데 이러한 과정을 통해 가장 낮은 비용을 갖는 기동정지계획을 지도해로 사용하였다. 그림 3은 본 논문에서 사용한 다양화 전략인 Path relinking 방법을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 다양화과정이 수행되면 지도해의 첫번째 발전기 계획부터 현재해에 대입되고 일정반복횟수동안 해가 개선되지 않으면 2번째 발전기의 계획이 현재해에 대입된다. 이러한 과정으로 각 발전기의 모든 시간에 관한 계획이 순차적으로 지도해의 계획으로 바뀌므로써 지도해의 속성을 반영하게 된다.

$$\text{우선순위} = \text{최대용량} - \text{최대부하평균비용} \times \lambda \quad (7)$$



iii) N번째 다양화 과정

N : 전체 발전기 대수

U<sub>i</sub> : i 번째 발전기 기동정지계획, i = 1, ..., N

그림 3 소규모 계통에서의 다양화 전략

Fig. 3 Diversification strategies for small systems

2) 대규모 계통에서의 다양화 전략

Tabu 탐색시 일정반복횟수 동안 최적해가 개선되지 않으면 다양화 전략을 적용하여 탐색영역을 변경시켰으며, 본 논문에서는 다양화 전략으로 Path relinking 방법을 사용하였다. 일반적으로 Path relinking 방법은 경험적인 방법에 의해 구한 좋은 해의 속성을 결합하여 지도해를 형성한 후, 이를 현재해에 반영함으로써 새로운 탐색영역으로 이동시키는 방법이다. 본 논문에서는 소규모 계통에서와 같이 변경된 우선순위법을 사용하여 24시간에 대한 각 발전기의 on/off 상태를 구한 후, 이를 지도해로 설정하였다. 그림 4는 대규모 계통에서 사용한 Path relinking 방법을 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 현재 해에서 다양화 전략을 적용할 대상 발전기를 임의로 선택하고, 선택된 발전기의 발전 계획을 지도해의 발전 계획으로 대체한다.

발전기	현재해	지도해	수정대상 발전기	변경된 계획
1	발전기 1의 일간발전계획	발전기 1의 일간발전계획	✓	발전기 1의 일간발전계획
2	발전기 2의 일간발전계획	발전기 2의 일간발전계획		발전기 2의 일간발전계획
3	발전기 3의 일간발전계획	발전기 3의 일간발전계획	✓	발전기 3의 일간발전계획
4	발전기 4의 일간발전계획	발전기 4의 일간발전계획	✓	발전기 4의 일간발전계획
⋮	⋮	⋮		⋮
N	발전기 N의 일간발전계획	발전기 N의 일간발전계획		발전기 N의 일간발전계획

그림 4 대규모 계통에서의 다양화 전략

Fig. 4 Diversification strategies for large systems

본 논문에서 제안한 Tabu 탐색법을 이용한 발전기 기동정지계획에 대한 탐색과정은 아래와 같으며, 전체 흐름도는 그림 5과 같다.

단계 1) 초기해 선정 : 우선 순위법을 이용하여 초기해를 선정하였다. 우선 순위법으로는 각 발전기의 최대부하출력 시 평균비용이 낮은 발전기에 높은 우선순위를 주어 운전하는 방법을 사용하였다.

단계 2) 이웃해 생성 및 평가 : 제안한 방법에 의해 현재해 부근의 이웃해를 생성한 후 목적함수에 의해 평가한다.

단계 3) 모의해 선정 : 단계 2)에서 생성된 이웃해 중에서 평가값이 가장 우수한 해를 모의해로 설정한다. 모의해는 Tabu로 설정되지 않았거나 설정되었지만 열망조건을 만족할 경우에는 해제되어 현재해로 갱신된다.

단계 4) Tabu Test : 모의해를 구하여 모의해의 속성이 Tabu List에 포함되어 있는지를 검토한다. Tabu List에는 발전기의 on/off 상태의 변화를 하나의 속성으로 하여 이전에 탐색한 해의 속성이 저장된다. 새로운 해의 속성이 Tabu List에 포함되어 있을 경우 이웃해가 되는 것을 금지(Tabu)함으로써 반복적인 탐색을 방지한다.

