

# 립자무리최량화에 의한 수력발전소의 최량운영방안탐색방법

박 경 호

립자무리최량화방법은 탐색속도를 우연적으로 변화시키면서 대역최량점으로 다가가기때문에 대역탐색성능과 수렴성이 좋은것으로 하여 수력발전소최량화문제풀이에 적합한것으로 알려졌다.[1, 3, 4]

론문에서는 립자무리최량화를 수력발전소의 최량운영방안탐색에 적용하는 방법을 제기하였다.

## 1. 립자무리최량화에 의한 수력발전소의 최량운영방안탐색원리

립자무리최량탐색법(PSO)에서는 최량화문제의 후보풀이들을 모두  $D$ 차원탐색공간에서의 하나의 점 즉 립자(Particle)라고 하고 모든 립자들은 목표함수에 의해 결정되는 적응도값을 가진다고 본다.  $D$ 차원목표탐색공간에서  $m$ 개의 가능한 문제풀이후보립자들로 구성된 립자무리는 다음과 같다.[2]

$$X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_m\} \quad (1)$$

그중 제 $i$ 립자의 위치는

$$x_i(t) = [x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iD}(t)]^T$$

속도는

$$v_i(t) = [v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{iD}(t)]^T, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

그리고  $t$ 단계의 립자의 최량풀이는  $p_i(t) = [p_{i1}(t), p_{i2}(t), \dots, p_{iD}(t)]^T$ , 무리의 최량풀이는  $p_g(t) = [p_{g1}(t), p_{g2}(t), \dots, p_{gD}(t)]^T$ 이며 여기서  $g$ 는 무리중에서 제일 좋은 위치를 차지한 립자의 번호( $g \in \{1, 2, \dots, m\}$ )이다.

립자들이 자체의 경험과 무리중의 제일 좋은 립자를 따르는 원리에 의하여 다음단계에로의 위치변화조작은 다음과 같이 한다.

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 r_1 [p_i(t) - x_i(t)] + c_2 r_2 [p_g(t) - x_i(t)] \quad (2)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (3)$$

여기서  $d = 1, 2, \dots, D$ ,  $D$ 는 탐색공간의 차수,  $t$ 는 단계번호,  $c_1, c_2$ 는 가속상수인데  $c_1$ 은 립자자체의 과거 제일 좋은 방향으로 움직이는 걸음길이,  $c_2$ 는 무리의 제일 좋은 방향으로 움직이는 걸음길이,  $r_1, r_2$ 는  $[0, 1]$ 사이의 평균분포우연수이다.

$f(x)$ 를 최대화문제의 목적함수라고 하면 립자  $i$ 의 최량풀이는 다음의 식으로 갱신한다.

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t), & f[x_i(t+1)] \leq f[p_i(t)] \\ x_i(t+1), & f[x_i(t+1)] > f[p_i(t)] \end{cases} \quad (4)$$

무리의 최량값  $f_g$ 는 다음의 식으로 확정한다.

$$f_g = \max \{f[p_1(t)], f[p_2(t)], \dots, f[p_m(t)]\} \quad (5)$$

이때 최량값을 주는 립자의 최량풀이  $p_i(t)$  가 무리의 최량풀이로 된다.

표준립자무리최량화산법의 주요단계는 다음과 같다.

결음1: 립자무리의 위치와 속도에 대한 초기화를 진행한다.

결음2: 식 (2), (3)으로 립자의 속도와 위치를 갱신하여 새 무리  $X(t+1)$  를 구성한다.

결음3: 립자무리  $X(t+1)$  을 평가한다. 즉 매 립자들의 적응도값을 계산한다.

결음4: 식 (4), (5)에 의하여 립자와 무리의 최량풀이, 최량값갱신을 진행한다.

결음5: 일반적으로 충분히 좋은 적응도값 혹은 예정한 최대반복수를 만족하면 결속하고 아니면  $t=t+1$ 로 하고 결음2로 간다.

구하려는 최량풀이를 립자로 하며 적응도값은 수력발전소최량운영모형의 목적함수값으로 한다.

수력발전소최량운영에 대한 수학적모형은 이미 많이 연구되었는데 단독저수지인 경우에는 다음과 같이 쓸수 있다.[1, 4]

목적함수

$$f(Q) = \max E = \sum_{j=1}^{12} P_j t_j, \quad P_j = A Q_j H_j \quad (6)$$

여기서  $P_j$ ,  $Q_j$ ,  $H_j$  는 각각  $j$ 시단의 평균출력, 평균사용수량, 평균유효낙차들이고  $A$ 는 출력계수이다.

제한조건들은 다음과 같다.

물바란스제한조건은

$$V_j = V_{j-1} + 3600t_j[I_j - O_j], \quad j \in [1, 12] \quad (7)$$

여기서  $I_j$  와  $O_j$  는 각각  $j$ 시단의 저수지평균류입량과 평균방출량이다.

