最適制御模型(MNI)에 의한 電源開發計劃

盧　富　鎬

▷目　次◁

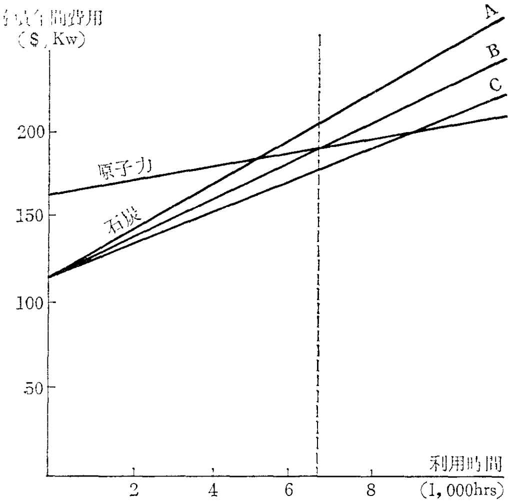
Ⅰ. 序　論

우리나라 總에너지中 電力部門의 構成比는 약 25%로서 電力은 國家産業의 動脈이 되고 있을 뿐만 아니라 第4次5個年計劃期間 동안에 電力投資는 우리나라 總投資의 13%나 차지하고 있어 電力事業이 國民經濟에 차지하는 比重은 높다. 電力事業의 이러한 重要性에 비추어 그 經營合理化가 절실히 요구됨에 따라 韓國開發研究院에서는 韓國電力(株)의 요청에 따라 프랑스電力公社(Electricité de France)와 共同으로 電源開發計劃, 負荷研究 및 料率分析을 網羅하는 綜合模型開發을 完遂하였는데 本稿는 그 뼈대를 이루고 있는 電源開發計劃模型의 理論的 배경을 說明함과 동시에 그 構造的・概念的 특징을 기술하고 開發된 模型이 長期的으로 어떻게 活用될 수 있는가를 보여주고자 한다.

本稿에서 記述하고 있는 電源開發模型은 電力事業綜合模型의 中心模型으로서 投資選擇模型이라 하겠다. 投資選擇이라고 했을 때 우리가 보통 생각하는 것은 個別「프로젝트」(project)의 內部收益率(internal rate of return)이나 現價(present value)를 구하여 그 代案과 비교함으로써 收益性이 더 좋은「프로젝트」를 선택한다든지 豫算의 範圍內에서 收益性이 좋은 것부터 차례로 선택하는 것이다. 이와 같은 傳統的인 投資審査方法은「프로젝트」사이에 存在하는 相互關聯性(interdependence), 相互補完性(complementarities) 및 여러 個의「프로젝트」들을 長期에 걸쳐서 어떤 時間的 間隔으로 조화있게 配置하느냐 하는 問題를 考慮할 수 없어 未備點이 많다. 內部收益率이나 現

筆者: 中央大學校 經營大學 副敎授 겸 韓國開發研究院 招請研究員

〔圖 1〕 「프로젝트」單位의 費用比較



價를 통한 「프로젝트」收益性의 比較方法이 여태껏 投資審査에 자주 사용되고 있는 이유는 長期에 걸친 많은 「프로젝트」들의 相互關聯性 등을 考慮하는 데 요구되는 計算量이 막대하기 때문이었는데 이제 컴퓨터의 一般化로 計算의 불편을 덜어주고 있기 때문에 系統全般에 대한 模型을 定立하여 體系分析的으로 相互關聯된 「프로젝트」들의 長期에 걸친 動的(dynamic) 比較硏究를 可能하게 하고 있어 投資審査의 次元이 달라지고 있다.

電力事業의 投資分析은 전통적으로 〔圖 1〕과 같은 형태를 취해 왔다. 즉, 投資費, 固定費, 燃料費 등의 諸費用을 等價年間費用(equivalent annual flows)으로 바꾸어서 「프로젝트」를 評價하는 것이다. 〔圖 1〕은 原子力發電所의 燃料費는 한가지 경우만 考慮하고 石炭發電所는 세가지 경우, 즉, A,B,C의 燃料費에 대해서 考慮하여 負荷率에 따른 費用의 변화가 相互 어떻게 비교되는가를 槪念的으로 간략하게 보여주며 燃料費와 發電所의 利用時間에 따라 等價年間費用이 달라짐을 알 수 있다. 이와 같이 發電所의 經濟性을 決定짓는 중요한 變數는 燃料費 및 利用時間인데 특히 發電所 利用時間은 電力系統의 相互關聯下에서 결정되는 것이므로 以上과 같은 個別「프로젝트」別로 收益性을 비교하는 방법은 誤謬을 범하기 쉽다. 長期電源開發計劃에 模型를 適用하는 體系的인 投資審査는 Massé와 Gibrat(1951)의 開拓的인 硏究以來로 그 實用性이 立證되고 있는데 線型計劃法과 같은 運用分析(Operations Research)技法을 應用한 模型에 의한 投資審査는 電力系統에서 水力, 火力, 原子力, 揚水의 相互補完關係 등을 體系的으로 考慮하여 系統全體의 觀點에서 投資選擇을 可能하게 한다.

