

揚水式発電所を含む電力系統の 最適運用計画 (第5報)*

—火力並列発電機群の決定法—

中 村 陽 一**

山 城 迪**

(昭和58年4月20日受理)

Optimum Operation Scheduling of Electric Power System Including the Pumping-up Power Stations (Part 5)

—Thermal Unit Commitment Decision Method—

by Yoichi NAKAMURA and Susumu YAMASHIRO

In the previous paper, we reported the optimum operation scheduling method which can satisfy the environmental pollution constraint. In a general convenient method, the unit commitment of thermal power stations is decided by the priority method. But the priority method does not always decide the optimum unit commitment, and it may not consider the environmental pollution constraint.

In this paper, we decide the unit commitment by the effect of stopping a thermal power station. This effect is calculated through considering the system's cost increase when one thermal power station is stopped. We have considered the recirculating type pumped storage power plants in our serial papers. In this paper, we consider the other energy storage units, for example, the multiple-use type pumped storage units, superconducting coils, or fly-wheels.

Our method is applied to a model system, and we report the results as follows. Our method can estimate the optimum operation which satisfies the environmental pollution constraint. The start and stop pattern of thermal power stations changes depending on the constraint of environmental pollution. We also show the influence of the efficiency and the environmental pollution constraint on the total system operating cost.

1. ま え が き

揚水式発電所を利用した電力系統最適運用法について、筆者らは前報¹⁾までに次のことを明らかにし報告してきた。すなわち、①送電損失を無視できる場合は、揚水式発電所の運転順

* 昭和58年電気学会全国大会で発表 (昭和58年4月)

** 北見工業大学電気工学科

位は総合効率だけで決定できるが、送電損失を無視できない場合にはその運転順位は単純に総合効率だけで決定することはできない。②現実の系統では、一般には火力発電所の起動停止パターンを一定とし、そのパターンに対して揚水式発電所の最適運用を決定する。しかし、系統全体の真の最適運用を求めるためには、火力発電所の起動停止パターンも揚水式発電所の運用にあわせて最適化する必要がある。③揚水式発電所の最適運用は、その運転量を微少増加したときの系統全体の運転費変化を考え、その全体の運転費が最も減少するように揚水式発電所の運転量をくり返し増加することにより得られる。このとき、揚水式発電所の運用は必ずしも最大負荷で発電機運転、最小負荷で揚水運転になるとは限らない。

前報では、火力発電所から排出される NO_x の各時間帯における最大排出量が規制された場合の最適運用決定法について述べた。一般に、火力起動停止パターンは前報で扱ったように、優先順位法を用いて決定されることが多いが、発電単価を利用した優先順位法では必ずしも最適解が得られる保証がない²⁾上に、排出量規制を考慮した並列発電機群を決定することもできない。そこで本報告では、発電単価を用いない、排出量規制を考慮した並列発電機群決定法を導く。また、揚水式発電所以外のエネルギー貯蔵装置を利用した場合を想定して、エネルギー貯蔵効率に変化した場合、すなわち貯蔵エネルギーに貯蔵量や貯蔵時間に応じて損失がある場合についても検討する。最後にモデル系統に対し本手法を適用し、その有効性を確認する。

2. 目的関数と本手法の概略

考察期間を N 時間帯に分割し、系統は M 台の火力発電所と L 台の揚水式発電所で構成されているものとする。第 n 時間帯における運転について(1)式に示すような目的関数を考える。

$$\phi = \sum_{m=1}^M f_m + \lambda \left(P + PL - \sum_{l=1}^L g_l - \sum_{m=1}^M g_m \right) + \mu \left(Y - \sum_{m=1}^M y_m \right) \quad (1)$$

