

揚水式発電所を含む電力系統の 最適運用計画 (第4報)*

—環境規制を考慮する場合—

中村陽一**
山城迪**

(昭和57年9月30日受理)

Optimum Operation Scheduling of Electric Power System Including the Pumping-up Power Stations (Part 4)

—the Case of Environmental Pollution Consideration—

by Yoichi NAKAMURA and Susumu YAMASHIRO

We report the optimum operation scheduling method which would satisfy the constraint of environmental pollution using the pumping-up power stations. The hourly emission of NO₂ is considered to be the determining factor in the constraint of environmental pollution. For this constraint, some measures are expected, for example the output shifting between thermal units, changing of the thermal unit commitment, or operation of the pumping-up power stations. Our method decides the optimum operation which is selected from these measures, or a combination of these measures. And the appropriateness of our method is reported from the results of calculations using a model system.

1. まえがき

わが国においては近年負荷率の低下、および発電機の大型化が著しく、エネルギー貯蔵装置に対する関心が高まっている。その一方で、火力発電所の環境対策費も増加の一途をたどっている¹⁰⁾。

本論では具体的な環境規制として、その達成率が数年来横ばい状態の続いている⁶⁾ NO₂排出量を考える。また、実際に稼働しているエネルギー貯蔵装置として揚水式発電所の運用を考える。揚水式発電所は自流分のない純揚水式発電所として扱う。つまり、本論は単位時間当たりのNO₂排出量規制値に対し、脱硝装置等を用いずに、揚水式発電所を用いてその規制値を達成しようとするものであり、本論の目的はその最適運用の決定にある。

* 電気四学会北海道支部連合大会で発表予定 (昭和57年10月)

** 北見工業大学電気工学科

揚水式発電所は送電損失の影響を考える場合、単純に総合効率の順に運転したのでは真の最適運用は得られない⁷⁾。また、排出量規制に対しては負荷を火力発電所と揚水式発電所で最適配分しなければならない上に、各火力発電所間でも最適配分をしてその規制を達成しなければならない。

本論で述べる計算手法の概略は次のとおりである。最初に、揚水式発電所を含まずに、火力発電機のみによる NO₂ 排出量規制を考慮した最適運用を、ラグランジュの未定乗数法により求める。次に微少電力を用いて、ある揚水式発電所がある時間帯で揚水運転、または発電機運転を行い、かつ排出量規制を満足する場合の系統全体の運転費の増加量を計算する。この運転費の増加量をもとに運転すべき揚水式発電所とその時期を求める。くり返し揚水式発電所の運転量を増加し、最適な揚水式発電所の運用を求める。

火力発電機の起動停止パターンは、揚水式発電所の運用を考慮して決定しなければならない⁸⁾。しかし、火力発電機の起動停止パターン（すなわち、各時間帯における火力並列発電機群）の変化を考えると、揚水式発電所の運転量に対する系統全体の運転費の特性がコンペックスではなくなる（後述第1図参照）。つまり、単純に出力を微少量ずつ増加して行ったのでは真の最適な並列発電機群は得られないことになる。そこで、本論では揚水式発電所の運転量を適当な大きさに仮定して最適な火力並列発電機群を求めるところにする。

最後に、モデル系統に対し本手法を適用し、種々の検討を行う。試算結果から、揚水式発電所を用いて排出量規制を達成できることを具体的に示す。また、火力発電機のみで排出量規制を達成した場合との比較から、揚水式発電所を利用した場合の効果を明らかにし、本手法の有効性を示す。

2. 目的関数

m 号火力発電機の出力を g_m とするとその運転費 f_m は(1)式となる。

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

ここで、 a_m , b_m , c_m は発電機定数であり、 g_m , \bar{g}_m は出力上下限制約である。 fS_m は停止時間に比例する起動費¹⁾である。このとき、 m 号機の NO₂ 排出量 y_m は(2)式となる²⁾。

$$y_m = d_m \cdot f_m \quad (2)$$

ここで、 d_m は発電機定数である。考察期間をいくつかの時間帯に分割する。第 n 時間帯の系統負荷を P_n とし、(3) 式に示す目的関数を考える。

$$\phi_n = \sum_m f_m + \lambda_n \cdot (P_n + PL - \sum_l g_l - \sum_m g_m) + \mu_n \cdot (Y - \sum_m y_m) \quad (3)$$

