

# 電力系統의 最適 發電機起動停止計劃 算法에 관한 研究

論 文

34~6~2

## A Study on the Optimal Unit Commitment Algorithm for Electric Power Systems

金 俊 鉉\* · 劉 仁 根\*\*  
(Joon-Hyun Kim · In-Keun Yu)

### Abstract

This paper proposes a new optimal unit commitment algorithm for the rational operation of electric power systems.

Especially, the algorithm is improved by considering transmission line capacity limits and load forecasting uncertainty with the consideration of the participation factors of each units, so that the method becomes more reliable and flexible one.

The transmission losses are considered by using updated penalty factors obtained from the constant matrixes of the fast decoupled load flow method, the system loads are distributed at each buses, and the several necessary operational constraints are also considered for the purpose of presenting a more practicable scheme.

Finally, the effectiveness of the proposed algorithm has been demonstrated by applying to the 23-bus model system.

### 1. 序 論

1920年代에 電力系統 經濟運用 方案의 一環으로 發電機의 經濟負荷配分을 위한 等増分燃料費法이 發表된 이래로 電力系統의 合理的, 經濟的 運用算法에 대한 研究가 꾸준히 進行되어 왔다.<sup>1)</sup>

그런데 이 때의 算法들은 주로 並列運轉할 發電機가 決定되어 있다는 前提下에 이루어진 것들이며, 1950年代 後半에 이르러 經濟運用 算法의 決定要因이라 할 수 있는 發電機起動停止 (Unit Commitment ; UC) 計劃 算法이 發表되면서<sup>2)</sup> 오늘날에 이르기 까지 이에 대한 많은 研究가 이루어 지고 있으나<sup>3)</sup> 아직도 大電力系統에 實用的이고 合理的으로 적용할 수 있는 最適算法에는 이르지 못하고 있는 실정이다.<sup>4)</sup> 이러한 UC 算法들은 주로 經驗의 내지는 發見的 技

法과,<sup>5),6)</sup> 여러가지 數理計劃法에 의한 것들인데<sup>7)~11)</sup>, UC 문제의 特性上 이들 중에서도 특히 動的計劃法 (Dynamic Programming ; DP)을 效果的으로 이용할 수 있음이 立證되었다.<sup>12),13)</sup>

筆者들은 이러한 점에 주목하여 순수한 DP의 결점을 補完한 Hybrid DP 理論에 의한 UC計劃 算法<sup>14)</sup>과, 近年 電力系統의 安全運用이 중요한 문제로 대두됨에 따라 發電系統의 信賴性을 고려할 수 있는 算法<sup>15)</sup>등을 이미 發表한 바있다.

그러나 上記한 종래의 算法들은 系統負荷를 일괄 처리하고, 送電線路의 容量限界를 고려하지 않아 實用時 線路의 過負荷를 초래할 수도 있는 문제점을 내포하고 있다. 물론 線路의 安全性을 고려할 수 있는 經濟給電 算法도<sup>16),17)</sup> 개발되고 있으나, 이것들은 어디까지나 UC計劃이 決定된 後의 解決法이기 때문에 線路 過負荷가 發生할 경우 過負荷 解消係數에 의존하는 經驗的인 試行錯誤에 의해 해결하든지<sup>18)</sup>, 부득이한 경우 UC計劃 자체를 變更해야 하는 불편

\*正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授  
\*\*正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程  
接受日字 : 1985年 3月 5日

성을 내포하고 있다.

본 논문에서는 負荷를 각 母線에 分布시키고, UC 計劃 算法 자체에서 線路의 容量限界를 고려함으로써 이러한 문제점을 해결하였으며, 水力系統은 實用的인 見地에서 使用水量制約을 만족하면서 火力系의 増分燃料費가 높은 尖頭負荷를 감당하도록 처리하였고, UC 對象 發電機의 banking 狀態<sup>9)</sup>까지를 고려하여 算法의 信賴性과 經濟性을 提高하도록 하였다.

또한, 豫測負荷의 微少한 不確實性은 發電機의 負荷感度係數 (participation factor)로 처리할 수 있도록 함으로써 算法의 柔軟性을 높였고, 線路의 容量限界 檢討用으로 사용되는 高速分割 潮流計算 過程에서 형성되는 不變行列<sup>20)</sup>을 이용하여 갱신된 penalty factor를 導出하여 사용함으로써 고정 penalty factor를 사용하는 종래의 算法들 보다 精度 높은 算法이 되게 하였으며, 事例研究를 통하여 提案한 算法의 効用性을 立證하였다.

## 2. 考慮事項

最適한 發電機 起動停止計劃을 세우기 위해서는 電力系統의 복잡, 다양한 運用狀態 및 制約條件을 實用的인 見地에서 충분히 考慮할 수 있는 算法이 되어야 할 것이다.

본 논문에서는 다음과 같은 事項을 만족시키면서 最經濟인 算法을 導出하는데 중점을 두었다.

