論 文
37~6~2

# 最適電源構成을 위한 簡略 시뮬레이션 技法의 開發

# The Development of the Simplified Simulation Technique for the Best Generation Mix

宋 吉 永* · 崔 在 錫**
(Kil-Yeong Song · Jae-Seok Choi)

## 요 약

本 論文은 經濟性評價를 中心으로하여 研究対象期間內의 最適電源組合의 추이를 쉽게 알 수 있는 簡略시뮬레이션技法의 開發에 관한 研究結果를 정리한 것이다.

이 簡略計算法에서는 簡略하지만 發電機 補修計劃, 揚水式水力의 運転狀況및 에너지制條約件을 갖는 LNG등을 다양하게 취급할 수 있어서 電源構成上의 각종 電源의 역할을 쉽게 評價할 수 있다. 實系統규모의 모델을 사용한 적용예를 통해 最適電源構成의 추이및 原子力 建設費, 核燃料費, 石油, 石炭價格, 深夜率등의 諸要因을 파라메트릭 分析해서 有用한 計劃指針을 얻을 수 있었다.

**Abstract** - The simplified simulation technique for the best generation mix is developed and the studied results are described. The best generation mix over study time from the economic point of view can be easily constructed by this technique. Generator maintenance, the operation of pump-generator and LNG thermal generator with limited energy are simulated variously, so a role of each generator is also easily evaluated. Through parametric analysis, useful planning guide points are obtained for the best generation mix transition, nuclear power plant construction cost, uranium cost, oil cost, coal cost and midnight factor in the study case corresponding to real power system size model.

## 1. 序 論

근래, WASP나 MNI처럼 대단위 프로그램을 사용해서 상세하게 電源開發을 分析하기에 앞서 실무자가 간단하게 電源開發의 패턴이나 파라메트릭 分析등을 목적으로한 앨고리즘들이 最適電源構成(Best Generation Mix) 이라는 제목아래 線型計劃法[1] 非線型計劃法[8],[9] 靜的인 動的計劃法(Static Dynamic Programming)[7] 등의 技法을 빌어서 開發되고 있다.

그러나 이들은 어느 것이나 研究対象期間을 특정時間斷面에 限定시킨 單面計算(Single-Stage)으로써 長期間에 걸친 電源構成의 추세를 파악하기에는 어려울뿐만 아니라 電源의 보수계획이나 揚水式水力과 같은 特殊한 電源의 運用狀況을 제대로 반영치 못하고 있으며 특히 揚水式水力의 開發패턴을 검토하고자 할때는 거의 불가능한 실정이다.

本 研究는 WASP나 MNI 처럼 대단위프로그램을 이용하여 상세하게 電源開發의 解를 구하기에 앞서 실무자가 간단하게 기본적인 파라메트릭 분석이나

*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：1987年 12月 8日
2次修正：1988年 5月 16日

電源開發패턴을 分析할 수 있는 다단용(Multi-Stage) 簡略시뮬레이션技法을 開發하였다.

開發한 앨고리즘에서는 揚水나 LNG등을 簡略하게나마 고려할 수 있도록 했으며 이를 모델계통에 적용해서 그 유용성을 검증하였다.

## 2. 問題의 設定

問題를 해석하게 위해 다음과 같이 가정한다.

(1) 電源는 Unit別이 아니고 種別로 나누어 각각 1機로 취급도록 한다.

(2) 固定費로는 建設費와 維持費를, 可変費로는 燃料費만으로 하고 이들의 合을 總費用으로 한다.

(3) 각 時間帶斷面別로 사전에 후보안을 몇개씩 설정한 다음 이중에서 最適案을 탐색하는 問題로 한정한다.

이하 問題의 定式化를 위해 $i$는 電源種別을(가령, 原子力은 $i=1$, 石炭은 $i=2$, LNG는 $i=3$, 石油는 $i=4$, 一般式水力은 $i=5$, 揚水式水力은 $i=6$), k, m, n는 각각 年度帶(이하 時間帶라 한다.), 月 및 代表日数를 나타내는 첨자로 한다.

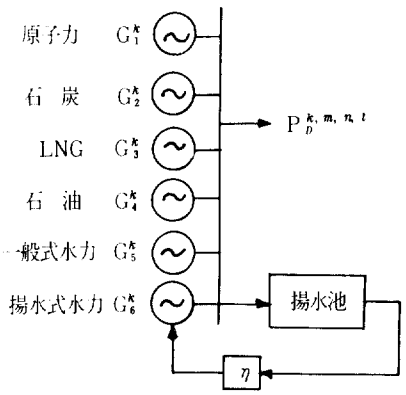



그림 1 모델의 개요

**Fig. 1** Outline of model

한편, 본 모델의 概要를 보이면 그림1과 같은데 이기서 $G_i^k$는 K時間帶에서 i電源의 容量[Kw]이며, $P_D^{kmnt}$는 k, m, n에서 t시각의 負荷値를, $\eta$는 揚水綜合効率[pu]를 표시한다.

後述하는 日間需給運用시뮬레이션을 위해 負荷持續曲線을 線型化시킨 $P_D^{kmnt}$를 예로써 나타내면 그림 2와 같다.

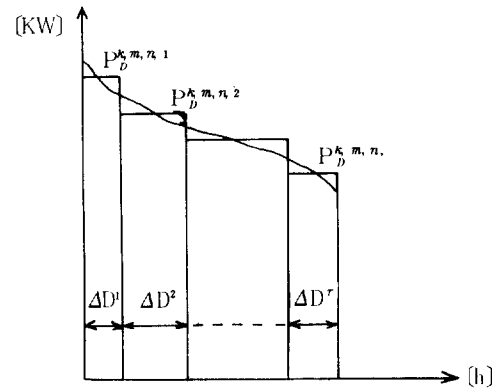



그림 2 日負荷持續曲線

**Fig. 2** Model of daily load duration curve

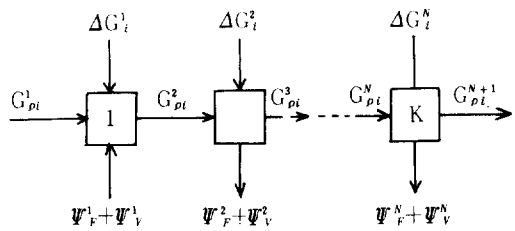



그림 3 最適電構成問題의 多段決定 과정

**Fig. 3** Multistage process of the best generation mix problem

## 3. 問題의 定式化

本 問題는 미리 설정한 構成案들중 末期時間帶까지 누적한 費用이 最小인 各 時間帶의 最適構成案을 탐색하는 最適化問題가 되므로 그림3에 보인 것처럼 각 時間帶를 단계로 하는 多段決定 問題로 변환할 수 있다. 이와같이 각종 制約條件이 時間的 또는 축차적으로 연결된 복잡한 問題는 여러개의 小單位, 小問題로 분할해서 最適化과정을 반복해 나가는 動的計劃法으로 해석하는 것이 有利하다.[14]

이를 위해 모든 費用을 어떤 기준년도로 현가화하기로 하여서 임의의 K時間帶에서의 現價化 固定費를 $\bar{\Psi}_F^k$, 現價化 可変費를 $\bar{\Psi}_V^k$, 또한 공급지장에 의한 페날티비용을 $\bar{\Psi}_P^k$라 했을때 이들을 K時間帶까지 누적한 最小費用函数를 F*라 정의하면 식(3.1)과 같이 定式化 된다.