ここで、 PL は送電損失、 g_l は l 号揚水式発電所の出力で $g_l > 0$ は発電機運転を示すものとする。 Y は NO_x 排出量規制値であり、 λ_n 、 μ_n はラグランジュの未定乗数とする。

3. 揚水式発電所を含まずに、火力発電機のみで運転した場合の最適運用決定法

ある火力並列発電機群のもとで(3)式を最小化するとき、 NO_x 排出量規制値 Y に対する、その並列発電機群のもとでの最適負荷配分が得られる。 $\partial\phi_n/\partial g_m=0$ とすると(4)式より(5)式となる。

$$\frac{\partial\phi_n}{\partial g_m} = (1 - \mu_n \cdot d_m) \cdot \frac{df_m}{dg_m} + \lambda_n \cdot \left(\frac{\partial PL}{\partial g_m} - 1 \right) \quad (4)$$

$$g_m = \frac{\lambda_n \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m} \right)}{2 \cdot c_m \cdot (1 - \mu_n \cdot d_m)} - \frac{b_m}{2 \cdot c_m} \quad (5)$$

つまり、(5)式に示す協調方程式を解くことにより最適負荷配分が得られることになる。従って、さまざまな並列発電機群のもとで最適負荷配分を求め、同時に系統全体の運転費 ($\sum_m f_m$) を求めることにより、最適な並列発電機群を得ることができる。各時間帯において最適並列発電機群による運転を行うことにより、火力発電機の最適な起動停止パターンによる最適運用ができる。なお、本論における潮流計算はその簡便さ、高速性に特にすぐれていることから直流法^{3),4)} を用いることにする。

4. 火力発電機のある一定の起動停止パターンのもとでの 揚水式発電所最適運用決定法

4.1 揚水式発電所の運転量の変化に伴う火力発電機の出力変化量の計算法

第 n 時間帯で l 号揚水式発電所が微少電力 $\Delta G (> 0)$ を用いて揚水運転を行う場合を考える。揚水運転に伴い火力発電機は出力を増加しなければならず、その増加量を Δg_m とする。また、 λ_n の増加量を $\Delta \lambda_n$ とする。 l 号揚水式発電所の揚水量が ΔG 変化しても増分送電損失 ($\partial PL/\partial g_l$)、および μ_n があまり変化しないものとすると、 λ_n が $\Delta \lambda_n$ 増加したときの出力増加量 Δg_m は(5)式から(6)式となる。

$$\Delta g_m = \frac{\Delta \lambda_n \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m} \right)}{2 \cdot c_m \cdot (1 - \mu_n \cdot d_m)} \quad (6)$$

需給バランスを考えると(7)式となる。

$$\Delta G \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_l} \right) = \sum_m \Delta g_m \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m} \right) \quad (7)$$

ここで、(7)式右辺は出力の上限で運転している発電機を除いて合計するものとする⁹⁾。(6)、(7)式から $\Delta \lambda_n$ を消去すると(8)式となる。

$$\Delta g_m = \frac{\Delta G \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_l}\right) \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m}\right)}{c_m \cdot (1 - \mu_n \cdot d_m) \cdot \sum_m \frac{(1 - \partial PL / \partial g_m)^2}{c_m \cdot (1 - \mu_n \cdot d_m)}} \quad (8)$$

4.2 揚水式発電所で揚水運転した場合の運転費の増加量の計算法

出力が g_m から Δg_m 増加したときの m 号機の運転費増加量 Δf_m は(1)式より(9)式となる。

$$\Delta f_m = \Delta g_m \cdot b_m + \Delta g_m \cdot c_m \cdot (2 \cdot g_m + \Delta g_m) \quad (9)$$

また、NO₂ 排出量の増加量 Δy_m は(2)式から(10)式となる。

$$\Delta y_m = d_m \cdot \Delta f_m \quad (10)$$

μ_n を一定と考えているので排出量を Δy_m 減少するときの系統全体の運転費の増加量は $-\mu_n \cdot \Delta y_m$ である ($\because \partial \sum f_m / \partial Y = \mu_n$)⁵⁾。従って、第 n 時間帯で l 号揚水式発電所が揚水量を ΔG 増加し、かつ排出量規制を満足するときの系統全体の運転費の増加量 $\Delta H_{\text{pump}}(l, n)$ は(11)式となる。

$$\Delta H_{\text{pump}}(l, n) = \sum_m \Delta f_m - \mu_n \cdot \sum_m \Delta y_m = \sum_m (1 - \mu_n \cdot d_m) \cdot \Delta f_m \quad (11)$$

