

## 揚水式発電所を含む電力系統の 最適運用計画 (第1報)\*

中村陽一\*\*

山城迪\*\*

(昭和56年9月30日受理)

### Optimum Operation Scheduling of Electric Power System Including the Pumping-up Power Stations (Part 1)

by Yoichi NAKAMURA and Susumu YAMASHIRO

In this paper, we consider the operation of pumping-up power stations such that load factor becomes higher, thermal power stations are operated as economically as possible, and the fuel of thermal power stations is saved. In the first place, we investigate the optimum operation of the power system including a pumping-up power station. In so doing, we consider what is optimum start-up and shut-down for thermal power stations and a pumping-up power station, and how is optimum dispatch to thermal power stations and a pumping-up power station. In the second place, we investigate optimum operation of the power system including some pumping-up power stations. In this time, we consider how is optimum dispatch to pumping-up power stations. Finally, we show the appropriateness of our method by applying it to a model system.

#### 1. まえがき

電力系統の負荷率が年々減少する一方で省エネルギー化が強く求められている。そこで、本論ではエネルギー貯蔵装置としての揚水式発電所の最適運用法について検討する。特に、揚水式発電所及び火力発電所の最適起動停止決定法について検討する。また、電力系統内に2カ所以上の揚水式発電所を含む場合について、各火力発電所及び各揚水式発電所間の最適負荷配分決定法について検討する。最後に、これらの計算手法をモデル系統へ適用し、その有効性を確認する。

#### 2. 揚水式発電所の運転特性

$P_P$ [MW] の電力で揚水運動したとき得られる流量を  $q_P$ [m<sup>3</sup>/s],  $P_G$ [MW] の発電運動に必

\* 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

必要な流量を  $q_A [m^3/s]$  とすると(1), (2)式が得られる<sup>1)</sup>。

$$P_P = q_P/h_P \quad (1)$$

$$P_G = q_G \cdot h_G \quad (2)$$

ここで、 $h_P$ ,  $h_G$  は(3), (4)式から得られる揚水式発電所定数である。

$$h_P = \eta_P \times 1000 / (9.8 \times H_P) \quad (3)$$

$$h_G = \eta_G \times 9.8 \times H_G / 1000 \quad (4)$$

また、 $\eta_P$ ,  $\eta_G$ ,  $H_P$ ,  $H_G$  はそれぞれ(5)～(8)式で与えられるものとする。ただし、貯水池の水位変動は無視できるものとする。

$$\eta_P = (\text{電動機効率}) \times (\text{ポンプ効率}) \quad (5)$$

$$\eta_G = (\text{発電機効率}) \times (\text{水車効率}) \quad (6)$$

$$H_P = (\text{総落差 [m]}) + (\text{揚水運転時の損失水頭 [m]}) \quad (7)$$

$$H_G = (\text{総落差 [m]}) - (\text{発電機運転時の損失水頭 [m]}) \quad (8)$$

### 3. 負荷曲線の離散化

系統負荷をあるきぎ幅  $\Delta P$  で分割し、第  $i$  番目の負荷レベルを  $P^i [\text{MW}]$  とする。すなわち、 $P^i$  は(9)式で与えられる。

$$P^i = i \cdot \Delta P \quad (9)$$

次に、この負荷レベル  $P^i$  の継続時間を  $T^i [\text{h}]$  とする(第1図参照)。なお、同じ負荷レベルが考慮期間内の負荷曲線に2回以上あらわれる場合は、それらの継続時間の合計を  $T^i$  とする。