Ⅱ. 理論的 背景

1. 模型의 定立

電源開發模型의 目的은 電力需要를 最小費用으로 만족시킬 수 있도록 長期電源開發計劃을 樹立하는 데 있는데 다음과 같이 數學的으로 表示될 수 있다.

$$\mathrm{MIN}\sum_{t=0}^{T}\left[\sum_{i=1}^{n} I_i^t\ U_i^t + G^t(X^t, U^t) + D^t(X^t, U^t)\right] \cdots\cdots (1)$$

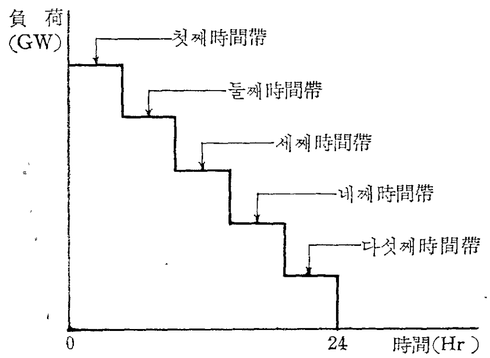
$$s.t.\ \ X_i^{t+1} = X_i^t + U_i^t,\quad U_i^t \geq 0 \qquad \left|\ \begin{array}{l} t=0 \text{ to } T-1 \\ i=1 \text{ to } n \end{array}\right.$$

X_i^t : t年度初에 存在하는 i群 發電所의 施設容量

U_i^t : t年度初의 i群 發電所의 投資容量

I_i^t : 固定費를 포함한 i群 發電所 單位投資費의 現價

〔圖 2〕 日負荷持續曲線



G^t : t年度의 燃料費의 現價
D^t : t年度의 供給支障費의 現價

위의 模型에서 보는 바와 같이 目的函數는 投資費, 燃料費, 供給支障費의 現價(present value)를 極小化하는 것으로 한다. 制約條件에서 X_i^t는 施設容量을 나타내는 狀態變數(state variable)이고 U_i^t는 投資容量을 나타내는 制御變數(control variable)로서 위에서 주어진 模型은 最適制御計劃(optimal control program)의 不連續인 경우이며 本模型을 最適制御模型[1] (以下 MNI라 稱함)이라고 부르고 있다.

MNI는 現在 韓國電力(株)에서 長期電源開發計劃을 樹立할 때 사용하는 WASP와 다른 세가지 構造的 特性을 가지고 있다. 그 內容을 간단히 記述하면,

① 發電所를 個別的으로 다루지 않고 그 經濟的 特性(投資費와 燃料費)과 技術的 特性(稼動率과 補修條件)에 따라서 몇개의 發電所群으로 나누어 취급하고 있고

② 負荷持續曲線이 〔圖 2〕에서 보여주는 바와 같이 몇개의 時間帶로 나누어져 階段式으로 表現되며

③ 目的函數에 投資費와 燃料費 以外에 供給支障費를 추가로 考慮하고 있다.

2. 最適條件

위 最適制御計劃(optimal control program) 問題(1)의 最適條件은 Kuhn-Tucker 必要條件에 의하여 주어진다. Φ^{t+1}을 進化式(evolution equation) $X^{t+1}-X^t-U^t=0$과 關聯된 「라그란지」乘數(Lagrange multiplier)로 하고 λ^t를 $U^t\geq 0$ 즉, $U^t-S^2=0$과 關聯된 「라그란지」승수로 하면 다음과 같은 「라그란지」방정식(Lagrangean equation)이 주어진다.

$$L=\sum_{t=0}^{T}\Big[\sum_{i=1}^{n} I_i^t\ U_i^t+G^t(X^t, U^t)+D^t(X^t, U^t)+\sum_{\alpha=1}^{n}\Phi_\alpha^{t+1}(X_\alpha^{t+1}-X_\alpha^t-U_\alpha^t)+\sum_{\alpha=1}^{n}\lambda_\alpha^t(U_\alpha^t-S^2)\Big] \cdots\cdots(2)$$

Kuhn-Tucker 必要條件은 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial X_i^t}=\frac{\partial G^t}{\partial X_i^t}+\frac{\partial D^t}{\partial X_i^t}+\Phi_i^t-\Phi_i^{t+1}=0\cdots(3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial U_i^t}=I_i^t+\frac{\partial G^t}{\partial U_i^t}+\frac{\partial D^t}{\partial U_i^t}-\Phi_i^{t+1}+\lambda_i^t=0 \cdots\cdots(4)$$

$$\lambda_i^t\cdot U_i^t=0 \cdots\cdots(5)$$

$$\lambda_i^t\leq 0 \cdots\cdots(6)$$

(3)으로부터

$$\Phi_i^{t+1}=\Phi_i^t+\frac{\partial G^t}{\partial X_i^t}+\frac{\partial D^t}{\partial X_i^t} \cdots\cdots(7)$$

이 條件은 「어조인트 시스템」(adjoint system)이라고 불리어진다.

(4), (5), (6)으로부터

$$I_i^t+\frac{\partial G^t}{\partial U_i^t}+\frac{\partial D^t}{\partial U_i^t}-\Phi_i^{t+1}=0 \text{ if } U_i^t>0\cdots(8)$$

1) 本模型은 프랑스電力公社의 電源開發模型인 MNI (Modele Nationale d'Investissements)에 기초를 두고 있다.

$$I_i^t+\frac{\partial G^t}{\partial U_i^t}+\frac{\partial D^t}{\partial U_i^t}-\Phi_i^{t+1}>0 \text{ if } U_i^t=0\cdots(9)$$

(8), (9)式은 다음과 같은 數理計劃(mathematical programining) 問題의 U_i^t에 관한 最適條件임을 알 수 있다. 즉,

$$\text{MIN}\sum_{i=1}^{n}I_i^tU_i^t+G^t(X^t, U^t)+D^t(X^t, U^t)-\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{t+1}U_i^t\cdots\cdots(10)$$

$$U_i^t\geq 0$$

여기서 「해밀토니안」(Hamiltonian) $H^t(X^t, U^t, \Phi^{t+1})=\sum_{i=1}^{n}I_i^tU_i^t+G^t(X^t, U^t)+D^t(X^t, U^t)-\sum_{i=1}^{n}\Phi_i^{t+1}U_i^t$로 定義하면 다음과 같은 Pontryagin(1962)의 極小化 原則을 記述할 수 있다.

