

論	文
36~	5~2

起動停止計劃을 고려한 揚水發電所의 週間 運用에 관한 研究

A Study On the Weekly Operation Planning of pumped Hydrostorage plant Considering Unit Commitment

宋吉永* · 洪尚垠** · 金榮泰***
(Kil-Yeong Song · Sang-Eun Hong · Yeong-Tae Kim)

Abstract

This paper presents a dynamic programming successive approximation algorithm for scheduling pumped storage hydro plants and shows how this method can be coordinated with the commitment of the thermal units of the system.

The general object of operation of pumped hydrostorage plants is the minimization of the overall production cost and the maximization of generation reserves.

The basic procedure used to obtain a combined pumped storage-unit commitment schedule is to execute the pumped storage scheduler and unit commitment scheduler iteratively.

A combined DPSA algorithm has been presented to coordinate the scheduling of the pumped storage with the scheduling of the thermal units.

1. 머리말

最近 우리나라의 전력계통에서는 原子力, 石炭火力 등 基底負荷用 電源設備가 전원구성에서 차지하는 비율이 크게 증가하고 있어서 週末은 물론 平日의 심야 輕負荷時에도 가동설비의 剩餘分이 發生하여 給電運用上 많은 지장을 초래하고 있다. 특히 앞으로는 燃料사용에 制約을 받는 LNG火力發電設備의 등장으로 給電運用은 더욱더 硬化될 전망이다.

이에 따라 揚水發電所를 剩餘對應운전하여 경부하지 剩餘設備의 가동율을 높여야 하는 경우가 많아질 추세이며, 이와같이 잉여설비의 가동에 의하여 저장된 전력은 重負荷時 揚水發電運轉으로 사용

되어야 한다. 그러나 揚水運用에서 揚水와 揚水發電時間帶의 발전기별 출력배분 및 揚水時 가동댓수의 配分을 적절히 하지 못하게 되면 커다란 經濟的 損失을 초래하게 된다.

揚水發電所의 運用計劃을 수립할 경우 화력기의 運用특성을 고려하여야함은 필수적이며, 또한 고찰기간도 系統負荷가 지니고 있는 강한 週間周期性 때문에 週間으로 설정하여야 한다.

이와 같은 양수발전소의 運用계획문제를 풀기 위한 방법으로 먼저 增分費用法^{1),2),3)} (Marginal Cost Method) 과 線型計劃法^{4),5)} (L.P Method) 이 개발되었다. 이들 방법은 매우 효용성이 있는 방법이지만 揚水 또는 揚水發電量이 연속적이거나 費用函數가 볼록성(convexity)을 지닐 경우에 한해 최적해를 구할 수 있다. 그에 반해 動的計劃法^{6),7),8)} (D.P Method)은 線型性, 볼록성(Convexity)에 관계없이 주어진 모델의 모든 특성을 고려하여 해를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이 방법도 制御變數의 수가 많아지면 計算量이 指數的으로 증가하게

*正會員: 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

**正會員: 韓電技術研究院 先任研究員

***正會員: 중경실업전문교수

接受日字: 1986年 12月 5日

1次修正: 1987年 2月 3日

된다는 단점이 있어 아직도 이 분야에 대한 연구는 계속되고 있다.

필자는 앞서 LP⁵⁾法, DP⁶⁾法을 이용하여 火力, 揚水發電所의 협조 운용 문제를 다룬 바 있으나 本研究에서는 이를 더욱 발전시켜서 당시 다루지 못했던 사항⁸⁾, 즉

① 火力기를 多機모델로 확장하여 起動停止의 시간대별 연료비의 算定고려

② 瞬動豫備力の 확보조건 고려

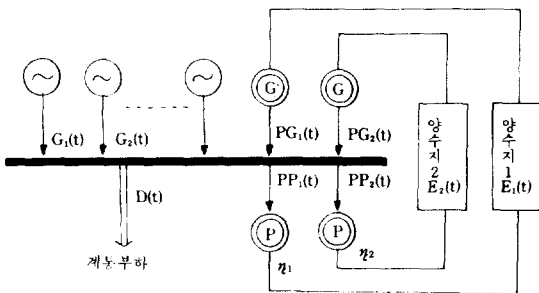
③ 多機揚水發電所 運用의 고려

④ 計算의 高速化를 위하여 Bellman과 Dreyfus의 축차근사법⁹⁾과 Larson과 Korsak의 축차근사법¹⁰⁾의 혼합적용,

등을 고려함으로써 종전보다 상세한 운전모델을 취급할 수 있었고, 解의 精度도 향상시킬 수 있는 새로운 알고리즘을 개발하여 이를 모델 계통에 적용시켜 본 결과 당초 기대했던대로 그 유용성을 확인할 수 있었기에 이를 보고하고자 한다.

