UDC 628.53:662.92:621.311.22:546.174

621.313.322:621.316.71

論 文

57-B 51

NO₂ 累積排出量規制に対する火力発電機の 起動停止問題の一解法

正 員 中 村 陽 一 (北見工大)

正 員 山 城 迪 (北見工大)

正 員 小 池 東一郎 (北見工大)

1. ま え が き

さまざまな大気汚染物質中、二酸化窒素(NO₂)については、まだまだ環境基準達成率が低く、その対策費も毎年膨大なものとなっている。産油国の政情不安などから良質燃料の安定確保も問題になっており、またLNGの相次ぐ値上げなどから、一層「環境は高価なもの」となりつつある。

そこで本論では、脱硝装置などによらずに運用制御の面から、すなわち火力発電所の日間起動停止パターン、および負荷配分方法を変更することにより、火力発電所から排出されるNO₂の累積排出量規制を満足し、かつ最も経済的な運用方式(最適運用)の決定方法について検討する。また、本手法により達成できる規制値の範囲とその費用も明らかにする。

本論文においては、火力発電所の燃料費およびNO₂排出量(以下、排出量と略す)が共に発電機出力の関数となるところに着目しており、排出量が制約された最適化問題として扱う。従って、脱硝技術の難しさを伴いながら、石油代替エネルギーとして再登場しつつある石炭火力を始めとして、あらゆる火力発電所に対して適用できるところに本手法の第一の特徴がある。次に、計算に利用する計算機システムの能力に合わせて計算量、使用語数を加減することにより、従来の単純な優先順位法に比較して厳密な最適解に、より近い解を算定できる「多重優先順位法」の導入を第二の特徴としている。また、本論文では各時間帯にお

ける最適な並列発電機の組み合わせを求める多段決定問題として扱っているが、状態推移が最小停止時間⁽¹⁾の制約により不可能な場合(不可能な再起動を含む状態推移の場合)、再帰的な計算手法を用いて、状態推移を可能にするような新たな運用を求め直すことにより最適運用を得ているところに第三の特徴がある。

2. 目的関数

以下に用いる主な記号を表1に示す。日間を N 等分し、 M 台の火力発電機により電力系統が構成されているものとし、運転費、排出量を(1),(2)式で表わすことにする⁽²⁾⁽⁸⁾。

$$f_m^n = \begin{cases} a_m + b_m \cdot g_m^n + c_m \cdot (g_m^n)^2 & (g_m^n > 0) \\ f_{S_m} & (g_m^n = 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$y_m^n = \alpha_m + \beta_m \cdot g_m^n + \gamma_m \cdot (g_m^n)^2 \quad (g_m^n > 0) \quad \dots\dots\dots (2)$$

累積排出量規制値を Y とし、送電損失を無視するならばラグランジュの未定乗数法により(3)式の目的関数を得る。

$$\Phi = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^n + \sum_{n=1}^N \lambda^n \left(P^n - \sum_{m=1}^M g_m^n \right) + \mu \left(Y - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_m^n \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_m^n, \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_m^n$ がコンベックスなとき、

$\partial\Phi/\partial g_m^n = 0$ を解いて $Y \geq \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_m^n$ を満足する最適値を得ることができる⁽³⁾。しかし、各時間帯で並列すべき発電機が決定されていないためにすぐに最適運用を決定することはできない。但し、最適運用が得

A Method for Startup and Shutdown Problem of Thermal Generating Units with the Total NO₂ Emission Constraints. By Yoichi Nakamura, Member, Susumu Yamashiro, Member & Toichiro Koike, Member (Kitami Institute of Technology).

中村陽一: 正員, 北見工業大学電気工学科

山城 迪: 正員, 北見工業大学電気工学科

小池東一郎: 正員, 北見工業大学

表 1 記号一覧表
Table 1. List of symbols.

