

ガスタービンを含む火力発電機群の起動停止方式*

山城 迪**

(昭和49年3月12日受理)

Optimum Startup and Shutdown of Thermal Generating Units with Gas Turbine

by Susumu YAMASHIRO

Many papers have reported, mainly from the economic side, about startup and shutdown problems for thermal generating units.

On the other hand, recently, security control for power systems is being watched with interest. When we study this problem from the stand point of a reliable operation schedule, we must consider not only economy but also load forecasting error and random unit outages.

In this problem of considering reliability, spinning reserve does the important role. So we must properly evaluate the operation of a spinning reserve such as a Gas Turbine.

From this point of view, this paper intends to develop a new optimum scheduling method of startup and shutdown for the thermal power system with a Gas Turbine. This stochastic scheduling problem considering random unit outages is modeled after the Markov deterministic process and is formulated by using the principle of optimality of Dynamic Programming, then, this method is applied to a simple model power system and some discussion is done about the numerical results.

1. ま え が き

近年、電力需要の増大に伴い、いわゆる、ピーク負荷対策が増々重要な問題となってきた。これに対する対応策としては、揚水式水力の開発、系統連系による電力隔通（マージン連系）、老朽火力あるいは中間負荷火力の日間の起動停止、更にはガスタービン（GT）の設置等が考えられ、これらは、適宜単独ないしは組合せ方式によって実施されている。

これらの中で、GTについてみると、これは本来、ピーク負荷対策用として、揚水式水力とともに最も有力なピーク用電源と考えられ年々増加の方向にあるが、一方、その優れた起動能力によって、運転予備力としての機能をも有し、単にピーク負荷対策用としてだけでなく、系統構成要素の偶発事故発生の際に、系統の供給信頼度を維持し得るものとして期待される

* 電気四学会北海道支部大会（昭和48年10月北見工大）で発表

** 北見工業大学電気工学科

設備である。

この、GTの運転予備力としての機能の重要性は例えば、文献(5)にみられるように、ピーク負荷対策等として、あらかじめ予想される運転時間よりも長時間の運転実績が報告されていることから容易に理解される。この予期以上の運転実績は、主として、負荷予測誤差によるもの、あるいは、発電機等の事故発生がその原因として考えられる。

ところで、現在のGTの運転コストは、汽力発電機のそれと比較して著しく高価であり、その結果、単に経済性のみからGTの運用を追求した場合には、需給不平衡の解決のための運用以外は、運用計画に表われて来ないのが普通である。一方、電力系統自動化の最終目標である、セキュリティ・コントロールにおけるオフ・ラインの信頼度予防制御の立場からは、負荷予測誤差や発電機等の偶発事故を考慮に入れた、系統運用計画が要求される。

このような観点から、本論文では、(1)GTを含む火力系統について、発電機の偶発事故を考慮に入れた、日間における火力機の起動停止計画の決定法を求め、(2)この手法を用いて予備力としての機能を持つGTの運用を予測することを目的とするものである。

以下、このような確率的要素を含んだ問題をマルコフ決定過程によつてモデル化し、これにDynamic Programmingの最適性の原理を用いて定式化を試み、かつ簡単なモデル系統での試算例を示し、本手法の妥当性を明らかにする。

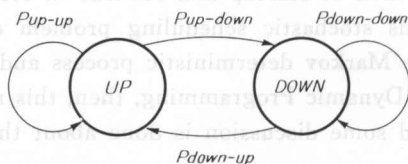
2. 系の状態空間の定義

マルコフ決定過程の基本概念は、系の状態、状態推移確率、状態推移に伴うコストである。本章および次章でこれらについて述べる。

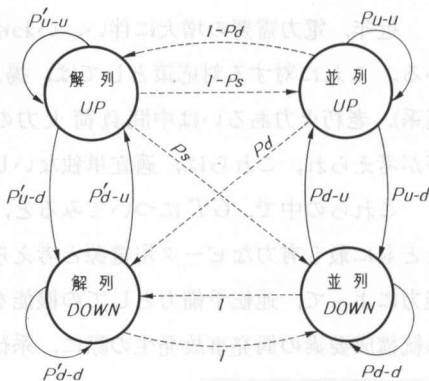
本論文で対象となる火力系は、ベース用火力、起動停止用火力およびGTによって構成されるものとする。また、これらのユニットの状態表示として、ベース火力については第1図の状態モデルを、起動停止用火力については、第2図の4状態モデルを用いることにする²⁾。

いま、GTを除く火力系の運用状態を、m台の起動停止火力の各々が、系統に並列するか解列するかによって、 2^m 通りの並列発電機群で表わすものとする。

個々の並列発電機群は、それを構成する各ユニットが健全状態(up)か故障状態(down)かのいずれかを占めることから、ユニット間の事故特



第1図 2状態モデル
Fig. 1. 2 state model.



第2図 4状態モデル
Fig. 2. 4 state model.