### 1) 系統의 有効電力 需給條件

$$\sum_{i \in R} P_i^t + \sum_{j \in H} P_j^t - P_{TD}^t - P_L^t = 0 ; t \in T \quad (1)$$

$$\text{단, } P_{TD}^t = P_D^t + P_d^t$$

### 2) 發電機의 有効出力制約

$$P_i \leq P_i^t \leq \bar{P}_i, U_i^t = 1 ; i \in R \quad (2)$$

$$P_j \leq P_j^t \leq \bar{P}_j, U_j^t = 1 ; j \in H$$

### 3) 運轉豫備力制約

$$\sum_{i \in M} \bar{P}_i \cdot U_i^t - \max_{i \in M} (\bar{P}_i \cdot U_i^t) \geq P_{TD}^t ; t \in T \quad (3)$$

단,  $M = R + H$

### 4) 發電機의 最少運轉時間制約

$$(U_i^t - U_i^{t-1}) \left( \sum_{n=1}^{t-1} U_i^n - \tau h_i \right) \leq 0 ; i \in R, t \in T \quad (4)$$

### 5) 發電機의 最少停止時間制約

$$(U_i^t - U_i^{t-1}) (Z_i^{t-1} - \tau l_i) \geq 0 ; i \in R, t \in T \quad (5)$$

단,  $Z_i^t = (Z_i^{t-1} + 1)(1 - U_i^t)$

### 6) 發電機의 日間 起動可能回数制約

$$\sum_{t \in T} |U_i^t - U_i^{t-1}| \leq \eta_i ; i \in R \quad (6)$$

### 7) 同一母線에서 同時 起動可能한 發電機臺數制約

$$\sum_{i \in G_p} U_i^t (1 - U_i^{t-1}) \leq \pi_i ; i \in R, t \in T \quad (7)$$

### 8) 送電線路 容量限界

$$\underline{x}_f \leq x_f \leq \bar{x}_f ; f \in NL \quad (8)$$

### 9) 水力發電機의 使用可能 水量制約

$$q_j \leq q_j^t \leq \bar{q}_j, U_j^t = 1 ; j \in H \quad (9)$$

$$\text{단, } Q_j = \int_0^t q_j^t(t) dt \rightarrow \text{一定 ; } j \in H$$

## 3. 經濟負荷配分算法

UC 計劃에서 經濟給電算法은 각 組合別 發電機의 出力配分과 發電費用計算을 위한 서브프로그램으로 사용된다.

이를 위해 본 논문에서 導入한 經濟給電算法은 並列運轉 發電機 (火力機) 群을 1機로 等價化하여 하나의 piecewise 線型 増分燃料費曲線으로 표현한다. 다음 각 發電機의 運轉狀態를 고려하여 最適運轉點을 구하는 等價化 經濟給電算法<sup>21)</sup>인데, 여기에서 水力機는 使用水量制約을 만족시키면서 火力系의 増分燃料費가 높은 尖頭負荷 時間帶의 負荷 ( $P_d^t = P_{TD}^t - P_D^t$ )를 감당하도록 하고, 微少한 負荷의 不確實性 (豫測誤差)은 發電機의 負荷感度係數로 처리할 수 있도록 하였으며, 送電損失을 고려하기 위한 penalty factor의 算定도 (3.2)와 같이 개선함으로써 보다 實用的이고 精度 높은 算法이 되게 하였다.

### 3.1 發電機의 負荷感度係數 算定

일반적으로 UC 計劃은 系統負荷를 一定한 것으로 가정하고 수립하므로, 豫測誤차가 심할 경우 計劃 자체를 變更해야 한다. 그러나 最近 豫測誤차를 數% 이내로 줄일 수 있는 負荷豫測算法들이 實用段階에 있고, 본 논문에서는 前述한 바와 같이 다양한 運用制約을 고려하였으므로 微少한 負荷變動時에는 發電機의 負荷感度係數를 이용하여 容易하게 出力을 再配分할 수 있을 것으로 생각 된다.

그러나 負荷變動이 비교적 심한 週末이라든가 첫

제, 셋째 주일, 공휴일등은 그 負荷패턴에 따라 UC 計劃 자체를 修正하는 것이 바람직 할 것이다.

發電費用  $f_i$ 를 出力  $P_i$ 의 2次式으로 가정했으므로<sup>2)</sup> 出力에 대한 1階 및 2階 導函數가 존재하고, 負荷變動을 고려하지 않았을 경우의 각 發電機 出力을  $P_i^0 (i \in R)$ , 增分燃料費를  $\lambda^0$ 라 하면, 發電機 出力의 微少變化  $\Delta P_i$ 와 이에 따른 增分燃料費  $\Delta \lambda$ 는 근사적으로 다음 관계가 성립한다.

$$\Delta \lambda_i = \Delta \lambda \cong [d^2 f_i / dP_i^2] (\Delta P_i); \quad i \in R \quad (10)$$

식 (10)으로 부터

$$[\Delta P_i] = \frac{\Delta \lambda}{[d^2 f_i / dP_i^2]}; \quad i \in R \quad (11)$$

와 같이 되고, 系統負荷가  $\Delta P_D (= 豫測值 - 實際負荷)$  만큼 變化한다면

$$\Delta P_D = \Delta \lambda \sum_{i \in R} \frac{1}{[d^2 f_i / dP_i^2]} \quad (12)$$

로 되며, 이때  $\Delta P_D$ 에 대한  $\Delta P_i$ 의 비를  $i$ 號機의 負荷變動분에 대한 感度係數  $K_i$ 라 하면, 다음과 같이 표현된다.

$$K_i = \frac{[1 / [d^2 f_i / dP_i^2]]}{\sum_{i \in R} [1 / [d^2 f_i / dP_i^2]]} \quad (13)$$

따라서 系統負荷가  $\Delta P_D$  만큼 變化했을 때 각 發電機의 出力은

$$P_i^{new} = P_i^0 + K_i (\Delta P_D); \quad i \in R \quad (14)$$

와 같이 再配分된다.