ここで、 f_m 、 g_m 、 y_m はそれぞれ m 号火力発電所の燃料費、出力、 NO_x 排出量であり、 f_m 、 y_m は(2)、(3)式となる。 g_l は l 号揚水式発電所の出力であり、 $g_l > 0$ は発電機運転を示すものとする。 P 、 PL 、 Y はそれぞれ第 n 時間帯の系統負荷、送電損失、 NO_x 排出量規制値とする。 λ 、 μ をラグランジュの未定乗数とする。

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

$$y_m = d_m \cdot f_m \quad (3)$$

ここで、 a_m 、 b_m 、 c_m は m 号火力発電所の定数であり、 fS_m は起動費³⁾である。 \underline{g}_m 、 \overline{g}_m は出力上下制限約であり、 d_m は発電機定数である⁴⁾。

第 n 時間帯における火力並列発電機群と各揚水式発電所の出力 g_l が与えられたとき、(1)

式を最小化して各火力発電所の出力および系統全体の運転費を求めることができる。以下に火力並列発電機群の決定法と揚水式発電所の出力決定法を含め、本手法の概略を述べる。Step 1: (火力並列発電機群の決定) 送電損失を無視し、系統負荷は火力発電機だけで分担するものとし(1)式を最小化する。各火力発電機を解列したときの系統全体の運転費変化を計算し、解列すべき発電機を求める。この計算をすべての発電機が並列している発電機群から始め、解列すべき発電機と新たな並列発電機群をくり返し求める。Step 2: (火力起動停止パターンの決定) Step 1で求めた各火力並列発電機群の中から、各時間帯で運転費最小となる並列発電機群を求め、揚水式発電所を含まない火力発電機だけによる最適運用を求める。この起動停止パターンにおいて、各時間帯で並列発電機群を変更し、かつ揚水式発電所を運用した場合の運転費変化を揚水式発電所の単位出力当りの値として求める。この運転費変化をもとに火力発電機起動停止パターンをくり返し変更する。Step 3 (揚水式発電所の最適運用) 揚水式発電所の運転量を微小変化したときの系統全体の運転費変化を、送電損失を考慮して求める。この運転費変化と、水量の収支を考えて運転すべき揚水式発電所とその時間帯を求め、運転量を微小増加する。以下計算をくり返し、与えられた火力起動停止パターンに対する揚水式発電所の最適運用を求める。

3. 火力並列発電機群の決定法

送電損失を無視 ($PL=0$) し、各火力発電機の出力を求めると $\partial\phi/\partial g_m=0$ より(4)式となる。

$$g_m = \frac{\lambda}{2 \cdot c_m \cdot (1 - \mu \cdot d_m)} - \frac{b_m}{2 \cdot c_m} \quad (4)$$

k 号火力発電所を解列したときの λ の増加量を $\Delta\lambda$ 、 m 号火力発電所の出力増加量を Δg_m とすると(4)式から(5)式となる。ただし、各火力発電所間で d_m の値に大きな差はないものと考え、 μ は一定とする。

$$\Delta g_m = \frac{\Delta\lambda}{2 \cdot c_m \cdot (1 - \mu \cdot d_m)} \quad (5)$$

$\mu \leq 0^5$ 、また一般に $c_m, d_m > 0$ より λ の増加は g_m の増加を招く。しかし、 m 号機が \bar{g}_m の出力で運転している場合には、 λ が増加しても g_m は増加しない。また、 g_m の出力あるいは \bar{g}_m の近傍の出力で運転している発電機の出力増加は必ずしも(5)式で得られるとは限らない。しかし、本手法では計算時間の短縮を目的に g_m 、あるいは \bar{g}_m の近傍で運転している発電機の出力変化も近似的に(5)式で求めるものとする。 $g_m \leq g_m < \bar{g}_m$ の範囲で運転している発電機から k 号機を除いた集合を u とすると需給バランス制約より(6)式となり、(5)、(6)式から $\Delta\lambda$ を消去すると(7)式となる。

$$g_k = \sum_{m \in u} \Delta g_m \quad (6)$$

$$\Delta g_m = \frac{g_k}{c_m \cdot (1 - \mu \cdot d_m) \cdot \sum_{m \in \epsilon u} \frac{1}{c_m \cdot (1 - \mu \cdot d_m)}} \quad (7)$$

m 号機の運転費増加を Δf_m とすると (2) 式から (8) 式となる。

$$\Delta f_m = \Delta g_m \cdot b_m + \Delta g_m \cdot c_m \cdot (2 \cdot g_m + \Delta g_m) \quad (8)$$

