UDC 621.311.22: 621.316.71
621.311.153.2

論 文

48-B 50

火力発電機群の起動停止問題の一解法

北見工業大学 山城 迪

1. ま え が き

火力発電機群の起動停止問題とは“考察期間内の総運転費を最小にするには、発電機群の中のどの発電機をいつ起動停止させるべきか?”を決定することである。この問題に関しては、すでにいくつかの論文が報告されているが、これらの論文は主として停止優先順位によって解析されており、^{(1)~(3)}この場合、発電単価などによりあらかじめ優先順位を求めておく必要があること、また、この優先順位法では必ずしも最適解が得られない、などの点が問題となる。したがって、真の最適解を得るためには優先順位によらない解法が必要であるが、起動停止問題を解く場合にネックとなる点は、主として、発電機が再起動するためにはある一定の停止時間(最小停止時間)を必要とすること、また、起動コストが停止時間の関数となること、などを考慮に入れなければならないことである。

以上の点から本論文は日間運用における起動停止問題に対して、起動コストを線形と仮定し運用上の制約としての最小停止時間および強制停止の処理方法を含んだ優先順位によらない解法として、Dynamic Programming (D.P) の適用を試みたものである。D.P を適用する際、並列発電機群を状態変数とするなら、起動停止問題は日間の各時間帯での最適な並列発電機群を求める多段決定問題と考えることができるが、このとき、最小停止時間が制約となって、状態推移(並列発電機群の変化)が不可能になる場合が生じ、その結果、多段決定過程がマルコフの特性を失うことになる。したがって、当然のことながら単に形式的に D.P を適用してみても真の最適解を得ることはできない。

そこで、筆者は状態推移に際しては、それが可能な場合と不可能な場合に別れる点に着目して(モデルシステムでの例では、不可能となる場合は全状態推移回数の約 1/7 である)、後者の場合、その原因が推移前の状態に到達した過去の運用にあることから、この運用を取り消し、新たに“状態推移を可能にする”という条件を満たす、いわば条件付き運用を求めることによって計算時間的には多少の損失は避けられないにしても、最小停止時間による制約を考慮した問題に対して、D.P により最適解を求めることが可能なことを明らかにし、かつ、モデルシステムへの適用によって、この手法の有効性を確めた。

2. D.P による問題の定式化

まず、最小停止時間を無視し起動費を直線と仮定した場合について考察する。なお、この場合は瞬時的な考え方で解が求まるが、後の説明のつごう上 D.P により定式化を行なうものとする。

〈2.1〉 問題の記述と定式化 電力システムが M 台の火力発電機によって構成されているものとして、系統に並列する発電機の種々の組合せを考え、これらの並列発電機群に対して番号 $i(i=1, 2, \dots, 2^M)$ を割りあてる。いま、日間を N 等分し、第 n 時間帯における i 番目の並列発電機群を集合 ${}^nU^i$ で表わせば、われわれの問題は考察期間内の総運転費(燃料費+起動費)を最小にするような並列発電機群の時系列を求める多段決定問題と考えることができる。ここで、 ${}^nU^i$ の要素は、系統に並列している発電機であり、たとえば最も簡単な例として、2 機系では次のようになる。

$${}^nU^1 = (u_1, u_2), \quad {}^nU^2 = (u_1), \quad {}^nU^3 = (u_2)$$

$${}^nU^4 = \phi \quad u_1, u_2: 1, 2 \text{ 号機} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ϕ は 2 台とも停止を表わすが、これは、需給バランスの面から実現不可能であるから、以下の考

A Method for Startup and Shutdown Problem of Thermal Generating Units. By S. YAMASHIRO, Member (Kitami Institute of Technology)

山城 迪: 正員, 北見工業大学電気工学科助教授, 電力工学担当

察ではこれを無視する。

さて、負荷曲線が与えられているものとして、第1時間帯にピーク負荷を選び、ここでは全発電機が系統に並列すると仮定するなら、運転費用は

$$\Phi^1(\mathbf{U}^1) = \sum_{m=1}^M f_m^1(G_m^1) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 f_m^1 : 第1時間帯での m 号機の燃料

