

システムアプローチによる揚水発電開発 計画の経済的評価法[†]

酒 卷 恒 一*

1. はしがき

近時わが国のみならず諸外国においても、大容量火力、原子力発電の出現により揚水発電の必要性が増大し、多くの揚水発電所電所が建設されつつある。

揚水発電を含む水火力系統の設備計画は、火力単独系統の計画よりも多くの要素を評価しなければならない。またその運用も火力単独系統の場合より困難である。電力系統の設備計画では、長期間の建設期間（2～5年）を必要とするため、各種の計画を評価する時点において、比較的確定している要素は僅かであり、計画決定の時点では不確定要素である。これらのいくつかは電力系統そのものに関連した技術革新からも生ずるし、また社会の経済構造の変化のような外部変化にもよる。系統全体の問題を扱う以上考察すべき要素も莫大なものとなり、量的な決定をする前にその設備の必要性の有無すら明確でない状態に立ち至ることさえある。それ故揚水発電設備計画にあたっては、各要素間の因果関係、数量的な関係を認識した上で、多くの開発計画代替案の比較を簡便かつ要領よく行ない、適正な開発地点を選定することが望まれる。しかしながらこのような複雑なシステムで、有用か無用か判明しがたい各種の計画の中から合理的な計画を見出すことは困難な問題である。

このような複雑さを解きほぐし、不確定要因の性格を明確にし、重要な因子と多くの手段の結果との関係を把握して、より重要な要素を主体とした手段と結果の関係を明確にして、系統全体としての評価基準を設定することが必要である。従って、将来の電力設備計画問題をとり巻く環境の変化、すなわち将来の需要の動向、ベース供給設備の性能の向上、各種発電方式の構成比率の変化、燃料価格の将来の傾向等に照らして系統全体からみた揚水発電の適正開発量を考察する必要がある。そしてあらかじめ準備された各開発可能地点の中から開発規模、池容量、経済性に関する制限条件、建設時期等を選定するために、適正な系統要求を定めねばならない。

このためシステムアプローチの考え方並びに手順を応用した揚水発電を含む水火力発電設備計画の経済的評価方式を開発した。この方式では、系統運用上の条件を制約条件にとり、長期の系統経費を最小にする quadratic programming (Q.P.) 問題を構成するモデルを作り、それをもと

[†] 1966年11月10日 秋季研究発表会講演

* 元 電気試験所 (現 日本電気株式会社)

に多くの要因のうちから重要な若干を選択し、統合する。次いでより少数の将来の状態を選択、考察し、それにより個別的揚水発電開発地点の計画を評価する系統評価基準を定めるものである。

ここに応用したシステムアプローチとは、文献 [2] に述べてあるようにシステム中心のアプローチすなわち個々のエレメントを問題とするとしても、これをエレメント自体を単位として考えず、常にシステム全体における位置づけをし、システム全体の働きに照らしてエレメントのあり方を評価する方法のことである。そしてシステムアプローチを具体的に進めるためには、通常デジジョン・メーカーの論理的な要素を一つ一つ考察する。そしてデジジョン・メーカーの論理構造を考える場合には、これを (1) 手段の範囲 (2) 環境 (3) 手段の結果 (4) 結果の価値 (5) 価値の尺度に分けて考えている。

電源系統計画解析の方法には、デジタル計算機を用いたシミュレーション手法(文献 [3] [4])、があるが多大の計算機所要時間を必要とする。このシステムアプローチのモデルでは、大胆な推定や簡略な関係式を用いて多くの要素の評価を行うようになっているので、次段の決定にはシミュレーション手法を用いた考察を行うことが望ましい。

以下、2章では揚水発電の開発計画の特質について説明し、3章でこの評価方式で使用する数学的モデルとその解法を説明する。4章ではこのモデルを利用して、揚水発電設備計画における重要な要素間の関係を若干例示する。5章では、多くの要素を整理統合し、系統全体からみた揚水発電計画の評価基準を作成する方法について述べる。

2. 開発計画で考慮すべき揚水発電の特徴

発電方式には KW 当たりの建設費が高く燃料費の比較的安い高能率火力発電。原子力発電、一般水力発電等があり、一方ピーク供給用または予備力として利用される KW 当たりの建設費が安く燃料費の割高な揚水発電、ガスタービン発電等がある。

揚水発電所は、上部貯水池の水を使用してピーク負荷時に電力供給を行ない、オフピーク時にベース用火力または原子力発電の電力を使って揚水し、上部貯水池に水を返還するのが普通である。そして揚水発電は附録 1 に記した経済的特質をもっている。(詳細は文献 [1] 参照)

揚水発電所の型式には、従来の水力発電設備と組合せる混合揚水式と組合せのない純揚水式とがある。混合式は上部貯水池に自流がある点が、純揚水式と異なる。従ってピーク容量が増し、揚水量が少なくてすむ。下部貯水池に累積した水量は、従来の水力発電所を通して放流し、総合効率を増加することができる。

揚水発電の価値は、系統によってかなり相違するもので、系統の大きさ、各種発電設備のタイプ、負荷のタイプ、日間、週間、季節のピークなどが、価値を決定する際に重要な役割を演ずるものである。一般にピーク電力が高く、オフピーク時の余剰電力が安い系統(例えばベース用火力燃料費が安い系統)では、揚水発電も一般に正当化される。

また揚水発電は耐用年数が長く、長期に渡って系統の発電コスト並びにピーク供給能力に影響を及ぼす。よって将来の需要の量的質的变化、各種発電方式の技術進歩、電力企業をとりまく環境の変化があっても、揚水発電の必要性、有効性を失わないように配慮する必要がある。

揚水発電は貯水池の有効容量も、最終段の最大出力にしても自然の地形、地質による制限内において、かなり自由に色々の設計ができる特徴をもっている。

3. 数学的モデルと解法

3-1 前提条件と記号

定式化の基本的な考え方を説明するため、単純な系統を想定し、ここでは次のような前提条件を設けた。

第1表 火力発電の分類

級 別	熱効率(発電端)	運転される負荷率領域
新設A級火力	39% 以上	A将来はA, B
既設B //	39%~35%	A, B, C 将来B, C
// C //	35%~25%	C

(1) 火力は第1表のように熱効率により分類し(系統によって適切に増減する方がよい)、ベース用以外のこれらの設備の負荷分担は総設備量に対する既設割合の縮小に伴って、負荷率の小さい領域へと移行するものとする。