즉, U^t($t=0$에서 $T-1$까지)가 最適制御가 되기 위해서는 「어조인트 시스템」(adjoint system)이라고 불리는 다음 式

$$\Phi_i^{t+1}=\Phi_i^t+\frac{\partial H^t}{\partial X_i^t}\qquad (i=1\text{에서 } n\text{까지})$$

에 의해서 定義되는 「어조인트」변수(adjoint variable) Φ^t가 存在하고 每t期에서 「해밀토니안」(Hamiltonian) H^t가 $U^t\geq 0$인 制約條件下에서 U^t에 대해서 極小가 되어야 한다. 즉, 每t期의 最適制御變數 U^t는 다음과 같은 數理計劃問題의 해답으로서 구해지는 것이다.

$$\text{MIN}H^t(X^t, U^t, \Phi^{t+1})\ \cdots\cdots(11)$$

$$U^t\geq 0$$

여기서 주목할 필요가 있는 것은 動的最適化의 問題로 나타나는 投資計劃의 問題 (1)이 「어조인트」변수 Φ^t에 의한 「해밀토니안」(Hamiltonian) H^t의 導入으로 時間的으로 分化되어 靜的最適化 問題(11)로 變形됐다는 것이다. 「어조인트」변수 Φ^t는 따라서 時間的 分化에 대한 指標(indicator)라고 할 수 있으며 「해밀토니안」(Hamiltonian) H^t는 nT次元의 問題인 (1)을 T개의 n次元의 問題인 (11)로 分化시켜주는 역할을 하고 있다.

一般的으로 最適制御計劃의 問題를 해결하는 방법으로는 Bellman(1962)의 最適原理(principle of optimality)에 基礎를 둔 動的計劃法과 Pontryagin의 極小化原則(minimum principle)에 의한 最適制御計劃法이 있는데 Pontryagin의 極小化 原則은 nT 次元의 動的最適化 問題를 「어조인트」변수 Φ^t의 도움으로 T개의 n次元의 靜的最適化 問題로 分化시켜 줌으로써 問題解決을 단순하게 하고 있다.

3. 發電所 使用價值

Kuhn-Tucker 必要條件의 「라그란지」乘數(Lagrange multiplier)의 一般的인 經濟的 分析으로부터 「어조인트」변수(adjoint variable) Φ_i^{t+1}의 經濟的 意味를 고찰하여 보자. 「라그란지」승수의 一般的인 定義로부터 Φ_i^{t+1}은 다음과 같이 表現된다.

$$\Phi_i^{t+1}=\frac{\partial\{\sum_{t=0}^{T}[\sum_{i=1}^{n}I_i^tU_i^t+G^t(X^t, U^t)+D^t(X^t, U^t)]\}}{\partial X_i^{t+1}}$$

X_i^{t+1}와 獨立的인 項을 除去하여

$$\Phi_i^{t+1}=-\frac{\partial[\sum_{t=t+1}^{T}G^t(X^t, U^t)+D^t(X^t, U^t)]}{\partial X_i^{t+1}}$$

$$\text{즉, }\Phi_i^t=-\frac{\partial[\sum_{t=t}^{T}G^t(X^t, U^t)+D^t(X^t, U^t)]}{\partial X_i^t}$$

따라서 Φ_i^t는 時間 t에서 X_i^t의 한 單位 增加에 대한 未來費用의 減少를 나타낸다. 總未來費用의 減少는 生產財(production equipment)의 潛在價格(shadow price)을 나타내는 것으

로 Φ_i^t는 時間 t에서 i發電所의 使用價値(use value)로 定義한다.

4. 最適條件의 經濟的 意味

「해밀토니안」(Hamiltonian) H^t가 U^t에 관해서 最小가 되는 條件은

$$I_i^t + \frac{\partial G^t}{\partial U_i^t} + \frac{\partial D^t}{\partial U_i^t} - \Phi_i^{t+1} = 0 \text{ if } U_i^t > 0 \quad (12)$$

$$I_i^t + \frac{\partial G^t}{\partial U_i^t} + \frac{\partial D^t}{\partial U_i^t} - \Phi_i^{t+1} > 0 \text{ if } U_i^t = 0 \quad (13)$$

이다. 그런데,

$$\frac{\partial G^t}{\partial U_i^t} = \frac{\partial G^t}{\partial X_i^t} \quad \cdots\cdots (14)$$

$$\frac{\partial D^t}{\partial U_i^t} = \frac{\partial D^t}{\partial X_i^t} \quad \cdots\cdots (15)$$

이므로 式 (14), (15)를 式 (12), (13)에 代入하면

$$I_i^t + \frac{\partial G^t}{\partial X_i^t} + \frac{\partial D^t}{\partial X_i^t} - \Phi_i^{t+1} = 0 \text{ if } U_i^t > 0 \quad (16)$$

$$I_i^t + \frac{\partial G^t}{\partial X_i^t} + \frac{\partial D^t}{\partial X_i^t} - \Phi_i^{t+1} > 0 \text{ if } U_i^t = 0 \quad (17)$$

여기에서 「어조인트 시스템」(adjoint system)

$$\Phi_i^{t+1} = \Phi_i^t + \frac{\partial G^t}{\partial X_i^t} + \frac{\partial D^t}{\partial X_i^t} \cdots\cdots (18)$$

을 式 (16), (17)에 代入하면

$$I_i^t - \Phi_i^t = 0 \quad \text{if } U_i^t > 0 \cdots\cdots (19)$$

$$I_i^t - \Phi_i^t > 0 \quad \text{if } U_i^t = 0 \cdots\cdots (20)$$

여기에서 $I_i^t - \Phi_i^t$는 單位 投資費와 使用價値의 차이로서 t年度에 i群發電所에 投資했을 때 나타나는 利潤(positive income) ($\Phi_i^t > I_i^t$) 및 損失(negative income) ($\Phi_i^t < I_i^t$)을 나타낸다. 따라서 위에서 주어진 바와 같이 最適條件에서는 制御變數(control variable)의 非陰이라는 條件 때문에 損失을 甘受해야 할 때가 있지만 그 외에는 $\Phi_i^t = I_i^t$이다. $\Phi_i^t - I_i^t$는 i發電所群의 價位投資로부터 發生하는 純利益을 나타내고 限界投資收益이라고 불려지며 最適解를 구하는 基準이 된다.