2. 揚水發電所의 運用計劃모델

양수발전소의 운용모델은 그림 1과 같다. 여기서, 揚水發電所는 多機모델로 취급하였다.



: 火力발전기 : 양수발전기 : 양수 전동기

그림 1. 양수발전소의 운용모델

Fig.1. Operation Model of pump-Generator storage.

2.1 系統運用 모델

수력발전소의 計劃發電量은 미리 주어진 것으로 하고 원래의 系統負荷에서 이것을 삭감시켜 만든 새로운 계통부하 D(t)를 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$D(t) = TG(t) + \sum_{r=1}^R \mu_G^r(t) \cdot PG^r(t) - \sum_{r=1}^R \mu_P^r(t) \cdot PP^r(t) \quad (1)$$

TG(t) : t시간대에 운전중인 火力發電出力의 합계. $(\sum_i G_i(t))$ [MW]

PP^r(t) : t시간대, r양수발전소의 揚水電動機 入力 [MW]

$\mu_G^r(t), \mu_P^r(t)$: t시간대, r양수발전소의 揚水發電, 揚水運轉을 결정하는 요소로서 1 또는 0의 값을 갖는다.

r : 揚水發電所의 台數 [대] (r ∈ R)

2.2 瞬動豫備力 確保條件

系統運用時 大電源 脫落事故와 같은 系統事故에 대비한 瞬動예비력의 확보조건은 다음과 같다.

$$\bar{T}G(t) + \sum_{r=1}^R \bar{P}G^r(t) \geq D(t) + SR(t) \quad (2)$$

$$SR(t) = m \cdot \text{Max}\{\bar{G}_i(t)\} \quad (3)$$

여기서,

$\bar{T}G(t)$: t시간대에 운전중인 火力機容量의 합계. [MW]

$\bar{P}G^r(t)$: t시간대에 운전중인 r양수발전기용량. [MW]

SR(t) : t시간대의 瞬動豫備力 確保量. [MW]

$\bar{G}_i(t)$: t시간대에 운전중인 i발전기의 용량. [MW]

m : 瞬動豫備率. [%]

2.3 揚水發電所 運用 모델

양수발전소의 운용모델을 揚水發電時와 揚水時로 나누어 다음과 같이 표현하였다.

i) 揚水池條件

$$E^r(t+1) = E^r(t) - \mu_G^r(t) \cdot PG^r(t) + \eta^r \cdot \mu_P^r(t) \cdot PP^r(t) \quad (4)$$

$$\underline{E}^r \leq E^r(t) \leq \bar{E}^r \quad (5)$$

여기서,

$E^r(t)$: t시간대 r양수지의 貯水量. [MWH]

$\bar{E}^r, \underline{E}^r$: r양수지용량의 상·하한치. [MWH]

η^r : r양수발전소의 揚水綜合效率. [%]

또, 양수발전소의 週間運用에서는 1週單位로 주기성을 지니고 운전되기 때문에 揚水池의 週初와 週末에서의 兩端點條件은 같은 것으로 하였다.

$$E^r(0) = E^r(T) = E_s^r \quad (6)$$

ii) 機器制限 條件

$$\underline{P}G^r \leq PG^r(t) \leq \bar{P}G^r \quad (7)$$

$$PP^r(t) = n^r(t) \cdot NPP^r \quad (8)$$

여기서,

$\bar{P}G^r$, $\underline{P}G^r$: r양수발전소의 양수발전 상·하한출력. [MW]

NPP^r : r양수발전소의 양수전동기 單位機 入力. [MW]

$n^r(t)$: t시간대에 운전 중인 r 양수발전소의 양수전동기 운전횟수. [대]

2.4 火力機 運用모델

화력기의 병입횟수 결정과 發電費用의 최소화과정은 다음과 같다.

i) 發電費用特性 및 機器制限條件

$$F_i(G_i(t)) = [a_i \cdot G_i^2(t) + b_i \cdot G_i(t) + c_i] \cdot \alpha_i \quad (9)$$

$$\underline{G}_i \leq G_i(t) \leq \bar{G}_i \quad (10)$$

여기서,

F_i : t시간대에 운전 중인 i발전기의 발전비용.

