

電力系統の長期経済運用方式

Optimum Long Range Scheduling of Electric Power System

川 本 幸 雄* 河 竹 好 一*
Yukio Kawamoto Kôichi Kawatake

内 容 梗 概

電力系統の長期運用方式の目的とするところは、需要電力、貯水池流入流量を確率変数とし、年間にわたる火力発電コストの期待値を最小ならしめる貯水池運用ルールを導くことである。この運用は単に最も確からしいデータによる運用ではなく、予想がはずれた場合に受ける損益を勘案した運用である。われわれは種々の特性を持つ電力系統の確率的運用の効果を確率的な動的計画法を用いて検討してきた。その結果、電力系統の確率的運用の効果は一般に

- (i) 期待コストは平均値コストよりも高くなる。
- (ii) 流入流量の分散が大きくなると低水位運転に移る。
- (iii) 溢水・渴水をさける方向に修正される。

など、流入流量、需要電力の予想ずれが大きくなると、それだけ安全度を見込んだ運用をとることが明らかになった。

1. 緒 言

電力系統における長期運用計画の目的とするところは、第1に長期間にわたり良質の電力を確実に供給するに十分な供給信頼度と予備力を持つこと、第2に運用の結果得られる利益を最大にし、ひいては低廉な料金で電力を供給することにある。すなわち年間にわたる需要電力、貯水池流入流量などの不確定要素を予測し、供給信頼度の面から常に余裕を持ちながら、火力発電コストを最小ならしめる運用ルールを導くのが目的である。しかしこの運用は、需要電力、貯水池流入流量の正確な予測が困難なため、通常の経済負荷配分計算では求まらず、これら不確定要素を統計的に処理して求めなければならない。

近年、系統運用の合理化が電子計算機の導入を中心として積極的に進められ、長期運用計画に関しても各種の計算が試みられてきた。現在確率的な動的計画法がこのような「一定の制限条件と不確実な情報のもとにおける長期間の運用ルールを導く問題」に最も適した数学的手段であるとされている。この方法によれば年間にわたる需要電力、貯水池流入流量を平均値だけでなく、データの分布の確率を考慮して年間の火力発電コストの期待値を最小ならしめる運用を求めることができる。これは単に最も確からしいデータ(平均値)による運用(通常の経済運用はこれである。以下これを平均値運用と呼ぶ)ではなく、予想がはずれた場合に受ける損益の大きさを勘案して修正された運用(以下これを確率的運用と呼ぶ)であって、われわれの知りうるデータの範囲内では最も合理的な予備力を含んだ解が求められる特長を持っている。

われわれは、制限条件の異なる各種の電力系統モデルについて数値的な検討と考察を加え、電力系統の確率的運用の特長を明らかにした。また確率的な動的計画法は計算量が多く数値計算が困難なものであるが、われわれは多貯水池系に適用しても良好な収れん性を示し、かつ貯水池相互間の相関係数も考慮できる数値計算方式を導き、実系統の運用ルールを導いた。

2. 長期運用方式の概要

長期運用方式は年間にわたる貯水池運用ルールを導き、中期経済運用計算または短期経済運用計算のための貯水量端点条件を与えることを主目的としている。したがって長期運用方式は需要電力、貯

水池流入流量のような不確定要素をいかに処理するか計算方式の重点がおかれ、送電損失、火力発電所間の負荷分担、火力発電所の起動停止、水系の流下時間遅れなどは中期、短期計算の段階で採りあげるべきで、長期では考慮の対象外になる。

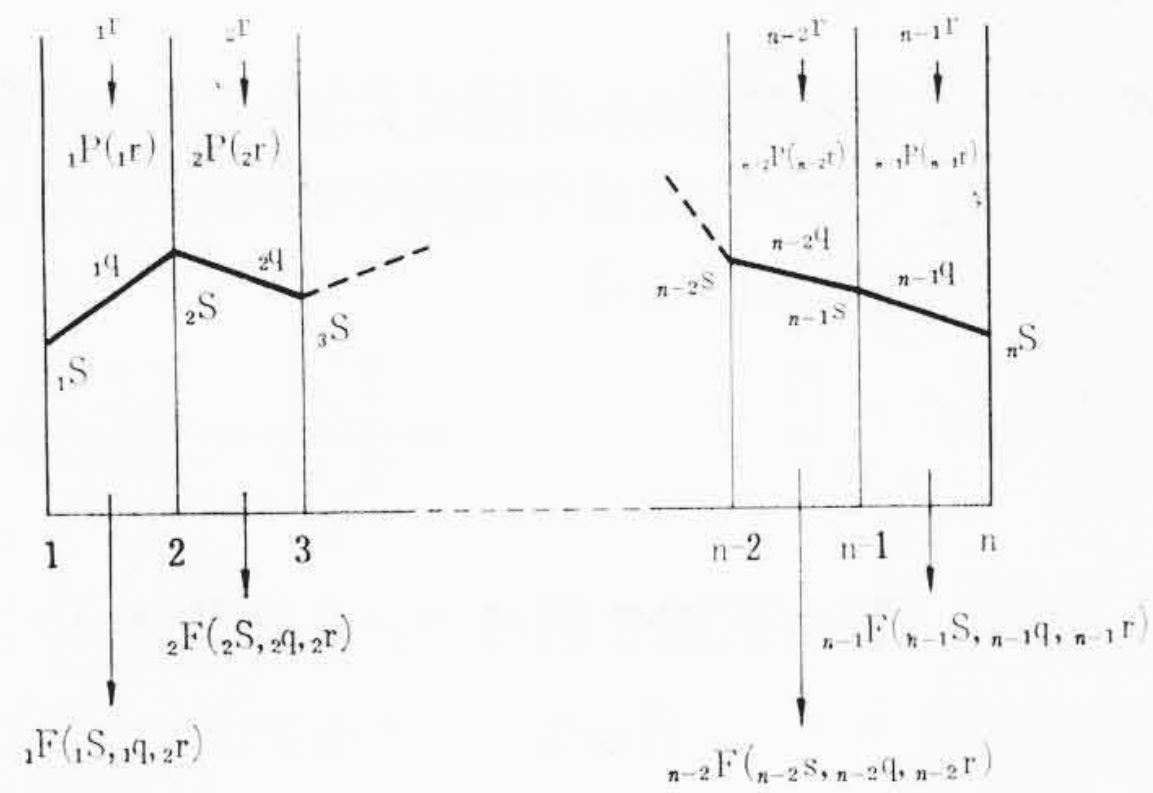
長期運用計算の手法としては現在(1)シミュレーション法(2)確率的な動的計画法が知られている。シミュレーション法は試行錯誤により経済的な貯水池運用ルールを導くものである。貯水池運用ルールとしては豊水期に水をたくわえ一度満水し、渴水期に水を使うルールを基本とし、このルールの変形を幾組か想定する。次に過去の適当な年度の日々の需要電力、貯水池流入流量を用いて系統を計算機上で運用し、制限条件に違反があれば貯水池運用ルールを修正して制限条件を維持する。年間の運用ルールが決まれば年間の系統経費を算出する。これを各ルールについて行ない系統経費が最小になるものを選び出す。この方法は予測がはずれた場合の損益の考慮が払われていないこと、貯水池運用ルールに最適性の保証がないことが欠点であるが、複雑な制限条件や人間の情勢判断がおり込める点に実用性が認められているものである。確率的な動的計画法は長期運用方式の数学的手法として最も適したものである。この方法で求める確率的運用は予想がはずれた場合に受ける損益の大きさを勘案した運用であり、通常安全度を見込んだ運用になる。この安全度は入力データとなる需要電力や貯水池流入流量の分散の大きさによって決まる。したがって確率的運用はこの安全度をわれわれの知りうるデータの範囲内で最も合理的に決定するものであるといえる。確率的な動的計画法の電力系統に対する適用はすでに試みられているが、数値計算が困難なため貯水池数や制限条件の多い電力系統に対して組織的な検討はなされていなかった。われわれは各種の制限条件を持つ多貯水池系の電力系統に対する確率的な動的計画法の適用方式を開発し、これを用いて電力系統の確率的運用の効果を明らかにした。さらにここに開発した手法を用いて実系統の運用ルールを導いた。

3. 確率的な動的計画法とその数値計算方式

3.1 確率的な動的計画法

動的計画法は多段階の最適決定問題を2段階の決定問題に集約しながら、逐次的に解く数学的手法である。動的計画法は確率変数が導入できること、不連続な制限条件を考慮できることを大きな特長としている。したがって、電力系統の長期経済運用方式のように、

* 日立製作所日立研究所



第1図 確率的な動的計画法

一定の制限条件と不確実な情報のもとにおける将来にわたる運用方針を決定する問題に最も適した手法である。

第1図において、 $1S, 2S, \dots, nS$ は多段階における系の状態を示す変数、 $1q, 2q, \dots, n-1q$ は系に対して下された決定を示す変数、 $1r, 2r, \dots, n-1r$ は系に入出するパラメータで確率密度関数 $p(1r), p(2r), \dots, p(n-1r)$ を持つ確率変数である。初期の状態 $1S$ に対し初期の決定 $1q$ が下され状態 $2S$ が得られ、 $2S$ に対し $2q$ が下されて $3S$ が得られるものとする。一般に $k-1S$ に対し $k-1q$ が下されて状態 kS が得られるとき、系に必ず利益または損失が伴う。今これを $k-1F(k-1S, k-1q, k-1r)$ で表わすものとする。また、状態 $k-1S$ と状態 kS を結び付ける式を変換式といい、

$$kS = T(k-1S, k-1q) \quad (1)$$

で表わす。このように状態 kS は $k-1S, k-1q$ だけによって決まり、 $k-2S, k-3S, \dots, 1S$ 、 $k-2q, k-3q, \dots, 1q$ に無関係な系をマルコフ的な系という。また、 $kF(kS, kq, kr)$ の総和を考え

$$I = \sum_{k=1}^{n-1} kF(kS, kq, kr) \quad (2)$$

の期待値

$$\begin{aligned} E\{I\} &= \sum_{k=1}^{n-1} E\{kF(kS, kq, kr)\} \\ &= \sum_{k=1}^{n-1} \int_{-\infty}^{+\infty} kF(kS, kq, kr) p(kr) dr \quad (3) \end{aligned}$$

を最大または最小にする kq の列($1q, 2q, \dots, n-1q$)を見出す問題を確率的な多段決定過程といい、この($1q, 2q, \dots, n-1q$)を最適政策と呼ぶ。 $E\{\}$ は $\{\}$ の期待値を意味する。

ところで I の期待値を最小にする場合を考えると最適性の原理*より

$$\begin{aligned} \text{MIN}[E\{I\}] &= \text{MIN}_{1q}[E\{1F(1S, 1q, 1r)\}] \\ &+ \text{MIN}_{2q}[E\{2F(2S, 2q, 2r)\}] \\ &+ \text{MIN}_{3q}[E\{3F(3S, 3q, 3r)\} + \dots] \\ &+ \text{MIN}_{n-1q}[E\{n-1F(n-1S, n-1q, n-1r)\}] \quad (4) \end{aligned}$$

ただし、ここに $\text{MIN}[\]$ は kq を適当にえらんで $\{\}$ を最小にすることを意味する。 $\text{MIN}_{kq}[E\{F(n-1S, n-1q, n-1r)\}]$ からはただ通りの $n-1q$ が決まり、これを用いると $\text{MIN}[E\{n-1F(n-1S, n-1q, n-1r)\}]$ は $n-1S$ だけの関数となる。そこでこれを

$$n-1f(n-1S) = \text{MIN}_{n-1q}[E\{n-1F(n-1S, n-1q, n-1r)\}] \quad (5)$$

で表わしこれを最適コスト関数という。さらにもう一段階含めた

$$\begin{aligned} \text{MIN}_{n-2q}[E\{n-2F(n-2S, n-2q, n-2r)\}] \\ + \text{MIN}_{n-1q}[E\{n-1F(n-1S, n-1q, n-1r)\}] \quad (6) \end{aligned}$$

を考えると、これに(5)式を用いて

$$\text{MIN}_{n-2q}[E\{n-2F(n-2S, n-2q, n-2r) + n-1f(n-1S)\}] \quad (7)$$

となる。(1)式の変換式を用いると

$$\text{MIN}_{n-2q}[E\{n-2F(n-2S, n-2q, n-2r) + n-1f(T(n-2S, n-2q))\}] \quad (8)$$

となり、 $n-1f(n-1S)$ が求まっていると、これは $n-2S$ だけの関数と考えられる。したがって

$$\begin{aligned} n-2f(n-2S) &= \text{MIN}_{n-2q}[E\{n-2F(n-2S, n-2q, n-2r) \\ &+ n-1f(T(n-2S, n-2q))\}] \quad (9) \end{aligned}$$

なる漸化式をうることができる。(9)式を逐次用いて $n-1f, n-2f, \dots, 2f$ を求めると

$$\text{MIN}_{1q}[E\{1F(1S, 1q, 1r) + 2f(T(1S, 1q))\}] \quad (10)$$

により $1q$ を決定し、 $1S, 1q$ より(1)式を用いて $2S$ を決定する。次に

$$\text{MIN}_{2q}[E\{2F(2S, 2q, 2r) + 3f(T(2S, 2q))\}] \quad (11)$$

により $2q$ を決定する。以下この操作をくり返すと最適政策($1q, 2q, \dots, n-1q$)が求まる。この逐次解法が動的計画法の原理である。

3.2 多次元平面近似法

動的計画法は漸化式を用いたくり返し解法であるから、段階数の多い問題の数値計算には特に効果的であるが、多数の貯水池を含む電力系統のような多次元の問題に対する数値計算は、多次元の最適コスト関数を導入しなければならないので困難であるとされてきた。われわれは多次元平面近似法という新しい収れん計算法を開発し、多貯水池系に適用して実用的に十分な収れん解を得ることに成功した。またこの方法によって初めて貯水池流入流量相互間、需要電力と貯水池流入流量の間の相関係数を考慮した解を得ることができたのである。

m 次元の系に対する動的計画法の漸化式は

$$\begin{aligned} k f(kS_1, \dots, kS_m) &= \text{MIN}_{(kq_1, \dots, kq_m)} [kF(kS_1, \dots, kS_m; kq_1, \dots, kq_m) \\ &+ k+1 f(T(kS_1, kq_1), \dots, T(kS_m, kq_m))] \quad (12) \end{aligned}$$

右辺の極値を求めるために偏微分すると

$$\frac{\partial kF}{\partial kq_i} + \frac{\partial k+1 f}{\partial kq_i} = 0 \quad (i=1 \sim m) \quad (13)$$

$$\frac{\partial kF}{\partial kq_i} + \frac{\partial k+1 f}{\partial k+1 S_i} \cdot \frac{\partial T}{\partial kq_i} = 0 \quad (i=1 \sim m) \quad (14)$$