5. 解　　法

基礎解(initial solution)로 任意의 制御變數 $U^t(t=0 \text{ to } T)$가 주어졌다고 하면 U^t와 關聯하여 X^t의 軌跡이 $t=0$에서 T까지 주어지는데 可能한 대로 빨리 目的函數를 減少시키는 傾斜方向(direction of descent)을 찾는 것이 問題解決의 核心이고 이렇게 하여 問題를 해결하는 것을 急傾斜法(steepest descent method)이라고 한다.

投資問題에서 傾斜方向은 限界投資收益 R_i^t $(=\Phi_i^t - I_i^t)$로서 주어지고 얼마만큼의 크기로 移動할 것인가 하는 것은 陽의 常數로 주어지는 $\theta \cdot K_i^t$에 의해 결정된다. 여기서 K_i^t는 미리 정해진 常數이고 θ는 충분히 작은(sufficiently small) 常數로서 計算過程(algorithm)內에서 그 크기를 바꾼다. 즉,

$$U_i^t(\theta) = 0 \text{ if } \tilde{U}_i^t = 0 \text{ and } \Phi_i^t - I_i^t < 0$$

$$U_i^t(\theta) = \tilde{U}_i^t + \theta \cdot K_i^t(\Phi_i^t - I_i^t) \text{ otherwise}$$

$$(i=1 \text{ to } n)$$

따라서 制御變數의 移動은 $\Phi_i^t - I_i^t$의 陰陽에 따라서 그 方向이 결정되고 그 크기는 $\theta \cdot K_i^t$에 의해서 결정된다. 解法의 過程은 다음과 같이 주어진다.

第1段階 : 前過程에서 주어진 $\tilde{U}^t$를 가지고 $\tilde{X}^t$의 軌跡을 다음과 같은 進化式(evolution equation)을 이용하여 구한다.

$X_i^{t+1} = X_i^t + U_i^t$ ($i=1$에서 n)

第2段階 : 制御變數 $\tilde{U}^t$와 狀態變數 $\tilde{X}^t$가 주어지면 다음과 같은 「어조인트 시스템」(adjoint system)에 의해서「어조인트」變數(adjoint variable) Φ^t를 구한다.

$$\Phi_i^{t+1} = \Phi_i^t + \frac{\partial G^t}{\partial X_i^t} + \frac{\partial D^t}{\partial X_i^t} \quad (i=1 \text{ 에서 } n)$$

第3段階 : 모든 i와 t에 대해서 相對限界投資收益, R_i^t/I_i^t를 구하여 만일

i) $\left|\frac{R_i^t}{I_i^t}\right| < \varepsilon$이면 最適解의 合理的인 近似解가 구해졌으므로 計算過程을 멈춘다.

ii) $\left|\frac{R_i^t}{I_i^t}\right| \geq \varepsilon$이면 다음 第4段階로 간다.

단, ε은 미리 정해진 常數

第4段階 : 制御變數의 移動을 다음과 같이 결정한다.

$U_i^t(\theta) = \tilde{U}_i^t + \theta \cdot K_i^t(\Phi_i^t - I_i^t)$ ($i=1$에서 n)

여기에서 制御變數의 移動은 θ의 函數로 나타나 있고 制御變數 $U^t(\theta)$가 주어지면 $X^t(\theta)$의 軌跡도 주어진다.

第5段階 : θ의 函數로 $U^t(\theta)$, $X^t(\theta)$가 주어지면 目的函數는 다음과 같이 나타난다.

$$J(\theta) = \sum_{t=0}^{T}\left[\sum_{i=1}^{n} I_i^t U_i^t(\theta) + G^t(X^t(\theta),\ U^t(\theta)) + D^t(X^t(\theta),\ U^t(\theta))\right]$$

여기에서 $J(\theta)$를 最小로 하는 θ^*를 구하여 이 過程(iteration)에서의 最適制御變數 $U^t(\theta^*)$를 구한다. 즉, 最適制御變數 $U^t(\theta^*)$는 $J(\theta^*) < J(\theta)$를 만족한다. 여기에서 다시 第1段階로 돌아가서 過程을 反復한다.

以上에서 설명한 바와 같이 急傾斜法에 의한 問題解決은 試行錯誤方法으로 最適解를 구하므로 정확한 最適解를 구할 수 없고 단지 그 合理的인 近似解를 구할 수 있을 뿐이다. 合理的인 近似解는 相對限界投資收益의 絶對値가 어떤 基準値보다 작을 때 구해지는 것이다.

그럼 여기에서 投資容量增減의 크기를 결정하는 常數 K_i^t를 어떻게 결정할 것인가를 알아보자. 이미 言及하였듯이 投資容量增減의 傾斜方向을 결정하는 限界投資收益 (R_i^t)은 制御變數인 t期의 投資容量 $\tilde{U}_i^t$의 $t=0$에서 T동안에 發生하는 收益과 關聯되어 있다. 즉, 投資容量의 增減은 發生하는 收益을 制約條件內에서 可能한 限 最大로 獲得하는 데 있으므로 增減의 크기는 相對限界投資收益(R_i^t/I_i^t)에 비례하고 또한 每年 增加하는 需要를 만족시키기 위해서 建設해야만 하는 追加發電容量 P^t에 比例해야만 할 것이다. 따라서 다음과 같이 K_i^t는 결정된다.

$$K_i^t = \frac{P^t}{I_i^t}$$

또한 投資容量의 增減은 다음과 같이 될 것이다.

$$U_i^t(\theta) = 0 \text{ if } \tilde{U}_i^t = 0 \text{ and } \Phi_i^t - I_i^t < 0$$

$$U_i^t(\theta) = \tilde{U}_i^t + \theta \cdot P^t \cdot \frac{\Phi_i^t - I_i^t}{I_i^t} \quad \text{otherwise}$$

Ⅲ. 限界費用

以上에서 記述한 計算過程을 간단히 고찰하면 먼저 投資容量 U^t 및 施設容量 X^t를 결정하고 第2段階에서 보여준 대로 「어조인트 시스템」에 의해서「어조인트」變數 Φ^t를 구해야 한다. 그런데 Φ^t를 구하기 위해서는 $\left(\frac{\partial G^t}{\partial X_i^t} + \frac{\partial D^t}{\partial X_i^t}\right)$, 즉, 施設容量이 한 單位 增加할 때 減少하는 燃料費와 供給支障費의 合으로 定義되는 設備限界費用을 구해야 하며 또한 設備限

