

線路容量限界를 고려한 短期 發電計劃

Short-Term Generation Scheduling Considering Transmission Line Capacity Limits

金俊鉉* · 宋賢善** · 劉仁根***
(Joon-Hyun Kim · Hyun-Seon Song · In-Keun Yu)

Abstract

This paper proposes an effective algorithm for short-term generation scheduling for the purpose of economic and secure operation of thermal power systems.

Especially, in the procedure of solution by Dynamic Programming, Linear Programming is introduced to promote the possibility of optimal solution and the security of power systems, and evaluation of security function is improved by the application of seven step approximation of normal distribution.

Several necessary considerations, that is, time dependent start-up and constant down cost of generating units, demand and spinning reserve constraints, minimum up and down time constraints, the number of possible start up of a generating unit in a day and the number of generating units which can be started up at the same time at the same bus, are also incorporated to elevate the usability and flexibility of the algorithm.

Finally, the effectiveness of the proposed algorithm has been demonstrated by applying to the 6-gen. 21-bus model power system.

1. 序 論

發電計劃은 電力計統 最適運用의 根幹을 이루는 것으로서, 日間이나 週間을 다루는 短期計劃과 月間이나 年間을 對象으로 하는 長期計劃으로 나눌 수 있으며, 그 基本目的은 주어진 設備를 需給狀態, 稼動狀態등 環境의 변화에 적절히 對處시키면서 良質의 電力을 豊富하고 安全하게, 經濟적으로 供給하는 것이라 할 수 있다.

近年 經濟의 持續的인 成長과 國民 生活水準의 향상등으로 電力需要가 漸增함에 따라 原子力 및

石炭火力 發電設備등의 建設이 추진되고 있으며, 發電所 用地確保 및 經濟性 提高등을 위하여 이들 新銳 火力發電設備의 單位容量이 大型化되어 基底負荷用 電源設備의 점유율이 높아짐으로써 輕負荷時 中間 및 尖頭負荷用 設備의 運用合理化가 중요한 問題로 대두되고 있는 실정이다.

그런데 電力系統의 運用合理化를 위해서는 系統의 諸條件을 만족시키면서 가장 經濟的인 運用計劃을 세울 수 있는 算法의 開發이 必須的이며, 이 分野에 대한 研究가 꾸준히 進行되고 있으나^{1~3)} 線路의 容量限界까지를 고려한 算法은 거의 발표되고 있지 않다.

筆者들은 이점에 주목하여 發電系統의 信賴性과 送電線路의 容量限界를 고려할 수 있는 算法을 발표한바 있으며^{4), 5)} 이 때 發電機의 信賴度指標로 安

*正 會 員: 漢陽大 工大 電氣工學科 教授

**正 會 員: 東洋工專大 電氣科 助教授

***正 會 員: 韓國電氣研究所 先任研究員 · 工博

接受日字: 1986年9月5日

定性函數(SF)를 導入하였다. 그런데 文獻4)에서는 SF의 算定時 發電機 容量의 大小에 關係 없이 모든 發電機를 同一하게 취급하고, 動的計画法에 의한 發電機 起動停止計劃 樹立時 線路의 過負荷를 초래하는 組合은 考察對象에서 除外시킴으로써 解의 最適性을 침해할 수도 있는등의 문제점을 내포하고 있다.

본 研究에서는 이러한 문제점을 補充하기 위해 SF의 算定時 正規分布의 7分割近似^{6,7)}를 이용하여 각 發電機의 容量水準에 따른 確率값을 導出, 適用하고 動的計画法에 의한 解過程中에 線型計画法⁸⁾을 사용하여 개개의 組合에 대한 解를 구함으로써 보다 合理的인 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. 問題의 設定과 定式化

2.1 問題의 設定

發電計劃은 一般의 으로

- 1) 需要의 豫測
- 2) 發電機의 起動停止計劃 樹立
- 3) 經濟給電計劃 樹立

의 節次로 이루어 지는데, 本 研究에서는 다음과 같은 몇가지 前提下에 發電計劃을 樹立하는 것으로 한다.

- 1) 系統需要는 各 母線別로 豫測이 可能하다.
- 2) 考察期間은 日間(24時間)으로 한다.
- 3) 發電機의 狀態는 2狀態(no-detrated)만을 고려하고 同時에 2機以上의 事故停止는 무시한다.
- 4) 送電線路의 容量限界는 安定餘裕度를 30%로 하여 算定한 값을 사용한다.
- 5) 有効電力 配分만을 다루며, 送電損失은 무시한다.

