

확률 타부 탐색법을 이용한 수화력 계통의 경제운영에 관한 연구

論 文
51A-3-6

Hydro-Thermal Optimal Scheduling Using Probabilistic Tabu Search

金亨洙* · 文景俊** · 朴俊灝***
(Hyung-Su Kim · Kyeong-Jun Mun · June Ho Park)

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. Dynamic decoding method was also used to restrict a search region and to handle water balance constraints.

In order to show the usefulness of the proposed method, the PTS is applied on two cases which have independent or 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.

Key Words : Probabilistic Tabu Search, Resatarting, Hydro-thermal scheduling

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, 연접수계, 지류, 자연 유입량 및 시지연 등 제약의 복잡성 때문에 아직까지 이러한 제반 조건을 충분히 고려한 효율적인 방법은 드문 실정이다.

수화력 협조에 의한 경제운영 문제를 해결하기 위한 수학적 최적화론에 근거한 대부분의 방법들은 Lagrange 미정 계수에 의한 이중 최적화 방법[1-3]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(Dynamic Programming)과 확률적인 최적화 방법인 진화전략(Evolution Strategy) 및 유전알고리즘(Genetic Algorithm) 등에 의한 해법들이 제시되었다[4-6]. 그러나 동적계획법[4]의 경우 변수값의 이산화에 의한 해의 정밀도가

문제가 되며, 또한 탐색공간이 넓은 경우 매우 많은 계산시간이 소요되는 문제를 가지고 있다. 진화전략 및 유전알고리즘과 같은 확률적인 최적화 방법의 경우에는 초기치에 의한 수렴 실패율이 낮고 전역해에 가까운 해를 구할 수 있으나, 전역 최적해 부근에서의 탐색이 비효율적이며 전역해로 수렴하기 위해 매우 많은 탐색 시간을 소모한다.

경험적인 탐색기법인 타부 탐색법[7-8]은 대상 문제의 지식을 활용하기가 용이하고, 비교적 빠른 국부수렴 특성 및 다른 알고리즘과의 결합성이 우수한 특징을 가짐으로서 최근에 많은 분야에서 적용되고 있다. 그러나 기존의 타부 탐색법은 단일 초기해의 주변을 탐색하기 때문에 초기설정에 영향을 많이 받으며, 실변수 구간을 갖는 문제에 적용하기 위해서는 타부를 정의하기가 쉽지 않아 적용된 예가 드문 실정이다.

본 논문에서는 실변수 구간 문제에 있어서도 타부 탐색법을 적용할 수 있도록 새로운 확률 타부 탐색법[9]을 제안하여 수화력 경제운영 문제에 적용하였다. 제안한 확률 타부 탐색법은 전체 탐색구간으로부터 신뢰구간과 근접구간을 정의하여 이 구간내에서 이웃해를 생성함으로써 초기해에 따른 영향을 최소화하며, 탐색 구간의 크기를 점차 감소하게 함으로써 탐색과정이 수렴하도록 한다. 그리고 해가 어느정도 수렴한 경우 재설정 과정에 의해 다시 탐색 영역을 확장함으로써 새로운 영역의 탐색이 가능하다. 재설정 이후의 탐색전략은 해의 개선 여부에 따라 확률적으로 변경하게 하여 대상 문제에 따라 적응적으로 전역적 탐색 및 국부탐색을 수행할 수 있도록 하였다. 수화력 경제운영 문제는 실변수 구간에서 많은 국부최소값을 갖는 최적화 문제[10]로 볼 수 있는데, 보다 효과적으로 수화력 경제운영 계획을 수립하기 위해 대상 발전소를 수력 발전소와 화력 발전소로 구분한 후, 복잡한 수력학적 제약을 갖는 수력 발전소의 매시간 출력을 확률 타부

* 正 會 員 : 釜山大 大學院 電氣工學科 工博

** 正 會 員 : 釜山大 大學院 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 釜山大 大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 11月 14日

最終完了 : 2002年 1月 22日

탐색법의 결정변수로 설정하여 수력 발전소의 각종 제약 조건의 고려가 용이하도록 하였다. 화력 발전소의 경우는 최적화 조건에 의한 수치적 반복법에 의한 경제배분을 수행함으로써 효과적으로 수화력 경제운용 계획을 수립할 수 있다. 또한, 결정변수의 범위를 동적으로 변경하였고, 등가 제약인 사용수량 제약을 만족하도록 결정변수를 디코딩함으로써 효율적인 탐색이 가능하도록 하였다.

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해 독립적인 수력 발전소를 가진 사례계통과 연계조건을 고려한 사례계통에 대해 시뮬레이션을 수행한 후, 결과를 비교·검토하였다. 검토 결과, 제안한 확률 타부탐색 방법은 기존의 방법보다 최적 탐색능력이 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 경제운용 문제의 정식화

수화력 계통에 있어 경제운용 문제[11]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. 먼저 총연료 비용을 최소화하기 위한 목적함수는 다음 식 (1)과 같이 화력 발전기 출력에 대한 2차식으로 정의할 수 있다.

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

여기서, $F_i(P_{Si}^t) = a_i + b_i P_{Si}^t + c_i P_{Si}^t{}^2$ [MW]
 $F_i(P_{Si}^t)$: t 시간, i 화력 발전기의 연료 비용함수
 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 제약과 더불어 수력학적 제약으로서 저수량 및 방류량 제한, 물의 시지연을 고려한 수계 연속조건, 물의 사용수량 제약조건 등을 고려해야 한다.