표 1은 모델系統 發電機의 負荷感度係數를 算定한 것이다.

### 3.2 增分送電損失計算

UC 計劃時 高速分割 潮流計算法을 이용하여 각 組合의 線路容量限界 침해 여부를 검증하고, 이때 線路 過負荷를 초래하는 組合은 고찰대상에서 제외시킴으로써 狀態 bounding 効果는 물론이거니와 系統의 安全運用에 크게 기여할 수 있도록 하였으며, 이때 潮流計算過程에서 형성되는 不變行列  $[B']$ 를 이용하여 增分損失을 容易하게 구할 수 있다. 따라서 이로부터 갱신된 penalty factor를 사용함으로써 고정 penalty factor를 사용하는 종래의 算法보다 計算時間은 다소 많이 소요되지만 精度를 높일 수 있는 算法이 되게 하였다.

變形된 高速分割法에 의한 修正方程式은 다음과 같이 쓸 수 있다.

표 1. 發電機의 負荷感度係數

Table 1. Load sensitivity coefficients of units

** LOAD SENSITIVITY OF UNITS **				
NO	UNIT	FI	1/FI	FII/ΣFII
1	UT14	0.008820	113.378685	0.007970
2	UT10	0.002140	467.289734	0.032847
3	UT09	0.002140	467.289734	0.032847
4	UT13	0.008220	121.654495	0.008551
5	UT21	0.001740	574.712646	0.040398
6	UT22	0.001740	574.712646	0.040398
7	UT03	0.001960	510.204071	0.035863
8	UT11	0.001320	757.575745	0.053251
9	UT12	0.001320	757.575745	0.053251
10	UT16	0.001460	684.931458	0.048145
11	UT17	0.001460	684.931458	0.048145
12	UT18	0.001460	684.931458	0.048145
13	UT23	0.003160	316.455688	0.022244
14	UT15	0.017180	58.207218	0.004091
15	UT01	0.007280	137.362640	0.009655
16	UT02	0.007280	137.362640	0.009655
17	UT24	0.003880	257.731964	0.018116
18	UT04	0.003880	257.731964	0.018116
19	UT05	0.003880	257.731964	0.018116
20	UT06	0.000160	6250.000000	0.439325
21	UH08	0.035520	28.153154	0.001979
22	UH19	0.037320	26.795284	0.001883
23	UH20	0.056940	17.562346	0.001234
24	UH07	0.012180	82.101807	0.005771

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B'^{-1} & 0 \\ 0 & B''^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P/E \\ \Delta Q/E \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{단, } B'_{pq} = -1 / X_{pq}; \quad p \neq q$$

$$B''_{pp} = \sum_{p \neq q} 1 / X_{pq}$$

식 (15)로 부터 매 반복시마다  $\theta$ 와  $E$ 를 修正하게 된다.

이제  $i$ 號機의 微少 出力變化에 대한 損失變化量을  $\Delta P_L$ 이라 하면

$$\Delta P_L = \Delta P_i + \Delta P_s \quad (16)$$

또는

$$\Delta P_L / \Delta P_i = 1 + \Delta P_s / \Delta P_i; \quad i \in M, \quad i \neq s \quad (17)$$

와 같이 표현 된다.

따라서 penalty factor  $L_i$ 는

$$L_i = -\Delta P_i / \Delta P_s; \quad i \in M, \quad i \neq s \quad (18)$$

로부터 간단히 구할 수 있다.

식 (18)의  $\Delta P_i / \Delta P_s$ 를 구하기 위하여 slack 母線 電力의 微少變化분을

$$\Delta P_s = [\partial P_s / \partial \theta] (\Delta \theta) \quad (19)$$

로 놓으면, 식 (15)로 부터

$$\Delta P_s = [\partial P_s / \partial \theta] [B'^{-1}] (\Delta P/E) \quad (20)$$

와 같이 되고, 식 (20)을 다시쓰면

$$\Delta P_s / \Delta P_i = [\partial P_s / \partial \theta] [A]; \quad i \in M, \quad i \neq s \quad (21)$$

로 된다. 여기서  $[A]$ 는  $[B'^{-1}]$ 의  $i$ 번째 列을

電圧  $E_i$ 로 나눈 값이며  $[B^{-1}]$ 가 不變行列이므로  $[\Delta P_s/\Delta P_i]$ 를 計算하기 위해서는 단지  $[\partial P_s/\partial \theta]$  값만을 구하면 된다.

그림 1은 이상의 計算節次를 나타내는 흐름도이다.