2.2 問題의 定式化

$F_t^*(k)$ 를 時刻 t , 狀態 k 까지의 最小運轉費用이라 하면 動的計画法에 의한 最小化 目的函數는 다음과 같이 표현할 수 있다.⁹⁾

$$F_t^*(k) = \text{Min}_j \{ F_{t-1}^*(j) + C(j, k) \}; t \in T \quad (1)$$

여기서,

$$C(j, k) = \{ C_T(j, k), C_P(j, k) \} \quad (2)$$

단, $C_T(j, k) = \{ C_T^s(k), C_T^d(j, k), C_T^r(j, k) \}$
; Transition cost

$$C_P(j, k) = \{ C_P^s(j, k), C_P^f(j, k), C_P^b(j, h), C_P^l(j, k), C_P^p(j, k), C_P^r(j, k) \}; \text{Penalty}$$

cost

j ; 決定變數(時刻 $t-1$ 에서의 最適決定)

k ; 時刻 t 에서의 狀態集合

이제 時刻 t 狀態 k 에서의 發電機 組合을 U^k 라 하고, 時刻 $t-1$ 狀態 j 에서의 組合을 $U^{j,t-1}$ 라 하면, 時刻 t 狀態 k 까지의 總 運用費用 $\phi_t^k(U^{j,t-1}, U^k)$ 는

$$\begin{aligned} \phi_t^k(U^{j,t-1}, U^k) = & \sum_{i \in R} f_i(P_i^t) + \sum_{i \in R} SC_i^t(Z_i^{t-1}) + \sum_{i \in R} DC_i^t + P_c^t(U^k) + P_c^t(\text{RES}) + P_c^t(\tau h_i) + \\ & P_c^t(\tau k_i) + P_c^t(\rho_i) + P_c^t(\pi_p) + F_{t-1}(U^{j,t-1}) \end{aligned} \quad (3)$$

단, $t \in T, j \in 2^K, k \in 2^R$

와 같이 되고, 윗 식이 各 項을 식(2)에 對應시키 면

$$C_T^s(k) = \sum_{i \in R} f_i(P_i^t); \text{發電費用} \quad (4)$$

$$C_T^d(j, k) = \begin{cases} \sum_{i \in R} SC_i^t(Z_i^{t-1}), j \neq k \\ 0, j = k \end{cases}; \text{起動費用} \quad (5)$$

$$C_T^r(j, k) = \begin{cases} \sum_{i \in R} DC_i^t, j \neq k; \text{停止費用} \\ 0, j = k \end{cases} \quad (6)$$

$$C_P^s(j, k) = P_c^t(U^k); \text{SF에 대한 PC} \quad (7)$$

$$C_P^f(i, k) = P_c^t(\text{RES}); \text{運轉豫備力에 대한 PC} \quad (8)$$

$$C_P^b(j, k) = P_c^t(\tau h_i); \text{最小運轉時間에 대한 PC} \quad (9)$$

$$C_P^l(j, k) = P_c^t(\tau_i); \text{最小停止時間에 대한 PC} \quad (10)$$

$$C_P^p(j, k) = P_c^t(\rho_i); \text{日間起動可能回數에 대한 PC} \quad (11)$$

$$C_P^r(j, k) = P_c^t(\pi_p); \text{同時起動可能한 台數에 대한 PC} \quad (12)$$

$$F_{t-1}^*(j) = F_{t-1}(U^{j,t-1}); \text{狀態 } j \text{까지의 最小費用} \quad (13)$$

단 PC: Penalty cost

로 되며, 이 때 식(7)~(12)는 다음과 같이 算定된 다.

$$P_c^t(U^k) = \begin{cases} C_P^t(k) \times \varphi, S^t(U^k) > SU \\ 0, S^t(U^k) \leq SU \end{cases} \quad (14)$$

단, φ ; Penalty cost rate

$S^t(U^k)$; 時刻 t 에서 組合 U^k 의 SF값

SU ; Security level

$$P_c^t(\text{RES}) = \begin{cases} 0, \sum_{i \in R} P_i^{\text{max}} U_i^t - \text{mid} (P_i^{\text{max}} U_i^t) \geq \\ P_b^t \end{cases} \quad (15)$$

$$P_c^t(\tau_{hi}) = \begin{cases} \infty, \sum_{i \in R} P_i^{\max} U_i^t - \text{mid}_i (P_i^{\max} U_i^t) < P_0^t \\ 0, (U_i^t - U_i^{t-1}) \left(\sum_{n=t-\tau_{hi}}^{t-1} U_i^n - \tau_{hi} \right) \leq 0; i \in R \quad (16) \\ \infty, (U_i^t - U_i^{t-1}) \left(\sum_{n=t-\tau_{hi}}^{t-1} U_i^n - \tau_{hi} \right) > 0 \end{cases}$$

$$P_c^t(\tau_{li}) = \begin{cases} 0, (U_i^t - U_i^{t-1}) (Z_i^{t-1} - \tau_{li}) \geq 0; i \in R \quad (17) \\ \infty, (U_i^t - U_i^{t-1}) (Z_i^{t-1} - \tau_{li}) < 0 \end{cases}$$

$$P_c^t(\rho_i) = \begin{cases} 0, \sum_{t \in T} |U_i^t - U_i^{t-1}| \leq \rho_i; i \in R \quad (18) \\ \infty, \sum_{t \in T} |U_i^t - U_i^{t-1}| > \rho_i \end{cases}$$

$$P_c^t(\pi_p) = \begin{cases} 0, \sum_{i \in G_p} U_i^t (1 - U_i^{t-1}) \leq \pi_p \quad (19) \\ \infty, \sum_{i \in G_p} U_i^t (1 - U_i^{t-1}) > \pi_p \end{cases}$$