$$F^*(G_{pi}^k,\ k) \triangleq \min_{\{\Delta G_i\}} \sum_{j=1}^{k} f(G_{pi}^j,\ \Delta G_i^j,\ j) \qquad (3.1)$$

단, $f(G_{pi}^j, \triangle G_i^j, j) = \bar{\Psi}_F^j + \bar{\Psi}_v^j + \bar{\Psi}_p^j$

$G_{pi}^j$ : j時間帶에서 i電源의 構成比〔p.u〕

$\triangle G_i^j$ : j時間帶에서 i電源의 建設量(>0인 경우)
또는 体廢止量(≤0인 경우)

$\bar{\Psi}_F^j = f_F(\triangle G_i^j)$

$\bar{\Psi}_v^j = f_v(G_i, \triangle G_i^j)$

$$\bar{\Psi}_p^j = f_p(\bar{P}) = \begin{cases} =0, & \sum \bar{P}_i^j \geqq P_{pmax}^j \text{ 일 때} \\ =\infty, & \sum \bar{P}_i^j \leqq P_{pmax}^j \text{ 일 때} \end{cases}$$

$\bar{P}_i^j$ : j時間帶에서 各 電源의 最大出力量〔Kw〕
$\{= G_i^j (1 - FoRi - MT_i^j)\}$

$FoR_i$ : 電源의 平均事故率〔p.u〕

$MT_i^j$ : 電源의 補修率〔p.u〕

한편 이때의 상태방정식및 상태변수 $G_{pi}^j$와 제어변수 $\triangle G_i^j$에 대한 제약조건은 식(3.2) 및 식(3.3)과 같다.

$$G_{pi}^{j+1} = \frac{G_\tau^j}{G_\tau^{j+1}} G_{pi}^j + \frac{1}{G_\tau^{j+1}} \triangle G_i^j \tag{3.2}$$

$$\left.\begin{aligned} &\sum_{i \in I} G_{pi}^j = 1 \\ &0.0 \leqq G_{pi}^j \leqq 1.0 \\ &\sum_{i \in I} \triangle G_i^j = G_\tau^{j+1} - G_\tau^j \end{aligned}\right\} \tag{3.3}$$

단, $G_\tau^j$ : j時間帶의 總所要電源容量〔Kw〕
$(= (1 + \varepsilon^j) P_{pmax}^j)$

$\varepsilon^j$ : j時間帶의 예비율〔p.u〕

식(3.1)에 Bellman의 '最適性의 源理'를[14] 적용하면 식(3.4)와 같은 動的計劃法에 의한 漸化式으로 표현 가능하다.

$$F^*(G_{pi}^k, k) = \min_{\triangle G_i^k} \{F^*(G_{pi}^{k-1}, k-1) + f(G_{pi}^k, \triangle G_i^k, k)\} \tag{3.4}$$
$$k = 1, 2, \cdots, N$$

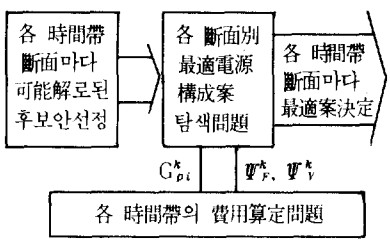



**그림 4** 本 問題의 解析과정

**Fig. 4** Process for analyzing this problem

## 4. 問題의 解析

앞서의 점화식인 식(3.4)는 각 時間帶內에서의 固定費 $\bar{\Psi}_F^k$ 및 可変費 $\bar{\Psi}_V^k$를 계산하는 '費用算定 問題'와 여기는 계산된 費用資料를 근거로 하면서 각 時間帶斷面別로 最適電源構成案을 탐색하는 '最適解探索問題'로 나누어 解析해 나갈 수 있다. 그림 4는 이의 개념도를 나타낸 것이다.

### 4.1 費用算定問題의 解析

편리상, 初期年度를 기준년도로 하고 그년도로 現在價値換算한 累積費用을 経済性 비교를 위한 目的函数로 삼기로 하면 각 費用을 다음과 같이 계산할 수 있다.

#### 4.1.1 固定費 算定

電源의 建設은 各 時間帶의 中間에 이루어지는 것으로 하여 現價化 建設費 $\bar{\Psi}_C^k$는 해당時間帶의 中間에, 現價化 維持費 $\bar{\Psi}_M^k$는 그 斷面에 투입되는 것으로 하면 이들을 식(4.1)과 식(4.2)에 따라 계산할 수 있다.[12][13]

$$\bar{\Psi}_C^k = \sum_{i \in I} \triangle G_i^{\prime k} c_i \alpha_i \left(\frac{1+e_{gi}}{1+r}\right)^{\left(k-\frac{1}{2}\right)\triangle T} \left\{\frac{(1+r)^{\delta_i} - 1}{r(1+r)^{\delta_i}}\right\} \tag{4.1}$$

$$\bar{\Psi}_M^k = \sum_{i \in I} \left\{ G_i^{k-1} c_i \beta_i \left(\frac{1+e_{gi}}{1+r}\right)^{(k-1)\triangle T} + G_i^k c_i \beta_i \left(\frac{1+e_{gi}}{1+r}\right)^{k\triangle T} \right\} \frac{\triangle T}{2} \tag{4.2}$$

단, $r$ : 할인율(Discount rate) 〔p.u〕

$e_{gi}$ : i電源의 建設材料 피상物價上昇率〔p.u〕
$\{= (1+e_{ri})(1+\zeta)$, $e_{ri}$ : 実質物價上昇率, $\zeta$ : 인플레이션率〔p.u〕$\}$

$c_i$ : i電源의 建設單價〔원/ Kw〕

$\alpha_i$, $\beta_i$ : i電源의 均等化 年経費率〔p.u〕 및 維持経費率〔p.u〕 (原子力경우 재처리비 포함)

$\delta_i$ : i電源의 耐用年数〔年〕

$\triangle T$ : 時間帶 斷面間의 間隔〔年〕

$I$ : 電源種類의 集合

$$\triangle G_i^{\prime k} : \begin{cases} =\triangle G_i^k, & \triangle G_i^k > 0 \text{ 일 때 〔Kw〕} \\ =0, & \triangle G_i^k \leqq 0 \text{ 일 때 〔Kw〕} \end{cases}$$

#### 4.1.2 可變費 算定

앞서 固定費 算定에서 電源建設이 각時間帶의 中間에 이루어지는 것으로 하였으므로 각 時間帶의 始終斷面에서의 電源構成은 서로 다르다. 그러므로 可変費算定도 이에 부합되도록 각 時間帶를 $\frac{1}{2}$로 잘라서 계산하되 그 時間帶에 해당하는 모든 年度를 대상으로 하지않고 簡略計算을 위해 그 時間帶

의 始斷年度를 代表年度로 삼아 이 年度에 대해서만 계산도록 하면 k 時間帶의 現價化 可変費 $\bar{W}_v^k$를 식(4.3)에 따라 계산할 수 있다.

$$\bar{W}_v^k = \sum_{i\in I}\left\{Q_i^k b_i\left(\frac{1+e_{fi}}{1+r}\right)^{(k-1)\triangle T} + Q_i^k b_i\left(\frac{1+e_{fi}}{1+r}\right)^{k\triangle T}\right\}\frac{\triangle T}{2} \quad (4.3)$$

단, $$Q_i^k = \sum_{m=1}^{12}\sum_{n\in S} W^{k,m,n} q_i^{k,m,n} \quad (4.4)$$

$q_i^{k,m,n}$ : i電源의 日間發電量[kWh]

$\left(=\sum_{t=1}^{\tau} P_i^{k,m,n,t}\triangle D^t\right)$

$P_i^{k,m,n,t}$ : i電源의 t 시각에서의 發電出力[Kw]

$\triangle D^t$ : t 시각에서 負荷持續時間[hours]

$b_i$ : i電源의 燃料單價[원/ Kwh]

$e_{fi}$ : i電源燃料의 피상物價上昇率[p. u]

$W^{k,m,n}$ : k, m 에서 n代表日의 發生빈도수[days]

s : 代表日 種類의 集合

### 4.2 簡略需給運用시뮬레이션

앞서의 可変費 算定式인 式(4.4)에서 각 電源의 發電量 $Q_i^k$ 계산은 쉽지 않고 계산소요시간도 큰 것이 일반적이다.