단계 5) 열망조건 : 모의해가 지금까지 찾은 최적해보다 더 좋을 경우에는 Tabu로 설정되었더라도 Tabu list에서 제외되어 현재해로 갱신됨으로써 재탐색을 가능하게 한다.

단계 6) 다양화 전략 : 제안한 방법에 의해 대상 발전기 계통에 대한 새로운 탐색영역을 제시한다.

단계 7) 종료조건 : 정해진 반복회수가 만족할 때까지 단계 2)~단계 6) 과정을 반복한다.

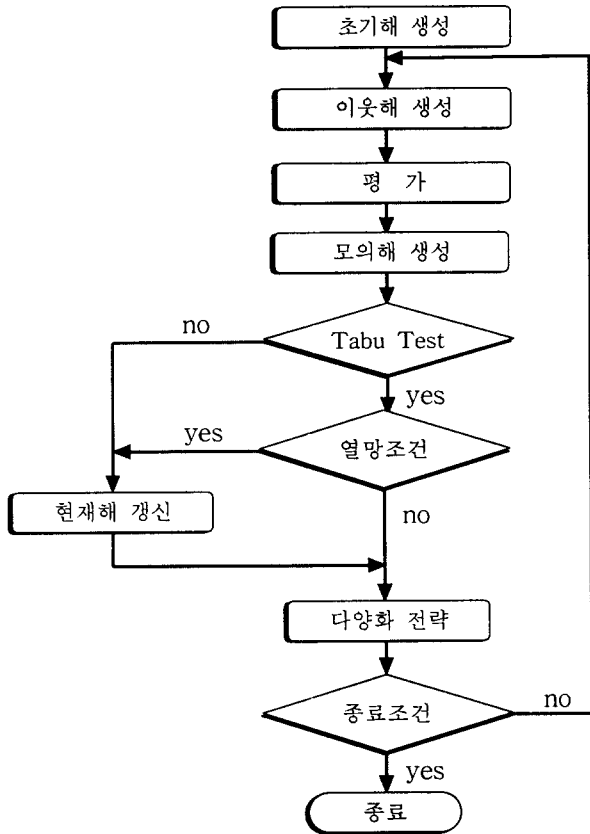


그림 5 Tabu 탐색법의 흐름도  
Fig. 5 Flow chart for Tabu Search

5. 사례 연구

본 논문에서는 제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해서 소규모 계통과 대규모 계통으로서 참고문헌[12]의 10대 및 110대 발전기의 데이터를 이용하여 종래의 방법과 비교·검토하였다.

1) 소규모 계통[12]

제안한 방법에 대한 유용성을 평가하기 위해 10대의 발전기에 적용하여 기존의 방법과 비교·검토하였다. 표 1은 발전기 10대에 대한 발전기 파라미터를 나타내었고, 표 2는 매 시간별 부하를 나타내었다. 그리고 Tabu 탐색법을 이용하여 해를 탐색하는데 필요한 초기해는 우선 순위법으로 구한 값을 사용하였으며, Tabu 탐색법에 사용한 시뮬레이션 계수는 표 3과 같다. Tabu List의 크기는 10~15이며 600회 반복(iteration)한 결과를 나타내었다. 다양화 전략은 50회 반복한 이후부터 적용되어 매 6회 반복시마다 다양화 전략을 도입하였다.

제 3장에서 설명한 것처럼 Tabu 탐색법은 Tabu List 크기에 따라서 해의 질(quality)이 달라진다. 따라서, 본 논문에서는 Tabu 탐색법을 이용하여 발전기의 기동정지계획 문제를 해결할 때 Tabu List의 크기에 따른 영향을 분석하였다. 표 4는 Tabu List 크기에 따른 총 발전비용을 나타내었다. 표 4에서 보는 바와 같이 같은 반복횟수에 대해서 Tabu

List의 크기가 너무 크거나 작은 경우에는 총 발전비용이 증가함을 알 수 있다. 따라서 Tabu List의 크기를 적절히 선정하지 못하면 국부최소값에 수렴할 가능성이 있음을 보여준다. 본 논문에서는 10대 발전기에 대해 Tabu List의 크기가 12일 때 가장 낮은 발전비용을 얻었다.