- 전력수급 평형조건

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

여기서, M : 수력 발전기의 수
 N : 화력 발전기의 수
 P_{Hj}^t : t 시간, j 수력 발전기의 발전 출력
 P_D^t : t 시간의 전력부하[MW]
 P_{TL}^t : t 시간의 송전 손실[MW]
 $(= \sum_{i=1}^{M+N} \sum_{j=1}^{M+N} P_{ij}^t B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{M+N} B_{0i} P_i + B_{00})$
 B_{ij}, B_{0i}, B_{00} : 송전 손실계수

- 발전출력 제약조건 (generation limit)

$$\frac{P_{Si}}{P_{Hi}} \leq P_{Si}^t \leq \overline{P_{Si}}, \quad t \in T \quad (3)$$

여기서, $\frac{P_{Si}}{P_{Hi}}, \overline{P_{Si}}$: i 화력 발전기의 최소, 최대 발전출력
 $\frac{P_{Hi}}{P_{Hi}}, \overline{P_{Hi}}$: j 수력 발전기의 최소, 최대 발전출력

- 저수량 및 방류량 제한조건

$$\frac{V_j}{Q_j} \leq V_j^t \leq \overline{V_j}, \quad t \in T \quad (4)$$

여기서, V_j^t : t 시간에서 j 수력발전소의 저수량
 Q_j^t : t 시간에서 j 수력발전소의 방류량
 $\frac{V_j}{Q_j}, \overline{V_j}$: i 화력발전기의 최소, 최대 저수량
 $\frac{Q_j}{Q_j}, \overline{Q_j}$: j 수력발전기의 최소, 최대 방류량

- 수계 연속 조건

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

여기서, I_j^t : t 시간에서 j 수력발전소의 자연유입량
 S_j^t : t 시간에서 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.

$$W_j = \sum_{i=1}^T q_j(P_{Hj}^i) \quad (6)$$

여기서, $q_j(P_{Hj}^i) = a_j + b_j P_{Hj}^i + c_j P_{Hj}^i{}^2$ [MW]
 $q_j(P_{Hj}^i)$: t 시간, j 수력 발전기의 물 방출량
 a_j, b_j, c_j : j 수력 발전기의 방출계수

3. 확률 타부 탐색법에 의한 수화력 계통의 경제 운용

3.1 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[12]과 현재해 부근의 임의영역인 근접구간으로부터 이웃해를 생성하며 탐색을 진행한다. 여기서 신뢰구간(Belief Space)은 효율적인 탐색을 하기 위해서 도입된 것으로 매 반복시 생성된 이웃해의 상위 일정 비율값의 범위로서 구성되며, 수렴정도에 따라 효과적으로 이웃해 생성구간을 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.

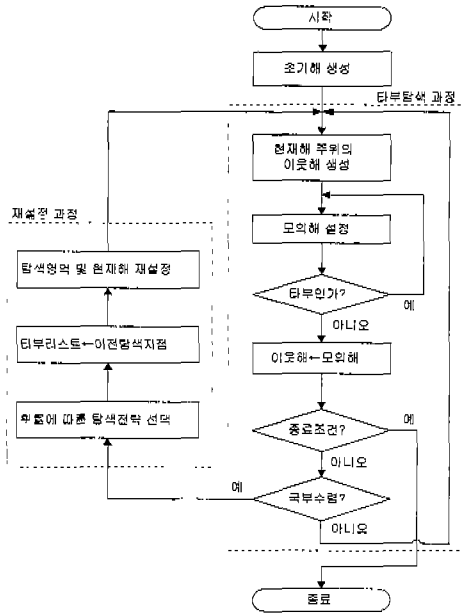


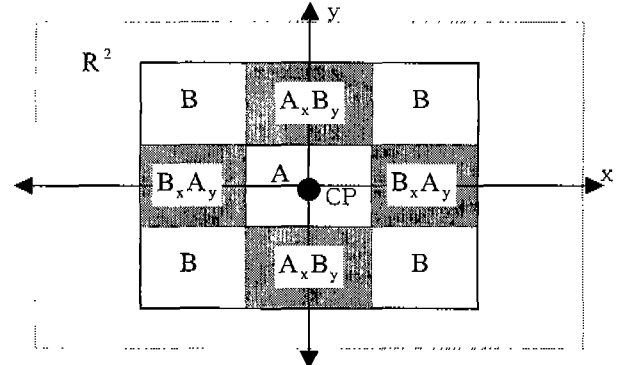
그림 1 확률 타부 탐색법의 흐름도
Fig. 1 Flowchart of the probabilistic Tabu Search

3.1.1 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.

1) 이웃해 구성 방법 : 그림 2에서 보는 바와 같이 전체 탐색 구간을 크게 두가지 영역, 즉 근접구간과 신뢰구간으로 구분한 후, 각각의 영역으로부터 일정비율의 이웃해를 생성한다. 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_xB_y, B_xA_y)으로 구분되는데, 이때 혼합구간은 현재해로부터 근접구간의 미세한 변화와 신뢰구간의 비교적 큰 변화를 동시에 가짐으로서 특정 변수값에 대한 탐색을 강화 또는 다양화하는 역할을 한다. N개의 독립변수를 갖는 문제의 경우 이웃해를 구성하는 방법은 그림 3과 같다. 그림 3에서 보는 바와 같이 모든 변수에 대해 근접구간(A)과 신뢰구간(B) 및 혼합구간(AB)으로 나누어 각각의 구간으로부터 정해진 비율만큼의 후보해를 생성한다. 이렇게 생성된 후보해를 평가하여 일정 비율만큼의 상위값들로 이웃해를 구성한 후,

이웃해의 분포범위에 의해 신뢰구간을 결정하게 된다. 신뢰구간은 전체 탐색영역으로부터 탐색영역을 제한하여 효율적인 탐색을 가능하게 하는 것으로, 대체로 후보해로부터 이웃해의 설정비율에 비례하여 크기가 감소한다.



여기서, R² : 전체탐색구간 A : 근접구간 B : 신뢰구간 AB(BA) : 혼합구간

그림 2 이웃해 생성을 위한 구간 구분
Fig. 2 Region partitioning for generation of neighborhoods

		변수					
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	...	x _N
근접구간		A	A	A	A		A
혼합구간		AB	AB	AB	AB	...	AB
신뢰구간		B	B	B	B		B

그림 3 N개의 변수에 대한 이웃해 구성 방법
Fig. 3 Composing method of neighborhoods in N-variable case

- 근접구간(Near Region) : 현재해를 중심으로 임의의 크기의 구간을 나타낸다. 구간의 크기는 초기값으로부터 반복횟수마다 α의 비율로 감소시켜 점차적으로 수렴하도록 하였다. 식 (7)은 근접 구간내에서의 이웃해 집합을 나타낸다.

