

揚水發電所의 週間運用計劃에 관한 研究

A Study on the Optimal Weakly Operation Planning of Pumped Hydrostorage Plant

宋 吉 永* · 金 榮 泰**
(Kil-Yeong Song · Yeong-Tae Kim)

Abstract

Increased attention has been given in recent years to the use of pumped hydrostorage plant to meet the requirements for peak generation and bottom pumping. Once a pumped hydrostorage plant is installed, its economic operation as an integral component of a steam generating system requires the selection of a pumping and generating schedule which will result in the most effective use of the hydro generating capacity.

The general object of coordination of pumped hydro storage plants with electric power system is the minimization of the overall production cost and the maximization of generation reserves.

This paper presents a method for the optimal scheduling of pumped hydrostorage plant and a computer program which determines weekly operating schedules for a pumped hydrostorage plant by dynamic programming method.

1. 머리말

오늘날 우리나라에서는 原子力發電이 電源多樣化의 중심이 되어 그 개발이 급속도로 이루어지고 있다. 이것이 總發電설비에 차지하는 비중도 83년말 현재의 12.3%에서 1991년에는 39.7% 이상이 될 것으로 예상되고 있다. 현재 原子力發電은 베이스(基底)電源으로서 운용되고 있는데 운전특성상 이 추세는 앞으로도 계속될 전망이다. 그러나 原子力發電의 設備構成率이 증대하게 되면 베이스전원이 과잉으로되어 深夜에 잉여전력이 발생하게됨으로 給電運用上 많은 지장을 초래하게 된다.

揚水發電所는 尖頭負荷用電源으로서 중요한 역할을 담당하고 있을 뿐아니라 특히 최근에는 原子

力, LNG, 石炭火力의 증대에 따른 심야잉여전력을 흡수한다는 역할도 담당해서 그 중요성은, 더욱 더 높아지고 있다.

본 연구는 給電運用上 이처럼 중요성을 더하고 있는 양수발전소의 운용방법에 대해서 고찰한 것이다. 저자는 앞서 선형계획법(LP法)을 이용해서 火力, 揚水發電所의 協助문제를 다룬 바 있으나¹⁾ 이번에는 다시 이를 動的計劃法(DP法)을 사용해서 定式化하고 모델계통에서의 週間需給 계획문제에 이를 적용함으로써 여러가지로 유용한 결과를 얻었기에 이를 소개 하는 바이다.

2. 揚水發電所 運用計劃의 定式化

2.1 모델의 概念化

먼저 그림 1과 같은 揚水발전소의 모델 系統을 대상으로 택하고 이의 운용계획을 정식화함에 있어서는 다음과 같은 몇가지 가정을 두었다.²⁾

- (1) 총수요중 原子力과 일반水力을 제외한 火力과 揚水로 분담해야 할 수요는 주어져 있다.

*正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
**正 會 員 : 高麗大 大學院 電氣工學科 博士課程
接受日字 : 1985年 1月 9日

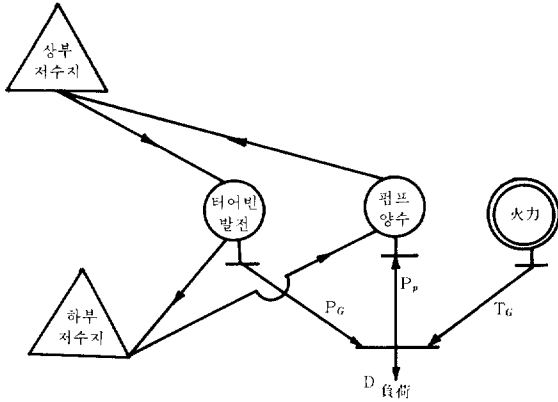


그림 1. 揚水發電所의 모델
Fig 1. A model of the operation of a pumped hydrostorage plant.

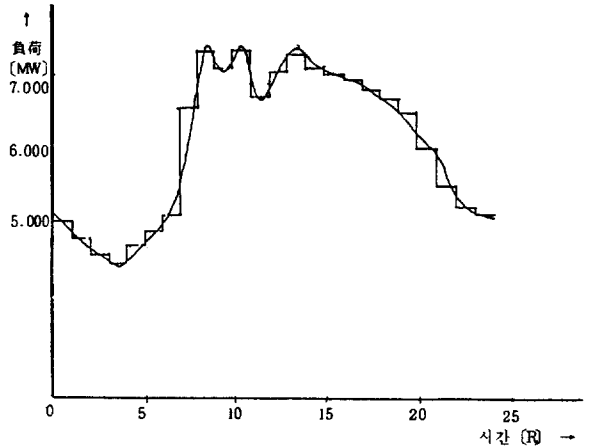


그림 2. 負荷曲線の離散化
Fig 2. Discretization of the chronological electric load curve.