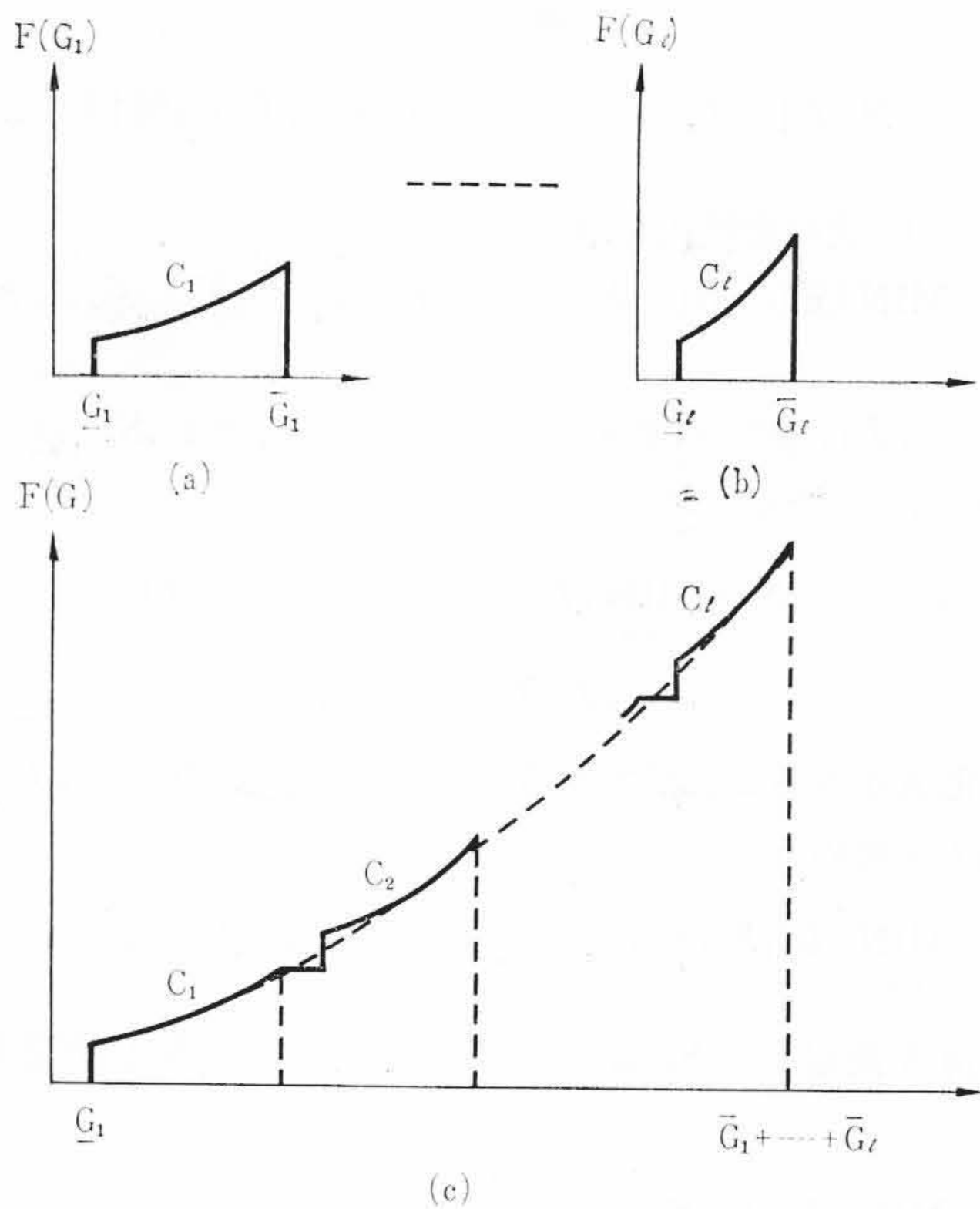
kF, T は与えられた関数であるから、 $\frac{\partial kF}{\partial kq_i}, \frac{\partial T}{\partial kq_i}$ は計算できる。

$\frac{\partial k+1 f}{\partial k+1 S_i}$ は一つ前のステップで求めておかなければならない。しかも $\frac{\partial k+1 f}{\partial k+1 S_i}$ は一般には $k+1S_i$ の関数であるから正確には前ステップにおいて $k+1S_i$ のすべての値について最小化計算が行なわれていなければならない。しかし $k+1S_i$ の微小な変動幅内では $\frac{\partial k+1 f}{\partial k+1 S_i}$ はほぼ一定と考えてよい。すなわち $k+1S_i$ に許容変動幅を設け、この範囲内で最適化計算を行なうものとするれば $\frac{\partial k+1 f}{\partial k+1 S_i}$ を一定値として取り扱うことができる。これは数学的には $k+1 f(k+1S_1, k+1S_2, \dots, k+1S_m)$ をTaylor展開し、その第1次項をとったことに相当する。

$$\begin{aligned} \Delta_{k+1} f(k+1S_1, k+1S_2, \dots, k+1S_m) &= \frac{\partial k+1 f}{\partial k+1 S_1} \cdot \Delta_{k+1} S_1 \\ &+ \frac{\partial k+1 f}{\partial k+1 S_2} \cdot \Delta_{k+1} S_2 + \dots + \frac{\partial k+1 f}{\partial k+1 S_m} \cdot \Delta_{k+1} S_m + \eta (\Delta S^2) \quad (15) \end{aligned}$$

またこれは幾何学的には $k+1 f$ なる曲面のある部分を平面で近似

*「最適政策はその一部期間においても最適政策になっている」。これは古典変分法の部分変分原理に相当する。



第2図 火力発電コスト特性の総合

したことに相当する。最適解を近似の許される範囲で求め、次にその解の周辺で同様の考え方で平面近似する。これをくり返せば能率よく全体にわたる最適解に収れんさせることができるであろう。これが平面近似法の基本的な考え方である。

4. 電力系統の定式化

電力系統は貯水量を状態量に、貯水量の時間的変化を決定変数に選べば多段決定過程の問題に定式化できる、各種の変数を次のように定義する。

- ${}_k S_i$: 第 k 時間帯における第 i 水力 P S の貯水量
- ${}_k q_i$: 第 k 時間帯における第 i 水力 P S の決定変数
- ${}_k J_i$: 第 k 時間帯における第 i 水力 P S の流入流量
- $(a_i + b_i {}_k S_i)$: 第 k 時間帯における第 i 水力 P S の電水比
- ${}_k G$: 第 k 時間帯における火力出力
- ${}_k PR$: 第 k 時間帯における需要電力
- ${}_k F$: 第 k 時間帯における火力発電コスト
- ${}_k \alpha_0, {}_k \alpha, {}_k \beta$: 第 k 時間帯における火力発電コスト係数
- Q_{0i} : 第 i 水力発電所の無効放流量
- m : 水力発電所数
- n : 時間帯数
- $\bar{x}, \underline{x}$: 変数 x の上限, 下限値を示す。

4.1 火力発電所

火力発電所は最大出力時の能率順に投入するものとする。各火力発電所を能率順に投入したときの火力発電コスト特性をグラフに描き、グラフ上から総合発電コスト特性の2次近似式を作成する。第2図は l 個の火力発電所の特性 $C_1, C_2, \dots, C_l$ から総合発電コスト特性 C を得る過程を示している。なお融通電力は全火力出力が上限値に違反したときに受けるものとする。

4.2 水力発電所

決定変数 ${}_k q_i$ は

$${}_k q_i = {}_{k+1} S_i - {}_k S_i \quad (16)$$

により定義する。したがって使用水量は

$${}_k Q_i = {}_k J_i - {}_k q_i \quad (17)$$

水力出力は

$${}_k P_i = (a_i + b_i {}_k S_i) ({}_k J_i - {}_k q_i - Q_{0i}) \quad (18)$$

4.3 需給バランス

需要電力には負荷の電力から自流式水力発電所の出力を差し引いたものを用いる。したがって負荷変動のほかに自流式水力の流入流量変動も含んだ確率変数である。

$${}_k PR = {}_k G + \sum_{i=1}^m {}_k P_i \quad (19)$$

5. 電力系統の期待コスト計算方式

われわれは期待コストを最小ならしめる決定を求めているのであるから、ある決定が下されたときの期待コストを計算するルーチンを作っておく必要がある。ところで電力系統の運用コストとしては通常連続な火力発電コストを中心に考えればよいが、(a)火力出力上下限、(b)貯水量上下限、(c)使用水量上下限などの制限条件のきびしい電力系統では、このほかに、(a)供給電力不足のために受ける融通電力コスト、(b)貯水池の溢水による損失、(c)貯水池渇水によるペナルティコストなどの不連続コストも考えなければならない。なぜなら期待コストは予想がはずれた場合における系統運用コストをその予想ずれの確率で重みをつけて累算したものであり、制限条件がきびしいかまたは予想ずれの大きい系統ではこれら不連続コストを計上する確率が高いからである。すなわち制限条件がきびしいかまたは予想ずれのはなはだしい(需要電力や貯水池流入流量の分散の大きい)電力系統においては、運用コストを一般に不連続な関係として取り扱わなければならないのである。この不連続性に関して電力系統は次の4種に分けて考えることができる。すなわち

- (1) どの制限条件も入力データの分散に比しきびしくない系統。
- (2) 火力上下限が入力データの分散に比しきびしい系統。
- (3) 火力上下限、貯水量上下限が入力データの分散に比しきびしい系統。
- (4) どの制限条件も入力データの分散に比しきびしい系統。

われわれはそれぞれの電力系統に対して、その特長を生かして計算量をできるだけ少なくすることに主眼をおいた期待コストの計算方式を導いた。

5.1 どの制限条件もきびしくない場合

この場合は系統運用コストとして火力発電コストを考えればよい。火力発電コスト ${}_k F$ と火力出力 ${}_k G$ はそれぞれ

$${}_k F = {}_k \alpha_0 + {}_k \alpha {}_k G + {}_k \beta {}_k G^2 \quad (20)$$

$${}_k G = {}_k PR - \sum_{i=1}^m (a_i + b_i {}_k S_i) ({}_k J_i - {}_k q_i - Q_{0i}) \quad (21)$$

である。動的計画法の漸化式は

$$\begin{aligned} & {}_k f({}_k S_1, \dots, {}_k S_m) \\ &= \text{MIN}_{({}_k q_1, \dots, {}_k q_m)} [E\{{}_k F({}_k S_1, \dots, {}_k S_m; {}_k q_1, \dots, {}_k q_m) \\ &+ {}_{k+1} f({}_{k+1} S_1, \dots, {}_{k+1} S_m)\}] \quad (22) \end{aligned}$$

(20), (21) を (22) に代入すると

$$\begin{aligned} & {}_k f({}_k S_1, \dots, {}_k S_m) \\ &= \text{MIN}_{({}_k q_1, \dots, {}_k q_m)} [{}_k \alpha_0 + {}_k \alpha {}_k G' + {}_k \beta {}_k G'^2 + {}_k \beta \{CV({}_k PR, {}_k PR) \\ &- 2 \sum_{i=1}^m (a_i + b_i {}_k S_i) CV({}_k PR, {}_k J_i) \\ &+ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (a_i + b_i {}_k S_i) (a_j + b_j {}_k S_j) CV({}_k J_i, {}_k J_j)\} \\ &+ {}_{k+1} f({}_{k+1} S_1, \dots, {}_{k+1} S_m)] \quad (23) \end{aligned}$$

ただし

$${}_k G' = {}_k PR' - \sum_{i=1}^m (a_i + b_i {}_k S_i) ({}_k J_i' - {}_k q_i - Q_{0i}) \quad (24)$$

ここに ${}_k PR'$, ${}_k J_i'$: 需要電力, 貯水池流入流量の平均値

$CV({}_k PR, {}_k PR)$: 需要電力 ${}_k PR$ の共分散

$CV(kPR, kJ_i)$: 需要電力と貯水池流入流量の共分散

$CV(kJ_i, kJ_j)$: 貯水池流入流量相互間の共分散

すなわち期待コストは平均値運用コストに需要電力、貯水池流入流量の共分散による項を加えることによって求められるので、計算がきわめて簡単である。これは火力発電コストが連続な2次関数であるという仮定に基づくものである。

5.2 火力上下限がきびしい系統

火力発電コスト特性は第3図のような特性を持っているものとする。図で $G \geq \bar{G}$ の部分は融通電力領域である。すなわち

$${}_kF = {}_k\alpha_0 + {}_k\alpha_k G + {}_k\beta_k G^2 \quad {}_k\bar{G} \leq {}_kG \leq {}_k\bar{G} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$${}_kF = {}_k\bar{F} + {}_k\gamma ({}_kG - {}_k\bar{G}) \quad {}_k\bar{G} \leq {}_k\bar{G} \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここに ${}_k\gamma$: 融通電力単価

$${}_kf({}_kS_1, \dots, {}_kS_m) = \min_{({}_kq_1, \dots, {}_kq_m)} [E\{{}_kF({}_kS_1, \dots, {}_kS_m; {}_kq_1, \dots, {}_kq_m) + {}_{k+1}f({}_{k+1}S_1, \dots, {}_{k+1}S_m)\}] \quad \dots\dots\dots (27)$$

において

(a) 右辺第1項 $E\{{}_kF\}$

$$E\{{}_kF\} = \int_{-\infty}^{\bar{G}} {}_kF p({}_kG) d{}_kG + \int_{\bar{G}}^{\infty} {}_kF p({}_kG) d{}_kG + \int_G^{+\infty} {}_kF p({}_kG) d{}_kG \quad \dots\dots\dots (28)$$

で与えられる。ここに $p({}_kG)$ は火力出力 ${}_kG$ の確率密度関数である。

今もし (1) ${}_kJ_1, {}_kJ_2, \dots, {}_kJ_m$ が m 次元の正規分布に従う。

(2) ${}_kPR$ と ${}_kJ_i$ が2次元の正規分布に従う。

という仮定をおくならば火力出力 ${}_kG$ は

$$\text{平均値: } {}_kG' = {}_kPR' - \sum_{i=1}^m (a_i + b_i {}_kS_i) ({}_kJ_i' - q_i - Q_{0i}) \quad \dots\dots (29)$$

標準偏差:

$$\sigma = \sqrt{CV({}_kPR, {}_kPR) + \sum_{i=1}^m (a_i + b_i {}_kS_i) \cdot CV({}_kPR, {}_kJ_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (a_i + b_i {}_kS_i) (a_j + b_j {}_kS_j) \cdot CV({}_kJ_i, {}_kJ_j)} \quad \dots\dots\dots (30)$$