시단평균방출량은

$$O_j = Q_j + S_j, \quad j \in [1, 12] \quad (8)$$

여기서  $Q_j$ ,  $S_j$  는  $j$ 시단의 발전소평균사용수량과 평균일류량이다.

저수지의 저수용적제한은

$$V^{\min} \leq V_j \leq V^{\max}, \quad j \in [1, 12] \quad (9)$$

여기서  $V_j$ ,  $V^{\min}$ ,  $V^{\max}$  는 각각 저수지의  $j$ 시단말용적, 최소, 최대허용(운영기준)용적이다.

타빈방출량제한은

$$Q^{\min} \leq Q_j \leq Q^{\max}, \quad j \in [1, 12] \quad (10)$$

여기서  $Q_j$ ,  $Q^{\max}$ ,  $Q^{\min}$  은 각각  $j$ 시단의 발전소의 평균사용수량과 최대, 최소허용타빈방출량이다.

출력제한은

$$P_j^{\min} \leq P_j \leq P_j^{\max}, \quad j \in [1, 12] \quad (11)$$

여기서  $P_j$ ,  $P_j^{\max}$ ,  $P_j^{\min}$  은 각각 발전소  $j$ 시단의 평균출력과 가능최대, 최소출력이다.

수력발전소최량화문제에서 탐색해야 할 값은 일반적으로 월별평균사용수량( $Q_j$ )이다.

그러므로 립자무리에서  $i$ 번째 립자  $x_i(t) = [x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{id}(t)]^T$  는  $Q_i(t) = [Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_{d-1}(t), Q_d(t)]$ 에 대응된다.

제한조건들은 벌칙함수를 리용하여 처리하는데 이 함수는 제한을 위반하지 않으면 목적값에 영향을 주지 않고 위반하면 위반정도에 따르는 벌칙값을 적용하여 목적값에서 덜어주게 함으로써 탐색과정에 제한을 위반하지 않는 풀이들만을 탐색해내도록 하는 작용을 한다.

벌칙함수를 리용하여 제한조건들을 가지는 조건부극값문제를 무조건극값문제로 넘길 때 목적함수  $F(x)$ 는 다음과 같이 된다.

$$F(x) = f(x) - \alpha fp_k(x) \quad (12)$$

여기서 제한위반때 벌칙함수는

$$fp_k(x) = \max\{0, g_k(x)\} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

여기서  $g_k(x)$ 는  $k$ 번째 제한조건,  $\alpha$ 는 벌칙계수(일반적으로 큰 수)이다.

용적제한조건식 (9)를 다음과 같은 벌칙항으로 만들수 있다. 즉

$$\left. \begin{aligned} fp_1(x) &= V^{\min} - V_j \\ fp_2(x) &= V_j - V^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

여기서는 탐색변수를 사용수량으로 하고 최대출력을 낼수 있는 최대사용수량과 최소 사용수량사이에서 탐색을 하도록 함으로써 식 (10), (11)을 탐색과정에 항상 만족하게 하고 용적과 관련되는 제한식 (9)만을 위반하지 않도록 벌칙함수를 적용하였다.

$$Q_j = Q^{\min} + (Q^{\max} - Q^{\min})x$$

여기서  $x$ 는 립자무리최량화탐색에서의 탐색변수([0, 1])이다.

## 2. 계산실험과 분석

계산실험에서는 ㄷ발전소저수지지점의 60년간 류입량자료를 리용하였다.

이 발전소의 저수지용적계수는 0.223으로서 계절조절능력만을 가지고있으므로 조절 주기는 1년으로 하고 연간류입되는 물량으로 연간발전량이 최대로 되게 할 때의 월별사용수량과 월별운영수위, 월별발전량을 계산하였다.

수력발전소의 최량운영방안탐색의 탐색정확도를 평가하기 위하여 평수년인 1967년 흐름량조건에서 10차의 최량탐색계산결과에 대한 분석을 진행하였다.

평균발전량 47 314 837kWh로부터의 평균절대오차 17 804kWh, 상대오차 0.037 6%로서 거의 편차가 없다는것은 탐색알고리즘이 충분한 탐색정확성을 가진다는것을 보여준다.(표 1)

표 1. 최량탐색의 정확성평가

No.	발전량/kWh	편차/kWh	상대오차/%
1	47 340 343	25 507	0.053 9
2	47 333 187	18 350	0.038 8
3	47 342 438	27 601	0.058 3
4	47 332 399	17 562	0.037 1
5	47 300 000	14 837	0.031 4
6	47 300 000	14 837	0.031 4
7	47 300 000	14 837	0.031 4
8	47 300 000	14 837	0.031 4
9	47 300 000	14 837	0.031 4
10	47 300 000	14 837	0.031 4
평균	47 314 837	17 804	0.037 6

평수년인 2001년도의 계산결과인 표 2에서 보는바와 같이 전력생산량이 최대가 되도록 고수위운영이 진행되고 총류입량과 방출량이 같으며 최대사용수량 15m<sup>3</sup>/s를 초과하지 않는 등 제한조건들이 충분히 만족된다는것을 알수 있다.

