電力貯蔵システムを含む各種電源のベスト ミックスならびに最適導入手順の決定

正員 安田 恵一郎 (北海道大)

正員 西谷 健一 (北海道大)

正員 長谷川 淳 (北海道大)

1. まえがき

これまでの電源計画に関する研究の多くは、導入電源として発電機(貯蔵システムを除く電源)のみを対象としている^{(1)~(5)}が、近年の二次電池や超電導エネルギー貯蔵システム(SMES)をはじめとする各種新形電力貯蔵システムの開発に伴い、貯蔵システムをも含めた電源計画決定手法の確立が必要となってきた。貯蔵システムを含めた研究としては、文献(6)のパラメトリック分析と文献(7)の解析的な研究があり、貯蔵システムを含むベストミックスの基本的な特性に関しては十分な解析および評価が行われているが、電力システムの負荷特性や貯蔵システムの運用戦略を考慮した具体的な電源計画決定手法の開発はなされていない。

発電機のみを対象とした電源計画では、発電機が補修などの特定の時期を除いて所望の出力が可能であるので、kW供給力のみを考慮した年負荷持続曲線に基づく検討が主として行われてきた。しかし、充電と放電を基本的な運用動作とする電力貯蔵システムは、発電機と異なりkWh容量によって運用そのものが制約を受け、常時所望の出力を発生することはできない。従って、導入対象電源に貯蔵システムを含む場合には、対象とする貯蔵システムの運用サイクルに合致した適切な負荷モデルを用い、kWh供給力をも考慮した手法を適用すべきである。例えば、著者らの検討によれば、揚水以上の貯蔵効率を有するSMESや二次電池などの新形貯蔵システムは、充電した電力をその日のう

ちに放電し終える、いわゆる日間最適運用が運用戦略としてふさわしいことが明らかとなっている^{(8)~(10)}。本論文ではこれらの点をふまえ、発電機だけでなく貯蔵システムをも含めた電源計画決定手法を提案する。

さて、電源計画問題を一つの動的最適化問題としてとらえ、動的計画法(Dynamic Programming)を直接適用することもできるが、問題の規模の増大に伴い計算時間が指数関数的に増大するため、実規模問題を解くことは極めて困難である。そこで本論文では、電源計画問題をベストミックス決定問題と導入手順決定問題の二つの部分計画問題に分割し、それぞれの部分計画問題に動的計画法を適用する実用的な手法を提案する。

具体的には、まず目標年において年間の総経費を最小とする電源のベストミックスを決定し、各電源の最終的な最適導入台数を求める。次に、現在の電源構成から目標年の電源構成に最小の費用で推移する各電源の最適導入手順(電源の開発手順)を決定する。前者のベストミックス決定には、動的計画法による発電機のためのベストミックス決定手法と、傾斜法(Gradient Method)による貯蔵システム最適運用決定手法を協調させた逐次近似法を適用している。ただし、動的計画法の段(stage)は発電機の種類、状態(state)は発電機の累積導入容量である。動的計画法の適用に際し、各段・各状態における決定(decision)を適切に限定することにより、新設電源だけでなく既存電源、更には各電源の単機容量をも考慮することができる。後者の貯蔵システムの最適導入手順は、適切な幅で離散化した年度を段、累積導入容量を状態とした動的計画法により決定している。なお、貯蔵システムのkWh供給力を考慮するために、運用戦略に合致した負荷モデルを用いている。

Optimal Generation Expansion Planning with Electric Energy Storage Systems. By Keiichiro Yasuda, Member, Ken-ichi Nishiyama, Member & Jun Hasegawa, Member (Faculty of Engineering, Hokkaido University).

安田恵一郎: 正員, 北海道大学工学部電気工学科

西谷健一: 正員, 北海道大学工学部電気工学科

長谷川淳: 正員, 北海道大学工学部電気工学科

以下、本論文では、第2章において貯蔵システムを含む各種電源のベストミックス決定手法を述べ、第3章において最適導入手順決定手法を述べる。更に、第4章では提案手法を典型的なモデルシステムに適用し、提案手法の有効性を明らかにする。