### 4. 火力分担負荷に対する火力発

#### 電機群の最適運転決定法

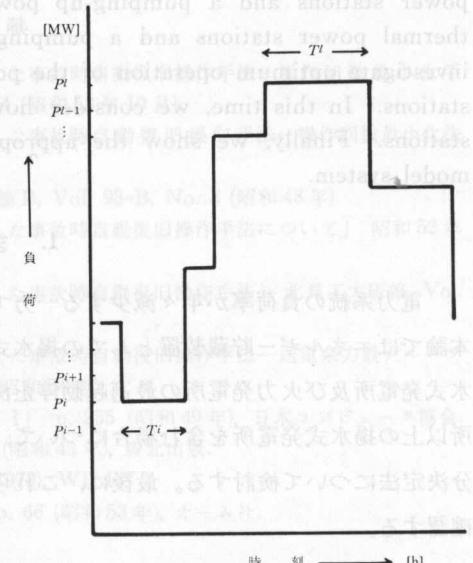
##### —最適並列発電機群による最適

##### 負荷配分法—

系統が  $M$  台の火力発電機により構成されているものとする。火力発電機の出力を  $\Delta P$  の幅で分割し、第  $m$  号機の第  $n$  番目の出力を  $g_m^n [\text{MW}]$  とする。すなわち、 $g_m^n$  は(10)式で与えられる。

$$g_m^n = n \cdot \Delta P \quad (10)$$

このとき、第  $m$  号機の運転費  $f_m(g_m^n)$  は(11)式により得られる。



第1図 負荷曲線の離散化

$$f_m(g_m^n) = \begin{cases} a_m + b_m \cdot g_m^n + c_m \cdot (g_m^n)^2 & (g_m \leq g_m^n \leq \bar{g}_m) \\ fS_m & (g_m^n = 0) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 $a_m, b_m, c_m$  は発電機定数であり、 $fS_m$  は起動費<sup>2)</sup>である。また、 $g_m, \bar{g}_m$  は第  $m$  号機の出力上下限制約を示し、 $g_m^n$  が(11)式に示された範囲に含まれない場合は実現不可能ということで、充分大きなペナルティコスト ( $\infty$ ) を与えることとする。

火力分担負荷  $P^i$  に対し、第1号機から第  $m$  号機までの  $m$  台の発電機で解・並列を考慮して最適並列発電機群を求め、そのときの  $m$  台の発電機の運転費の合計を  $_m F(P^n)$  [千円/時] で表わすと(14)式の漸化式を解いて得ることができる<sup>3)</sup>。ただし、(12), (13)式は漸化式を解くための初期値を示す。また、送電損失は無視するものとする。

$$_0 F(0) = 0 \quad (12)$$

$$_0 F(P^n) = \infty \quad (P^n > 0) \quad (13)$$

$$_m F(P^i) = \min_{g_m^n} \left\{ f_m(g_m^n) + {}_{m-1} F(P^i - g_m^n) \right\} \quad (14)$$

## 5. 揚水式発電所を1カ所含む場合の最適運用決定法

系統負荷が  $P^i$  のときに  $j \cdot \Delta P$  の電力を用いて  $t_P$  [h] だけ揚水運転を行うものとする。このとき得られる水量を用いて系統負荷が  $P^l$  のときに  $k \cdot \Delta P$  の出力で  $t_G$  だけ発電機運転を行うならば、自流分のない純揚水式発電所の場合(15)

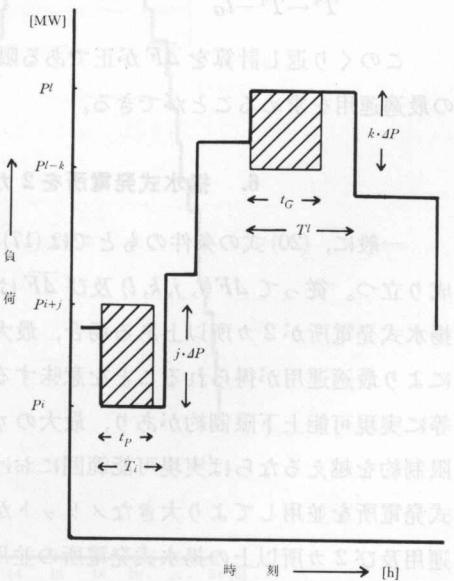
式より  $t_G$  は(16)式となる(第2図参照)。

$$\begin{aligned} t_P \cdot j \cdot \Delta P \times 60 \times 60 \times h_P &= t_G \cdot k \cdot \Delta P \\ &\times 60 \times 60 / h_G \quad (\because (1), (2)) \quad (15) \end{aligned}$$

$$t_G = t_P \cdot h_P \cdot h_G \cdot j / k = t_P \cdot \eta \cdot j / k \quad (16)$$