また、このとき m 号機で NO_x 排出量が $d_m \cdot \Delta f_m$ 増加している。この増加量を系統全体で吸収 (減少) するときの運転費増加は $-\mu \cdot d_m \cdot \Delta f_m$ である⁶⁾ ことから、 k 号機を解列し、かつ排出量規制を満足するときの系統全体の運転費増加 $\Delta H_{\text{unit}}(k)$ は (9) 式となる。

$$\Delta H_{\text{unit}}(k) = (1 - \mu \cdot d_k) \cdot (fS_k - f_k) + \sum_{m \in \epsilon u} (1 - \mu \cdot d_m) \cdot \Delta f_m \quad (9)$$

$\Delta H_{\text{unit}}(k)$ の最小値を $\underline{\Delta H_{\text{unit}}}$ とし、ある値 $\epsilon_{\text{unit}} (\geq 0)$ を用いて (10) 式の不等式を考える。

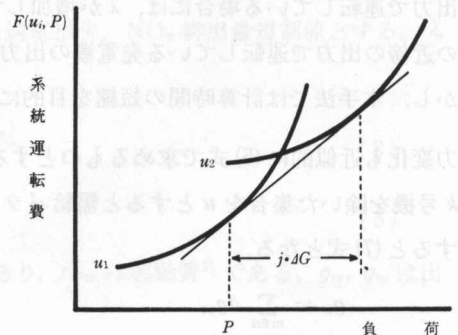
$$\Delta H_{\text{unit}}(k) \leq \begin{cases} \underline{\Delta H_{\text{unit}}} + \epsilon_{\text{unit}} & (\underline{\Delta H_{\text{unit}}} \leq 0) \\ \epsilon_{\text{unit}} & (\underline{\Delta H_{\text{unit}}} > 0) \end{cases} \quad (10)$$

(10) 式を満足するとき k 号機を解列して新たな並列発電機群を得るものとする。ここで、 ϵ_{unit} を導入した主な理由は ① 送電損失を無視し、② (5) 式で近似的計算を行っている、ためである。すべての発電機が並列する発電機群で、さまざまな負荷のもとで (9) 式の $\Delta H_{\text{unit}}(k)$ を計算する。(10) 式により新たな並列発電機群を求め、以下計算をくり返すものとする。

4. 火力起動停止パターンの決定法

各時間帯の負荷に対し運転費最小の並列発電機群を選ぶことにより、揚水式発電所を含まない送電損失を無視した火力最適起動停止パターンが得られる。揚水式発電所の最適運用は送電損失を無視しているために次のようにして求めることができる。運転すべき揚水式発電所は最大の総合効率 (これを $\bar{\eta}$ とする) を持つ発電所とする。揚水式発電所の運転量の微小増加に対する系統の運転費の増加量 ($\partial \sum_m f_m / \partial \sum_l g_l = \lambda$ ⁵⁾) を各時間帯において求める。なお、各時間帯における λ 、および系統運転費の計算は第3章で求めた「さまざまな負荷に対する運転」を行ったときの値をもとに補間法により求める。最大、最小の λ をそれぞれ $\bar{\lambda}$ 、 $\underline{\lambda}$ とし、これらの値を与える時間帯でそれぞれ微小電力 ΔG 、 $\bar{\eta} \cdot \Delta G$ の揚水、発電機運転を行う。この計算を $\lambda / \bar{\lambda} < \bar{\eta}$ である限りくり返す。