2. 貯蔵システムを含む各種電源のベストミックスの決定

本章では、ある目標年における年間の固定費と可変費の総和を最小とするような、貯蔵システムを含む各種電源のベストミックス決定手法を述べる。

〈2・1〉 問題の定式化と手法の概要 本論文では以下の仮定のもとで、ベストミックスならびに最適導入手順を決定する。

- (1) 現在から目標年に至る負荷需要は既知とする。
- (2) 各種電源の総経費は可変費と固定費の線形和とし、貯蔵システムは固定費のみとする。
- (3) 貯蔵システムを含む各種電源の単機容量はあらかじめ与える。
- (4) 二次電池や SMES などの運用戦略が日間最適運用となると予想されるので、日負荷持続曲線をデータとして用いる。
- (5) 導入する貯蔵システムは一種類とする。
- (6) 目標年における既存電源の利用政策（休・廃止するか最大利用するかなど）はあらかじめ与える。
- (7) 電源の補修計画は無視する。

さて、一般にある目標年度 T におけるベストミックスは、その年度の総経費 f_M を最小するように決定されるものであり、数理計画問題として以下のように定式化される。

$$\begin{aligned} \min_{(x, v)} f_M(x, v) \\ = \sum_{j=1}^M \{a_j x_j + b_j Q_{Tj}(X_{j-1}, X_{j-1} + x_j, v)\} \\ + a_s x_s \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{subj. to } x_{j\min} \leq x_j \leq x_{j\max} \\ (j=1, 2, \dots, M, s) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{T\min} \leq v_{Tjk} \leq v_{T\max} \\ (j=1, 2, \dots, R, k=1, 2, \dots, D) \dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^M x_j + x_s \geq P_{LT} + P_{RT} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$\begin{aligned} Q_{Tj}(X_{j-1}, X_{j-1} + x_j, v) \\ = \sum_{k=1}^R \alpha_{Tk} \int_{X_{j-1}}^{X_{j-1} + x_j} L_{Tk}(u, v) du \end{aligned}$$

表 1 記号の定義

Table 1. List of symbols.

R :	日負荷持続曲線のパターン
D :	日負荷持続曲線の時間帯数
M :	発電機の種類
N :	離散化した年度数
x_j :	電源 j の導入 kW 容量 (kW)
X_j :	電源 1 から j までの累積導入 kW 容量 (kW)
y_{ij} :	第 i 年度における電源 j の導入 kW 容量 (kW)
Y_{ij} :	第 i 年度までの電源 j の累積導入 kW 容量 (kW)
Ψ_{ij} :	第 i 年度における電源 1 から j までの累積導入 kW 容量 (kW)
v_{ijk} :	第 i 年度における第 j 番目の日負荷持続曲線の第 k 時間帯での貯蔵システム出力 (kW)
a_j :	電源 j の固定費 (千円/kW)
b_j :	電源 j の可変費 (円/kWh)
$L_{ij}(u, v)$:	貯蔵システム運用後の第 i 年度における第 j 番目の日負荷持続曲線の逆関数 [負荷レベル u (kW) 以上の負荷の日間持続時間 (時間)]
α_{ij} :	$L_{ij}(u, v)$ の年間発生日数 (日)
Q_{ij} :	第 i 年度における発電機 j の年間発電電力量 (kWh)
P_{Di} :	第 i 年度における年間最大負荷 (kW)
P_{Ri} :	第 i 年度における供給予備力 (kW)
min, max:	変数の下限値および上限値

図 1 貯蔵システムを含むベストミックスの概念
Fig. 1. A concept of the optimal generation mix with electric energy storage systems.

$$(j=1, 2, \dots, M) \dots\dots\dots (5)$$

$$b_j \leq b_{j+1} \quad (j=1, 2, \dots, M-1) \dots\dots\dots (6)$$

$$\begin{aligned} X_0 = 0 \\ X_j = \sum_{k=1}^j x_k \quad (j=1, 2, \dots, M) \end{aligned} \left. \dots\dots\dots (7) \right\}$$

各変数の定義は表1を参照されたい。上式中の添字 s は貯蔵システムを表している。なお、貯蔵システムを含む電源のベストミックスの概念を図1に示す。

この最適化問題は各電源の導入量 x (単機容量の整数倍の離散量) と、貯蔵システムの運用 v (連続量) の二種類の変数からなる混合整数計画問題である。従

って、(2)、(4)式を満足するすべての電源の組合せ x に対して目的関数を評価することにより最適解を得ることができるが、このような手法では問題の規模の増大に伴い計算量が指数関数的に増大してしまう。そこで本論文では、上記の最適化問題を