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

여기서, Aα^k : k 반복횟수일 경우의 근접구간 크기
x^k : k 반복횟수에서의 현재해, k=1...N
α : 근접구간 크기의 감소율, 0 < α < 1
A : 근접구간의 초기치

- 신뢰구간(Belief Space) : 문제를 풀면서 생기는 정보를 효율적으로 이용한다면 탐색능력을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다. 문화 알고리즘(cultural algorithm)[12]에서 사용된 신뢰구간의 개념은 주어진 문제의 제약조건이나 얻어진 정보를 이용하여 탐색 영역을 제한하는 것으로 탐색구간이 큰 경우 탐색구간을 효과적으로 축소함으로써 탐색성을 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 중에서도 비교적 우수한 해의 근처로부터 전역 최적값이 발견될

가능성이 크다는 가정을 기초로 하였다. 신뢰구간에 의해 전체 탐색영역으로부터 탐색구간을 제한함으로써 탐색능 및 수렴 속도를 크게 개선할 수 있다. 식 (8)은 신뢰구간내에서 생성된 이웃해 집합을 나타낸 것이다.

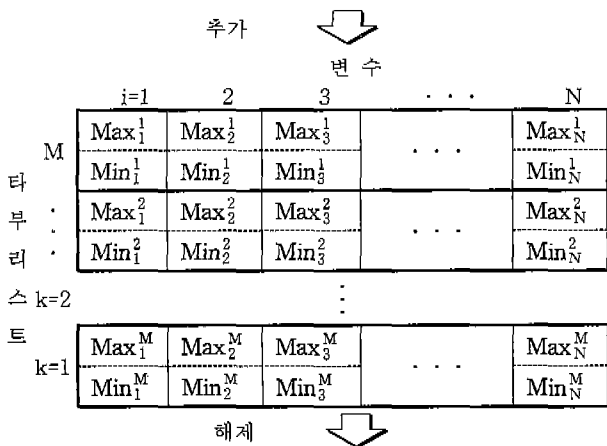
$$N_B(x^k) = \{x \mid l \leq x \leq u, x \in R^n\} \quad (8)$$

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

여기서, B : 신뢰구간
 l : 신뢰구간의 하한값
 u : 신뢰구간의 상한값

- 혼합구간(Mixed Region) : N개의 독립변수를 가진 문제를 최적화하려고 할 경우, 모든 독립변수에 대해 제각기 동일구간의 조합으로만 이웃해를 생성한다면 특정 변수의 변동성분을 고려하기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 앞의 그림 3과 같은 이웃해 구성으로부터 확률적으로 선택한 임의의 변수에 대해서는 비교적 변동이 큰 신뢰구간 내에서, 나머지는 근접구간 내에서 발생시키는 방법을 이용하여 근접구간과 신뢰구간의 혼합된 구간을 구현하였으며, 이 구간내에서 적절한 비율 만큼의 이웃해를 생성함으로써 보다 효율적인 이웃해를 구성하도록 하였다.

2) 타부 리스트 : 제한한 방법에서는 확률적인 탐색기법을 사용하므로 최근의 탐색 지점에 의한 타부를 설정하기가 쉽지 않다. 따라서 국부수렴에 의한 재설정 과정이 전까지의 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.



여기서, Max_i^k : i번째 변수, k번째 재설정시 탐색영역 최대값
 Min_i^k : i번째 변수, k번째 재설정시 탐색영역 최소값
 N = 변수 수, M = 타부 리스트 길이

그림 4 큐(queue) 구조를 이용한 장기 메모리형 타부 리스트
 Fig. 4 Tabu list based longer term memory using queue structure

3) 열망조건(Aspiration Criterion) : 타부 탐색법은 이웃해 중에서 가장 좋은 해를 다음 탐색의 현재해로 설정하여 탐색한다. 이때 타부 리스트를 이용하여 이전에 탐색한 지점에서의 이동을 금지하게 된다. 열망조건은 비록 타부 리스트에 포함되어 있지만 이제까지 탐색한 전역 최적해보다 더 나은 해가 발생한 경우, 타부 리스트를 무시하고 현재해로 선정할 수 있도록 함으로써 탐색한 지점을 항상 금지하는 타부 리스트를 보완하여 타부 탐색법의 국부 탐색 능력을 강화하여, 최적해로의 수렴 속도를 증가시키는 역할을 한다.

3.1.2 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 개선여부에 따른 확률을 부여하여 확률에 따라 탐색 전략을 선택할 수 있도록 하였다. 그림 5는 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 반복하게 되는데, 이것은 타부 탐색과정에 의한 빠른 수렴 특성을 이용하면서 전역적인 탐색이 가능하도록 한다.

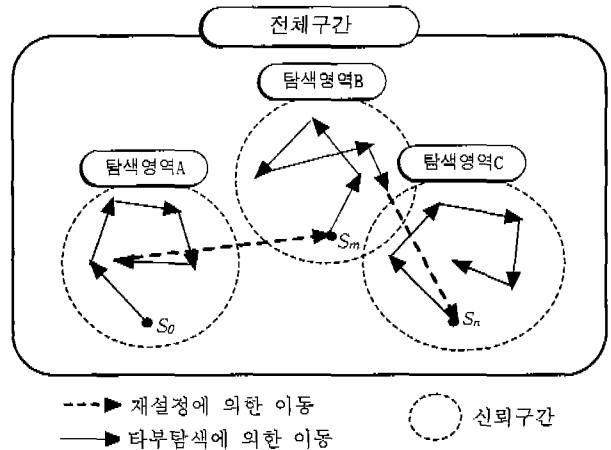


그림 5 재설정에 의한 탐색 영역의 다양화
 Fig. 5 Diversification of search region by restarting

1) 탐색구간의 재설정 : 타부 탐색과정은 탐색이 진행됨에 따라 근접구간의 크기 및 신뢰구간의 크기를 점차 감소시킨다. 이때 신뢰구간의 크기가 매우 작아질 경우에는 더 이상 새로운 영역의 탐색이 어려워 국부 수렴하게 되는데, 이러한 경우 신뢰구간과 근접구간을 동시에 확장시키는 재설정 방법을 사용함으로써 새로운 영역을 탐색할 수 있도록 하였다. 재설정 과정에 의해 신뢰구간의 크기는 전체구간으로 확장되며, 근접구간의 크기는 식 (9)와 같이 초기화된다.

