

金 俊 鉉 : 漢陽大學校

劉 仁 根 : 韓國電氣研究所

孫 洪 寬<sup>†</sup>: 漢陽大學校

### 1. 序 論

發電計劃은 電力系統 最適運用的 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, 稼動狀態等 環境의 變化에 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.

특히 近年 經濟의 持續的인 成長과 國民生活 水準의 向上등으로 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 推進됨으로써 電力系統은 더욱 大規模化되고 負荷率도 점차 낮아질 前景이며, 發電所 用地 確保 및 經濟性 提高등을 위하여 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 占有率이 높아짐으로써 輕負荷時 中間 및 尖頭負荷用 設備의 運用 合理化가 重要한 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 충분히 고려할 수 있는 運用計劃 算法의 開發이 必須的이며 이分野에 대한 研究가 꾸준히 進行되고있다.<sup>(1)</sup>

筆者等은 이점에 主目하여 發電系統의 信賴性和 送電線路의 容量限界를 고려할 수 있는 算法을 發表한 바 있<sup>(2)</sup>으며, 이 때 發電機의 信賴度指標로 Security function을 導入하였다. 그런데 文獻 (2)에서는 sf의 算定時 發電機 出力의 大小에 관계없이 모든 發電機를 同一하게 취급하고, 動的計劃法에 의한 起動停止計劃 樹立時 線路 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 問題點을 내포하고있다.

本 研究에서는 이러한 問題點을 補充하기위해 正規分布의 7分割近似<sup>(3)</sup>를 이용하여 各 發電機의 出力水準에 따른 確率값을 導出, 適用하고 動的計劃法에 의한 解過程中에 線型計劃法을 導入하여 各개의 組合에대한 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 效用性을 立證하였다.

### 2. 問題의 設定

發電計劃은 一般的으로

- 1) 系統需要의 豫測
- 2) 發電機 起動停止 計劃
- 3) 經濟給電

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

- 1) 系統負荷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-derated)만을 考慮하고 同時에 2機以上の 事故停止는 무시한다.
- 4) 運轉豫備力은 等價負荷로 취급하며, 送電損失은 무시한다.
- 5) 送電線路의 容量限界는 安定裕度를 30%로 하여 算定한 값을 사용한다.

6) 有效電力 配分만을 다룬다.

2-1 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 動的計畵法에 의한 最小化 目的函數는 다음과 같이 표현 할수 있다.

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

여기서,

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

$$\text{단, } C_T(j, k) = (C_T^a(j, k), C_T^b(j, k), C_T^c(j, k))$$

: Transition cost

$$C_P(j, k) = (C_P^a(j, k), C_P^b(j, k), C_P^c(j, k),$$

$$C_P^d(j, k), C_P^e(j, k))$$

: Penalty cost

$j$ : 決定變數(時刻  $t-1$ 에서의 最速決定)

$k$ : 時刻  $t$ 에서의 狀態集合

이제 時刻  $t$  狀態  $k$ 에서의 發電機 組合을  ${}^tU^k$ 라 하고, 時刻  $t-1$  狀態  $j$ 에서의 組合을  ${}^{t-1}U^j$ 라 하면, 時刻  $t$  狀態  $k$ 까지의 總 運轉費用은

$$\Phi_t^k({}^{t-1}U^j, {}^tU^k) = \sum_{i \in R} f_i(P_i^t) + \sum_{i \in R} SC_i^t(Z_i^t) + \sum_{i \in R} PC_i^t + P_2^t({}^tU^k) + P_2^t(Z_2) + P_2^t(Z_2) + P_2^t(\pi) + E_{t-1}({}^{t-1}U^j) \quad (3)$$

$$\text{단, } t \in T, j \in 2^A, k \in 2^A$$

로 된다. (식 (3)의 각 項에 대한 內容은 文獻 (2) 참조) 따라서, 식 (3)을  $({}^{t-1}U^j)$ 에 대해 最小化 하면

$$F_t^k({}^tU^k) = \min \{ \Phi_t^k({}^{t-1}U^j, {}^tU^k) \} ; t \in T \quad (4)$$

로 되고, 식 (4)는 考察對象 系統의 運轉制約을 만족하는 最小化 目的函數이며, 식 (3)과(4)의 漸化式을 풀어서 初期段階로 부터 最終段階의 여러組合에 도달하기 까지의 最小費用이 소요되는 計劃을 選擇한다.

