

## 확률 타부 탐색법을 이용한 수화력 계통의 경제운영

김형수 · 박준호  
부산대학교 전기공학과

### Hydro-Thermal Optimal Scheduling Using Probabilistic Tabu Search

Hyung-Su Kim · June Ho Park  
Department of Electrical Engineering of Pusan National University

**Abstract** - In this paper, we propose a Probabilistic Tabu Search(PTS) method for hydro-thermal scheduling. Hydro scheduling has many constraints and very difficult to solve the optimal schedule because it has many local minima. To solve the problem effectively, the proposed method uses two procedures, one is Tabu search procedure that plays a role in local search, and the other is Restarting procedure that enables to diversify its search region. To adjust parameters such as a reducing rate and initial searching region, search strategy is selected according to its probability after Restarting procedure.

In order to show the usefulness of the proposed method, the PTS is applied on two cases which have dependent hydro plants and compared to those of other method. The simulation results show it is very efficient and useful algorithm to solve the hydro-thermal scheduling problem.

#### 1. 서 론

전력계통 운용에 있어 발전계획 문제는 각종 제약을 고려하여 가장 경제적인 발전설비의 운용방식을 결정하는 것으로 매우 중요한 문제이다. 특히 수화력 협조에 의한 경제운영 문제는 기동정지 계획과 함께 발전계획의 주된 관심사로서 그동안 많은 연구가 이루어져왔다. 그러나 화력 발전기와는 다르게 수력 발전기의 경우에는 많은 수력학적 제약조건들, 즉 물의 저수량 및 방류량 제약과 더불어 낙차 변동, 연결수계, 지류, 자연 유입량 및 시지연 등 제약의 복잡성 때문에 아직까지 이러한 제반 조건을 충분히 고려한 효율적인 방법은 매우 드물다.

기존의 수학적 최적화론에 근거한 대부분의 방법들은 Lagrange 미정 계수에 의한 이중 최적화 방법[1-2]을 이용하고 있는데, 댐간의 수력학적 결합, 수위 변화에 따른 수력기의 출력함수의 변화 등의 복잡한 제약을 고려하기가 어려우며, 해의 수렴성을 항상 보장할 수가 없어 실제 사용상 제약이 따른다. 그 외에도 동적계획법[3]과 확률적인 최적화 방법인 진화전략 및 유전알고리즘[4] 등에 의한 해법들이 제시되었으나 탐색공간이 넓을 경우 매우 많은 계산시간이 소요되는 문제를 가지고 있다. 최근에는 경험적인 탐색기법으로 빠른 수렴 특성 및 다른 알고리즘과의 결합성이 우수한 특징을 가지는 타부 탐색법[5]이 제안되고 있다. 그러나 타부 탐색법은 단일 초기해의 주변을 탐색하기 때문에 초기설정에 영향을 많이 받으며 타부구간의 정의방법에 따라 탐색성능이 크게 좌우된다. 본 논문에서는 실변수 구간 문제에 있어서도 타부 탐색법을 적용할 수 있는 새로운 확률 타부 탐색법[6]을 적용하여 수화력 경제운영 문제에 적용하였다. 제안한 확률 타부 탐색법은 전체 탐색구간에 대해 신뢰구간과 근접구간을 정의하여 이 구간내에서 랜덤하게 이웃해를 생성함으로써 초기해에 따른 영향을 최소화하며, 탐색 구간의 크기를 점차 감소하게 함으로써 탐색

과정이 수렴하도록 한다. 해가 어느정도 수렴한 경우에는 재설정 과정에 의해 다시 탐색 영역을 확장함으로써 새로운 영역의 탐색이 가능하게 된다. 재설정 이후의 탐색전략은 해의 개선 여부에 따라 확률적으로 변경하게 함으로써 대상 문제에 따라 적응적으로 전역적 탐색 및 국부탐색을 수행할 수 있도록 하였다.

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해 사례계통에 대해 시뮬레이션을 수행한 후, 결과를 비교·검토하였다. 검토 결과, 제안한 확률 타부탐색 방법은 기존의 방법보다 최적 탐색 능력이 우수할 뿐만 아니라, 비교적 빠른 수렴 속도를 가지며, 복잡한 수력학적 제약조건을 용이하게 처리할 수 있어 EMS(Energy Management System)와 같은 실제 시스템에서도 쉽게 적용가능한 방법으로 사료된다.