표 1 10대 발전기 계통의 발전기 파라미터

Table 1 Unit parameters of 10 unit system

Unit 발전기 파라미터	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
a [\$]	15	25	40	32	29	72	105	100	49	82
b [\$/MW]	1.4	1.5	1.35	1.4	1.54	1.35	1.395	1.329	1.264	1.214
$c [10^{-3} \text{ } \$/\text{MW}^2]$	5.1	4.0	3.9	3.8	2.1	2.6	1.3	1.4	2.9	1.5
MDT [h]	2	4	4	3	3	3	4	2	5	6
MUT [h]	3	3	4	3	1	6	10	3	7	6
초기조건[h]	3	3	4	4	-3	-3	10	3	7	6
$\sigma$ [\$]	15	15	25	12	30	30	60	80	50	70
$\delta$ [\$]	123	123	110	100	130	146	207	202	137	157
$\tau$	5	5	5	5	5	6	11	11	7	9
SD [\$]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

표 2 시간별 부하

Table 2 Hourly load data

시간 [h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
부하 [MW]	1517	1426	1368	1328	1317	1351	1398	1351	1317	1238	1238	1226
시간 [h]	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
부하 [MW]	1208	1180	1170	1136	1113	1079	1034	1022	1010	1058	1124	1517

표 3 Tabu 탐색법의 시뮬레이션 계수

Table 3 Simulation parameters for Tabu Search

파라미터	설정값
Tabu List의 크기	10 ~ 15
최대 반복회수	600 [iteration]
다양화 시작 기준	50 [iteration]이후
다양화 전략 수행 기준	6 [iteration]

표 4 Tabu list 크기에 따른 발전비용

Table 4 Total generation costs for different tabu list size

분류 Tabu List 크기	발전비용[\$]	시간[sec]
10	47514	26
12	47447	26
15	47520	27

표 5는 10대 발전기에 대한 기존의 방법 및 제안한 방법에 의해 구해진 발전비용을 나타내고 있다. 제안한 방법이 유전 알고리즘이나, 라그랑지 미정계수법보다는 발전비용 면에서 더 나은 결과를 얻었다. 최적해를 구한 동적 계획법보다는 약간 더 높은 발전 비용을 얻었으나 동적 계획법은 계산시간이 많이 소요되며 또한 큰 계통에서는 계산이 불가능하다는 단점이 있다. 표 6은 제안한 방법에 의해서 구해진 발전기 기동 및 정지 상태를 나타내었다. 여기서, 검은 부분은 발전기 기동상태를 나타내고, 흰색부분은 발전기 정지상태를 나타낸다. 그림 6은 제안한 방법에 의해서 구해진 총 발전비용의 추이를 나타내었다.

표 5 기존의 방법 및 제안한 방법에 의한 발전 비용  
Table 5 Comparison of total generation costs by conventional and proposed method

방법	우선순위 (PR)	유전알고리즘 (GA)	미정계수 (LR)	동적계획 (DP)	Tabu 탐색 (TS)
발전 비용[\$]	48698	47576	47511	47261	47447

표 6 발전기의 기동 및 정지상태  
Table 6 On/off states of units

시간 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																									

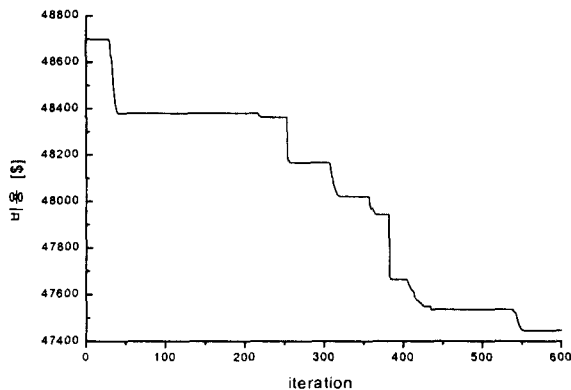


그림 6 제안한 방법에 의한 비용 수렴 특성  
Fig. 6 Convergence characteristics of total costs for the proposed method

