

NO_x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3報)*

中 村 陽 一**

山 城 迪**

(昭和54年4月28日受理)

Startup and Shutdown Problem of Thermal Generating Units with Constrained Total Nitrogen Oxides Emissions (Part 3)

by Yoichi NAKAMURA and Susumu YAMASHIRO

In the previous paper, we reported on the scheduling method which decides the optimum operative pattern with a constrained total nitrogen oxides emissions from thermal power stations.

When we decide the optimum operative pattern, in the strict sence, we must consider every commitment of the generating units. However, these commitments tend to increase in geometric progression.

In this paper, we create a level E ($0 \leq E < 1$), and remove the unit which ratio of unit cost to a maximum unit cost of generating is greater than E , and we will get another commitment of generating units. By using this method, we create the commitments of generating units, and we can avoid considering every commitment, and so can reduce of the memory requirement and computing time.

Applying our method to the model system, we can see that the computing time is more reduced by increasing the value of E , and the solution is slipped out from the original optimum operative pattern, but this difference is very little.

1. ま え が き

前報¹⁾では、火力発電所より排出される窒素酸化物(NO_x)の累積排出量が制約された場合の最適運転パターンの決定手法について述べた。最適運用を選択、決定する場合、厳密には組み合わせ可能なすべての並列発電機群について考慮する必要がある²⁾。しかし、この並列発電機群の数は、系統構成発電機台数の増加により幾何級数的に増大する。そこで一般には優先順位法等により、一部の並列発電機群についてのみ考慮し最適運用を求めることになる³⁾。しか

* 電気学会全国大会で一部発表 (昭和54年4月)

** 北見工業大学電気工学科

し、このとき、この考慮する並列発電機群の範囲によっては真の最適運用が求まらない場合もある⁴⁾。そこで今回、考慮する並列発電機群の範囲を与える指標値 E を設定することにし、この指標値 E により最適化に必要な計算時間が短縮化できること、また、 E の値によっては真の最適解は得られなくなる場合もあるが実用上は最適解に等しいとみなせる準最適解が得られることを示す。

2. 定 式 化

2.1 目的関数

日間を N 時間帯に分割し、発電機 M 台からなる系統を考えると(1)式に示すような目的関数を考える。

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

$$= \sum_{n=1}^N \phi^n + \mu Y \quad (2)$$

$$\phi^n = \sum_{m=1}^M f_m^n + \lambda_n \left(P_n - \sum_{m=1}^M g_m^n \right) - \mu \sum_{m=1}^M y_m^n \quad (3)$$

ここで g_m^n は第 n 時間帯における m 号機の出力であり、 f_m^n は g_m^n の 2 次式で与えられる燃料費が、または停止時間に対し線形な値をとる起動費²⁾である。 y_m^n は g_m^n の 2 次式で表わされる排出量³⁾である。また、 P_n は第 n 時間帯の負荷であり、 λ_n 、 μ は Lagrange の未定乗数である。 Y は累積排出量制約である。(1)式を(2)式のように変形すると ϕ^n は(3)式となる。

2.2 最適運用

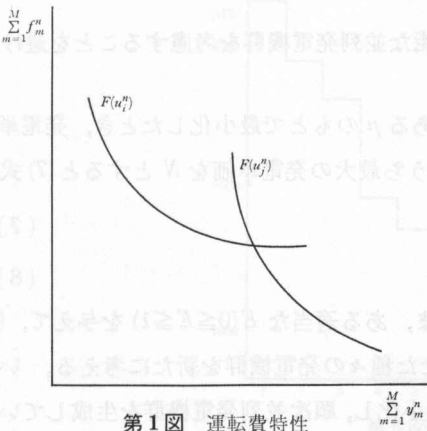
第 2 章 4 節で述べる並列発電機群 u_i^n について、さまざまな μ (≤ 0) のもつて(3)式を最小化するとき、各総排出量 $\left(\sum_{m=1}^M y_m^n \right)$ に対する運転費 $\left(\sum_{m=1}^M f_m^n \right)$ の特性が得られる¹⁾。このとき、この運転費特性を $F(u_i^n)$ で表わすことにする(第 1 図)。第 n 時間帯における最適運用を ω^n とすると(4)式により求めることができる。