の正規分布に従う。すなわち

$$p({}_kG) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{({}_kG - {}_kG')^2}{2\sigma^2}} \quad \dots\dots\dots (31)$$

である。ここで

$$t = \frac{{}_kG - {}_kG'}{\sigma} \quad \dots\dots\dots (32)$$

なる変数変換を行なうと

$$E\{{}_kF\} = {}_kF \int_{-\infty}^{t_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + ({}_k\alpha_0 + {}_k\alpha_k G' + {}_k\beta_k G'^2 + {}_k\beta\sigma^2) \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{t^2}{2}} ({}_k\alpha + 2{}_k\beta G' + {}_k\beta\sigma t) \right]_{t_1}^{t_2} + \{({}_k\alpha_0 + {}_k\alpha_k \bar{G} + {}_k\beta_k \bar{G}^2 + {}_k\gamma ({}_kG' - {}_k\bar{G}))\} \int_{t_2}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \frac{{}_k\gamma\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{t^2}{2}} \right]_{t_2}^{+\infty} \quad \dots\dots\dots (33)$$

で計算できる。ここに

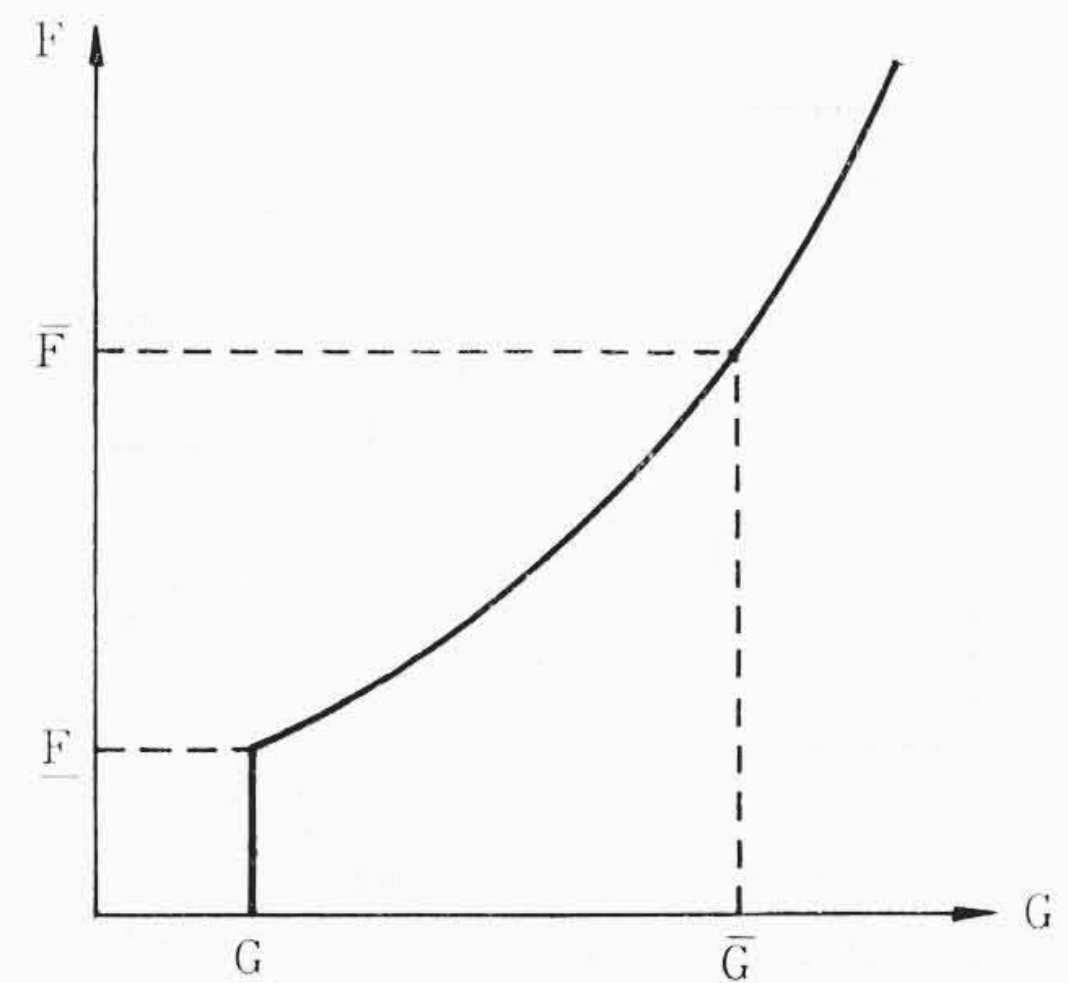
$$t_1 = \frac{\bar{G} - G'}{\sigma}, \quad t_2 = \frac{\bar{G} - G'}{\sigma}$$

(b) 右辺第2項 $E\{{}_{k+1}f\}$

${}_{k+1}f$ は貯水量だけの関数であるから貯水量の変動がないかぎり

$$E\{{}_{k+1}f\} = {}_{k+1}f$$

である。しかし火力が下限を割ったときは水力出力を減らせてこれを維持する運転をとるから貯水量が増加することになる。火力



第3図 総合火力発電コスト特性

が下限を割ったとき、各水力はその出力の比率に応じてこれを分担するものとする。 ${}_{k+1}S_i$ の増分 $\Delta_{k+1}S_i$ は

$$\Delta_{k+1}S_i = w_i ({}_k\bar{G} - {}_kG) \quad {}_kG \leq {}_k\bar{G}$$

$$w_i = \frac{{}_kJ_i - {}_kq_i - Q_{0i}}{{}_kPR - {}_kG} \quad \dots\dots\dots (34)$$

である。したがって

$$E\{{}_{k+1}f\} = \int_{-\infty}^{{}_k\bar{G}} {}_{k+1}f({}_{k+1}S_1 + \Delta_{k+1}S_1, \dots, {}_{k+1}S_m + \Delta_{k+1}S_m) p({}_kG) d{}_kG + \int_{{}_k\bar{G}}^{+\infty} {}_{k+1}f({}_{k+1}S_1, \dots, {}_{k+1}S_m) p({}_kG) d{}_kG \quad \dots\dots (35)$$

に分けて計算しなければならない。 ${}_{k+1}f$ を3章(15)式の近似式で表現し、変数変換して整理すると

$$E\{{}_{k+1}f\} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial {}_{k+1}f}{\partial {}_{k+1}S_i} \left\{ {}_{k+1}S_i + w_i \int_{-\infty}^{t_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + w_i \sigma \left[e^{-\frac{t^2}{2}} \right]_{-\infty}^{t_1} \right\} \quad \dots\dots\dots (36)$$

以上のように多次元の確率分布が火力の1次元の分布に還元できるので計算が簡単になるが、これは使用水量上下限がゆるやかで需給バランスの式が各貯水池流入流量にとって連続な1次結合式とみなせる範囲において成立するものである。

5.3 火力上下限と貯水量上下限がきびしい系統

この場合の期待コスト計算式 $E\{{}_{k+1}F\}$ は(33)式とまったく同じであるが、 $E\{{}_{k+1}f\}$ は(35)式とは異なる。火力が下限を割ったときは各水力がその出力の比率に応じて貯水量を増加させて吸収するが、貯水量が上限に達すると溢水する。すなわち貯水量 S_i の上限 $\bar{S}_i$ に対応する ${}_kG(\bar{S}_i)$ を

$$({}_kG - {}_kG(\bar{S}_i)) \frac{{}_kJ_i - {}_kq_i - Q_{0i}}{{}_kPR - {}_kG} = -({}_kS_i + {}_kq_i - {}_k\bar{S}_i) \quad \dots\dots (37)$$

なる関係で求め

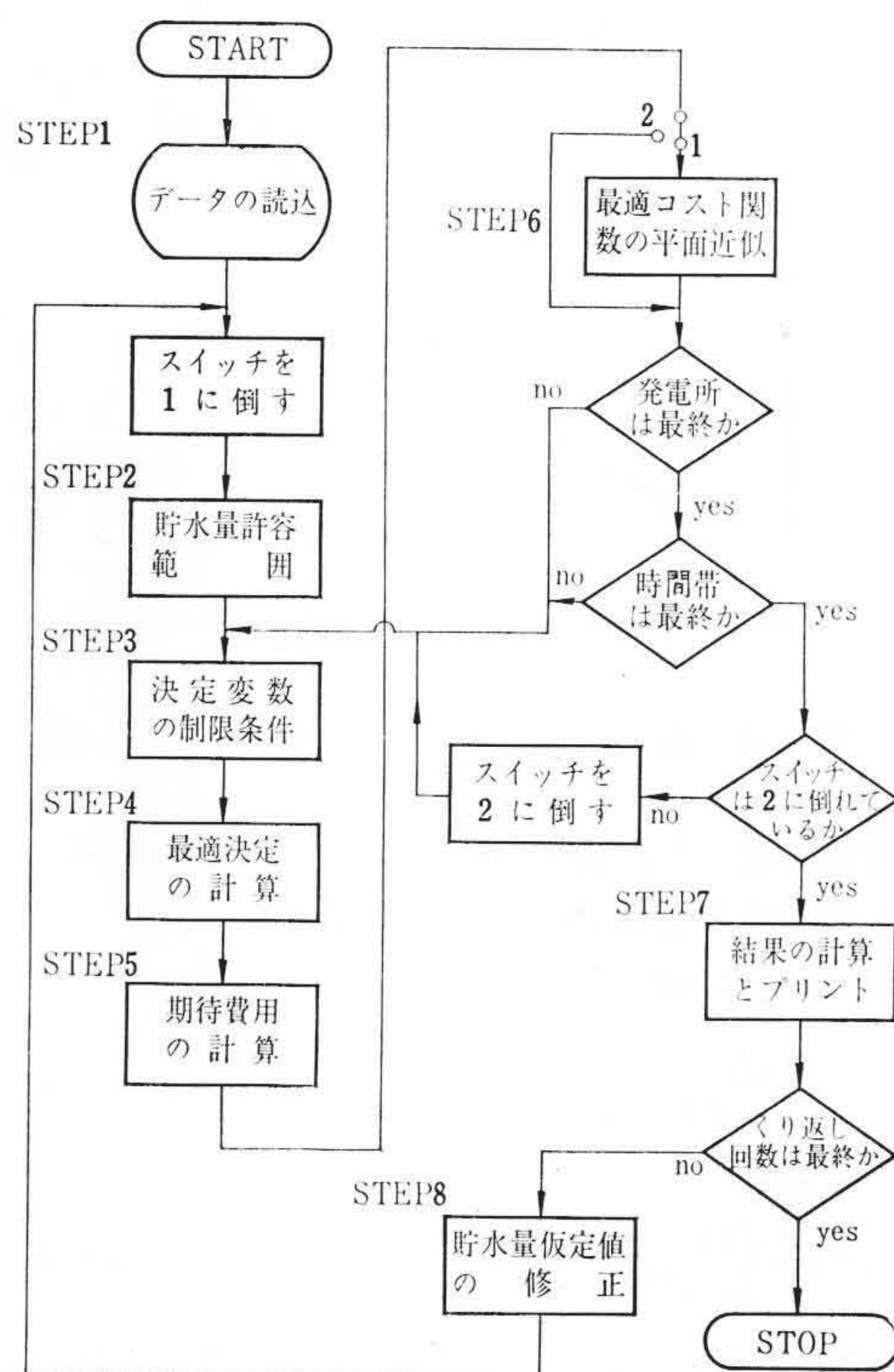
- (1) ${}_kG \leq {}_kG(\bar{S}_i)$ のとき貯水量は $S_i = \bar{S}_i$ となり溢水する。
- (2) ${}_kG(\bar{S}_i) \leq {}_kG \leq {}_k\bar{G}$ のとき貯水量は増大する。
- (3) ${}_k\bar{G} \leq {}_kG$ のとき貯水量変化なし。

なる三つの領域に分けて考えなければならない。したがって

$$E\{{}_{k+1}f\} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial {}_{k+1}f}{\partial {}_{k+1}S_i} \left\{ \int_{-\infty}^{{}_kG(\bar{S}_i)} {}_{k+1}\bar{S}_i p(G) dG + \int_{{}_kG(\bar{S}_i)}^{{}_k\bar{G}} ({}_kS_i + \Delta_{k+1}S_i) p(G) dG + \int_{{}_k\bar{G}}^{+\infty} {}_{k+1}S_i p(G) dG \right\} \quad \dots\dots\dots (38)$$

変数変換して整理すると

$$E\{{}_{k+1}f\} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial {}_{k+1}f}{\partial {}_{k+1}S_i} \left\{ \bar{S}_i \int_{-\infty}^{t_{3i}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + {}_{k+1}S_i \int_{t_{3i}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + w_i \int_{t_{3i}}^{t_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + w_i \sigma \left[e^{-\frac{t^2}{2}} \right]_{t_{3i}}^{t_1} \right\} \quad \dots\dots\dots (39)$$



第4図 計算手順を示すフローチャート

ここに

$$t_{3i} = \frac{kG(\bar{S}_i) - kG}{\sigma} \dots\dots\dots (40)$$

5.4 どの制限条件もきびしい系統

この場合には多次元分布を1次元分布に集約できないので多次元確率密度関数を求めて Stieltjes 積分を行なわなければならない。 m 個の貯水池を含む系統の発電コストは需要電力を合わせて $(m+1)$ 次元の確率密度関数を持つ。これを正規分布であるとするとき次式により表わせる。

$$p(x_1, x_2, \dots, x_{m+1}) = \frac{\sqrt{|A|}}{(2\pi)^{\frac{m+1}{2}}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{m+1} A_{ij}(x_i - a_i)(x_j - a_j)} \dots\dots\dots (41)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに } x_1 &= {}_kPR, & a_1 &= {}_kPR' \\ x_2 &= {}_kJ_1, & a_2 &= {}_kJ_1' \\ &\vdots & &\vdots \\ x_{m+1} &= {}_kJ_m, & a_{m+1} &= {}_kJ_m' \end{aligned}$$

A_{ij} は分散行列の逆行列の要素である。すなわち

$$\left. \begin{aligned} [A_{ij}] &= [A^{ij}]^{-1} \\ A^{ij} &= CV(x_i, x_j) = \gamma_{ij} \sigma_i \sigma_j \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (42)$$

