

통합혼합정수계획법 모형을 이용한 수력발전소의
최적 발전기 운영계획 수립
Optimal Unit Commitment of Hydropower System Using
Combined Mixed Integer Programming

이 재 응*

Yi, Jae Eung

Abstract

An optimal unit commitment model for efficient management of water and energy resources in a basin using combined mixed integer programming is developed. The combined mixed integer programming model is able to solve the inconsistency problem that may occur from mixed integer programming models. The technique which enables the use of conditional constraints and either-or constraints in the linear programming is also suggested. As a result of applying the combined mixed integer programming model to Lower Colorado River Basin in United States, the basin efficiency is decreased by 1.53% from the results of the mixed integer programming, while it is increased by 0.67% from the results of the historical operation. It is found that the decreased allowable error between power supplies and demands in the combined mixed integer programming causes the decreased basin efficiency.

Keywords: unit commitment, combined mixed integer programming, basin efficiency

요 지

유역내의 수력 에너지자원과 수자원의 효율적 관리를 위하여 통합혼합정수계획법(combined mixed integer programming)을 사용한 최적 발전기 운영계획 모형을 개발하였다. 통합혼합정수계획법 모형은 기왕에 개발된 혼합정수계획법 모형에서 발생할 수 있는 모순을 해결하기 위하여 개발되었다. 또한, 조건부 제약조건과 택일 제약조건들을 선형계획법 모형에서 사용할 수 있도록 수정하는 기법을 제안하였다. 미국 콜로라도강 하부유역에 통합혼합정수계획법을 적용한 경우를, 최적화 모형을 사용하지 않은 경우 및 혼합정수계획법을 사용한 경우와 비교한 결과, 최적화 기법을 사용하지 않은 경우보다 유역효율이 0.67% 증가하였고, 혼합정수계획법을 사용한 경우보다 유역효율이 1.53% 감소하였다. 통합혼합정수계획법모형의 효율이 감소한 이유는 혼합정수계획법모형보다 전력요구량과의 허용오차를 감소시켰기 때문인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 발전기 운영계획, 통합혼합정수계획법, 유역효율

* 아주대학교 환경도시공학부 조교수

Assistant Prof., School of Envir. and Urban System Engrg., Ajou Univ., Suwon, Kyonggi 442-749, Korea

1. 서론

유역내의 수력 에너지자원과 수자원의 효율적 운영을 위하여 Yi(1998)는 혼합정수계획법(mixed integer programming)을 사용한 최적 발전기 운영계획 모형을 개발하였다. 최적 발전기 운영계획 모형은 '언제', '어느 발전기에', '얼마만한 양을' 발전시켜야 유역의 수자원과 에너지 자원의 이용효율을 최대로 할 수 있을 것인가를 결정하는 모형이다. 이 모형은 대상 유역내 시스템의 규모에 따라 포함된 변수들의 상당수가 정수형 변수인 동시에 대규모(large-scale), 비선형(nonlinear), 오목형(concave), 다차원(multi-dimensional) 최적화 문제에 구분될 수 있다.

이를 해결하기 위하여 Lowery(1966), Pang 등(1976), Lauer 등(1982), Van den Bosch 등(1985), Snyder 등(1991)은 동적계획법을 사용한 모형을 개발하였고, Virmani 등(1982), Ruzic 등(1991), Baldlick 등(1995), Guan 등(1995), Peterson 등(1995)은 Lagrangian 기법을 사용한 모형 등을 개발하였다.

Yi(1998)에 의해 개발된 혼합정수계획법 모형은 유역내의 댐들을 발전이 주목적인 발전용 댐들과 용수공급이 주목적인 용수공급용 댐들로 구분하여, 발전용 댐들에서는 주어진 전력수요를 만족시키도록 전력생산을 하면서 방류를 최소로 하도록 하였고, 용수공급용 댐들에서는 주어진 용수수요를 만족시키도록 방류를 하면서 전력생산을 최대로 하도록 구성되었다. 총 전력수요, 예비전력 보유 요구량, 저수지에서의 의무 방류량, 발전기의 rough zone에서의 운영 회피, 발전기의 최소 운영 및 정지시간, 운영할 수 없는 발전기, 효율이 뛰어나 꼭 운영해야 하는 발전기, 공회전하는 발전기 등 유역과 수력발전소에 필요한 각종 조건들을 고려하여 일간 발전기들의 운영계획이 수립되었다. 혼합정수계획법 모형은 용수공급용 댐들의 시간별 방류계획을 수립하는 부속모형 PLANT_DY_W, 작성된 방류계획을 기준으로 모든 수력발전소의 발전기 운영계획을 수립하는 두 개의 부속모형 PLANT_GO_W와 PLANT_ST_W 등 모두 세 개의 부속모형으로 구성되어 있다. 그러나 각 부속모형들은 각각 상이한 조합의 제약조건들을 사용하기 때문에, 첫 번째 부속모형에서 얻은 발전기들의 운영계획과 다른 두 개의 부속모형에서 얻은 발전기들의 운영계획들이 일치하지 않을 수도 있다. 이럴 경우 첫 번째 부속모형에서 산정된

방류계획이 다른 두 개의 부속모형의 운영기준으로 사용될 때 불능해(infeasible solution)를 발생시키는 원인이 될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 통합혼합정수계획법(combined mixed integer programming) 모형을 개발하였다. 통합혼합정수계획법 모형은 혼합정수계획법 모형에서 개발된 세 개의 부속모형들을 하나로 통합한 모형이다.