記 号	意 味	記 号	意 味
$m, m1, m2$	火力発電機の番号	U_0	すべての発電機を要素とする集合
n	時間帯の番号	U_J, U_{K1}, U_{K2}	U_0 の部分集合
T	最小停止時間	U_{R1}, U_{R2}	
t	T を時間帯数で表わした値	$F(u_i^n)$	u_i^n により第 n 時間帯においてさまざまな排出量を実現したときの特性。排出量、運転費、 μ の三次元空間における特性
$\alpha_m, b_m, c_m, \alpha_m, \beta_m, \gamma_m$	発電機定数	$\omega^n(U_0)$	第 n 時間帯において U_0 に含まれる u_i^n によりさまざまな排出量を実現し、各排出量ごとに最適な運転を選んだときの特性。排出量、運転費、 μ 、 u_i^n の四次元空間における特性
fS_m	m 号機の起動費 ⁽¹⁾	Q^1	$\omega^1(U_0)$
P^n	第 n 時間帯における負荷	$Q^n(U_0, Q^1)$	第 1 時間帯における運用は Q^1 とし、第 2 時間帯から第 n 時間帯までは U_0 に含まれる並列発電機集合により運転し、さまざまな累積排出量を実現し各累積排出量ごとに最適な運用を選んだときの特性。累積排出量、累積運転費、 μ 、起動停止パターンの四次元空間における特性
λ^n	第 n 時間帯における需給バランスに関するラグランジュ乗数	$Q^{n-1}(U_J, Q^{n-1-1}(U_0, Q^1))$	第 $n-1$ 時間帯までの運用は、 $Q^{n-1-1}(U_0, Q^1)$ とし、第 $n-1$ 時間帯から第 $n-2$ 時間帯までは U_J に含まれる並列発電機集合により運転し、さまざまな排出量を実現し、各累積排出量ごとに、最適な運用を選んだときの特性。 $Q^n(U_0, Q^1)$ と同じ四次元空間の特性
μ	累積排出量規制に関するラグランジュ乗数	$\phi^{n-1}(u_i^n)$	u_i^n の運転を可能にするような第 $n-1$ 時間帯までの運用の中から選んだ最適な運用の特性。 $Q^n(U_0, Q^1)$ と同じ四次元空間の特性
g_m^n	第 n 時間帯における m 号機の出力		
$\Delta g_{m1}^n, \Delta g_{m2}^n$	第 n 時間帯において m 号機を解列したときの $m1, m2$ 号機の出力増加分		
y_m^n	第 n 時間帯における m 号機の排出量		
f_m^n	第 n 時間帯における m 号機の運転費		
Δf_{m1}^n	第 n 時間帯において m 号機を解列したときの $m1$ 号機の運転費増加分		
$\Delta(\sum f)_m$	m 号機を解列したときの系統全体の運転費の増加分		
u_i^n	第 n 時間帯において i 番目に構成された並列発電機集合その要素は並列している発電機		

られたとき、その運用は(3)式の目的関数を $Y \geq \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_m^n$ のもとで最小にするので、最適運用はすべての時間帯を通して等しい μ を用いて決定できることがわかる。

3. 多重優先順位法による並列発電機集合の構成

従来、厳密な計算により最適運用を決定するとき、発電機が系統に並列する、すべての組み合わせを考え、これらの中から最適運用を構成するための各時間帯で並列すべき発電機の組み合わせを決定した⁽¹⁾。しかし、この「すべての組み合わせは」系統構成発電機台数の増加により幾何級数的に増大し、使用語数、計算時間の増大を招くので、それを避ける場合には優先順位による「特定の組み合わせ」の中から最適、あるいは準最適な並列発電機の組み合わせを決定した。この優先順位法は主として発電単価など、経済性に着目して決定されており、環境保全を考慮した優先順位法は確立されておらず、また最小停止時間の制約によっては、あるいは特性の似た発電機が含まれている場合は真の最適解を決定し得ない場合がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。そこで、本論文では発電単価によらず、多重優先順位なる概念を導入し並列発電機のすべての組み合わせについて計算することなく、しかもできるだけ厳密な最適解に近い解が得られるように配慮する。

ある μ のもとで(3)式を最小化すると、 $\partial \Phi / \partial g_m^n = 0 (m \in u_i^n)$ 、 m 号機を解列すると $g_m^n = \sum \Delta g_{m2}^n$ が成

立する。これらの式から m 号機を解列したときの λ^n の変化分を消去すると、(4)式が得られ、(1)式より(5)式となる。

$$\Delta g_{m1}^n = \frac{g_m^n}{(c_{m1} - \mu \gamma_{m1}) \sum_{\substack{m2 \in u_i^n \\ m2 \neq m}} \frac{1}{c_{m2} - \mu \gamma_{m2}}} \quad m1 \in u_j^n, m1 \neq m, \dots (4)$$

$$\Delta f_{m1}^n = \Delta g_{m1}^n b_{m1} + \Delta g_{m1}^n c_{m1} \times (\Delta g_{m1}^n + 2g_{m1}^n) \quad m1 \in u_i^n, m1 \neq m, \dots (5)$$

ここで、 g_{m1}^n は m 号機を解列する前の $m1$ 号機の出力である。従って、系統全体では(6)式となる。

$$\Delta(\sum f)_m = \sum_{\substack{m1 \in u_i^n \\ m1 \neq m}} \Delta f_{m1}^n + fS_m - f_m^n \quad (m \in u_i^n) \dots (6)$$

ここで、 f_m^n は m 号機の解列前の運転費である。一般に負荷配分を行なうとき、 $\partial \Phi / \partial g_m^n = 0$ を解いて得られる g_m^n が出力上下限制約を越えるならば、そのような発電機の出力は上限、または下限に固定される。このような固定操作を受けた発電機の出力増加分は(4)式とはならない。しかし、 u_i^n から解列すべき適当な発電機を見出す分においては、出力増加分を厳密に求めなくとも十分正確に解列すべき発電機を決定し得る⁽⁶⁾ことを考慮し、(4)式の出力増加分は出力固定操作の有無にかかわらず、並列しているすべての発電機に対して適用するものとする。このとき、(6)式は近似的に求めた値となる。

