

유전 알고리즘에 의한 수화력 협조를 위한 단기 수력 스케줄링

이 용 한 박 준 호  
부산대학교 전기공학과

Short-Term Hydro Scheduling for Hydrothermal Coordination Using Genetic Algorithm

Yong Han Lee, June Ho Park  
Department of Electrical Engineering, Pusan National University

**Abstract** - This paper presents short-term hydro scheduling method for hydrothermal coordination by genetic algorithm. Hydro scheduling problem has many constraints with fixed final reservoir volume. In this paper, the difficult water balance constraints caused by hydraulic coupling satisfied throughout dynamic decoding method. Adaptive penalizing method was also proposed to handle the infeasible solutions that violate various constraints.

The effectiveness of proposed method in this paper was examined through the case studies. Further studies for the validation of the hydro scheduling scheme obtained by genetic algorithm will be very appreciated.

1. 서 론

수화력 협조 문제는 수력 및 화력 하부 문제로 분해하여 해결하는 방법(Decomposition Method)에 의해 두 개의 하부 문제를 상호 교대로 반복적인 방법에 의해 최적화 할 수 있으며, 수학적 최적화 방법론에 근거한 방법들이 적용되어 왔다. 이러한 방법들에는 Lagrange Relaxation(LR)을 이용한 방법들이 주로 적용되고 있으며[9-13], 그 외에 동적 계획법(Dynamic Programming)을 이용한 방법[8], 혼합 정수 계획법(Mixed-Integer Programming)을 이용한 방법[14] 및 타부 탐색법(Tabu Search)을 이용한 방법[3]도 시도되고 있다.

최근 진화론적인 원리에 근거한 최적화 방법들이 많은 분야에 적용되고 있는데, 이러한 방법들의 대표적인 예로 진화 프로그래밍(Evolutionary Programming), 진화 전략(Evolution Strategy) 및 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 들 수 있다. GA는 자연 생태계의 진화 원리를 모의하여 확률적인 방법에 의해 전역 최적해를 탐색하는 알고리즘으로써, 알고리즘의 유연성 및 효용성이 우수하여 많은 최적화 문제에 적용할 수 있다[4,15].

수화력 협조 문제는 많은 제약 조건과 비선형성으로 인해 수많은 국부 최적해가 존재하게 되는데, 미분 이론에 근거한 수화력 최적화 방법들은 이러한 국부 최적해에 수렴하게 될 위험성이 상존하고 있으나, GA는 집단적인 해 후보들의 병렬 진화 및 유전 연산(특히 돌연변이 연산)에 의해 국부 수렴 문제를 해결할 수 있다. 본 논문에서는 수화력 협조를 위한 단기 수력 스케줄링 문제를 해결하기 위한 체계적인 GA 접근 방법을 제안하였으며, GA 파라미터들이 해결단 진화 특성에 끼치는 영향을 분석하여 보다 효과적인 GA 적용 방법을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 수화력 협조 문제의 정식화

2.1.1 기호 정의

- $P_{Hj}^t$  : 시구간 t에서 j번째 수력 발전소의 출력
- $P_{Sj}^t$  : 시구간 t에서 i번째 화력 발전소의 출력
- $F_i^t(P_{Sj}^t)$  : 시구간 t에서 i번째 화력 발전소의 생산비용
- $T$  : 전체 시구간 수
- $R_H$  : 수력 발전소의 전체 집합
- $R_S$  : 화력 발전소의 전체 집합
- $P_D^t$  : 시구간 t에서의 총 부하
- $P_L^t$  : 시구간 t에서의 총 손실
- $V_j^t$  : 시구간 t에서 j번째 수력 발전소의 저수량
- $V_j^{ini}$  : j번째 수력 발전소의 초기 저수량
- $V_j^{end}$  : j번째 수력 발전소의 최종 저수량
- $I_j^t$  : 시구간 t에서 j번째 수력 발전소로의 자연 유입량
- $Q_j^t$  : 시구간 t에서 j번째 수력 발전소의 방류량
- $S_j^t$  : 시구간 t에서 j번째 수력 발전소의 유출량
- $R_{i,U}$  : j번째 수력 발전소의 직상류 발전소의 집합
- $\tau_{j,k}$  : k번째 수력 발전소로부터 방류된 물이 j번째 수력 발전소까지 도달하는 시간
- $C_A, \dots, C_B$  : j번째 수력 발전소의 출력 함수 계수
- $C_{Sj}^t$  : 시구간 t에서 i번째 화력 발전소의 기동 비용
- $V_j^{max}, V_j^{min}$  : j번째 수력 발전소의 저수량 상·하한
- $Q_j^{max}, Q_j^{min}$  : j번째 수력 발전소의 방류량 상·하한
- $P_{Sj}^{max}, P_{Sj}^{min}$  : i번째 화력 발전소의 발전 출력 상·하한
- $P_{Hj}^{max}, P_{Hj}^{min}$  : j번째 수력 발전소의 발전 출력 상·하한

