

Tabu 탐색법을 이용한 수화력 계통의 단기 운용 계획

김성기 · 김형수 · 문경준 · 황기현 · 박준호
부산대학교 전기공학과

A Short Term Hydro-Thermal Scheduling using Tabu Search

Sung-Ki Kim · Hyung-Su Kim · Kyeong-Jun Mun · Gi-Hyun Hwang · J. H. Park
Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract - This paper propose the method combined Priority and Tabu search (TS) for short term hydro-thermal scheduling. We satisfy various constraint conditions using TS. Restarting method is used as diversification strategy of TS to prevent a local convergence. Also, we use Lagrangian method to solve economic dispatch problems.

여기서, $F_i(P_{Si}^t)$: t시간에 i번째 화력 발전소의 출력 따른 연료 비용함수
 C_{Si}^t : 시구간 t에서 i번째 화력 발전소의 고정 비용
 T, N : 계획 시간 및 화력발전기의 수

1. 서 론

수화력 계통의 단기 운용 계획 목적은 각 발전기에 최적의 출력 배분을 수행함에 있어 주어진 제약조건을 만족하면서 화력 발전소의 총 연료 비용을 최소화하는데 있다. 화력 발전소만으로 구성된 계통과는 달리 수화력 계통은 수화력 발전소 간의 전기적 결합뿐만 아니라, 수력학적 결합을 고려해야하므로 문제가 더욱 복잡해진다.

화력 발전소만으로 구성된 계통의 제약조건으로는 전력 수급 조건, 운전 예비력 확보, 각 발전기의 출력한계, 최소 운전 및 정지 시간 등이 있으며, 여기에 수력 발전소의 제약 조건인 자연 유입량, 상류 댐의 방류 특성을 고려한 수량 평형 조건, 저수량 및 방류량 한계, 최종 저수량 고정 등의 제약 조건 추가로 인해 그 해석이 대단히 복잡하다고 할 수 있다[1].

수화력 운용 계획에 사용되고 기존의 방법으로는 Newton Raphson Method[2,3], Dynamic Programing[1,4], Linear Programing 방법[1] 등, 여러 가지 수치해석적 기법들이 제시되었으나[5,6], 이러한 방법들은 다양한 제약조건을 포함시키기가 어려우며 전역적인 최적해(global optimal solution)를 구하기 어려운 단점이 있다. 또한 최근의 최적화 기법으로서 Simulated Annealing, 전문가 시스템, 신경회로망 등을 이용한 방법들이 제시되었지만 많은 계산시간이 소요되고 국부적인 최적해에 수렴되는 문제점이 있다.

본 논문에서는 우선 순위법과 Tabu 탐색법[7,8]을 결합한 수화력 발전기의 단기 운용 계획 방법을 제안하였다. Tabu 탐색법에 의해 다양한 제약조건을 만족시키면서 각 발전기의 운전 및 정지 상태를 설정하였으며, Tabu 탐색법이 국부 최소값에 수렴하는 것을 방지하기 위한 다양화 방법(Diversification)을 제안하였다. 그리고 단기 수화력 운용 계획에 주로 사용되는 라그랑지 미정 계수법을 이용하여 경제 급전 문제를 해결하였다.

2. 문제의 정식화

본 논문에서는 단일수계에 대해 화력 발전소의 총 연료 비용을 최소화하도록 다음과 같이 정식화하였다.

1) 목적함수

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

2) 제약조건

① 계통의 수급 균형 조건

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

여기서, M : 수력발전기의 수

② 발전 출력 제약조건

$$\begin{aligned} P_{Si}^{\text{Min}} &\leq P_{Si}^t \leq P_{Si}^{\text{Max}}, \quad t \in T \\ P_{Hj}^{\text{Min}} &\leq P_{Hj}^t \leq P_{Hj}^{\text{Max}}, \quad t \in T \end{aligned} \quad (3)$$