4.3 揚水式発電所で発電機運転した場合の運転費の増加量の計算法

l 号揚水式発電所が第 n 時間帯で揚水運転量を ΔG 増加して得られた水量を用いて、第 k 時間帯で発電機運転を行う場合を考える。 l 号揚水式発電所の総合効率を η_l とすると、発電機運転時の出力増加量は $\eta_l \cdot \Delta G$ となる。従って、第 k 時間帯における需給バランスは(12)式となる。

$$-\eta_l \cdot \Delta G \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_l}\right) = \sum_m \Delta g_m \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m}\right) \quad (12)$$

ここで(7)式と同様、(12)式右辺は出力の下限で運転している発電機を除いて合計するものとする。(6)、(12)式から $\Delta \lambda_n$ を消去すると(13)式となる。

$$\Delta g_m = \frac{-\eta_l \cdot \Delta G \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_l}\right) \cdot \left(1 - \frac{\partial PL}{\partial g_m}\right)}{c_m \cdot (1 - \mu_n \cdot d_m) \cdot \sum_m \frac{(1 - \partial PL / \partial g_m)^2}{c_m \cdot (1 - \mu_n \cdot d_m)}} \quad (13)$$

従って(13)式から得られる出力増加量を用いて(9)式から m 号機の運転費増加量を計算できる。同様に、(10)式から排出量増加量が得られ、系統全体の運転費増加量は(11)式から得られる。ここで、いま(11)式により求めた値の意味は、 l 号揚水式発電所が ΔG だけ揚水運転量を増加して得られた水量を用いて、第 k 時間帯で発電機運転を行いかつ排出量規制を満足したときの系統全体の運転費の増加量であり、これを $\Delta H_{\text{gene}}(l, k)$ とする。

4.4 揚水式発電所の運用決定法

ある火力発電機起動停止パターンに対し、運転すべき揚水式発電所とその時期は(14)式の最小化操作により得られる。ここで α_{ijkl} はタグランched の未定係数とする。

$$\min_{l,n,k} \{ \Delta H_{\text{pump}}(l, n) + \Delta H_{\text{gene}}(l, k) \} \quad (14)$$

(14) 式の結果に基づき、該当する揚水式発電所を該当する時間帯で運転する。それらの時間帯で再び(3)式の最小化を行い、増分送電損失、 μ_n を求める。つまり、揚水式発電所を含まない、火力発電機のみによる運用からはじめて、 ΔG 、 $\eta_l \cdot \Delta G$ の揚水式発電所の運転量の増加をくり返す。揚水式発電所の運転量に対し系統全体の運転費がコンペックスに変化するならば、この計算をくり返して最適な揚水式発電所の運用を求めることができる。

なお、排出量規制値 Y が厳しい値で与えられ、第 n 時間帯における火力発電機のみによる運転では、その規制値を達成できない場合の計算手法について以下に述べる。各揚水式発電所の総合効率のうち最大の総合効率を持つ揚水式発電所を \bar{l} とし、その総合効率を $\bar{\eta}$ とする。また、この排出量規制値を満足できない時間帯を以下では n_0 とする。第 n_0 時間帯で排出量規制値を満足できない場合は、 \bar{l} 号揚水式発電所で発電機運転を行う。その運転量は、排出量規制値が満足されるまで $\bar{\eta} \cdot \Delta G$ ずつ、くり返し増加する。この発電機運転に対し、揚水運転すべき時間帯は(15)式の最小化操作で求める。

$$\min_k \{ \Delta H_{\text{pump}}(\bar{l}, k) \} \quad (15)$$

この最小化操作で得られた時間帯で ΔG の揚水運転を行い、再び(15)式の最小化操作を行う。この計算を、第 n_0 時間帯の発電機運転量に見合う揚水量が得られるまでくり返す。

