

一次エネルギーの供給制約及び環境規制を考慮した 電力系統の最適運用計画 (第1報)*

中村 陽 一**
山城 迪**

(昭和55年9月30日受理)

Optimum Operation Scheduling under Constrained Supply of a Primal Energy and Constrained Environmental Pollution (Part 1)

by Yoichi NAKAMURA and Susumu YAMASHIRO

Recently, there are many anxious news about problem of stabilizing the supply of primal energy (the fuel for thermal power stations). In addition, power system is required clean operation. Therefore, we report the optimum operation scheduling method such that the total fuel consumption is less than the fuel supply, the total NO_2 emission is less than the constrained emission, and that operation becomes economically. In our method, for easy calculation, we introduce two assumptions and approximate calculations. The first approximation is that the optimum start-up and shut-down pattern of thermal units is determined in disregard for lower and upper power limits of each unit. The second approximation is that Lagrange's multipliers are little change when one unit shuts-down for a single time interval from any operating pattern. We show the appropriateness of our method by applying it to a model system. We also show the appropriateness of our approximation by model system calculations.

1. ま え が き

電力系統の運用についてその安定供給が当然のこととして要求されている一方で、良質燃料の低廉確保が次第に困難な状況になりつつある。また、一次エネルギー(火力発電所の燃料)の多様化が推進されている一方で、環境保全も強く求められている、というのが現状である。そこで、本論では電力系統において従来行われてきた経済運用に対して、新たな運用方式、すなわち各燃料供給制約及び環境規制(NO_2 累積排出量制約)を考慮し、しかも経済的な運用方式について検討を行う。

* 電気四学会北海道支部連合大会で一部発表(1980-9)

** 北見工業大学電気工学科

一般に、最適化問題においては制約項が増加するに従い計算量が増加し、本論のような非線形問題ではこの傾向はさらに著しくなる。そこで、本論では適当な仮定を設けることにより近似計算を行い、近似的な最適運用を求めることにする。この近似計算は一部の計算で各発電機の出力上下制限約を無視し、出力一増分燃料費特性が純粋に線形であるとする部分と（従来、この特性は折れ線で扱われていた）、燃料供給制約とNO₂排出量制約に対するラグランジュ乗数が1台、1回程度の発電機の起動停止変更ではほとんど変化しない、とする部分から成っている。なお、本手法は最後にモデル系統に対して適用されその有効性が確認される。また、燃料供給制約及びNO₂排出量制約がない場合について、この近似解法と従来の厳密な計算法による場合とを比較し、本論で設けた仮定及び近似計算が充分有効であることを示す。

2. 目的関数

日時間を N 時間帯に分割し、系統は M 台の火力発電機により構成されるものとする。第 n 時間帯における第 m 号機の出力を g_m^n とすると、運転費 f_m^n は(1)式で表わすことができる。

$$f_m^n = \begin{cases} a_m + b_m \cdot g_m^n + c_m \cdot (g_m^n)^2 & (g_m \leq g_m^n \leq \bar{g}_m) \\ fS_m & (g_m^n = 0) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 a_m , b_m , c_m は発電機定数であり、 fS_m は起動費¹⁾である。また、 g_m , \bar{g}_m は第 m 号機の運転可能範囲を示す。次に、第 n 時間帯における第 m 号機のNO₂排出量を y_m^n 、燃料消費量を r_m^n とすると(2), (3)式で表わすことができる^{2),3)}。

$$y_m^n = \alpha_m \cdot f_m^n \quad (2)$$

$$r_m^n = \beta_m \cdot f_m^n \quad (3)$$

ここで、 α_m , β_m は発電機定数である。NO₂累積排出量制約を Y 、燃料供給制約を R とし、第 n 時間帯の系統負荷を P^n とし送電損失を無視するならば(4)式の目的関数が得られる。

$$\phi = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^n + \sum_{n=1}^N \lambda^n \cdot \left(P^n - \sum_{m=1}^M g_m^n \right) + \mu_Y \cdot \left(Y - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_m^n \right) + \mu_R \cdot \left(R - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M r_m^n \right) \quad (4)$$