#### 2. 수화력 경제운영 문제의 정식화

수화력 계통에 있어 경제운영 문제[7]는 각 발전기에 대한 최적의 출력 배분을 결정함에 있어 주어진 제약조건을 만족하면서 화력 발전소의 총연료 비용을 최소화하는 것이다. 화력 발전소만으로 구성된 계통과는 달리 수화력 계통은 발전소간의 전기적 결합뿐만 아니라, 수력 발전소의 수력학적 결합을 고려해야 하므로 고려할 제약조건이 매우 많다. 본 논문에서는 총연료 비용을 최소화하기 위한 목적함수는 다음 식 (1)과 같이 화력 발전기 출력에 대한 2차식으로 정의하였다.

$$\text{Min } F_T = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^N [F_i(P_{Si}^t)] \quad (1)$$

여기서,  $F_i(P_{Si}^t) = a_i + b_i P_{Si}^t + c_i P_{Si}^{t2}$  [MW]

$F_i(P_{Si}^t)$  :  $t$ 시간,  $i$  화력 발전기의 연료비용함수

$a_i, b_i, c_i$  :  $i$  화력 발전기의 비용계수

$P_{Si}^t$  :  $t$ 시간,  $i$  화력 발전기의 발전출력

$T, N$  : 계획 시간 및 화력 발전기의 수

주어진 목적함수를 최적화할 때 고려해야 할 제약조건으로는 전력수급 평형조건과 각 발전 출력 및 수력학적 제약으로서 저수량 및 방류량 제한, 물의 시지연을 고려한 수계 연속조건, 물의 사용수량 제약조건 등을 고려할 수 있다.

#### • 전력수급 평형조건

$$\sum_{i=1}^M P_{Si}^t + \sum_{j=1}^N P_{Hj}^t = P_D + P_{TL}^t, \quad t \in T \quad (2)$$

여기서,  $M, N$  : 수력 및 화력 발전기의 수

$P_{Hj}^t$  :  $t$ 시간,  $j$ 수력 발전기의 발전 출력

$P_D$  :  $t$ 시간의 전력부하[MW]

$P_{TL}^t$  :  $t$ 시간의 송전 손실[MW]

$$= \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} P_{ij}^t B_{ij} P_i + \sum_{i=1}^{m+n} B_{0i} P_i + B_{00}$$

$B_{ij}, B_{0i}, B_{00}$  : 송전 손실계수

- 발전출력 제약조건 (generation limit)

$$\begin{aligned} P_{Si} &\leq P_{Si}^* \leq \overline{P_{Si}}, \quad t \in T \\ P_{Hi} &\leq P_{Hi}^* \leq \overline{P_{Hi}}, \quad t \in T \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\underline{P_{Si}}, \overline{P_{Si}}$  :  $i$  화력발전기의 최소, 최대 발전출력

$\underline{P_{Hi}}, \overline{P_{Hi}}$  :  $j$  수력발전기의 최소, 최대 발전출력

- 저수량 및 방류량 제한조건

$$\begin{aligned} V_j &\leq V_j^* \leq \overline{V_j}, \quad t \in T \\ Q_j &\leq Q_j^* \leq \overline{Q_j}, \quad t \in T \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $V_j^*$  :  $t$  시각에서  $j$  수력발전소의 저수량

$Q_j^*$  :  $t$  시각에서  $j$  수력발전소의 방류량

$\underline{V_j}, \overline{V_j}$  :  $i$  화력발전기의 최소, 최대 저수량

$\underline{Q_j}, \overline{Q_j}$  :  $j$  수력발전기의 최소, 최대 방류량

- 수계 연속 조건

$$V_j^* = V_j^{*t-1} + I_j^* - Q_j^* - S_j^* + \sum_{k \in R_j, U} [Q_k^{t-5, k} + S_k^{t-5, k}] \quad (5)$$

여기서,  $I_j^*$  :  $t$  시각에서  $j$  수력발전소의 자연유입량

$S_j^*$  :  $t$  시각에서  $j$  수력발전소의 유출량

$R_j, U$  :  $j$  수력발전소의 상류 수력발전소 집합

- 물의 사용수량 제약조건 : 각 수력 발전소는 일정 기간 내에 사용할 수 있는 물의 사용수량 제약조건이 정해져 있다. 일반적으로 출력에 대한 2차식의 형태로 나타낸다.