性に独立性を仮定すると、次のような状態空間が考えられる。

$$S = (S_0, S_1, \dots, S_{2^M-1}) \quad (1)$$

ここで S_0 : 全ユニット *up*
 S_1 : #1 ユニット *down* 他は *up*
 \vdots
 S_{2^M-1} : 全ユニット *down*
 M : ユニット台数

次に、 GT を考慮した場合を考えると、まず、 GT の運用の仕方としては、主として、次の2つの場合を考えることができる。

- (i) ピーク負荷時などにおける需給不平衡を解消するための運用
- (ii) 火力機の事故発生時に、事故機をバックアップするための運用

予備力としての GT が他の火力機と異なる点は、系統の状態がこの2つの条件を満足する時のみ系統構成要素として取り扱われるということである。

さて、運転中の GT を2状態モデルを用いて状態表示するなら、例えば、(i) の運用を考えた場合には、これは全ユニットが健全状態にあることが条件だから、(1) 式の状態 S_0 は次のようになる。

$$\begin{aligned} S_{0-u}: & \text{全ユニット } up \text{ and } GT \text{ } up \\ S_{0-d}: & \text{" " and } GT \text{ } down \end{aligned} \quad (2)$$

また、運用 (ii) の場合は、(1) 式の状態 $S_1 \sim S_{2^M-1}$ に対して

$$\begin{aligned} S_{1-u}: & \text{\#1 } down \text{ 他は } up \text{ and } GT \text{ } up \\ S_{1-d}: & \text{" " and } GT \text{ } down \\ & \vdots \\ S_{2^M-1-u}: & \text{全ユニット } down \text{ and } GT \text{ } up \\ S_{2^M-1-d}: & \text{" " and } GT \text{ } down \end{aligned} \quad (3)$$

このように、 GT は複数ユニットの同時故障に対してもバックアップ作用が期待されるが現実の系統で2台以上の同時故障発生の確率は非常に小さいことを考慮して、以下では、2台以上の同時故障は考察の対象外とする。なお、 GT の運用 (ii) については、事故機以外の火力機で需給バランスが維持される場合には GT は運転しないものとする。

3. 状態推移確率および推移コスト

いま、考察期間 (日間) を N 等分し、各時間帯における運用を考える。時間帯幅を Δt とし、説明の都合上、時間方向とは逆向きに、考察期間の終端から順次時間帯番号 $n (=1, 2, \dots, N)$ を割り当てる。

各時間帯では、 2^m 通りの並列発電機群による運用が考えられ、時間帯 n における並列発

電機群を集合, ${}^nU^i (i=1, 2, \dots, 2^m)$ で表わす。

次に, ${}^nU^i$ および ${}^{n-1}U^j (j=1, 2, \dots, 2^m)$ における系の状態を各々, S_k および $S_l (k, l=0, 1, \dots, M)$ とすれば, 並列発電機群が ${}^nU^i$ から ${}^{n-1}U^j$ に変る場合に, $S_k \Rightarrow S_l$ の状態推移が考えられる。この時の推移確率 PS_{kl} を求めることが, この章の目的であるが, そのためには, 個々のユニットの推移確率を知る必要がある。

3.1 ベース火力の推移確率

事故発生率 λ および復旧率 μ を一定とし, かつ状態推移間の時間を Δt とすると, 1回の推移で健全状態から故障状態へ推移する確率は

$$P_{up-down}(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda \Delta t} \quad (4)$$

以下, 同様にして, $P_{down-up}$ などを求めると次の推移確率行列を得る。

$$P = \begin{bmatrix} P_{up-up} & P_{up-down} \\ P_{down-up} & P_{down-down} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\lambda \Delta t} & 1 - e^{-\lambda \Delta t} \\ 1 - e^{-\mu \Delta t} & e^{-\mu \Delta t} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.2 起動停止火力の推移確率

起動停止火力が隣り合う時間帯において並列状態にあるときは (5) 式から, また, 解列状態にあるときは, 解列時の事故発生率 λ' , 復旧率を μ' 用いて (5) 式同様, 推移確率行列を定義することができる。

一方, 解列 \rightarrow 並列, または, 並列 \rightarrow 解列のように, 起動または停止を伴う場合には, 第2図から, 起動, 停止時の推移確率を次のように定めることができる。

$$P_s = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} up & down \end{array} \\ \begin{array}{c} up \\ down \end{array} & \begin{bmatrix} 1 - P_s & P_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \quad (6)$$

$$P_d = \begin{array}{cc} & \begin{array}{cc} up & down \end{array} \\ \begin{array}{c} up \\ down \end{array} & \begin{bmatrix} 1 - P_d & P_d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \quad (7)$$

ここで, P_s, P_d は, 各々, 起動失敗確率および停止時の事故発生確率である。

例えば, 解列 \rightarrow 並列の場合の推移確率は (6) 式を用いて次のようになる。

$$P = \begin{bmatrix} e^{-\lambda' \Delta t} & 1 - e^{-\lambda' \Delta t} \\ 1 - e^{-\mu' \Delta t} & e^{-\mu' \Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - P_s & P_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} (1 - P_s) e^{-\lambda' \Delta t} & P_s e^{-\lambda' \Delta t} + (1 - e^{-\lambda' \Delta t}) \\ (1 - P_s)(1 - e^{-\mu' \Delta t}) & P_s(1 - e^{-\mu' \Delta t}) + e^{-\mu' \Delta t} \end{bmatrix}$$