(2) 水力設備は池の大きさと水力の運用方式とを考慮して、ベース用供給力(平日17時間以上継続する出力)とピーク用供給力とに分離する。

(3) 各水火力設備の負荷率は、系統によって種々に分類できるが、ここではA, B, C, D, E, 領域の5段階に分類し、A領域は平日平担運転する火力分、B領域は深夜出力低下の運転をする火力分、C領域はその他の火力分と、開発される一般水力と揚水発電分、D領域は既設水力、ピーク供給力、E領域は既設並びに新設水力のベース供給力と新設ベース火力分とする。

(4) 揚水式発電は一般水力発電と協調して、年間火力燃料費を最小にするように運用するものとして第1図C領域の上部発電に割当てられるものとする。

(5) 一般水力は調整式を主体としていくつかの開発地点があるものとする。

(6) 揚水発電には自流給水が可能な地点とする。

(7) 需要が毎年増加し、毎年各型式の発電設備の増加を要求する場合には、毎年の最適計画の集りが、考察期間の最適計画となる。従って建設費の毎年の均等化経費に毎年の運転経費を加えたものを最小にする計画を最適計画とする。一定の系統信頼度基準のもとでは、供給力構造によって、特に水火力構成比率によって系統が必要とする供給予備率の割合が多少変化するが、ここでは一定の供給予備率として取扱う。

(8) 他社系統よりの受電，融通電力，旧火力（近い将来に廃止するもの）の発電電力等は問題を簡略化するために本モデルでは除外する。

(9) 原子力発電は，高能率火力発電と発電コスト面において競合できる状態にあるが1985年頃まではベース用火力の一部と置き代り得るのみで，本質的な揚水発電開発計画への影響は殆んどないので除外することにする。

需要電力量はまず需要端で想定し，需給バランスを検討する際に，電力損失率を考慮して，通常送電端に換算される。従ってこの問題では送電端において需給バランスをとるものとし，送電端需要に一致する送電端供給力を所与のものとしてモデルを構成した。それ故一般の電源計画では需給バランスを制約条件とするが，ここでは(7)の予備力の仮定と(8)の前提条件を考慮して，考察期間中の送電端供給力を所与のものと考え，送電端の総合設備利用率を一定の値に指定した。ここで設備利用率とは一年間の発電平均電力を設備可能出力で除したものである。以下ここでは説明の便宜上設備利用率を単に利用率と略称する。

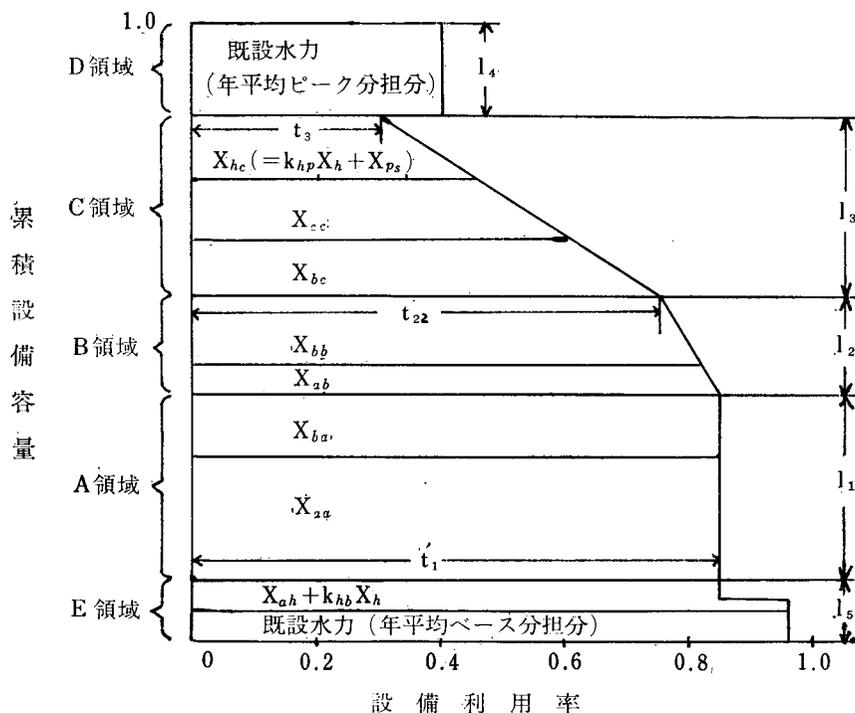
それ故ここで対象とする問題は，(1)～(4)に仮定した運用条件と送電端総合利用率一定とを制約条件として，(7)に定義した最適計画となるような揚水発電を含む水火力開発計画を求める問題となる。必要な経費計算には発電端発電電力量が便利であるので，総設備容量を1.0で表わした場合に対して，発電端基準の各発電領域の発電電力量が算出でき，かつ制約条件の表現が容易になるよう諸要素を選定した。

水火力出力，年間利用率の記号は第1図に明示した。この図で縦軸は累積設備容量で設備総量を1.0として表現し，E，A，B，C，D領域の順に各領域の発電に必要な設備出力が積み上げである。横軸は利用率で，図の折れ線は各領域の面積がその発電電力量に対応するように画かれている。既設水力の利用率は通常長期計画で一般に取扱われているように，実績記録を累年平均して求めた平水年の年間発電平均電力にもとづいて定める。考察基準年度（考察期間の前年）の火力の利用率は，水火力の構成比率により運用状況が年々変化し実績をそのまま使用できないため，最近年の実績を参考に，過去の運用経験から推定するか，または年間から選んだ代表的数日か数週間の運用例から平水年の平均的な年間発電平均電力を求めた後， t_1, t_2, t_3 を定めねばならない。これらのデータには，最近の系統を対象に行なったシミュレーションの計算結果が利用できれば理想的である。

またこの問題では送電端総合利用率一定と仮定するので，考察期間中の水火力の比率の変動に応じて，火力の経済運用を考慮の上，総合利用率が一定となるよう第1図の折れ線を修正する必要がある。第1図に示した $t_1 \sim t_5, t_1 \sim t_3$ の値の定め方の詳細については附録2で説明する。これとは別に文献[5]，[6]のように簡略計算を用いる方法も参考になるであろう。