- (2) 火力발전기의 週間起動停止계획은 미리 정해져 있다.
- (3) 揚水종합효율 η , 揚水발전 최대출력 및 揚水 최대동력은 上部저수지의 水位에 따라 변하지 않는다.
- (4) 송전손실은 무시한다.

위의 가정하에서 고찰기간 초기의 上部저수지 (이하 揚水池라고 함) 수위와 고찰기간 말에 있어서의 揚水池의 도달수위 목표치가 정해져 있을때 揚水발전소의 운용계획은 揚水池의 저수량, 발전시의 최대가능 사용유량, 揚水池의 최대동력량등에 관한 제한조건하에서 부하의 수급조건을 만족 하면서 火力계통의 총연료비 최소화를 도모하는 것이라고 말할 수 있다.

먼저 그림 2 처럼 부하를 離散化하여 N구간으로 나눈다. 여기서는 한시간간격으로 잡아서 日負荷 곡선은 24구간, 주간부하곡선은 168구간으로 나누었으며 각각의 시간대에서는 부하가 일정한 것으로 보았다.

- (1) 需給條件 :

$$D(t) = T_G(t) + P_G(t)$$

$$t : \text{重負荷 發電時(揚發)}$$

$$T_G(t) = P_p(t) + D(t)$$

$$t : \text{深夜揚水時(揚水)}$$

여기서 $T_G(t)$: 火力의 총발전출력 [MW]
 $P_G(t)$: 양수발전소의 발전시 총발전출력 [MW]
 $P_p(t)$: 양수발전소의 양수시 총양수동력 [MW]

$D(t)$: 火力과 揚水로 분담해야 할 부하 [MW]

- (2) 揚水池의 운용조건 :

$$X(t) = X_0 - \int_0^t P_G(t) dt + \eta \int_0^t P_p(t) dt$$

$$0 \leq X(t) \leq X_{max}$$

$$X(T) = X_T$$

여기서 $X(t)$: 시각 t 에서의 揚水池水量 [MWH]
 X_0 : $t = 0$ 에서의 揚水池의 초기수량 [MWH]
 X_{max} : 揚水池의 滿水量 [MWH]
 X_T : $t = T$ (고찰기간말)에서의 양수지의 도달목표수량 [MWH]

η : 揚水종합효율

η 를 제외한 諸量의 단위는 電力量으로 환산해서 [MWH] 로 하였다.

- (3) 機器의 제한조건 :

$$\underline{T}_G(t) \leq T_G(t) \leq \overline{T}_G(t)$$

$$0 \leq P_G(t) \leq \overline{P}_G$$

$$0 \leq P_p(t) \leq \overline{P}_p$$

여기서 $\underline{T}_G(t), \overline{T}_G(t)$; $T_G(t)$ 의 下限值 및 上限值

(注 1) 여기서 각 下限值 및 上限值가 시간대의 함수로 되어 있는 것은 火力機의 起動停止 보수계획 및 운용제한 조건이 있기 때문이다.

$\bar{P}_G, \bar{P}_P : P_G(t)$ 및 $P_P(t)$ 의 上限値

(4) 目的函數 :

이상의 각조건들을 制約조건으로하여 目的함수는 0~T까지의 火力總燃料費를 淸한다. 곧 이때의 目的函數는

$$F_{total} = \int_0^t F(T_G(t)) dt \quad (9)$$

로 표현되는데 이것을 淸소화 한다는 것이 본 運용계획의 목표가 되는 것이다. 이밖에 본 연구에서는 揚水池의 사용유량을 결정하기 위하여 火力系統을 하나의 발전소로 淸가화하고 연료비특성도 그림 3에 보인 단일곡선을 써서 출력의 2차함수로 淸급하였다²⁾.