본 硏究에서는 에너지 制約條件을 갖는 LNG 및 揚水式 水力의 運用狀況을 쉽게 시뮬레이션할 수 있는 새로운 簡略需給運用시뮬레이션 방법을 開發하여 적용하였다. 이를 위해 다음과 같은 전제조건을 두기로 한다.

(1) 각 電源의 負荷分擔은 優先順位法에 의한다.

(2) 最小出力限度를 갖는 電源으로서는 石炭, LNG, 石油火力으로 限定하고 原子力은 그 구성비율이 높아지면 부하추종 운전이 가능하다고 가정한다.

(3) 揚水式 水力의 運転은 잉여 또는 尖頭負荷대응만으로 限定한다.

(4) LNG 및 水力은 그 설비이용율을 각각 지정해 주므로써 發電量을 갖는 것으로 한다.

이상과 같은 전제조건 아래에서 각 電源의 日間發電量 $q_i^{k,m,n}$를 다음의 앨고리즘으로 쉽게 구할 수 있다.

Step. 1 각 電源의 上限値 $\bar{P}_i^{k,m}$, 下限値 $\underline{P}_i^{k,m}$와 LNG 및 水力의 지정 發電量 $E_{LNG}$ 및 $E_{HYD}$, 그리고 負荷持續曲線 $P_D^{k,m,n,t}$를 각각 식(4.5)에 따라 구한다.

$$\left.\begin{aligned} &\bar{P}_i^{k,m} = G_i^k(1-MT_i^{k,m}-FOR_i),\ i=1,2,\cdots,6\\ &\underline{P}_i^{k,m} = \bar{P}_i^{k,m}\times\theta_i,\ i=2,3,4\\ &E_{LNG} = \bar{P}_3^{k,m}\times 24\times P_{r3}\\ &E_{HYD} = \bar{P}_5^{k,m}\times 24\times P_{r5}\\ &P_D^{k,m,n,t} = P_{Dmax}^k\times L_D^{m,n,t}\end{aligned}\right\} \quad (4.5)$$

단, $MT_i^{k,m}$ : i電源의 補修率[p. u]

$FOR_i$ : i電源의 平均事故率[p. u]

$\theta_i$ : i電源의 出力下限値率[p. u]

$P_{r3}$, $P_{r5}$ : LNG 와 水力의 日間設備利用率[p. u]

$P_{Dmax}^k$ : K時間帶의 最大負荷値[Kw]

$L_D^{m,n,t}$ : m, n의 負荷패턴에서 t 시각에서의 값[p.u]

Step. 2 처음의 負荷持續曲線 $P_{D1}^{k,m,n,t}$로부터 石炭, LNG 및 石油火力의 最低出力限度에 따른 수정負荷持續曲線 $P_{D2}^{k,m,n,t}$를 식(4.6)에 의하여 구하고 이들의 發電量을 식(4.7)처럼 구한다.

$$\mathbf{P}_{D_2}^{k,m,n} = \mathbf{P}_{D_1}^{k,m,n} - \left(\sum_{j=2}^{4}\underline{P}_j^{k,m,n,t}\right)\mathbf{II} \quad (4.6)$$

단, $\mathbf{P}_{D\mu}^{k,m,n}$ : $\mu$번째의 수정 負荷持續曲線벡타 $(\tau\times 1)$

II : 모든 요소가 '1'인 렬벡타$(\tau\times 1)$

$\underline{P}_j^{k,m,n,t} = \underline{P}_j^{k,m}$

$$q_j^{k,m,n} = \sum_{t=1}^{\tau}\underline{P}_j^{k,m,n,t}\triangle D^t \quad (4.7)$$

(단, j=2, 3, 4)

Step. 3 揚水式水力을 다음과 같은 방법으로 시뮬레이션 한다.

(1) 揚水式水力을 最大限運転할 때의 限界値를 구하여 수정負荷持續曲線 $P_{D2}^{k,m,n,t}$를 作成한다. 이때 도표변환법[15]을 응용하여 揚水發電部分은 식(4.8)에 따라 負荷를 첨두삭감하므로써 구하고 揚水部分은 식(4.9)에 따라 기저負荷를 높여주므로써 구할 수 있다.

揚水發電部分

$$\left.\begin{aligned} &P_{g6}^{k,m,n,t}\le\bar{P}_6^{k,m}\\ &\sum_{t=1}^{\tau}P_{g6}^{k,m,n,t}\triangle D^t = \bar{E}_{PG}^k\end{aligned}\right\} \quad (4.8)$$

揚水部分

$$\left.\begin{aligned} &P_{p6}^{k,m,n,t}\le\bar{P}_6^{k,m}\\ &\sum_{t=1}^{\tau}P_{p6}^{k,m,n,t}\triangle D^t = \frac{\bar{E}_{PG}^k}{\eta}\end{aligned}\right\} \quad (4.9)$$

단, $P_{g6}^{k,m,n,t}$, $P_{p6}^{k,m,n,t}$ : 각각 k, m, n, t에서 揚水發電및 揚水 運転値[Kw]

$\bar{E}_{PG}^k$ : k時間帶에서 揚水式水力의 最大發電可能量[Kwh] $(=\bar{P}_6^{k,m}\times 24\times P_{r6})$

(2) 尖頭負荷対応(Need Operation) 揚水發電量 $E_{PPG}^{k,m,n}$을 식(4.10)에 따라 구한다.

$$E_{PPG}^{k,m,n} = \sum_{t=1}^{\tau}\mathrm{pos}\left\{P_{D2}^{k,m,n,t} - \max\left\{P_{D2}^{\prime k,m,n,t}, \sum_{i=1}^{5}\bar{P}_i^{k,m}\right\}\right\}\triangle D^t \quad (4.10)$$

단, $\text{pos}\{A-B\}\begin{cases}=A-B & A>B \text{ 일때}\\ =0 & A<B \text{ 일때}\end{cases}$

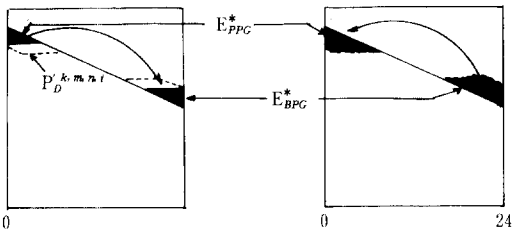
$\max\{A, B\}\begin{cases}=A & A>B \text{ 일때}\\ =B & A<B \text{ 일때}\end{cases}$

(3) 剩創揚水量 $E_{BPG}^{k,m,n}$를 식(4.11)에 따라 구한다.

$$E_{BPG}^{k,m,n}=\sum_{t=1}^{\tau}\text{pos}\{\min[P'^{k,m,n,t}_{D2}, \sum_{i=2}^{4}P_i^{k,m}+\bar{P}_1^{k,m}]-P_2^{k,m,n,t}\}\triangle D^t \quad (4.11)$$

단, $\min\{A, B\}\begin{cases}=A & A<B \text{ 일때}\\ =B & A>B \text{ 일때}\end{cases}$

(4) 끝으로 식(4.12)에 따라 실제 運転해야할 揚水發電量 $E_{PPG}^{*k,m,n}$ 및 揚水量 $E_{BPG}^{*k,m,n}$를 계산하고 이만큼 식(4.13) 및 식(4.14)에 따라 각각 첨두부하를 삭감하고 기저부하를 상승시키므로써 그림5처럼 揚水運転을 시뮬레이션 한다.