[원/H]

α_i : i발전기의 燃料費 單價 [원/Kcal]

a_i, b_i, c_i : i발전기의 연료비 정수.

ii) 經濟負荷配分

화력기의 경제부하배분은 식 (11)과 같이 等増分 燃料費法에 따른다.

$$\frac{dF_i(t)}{dG_i(t)} = \lambda(t) \quad (11)$$

여기서,

$\frac{dF_i(t)}{dG_i(t)}$: t시간대, i발전기의 増分燃料費 [원/MWH]

$\lambda(t)$: t시간대, 시스템의 増分費用 [원/MWH]

iii) 起動停止計劃 고려

화력기의 기동정지계획은 t시간대에 있어 NP(t)대의 화력기가 우선순위에 따라 병입된다면 식 (11)에 의하여 각 화력기가 부하배분을 결정하고난 후 다음 (t+1)시간대의 발전비용을 최소화할 수 있는 火力機並列台數를 정하는 문제이다. 식 (12)은 이때의 화력기 병렬횟수의 천이과정을 나타내는 것이다.

$$NP(t+1) = NP(t) + N(t) \quad (12)$$

$$0 \leq NP(t) \leq Na \quad (13)$$

단, 기동시: $N(t) \geq 0$

정지시: $N(t) \leq 0$

여기서,

$N(t)$: 優先順位에 따라 t시간대에 起動 또는 停止될 火力機의 隻수. [대]

Na : 고찰기간 중 運轉可能한 火力機의 총 隻수. [대]

iv) 火力機 發電費用

이상 기동 및 정지비용을 포함시킨 화력기의 발전비용은 식 (14)와 같다.

$$F_g(TG(t)) = \sum_{i=1}^{NP(t)} \{F_i(G_i(t))\} + TS_{NP(t)} - TS_{NP(t-1)} + TD_{NP(t) - N(t-1)} - TD_{NP(t)} \quad (14)$$

$$TS_{NP(t)} = \sum_{i=1}^{NP(t)} S_i \quad (15)$$

$$TD_{NP(t)} = \sum_{i=1}^{NP(t)} D_i \quad (16)$$

여기서,

S_i : i발전기의 기동비용. [원/H]

D_i : i발전기의 정지비용. [원/H]

2.5 目的函數

목적함수는 식 (1), (2), (4)~(8), (10), (12), (13)의 각 제한조건을 시키면서 식 (14)의 발전비용을 최소화시키는 것으로 된다. 따라서 이 목적함수는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

곧,

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T F_g(TG(t)) \quad (17)$$

양수와 양수발전은 동시에 일어나는 것이 아니기 때문에 편의상 식 (18)과 같이 하나로 통일해서 나타낼 수 있다.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T F_g(D(t)) - \sum_{t=1}^R P_u^r(t) \quad (18)$$

단, (揚水發電運轉일 경우)

$$P_u^r(t) = P^r G(t), P^r G(t) \geq 0$$

(揚水運轉일 경우)

$$P_u^r(t) = -P^r P(t), P^r P(t) \geq 0$$

여기서, $P_u^r(t)$: MWH로 환산된 揚水運轉量 [MWH]

3. 動的計劃法 (D. P Method)의 適用

3.1 D. P문제로의 정식화

앞에서 정의한 운용계획 문제를 D. P법으로 정식화함에 있어, 우선 전 고찰기간을 NT구간으로 이산화하고 각 이산화된 시간대를 K로 일반화하여 정의하면 양수지 저수량 및 화력기 병렬횟수의 천이과정은 식 (19)와 같이 표현된다.

$$E^*(k+1) = E^*(k) + \dot{P}u(k) \quad (19)$$

$$NP(k+1) = NP(k) + N(k) \quad (20)$$

단, 기동시 $N(k) \geq 0$

정지시 $N(k) \leq 0$

목적함수는 앞에서 보인 바와 같이 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$F^*(E, NP, NT) = \min_{P, u(k), N(k)} \sum_{k=1}^{NT} [F_g(\dot{E}(k), NP(k), D(k), \dot{P}u(k), N(k))] \quad (21)$$

단, $\dot{E}(k), \dot{P}u(k)$ 는 벡터량.

3.2 축차근사법의 적용.

動的計劃法의 적용시에 있어 계산량 및 기억용량을 줄이기 위한 일련의 방법들이 개발되어왔다.

이들 중 일반적으로 유용성이 있다고 평가되는 방법은 Bellman과 Dreyfus의 축차근사법⁹⁾ 및 Larson과 Korsak의 축차근사법¹⁰⁾이다. 이 중 前者의 방법은 상태공간에서 격자점을 넓게 설정하여 (Coarse Grid) 解를 求한 다음 그 解의 근처에서 격자점을 좁게 하여 (Fine Grid) 보다 정확한 解를 접근시키는 방법이다. 後者の 방법은 다수개의 제어변수를 갖는 원래의 문제를 단지 하나의 변수를 갖는 문제로 변환하여 연속적으로 반복계산함으로써 계산량을 줄이고자 하는 방법이다. 그러나 이들 兩 방법 모두 제어변수 및 격자점의 數가 많게 되면 많은 계산량이 생긴다.