3. 最速狀態의 決定

식 (3)의 右邊 第 1項으로 表現되는 各 狀態의 發電 費用  $\sum_{i \in R} f_i(P_i^t)$ 를 決定하기 위해 線型計畵法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 最小費用과 各 發電機의 出力狀態를 決定한다.

$$\text{最小化 : } \sum_{i \in R} f_i(P_i^t) \quad (5)$$

$$\text{制約條件: } P_i^{\min} \leq P_i^t \leq P_i^{\max} \quad (6)$$

$$-P_L^{\max} \leq P_L^t \leq P_L^{\max} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in R} P_i^t - P_D - P_R = 0 \quad (8)$$

여기서, 식 (6)은 發電機 出力의 上下限制約을, 식 (7)은 線路의 容量限界를, 식 (8)은 電力需給條件을 각각 나타 낸 것이다.

첫 식에 線型計畵法을 적용하기 위해서는 目的函數와 制約條件의 線型化가 必要하므로, 發電費用을 出力의 2次 式으로 假定하여 그림 1과 같이 Piecewise 線型化하고, 送電容量限界式은 直流法을 利用하여 線型化하였다.

3-1 目的函數의 線型化

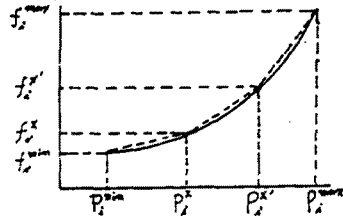


그림 1. 發電機의 燃料費 特性

$$f_i(P_i^t) = \alpha_i + \beta_i P_i^t + \gamma_i (P_i^t)^2 ; i \in R \quad (9)$$

식 (9)로 表現되는 燃料費 特性을 利用하여, 等增分燃料費法에 의해 初期可能解를 求하고, 이때의 出力을 根據로 係數行列  $K$ 를 다음 식으로 算定한다.

$$K = \begin{bmatrix} (f_2^4 - f_2^3) / (P_2^4 - P_2^3) & , P_2^{\min} \leq P_2^t \leq P_2^3 \\ (f_2^3 - f_2^2) / (P_2^3 - P_2^2) & , P_2^2 \leq P_2^t \leq P_2^3 \\ (f_2^2 - f_2^1) / (P_2^2 - P_2^1) & , P_2^1 \leq P_2^t \leq P_2^2 \end{bmatrix} T \quad (10)$$

$$\text{단, } f_2^i(P_2^i) = \alpha_i + \beta_i P_2^i + \gamma_i (P_2^i)^2$$

$$g \in \{ \min, x, x', \max \}$$

3-2 線路容量制約의 線型化

直流法에 의한 각 母線電力과 線路潮流의 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$P = C P_L \tag{11}$$

여기서, P ; 母線電力 Vector

C ; Node-branch 接續行列

$P_L$  ; 線路潮流 Vector

또한, 식 (11)의  $P_L$  은

$$P_L = Y_B C^T \delta \tag{12}$$

로 표현되고,  $\delta = Z P$ 의 관계로 부터

$$P_L = Y_B C^T Z P \tag{13}$$

또는

$$P_L = A P, \quad A = Y_B C^T Z \tag{14}$$

를 얻는다. 따라서 식 (7)은

$$-P_L^{max} \leq A P \leq P_L^{max} \tag{15}$$

와 같이 線型制約式으로 표현할 수 있다.

식 (5)의 最小化問題는 Revised Simplex Method로 解를 구하였다.

4. Security Function의 算定

本 研究에서 導入한 系統의 短期間 信賴度指標 S(t)는 다음과 같이 표현된다.

$$S(t) = \sum P_L(t) Q_L(t) \tag{16}$$

이 때  $Q_L(t)$ 는, 濼測負荷를 一定한 것으로 假定할 경우 1 또는 0의 값을 갖지만, 發電機의 容量이 多樣하므로 모든 경우에 같은 값을 適用하는 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하였다.