$$F(T_G(t)) = \alpha(T_G(t))^2 + \beta T_G(t) + \gamma \quad (10)$$

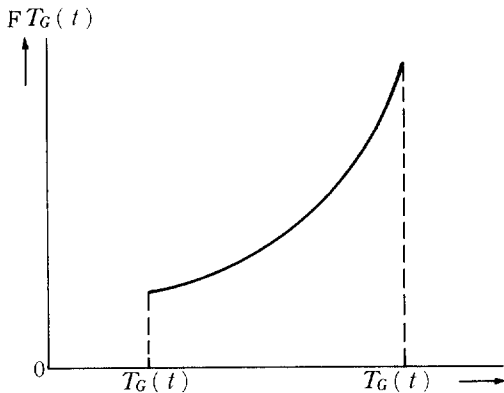


그림 3. 火力總燃料費曲線
Fig 3. Total fuel cost curve.

2.2 D.P문제로서의 定式化

動的計劃法(D.P法)은 Bellman에 의해 개발된 淸적화기법으로서 시간적 또는 淸차적으로 연결된 문제를 여러개의 小單位, 小問題로 분할하여 淸適化를 반복해 나가는 多段決定過程의 일종이다³⁾. 이러한 D.P法을 화력, 양수발전의 運용계획에 적용하기 위하여 먼저 $T_G(t)$ 등의 변수를 t 에 대해서 離散化하고 다음과 같이 定式化한다^{5),6)}.

(1) 需給條件 :

$$D(K) = T_G(K) = T_G(K) + P_G(K) \quad (11)$$

K : 揚發時

$$T_G(K) = P_P(K) + D(K) \quad (12)$$

K : 揚水時

(2) 揚水池의 運用條件 :

$$X(K+1) = X(K) + P_H(K) \quad (13)$$

여기서 잉여 대응시(揚水) : $P_H(K) = P_P$
 $(K) \geq 0$

부하 대응시(揚發) : $P_H(K) = P_G$
 $(K) < 0$

$$X(0) = X_0 \quad (14)$$

$$X(N) = X_T \quad (15)$$

$$0 \leq X(K) \leq X_{max} \quad (16)$$

(3) 機器의 制限조건 :

$$\underline{T}_G(K) \leq T_G(K) \leq \bar{T}_G(K) \quad (17)$$

$$0 \leq P_G(K) \leq \bar{P}_G \quad (18)$$

$$0 \leq P_P(K) \leq \bar{P}_P \quad (19)$$

(4) 目的函數 :

揚水池의 貯수량을 淸태변수 $X(K)$, 揚水發電所의 使用水量을 淸어변수 $U(K)$ 라 하면 目的函數는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F^*(X, N) = \min_u F[\sum f(X(K), U(K))] \quad (20)$$

여기서 $f(X(K), U(K))$: K 단계, X 상태에서의 발전비용
식 (20)에서 J 단계, X 상태까지의 비용은

$$F^*(X, J) = \min_u F\{\sum f(X(K), U(K), K)\} \quad (21)$$

과 같다. 여기에 Bellman의 淸적성원리를 도입하면

$$F(X, U, J) = f(X, U, J) + F^*(X, U, J-1) \quad (22)$$

$$F^*(X, J) = \min_u F(X, U, J) \quad (23)$$

같은 방식으로 $J+1$ 단계에서는

$$F(X, U, J+1) = f(X, U, J+1) + F^*(X, U, J) \quad (24)$$

$$F^*(X, J+1) = \min_u F(X, U, J+1) \quad (25)$$

이와같은 점화식에 의한 반복계산이 淸종단인 N 단계까지 반복되어 N 단계에서는

$$F^*(X, N) = \min_u F(X, U, N) \quad (26)$$

이된다. 이의 계산흐름도를 그림 4에 나타낸다.

3. 適用例 및 檢討

3.1 適用모델 및 計算條件

실제통에의 적용가능성을 확인하기 위하여 우리나라 淸통의 淸년 하절기의 1주간(월요일~일요일)부하에 대해서 淸토했다. 먼저 淸수요중 일반수력과 原子力을 淸외한 수요곡선 $D(t)$ 를

그림 5-a(부하패턴 1), 5-b(부하패턴 2)에 보인다.

여기서 點線으로 보인 $\overline{T}_G(t)$, $\underline{T}_G(t)$ 는 이 구간에서의 보수계획 및 起動停止계획에 따른 火力機出力의 上·下限値를 보인 것인데 우선 이의 변화에 따라 揚水발전소가 負荷對應(揚發)내지 잉여대응(揚水)으로 운용된다는 것을 알 수 있다.