$$W_j = \sum_{t=1}^T a_j(P_{Hi}^t) \quad (6)$$

여기서,  $a_j(P_{Hi}^t) = a_j + b_j P_{Hi}^t + c_j P_{Hi}^{t2} [MW]$

$a_j(P_{Hi}^t)$  :  $t$  시각,  $j$  수력 발전기의 물 방출량

$a_j, b_j, c_j$  :  $j$  번째 수력 발전기의 방출계수

### 3. 확률 타부 탐색법

본 논문에서 제안한 확률 타부 탐색법은 국부탐색을 담당하는 타부 탐색 과정과 국부 수렴한 경우 탐색영역을 다시 확장하는 재설정(Restarting) 과정으로 구성되며, 이때 국부 탐색 비율과 전역 탐색 비율을 적응적으로 조절하기 위해 확률적 탐색 전략을 사용하였다. 제안한 전체 알고리즘의 순서도를 그림 1에 나타내었는데, 그림에서 보는 것처럼 타부 탐색 과정에서는 신뢰구간(Belief Space)은 효율적인 탐색을 하기 위해서 도입된 것으로 매 반복시 생성된 이웃해의 상위 일정 비율의 후보해 범위로서 구성되며, 수렴정도에 따라 효과적으로 이웃해 생성 구간을 제한하는 역할을 한다. 근접구간 또한 초기 범위로부터 일정비율로 감소하도록 하였으며, 신뢰구간의 크기가 일정 크기 이하로 줄어들거나 일정 반복동안 해의 변동이 없을 경우에 국부 수렴한 것으로 간주하여 재설정 과정을 수행하게 된다. 재설정 과정에서는 탐색영역을 다시 확장한 후, 해의 개선 여부에 따라 조절된 확률에 의해 다음 탐색시의 탐색 파라미터값을 조절하게 된다. 이러한 탐색 과정을 정해진 종료 조건이 만족될 때까지 반복하였다.

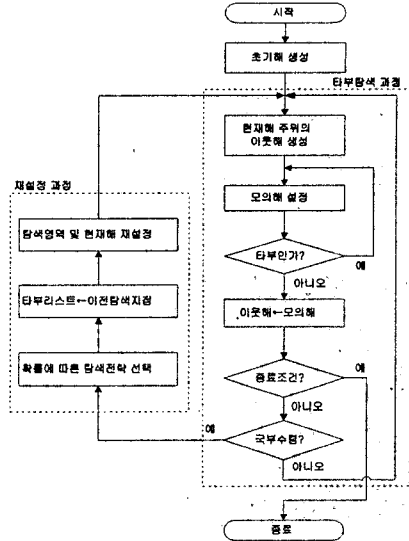


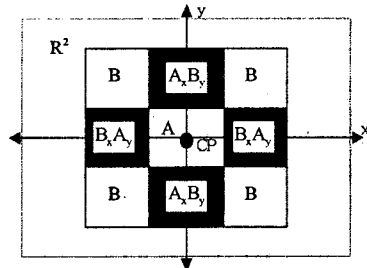
그림 1 확률 타부 탐색법의 흐름도

### 3.1 타부 탐색 과정

제안한 타부 탐색법은 전체 탐색영역을 임의의 두 구간으로 구분한 후, 각 구간내에서 랜덤하게 일정비율의 이웃해를 생성한 후, 생성된 이웃해로부터 가장 우수한 해의 방향으로 탐색을 진행한다. 이때 타부 리스트에 의해 기존에 탐색한 지점으로 판단된 경우에는 진행을 금지함으로써 보다 다양한 영역을 탐색할 수 있도록 한다.

#### 3.1.1 이웃해 구성 방법

그림 2에서 보는 바와 같이 전체 탐색구간을 크게 두 가지 영역, 즉 근접구간과 신뢰구간으로 구분한 후, 각각의 영역으로부터 일정비율의 이웃해를 생성 한다. 근접구간은 현재해를 중심으로 작은 범위의 구간을 나타내며, 신뢰구간은 이전 탐색정보에 의해 적응적으로 결정되는 탐색 영역을 나타낸다. 그림 2의 경우는 두 개의 독립변수( $x, y$ )를 가진 경우에 대해 나타낸 것으로, 현재해(CP)를 중심으로 근접구간(A)과 신뢰구간(B), 그리고 어느 한 변수구간이 서로 다른 구간내에 위치하게 되는 혼합구간( $A_x B_y, B_x A_y$ )으로 구분되는데, 이때 혼합구간은 현재해로부터 근접구간의 미세한 변화와 신뢰구간의 비교적 큰 변화를 동시에 가짐으로서 특정 변수값에 대한 탐색을 강화 또는 다양화하는 역할을 한다.