- (i) 貯蔵システムの運用 v を固定した電源構成 x の最適化問題
- (ii) 電源構成 x を固定した貯蔵システムの運用 v の最適化問題

の二つの部分問題に分割する。そして、貯蔵システムの導入台数を一台ずつ増加させつつ、それぞれの部分問題を繰返し解き、最終的に最適解を求める逐次近似法を提案する。以下に、二つの部分問題からなる逐次近似法のアルゴリズムの概要を示した後、次節以降で各々の部分問題の具体的な解法アルゴリズムを述べる。

〔ステップ1〕 貯蔵システムを含む各種電源の諸経費・単機容量、既存電源の利用政策ならびに日負荷持続曲線 $L(u, v)$ を与える。貯蔵システムの導入量 $x_s=0$ 、最適年間総経費 $f_0=\infty$ とする。

〔ステップ2〕 貯蔵システムの出力を零として発電機のみを最適ミックス x を決定し、年間総経費を f_1 とする。

〔ステップ3〕 発電機構成 x を固定して貯蔵システムの最適運用 v を決定し、年間総経費を f_2 とする。

〔ステップ4〕 $|f_1 - f_2| < \varepsilon$ (ε : 十分小さな正の数) ならば〔ステップ6〕へ行く。さもなければ貯蔵システムの運用に基づいて $L(u, v)$ を修正して〔ステップ5〕へ行く。

〔ステップ5〕 貯蔵システムの運用 v を固定して発電機のみを最適ミックス x を決定する。年間総経費を f_1 として〔ステップ3〕へ行く。

〔ステップ6〕 $f_0 \leq f_2$ ならば〔ステップ7〕へ行く。さもなければ $f_0 = f_2$ として〔ステップ7〕へ行く。

〔ステップ7〕 $x_{s, \max} \leq x_s$ ならば f_0 を与える電源構成が最適ミックスである。さもなければ貯蔵システムの導入量を一台増やし、 $x_s = x_s + \Delta x_s$ として〔ステップ2〕へ行く。

一般に、この種の逐次近似法が最適解に収束するためには目的関数の凸性が必要となるが、本論文の目的関数は電源構成 x および貯蔵システムの運用 v に関して凸であり⁽¹⁾⁽³⁾、この条件を満足している。しかし、各電源の kW 容量は単機容量として離散的に与えられるため、離散化に起因する解の振動がないとは

図2 貯蔵システムを含む電源のベストミックス決定の流れ図

Fig. 2. Flowchart for determination of the optimal generation mix with energy storage systems.

いえないが、著者らの十数種のシミュレーションではすべて収束した。なお、解が振動する場合には振動しているグループ中の最小解を選べばよい。提案手法の流れ図を図2に示す。

〈2.2〉 発電機のみを最適ミックス決定手法

本節では、発電機が分担すべき日負荷持続曲線 $L(u, v)$ が与えられたとき、つまり貯蔵システムの導入量とその運用 v が与えられたとき、発電機の経年経費を最小とするような発電機の組合せ x を決定する手法について述べる。これまで最適ミックス決定手法としては、広くスクリーニング法⁽¹⁾⁽³⁾⁻⁽⁵⁾⁽⁷⁾が用いられてきた。この手法は直観的に理解しやすく、種々の物理的な概念を与えてはくれるが、

- (i) 解が連続量として得られるため必ずしも各々の電源の離散的な単機容量を満足しない

(ii) 既存電源の利用政策を容易には考慮できないなどの欠点があり、実際の電源計画に対しては必ずしも十分であるとはいえない。そこで本論文では、各段・各状態における決定を適切に限定することにより、これらの欠点を容易に解消可能な動的計画法に基

図3 動的計画法に基づくベストミックスの決定
Fig. 3. Determination of the optimal generation mix based on dynamic programming.

づく手法⁽²⁾を適用する。

動的計画法の適用に先立ち、目的関数が段に関して左もしくは右に分離可能となるように、つまり各段・各状態における決定が、その段以前の目的関数値に何らの影響も与えないように段と状態を選定しなければならない。本論文では、図3に示すように左から可変費の安い順に発電機を並べて段とし、各発電機の累積導入kW値を状態(X)とする。最適な方策(policy; 決定を一次元の系列に並べたもの)が、同図のように与えられたときの発電機 k の最適導入kW値は図の x_k となる。いま、発電機の燃料費は可変費として発電機出力の線形関数としているので、負荷持続曲線における負荷分担は可変費の安い順に最大出力まで出力を分担する。すなわち、上述のように段と状態を選択すれば、各段・各状態に対応する可変費は一意に決まり、それ以降の決定からは何らの影響も受けない。つまり、図3において目的関数は右に分離可能となっている。従って、左から右に向かって動的計画法が適用可能であり、第 k 段における状態 X_k の、決定 x_k に対する関数漸化式は次式となる。