$$\omega^n = \min_{u_i^n} \left\{ F(u_i^n) \right\} \quad (4)$$

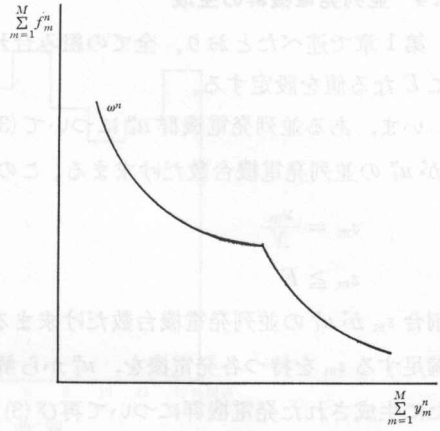
$$\Omega^1 = \omega^1 \quad (5)$$

$$\Omega^n = \omega^n + \Omega^{n-1} \quad (n > 1) \quad (6)$$

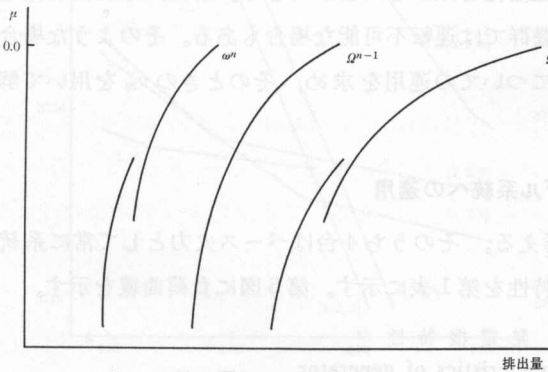
ここで、 ω^n は第 2 図に示すように、各排出量ごとに最小な $F(u_i^n)$ を選択して得られる¹⁾。第 n 時間帯までの累積運転費特性を Ω^n とすると Ω^1 については(5)式より、 Ω^n ($n > 1$) については(6)式より求めることができる。(6)式において、 ω^n と Ω^{n-1} の和は、(1)式により μ の等しいものどうしを加え累積運転費 $\left(\sum_{n=1}^n \sum_{m=1}^M f_m^n \right)$ 、累積排出量 $\left(\sum_{n=1}^n \sum_{m=1}^M y_m^n \right)$ を求めることを意味する。このとき第 3 図に示すように、ある累積排出量に対し複数の運用が求まる場合があるが、このときには ω^n を求めたときと同様に各累積排出量につき最小化操作を行う。



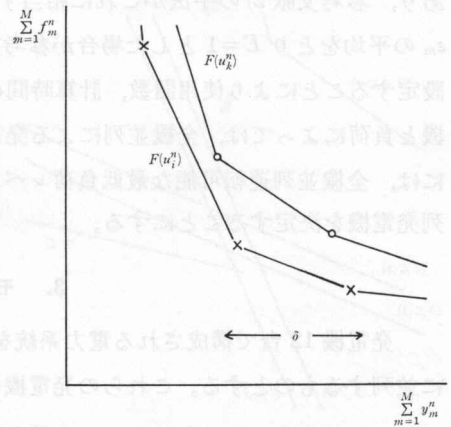
第1図 運転費特性
Fig. 1. Cost for emission.



第2図 第n時間帯における最適運用
Fig. 2. Optimum operation in the nth time interval.



第3図 累積排出量
Fig. 3. Total emissions.



第4図 運転費特性の折れ線近似
Fig. 4. Approximation of character by polygonal line.

2.3 第n時間帯における最適運用 ωⁿ の決定

前報¹⁾で述べたとおり、運転費特性 $F(u_i^n)$ を最小化して ω^n を求めるためには、 ω^n の不連続点を求めなければならないが、その不連続点を定式的に求めることは一般に不可能である¹⁾。そこで本論では $F(u_i^n)$ の特性を折れ線で近似する。ここで $\delta [t]$ なる排出量を設定し、各折れ線の各区間においてその総排出量 $\left(\sum_{m=1}^M y_m^n\right)$ についての領域が常に δ より小さくなるように折れ線を求める。そして、この折れ線で近似された $F(u_i^n)$ を用いて各領域内の ω^n の不連続点の存在を判定する(第4図)。不連続点の位置は繰り返し計算法により、 $F(u_i^n)$ と $F(u_j^n)$ の運転費と総排出量の一致した点を求める。