표 2. 월별수위, 류입량, 방출량, 최량사용수량, 전력량

월	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
수위/m	619.79	620	620	619.99	620	619.9	619.25	612.59	603	600.39	608.47	620
류입량/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	7.7	5.3	3.3	1.8	2	2.3	4.3	2.2	2.5	12.8	20.1	24.7
방출량/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	8	5.1	3.3	1.8	2	2.4	5	7.6	9.2	14.2	15	15.3
사용수량/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	8	5.1	3.3	1.8	2	2.4	5	7.6	9.2	14.2	15	15
전력량/(×10 <sup>6</sup> kWh)	4.5	2.8	1.9	1.1	1	1.4	2.7	4.1	4.3	6	6.5	7.2

그림 1에서 보는바와 같이 고수위운영을 하다가 5월부터 류입량보다 더 많은 물을 리용하면서 전기를 생산하고 큰물시기 일류량을 줄이면서도 연말에 고수위를 유지한다.

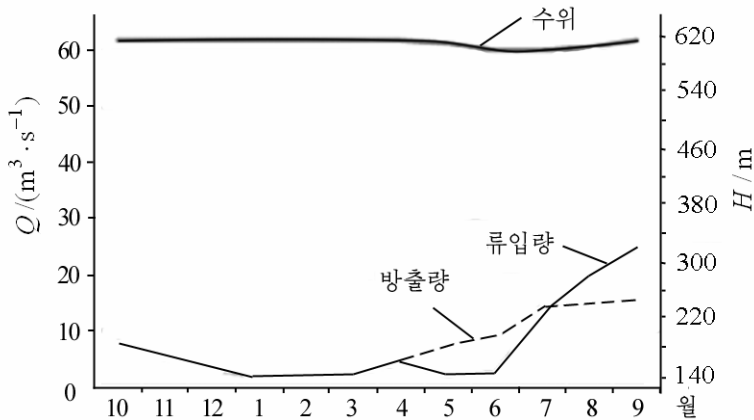


그림 1. 최량운영수위, 류입량과 최량방출량

그림 2는 연간 류입되는 물량을 가지고 전력을 최대로 생산할 때의 월별전력생산량이다. 이것은 월별보장출력제한을 주지 않았을 때의 발전량이며 현실에서는 월별로 보장하여야 할 최소발전량제한이 설정되게 된다.

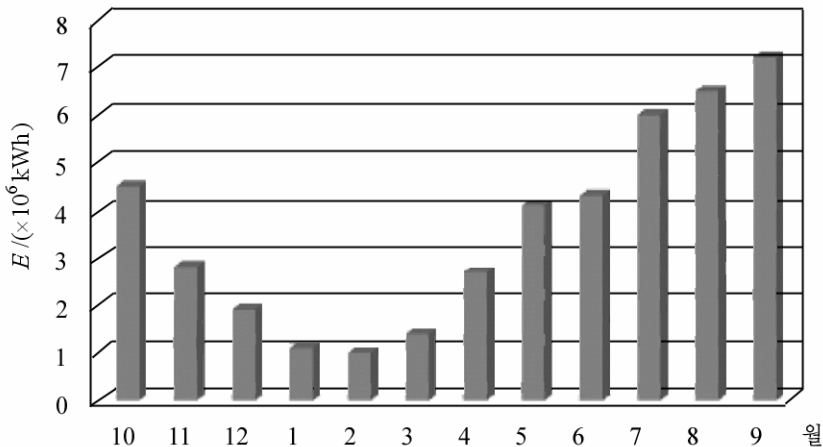


그림 2. ㄷ발전소의 월별전력생산량

## 맺 는 말

수력발전소의 최량운영방안탐색에 립자무리최량화를 적용하는 방법을 제기하고 ㄷ발 전소에서 월별류입량예보값으로 월별보장발전량제한이 없을 때의 최량운영방안계산을 진행한 실례를 주었다. 월별류입량예보의 불확정성이 존재하고 월별로 보장하여야 할 출력이 주어지는 현실조건에서는 그에 맞는 실시간조절방법이 안받침되어야 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] 박경호; 기상과 수문, 1, 18~20, 주체94(2005).
- [2] 박경호, 신철준; 기상과 수문, 1, 17~19, 주체104(2015).
- [3] Zhong-Kai Feng et al.; J. Water Resour. Plann. Manage., 143, 10, 128~137, 2017.
- [4] 张双虎 等; 水力发电学报, 26, 1, 2, 2007.

주체109(2020)년 10월 5일 원고접수

## **Particle Swarm Optimization Method for the Optimization of Hydroelectric Power Operation Scheduling**

*Pak Kyong Ho*

In this paper, particle swarm optimization method is proposed for the optimization of hydroelectric power operation scheduling.

Keywords: hydroelectric power, particle swarm optimization, water management