ある並列発電機集合 u_i^n についてある μ の値によ

り負荷配分を行なったとき、(6)式の $\Delta(\sum f)_m$ を u_i^n の要素の数だけ求める。これらの $\Delta(\sum f)_m$ のうち、最小のものを $\Delta(\sum f)_{\min}$ とし、ある適当な $\varepsilon (\geq 0)$ を用いて(7)式に示す不等式を考える。

$$\Delta(\sum f)_m \leq \begin{cases} \Delta(\sum f)_{\min} + \varepsilon & \Delta(\sum f)_{\min} < 0 \\ \varepsilon & \Delta(\sum f)_{\min} \geq 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7)$$

この(7)式を満足する発電機を u_i^n から除いて(解列して)、それぞれ新たな並列発電機集合を構成する。この発電機集合の構成は、全機が並列する発電機集合から始めることにし、例えば $\varepsilon=0$ の場合を考えると $u_1^n \rightarrow u_2^n \rightarrow u_3^n \dots$ と表わすことができる。ここで、例えば解列順位が 1, 2, ... 号機となっている場合は u_1^n : 全機並列, u_2^n : 1号機解列, u_3^n : 1, 2号機解列となる。これは従来の単純な優先順位を(6)式を用いて決定した場合に相当し、ある μ のもとで考えた結果である。これをさまざまな μ のもとで考えることにする。 μ が変化すると $\Delta(\sum f)_{\min}$ を与える発電機が変化する。また $\varepsilon > 0$ とすると $\Delta(\sum f)_{\min}$ 以外の発電機も解列することになり、後述のモデル系統試算例では図6のようになる。これは従来の単純な優先順位を複数種類同時に考慮することに相当し、本論文では多重優先順位法と呼ぶことにする。

前述したように、単純な優先順位法を用いたために厳密な最適解が得られなくなる場合とは、最小停止時間の制約が原因となっている場合と、(6)式の近似計算が原因となっている場合がある。計算に利用する計算機システムの能力によって許容される計算時間、使用語数を考慮して ε をできるだけ大きくするということは、この「厳密な最適解が得られなくなる場合」をできるだけ避けていることを意味する。

4. すべての発電機の最小停止時間が時間帯幅 (24 時間/ N) 以下の場合の最適運用決定法——最小停止時間の制約を考慮する必要のない場合——

ある起動停止パターン (u_i^n のある組み合わせ) に対してさまざまな $\mu (\leq 0)$ (3) のもとで(3)式を最小化すると、各時間帯の u_i^n において排出量 $\left(\sum_{m=1}^M y_m^n \right)$ に対する運転費 $\left(\sum_{m=1}^M f_m^n \right)$ 、および μ の特性が得られる。最小排出量運転 (μ に負の十分小さな値を用いた場合)*による排出量に対し、それ未満の排出量が要求されても実現不可能であり、そのような運用に対しては

十分大きなペナルティコストを与えることにする。第 n 時間帯においてこの排出量 - 運転費 - μ の三次元空間で表わされる特性を $F(u_i^n)$ とする。第 n 時間帯において多重優先順位法により得られた並列発電機集合の $F(u_i^n)$ を求め、これらの特性を排出量 - 運転費平面からみると(各排出量に対する運転費を考えると)例えば図1のようになる。

第 n 時間帯における排出量に対する最適運転の特性を $\omega^n(U_0)$ とすると、(8)式を得る。

$$\omega^n(U_0) = \min_{u_i^n \in U_0} \{ F(u_i^n) \} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $\min \{ \}$ は、 $u_i^n \in U_0$ なるすべての u_i^n に関して、各排出量ごとに運転費最小な $F(u_i^n)$ を選択することを意味し、図1では $\omega^n(U_0)$ は太線で示した特性となる。このとき、各排出量に対し(8)式の $\omega^n(U_0)$ を与える μ の特性 ($\omega^n(U_0)$ の排出量 - μ 平面から見た特性) は、例えば図2の ω^n となる。図中、 ω^n

図1 $F(u_i^n)$ の NO_2 排出量 - 運転費平面からみた特性

Fig. 1. The characteristics of $F(u_i^n)$ on emission-cost plane.

図2 (10)式を NO_2 排出量 - μ 平面からみた特性

Fig. 2. The characteristics for eq. (10) on emission- μ plane.