2. 문제구성

2.1 목적함수

통합혼합정수계획법의 목적함수는 유역내의 수자원과 에너지자원의 통합운영효율로 정의되는 유역효율을 최대화하는 것으로 다음과 같다.

$$\max BG = \sum_{t \in T} \left(\sum_{w \in W} P_{wt} - E \cdot \sum_{g \in G} (Q_{gt} \cdot H_g \cdot 8.45 \times 10^{-5}) \right) \cdot \Delta t_t \quad (1)$$

여기서 BG 는 유역의 일간 발전량(MWh), P_{wt} 는 시간 t 일 때 용수공급용 댐 w 에서의 발전량(MW), E 는 효율, Q_{gt} 는 시간 t 일 때 발전용 댐 g 에서의 방류량(cfs), H_g 는 식 (2)로 계산되는 발전용 댐 g 에서의 총 수두차(ft), Δt_t 는 전력 수요 계획과 예비 전력 수요계획이 일정한 시간의 길이(hr), T 는 전력 수요 계획이나 예비전력 수요계획이 변화하는 시간들의 집합, W 는 유역내에서 용수공급이 주목적인 모든 댐들의 집합, G 는 유역내에서 발전이 주목적인 모든 댐들의 집합을 나타낸다.

식 (1)에서 발전량을 계산하기 위하여 필요한 저수지 상·하류의 낙차는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_p = FB_p - TB_p \quad \text{for all } p \in P \quad (2)$$

여기서 FB_p 와 TB_p 는 각각 댐 p 의 저수위(ft)와 방수위(ft)를 나타낸다.

운영효율의 증가는 두 가지 방법을 통하여 얻을 수 있다. 첫째, 용수공급이 주목적인 댐들에서는 주어진 발전수요를 만족시키면서 방류를 최소로 하여 귀중한 수자원의 낭비를 방지한다. 둘째, 발전이 주목적인 댐들에서는 주어진 요구방류량을 만족시키면서 발전을 최대로 하여 에너지 자원을 최대한 이용한다.

2.2 제약조건

댐으로부터의 시간당 방류량은 각 터빈을 통한 시간당 방류량의 합으로 표현할 수 있다. 또한, 용수공급이 주목적인 댐에서의 시간당 방류량은 주어진 시간당 최소방류량 $Q_{\min, wt}$ 이상이어야 하며, 총 방류량도 주어진 총 요구방류량 이상이어야 한다. 방류량과 발전량 곡선을 모형 내에서 쉽게 해석하기 위하여 식 (3)과 같이 선형화하였다.

$$UFH_{it} = SNF_i \cdot OL_{it} + \frac{GL_{it} \cdot (BP_i - SNF_i)}{HZ_i} + SN_i \cdot OU_{it} + \frac{GU_{it} \cdot (CF_i - SN_i)}{C_i} + CT_i \cdot GU_{it} \quad (3)$$

$$Q_{pt} = \sum_{i \in N(p)} UFH_{it} \quad \text{for all } t \in T \quad (4)$$

$$Q_{wt} \geq Q_{\min, wt} \quad \text{for all } t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{t=1}^T (Q_{wt} \cdot \Delta t_t) = SF_w \cdot 24 \times 10^3 \quad \text{for all } w \in W \quad (6)$$

여기서 UFH_{it} 는 시간 t 에 운영할 수 있는 터빈 i 를 통과하는 유량(cfs)을 나타낸다. SNF_i 는 무발전 방류량(cfs), BP_i 는 방류량과 발전량 곡선을 선형화할 때 절단점에 해당하는 방류량(cfs), SN_i 는 절단점 상류부를 연장했을 때 무발전 방류량(cfs), CF_i 는 최대 발전량에 해당하는 방류량(cfs), CT_i 는 저수지 하류의 수심 상승효과를 고려한 방류량(cfs), OL_{it} , OU_{it} 는 각각 시간 t 에 발전기 i 의 rough zone 하부 및 상부의 발전상태를 나타내는 이진변수(binary variables), GL_{it} , GU_{it} 는 각각 시간 t 에 발전기 i 의 rough zone 하부 및 상부에서 발전한 량(MW), HZ_i 는 각 발전기 i 에서 rough zone의 상부값

(MW), C_i 는 운영할 수 있는 발전기 i 의 용량 (MW), Q_{pt} 는 시간 t 에 댐 p 로부터의 방류량(cfs), Q_{wt} 는 시간 t 에 발전용 댐 w 로부터의 방류량(cfs), SF_w 는 1000cfs로 표시되는 각 용수공급용 댐으로부터의 계획방류량, $A(p)$ 는 댐 p 에서 운영할 수 있는 발전기들의 집합을 나타낸다.

모든 발전기들은 rough zone을 벗어난 영역에서 발전해야 한다. 여기서 rough zone이란 발전기가 이 영역 내에서 발전하면 진동이 심하게 발생하여 발전기의 수명이 단축되므로 가능하면 회피해야 하는 영역을 나타낸다.

$$\begin{aligned} GU_{it} &\leq OU_{it} \cdot C_i \\ GU_{it} &\geq OU_{it} \cdot UD_{HZ_i} \\ GL_{it} &\leq OL_{it} \cdot UD_{LZ_i} \\ GL_{it} &\geq OL_{it} \cdot LL \cdot C_i \\ &\text{for all } i \in A(p) \\ &\text{for all } p \in P \\ &\text{for all } t \in T \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 LZ_i 는 각 발전기 i 에서 rough zone의 하부 값(MW), LL 은 발전기의 용량 중에서 발전 하한값으로 사용되는 비율을 나타낸다.

각 발전기는 상태에 따라 발전용으로 운영되어야 하는 발전기와 발전용이나 공회전용으로 운영되어야 하는 발전기로 구분할 수 있다. 또한 운영할 수 있는 발전기는 발전, 공회전 또는 중지상태 등 세가지중 하나의 상태를 가질 수 있다.