(a) $E_{PPG}>E_{BPG}$ 경우 (原子力比率 : 小)　　(b) $E_{BPG}>E_{PPG}$ 경우 (原子力比率 : 大)

**그림 5** 揚水式水力의 揚水및 揚水發電의 決定

**Fig. 5** Determination of generation and pumping up of pump storage hydro power station

$$\left.\begin{aligned}&E_{PPG}^{*k,m,n}=\max\{E_{PPG}^{k,m,n}, E_{BPG}^{k,m,n}\times\eta\}\\ &E_{BPG}^{*k,m,n}=E_{PPG}^{*k,m,n}/\eta\end{aligned}\right\} \quad (4.12)$$

揚水發電部分

$$\left.\begin{aligned}&P_{g6}^{k,m,n,t}\leqq\bar{P}_6^{k,m}\\ &\sum_{t=1}^{\tau}P_{g6}^{k,m,n,t}\triangle D^t=E_{PPG}^{*k,m,n}\end{aligned}\right\} \quad (4.13)$$

揚水部分

$$\left.\begin{aligned}&P_{p6}^{k,m,n,t}\leqq\bar{P}_6^{k,m}\\ &\sum_{t=1}^{\tau}P_{p6}^{k,m,n,t}\triangle D^t=E_{BPG}^{*k,m,n}\end{aligned}\right\} \quad (4.14)$$

여기서 구한 $P_{g6}^{k,m,n,t}$ 및 $P_{p6}^{k,m,n,t}$를 이용하여 揚水까지 고려한 수정負荷持續曲線 $P_{D3}^{k,m,n,t}$를 식(4.15)에 따라 구하고 이의 출력량 $q_6^{k,m,n}$를 식(4.16)에 따라 구한다.

$$\mathbf{P}_{D3}^{k,m,n}=\mathbf{P}_{D2}^{k,m,n}-\mathbf{P}_{g6}^{k,m,n} \quad (4.15)$$

$$q_6^{k,m,n}=\sum_{t=1}^{\tau}P_{g6}^{k,m,n,t}\triangle D^t \quad (4.16)$$

Step. 4 一般式水力의 運転모의로써 식(4.17)과 같이 上限値制約條件을 만족하면서 지정된 發電量 $E_{HYD}^{k,m,n}$를 負荷分擔하도록 尖頭負荷삭감을 행한다.[15] 이로부터 水力까지 고려한 수정 負荷持續曲線 $P_{D4}^{k,m,n,t}$를 식(4.18)에 따라 구하고 이의 發電量 $q_5^{k,m,n}$를 식(4.19)에 따라 구한다.

$$\left.\begin{aligned}&P_5^{k,m,n,t}\leqq\bar{P}_5^{k,m}\\ &\sum_{t=1}^{\tau}P_5^{k,m,n,t}\triangle D^t=E_{HYD}^{k,m,n}\end{aligned}\right\} \quad (4.17)$$

$$\mathbf{P}_{D4}^{k,m,n}=\mathbf{P}_{D3}^{k,m,n}-\mathbf{P}_5^{k,m,n} \quad (4.18)$$

$$q_5^{k,m,n}=\sum_{t=1}^{\tau}P_5^{k,m,n,t}\triangle D^t=E_{HYD}^{k,m,n} \quad (4.19)$$

Step. 5 잔여 LNG 火力의 負荷分擔을 식(4.20)에 따라 행한다.[15] 이때 Step. 2에서 이미 이의 最低出力限度를 고려했으므로 LNG의 지정 發電量 $E_{LNG}^{k,m,n}$와 上限値 制約條件을식(4.21)처럼 수정하여 행한다.

$$\left.\begin{aligned}&P_3'^{k,m,n,t}\leqq\bar{P}_3'^{k,m}\\ &\sum_{t=1}^{\tau}P_3'^{k,m,n,t}\triangle D^t=E_{LNG}'^{k,m,n}\end{aligned}\right\} \quad (4.20)$$

$$\left.\begin{aligned}&\text{단, } E_{LNG}'^{k,m,n}=E_{LNG}^{k,m,n}-\underline{q}_3^{k,m,n}\\ &\bar{P}_3'^{k,m}=\bar{P}_3^{k,m}-\underline{P}_3^{k,m}\end{aligned}\right\} \quad (4.21)$$

역시, 여기서 구한 $P_3'^{k,m,n,t}$를 이용하여 수정負荷特續曲線 $P_{D5}^{k,m,n,t}$를 식(4.22)에 따라 구하고 이의 發電量 $q_3^{k,m,n}$를 식(4.23)에 따라 구한다.

$$\mathbf{P}_{D5}^{k,m,n}=\mathbf{P}_{D4}^{k,m,n}-\mathbf{P}_3'^{k,m,n} \quad (4.22)$$

$$q_3^{k,m,n}=\sum_{t=1}^{\tau}P_3'^{k,m,n,t}\triangle D^t+\underline{q}_3^{k,m,n}=E_{LNG}^{k,m,n} \quad (4.23)$$

Step. 6 原子力의 負荷分擔을 식(4.24)에 따라 행한다.

$$P_1^{k,m,n,t}\begin{cases}=P_{D5}^{k,m,n,t}, \bar{P}_1^{k,m}\geqq P_{D5}^{k,m,n,t} & \text{경우}\\ =\bar{P}_2^{k,m,n,t}, \bar{P}_1^{k,m}\leqq P_{D5}^{k,m,n,t} & \text{경우}\\ =\bar{P}_{D4}^{k,m,n,t}, \bar{P}_1^{k,m}\leqq P_{D3}^{k,m,n,t}\geqq P_{D2}^{k,m,n,t} & \text{경우}\end{cases} \quad (4.24)$$

역시, 原子力까지 고려한 수정負荷持續曲線 $P_{D6}^{k,m,n,t}$를 식(4.25)에 따라 구하고 이의 發電量 $q_1^{k,m,n}$를 식(4.26)에 따라 구한다.

$$\mathbf{P}_{D6}^{k,m,n}=\mathbf{P}_{D5}^{k,m,n}-\mathbf{P}_1^{k,m,n} \quad (4.25)$$

$$q_1^{k,m,n}=\sum_{t=1}^{\tau}P_1^{k,m,n,t}\triangle D^t \quad (4.26)$$

Step. 7 石炭火力의 出力可能發電量을 무한대라 가정하고 負荷分擔을 식(4.27)에 따라 행한다. 이 경우도 Step. 2에서 이미 이의 最低出力限度를 고려했으므로 上限値制約條件을 식(4.28)처럼 수정한다.

$$\left.\begin{aligned} &P_2'^{k,m,n,t} \leqq \overline{P}_2'^{k,m} \\ &\sum_{t=1}^{\tau} P_2'^{k,m,n,t}\,\triangle D^t \leqq \infty \end{aligned}\right\} \quad (4.27)$$

단, $\overline{P}_2'^{k,m} = \overline{P}_2^{k,m} - \underline{P}_2^{k,m}$ (4.28)

역시 石炭火力까지 고려한 수정負荷特續曲線 $P_{D7}^{k,m,n}$를 식(4.29)에 따라 구하고 이의 發電量 $q_2^{k,m,n}$를식(4.30)에 따라 구한다.