*: 最小排出量運転はコスト関数に排出量を用いた目的関数の最小化により得られる。この最小化条件と $\partial \Phi / \partial g_m^n = 0$ を $\mu \rightarrow -\infty$ とした場合が一致する。

の ④, ⑤ は図 1 で示した最適並列発電機集合の変化する点 ④, ⑤ に対応している。

第 n 時間帯までの最適運用は、マルコフ的特性が保証されていることより、(9), (10) 式を解いて得ることができる。

$$\Omega^1(U_0, \Omega^1) = \Omega^1 = \omega^1(U_0) \dots\dots\dots (9)$$

$$\Omega^n(U_0, \Omega^1) = \omega^n(U_0) + \Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1) \\ n=2, 3, \dots, N \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\omega^n(U_0)$ と $\Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1)$ の和は、(3) 式より同じ μ の値を用いて得られた値 $\sum_{m=1}^M y_m^n$ と $\sum_{n=1}^{n-1} \sum_{m=1}^M y_m^n$, $\sum_{m=1}^M f_m^n$ と $\sum_{n=1}^{n-1} \sum_{m=1}^M f_m^n$ および u_i^n と起動停止パターン) を加え、合成し(すなわち、四次元空間において μ 軸以外の各軸方向へたし算、合成を行ない) $\Omega^n(U_0, \Omega^1)$ を得ることを意味し、図 2 は排出量軸方向へ加えているようすを示している。図中、 Ω^n の ④, ⑤ は ω^n の ④, ⑤ から得られた点を示している。図からわかるように、 μ が不連続なためにある排出量に対しては、複数の運用が得られる場合があるが、この部分については累積運転費の小さい方の運用を採用。その結果 Ω^n の排出量- μ 平面から見た特性は、例えば図 2 の太線ようになる。

結局、本手法において、最適運用を求める ((8)~(10) 式を計算する) ためには排出量-運転費平面からみた各特性の交点を求める必要がある。この交点を求める計算を容易にするために、各特性を折れ線で近似し、交点の存在の判定に利用することにする。

5. 最小停止時間が時間帯幅を越える発電機がある場合の最適運用決定法

時間帯幅を越える最小停止時間をもつ発電機の起動停止を考える場合、(10) 式の $\Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1)$ の起動停止パターンによっては、 $\omega^n(U_0)$ への状態推移 ($\Omega^{n-1} \rightarrow \omega^n$) が不可能になるときもある。その場合は、(10) 式の代わりに (11) 式を用いて $\Omega^n(U_0, \Omega^1)$ を求める。

$$\Omega^n(U_0, \Omega^1) = \min_{u_i^n \in U_0} \{F(u_i^n) + \phi^{n-1}(u_i^n)\} \dots\dots\dots (11)$$

なお、第 1 時間帯にはピーク負荷を選びすべての発電機が並列するものとする。ところで、 $\phi^{n-1}(u_i^n)$ は最小停止時間 T がすべての発電機について等しい場合、(12) 式で与えられる。

$$\phi^{n-1}(u_i^n) = \min_{u_j^{n-1} \in U_0} \left\{ F(u_j^{n-1}) + \Omega^{n-2}(U_j, \Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1)) \right\}$$

図 3 (12) 式 の 概 念

Fig. 3. Concept of eq. (12).

$$U_j = (\overline{u_i^n} \cup u_j^{n-1}) \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $\overline{u_i^n}$ は u_i^n の余集合を示し、 $\cup$ は和集合を示す。従って、 U_j は $u_j^{n-1} \rightarrow u_i^n$ の状態推移を可能にするために $n-t$ から $n-2$ 時間帯の間に並列が許される発電機の集合である。すなわち、 u_j^{n-1} に含まれる u_i^n に含まれる (再起動している) 発電機を除いた集合である。ここで、 $\Omega^{n-2}(U_j, \Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1))$ の特性を構成し得る各時間帯における $F(u_i^n)$ を概念的に示すと図 3 となる。

図から、第 1 時間帯から第 $n-t-1$ 時間帯まではすべての発電機を要素とする集合 U_0 に含まれる範囲、および第 $n-t$ 時間帯から第 $n-2$ 時間帯までは、一部の発電機を要素とする集合 U_j に含まれる範囲で最適化を行ない、 $\Omega^{n-2}(U_j, \Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1))$ を求めており、 $u_j^{n-1} \rightarrow u_i^n$ の状態推移を可能にする最適運用が得られているようすがわかる。ここで、多重優先順位法を用いるとき、図 3 のように各時間帯で構成される並列発電機集合の数が等しくなる保証はなく、また U_j に含まれる並列発電機集合は図のように一部に集まっている保証もないが、同図は (12) 式の概念を示してある。また ϕ^{n-1} の () の中に示されるパラメータは、「運転を保証する並列発電機集合」を要素とする集合とし、その要素 (すなわち、並列発電機集合) をすべて記入して示すものとする (後述 (15), (18) 式参照)。ところで、(12) 式の $\Omega^{n-2}(U_j, \Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1))$ は、(13), (14) 式の漸化式により決定することができる (最小停止時間の時間帯数 $t=2$ の場合は (14) 式により決定できる)。

$$\Omega^{n-p}(U_j, \Omega^{n-t-1}(U_0, \Omega^1)) \\ = \omega^{n-p}(U_j) + \Omega^{n-p-1}(U_j, \Omega^{n-t-1}(U_0, \Omega^1)) \\ p=t-1, t-2, \dots, 3, 2 \dots (13)$$

$$\Omega^{n-t}(U_j, \Omega^{n-t-1}(U_0, \Omega^1)) \\ = \omega^{n-t}(U_j) + \Omega^{n-t-1}(U_0, \Omega^1) \dots\dots\dots (14)$$