γ_{ij} : 相関係数, σ_i, σ_j : x_i, x_j の標準偏差

$$\text{また } |A| = \det |A_{ii}| \dots\dots\dots (43)$$

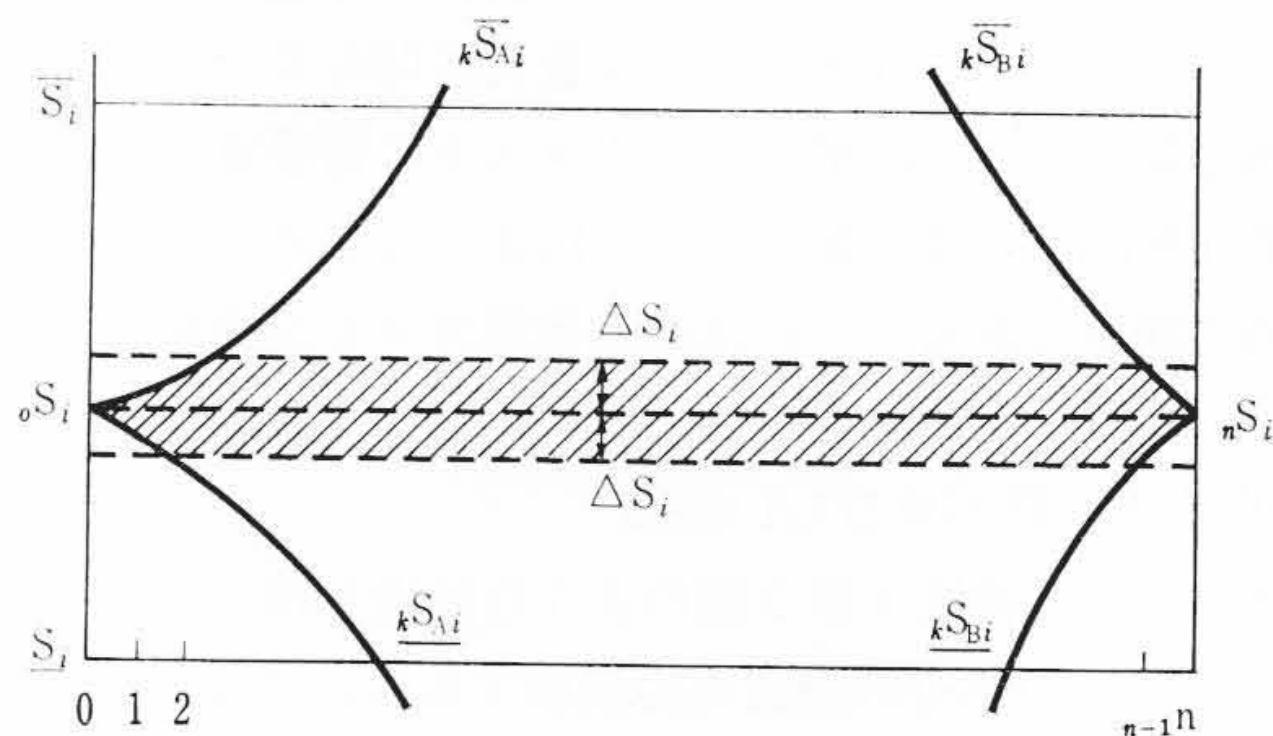
期待コストは

$$\begin{aligned} {}_kf({}_kS_1, \dots, {}_kS_m) &= \min_{({}_kQ_1, \dots, {}_kQ_m)} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} \\ &({}_kF + {}_{k+1}f) p({}_kPR, {}_kJ_1, \dots, {}_kJ_m) \cdot \\ &d{}_kPR d{}_kJ_1 \dots d{}_kJ_m \dots\dots\dots (44) \end{aligned}$$

である。しかるに正規確率密度関数は

$$a_i - 3\sigma_i \leq x_i \leq a_i + 3\sigma_i \quad (i=1 \sim m+1) \dots\dots\dots (45)$$

なる領域で考えれば実用上十分であるから、各変数 ${}_kPR, {}_kJ_i$ ($i=1 \sim m$) をその範囲内で適当に分割し、そのあらゆる組み合わせについて $({}_kF + {}_{k+1}f)$ を計算し、これにそのときの確率 $p({}_kPR, {}_kJ_1, \dots, {}_kJ_m)$ を乗じて Simpson の公式に従って累算すればよい。 $({}_kF + {}_{k+1}f)$ の計算は付録に示すように行なう。



第5図 貯水量許容範囲

6. 計算手順

計算手順を示すフローチャートを第4図に示す。

ステップ1「データの読み込み」

- 時間帯数: n
- 水力発電所数: m
- くり返し回数: I_m
- 火力上下限值: ${}_k\bar{G}, {}_k\underline{G}$ ($k=1 \sim n$)
- 火力発電コスト係数: ${}_k\alpha_0, {}_k\alpha, {}_k\beta$ ($k=1 \sim n$)
- 融通電力単価: ${}_k\gamma$ ($k=1 \sim n$)
- 需要電力分散: $CV({}_kPR, {}_kPR), CV({}_kPR, {}_kJ_i)$ ($k=1 \sim n, i=1 \sim m$)
- 貯水量初期値: ${}_kS_i$ ($k=1 \sim n, i=1 \sim m$)
- 流入流量平均値: ${}_kJ_i$ ($k=1 \sim n, i=1 \sim m$)
- 流入流量共分散: $CV({}_kJ_i, {}_kJ_j)$ ($k=1 \sim n, i, j=1 \sim m$)
- 貯水量上下限: $\bar{S}_i, \underline{S}_i$ ($i=1 \sim m$)
- 電水比係数: A_i, B_i ($i=1 \sim m$)
- 使用水量上下限値: $\bar{Q}_i, \underline{Q}_i$ ($i=1 \sim m$)
- 無効放流量: Q_{0i} ($i=1 \sim m$)
- 収れん判定誤差: ε

ステップ2「貯水量の許容範囲」

最適コスト関数の Taylor 近似のため貯水量に許容範囲を設定する(第5図参照)。ただし、貯水量の取りうる範囲は使用水量制限と端点条件のため限定される。これを ${}_k\bar{S}_A, {}_k\underline{S}_A, {}_k\bar{S}_B, {}_k\underline{S}_B$ で表現する。

$$\begin{aligned} {}_kS_{\max i} &= \min[{}_kS_i + \Delta S_i, {}_k\bar{S}_{Ai}, {}_k\bar{S}_{Bi}, \bar{S}_i] \\ {}_kS_{\min i} &= \max[{}_kS_i - \Delta S_i, {}_k\underline{S}_{Ai}, {}_k\underline{S}_{Bi}, \underline{S}_i] \end{aligned} \dots\dots\dots (46)$$

$$\left. \begin{aligned} {}_k\bar{S}_{Ai} &= {}_0S_i + \sum_{k=1}^k ({}_kJ_i - \underline{Q}_i) \\ {}_k\bar{S}_{Bi} &= {}_nS_i - \sum_{k=k+1}^n ({}_kJ_i - \bar{Q}_i) \\ {}_k\underline{S}_{Ai} &= {}_0S_i + \sum_{k=1}^k ({}_kJ_i - \bar{Q}_i) \\ {}_k\underline{S}_{Bi} &= {}_nS_i - \sum_{k=k+1}^n ({}_kJ_i - \underline{Q}_i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (47)$$

ステップ3「決定変数の制限条件」

使用水量、貯水量に制限条件があるので、当然決定変数にも制限条件が加わる。使用水量上下限による決定変数の制限 $\bar{q}(Q), \underline{q}(Q)$ は

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}(Q) &= {}_kJ_i - \underline{Q}_i \\ \underline{q}(Q) &= {}_kJ_i - \bar{Q}_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (48)$$

貯水量許容範囲による決定変数の制限 $q(S)$ は

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}(S) &= {}_{k+1}S_{\max i} - {}_kS_i \\ \underline{q}(S) &= {}_{k+1}S_{\min i} - {}_kS_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (49)$$

両者を総合して

第1表 流入流量と共分散

時間帯	月 別	kJ_1' (m ³ /s)	kJ_2' (m ³ /s)	$C(kJ_1, kJ_1)$ (m ³ /s) ²				$C(kJ_1, kJ_2)$ (m ³ /s) ²				$C(kJ_2, kJ_2)$ (m ³ /s) ²			
		各 case 共 通	各 case 共 通	case 1	case 2	case 3	case 4	case 1	case 2	case 3	case 4	case 1	case 2	case 3	case 4
1	4~5	4.7	3.9	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0
2	6~7	5.8	4.1	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0
3	8~9	5.8	4.1	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0
4	10~11	3.4	3.5	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0
5	12~1	3.0	3.4	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0
6	2~3	3.3	3.5	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0

第2表 需要電力と共分散

時間帯	kPR' (MW)	$C(kPR, kPR)$ (MW) ²	$C(kPR, kJ_1)$ (MW・m ³ /s)	$C(kPR, kJ_2)$ (MW・m ³ /s)
	各 ケ ー ス 共 通	各 ケ ー ス 共 通	各 ケ ー ス 共 通	各 ケ ー ス 共 通
1	75.0	0.0	0.0	0.0
2	60.0	0.0	0.0	0.0
3	80.0	0.0	0.0	0.0
4	90.0	0.0	0.0	0.0
5	90.0	0.0	0.0	0.0
6	80.0	0.0	0.0	0.0

$$\left. \begin{aligned} k\bar{q}_i &= \min[k\bar{q}_i(Q), k\bar{q}_i(S)] \\ k\underline{q}_i &= \max[k\underline{q}_i(Q), k\underline{q}_i(S)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (50)$$

ステップ4「最適決定の計算」

$$\begin{aligned} k f(kS_1, \dots, kS_m) \\ = \min_{(kq_1, \dots, kq_m)} [E\{kF(kS_1, \dots, kS_m : kq_1, \dots, kq_m) \\ + k_{+1} f(k_{+1}S_1, \dots, k_{+1}S_m)\}] \dots\dots\dots (51) \end{aligned}$$

すなわち、 $kq_2, \dots, kq_m$ を最初上下限の中間の値に固定し、 kq_1 を $k\underline{q}_1$ から Δq_1 ずつ $k\bar{q}_1$ まで変化させる。このとき $k f$ が最小になる kq_1 を求めこれを kq_1' とする。次に kq_2 を取り出し同様に $k\underline{q}_2$ から Δq_2 ずつ $k\bar{q}_2$ まで変化させ $k f$ を最小ならしめる kq_2' を求める。これをくり返し、 $kq_i' (i=1 \sim m)$ を一定値に収れんさせる。

ステップ5「期待コストの計算」

ステップ4で求めた最適決定 kq_i' から

$$kG' = kPR' - \sum_{i=1}^m (a_i + b_i kS_i) (kJ_i' - kq_i' - Q_{0i}) \dots\dots\dots (52)$$

を算出し、これを基に前節の計算方式によって

$$E\{kF + k_{+1} f\}$$

を計算する。

ステップ6「最適コスト関数の近似」

$$\begin{aligned} k\hat{s}_i &= \frac{\partial k f}{\partial kS_i} \\ &\approx \frac{k f(kS_1, \dots, kS_{\max i}, \dots, kS_m) - k f(kS_1, \dots, kS_{\min i}, \dots, kS_m)}{kS_{\max i} - kS_{\min i}} \dots\dots\dots (53) \end{aligned}$$

すなわち、ステップ3～ステップ5までの計算を $kS_i = kS_{\max i}$ の場合と、 $kS_i = kS_{\min i}$ の2通りの場合について行ない、両者のコストの差と $(kS_{\max i} - kS_{\min i})$ の比を求める。ステップ2～ステップ7の計算を各発電所、各時間帯について行なうと決定プロセスに移行するためにスイッチを2に倒す。

ステップ7「結果のプリント」

最適決定から各種のデータを算出する。溢水量は $kS_i + kq_i' > \bar{S}_i$ の

とき発生し、その大きさは

$$kQW_i = kq_i' - (\bar{S}_i - kS_i) \dots\dots\dots (54)$$

である。プリントの内容は

くり返し回数: I

総期待コスト: T_{COST}

発電所番号: i

貯水量: $kS_i (k=1 \sim n, i=1 \sim m)$

水力出力: $kP_i (k=1 \sim n, i=1 \sim m)$

使用水量: $kQ_i (k=1 \sim n, i=1 \sim m)$

溢水量: $kQW_i (k=1 \sim n, i=1 \sim m)$

融通電力: $kPT (k=1 \sim n)$

である。

ステップ8「貯水量仮定値の修正」

貯水量初期値を解で置換える。

7. 数値計算と検討

7.1 モデル系統と計算ケース

電力系統の確率的運用の効果を検討するために、水力2機、火力1機からなるモデル系統を用い、IBM 7074 で数値計算を行なった。

(1) 火力発電所

$$kF = 14.9 + 2.06 kG + 0.0026 kG^2 \quad (10^3 \text{ k} \text{ ¥} / 2 \text{ month}) \dots (55)$$

融通電力単価 $k\gamma = 4 (\text{¥} / \text{kW})$

$$\bar{G} = 75 (\text{MW}), \quad \underline{G} = 25 (\text{MW})$$

(2) 第1水力発電所

$$kP_1 = (0.838 + 0.04 kS) (kQ - 0.5) \dots\dots\dots (56)$$

$$\bar{Q} = 10 (\text{m}^3/\text{s}), \quad \underline{Q} = 0$$

$$\bar{S} = 20 (\text{m}^3/\text{s} / 2 \text{ month}), \quad \underline{S} = 0$$

(3) 第2水力発電所

$$kP_2 = (4.584 + 0.0948 kS) (kQ - 0.5) \dots\dots\dots (57)$$

$$\bar{S} = 20 (\text{m}^3/\text{s} / 2 \text{ month}), \quad \underline{S} = 0$$