따라서, 식 (3)을 $\{^t U^t\}$ 에 대해 最小化 하면

$$F_t^*(U^k) = \text{Min} \left\{ \phi_t^k \left(\{^{t-1} U^t, \{U^k \right\} \right); t \in T \quad (20)$$

로 되고, 식 (20)은 考察對象 系統의 運用制約을 만족하는 最小化 目的函數이며, 식 (3)과 (20)의 漸化式을 풀어서 初期段階로부터 最終段階의 여러 組合에 도달하기 까지의 最小費用이 소요되는 計劃을 구한다.

3. 最適狀態의 決定

식 (3)의 우변 第1項으로 표현되는 각 狀態의 發電費用 $\sum_{i \in R} f_i(P_i^t)$ 를 算定하기 위해 線型計劃法을 導入하여 發電機 出力의 上下限과 電力需給條件은 물론, 線路의 容量限界까지를 만족하는 각 發電機의 出力狀態 (P_i^t) 를 決定한다.

$$\text{最小化 } \sum_{i \in R} f_i(P_i^t) \quad (21)$$

$$\text{制約條件}; P_i^{\min} \leq P_i^t \leq P_i^{\max}, i \in R \quad (22)$$

$$-P_i^{\max} \leq P_i^t \leq P_i^{\max} \quad (23)$$

$$\sum_{i \in R} P_i^t - P_0^t = 0 \quad (24)$$

여기서, 식 (22)는 發電機 出力의 上下限制約을, 식 (23)은 線路의 容量限界를, 식 (24)는 電力需給條件을 각각 나타낸 것이다.

윗 식에 線型計劃法을 적용하기 위해서는 目的函數와 制約條件의 線型化가 필요하므로, 다음과 같이 線型化하였다.

3.1 目的函數의 線型化

發電費用을 出力의 2次式

$$f_i(P_i^t) = \alpha_i + \beta_i P_i^t + \gamma_i (P_i^t)^2 \quad (25)$$

으로 假定하여 그림 1과 같이 折線近似에 의해 線型化하고, 식 (25)로 표현되는 燃料費特性을 이용하여 等增分燃料費法에 의해 初期可能解를 구한 다음, 이 때의 出力을 근거로 最小化 目的函數의 係數行列 K 를 다음 식으로 算定한다.

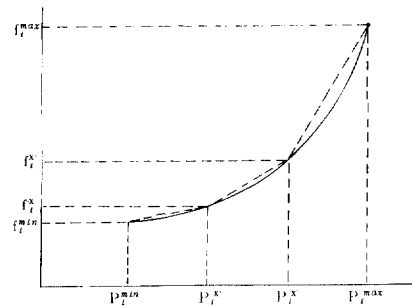


그림 1. 發電機의 燃料費特性

Fig. 1. Cost characteristic of generating unit.

$$K = \begin{bmatrix} (f_i^x - f_i^{\min}) / (P_i^x - P_i^{\min}), \\ P_i^{\min} \leq P_i^t \leq P_i^x \\ (f_i^{x'} - f_i^x) / (P_i^{x'} - P_i^x), \\ P_i^x < P_i^t \leq P_i^{x'} \\ (f_i^{\max} - f_i^{x'}) / (P_i^{\max} - P_i^{x'}), \\ P_i^{x'} < P_i^t \leq P_i^{\max} \end{bmatrix}, i \in R \quad (26)$$

$$\text{단, } f_i^g(P_i^g) = \alpha_i + \beta_i P_i^g + \gamma_i (P_i^g)^2, \\ g \in \{ \min, x, x', \max \}$$

3.2 線路容量制約의 線型化

直流潮流計算法¹⁰⁾에 의한 母線電力과 線路潮流의 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$P = CP_1 \quad (27)$$

여기서,

P ; 母線電力 벡터

C ; 母線-線路 接續行列

P_1 ; 線路潮流 벡터

또한, 식 (27)의 P_1 은

$$P_1 = Y_B C^T \delta' \quad (28)$$

식 (28)에서 Y_B 는 인접 모선 사이의 어드미턴스를 나타내는 대각 행렬이고, C^T 는 母線轉置行列이며, 線路接續行列 C 의 δ' 는 인접모선 사이의 位相差를 나타내는 벡터이다. 식 (28)에 $\delta' = ZP$ 의 관계를 대입하면

$$P_1 = Y_B C^T ZP \quad (29)$$

또는

$$P_1 = LP \quad (30)$$

$$\text{단, } L = Y_B C^T Z$$

을 얻는다. 따라서 식 (23)으로 표현되는 線路潮流制約式은

$$-P_1^{\max} \leq LP \leq P_1^{\max} \quad (31)$$

과 같이 線型制約式으로 표현할 수 있다.