ところで、(12)式において右辺第2項の Ω^{n-2} の起動停止パターンから、右辺第1項の並列発電機集合 u_j^{n-1} への状態推移($\Omega^{n-2} \rightarrow u_j^{n-1}$)が不可能になる場合も考えられ(Ω^{n-2} は $u_j^{n-1} \rightarrow u_i^n$ の状態推移を保証しているにすぎないからである)、その場合は(12)式の第2項 Ω^{n-2} の代わりに(15)式の ϕ^{n-2} を用いて ϕ^{n-1} を決定する。

$$\left. \begin{aligned} & \phi^{n-2}(u_i^n, u_j^{n-1}) \\ &= \min_{u_k^{n-2} \subset U_J} \{F(u_k^{n-2}) + \Omega^{n-3} \\ & \quad (U_{K1}, \Omega^{n-t-1}(U_{K2}, \Omega^{n-t-2} \\ & \quad (U_0, \Omega^1)))\} \\ & U_{K2} = (u_j^{n-1} \cup u_k^{n-2}) \\ & U_{K1} = (U_J \cap U_{K2}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (15)$$

ここで、 U_{K2} は $u_k^{n-2} \rightarrow u_j^{n-1}$ の状態推移を考慮した並列発電機集合であり、 $\cap$ は積集合を示し、 U_{K1} は $u_k^{n-2} \rightarrow u_j^{n-1}$ と $u_j^{n-1} \rightarrow u_i^n$ の両方の状態推移を考慮している。(15)式において $t=2$ のとき右辺第2項 Ω^{n-3} は(16)式による。

$$\begin{aligned} & \Omega^{n-3}(U_{K1}, \Omega^{n-t-1}(U_{K2}, \Omega^{n-t-2}(U_0, \Omega^1))) \\ &= \Omega^{n-t-1}(U_{K2}, \Omega^{n-t-2}(U_0, \Omega^1))^{t=2} \dots (16) \end{aligned}$$

また、 $t > 2$ のとき(15)式の Ω^{n-3} は(13)、(14)式により再帰的に決定できる。(15)式において、 $\Omega^{n-3} \rightarrow u_k^{n-2}$ の状態推移が不可能になったときは $n-1$ を n と考えて再帰的に $\phi^{n-3}(u_i^n, u_j^{n-1}, u_k^{n-2})$ を(15)式により求め、第2項 Ω^{n-3} の代りにこの ϕ^{n-3} を用い ϕ^{n-2} を求めることができる。(13)式において $\Omega^{n-p-1} \rightarrow \omega^{n-p}$ の状態推移が不可能になった場合は(17)、(18)式により Ω^{n-p} を決定する。

$$\left. \begin{aligned} & \Omega^{n-p}(U_J, \Omega^{n-t-1}(U_0, \Omega^1)) \\ &= \min_{u_i^{n-p} \subset U_J} \{F(u_i^{n-p}) + \phi^{n-p-1} \\ & \quad (u_i^n, u_i^{n-p})\} \dots\dots\dots (17) \\ & \phi^{n-p-1}(u_i^n, u_i^{n-p}) \\ &= \min_{u_r^{n-p-1} \subset U_J} \{F(u_r^{n-p-1}) + \Omega^{n-p-2} \\ & \quad (U_{R1}, \Omega^{n-t-1} \\ & \quad (U_{R2}, \Omega^{n-p-t-1}(U_0, \Omega^1)))\} \\ & U_{R2} = (u_i^{n-p} \cup u_r^{n-p-1}) \\ & U_{R1} = (U_{R2} \cap U_J) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

図4は(18)式の概念を示しているが、 $n-p-t$ 時間帯から $n-t-1$ 時間帯までは $u_r^{n-p-1} \rightarrow u_i^{n-p}$ の状態推移を考慮し、 $n-t$ 時間帯から $n-p-2$ 時間帯までは $u_j^{n-1} \rightarrow u_i^n$ の状態推移をも考慮していることを表わしている。 U_{R1} 、 U_{R2} に含まれる範囲が図のように

図4 (18)式概念

Fig. 4. Concept of eq. (18).

集中する保証はないが、概念的に示してあることは図3と同様である。(18)式において、 $p=t-1$ のとき第2項 Ω^{n-p-2} は(19)式により求められる。

$$\begin{aligned} & \Omega^{n-p-2}(U_{R1}, \Omega^{n-t-1}(U_{R2}, \Omega^{n-p-t-1}(U_0, \Omega^1))) \\ &= \Omega^{n-t-1}(U_{R2}, \Omega^{n-p-t-1}(U_0, \Omega^1)) \\ & \quad p=t-1 \dots\dots (19) \end{aligned}$$