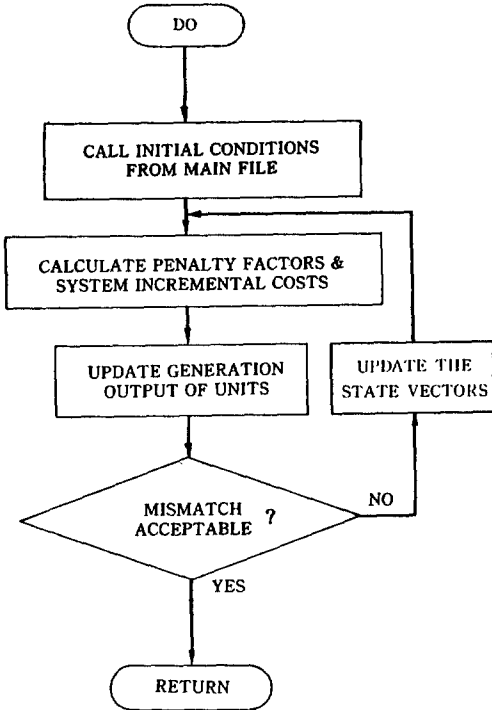


그림 1. 増分損失計算 흐름도  
Fig. 1. Flow of incremental loss calculation.

이렇게 하여 각 시간대의 最適 運轉點  $\lambda_{opt}^t$ 가 구해지면 각 發電機의 運轉狀態는 다음과 같이 決定된다.

$$P_i^t = \begin{cases} \bar{P}_i, \lambda_i \leq \lambda_{opt}^t & ; i \in R \\ \underline{P}_i, \lambda_i \geq \lambda_{opt}^t & ; i \in R \\ (\underline{P}_i < P_i^t < \bar{P}_i), \lambda_i < \lambda_{opt}^t < \bar{\lambda}_i & ; i \in R \end{cases} \quad (22)$$

#### 4. 發電機 起動停止計劃

본 論文에서 提案한 UC計劃 算法은 문헌 [14], [15]의 理論을 系統負荷分布, 線路의 容量限界 및 UC對象 發電機의 banking 狀態까지를 고려할 수 있도록 개선함으로써 經濟性, 發電系統의 信賴性은 물론 線路의 安全性을 提高할 수 있는 算法이 되게 한 것이다.

$F_i^*(k)$ 를 시각  $t$ , 狀態  $k$ 에서 이루어질 수 있는

最少 運轉費用이라 하면 DP의 汎函數式은 다음과 같이 된다.

$$F_i^*(k) = \min_j \{F_{i-1}^*(j) + C(j, k)\}; t \in T \quad (23)$$

여기서

$$C(j, k) = (C_d(k), C_\beta(j, k), C_r(j, k), C_o(j, k)) \quad (24)$$

시각  $t$ , 狀態  $k$ 에서의 並列 發電機 組合를  ${}^tU^k$ 라고 하고 시각  $t-1$ , 狀態  $j$ 에서의 組合를  ${}^{t-1}U^j$ 라 하면 시각  $t$ , 狀態  $k$ 까지의 總 運用費用  $\phi_t^*$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\phi_t^*({}^{t-1}U^j, {}^tU^k) = \sum_{i \in R} f_i^t(P_i^t) + \sum_{i \in R} SC_i^t(Z_i^{t-1}) + \sum_{i \in R} DC_i^t + P_\epsilon^t({}^tU^k) + F_{t-1}({}^{t-1}U^j); t \in T \quad (25)$$

단,  $j \in 2^R, k \in 2^R$

여기서

$$\sum_{i \in R} f_i^t(P_i^t) = C_a(k) \quad ; t \in T \quad (26)$$

$$\sum_{i \in R} SC_i^t(Z_i^{t-1}) = \begin{cases} C_\beta(j, k), & j \neq k \\ 0, & j = k \end{cases} ; t \in T \quad (27)$$

$$\sum_{i \in R} DC_i^t = \begin{cases} C_r(j, k), & j \neq k \\ 0, & j = k \end{cases} ; t \in T \quad (28)$$

$$P_\epsilon^t({}^tU^k) = \begin{cases} C_o(j, k), & S^t({}^tU^k) > SU \\ 0, & S^t({}^tU^k) \leq SU \end{cases} ; t \in T \quad (29)$$

단,  $C_o(j, k) = C_d(k) \times \varphi$

$$F_{t-1}({}^{t-1}U^j) = F_{t-1}^*(j) \quad ; t \in T \quad (30)$$

따라서 식 (25)를  $\{{}^{t-1}U^j\}$ 에 대해 最少化하면

$$F_i^*({}^tU^k) = \min_{\{{}^{t-1}U^j\}} \{\phi_t^*({}^{t-1}U^j, {}^tU^k)\}; t \in T \quad (31)$$

와 같이 되고, 식 (31)은 식 (1)~(9)의 運用制約條件下에서의 最少化 目的函數이며, 식 (25)와 (31)의 漸化式을 풀어서 最終段階의 여러 組合에 도달하는데 最少의 費用이 소요되는 計劃을 선택한다.

또한 UC對象 發電機의 banking 狀態를 고려하기 위하여 식 (25)와 (31)로부터 決定된 最適計劃중 起動 및 停止를 수반하는 發電機의 起動停止 費用과 그 時間동안 banking 狀態로 유지하는데 필요한 費用을 비교하여 經濟的인 쪽으로 計劃을 變更한다면 經濟的인 側面에서 뿐만 아니라, banking 狀態의 發電機를 瞬時豫備力으로도 運用할 수 있으므로 系統의 安全 運用面에서도 바람직한 計劃을 수립할 수 있을 것으로 생각된다.