火力の運用状況は年々変化するので，新設の設備出力も既設の設備出力も変数にとり，図示したように定義したがこれらの設備出力と発電領域は次の通りである。

x_{ab} 新設＝級火力設備出力（添付記号 a に対応），B領域供給（添付記号 b に対応）。



第1図 変数記号の説明図
(総設備容量をユニットにとる)

(x_{aa} , x_{ba} , x_{bb} , x_{bc} , x_{cc} 等も同様)

- x_{ah} 新設A級火力設備出力, E領域供給
 x_h 新設一般水力 // , C //
 x_{ps} 新設揚水発電 // , C //
 $x_{hc} = k_{hp}x_h + x_{ps}$ (k_{hp} は後述)

また定式化のために次のような記号を定めた。

- M_0 初期の総設備容量 (M_w)
 M_n n 年後の // (M_w)
 t_h 開発水力の期待年間設備利用率 (池容量の関数)
 $t_{hp} = t_h - 0.96 k_{hb}$ (0.96 はベース部分の利用率)
 k_{hb} 開発水力の平日17時間継続する出力の年平均値を開発水力最大出力で割った値
 $k_{hp} = (1 - k_{hb})$
 t_{ps1} 全揚水発電所平均の期待年間設備利用率 (池容量の関数)
 t_{ps2} 揚水分発電の期待年間設備利用率
 k_{ar} 火力群の平均有効率 (送電端発電量に変換される熱量の割合)

H_a	A級火力の平均 heat rate (円/KWh)		
H_b	B級火力	"	"
H_c	C級火力 (下積部分)	"	"
H_{cup}	C級火力 (上積部分)	"	"
H_{ps}	揚水発電の火力換算	"	"
$F_a C_a L_a$	火力建設費の均等化経費 (円/KW)		
$F_{ps} C_{ps} L_{ps}$	揚水発電建設費	"	"
$F_h C_h L_h$	一般水力発電建設費	"	"
A_a, A_b, A_c	それぞれA, B, C領域の電力量		
k_1, k_2	設備利用率曲線により定まる定数		

F_a は火力の経費率, C_a は KW 当りの火力建設費 L_a は付属送電設備による加算率で, 一般水力, 揚水発電についても同様である。

3-2 数式モデルと解法

この方法は各種発電設備の運用条件を制約 (一次式の制約) にとり, 発電に要する総経費 (二次式で表示) を最小にすることを目的とする Q.P. 問題を作成するものである。第1図の問題について目的関数と制約条件を整理すると次のようになる。但し変数はすべて非負値をとるものとする。また揚水動力にはB領域の余剰電力を使用するものとする。

$$\text{目的関数 } C_{ri} + C_{rf} \quad (1)$$

$$\text{建設費の均等化経費の総和 } C_{ri} = F_a C_a L_a (x_{aa} + x_{ab} + x_{ah}) + F_{ps} C_{ps} L_{ps} x_{ps} + F_h C_h L_h x_h, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{年間燃料費 } C_{rf} = & 8760 [t_1 (H_a x_{aa} + H_b x_{ba}) + k_1 x_{ab}^2 (H_a - H_b) / 2 + (t_1 \\ & - k_1 x_{ab} / 2) x_{ab} H_a + \{A_b - (t_1 - k_1 x_{ab} / 2) x_{ab}\} H_b + (t_2 - k_2 x_{bc} / 2) x_{bc} H_b + \{t_2 \\ & - k_2 (x_{bc} + x_{cc}) / 2\} x_{cc} (H_c + H_{cup}) / 2 + t_{ps2} x_{ps} + t_1 x_{ah} H_a] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{制約条件 } x_{aa} + x_{ba} = l_1 \quad (4)$$

$$x_{ab} + x_{bb} = l_2 \quad (5)$$

$$x_{ba} + x_{bb} + x_{bc} = (l_1 + l_2) z \quad (6)$$

$$k_{hp} x_h + x_{ps} = x_{hc} \quad (7)$$

$$x_{cc} = l_3 z (z \equiv M_0 / M_n) \quad (8)$$

$$x_{bc} + x_{hc} = (l_3 + l_4) (1 - z) \quad (9)$$

$$x_{ah} + k_{hb} x_h = l_5 (1 - z) \quad (10)$$

$$t_{hp} x_h + t_{ps1} x_{ps} = k_{av} (t_3 + k_2 x_{hc} / 2) x_{hc} \quad (11)$$

$$x_{ba} \cdot x_{ab} = 0 \quad (12)$$

この問題は (12) 式の条件のため, Q.P. 問題として解くことができない。しかしながら (12) 式の条件を $x_{ab} = 0, x_{ba} > 0$ の場合と $x_{ba} = 0, x_{ab} > 0$ の場合の二つの場合に分けると次のような

二つの問題となる。

(A) $x_{ab}=0, x_{ba}>0$ の場合 (考察期間の前期)

$x_{aa}, x_{ab}, x_{ba}, x_{bb}, x_{cc}, x_h, x_{ps}$ を消去すると次の Q.P. 問題を作ることができる。

$$\text{目的関数 } (C_2x_{bc}^2 + C_3x_{hc}^2/\delta)/2 - P_2(x_{bc} - P_3x_{hc}/\delta) \quad (13)$$

$$\text{ここで } \delta \equiv k_{hp}t_{ps1} - t_{hp} \quad (14)$$

$$P_1 \equiv 8760 t_1(H_b - H_a) \quad (15)$$

$$C_2 \equiv 8760 k_2(H_c - H_b) \quad (16)$$

$$P_2 \equiv 8760 t_2(H_c - H_b) \quad (17)$$

$$C_3 \equiv k_{av}k_2(Q_1 - k_{hp}Q_2) \quad (18)$$

$$P_3 \equiv (t_{ps1}Q_1 - t_{hp}Q_2) + k_{av}t_3(k_{hp}Q_2 - Q_1) \quad (19)$$

$$Q_1 \equiv 8760(t_{hp}H_{cup}/k_{av} + 0.96 k_{ht}H_a) + F_a C_a L_a - k_{hp}P_1 - F_h C_h L_h \quad (20)$$

$$Q_2 \equiv 8760(t_{ps1}H_{cup}/k_{av} - t_{ps2}H_{ps}) + F_a C_a L_a - P_1 - F_{ps} C_{ps} L_{ps} \quad (21)$$