費、 G_m^1 : 第1時間帯での m 号機の出力、

$\mathbf{U}^1$: 第1時間帯で全発電機並列

次に、第 n 時間帯での並列発電機群を $\mathbf{U}^n$ 、 $n-1$ 時間帯でのそれを、 $\mathbf{U}^{n-1}$ とすると、 n 時間帯末までの累積運転費は

$$\begin{aligned} \phi^n(\mathbf{U}^n, \mathbf{U}^{n-1}) = & \sum_m f_m^n(G_m^n) \\ & + \sum_{m'} \{f_{S_{m'}^n}(\tau_{m'}^n) - f_{S_{m'}^{n-1}}(\tau_{m'}^{n-1})\} \\ & + \Phi^{n-1}(\mathbf{U}^{n-1}) \quad n=2, 3, \dots, N \dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 $u_m \in \mathbf{U}^i$, $u_{m'} \notin \mathbf{U}^i$ で、式中右辺第2項は $u_{m'}$ の n 時間帯における起動費を示す。また、 $\tau_{m'}^n$ は $u_{m'}$ の時間帯 n での停止時間で、

$$\tau_{m'}^n = \tau_{m'}^{n-1} + \delta, \quad u_{m'} \notin \mathbf{U}^i \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau_{m'}^n = 0, \quad u_{m'} \in \mathbf{U}^i \dots\dots\dots (5)$$

δ : 時間帯幅 (hr)

(3)式を $\mathbf{U}^{n-1}$ について最小化操作を行なうと、

$$\Phi^n(\mathbf{U}^i) = \min_{\mathbf{U}^{n-1}} \{\phi^n(\mathbf{U}^i, \mathbf{U}^{n-1})\} \dots\dots (6)$$

ただし、 $n=1$ の場合は(1)式による。

われわれは、(3)、(6)式の間数漸化式を解くことによって最適運用を決定することができる。

〈2.2〉 起動費の直線近似および燃料費の決定

一般に、起動費は発電機の停止時間の関数として次式で表わされる。すなわち埋火の場合は(7)式で、また、自然冷却の場合は(8)式となる。

$$fS(\tau) = k\tau \quad k: \text{定数} \dots\dots\dots (7)$$

$$fS(\tau) = k'(1 - e^{-\tau/T_0}) \dots\dots\dots (8)$$

k' : 定数、 T_0 : ボイラ冷却時定数

上式から、(3)式の右辺第2項における $u_{m'}$ の起動費は、おのおの(9)、(10)式となる。

$$\begin{aligned} f_{S_{m'}^n}(\tau_{m'}^{n-1}) - f_{S_{m'}^{n-1}}(\tau_{m'}^{n-1}) = & k_{m'} \delta \\ \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_{S_{m'}^n}(\tau_{m'}^n) - f_{S_{m'}^{n-1}}(\tau_{m'}^{n-1}) = & k_{m'} (e^{-\tau_{m'}^{n-1}/T_0} - e^{-\tau_{m'}^n/T_0}) \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

したがって、自然冷却の場合は、第 n 時間帯の起動費は停止時間の関数となる。すなわち、その費用は $n-1$ 時間帯以前の運用の仕方によって異なってくるので、前節で示した(3)、(6)式を解いても、真の最適解を得ることができないことになる。

第1図 自然冷却時の起動費とその線形近似

Fig. 1. Start-up cost for natural cooling and its linear approximation.