여기서 OM_{it} 는 시간 t 에 발전기 i 의 공회전 상태를 나타내는 무차원 정수 변수이고 집합 $N(p)$ 는 댐 p 에서 발전해야 하는 발전기들의 집합, $R(p)$ 는 댐 p 에서 발전용이나 공회전용으로 운영되어야 하는 발전기의 집합을 나타낸다.

용수공급이 주목적인 댐으로부터의 시간당 방류량이 전시간에 비하여 정해진 값 이상으로 증가되면 발전의 증가가 필요하므로, 중지되었던 발전기는 발전을 시작할 수 있고, 발전하던 발전기는 중지할 수 없다. 이를 위하여 발전기의 운영상태는 다음 조건들을 만족시켜

$$OM_{it} = 0 \quad \text{for all } i \in N(p), \text{ for all } t \in T, \text{ for all } p \in P \quad (8)$$

$$OL_{it} + OU_{it} + OM_{it} = 1 \quad \text{for all } i \in R(p), \text{ for all } t \in T, \text{ for all } p \in P \quad (9)$$

$$OL_{it} + OU_{it} + OM_{it} \leq 1 \quad \text{for all } i \in A(p), \text{ for all } t \in T, \text{ for all } p \in P \quad (10)$$

야 한다. 첫째, 발전중이던 발전기는 계속 발전해야 한다. 둘째, 중지상태이던 발전기는 계속 중지상태로 있거나, 발전하거나 공회전을 할 수 있다. 셋째, 공회전중이던 발전기는 계속 공회전하거나 발전할 수 있다. 이전에 개발된 혼합정수계획법 모형에서는 시간당 방류량이 첫 번째 부속모형 PLANT_DY_W로부터 계산되어, 이후의 부속모형 PLANT_GO_W와 PLANT_ST_W에서는 상수로 취급되었으나 본 모형에서는 모든 부속모형들을 하나로 통합하였기 때문에 시간당 방류량은 변수로 처리된다. 따라서 앞에서 기술한 세 가지의 발전기 운영조건들은 조건부 제약조건들로 선형계획법 모형에서 직접 처리할 수 없으므로, 혼합정수계획법을 사용하여 처리하였다. 첫 번째 조건부 제약조건을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{if } \sum_{w \in W} Q_{wt} - \sum_{w \in W} Q_{w,t-1} > C \text{ and } u_{it} = 1 \\ & \text{then } OL_{it} + OU_{it} = 1 \\ & \quad \text{for all } t = 1, \dots, 24 \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 C 는 저수지 운영자에 의하여 정해지는 고정된 값으로 각 발전기를 통한 방류량과 운영자의 경험에 의하여 결정되며, u_{it} 는 0이나 1 중의 하나의 값을 갖는 이진 결정변수(binary decision variable)로 발전기가 현재시간 t 에 발전중이면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다. 식 (11)은 선형계획법에서 처리할 수 없는 조건부 제약조건인 형태이므로 새로운 이진변수 $y1_t, y2_t$ 를 사용하여 식 (12)~(14)로 다시 표현하였다.

$$\begin{aligned} & \text{if } \sum_{w \in W} Q_{wt} - \sum_{w \in W} Q_{w,t-1} > C \\ & \text{then } y1_t = 0 \\ & \quad \text{for all } w \in W \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \text{if } u_{it} = 1 \\ & \text{then } y2_{it} = 0 \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \text{if } y1_t + y2_{it} = 0 \\ & \text{then } OL_{it} + OU_{it} = 1 \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \\ & \quad \text{for all } t = 1, \dots, 24 \end{aligned} \quad (14)$$

식 (12)~(14)는 아직도 조건부 제약조건을 포함하고 있으며 이를 소거하기 위해서는 첫째, 각 식을 먼저 택일 제약조건(Either-or Constraint)으로 전환시키고, 둘째, 전환된 택일 제약조건을 이진변수를 사용하여 혼합정수계획법에서 사용할 수 있는 형태로 다시 전환시켜야하는 두 단계를 거쳐야 한다. 택일 제약조건은 두 제약조건 중 어느 하나만 만족시키면 되는 형태의 조건으로, 어느 한 제약조건이 만족되면 다른 하나의 제약조건이 만족되던 만족되지 않던 상관할 필요가 없다. 식 (12)를 택일 제약조건 형태로 전환시키면 다음과 같다.

$$\text{Either } \sum_{w \in W} Q_{wt} - \sum_{w \in W} Q_{w,t-1} \leq C \quad (15a)$$

$$\text{or } y1_t = 0 \quad \text{for } t = 1, \dots, 24 \quad (15b)$$

식 (15a)와 (15b)는 이진변수를 사용하여 다음과 같이 전환되었다.

$$\begin{aligned} & \sum_{w \in W} Q_{wt} - \sum_{w \in W} Q_{w,t-1} \leq C + B \cdot (1 - z1_t) \\ & y1_t \leq z1_t \\ & \quad \text{for } t = 1, \dots, 24 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $z1_t$ 는 이진변수, B 는 임의의 큰 수(본 연구에서 B 값으로 10^5 을 사용하였음)이다. 즉, $z1_t$ 가 1이면 식 (15a)를 만족시킬 수 있고, $z1_t$ 가 0이면 식 (15b)를 만족시킬 수 있다. 따라서 조건부 제약조건이었던 식 (12)가 혼합정수계획법에서 사용할 수 있는 형태인 식 (16)으로 전환되었다. 동일한 방법을 사용하여 식 (13)과 (14)를 각각 식 (17)과 (18)과 같이 전환시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} & u_{it} \leq z2_{it} \\ & y2_{it} \leq 1 - z2_{it} \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \\ & \quad \text{for } t = 1, \dots, 24 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & y1_t + y2_{it} \geq z3_{it} \\ & OL_{it} + OU_{it} \geq 1 - z3_{it} \\ & \quad \text{for } t = 1, \dots, 24 \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $z2_{it}$ 와 $z2_{it}$ 는 이진변수이다. 원래 택일 제약조건이던 식 (11)은 이제 혼합정수계획법을 사용하여 처리할 수 있는 형태인 식 (16)~(18)로 전환되었다.