고찰기간중 起動停止를 수반하는 發電機의 起動停

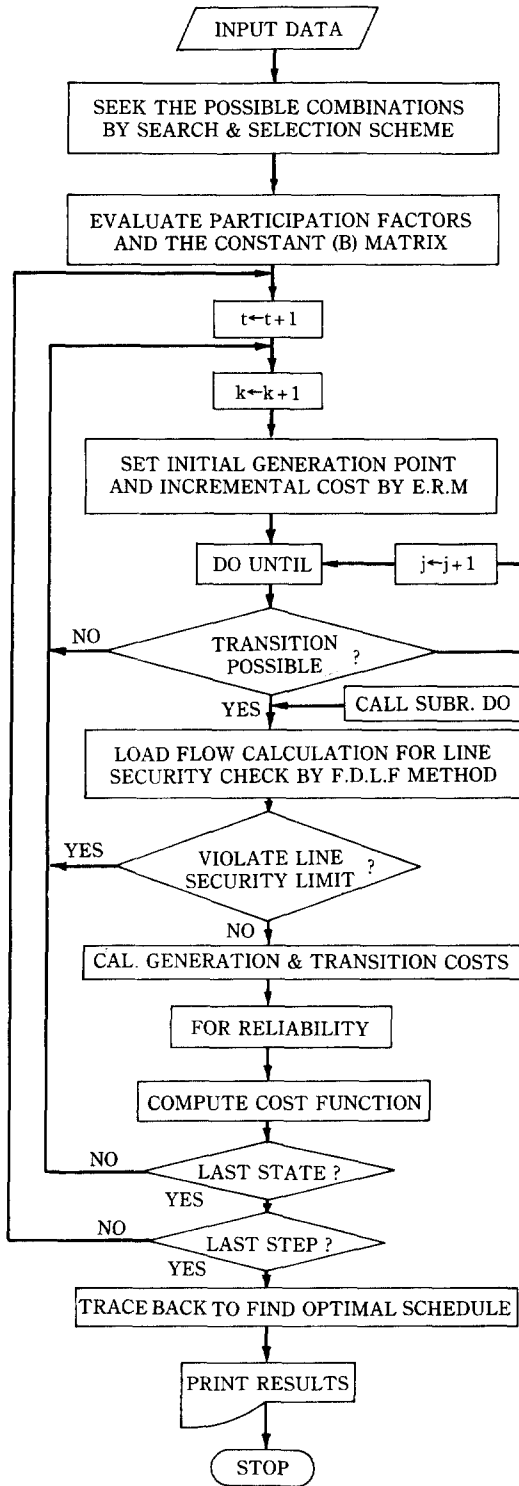


그림 2. 提案한 UC算法의 흐름도  
Fig. 2. Flow of proposed UC algorithm.

止費用을  $ST_i(t)$ 라 하고, 그것의 banking 費用을  $SB_i(t)$ 라 하면, 이들은 각각

$$ST_i(t) = \{SC_i^t(Z_i^{t-1}) + DC_i^t(z_i^{t-1})\}, i \in R \quad (32)$$

$$SB_i(t) = \{BC_i^t(Z_i^{t-1})\}, i \in R \quad (33)$$

로 표현되며, 이들의 관계를 식 (25)에 대입하면

$$\phi_i^*(t-1, U^j, U^k) = C_a(k) + \min_i \{ST_i(t), SB_i(t)\} + C_o(j, k) + F_{i-1}^*(j) \quad (34)$$

와 같이 정리된다. 따라서 식 (34)의 우변 두번째 항으로 부터 發電機의 停止내지는 banking 狀態가 다음과 같이 決定된다.

$$\{ST_i(t) - SB_i(t)\} \begin{cases} > 0, U_i^t - z_i^{t-1} = B_i \\ < 0, U_i^t - z_i^{t-1} = 0 \end{cases} \quad (35)$$

본 論文에서 提案한 UC計劃 算法의 개략적인 흐름은 그림 2와 같다.

### 5. 事例研究

본 論文에서 提案한 UC計劃 算法의 效用성을 立證하기 위하여 그림 3과 같은 모델系統의 日間發電計劃에 적용한 結果를 提示 및 검토하였다.

그림 3에서와 같이 각 母線에 負荷를 分布시키고

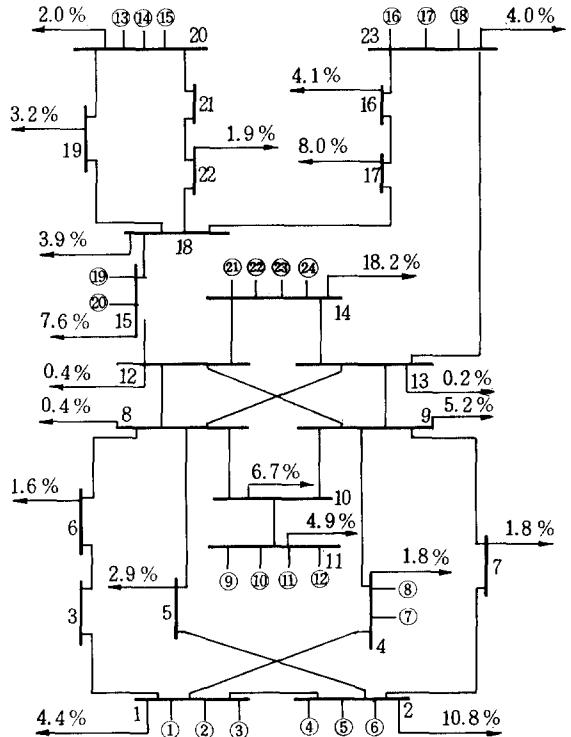


그림 3. 모델系統圖  
Fig. 3. Line diagram for model system.