しかしながら、日間のような短期運用においては、(8)式は τ とともにほぼ直線的に増加するから、多くの場合、第1図に示すような起動費の直線近似が妥当なものと考えられる。ただし、ボイラ冷却時定数の特に小さい発電機については(このような発電機は停止時間の短い場合は、埋火を行なうほうが経済的に有利ではあるが)直線近似により、誤差が生じ起動費のみに着目した場合には問題があるが、日間運用の総運転費に占める起動費の割合はきわめて小さいことを考えると、(後の計算例では約1%)実用上は、起動費を直線と仮定してもさほど問題はないと考えられる。

以上の点から本論文では起動費を直線と考え、その適用対象については、厳密には埋火を行なう発電機が考察の対象となるが、先の理由により実用上は自然冷却の場合にも適用しうるものと考えてよい。

一方、運転費の大部分を占める燃料費は、発電機出力の二次式で表わし発電機間の負荷配分は等増分燃料費則を用いて決定する。

なお、並列発電機群 $\mathbf{U}^i$ が、電力平衡条件を満足し得ない場合には、コスト関数にはじゅうぶん大きなペナルティコストを与えることによって処理する。

3. 最小停止時間を考慮した解法

前章までの議論では起動に必要な最小停止時間については一切触れないできたが実際には停止中の発電機は、瞬時に系統に並列し負荷を分担することは不可能である。表現を変えれば並列発電機群を電力系統の運用状態を表わす状態変数と考えるなら、任意に状態推移を行なうことができないということになる。このような制約を考慮に入れた最適運用を求めるためには(3)、(6)式に次に述べるような考慮が必要である。

いま、 m 号機が n 時間帯で起動する場合を考える。

このとき、 $n-1$ 時間帯未までの停止時間 τ_m^{n-1} が、

$$\tau_m^{n-1} \geq T_m \quad T_m: \text{最小停止時間} \dots\dots\dots (11)$$

ならば、起動可能である。逆に、 $\tau_m^{n-1} < T_m$ なら起動不可能であるから、状態推移 $^{n-1}U^j \Rightarrow^n U^i$ は行なえない。(ここで、 $u_m \in ^{n-1}U^j, u_m \in ^n U^i$ とする)

この原因は $\Phi^{n-1}(^{n-1}U^j)$ の決定、すなわち、いかにして状態 $^{n-1}U^j$ に到達したかという過去の決定によるものであるから、最小停止時間の制約を考慮する場合には、問題の性質がマルコフ的特性を失うことになる。

しかしながら、すでに求めた $n-1$ 時間帯までの最適運用、 $\Phi^{n-1}(^{n-1}U^j)$ に固執しなければ、最小停止時間の制約を満足する他の運用法を見出すことによって、 $^{n-1}U^j \Rightarrow^n U^i$ の状態推移が可能となる。

このような、最小停止時間を満足するという条件付き運用の中から、最小費用運用を求め、これを、 $\Omega^{n-1}(^{n-1}U^j)$ で表わすと、累積運転費は(3)式のかわりに(12)式から求めることができる。

$$\begin{aligned} \phi^n(^{n-1}U^j, ^n U^i) = & \sum_m f_m^n(G_m^n) \\ & + \sum_{m'} \{f S_{m',n}(\tau_{m',n}) - f S_{m',n-1}(\tau_{m',n-1})\} \\ & + \Omega^{n-1}(^{n-1}U^j) \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

4. $\Omega^{n-1}(^{n-1}U^j)$ の決定法

〈4.1〉 2 機系の場合 いま、簡単のため発電機の起動に必要な最小停止時間はすべて等しいものとする。並列発電機群を格子点で示した第 n 時間帯までの全状態空間は第2図で表わすことができる。同図から $^{n-1}U^2 \Rightarrow^n U^1$ の状態推移では $u_2 \in ^{n-1}U^2$ かつ $u_2 \in ^n U^1$ だから、 u_2 が時間帯 n で起動する。このとき、 u_2 の停止時間 τ_2^{n-1} によって累積運転費は次のようになる。

(1) $\tau_2^{n-1} \geq T$ の場合は(3)式による。

(2) $\tau_2^{n-1} < T$ の場合

最小停止時間を時間帯の数で表わすと、 $q=T/\delta$ であるから、 u_2 が起動するためには、 $(n-q)$ から $(n-1)$ 時間帯の間で停止していなければならない。このことから、 $^{n-1}U^2 \Rightarrow^n U^1$ を可能にする状態空間は第2図の●印に制限される。この状態空間から得られる

第2図 2機系の状態空間

Fig. 2. State space of two unit system.