制約条件

$$x_{bc} + x_{hc} = (I_3 + I_4)(1 - z) \quad (22)$$

$$k_{av}k_{hp}k_2x_{hc} \leq z(t_{hp} - k_{av}k_{hp}t_3) \quad (23)$$

(この問題では $t_{hp} - k_{hp}t_{ps1} > 0$ の条件を満足する問題を取扱うので、この条件によって x_{ps} は非負値となる。)

この問題は Wolfe の方法などによって容易に解くことができ、そのときの解より $x_{aa}, x_{ab}, x_{ba}, x_{bb}, x_h, x_{ps}$ を求めることができる。しかしながら x_{aa} の解が、 $x_{aa} > I_1$ となり、(4) の制約条件に違反するときは次の場合として解を求めねばならない。

(B) $x_{ba}=0, x_{ab}>0$ の場合 (考察期間の後期)

この場合には (4) 式より $x_{aa} = I_1$ となるから、 $x_{ab}, x_{ah}, x_{bb}, x_{cc}, x_h, x_{ps}$ を消去すると、前と同様に (13), (22), (23) 式の Q.P. 問題を作ることができる。従ってこのときの解より $x_{ab}, x_{ah}, x_{bb}, x_h, x_{ps}$ を求めることができる。

何れの場合にも (6) 式の関係があるので、 z が小さくなり $(I_1 + I_2)z < (I_3 + I_4)(1 - z)$ となる時点まで考察する問題のときは、 $x_{bc} \leq (I_1 + I_2)z$ なる制約条件を (22), (23) 式の制約条件の他に附加して、Q.P. 問題を解かねばならない。また前述のように $x_{ps} \geq 0$ の条件のために (23) 式の制約条件のみを考慮し、 $x_h \geq 0$ の条件は無視してある。これは一般的な揚水発電開発計画問題では $t_{hp} - k_{hp}t_{ps1} > 0$ かつ $t_{ps1} - k_{av}t_3 < 0$ の条件を満足する問題を取扱うので、非負値の x_{hc} が求まる場合には常に x_h が非負値となるためである。

(A), (B) 何れの場合にも (23) 式の等号が成立しない場合の解は、解が満足すべき条件より

$$x_{hc} = \frac{\delta C_2(I_3 + I_4)(1 - z) - P_2\delta + P_3}{\delta C_2 + C_3} \quad (24)$$

となる。

また (7), (11) 式より

$$x_{ps} = x_{hc} \{k_{av} k_{hp} (t_3 + k_2 x_{hc} / 2) - t_{hp}\} / \delta \quad (25)$$

$$x_h = x_{hc} \{t_{ps1} - k_{av} (t_3 + k_2 x_{hc} / 2)\} / \delta \quad (26)$$

となる。

Q.P. 問題が成立するためには, (13) 式は凸関数でなければならない。従って $C_3/\delta, P_3/\delta$ は正值でなければならない。このような条件が満足されない時は, x_{hc} に関する系統総経費の増分特性から, 揚水発電の経済性を判断することができる。

4. 主要要素による系統評価基準の変化

すべてのパラメータは, (14) 式~(21) 式で表現した量 $P_1 \sim P_3, C_2, C_3, \delta$ 等に整理, 統合されて系統評価基準に影響する。揚水発電と一般水力発電の開発地点の設計が関係するのは C_3, P_3, δ である。そして C_3, P_3 は k_2, t_3 によって需要の形態と関係している。以下建設費の均等化経費, 期待年間設備利用率, 各種発電設備の燃料費等がどのように系統評価基準に影響するかを例題によって説明する。

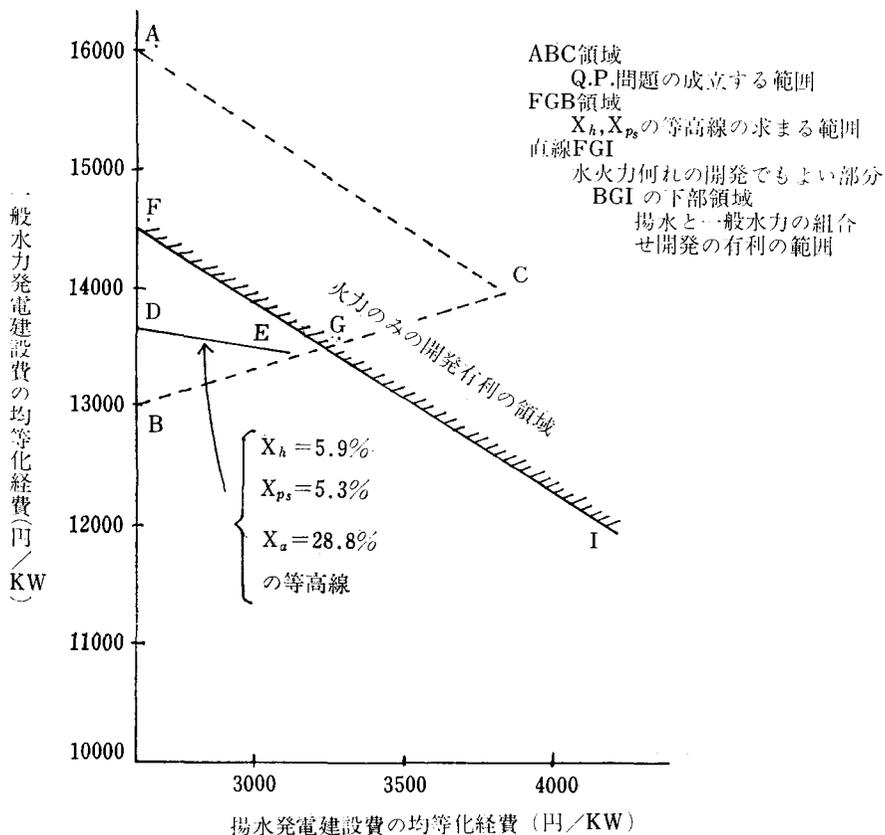
例題 (1)

$M_0/M_n=0.6$ の時点について次のような諸元を用いて火力, 揚水発電, 一般水力等の建設費の均等化経費と適正開発割合の関係を調査した。

$$t_{hp}=0.4, \quad t_{ps1}=0.1, \quad t_{ps2}=0.08, \quad t_1=0.88, \quad t_2=0.75, \quad t_3=0.262, \quad k_2=1.575, \\ H_a=1.565, \quad H_b=1.627, \quad H_c=1.771, \quad H_{cup}=1.912, \quad H_{ps}=2.503, \quad F_a C_u L_u=4000 \\ M_0/M_n=0.6$$