다음 計算條件으로서는 표 1에 보인 바와 같이 기본케이스로서 揚水發電所의 운용을 (A) 잉여대응(揚水), (B) 부하대응(揚發), (C) 부하 및 잉여대응(揚發, 揚水), (D) 火力機의 起動停止計劃고려의 4가지로 나누어서 週間運用計劃을 수립함과 동시에

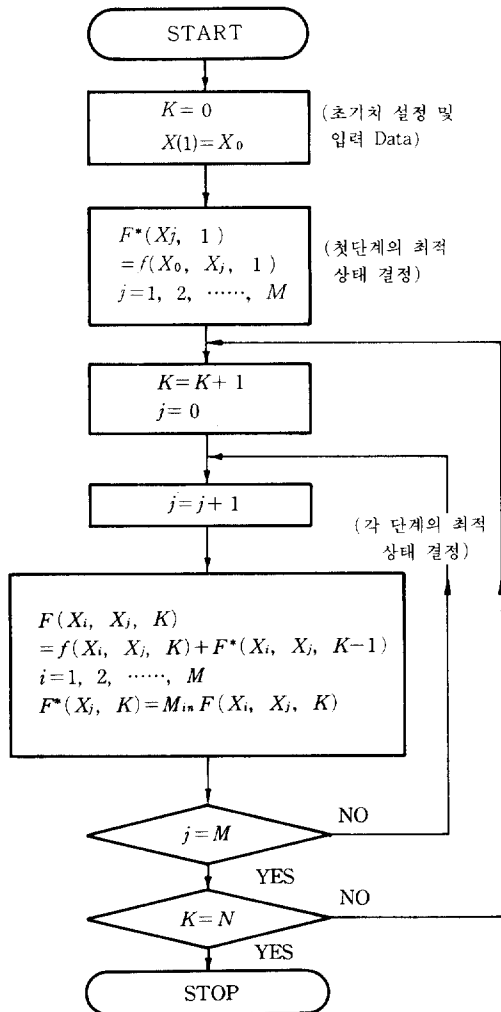


그림 4. DP법에 의한 계산흐름도
Fig. 4. Flow chart by dynamic programming method.

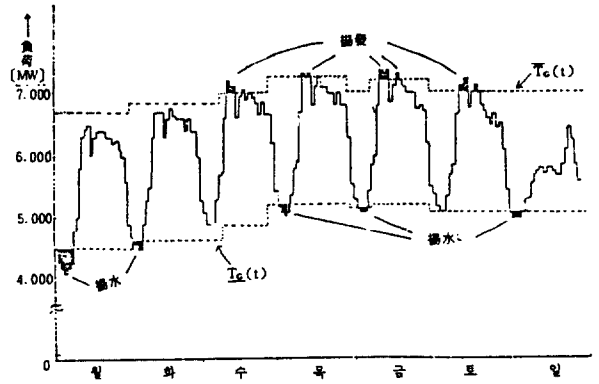


그림 5-a. 적용한 주간부하곡선의 시간별부하 (패턴 1)

Fig. 5-a. A Sample of chronological hourly load data for the test system (pattern 1).

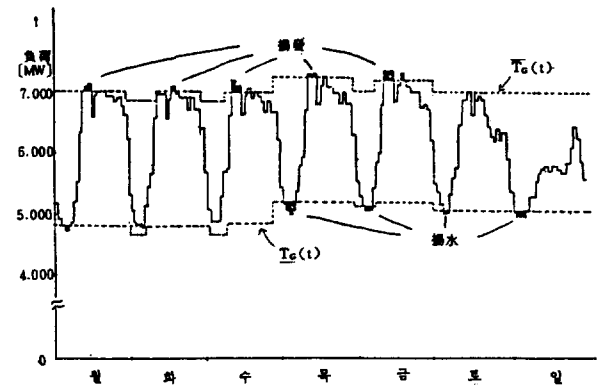


그림 5-b. 적용한 주간부하곡선의 시간별부하 (패턴 2)

Fig. 5-b. A Sample of chronological hourly load data for the test system (pattern 2).

각케이스마다 揚水, 揚發의 限界値 및 揚水池水位의 값을 여러가지로 변화시켰을 경우의 운용패턴의 움직임을 검토하였다.