$n-1$ 時間帯までの最小費用は、 $(n-q)$ から $(n-1)$ 時間帯までの状態推移の仕方は唯一通りよりないので次のようにして求めることができる。新しい状態空間で求まる停止時間を t で示すと

$$\begin{aligned} \Omega^{n-1}(^{n-1}U^2) = & \sum_{l=n-q+1}^{n-1} \{f_1^l(G_1^l) + f S_2^l(t_2^l) \\ & - f S_2^{l-1}(t_2^{l-1})\} + \Omega^{n-q}(^{n-q}U^2) \dots (13) \end{aligned}$$

ここで、 t_2^l は、 u_2 の時間帯 l までの停止時間で

$$t_2^l = t_2^{l-1} + \delta, -t_2^{n-q} = \tau_2^{n-q} \dots\dots\dots (14)$$

また、

$$\Omega^{n-q}(^{n-q}U^2) = \Phi^{n-q}(^{n-q}U^2) \dots\dots\dots (15)$$

(13)式を用いると、状態推移 $^{n-1}U^2 \Rightarrow^n U^1$ における累積運転費は

$$\begin{aligned} \phi^n(^{n-1}U^2, ^n U^1) = & \sum_{m=1}^2 f_m^n(G_m^n) + \Omega^{n-1}(^{n-1}U^2) \\ & \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

以上は u_2 が起動する場合であるが、 u_1 が起動する場合 ($^{n-1}U^3 \Rightarrow^n U^1$) も同様に処理することができる。

〈4.2〉 3 機系の場合 全状態空間は第3図のとおりである。2機系と異なる点は3機系では起動台数が1台の場合と2台の場合とがある点で、以下、おのおの場合について説明する。

(1) 2台起動する場合 2台中、いずれか一方の発電機の停止時間が(11)式の条件を満足しない場合は Ω を求めるのに必要な状態空間は第3図の●印で示されるから、(13)式と同様の考え方で

$$\begin{aligned} \Omega^{n-1}(^{n-1}U^5) = & \sum_{l=n-q+1}^{l=n-1} \sum_m \{f_m^l(G_m^l) \\ & + \sum_{m'} \{f S_{m',l}(t_{m',l}) - f S_{m',l-1}(t_{m',l-1})\} \\ & + \Omega^{n-q}(^{n-q}U^5) \quad m=1, m'=2, 3, \dots\dots (17) \end{aligned}$$

ただし、 $t_{m',n-q} = \tau_{m',n-q}, t_{m',n-1} = \tau_{m',n-q} + (q-1) \times \delta \geq T_{m'}$

$$\Omega^{n-q}(^{n-q}U^5) = \Phi^{n-q}(^{n-q}U^5) \dots\dots\dots (18)$$

(2) 1台起動する場合 たとえば、 u_3 が起動

第3図 3機系の状態空間

Fig. 3. State space of three unit system.

〔1台(u_3)起動する場合〕

第4図 状態推移を可能にする状態空間

Fig. 4. State space which makes state transition possible.

する場合を考えると、 $\tau_3^{n-1} < T$ のときは、 $(n-q)$ から $(n-1)$ 時間帯の間では、 u_3 が解列しているような並列発電機群だけを対象にすれば、必ず(11)式が満足されるから、第4図に示す状態空間について考えればよい。ただし、2台起動の場合と違って、この場合は最小停止時間を満足する運用法は、唯一通りではないので、いくつかの運用法の中から最小費用運用を求める必要がある。

ここでは、ふたたび D.P. を用いて最小費用運用を求めることにする。そこで、全状態空間を対象とした最適解と、第4図のような部分空間における最適解とを区別する意味で、前者の Φ, ϕ, τ, n に対して、後者の Ω, ω, t, l なる記号で表わせば(3)、(6)式に対応して、(19)、(20)式を得る。