第2図はこの場合の適正開発量の様相を示したものである。図のABC領域はQ.P.問題が成立する領域である。FGB領域内は, Q.P.問題の解としての揚水発電, 一般水力発電の開発量が正值となる。そして直線DEは等高線の一例を示したもので, この線上では揚水発電(x_{ps}) 5.3%, 一般水力発電(x_h) 5.9%, 火力 28.8% の開発が最適になる。直線FGIは(24)式の分子が零になる部分で, これより上では目的関数の増分特性から火力のみの開発が有利となる。またBGIより下の部分は, この条件に適合する開発地点が充分ある場合には, 揚水発電と一般水力発電とを組合せた開発のみが有利である。この例題から判るように, 一般に水火力並びに揚水発電の建設費によって次の3つの状態に分類される。

- (a) 揚水発電と水火力の混合開発が経済的な領域 (Q.P.問題で解ける)
- (b) 火力開発のみ有利な領域 (系統総経費の増分特性より判定)
- (c) 揚水発電と一般水力発電の組合せ開発のみが有利な領域 (系統総経費の増分特性より判定), この領域では実際には開発地点の稀少性, 需要伸長のテンポと工事期間, 工事資



第2図 揚水発電，一般水力発電建設費の限界均等化経費
(増分設備要求40%の時点で，水力発電建設費の)
均等化経費4,000(円/KW) の場合

金の制約等を考慮して計画を定めねばならない。

例題 (2)

開発地点の建設費が設備利用率の関数として表現される場合がある。このような時は系統評価基準は適正な設備利用率と開発量で与えられることになる。それ故ここでは建設費の均等化経費が次式のように設備利用率の一次式で表現される場合について，揚水発電並びに一般水力の設備利用率と $x_{hc}(=x_{ps}+k_{hp}x_h)$ との関係を調査した。時点は $M_0/M_n=0.6$ となる場合を選定した。

$$F_h C_h L_h = 2800 + 20,000 \{k_{hp} t_{hp} + 0.96 k_{hp}\} \text{ (円/KW)} \quad (24)$$

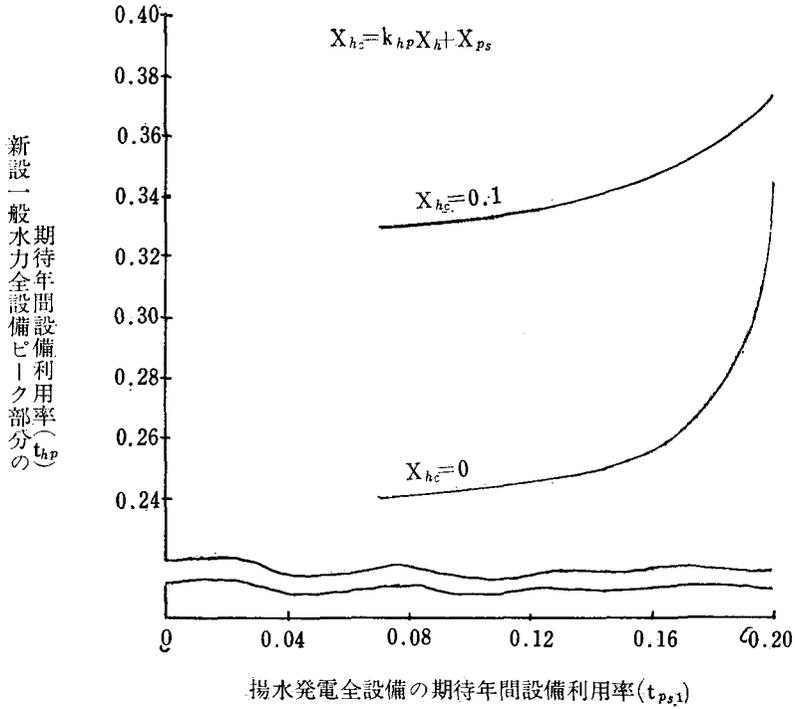
$$F_{ps} C_{ps} t_{ps} = 2000 + 7,000 t_{ps1} \text{ (円/KW)} \quad (25)$$

このときの主な諸元は次の通りである。

$$t_{ps2} = 0.8 t_{ps1}, \quad t_3 = 0.262, \quad k_2 = 1.575, \quad H_a = 1.500, \quad H_b = 1.570, \quad H_c = 1.705,$$

$$H_{cup} = 1.950, \quad H_{ps} = 2.503$$

第3図は x_{hc} の等高線が10%と0%になる場合の t_{hp} (=一般水力のピーク供給力に対する



第3図 揚水発電と一般水力の期待年間設備利用率の影響
($M_o/M_n=0.6$ の時点)

期待年間設備利用率)と t_{ps1} (=全揚水発電所平均の期待年間設備利用率) の関係を示したものである。図示のように $t_{ps1}=0.2$ のときは x_{hc} が 0.1~0 の範囲内になる t_{hp} の範囲が狭くなっているのが注目される。このような特性は、ピーク電力とピーク電力量をバランスさせるための必要条件並びに揚水発電と一般水力の開発のメリットすなわち Q_1, Q_2 (20, 21 式) の特性とによって定まるものである。

例題 (3)

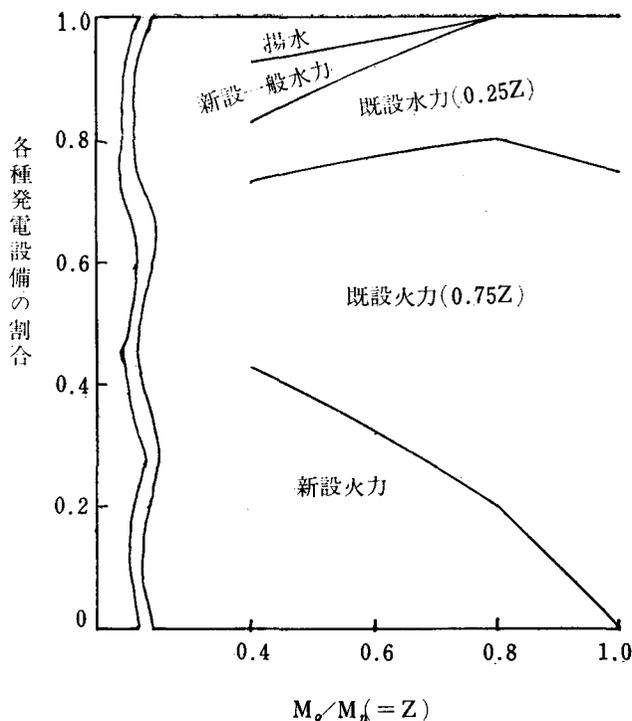
需要の増加につれて総設備量要求 (M_n) が増すが、 M_n の増加と揚水開発量との関係を例示するために、 M_n の値を $M_0 \sim 2.5 M_0$ まで変化させた場合を計算した。この問題の諸元は次の通りである。