界費用을 구하기 위해서는 電力需要가 한 單位 增加할 때 追加로 所要되는 燃料費 또는 그 때 發生하는 社會的 費用으로 定義되는 發電限界費用을 구해야 하는데 發電限界費用 및 設備限界費用을 計算하는 절차는 다음과 같다. 즉, 주어진 負荷持續曲線에 水力發電電力을 差減하여 火力發電所에 의해서 채워져야 하는 需要, 즉, 火力需要(thermic demand)를 구하고 發電所群을 燃料費와 供給支障費의 合이 最小가 되면서 火力需要(thermic demand)를 充足시킬 수 있도록 燃料費가 增加하는 順序로 運營해 나가며 여기에 揚水發電을 考慮한 最適運轉의 결과로 限界費用을 구하는 것이다.

MNI는 限界費用을 구할 때 두가지 중요한 不確實性을 考慮하고 있는데, 하나는 需要에 관한 不確實性이고 다른 하나는 火力發電所의 稼動率에 관한 不確實性이다. 이 두가지 不確實性은 平均과 標準偏差 두개의 母數로 定義되는 正規分布로 되어 있다고 假定하고 있다. MNI는 이러한 不確實性을 模型化하는 데에 離散化(discretization)에 의한 模擬(simulation)의 방법을 취하고 있다. 離散化라 함은 正規分布를 몇개의 點으로 代表하는 것을 말하는데 그 한 例로서 12個의 離散點을 택할 때의 標準化變量 및 確率은 〈表 1〉과 같다. 以上과 같이 需要와 稼動率이 12個의 點으로 離散化되었다면 144(12×12)가지의 各 경우에 대해서 最適運轉에 의한 限界費用을 計算하여 各 경우의 確率을 곱하여 모든 경우에 대해서 合함으로써 限界費用의 數學的 期待值를 구하는 것이다.

1. 發電限界費用

發電限界費用은 어떤 時間 h에서 電力需要가 한 單位 增加했을 때 追加로 發生하는 費用을 말하는데 運轉狀態의 경우에는 限界發電所의 燃料費로 하며 供給支障의 경우에는 그 때 發生하는 社會的 費用으로 하는데 供給支障電力이 X일 때 追加로 發生하는 社會的 費用 $D(X)$는 다음과 같이 表現될 수 있다.

$$D(X)=aX^2+bX+c$$

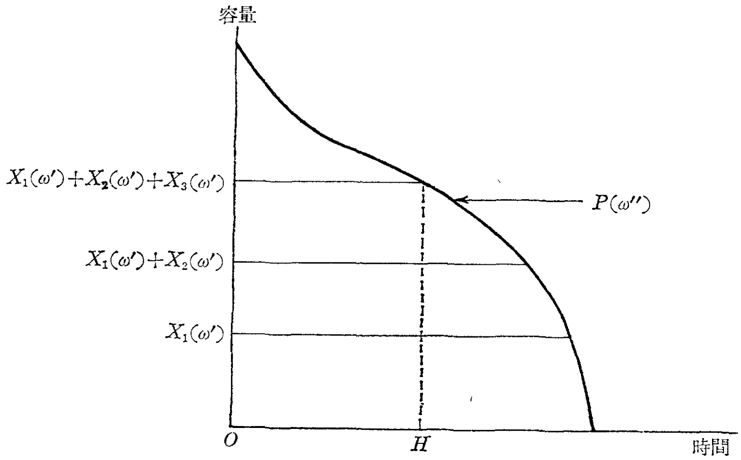
위의 式은 두가지 解析的 意味를 지니고 있는데 첫째, 供給支障의 發電限界費用은 供給支障電力 X가 클수록 커지며, 둘째, 供給支障의 發電限界費用은 燃料費가 비싼 火力發電所의 연장으로 볼 수 있어 係數 C는 最上段에 위치한 火力發電所群의 燃料費와 같든지 크든지 할 것이다.

發電限界費用은 發電所群別 可能出力(available capacity)과 電力需要의 관계로부터 결정된다. 可能出力을 결정하기 위하여 燃料費가 $C_i(C_1<C_2<\cdots<C_n)$인 n個의 發電所群을 생각하고 각 發電所群에 대해서 事故率의 不確實性에 따라서 $|\Omega'|$의 數만큼 離散化된 可能出力의 경우가 있다고 假定하면 $\pi'(\omega')$의 確率로 일어나는 어떤 경우 $\omega'(\omega'=1,2,\cdots|\Omega'|)$에 있어서 i發電所群의 時間 h에서의 可能出力 $X_{ih}(\omega')$은 다음과 같이 表示될 수 있다.

〈表 1〉 離散化 確率

離散標準化變量	±0.3	±0.9	±1.5	±2.1	±2.7	±3.4
確　　率	0.2257	0.1592	0.0792	0.0277	0.00685	0.00135

〔圖 3〕 可能出力과 電力需要와의 關係



$$X_{ih}(\omega')=X_i(1-\tau_{ih})\xi_i(\omega')$$

단, X_i : i發電所群의 施設容量

τ_{ih} : 어떤 時間 h에서의 i發電所群의 補修率

$\xi_i(\omega')$: 어떤 경우 ω'에 있어 i發電所群의 利用可能率

한편 어떤 時間 h에서의 電力需要를 결정하기 위하여 水力發電量이 水力發電所의 年間最適運營計劃에 의해서 미리 결정된다고 假定하고 總電力需要에서 水力發電量을 減하면 火力이 擔當할 火力需要가 나온다. 이 火力需要도 需要의 不確實性에 따라서 $|\Omega''|$의 數만큼 離散化되어 있다고 假定하면 어떤 時間 h에서 $\pi''(\omega'')$의 確率로 일어나는 어떤 경우 $\omega''(\omega''=1, 2, \cdots\cdots, |\Omega''|)$에 있어서의 需要를 $P_h(\omega'')$로 表示할 수 있다. 따라서 利用可能設備容量과 火力需要에 대해서 $|\Omega|=|\Omega'|\times|\Omega''|$ 數만큼의 경우를 생각할 수 있으며 어떤 경우 $\omega=(\omega';\omega'')$가 發生할 確率 $\pi(\omega)$는 $\pi(\omega)=\pi'(\omega')\times\pi''(\omega'')$로 表示된다.