$$G_k(X_k) = \min_{x_k \min \leq x_k \leq x_k \max} \{g_k(X_{k-1}, x_k) + G_{k-1}(X_{k-1})\} \quad (k=1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} G_0(X_0) &= 0 \\ g_k(X_{k-1}, x_k) &= a_k x_k + b_k Q_{Tk}(X_{k-1}, X_{k-1} + x_k, v) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= 0 \\ X_k &= X_{k-1} + x_k \quad (k=1, 2, \dots, M) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

既存電源の利用政策および新規導入電源の単機容量は、各段・各状態での決定 x_k を適切に限定すること

により容易に考慮できる。既存電源の利用政策は、目標年度における既存電源の利用政策に合致するように決定 x_k を限定すればよい。また、発電機の離散単機容量はすべての発電機の単機容量の最大公約数で総導入kW値を離散化し、各電源の単機容量の整数倍となるように決定 x_k を限定することにより、厳密に考慮することができる。このような決定の限定操作は、コスト $\{g_k(X_{k-1}, x_k)\}$ を評価しなければならない決定の数を減少させるので、結果として計算量の削減をもたらすことになる。以下にアルゴリズムの概要を示す。

〔ステップ1〕 既存および新規導入電源を可変費の安い順に並べ、各段とする。すべての発電機の単機容量の最大公約数を単位として総導入kW値を離散化し、動的計画法の各状態とする。

〔ステップ2〕 (8)式の関数漸化式を用いて、既存電源の利用政策および新規導入電源の単機容量を満足するように、各段・各状態における最適決定 x_k を選ぶ。

〔ステップ3〕 最終段から逆方向に最適方策をたどる。電源 k の最適導入量は x_k として得られる。

〈2・3〉 貯蔵システムの最適運用の決定 ここでは、発電機構成が与えられたとき、発電機の変費(燃料費)を最小とすると共に、新たに導入すべき発電機が最も少なくなるような貯蔵システムの運用を決定する。貯蔵システムの運用により可変費の改善が可能な条件は、貯蔵効率 η が放電時間帯の系統の増分燃料費 λ_D と充電時間帯の系統の増分燃料費 λ_c の比よりも大きいことであり、次式となる⁽¹¹⁾。

$$\eta > \lambda_c / \lambda_D \quad (11)$$

上式は貯蔵システムの運用による経済性成立条件であり、本論文では貯蔵システムの経済運用条件と呼ぶことにする。さて、本論文では発電機の変費を出力の一次関数としているので、負荷分担の際、発電機は可変費の安い順に最大出力まで出力を分担する。すなわち、系統の増分燃料費 λ は最大出力まで出力を分担していない発電機の変費係数に一致し、その発電機の出力状態によらず一定値となる。つまり、可変費を発電機出力の一次関数とした場合には、可変費を目的関数としても貯蔵システムの運用形態は一意には決まらない。

一方、系統に必要な発電機の最大kW容量は年間の最大負荷によって決定される。従って、可変費の改善を最大にしつつ導入発電機台数を最小とするためには、(11)式の経済運用条件が成立する範囲で負荷を最も平準化するように貯蔵システムの運用を決定すればよい。つまり、目的関数は負荷平準化であり、制約条

件は(11)式の経済運用条件式となる。以下の傾斜法のアルゴリズムをすべての日負荷持続曲線に適用することにより、日間運用に基づく貯蔵システムの年間最適運用が決定される。

〔ステップ1〕 最大および最小負荷時間帯を選び出し、各々の増分燃料費を求める。

〔ステップ2〕 経済運用条件(11)式を満足しなければ終了。さもなければ最大負荷時間帯と最小負荷時間帯の間で貯蔵システムの出力を試みに微量増やす。

〔ステップ3〕 貯蔵システムの kWh 制約に達したら終了。

〔ステップ4〕 貯蔵システムの kW 制約に達したら、その時間帯を対象外として〔ステップ1〕へ行く。

なお、〔ステップ2〕の貯蔵システムの微小運用幅は最大負荷の 1/1,000 程度としている。

3. 最適導入手順の決定

前章のベストミックス決定手法により、目標年における貯蔵システムを含む各種電源のベストミックスが決定された。本章では、現在の電源構成から目標年のベストミックスへ、最小の費用で推移するような各種電源の最適導入手順を動的計画法に基づいて決定する。最適導入手順決定問題の目的は、現在から目標年に至る総経費 f_T の最小化であり、数理計画問題として以下のように定式化される。なお、変数の定義は表1のとおりである。