また, 並列 \rightarrow 解列の場合 (5), (7) 式から (8) 式のように推移確率行列を定義することができる。

3.3 状態推移確率

ユニットの推移確率が決まると, 状態推移確率は, 各ユニットの推移確率の積として求め

ることができる。例えば、ベース火力（#1ユニット）、起動停止火力（#2ユニット）、それにGTからなる系統で、いま、起動停止火力が起動する場合と考えると次のようになる。

(1) GTが待機中の場合（第3図参照）

$$\begin{aligned}
 PS_{00} &= P_{up-up}^1 \times P_{up-up}^2 \\
 PS_{01} &= P_{up-up}^1 \times P_{up-down}^2 \\
 &\vdots \\
 PS_{22} &= P_{down-down}^2 \times P_{up-up}^1
 \end{aligned}$$

ここで、 P^1, P^2 は#1, #2ユニットの推移確率を示す。

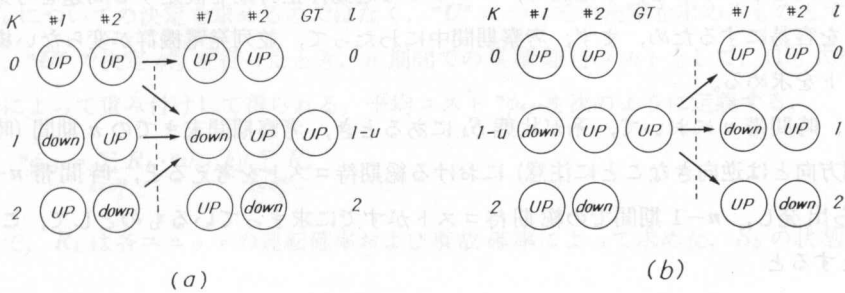
(2) GTが運転する場合

例えば、#1ユニットが故障状態にあるときに、GTが運転する場合について考えてみると、これには次3のつのケースが考えられる。

ケースI: GTが待機状態から運転状態に移る場合

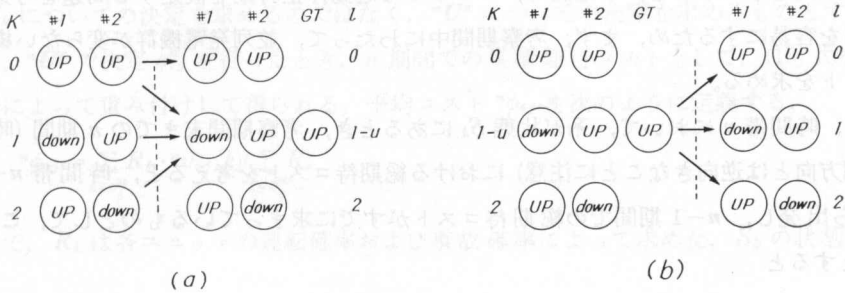
GT起動後の状態 S_1 は(3)式で示されるが、現実には、 S_{1-u} は運転不可能なので、 S_{1-u} への推移確率のみに注目すると、第4図(a)を参照し、GTの起動成功確率 $(1-P_s)_{GT}$ を考慮すると

$$\begin{aligned}
 PS_{01-u} &= P_{up-down}^1 \times P_{up-up}^2 \times (1-P_s)_{GT} \\
 PS_{11-u} &= P_{down-down}^1 \times P_{up-up}^2 \times (1-P_s)_{GT} \\
 PS_{21-u} &= P_{up-down}^1 \times P_{down-up}^2 \times (1-P_s)_{GT}
 \end{aligned} \tag{10}$$

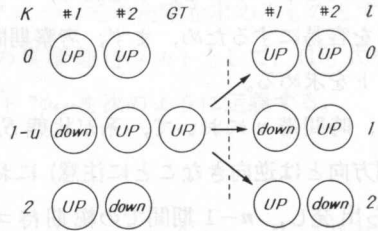


第3図 状態推移確率 (GTを含みぬ場合)

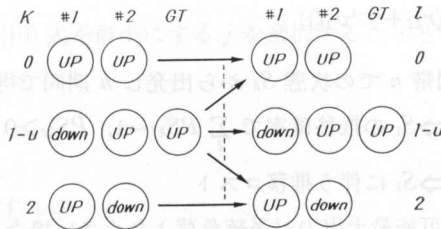
Fig. 3. State transition probability.



(a)



(b)



(c)

第4図 状態推移確率 (GTを含む場合)

Fig. 4. State transition probability.