두 번째 조건부 제약조건은 항상 만족되므로 고려할 필요가 없으며, 세 번째 제약조건을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{if } \sum_{w \in W} Q_{wt} - \sum_{w \in W} Q_{w,t-1} > C \text{ and } v_{it} = 1 \\ & \text{then } OL_{it} + OU_{it} + OM_{it} = 1 \\ & \quad \text{for all } t = 1, \dots, 24 \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 v_{it} 는 0이나 1 중의 하나의 값을 갖는 이진 결정변수로 발전기가 현재시간 t 에 공회전중이면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다. 앞에서 사용한 것과 동일한 방법을 사용하여 식 (19)를 혼합정수계획법을 사용하여 처리할 수 있는 식 (20)~(22)로 전환할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum_{w \in W} Q_{wt} - \sum_{w \in W} Q_{w,t-1} \leq C + B \cdot (1 - z4_t) \\ & y3_t \leq z4_t \\ & \quad \text{for } t = 1, \dots, 24 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & v_{it} \leq z5_{it} \\ & y4_{it} \leq 1 - z5_{it} \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \\ & \quad \text{for } t = 1, \dots, 24 \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & y3_t + y4_{it} \geq z6_{it} \\ & OL_{it} + OU_{it} + OM_{it} \geq 1 - z6_{it} \\ & \quad \text{for } t = 1, \dots, 24 \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 $y3_{it}$, $y4_{it}$, $z4_{it}$, $z5_{it}$, $z6_{it}$ 은 이진변수들이다.

용수공급용 댐으로부터의 시간당 방류량이 전시간에 비하여 정해진 값 이상으로 감소되면 발전의 감소가 필요하므로, 발전기의 운영상태는 다음 조건들을 만족시켜야 한다. 첫째, 발전중이던 발전기는 계속 발전하거나, 중지하거나, 공회전할 수 있다. 둘째, 중지상태이던 발전기는 계속 중지상태로 있어야 한다. 셋째, 공회전중이던 발전기는 계속 공회전하거나 중지되어야 한

다. 첫 번째 조건은 항상 만족되므로 고려할 필요가 없고, 둘째 조건과 셋째 조건을 각각 식으로 나타내면 식 (23), (24)와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{if } \sum_{w \in W} Q_{wt} - \sum_{w \in W} Q_{w,t-1} \leq -C \text{ and } s_{it} = 1 \\ & \text{then } OL_{it} + OU_{it} + OM_{it} = 1 \\ & \quad \text{for all } t = 1, \dots, 24 \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \text{if } \sum_{w \in W} Q_{wt} - \sum_{w \in W} Q_{w,t-1} \leq -C \text{ and } v_{it} = 1 \\ & \text{then } OL_{it} + OU_{it} = 0 \\ & \quad \text{for all } t = 1, \dots, 24 \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \end{aligned} \quad (24)$$

동일한 기법을 사용해서 식 (23), (24)를 혼합정수계획법을 사용하여 처리할 수 있는 식 (25)~(30)으로 전환할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum_{w \in W} Q_{w,t-1} - \sum_{w \in W} Q_{wt} \leq C + B \cdot (1 - z7_t) \\ & y5_t \leq y7_t \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & s_{it} \leq z8_{it} \\ & y6_{it} \leq 1 - z8_{it} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} & y5_t + y6_{it} \geq z9_{it} \\ & OL_{it} + OU_{it} + OM_{it} \leq z9_{it} \\ & \quad \text{for } t = 1, \dots, 24 \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{w \in W} Q_{w,t-1} - \sum_{w \in W} Q_{wt} \leq C + B \cdot (1 - z10_t) \\ & y7_t \leq z10_t \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} & v_{it} \leq z11_{it} \\ & y8_{it} \leq 1 - z11_{it} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} & y7_t + y8_{it} \geq z12_{it} \\ & OL_{it} + OU_{it} \leq z12_{it} \\ & \quad \text{for } t = 1, \dots, 24 \\ & \quad \text{for all } i \in A(p) \\ & \quad \text{for all } p \in P \end{aligned} \quad (30)$$

총 예비전력은 다음의 총 예비전력 요구조건을 만족시켜야 한다. 여기서 예비전력이란 긴급사태 발생시 즉시 추가 생산이 가능한 전력을 나타낸다.

$$\sum_{i \in A(p)} (OL_{it} \cdot C_i + OU_{it} \cdot C_i + OM_{it} \cdot C_i) \geq CR_t \quad \text{for } t \in T \quad (31)$$

여기서 CR_t 는 시간 t 에 유역내 모든 수력 발전소로부터의 총 예비전력 요구량(MW)이다.

발전이 주목적인 발전소로부터의 총 전력수요를 만족시켜야 한다.

$$P_{gt} = \sum_{i \in A(g)} (GU_{it} + GL_{it} - OM_{it} \cdot MT \cdot C_i) = GR_t \quad \text{for all } g \in G \quad \text{for all } t \in T \quad (32)$$

여기서 P_{gt} 는 시간 t 에 발전이 주목적인 댐으로부터의 총 발전량(MW)이고 GR_t 는 시간 t 에 발전이 주목적인 댐에서 요구되는 전력수요량(MW)이다.