次に、いまの計算で得られた \bar{l} 号揚水式発電所の運転量を他の揚水式発電所へ分担することを考える。第 k 、 n_0 時間帯で \bar{l} 号揚水式発電所の運転量をそれぞれ ΔG 、 $\eta_l \cdot \Delta G$ だけ l 号揚水式発電所へ肩代りさせる場合を考えると、その肩代りすべき揚水式発電所と時間帯は(16)式の最小化操作により得られる。

$$\min_{l,k} \{ \Delta H_{\text{pump}}(l, k) - \Delta H_{\text{pump}}(\bar{l}, k) + \Delta H_{\text{gene}}(l, n_0) \} - \Delta H_{\text{gene}}(\bar{l}, n_0) \quad (16)$$

ここで、第 n_0 時間帯で \bar{l} 号揚水式発電所から l 号揚水式発電所へ肩代りすると排出量規制値を越える場合がある ($\because \bar{\eta} \cdot \Delta G \geq \eta_l \cdot \Delta G$)。その場合は \bar{l} 号揚水式発電所の運転量を増加することにより排出量規制を考慮する。(16)式の最小化をくり返すことにより各揚水式発電所の運転量を決定することができる。

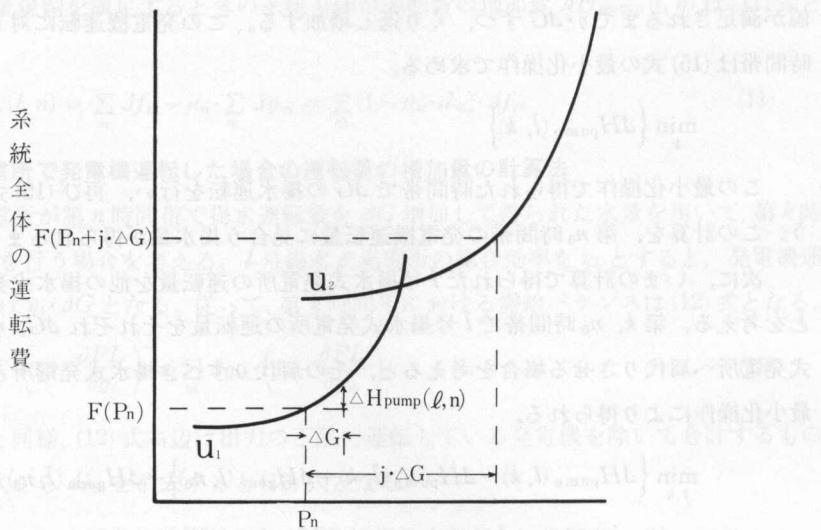
また、与えられた発電機群では出力上下限制約のために需給バランスがとれない場合もある。その場合も、上で述べた排出量規制値を達成できなかった場合と同様に扱う。つまり、 \bar{l} 号揚水式発電所の運用により需給バランスを満足し、その後各揚水式発電所間の出力分担を(16)式により求める。

5. 揚水式発電所の最適運用を考慮した火力発電機最適運用決定法

5.1 火力発電機起動停止パターンの変更法

さまざまな火力並列発電機群を考え、これらを u_1, u_2, \dots とする。ある排出量規制のもとで、さまざまな火力分担負荷に対する系統全体の運転費を考えると一般に第1図のようになる。火力分担負荷 P_n に対し、最適な並列発電機群により運転したときの系統全体の運転費を $F(P_n)$ とする。第1図から明らかなように、揚水式発電所の運転量により最適な並列発電機群は変化し、その点で第1図の特性はコンベックスではなくなる。第 n 時間帯で $j \cdot \Delta G$ の電力で揚水運転を行い、かつそのとき得られた水量で第 k 時間帯で発電機運転を行ったときの累積運転費の増加量を $\Delta H_{\text{total}}(n, k)$ とすると(17)式となる。

$$\Delta H_{\text{total}}(n, k) = F(P_n + j \cdot \Delta G) - F(P_n) - F(P_k) + F(P_k - j \cdot \bar{\eta} \cdot \Delta G) \quad (17)$$



第1図 火力分担負荷に対する系統運転費

すなわち、(17)式の $\Delta H_{\text{total}}(n, k)$ は $j \cdot \Delta G$ による揚水運転とそれに伴う発電機運転を、 l 号揚水式発電所のみで運転した場合を示している。 j にさまざまな値を与えて $\Delta H_{\text{total}}(n, k)$ を求めると、揚水式発電所の運用を考慮した火力最適並列発電機群の候補を求めることができる。しかし、 j に多数の種類の値を与えて(17)式を計算することは、計算量の増大を招き望ましくない。従って、ある定数 $\varepsilon (\geq 0)$ を用いて(18)式の不等式を考える。

$$\Delta H_{\text{total}}(n, k) \leq \begin{cases} \frac{\Delta H_{\text{total}} + \varepsilon}{\varepsilon} & (\Delta H_{\text{total}} < 0) \\ 0 & (\Delta H_{\text{total}} \geq 0) \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 $\underline{\Delta H_{\text{total}}}$ は $\Delta H_{\text{total}}(n, k)$ の最小値を示す。すなわち(18)式を満足するとき火力並