표 2. 모델 시스템의 線路定數

Table 2. Line parameters for model system  
TRANSMISSION LINE DATA

LINE	SB	EB	R(F.U)	R(P.U)	X(P.U)	CAP.
1	1	3	0.0118	0.0242	0.0504	290.0
2	1	4	0.0151	0.0309	0.0693	90.0
3	2	5	0.0197	0.0404	0.0888	145.0
4	8	3	0.0157	0.0325	0.0709	145.0
5	2	7	0.0342	0.0625	0.1620	100.0
6	3	6	0.0320	0.0576	0.1520	85.0
7	4	9	0.0148	0.0266	0.0700	90.0
8	9	7	0.0112	0.0229	0.0504	100.0
9	8	6	0.0218	0.0446	0.1603	85.0
10	11	10	0.0456	0.0013	0.0214	900.0
11	9	10	0.0291	0.0067	0.0365	305.0
12	8	10	0.0291	0.0077	0.0375	310.0
13	13	14	0.2373	0.0043	0.0341	260.0
14	14	12	0.2373	0.0043	0.0331	280.0
15	15	12	0.2078	0.0038	0.0307	365.0
16	18	15	0.1951	0.0135	0.1288	125.0
17	23	13	0.4871	0.0089	0.0720	205.0
18	16	17	0.0543	0.0040	0.0080	390.0
19	17	18	0.1133	0.0321	0.1067	100.0
20	19	18	0.0862	0.0316	0.1027	165.0
21	20	19	0.2451	0.0345	0.1362	185.0
22	22	18	0.1298	0.0424	0.1002	100.0
23	20	21	0.1056	0.0219	0.1156	100.0
24	21	22	0.0770	0.0214	0.1114	100.0
25	23	16	0.1109	0.0020	0.0164	605.0
26	12	8	0.0000	0.0023	0.0839	105.0
27	13	8	0.0000	0.0023	0.0839	100.0
28	12	9	0.0000	0.0018	0.1300	160.0
29	13	9	0.0000	0.0023	0.0839	105.0
30	1	2	0.0000	0.0025	0.2000	60.0

(백분율로 표시하였음), 이 비율은 考察期間中 일정한 것으로 가정하였으며, 24臺의 發電機中 4번 母線의 ⑦, ⑧號 發電機와 15번 母線의 ⑱, ⑳號 發電機를 水力機로 가정하였다.

표 2는 모델 시스템의 線路定數를, 표 3은 發電機定數를 나타낸 것이다.

표 3에서

AA, BB, CC : 發電機의 燃料費係數

COST : 燃料費單價

L-MIN, L-MAX : 最底 및 最高出力일 때의 增分燃料費

R : 事故發生率

MU : 復舊率

FS : 起動失敗確率

표 4는 UC對象 發電機의 特性을 나타내는 것으로, X0는 初期 運轉狀態(0:停止, 1:運轉)를, TM은 그 狀態의 持續時間을, SA(TA), SB(TB)는 起動特性을 각각 나타낸 것이다. 또한, SD는 停止費用이며, TL 및 TH는 각각 發電機의 最少停止時間과 最少運轉時間을 나타낸 것이다.