3.3 最適出力狀態의 決定

식 (21)~(24)의 最小化 문제를 풀기위해 식 (26) 및 식 (31)과 같이 線型化된 식을 이용하여 다시쓰면

$$\text{最小化 : } F = KP^t \quad (32)$$

$$\text{制約條件 : } P^{\min} \leq P^t \leq P^{\max} \quad (33)$$

$$-P_1^{\max} \leq LP^t \leq P_1^{\max} \quad (34)$$

$$\sum_{i \in R} P_i^t - P_b^t = 0 \quad (35)$$

$$P^t \geq 0 \quad (36)$$

단, P^t : 時刻 t 에서의 發電機 出力벡터

와 같이 되며, 이상의 最小化 문제는 改訂심플렉스法으로 解(P^t)를 구하였다. 이로부터 구해진 發電機出力은 出力制約, 需給條件은 물론 線路의 潮流制約까지를 만족하는 最適出力狀態가 되고, 이 값을 식 (25)에 대입하여 最適狀態에 대한 發電費用($f_i(P_1^t)$)을 算定하게 된다.

4. 安定性 函數의 算定

본 研究에서 도입한 系統의 短期間 信賴度指標 $S(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$S(t) = \sum_i P_i(t) Q_i(t) \quad (37)$$

여기서, $P_i(t)$: 時刻 t 에서 系統이 狀態 i 에 있을 確率

$Q_i(t)$: 狀態 i 가 系統信賴도를 침해할

確率

이 때 $Q_i(t)$ 는, 豫測負荷를 一定한 것으로 假定할 경우 1 또는 0의 값을 가지지만, 發電機의 容量이 다양하므로 모든 경우에 대해 같은 값을 적용하는 것은 不合理하며, 따라서 다음과 같은 方法을 提案·適用하였다.

系統負荷의 期待値와 組合構成 發電機의 可能最大出力의 偏差量이 正規分布를 따르는 것으로 假定하고 그림 2와 같은 正規分布의 7分割近似를 適用하여 각 發電機의 容量水準에 따른 $Q_i(t)$ 의 값을 도출하였다.

즉, 時刻 t 狀態 k 에서 i 號機가 事故停止될 경우, 그 때의 系統負荷와 事故停止된 發電機를 제외하 나머지 發電機들의 可能最大出力의 偏差量을 ΔP_i^k 라 하면

Probability Given by Indicated Area

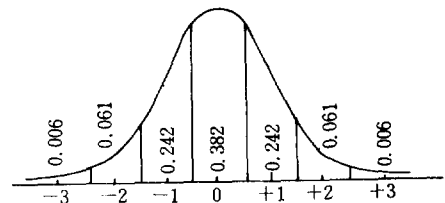


그림 2. 正規分析의 7分割近似

Fig. 2. Seven step approximation of normal distribution.

$$\Delta P_i^k = P_b^t - \sum_{i \in R} P_i^{\max}; i \in R \quad (38)$$

단, P_b^t : 時刻 t 에서 系統負荷와 같이 되고 식 (38)의 平均値를 ΔP_m 이라 하면

$$\Delta P_m = \frac{1}{n} \sum_{i \in R} |\Delta P_i^k| \quad (39)$$

단, n ; 狀態 k 를 구성하는 發電機 台數로 된다. 이 때, 標準偏差는 考察對象系統 發電機의 容量特性에 따라 적절한 값을 적용할 수 있고, $Q_i(t)$ 는 0~1사이의 값을 갖게 되며, 다음 식으로 표현된다.

$$Q_i(t) = \sum_{d=-3}^{+3} q_d P_d^d \quad (40)$$

여기서,

d ; 區間(-3, ..., 0, ..., +3)

P_d^d ; 區間 d 의 確率

$$q_d = \begin{cases} 1, & \Delta P_i^k \geq \Delta P_m^d \\ 0, & \Delta P_i^k < \Delta P_m^d \end{cases}$$

표 1. 發電機 特性定數

Table 1. Characteristic parameters of generating units.

發電機 番 號	發力 [MW]		燃料費 特性			事故率 μ	復舊率 η	起動失 敗率
	最小	最大	γ	β	α			
UT01	12.0	40.0	.03500	3.50000	7.00000	.00015	.01250	.01
UT02	10.0	30.0	.02500	3.00000	5.00000	.00040	.01540	.01
UT03	10.0	35.0	.00834	3.35000	9.00000	.00030	.01250	.01
UT04	15.0	50.0	.06250	1.00000	3.00000	.00013	.01720	.01
UT05	20.0	80.0	.01750	1.75000	3.00000	.00020	.01750	.01
UT06	50.0	200.0	.00375	2.00000	5.00000	.00013	.01320	.01

단, ΔP_m^d : 區間 d의 期待值
따라서, 算定하고자 하는 $S(t) \in \{S_c(t), S_u(t)\}$ 는
다음과 같이 된다.