(4) 流入流量 第1表に示すとおり。

(5) 需要電力 第2表に示すとおり。

(6) 計算結果 第6図: case 1～case 4 までのコスト収束曲線

第7図: case 1 の最適貯水量と最適使用水量

第8図: case 2 の最適貯水量と最適使用水量

第9図: case 3 の最適貯水量と最適使用水量

第10図: case 4 の最適貯水量と最適使用水量

第11図: case 1 の最適発電電力

第12図: case 2 の最適発電電力

第13図: case 3 の最適発電電力

第14図: case 4 の最適発電電力

なおこの計算には5.2の計算方式を採用している。

7.2 電力系統の確率的運用の効果

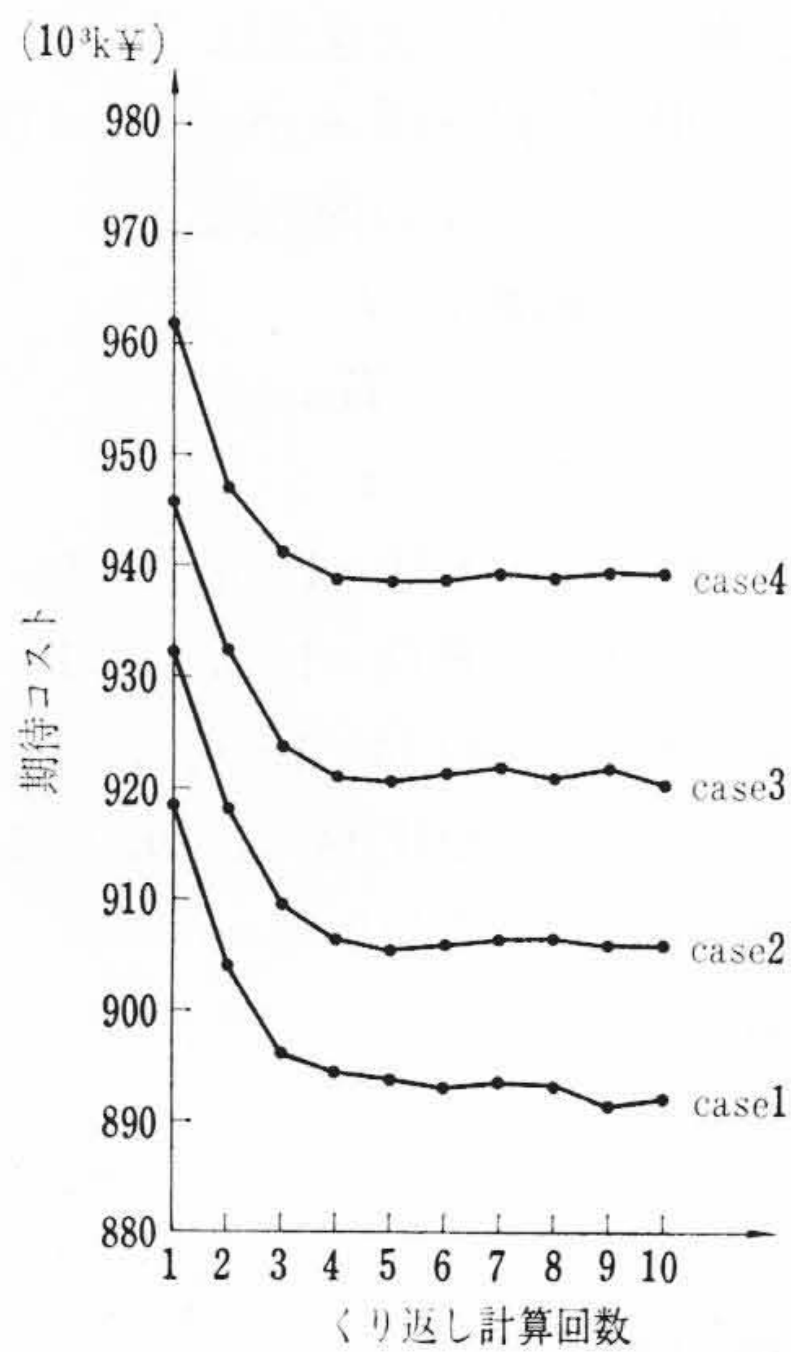
モデル系統を用いた数値計算と理論的考察から、電力系統の確率的運用は次のような特長を持っていることが明らかになった。

(1) 期待コスト

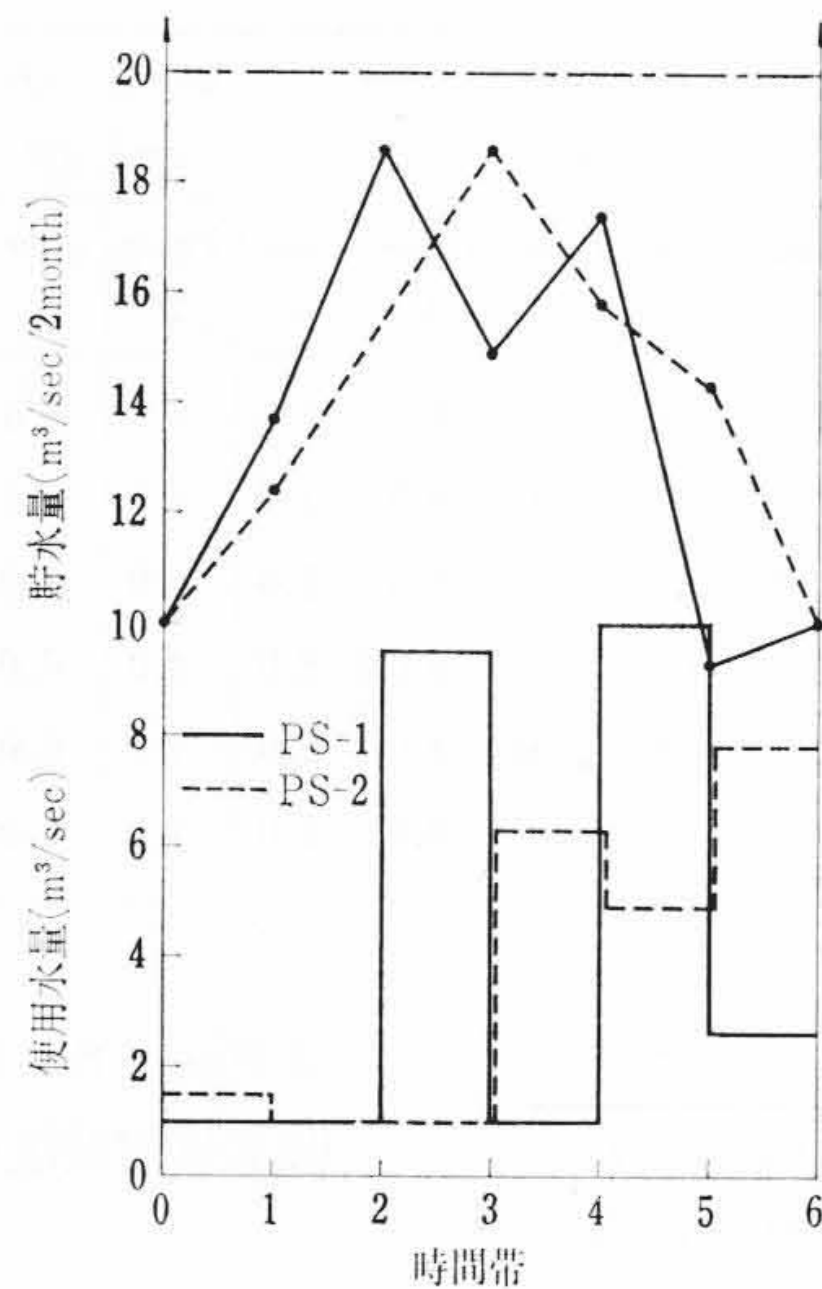
最適解の期待コストは分散が大きくなるとそれだけ増大している。このことは予想ずれが大きくなるとそれだけ大きな安全度を見込んだ運用を選んでいることを示している。

(2) 低水位運転

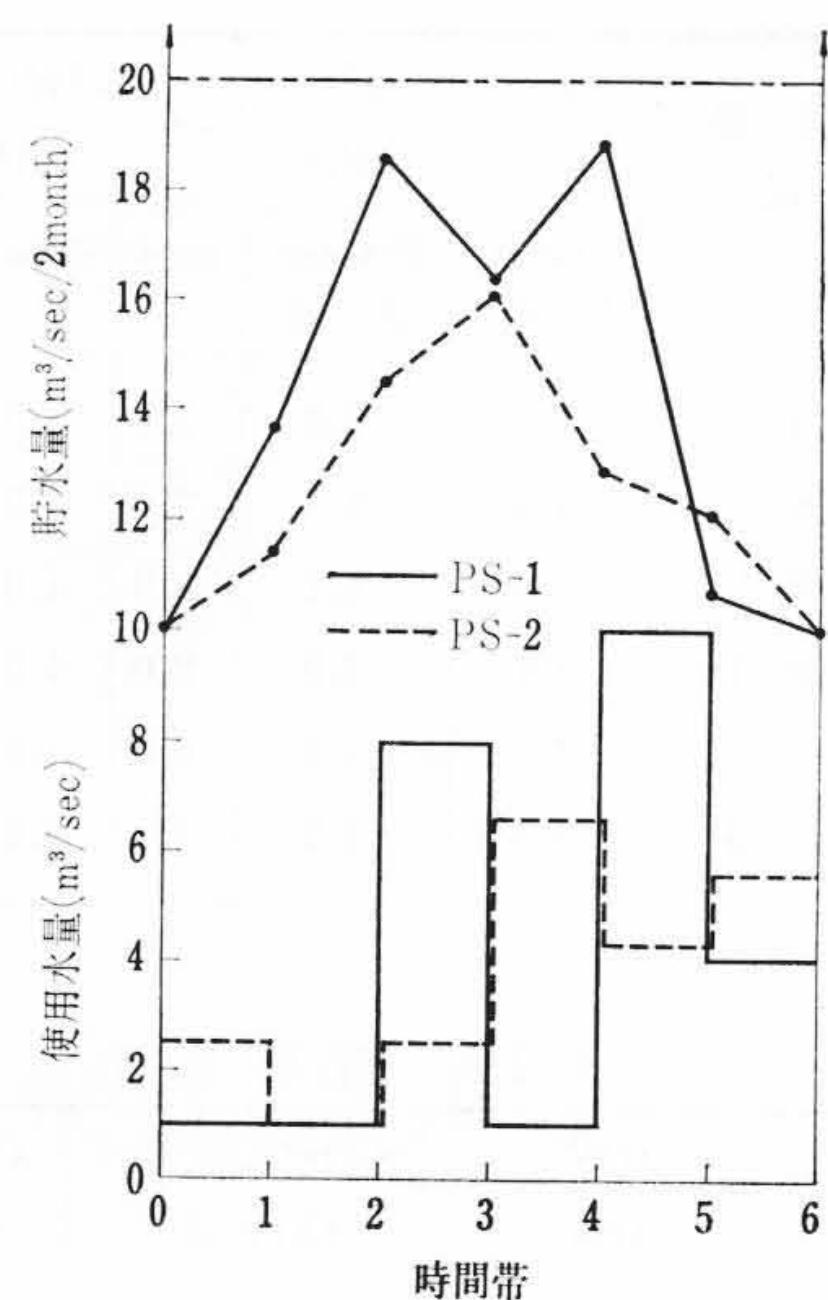
各貯水池の流入流量のばらつきは火力発電コストのばらつきに換算される。各貯水池の電水比の大きいところでは流入流量のばらつきがそれだけ拡大されて火力発電コストのばらつきになるので期待コストは高くなる。したがって確率的運用における貯水量カーブは平均値運用に比べると少し低水位運転に移る傾向を持っている。