$$A^t = A_0 \beta^t \quad (9)$$

여기서, t : 재설정 횟수

A_0 : 최초의 근접구간 초기치

A^t : t 번째 재설정시의 근접구간 초기치

β : 근접구간 초기치의 감소율, $\beta > 0$

2) 확률에 의한 탐색전략 선택 : 일정한 감소율을 가진 타부 탐색과정은 문제 유형에 따른 수렴특성을 적절하게 고려하지 못해 탐색성능이 저하될 수 있다. 본 논문에서는 재설정 이후에 확률적으로 탐색 전략을 선택함으로써 감소율을 조절할 수 있도록 하였다. 탐색 전략은 근접구간 감소율(α)과 근접구간 초기값 크기의 감소율(β)의 조합으로 구성되며, 선택확률에 따라 선택된다. 각 전략의 선택확률(P_{xy})은 식 (10)과 같이 조절되는데, 이때 변경 비율은 표 1과 같다.

표 1에서 나타낸 바와 같이 해가 이전의 재설정 과정시의 값보다 개선된 경우와 개선되지 않은 경우로 나누어져 각 전략의 확률을 조절한 후, 조절된 선택확률에 따라 다음 탐색전략을 확률적으로 결정함으로써 수렴특성에 따른 효과를 적응적으로 고려하도록 하였다. 즉, 이전 재설정 과정에서 선택된 전략에 의해 해가 개선된 경우에는 +20%의 확률증가를 가져오며, 그렇지 못한 경우에는 -20%의 비율만큼 확률을 감소시켰다. 이때 같은 열 또는 행에 위치한 전략의 경우 $\frac{1}{2}$ 의 비율만큼 확률이 조절되도록 하였다.

$$P_{xy}^t = P_{xy}^{t-1} (1 + \Delta P_{xy}^t)$$

$$\sum_{x=1}^3 \sum_{y=1}^3 P_{xy}^t = 1, \quad x \in \{\alpha_{high}, \alpha_{mid}, \alpha_{low}\}$$

$$, y \in \{\beta_{high}, \beta_{mid}, \beta_{lower}\} \quad (10)$$

여기서, P_{xy}^t : t 번째 재설정시의 선택확률

ΔP_{xy}^t : t 번째 재설정시의 선택확률 변화율

표 1 해의 개선여부에 따른 각 전략의 선택확률 변경 비율
Table 1 Changing the probability of selection strategies

변화율 [%]	해가 개선된 경우			해가 개선되지 않은 경우		
	ΔP_{xy}^t			ΔP_{xy}^t		
선택전략	β_{high}	β_{mid}	β_{low}	β_{high}	β_{mid}	β_{low}
α_{high}	-20	+10	+10	-20	-10	-10
α_{mid}	+10	0	0	-10	0	0
α_{low}	+10	0	0	-10	0	0

3.2 수화력 계통의 경제운용 문제에 적용 방법

제안한 확률 타부 탐색법을 수화력 경제운용 문제에 적용하기 위해서는 수화력 협조 문제의 특성과 이때 고려해야 할 제약조건을 적절하게 처리해야 한다. 본 논문에서는 수력 발전소에 대해 연결 수계를 고려하지 않았을 경우와 연결 수계를 고려했을 경우로 나누어 효과적으로 수력 및 화력 발전 출력을 결정하는 방안을 제안하였다. 목적 함수를 최적화하기 위한 결정변수의 선정 및 제약조건을 만족하도록 하는 디코딩 방식은 다음과 같다.

3.2.1 결정 변수의 선정

수화력 계통의 경제운용 문제는 여러 제약조건을 만족하면서 수력 및 화력 발전기의 매시간 발전량을 결정하는 것이다. 이때 화력 발전기의 경우에는 시간에 대해 독립성을 가지므로 발전 출력의 한계와 함께 부하 평형조건만 만족하면 되므로 식(11)과 같이 라그랑지 미정 계수 λ 를 도입하여 최적화 조건을 풀므로써 쉽게 구할 수 있다.

$$L = F_T - \lambda (\sum_{i=1}^N P_{Si}^t + \sum_{j=1}^M P_{Hj}^t - P_D^t - P_{TL}^t), \quad t \in T \quad (11)$$

$$\lambda^t = \frac{dF_T}{dP_i} \frac{1}{\frac{\partial P_{TL}^t}{\partial P_i} - 1}$$

여기서, L : 부하 평형 제약을 고려한 Lagrange 함수

화력 발전소의 경우에는 위와 같은 최적화 조건으로서 쉽게 출력을 결정할 수 있으나 수력 발전소의 경우에는 복잡한 제약조건을 고려해야 하므로 풀기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 매시간 각 수력 발전기의 출력을 결정변수로 설정함으로써 복잡한 제약조건 처리를 용이하게 하였으며, 화력 발전기의 경우에는 구해진 수력 발전기의 출력을 전체 부하에서 뺀 후, 나머지 부하에 대해서 식 (11)의 최적화 조건을 만족하는 λ 값에 의해 출력 배분을 함으로써 효과적인 경제운용 계획의 수립이 가능하도록 하였다.

3.2.2 디코딩 방식

1) 동적 범위 제약 : 제안한 방법은 실변수에 의한 결정변수를 사용함으로 실제값에 의한 상·하한 제한을 갖게 된다. 수력확적으로 연계된 수력 발전소의 경우, 각 댐의 방류량은 직전 저수량과 상류 댐의 방류량 및 유출량, 하류 댐의 최소, 최대 방류량 제약조건 등을 고려하여야 하므로 매시간별 가능 방류량 또는 발전 출력의 범위가 다르게 된다. 따라서 매시간의 방류량 상·하한 값을 연계된 발전소와의 관계에 의해 조절함으로써 보다 효율적인 탐색이 가능하도록 할 수 있다. 상류 및 하류에 연계된 댐에 의한 시간별 최대, 최소 방류량 제한 범위는 식 (12)~(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{\bar{n}}^t = V_j^{t-1} - \bar{V}_j + I_j^t - S_j^t + \sum_{k \in R_{j,u}} (Q_k^{t-\tau_{j,u}} + S_k^{t-\tau_{j,u}}) \quad (12)$$