2.4 並列発電機群の生成

第1章で述べたとおり、全ての組み合わせ可能な並列発電機群を考慮することを避けるために E なる値を設定する。

いま、ある並列発電機群 u_i^n について (3) 式をある μ のもとで最小化したとき、発電単価、 ν_m が u_i^n の並列発電機台数だけ求まる。この ν_m のうち最大の発電単価を N とすると (7) 式によ

$$\varepsilon_m = \frac{\nu_m}{N} \quad (7)$$

$$\varepsilon_m \geq E \quad (8)$$

る割合 ε_m が u_i^n の並列発電機台数だけ求まる。いま、ある適当な $E (0 \leq E \leq 1)$ を与えて、(8) 式を満足する ε_m を持つ各発電機を、 u_i^n から解列させた種々の発電機群を新たに考える。いま、新たに生成された発電機群について再び (3) 式を最小化し、順次並列発電機群を生成していくことにする。これを全機が並列する発電機群から始めて、需給バランスがとれなくなるまで各総排出量について行う。明らかに $E=0$ の場合はすべての並列発電機群について考慮する場合であり、参考文献2)の手法がこれに相当する。また、ある u_i^n について、各総排出量における ε_m の平均をとり $E=1$ とした場合が参考文献1)の場合に当たる。これより、ある適当な E を設定することにより使用語数、計算時間の短縮化をはかることができる。また、系統構成発電機と負荷によっては、全機並列による発電機群では運転不可能な場合もある。そのような場合には、全機並列運転可能な最低負荷レベルについての運用を求め、そのときの ν_m を用いて解列発電機を決定することにする。

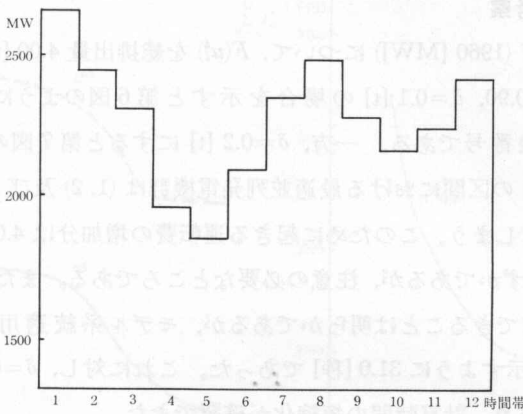
3. モデル系統への適用

発電機12台で構成される電力系統を考える。そのうち4台はベース火力として常に系統に並列するものとする。これらの発電機の特性を第1表に示す。第5図に負荷曲線を示す。

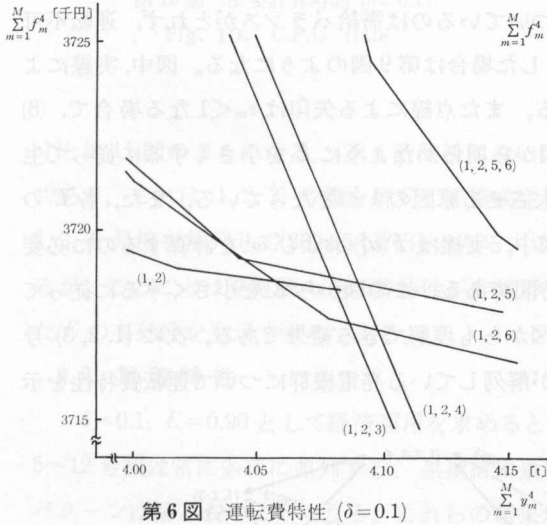
第1表 発電機特性

Table 1. Characteristics of generator

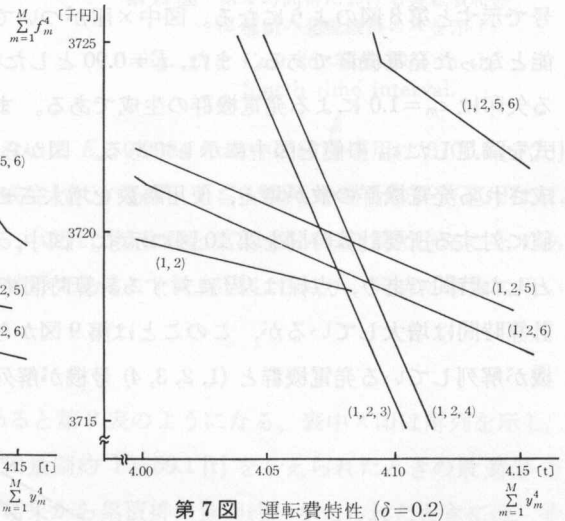
発電機	燃料費 $f=a+bg+cg^2$ [千円/時]			g_{\min} [MW]	g_{\max} [MW]	排出量 $y=\alpha+\beta g+\gamma g^2$ [kg/h]			起動費 [千円/時]
	a	b	$c \times 1000$			α	β	$\gamma \times 1000$	
1	15.652	0.7971	3.153	27	101	164.98	0.3652	3.479	2.0
2	9.334	0.9546	2.190	27	101	164.98	0.3652	3.479	2.2
3	25.718	0.7922	0.732	37	232	62.31	-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	—