次に揚水式発電所の運用にあわせた火力起動停止パターンの最適化法について考える。第3章で求めた「さまざまな負荷に対する運転」を示すと第1図のようになる。図中、 P は第 n 時間帯の



第1図 各負荷に対する系統全体の運転費

負荷とする。並列発電機群に番号を与え u_1, u_2, \dots とする。第 i 並列発電機群による負荷 P に対する系統全体の運転費を $F(u_i, P)$ とする。第 n 時間帯の並列発電機群を u_s とし、 u_s から並列発電機群を変更し、かつ $j \cdot \Delta G$ (ここで、 $j=1, 2, 3 \dots$) の電力で揚水運転を行う場合を考える。揚水量当りの運転費増加 (第1図の場合は接線の傾き) を最小にする並列発電機群の変更 $\Delta H_{\text{change}}(n)$ は (11) 式となる。

$$\Delta H_{\text{change}}(n) = \min_{i,j} \left\{ \frac{F(u_i, P + j \cdot \Delta G) - F(u_s, P)}{j \cdot \Delta G} \right\} \quad (11)$$

最小の $\Delta H_{\text{change}}(n)$ を (12) 式に示すように $\underline{\Delta H}_{\text{change}}$ とする。

$$\underline{\Delta H}_{\text{change}} = \min_n \left\{ \Delta H_{\text{change}}(n) \right\} \quad (12)$$

(10) 式同様、ある幅 $\varepsilon_{\text{change}} (\geq 0)$ を導入し、(13) 式を考える。

$$\Delta H_{\text{change}}(n) \leq \underline{\Delta H}_{\text{change}} + \varepsilon_{\text{change}} \quad (13)$$

(13) 式を満足する第 n 時間帯で並列発電機群の変更を行う。このとき (13) 式を満足する $\Delta H_{\text{change}}(n)$ が複数存在する場合は、それぞれを変更し複数の起動停止パターンを得るものとする。また、 $\varepsilon_{\text{change}}$ を導入した理由は ① 送電損失を無視し、② 揚水式発電所の発電機運転時のことを考慮せずに並列発電機群の変更を考えているためである。

同様に第 n 時間帯で並列発電機群を変更し、かつ発電機運転を行う場合には (11)~(13) 式は (11)'~(13)' 式となる。

$$\Delta H_{\text{change}}(n) = \max_{i,j} \left\{ \frac{F(u_s, P) - F(u_i, P - j \cdot \Delta G)}{j \cdot \Delta G} \right\} \quad (11)'$$

$$\overline{\Delta H}_{\text{change}} = \max_n \left\{ \Delta H_{\text{change}}(n) \right\} \quad (12)'$$

$$\Delta H_{\text{change}}(n) \geq \overline{\Delta H}_{\text{change}} - \varepsilon_{\text{change}} \quad (13)'$$

(13) および (13)' 式により得られた新たな起動停止パターンに対し、送電損失を無視した揚水式発電所の最適運用を行う。すなわち、 \bar{v} を持つ揚水式発電所により、 $\lambda, \bar{\lambda}$ の時間帯で揚水、発電機運転を行い、 $\lambda/\bar{\lambda} < \bar{v}$ なる限りくり返す。

新たな起動停止パターンに、得られた順に番号を与える。第 r 起動停止パターンで送電損失無視の揚水式発電所の運用を行ったときの累積運転費を $FT_{\text{pattern}}(r)$ とする。 $FT_{\text{pattern}}(r)$ の最小値を $\underline{FT}_{\text{pattern}}$ とし、(10) 式同様ある幅 $\varepsilon_{\text{pattern}} (\geq 0)$ を考える。すなわち $(\underline{FT}_{\text{pattern}} + \varepsilon_{\text{pattern}})$ の値より小さい累積運転費を持つ起動停止パターンに対し、くり返し (13), (13)' 式を適用し、新たな起動停止パターンを得るものとする。