ここで、 $\eta$  は揚水式発電所の総合効率である。また、このとき得られるメリットを  $\Delta F(i, j, k, l)$  とすると(17)式となる。

$$\begin{aligned} \Delta F(i, j, k, l) &= t_G \cdot \left\{ {}_M F(P^l) - {}_M F(P^l - k \cdot \Delta P) \right\} \\ &- t_P \cdot \left\{ {}_M F(P^i + j \cdot \Delta P) - {}_M F(P^i) \right\} \\ &= t_P \cdot \eta \cdot (j/k) \cdot \left\{ {}_M F(P^l) - {}_M F(P^{l-k}) \right\} \\ &- t_P \cdot \left\{ {}_M F(P^{i+j}) - {}_M F(P^i) \right\} \\ &= t_P \cdot \left[ \eta \cdot (j/k) \cdot \left\{ {}_M F(P^l) - {}_M F(P^{l-k}) \right\} \right. \\ &\quad \left. - \left\{ {}_M F(P^{i+j}) - {}_M F(P^i) \right\} \right] \quad (17) \end{aligned}$$



第2図 揚水運転および発電機運転による火力分担負荷の変化  
太線：系統負荷  
斜線：揚水式発電所の運転部分

(17) 式より、メリットが正の値を取るととき  $t_P$  が大きい程メリットが大きくなることがわかる。また、(17)式の  $t_P$  を  $t_G$  で表わすと(18)式となり、 $t_G$  も同様に大きい程メリットが大きくなることがわかる。

$$\Delta F(i, j, k, l) = t_G \cdot \left[ \left\{ {}_M F(P^l) - {}_M F(P^{l-k}) \right\} - k / (j \cdot \eta) \cdot \left\{ {}_M F(P^{i+j}) - {}_M F(P^i) \right\} \right] \quad (18)$$

従って、(19), (20)式の条件のもとで(21)式の最大化操作を行うことにより、揚水式発電所の最大のメリットを得られる負荷レベルを求めることができる。

$$\{(t_P = T^i) \wedge (t_G \leq T^l)\} \vee \{(t_P \leq T^i) \wedge (t_G = T^l)\} \quad (19)$$

$$P^l > P^{l-k} > P^{i+j} > P^i \quad (20)$$

$$\overline{\Delta F} = \max_{i, j, k, l} \left\{ \Delta F(i, j, k, l) \right\} \quad (21)$$

ここで、 $\wedge$  および  $\vee$  はそれぞれ論理積および論理和を表わす。(21)式の  $\overline{\Delta F}$  が得られたとき、(22)～(25)式の代入操作により負荷曲線を新らたな火力分担負荷曲線に修正し、再び(17)～(21)式による最大化操作を行う。