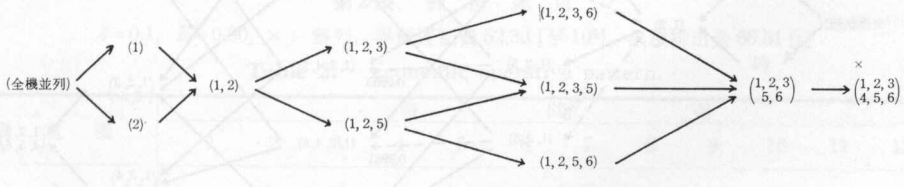
第5図 負荷曲線
Fig. 5. Load curve.



第6図 運転費特性 ($\delta=0.1$)
Fig. 6. Cost for emission ($\delta=0.1$).



第7図 運転費特性 ($\delta=0.2$)
Fig. 7. Cost for emission ($\delta=0.2$).



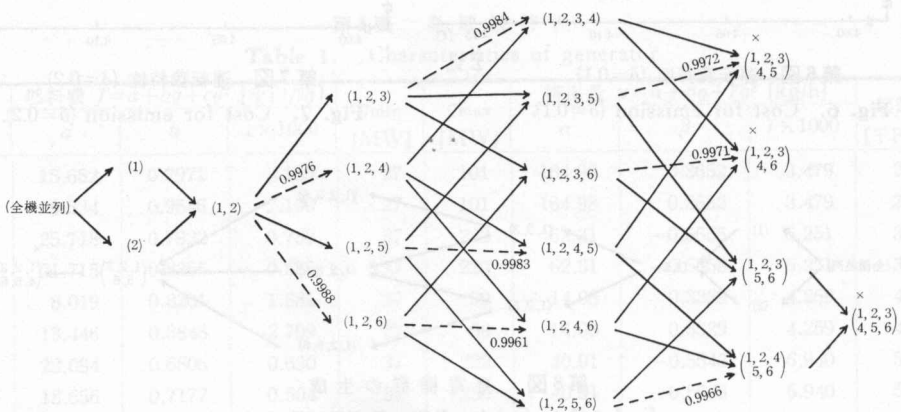
第8図 発電機群の生成
 $E=1$ の場合、() 内の数字は解列発電機番号、
×印は運転不可能な発電機群
Fig. 8. Creation of generating units commitments.

3.1 δ についての考察

第4時間帯の負荷 (1960 [MW]) について、 $F(u_i^4)$ を総排出量 4.00 [t] から 4.15 [t] の区間について部分的に、 $E=0.90$ 、 $\delta=0.1$ [t] の場合を示すと第6図のようになる。図中 () 内の数字は u_i^4 の解列発電機番号である。一方、 $\delta=0.2$ [t] にすると第7図のようになり、総排出量 4.054 [t] から 4.082 [t] の区間における最適並列発電機群は (1, 2) 及び (1, 2, 3) となり、(1, 2, 6) の最適性が見失われてしまう。このために起きる運転費の増加分は 4.078 [t] の総排出量の例では約 0.8 [千円] とわずかであるが、注意の必要なところである。また、 δ を大きくすることによって計算時間を短縮できることは明らかであるが、モデル系統適用例では $E=0.90$ 、 $\delta=0.1$ の場合、後で10図に示すように 31.0 [秒] であった。これに対し、 $\delta=0.2$ にしたときの所要計算時間は 22.9 [秒] であり、計算時間の短縮化が確認できた。