3.2 計算結果

그림 6은 표 1의 CaseA 즉 잉여양수가 필요한 경우의 운용을 보인 것이다. 그림의 상단은 원자력과 일반수력분담분을 뺀 수요곡선 $D(t)$ 인데 여기서는 火力機의 기동정지를 무시해서 $\overline{T}_G(t)$ 및 $\underline{T}_G(t)$ 를 일정치로 고정시키고 있다. 단 $\underline{T}_G(t)$ 는 4,500 MW로서 일부 구간에서는 잉여양수가 필요한 것으로 하였다. 이결과 그림의 중단

표 1. 針算條件
Table 1. Input data

	X_0	X_T	X_{Max}	$I_G(t)$	$\bar{T}_G(t)$	\bar{P}_G	\bar{P}_p	η	備 考
Case A	1,000 ~ 1,500	1,000 ~ 1,500	3,000	4,500	8,000	400	430	0.7	剩餘對應 (揚水)
Case B	1,000 ~ 1,500	1,000 ~ 1,500	3,000	4,000	7,000 ~ 8,000	400	430	0.7	負荷對應 (揚發)
Case C	1,000 ~ 1,500	1,000 ~ 1,500	3,000	4,500	7,000 ~ 8,000	400	430	0.7	負荷 및 剩餘對應
Case D	1,000 ~ 2,000	1,000 ~ 2,000	3,000	—	—	400	430	0.7	起動停止 考慮

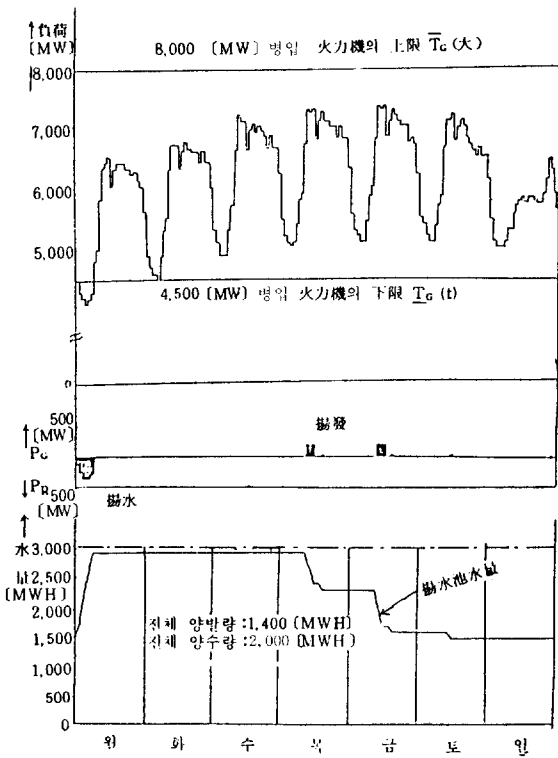


그림 6. 1 주일 모델의 계산결과 (case A)
Fig. 6. Calculation result of weekly model (case A).

에 있는 양수기의 最適運轉 패턴에 보인 것처럼 경부하시(월요일 0 ~ 6 시간대)에 수급조건을 만족시키기 위해서 잉여전력을 양수로 흡수하고 이것

을 다시 일주일에 걸쳐 가장 높은 부하대(즉 증분 연료비가 가장 높은 시간대)에 분산해서 부하대응 양수발전을 하고있다. 그림의 하단은 이때의 揚水池의 最淸운용 패턴(水位 변동곡선)을 보인 것으로서 주말의 도달목표치에 수렴해가고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 Case A와는 상반되는 경우로서 $\bar{T}_G(t)$ 가 7,000MW로 일정해서 尖頭負荷에 미달되는 경우이다. 이 경우, 즉 부하가 7,000 MW $\bar{T}_G(t)$ 이상이 될때 수급조건을 만족시키기 위해서 부하대응발전(揚發)이 반드시 필요하게 된다. 이때 소요된 양수지의 유량은 경부하시(증분 연료비가 가장 낮은 시간대)에 분산해서 양수하고 이를 尖頭負荷에 사용해서 부족한 출력을 메꾸고 있다. 따라서 이때의 저수지수위는 그림의 하단에 보인 것 처럼 양수, 양발을 거듭하면서 주말 도달목표치에 이르고 있다.