여기서,  $R^2$  : 전체탐색구간 A : 근접구간

B : 신뢰구간

AB(BA) : 혼합구간

그림 2 이웃해 생성을 위한 구간 구분

- 근접구간(Near Region) : 현재해를 중심으로 임의의 크기의 구간을 나타낸다. 구간의 크기는 초기 값으로부터 매 반복횟수마다  $\alpha$ 의 비율로 감소시켜 점차적으로 수렴하도록 하였다. 식 (7)은 근접 구

간내에서의 이웃해 집합을 나타낸다.

$$N_{NR}(x^k) = \{x \mid |x - x^k| \leq A\alpha^k, x \in R^n\} \quad (7)$$

여기서,  $A\alpha^k$  :  $k$  반복횟수일 경우의 근접구간 크기

$x^k$  :  $k$  반복횟수에서의 현재해,  $k=1 \cdots N$

$\alpha$  : 근접구간 크기의 감소율,  $0 < \alpha < 1$

$A$  : 근접구간의 초기치

- 신뢰구간(Belief Space) : 문제를 풀면서 생기는 정보를 효율적으로 이용한다면 탐색능력을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다. 문화 알고리즘(culture algorithm) [12]에서 사용된 신뢰구간의 개념은 주어진 문제의 제약조건이나 얻어진 정보를 이용하여 탐색 영역을 제한하는 것으로 탐색구간이 큰 경우 탐색구간을 효과적으로 축소함으로써 탐색성능을 높일 수 있도록 한 것이다. 본 논문에서는 신뢰구간을 결정하기 위해 우선 탐색과정 중에 생성된 후보해의 상위집단에 의해 이웃해를 구성하였으며, 구성된 이웃해의 전체 분포범위를 이용하여 다음 탐색시의 신뢰구간 범위를 설정하였다. 이것은 후보해 중에서 비교적 우수한 해의 근처로부터 전역 최적값이 발견될 가능성이 크다는 가정을 기초로 하였다. 신뢰구간에 의해 전체 탐색영역으로부터 탐색구간을 제한함으로써 탐색성능 및 수렴 속도를 크게 개선할 수 있다. 식 (8)은 신뢰구간내에서 생성된 이웃해 집합을 나타낸 것이다.

$$N_B(x^k) = \{x \mid l \leq x \leq u, x \in R^n\} \quad (8)$$

$$l = \min_{x \in B} x, \quad u = \max_{x \in B} x$$

여기서,  $B$  : 신뢰구간

$l$  : 신뢰구간의 하한값

$u$  : 신뢰구간의 상한값

### 3.1.2 타부 리스트

제안한 방법에서는 확률적인 탐색기법을 사용하므로 최근의 탐색 지점에 의한 타부를 설정하기는 어렵다. 따라서 국부수렴에 의한 재설정 과정 이전까지의 장기간에 걸쳐 탐색한 영역의 범위를 타부 리스트에 기록함으로써 타부를 설정하도록 하였다. 이것은 기존에 탐색한 영역으로 다시 이동하는 것을 방지하므로 보다 다양한 영역의 탐색을 도모하여 국부수렴의 가능성을 감소시킨다. 그림 4는 이때 사용된 장기 메모리형 타부 리스트 구성을 나타낸 것이다.

### 3.2 재설정에 의한 다양화

타부 탐색과정에 의한 탐색은 탐색영역이 수렴하여 국부값에 도달한 경우 국부 수렴 영역을 벗어나 새로운 영역을 탐색하는 것이 매우 어렵다. 이러한 경우 탐색영역을 다시 재설정하는 방법을 사용하여 탐색영역을 확장함으로써 새로운 영역으로 탐색지점을 이동할 수 있다. 본 논문에서는 재설정시 초기값과 감소율에 대해 해의 개선 여부에 따른 확률을 부여하여 확률에 따라 탐색 전략을 선택할 수 있도록 하였다. 그림 3은 이러한 방법에 의한 탐색과정을 도식적으로 나타낸 것이다. 초기해로부터 탐색영역 A내에서 근접구간과 신뢰구간에 의해 타부 탐색과정을 수행하다가 국부 수렴한 것으로 판단될 경우, 재설정 과정이 수행된다. 재설정 이후 탐색지점은 탐색영역 B로 이동하며 확률에 따라 새롭게 선택된 초기값 및 감소율에 의해 다시 타부 탐색과정이 수행된다. 이러한 과정을 종료 조건이 만족할 때까지 반복함으로써 전역적인 탐색이 가능하게 된다.