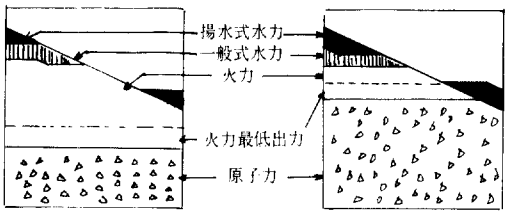
$$P_{D7}^{k,m,n} = P_{D6}^{k,m,n} - P_2^{k,m,n} \quad (4.29)$$

$$q_2^{k,m,n} = \sum_{t=1}^{\tau} P_2'^{k,m,n,t}\,\triangle D^t + \underline{q}_2^{k,m,n} \quad (4.30)$$

Step. 8 마지막으로 모든 나머지 負荷는 石油火力이 담당하도록 하며 이의 發電量 $q_4^{k,m,n}$를 식(4.31)에 따라 계산할 수 있다.

$$q_4^{k,m,n} = \sum_{t=1}^{\tau} P_{D7}^{k,m,n,t}\,\triangle D^t + \underline{q}_4^{k,m,n} \quad (4.31)$$

이와같은 절차에 따라 구한 각 電源중 크게 水力, 火力, 原子力으로 나누어 이들의 負荷分擔을 나타내면 그림 6과 같다. 〈그림 6〉




(a) 原子力比率 : 小 경우 (b) 原子力比率 : 大경우

**그림 6** 水力, 原子力, 火力의 負荷分擔

**Fig. 6** Load dispatch of hydro, nuclear and thermal power stations.

한편, 여기서 구한 $q_i^{k,m,n}$를 앞서의 식(4.4)에 적용하므로써 각 電源의 年間發電量 $Q_i^k$를 쉽게 계산할 수 있으며 또한 年間設備利用率도 식(4.32) 와 같이 계산할 수 있다.

$$P_{Ti}^k = \frac{Q_i^k}{G_i^k \times 365 \times 24}\ [\text{p.u}] \quad (4.32)$$

위의 簡略日間需給運用 시뮬레이션技法의 개략적인 흐름도는 그림 7 과 같다.

### 4.3 最適解探索問題의 解析

각 時間帶의 斷面에 可能解인 후보안들을미리 설정해 주고나서 그중에서 最適解를 선택하는 問題로 限定했으므로 이들 후보안들을 해당 時間帶斷面의 格子點에 대응시킨후 初期時間帶부터 末期時間帶까지 점화식인 식(3.4)를 사용해서 각 후보안에 대하여 차례로 풀고(이때 식(3.2)와 식(3.3)의 제약

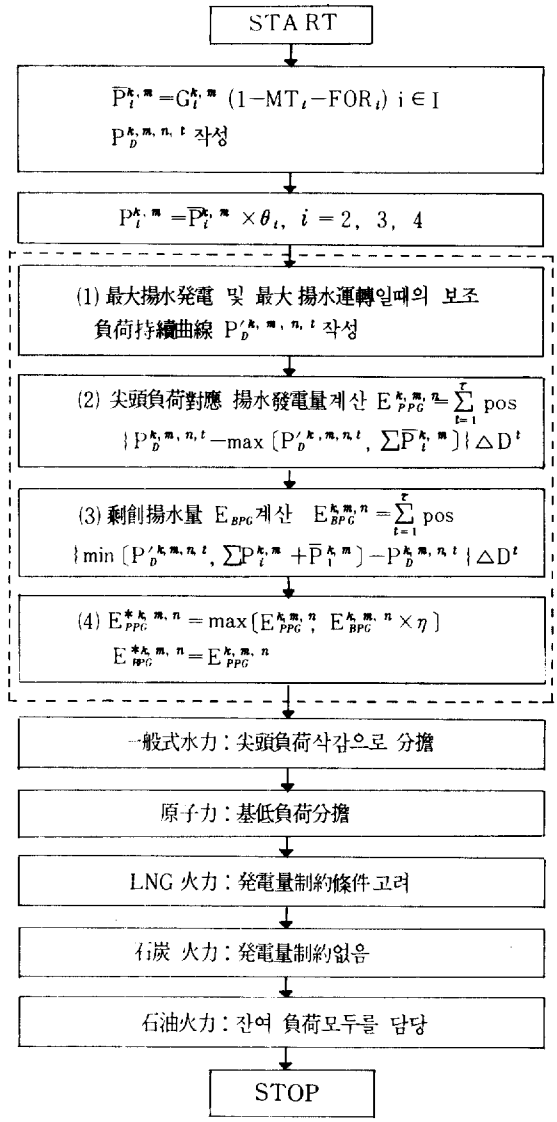



**그림 7** 日間需給運用簡略시뮬레이션 技法의 흐름도

**Fig. 7** Flow chart of the simplified simulation technigue for daily load dispatch.

조건을 벗어나면 $f(\cdot) = \infty$로 한다.) 末期時間帶의 終斷面에서 最小費用을 갖는 最適案을 찾아 그 經路를 後退型(Backward)으로 재추적하므로써 각 斷面別 最適案을 모두 구할 수 있다.

그림. 8 은 動的計劃法에 의하여 각 斷面의 最適構成案을 탐색하는 과정을 간단히 도식적으로 나타낸 것이다.

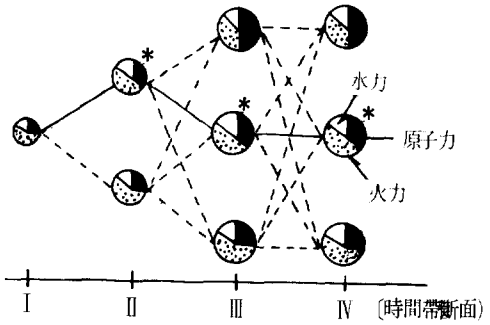



그림 8 動的計劃法에 의한 最適電源構成案의 탐색도

**Fig. 8** Concept diagram of the best generation mix searching by dynamic programming

한편, 모든 電源種類대로 후보안들을 동시에 설정하여 탐색한다는 것은 현실적으로 불가능하므로 (예로써 선정대상電源種類＝4個, 각 電源당 후보안의 数＝10일 경우 時間帶斷面당 후보안의總数는 $10^4$個가 必要) 여기서는 상호 비교되는 電源끼리 묶어서 후보안들을 설정한후 그때마다 最適解를 구해나가는 逐次近似 動的計劃法(Successive Approximation Dynamic Programming)을 적용하므로써 原子力외에 石炭火力, 石油火力 및 場水式水力의 構成比도 決定할 수 있도록 한다.