また、(18)式において、 $p < t-1$ のときは(18)式の $n-p$ を(13)、(14)式の n と考えて Ω^{n-p-2} を再帰的に決定することができる。(18)式の $\Omega^{n-p-2} \rightarrow u_r^{n-p-1}$ の状態推移が不可能になった場合は、(15)式において状態推移不可能になった場合と同様に、 $n-1$ を n と考え、 $\phi^{n-p-2}(u_i^n, u_i^{n-p}, u_r^{n-p-1})$ を(18)式から再帰的に求め、(18)式第2項 Ω^{n-p-2} の代りに、この ϕ^{n-p-2} を用いて ϕ^{n-p-1} を決定する。(14)式において $\Omega^{n-t-1} \rightarrow \omega^{n-t}$ の状態推移不可能な場合は(20)式により Ω^{n-t} を求めることができる。

$$\begin{aligned} & \Omega^{n-t}(U_J, \Omega^{n-t-1}(U_0, \Omega^1)) \\ &= \min_{u_s^{n-t} \subset U_J} \{F(u_s^{n-t}) + \phi^{n-t-1}(u_s^{n-t})\} \\ & \quad \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

ここで、第2項 $\phi^{n-t-1}(u_s^{n-t})$ は $n-t$ を n と考え(12)式より再帰的に導くことができる。

以上の計算手順により、最小停止時間が時間帯幅を超える場合も有限回の再帰的な計算により最適運用を求めることができる。

6. 最小停止時間が発電機により異なる場合の最適運用

最小停止時間が発電機により異なる場合も、再帰的な計算手法を用いて、最適運用を決定することができる。すなわち、 $\Omega^{n-1} \rightarrow \omega^n$ の状態推移が不可能になり、 $u_j^{n-1} \rightarrow u_i^n$ において再起動する発電機の中に2種類の最小停止時間がある場合、これらを時間帯数に換算して $t_1, t_2 (t_1 < t_2)$ であるなら、(12)式の第2項を $\Omega^{n-2}(U_{T1}, \Omega^{n-t_1-1}(U_{T2}, \Omega^{n-t_2-1}(U_0, \Omega^1)))$ として $\phi^{n-1}(u_i^n)$

を求めることができる。ここで、 U_{T2} は $u_j^{n-1} \rightarrow u_i^n$ の状態推移で再起動する発電機のうち、最小停止時間が t_2 の発電機の余集合であり、 U_{T1} は最小停止時間が t_1 の発電機の余集合と U_{T2} の積集合 ($u_j^{n-1} \rightarrow u_i^n$ で再起動するすべての発電機の余集合) である。

再起動する発電機に h 種類の最小停止時間があるときは、それらの最小停止時間を時間係数に換算したものを $t_1, t_2, \dots, t_h (t_1 < t_2 < \dots < t_h)$ として、 h 重の再帰的な計算による $\Omega^{n-2}(U_{T1}, \Omega^{n-1-1}(U_{T2}, \Omega^{n-2-1}(U_{T3}, \dots, U_{T_h}, \Omega^{n-t_h-1}(U_0, \Omega^1) \dots)))$ を、(12) 式の第 2 項として $\phi^{n-1}(u_i^n)$ を求めることができる。以下、同様に (15), (18) 式の第 2 項も求めることができる。

7. モデル系統への適用および結果に対する考察

表 2 に特性を示す 12 台の発電機からなるモデル系統を考える。負荷曲線を図 5 に示す。最初に、最小停止時間の制約を考慮しない場合について試算した結果を示す。 $\varepsilon=5.0$ として経済運用を行なった場合の結果は表 3 のとおりである。表中、×印は解列を示す。経済運用を行なった場合、必然的に排出される NO_2 の累積排出量は 66.51t であった。また、この経済運用のときの累積運転費は 5,233 万円となった。

第 4 時間帯において、並列発電機集合が構成されるようすを示すと図 6 となる。但し、図中に示した番号は並列発電機集合に含まれない (解列している) 発電機の番号である。実線で示した矢印は、 $\Delta(\Sigma f)_{\min}$ を与える発電機を解列して得られた並列発電機集合の構成経路であり、 $\varepsilon=0$ の場合でも得られる経路であることを示す。点線による矢印は $\Delta(\Sigma f)_{\min}$ を与えない発電機を解列して得られた構成経路であり、その構成に必要な最小の ε の値を図中に示してある。一方、

図 5 負荷曲線

Fig. 5. Load pattern.

表 3 経済運用 ($T=0$ 時間)

Table 3. Economic operation ($T=0$ h).

発電機 No.	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2		×	×	×	×	×	×		×	×	×	×
3				×	×	×				×		
4					×	×						
5~12												

累積運転費: 5,233 万円, NO_2 累積排出量: 66.51t

従来方法により、さまざまな μ のもとで最大の発電単価を与える発電機を解列して並列発電機集合を構成した場合⁽⁷⁾の様子を図 7 に示す。

表 3 から、第 4 時間帯で経済運転を与えている発電機集合の解列番号は 1, 2, 3, 4 であることがわかるが図 7 では、この発電機集合は得られていない。このことから本手法で用いた多重優先順位法により、より厳密な解を得られることが確認でき、その有効性が明らかになった。

また、本モデル系統においては、最適運用を与える

表 2 発電機特性定数

Table 2. Characteristic constants of units.