本 연구에서는 이와같은 단점을 극복하기 위하여 새로운 연속근사법을 제시 하였으며, 이 방법은 앞서의 2 가지 방법의 개념들을 조합시킨 것이다.

이때 제어변수 $\dot{P}u(k), N(k)$ 및 상태변수 $\dot{E}(k), NP(k)$ 를 각각 U 및 X 로 일반화하여 설명하면 다음과 같다.

① 제어변수의 모든 초기값 U_i^0 로 부터 U_i^0 에 대한 허용범위 U_i^0 를 정한다.

② 모든 U_j^0 (단, $j \neq i$)를 고정하고 다음식으로 부터 초기 목적함수값을 구한다.

$$F^{(0)}(X, k+1) = f\{X, U_i^0(X, k+1)\} + F^{(0)}\{g(X, U_i^0(X, k+1), k) \quad (22)$$

단, $k = 1, 2, \dots, N-1$

③ U_j^0 를 결정하기 위하여 다음 U_j^0 에 대하여 위와 같은 과정을 반복한다.

④ U_i^0 의 범위내에서 다음식을 풀어 U_i^0 와 U_i^0 에 대한 $F^{(1)}(X, k+1)$ 을 정한다.

$$F^{(1)}(X, k+1) = f\{X, U_i^0(X, k+1)\} + F^{(1)}\{g(X, U_i^0(X, k+1), k) \quad (23)$$

단, $k = 1, 2, \dots, N-1$

⑤ 이와같이 U_i^0 이 정해지면 U_i^0 에 대한 허용범위 U_i^0 을 결정한다.

⑥ 이상과 같은 과정을 되풀이 하여 $F^{(iter-1)}$ 와 $F^{(iter)}$ 의 값을 구해 다음조건을 충족시키면 계산을 종료한다.

$$\frac{F^{(iter)} - F^{(iter-1)}}{F^{(iter)}} < \Delta F \quad (24)$$

4. 起動停止計劃과의 協調運用

양수발전소 운용에 기동정지계획을 협조시키는 기본적인 절차는 이들 兩者를 반복하는 것이다. 그림 2는 이와같은 절차에 대해 나타낸 것이며 그들 각각의 절차는 最適化準備段階와 最適化段階의 두 가지로 대별할 수 있다.

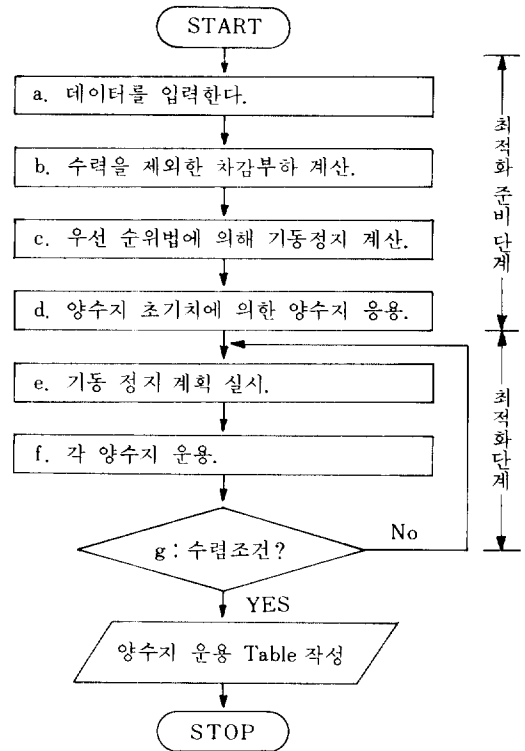


그림 2. 양수-기동정지 협조 운용의 개요

Fig.2. The pumped storage-unit commit logic diagram.

4.1 最適化準備段階(그림 2 의 ①, ②, ③, ④)

①, ②: 시간대별 부하 및 순동예비력 확보을 각 기기의 제정수, 각 양수지의 초기수위, 제한조건, 계산종료조건 등의 입력데이터를 읽어들인 다음 水力發電所計劃發電量을 제외한 화력과 양수가 담당하는 부하를 계산한다.

③: 부하에 瞬動豫備力을 더한 수요를 충족시키기 위하여 초기 기동정지계획을 優先順位法에 의하여 실시 한다.