2.1.2 수학적 정식화

- 목적함수
 
$$\min \sum_{t \in T} \sum_{i \in R_S} [F_i(P_{Sj}^t) + C_{Sj}^t] \quad (1)$$
- 부하 평형 조건
 
$$\sum_{i \in R_S} P_{Sj}^t + \sum_{j \in R_H} P_{Hj}^t = P_D^t + P_L^t, \quad t \in T \quad (2)$$
- 수계 연속 조건
 
$$V_j^t = V_j^{t-1} + I_j^t - Q_j^t - S_j^t + \sum_{k \in R_{i,U}} [Q_k^{t-\tau_{j,k}} + S_k^{t-\tau_{j,k}}] \quad (3)$$
- 수력 발전 출력 함수
 
$$P_{Hj}^t = C_A V_j^t + C_B Q_j^t + C_C V_j^t Q_j^t + C_D V_j^t + C_E Q_j^t + C_F, \quad j \in R_H, t \in T \quad (4)$$

## 2.2 유전 알고리즘에 의한 단기 수력 스케줄링

### 2.2.1 유전 알고리즘

유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 진화 연산 기법의 한 종류로서, 자연 생태계의 진화 과정을 모의하여 어떤 문제에 대한 해집단을 확률적으로 진화시켜 감으로써 전역 최적해를 탐색해 가는 방법이다[4].

그림 1에 기본적인 GA 흐름도를 도시하였다.

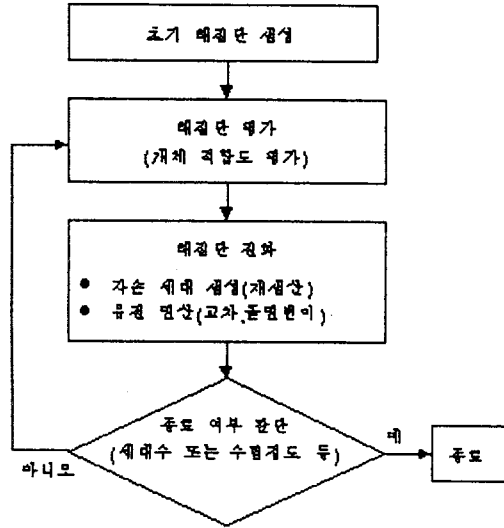


그림 1 기본적인 GA 흐름도

### 2.2.2 수력 스케줄링 문제의 구현

#### 2.2.2.1 목적 함수의 설정

본 논문에서는 목적함수로서 수력 발전 비용을 무시한 전체 발전 및 운전 비용, 즉 화력 발전기들의 발전 비용 및 기동 비용의 합으로 설정하였다.

#### 2.2.2.2 결정 변수의 선정 및 부호화 방법

본 논문에서는 매시구간 각 댐의 방류량을 결정 변수로 사용하는 방법을 선택하였으며, 그림 2와 같이 2진수 부호화 방법과 1차 배열 방식을 사용하여 각 개체를 표현하였다.

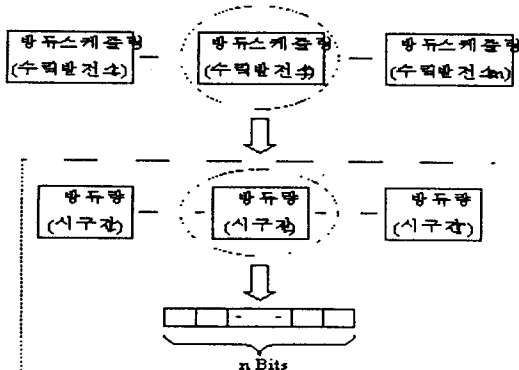


그림 2 개체의 구조

#### 2.2.2.3 디코딩 방법

디코딩(Decoding)은 부호화된 각 개체를 실제의 결정 변수 값으로 환산하는 작업인데, 본 논문에서는 수력 스케줄링 문제의 복잡한 제약 조건을 고려하여, 일정 방류량 범위를 적용하는 정적 디코딩(Static Decoding)과 저수량 제한 및 상부 댐의 방류량 등을 고려한 동적 디코딩(Dynamic Decoding)의 2가지 방법을 비교·검토하였다.