ここで、 λ^n , μ_Y , μ_R はラグランジュの未定乗数である。従って、起動停止パターンが与えられるならば、 $Y \geq \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_m^n$, $R \geq \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M r_m^n$ の下で(4)式を最小化し、その起動停止パターンにおける最適運用を得ることができる。

3. 最適起動停止パターンによる最適運用の決定

計算の簡単化のため、次のことを仮定する。

[仮定1] 第 n 時間帯である発電機を解列したときの総運転費の変化量において、その変化量を最大（または、最小）にするような発電機は、各発電機の出力上下制限約を無視して求めることができる。

[仮定2] ある火力発電機起動停止パターンに Y, R の制約を満足する運用を与える μ_Y, μ_R と、そのパターンから第 n 時間帯の第 m 号機を解列し、かつ Y, R の制約を満足する運用を与える μ_Y, μ_R は、ほぼ等しい。

ある起動停止パターンにおける最適運用が得られたとき、第 n 時間帯で第 m 号機が並列しており、(5) 式を満足しているならば (6) 式より (7) 式が得られる。

$$g_m < g_m^n < \bar{g}_m \tag{5}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial g_m^n} = (1 - \mu_Y \cdot \alpha_m - \mu_R \cdot \beta_m) \cdot \frac{df_m^n}{dg_m^n} - \lambda^n = 0 \tag{6}$$

$$g_m^n = \frac{\lambda^n}{2 \cdot c_m \cdot (1 - \mu_Y \cdot \alpha_m - \mu_R \cdot \beta_m)} - \frac{b_m}{2 \cdot c_m} \tag{7}$$

この第 m 号機を第 n 時間帯で解列したとき第 l 号機の出力増加分を Δg_l^n とするならば、需給バランスの面から (8) 式が得られる。

$$g_m^n = \sum_{l \neq m} \Delta g_l^n \tag{8}$$

このときの λ^n の増加分を $\Delta \lambda^n$ とすると、第 n 時間帯で第 l 号機が並列しているならば Δg_l は (7) 式より (9) 式となる。

$$\Delta g_l^n = \frac{\Delta \lambda^n}{2 \cdot c_l \cdot (1 - \mu_Y \cdot \alpha_l - \mu_R \cdot \beta_l)} \tag{9}$$

(8) 式と (9) 式から $\Delta \lambda^n$ を消去すると (10) 式が得られる。

$$\Delta g_l^n = \frac{g_m^n}{c_l \cdot (1 - \mu_Y \cdot \alpha_l - \mu_R \cdot \beta_l) \sum_{k \neq m} \frac{1}{c_k \cdot (1 - \mu_Y \cdot \alpha_k - \mu_R \cdot \beta_k)}} \tag{10}$$

第 n 時間帯で第 m 号機を解列する前の第 l 号機の出力が g_l^n であり、解列により Δg_l^n 増加するならば、このときの燃料費の増加量は (1) 式から (11) 式となる。

$$\Delta f_l^n = \Delta g_l^n \cdot b_l + c_l \cdot \left\{ 2 \cdot \Delta g_l^n \cdot g_l^n + (\Delta g_l^n)^2 \right\} \tag{11}$$