ケース II: 運転状態から待機状態に移る場合

S_{1-u} からの推移確率は、第 4 図 (b) を参照して

$$\begin{aligned} P_{1-u0} &= P_{down-up}^1 \times P_{up-up}^2 \\ P_{1-u1} &= P_{down-down}^1 \times P_{up-up}^2 \\ P_{1-u2} &= P_{down-up}^1 \times P_{up-down}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 P^{gx} は GT の推移確率を示す。

ケース III: 運転状態を継続する場合

この場合も、第 4 図 (c) を参照して容易に推移確率を求めることができる。

なお、 GT が同時に 2 台以上運転する場合には、(10), (11) 式等の GT に関する確率の項を各 GT の推移確率の積からなる確率でおきかえるとよい。

3.4 推移コスト

状態推移 $S_k \Rightarrow S_l$ に伴うコストを求めるわけだが、コストは燃料費と起動費の和として定義し、また、起動費を停止時間の一次式で近似¹⁾することによって、 $S_k \Rightarrow S_l$ に伴うコストは時間帯 n における、系統負荷および状態 S_k によって決定されると考えると、推移コスト r_{kl} は次式で表される。

$$r_{kl} = (\text{時間帯 } n \text{ における状態 } S_k \text{ の燃料費} + \text{起動費}) \quad (12)$$

4. 火力機の最適起動停止時期の決定

前章までの準備をもとにして、考察期間中の総期待コストを最小にするような、並列発電機群の時系列を求めること、すなわち、ユニットの起動停止時期を決定する問題を考察する。

説明を容易にするため、まず、考察期間中にわたって、並列発電機群が変わらない場合の総期待コストを求める。

いま、時間帯 n において、系が状態 S_k にあるとき、考察期間末までの n 期間 (時間帯番号は時間方向とは逆向きなことに注意) における総期待コストを考えると、時間帯 $n-1$ の状態 S_l から出発し、 $n-1$ 期間での総期待コストがすでに求まっているものとして、これを、 ${}^{n-1}v(l)$ とすると

$${}^n v(k) = \sum_l PS_{kl} (r_{kl} + {}^{n-1}v(l)) \quad (13)$$

ここで、 ${}^n v(k)$: 時間帯 n での状態 S_k から出発し n 期間で得られる総期待コスト

PS_{kl} : $S_k \Rightarrow S_l$ の推移確率で $\sum_l PS_{kl} = 1$, $PS_{kl} > 0$

r_{kl} : $S_k \Rightarrow S_l$ に伴う推移コスト

ところで、状態 S_k の可能最大出力が系統負荷より小さい場合には運転不可能と考え、このような状態は考察の対象外とすると、この状態を除いた残りの部分空間について (13) 式は次のようになる。

$${}^n v(k) = \sum_{l \in \Omega^{n-1}} PS_{kl}(r_{kl} + {}^{n-1}v(l)) / \sum_{l \in \Omega^{n-1}} PS_{kl} \quad (14)$$

ここで、 $k \in \Omega^n$ で、 Ω^n は運転可能な状態からなる部分空間を示す。

次に、 2^m 個の並列発電機群を対象にして、日間の総期待コストを最小にする並列発電機群の時系列を求める決定問題に戻る。

この多段決定問題でなされる決定とは次のようなものである。すなわち、時間帯 n における並列発電機群 ${}^n U^i$ を考えたとき、 $n-1$ 時間帯の ${}^{n-1} U^j$ ($j=1, 2, \dots, 2^m$) のどの発電機群へ移るべきかを決定することである。

いま、 ${}^n U^i$ の状態空間の1点 S_k から出発し、 n 期間で得られる総期待コストを ${}^n v_{ij}(k)$ 、 ${}^{n-1} U^j$ の状態 S_l への推移確率を $PS_{kl}(q_{ij}^n)$ 、推移コストを $r_{kl}(q_{ij}^n)$ とする。ただし、 q_{ij}^n は並列発電機群の変化、 ${}^n U^i \rightarrow {}^{n-1} U^j$ を表わす。

いま、 $n-1$ 時間帯以前の最適運用がすでに求まったとして、この決定に従い、 ${}^{n-1} U^j$ の状態 S_l から出発し、 $n-1$ 期間での累積期待コストを ${}^{n-1} V_j(l)$ とすれば

$${}^n v_{ij}(k) = \sum_{l \in \Omega_j^{n-1}} PS_{kl}(q_{ij}^n) \left\{ r_{kl}(q_{ij}^n) + {}^{n-1} V_j(l) \right\} / \sum_{l \in \Omega_j^{n-1}} PS_{kl}(q_{ij}^n) \quad (15)$$

ただし、境界条件として、すべての、 j および l について、 ${}^0 V_j(l) = 0$ とする。また考察期間の初めにおいては、全ユニットが健全状態にあると仮定する。

さて、マルコフ決定過程によれば、最適政策は ${}^n U^i$ の状態 S_k について、(15) 式を最小にする j を求めればよいが、その結果、並列発電機群 ${}^n U^i$ について、 k 通りの決定が求まり、並列発電機群の時系列を決定することは出来ないことになる。そこで、次の様な方法で、 ${}^n U^i$ の状態 S_k についての決定を求めるのではなく、 ${}^n U^i$ についての決定を求めるものとする。

いま、 ${}^n U^i$ で決定 q_{ij}^n を行ったとき、 n 期間での累積期待コストとして、(15) 式を S_k の状態確率によって重み付けして得られる、平均コスト ${}^n \phi_{ij}$ を次のように定義する。

$${}^n \phi_{ij} = \sum_{k \in \Omega_k^n} R_k \cdot {}^n v_{ij}(k) / \sum_{k \in \Omega_k^n} R_k \quad (16)$$