동적 디코딩은 각 댐의 직전 시구간에서의 저수량과 직상류 댐의 과거 방류량 및 유출량, 직후 시구간에서의 최소 및 최대 방류량 제약 조건 등을 고려하여 현 시구간에서의 방류량 상하한을 매시간 새롭게 설정하고, 정제된 방류량을 새롭게 설정된 방류량의 상하한 사이의 값으로 디코딩하는 방법이다.

#### 2.2.2.4 제약 조건 위반 처리

본 논문에서는 수력 발전소의 제약 조건들을, 그들의 성격에 따라

- 경 제약(Hard Constraints) : 물리적 제약 조건 (방류량 상,하한 제약 조건) 및
- 연 제약(Soft Constraints) : 전략적 제약 조건 (최종 저수량 제약 조건)

의 2가지로 분류하여 이들에 대해 벌점 부여 방식을 다르게 적용하였는데, 적합도 평가를 위한 총 비용은 - (총 비용) = (화력기 운전비용) + (벌점 비용) 으로 선정하였으며, 경 제약 및 연 제약 특성을 고려하여 개체의 총 비용이 다음 2가지 조건을 만족하도록 벌점 처리 전략을 수립하였다.

- (경 제약 위반 해의 최저 비용)  $\geq$  (연 제약 위반 해의 최고 비용)
- (연 제약 위반 해의 최저 비용)  $\geq$  (제약조건을 비위반 해의 최고 비용)

위와 같은 방식은 현재 해집단의 구성에 따라 벌점량이 달라지게 되므로, 본 논문에서 이러한 벌점 처리 방식을 적용 벌점 처리 기법(Adaptive Penalizing Method)으로 명명하였다.

#### 2.2.2.5 유전 연산자의 선택

유전 알고리즘에서 사용하는 대표적인 유전 연산자로는 새로운 부모 세대를 형성하는 선택 연산자(Selection operator), 선택된 자손 세대 개체간의 정보의 교환 작업을 수행하는 교차 연산자(Crossover operator), 새로운 탐색 영역으로의 탈출 기회를 부여하는 돌연변이 연산자(Mutation operator)가 있다.

본 논문에서는 스케일링된 적합도의 크기에 비례하는 선택 확률을 가지는 룰렛(Roulette) 선택 연산자, 균일 교차(uniform crossover), 1점 교차(1-point crossover), 2점 교차(2-points crossover) 연산자, 및 균일 돌연변이 연산을 적용하였으며, 또한 우수 개체의 보존을 위해 엘리트 전략을 채용하였다.

## 2.3 사례 연구

### 2.3.1 사례 연구 대상 계통

사례 연구 대상 수력 계통은 그림 3에 도시한 바와 같이 상호 결합된 4개의 수력 발전소로 구성된 계통으로 상정하였으며, 화력 발전소는 등가 단일 발전소로 상정하였다[2].

### 2.3.2 사례 연구 결과

표 1에 매 경우 1000 세대, 10 회 반복 진화를 수행했을 때의 사례 연구 결과를 종합하여 나타내었는데, 유전 알고리즘의 진화 특성이 확률적인 성격을 갖고 있으므로, 해의 다양성이 충분히 확보되며, 진화에 의해 가능 영역 해의 손실을 방지할 수 있는 경우의 진화 결과가 양호함을 알 수 있다. 즉, 동적 디코딩을 적용하여

실질적인 해의 다양성이 확보되고, 엘리트층에 의해 적정한 엘리트의 복제를 보장한 경우(본 논문에서는 5 - 10%)의 진화 결과가 그렇지 못한 경우에 비해 우수한 결과를 나타내었다.