용수공급이 주목적인 댐으로부터의 총 발전은 일반전형태곡선에서 일정량의 상·하 오차 내에 포함되도록 유지되어야 한다.

$$\sum_{i \in A(g)} (GU_{it} + GL_{it} - OM_{it} \cdot MT \cdot C_i) \geq GS_t - BD \quad \sum_{i \in A(g)} (GU_{it} + GL_{it} - OM_{it} \cdot MT \cdot C_i) \leq GS_t + BD \quad (33)$$

여기서 MT 는 공회전에 필요한 발전용량, GS_t 는 용수공급이 주목적인 댐으로부터의 방류량과 주어진 일반전형태곡선으로부터 구한 시간 t 에의 발전계획(MW), BD 는 운영자가 결정하는 허용오차이다.

용수공급이 주목적인 댐으로부터의 일반전형태곡선은 주어진 발전계획을 따라야 한다.

$$\begin{aligned} &\text{if } GS_t - GS_{t-1} > 0 \\ &\text{then } (P_{wt} - P_{w,t-1}) > 0 \\ &\text{if } GS_t - GS_{t-1} = 0 \\ &\text{then } (P_{wt} - P_{w,t-1}) = 0 \\ &\text{if } GS_t - GS_{t-1} < 0 \\ &\text{then } (P_{wt} - P_{w,t-1}) < 0 \end{aligned} \quad (34)$$

for $t = 1, \dots, 24$
for all $w \in W$

만일 발전요구량과 발전 예비용량이 변하지 않는다면, 발전기 운영계획도 변하지 않는다.

$$\begin{aligned} &\text{if } t \in T, \quad \text{Then} \\ &Q_{wt} = Q_{w,t-1} \\ &Q_{gt} = Q_{g,t-1} \\ &GU_{it} = GU_{i,t-1} \\ &GL_{it} = GL_{i,t-1} \\ &OU_{it} = OU_{i,t-1} \\ &OL_{it} = OL_{i,t-1} \\ &OM_{it} = OM_{i,t-1} \\ &P_{gt} = P_{g,t-1} \\ &s_{i,t+1} = s_{it} \\ &u_{i,t+1} = u_{it} \\ &v_{i,t+1} = v_{it} \end{aligned} \quad (35)$$

for all $w \in W$
for all $g \in G$
for $t = 1, \dots, 24$
for all $i \in A(p)$
for all $p \in P$

이진변수들 OL_{it} , OU_{it} , OM_{it} 에 따라서 다음 시간 발전기의 운영상태가 결정된다. 만일 발전기가 현 시간에 중지되어 있다면, 다음 시간의 중지상태를 나타내는 이진변수 $s_{i,t+1}$ 은 1이다.(주: ' $s_{i,t+1} = 1$ '은 시간 $t+1$ 에 발전기가 중지증임을 나타낸다.)

$$\begin{aligned} &\text{if } OL_{it} + OU_{it} + OM_{it} = 0 \\ &\text{then } s_{i,t+1} = 1 \end{aligned} \quad (36)$$

for all $i \in A(p)$
for all $p \in P$
for $t \in T'$

여기서 집합 T' 은 25개의 각 시간들을 나타낸다.

만일 발전기가 현 시간에 발전중이라면, 다음 시간의 발전상태를 나타내는 이진변수 $u_{i,t+1}$ 은 1이다.(주: ' $u_{i,t+1} = 1$ '은 시간 $t+1$ 에 발전기가 발전증임을 나타낸다.)

$$\begin{aligned} &\text{if } OL_{it} + OU_{it} = 1 \\ &\text{then } u_{i,t+1} = 1 \end{aligned} \quad (37)$$

for all $i \in A(p)$
for all $p \in P$
for $t \in T'$

만일 발전기가 현 시간에 공회전중이라면, 다음 시간의 공회전 상태를 나타내는 이진변수 $v_{i,t+1}$ 은 1이다.(주: ' $v_{i,t+1} = 1$ '은 시간 $t+1$ 에 발전기가 공회전증임을 나타낸다.)

$$\begin{aligned}
 &\text{if } OM_{it} = 1 \\
 &\text{then } v_{i,t+1} = 1 \\
 &\quad \text{for all } i \in A(p) \\
 &\quad \text{for all } p \in P \\
 &\quad \text{for } t \in T'
 \end{aligned} \tag{38}$$

동일한 기법을 사용하여 조건부 제약조건 (36)~(38)은 각각에 상응하는 혼합정수계획법의 제약조건 (39)~(41)로 전환될 수 있다.

$$OL_{it} + OU_{it} + OM_{it} = 1 - s_{i,t+1} \tag{39}$$

$$OL_{it} + OU_{it} = u_{i,t-1} \tag{40}$$

$$\begin{aligned}
 OM_{it} &= v_{i,t+1} \\
 &\quad \text{for all } i \in A(p) \\
 &\quad \text{for all } p \in P \\
 &\quad \text{for } t \in T'
 \end{aligned} \tag{41}$$

3. 최적화 과정

통합혼합정수계획법을 사용하여 발전기의 최적 운영 방안을 구하는 과정은 다음과 같다.

(1) 유역내 모든 발전소의 초기 수두에 관한 발전기 유량의 상수들을 계산한다. 초기 수두로 1 A.M. 의 수두를 사용하며, 하루중의 수두는 초기수두로 일정하다고 가정한다. 여기서 계산되는 발전기 유량의 상수들은 무발전 방류량, 방류량과 발전량 곡선을 선형화할 때 절단점에 해당하는 방류량, 절단점 상류부를 연장했을 때 무발전 방류량, 최대 발전량에 해당하는 방류량,

저수지 하류의 수심 상승효과를 고려한 방류량 등이다.

(2) 자료 파일에서 초기의 발전기 상태를 읽는다.

(3) 전력 수요 및 예비전력 수요계획 곡선과 용수공급이 주목적인 발전소의 계획 방류량을 기초로 발전 운영계획을 계산한다.