5. 送電損失を考慮した揚水式発電所最適運用決定法

送電損失を考慮した火力発電機出力は $\partial \phi / \partial g_m = 0$ より (14) 式となる。

$$g_m = \frac{\lambda \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m}\right)}{2 \cdot c_m \cdot (1 - \mu \cdot d_m)} - \frac{b_m}{2 \cdot c_m} \quad (14)$$

l 号揚水式発電所を運転した場合の出力変化を考えると(15)式となる。

$$\Delta g_m = \frac{\Delta \lambda \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m}\right)}{2 \cdot c_m \cdot (1 - \mu \cdot d_m)} \quad (15)$$

ここで、揚水式発電所の運転量の微小変化に対し増分送電損失 $(\partial PL / \partial g_m)$ はあまり変化しないものとする。 l 号揚水式発電所の揚水運転増加量を ΔG とすると需給バランスは(16)式となり、(15)、(16)式から $\Delta \lambda$ を消去すると(17)式となる。

$$\Delta G \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_l}\right) = \sum_{m \in u} \Delta g_m \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m}\right) \quad (16)$$

$$\Delta g_m = \frac{\Delta G \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_l}\right) \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m}\right)}{c_m \cdot (1 - \mu \cdot d_m) \cdot \sum_{m \in u} \frac{\left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m}\right)^2}{c_m \cdot (1 - \mu \cdot d_m)}} \quad (17)$$

ここで、 u は $g_m \leq g_m < \bar{g}_m$ で運転している発電機集合である。従って、 m 号火力発電所の運転費増加は(17)式の Δg_m を用いて(8)式から得られる。この Δf_m を用いて、第 n 時間帯の系統全体の運転費増加 $\Delta H_{\text{pump}}(l, n)$ は(18)式となる。

$$\Delta H_{\text{pump}}(l, n) = \sum_{m \in u} (1 - \mu \cdot d_m) \cdot \Delta f_m \quad (18)$$

次に、このとき得られた水量で発電機運転を行うことを考える。総合効率を η_l とすると、その出力は $\eta_l \cdot \Delta G$ となることより、需給バランスは(16)式左辺 ΔG を $-\eta_l \cdot \Delta G$ として得られる。ただし u を $\underline{g}_m < g_m \leq \bar{g}_m$ の発電機集合とする。従って m 号機の出力増加は(17)式右辺分子の ΔG を $-\eta_l \cdot \Delta G$ として得られる。この Δg_m を用いて(8)、(18)式により系統全体の運転費増加を求め、その値を $\Delta H_{\text{gene}}(l, n)$ とする。

水量の収支を考えた揚水式発電所の運用は(19)式の最小化操作により得られる。

$$\min_l \left\{ \min_n \left\{ \Delta H_{\text{pump}}(l, n) \right\} + \min_{n'} \left\{ \Delta H_{\text{gene}}(l, n') \right\} \right\} \quad (19)$$

(19)式から得られた揚水式発電所、時間帯で ΔG 、 $\eta_l \cdot \Delta G$ の揚水、発電機運転を行う。この計算を(19)式の値が負である限りくり返すことにより送電損失を考慮した揚水式発電所の最適運用が得られる。第4章で求めた、送電損失を無視した累積運転費が $(FT_{\text{pattern}} + \varepsilon_{\text{pattern}})$ より小なるすべての火力起動停止パターンに対し、この第5章で述べた送電損失を考慮した最適運用を求めることにより、揚水式発電所の運用を考慮した最適火力起動停止パターンが得られる。

6. 揚水式発電所以外のエネルギー貯蔵装置を利用した場合

本論文では主に揚水式発電所を利用した場合の最適運用決定法について述べた。揚水式発電所以外のエネルギー貯蔵装置を利用する場合も、その総合効率が一定と考えられる場合は揚水式発電所とまったく同様に扱うことができる。貯蔵エネルギーに損失があり、総合効率が変化する場合について以下に述べる。