ただし、ここでは時間帯 l においては状態推移はすべて可能と仮定する。

$$\begin{aligned} \omega^l(l-1 \mathbf{U}^j, l \mathbf{U}^i) = & \sum_m f_m^l(G_m^l) \\ & + \sum_{m'} \{f S_{m',l}(t_{m',l}) - f S_{m',l-1}(t_{m',l-1})\} \\ & + \Omega^{l-1}(l-1 \mathbf{U}^j) \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

$$\Omega^l(l \mathbf{U}^i) = \min_{l-1 \mathbf{U}^j} \{\omega^l(l-1 \mathbf{U}^j, l \mathbf{U}^i)\} \dots\dots (20)$$

ここで、 $u_m \in l \mathbf{U}^i, u_{m'} \in l-1 \mathbf{U}^j, l = (n-q+1), \dots\dots, (n-1)_0 (m=1, 2, m'=3) \text{ または } m'=2$
3) または $(m=2, m'=1, 3)$

また、 $t_{m',n-q} = \tau_{m',n-q}$

$$\Omega^{n-q}(n-q \mathbf{U}^j) = \Phi^{n-q}(n-q \mathbf{U}^j) \dots\dots\dots (21)$$

〈4.3〉 m 機系の場合 以上の議論から一般に m 機系 ($m=2, 3, \dots\dots, M$) の場合は、状態推移の際に制約条件(11)式を満足しえない場合は、起動台数に応じて次のように Ω を決定することができる。

(1) $m-1$ 台起動する場合 時間帯 $(n-q)$ から $(n-1)$ の間で(11)式を満す運用は唯一通りしかないので

$$\begin{aligned} \Omega^{n-1}(n-1 \mathbf{U}^j) = & \sum_{l=n-q+1}^{n-1} \{ \sum_m f_m^l(G_m^l) \\ & + \sum_{m'} \{f S_{m',l}(t_{m',l}) - f S_{m',l-1}(t_{m',l-1})\} \\ & + \Omega^{n-q}(n-q \mathbf{U}^j) \} \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

ただし、 $t_{m',n-q} = \tau_{m',n-q}, \Omega^{n-q}(n-q \mathbf{U}^j) = \Phi^{n-q}(n-q \mathbf{U}^j)$

(2) 起動台数が $m-2$ 台以下の場合 (19)、(20)式のように部分空間を対象にした、 ω^l および Ω^l を D.P. により求める。このとき、状態推移 $l-1 \mathbf{U}^j \Rightarrow l \mathbf{U}^i$ が(11)式によって不可能となる場合には、さらに状態空間を修正しこの空間に関して再び ω, Ω を求めるといった操作をくり返す。すなわち、同一くり返しレベル内での累積運転費は

$$\begin{aligned} \omega^{l_a}(l_a-1 \mathbf{U}^j, l_a \mathbf{U}^i) = & \sum_m f_m^{l_a}(G_m^{l_a}) \\ & + \sum_{m'} \{f S_{m',l_a}(t_{m',l_a}) - f S_{m',l_a-1}(t_{m',l_a-1})\} \\ & + \Omega^{l_a-1}(l_a-1 \mathbf{U}^j) \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

また、異なったレベルをはさんでの累積運転費は

$$\begin{aligned} \omega^{l_a}(l_a-1 \mathbf{U}^j, l_a \mathbf{U}^i) = & \sum_m f_m^{l_a}(G_m^{l_a}) \\ & + \sum_{m'} \{f S_{m',l_a}(t_{m',l_a}) - f S_{m',l_a-1}(t_{m',l_a-1})\} \\ & + \Omega_{\alpha+1}^{l_a-1}(l_a-1 \mathbf{U}^j) \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

$$\Omega_{\alpha}^{l_a}(l_a \mathbf{U}^i) = \min_{l_a-1 \mathbf{U}^j} \{\omega^{l_a}(l_a-1 \mathbf{U}^j, l_a \mathbf{U}^i)\} \dots (25)$$