発電機 No.	燃料費 $f=a+b \cdot g+c \cdot g^2$ (千円/時)			$g_{\min}$ (MW)	$g_{\max}$ (MW)	排出量 $y=\alpha+\beta \cdot g+\gamma \cdot g^2$ (kg/時)			起動費 (千円/時)
	a	b	$c \times 1,000$			α	β	$\gamma \times 1,000$	
1	15.652	0.7971	3.153	27	101	164.98	0.3652	3.479	2.0
2	9.334	0.9546	2.190	27	101	164.98	0.3652	3.479	2.2
3	25.718	0.7922	0.732	37	232	62.31	-0.5655	6.251	3.9
4	21.715	0.8355	0.588	37	220	62.31	-0.5655	6.251	3.9
5	8.019	0.8201	1.881	27	99	14.08	0.3329	4.259	4.6
6	13.446	0.6848	2.709	27	99	14.08	0.3329	4.259	4.6
7	22.094	0.6806	0.630	37	222	40.91	-0.5543	6.940	5.2
8	18.656	0.7177	0.504	37	236	40.91	-0.5543	6.940	5.2
9	34.302	0.7513	0.438	144	344	10.43	-0.6147	5.738	—
10	28.058	0.7915	0.372	144	344	10.43	-0.6147	5.738	—
11	29.469	0.6455	0.375	144	344	43.58	-0.5194	4.686	—
12	24.104	0.6800	0.318	144	344	43.58	-0.5194	4.686	—

(注) 9~12 号機はベース火力として、常に系統へ並列する

図 6 (6)式による並列発電機集合の構成
($n=4$, $\varepsilon=5.0$ の場合, 解列発電機
番号を示す)

Fig. 6. Construction of operating units
set by eq. (6).

図 7 発電単価による並列発電機集合の構成
(解列発電機番号を示す)

Fig. 7. Construction of operating units
set by generating unit cost.

並列発電機集合は各時間帯で $\Delta(\sum f)_{\min}$ を与える発電機の解列を繰り返して得られており, これは後述する最小停止時間, 累積排出量規制を考慮する場合も同様であった。このことは, $\varepsilon=0$ として計算することにより, 最小の計算時間と使用語数により最適運用が得られることを意味している。しかし, 前に述べたように本手法では(6)式の近似計算を用いていることから, あらゆる系統で $\varepsilon=0$ で最適運用が得られるという保証はないことに注意しなければならない, ここに多重優先順位法の有効性がある。

次に, ε の値に対する所要計算時間を調べると, 北海道大学大型計算機センターの M180 を用いた例では, $\varepsilon=0$ で 12.81 秒, $\varepsilon=1.2$ で 13.53 秒, $\varepsilon=5.0$ で 14.22 秒であり, ε を大きくするに従って所要計算時間が增大することが確認できた。これは, 各時間帯における並列発電機集合の数が増大するためであるが, このことは同時に所要記憶容量の増大も意味し, 結局 ε は計算に利用する計算機システムの能力により制約される値となる。

次に, 起動停止するすべての発電機の最小停止時間 T を 6 時間とした場合の経済運用を表 4 に示す。この

表 4 経済運用 ($T=6$ 時間)

Table 4. Economic operation ($T=6$ h).

発電機 No.	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2		×	×	×	×	×	×		×	×	×	×
3				×	×	×						
4												
5~12												

累積運転費: 5,235 万円, NO_2 累積排出量: 65.15 t

表 5 最適運用 ($T=6$ 時間, $Y=61.0$ t)

Table 5. Optimal operation ($T=6$ h, $Y=61.0$ t).

発電機 No.	時 間 帯											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
2		×	×	×	×	×	×		×	×	×	×
3												
4												
5~12												

累積運転費: 5,255 万円

図 8 累積 NO_2 排出量規制に対する累積運転費

Fig. 8. Total cost with total emission
constraint.

ときの累積運転費は 5,235 万円であり, 必然的に排出される NO_2 は 65.15 t であった。表 3 と比較して, 最小停止時間の制約を考慮することにより, 若干累積運転費が大きくなっていることがわかる。また, 同じく $T=6$ 時間の場合について, 累積排出量規制 $Y=61.0$ t を与えた場合の計算結果を表 5 に示す。

表から, 累積排出量規制により起動停止パターンも変化することがわかる。 $T=6$ としたときの各累積排出量規制に対する累積運転費を図 8 に示す。図から, 排出量規制が厳しくなるに従って, 幾何級数的に累積運転費が増大していることがわかり, 火力発電所に排出量規制が与えられた場合の運転費の変化の様子が明らかになった。図中の矢印は発電機の起動停止パターンが変化する点であり, 累積排出量規制に対する累積

運転費特性の傾きが不連続になっているのは、この起動停止パターンが変化するためである。

8. む す び

火力発電所に対し、NO₂の累積排出量規制が与えられた場合、従来利用されていた脱硝装置などハード的な対策によらない新たな運用制御方式を開発し、モデルシステムを用いて試算し、その有効性を確認した。