ここで、 R_k は各ユニットの運転確率および事故確率によって求めた、 S_k の状態確率である。

${}^n U^i$ で行うべき決定は (16) 式を最小にする j を選択することと考えると、その結果得られる最小コストは

$${}^n \Phi_i = \min_j \left\{ {}^n \phi_{ij} \right\} \quad (17)$$

(17) 式から求める j を j^* とすれば

$${}^n V_i(k) = {}^n v_{ij^*}(k) \quad (18)$$

ところで、(15) 式の ${}^{n-1} V_j(l)$ は ${}^{n-1} U^j$ の S_l から出発し、 S_l について決定を行った場合の最

小コストであり、一方、(18)式による ${}^{n-1}V_j(l)$ は ${}^{n-1}U^j$ について平均的に求めた決定に従った場合のコストであるから、両者が必ずしも一致するとは限らない。そこで、(15)式の ${}^{n-1}V_j(l)$ を(18)式から求まる ${}^{n-1}V_j(l)$ でおき換えた場合の累積コストを考えてみると、推移コストは状態 S_l に無関係に求めるから、 r_{kl} を r_k とおいて次式を得る。

$${}^n v_{ij}(k) = r_k(q_{ij}^n) + \left\{ \sum_{l \in \Omega_j^{n-1}} PS_{kl}(q_{ij}^n) \times {}^{n-1}V_j(l) \right\} / \sum_{l \in \Omega_j^{n-1}} PS_{kl} \quad (19)$$

また、(17)式は次のように表わせるので

$${}^{n-1}\Phi_j = \left(\left\{ \sum_{l \in \Omega_j^{n-1}} R_l \cdot {}^{n-1}V_j(l) \right\} \right) / \sum_{l \in \Omega_j^{n-1}} R_l \quad (20)$$

もしも

$$PS_{kl} \simeq R_l \quad (21)$$

$$l = 0, 1, 2, \dots$$

なる状態 S_k が存在すれば、この S_k に対して(19)式は

$${}^n v_{ij}(k) \simeq r_k(q_{ij}^n) + {}^{n-1}\Phi_j \quad (22)$$

となるから、 ${}^{n-1}U^j$ について平均的に求めた決定は ${}^n U^i$ の状態 S_k について最適政策を与えるものと考えることができる。

一方、発電機の事故発生率および復旧率についてみると、前者は後者に比べて充分小さく従って、運転確率は1に近く、ユニットの推移確率 P_{up-up} にほぼ等しいことを考慮すると、全ユニット健全状態($k=0$)からの推移確率 PS_{0l} と S_l の状態確率との間に(21)式の関係が成立する。

また、平均コスト ${}^n \phi_{ij}$ についてみると、(16)式は(22)式を用いると

$$\begin{aligned} {}^n \phi_{ij} &= \left\{ R_0(r_0 + \sum_l PS_{0l} \cdot {}^{n-1}V_l(l)) / \sum_l PS_{0l} + \right. \\ &\quad \left. R_1(r_1 + \sum_l PS_{1l} \cdot {}^{n-1}V_j(l)) / \sum_l PS_{1l} + \dots \right\} / \sum_k R_k \\ &\simeq (\sum_k R_k \cdot r_k) / \sum_k R_k + R_0 \cdot {}^{n-1}\Phi_j(q_j^{n-1}) / \sum_k R_k + \varepsilon(q_j^{n-1}) \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 $\varepsilon(q_j^{n-1}) = \left\{ R_1 \cdot \sum_l PS_{1l} \cdot {}^{n-1}V_j(l) / \sum_l PS_{1l} + \dots \right\} / \sum_k R_k$ 、 $l \in \Omega_j^{n-1}$ 、 $k \in \Omega_i^n$

上式から、 ${}^n \phi_{ij}$ は ${}^{n-1}U^j$ について平均的に求めた決定、 q_j^{n-1} に依存する項、 $\varepsilon(q_j^{n-1})$ をも含むので、(22)式で示したように、決定 q_j^{n-1} が ${}^n U^i$ の状態 S_0 について最適政策を与えるからといって、この決定が必ずしも並列発電機群 ${}^n U^i$ について最適政策を与えるものではないが、 $R_0 \gg R_1, R_2, \dots$ の関係を考慮すると、 $R_0 \cdot {}^{n-1}\Phi_j(q_j^{n-1}) / \sum_k R_k \gg \varepsilon(q_j^{n-1})$ であり、決定 q_j^{n-1} の違いによる $\varepsilon(q_j^{n-1})$ の値の変動が ${}^n \phi_{ij}$ に与える影響は小さいこと、また、仮りにこの変動がコスト減少方向に働いたとしても、 $R_0 \cdot {}^{n-1}\Phi_j(q_j^{n-1}) / \sum_k R_k$ の値は増加方向に変化することを考え

ると、近似的に ${}^{n-1}U^j$ での決定は、 ${}^nU^i$ についても最適政策を与えるものと考えることができる。

以上の議論から、先に仮定した通り、考察期間の初期状態を全ユニット健全とするなら、(15) 式の ${}^{n-1}V_j(L)$ を (18) 式から求め、(15)~(18) 式を $n=1$ から逐次計算することにより、最適な並列発電機群の時系列と初期状態 $k=0$ から出発し、考察期間にわたっての最小総期待コストを求めることができる。