ただし、 $\Omega_{\alpha}^{p_{\alpha}-q}(p_{\alpha}-q \mathbf{U}^j) = \Phi^{p_{\alpha}-q}(p_{\alpha}-q \mathbf{U}^j)$

ここで、 α : くり返しのレベルで

$$\alpha = 1, 2, \dots\dots, (n-q+1)$$

l_a : レベル α での時間帯を示し

$$l_a = (p_{\alpha}-q+1), \dots\dots, (p_{\alpha}-1)$$

p_{α} : レベル $\alpha-1$ において状態推移が不可能となる時間帯で次の関係がある。

$$p_1 > p_2 > \dots\dots, \text{ただし、} p_1 = n$$

$\Omega_{\alpha}^{l_a-1}$: レベル α の時間帯 l_a における最小運転費

たとえば、第5図を参照して $\alpha=1$ での起動台数を $k_1 (\leq m-2)$ とすると、 l_1 の間で対象となる状態空間は $m-k_1$ 機系の問題として扱うことができる。次に、レベル1のある時間帯 (p_2) で状態推移が不可能な場合が生じたとする。このときの起動台数を k_2 , ($k_1 > k_2$) とすれば、区間 $(p_1-q) \sim (p_1-q)$ では $\{m-(k_1+k_2)\}$ 機系の、また、区間 $(p_2-q) \sim (p_1-q-1)$ の間では $(m-k_2)$ 機系の問題として処理することができる。以下、同様の考察を進めていくと、最大くり返しレベル、 $\alpha = (n-q-1)$ 以内で必ず、 Ω^{n-1} を求めることができる。

なお、第1時間帯を全発電機並列と仮定しているから、時間帯 $2 \sim (q+1)$ の間では起動不可能で、この区間では起動を伴う状態推移に対しては、次のペナル

第5図 レベル α と状態空間の関係Fig. 5. Relation of level α and state space.

ティコストを与えることにする。

$$\phi^n(n-1, U^j, n, U^i) = \infty \quad (26)$$

ただし, $n \leq q+1$

また, 同じ負荷パターンがくり返される場合には, 第1時間帯で全発電機が運転するためには, 最終時間帯 N の直前, $(N-q) \sim N$ の間では停止不可能であるから, 停止を伴う状態推移に対しては(26)式のペナルティコストを与える。

以上の説明では最小停止時間は各発電機とも同じと仮定したが, これらが異なる場合には以下の例に示すような方法で, 新しい状態空間を設定しこの空間を用

第6図 最小停止時間が異なる場合の状態空間 ($q_2 > q_3$)

Fig. 6. State space when minimum hours needed to short-up unit u_2 and u_3 are not same ($q_2 > q_3$).

いて, すでに述べてきた方法により最適解を求めればよい。

たとえば, 第6図を参照して3台の発電機が運転中

(a) フローチャート
(a) Flow chart. (b) Q^{n-1} [第7図(a) ※印] の求め方
(b) Flow chart to determine Q^{n-1} .

第7図

Fig. 7.

u_2, u_3 がともに起動不可能の場合を考える。おのおのの最小停止時間を, q_2, q_3 とし, もし $q_2 > q_3$ ならば,

(イ) $(n-1) \sim (n-q_3)$ の間は, u_2, u_3 をともに含まぬ並列発電機群

(ロ) $(n-q_3-1) \sim (n-q_2)$ の間は, u_3 のみを含まぬ並列発電機群を

によって構成される状態空間を新しい状態空間として考えればよい。

5. 計算手順

以上の説明を要約すると, 火力発電機群の起動停止問題において起動費を直線と仮定し, 最小停止時間を考慮した場合に並列発電機群を状態変数として, D.P を適用するとき

(1) 状態推移 ${}^{n-1}U^i \Rightarrow {}^nU^j$ において, 起動発電機の停止時間が最小停止時間を満足する場合は, (3)式を用いて

(2) 最小停止時間を満足しない場合は, (12)式によって, おのおの累積運転費を求め, 最適運用は(6)式から決定すればよい。第7図(a)に全体の計算手順を, また(b)図に Ω 決定のフローチャートを示す。

6. モデル系統への適用

〈6.1〉 モデル系統 発電機6台からなる火力系

第1表 並列発電機群の構成

Table 1. Construction of group of running units.