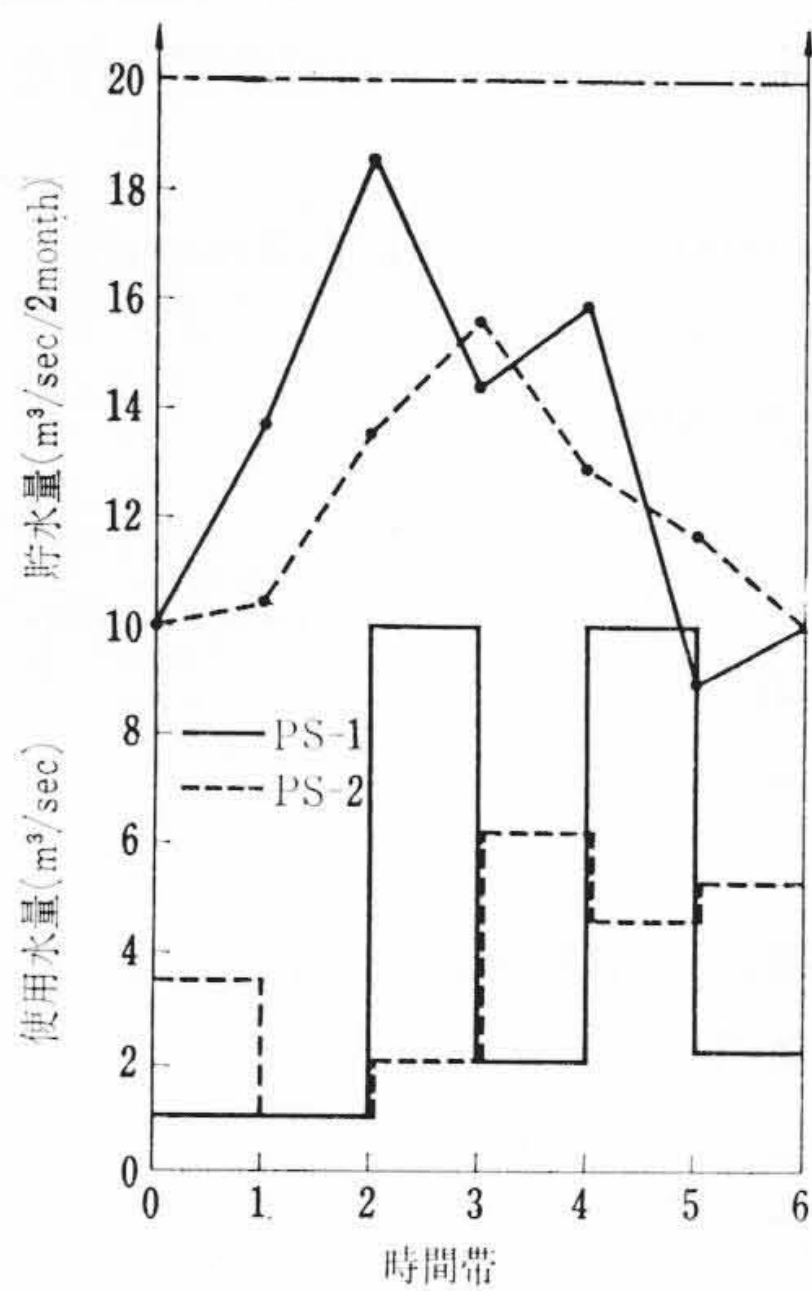
第6図 コスト収束曲線



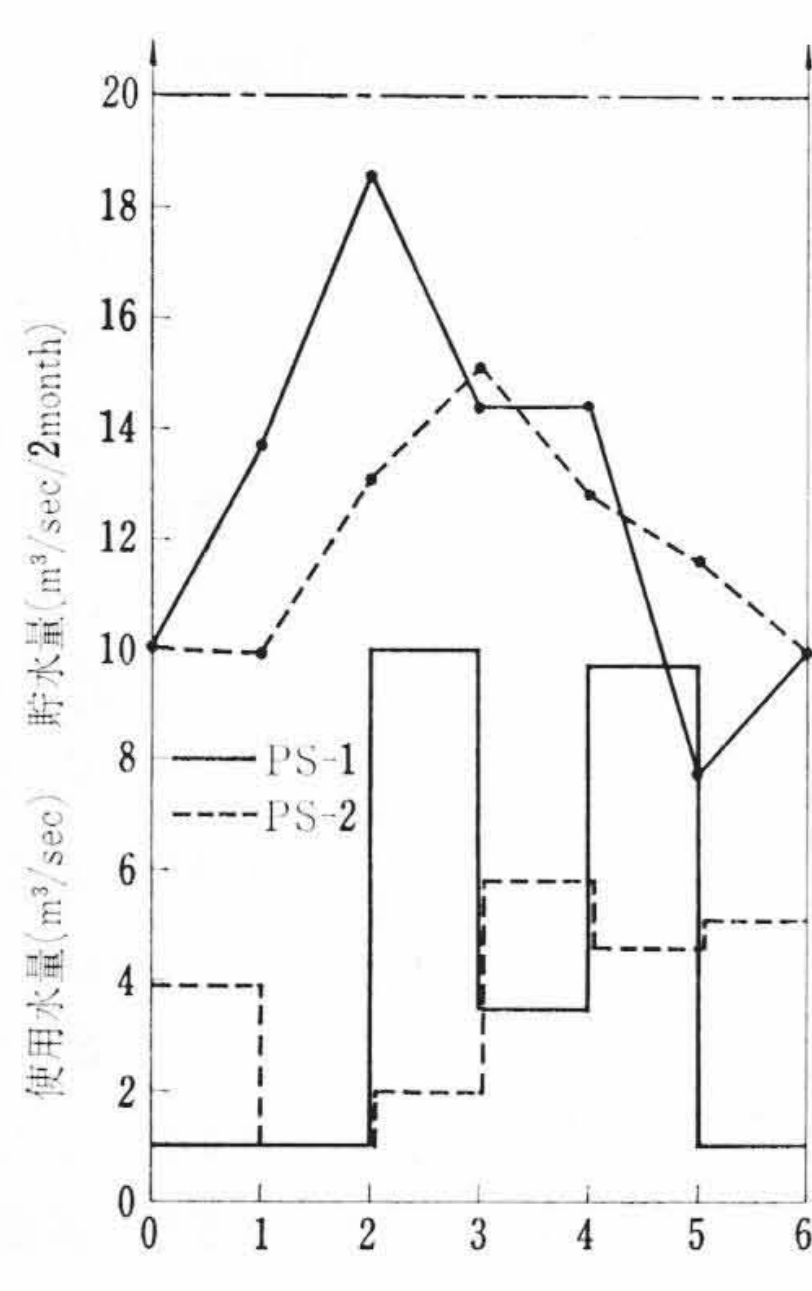
第7図 貯水量, 使用水量 case 1



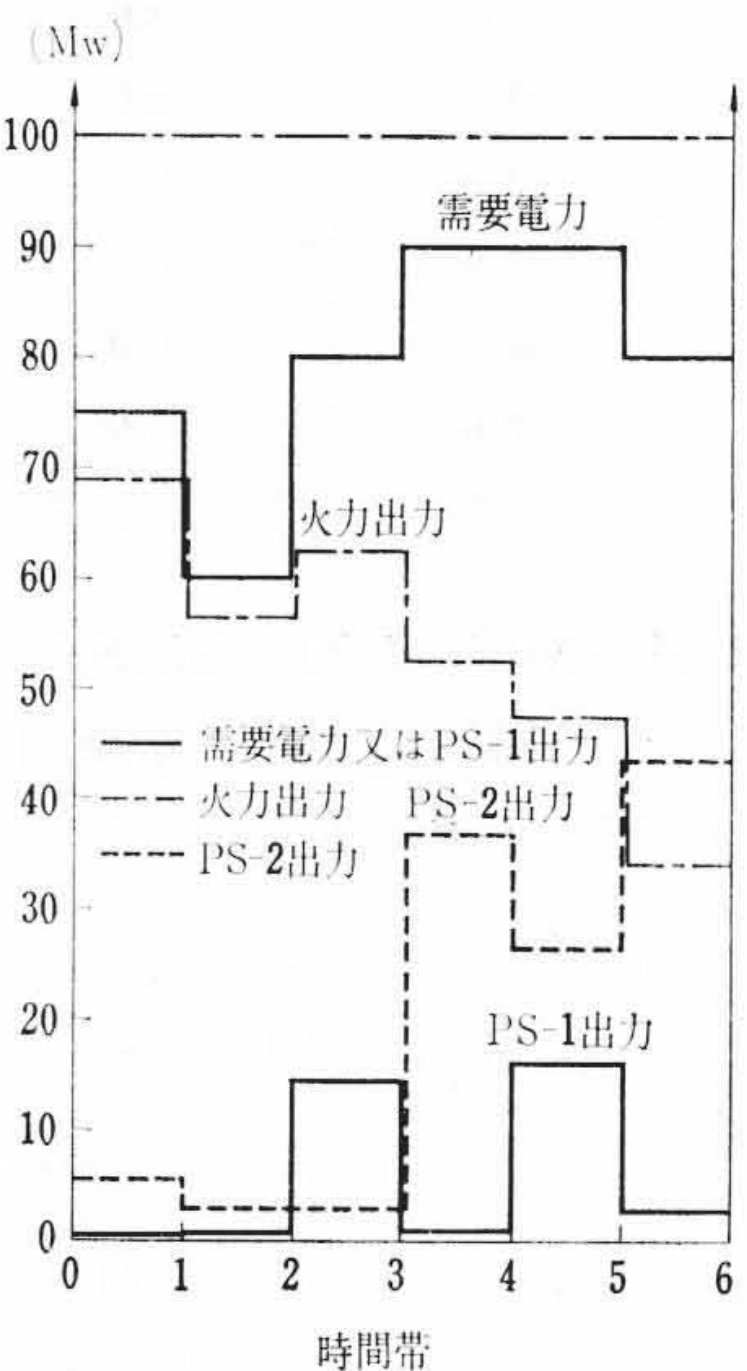
第8図 貯水量, 使用水量 case 2



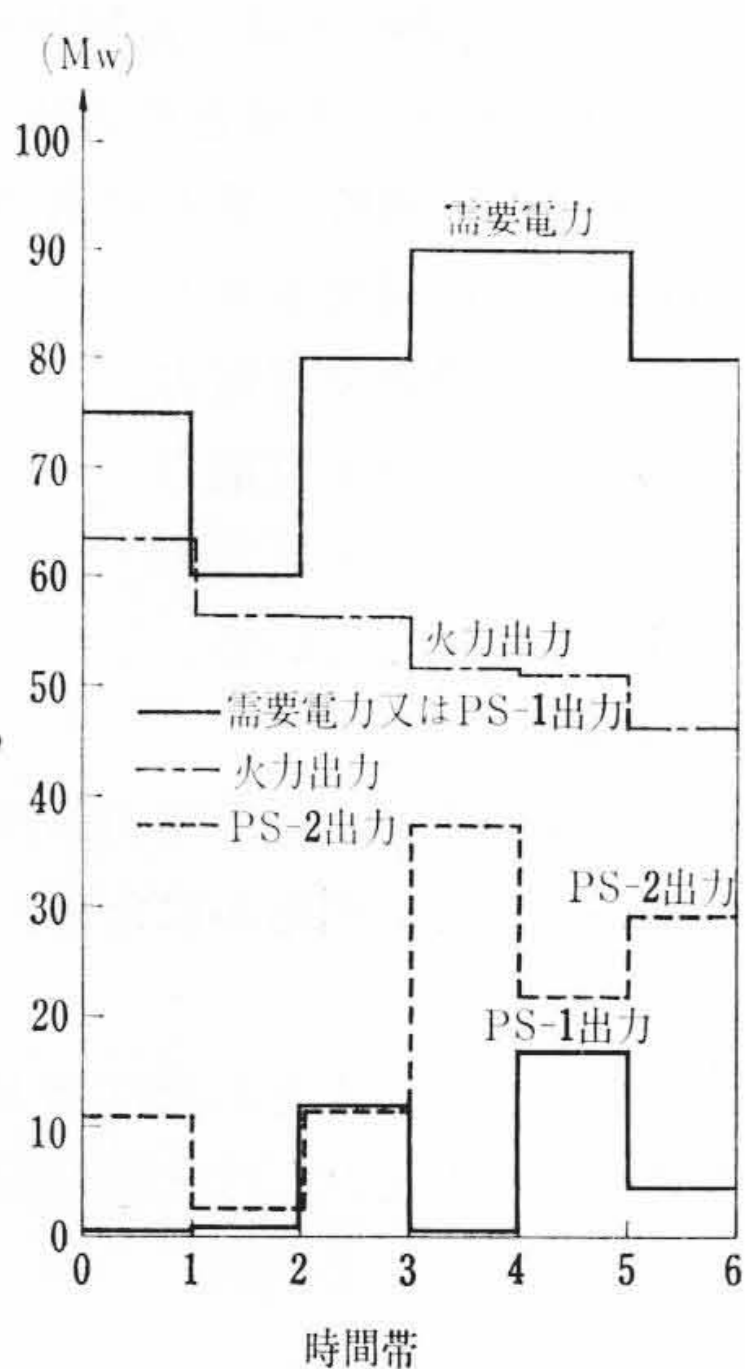
第9図 貯水量, 使用水量 case 3



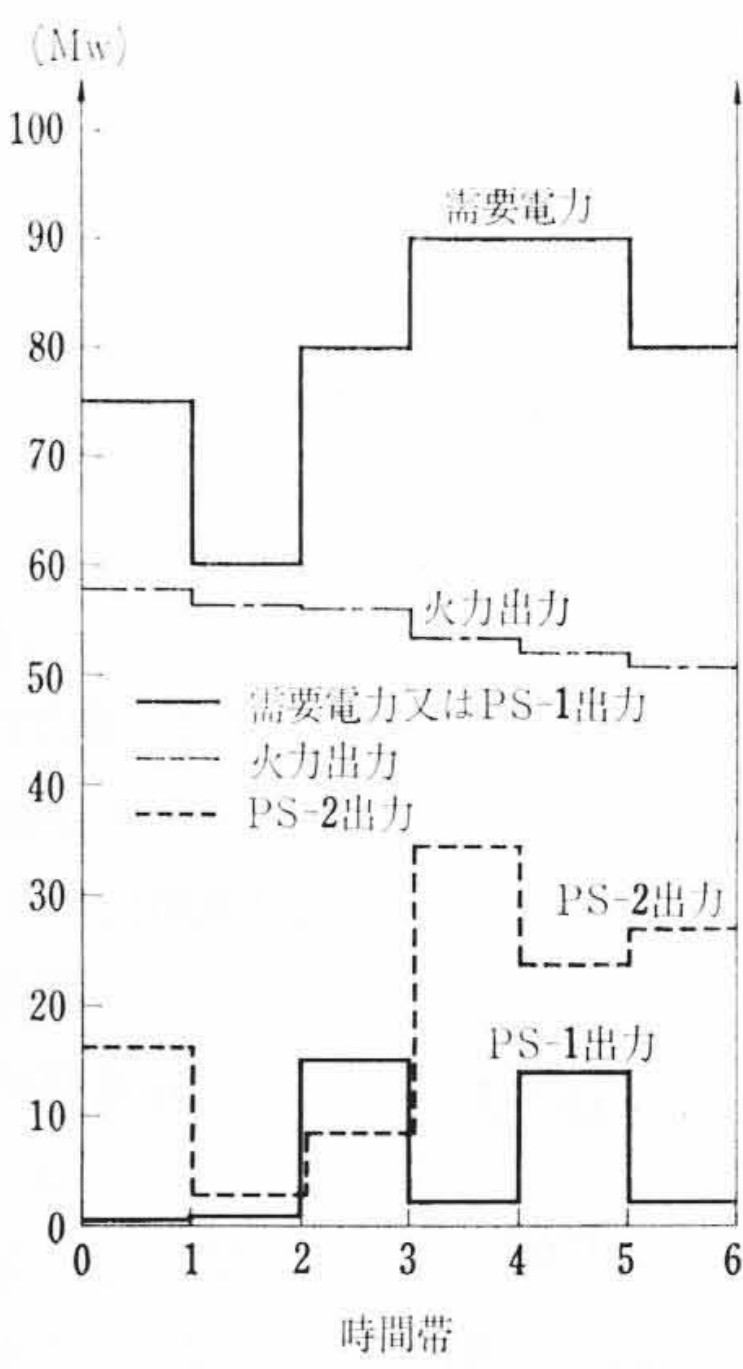
第10図 貯水量, 使用水量 case 4



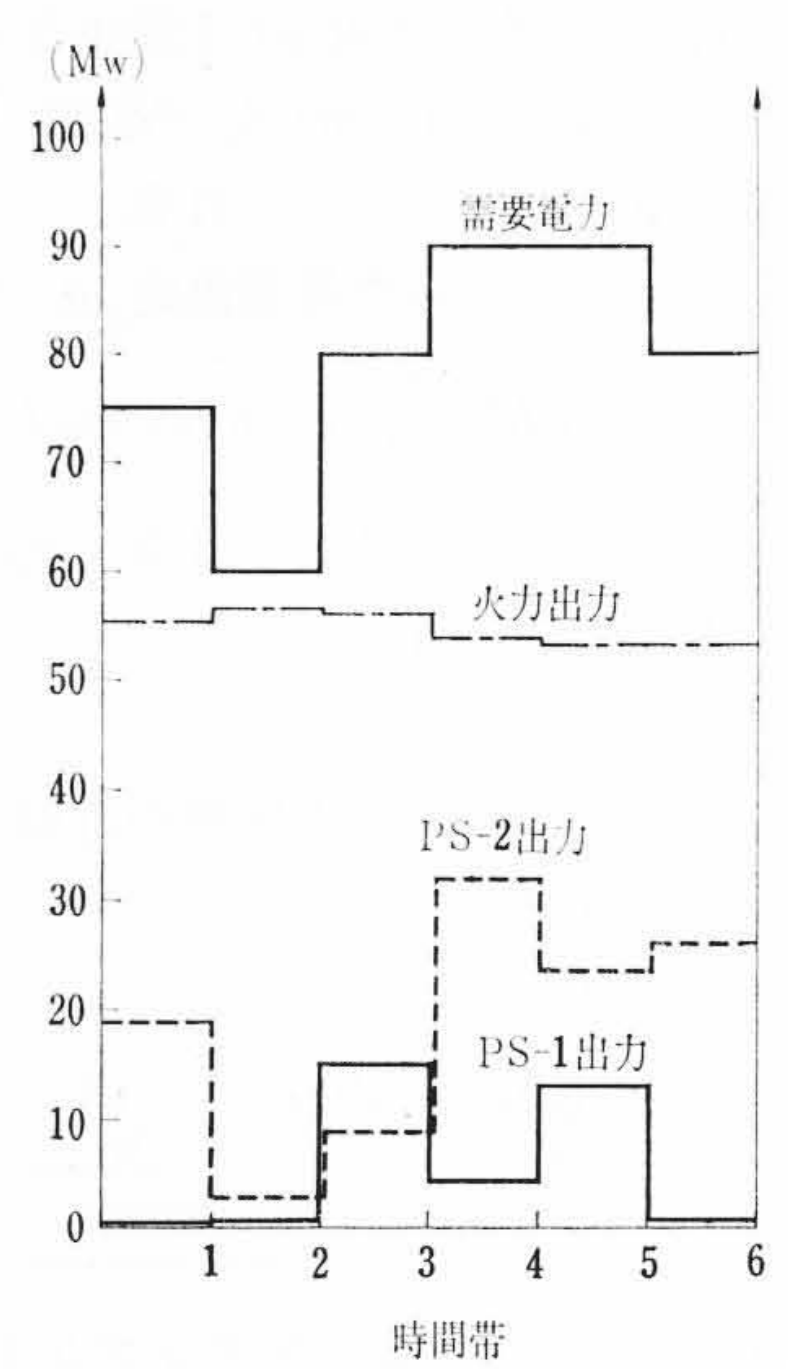
第11図 需給電力 case 1