(4) 발전기 운영계획이 변하지 않는 기간의 시작시간과 시간길이를 계산한다. 또한, 전력 수요 및 예비전력 수요계획 곡선과 예비발전 용량계획이 변하지 않는 기간의 시작 시간과 시간 길이를 계산한다.

(5) 최적화 모형을 푼다.

4. 적용결과

혼합정수계획법을 적용하였던 미국 콜로라도강 하부 유역에 통합혼합정수계획법을 다시 적용하였다. 콜로라도강 하부 유역의 상황과 유역내 댐 및 발전기 제원에 대해서는 Yi(1998)에 상세히 설명되어 있다. 기왕의 자료로 1988년 4월 17일 데이비스와 파커 수력발전소의 발전계획을 사용하였다. 그림 1에 데이비스와 파커 수력발전소의 발전형태곡선이 나타나 있고, 그림 2에 유역내 모든 발전소로부터 필요한 전력수요 및 예비전력 수요가 나타나 있다.

콜로라도강 하부 유역에 대한 통합혼합정수계획 모형을 풀기 위하여, GAMS(General Algebraic Modeling System) XA Linear and Generalized Integer Solver를 사용하였다. 모형은 12,366개의 제약조건, 10,045의 변수를 갖고 있으며, 이중 8,274개는 정수변수이다. 통합혼합정수계획법 모형을 사용하였을 때, Pentium II 300Mhz 급 기종 PC에서 약 2시간

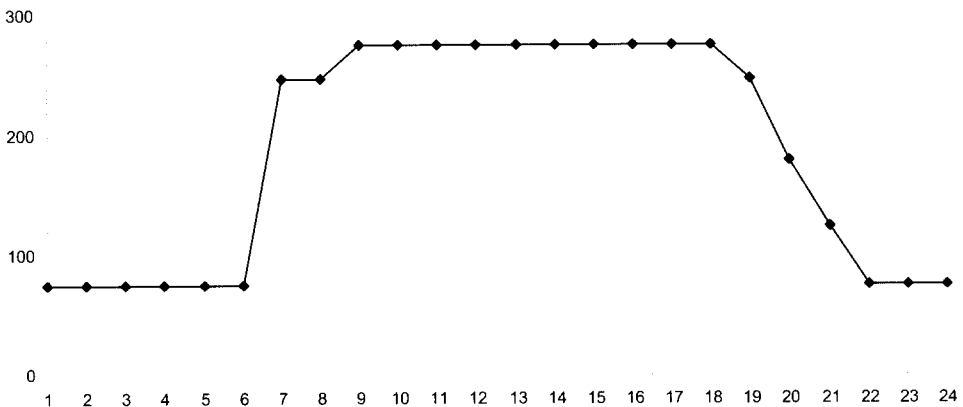


그림 1. 데이비스와 파커 수력발전소의 발전 형태곡선

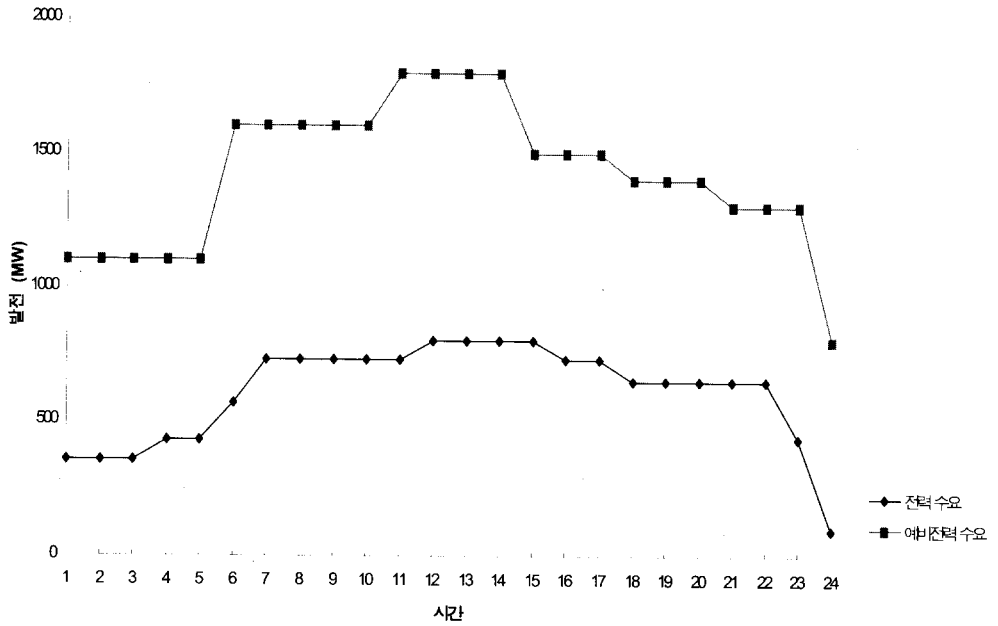


그림 2. 전력수요 및 예비전력 수요 계획

18분의 시간이 소요되었으며, 유역내 전력생산량과 용수공급량에 의하여 결정되는 유역효율(식 (1) 참조)은 83.88%로 혼합정수계획모형의 85.41%보다 1.53% 감소하였다.(그림 3) 통합혼합정수계획법 모형이 혼합정수계획법 모형보다 약간 떨어지는 유역효율을 보이나, 이는 혼합정수계획법 모형에서 가능해(feasible solution)를 얻기 위하여 허용오차를 크게 선정하였기