$$Q_{\bar{n}}^t = V_j^{t-1} - \underline{V}_j + I_j^t - S_j^t + \sum_{k \in R_{j,c}} (Q_k^{t-\tau_{j,c}} + S_k^{t-\tau_{j,c}})$$

$$Q_{\bar{2}}^t = -V_{j+1}^{t-1} + \underline{V}_{j+1}^t - I_{j+1}^t + S_{j+1}^t + \underline{Q}_{j+1} \quad (13)$$

$$\underline{Q}_{\bar{2}}^t = -V_{j+1}^{t-1} + \bar{V}_{j+1}^t - I_{j+1}^t + S_{j+1}^t + \bar{Q}_{j+1}$$

$$Q_{\bar{1}}^t = \text{Max}(Q_j, \underline{Q}_{\bar{n}}^t, \underline{Q}_{\bar{2}}^t) \quad (14)$$

$$\underline{Q}_{\bar{1}}^t = \text{Min}(\bar{Q}_j, \bar{Q}_{\bar{n}}^t, \bar{Q}_{\bar{2}}^t)$$

여기서, $Q_{\bar{n}}^t, \bar{Q}_{\bar{n}}^t$: 상류 발전소에 의한 상·하한 방류량 제약

$\underline{Q}_{\bar{2}}, \bar{Q}_{\bar{2}}^t$: 하류 발전소에 의한 상·하한 방류량 제약

2) 등가 제약 포함 : 수력 발전기의 매시간 방수량을 결정할 경우 등가 제약으로서 저수지의 사용 수량 또는 최

중 수위를 일정하게 유지해야 한다. 그러나 수력 발전기의 경우 수력학적 결합에 의한 여러 제약을 동시에 고려해야 하므로 확률적인 탐색 기법으로는 이러한 제약 조건을 만족시키면서 최적해를 구하는 것이 비효율적일 뿐만 아니라 매우 어려운 일이 된다. 따라서 본 논문에서는 확률 타부 탐색에 의해 구해진 변수값에 대해 수력 발전소의 방수량을 증가 제약을 만족하도록 다시 수정하는 방법을 사용함으로써 이러한 문제를 해결하였다. 즉, 식 (15)에서처럼 구해진 각 결정변수값(Q_j^t)에 일정 값(a)을 더하여 사용 수량 제약을 만족하도록 디코딩하였다. 그림 6은 이러한 과정을 나타낸 것으로 초기의 계획을 제약조건을 만족할때까지 수직 이동함으로써 초기 계획에 의한 사용수량 W_1 이 사용 가능한 총 사용수량 W_2 를 만족하도록 변경된다. 이때 최대 방수량을 초과할 경우에는 값을 고정시켜 범위를 벗어나지 않도록 하였다. 이러한 방법은 결정변수에 의해 구해진 계획의 형태를 유지함과 동시에 증가 제약인 사용수량 제약을 만족하게 함으로서 실행 불가능한 해를 탐색하는데 소요되는 시간을 제거함으로써 탐색 효율을 크게 향상시켰다.

$$\sum_{t=1}^T (Q_j^t + a) = W_j \quad (15)$$

여기서, W_j : 계획시간동안 j수력발전소의 사용가능 수량
 a : 각 시간별 방수량 증가분[m^3]

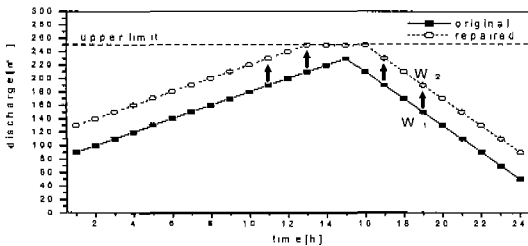


그림 6 증가제약을 만족하도록 방수량 계획의 수정 방안
 Fig. 6 Repairing a scheduling of water discharge to satisfy equality constraint

4. 사례 연구

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해 2가지 사례에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 첫번째 사례에서는 독립적인 수력 발전소를 갖는 계통에 대해 시뮬레이션을 수행하여 기존 사례와 비교함으로써 제안한 방법의 효용성을 검토하였다. 두번째 사례에서는 상하 연계 및 시지연 등의 각종 수력학적 제약을 포함한 경우에 대해 제안한 방법을 적용, 기존의 방법과 비교함으로써 복잡한 제약을 포함한 경우에 대해서도 효과적으로 경제운용 계획을 수립함을 입증하였다.

4.1 사례계통 1 : 독립적인 수력 발전소를 갖는 계통

제안한 방법의 효용성을 검토하기 위해 사례 계통[3]에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 사례 계통은 화력과 수력 발전소를 각각 2기를 가지며, 연료비용 및 사용수량은 발전 출력

에 대한 2차식으로 나타낸다. 일반적으로 화력 발전소만의 경제배분에 있어서는 출력한계 및 부하수급 제약만을 고려하여 최적화이론에 의해 쉽게 해결이 가능하나, 각종 수력학적 제약을 갖는 수력 발전소를 포함한 경우에는 비선형이 강해 최적해로 수렴하기가 쉽지 않다. 본 논문에서는 확률 타부 탐색법에 의해 수력 발전소의 매시간 방류량 또는 발전 출력을 결정변수로 하여 출력을 결정하도록 하였으며, 전체 부하에서 수력발전의 출력을 뺀 나머지 부하를 화력 발전소의 출력으로 하여 수치적 반복법으로 구하였다. 표 2는 첫번째 사례 계통의 발전기 데이터 및 송전 손실 계수를 나타내었으며, 표 3은 이때 사용한 시뮬레이션 계수를 나타내었다.