限界費用을 계산하기 위하여 어떤 경우 $\omega=(\omega', \omega'')$에 있어 電力需要 $P(\omega'')$와 發電所群別 可能出力 $X_i(\omega')$ $(i=1, 2, 3)$이 〔圖 3〕과 같이 주어졌다고 假定하자. 어떤 時間 h에서 電力需要 $P_h(\omega'')$와 發電所群別 可能出力 $X_{ih}(\omega')$ 사이에 다음과 같은 두가지 경우를 考慮할 수 있다.

1) 運轉狀態

$$\sum_{i=1}^{l}X_{ih}(\omega')\leq P_h(\omega'')<\sum_{i=1}^{l+1}X_{ih}(\omega') \quad l=1, 2, \cdots\cdots, n-1$$

위와 같은 關係가 成立하면 運轉狀態에 있고 이때의 限界費用은 限界發電所의 燃料費가 된다. 즉, $\mu_h(\omega)=C_{l+1}$. 〔圖 3〕에서 H의 오른쪽은 運轉狀態에 있다.

2) 供給支障狀態

$$P_h(\omega'')\geq\sum_{i=1}^{n}X_{ih}(\omega')$$

위와 같은 關係가 成立하면 供給支障狀態에 있고 이때의 限界費用은 다음과 같다.

$$\mu_h(\omega)=D(P_h(\omega'')-\sum_{i=1}^{n}X_{ih}(\omega'))$$

〔圖 3〕에서 H의 왼쪽은 供給支障狀態에 있다. 따라서 어떤 時間 h에서 限界費用의 數學

的 期待値를 $\bar{\mu}_h$라고 하면 $\bar{\mu}_h$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\mu}_h=\sum_{\omega\in\Omega}\pi(\omega)\cdot\mu_h(\omega)$$

단, $\Omega=\{\omega=(\omega',\omega'')\ ;\ \omega'=1,2,\cdots\cdots,|\Omega'|\ ;$

$\omega''=1,2,\cdots\cdots,|\Omega''|\}$

2. 設備限界費用

設備限界費用은 어떤 發電所群의 施設容量을 한 單位 增加했을 때 系統全體에 나타나는 燃料費와 供給支障費의 合인 總運轉費의 減少를 말한다. 어떤 發電所群의 設備容量이 한 單位 增加하면 限界發電所群의 한 單位 發電이 增加된 發電所群의 한 單位 發電으로 代替되는 결과를 가져오게 된다. 즉, 어떤 경우 $\omega=(\omega',\omega'')$에서 i發電所群의 設備限界費用은 어떤 時間 h에서의 發電限界費用 μ_h와 i發電所群의 燃料費 C_i의 差異를 1年에 걸쳐서 積分함으로써 구해진다. 즉, 어떤 경우 ω에서의 i發電所群의 設備限界費用 $S_i(\omega)$는 다음과 같이 表現될 수 있다.

$$S_i(\omega)=\int_0^{8760}(\mu_h-C_i)dh$$

또한 이렇게 나타나는 경우의 確率이 $\pi(\omega)$이므로 i發電所群의 設備限界費用의 數學的 期待値 $E_i(S)$는 다음과 같이 주어진다.

$$E_i(S)=\sum_{\omega\in\Omega}\pi(\omega)\cdot S_i(\omega)$$

Ⅳ. 模型의 特徵

本稿에서 記述한 MNI는 다른 電源開發模型에서 찾아 볼 수 없는 다음 몇가지 特徵을 가지고 있다. 그 特徵을 지금 韓國電力(株)에서 電源開發計劃을 樹立할 때 사용하는 WASP와 비교해 가면서 설명하고자 한다.

1. 模型의 種類

MNI는 最適制御計劃法(optimal control programming)에 基礎를 두고 Pontryagin의 極小化原則(minimum principle)에 의하여 問題를 해결하지만 WASP는 動的計劃法(dynamic programming)에 基礎를 두고 Bellman의 最適原理(principle of optimality)에 의해서 問題를 해결하고 있다.

動的計劃法에 의한 問題解決은 最終條件(final condition) 즉, 計劃期間 最終年度의 施設容量을 미리 결정해야 할 뿐만 아니라 年度別 投資容量의 여러가지 代案(configurations)을 미리 결정해야 하는 불편이 있으나 最適制御計劃法은 이러한 變數를 模型自體內에서 결정해주고 있어 長期計劃을 세우는 데 불편이나 任意性을 排除해 주고 있다. 投資容量의 代案을 미리 결정해 두어야 한다는 것은 모든 可能性을 다 考慮하지 않는 以上, 엄밀한 意味에서 最適解를 구할 수 없으므로 計劃樹立의 任意性을 排除할 수 없다.

2. 不確實性의 模型化

MNI는 需要, 事故率 및 水力發電電力의 不確實性을 취급하고 있는데 以上의 不確實性을 模型化함에 있어서 離散化(discretization)에 의한 模擬(simulation)를 하고 있다. WASP도 不確實性을 模型化하고 있으나 엄밀한 意味에

서 模擬라고 할 수는 없고 단지 確率的 計算에 의한 等價負荷持續曲線(equivalent load duration curve)을 구하는데 不過하다. WASP의 等價負荷持續曲線은 平均概念이므로 系統의 特性을 뚜렷히 反映하고 있다고 볼 수 없다.