列発電機群を $\Delta H_{\text{total}}(n, k)$ を与える並列発電機群に変更し、新たな火力起動停止パターンを得る。ここで、 ε を導入した理由は

- ① j に与えるべき値の決定は経験的、試行錯誤的に行わなければならない。
- ② (17) 式は揚水式発電所の分担負荷をすべて l 号機に与え、揚水式発電所間の負荷配分を考えていない。
- ③ (17) 式は第 n 時間帯で揚水した水量をすべて第 k 時間帯で使用しており、時間帯間の配分を考えていない。

などの点を考慮し、できるだけ正確な解を求めるためである。また、具体的に j および ε に与えるべき値は系統の規模や計算機の能力等を考慮して決定する必要がある。

5.2 本手法による最適運用決定手順

以上に述べた本論の計算手法をまとめると次のようになる。

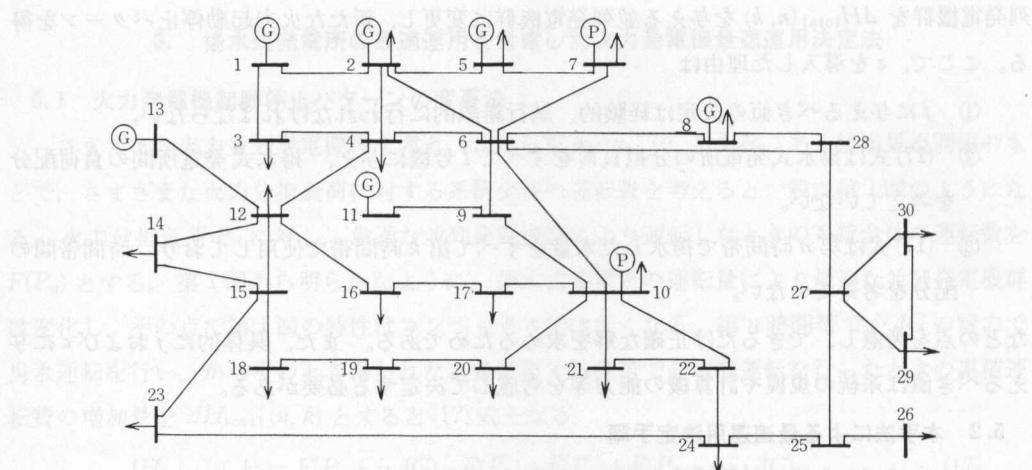
- [Step 1] 第3章で述べた計算手法により、火力発電機のみによる最適運用を求める。
- [Step 2] 与えられた火力発電機起動停止パターンに対し、第4章で述べた計算手法を適用し、揚水式発電所の最適運用を求める。
- [Step 3] 第5.1節で述べた計算手法により、新たな火力発電機起動停止パターンを求める。得られたすべての起動停止パターンに対し [Step 2] を適用する。

6. モデル系統による試算例

6台の火力発電機で構成されるモデル系統を用いて試算を行った。火力発電機の特性を第1表に示す。火力並列発電機群は優先順位法により構成されるものとし、第1表の発電機 No. は並列優先順位を示すものとする。系統を第2図に示す。負荷曲線を第3図に示す。系統の各ノードの負荷は、この負荷曲線に従い、かつ第2表に示した一定の割合で常に変化するものと考えた。系統内には2台の揚水式発電所が含まれるものとし、その特性定数を第3表に示す。最初に揚水式発電所を含まずに、火力発電機のみで運転した場合の経済運用（排出量規制はない）を求めたところ、その結果は第4表のようになった。次に揚水式発電所を含む経済運用を