④: 양수지 초기치로부터 양수발전소 초기운용을 실시한다.

4.2 최적화단계(그림 2 의 ⑤, ⑥, ⑦, ⑧)

⑤: 전 항에서 계산된 양수발전량, 양수량을 계산하고 순수화력이 담당하는 부하를 계산하여 참고 문헌(11)의 3가지 기법 중의 하나인 D. P. S. C 법 (연속조합 동적계획법: Dynamic Programming Sequential Combination Method)을 실시한다.

⑥: 전 항에서 계산된 기동정지계획을 고정시킨 다음 각 양수지의 운용을 DP법에 의해 계산한다.

⑦ ⑧: 計算終了에 대한 판정을 하여, 만족 시키지 못할 경우에는 ⑤항으로 되돌아가고 만족할 경우에는 最適揚水池 運用計劃을 出力한다.

표 1. 화력기 입력데이터

Table 1. Thermal plant input data

	TYPE	MINCAP	MAXCAP	INPUT-OUTPUT (A*X**2. + B*X+C)			FUEL COST	PF.
1	N	1200.	1200.	0.001417	7.30	1681.20	0.620	1
2	N	1000.	1000.	0.001700	7.30	1401.00	0.620	1
3	N	1000.	1000.	0.001700	7.30	1401.00	0.620	1
4	N	1000.	1000.	0.001700	7.30	1401.00	0.620	1
5	C	300.	600.	0.000508	7.86	438.26	1.080	1
6	C	300.	600.	0.000508	7.86	438.26	1.080	1
7	C	300.	600.	0.000508	7.86	438.26	1.080	1
8	C	200.	400.	0.001322	7.76	282.85	1.080	1
9	C	100.	200.	0.002248	8.21	165.25	1.080	1
10	C	100.	200.	0.002248	8.21	165.25	1.080	1
11	C	100.	200.	0.002248	8.21	165.25	1.080	1
12	C	100.	200.	0.002248	8.21	165.25	1.080	1
13	C	100.	200.	0.002248	8.21	165.25	1.080	1
14	C	100.	200.	0.002248	8.21	165.25	1.080	1
15	C	100.	200.	0.002248	8.21	165.25	1.080	1
16	C	100.	200.	0.002248	8.21	165.25	1.080	1
17	O	200.	400.	0.001381	8.10	295.40	3.210	1
18	O	200.	400.	0.001381	8.10	295.40	3.210	1
19	O	200.	400.	0.001381	8.10	295.40	3.210	1
20	O	200.	400.	0.010890	9.91	50.01	3.210	1
21	O	200.	400.	0.010890	9.91	50.01	3.210	1
22	O	200.	400.	0.010890	9.91	50.01	3.210	1
23	O	200.	400.	0.010890	9.91	50.01	3.210	1
24	T	50.	50.	0.000000	14.0	0.00	4.600	1
25	T	50.	50.	0.000000	14.0	0.00	4.600	1
26	T	50.	50.	0.000000	14.0	0.00	4.600	1
27	T	50.	50.	0.000000	14.0	0.00	4.600	1
28	T	50.	50.	0.000000	14.0	0.00	4.600	1
29	T	50.	50.	0.000000	14.0	0.00	4.600	1
30	T	50.	50.	0.000000	14.0	0.00	4.600	1
31	T	50.	50.	0.000000	14.0	0.00	4.600	1
32	T	50.	50.	0.000000	14.0	0.00	4.600	1

5. 事例研究

5.1 適用모델 및 計算條件

제한한 알고리즘의 효율성을 立證하기 위하여 우리나라 系統의 하절기 1週間負荷 패턴을 모델로 검토하였다.

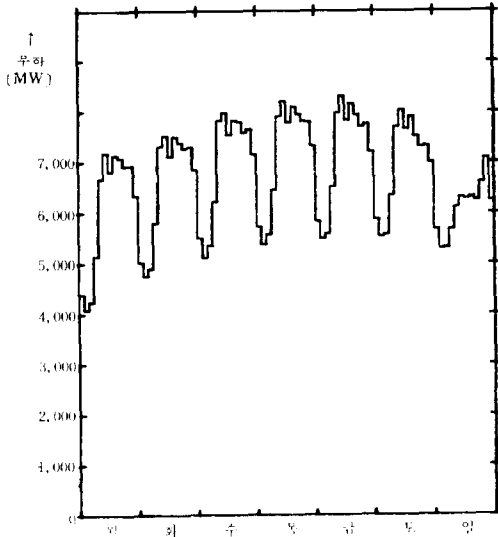


그림 3. 모델계통의 주간부하
Fig.3. The weekly load curve of model system.