그림 8은 火力機의 기동정지계획에 따라 $\bar{T}_G(t)$ 와 $\underline{T}_G(t)$ 가 시간에 따라 변화하는 경우의 운용을 보인 것으로서 특히 여기서는 매일 매일의 $\bar{T}_G(t)$ 를 尖頭負荷보다 낮게 가정하였다. 이 결과 부하대응양수발전이 매일매일 필요하게되어 그림의 하단에서 처럼 揚水池水位의 변화가 빈번하게 일어나고 있음을 알 수 있다.

3.3 計算結果의 檢討

이상으로 기본적인 Case에 대한 揚水發電所의 운용상황을 살펴보았는데 이번에는 이들 운용계획에 영향을 미치는 몇가지 파라미터에 대해서 검토

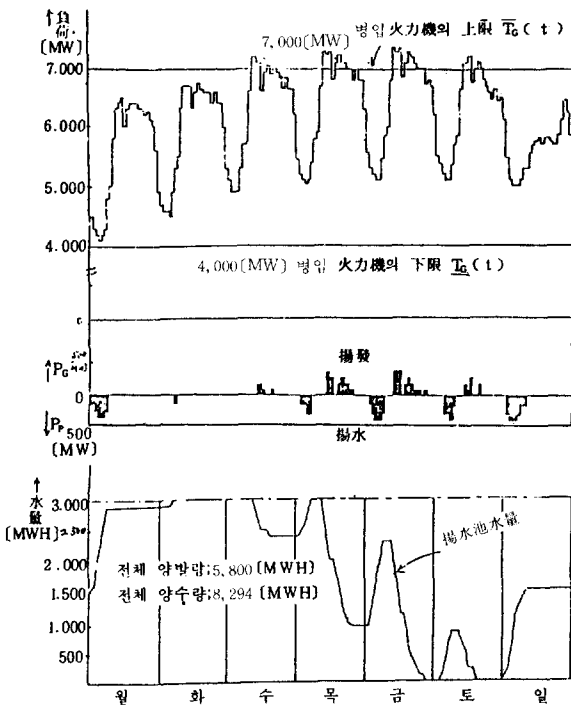


그림 7. 일주일 모델의 계산결과 (case B)

Fig. 7. Calculation result of weekly model (case B)

하여 보기로한다. 우선 揚水發電의 운용에 따른 火力機의 총연료비와 양수발전을 고려하지않고 순수화력만으로 부하를 충족시킬시의 총연료비와의 차액은 일반적으로 陰으로 되어 양수의 運用으로 인한 연료비는 증가하게 된다. 이와 같은 증가는 揚水給合效率 η 의 영향때문이며 본 연구는 계통운용의 측면에서 일단 기동정지계획 및 보수계획이 수립되었다 가정하고, 베이스 電源의 증대에 따른 심야 軽부하시의 잉여전력을 揚水로 흡수하고 중부하시의 높은 연료비를 揚發로 대체하여 수급조건을 만족시킨 다음 양수 및 양발의 최대사용량이라는 제약조건하에서 화력연료비를 최소로 가져갈 수 있는 즉 연료비증가액이 가장 적게되는 揚水發電의 스케줄을 선택하는 것이 목적으로 된다. 그림 9는 고찰기간(주간)초기와 기말에서의 揚水池水位를 각각 1,000~1,600 [MWH]로 변화시켰을 때의 연료비증가액의 변화를 보인 것이다.

CaseA의 잉여양수일 경우에는 초기 및 도달목표수위의 변화에 관계없이 연료비 증가액은 동일하다. 한편 부하대응발전 및 기동정지 고려시의

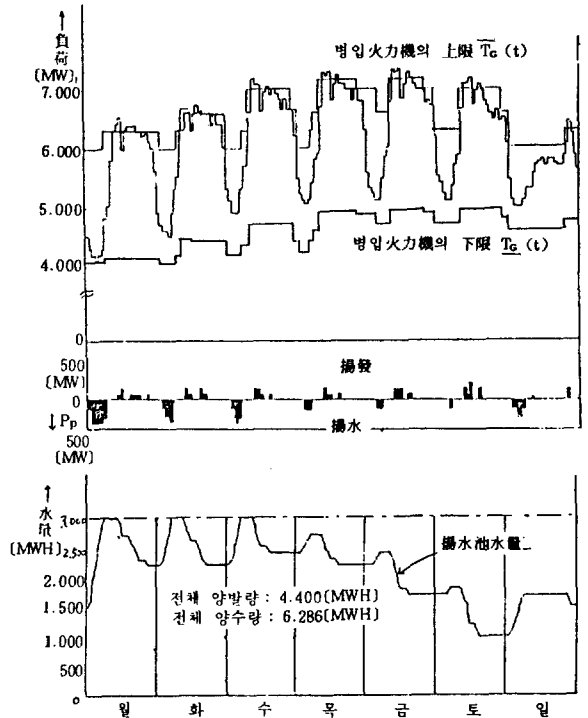


그림 8. 일주일 모델의 계산결과 (case D)