なお、状態確率による重み付けによる上記の決定法から、概略的な運用計画をより速く得る方法として、並列発電機群 ${}^nU^i$ を指定することは全ユニット健全状態を意味すると考えて、 $k=0$ について (15) 式を求めると

$${}^n v_{ij}(0) = \sum_{i \in \Omega_j^{n-1}} PS_{0i}(q_{ij}^n) \left\{ r_{0i}(q_{ij}^n) + {}^{n-1}V_j(L) \right\} / \sum_{i \in \Omega_j^{n-1}} PS_{0i}(q_{ij}^n) \quad (23)$$

$${}^n V_i(0) = \min_j \left\{ {}^n v_{ij}(0) \right\} \quad (24)$$

となる j を j^* として

$${}^n V_i(k) = {}^n v_{ij^*}(k) \quad k = 1, 2, \dots \quad (25)$$

(23)~(25) 式から概略的な運用計画を決定することができる。次章に、これら二つの決定法を用いた試算例を述べる。

5. モデル系統での試算例

5.1 モデル系統

ベース火力3台、起動停止火力3台およびGTからなる火力系統を対象とした。なお、

第1表 発電機特性定数

Table 1. Characteristic constant of units.

発電機 No.	出力 (MW)		燃料費 $F = a + bG + cG^2$ (千円)			起動費	事故発生率	復旧率	運転確率	起動失敗確率	停止時の事故発生確率
	G_{max}	G_{min}	a	b	c	k (千円/h)	λ	μ	$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$	P_s	P_d
1	175	50	6.90	0.648	0.00105	—	0.0005	0.02	0.9756	—	—
2	125	40	11.74	1.189	0.00110	—	0.0006	"	0.9709	—	—
3	125	40	8.64	0.756	0.00259	—	0.0006	"	"	—	—
4	125	40	12.96	0.648	0.00432	5.2	0.0006 (0.0005)	"	0.9709 (0.9756)	0.01	0
5	75	20	6.90	1.390	0.00375	3.2	0.0003 (0.0002)	"	0.9852 (0.9901)	0.01	0
6	75	20	12.40	1.250	0.00163	3.0	0.0003 (0.0002)	"	0.9852 (0.9901)	0.01	0
GT	—	0	$F = 4 \times G$ (千円/h)			—	0.0003	0.02	0.9852	0.01	—

() は解列時の値を示す。

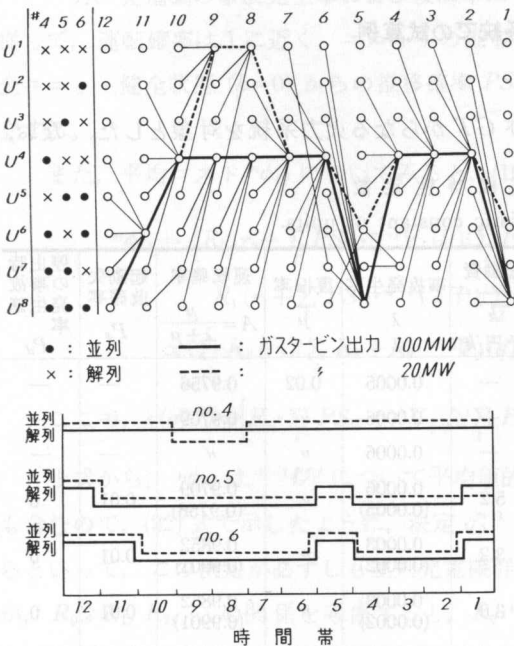
GTの出力はパラメトリックに考え、0~120 MWの出力範囲について考察した。第1表はこれら系統構成要素の諸元を示す。また、第5図は系統の負荷曲線である。

5.2 計算結果および考察

最初に、状態確率による重み付けの方法による結果について説明する。第6図は計算結果の一例である。実線はGTの最大出力を100 MWとした場合で、太線はこの時の最適運用パターンを表わしている。また、同図の点線は、GTの出力を20 MWとした場合の最適運用パターンである。この二つの運用パターンに対する総期待コストを比較してみると、20 MWに対しては、12,143 (千円)であるが、100 MWの場合は12,197 (千円)となる。これは、GTの出力が増せば、予備力としてのGTを運転する機会が増えること、GTの運転費が高価なことから理解される。

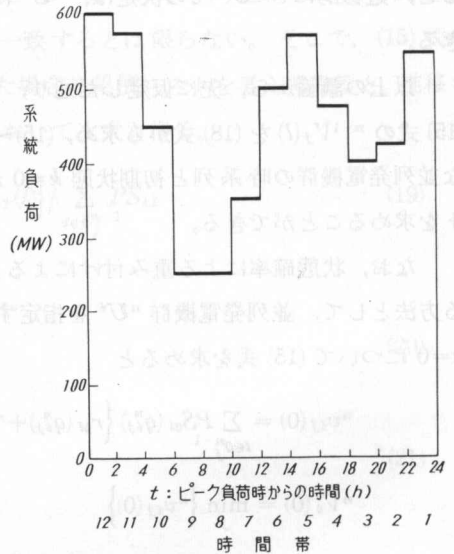
一方、信頼性に注目すると、予備力が増せば、供給信頼度が向上するのが当然であるが、