(6) 式で述べたように、(5) 式に示された範囲で (7) 式が成り立つ。同様に、(10) 式が成り立つのは (12), (13) 式を満足する場合であるが、燃料費増加量 Δf_l^n を近似的に簡単に求めるために、(11) 式の Δg_l^n は各時間帯で並列しているすべての発電機に対して (10) 式を適用することにする [仮定1]。

$$g_l < g_l^n < \bar{g}_l \tag{12}$$

$$g_l < g_l^n + \Delta g_l^n < \bar{g}_l \tag{13}$$

但し、(11) 式の g_l^n は (7) 式による g_l^n ではなく、各発電機の出力上下限制約の下で最適運用を求めたときの第 n 時間帯における第 l 号機の出力とする。結局、第 n 時間帯で第 m 号機を解列し、かつ需給バランスをとるために起きる総運転費の増加分 ΔF_p は (14) 式となる。

$$\Delta F_p = \sum_{l \neq m} \Delta f_l^n - f_m^n + f S_m \quad (14)$$

ここで、 f_m^n は第 n 時間帯で第 m 号機が解列する前の運転費（燃料費）である。また、この第 n 時間帯の第 m 号機の停止により第 l 号機の出力が Δg_l^n 増加したとき、第 n 時間帯において起きる排出量増加分を ΔY 、燃料消費量増加分を ΔR とすると (15)、(16) 式となる。

$$\Delta Y = \sum_{l \neq m} \alpha_l \cdot \Delta f_l^n - y_m^n \quad (15)$$

$$\Delta R = \sum_{l \neq m} \beta_l \cdot \Delta f_l^n - r_m^n \quad (16)$$

第 n 時間帯で第 m 号機を停止して、なお Y 、 R の制約を満足するためにこの ΔY 、 ΔR を全時間帯で吸収（減少）したときの燃料費増加分 ΔF_Y 、 ΔF_R は (17)、(18) 式となる [仮定 2]。

$$\Delta F_Y = -\mu_Y \cdot \Delta Y \quad \left(\because \partial \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^n / \partial Y = \mu_Y \right)^{\text{付録}} \quad (17)$$

$$\Delta F_R = -\mu_R \cdot \Delta R \quad \left(\because \partial \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^n / \partial R = \mu_R \right) \quad (18)$$

従って、第 n 時間帯で第 m 号機を停止し、かつ Y 、 R の制約を満足するときの累積運転費の増加量 ΔF_m^n は (19) 式となり、最小の累積運転費増加を与える発電機停止は (20) 式の最小化操作により得ることができる。

$$\Delta F_m^n = \Delta F_p + \Delta F_Y + \Delta F_R \quad (19)$$

$$\underline{\Delta F} = \min_{n,m} \left\{ \Delta F_m^n \right\} \quad (20)$$

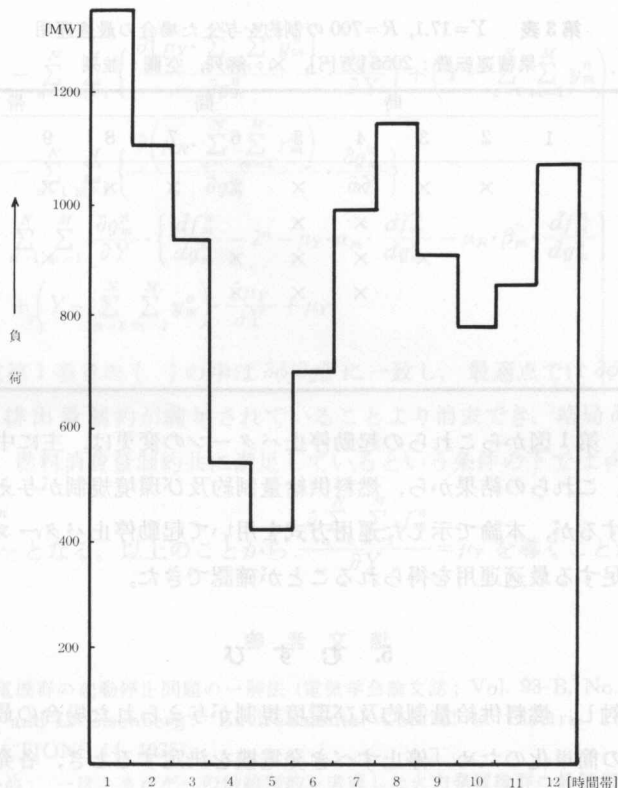
これらのことより、ある起動停止パターンについて (4) 式を最小化し、そのとき得られる g_m^n 、 μ_Y 、 μ_R をもとに (19) 式の ΔF_m^n を求め (20) 式の $\underline{\Delta F}$ を与える発電機を停止し新たな起動停止パターンを得る。このくり返し計算を $\underline{\Delta F}$ が負である限り続けることにより、最適起動停止パターンによる最適運用を求めることができる。