그림 3 은 일주일간의 각 시간대별 부하를 보인 것이다. 표 1 은 화력기의 입력 데이터이며 기준 케이스로서 표 2 에 보인 바와 같은 運轉條件下에서

- ① 揚水運用과 起動停止計劃을 함께 고려한 協調運用을 기준케이스 I 로 정하고 이것과,
- ② 揚水發電所 運用을 전혀 고려하지 않은 火力機單의 運用(케이스 I - 1)
- ③ 優先順位法에 의해 화력기 병렬댁수만을 먼저 결정한 경우의 양수발전소운용(케이스 I - 2) 을 차

표 2. 양수발전소 運轉條件
Table2 . Operating condition of pumped hydro storage plant.

양수 발전기 용량	1,000 [MW]
양수지 최대 저수량	6,000 [MWH]
양수지 초기 소위수	2,000 [MWH]
양수지 목표 수위	2,000 [MWH]
양수 종합 효율	70 [%]

례로 비교하였다.

이밖에 多機의 揚水發電所를 1機로 증가화 했을 경우와 각 양수발전소별로 나누어서 運轉하였을 경우(케이스 II)와 순동예비력의 확보조건을 변화시켰을 경우(케이스 III)의 양수지 運轉 패턴 및 總發電費用의 변화에 대해서도 검토하였다.

5.2 計算結果

표 3 은 기준케이스를 중심으로 실시한 계산결과를 비교한 것이며 그림 4, 5 는 케이스 I 및 케이스 I - 2 에 대한 揚水池運用 패턴을 보인 것이다.

먼저 그림 4 는 기본케이스의 경우로서 앞서 2, 3, 4 절에서 정식화 했던 揚水發電所와 起動停止計劃을 협조시켰을 경우의 協調運用에 대한 결과이다. 여기서 거의 매일 양수 및 양수발전을 거듭해

표 3. 계산 결과(기준 케이스 I 을 중심으로)
Table3 . Out put results I.

	화력발전량 [MWH]	총 발전 비용 [千 원]	비 고
I	580,933	12,656,502	기동 정지 고려
I - 1	575,014	14,441,068	화력單의 運轉
I - 2	576,433	14,014,493	우선 순위

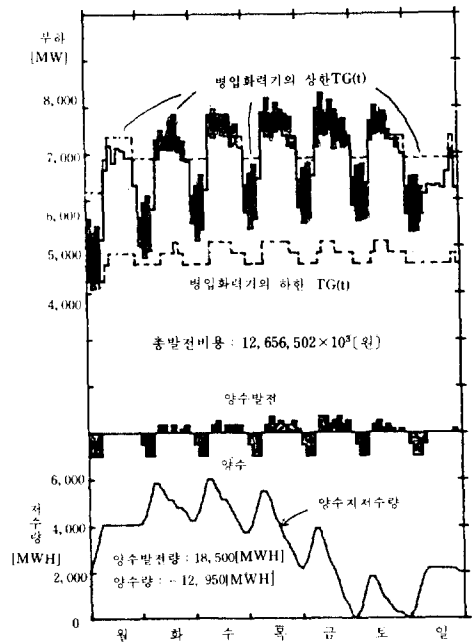


그림 4. 1 주일 모델의 계산결과(케이스 I)
Fig.4. Calculation result of weekly model(case I)

서 揚水池의 수위가 빈번하게 변화하고 있음을 알 수 있다.

이는 각 요일의 높은 부하대에 대해서는 양수발전, 낮은 부하대에 대해서는 揚水를 적절히해서 系統에 竝入되어 있는 火力機가 빈번하게 起動 또는 停止하지 않게 함으로써 불필요한 起動 및 停止費用을 줄이고 있다. 또 중부하대에서는 양수발전을 하여 尖頭負荷를 담당하기 때문에 效率이 좋은 火力機가 양수발전으로 삭감된 부하를 담당하게 되므로 양수시의 양수종합효율에 의한 손실을 감안하더라도 이때의 총발전 비용은 후술하는 케이스 I - 1, I - 2에 비해 경감되었다.

표 3의 케이스 I - 1은 揚水運用을 전혀 하지 않고 화력만으로 系統負荷를 충족시키는 경우에 대한 것이다. 그 결과 기준케이스 I에 비해 총발전비용이 14% 정도 증가되었다.

이는 비록 揚水時의 損失은 있지만 揚水發電所의 運用을 적절히 함으로써 총발전비용을 줄일 수 있기 때문에 揚水發電所와 起動停止計劃 協調運用의 效用性을 입증하는 것이다.