発電機 No.	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
並列発電機群						
U^1	○	○	○	×	×	×
U^2	○	○	○	×	×	○
U^3	○	○	○	×	○	×
U^4	○	○	○	○	×	×
U^5	○	○	○	×	○	○
U^6	○	○	○	○	×	○
U^7	○	○	○	○	○	×
U^8	○	○	○	○	○	○

○: 並列, ×: 解列

第2表 発電機特性定数

Table 2. Characteristic constants of units.

発電機 No.	燃料費 $F=a+bG+cG^2$ (千円)			起動費 k (千円/h)	出力 (MW)	
	a	b	c		$\bar{G}$	$\underline{G}$
u_1	6.90	0.648	0.00105	—	175	50
u_2	11.74	1.189	0.00110	—	125	40
u_3	8.64	0.756	0.00259	—	125	40
u_4	12.96	0.648	0.00432	5.2	125	40
u_5	6.90	1.390	0.00375	3.2	75	20
u_6	12.40	1.250	0.00163	3.0	75	20

第8図 負荷電力曲線

Fig. 8. Load pattern.

第9図 最適運用パターン例 ($T=10$ hr の場合)

Fig. 9. Example of optimal operation pattern.

統を対象とし, 6台中3台は常時, 系統に並列するものと仮定する。並列発電機群の構成は第1表に示すとおりである。第8図に負荷パターンを, また, 第2表には発電機の諸特性を示す。

〈6.2〉 計算結果 最小停止時間をパラメータとし, 通常停止と強制停止のおのおのについて計算を行なった。第9図は通常停止を行なう場合の最適運用パターンの一例である。

また, 第10図は負荷パターンがくり返される場合の計算例である。第11図は強制停止を行なう場合の

第 10 図 負荷パターンがくり返される場合の最適運用

Fig. 10. Optimum operation when load pattern is repeated.

第 11 図 強制停止を行なう場合の最適運用パターン ($T=6\text{hr}$)

Fig. 11. Optimal operation pattern for the forced shutdown.

例で、ここでは 4~6 号機が時間帯 4~6 において強制的に停止すると仮定した。第 3 表には最小停止時間の制約で状態推移が不可能となる回数を、また、第 12 図には計算時間を示す。なお、計算に際しては、北海道大学大形計算機センタの FACOM 230-60 を利用した。

〈6.3〉 結果の検討および考察

(1) 第 12 図は最小停止時間と総費用の関係を示

第 3 表 状態推移が不可能となる回数

Table 3. Frequency of state transition which is impossible.

$T \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計 (Σ)	Σ/β
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	22	15	0	0	9	4	22	15	15	102	0.15
6	0	0	0	0	27	15	0	9	4	22	33	15	125	0.18
8	0	0	0	0	0	27	15	9	4	22	33	27	137	0.19
10	0	0	0	0	0	0	27	9	4	22	33	27	122	0.17
12	0	0	0	0	0	0	0	16	4	22	33	27	102	0.15
14	0	0	0	0	0	0	0	0	8	16	33	27	84	0.12

n : 時間帯, T : 起動に必要な最小停止時間

β : 全状態推移回数=704

第 12 図 最小停止時間と最小運転コストおよび計算時間の関係

Fig. 12. Relation of minimum shutdown hours and minimum operation cost and computing time.