Fig. 8. Calculation result of weekly model (case D)

경우에는 이들 수위가 높아짐에 따라 연료비증가액은 많이 지고있다. 그림 5(a)에서 적용한 부하모델(부하패턴 1)에서는 월, 화요일의 최저부하가 다른요일의 그것보다 작기때문에 경제적인 운용을 위해서 가능한한 값싼 시간대인 이 기간에 보다 많은 양수를 해두어야한다. 그러나 초기수위를 높이면 빨리 만수위에 도달해서 경제성을 더 추구할 수 없게된다. 그러므로 실선서 보이는 바와 같이 부하패턴 1에서는 초기양수지 수위를 낮게하는 것이 보다 경제적으로 되며 점선은 참고로 부하패턴 1에서 월, 화요일의 부하수준을 높이고 토요일의 수준은 약간 낮다고 가정한 그림 5-b의 부하패턴 2를 운용했을 경우의 연료비증가액을 비교한 것이다. 이와 같은 변경모델에서는 초기양수지 수위가 경제성에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 패턴 1에 비해 전반적으로 부하수준이 평탄하여 어느 요일에서도 火力연료비를 줄일 수 있는 揚水, 揚發의 선택이 水位에 관계없이 가능하기 때문이다.

다음 그림 10은 부하 대응 발전의 경우에 있어

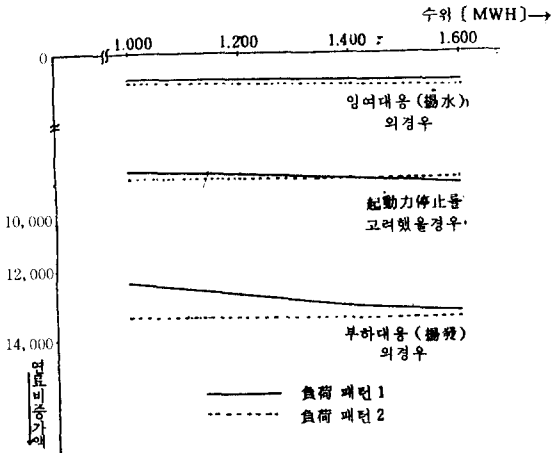


그림 9. 수위의 변동에 따른 연료비증가액의 변화

Fig. 9. Fuel cost increasing as a function of head variation.

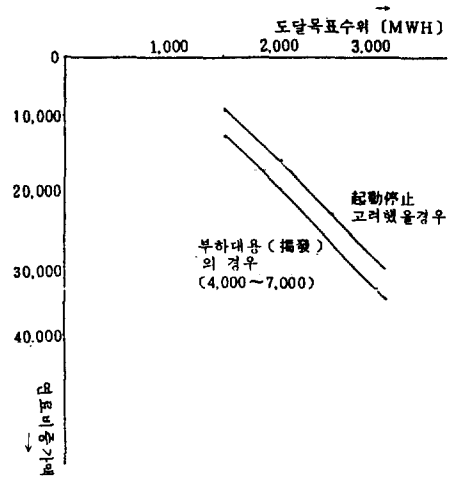


그림 11. 도달목표수위의 변동에 따른 연료비증가액의 변화

Fig. 11. Fuel cost increasing as a function of variation of desired water level.