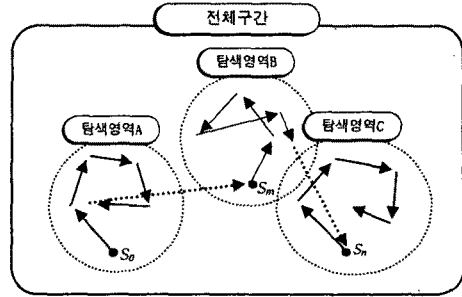


그림 3 재설정에 의한 탐색 영역의 다양화

## 4. 수화력 계통의 경제운용 문제에 적용 방안

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위하여 그림 4와 같이 4대의 상호 결합된 수력 발전소와 등가 단일 화력 발전소로 구성된 수화력 계통에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 각 수력 발전소의 자연 유입량 및 하류 댐과의 시지언, 수력 발전 출력 함수의 계수, 그리고 제약 범위는 참고문헌 [4]에 주어진 값을 사용하였다. 본 사례연구에서는 화력 발전기의 비용함수는 식 (9)와 같이 발전량에 대한 2차 함수 특성을 갖는 단일 발전기로 모의하였다.

$$F_1(P_{Si}) = 5,000 + 19.2 \cdot P_{Si} + 0.002 \cdot P_{Si}^2, \quad 500 \leq P_{Si} \leq 2,500 \quad (9)$$

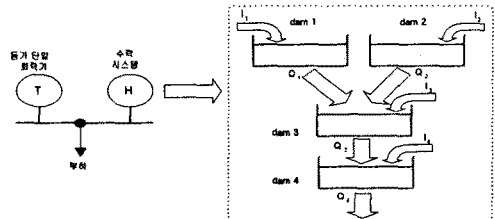


그림 4 연결 수계를 갖는 수화력 계통

수력 발전소의 출력함수의 경우는 다양한 방법 [6]으로 모의할 수 있는데, 본 사례에서는 다음 식 (10)과 같이 방류량과 저수량의 2차 함수 형태로 모의하였다.

$$P_{iH} = C_{i1} V_i^2 + C_{i2} Q_i^2 + C_{i3} V_i Q_i + C_{i4} V_i + C_{i5} Q_i + C_{i6}, \quad j \in R_H, t \in T \quad (10)$$

제안한 방법을 사례계통에 적용하기 위해 사용한 타부 탐색법의 시뮬레이션 계수는 표 1과 같다. 그림 5는 제안한 방법에 의한 해의 수렴 특성을 나타낸 것으로, 현재해가 주기적으로 이동하면서 전역적인 탐색을 수행할 수 있다. 타부 탐색의 경우 과거의 탐색 지점을 타부 리스트에 저장하므로 타부 리스트 길이에 따라 탐색 성능도 영향을 받게 된다. 그림 6에서는 타부 리스트 길이를 달리한 경우에 대한 결과를 나타내었으며, 타부 리스트 길이가 길어질수록 국부수렴 값을 벗어날 가능성이 증가하여 탐색성능이 어느정도 개선되는 것을 알 수 있다.

표 1 확률 타부 탐색법의 시뮬레이션 계수

계수	최대 반복 횟수	이웃해 비율	후보 해 수	타부 리스트 길이	근접구간 크기의 초기값	근접구간 감소율	
						$\alpha$	$\beta$
설정값	2000	60%	100	1~10	전체구간의 5%	0.79~0.95	0.8~1.2

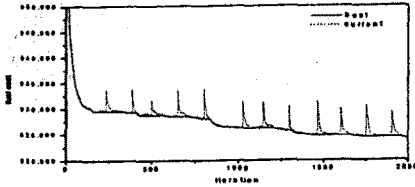


그림 5 발전 비용 수렴 특성

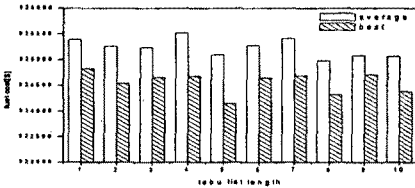
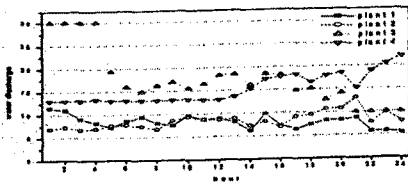
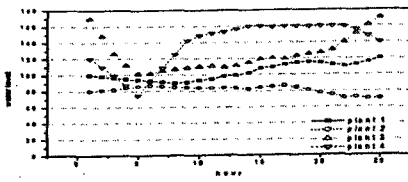