6.1 総合効率が貯蔵エネルギー量の関数となる場合

本手法では貯蔵エネルギーを微小量 ΔG ずつ増加する手法を採用しているので、エネルギー貯蔵量に対して系統全体の運転費がコンベックスに変化するならば、常に本手法の適用ができる。すなわち貯蔵エネルギーの損失が貯蔵量に対しコンベックスに変化するとき本手法の適用が可能である。このとき η_l は貯蔵エネルギー量の関数として扱う。

6.2 総合効率が貯蔵時間の関数となる場合

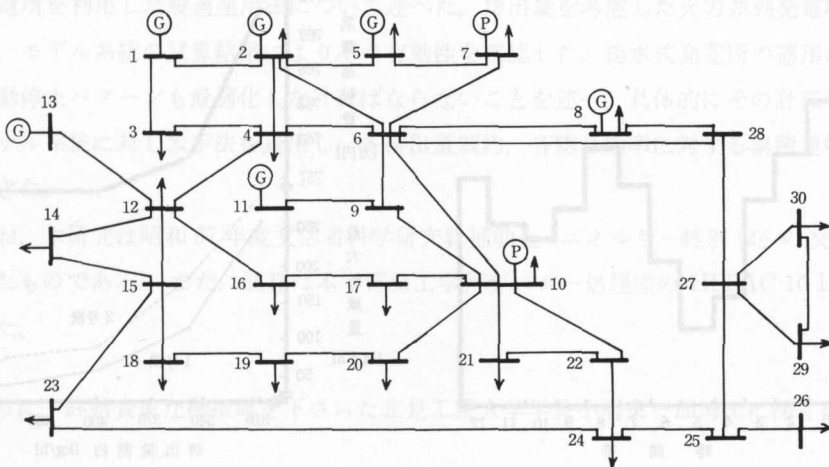
エネルギーを貯蔵する時間帯を n 、放出する時間帯を n' とし、(19) 式を次の (19)' 式に変更する。

$$\min_{l, n, n'} \{ \Delta H_{\text{pump}}(l, n) + \Delta H_{\text{gene}}(l, n') \} \quad (19)'$$

そして、 $\Delta H_{\text{gene}}(l, n')$ を計算するときの η_l は $(n' - n)$ の関数となる。

7. モデル系統による試算例

モデル系統⁷⁾ は第2図に示すように30ノードで構成され、系統内には6台の火力発電機と2台の揚水式発電所が含まれる。火力発電機の燃料費特性を第1表に、負荷曲線を第3図に示す。揚水式発電所の総合効率を $\eta_1 = 0.74$ (第10ノード)、 $\eta_2 = 0.73$ (第7ノード) とし、排出量規



第2図 モデル系統

第1表 火力発電機特性

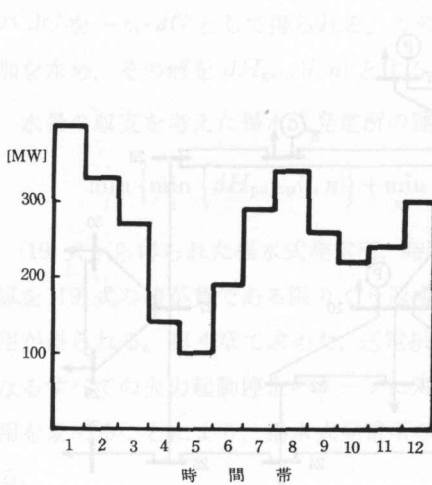
発電機	ノード	$f=a+b\cdot g+c\cdot g^2$ [千円/時]			g	\bar{g}	d	fS
		a	b	$c\times 1000$	[MW]	[MW]	[kg/千円]	[千円/時]
1	8	3.753	1.3553	3.48	10	35	0.774	2.4
2	11	2.085	1.2510	10.40	10	30	0.722	2.2
3	13	2.035	1.2510	10.40	12	40	2.552	2.6
4	5	1.251	0.4170	26.10	15	50	2.546	2.8
5	2	1.251	0.7298	7.30	20	80	0.750	3.2
6	1	2.085	0.8340	1.56	50	200	0.669	—