$$\begin{aligned} \min f_T(\mathbf{y}, \mathbf{v}) \\ (\mathbf{y}, \mathbf{v}) \\ = \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^M \{ a_j(Y_{(i-1)j} + y_{ij}) \right. \\ \left. + b_j Q_{ij}(\Psi_{i(j-1)}, \Psi_{i(j-1)} + Y_{ij}, \mathbf{v}) \right. \\ \left. + a_s(Y_{(i-1)s} + y_{is}) \right\} \dots (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{subj. to } y_{ij} \min \leq y_{ij} \leq y_{ij} \max \\ (i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, M, s) \\ \dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_i \min \leq v_{ijk} \leq v_i \max \\ (i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, R, \\ k=1, 2, \dots, D) \dots (14) \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^M Y_{ij} + Y_{is} \geq P_{Di} + P_{Ri} \quad (i=1, 2, \dots, N) \dots (15)$$

$$\begin{aligned} Y_{0j} = Y_{Ej} \quad (j=1, 2, \dots, M, s) \\ Y_{Nj} = Y_{Tj} \quad (j=1, 2, \dots, M, s) \end{aligned} \dots (16)$$

ただし、

$$\begin{aligned} Q_{ij}(\Psi_{i(j-1)}, \Psi_{i(j-1)} + Y_{ij}, \mathbf{v}) \\ = \sum_{k=1}^R \alpha_{ik} \int_{\Psi_{i(j-1)}}^{\Psi_{i(j-1)} + Y_{ij}} L_{ik}(u, \mathbf{v}) du \\ (i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, M) \dots (17) \end{aligned}$$

$$b_j \leq b_{j+1} \quad (j=1, 2, \dots, M-1) \dots (18)$$

$$\begin{aligned} Y_{ij} = \sum_{k=1}^i y_{kj} + Y_{0j} \\ (i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, M, s) \\ \dots (19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_{ij} = \sum_{k=1}^j Y_{ik} \\ (i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, M, s) \\ \dots (20) \end{aligned}$$

$\mathbf{Y}_E, \mathbf{Y}_T$ はそれぞれ電源の既存容量ベクトルおよび最終導入容量ベクトルである。最終導入容量 $\mathbf{Y}_T$ は各電源の単機容量の整数倍となっているので、 $\mathbf{Y}_T$ をそれぞれの電源の単機容量で離散化して各状態とすることにより、各離散年度における最適導入台数を決定することができる。

本論文では、図4に示すように対象期間を適切に分割して各段とし、電源の累積導入 kW 値をそれぞれの電源の単機容量で離散化して各状態とする。簡単のために、同図には導入対象電源が一種類の場合について示してあるが、実際には電源の種類数だけの次元 ($M+1$ 次元) を有する。最適方策が同図のように与えられたとすると、いま着目している発電機の第 k 年度における導入量は、単機容量の整数倍として図の y_k で与えられる。図4において、目的関数は(2・2)節のベストミックス決定の場合と同様に、右に分離可能となっている。従って、左から右に向かって動的計画

図4 動的計画法に基づく最適導入手順の決定

Fig. 4. Determination of the optimal generation addition process based on dynamic programming.

法が適用可能であり、一般に第 k 段における状態 $\mathbf{Y}_k$ の決定 $\mathbf{y}_k$ に対する関数漸化式は次式となる。

$$H_k(\mathbf{Y}_k) = \min_{\mathbf{y}_k \min \leq \mathbf{y}_k \leq \mathbf{y}_k \max} [h_k(\mathbf{Y}_{k-1}, \mathbf{y}_k) + H_{k-1}(\mathbf{Y}_{k-1})] \\ (k=1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots (21)$$