$t_{hp}=0.4, t_{ps1}=0.1, t_{ps2}=0.08$

$t_3(M_0 \text{ の場合})=0.3125, k_2(M_0 \text{ の場合})=1.750, F_h C_h L_h=13,264.7, F_{ps} C_{ps} L_{ps}=3,000$

その他例題 (2) と同様、

この場合の計算結果が第4図に示してある。 $M_n=2.5 M_0$ の時点の所要設備量を 25,000 MW とすれば、揚水開発は 1,740 MW、一般水力開発 2,510 MW が系統としての目標値になる。



第4図 各種発電設備割合と M_0/M_n の関係
(M_n =n年後の総設備容量)

例題 (4)

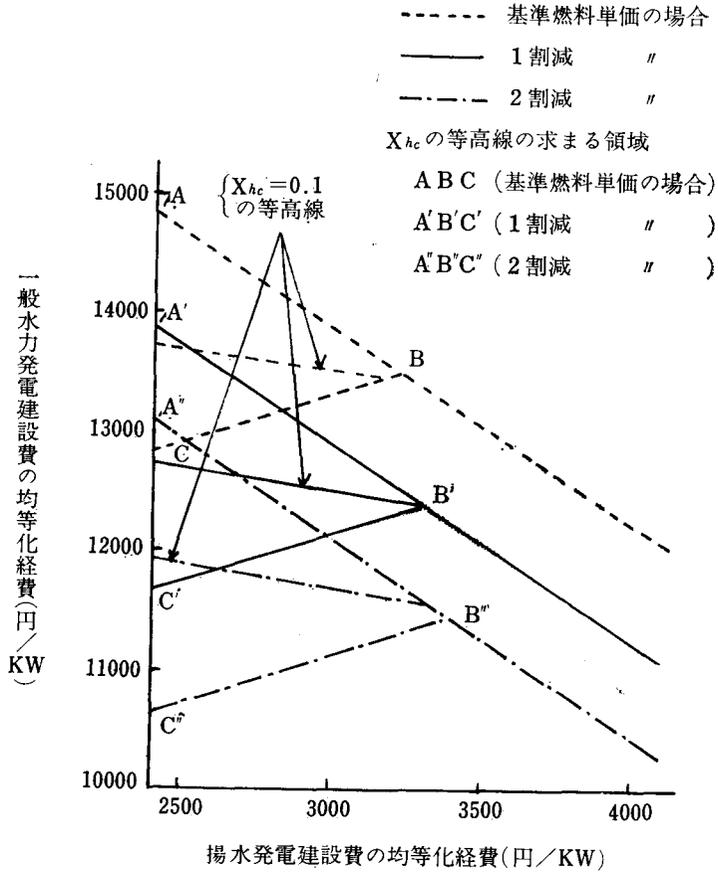
例題(1)の諸元を用いて燃料単価が一割減と二割減の場合について検討した。第5図は $M_0/M_n=0.6$ の時点に対してこのケースの結果を示したものである。この図によれば、燃料単価の将来の動向が、適正開発量と建設費の系統基準との関係にかなり鋭敏に影響しており、燃料価格が低下する場合には、一般水力の建設費基準をかなり安価にしない限り揚水の有効性が失なわれる。

例題 (5)

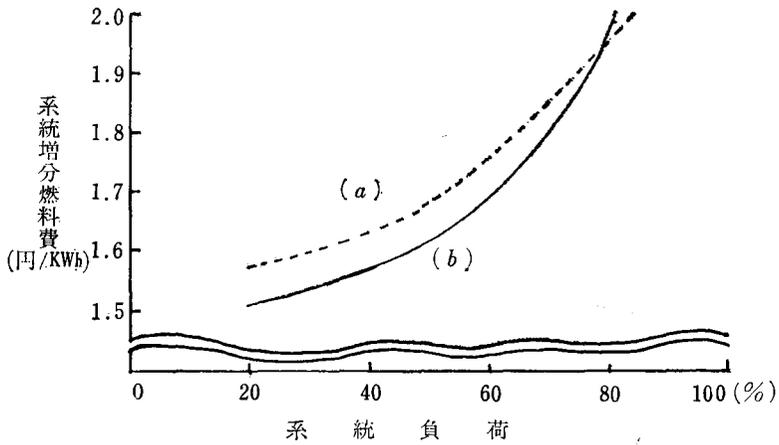
第6図(a),(b)曲線のように系統増分燃料費対系統負荷特性を想定した場合について両者の差を検討した。第7図は $M_0/M_n=0.6$ の時点における結果を示したもので、燃料単価の変更と同様、揚水並びに一般水力の適正開発量と建設費の系統基準との関係は大きく変動する。