표 3. 모델 시스템의 發電機定數

Table 3. Unit parameters for model system

INPUT DATA FOR TP (XBRITH-85 MODEL ****)													
NO	TYPE	NAME	PMIN MW	P MAX MW	AA P**	BB P*	CC	COST	L-MIN	L-MAX	R	MU	FS
1	T	UT14	70.0	100.0	0.00441	1.76033	126.10672	16.539	40.584	45.100	0.00047	0.0520	0.01
2	T	UT10	90.0	180.0	0.00107	1.94354	52.78449	16.539	38.085	41.519	0.00069	0.0610	0.01
3	T	UT09	90.0	180.0	0.00107	1.94354	52.78449	16.539	36.460	39.748	0.00050	0.0510	0.01
4	T	UT13	90.0	200.0	0.00411	1.76033	126.10697	16.539	45.609	62.104	0.00047	0.0520	0.01
5	T	UT21	180.0	285.0	0.00087	1.74287	103.74299	16.539	37.508	40.841	0.00046	0.0510	0.01
6	T	UT22	180.0	309.0	0.00087	1.74287	105.74299	16.539	36.284	40.245	0.00047	0.0420	0.01
7	T	UT03	120.0	190.0	0.00098	1.89809	57.33759	16.539	37.858	40.293	0.00027	0.0350	0.01
8	T	UT11	200.0	380.0	0.00066	1.69351	125.02899	16.539	33.573	37.648	0.00035	0.0550	0.00
9	T	UT12	200.0	380.0	0.00066	1.69351	125.02899	16.539	33.379	37.430	0.00038	0.0550	0.00
10	T	UT16	175.0	333.0	0.00073	1.67792	114.61200	16.659	33.207	37.169	0.00059	0.0740	0.00
11	T	UT17	175.0	333.0	0.00073	1.67791	114.61200	16.659	33.207	37.169	0.00050	0.0580	0.00
12	T	UT18	175.0	333.0	0.00073	1.67791	114.61200	16.659	33.980	38.034	0.00040	0.0150	0.00
13	T	UT23	70.0	120.0	0.00158	1.99502	41.06499	14.060	32.282	34.583	0.00048	0.0170	0.00
14	T	UT15	80.0	163.0	0.00859	1.99130	30.92865	10.125	34.376	48.855	0.00066	0.0080	0.00
15	T	UT01	70.0	154.0	0.00364	1.37487	76.97529	16.272	33.945	44.961	0.00050	0.0520	0.00
16	T	UT02	70.0	154.0	0.00364	1.37487	76.97529	16.272	31.737	42.036	0.00080	0.0720	0.00
17	T	UT24	100.0	238.0	0.00194	1.34467	127.01199	14.000	25.349	33.182	0.00040	0.0360	0.00
18	T	UT04	100.0	238.0	0.00194	1.34467	127.01199	14.000	26.562	34.770	0.00044	0.0370	0.00
19	T	UT05	100.0	238.0	0.00194	1.34467	127.01199	14.000	26.513	34.707	0.00044	0.0280	0.00
20	H	UT06	650.0	650.0	0.00008	1.00000	15.23300	3.243	3.584	3.584	0.00070	0.0080	0.00
21	H	UT08	25.0	48.0	0.01776	1.16973	11.76397	1.000	2.058	2.875	0.00010	0.0040	0.00
22	H	UT19	30.0	57.0	0.01866	3.18551	8.90187	1.000	4.305	5.313	0.00010	0.0030	0.00
23	H	UT20	30.0	57.0	0.02847	6.02883	5.35891	1.000	7.737	9.274	0.00010	0.0040	0.00
24	H	UT07	25.0	50.0	0.00609	4.29077	1.37937	1.000	4.595	4.900	0.00010	0.0040	0.00
TOT.			24	3095.0	5370.0								







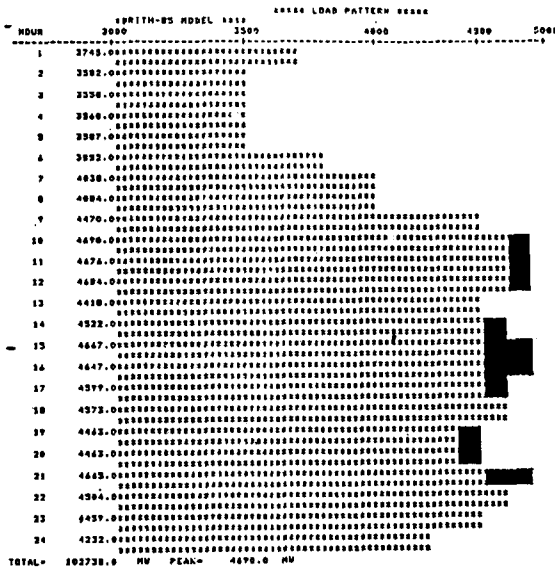


그림 4. 水, 火力機의 負荷分擔曲線

Fig. 4. Load sharing curve for thermal and hydro units

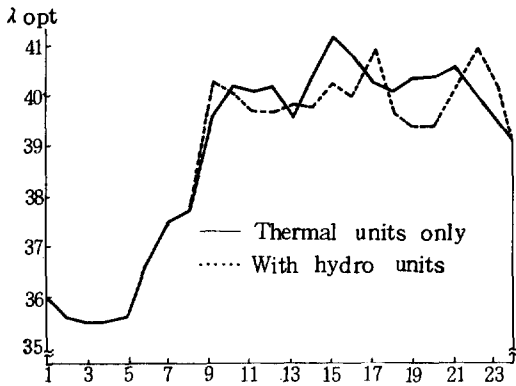


그림 5. 最適 増分燃料費 變化曲線

Fig. 5. Curve for the variation of optimal incremental cost

### 6. 結 論

電力系統을 安全하고 經濟的으로 運用하는데 기여할 수 있는 最適 發電機 起動停止計劃 算法을 提案하였으며, 그 研究結果를 要約하면 다음과 같다.

1) 實用的인 見地에서 運用制約을 충분히 고려하였다.

2) UC計劃 算法 자체에서 送電線路의 容量限界를 고려함으로써 狀態 bounding 效果는 물론, 系統의 安全運用에 기여토록 하였다.

3) UC對象 發電機의 banking 狀態를 고려하여 經濟性和 信賴性을 提高하였다.

4) 본 論文에서는 日間의 起動停止計劃만을 다루었으나, 시대적인 요청에 따라 揚水 및 Gas Turbine을 포함한 종합적인 日間 내지는 週間 發電計劃算法의 개발이 요구되며, 筆者등은 이 分野의 研究를 계속할 계획이다.