4. モデル系統による試算例

第 1 表に特性を示す 6 台の発電機からなる系統へ第 1 図に示す負荷曲線を与える。最初に、 Y 、 R へ充分大きな値を与えて得られた経済運用を第 2 表に示す。この運用は従来の経済

第 1 表 発電機特性

発電機	a	b	$c[\times 10^{-3}]$	g	\bar{g}	α	β	fS
1	15.652	0.7971	3.153	27	101	2.546	0.0357	2.0
2	25.718	0.7922	0.732	37	232	0.683	0.0294	3.9
3	8.019	0.8201	1.881	27	99	0.774	0.0417	4.6
4	28.058	0.7915	0.372	144	344	0.830	0.0500	6.0
5	18.656	0.7177	0.504	37	236	0.750	0.0278	5.2
6	24.104	0.6800	0.318	144	344	0.937	0.0313	6.0



第1図 負荷曲線

第2表 経済運用

累積運転費：2044 [万円], 累積排出量：17.32 [t], 累積燃料消費量：732.3 [kJ]

×：解列, 空欄：並列

発電機	時間帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2			×	×	×	×	×		×	×	×	
3				×	×	×				×		
4				×	×							
5												
6												

運用決定法¹⁾(発電機のすべての解・並列の組み合わせを考え, それらの組み合わせに対し等増分燃料費則を適用し, 最適運用を求める)により求めた結果に一致し, [仮定1]の妥当性が確認できた。なお, このときの累積運転費は2044 [万円]であり, 必然的に排出されるNO₂累積排出量, 及び燃料消費量はそれぞれ17.32 [t], 732.3 [kJ]であった。次に, Y=17.1 [t], R=700 [kJ]の制約に対する最適運用を第3表に示す。第2表の経済運用と比較して, α, β の比較的小さな第2号機が並列し, α, β の比較的大きな第3, 4号機が解列し, Y, Rの制約を満たしているこ

第3表 Y=17.1, R=700の制約を与えた場合の最適運用
 累積運転費：2056 [万円], ×：解列, 空欄：並列

発 電 機	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2				×	×						×	
3			×	×	×	×			×	×	×	
4				×	×	×				×		
5												
6												

とがわかる。また、第1図からこれらの起動停止パターンの変更は、主に中間負荷で行われていることもわかる。これらの結果から、燃料供給量制約及び環境規制が与えられた場合、若干累積運転費は増加するが、本論で示した運用方式を用いて起動停止パターンを変更することにより、各制約を満足する最適運用を得られることが確認できた。

5. む す び

火力発電所に対し、燃料供給量制約及び環境規制が与えられた場合の最適運用決定法について述べた。計算の簡単化のため「停止すべき発電機を決定するとき、各発電機の出力上下限制約を無視する」「1台、1回程度の起動停止パターンの変更では、各制約項に対するラグランジュ乗数の変化を無視する」という近似計算を導入した。また、モデル系統を用いた試算例により、本手法の有効性を確認した。本論で導入した近似計算について、従来の手法による結果と比較しその妥当性を示した。最後に、本論で述べた運用方式により起動停止パターン及び負荷配分法を変更し、燃料供給制約及び環境規制を満足する運用が得られることを、モデル系統による試算例を用いて示した。なお、本研究は昭和55年度文部省科学研究費補助金(一般研究C)の交付を受けて行ったものである。