2) 대규모 계통[12]

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해서 대규모 발전기 계통(110대 발전기)의 데이터를 이용하여 기존의 방법과 비교·검토하였다. 표 7은 매 시간별 부하를 나타내었고, 표 8은 Tabu 탐색법에 사용된 시뮬레이션 계수를 나타내었다.

표 7 시간별 부하  
Table 7 Hourly load data

시간[h]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
부하 [백MW]	116	109	95	93	105	112	125	129	135	145	146	140
시간[h]	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
부하 [백MW]	132	130	145	146	140	147	156	162	165	150	143	135

표 8 Tabu 탐색법에 사용된 시뮬레이션 계수(110대 발전기)  
Table 8 Simulation parameters for Tabu search

파라미터	설정값
반복횟수	800
Tabu List 크기	1~5
다양화 전략 적용 기준	6 iteration

Tabu List 크기를 적절히 선정하지 못할 경우 국부최소값에 수렴할 가능성이 있다. 표 9에서는 Tabu list의 크기에 따라 계산 시간 및 발전 비용을 5번 시도후 평균값으로 나타내었다. 계산시간은 비슷한 결과를 나타내었지만 Tabu list의 크기에 따라 총 발전비용이 다소 다른 것을 알 수 있었다. 본 논문에서는 110대 발전기에 대해 Tabu List의 크기가 3일 때 가장 낮은 발전비용을 얻었다. 그러나 문제마다 Tabu List의 크기를 정확히 설정하는 것은 어렵기 때문에 적용적으로 크기를 변화시키는 방법의 도입도 고려해 볼 수 있다.

표 10은 110대 발전기 계통에 대해 제안한 방법과 기존의 방법을 비교하였다. 표 10에서 보는 바와 같이 우선순위법의 결과를 초기해로 이용한 Tabu 탐색법이 발전비용면에서 GA 및 Hybrid GA보다 더 우수한 결과를 얻었다. 그림 7은 우선순위법에 의해 구한 초기해에 대해서 Tabu 탐색법을 적용한 경우에 이동횟수에 따른 총 발전비용추이를 나타내었다. 그림 7에서 보는 것처럼 국부탐색능력을 가진 Tabu 탐색법에 의해서 최적해 부근으로 빠르게 수렴함을 알 수 있다.

표 9 Tabu list 크기에 따른 비용 및 계산시간  
Table 9 Total costs and computation times for different tabu list sizes

Tabu list 크기	비용[\$]	계산시간[sec]
1	3818070	604
2	3818200	601
3	3817850	601
4	3818270	608
5	3818090	609

표 10 각 방법으로 구한 발전 비용의 비교 (발전기 110대)  
Table 10 Comparison of generation costs by each method

방법	우선순위법 (PR)	GA	HGA	PR+TS
발전 비용[\$]	3854821	3834467	3826775	3816900
계산 시간	1 초	12 시간	20 분	10 분

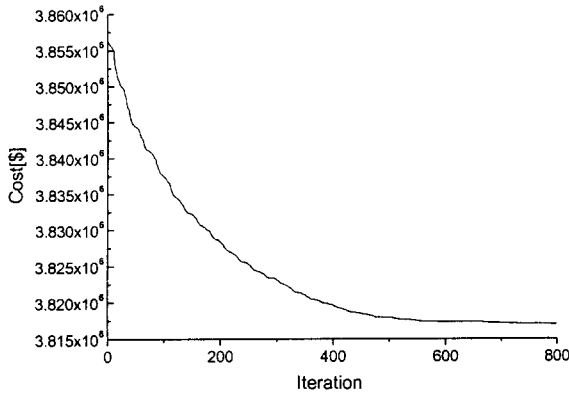


그림 7 Tabu 탐색법에 의한 총 발전비용 추이  
Fig. 7 Convergence characteristics of total costs for the proposed method