$$S_c(t) = \sum_{i \in R} [P_{dn_i}(t) \prod_{\substack{j \in R \\ j \neq i}} P_{up_j}(t) Q_i(t)] \quad (41)$$

단, $P_{dn_i}(t) \in \{P_{dn_i}^b, P_{dn_i}^c(t)\}$
 $P_{up_j}(t) \in \{P_{up_j}^b, P_{up_j}^c(t)\}$

여기서, $S_c(t)$ 는 狀態遷移가 發電機의 起動을 수
반하지 않는 경우의 Security function 값을 나타낸
것이며, 狀態遷移가 發電機의 起動을 수반할 경우
의 값 $S_u(t)$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$S_u(t) = \sum_{i \in R} [P_{dn_i}^u(t) \prod_{\substack{j \in R \\ j \neq i}} P_{up_j}^u(t) Q_i(t)] \quad (42)$$

단, $P_{dn_i}^u(t) \in \{P_{dn_i}^a, P_{dn_i}^c(t), P_{dn_i}^u(t)\}$
 $P_{up_j}^u(t) \in \{P_{up_j}^b, P_{up_j}^c(t), P_{up_j}^u(t)\}$

5. 事例研究

본 研究에서 提案한 短期發電計劃 算法의 効用性
을 立證하기 위해 그림 3과 같은 6機 21母線系統

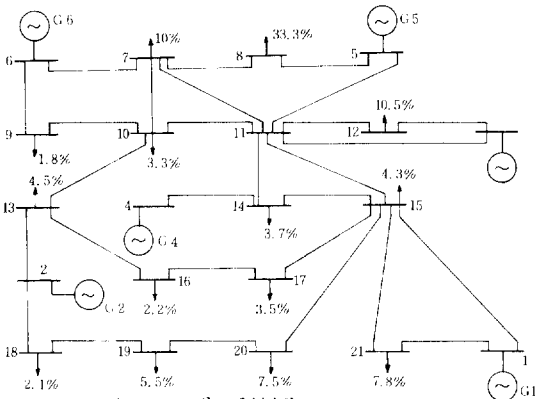


그림 3. 모델 系統圖

Fig. 3. Model power system.

의 日間發電計劃에 적용하고, 그 結果를 檢討 및
提示하였다.

그림 3에서 %값으로 표시한 것은 각 母線의 負
荷比率을 나타낸 것이다.

표 2. 線路特性定數

Table 2. Characteristic parameters of transmission lines.

선로 번호	시작 모선	끝 모선	리액턴스 (Ω)	용량 한계
1	1	15	.14990	16.
2	1	21	.02360	16.
3	2	13	.13040	32.
4	2	18	.21850	32.
5	3	11	.05990	32.
6	3	12	.20000	32.
7	4	14	.20800	65.
8	5	8	.11600	32.
9	5	11	.08200	32.
10	6	7	.05750	145.
11	6	9	.18520	65.
12	7	8	.19830	65.
13	7	10	.17370	65.
14	7	11	.17630	65.
15	9	10	.03790	65.
16	10	11	.04140	65.
17	10	13	.25600	45.
18	11	12	.04200	32.
19	11	14	.20800	60.
20	11	15	.55600	32.
21	13	16	.19870	32.
22	14	15	.11000	65.
23	15	17	.08450	16.
24	15	20	.20900	32.
25	15	21	.07490	32.
26	16	17	.19320	16.
27	18	19	.12920	32.
28	19	20	.06800	32.

또한 표 1은 發電機의 特性定數를, 표 2는 線路定數를 각각 나타낸 것이고, 표 3은 發電機의 起動停止計劃 結果를 나타낸 것이다.

표 3의 狀態持續時間中 負로 표시된 값은 發電機의 停止持續時間을, 正으로 표시된 값은 運轉持續時間을 의미한다.

표 4는 送電線路의 容量限界를 고려하기 前後의 最適計劃에 대한 線路潮流 狀態를 比較하기 위해, 尖頭負荷 時間帶(10時, 負荷 355MW)의 潮流計算 結果를 나타낸 것이다.

표 4에서 알 수 있는 바와 같이 線路容量限界를 고려하지 않을 경우 尖頭負荷 時間帶에서 4번, 17번, 26번 線路에 過負荷가 생기고, 線路容量 制約을 고려한 후에는 過負荷가 解消되었다.

따라서, 電力系統의 安全運用과 供給信賴度 向上 등을 위해서는 發電計劃을 樹立하는 過程에서 線路의 容量限界까지를 고려하는 것이 보다 바람직하

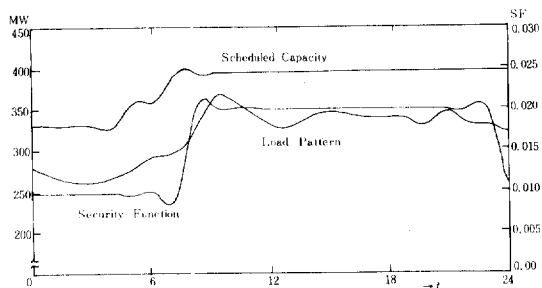


그림 4. 計劃容量과 security function의 推移
Fig. 4. Transition of security function and scheduled capacity.