終りに、終始貴重な御指導を下された北見工業大学学長小池東一郎博士に深く感謝申し上げます。

付 録⁴⁾

本文(17)式において、 $\partial \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^n / \partial Y = \mu_Y$ が成立することの証明を示す。常に排出量制約が満足されているという条件の下では、Yは $g_m^n (m=1, 2, 3, \dots, M, n=1, 2, 3, \dots, N)$ で表わすことができる。従って次式が得られる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial Y} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\partial \left(\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^n \right)}{\partial g_m^n} \cdot \frac{\partial g_m^n}{\partial Y} \right\} - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\partial \left(\sum_{n=1}^N \lambda^n \sum_{m=1}^M g_m^n \right)}{\partial g_m^n} \cdot \frac{\partial g_m^n}{\partial Y} \right\} + \mu_Y$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\partial \left(\mu_Y \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_m^n \right)}{\partial g_m^n} \cdot \frac{\partial g_m^n}{\partial Y} \right\} + \left(Y - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_m^n \right) \cdot \frac{\partial \mu_Y}{\partial Y} \\
 & - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\partial \left(\mu_R \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M r_m^n \right)}{\partial g_m^n} \cdot \frac{\partial g_m^n}{\partial Y} \right\} \\
 = & \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\partial g_m^n}{\partial Y} \cdot \left\{ \frac{df_m^n}{dg_m^n} - \lambda^n - \mu_Y \cdot \alpha_m \cdot \frac{df_m^n}{dg_m^n} - \mu_R \cdot \beta_m \cdot \frac{df_m^n}{dg_m^n} \right\} \\
 & + \left(Y - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_m^n \right) \cdot \frac{\partial \mu_Y}{\partial Y} + \mu_Y
 \end{aligned}$$

ここで、上式第1項目の{ }の中は $\partial\phi/\partial g_m^n$ に一致し、最適点では $\partial\phi/\partial g_m^n=0$ より消去できる。第2項目も排出量制約が満足されていることより消去でき、結局 $\partial\phi/\partial Y=\mu_Y$ となる。

一方、排出量制約、燃料消費量制約共に満足しているという条件の下では $\phi = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^n$ であり、

$$\frac{\partial\phi}{\partial Y} = \frac{\partial \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^n}{\partial Y} \text{ となる。以上のことから } \frac{\partial \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^n}{\partial Y} = \mu_Y \text{ を導くことができる。}$$

参 考 文 献

- 1) 山城：火力発電機群の起動停止問題の解法 (電気学会論文誌; Vol. 93-B, No. 9, 昭和48年9月).
- 2) J. B. Cadogan and L. Eisenberg: Environmental Control of Electric Power Systems (ISA TRANSACTIONS 14, 1975).
- 3) 山城・中村・小池：一次エネルギーの供給制約を考慮した火力発電機群の最適起動停止計画の決定 (昭和55年電気学会全国大会, 826).
- 4) D. A. Wismer and R. Chattergy: INTRODUCTION TO NONLINEAR OPTIMIZATION (Elsevier North-Holland, Inc., 1978).
- 5) 中村・山城・小池：一次エネルギーの供給制約及び環境規制を考慮した電力系統の最適運用 (第1報) (昭和55年電気四学会北海道支部連合大会, 56).

1. 結 言

長 167 km に及ぶ我国初の直流送電による北海道-本州間の電力送電は、契約的に 800 MW、電圧 250 kV、120 A になる予定である。今後、このような長距離大容量の直流送電に必要の増大を予想して、直流高電圧送電線の実用面での実験的調査が数多く行われ、技術的開発がなされているが未解明の点も多く残されている。その中には誘導電圧降下による電界現象と送電線の絶縁設計の問題があり、直流送電線電圧の異常昇圧の現象が注目される点である。

* 昭和55年4月電気学会全国大会にて一報発表

** 北見工科大学電気工学科