第12図 需給電力 case 2



第13図 需給電力 case 3

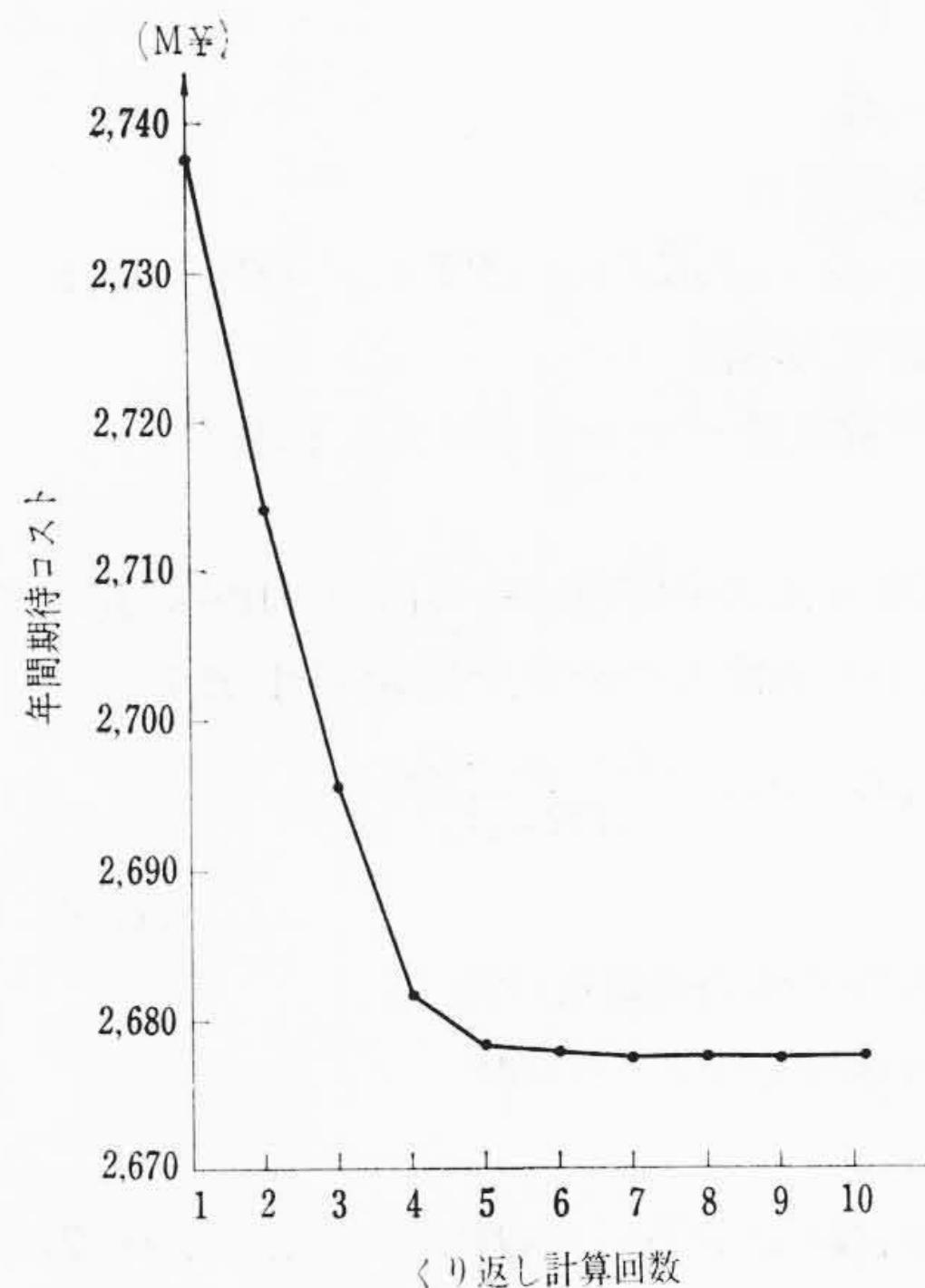


第14図 需給電力

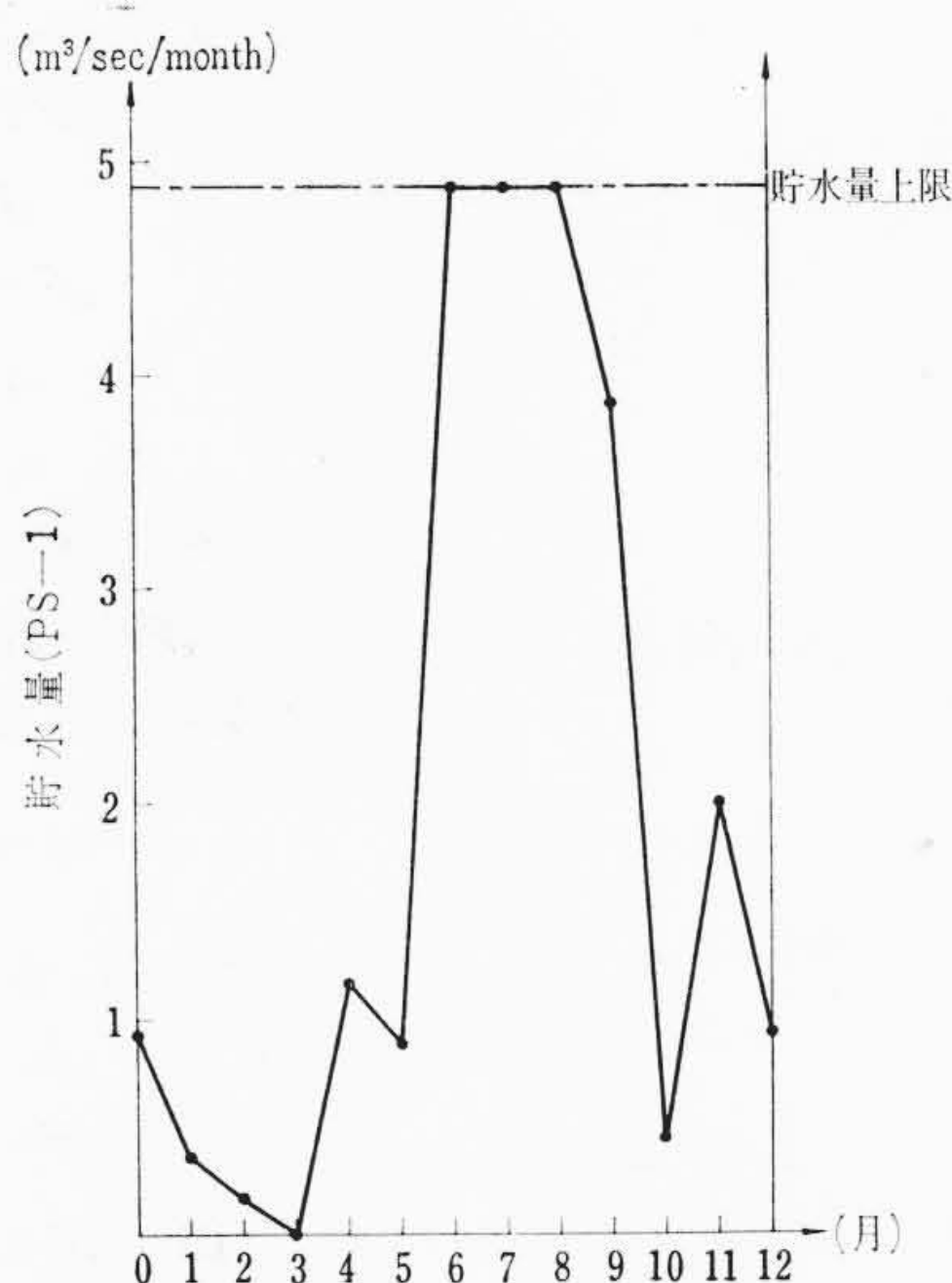
(3) 火力出力上下限

火力出力が上限に近いところでは流入流量が予測値よりも少なく需要電力が予測値よりも多く出たときは融通電力を受けなければならない。したがって最適決定は火力出力上限から少し遠く

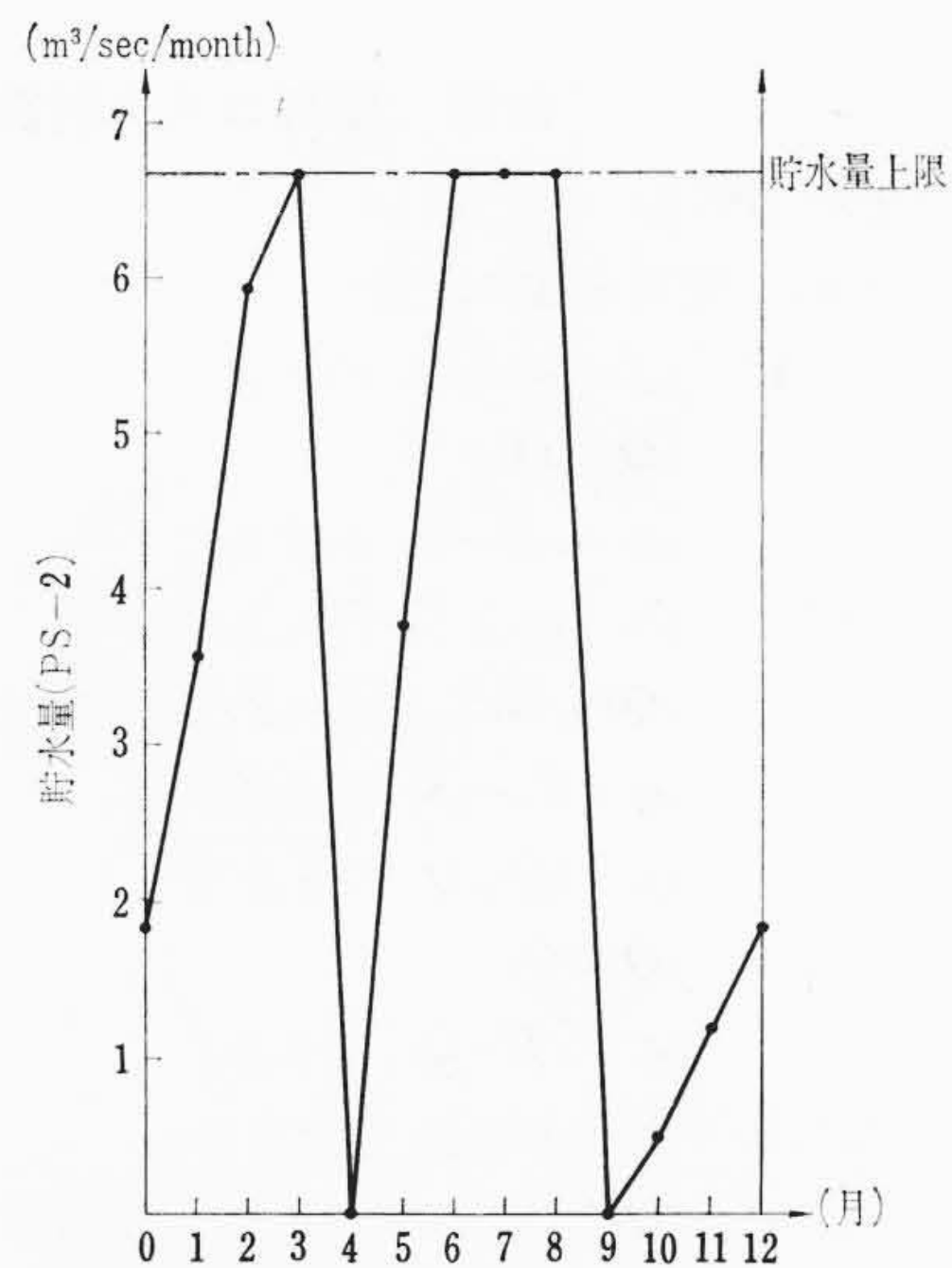
方向に修正される。火力出力が下限近くで運転しているところでは流入流量の予測値よりも多く出ても火力出力を減らすことができず火力は下限値に固定される。したがってこの時間帯に関しては期待コストは高くなる。しかしその分だけ水が節約され貯水量