6号機はベース火力として常に並列する。

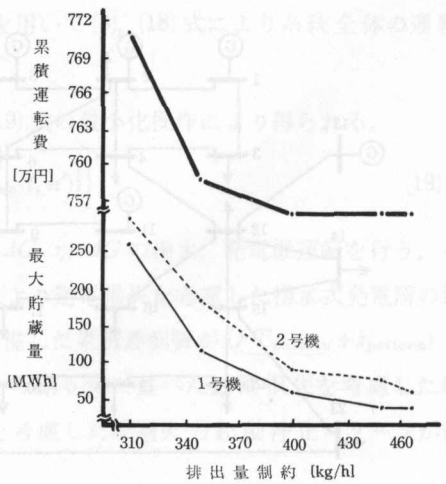
第2表 経済運用

		時 間 帯											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
火力 発電 機	1			×	×	×	×	×		×	×	×	×
	2				×	×	×				×	×	
	3				×	×	×				×		
	4												
	5												
	6												
揚水 [MW]	1	14.8				-20.0							
	2	21.9			-10.0	-20.0							
NO _x [kg/時]		467	386	304	142	133	184	335	408	291	218	269	355

累積運転費：756 [万円]



第3図 負荷曲線

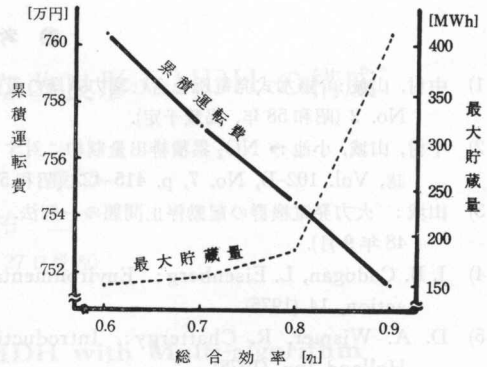


第4図 各排出量制約に対する最適運用

制値 Y に充分大きな値を与えて経済運用を求めたところ、その結果は第2表のようになった。第1表から、火力発電機の \bar{g}_m の発電単価とその順位を求めると 1.75 (4号機) $>$ 1.72 (3号機) $>$ 1.63 (2号機) $>$ 1.58 (1号機) となる。しかし、第2表の解列順位はこの逆であり本手法の並列発電機群決定法の有効性が得られた。

次に各排出量制約に対する累積運転費を求めたところ第4図のようになった。図中、

最大貯蔵量はそれぞれの揚水式発電所の貯水量の最大値、すなわち最適運用のための必要量を示す。図から揚水式発電所を利用して排出量制約を満足できるが、排出量規制が厳しくなるに従い揚水式発電所の運転量が増加し、累積運転費も増加することがわかる。また、第2表、第4図から、 $\eta_1 > \eta_2$ にもかかわらず2号揚水式発電所の運転量の方が大きいのが、これは2号機の方がより大きな負荷 (その割合は約 $1:3.9$)¹⁾ に接続しているためであると思われる。次に、 $Y=400$ [kg/時] として各総合効率に対する最適運用を第5図に示す。ただし、 $\eta_2=0.78 \cdot \eta_1$ とし、最大貯蔵量は1号機と2号機の合計量で示す。図から総合効率の増大により累積運転費はほぼ線形に減少するが、最大貯蔵量は幾何級数的に増大することがわかる。すなわち、高効率の貯蔵装置ほど大きな容量を要求されることがわかった。