6. 결 론

본 논문에서는 우선순위법 및 국부탐색능력이 뛰어난 경험적인 탐색방법인 Tabu 탐색법을 이용하여 발전기 기동정지계획 문제를 해결하였다. 우선순위법에 의해 구해진 해를 수렴속도가 비교적 빠른 Tabu 탐색법의 초기해로 이용함으로써 빠른 시간안에 전역최적해를 찾는 방법을 제시하였다. 또한 Tabu 탐색법의 탐색성능을 개선하기 위하여 탐색중에 해가 개선되지 않는 경우 탐색영역을 변경하기 위하여 다양화 전략으로서 Path relinking 방법을 적용하였다.

제안한 방법의 유용성을 평가하기 위하여 참고문헌[12]의 10대 및 110대 발전기 계통에 대해 적용해 본 결과, 제안한 방법이 우선순위법, GA 및 Hybrid GA보다 계산시간과 총 발전비용면에서 더 나은 해를 구할 수 있었다. 대규모 계통인 110대 발전기를 가진 계통에 제안한 방법을 성공적으로 적용함으로써 실제 문제에도 효율적으로 적용가능함을 보여주었다.

감사의 글

본 연구(관리번호: 96-중-05)는 한국전력공사의 지원에 의해 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] J. Wood and F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, And Control", pp. 131-170
- [2] C. K. Pang, H. C. Chen, "Optimal Short-Term Thermal Unit Commitment", IEEE Trans. on PAS, Vol. 95, No. 4, pp. 1336-1346, July/August 1976
- [3] A. I. Cohen, M. Yoshimura, "A Branch-and-Bound Algorithm for Unit Commitment", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-102, pp. 444-451, Feb. 1983
- [4] L.F.B. Baptistella, J.C. Geromel, "A Decomposition Approach to Problem of Unit Commitment Schedule for Hydrothermal Systems", IEEE Proc. Vol. 127, part D, No 6, pp. 250, Nov. 1980
- [5] S. Virmani, C. Adrian, K. Imhof, S. Mukherjee, "Implementation of a Lagrangian Relaxation Based Unit Commitment Problem", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 4, No. 4, pp. 1373-1380, Oct. 1989
- [6] N. Chowdhury, R. Billinton, "Unit Commitment in Interconnected Generating Systems Using a Probabilistic Technique", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 5, No. 4, pp. 1231-1237, November 1990
- [7] S. K. Tong, S. M. Shahidepour, Z. Ouyang, "A Heuristic Short-Term Unit Commitment", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 6, No. 3, pp. 1210-1216, August 1991
- [8] Z. Ouyang, S.M. Shahidepour, "A Hybrid Artificial Neural Network-Dynamic Programming Approach to Unit Commitment", IEEE trans. on PWRS, Vol. 7, no. 1, pp. 236-242, February 1992
- [9] 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, February 1996
- [10] F. Glover, "Tabu Search - Part I," ORSA Journal on Computing Vol. 1. No. 3, pp. 190-206, 1989
- [11] F. Glover and M. Laguna, "Tabu Search" pp. 111-116
- [12] S. O. Orero and M. R. Irving. "Large scale unit commitment using a hybrid genetic algorithm", Elsevier Science Ltd pp. 45-55 ,1996

저 자 소 개



**천희주 (千熙周)**

1972년 3월 1일 생. 1998년 경상대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 부산대 전기공학과 석사과정



**문경준 (文景俊)**

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



**김형수 (金亨洙)**

1972년 1월 26일 생. 1994년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정

Tel : 051-510-3188

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



**박준호 (朴俊灝)**

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



**황기현 (黃琪玆)**

1968년 3월 1일생. 1994년 경성대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 부산대 일반대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 수료