다는 것을 알 수 있다.

표 5는 線路容量 制約을 고려하기 前後의 각 發電機의 出力配分값을 나타낸 것이다.

그림 4는 系統負荷와 計劃容量 및 Security function의 推移를 나타낸 것이다.

표 3. 發電機 起動停止計劃 結果

Table 3. Results of unit commitment.

時間	負荷	容量	起動費	停止費	燃料費	λ	SF	狀態 持續 時間			
1	281.	330.	0.	0.	8600.	41.81	.009801	-5.	-5.	-5.	5.
2	270.	330.	0.	0.	8132.	38.50	.009812	-6.	-6.	-6.	6.
3	262.	330.	0.	0.	7821.	37.98	.009811	-7.	-7.	-7.	7.
4	263.	330.	0.	0.	7858.	38.05	.009810	-8.	-8.	-8.	8.
5	270.	330.	44.	0.	8132.	38.50	.009809	-9.	-9.	-9.	9.
6	280.	360.	0.	0.	8544.	38.50	.009535	-10.	0.	-10.	10.
7	295.	360.	44.	0.	9194.	41.42	.009803	-11.	1.	-11.	11.
8	300.	395.	0.	0.	9444.	39.54	.009522	-12.	2.	0.	12.
9	329.	395.	0.	0.	10729.	42.28	.020132	-13.	3.	1.	13.
10	355.	395.	0.	0.	12201.	46.28	.020214	-14.	4.	2.	14.
11	350.	395.	0.	0.	12101.	45.27	.020145	-15.	5.	3.	15.
12	340.	395.	0.	0.	11828.	43.36	.0200086	-16.	6.	4.	16.
13	327.	395.	0.	0.	10630.	42.09	.020071	-17.	7.	5.	17.
14	343.	395.	0.	0.	11654.	42.75	.020056	-18.	8.	6.	18.
15	345.	395.	0.	0.	11979.	44.33	.020042	-19.	9.	7.	19.
16	344.	395.	0.	0.	11948.	44.14	.020027	-20.	10.	8.	20.
17	340.	395.	0.	0.	11828.	43.36	.020013	-21.	11.	9.	21.
18	338.	395.	0.	0.	11771.	43.13	.019999	-22.	12.	10.	22.
19	339.	395.	0.	0.	11799.	43.22	.019986	-23.	13.	11.	23.
20	329.	395.	0.	0.	10729.	42.28	.019972	-24.	14.	12.	24.
21	346.	395.	0.	0.	12010.	44.53	.020027	-25.	15.	13.	25.
22	332.	395.	0.	0.	11554.	42.56	.019946	-26.	16.	14.	26.
23	329.	395.	0.	0.	10729.	42.28	.019933	-27.	17.	15.	27.
24	320.	395.	0.	0.	10327.	41.43	.009688	-28.	18.	16.	28.

표 4. 尖頭負荷時의 潮流計算 結果

Table 4. Results of load flow calculation for peak load.

線路 番號	시작 母線	끝 母線	리액턴스 (Ω)	線路 潮流		容量 限界	線路 番號	시작 母線	끝 母線	리액턴스 (Ω)	線路 潮流		容量 限界
				前	後						前	後	
1	1	15	.14990	-8.	-9.	16.	15	9	10	.03790	50.	49.	65.
2	1	21	.02360	8.	9.	16.	16	10	11	.04140	11.	24.	65.
3	2	13	.13040	-8.	-1.	32.	17	10	13	.25600	51.	35.	45.
4	2	18	.21850	36.	31.	32.	18	11	12	.04200	26.	26.	32.
5	3	11	.05990	23.	23.	32.	19	11	14	.20800	26.	38.	65.
6	3	12	.20000	12.	12.	32.	20	11	15	.55600	18.	24.	32.
7	4	14	.20800	27.	24.	65.	21	13	16	.19870	26.	18.	32.
8	5	8	.11600	65.	65.	65.	22	14	15	.11000	40.	48.	65.
9	5	11	.08200	11.	13.	32.	23	15	17	.08450	-5.	3.	16.
10	6	7	.05750	143.	144.	145.	24	15	20	.20900	19.	24.	32.
11	6	9	.18520	57.	56.	65.	25	15	21	.07490	19.	20.	32.
12	7	8	.19830	57.	57.	65.	26	16	17	.19320	18.	10.	16.
13	7	10	.17370	24.	22.	65.	27	18	19	.12920	28.	23.	32.
14	7	11	.17630	26.	28.	65.	28	19	20	.06800	8.	3.	32.

표 5. 發電機의 負荷分担結果

Table 5. Load sharing results of generating units.