一例として、第6図の運用について、供給支障を起こさない確率を求めたのが第7図である。予想される通り、コストの関係とは逆に予備力の増加により、供給信頼度が



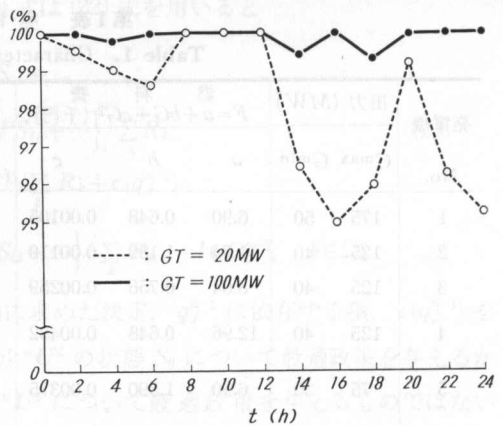
第6図 最適運用の例 (重み付け法)

Fig. 6. An example of optimum operation.



第5図 負荷曲線

Fig. 5. Load pattern.



第7図 供給力不足を生じない確率

Fig. 7. Probability that capacity available will be equal to or greater than load.

第2表 運転可能な状態空間 (GTの出力が 100 MW の場合)

Table 2. State space which is possible to operate.

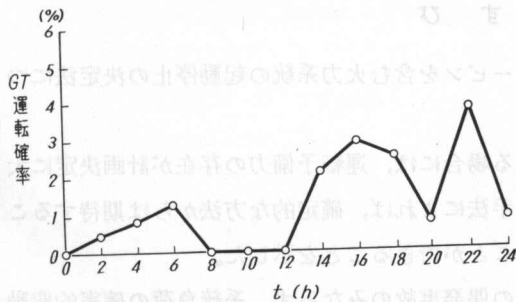
時間帯	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
U_i	8	6	4	4	4	4	4	8	4	4	4	8
状態	0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	1	▲	×	▲	○	○	▲	×	▲	×	▲	▲
	2	▲	▲	▲	○	○	○	▲	▲	▲	○	▲
	3	▲	▲	▲	○	○	○	▲	▲	▲	○	▲
	4	▲	▲	▲	○	○	○	▲	▲	▲	○	▲
	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	6	○	▲	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○： 運転可能， ×： 運転不可能， ▲： GTのバックアップで運転可能。

向上していることがわかる。

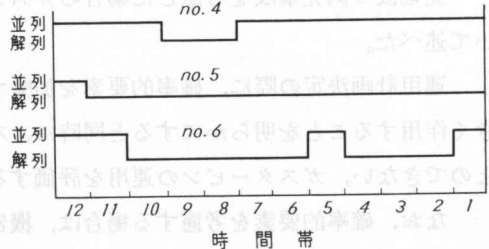
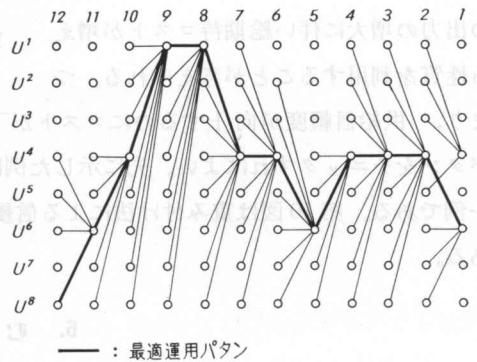
また、GTの運転を予測したのが第2表および第8図である。第2表は、第6図のGT=100 MWに対する最適運用について、各時間帯における並列発電機群の状態を、運転可能なもの、不可能なもの、GTのバックアップで可能なもの、に区分したものである。この表からGTの運転を予測するには同表の▲印に該当する状態の確率を求め、各時間帯ごとにその和をとれば、どの位の確率でGTの運転が期待されるかがわかる。

第8図は、時刻 $t=0$ において、全発電機が健全状態にあると仮定した場合に、第2表を用いて求めたGTの運転確率である。なお、経済性のみに注目し確定的な方法で求めた最適運用パターンは、第6図のGT=20 MWのパターンと一致するが、その場合、GTの運転確率は考察期間を通じて、零であり、



第8図 ガスタービンの運転確率

Fig. 8. Probability that Gas turbine will be expected to operate.



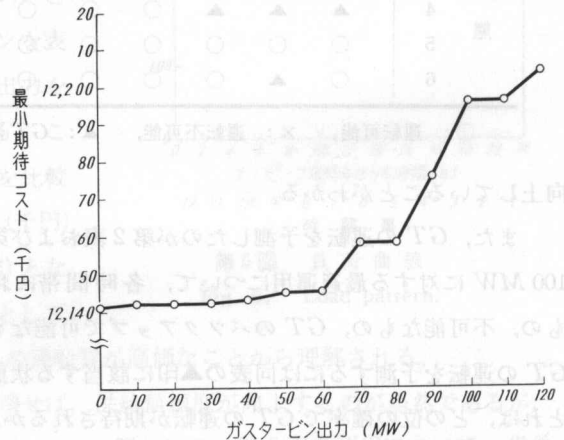
第9図 最適運用の例 (GT=70 MW)

Fig. 9. An example of optimum operation.