$$T^i \leftarrow T^i - t_P \quad (22)$$

$$T^{i+j} \leftarrow T^{i+j} + t_P \quad (23)$$

$$T^{l-k} \leftarrow T^{l-k} + t_G \quad (24)$$

$$T^l \leftarrow T^l - t_G \quad (25)$$

このくり返し計算を  $\overline{\Delta F}$  が正である限り続けることにより、揚水式発電所を含む電力系統の最適運用求めることができる。

## 6. 揚水式発電所を2カ所以上含む場合の最適運用決定法

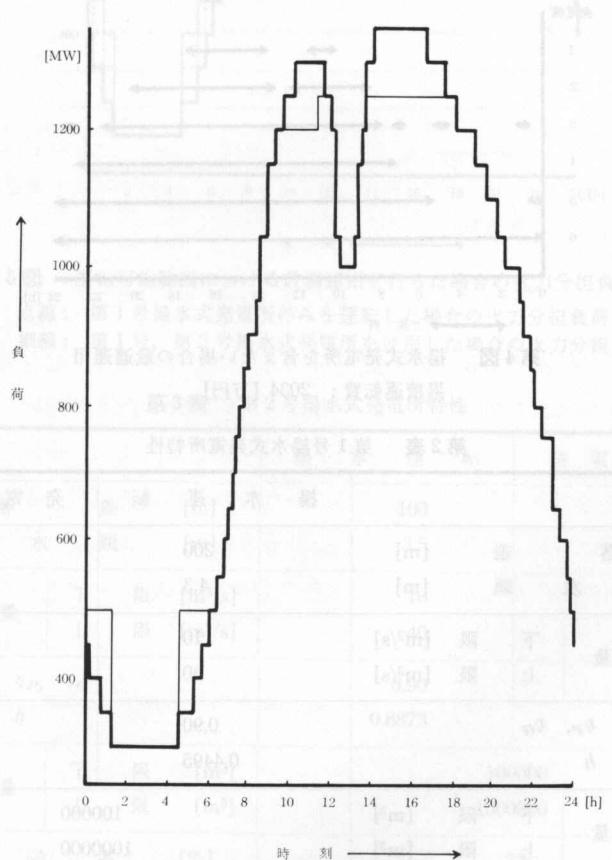
一般に、(20)式の条件のもとでは(17)式において  ${}_M F(P^l) > {}_M F(P^{l-k})$ ,  ${}_M F(P^{i+j}) > {}_M F(P^i)$  が成り立つ。従って  $\Delta F(i, j, k, l)$  及び  $\overline{\Delta F}$  は  $i$  が大きい程大きな値となる。このことは  $\eta$  の異なる揚水式発電所が2カ所以上ある場合、最大の  $\eta$  を持つ揚水式発電所を1カ所だけ運転することにより最適運用が得られることを意味する。しかし、一般に揚水式発電所には流量及び貯水量等に実現可能上下制約があり、最大の  $\eta$  を持つ揚水式発電所による最適運用がこれらの上下制約を越えるならば実現可能範囲における運用を求める必要があり、このとき  $i$  の劣る揚水式発電所を並用してより大きなメリットが得られる場合がある。なお、実現可能範囲における運用及び2カ所以上の揚水式発電所の並用運用は、貯水池を共用せず独立な運用ができる場合、以下に述べる手法により求めることができる。すなわち、流量についてはその上下制約を越える  $\Delta F(i, j, k, l)$  に負のペナルティコストを与えることにする。また、貯水量については  $\Delta F(i, j, k, l)$  がその上下制約を越えるとき、(19)式の条件にこだわらず実限可能で最大の  $t_G$ ,

$t_P$  (貯水量が上限または下限になるような  $t_g$ ,  $t_p$ ) を用いて  $\Delta F(i, j, k, l)$  を求めることにする。

先ず、このようにして  $\Delta F$  をくり返し求め、最大の  $\gamma$  を持つ揚水式発電所の実現可能範囲における最適運用を求める。次に、そのとき得られる火力分担負荷曲線を用いて、残りの揚水式発電所の中の最大の  $\gamma$  を持つ発電所による最適運用を同じ手法により求める。以下、 $\gamma$  の順に並用していき 2 カ所以上の揚水式発電所を含む電力系統の最適運用を求めることができる。