5. 個別揚水発電開発計画選定のための系統評価基準作成法

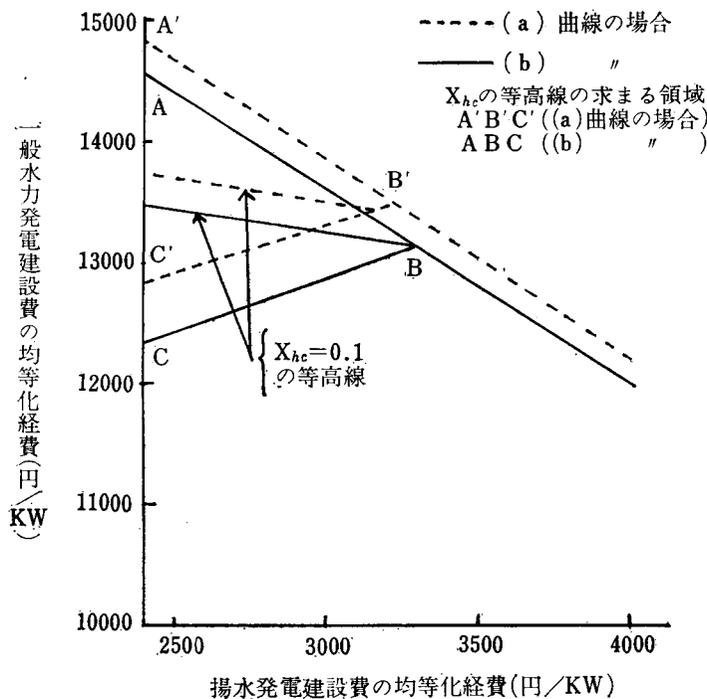
電源計画は最終的には各種の発電設備を最適に組合せて開発することであるが、その組合せを作成するためには先ずその系統が将来要求する各発電設備型式別の適正な開発割合を調査することが必要である。そして水力発電の開発においては、その系統に準備された各開発地点別の各



第5図 燃料単位の影響



第6図 系統増分燃料費対系統負荷特性曲線



第7図 系統増分燃料費対系統負荷特性の影響

種計画案，すなわち電源計画のための素材をこの基準に照らして評価し，系統が要求する条件，すなわち KW 当たりの建設費，開発規模，年間発生電力量等の条件が適合するものより，より少数の具体的計画を将来の各時点に対して選定することである。

このような選定を行なうためには，多くの要因の影響を列挙するだけでなく，これらを整理統合し，重要な若干の問題に集約して解を提供しなければならない．系統全体としての評価基準を定める方法には，不確実性の下での決定理論を応用したいろいろな手順が考えられるであろうが，ここではその一例として次のような手順を提案する．

1. 揚水発電や調整式水力発電等では，各開発地点の素材の情報を念頭において次の要素の検討範囲を選定する．すなわち平年の期待年間設備利用率 (t_{ps1} , t_{ps2} , t_h , k_{hp} 等)，揚水効率を考慮した火力換算 heat rate (H_{ps}) 等の検討範囲を前提条件として選定する．

2. 上記検討範囲に対して次の環境条件の影響を考察し反映させる．

- (1) 将来の需要の動向，負荷曲線の様相．(t_3 , k_2 等)
- (2) ベース供給力の特性とその技術的進歩．($F_a C_a L_a$, H_a 等)
- (3) 系統増分燃料費対系統負荷の特性の推移，燃料価格の将来の動向．

(H_a , H_b , H_c , H_{cup} , H_{ps} 等)

- (4) 各種発電設備の運用．($t_1 \sim t_3$, $l_1 \sim l_3$, k_{av})

3. 実現の可能性の強いいくつかの将来の状態に対して、モデル計算に必要な諸定数の組を、各時点毎に何組か用意する。これらを $C_2, P_2, Q_1 + F_h C_h L_h (= 8760 t_{hp} (H_{cup}/k_{av} + 0.96 k_{hb} H_a) + F_a C_a L_a - k_{hp} P_1)$, $Q_2 + F_{ps} C_{ps} L_{ps} (= 8760 (t_{ps1} H_{cup}/k_{av} - t_{ps2} H_{ps}) + F_a C_a L_a - P_1)$ ((20), (21) 式参照) に統合し、これらの組の将来の実現の可能性を確率値として与える。

4. $(Q_1 + F_h C_h L_h)$, $(Q_2 + F_{ps} C_{ps} L_{ps})$ の期待値を参考に素材の情報を考慮して $F_h C_h L_h, F_{ps} C_{ps} L_{ps}$ の選定基準を 2, 3 選定する。

5. 毎年の期待経費を目的関数とする若干の Q.P. 問題を作り、これらの解から系統評価基準を定める。

(例題)

Q.P. 問題の諸定数が第 2 表のように推定される 3 状態について、系統の評価基準を求めた。実際には長期の時点について考察すべきであるが、ここでは増分設備要求が総設備要求の 40% に相当する時点に対してのみ計算した。第 3 表はこの場合の系統評価基準を示したものである。

第 2 表 主な定数の期待値

定数	No. 1	No. 2	No. 3
t_{ps1}	0.16	0.16	0.16
t_{ps2}	0.128	0.128	0.128
t_{hp}	0.4	0.45	0.45
k_{hp}	0.8	0.8	0.8
C_2 の期待値	1594.5	1594.5	1793.8
P_2 //	756.9	756.9	854.1
$Q_1 + F_h C_h L_h$ //	12106.3	12739.5	13832.0
$Q_2 + F_{ps} C_{ps} L_{ps}$ //	381.6	3810.6	3786.9

第 3 表

項目	No. 1	No. 2	No. 3
$F_h C_h L_h$ (円/KW)	12250	12750	13500
$F_{ps} C_{ps} L_{ps}$ //	2800~3000	2800~3000	2800~3000
x_{ps} (%)	4.9~3.4	5.3~4.3	6.5~4.3
x_h //	2.6~1.4	2.3~1.2	3.3~1.6
x_a //	32.5~35.2	32.4~35.5	30.2~34.1

この例では、系統に総合した建設単価の均等化経費と設備利用率の選定基準が、揚水発電と調整式水力発電開発の有効性に大きく影響する場合を示した。この結果から判るように系統評価基準を定めるのには、これらの基礎になる Q_1, Q_2 の特性に関する慎重な予測が必要であり、これらの期待値と開発予定地点の設計情報を統合した判断が必要である。

6. 結 言

揚水発電を含む電力系統の設備計画の問題は、かなり複雑であり、考察すべき要因も多い。また設備計画問題の本質として多くの不確定要素が含まれる。更に揚水発電は自然の地形、地質の制限内においてかなり自由に色々の設計ができる。従っていろいろな設備計画案に対して、単に多くの要因の影響を列挙しても、いずれが適正な設備計画であるかを解明することはできない。ここで取扱った評価方法は、システムアプローチに基づいて、問題の複雑さや特殊性を解きほぐし、重要な因子を整理統合し、二三の Q.P. 問題に総括した後、系統全体からみた揚水発電の評価基準を定めるものである。そしてこの基準は多くの開発計画案の中から系統に適合する開発規模、池容量、建設時期等を選定するのに利用することができる。またここで用いたモデルにより、各種要素間の因果関係、数量的な関係を把握することが可能で、このような結果は総合的な設備計画の方針を定めるのに役立つことができる。しかしながらここで用いた関係式は説明の便宜上簡略に取扱ってあるので、電力系統の特性に応じて改訂することが必要であろう。この問題についてはシュミレーション手法等により今後更に詳細に研究する予定である。