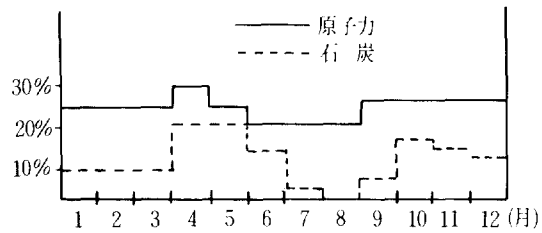



그림 9 補修維持計劃패턴
(예, 原子力 및 石炭火力)

**Fig. 9** Maintenance scheduling patterns
(Ex. Nuclear & Coal power plants)

표 1 代表年度의 最大負荷및 總所要電源容量

**Table 1** Maximum load in each period

| Stage | Year | PDmax [$10^3$kw] | Gr [$10^3$kw] |
|---|---|---|---|
| 1 | 1986 | 10500 | 18000 |
| 2 | 1991 | 14000 | 21000 |
| 3 | 1996 | 20000 | 25600 |
| 4 | 2001 | 27000 | 33000 |

표 2 초기 年度의 電源構成

**Table 2** Generaion mix at initial period(1986-year)

| Gen | Cap($10^3$ kw) | (%) |
|---|---|---|
| Nucr | 4860 | 27.0 |
| Coal | 3600 | 20.0 |
| LNG | 2520 | 14.0 |
| Oil | 4860 | 27.0 |
| Hydr | 1260 | 7.0 |
| Pump | 900 | 5.0 |
| Sum | 18000 | 100.0 |

## 5. 적용예

이번에 開發한 簡略計算法을 표 1 및 표 2 와 같은 조건아래 1986年을 初期年度 및 기준년도로 하고 5年 간격으로 2001年까지 最適電源構成比를 決定하려 하는 3時間帶, 4斷面 모델系統에 적용하여 보았다.

이를위해 各 代表年度의 最大負荷値및 總所要電源容量은 표 1과 같다고 가정했으며 年度別 負荷曲線의 패턴은 모두 동일하다고 보았다.

또한 각 年度別 補修計劃패턴도 모두 동일하다고 가정했는데, 그 一例로서 原子力및 石炭火力의 패턴을 보이면 그림 9와 같다.

그외 각종 變数들과 経済性 資料는 표. 3 및 표. 4를 사용하였다.

표 3 電源特性資料

**Table 3** Generation characteristic data

| | |
|---|---|
| Pump eff. | 0.7 |
| Pr 6(Pump) | 0.20 |
| Pr 5(Hydro) | 0.25 |
| Pr 3(LNG) | 0.55 |
| Nuclear F.O.R | 0.05 |
| Thermal F.O.R | 0.02 |
| Hydro F.O.R | 0.00 |
| $\theta 2$ | 0.35 |
| $\theta 3$ & $\theta 4$ | 0.20 |

단, Pr : 設備利用率
耐用年數＝30〔年〕

표 4 각종 経済性資料

**Table 4** Economical data

| Gen name | 건설비 [만원/Kw] | 건설비 실질상승율 [%/년] | 연료비 [원/kwh] | 연료비 실질상승율 [%/년] | 이 경비율 [%] | 기설설비 유지경비율 [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Nucr | 135 | 0 | 15.0 | 1.0 | 19 | |
| Coal | 100 | 0 | 37.5 | 1.0 | 17 | |
| LNG | 85 | 0 | 67.5 | 1.0 | 17 | |
| Oil | 65 | 0 | 80.0 | 1.0 | 17 | 8 |
| Pump | 50 | 0 | | | 13 | |

(단, 할인율=10%)

### 5.1 最適電源構成比決定

여기서는 一般式水力 및 LNG 火力의 構成比는 주어진 것으로 하고 原子力, 石炭, 石油및 揚水式水力의 構成比를 決定하는 問題로 하여 이들을 표. 5와 같이 상호 관련성이 있는 것끼리 짝을 지어서 前述한 逐次近以 動的計劃法으로 처리하여 보았다.

수렴시에의 最適電源構成比를 각 代表年度別로 나타내면 그림. 10과 같았는데 표. 1의 所要電源容量을 이 구성비와 곱하여 구한 실제 용량크기로서 비교해 본다면 基低負荷用電源인 原子力이 증대함에 따라 揚水式水力도 같이 증대하는 것이 経済的임을 알 수 있으며 石炭역시 증대하나 대신 石油火力은 점차 감소하는 추세로 나아감을 알 수 있다.

표 5 決定目標電源과 비교대상 電源

**Table 5** Determining Generator and Comparative Generator

| 단계 | 決定目標電源 | 비교대상電源 | 비교 이유 |
|---|---|---|---|
| Ⅰ | 原 子 力 | 石 炭 火 力 | 経済性이 対 等 |
| Ⅱ | 石 炭 火 力 | 石 油 火 力 | 出力變動이可能 |
| Ⅲ | 揚 水 式 水 力 | 石 油 火 力 | 첨두負荷対応 |

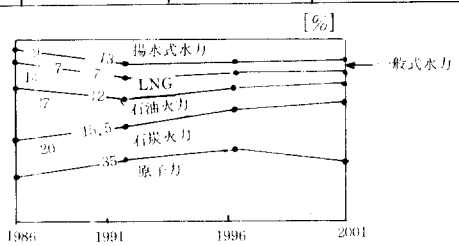



**그림10** 最適電源構成比(代表年度別 變化)

**Fig.10** The best generation mix (configuration in standard years)

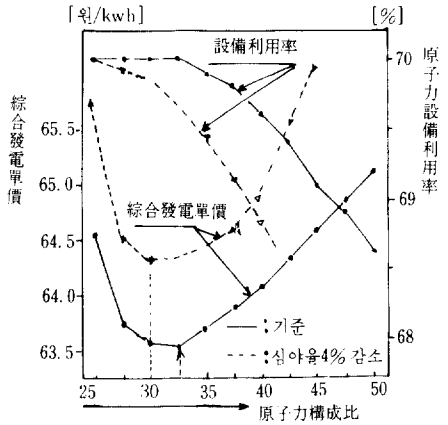



**그림11** 原子力 設備利用率과 綜合發電單價의 變化

**Fig.11** Variation of LBC and nuclear capacity factor

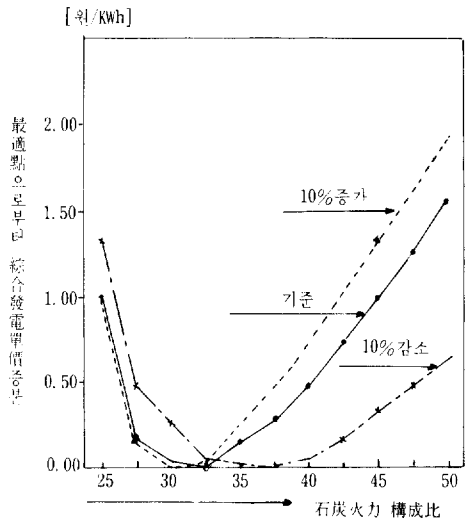



**그림12** 原子力 建設費의 영향

**Fig.12** Effect of nuclear construction cost

### 5.2 原子力 設備利用率과 構成比

2001年度에서 原子力의 構成比증가에 따른 그의 設備利用率 및 綜合發電單價의 변화는 그림. 11과 같았다. 이는 原子力이 그의 設備利用率이 높게 維持되는한 最経済的인 電源으로 판단되지만 그의 構成比가 증대함에 따라 심야시 減發運転 (Derating Operation)이 불가피하게 되어 그 設備利用率이 저하되고 経済性은 악화됨을 보여주고 있다.