發電機 時間	UTO1		UTO2		UTO3		UTO4		UTO5		UTO6		負荷
	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	
1	0	0	0	0	0	0	22	15	59	66	200	200	281
2	0	0	0	0	0	0	20	15	50	55	200	200	270
3	0	0	0	0	0	0	20	15	48	47	194	200	262
4	0	0	0	0	0	0	20	15	49	48	195	200	263
5	0	0	0	0	0	0	20	15	50	55	200	200	270
6	0	0	0	10	0	0	22	15	58	55	200	200	280
7	0	0	15	10	0	0	22	15	58	70	200	200	295
8	0	0	17	10	0	10	23	15	60	65	200	200	300
9	0	0	17	10	30	10	23	29	60	80	200	200	329
10	0	0	28	30	35	35	27	24	64	66	200	200	355
11	0	0	24	10	35	35	26	50	65	55	200	200	350
12	0	0	19	30	35	35	24	50	63	26	200	199	340
13	0	0	17	10	29	10	23	27	59	80	200	200	327
14	0	0	18	30	32	35	23	50	61	20	200	199	334
15	0	0	21	30	35	35	24	50	65	31	200	199	345
16	0	0	20	30	35	35	24	50	65	30	200	199	344
17	0	0	19	30	35	35	24	50	63	26	200	199	340
18	0	0	18	30	34	35	23	50	62	24	200	199	338
19	0	0	19	30	35	35	23	50	62	25	200	199	339
20	0	0	17	10	30	10	23	29	60	80	200	200	329
21	0	0	21	30	35	35	24	50	66	32	200	199	346
22	0	0	17	27	31	35	23	50	61	20	200	200	332
23	0	0	17	10	30	10	23	29	60	80	200	200	329
24	0	0	15	10	25	10	22	20	58	80	200	200	320

6. 結 論

본 研究에서는 電力系統의 運用合理化를 위한 方案의 일환으로 効果적인 短期 發電計劃 算法을 提案하고, 事例研究를 통하여 그 効用성을 立證하였으며, 研究結果를 要約하면 다음과 같다.

1) 動的計劃法에 의한 解過程中에 線型計劃法을 導入하여 線路의 容量限界를 보다 合理的으로 고려함으로써 解의 最適성을 保障하면서 電力系統의 安全運用에 기여할 수 있는 算法이 되게하였다.

2) 算法의 實用性 提高를 위해 起動停止對象 發電機의 最小運轉時間 및 最小停止時間, 日間 起動可能 回數, 同一 母線에서 同時 起動possible한 發電機 台數, 時變 起動費用 및 一定 停止費用, 運轉豫備力 등 실제 電力系統 運用時 制約이 되는 事項들을 충분히 고려하였다.

3) 發電系統의 信賴度指標로 도입한 安定性 函數의 合理的인 算定을 위하여 正規分布의 7分割近似를 이용한 方法을 提案·適用하였다.

4) 본 研究는 母線別 需要豫測이 可能하다는 前提에 이루어진 것이므로 이를 위한 算法의 개발이 요구되며, 發電計劃 樹立時 系統의 想定事故을 고려하는 문제들은 추후 研究課題로 남는다.

참 고 문 헌

- 1) D.P. Bertsekas, G.S. Lauer, N.R. Sandell, T.A. Posbergh, "Optimal Short-Term Scheduling of Large-Scale Power Systems", IEEE Trans, Vol. AC-28, No.1, pp.1~11, 1983.
- 2) J.J. Shaw, D.P. Bertsekas, "Optimal Scheduling of Large Hydrothermal Power Systems", IEEE Trans, Vol. PAS-104, No.2, pp.286~293, 1985.
- 3) M.F. Zaghlool, F.C. Trutt, "Efficient Methods for Optimal Scheduling of Fixed Head Hydrothermal Power Systems", IEEE PES Summer Meeting Paper, SM 317-2, 1986.
- 4) 金俊鉉, 劉仁根, "發電系統의 信賴性を 고려한 發電機 並列台數 決定에 관한 研究", 電氣學會論文誌, Vol. 33, No.10, pp.387~395, 1984.
- 5) 金俊鉉, 劉仁根, "電力系統의 最適發電機 起動停止計劃算法에 관한 研究", 電氣學會論文誌, Vol. 34, No.6, pp.220~229, 1985.
- 6) R. Billinton, R.N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press,

New York, 1984.

- 7) S. Yamashiro, "A scheduling Method for Power System Operation using a Short-range Reliability Index", JIEE, Vol.95-B, No.9, pp.447~452, 1975.
- 8) M.S. Bagaraa, J.J. Jarvis, "Linear Programming and Network Flows", John Wiley & Sons, New York, 1977.
- 9) R. Bellman, "Dynamic Programming", Princeton University Press, 1957.
- 10) 新田目 倭進, "電力系統技術計算の基礎", 電氣書院, 1980.