표 2 첫 번째 사례계통의 발전기 데이터
 Table 2 Unit data of case 1

발전기	P_{max} [MW]	P_{min} [MW]	a	b	c	W [m^3]
화력 1	500	0	0.0025	3.2	25.0	
화력 2	800	0	0.0008	3.4	30.0	
수력 1	500	0	0.000216	0.306	1.98	2500
수력 2	400	0	0.00036	0.612	0.936	2100
손실 계수	B	$\begin{bmatrix} 0.00014 & 0.0001 & 0.000015 & 0.000015 \\ 0.00001 & 0.00006 & 0.00001 & 0.000013 \\ 0.000015 & 0.00001 & 0.000068 & 0.000065 \\ 0.000015 & 0.000013 & 0.000065 & 0.00007 \end{bmatrix}$				
	B_0	$[0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$				
	B_{00}	0				

표 3 확률 타부 탐색법의 시뮬레이션 계수

Table 3 Simulation parameters for probabilistic tabu search

계수	최대 반복 횟수	이웃해 비율	후보해 수	타부 리스트 길이	근접구간 크기의 초기값	근접구간 감소율	
						α	β
설정값	2000	60%	100	1~10	전체구간의 5%	0.79~0.95	0.8~1.2

그림 7은 제안한 확률 타부 탐색법에 의한 해의 수렴 특성을 나타내었으며, 그림 8은 이때의 탐색 구간의 변화를 나타낸 것이다. 그림 7로부터 현재해는 주기적으로 변하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 그림 8과 같이 신뢰구간 및 근접구간내에서 이웃해를 만들며 탐색을 진행하다가 국부수렴으로 판단될 경우 재설정에 의해 다시 탐색구간이 확장되어 새로운 영역으로 탐색지점이 이동하기 때문이다. 재설정 이후 타부 탐색을 위한 초기구간의 크기와 근접구간 감소율은 확률에 따라 선택되며, 이렇게 이동한 새로운 지점으로부터 다시 수렴할때까지 탐색구간을 감소시키면서 탐색을 수행한다. 이러한 반복적인 재설정 전략에 의해 탐색 지점을 이동하면서 전역적인 탐색이 가능하게 된다. 그림 9는 이웃해로부터 타부 발생 빈도를 나타낸 것으로 탐색 과정이 수렴함에 따라 금지 횟수가 증가하므로 새로운 탐색 지점으로 이동시킴으로서 전역적인 탐색을 가능하게 한다. 타부 리스트 길이에 따른 탐색 성능을 그림 10에 나타내었는데, 각 경우는 10번씩 시행한 후의 결과를 나타낸 것으로, 타부 리스트의 길이가 짧은 경우에 평균해의 성능이 다소 떨어짐을 알 수 있는데, 이것은 타부 발생 빈도가 적으므로 국부수렴 값에 수렴할 가능성이 더 커지기 때문으로 볼 수 있다.

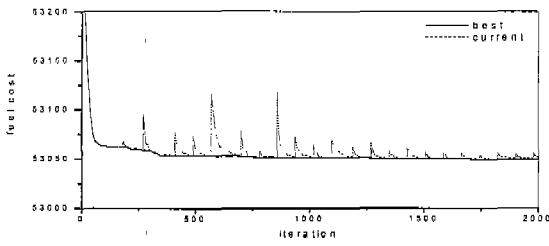


그림 7 발전 비용 수렴 특성
Fig. 7 Generation costs

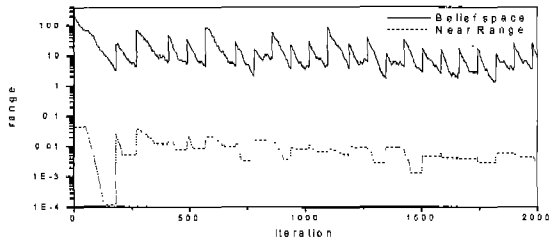


그림 8 탐색 구간의 변경
Fig. 8 Change of searching range

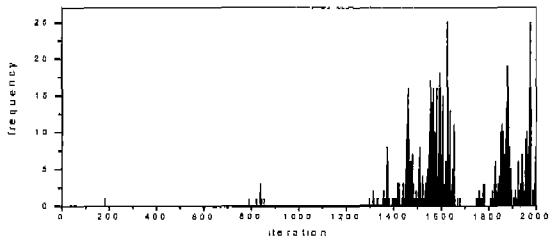


그림 9 타부 발생 빈도
Fig. 9 Frequency of tabu occurrence

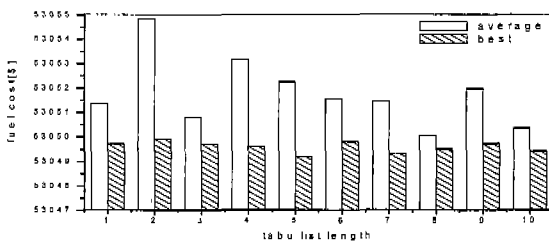


그림 10 장기 타부 리스트 길이에 따른 탐색 성능 변화
Fig. 10 Influence of long term tabu list length

제안한 방법에 의해 구한 각 발전기의 매시간 출력을 표 4에 나타내었다. 구해진 수력 발전기 출력에 대해 화력 발전기 출력은 λ -반복법으로 구하였다. 표 5에서는 제안한 방법의 의해 구해진 최적값을 기존의 수치적 방법과 비교하였다. 확률적인 탐색 특성으로 인해 제안한 방법은 평균 계산시간이 4분 정도로 수치적 방법에 비해 계산시간은 다소 많이 소요되었다. 그러나 기존의 방법은 좀더 복잡한 수력학적 제약을 고려하여 풀기가 쉽지 않은 반면, 제안한 방법은 매시간별 출력을 결정변수로 설정함으로써 보다 용이하게 새로운 제약을 고려할 수 있다.

표 4 사례계통 1에 대해 구해진 발전 출력

Table 4 The result of proposed method in case 1

시간	부하 [MW]	수력 1 [MW]	수력 2 [MW]	화력 1 [MW]	화력 2 [MW]	λ
1	400	169.742	22.6502	77.3264	135.853	3.69804
2	300	150.111	6.1786	61.1235	85.838	3.59001
3	250	140.991	0	52.4474	59.0431	3.53373
4	250	137.835	0	53.2325	61.3863	3.53836
5	250	139.266	0	52.8765	60.3239	3.53626
6	300	139.266	0	62.7344	90.7078	3.59956
7	450	175.543	35.6282	85.3316	160.507	3.75206
8	900	264.403	119.922	158.54	385.82	4.26376
9	1230	332.274	185.953	213.139	553.252	4.66818
10	1250	334.435	186.064	218.008	567.968	4.70401
11	1350	359.435	206.209	233.94	616.819	4.8273
12	1400	371.229	217.505	241.917	641.238	4.88997
13	1200	321.726	176.61	210.025	543.475	4.64297
14	1250	335.654	181.351	218.875	570.569	4.70975
15	1250	340.277	192.581	214.907	558.766	4.68402
16	1270	342.523	190.761	220.226	574.894	4.72209
17	1350	356.733	213.923	232.702	613.094	4.81902
18	1470	387.093	227.554	254.719	680.279	4.98942
19	1330	353.731	203.022	230.704	606.893	4.80215
20	1250	340.734	192.892	214.716	558.202	4.68275
21	1170	325.682	175.328	201.401	516.822	4.58812
22	1050	298.615	147.35	182.847	460.458	4.44213
23	900	268.327	121.119	157.255	382.014	4.25561
24	600	206.952	62.7559	109.049	233.799	3.91274
사용수량	2500 [m ³]	2100 [m ³]				