때문인 것으로 판단된다. 하지만, 통합혼합정수계획법은 조건부 제약조건들을 선형계획법에서 사용할 수 있는 제약조건으로 전환시키는 과정에서, 제약조건들의 수가 증가하여 모형의 실행시간이 오래 소요된다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 다음 날의 발전기 운영계획을 설정하기 위한 목적으로는 무리 없이 사용될 수 있으나, 갑자기 발생한 돌발사태로 발전기의 운영계획을

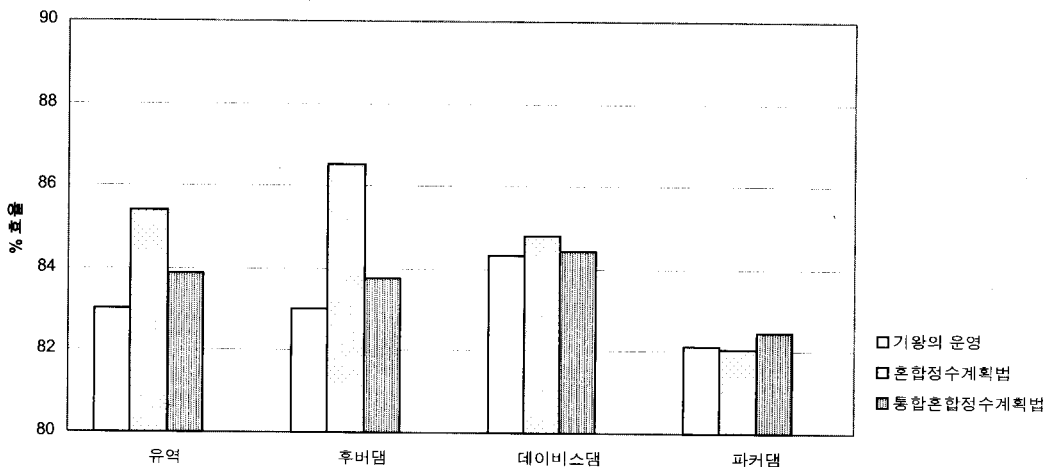


그림 3. 유역 및 각 수력발전소의 효율

표 1. 후버 수력발전소의 발전기 운영계획

시간	발 전 기 (MW)																	
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	
1	0.0	87.7	115.0	-3.5	-3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.5	115.0	0.0	-3.5	0.0	60.0	-1.8	-2.1	
2	0.0	87.7	115.0	-3.5	-3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.5	115.0	0.0	-3.5	0.0	60.0	-1.8	-2.1	
3	0.0	85.0	100.9	-3.5	-3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.5	115.0	0.0	-3.5	0.0	60.0	29.7	-2.1	
4	0.0	85.0	100.9	-3.5	-3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.5	115.0	0.0	-3.5	0.0	60.0	29.7	-2.1	
5	0.0	92.4	115.0	-3.5	-3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.5	115.0	0.0	-3.5	0.0	115.0	29.7	-2.1	
6	115.0	96.9	115.0	-3.5	-3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	115.0	0.0	-3.5	0.0	115.0	29.7	35.0	
7	80.0	85.0	65.0	-3.5	-3.5	0.0	90.4	115.0	-3.5	45.0	65.0	0.0	-3.5	0.0	115.0	29.7	35.0	
8	80.0	85.0	65.0	-3.5	-3.5	0.0	90.4	115.0	-3.5	45.0	65.0	0.0	-3.5	0.0	115.0	29.7	35.0	
9	80.0	85.0	65.0	-3.5	-3.5	0.0	90.4	115.0	-3.5	45.0	65.0	0.0	-3.5	0.0	115.0	29.7	35.0	
10	80.0	85.0	65.0	-3.5	-3.5	0.0	90.4	115.0	-3.5	45.0	65.0	0.0	-3.5	0.0	115.0	29.7	35.0	
11	115.0	85.0	65.0	-3.5	-3.5	0.0	90.4	115.0	-3.5	45.0	65.0	0.0	-3.5	0.0	115.0	29.7	35.0	
12	115.0	98.8	65.0	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	-3.5	45.0	65.0	0.0	-3.5	-3.5	115.0	29.7	35.0	
13	115.0	98.8	65.0	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	-3.5	45.0	65.0	0.0	-3.5	-3.5	115.0	29.7	35.0	
14	115.0	98.8	65.0	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	-3.5	45.0	65.0	0.0	-3.5	-3.5	115.0	29.7	35.0	
15	0.0	98.8	65.0	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	-3.5	45.0	65.0	0.0	-3.5	-3.5	115.0	29.7	35.0	
16	0.0	107.4	115.0	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	0.0	45.0	115.0	0.0	-3.5	-3.5	115.0	-1.8	0.0	
17	0.0	107.4	115.0	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	0.0	45.0	115.0	0.0	-3.5	-3.5	115.0	-1.8	0.0	
18	0.0	85.0	65.0	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	0.0	45.0	107.4	0.0	-3.5	-3.5	115.0	-1.8	0.0	
19	0.0	85.0	65.0	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	0.0	45.0	107.4	0.0	-3.5	-3.5	115.0	-1.8	0.0	
20	0.0	85.0	107.4	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	0.0	45.0	65.0	0.0	-3.5	-3.5	115.0	-1.8	0.0	
21	0.0	85.0	65.0	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	0.0	45.0	105.3	0.0	-3.5	-3.5	115.0	0.0	0.0	
22	0.0	85.0	105.4	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	0.0	45.0	65.0	0.0	-3.5	-3.5	115.0	0.0	0.0	
23	0.0	85.0	105.4	-3.5	-3.5	0.0	115.0	115.0	0.0	45.0	65.0	0.0	-3.5	-3.5	115.0	0.0	0.0	
24	0.0	88.5	115.0	0.0	0.0	0.0	0.0	115.0	0.0	45.0	65.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