3. 負荷持續曲線

MNI는 負荷持續曲線을 階段式으로 表現하고 있다. 階段式으로 表現한 負荷持續曲線은 模型의 計算過程을 상당히 단순하게 해 줄 뿐만 아니라 時間帶別 發電限界費用을 구하여 電氣料率을 策定하는 것을 편리하게 하여 주고 있다. WASP에서와 같이 多項式으로 負荷持續曲線을 表現하면 正確性을 기할 수 있는 반면 막대한 계산의 불편을 招來하고 있다.

4. 發電所組合

MNI는 火力發電所를 投資費, 燃料費와 같은 經濟的 特性 및 稼動率, 補修條件과 같은 技術的 特性에 따라 몇個의 發電所群으로 나누어서 취급하고 있다. WASP에서는 發電所를 個別的으로 다루고 있는데 이렇게 하면 보다 정확한 것이 되겠으나 계산의 불편을 排除할 수 없다. MNI에서 火力發電所를 몇個의 發電所群으로 나누는 것은 負荷持續曲線을 階段式으로 表現한 것과 같이 模型을 單純化하여 계산의 불편을 輕減하는 利點을 提供하고 있다.

5. 供給支障

MNI는 目的函數에 있어서 WASP에서 考慮하는 投資費와 運轉費 以外에 供給支障費를 追加로 考慮하고 있다. 供給支障費를 계산하는 데는 供給支障電力이 중요한 變數가 되는데 WASP에서는 供給支障費用은 계산하지 않고 供給支障確率을 하나의 制約條件으로 사용하고 있다. 供給支障費用을 계산하기 위해서는 單位供給支障電力의 費用을 算出해 내는 供給支障費用係數를 推定하는 것이 중요한 일이다. 本硏究에서는 系統全般에 관한 原則에 입각하여 供給支障費用의 係數를 결정하였다.

6. 計算所要時間

以上에서 言及한 대로 負荷持續曲線을 模型化하는 過程에서 WASP는 多項式으로 表現하지만 MNI는 階段式으로 表現하여 單純化하고 있으며 WASP는 發電所를 個別的으로 취급하고 있는 데 반하여 MNI는 發電所를 몇個의 組合으로 나누어서 취급하고 있다. 이와 같은 MNI의 單純化는 상당한 계산의 利點을 提供하여 1時間 정도의 計算時間이 所要되고 있다. 1時間의 計算時間이라면 그렇게 적은 時間도 아니지만 WASP에서 所要되는 20時間 以上의 計算時間에 비하면 엄청난 차이로서 實際應用하는데 決定的인 利點이 된다.

WASP는 6個의 Module, 즉, FIXSYS, VARSYS, LOADSY, CONGEN, MERSIM, DYNPRO로 構成되어 있다. 이 가운데서 CONGEN, MERSIM, DYNPRO의 세가지 Module을 遂行하는데 1回에 3時間 내지 4時

間의 計算時間이 所要되는데 計劃을 樹立하는 作業을 完了하기 위해서는 보통 7回의 反復作業을 要하므로 全作業을 遂行하기 위해서 所要되는 時間은 3日 내지 10日이 걸린다.

7. 經營情報

以上에서 言及한 대로 MNI가 WASP보다 좀더 앞선(sophisticated) 理論에 根據를 두고 있고 計算所要時間이 훨씬 적다는 以外에 MNI는 系統運轉狀態에 대한 情報를 提供하고 있어 電力事業의 經營에 効率的으로 適用될 수 있다. 특히 MNI가 提供하는 情報중에서 發電限界費用은 料率을 策定하는 데 基本이 되는 것으로 MNI가 WASP보다 더 綜合的인 模型임을 알 수 있다. MNI의 이러한 理論的이고 綜合的인 側面은 電力系統의 特性 및 原理를 理解하는 데 좋다.

8. 相互補完關係

MNI의 概念的 優位性이 實際的 優位性을 갖고 있느냐 하는 것은 別個의 問題이다. MNI가 좀더 앞선 理論에 根據를 두고 있는 綜合的인 模型이며 模型의 單純化로 計算上의 利點을 提供하고 있는 반면 單純化 때문에 模型의 現實性을 喪失할 憂慮가 있다. 또한 MNI는 整數計劃法(integer programming)에 基礎를 두고 있지 않기 때문에 投資容量이 連續的인 값(continuous value)으로 나타나므로 模型의 結果와 가장 가까운 發電所群別 基本容量單位로 計劃을 樹立해야 하는 弱點을 가지고 있다. WASP는 이와 반대로 發電所를 個別的으로 취급하고 多項式 負荷持續曲線을 사용하여 計算上의 불편을 甘受해야 하지만 보다 상세하게 現實을 묘사하는 長點을 가지고 있으며 미리 年度別 投資容量의 代案(configurations)을 提示하여 MNI에서와 같은 連續的인 값을 基本容量單位로 바꾸는 作業이 필요없다.

따라서 MNI가 WASP에 대해서 實際的 優位性을 갖추기 위해서는 負荷持續曲線과 發電所 組合의 單純化를 현명하게 취급하여 模型의 現實性을 喪失하지 않는 範圍內에서 計算의 불편을 더는 利點을 追求하고 模型의 單純化에 따른 特性에 맞는 入力資料를 준비하여 模型의 現實性을 向上시켜야 할 것이다.

MNI와 WASP중 어느 것이 더 나은가 하는 것은 各各에 대한 經驗을 좀더 쌓은 뒤에 말할 수 있는 것이며, 오히려 MNI와 WASP는 各各의 長短點을 조화있게 이용하여 相互補完的으로 活用할 수 있다. 예를 들어서 MNI는 그 결과에서 發電所別 使用價値를 提供해 주는데 이 使用價値는 發電所의 投資費와 직접 비교되어 投資費보다 크면 發電所 施設容量을 增加시켜야 하고 投資費보다 작으면 施設容量이 높게 策定되어 있음을 나타내 주는 基準이 되는 것으로 MNI가 提供하는 使用價値의 觀點에서 WASP의 결과에 대한 妥當性을 검토할 수 있으며 WASP는 또한 供給支障確率을 중요한 基準으로 삼고 있는데 MNI의 결과가 WASP의 供給支障確率에 대한 基準을 만족하고 있는가를 검토함으로써 그 妥當性을 검토할 수 있는 것이다.