③ 최소 발전기 기동/정지 시간

$$T_{on,i} \geq MUT_i, \quad T_{off,i} \geq MDT_i, \quad i \in N$$

여기서, $T_{on,i}$: 발전기 i가 연속으로 on된 시간

$T_{off,i}$: 발전기 i가 연속으로 off된 시간

MDT_i : i번째 발전기 최소 정지 시간

MUT_i : i번째 발전기 최소 기동 시간

④ 저수량 및 방류량 제한조건

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

⑤ 수계 연속 조건

$$V_j^t = V_j^{t-1} + I_j^t - Q_j^t - S_j^t + \sum_{k \in N_{j,c}} [Q_k^{t-\tau_{k,j}} + S_k^{t-\tau_{k,j}}]$$

여기서, I_j^t : 시구간 t에서 번째 j수력 발전소로의 자연 유입량

S_j^t : 시구간 t에서 번째 j수력 발전소로의 유출량

$R_{k,u}$: j번째 수력 발전소의 직상류 수력 발전소의 집합

3. Tabu 탐색법

Tabu 탐색법은 경험적인 최적화 알고리즘으로써, 특히 조합최적화 문제를 푸는데 아주 효과적인 방법이다. Tabu 탐색법은 다른 최적화방법에 비해서 메모리구조에서 차이를 가지고 있다. 유전알고리즘, Simulated Annealing은 메모리를 가지지 않는 것과 한지분정법(Banch and Bound) 같이 고정 메모리를 가지는 것과 달리 Tabu 탐색법은 유전한 메모리를 이용하여 한번 방문한 탐색지점에 관해서 반복탐색을 금지하여 국부 최소값에서 벗어날 수 있다. 그리고, 유전알고리즘, Simulated Annealing와 같은 전역탐색기법에 비해 대상문제에 관한 지식을 활용하기에 유리한 탐색기법이다. 뿐만 아니라 초기해에 많이 의존하지 않고 좋은 해를 찾을 수 있고, 프로그래밍하기도 비교적 쉽다는 장점도 있

다. Tabu 탐색법은 강화과정으로 국부 최소값 탐색을 할 수 있고, 다양화 과정을 이용해서 국부 최소값에서 벗어날 수 있도록 한다. Tabu 탐색 과정을 살펴보면, 먼저 문제의 제약조건을 만족하는 영역에서 하나의 해를 선택한다. 이 해 근처에서 이웃해를 생성하고, 이웃해를 평가 후, 가장 좋은 목적함수값 가지는 곳으로 이동(move)한다. 이때 이동하는 해의 속성(attribute)이 tabu list에 포함이 되어 있으면 이동을 하지 않고, tabu list에 포함이 되어 있고 열람기준에 만족하면 tabu로 설정된 해의 속성이 해제되고, 해는 tabu list에서 제외된다. 그리고 해가 국부 최소값에 수렴한 경우에는 전역 탐색 성능을 가진 다양화 과정을 수행한다. 계속적인 탐색을 통하여 정해진 반복 횟수에 도달하거나 해의 개선 정도가 일정수준이하로 떨어질 경우에 탐색을 끝내게 된다.

4. 제안한 방법

본 논문에서는 단기 수화력 운용 계획을 세우는데 먼저 Tabu 탐색법을 이용하여 화력 발전소 기동정지 계획을 세우고, 라그랑지 미정계수법을 이용하여 수화력 계통의 경제 급전 문제를 해결하였다. Tabu 탐색법을 적용할 경우 국부 수렴을 방지하기 위한 다양화 전략으로 그림 1의 Restarting 방법을 적용하였다.

Simple Tabu 탐색법을 적용하여 문제를 푼 후, 국부 수렴이 되었다고 판단할 경우 Restarting 한다. Restarting은 Simple Tabu 탐색법에서 해의 변화된 속성을 저장했다가 가장 적게 변화된 속성을 확률적으로 선택하여 이들 속성을 변화시킨 것을 새로운 현재해로 설정한다.