したもので、これから T が大きくなるに従って、費用が増加することがわかる。これは運用の方法に、より強い規制が加わることから理解される。

(2) 第 3 表から T によって状態推移が不可能となる割合は、全状態推移回数の 12~19% で、左ほど大きな変化はない。 T が増加すると起動不可能となる時間帯 ($2 \sim q+1$) が増すためと考えられる。

また、計算時間に関しては状態推移がすべて可能になる、 $T=0$, $T=2$ に比べて、 $T=10$ では約 3 倍である。 T が大きくなるにつれて、くり返しレベルも増加し、これが計算時間の増加につながるが、 T がある値以上になると、起動不可能となる区間がふえ、その結果、計算時間は逆に減少する傾向を示す。

(3) 最小停止時間によって、多段決定過程がマルコフ的特性を失うことはすでに述べたとおりであるが一例として、 $T=8$ の場合について検討してみる。

第 13 図において $n=6$, $j=7$, $i=8$ の場合は第 1 時間帯からの最適運用は $1U^8 \Rightarrow 2U^8 \Rightarrow 3U^7 \Rightarrow 4U^7 \Rightarrow 5U^2$

第 13 図 状態推移が不可能な場合の最適運用 ($T=8h$)

Fig. 13. Optimal operation when state transition is impossible.

$\Rightarrow {}^6U^8$ (これを, 運用 A とする) となっているが, 実際には, ${}^1U^8 \Rightarrow {}^2U^7 \Rightarrow {}^3U^7 \Rightarrow {}^4U^7 \Rightarrow {}^5U^7 \Rightarrow {}^6U^8$ (これを, 運用 B とする) が最適運用となる。その理由は, ${}^5U^7 \Rightarrow {}^6U^8$ では u_6 が起動することになるが, 運用 A では $\tau_6^5=10$ のため起動できない。

一方, 運用 B では $\tau_6^5=8$ となって, 最小停止時間を満足するので, ${}^5U^7 \Rightarrow {}^6U^8$ の過程では運用 B が最適運用となる。

この場合, A の Φ^{n-1} と B の Ω^{n-1} を比較すると

$$A: \Phi^5({}^5U^7) = 5240.72 \text{ (千円)}$$

$$B: \Omega^5({}^5U^7) = 5241.92 \text{ (千円)}$$

状態推移が可能な場合は, 常に $\Phi^5({}^5U^7)$ が ${}^5U^7$ に対する最適解であり, $\Phi^{n-1} < \Omega^{n-1}$ が成立する。

この例からもわかるとおり, 最適運用パターンが最小停止時間の制約を満足している場合は問題ないが, そうでないときは, 第 9 図などで示した運用パターンからは最適運用は求まらず, この点, 注意が必要である。

(4) 強制停止を行なう場合は第 11 図にも示すように, 停止時期があらかじめ与えられている場合には対象とする状態空間を, その期間についてのみ縮小させるだけで, 他は通常停止と同様の方法で処理できるから計算はより簡単になる。

(5) 本モデル系統で計算機の所要メモリー数は, 約 6.5k 語であった。起動停止対象ユニット数の増加により, 状態変数は幾何級数的に増加する。したがって本プログラムの適用範囲は使用する計算機の容量によっては, かなり, 制約を受けると考えられるが, 現実の系統では, 日間での起動停止対象発電機は数台ないしは 10 台前後と考えられるから, 本手法が現実の系統に対して適用可能なことがわかる。

7. む す び

火力発電機群の起動停止問題に対して, 従来用いられてきた優先順位によらない方法として, 最小停止時間の制約処理を主体にした, D.P による解法を開発しモデル系統に適用しその有効性を確めた。

終わりに, 日ごろご指導いただいている, 北海道大学工学部長 小池東一郎教授, 同学電気工学科宮本衛市助教授に厚く感謝の意を表します。

(昭和 47 年 4 月 21 日受付, 同 47 年 12 月 18 日再受付)

文 献

- (1) 豊田: 電学誌 84, 121 (昭 39-1)
- (2) 河竹: 電学誌 89, 1595 (昭 44-8)
- (3) 都築: 電中研報告 No. 65017
- (4) 山城・宮本・小池: 北大工学部研報 第 44 号 (昭 42-9)
- (5) 関根: 電力系統工学
- (6) 山城: 昭 47 電気学会全国大会 No. 694
- (7) M. Udo: 第 28 回 電力系統工学専門委員会資料 O-S-7 (昭 45-3)