변경해야 하는 경우에는 사용하기 어렵다. 혼합정수계획법 모형을 사용하여 얻은 발전기 운영계획이 표 1과 2에 나타나 있다. 특히 표에서 음의 값은 해당 발전기가 해당 시간에 공회전을 하기 때문에 오히려 약간의 전력을 소모함을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 한정된 수자원과 에너지자원의 이용 효율을 증가시킬 수 있도록 통합혼합정수계획법을 사용하여 유역내 수력발전소들의 최적 발전기 운영계획 모형을 개발하였다. 모형의 목적함수는 유역내 수자원의 이용을 최소화 하며, 에너지자원의 이용을 최대한도로 구성하였고, 유역관련 제약조건, 발전기의 운영에 필요한 운영계약조건 및 시스템 관련 제약조건들을 고려하였다. 이 모형은 기왕에 개발된 혼합정수계획법 모형에서 부속모형 간의 불일치로 발생하는 불능해의

문제점을 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 통합혼합정수계획법 모형을 콜로라도 하부유역에 적용한 결과, 기왕의 운영보다 향상된 유역효율을 보여 주었다.

추후 연구과제로는 첫째, 통합혼합정수계획법의 실행 시간을 단축시켜 돌발사태로 발전기의 운영계획을 변경해야 하는 경우에도 적용할 수 있는 실시간 운영모형의 개발이 필요하다. 둘째, 유역내의 수력발전소뿐만 아니라 화력발전소도 포함시킨 통합된 발전기 운영모형을 개발하여 명실상부한 에너지자원과 수자원의 효율적 관리 및 운영계획을 수립할 수 있어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 1998학년도 아주대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 지원에 깊은 감사를 드립니다.

표 2. 후버 수력발전소의 발전기 운영계획

시간	발 전 기 (MW)								
	D1	D2	D3	D4	D5	P1	P2	P3	P4
1	0.0	48.0	0.0	0.0	37.6	0.0	21.4	0.0	0.0
2	0.0	48.0	0.0	0.0	37.6	0.0	21.4	0.0	0.0
3	0.0	48.0	0.0	0.0	33.0	0.0	21.4	0.0	0.0
4	0.0	48.0	0.0	0.0	33.0	0.0	21.0	0.0	0.0
5	0.0	48.0	0.0	0.0	33.0	0.0	21.0	0.0	0.0
6	0.0	48.0	0.0	0.0	33.0	0.0	10.0	0.0	0.0
7	0.0	48.0	0.0	0.0	48.0	3.4	28.0	23.9	0.0
8	0.0	48.0	0.0	0.0	48.0	3.4	28.0	23.9	0.0
9	48.0	48.0	0.0	0.0	48.0	28.0	28.0	28.0	-0.8
10	48.0	48.0	0.0	0.0	48.0	28.0	28.0	28.0	-0.8
11	48.0	48.0	0.0	0.0	48.0	28.0	28.0	28.0	-0.8
12	48.0	48.0	0.0	0.0	32.2	13.9	28.0	28.0	1.6
13	48.0	48.0	0.0	0.0	32.2	13.9	28.0	28.0	1.6
14	48.0	48.0	0.0	0.0	32.2	13.9	28.0	28.0	1.6
15	48.0	48.0	0.0	0.0	32.2	13.9	28.0	28.0	1.6
16	48.0	48.0	0.0	0.0	48.0	10.0	28.0	28.0	1.6
17	48.0	48.0	0.0	0.0	48.0	10.0	28.0	28.0	1.6
18	48.0	48.0	0.0	0.0	48.0	3.4	28.0	28.0	10.0
19	48.0	48.0	0.0	0.0	48.0	3.4	28.0	28.0	0.0
20	48.0	48.0	0.0	0.0	0.0	0.0	13.2	28.0	0.0
21	48.0	48.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.6	28.0	0.0
22	48.0	48.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.0	0.0
23	48.0	48.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.0	0.0
24	48.0	48.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.0	0.0

참 고 문 헌

Baldick, R. (1995). "The generalized unit commitment problem." *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 465-475.

Guan, X., Luh, P.B., and Zhang, L. (1995). "Nonlinear approximation method in Lagrangian relaxation-based algorithms for hydrothermal scheduling." *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 772-778.

Lauer, G.S., Sandell, N.R., Bertsekas, D.P., and Posbergh, T.A. (1982). "Solution of large-scale optimal unit commitment problems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 1, pp. 79-86.

Lowery, P.G. (1966). "Generating unit commitment by dynamic programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 85, No. 5, pp. 422-426.

Pang, C.K. and Chen, H.C. (1976). "Optimal short-term thermal unit commitment," *IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems*, Vol. 95, No. 4, pp. 1336-1346.

Peterson, W.L. and Brammer, S.R. (1995). "A capacity based Lagrangian relaxation unit commitment with ramp rate constraints," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 1077-1084.

Ruzic, S. and Rajakovic, N. (1991). "A new

- approach for solving extended unit commitment problem," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 269-277.
- Snyder, W.L.Jr., Powell, H.D.Jr. and Rayburn, J.C. (1987). "Dynamic programming approach to unit commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 339-350.
- Van den Bosch, P.P.J. and Honderd, G. (1985). "A solution of the unit commitment problem via decomposition and dynamic programming," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 104, No. 7, pp. 1684-1690.
- Virmani, S., Adrian, E.C., Imhof, K. and Mukjerjee, S. (1989). "Implementation of a Lagrangian relaxation based unit commitment problem," *IEEE Transactions on power Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 1373-1380.
- Yi, Jaeung (1998). "Mixed Integer Programming Approach to Optimal Short-term Unit Commitment for Hydropower Systems", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 335-346

(논문번호:99-049/접수:1999.06.16/심사완료:1999.07.30)