그림 5는 우선순위에 의해 각 시간대별부하에 대

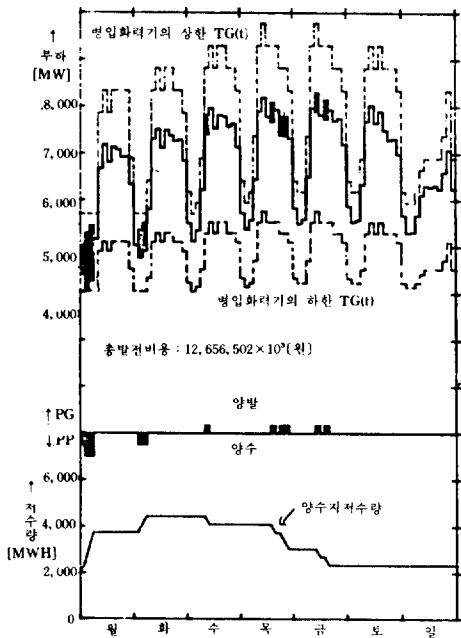


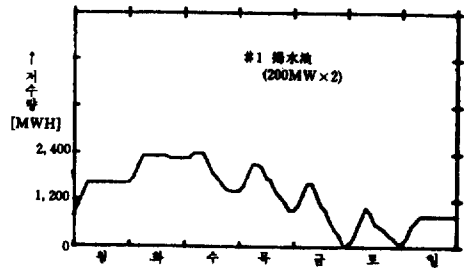
그림 5. 1주일 모델의 계산결과(케이스 I - 2)
Fig.5. Calculation results of weekly model (case I - 2)

한 火力發電機 竝列台數를 결정한 후의 揚水運用을 보인 것인데 이때 각 시간대별 부하는 TG(t) 및 $\bar{T}G(t)$ 의 범위내에 있기 때문에 기준케이스 I과 상이한 揚水池運用 패턴을 나타낸다. 그러나 이 경우에는 시간대별 부하를 고려해서 필요한 만큼의 火力機만을 병렬시켜 揚水와 협조운동하기 때문에 총발전비용은 케이스 I - 1 보다 경감되지만 그래도 기준케이스와 비교하면 상당히 높은 편이다. 이러한 결과 양수지의 최적운동은 어디까지나 기동정지계획과 협조시켰을 경우에 이루어진다는 것을 알 수 있다.

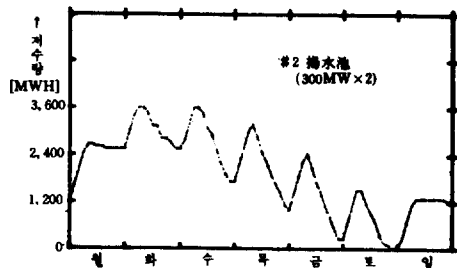
다음 표 4는 揚水發電所를 1機로 等價化시켜 운동했을 경우와 개별 운동할 경우의 계산결과를 비

표 4. 계산 결과(등가 운동과 개별운동의 비교)
Table 4. Output results 2

	단위 양수량 [MW]	최대 저수량 [MWH]	총 발전 비용 [千 원]	비 고
I	500 ^{MW} × 2	6,000	12,656,502	등가 운전
II	# 1 200 ^{MW} × 2	2,400	12,651,814	개별 운전
	# 2 300 ^{MW} × 2	3,600		



(a) # 1 양수지의 水位曲線



(b) # 2 양수지의 水位曲線

그림 6. 양수지 주간 수위곡선
Fig.6. The weekly rule curve

교한 것이다.

이에 따르면 양수발전소를 個別運用 하는 쪽이 각 양수발전소가 취할 수 있는 운용패턴의 조합이 많아진 만큼 연료비경감보다는 운용의 융통성(#1, #2 양수지의 운용곡선 취득가능.)을 기할 수 있었다.

그림 6은 이때의 각 양수지별의 운용곡선을 보인 것이다.

다음 표 5는 기준케이스의 瞬動豫備力 확보량을 600MW에서 1,200MW로 증대시켰을 경우를 서로 비교한 것이다.

이 결과 瞬動豫備力の 확보량이 많아진 케이스Ⅲ이 케이스Ⅰ보다 總發電費用에서 1.6%정도 증가하고 있다.