第1表 火力発電機特性

発電機	$a$	$b$	$c \times 10^3$	$g$	$\bar{g}$	$fS$
1	15.652	0.7971	3.153	27	101	2.0
2	25.718	0.7922	0.732	37	232	3.9
3	8.019	0.8201	1.881	27	99	4.6
4	28.058	0.7915	0.372	144	344	6.0
5	18.656	0.7177	0.504	37	236	5.2
6	24.104	0.6800	0.318	144	344	6.0

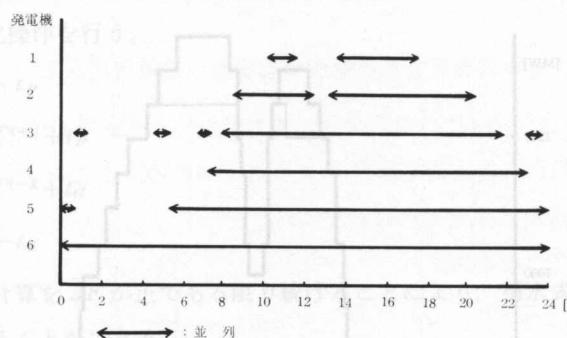


第3図 系統負荷曲線

細線：第1号揚水式発電所を運転可能範囲を無視して運転した場合の火力分担負荷

### 7. モデル系統による試算例

第1表に示す6台の火力発電機からなるモデル系統に、第3図に太線で示す系統負荷曲線を与えるものとする。最初に揚水式発電所を含まず、火力発電機だけで系統負荷を分担した場合の最適運用パターンを第4図に示す。図中 $\leftrightarrow$ は運転期間を示し、このとき累積運転費は2034[万円]であった。この最適運用は(14)式により火力発電機の解・並列のすべての組み合わせから求めたものであり、一部の発電機が頻繁な起動停止をくり返すのはこのためである。また、この最適運用は従来の単純な優先順位法では決定し得ないことは明らかであり、「火力発電機のすべての組み合わせによる最適運用決定法」<sup>2)</sup>の有効性が再び確認できた。次に、第2表に示す第1号揚水式発電所を1カ所だけ系統に含み、運転可能流量及び可能貯水量の上下限制約を無視した場合の火力分担負荷を第3図に細線で示す。このときの累積運転費は2027[万円]であり、第1号揚水式発電所の運転効果が確認できた。ここで、系統負荷の最低負荷(300[MW])で揚水運動が行われていないのは、第4図からわかるように350→300[MW]の火力分