### 5.3 파라메트릭 分析

표. 5와 같이 상호관련성이 있는 電源끼리 建設

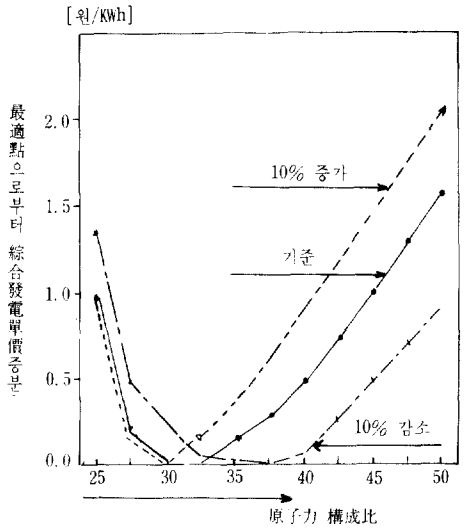



그림13 原子力 核燃料費의 영향

**Fig.13** Effect of uranium cost

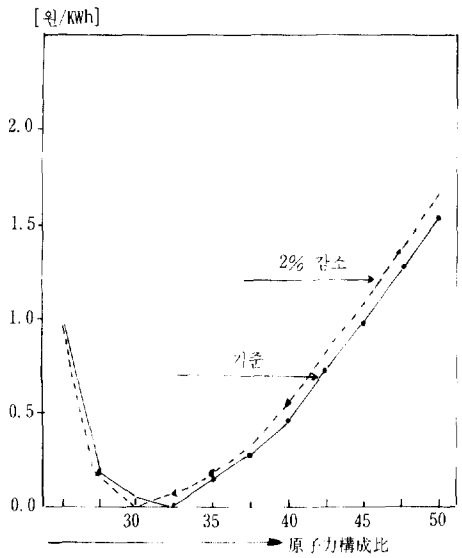



그림14 揚水式水力의 構成比 영향

**Fig.14** Effect of pump-generation power plant composition ratio

單價나 燃料單價 또는 探夜率등과 같은 파라메타들이 變動함에 따라 2001年度에 있어서 그 構成比가 어떻게 變化하는가를 다음과 같이 分析해 보았다.

① 原子力 建設費의 영향

그림. 12는 原子力 建設費 變動에 따라 그 最適構成比가 變化하는 모습을 나타낸 것인데 建設費가 저하되면 比率點은 커지고, 반대로 상승하면 石炭과의 경합에서 열세에 놓여서 작아짐을 알 수 있다.

② 核燃料費의 영향

그림. 13은 原子力 核燃料費 變動에 따른 그의 最適構成比의 變化모습을 나타낸 것인데 建設費 영향에서와 같이 이의 상승, 저하에 따라 石炭火力과 경합을 이루어서 각각 比率點이 작아지거나 커짐을 알 수 있다.

③ 揚水式水力 構成比의 영향

그림. 14는 揚水式水力의 構成比變動에 대한 原子力 構成比의 變化모습을 나타낸 것으로 그 構成比가 감소함에 따라 原子力 最適構成比도 따라서 감소함을 알 수 있는데, 이는 그 만큼 原子力의 設備利用率이 나빠져서 最經濟點이 저하되기 때문인 것으로 판단된다.

④ 石油價格의 영향

그림. 15는 原子力을 最經濟點인 32.5%에 고정시킨 후 石油價格의 變動에 따른 石炭火力의 構成比 變化를 살펴본 것이다. 여기서 石油價格의 증, 감에 따라 石炭火力 構成比는 역으로 감, 증으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

⑤ 石炭價格의 영향

그림. 16은 ④에서와 동일한 分析방법으로 하고 石炭價格에 따른 石炭火力 構成比 變化를 살펴본 것인데 石炭價格의 증, 감에 따라 그 構成比도 역시 증, 감으로 나타남을 알 수 있다.

⑥ 石炭火力 建設費의 영향

그림. 17도 ④에서와 동일한 分析방법으로 하고 石炭火力 建設費變動에 따른 그 構成比의 變化를 살펴본 것인데 그 費用이 증가할 수록 그 構成費는 크게 벗어짐을 알 수 있다.

⑦ 負荷深夜率의 영향

(a) 揚水式水力의 構成比 고정시; 앞서 그림. 11은 揚水式水力의 構成比를 일정하게 고정시킨후 深夜率 變動에 따른 原子力의 設備利用率및 그의 最適點의 變化도 살펴본 것인데 深夜率이 낮아지면 그 設備利用率은 급격히 저하되고 最適點도 낮아지며 綜合發電單價가 높아짐을 알 수 있다.

(b) 原子力의 構成化 고정시; 그림. 18은 原子力의 構成比를 고정시킨후 深夜率의 變動에 따른 揚水式水力의 構成比 變化를 살펴 본 것으로써 深夜率이 저하될수록 揚水式水力의 構成比가 점차 증대됨을 알 수 있다.

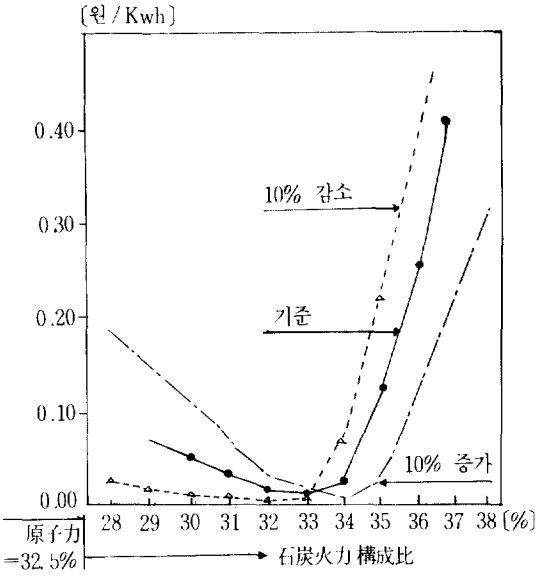



그림15 石油價格의 영향

**Fig.15** Effect of oil cost

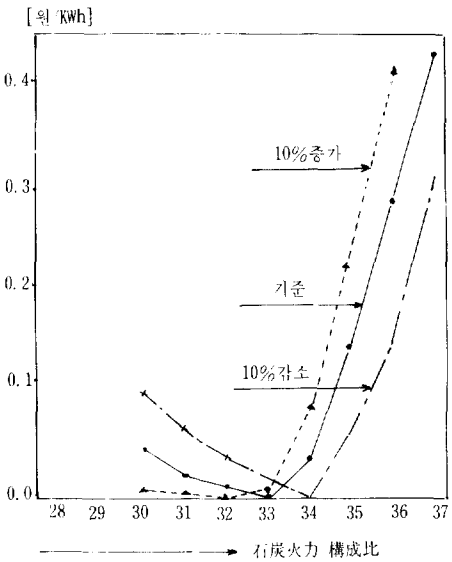



그림16 石炭價格의 영향

**Fig.16** Effect of coal cost

이는 深夜率이 저하되면 이에따라 原子力의 設備利用率도 나쁘게되는 바 이를 最適으로維持하기 위해서 電力貯藏設備인 揚水式水力의 構成比를 증대시키기 때문인 것으로 풀이된다.