また、第8図に対比する意味で、第6図の $GT=100\text{ MW}$ に対する運用について検討した結果も同様に、 GT は運用計画の表面に表われて来なかった。

次に (23)~(25) 式による運用計画決定法を適用した結果の一例が第9図である。 GT の出力を同一条件にして重み付け法を用いた場合も同様な結果が得られた。多くの場合二つの手法による最適運用パターンは一致するが全ての場合について一致するとは限らない。例えば、このモデル系統において、 $GT=100\text{ MW}$ の場合についてみると、第6図を参照して、重み付け法では、第5時間帯から第4時間帯へは ${}^5U^8 \Rightarrow {}^4U^4$ となっているが、もう一方の手法によれば、他の時間帯についてはすべて同じ運用パターンではあるが ${}^5U^8 \Rightarrow {}^4U^7$ となる。

この時、総期待コストを比較すると、12,197 (千円) と 12,205 (千円) であり重み付け法による運用パターンの方が良い結果となる。この様に概略的な決定法は、より速い。(約 1/4 の計算時間) 手法で多くの場合重み付け法と結果が一致するが、必ずしも最適運用パターンが得られない点注意が必要である。なお、計算結果が最適か否かのチェックの方法として、 GT の出力の増大に伴い総期待コストが増える性質を利用することが考えられる。つまり、供給信頼度が向上するのにコストが下がる場合は、そのような GT 出力に対する運用パターンをチェックすればよい。先に示した例は、この信頼度とコストの関係からチェックした一例である。第10図は重み付け法による信頼度 (GT 出力) とコストとの関係を示したものである。



第10図 ガスタービン出力と最小期待運転費の関係

Fig. 10. Relation between Gas turbine output and expected minimum operation cost.

6. む す び

発電機の偶発事故を考慮した場合のガスタービンを含む火力系統の起動停止の決定法について述べた。

運用計画決定の際に、確率的要素を加味する場合には、運転予備力の存在が計画決定に大きく作用することを明らかにすると同時に、本手法によれば、確定的な方法からは期待することのできない、ガスタービンの運用を評価することができることを示した。

なお、確率的要素を考慮する場合は、機器の偶発事故のみならず、系統負荷の確率的変動分をも考慮する必要があると考え、この変動が、負荷配分や起動停止に及ぼす影響等について今後検討してみたい。

終りに、日頃御指導いただき、北海道大学工学部長、小池東一郎教授、同学宮本衛市助教授に厚く感謝の意を表します。

なお、計算は北海道大学大型計算機センターの FACOM 230-60 を利用した。関係諸氏に深謝申し上げる次第です。

文 献

- 1) 山城 迪： 電気学会論文誌 B 分冊, **93**, 391 (1973).
- 2) 山城 迪： 電気学会論文誌 B 分冊, **94**, 279 (1974).
- 3) 宮田秀介： 電力系統の計画と運用 (1970), 電気書院.
- 4) フェラー： 確率論とその応用 (1961), 紀伊国屋書店.
- 5) R, Shuster: Power Engineering, **74**, 28 (1970).

Resistance vs. Relative Humidity
Thin Film
Element for Measuring Humidity
by Hiraku KITAGAWA

A new type of electric hygrometer, the "iron oxide thin film element" is described. The element covers the range from 80% to 90% of relative humidity with variance in resistance from 100 MΩ to 15 MΩ. Logarithm of the resistance vs. relative humidity is linear. Other features of the new element are high sensitivity to moisture, rapid response, little calibration independent of temperature between 0°C and 40°C, and good solidity.

1. 要 旨

本研究では、湿度計測用の敏感素子の材料として、酸化チタン、酸化鉛、酸化コバルト、酸化ニッケル、酸化アルミニウム、酸化亜鉛などの金属酸化物、あるいは有機物の誘電率を測定したものを、薄膜抵抗設計、アンチトラセア膜形成のメカニズムによる抵抗感度、その構造による半導体物質の熱膨張、金属酸化物 (Cr₂O₃, Fe₂O₃, Ni₂O₃, Al₂O₃, ZnO, Cr₂O₃-Ni₂O₃ 粉末の塗膜¹⁾、炭素線²⁾、酸化アルミニウムの塗膜³⁾などがある。

従来は Cr₂O₃, Fe₂O₃, Ni₂O₃, Al₂O₃, ZnO, Cr₂O₃-Ni₂O₃ などの粉末を蒸着液に浸漬し、それを基板表面に塗布して作った薄膜を乾燥させたものを素子として用いた結果、一般に電気抵抗の絶対値が高く、Cr₂O₃, Fe₂O₃, Al₂O₃, ZnO などは相対湿度 65% 付近において電気抵抗が 10⁹ MΩ 以上になり、また素子の安定性や再現性などの問題も残されている。

著者は茲に Fe₂O₃ を素子としたものを素子として使用し、上述の問題からの結果より好結果を得たので以下に報告する。

1) 電気学会北海道支部大会講演 (昭和 38 年 10 月, 札幌)
2) 東京工業大学電気工学科
3) 東京工業大学電気工学科