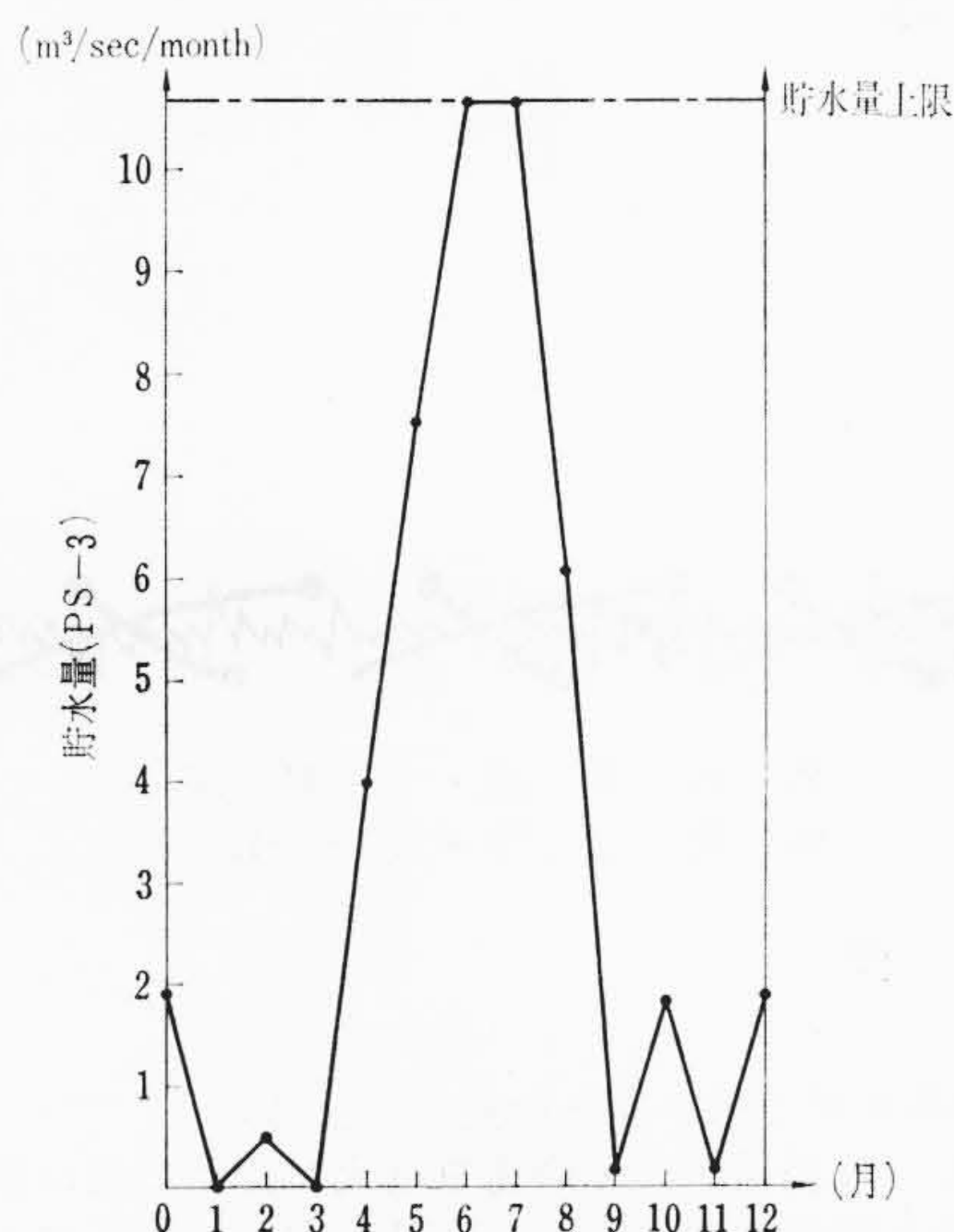
第15図 コスト収束曲線



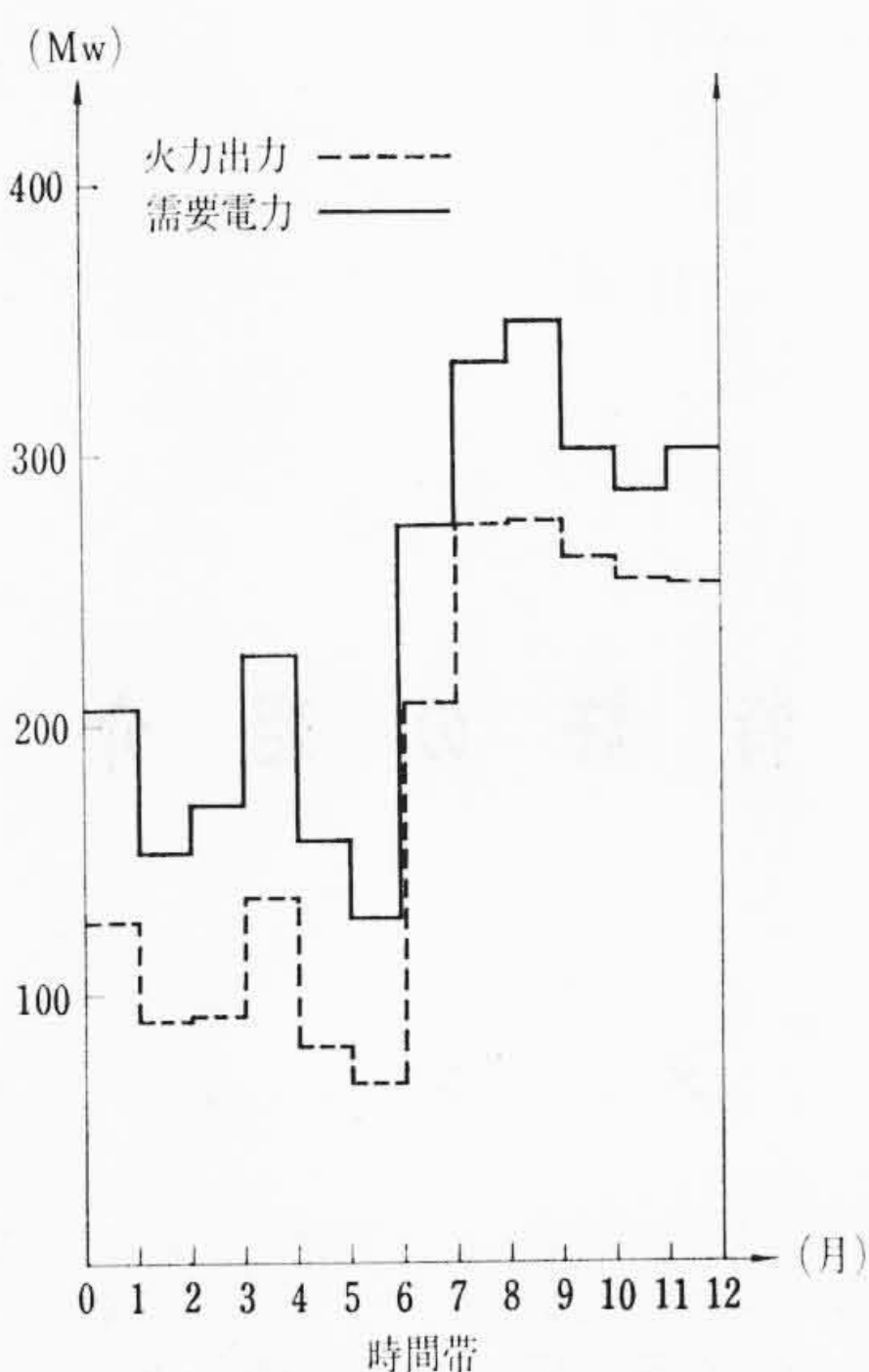
第16図 貯水量 (PS-1)



第17図 貯水量 (PS-2)



第18図 貯水量 (PS-3)



第19図 火力出力と需要電力

第19図は最適解の全火力出力と需要電力の平均値を示すものである。

8. 結 言

電力系統の長期運用方式に対して確率的な動的計画法を基本とする計算方式を開発し、電力系統の確率的運用の効果を明らかにし、また昭和38年度の四国電力系統の運用を導いた。

多機系統に対する動的計画法の数値計算は困難であるが、確率的な問題では貯水池相互間の相関係数を考慮しなければならないので計算は一段と困難になる。われわれは共分散を用いた期待コスト計算方式と平面近似法の収束計算法でこの点を解決することができた。電力系統の確率的運用は予想がずれた場合に受ける損益を勘案した運用で、通常安全度を見込んだ運用である。われわれは各種の

計算方式と各種のモデル系統について数値計算を行ない、電力系統の確率的運用の効果を具体的に検討した。そしてこれは低水位運転でかつ融通電力を受けず、溢水、渇水をさける方向に最適解が修正されることを明らかにした。われわれはまたこの手法を用いて昭和38年度の四国電力系統の運用方針を導き、本計算方式の実用性を示した。

しかしこの手法もまだ揚水条件、接続水系、火力発電所の最適な定期点検時期を発見する問題には適用できない。これらに関しても各位のご指導を得て解決に努力したいと考える。

本研究は四国電力株式会社とのELD協同研究の一環として行なったものである。本研究の機会を与えられ種々ご指導いただいた同社の工務部平井次長、中央給電指令所今村所長はじめ給電課桑村副長、児玉技師、また本研究に対しご激励をいただいた日立製作所 落部長、小林部長、静岡課長はじめ関係各位に心からお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 川本・河竹：昭38東支大会 209
- (2) 系統運用委員会：電力中研技術研究所報告（電力・61044）
- (3) J. D. C. Little：JORA 3, No. 2 (1955)
- (4) 深尾・山崎：電学誌 79, 158 (昭34)
- (5) 三木：電学誌 80, 1807, 1816 (昭35)
- (6) R. Bellman：Dynamic Programming (Princeton Press) (1959)

が増大するのでそれ以後の時間帯にとっては利益となり、両者が相殺して最適決定への影響は少ない。貯水量が満水に近いところで運転しているときは節約された水が溢水として捨てられるので期待コストは高くなり、最適決定は火力が下限から遠のく方向に修正される。

(4) 使用水量上下限

使用水量が上限近くで運転されているところでは流入流量が予測値よりも多くても水力出力が押えられて火力出力を減らすことができない。したがってこの時間帯で期待コストは高くなるが貯水量が満水状態に近いところでは溢水損が発生するので最適決定は使用水量上限から遠のく方向に修正される。

7.3 実 系 統 計 算

以上のような手法を用いて昭和38年度の四国電力系統の運用方針を導いた。対象とした火力発電所は6機、水力発電所は4機である。火力発電所は能率優先順位と定期点検時期を与えて等価的に1機に集約しておく。水力発電所の貯水池流入流量の平均値と共分散は昭和17年～36年までの20年間の月別流入流量を基に算出したものを用いた。第15図は貯水量フラット運転から出発したときの年間の期待コスト収束曲線である。第16～18図はそれぞれ第1水力発電所、第2水力発電所、第3水力発電所の貯水量推移曲線である。

付録 期待コスト計算方式

(1) kF の計算

(a) 使用水量の決定

(i) $kJ_i - kq_i \geq \bar{Q}_i$ のとき

$$kQ_i = \bar{Q}_i$$

$$kq_i = kJ_i - \bar{Q}_i \text{ とする。}$$

ただし $kS_i + kq_i \geq \bar{S}_i$ のときは

$$kQW_i = kS_i + kq_i - \bar{S}_i \text{ だけ溢水させて}$$

$$kq_i = \bar{S}_i - kS_i \text{ とする。}$$

..... (付 1)

(ii) $kJ_i - kq_i \leq \bar{Q}_i$ のとき

$$kQ_i = \bar{Q}_i$$

$$kq_i = kJ_i - \bar{Q}_i \text{ とする。}$$

ただし $kS_i + kq_i \leq \bar{S}_i$ のときは

$$kQP = \bar{S}_i - kS_i - kq_i \text{ だけ責任放流量を}$$

$$\text{割らせ } kq_i = \bar{S}_i - kS_i \text{ とする。}$$

..... (付 2)

(iii) $\bar{Q}_i \leq kJ_i - kq_i \leq \bar{Q}_i$ のとき

$$kQ_i = kJ_i - kq_i$$

$$kq_i = kJ_i - kQ_i$$

..... (付 3)

(b) 火力出力の決定

$$kG = kPR - \sum_{i=1}^m (a_i + b_i kS_i) (kQ_i - Q_{0i}) \text{ (付 4)}$$

(i) $kG_i > k\bar{G}_i$

$$kPT = kG_i - k\bar{G}_i$$

kPT : 融通電力

$$kF = k\alpha_0 + k\alpha k\bar{G}_i + k\beta k\bar{G}_i^2 + k\gamma kPT + k\gamma' kQP \text{ (付 5)}$$

$k\gamma$: 融通電力単価

$k\gamma'$: 責任放流量ペナルティコスト係数

(ii) $kG \leq k\bar{G}$

制限条件の違反分を水力発電所にその出力の比率に応じて分担させる。すなわち各水力の決定変数 kq_i を修正し

$$kq_i = kq_i + (k\bar{G} - kG) \frac{kJ_i - kq_i - Q_{0i}}{kPR - kG}$$

とする。ただし

$kJ_i - kq_i < \bar{Q}_i$ なる水力発電所は除く。

$$kF = k\alpha_0 + k\alpha kG + k\beta kG^2 + k\gamma' kQP$$

..... (付 6)

(iii) $k\bar{G} \leq kG \leq k\bar{G}$

$$kF = k\alpha_0 + k\alpha kG + k\beta kG^2 + k\gamma' kQP \text{ (付 7)}$$

(2) $k_{+1}f$ の計算

$$k_{+1}f = \sum_{i=1}^m \frac{\partial k_{+1}f}{\partial k_{+1}S_i} \cdot k_{+1}S_i \text{ (付 8)}$$



特許の紹介



特許第315099号

外岡英徳・小沢照夫
岡野金平・大内田久

セグメント軸受

セグメント軸の曲率半径は従来の考えによれば油膜の厚さだけ軸の半径よりも大きくするものであった。実際には油膜の厚さは百分の何mmという小さい値であるから軸径と軸受径の間に精確に所要の差を持たせることは困難であり、結局摺合せによって製作されていた。

本発明はこのような従来の思想をまったく打破り、軸半径に比してはるかに大きな軸受曲率半径をとることを特徴とするものである。本発明によって規定された軸受曲率半径と軸半径の比は1.005~1.1の範囲である。

本発明によれば軸受圧力を大きくしてもその温度上昇は従来のものに比してはるかに小さく、また周速を増しても、それによる温度上昇の度合は従来のものに比してはるかに少ない。これらの関係を実測した結果によって示すと第1図及び第2図のようになる。同図

で K とあるのは軸受曲率半径と軸半径との比率である。

このように本発明によって軸受圧力や周速を増大しえた理由は摩擦係数が小さくなり、軸と軸受の間を流れる油量が大きくなったことにある。また本発明のように油膜厚さを大きくすると軸受面の圧力中心がセグメントの中心に接近し、たとえば $K=1.05$ ではその偏心は零となった。その結果セグメントの支持点を従来のようにセグメントの中心から偏心させる必要がなく、両者を合致させることによって可逆回転を可能ならしめた。

さらに軸受の曲率半径と軸半径との間に大きな裕度を許すところから軸および軸受面の仕上精度を従来のものに比べゆるやかにすることができる。さらにまた、本発明によれば軸受の温度上昇が低いことから潤滑油の温度上昇がおさえられ、油の劣化防止に役だつなどその効果はきわめて大きいものである。(高橋)