## 6. 結 論

本 研究의 結論을 要約하면 다음과 같다.

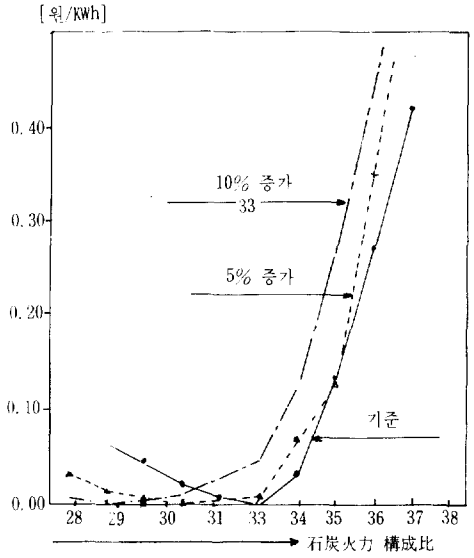



그림17 石炭火力 建設費의 영향

**Fig.17** Effect of coal plant construction cost

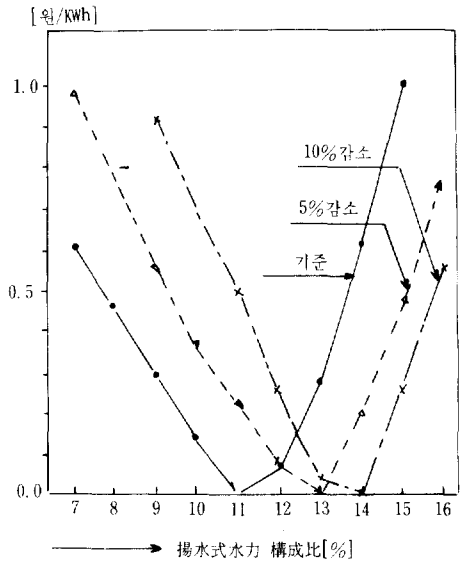



그림18 深夜率의 영향

**Fig.18** Effect of midnight factor

(1) 研究対象期間中 中間年度의電源構成 狀態에 따른 設備利用率의 영향도 고려하여 最適電源構成比를 쉽게 決定할 수 있는 日間需給運用簡略 시뮬레이션技法을 開發하였다.

(2) 이 簡略計算法에서는 發電機 補修計劃과 揚水式水力의 運用狀況 및 發電量 制約條件을 갖는LNG 火力電源등을 다양하게 취급할 수 있어서 電源構成比의 각종 設備의 역할을 쉽게 평가할 수 있었다.

(3) 이 모델을 사용해서 原子力 建設費, 核燃料費, 揚水式水力의 構成比, 石油價格, 石炭價格, 石炭火力 建設費 및 深夜率등 諸要因을 파라메트릭 分析해서 이들의 영향을 다각적으로 검토하였다

(4) 여기서 얻어진 결과를 구체적으로 어떻게 살려 나갈 것인가에 대해서는 需要의 계절적변동, 電源補修作業의 실태, 中間負荷用火力의 보유상태, 尖頭用電源의 실정등을 감안해서 적절히 적용해 가면 될 것으로 기대된다.

(5) 한편 本 研究에서 開發한 앨고리즘은 發電機 負荷追從能力이나 發電所의 立地條件등을 무시한 것이므로 完全한 것이라고는 할 수 없으나 실용면에 있어서는 電源開發 담당자들이 基礎資料를 分析하는데 有用하게 사용될 수 있으리라 기대된다.

〈附 録〉

綜合發電單價 (Levelized Busbar Cost)

N時間帶까지 均等化(Levelized)된 綜合發電單價를 가정하여 LBC라 하면 식(A.1)과 같은 등식이 성립한다.

$$\sum_{k=1}^{N}(\overline{\Psi}_F^{k}+\overline{\Psi}_v^{k})=\sum_{k=1}^{N}\frac{LBC\cdot KwH_k\cdot w_k}{(1+r)^{(k-1+\triangle T)}}\text{[원]} \qquad (A.1)$$

단, KwHk : K年度의 負荷電力量[Kwh]

$$\left(=\sum_{m=1}^{12}\sum_{n\in S}W^{k,m,n}\sum_{t=1}^{T}P_n^{k,m,n,t}\triangle D^t\right)$$

$w_k$ : Weighting Factor $\begin{cases}\triangle T & k=2,3\cdots N-1 \text{ 경우}\\ \frac{\triangle T}{2} & k=1,N \text{ 경우}\end{cases}$

그러므로 LBC는 식(A.2)처럼 유도되어 간단히 이 값을 구할 수 있다.

$$LBC=\frac{\sum_{k=1}^{N}(\overline{\Psi}_F^{k}+\overline{\Psi}_V^{k})}{\sum_{k=1}^{N}\frac{KwH_k\cdot\omega_k}{(1+r)^{(k-1+\triangle T)}}}\text{[원/kwH]} \qquad (A.2)$$

## 참 고 문 헌

1) 韓國電力公社 研究報告書 ; '電力系統의 長期展望과 運用戰略에 관한 研究' KRC-85S 1986年11月

2) 宋吉永著 ; '電力系統工學' 東明社 1977年 p. 260-352

3) 齊勝雄志 外 ; 電力需給動向と 電力構成' 日本電力經濟研究誌 1985年 No.10

4) 磯田八郎 外 ; '原子力發電の 增大に伴なう 各種電源設備利用率の 變化' 日本電力中央研究所技術報告, No. 183017, 1983年

5) 大庭靖男 外 ; 電力構成における 電力貯藏設備・の役割の評價'
日本電氣學會論文誌, 60-B49, 1985 年, pp427~434

6) R.E. Larson ; 'A survey of dynamic programming computational procedure'IEEE Trans on AC, 1967. pp767-774

7) A.B. Borison, P.A. Morris ; 'An efficient approach to the optimal static generation mix problem'
IEEE PAS-103, 1984, 3, pp576-580

8) N.Levin, J. Zahavi ; 'Optimal mix algorithms with limited-energy plants' IEEE PAS-104 1985,5, pp1131-1139

9) N.M. Stoughton, R.C. Chen, S.T. Lee ; 'Direct construction of optimal generation mix. 'IEEE PAS-99 1980,2, pp753-759

10) R.T. Jenkins, D.S. Joy ; 'Wien Automatic System Planning Package (WASP)-An Electric Utility Optimal Generation Expansion Planning Computer Code' Oak Ridge National laboratory Oak Ridge, Tennessee, ORNL, July, 1974

11) EPRI Report ; 'Technical Assessment Guide' PS-1201-SR 1979 p. 2-1~3-31

12) EPRI Spcial Rport ; 'Technical Assessment Guide' P-2410-SR 1982 p. 1-1~1-11

13) J.Vardi, B.Avi-Itzhak ; 'Electric Energy Generation Economics, Reliability and Rates' MIT Press, 1981

14) G.L. Nemhauser ; 'Introduction to dynamic Prgramming' John Wiley and Sons, Inc 1966

15) 宋吉永 外 ; 効率的인 發電費用計算을 위한 앨고리즘 開發에관한 研究' 大韓電氣學會 하계학술대회발표논문 86-6-4 pp261~265