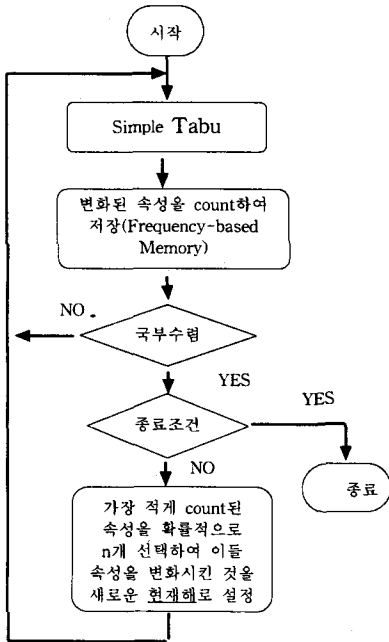


그림 1 restarting을 이용한 Tabu 탐색법

동일한 수계에 여러 개의 수력 발전소가 연결되어 있는 연결 수계의 경우는 그렇지 않은 경우에 비해 운용 계획을 세우는데 있어 더욱 복잡하다. 왜냐하면 상류에서 방류한 물이 하류 발전소의 수위에 영향을 미치게 되고, 각 수력 발전소간 물의 이동시간, 상류 발전소로의 자연 유입량, 지류, 홍수, 장마, 태풍 및 댐의 유지 보수 문제 등을 고려해야 하기 때문이다.

그림 2는 본 논문에서 제안한 Tabu 탐색법을 이용한 수화력 발전계획을 나타내었다. 그림 2에서 보는 것처럼 화력 발전소의 제약조건과 함께 수력 발전소의 시지연(water delay time) 제약 조건을 고려하여 라그랑지 미정계수법으로 최적의 경제 배분을 하였다. 라그랑지 함수는 총 연료 비용함수, 계통의 수급 균형 조건, 사용 수량 일정 조건 등으로 구성하여 수급 균형 조건의 미정계수인 λ , 사용수량 일정 제약조건의 미정계수 γ 를 이용하는 λ - γ iteration 방법을 적용하였다.

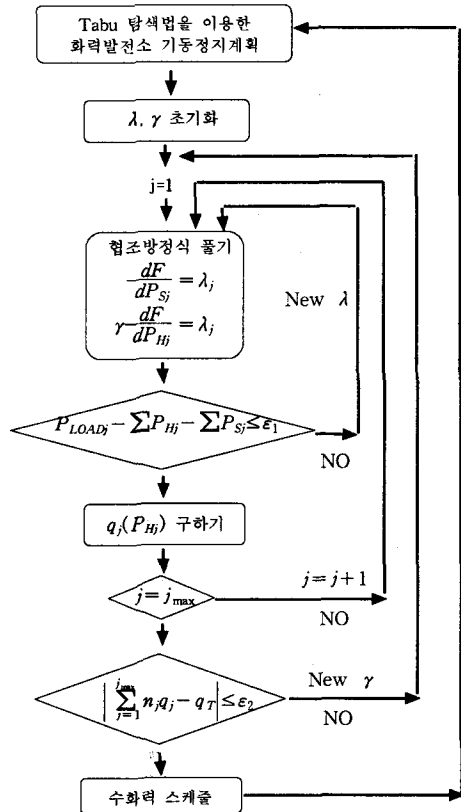


그림 2 Tabu 탐색법과 λ - γ iteration 방법을 이용한 수화력 운용 계획

5. 사례 연구

본 연구에서는 제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해 참고논문[9]의 53대 화력 발전소와 3대의 수력 발전소가 있는 수화력 계통에 대해 적용하였다. 첫 번째 수력 발전소와 두 번째 수력 발전소 사이의 물의 시지연은 2시간이며, 두 번째 수력 발전소와 세 번째 수력 발전소 사이에는 시지연은 없다. 모든 화력 발전소의 최소 기동 및 정지 시간은 2시간이고, 1~53번은 화력 발전소를 나타내며, 54~56번은 수력 발전소이다. 표 1은 발전기의 초기상태를 나타내었고, 1~40번의 화력 발전소는 모두 기동상태이고, 51~53의 화력 발전소는 모두 정지상태이다.

그림 3은 발전기의 초기상태를 이용하여 얻어진 수화력 계통의 발전계획이다. Tabu 탐색법을 통하여 얻어진 발전소의 기동 정지 계획은 표 2와 같고, 최종 수화력 발전 계획은 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 화력 발전소의 발전출력을 수력 발전소가 분담함으로써 인해 화력 발전소의 발전출력이 평탄해짐을 알 수 있고, 수력 발전소가 부하 변화에 맞게 발전하고 있

음을 알 수 있다. 그리고 총 연료 비용과 기동비 면에서 도 더 나은 결과를 얻을 수 있었다.