第5図 各総合効率に対する最適運用

8. むすび

火力発電所から排出される NO_x の各時間帯における最大排出量が制約された場合の、揚水式発電所を利用した最適運用法について述べた。排出量を考慮した火力並列発電機群計算法を示し、モデル系統の試算結果によりその有効性を確認した。揚水式発電所の運用にあわせて火力起動停止パターンも最適化しなければならないことを述べ、具体的にその計算法を示した。モデル系統に対し本手法を適用し、各排出量制約、各総合効率に対する累積運転費を明らかにできた。

なお、本研究は昭和57年度文部省科学研究費補助金 (エネルギー特別 (2)) の交付を受けたものである。また、試算は本学電気工学科データ処理室の HITAC 10 II を利用して行った。

最後に、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。

参 考 文 献

- 1) 中村, 山城: 揚水式発電所を含む電力系統の最適運用計画 (第4報). 北見工業大学研究報告, Vol. 14, No. 2 (昭和58年, 掲載予定).
- 2) 中村, 山城, 小池: NO₂ 累積排出量制約に対する火力発電機の起動停止問題の一解法. 電気学会論文誌, Vol. 102-B, No. 7, p. 415-422 (昭和57年7月).
- 3) 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, p. 391-398 (昭和48年9月).
- 4) J. B. Cadogan, L. Eisenberg: Environmental Control of Electric Power System. ISA, Transaction, 14 (1975).
- 5) D. A. Wismer, R. Chattergy: Introduction to Nonlinear Optimization. Elsevier, North-Holland Inc. (1978).
- 6) 中村, 山城, 小池: 一次エネルギーの供給制約および環境規制を考慮した火力系統の最適運用方式. 電気学会論文誌, Vol. 103-B, No. 5 (昭和58年5月, 掲載予定).
- 7) O. Alsac, B. Stott: Optimal Load Flow with Steady-State Security. IEEE, Vol. PAS-93, No. 3, p. 745-751 (1974).
- 8) 中村, 山城, 小池: 揚水式発電所を含む電力系統の最適運用 (第5報). 昭和58年電気学会全国大会, No. 972, p. 1225 (昭和58年4月).

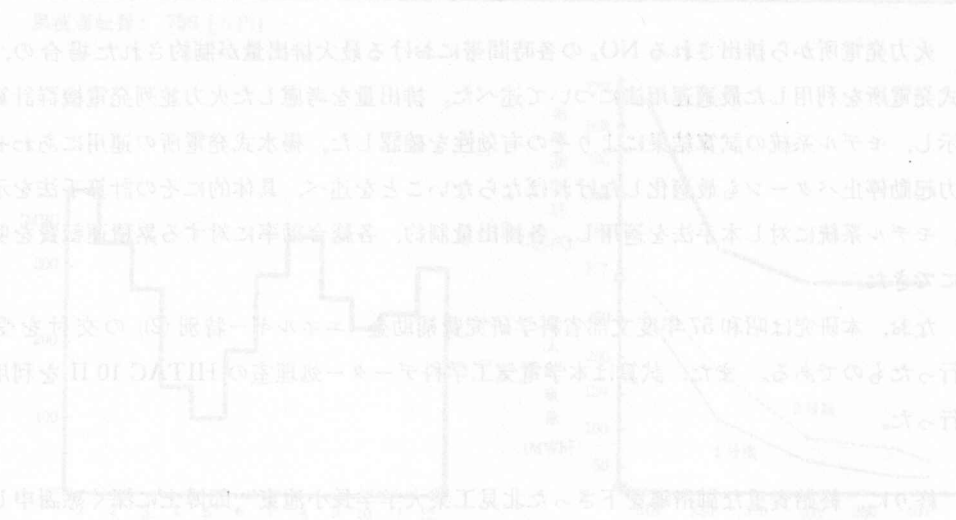


図3 揚水式発電所を含む電力系統の最適運用計画 (第4報) の結果