従来用いられた優先順位法に対し、発電単価による多重優先順位法を導入し、計算に利用する計算機システムの能力に合わせた計算をすることにより、できるだけ、厳密な最適解に近い解を得られるよう配慮し、その有効性を示した。

また、再帰的な計算手法を用いることにより、最小停止時間の制約を考慮した最適運転パターンが得られることを示し、モデルシステムを用いてその有効性を確認できた。

累積排出量規制が厳しくなるに従い、累積運転費は幾何級数的に増大し、また規制値により起動停止パターンも変化することを示した。なお、これらの計算は北見工業大学データステーションより北海道大学大型計算機センターの FACOM 230-75、および M 180 の PASCAL を利用して行なった。また、本研究の一部は昭和 54 年度北海道科学研究費一般研究補助金の交付を受けて行なったものである。

(昭和 55 年 11 月 17 日受付、同 56 年 7 月 24 日再受付)

文 献

- (1) 山城：電学論 B, 93, 391 (昭 48-9)
- (2) 中村・奈良・山城：昭 53 年電気学会全大 No. 1027
- (3) D. A. Wismer & R. Chattergy: Introduction to Nonlinear Optimization 82 (1978)
- (4) 関根：電力系統工学 119 (昭 53-8)
- (5) 高橋：電力システム工学 287 (昭 52-1)
- (6) 中村・山城・小池：昭 55 年電気四学会北海道支部連大 69
- (7) 中村・山城・小池：昭 54 年電気四学会北海道支部連大 72
- (8) O. E. Finnigam & A. A. Fouad: IEEE Winter Power Meeting (1974-1)
- (9) J. B. Cadogan & L. Eisenberg: ISA Trans. 14, 217 (1975)
- (10) 中村・山城・小池：電気学会情報処理研究 IP-81-14 (昭 56-3)

付 録

計算量の短縮化 (11)式において、 $\Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1)$

の運用で各累積排出量において常に第 $n-1$ 時間帯で並列しているか、または既に最小停止時間以上停止している発電機は第 n 時間帯で常に並列運転可能であるために、そのような発電機の集合を U_{11} とすると、 U_{11} に含まれる並列発電機集合 u_{i1}^n については $\phi^{n-1}(u_{i1}^n) = \Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1)$ となるので、(付 1)、(付 2) 式により $1\Omega^n, 2\Omega^n$ を求め、(付 3) 式により $\Omega^n(U_0, \Omega^1)$ を求めることができる。

$$1\Omega^n = \omega^n(U_{11}) + \Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1) \dots \dots \dots (\text{付 1})$$

$$2\Omega^n = \min_{u_i^n \in U_{11}} \{F(u_i^n) + \phi^{n-1}(u_i^n)\} \dots (\text{付 2})$$

$$\Omega^n(U_0, \Omega^1) = \min\{1\Omega^n, 2\Omega^n\} \dots \dots \dots (\text{付 3})$$

また、 $\Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1)$ と $\phi^{n-1}(u_i^n)$ を比較すると、各累積排出量において、常に $\phi^{n-1}(u_i^n)$ の累積運転費の方が大きい等しい ($\Omega^{n-1}(U_0, \Omega^1) \leq \phi^{n-1}(u_i^n)$) ので、 $\omega^n(U_{11}) < F(u_i^n)$ を満足する u_i^n については、(付 2) 式の $2\Omega^n$ を求めるとき考慮する ($\phi^{n-1}(u_i^n)$) を計算する) 必要がないことになる。また、 U_{11} に含まれない並列発電機集合 u_i^n の中で要素の数最小の集合を u_{i2}^n として、 $u_{i2}^n \supset U_{12}^n$ を満足する u_{i2}^n については $\phi^{n-1}(u_{i2}^n) \leq \phi^{n-1}(u_{i2}^n)$ が成り立つ。なぜならば、 $\phi^{n-1}(u_{i2}^n) \rightarrow u_{i2}^n$ の状態推移は常に可能であるが、 $\phi^{n-1}(u_{i2}^n) \rightarrow u_{i2}^n$ の状態推移は常に可能とは限らないからである。従って、(付 2) 式の $2\Omega^n$ を求めるとき、 $F(u_{i2}^n) < F(u_{i2}^n)$, $u_{i2}^n \supset u_{i2}^n$ なる $F(u_{i2}^n)$ は考慮する ($\phi^{n-1}(u_{i2}^n)$ を計算する) 必要がないことになる。従って、(付 2) 式は (付 2)' 式のように変更することができる。

$$2\Omega^n = \min_{\substack{u_i^n \in U_{11}, \text{not}\{F(u_i^n) > \omega^n(U_{11})\} \\ \text{not}\{F(u_i^n) > F(u_{i2}^n)\}, u_i^n \supset u_{i2}^n}} \{F(u_i^n) + \phi^{n-1}(u_i^n)\} \dots \dots \dots (\text{付 2})'$$

ここで、not{関係演算} は「各排出量において常に関係演算が成立する」ことの否定である。同様な計算量短縮化は (12) 式に対しても適用する。