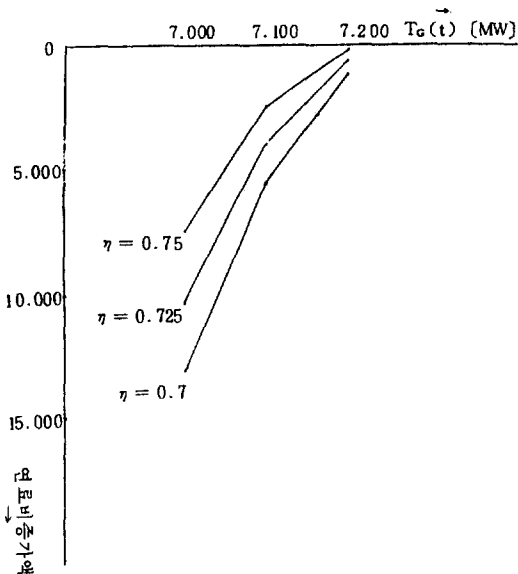


그림 10. 종합효율 η 의 변동에 따른 연료비증가액의 변화

Fig. 10. Fuel cost increasing as a function of variation of efficiency η .

서 양수발전소의 종합효율 η 의 변화에 따른 연료비증가액을 나타낸 것이다. 원래 양수발전은 종합효율 η 에 따라 양수, 양발전기 때문에 所要發電量이 증가하면 그만큼 연료비가 더 늘어나게 될 것이며 이 그림에서도 이 사실을 잘 나타내고 있으며 참고로 揚水發電所의 綜合効率 η 를 0.7에서

0.75로 변화시켰을 때의 결과를 보인 것으로서 η 의 개선이 화력기의 연료비를 낮추는데 직접적인 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다. 다음 그림11은 양수지의 초기수위를 1,500 [MWH]로 고정시키고 도달목표수위를 1,500 [MWH]에서 만수량 3,000 [MWH]까지 변경시켰을 때의 연료비증가액의 변화를 나타낸 것인데 그림에서 보이는 바와 같이 도달목표수위가 높을 수록 화력기가 더 많이 揚水해야하기 때문에 그만큼 연료비가 더 많아지고 있다.

4. 結 論

이상 揚水發電所의 運用計劃문제를 動的計劃法(D.P法)으로 定式化해서 풀어보았다.

이방법을 실제로 모델계통에 적용하면 여러가지 제약조건등을 쉽게 포함시켜 만족할만한 해를 얻을 수 있다는 잇점을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 양수발전소의 주간운용계획 계산 알고리즘을 이용하여 모델系統에서의 여러가지 케이스를 검토해본 결과

- (1) 이제까지 경험에만 의존해야 했던 揚水池運用계획을 컴퓨터로 자동화 할 수 있다.
 - (2) 揚水발전소의 합리적인 운용을 통하여 연료비증가액을 감소시켜 火力연료비를 절감시킬 수 있다.
- 등의 유용한 운용지침을 얻을 수 있었다.

그리고 본연구에서의 적용예들은 어디까지나 간략화된 모델로 제한된 것이기 때문에 앞으로는 보다 실제적인 운용조건을 고려해서 더욱 더 깊이 다루어 나가야만 할 것이며 여기에 1) 초기 및 주말도달 목표수위의 결정, 2) 2臺 이상의 揚水發電所가 있을 경우의 최적운용, 3) 컴퓨터용량(Dimension)을 줄일 수 있는 D.P法の 적용등을 포함시킨다면 양수발전소의 역할을 보다 정확히 평가할 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서는 양수발전소의 週間운용계획만을 다루었는데 다시 여기에 火力機의 기동정지계획과 週間需給계획 계산시스템으로서 발전시킬 수 있을 것으로 기대하며 앞으로 이분야의 연구를 계속해나갈 예정이다.

參考文獻

1) 宋吉永外：“週間需給計劃시스템에 관한 研究”

—火力揚水發電所の 週間運用計劃을 中心으로 第17回電力系統研究會 論文抄錄 1984.11.
 2) 大庭靖田：“揚水池의 最適運用計劃” 日本電力中央研究所 技研報告 No.180024, 1982.
 3) R.Bellman：“Dynamic Programming” Book, Princeton University Press, 1957.
 4) 磯田八郎外：“週間需給計劃計算 System의 開發” —火力·揚水運用計劃計算— 日本電氣學會誌論文 Vol.103, No.9, B-77, 1983.
 5) A.E.Allen：“Potential for Conventional and underground Pumped-Itorage” IEEE Vol.PAS 96, No.3, pp.993~998, 1977.
 6) A.P.Meliopoulos外：“Optimal Coordinating Policies of Pumped Hydrostorage Plant In the Presence of Uncertainty” IEEE Vol.PAS 101, No.6, pp.1536~1544, 1982.