附 錄

發電機의 狀態確率 算定

1. 2 狀態 모델

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_1(t) \\ \dot{P}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\eta & \mu \\ \eta & -\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

단, $\eta = 1/\text{平均 運轉持續時間(事故發生率)}$

$\mu = 1/\text{平均 事故持續時間(復舊率)}$

$P_1(t)$: 時刻 t 에서 發電機가 運轉狀態에 있을 確率

$P_2(t)$: 時刻 t 에서 發電機가 事故停止狀態에 있을 確率

$\dot{P}_1(t), \dot{P}_2(t)$ 는 각각 $P_1(t)$ 및 $P_2(t)$ 의 도함수

식 (1)을 $P_1(t), P_2(t)$ 에 대해 풀면

$$P_1(t) = \frac{\mu}{\eta + \mu} [P_1(0) + P_2(0)] + \frac{e^{-(\eta + \mu)t}}{\eta + \mu} [\eta P_1(0) - \mu P_2(0)] \quad (2)$$

$$P_2(t) = \frac{\eta}{\eta + \mu} [P_1(0) + P_2(0)] + \frac{e^{-(\eta + \mu)t}}{\eta + \mu} [\mu P_2(0) - \eta P_1(0)] \quad (3)$$

여기에 初期條件 $P(0) = [1 \ 0]$ 를 代입하여 정리하면

$$P_{\omega_i}^c(t) (P_1(t)) = \frac{\mu_i + \eta e^{-\mu_i + \mu_i t}}{\mu_i + \eta_i} \quad (4)$$

$$P_{\omega_i}^c(t) (P_2(t)) = \frac{\eta_i [1 - e^{-\mu_i + \eta_i t}]}{\mu_i + \eta_i} \quad (5)$$

와 같이 된다.

또한 基底負荷用 發電機에 대해서는 $t = \infty$ 로 적

용할 수 있으며, 따라서

$$P_{wp_i}^b = P_{wp_i}^c(t) |_{t \rightarrow \infty} = \frac{\mu_i}{\mu_i + \eta_i} \quad (6)$$

$$P_{an_i}^b = P_{an_i}^c(t) |_{t \rightarrow \infty} = \frac{\eta_i}{\mu_i + \eta_i} \quad (7)$$

로 된다.

2. 3 狀態 모델

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_1(t) \\ \dot{P}_2(t) \\ \dot{P}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\eta & \mu & \gamma \\ \eta & -\mu & \delta \\ 0 & 0 & -(\nu + \delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{初期條件 } P(0) = [0 \ 0 \ 1] \quad (9)$$

단, ν : 起動成功率

δ : 起動失敗率

식 (8)의 解를 구하면 다음과 같이 된다.

$$P_1(t) = \frac{\mu(\nu + \delta)}{ab} + \frac{\mu(\gamma + \delta) - a\gamma}{a(a-b)} e^{-at} - \frac{\mu(\gamma + \delta) - b\gamma}{b(a-b)} e^{-bt} \quad (10)$$

$$P_2(t) = \frac{\eta(\gamma + \delta)}{ab} + \frac{\eta(\gamma + \delta) - a\gamma}{a(a-b)} e^{-at} - \frac{\eta(\gamma + \delta) - b\gamma}{b(a-b)} e^{-bt} \quad (11)$$

$$P_3(t) = e^{-(\nu + \delta)t} \quad (12)$$

여기서,

$$a = \frac{1}{2} \{ (\eta + \mu + \gamma + \delta) + [(\eta + \mu + \gamma + \delta)^2 - 4(\eta\gamma + \gamma\delta + \mu\gamma + \mu\delta)]^{1/2} \} \quad (13)$$

$$b = \frac{1}{2} \{ (\eta + \mu + \gamma + \delta) - [(\eta + \mu + \gamma + \delta)^2 - 4(\eta\gamma + \gamma\delta + \mu\gamma + \mu\delta)]^{1/2} \} \quad (14)$$

따라서, 時刻 t 에서 起動되는 發電機가 運轉狀態에 있을 確率 $P_{wp_i}^u(t)$ 와 事故停止狀態에 있을 確率 $P_{an_i}^u(t)$ 는 각각 다음과 같이 표현할 수 있고

$$P_{wp_i}^u(t) = \frac{\mu_i(\gamma_i + \delta_i)}{a_i b_i} + \frac{\mu_i(\gamma_i + \delta_i) - a_i \gamma_i}{a_i(a_i - b_i)} e^{-a_i t} - \frac{\mu_i(\gamma_i + \delta_i) - b_i \gamma_i}{b_i(a_i - b_i)} e^{-b_i t} + e^{-(\nu_i + \delta_i)t} \quad (15)$$

$$P_{an_i}^u(t) = \frac{\eta_i(\gamma_i + \delta_i)}{a_i b_i} + \frac{\eta_i(\gamma_i + \delta_i) - a_i \gamma_i}{a_i(a_i - b_i)} e^{-a_i t} - \frac{\eta_i(\gamma_i + \delta_i) - b_i \gamma_i}{b_i(a_i - b_i)} e^{-b_i t} \quad (16)$$

식 (4) ~ (7), (15) (16)으로 해당 發電機의 狀態確率을 計算하여 Security function을 算定하게 된다.