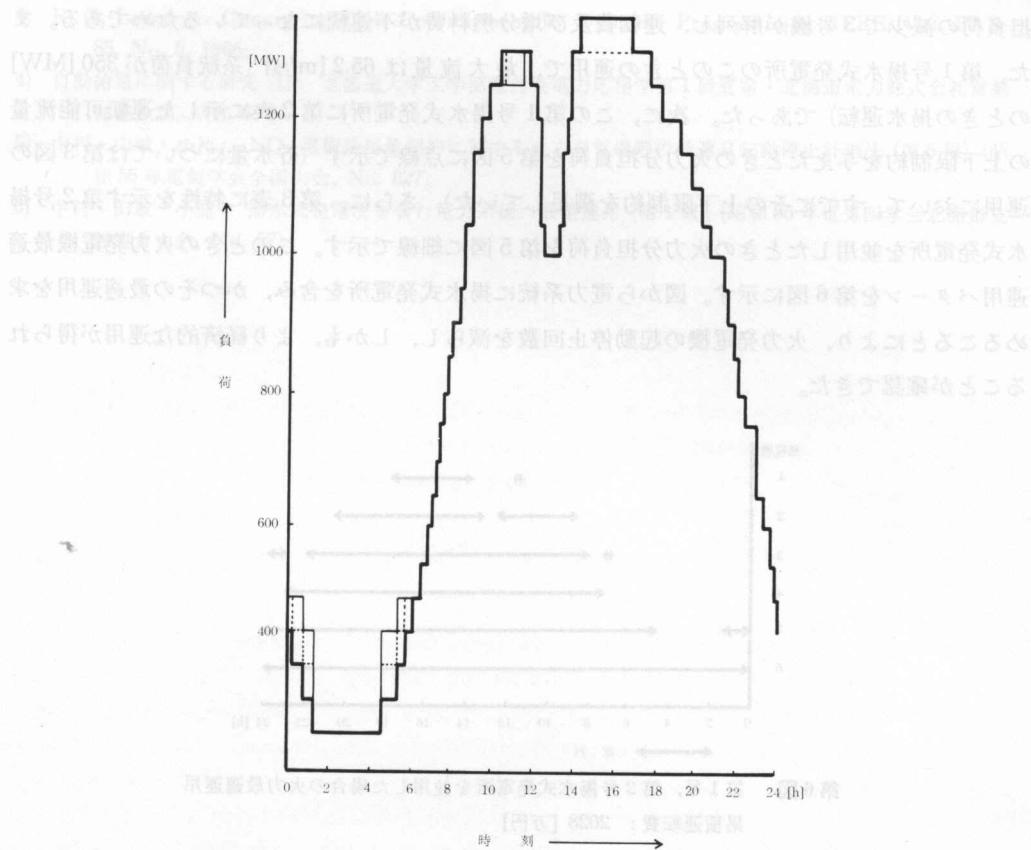


第4図 揚水式発電所を含まない場合の最適運用

累積運転費： 2034 [万円]

第2表 第1号揚水式発電所特性

		揚水運動	発電機運動
総損失水頭	落差[m]	200	200
運転可能流量	下限 [m <sup>3</sup> /s]	10	10
	上限 [m <sup>3</sup> /s]	30	30
$\eta_P, \eta_G$		0.90	0.87
$h$		0.4495	1.6685
可能貯水量	下限 [m <sup>3</sup> ]	100000	
	上限 [m <sup>3</sup> ]	1000000	
総合効率 [%]		75	



第5図 運転可能範囲における最適運用を行った場合の火力分担負荷

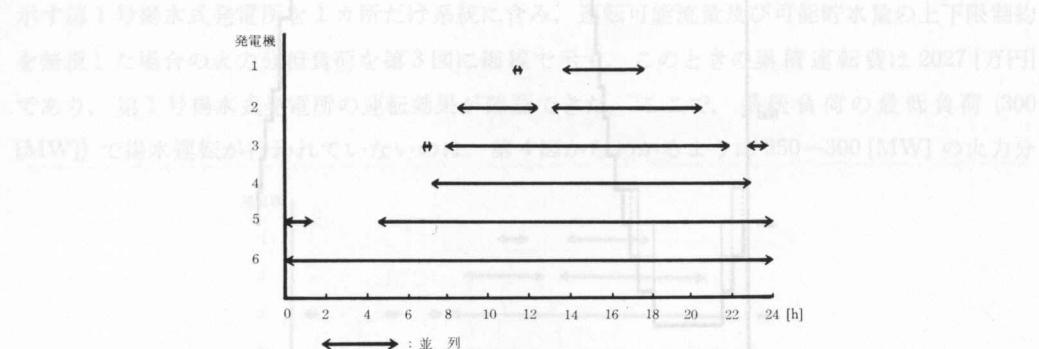
点線：第1号揚水式発電所のみを運転した場合の火力分担負荷

細線：第1号、第2号揚水式発電所を並用した場合の火力分担負荷

第3表 第2号揚水式発電所特性

		揚水運動	発電機運動
総落差 [m]		100	100
損失水頭 [m]		3.5	3.5
運転可能流量	下限 [ $m^3/s$ ]	10	10
	上限 [ $m^3/s$ ]	40	40
$\eta_P, \eta_G$		0.90	0.87
$h$		0.8873	0.8228
可能貯水量	下限 [ $m^3$ ]	100000	
	上限 [ $m^3$ ]	1000000	
総効率 [%]		73	73