표 5 각 방법에 따른 비용 비교

Table 5 The comparison of costs

방법	비용[\$]
Newton's Method	53125.39
Progressive Optimality	54504.54
LU Factorization	53051.48
수정된 Newton's Method	53051.48
객체지향 기법	53051.5
확률 타부 탐색법(제안한방법)	53049.3

4.2 사례계통 2 : 연접수계 및 시지연을 고려한 계통[5-6]

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위하여 그림 11과 같이 4대의 상호 결합된 수력 발전소와 등가 단일 화력 발전소로 구성된 보다 복잡한 수화력 계통에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 각 수력 발전소의 자연 유입량 및 하류 댐과의 시지연, 수력 발전 출력 함수의 계수, 그리고 제약 범위는 참고문헌[5]에 주어진 값을 사용하였다. 본 사례연구에서는 화력 발전소를 단일 발전기로 모의하였는데, 다수의 화력 발전기를 가질 경우에는 첫번째 사례에서 사용한 방법처럼 수력발전 출력을 제외한 나머지 부하에 대해 최적화이론을 적용하여 쉽게 구할 수 있다. 본 논문에서 사용한 단일 화력 발전기의 비용 함수는 식 (16)과 같이 발전량에 대한 2차 함수로 모의하였다.

$$F_i^t(P_{Si}^t) = 5,000 + 19.2 \cdot P_{Si}^t + 0.002 \cdot P_{Si}^t{}^2 \quad (16)$$

$$, \quad 500 \leq P_{Si}^t \leq 2,500$$

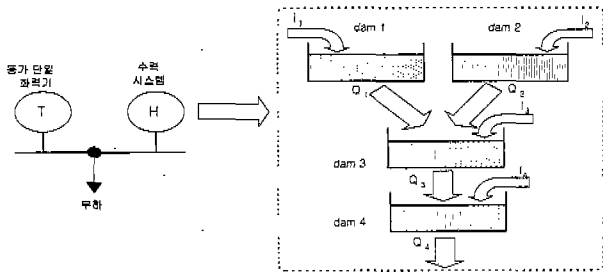


그림 11 연결 수계를 갖는 수화력 계통
Fig. 11 Hydrothermal power system for case 2

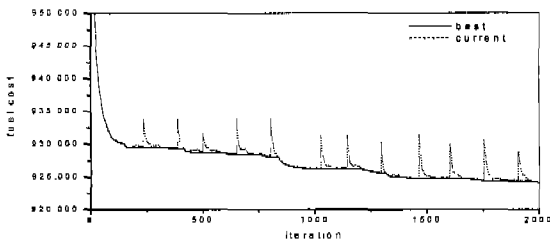


그림 12 발전 비용 수렴 특성
Fig. 12 Generation costs

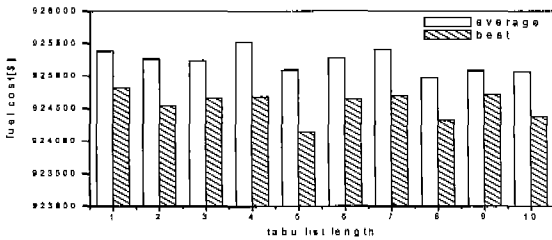


그림 13 타부 리스트 길이에 따른 탐색 성능 변화
Fig. 13 Influence of long term tabu list length

수력 발전소의 출력함수의 경우는 다양한 방법[6]으로 모의할 수 있는데, 본 사례에서는 다음 식(17)과 같이 방류량과 저수량의 2차 함수 형태로 모의하였다.

$$P_{Hj}^t = C_{j1} V_j^{t2} + C_{j2} Q_j^{t2} + C_{j3} V_j^t Q_j^t + C_{j4} V_j^t + C_{j5} Q_j^t + C_{j6},$$

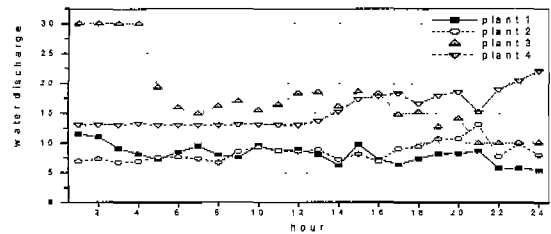
$$j \in R_H, t \in T \quad (17)$$

제안한 방법을 사례계통에 적용하기 위해 사용한 시뮬레이션 계수는 첫번째 사례연구와 같은 표 3의 값을 사용하였다. 그림 12는 제안한 방법에 의한 해의 수렴 특성을 나타낸 것으로, 현재해가 주기적으로 이동하면서 전역적인 탐색을 수행함을 알 수 있다. 타부 탐색의 경우 과거의 탐색 지점을 타부 리스트에 저장하므로 타부 리스트 길이에 따라 탐색 성능도 영향을 받게 된다. 그림 13에서는 타부 리스트 길이를 달리한 경우에 대한 결과를 나타내었으며, 타부 리스트 길이가 길어질수록 국부수렴 값을 벗어날 가능성이 증가하여 탐색 성능이 다소 개선되는 것을 알 수 있다.