표 1 발전기 기동정지 계획

발전기	시 간 (1-24)
41	1 1
42	1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
43	1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
44	0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0
45	0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
46	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 0 0
47	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0
48	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0
49	0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
50	0 0

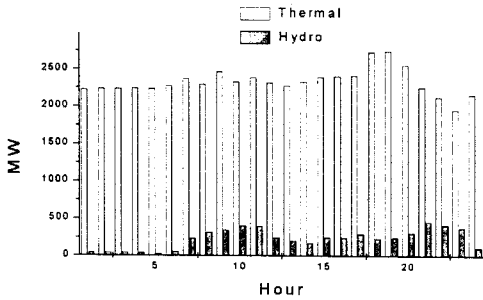


그림 3 초기 상태의 발전 계획

표 2 제안한 방법으로 구한 발전기 기동 정지 계획

발전기	시 간 (1-24)
41	1 1
42	1 1
43	1 1
44	0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0
45	0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
46	0 0
47	0 0
48	0 0
49	0 0
50	0 0

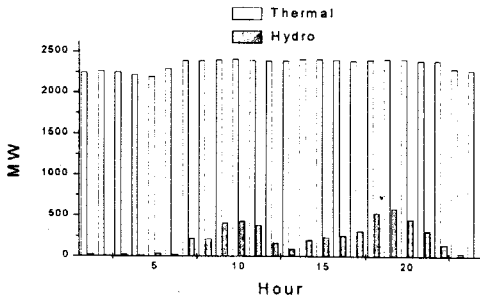


그림 4 제안한 방법에 의한 발전 계획

6. 결론

본 논문에서는 우선 순위법과 Tabu 탐색법을 결합한 수화력 발전기의 단기 운용 계획 방법을 제안하였다. 수

화력 발전소의 단기 운용 계획시 Tabu 탐색법으로 다양한 제약조건을 만족시키면서 각 발전기의 기동 및 정지 상태를 설정하였다. 또한 Tabu 탐색법이 국부 최소값에 수렴하는 것을 방지하기 위해 다양화 전략으로 Restarting 방법을 도입하였다.

제안한 방법의 유용성을 검토하기 위해 화력발전기 53기와 수력발전기 3기의 예제 계통에 적용하였다. 수행 결과, 기존의 방법보다 Tabu 탐색법에 의한 결과가 계산시간 및 수렴속도 면에서 더 나은 결과를 얻을 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. Wood and F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, And Control", pp. 131-170
- [2] M.E. El-Hawary and J.K. Landrigan, "Optimum Operation of Fixed-Head Hydro-Thermal Electric Power Systems : Powell's Hybrid Method versus Newton Raphson Method", IEEE Trans. Vol PAS-101, No. 3, pp.547-554, March, 1982
- [3] Abdul Halim and Khalid Mohamed-Nor, "An Efficient Method for Optimal Scheduling of Fixed Head Hydro and Thermal Plants", IEEE Trans. Power Systems, Vol.6, No. 2, pp.632-636, May 1991.
- [4] M.E. El-Hawary and G.S. Christensen, "Optimal Economic Operation of Electric Power Systems", Academic Press, New York, 1984
- [5] M.F. Calvalho and S. Soares, "An Efficient HydroThermal Scheduling Algorithm", IEEE Trans. Power Systems, Vol PWRS-2, No 3, August 1986.
- [6] D.S., S.A., T.A. and U.N., "Optimal Operations Planning in a large Hydro-Thermal Power System", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol PAS-102, No. 11, November 1983
- [7] F. Glover, "Tabu Search - Part I," ORSA Journal on Computing Vol. 1, No. 3, pp. 190-206, 1989.
- [8] F.Glover and M Laguna, "Tabu Search" pp. 111-116
- [9] X. Bai, "Hydro-thermal scheduling by tabu search and decomposition method", IEEE/PE summer meeting, July 23-27, 1995