V. 結　論

1. 模型의 檢證

模型은 實際問題를 잘 反映할 수 있는 現實性과 편리하게 活用할 수 있는 單純性을 內包하고 있어야 한다. 그러나 두가지를 동시에 最善으로 갖춘다는 것은 不可能한 일이다. 現實性을 너무 追求하는 나머지 模型이 너무 복잡하여 막대한 계산의 불편을 招來한다든지 資料의 作成 및 管理를 불편하게 해서는 안될 것이고 또한 反對로 模型의 單純化를 너무 追求하여 模型이 現實性을 喪失한 假想的 模型이 된다면 模型의 결과는 無意味하게 될 것이다. 그러므로 模型을 定立함에 있어 留意해야 할 것은 現實性과 單純性의 調和를 어떻게 維持할 것인가 하는 것이다. 이러한 現實性과 單純性 사이의 調和는 專門家의 오랜 경험을 통한 模型의 檢證을 통해서 可能하며 이러한 模型의 檢證은 長期的으로 不斷히 推進되어야 할 課題이다.

模型의 檢證은 몇가지 模型의 構造를 바꾸어 가면서 결과에 대한 反應을 分析하면서 模型을 보다 現實的으로 만드는 것이 目的인데 本 MNI의 檢證은 다음 몇가지 要素에 대해서 특히 留意할 필요가 있다.

가. 負荷持續曲線

階段式으로 表現된 負荷持續曲線의 時間帶를 몇個로 나눌 것인가, 또는 各時間帶의 持續時間은 몇時間으로 할 것인가를 여러가지 代案에 대해서 比較分析한다.

나. 發電所의 組合

MNI模型의 特徵은 火力發電所를 그 技術的 特性 및 經濟的 特性에 따라 몇가지 그룹으로 나누는데 여러가지 代案을 검토하여 發電所의 組合을 向上시킬 수 있다.

다. 供給支障費用

供給支障費用曲線의 係數를 결정함에 있어 그 數値를 바꾸어 가면서 係數의 數値가 바뀜에 따라서 供給支障確率이 어떻게 달라지는가를 검토하고 供給支障費用과 가스터빈의 早期擴張費用[2](anticipation cost)과 비교함으로써 좀더 나은 係數를 推定할 수 있다.

라. 模擬(simulation)

MNI는 不確實性을 模型化함에 있어 離散化에 의한 模擬(simulation)를 하고 있는데 不確實性을 模型化하는 다른 方法인 「몽테 칼로」模擬(Monte Carlo simulation)를 試圖하여 결과를 비교하여 볼 수 있겠다. 「몽테 칼로」模擬는 發電所를 個別的으로 취급하는 WASP에서는 막대한 計算量을 요구하므로 바람직하지 못한 것으로 되어 있으나 MNI는 發電所를 몇개의 組合으로 나누므로 그만큼 計算量이 減少되어 「몽테 칼로」模擬를 試圖하는데 無理가 없다 하겠다.

2. 模型의 活用

MNI의 目的은 電源開發計劃을 樹立하는 것

2) 早期擴張費用은 發電所를 1年 앞당겨 建設할 때 追加로 發生하는 費用으로 資本費用, 減價償却費, 固定費의 合으로 定義된다,

인데 電源開發計劃의 妥當性은 入力資料의 質에 따라서 결정된다. MNI의 入力資料中에서도 電源開發計劃을 세우는 데 가장 중요한 要素인 負荷水準, 燃料費, 建設費 및 이러한 諸費用의 價格上昇率(escalation rate)에 대해서는 몇가지 代案에 대한 결과를 比較分析하는 感應度分析을 통해서 合理的인 入力資料를 선택하고 보다 나은 電源開發計劃을 세울 수 있다. MNI는 入力資料의 量이 다른 模型에 비해서 小量이고 Computer Package의 부피도 작아 몇가지 入力資料를 바꾸어 결과를 分析하는 感應度分析을 容易하게 할 수 있는 利點이 있다. MNI의 入力資料中 長期間 統計資料를 蒐集해야 하는 補修率, 事故率, 需要와 事故率의 不確實性에 관한 資料의 分析과 그 質을 向上시키는 作業은 長期的인 觀點에서 나루어야 할 課題이다.

▷參 考 文 獻◁

Bellman, R. and S. Dreyfus, *Applied Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, N.J., 1962.

Bergougneux, J. et al., "Global Models for the Long Range Planning of Power Systems", P.S.C.C. Meeting, Cambridge, 1975.

Breton, A. and F. Falgarone, "Application de la Theorie de la Commande Optimale au Probleme du Choix des Investissements a Electricite de France", Electricite de France Working Paper M. 67, 1972.

Garlet, M., E. LHermitte, and D. Levy, "Methods and Models used by EDF in the Choice of its Investments for its Power Generation System", TIMS Conference, July 1977.

Garlet, M. and H. Persoz, "Production Transmission System Planning at the E.D.F.", Electricite de France Working Paper, 1978.

Masse, P. and R. Gibrat "Application of Linear Programming to Investments in the Electric Power Industry", *Management Science*, April 1951.

Parmantier, J. P. and F. Velten, "Optimal Power Investment and Nuclear Fuel Management", TIMS-ORSA Joint Meeting, May 1978.

Pontryagin, L.S., V.G. Boltyanskii, R.V. Gamkrelidze, and E.F. Mischenko, *The Mathematical Theory of Optimal Processes*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1962.

Electricite de France, "La Nouvelle Version du MNI", Working Paper M. 333, 1976.

Electricite de France, "Une Representation Simplifiee de la Gestion Annuelle de Moyens de Production", Etudes Economiques Generales Working Paper M. 334, 1976.

Electricite de France, "Lois de Disponibilite du Parc Thermique dans les Modeles de Gestion", Working Paper M. 458, 1977.

UNIPEDE, "Availability and Unavailibility Factors of Thermal Generating Plants", 1977.