Probability Given by Indicated Area

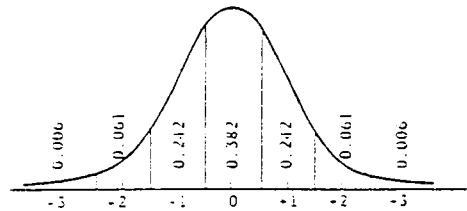


그림 2. 正規分布의 7分割近似

$$\Delta P_i^k = P_i^k - \sum_{j \in R, j \neq i} P_j^{max} \quad ; i \in R \tag{17}$$

여기서,  $\Delta P_i^k$ : 系統負荷와 運轉中인 發電機의 最大出力의 偏差量

식 (17)의 平均値를  $\Delta P_m$  이라하면

$$\Delta P_m = \frac{1}{n} \sum_{k \in R} |\Delta P_i^k| \tag{18}$$

단, n; 狀態 k를 構成하는 發電機 臺數

와 같이되고,  $Q_L(t)$ 는

$$Q_L(t) = \sum_{d=-3}^{+3} q_d P_L^d \tag{19}$$

여기서, d ; 區間(-3, -1, 0, +1, +3)

$P_L^d$  ; 區間 d의 確率

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

단,  $\Delta P_m^d$  ; 區間 d의 期待値

5. 事例研究

本 研究에서 提案한 短期 發電計劃 算法의 效用性을 立證하기 위해 그림 3과 같은 3機 6母線系統의 日間發電計劃에 適用하고, 그 結果를 檢討 및 提示하였다.

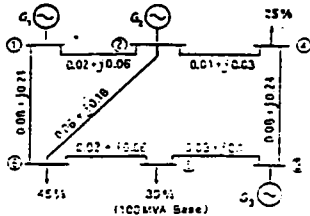


그림 3. 모델系統圖

표 1은 發電機의 特性定數를, 표 2는 線路容量 限界를 考慮하기 前後의 各 時間帶의 發電機出力을 나타낸 것이며, 표 3은 線路 過負荷가 헤스된 것을 보이기 위한 一例로서 10時(395MW)의 潮流計算 結果를 나타낸 것이다.

표 1. 發電機 特性定數

發電機 No.	燃料費特性			出力(MW)	
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	PMIN	PMAX
G1	15.3	1.48	.00326	25.	75.
G2	13.7	1.30	.00263	40.	125.
G3	10.3	1.07	.00105	80.	225.

표 3. 潮流計算結果(10時)

線路番號	시작	끝	$X_L$	潮流	線路容量
1	1	2	.06	9. (18.)	30.
2	1	6	.24	52. (57.)	100.
3	2	4	.03	52. (60.)	90.
4	2	6	.18	66. (70.)	90.
5	3	4	.24	46. (39.)	100.
6	3	5	.10	176. (170.)	170.
7	5	6	.06	60. (51.)	80.

( )는 容量限界를 考慮한 경우

표 2. 發電機出力

No. 時間	G1		G2		G3		負荷
	前	後	前	後	前	後	
1	0.	0.	56.	56.	225.	225.	281.
2	0.	0.	46.	45.	224.	225.	270.
3	0.	0.	44.	40.	218.	222.	262.
4	0.	0.	44.	40.	219.	223.	263.
5	0.	0.	46.	45.	224.	225.	270.
6	0.	0.	55.	55.	225.	225.	280.
7	0.	0.	70.	70.	225.	225.	295.
8	0.	0.	95.	95.	225.	225.	320.
9	45.	25.	89.	116.	225.	218.	359.
10	61.	75.	109.	111.	225.	209.	395.
11	52.	75.	98.	84.	225.	216.	375.
12	45.	25.	90.	118.	225.	217.	360.
13	35.	72.	77.	40.	225.	225.	337.
14	33.	69.	76.	40.	225.	225.	334.
15	43.	25.	87.	111.	225.	219.	355.
16	38.	75.	81.	44.	225.	225.	344.
17	36.	75.	79.	40.	225.	225.	340.
18	35.	73.	78.	40.	225.	225.	338.
19	36.	74.	78.	40.	225.	225.	339.
20	0.	0.	104.	104.	225.	225.	329.
21	0.	0.	95.	95.	225.	225.	320.
22	0.	0.	85.	85.	225.	225.	310.
23	0.	0.	75.	75.	225.	225.	300.
24	0.	0.	65.	65.	225.	225.	290.

6. 結論

電力系統 運用合理化 方案의 一環으로 效果의인 短期 發電計劃 算法을 提案하고, 事例研究를 통하여 그 效用性을 立證하였다.

參考文獻

1. J.J.Shaw, D.P.Bertsekas, "Optimal Scheduling of Large Hydrothermal Power Systems", IEEE Trans., Vol. PAS-104, No.2, pp.286-293, 1985
2. 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
3. R.Billinton, R.N.Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, New York, 1984
4. 山城 也, "直流法による 電力潮流 最適化", 日本電氣學會 論文誌, Vol.97-B, No.11, 1977