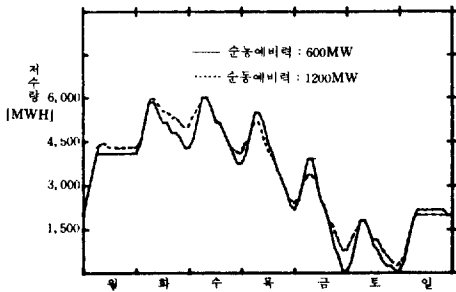


그림 7. 양수지의 주간 수위 곡선(케이스 I, III)
Fig.7. The weekly rule curve(case I, III)

그림 7은 양자의 揚水池水位曲線을 나타낸 것인데 여기에서도 곧 알 수 있듯이 케이스Ⅲ의 경우가 특히 重負荷時에 양수발전을 적게하여 揚水池水位가 케이스Ⅰ보다 전반적으로 높아지고 있다. 이는 瞬動豫備力の 확보량이 600MW 더 많아졌기 때문에 예기치 않은 事故에 대비해서 揚水池가 보다 많은 餘裕容量을 보유하게끔 제약되기 때문이다.

6. 結 論

이상 揚水發電所의 運用計劃과 起動停止 計劃을

협조시키는 문제를 混合逐次近似 D. P법으로 定式化하여 풀어 보았다.

개발된 축차근사 D. P법을 이용하여 모델계통에서의 여러가지 케이스를 검토해서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 揚水發電所運用과 起動停止計劃을 적절히 協調시킴으로서 보다 정확하고 효율적인 운용계획을 세울 수 있었다.

② 火力機의 多機모델 취급 및 순동예비력 조건을 포함함으로써 보다 융통성 있는 운용방안을 구할 수 있었다.

③ 揚水發電所를 多機모델로 취급함으로써 각 양수발전소별의 운용상황을 파악할 수 있었다. 등의 有用한 결과를 얻을 수 있었다.

한편 本研究에서는 揚水運用에 비중을 두어 起動停止문제는 간략한 모델로 취급했기 때문에 앞으로 보다 실제적인 운용조건을 고려하여야 할 것이며 또 수력발전소의 운용도 포함한 알고리즘의 연구가 요망된다.

參 考 文 獻

- 1) G. H. McDaniel 外: "Dispatching Pumped Storage Generation", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-85, PP. 465-471, May 1966.
- 2) K. D. Lee 外: "A Global Optimization Method for Scheduling Thermal Generation, Hydro Generation and Economy Purchases", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, pp. 1986-1993, July 1983.
- 3) L. L. Wang 外: "Time-of-Day System Energy costs with A Pumped-Storage Project", Proceedings of The American Power Conference, Vol. 44 pp. 610-614, 1982.
- 4) C. D. Galloway 外: "An Investigation of Pumped Storage Scheduling", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-85, pp. 459-465, May, 1966.

표 5. 瞬動豫備力の 確保量에 따른 比較
Table 5. The comparison of spinning reserve

케이스	최대 용량 화력기 [MW]	순동 예비력 확보량 [MW]	총 발전 비용 [千 원]	비 고
I	1,200	600	12,656,502	순동 예비율 50%
III	1,200	1,200	12,855,240	순동 예비율 100%

- 5) 宋吉永 外: “주간수급계획 시스템에 관한 연구-화력양수발전소의 주간운영계획을 중심으로-”, 제17회 전력계통연구회 논문초록, 1984, 11월
- 6) V. P. Lukic 外: “Optimal Operating Policy for Energy Storage”, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, pp. 3295-3302, Sep. 1982.
- 7) A. I. Cohen 外: “An Algorithm for Scheduling A Charge Pumped Storage Plant,” IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 8, pp. 2099-2104, Aug. 1985.
- 8) 宋吉永 外: “揚水發電所의 週間運用計劃에 관한 研究” 전기학회지 논문35-5-4, pp. 21-28, 1985, 5.
- 9) R. E. Bellman 外: “Applied Dynamic Programming”, Princeton University Press, Princeton, N. J., 1962
- 10) R. E. Larson 外: “A Dynamic Programming Successive Approximations Technique with Convergence Proofs Part I”, Automatica, Vol. 6, pp. 245-252, 1970.
- 11) C. K. Pang 外: “Evaluation of Dynamic Programming Based Methods And Multiple Area Representation for Thermal Unit Commitments.”, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, pp. 1212-1218, Mar. 1981.
- 12) C. K. Pang 外: “Optimal short-Term Thermal Unit Commitment” IEEE Transaction on Power apparatus and Systems Vol. PAS-95, No. 4, pp. 1336-1346, July / Aug, 1986.
- 13) A. J. Korsak 外: “A Dynamic Programming Successive Approximations Technique with Convergence Proofs-Part II”, Automatica. Vol 6, pp. 253-260, 1970