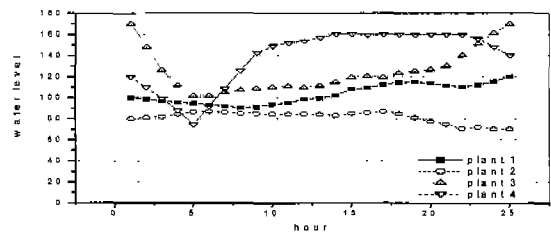
표 6은 최종적으로 구해진 해의 값을 나타낸 것으로 수력 발전기의 출력함을 제외한 나머지 부하를 화력 발전기가 담당하고 있다. 이때의 저수지 수위 변화 및 방수량을 변화를

표 6 사례계통 2에 대해 구해진 발전 출력
Table 6 The result of proposed method in case 2

출력[MW] 시간[h]	수력 1	수력 2	수력 3	수력 4	화력
1	91.6392	55.5491	0	205.994	1016.82
2	89.1591	58.4561	0	194.053	1048.33
3	80.1246	55.8664	0	181.278	1042.73
4	74.4927	58.1218	0	167.443	989.943
5	67.9654	63.3228	21.0451	167.482	970.185
6	75.4978	63.5176	34.2065	188.687	1048.09
7	79.714	61.12	37.6768	207.98	1263.51
8	71.9212	56.5678	35.6339	225.713	1610.16
9	69.7726	67.9486	33.9951	237.155	1831.13
10	81.7627	71.716	38.3423	242.417	1885.76
11	78.2884	68.4595	35.8441	243.099	1804.31
12	80.3047	67.8637	29.4324	245.102	1887.3
13	75.8875	69.0561	29.9104	254.623	1800.52
14	63.9524	59.4662	39.4459	271.406	1765.73
15	87.7621	65.7783	32.6867	287.614	1656.16
16	72.3144	58.5584	33.6537	291.342	1614.13
17	66.6284	71.436	43.9513	294.926	1653.06
18	74.5812	71.7777	44.4201	281.971	1667.25
19	79.9452	75.2073	47.8119	292.629	1744.41
20	79.9581	73.258	47.5415	296.544	1782.7
21	82.356	78.9595	49.0337	270.455	1759.2
22	61.1792	54.6517	51.5161	297.073	1655.58
23	61.3636	65.8791	53.8916	299.977	1368.89
24	59.0633	55.38	55.6142	298.914	1121.03
총 연료비용[\$]					924,075



(a) 방류량



(b) 저수지 수위

그림 14 매시간 수력 발전소의 방류량 및 수위
Fig. 14 Hourly hydro plant discharge and water level

그림 14에 나타내었다. 그림 14로부터 제안한 방법은 각 발전기의 방수량 제약 및 저수지 수위 제약을 만족하면서 최적의 발전 출력을 구하는 것을 확인할 수 있으며, 표 7에서는 제안한 방법에 의해 구한 결과를 기존의 방법과 비교하였다. 비교 결과, 제안한 방법은 기존의 방법에 비해 계산시간 및 최적해를 크게 개선함을 알 수 있다. 특히 유전알고리즘의

7 기존의 방법에 의한 결과와 비교

Table 7 Comparison of methods and results

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

경우 최적해 부근에서 수렴하기 위해 많은 계산시간을 소요하는데 반해, 제안한 확률 타부 탐색법은 탐색지점을 중심으로 강도높은 탐색을 수행하므로 보다 빠른 수렴 특성을 가지며, 재설정 과정에 의해 전역적 탐색도 가능함을 알 수 있다.

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 방법에 의해 경제운영 계획 수립을 위한 결정변수로서는 수력 발전기의 매시간 출력을 선정하여 복잡한 수화력 계통의 제약을 쉽게 고려할 수 있도록 하였고, 동시 제약 범위내에서 수량 제약을 만족하도록 디코딩함으로써 실행가능해의 영역내에서 효율적으로 수화력 계통의 경제운영 계획을 수립할 수 있도록 하였다. 사례 계통에 대해 제안한 방법을 적용하여 시뮬레이션 수행한 후, 기존의 결과와 비교·검토함으로써 제안한 방법의 우수성을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음(99-지정-18)

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 Power Systems, 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 Power Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 226-235, 1998
 [3] Abdul Halim and Khalid Mohamed-Nor, "An Efficient Method for Optimal Scheduling of Fixed Head Hydro and Thermal Plants", IEEE Trans. Power System,

Vol. 6, No. 2, pp. 632-636, May 1991

[4] S. Chang, C. Chen, I. Fong, P. B. Luh, "Hydroelectric Generation Scheduling with an Effective Differential Dynamic Programming", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 737-743, 1990
 [5] S. O. Orero, M. R. Irving, "A Genetic Algorithm Modelling Framework and Solution Technique for Short Term Optimal Hydrothermal Scheduling", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 2, pp. 501-518, 1998
 [6] 이용환, 황기현, 문경준, 박준호, "유전알고리즘을 이용한 단기 수력 스케줄링에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 48권 9호, 1999
 [7] F. Glover and M. Laguna, "Tabu Search", Kluwer Academic Publishers, 1997
 [8] M.D. Asic and V.V. Kovacevic-Vujcic, "Tabu Search Methodology in Global Optimization", Computers and Mathematics with Applications 37, pp. 125-133, 1999
 [9] 김형수, 황기현, 박준호, "확률적 타부 탐색 전략을 이용한 새로운 함수 최적화방법에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 50D권 11호, pp. 532-540, 2001
 [10] F. Manzanedo, J. L. Castro, M. Perez-Donsion, "Application of evolutionary techniques to short-term optimization of hydrothermal systems", Proceedings of International Conference on Power System Technology, Vol. 3, pp. 1539-1544, 2000
 [11] J. Wood and F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, And Control", JOHN WILEY & SONS, INC., pp. 209-263, 1996
 [12] 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

저 자 소 개

김 형 수 (金亨洙)

전기학회논문지 제 50A권 제 11호 참조
 Tel : 051) 510-3188, Fax: 051) 513-0212
 E-mail : kimhsu@hyowon.pusan.ac.kr

문 경 준 (文景俊)

전기학회논문지 제 50A권 제 11호 참조
 Tel : 051) 510-3188, Fax: 051) 513-0212
 E-mail : kjmun@hyowon.pusan.ac.kr

박 준 호 (朴俊濤)

전기학회논문지 제 50A권 제 11호 참조
 Tel : 051) 510-2370, Fax: 051) 513-0212
 E-mail : parkjh@hyowon.pusan.ac.kr