3.2 E についての考察

$\delta=0.1$ として $E=1$ とした場合、第4時間帯において生成される発電機群を解列発電機番号で示すと第8図のようになる。図中×印がついているのは需給バランスがとれず、運転不可能となった発電機群である。また、 $E=0.90$ とした場合は第9図のようになる。図中、実線による矢印は $\epsilon_m=1.0$ による発電機群の生成である。また点線による矢印は $\epsilon_m < 1$ なる場合で、(8) 式を満足した ϵ_m の値を図中に示してある。図から明らかのように E を小さくするに従って生成される発電機群の数が増え、使用語数を増大させる原因の1つとなっている。また、各 E の値に対する所要計算時間を第10図に示す。図中、実線は $F(u_i^4)$ および ω^4 を計算するのに必要とした時間であり、点線は Ω^{12} に対する計算時間である。この図から E を小さくするに従って計算時間は増大しているが、このことは第9図からも理解できる結果である。次に (1, 2, 3) 号機が解列している発電機群と (1, 2, 3, 4) 号機が解列している発電機群について運転費特性を示



第9図 発電機群の生成

$E=0.90$ の場合、() 内の数字は解列発電機番号、
点線の値は ϵ_m 、×印は運転不可能な発電機群

Fig. 9. Creation of generating units commitments.

第3表 累積排出量制約 $Y=59.1$ [t] の場合の最適運用
 $\delta=0.1$, $E=0.90$, \times : 解列, 累積運転費 53.22 [¥ 10⁶]

Table 3. Optimum operative pattern with constrained total emissions at 59.1 [t].

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

第4表 経 済 運 用

$\delta=0.1$, $E=0.9987$, \times : 解列, 累積運転費 52.33 [¥ 10⁶], 累積排出量 65.98 [t]

Table 4. Economic operative pattern.

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

の経済運用は第4表のようになる。第2表と比較して運転パターンは異なるが累積運転費は $E=0.90$ の場合の 52,326 [千円] に対して 52,332 [千円] と極めて近い値が得られており、第10図に示したように計算時間は単縮化されている。

4. む す び

火力発電所より排出される NO_x の累積排出量が制約された場合、考慮する並列発電機群の範囲を与える指標値 E を設定し、その有効性を確かめた。 E を大きくすることにより、考慮する並列発電機群の範囲を小さくし、計算時間の単縮化を図ることができた。また、 E を大きくすることにより、真の最適解が得られなくなるが、実用上は最適解に等しいと見なせる値が得られることも示した。

E の値は本来、計算を始める前に与えられなければならない値であるが、使用する計算機の処理速度、記憶容量の大きさ等も考慮に入れて決定すべきものである。本論における計算例は、北海道大学大型計算機センターの FACOM 230-75 による PASCAL を北見工業大学データステーションより利用して計算したものである。

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: NO_x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2報), (北見工大研報, 10巻2号).
- 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) 中村・奈良・山城: NO_x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1報), (北見工大研報, 10巻1号).
- 4) 山城・中村: 火力発電機群の起動停止問題における起動優先順位に関する考察(北見工大研報, 7巻1号).

(昭和54年11月20日受理)

Computer Simulation of a Transient Discharge in Nitrogen
between Sphere and Plane Electrodes

by Kousaku Yoshida and Hiroaki Takahashi

A computer simulation of a nitrogen discharge in the sphere to plane gaps is used to study the influences of a polarity of applied voltage and a nonuniformity in the field on the discharge development. The numerical method which is quantified available to the simulation of a discharge between parallel plates is extended and applied to the discharge between the sphere and plane electrodes. In the present

work, streak diagrams of the light output obtained by the simulation in the case of positive polarity show that, when the field is weakly nonuniformed, a rapid propagation of luminosity front towards the cathode will appear but under a stronger nonuniform field a luminosity propagation occurs in the opposite direction. The contribution of each of the two fast secondary processes, i.e. photoionization in the gas and ion emission at the cathode, to the discharge development is also discussed and it is concluded that the latter process becomes dominant in the discharge of positive polarity when nonuniformity is largened.

1. 実 験 装 置

本論文の電気的絶縁並極現象は本質的に過渡的かつ非線形な現象である。この現象を正確に理論的に進められて来たが、1970年代に入ってからいかに電圧降下を正確に計算して、その結果を比較する研究が各種の気体放電を対象にして行われて来たことが知られている。

従来最も定量的なシミュレーションモデルの開発として、1970年代後半から1980年代前半にかけて、コンピュータを用いたシミュレーションが行われて来た。今回は、従来の現象を比較して、その有用性なども

* 昭和54年11月20日電気学会北海道支部大会で一度発表。

** 北見工業大学電気工学科。

*** 北海道大学工学部電気工学科。