担負荷の減少で3号機が解列し、運転費及び増分燃料費が不連続になっているためである。また、第1号揚水式発電所のこのときの運用で、最大流量は $65.2 \text{ [m}^3/\text{s}]$  (系統負荷が350 [MW] のときの揚水運転) であった。次に、この第1号揚水式発電所に第2表に示した運転可能流量の上下限制約を与えたときの火力分担負荷を第5図に点線で示す (貯水量については第3図の運用において、すでにその上下限制約を満足していた)。さらに、第3表に特性を示す第2号揚水式発電所を並用したときの火力分担負荷を第5図に細線で示す。このときの火力発電機最適運用パターンを第6図に示す。図から電力系統に揚水式発電所を含み、かつその最適運用を求めるこことにより、火力発電機の起動停止回数を減らし、しかも、より経済的な運用が得られることが確認できた。



第6図 第1号、第2号揚水式発電所を並用した場合の火力最適運用  
累積運転費： 2028 [万円]

## 8. む　す　び

揚水式発電所を含む電力系統の最適運用決定法について述べた。総合効率最大の揚水式発電所を1カ所だけ含む系統の最適運用が、その運転可能範囲に収まる場合、それ以外の揚水式発電所を並用せずに最大のメリットが得られることを示した。また、運転可能範囲に収まらない場合、運転可能範囲の中で最適運用を求め、かつ他の揚水式発電所を並用して最大のメリットを得る計算手法も示した。最後に、これらの計算手法をモデル系統へ適用し、その有効性を確認した。なお、本研究は昭和55年度文部省科学研究費補助金(エネルギー特別研究(2))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った北見工業大学長小池東一郎博士に深く感謝申し上げます。

## 参　考　文　献

- 1) 中村・山城：NO<sub>x</sub>の累積排出量が制約された場合の火力発電機群起動停止問題(第5報), (北見工大研報, 投稿中).
- 2) 山城：火力発電機群の起動停止問題の一解法(電気学会論文誌; Vol. 93-B, No. 9, 昭和48年9月).

- 3) R. G. Lowery: Generating Unit Commitment by Dynamic Programming (IEEE, Vol. PAS-85, No. 5, 1966).
- 4) 自動給電に関する研究(I): 北海道大学工学部電力及電力応用学第1研究室・北海道電力株式会社営業部需給課, 昭和42年.
- 5) 中村・山城・小池: NO<sub>x</sub> 累積排出量制約に対する火力発電機群の最適日起動停止計画法(第5報), (昭和55年電気学会全国大会, No. 827).
- 6) 中村・山城・小池: 捷水式発電所を含む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, No. 57).

## Optimum Operation Scheduling with Constrained Supply of a Prime Energy and Constrained Environmental Pollution (Part I)

by Yoichi NAKAMURA and Susumu YAMASURO

Recently, there are many anxious news about problem of stabilizing the supply of energy (the fuel for thermal power stations). In addition, power system is of clean operation. Therefore, we report the optimum operation scheduling method such that the total fuel consumption is less than the fuel supply, the total emission is less than the constrained emission, and that operation becomes economically. In our method, for easy calculation, we introduce two assumptions and estimate calculations. The first approximation is that the optimum start-up and down patterns of thermal units is determined in disregard for lower and upper limits of each unit. The second approximation is that Lagrange's multipliers are change when one unit shuts down for a single time interval from any operation. We show the appropriateness of our method by applying it to a model. 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必然のこととして要求されている一方で、貴賀燃費削減が次第に困難な状勢になりつつある。また、一高水準エネルギー(火力発電所の燃料)開拓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、すなはち各燃料供給制約及び環境規制(NO<sub>x</sub> 累積排出量制約)を考慮したしかも経済的な運用方法について検討を行う。アーティファクトによる影響を考慮する。

\* 電気四学会北海道支部連合大会一般発表会 (1980.9)

北海道大学電気工学科