### 參考文獻

- 1) L.K. Kirchmayer, 'Economic operation of power systems', John Wiley & Sons, New York, 1958.
- 2) C.J. Baldwin, K.M. Dale, R.F. Dettrich, 'A study of economic shutdown of generating units in daily dispatch', AIEE Trans., Vol. PAS-78, pp. 1272-84, 1959.
- 3) IEEE Working Group Report, 'Description and bibliography of major economy-security functions part I-descriptions', IEEE Trans., Vol. P A S-100, pp.211-35, 1981.
- 4) A.J. Wood, B.F. Wollenberg, 'Power generation, operation, and control', John Wiley & Sons, New York, 1984.
- 5) R.H. Kerr, A.J. Fontana, J.L. Schdit, J.K. Wiley, 'Unit commitment', IEEE Trans., Vol. PAS-85, pp.417-21, 1966.
- 6) H.H. Happ, R.C. Johnson, W.J. Wright, 'Large scale hydrothermal unit commitment method and results', IEEE Trans., Vol. PAS-90, pp.1373-84, 1971.
- 7) P.G. Lowery, 'Generating unit commitment by dynamic programming', IEEE Trans., Vol. PAS-85, pp.422-26, 1966.
- 8) C.K. Pang, H.C. Chen, 'Optimal short-term thermal unit commitment', IEEE Trans., Vol. PAS- 95, pp.1336-46, 1976.
- 9) J.A. Muckstadt, R.C. Wilson, 'An application of mixed integer programming duality to scheduling thermal generating system', IEEE Trans., Vol. PAS-87, 1968.
- 10) T.S. Dillon, 'Integer programming approach to the problem of optimal unit commitment with pro-

babulistic reserve determination', IEEE Trans., Vol. PAS- 97, pp.2154-66, 1978.

11) G.S. Lauer, D.P. Bertsekas, N.R. Sandell, T.A. Posbergh, 'Solution of large scale optimal unit commitment problems', PICA Conf.-81, Philadelphia, pp.198-204, 1981.

12) R.E. Bellman, S.E. Dreyfus, 'Applied dynamic programming', Princeton University Press, New Jersey, 1962.

13) M. Held, R.M. Karp, 'A dynamic programming approach to sequencing problems', J. Soc. Indust. Appl. Math., Vol. 10, pp.196-210, 1962.

14) 金俊鉉 外, 'Hybrid DP에 의한 電力系統의 發電機 並列臺數 決定에 研究,' 電氣學會論文誌, Vol. 33, PP. 148 ~ 56, 1984

15) 金俊鉉 外, '發電系統의 信賴性을 고려한 發電機 並列臺數 決定에 관한 研究,' 電氣學會論文誌, Vol. 33, PP. 387 ~ 95, 1984

16) K. Aoki, T. Satoh, 'Economic dispatch with network security constraints using quadratic programming', IEEE Summer Meeting, SM-4626-5, San Francisco, California, 1982.

17) M. Huneault, A.F. Vojdani, M. Juman, R. Calderon, F.D. Galiana, 'The continuation method in power system optimization; Application to economy-security functions', IEEE Trans., Vol. PAS-104, pp.114-24, 1985.

18) T. Ueda, J. Hasegawa, S. Yamashiro, 'Optimization of power flow considering line overload', JIEE Trans., Vol. 101-B, pp.367-74, 1981.

19) A. Turgeon, 'Optimal scheduling of thermal generating units', IEEE Trans., Vol. AC-23, pp.1000-5, 1978.

20) J.N. Malik, G.K. Rao, 'Economic load dispatch solution using fast decoupled load flow', Proc. IEE,

Vol. 125, pp.334-5, 1978.

21) 金俊鉉 外, '等價化法에 의한 經濟給電,' 電氣學會誌 Vol. 30, PP. 817 ~ 21. 1981

附 錄

記號說明

- $P_i, \bar{P}_i, \underline{P}_i$  :  $i$  號機의 出力, 上限值, 下限值  
 $P_{TD}, P_L$  : 系統負荷, 送電損失  
 $P_d, P_D$  : 水力系 및 火力系가 감당할 負荷  
 $H, R$  : 水, 火力發電機 集合 인덱스  
 $t, T$  : 考察 時區間 및 最終時刻  
 $U_i^t, U_j^t$  : 發電機 運轉狀態變數  
 $\tau h_i, \tau l_i$  : 最少運轉時間 및 最少停止時間  
 $Z_i^t$  : 停止持續時間  
 $\eta_i$  : 日間 起動可能回数  
 $\pi_i$  : 同一母線에서 同時起動可能한 發電機臺數  
 $G_p$  : 母線  $p$ 의 發電機集合 인덱스  
 $x_f, \underline{x}_f, \bar{x}_f$  : 線路의 潮流, 容量限界下限值, 上限值  
 $q_j, \underline{q}_j, \bar{q}_j$  : 水力機의 使用水量, 下限值, 上限值  
 $Q_j$  : 日間 使用可能水量  
 $\Delta \theta, \Delta E$  : 位相角 및 電壓의 微小變化量 벡터  
 $\Delta P, \Delta Q$  : 有, 無効電力의 偏差量 벡터  
 $B', B''$  : 高速分割 潮流計算의 不變行列  
 $p, q, s$  : 母線인덱스  
 $X_{pq}$  : 母線  $p-q$ 의 線路리액턴스  
 $C(j, k)$  : 狀態遷移費用 集合  
 $f_i(p_i)$  : 發電費用  
 $SC_i^t(Z_i^{t-1})$  : 起動費用  
 $DC_i^t$  : 停止費用  
 $j, k$  : 狀態인덱스  
 $P_i^t(U^k)$  : Penalty cost  
 $S^t(U^k)$  : Security function 값  
 $SU, \varphi$  : Security level, Penalty cost rate  
 $B_i$  : 發電機 banking 狀態 인덱스