그림 6 타부 리스트 길이에 따른 탐색 성능 변화

그림 7은 최종적으로 구해진 해에 대한 저수지 수위 변화 및 방수량을 변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터 제안한 방법은 각 발전기의 방수량 제약 및 저수지 수위 제약을 만족하면서 최적의 발전 출력을 구하는 것을 확인할 수 있으며, 표 2는 제안한 방법에 의해 구한 결과를 수행 성능을 기존의 방법과 비교한 것이다. 비교 결과, 제안한 방법은 기존의 방법에 비해 계산시간 및 최적해를 크게 개선함을 알 수 있다. 특히 유전알고리즘의 경우 최적해 부근에서 수렴하기 위해 많은 계산시간을 소요되는데 반해, 제안한 확률 타부 탐색법은 탐색시점을 중심으로 강도높은 탐색을 수행하므로 보다 빠른 수렴 특성을 가지며, 재설정 과정에 의해 전역적 탐색도 가능함을 알 수 있다.



(a) 방류량



(b) 저수지 수위

그림 7 매시간 수력 발전소의 방류량 및 수위

표 2 기존의 방법에 의한 결과와 비교

항목	알고리즘	세대/ 반복수	해집단/ 이웃해 수	최소 발전비용	계산시간
참고문헌[6]	GA	31,000	100	926,711	1시간12분
참고문헌[7]	동적 디코딩 GA	1,000	100	925,863	16분
제안한 방법	확률 타부 탐색법	2,000	100	924,075	45초

## 5. 결 론

본 논문에서는 타부 탐색법을 이용하여 수화력 계통의 경제운영 계획 문제를 해결하는 방안을 제시하였다. 수화력 경제운영 계획과 같이 실변수 구간을 갖는 문제의 최적화에 적합한 새로운 확률 타부 탐색법을 구현하였으며, 각종 수력학적 제약조건을 포함한 사례 계통에 적용함으로써 그 유용성을 검토하였다. 확률 타부 탐색법은 크게 국부탐색을 담당하는 타부 탐색 과정과 국부 수렴한 경우 탐색영역을 확장하는 재설정 과정으로 구성되어 실변수 구간내에서 최적화 과정을 수행한다. 이때 국부 탐색 비율과 전역 탐색 비율을 적응적으로 조절하기 위해 해의 개선여부에 따라 확률적으로 탐색 전략을 선택하도록 하였다. 제안한 방법은 결정변수로서는 수력 발전기의 매시간 출력을 선정함으로써 복잡한 수화력 계통의 제약을 쉽게 고려할 수 있도록 하였고, 동적 제한 범위내에서 수량 제약을 만족하도록 디코딩함으로써 탐색 영역을 제한하여 효율적으로 수화력 경제운영 계획을 수립할 수 있도록 하였다. 사례 계통에 대해 제안한 방법을 적용하여 시뮬레이션 수행한 후, 기존의 결과와 비교·검토함으로써 제안한 방법의 우수성을 입증하였다.

## (참 고 문 헌)

- [1] P. B. Luh, D. Zhang, R. N. Tomastik "An Algorithm for Solving the Dual Problem of Hydrothermal Scheduling", IEEE Trans. on PWS, Vol. 13, No. 2, pp. 593-600, 1998.
- [2] M. S. Salam, K. M. Nor, A. R. Hamdan, "Hydrothermal Scheduling Based Lagrangian Relaxation Approach to Hydrothermal Coordination", IEEE Trans. on PWS, Vol. 13, No. 1, pp. 226-235, 1998
- [3] S. Chang, C. Chen, I. Fong, P. B. Luh, "Hydroelectric Generation Scheduling with an Effective Differential Dynamic Programming", IEEE Trans. on PWS, Vol. 5, No. 3, pp. 737-743, 1990
- [4] 이용한, 황기현, 문경준, 박준호, "유전알고리즘을 이용한 단기 수력 스케줄링에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 48권 9호, 1999
- [5] F. Glover and M. Laguna, "Tabu Search", Kluwer Academic Publishers, 1997
- [6] 김형수, 황기현, 박준호, "확률적 타부 탐색 전략을 이용한 새로운 함수 최적화방법에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 50D권 11호, pp. 532-540, 2001
- [7] J. Wood and F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, And Control", JOHN WILEY & SONS, INC., pp. 209-263, 1996
- [8] R. G. Reynolds and ChanJin Chung, "Knowledge-based Self-adaptation in Evolutionary Programming Using Cultural Algorithms", IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp. 71-76, 1997