尚、この研究には、電気協同研究会揚水発電専門委員会における調査研究がかなり参考になっている。日頃の御指導と共にこのような研究会参加の機会を与えられた日高電力部長に深く感謝する。

附録 1 揚水発電の経済的特質

(a) 揚水発電の主要な利点

1. 比較的低い設備費で建設できる。
2. 自動化又は遠隔制御のため人件費が少ない。
3. 一般の揚水発電計画は多機設備になるので、数段階に分けて建設することが可能で負荷要求に適合させ、かつ先行投資を避けることができる。
4. 耐用年数が長く、償却費を軽減することができる。
5. 自己近代化 (Self-modernizing) 特性を有する。これは動力源として原子力発電等の増分発電費の低いものが利用できるようになれば、揚水発電費が安くなってくることである。

(b) 揚水発電を開発するための主な制約

1. KW 当たりの設備費を満足な値にするためにはかなり大規模にする必要がある。それ故揚水発電は、一般に大系統や連系系統に利用すべきである。
2. 燃料費の不利。これは主にベース用発電設備の建設を延期させることによって生ずる。ベース用発電設備の代りにピーク用が設備されるときは、既設のやや効率の悪い火力発電の利用率が増すためである。

附録 2 発電所群の出力および年間設備利用率の定め方

l_1 は設備可能出力に極めて近い出力で通常運転される火力群の合計出力で、基準年度の設備容量より定める。 t_1 は l_1 に属する発電所群の発電端利用率で、平均的な年間の補修日数と事故停止時間から求められる。 t_2 は既設B級上積火力群と既設C級下積火力群の平均的な発電端利用率である。 l_2 はB級火力群の総合利用率 U_b を求めた後、これより次式を満足するように定める。

$$(l_1 + l_2) U_b = l_1 t_1 + l_2 (t_1 + t_2) / 2 \quad \text{附 (1)}$$

既設水力設備に対しては、基準年度の水力総設備容量より ($l_4 + l_5$) を定め、次いで12月代表日運用から17時間以上継続する平水年の自流式可能電力を求めた後、まず l_5 を定め、残りを l_4 としてある。 l_5 に対する利用率は平均的な自流式発電所の停止率を考慮して、ここでは 0.96 と仮定した。 l_4 に対する利用率 t_{hp} は既設水力の平水年供給力から総合利用率 U_h を求め、これより次式を満足するように定めた。

$$(l_4 + l_5) U_h = t_{hp} l_4 + 0.96 l_5 \quad \text{附 (2)}$$

l_3 は基準年度のC級火力設備容量より定め、基準年度の t_3 の値 t_{3s} は次式より定めた。

$$(t_2 + t_{3s}) / 2 = U_c \quad \text{附 (3)}$$

ここで U_c はC級火力の平均的な発電端年間利用率である。

想定年間需要電力量の増加につれて既設水力発電量の割合が減少するから、仮定したように全設備総合の送電端利用率を一定にするためには、E領域の新設水火力の発電量とC領域火力の発電量を増加しなければならない。従って新設の揚水と一般水力のC領域発電量おも火力で代替するとすれば、補充発電量は

$$\begin{aligned} k_{av}(t_2 + t_3) \{l_3 + l_4(1-z)\} / 2 - k_{av}(t_2 + t_{3s}) / 2 + k'_{av} t_1 x_{an} + (1 - k'_{av}) t_1 x_{an} \\ + 0.96 k_{hb} x_h = 0.96 l_5 (1-z) + t'_{hp} l_4 (1-z) \end{aligned} \quad \text{附 (4)}$$

を満足しなければならない。ここで k'_{av} はベース火力群の平均有効率で、 $(1 - k'_{av}) t_1 x_{an}$ は補充されなければならない火力発電所内消費電力量に相当するものである。しかるに

$$\begin{aligned} 0.96 l_5 (1-z) = k'_{av} t_1 x_{an} + (1 - k'_{av}) t_1 x_{an} \\ + 0.96 k_{hb} x_h + (0.96 - t_1) \{l_5 (1-z) - k_{hb} x_h\} \end{aligned} \quad \text{附 (5)}$$

であり、ここで取扱う問題では $(1 - k'_{av}) t_1 x_{an} - (0.96 - t_1) k_{hb} x_h$ の値はかなり小さくなるので、これを無視してよい。それ故考察期間中の t_3 は次式を満足するように定めればよい。

$$\begin{aligned} k_{av}(t_2 + t_3) \{l_3 + l_4(1-z)\} / 2 = k_{av}(t_2 + t_{3s}) l_3 / 2 \\ + t'_{hp} l_4 (1-z) + (0.96 - t_1) l_5 (1-z) \end{aligned} \quad \text{附 (6)}$$

しかしながら、更に精度を上げたいときには、求めた解を利用して附 (5) 式の $(1 - k'_{av}) t_1 x_{an}$ の値に応じて火力発電量を調整するために t_2 を修正することと、 $(0.96 - t_1) k_{hb} x_h$ (火力発電所の補修又は事故による稼働時間の減少による供給停止電力量に関連する量) の値に応じて t_3 の値を修正することによって、Q.P. 問題の計算を繰返すことが望ましい。

参 考 文 献

- [1] 酒巻恒一, “海外における揚水発電開発計画と運用”, 電気試験所調査報告 No. 161 (昭 42, 5).
- [2] 横山保編, 設備問題への経営科学的接近, 培風館, 昭和39年.
- [3] Galloway, Lands, Marsh; “The Role of Pumped Storage in Generation Systems,” Proc. Am. Power Conf., vol. 26 (1964), p. 954.
- [4] Galloway, Ringlee; “An Investigation of Pumped Storage Scheduling,” Power Apparatus and Systems, (1966, 5) p. 459.
- [5] Jaeger, C., “Price and Cost Analysis in Expanding Electrical Systems,” The English Elec. J., 17 [4] (1961), 37-51.
- [6] Pozer, H., “Vereinfachte Bestimmung der veränderlichen Kosten von Wärmekraftwerken in Verbundsystemen,” Oesterr. Z. Elektrizitätswirtsch 19 [4] (1966), 183-190.