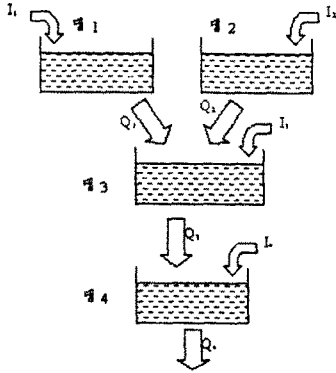


그림 3 수력 발전 계통도

표 1 사례 연구 결과 종합

case #	최적비용	평균비용	표준 편차
1	927210.0	936101.0	5791.700
2	929852.3	933083.4	2097.897
3	927805.4	935178.6	5560.835
4	927720.9	934578.2	5015.241
5	927207.6	931249.7	3722.134
6	930927.9	932469.2	1481.845
7	931618.3	933698.7	1444.199
8	930007.4	932362.6	2494.642
9	935360.2	945682.1	4834.248
10	935100.3	937126.9	1726.873
case 1	: 동적 디코딩, 엘리트 수=5, 균등 교차		
case 2	: 정적 디코딩, 엘리트 수=5, 균등 교차		
case 3	: 동적 디코딩, 엘리트 수=5, 1점 교차		
case 4	: 동적 디코딩, 엘리트 수=5, 2점 교차		
case 5	: 동적 디코딩, 엘리트 수=10, 균등 교차		
case 6	: 정적 디코딩, 엘리트 수=10, 균등 교차		
case 7	: 정적 디코딩, 엘리트 수=5, 1점 교차		
case 8	: 정적 디코딩, 엘리트 수=5, 2점 교차		
case 9	: 동적 디코딩, 엘리트 수=1, 균등 교차		
case 10	: 정적 디코딩, 엘리트 수=1, 균등 교차		

### 3. 결 론

본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하여 수화력 협조를 위한 단기 수력 스케줄링 문제를 최적화하는 방법에 대해 검토하였다.

유전 알고리즘은 비록 계산 시간이 길다는 단점을 가지고 있으나, 문제에 대한 제한이 거의 없으므로, 오프라인(off-line) 해석이 가능한 수력 스케줄링 문제에 매우 적합한 최적화 도구라 할 수 있다.

본 논문에서는 수력 스케줄링 문제에 적합한 디코딩 방법과 적응 벌점 부여 방식을 제안하여 많은 제약 조건을 갖는 수력 스케줄링 문제 해결을 위한 유전 알고리즘 적용 방법을 제시하였으며, 사례 계통에의 적용을 통해 유용성을 확인하였다.

그러나 실무계 계통의 수화력 협조 문제를 해결하기 위해서는 화력 발전기들의 기동정지계획 문제에 대한 빠른 해법과 더불어 유전 알고리즘이 갖고 있는 병렬성을

최대한 활용할 수 있는 병렬 처리기법 등에 관한 연구가 계속 진행되어야 할 것이며, 또한 유전 알고리즘으로 구한 수력 스케줄링의 타당성에 대한 검증 방법도 연구되어야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons, 1996.
- [2] 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.
- [3] X. Bai, S. M. Shahidehpour, "Hydro-Thermal Scheduling by Tabu Search and Decomposition Method", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 968-974, 1996.
- [4] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison Wesley, 1989.
- [5] P. Chen, H. Chang, "Genetic Aided Scheduling of Hydraulically Coupled Plants in Hydro-Thermal Coordination", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 975-981, 1996.
- [6] I. J. Nagrath, *Power System Engineering*, Tata McGraw-Hill, 1994.
- [7] M. E. El-Hawary, "An Overview of Scheduling Functions in Hydro-Thermal Electric Power Systems", *Proceedings of the 1991 IASTED International Conference*, pp. 1-37, 1991.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] S. Ruzic, N. Rajakovic, A. Vuckovic, "A Flexible Approach to Short-Term Hydro-Thermal Coordination. Part I : Problem Formulation and General Solution Procedure", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No. 3, pp. 1564-1571, 1996.
- [12] S. Ruzic, N. Rajakovic, A. Vuckovic, "A Flexible Approach to Short-Term Hydro-Thermal Coordination. Part II : Dual Problem Solution Procedure", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No. 3, pp. 1564-1571, 1996.
- [13] X. Guan, E. Ni, R. Li, P. B. Luh, "An Optimization-Based Algorithm for Scheduling Hydrothermal Power Systems with Cascaded Reservoirs and Discrete Hydro Constraints", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 1775-1780, 1997.
- [14] O. Nilsson, D. Sjelvgren, "Mixed-Integer Programming Applied to Short-Term Planning of a Hydro-Thermal System", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 281-286, 1996.
- [15] M. Gen, R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, 1997.