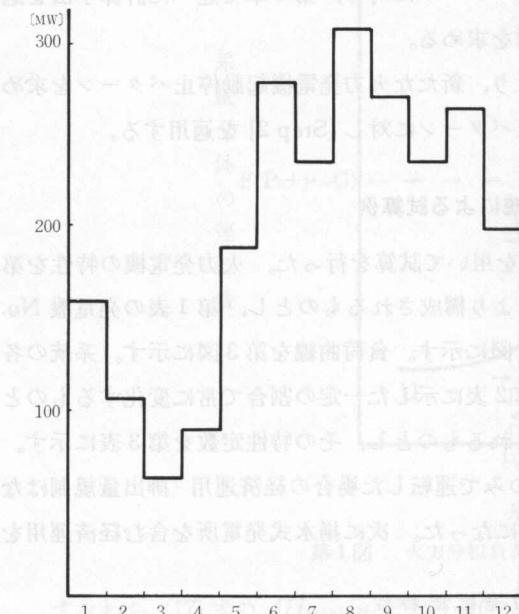
第1表 火力発電機特性

No.	接続ノード	$f = a + b \cdot g + c \cdot g^2$ [千円/時]			$\frac{g}{[MW]}$	\bar{g} [MW]	d	起動費
		a	b	$c \times 1000$				
1	1	2.085	0.8340	1.560	50	200	0.669	—
2	2	1.251	0.7298	7.300	20	80	0.750	3.2
3	8	3.753	1.3553	3.480	10	35	0.722	2.4
4	11	2.085	1.2510	10.400	10	30	0.774	2.2
5	13	2.085	1.2510	10.400	12	40	2.546	2.6
6	5	1.251	0.4170	26.100	15	50	2.552	2.8



第2図 モデル系統

第2表 系統内負荷



第3図 負荷曲線

第3表 揚水式発電所定数

No.	接続ノード	η
1	10	0.74
2	7	0.73

第4表 経済運用(揚水なし)

		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												
運転費 [千円]		179	117	76	99	215	340	277	386	330	277	320	228
排出量 [kg]		185	74	42	61	212	311	261	351	303	261	296	222

×：解列、空欄：並列、累積運転費：568.71[万円]

第5表 経済運用(揚水あり)

		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	1				-20								14.8
	2				-20								14.6
運転費 [千円]		179	117	114	99	215	340	277	341	330	277	320	228
排出量 [kg]		185	74	72	61	212	311	261	312	303	261	296	222

×：解列、空欄：並列、累積運転費：567.27[万円]

第6表 $Y=300$ [kg]に対する最適運用(揚水なし)

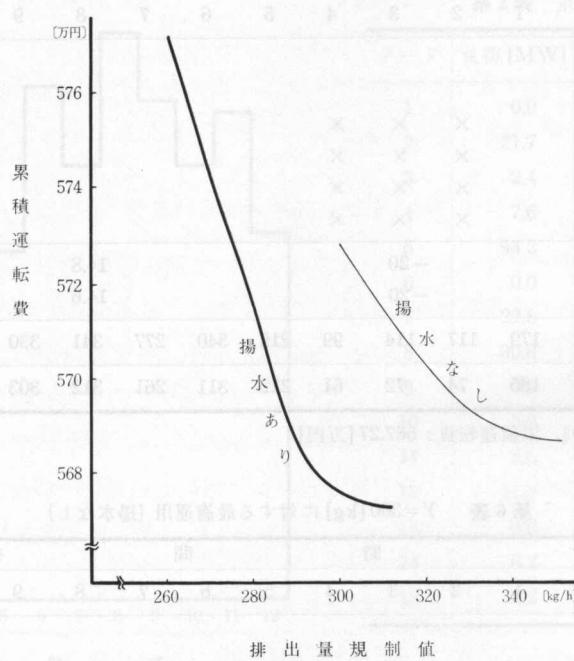
		時間帯											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
火力発電機	1												
	2												
	3												
	4												
	5												
	6												
運転費 [千円]		179	117	76	99	215	341	277	406	330	277	320	228
排出量 [kg]		185	74	42	61	212	300	261	281	300	261	296	222

×：解列、空欄：並列、累積運転費：572.85[万円]

第7表 $Y=300[\text{kg}]$ に対する最適運用 (揚水あり)

		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	1						-20					14.8	
	2						-40					29.2	
運転費 [千円]		179	117	114	121	215	341	277	319	330	277	320	228
排出量 [kg]		185	74	72	76	212	300	261	295	300	261	296	222

×: 解列, 空欄: 並列, 累積運転費: 567.57 [万円]



第4図 排出量規制に対する運転費

求めたところ、その結果は第5表に示すような結果となった。第5表の結果から、揚水式発電所を単純に総合効率 η の順に並列したのでは眞の最適運用は得られないことが再び確認できた(単純に総合効率だけで揚水式発電所の運用を求める $\eta_1 > \eta_2$ から 1 号揚水式発電所のみを運転することになる)。次に排出量規制値 Y を $300[\text{kg}]$ として最適運用を求めた。この規制値に対しては、第6, 8, 9 時間帯でそれぞれ規制値オーバーになっている。揚水式発電所を含まず

に、火力発電所機のみで運転した場合の最適運用を第6表に示す。第6表の結果から第6, 9時間帯では火力発電機間で負荷配分を変更し、排出量規制を達成していることがわかる。このとき、第9時間帯では排出量を約1% (3kg) 削減するのにほとんど運転費は増加していない。それに対し、第6時間帯では約3.7% (11kg) 排出量を削減するのに、運転費は約0.3% (1千円) 程度増加しているのがわかる。一方、第8時間帯では火力並列発電機群を変更して排出量規制を達成しており、このとき排出量の削減必要量約17% (51kg) に対し運転費は約5% (2万円) の増加となっていることがわかる。次に同じ排出量規制に対し、揚水式発電所を含む最適運用を求めたところ第7表のような結果となった。経済運用の第5表の結果から、排出量規制値をオーバーしているのは第6表の場合と同じく第6, 8, 9時間帯である。第6表の結果と同様、第7表の結果でも第6, 9時間帯では、火力発電機間の負荷配分を変更して排出量規制を達成している。また第8時間帯では火力並列発電機群は変更せずに揚水式発電所を運転し、火力分担負荷を軽減し排出量規制を達成していることがわかる。さまざまな排出量規制値に対する累積運転費を第4図に示す。第4図から経済運用(最小費用運用)では、揚水式発電所を用いることにより運転費と排出量の両方を同時に減少できていることがわかる。また、揚水式発電所を利用して各排出量規制値を満足する最適運用が得られることが確認できた。

7. む す び

火力発電所に対し、単位時間当りのNO₂排出量規制が与えられた場合の、揚水式発電所を利用した最適運用決定法について述べた。排出量規制に対しては、火力発電機間の負荷配分を変更する方法、火力並列発電機群を変更する方法、揚水式発電所を運転する方法がある。本手法を用いることにより、排出量規制に対する最適な方法、または最適な方法の組み合わせを求め、最適運用を決定できることを示し、モデル系統による試算で確認した。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))の交付を受けて行ったものである。また、試算は本学電気工学科データー処理室の HITAC 10 II を利用して行った。

終りに、終始貴重な御指導を下さっ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) 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B分冊, Vol. 93-B, No. 9, p. 391-398 (昭和48年9月).
- 2) J. B. Cadogan and L. Eisenberg: Environmental Control of Electric Power System, ISA, Transaction 14, (1975).
- 3) 山城：直流法による電力潮流最適化、電気学会論文誌B分冊, Vol. 97-B, No. 11, p. 679-684 (昭和52年11月).
- 4) 中村・奈良・山城：電力潮流の最適化(第4報)、北見工業大学研究報告, Vol. 9, No. 2, p. 151-160 (昭和53年3月).

- 5) D. A. Wismer and R. Chattergy: Introduction to Nonlinear Optimization, Elserier North-Holland Inc. (1978).
 - 6) 例えば朝日年鑑: 1982, p. 453 (昭和 57 年 2 月).
 - 7) 中村・山城・小池: エネルギー貯蔵装置の最適配置による電力系統の負荷率向上とその最適運用(第 3 報), 文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究電気エネルギーの有効利用と高密度化に関する研究, 昭和 56 年度研究成果報告書, p. 144-148 (昭和 57 年 2 月).
 - 8) 中村・仲村・山城・小池: 揚水式発電所を含む電力系統の最適運用(第 3 報), 昭和 57 年電気学会全国大会, No. 943, p. 1217 (昭和 57 年 3 月).
 - 9) 中村・山城: 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 4 報), 北見工業大学研究報告, Vol. 14, No. 1 掲載予定.
 - 10) 清水: 日本のエネルギー計画, 株式会社エネルギー・ナル, p. 9-24 (昭和 57 年 7 月).