ただし、

$$H_0(\mathbf{Y}_0) = \sum_{j=1}^M \{a_j Y_{0j} + b_j Q_{0j}(\Psi_{0(j-1)}, \Psi_{0(j-1)} + Y_{0j}, \mathbf{v}) + a_s Y_{0s} \dots\dots\dots (22)$$

$$h_k(\mathbf{Y}_{k-1}, \mathbf{y}_k) = \min_{\mathbf{v}} \left[\sum_{j=1}^M \{a_j (Y_{(k-1)j} + y_{kj}) + b_j Q_{kj}(\Psi_{k(j-1)}, \Psi_{k(j-1)} + Y_{kj}, \mathbf{v}) + a_s (Y_{(k-1)s} + y_{ks}) \} \dots\dots\dots (23)$$

$$\left. \begin{aligned} Y_{0j} &= Y_{Ej} \quad (j=1, 2, \dots, M, s) \\ Y_{Nj} &= Y_{Tj} \quad (j=1, 2, \dots, M, s) \\ \mathbf{Y}_k &= \mathbf{Y}_{k-1} + \mathbf{y}_k \quad (k=1, 2, \dots, N) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

上式中の $\mathbf{Y}_k, \mathbf{y}_k$ はそれぞれベクトル $\mathbf{Y}, \mathbf{y}$ の第 k 行ベクトルである。漸化式(21)において、各段の決定 $\mathbf{y}_k$ が決まれば貯蔵システムを含むすべての電源構成が一意に定まる。従って、ベルマンの最適性の原理に基づいて漸化式(21)を解くためには、決定 $\mathbf{y}_k$ により与えられる電源構成に対して貯蔵システムの最適運用を決定すればよい。貯蔵システムの最適運用は〈2・3〉節で述べた傾斜法により決定する。以下に具体的なアルゴリズムを示す。

〔ステップ1〕 対象期間を適切な幅で離散化し各段とする。最終導入容量 $\mathbf{Y}_T$ をそれぞれの電源の単機容量で離散化して各状態とする。

〔ステップ2〕 (21)式の関数漸化式を用いて、各段・各状態における最適決定 $\mathbf{y}_k$ を供給予備力を満足するように選ぶ。

〔ステップ3〕 最終段から逆方向に最適方策をたどる。第 k 年度の電源 j の最適導入量は y_{kj} として得られる。

4. 数値計算例

四種類の既存発電機と、一種類の貯蔵システムを含む五種類の新規導入電源を有する最適化期間15年の電源計画問題に提案手法を適用した。ただし、既存発電機と導入発電機は同一の特性をもつものとしており、これらの諸経費と単機容量は表2のとおりである。最適化に際しては15年の最適化期間を3年ごと

表2 電源の諸経費と単機容量

Table 2. Data for generation technologies.

電 源	可変費 (円/kWh)	固定費 (千円/kW)	単機容量 (MW)
原子力 (N)	5	65	1,000
石 炭 (C)	8	45	500
LNG (L)	10	40	300
石 油 (O)	15	35	200
貯蔵システム	—	42	1,000 (5,000 MWh)

貯蔵システムの貯蔵効率=95%

図5 現在の夏の平日の日負荷持続曲線

Fig. 5. Daily load duration curve for summer weekday at starting year.

の五つの期間に分割している。供給予備力は各離散年度において最大負荷の10%とし、予備発電機の種類の制約はないものとしている。また、既存電源は目標年度(15年後)において最大限利用(休・廃止などは行わない)するものと仮定している。負荷は1年を春夏秋冬の四つに分け、更にそれぞれを週日と土日の二つに分けた合計8パターンの日負荷を用いた。負荷の伸び率は図5に示すように、日負荷持続曲線を負荷の大きい順に六つの部分に分け、それぞれの時間帯に対して図のように仮定している。なお、負荷の伸び率は8パターンの日負荷に対して同一である。これらの日負荷から合成される年負荷持続曲線(年負荷率60%)と既存電源の負荷分担の様子を示したものが図6である。ただし、持続時間は一年を単位としている。

現在の電源構成ならびに提案手法により得られた、15年後の貯蔵システムなしの場合と貯蔵システムありの場合のベストミックス(最適導入台数)をそれぞれ表3に示す。15年後の貯蔵システムなしの場合とありの場合、年負荷持続曲線に対する負荷分担の様子が

図 6 現在の年負荷持続曲線と負荷分担

Fig. 6. Annual load duration curve and initial generation mix at starting year.

表 3 現在と目標年における電源構成

Table 3. Generation mix at starting year and optimal generation mixes at target year.

電 源	現 在		目標年 (15年後) における ベストミックス			
			貯蔵システムなし		貯蔵システムあり	
	既設台数 (台)	設備容量 (MW) (構成比)	最終台数 (台) (増設台数)	設備容量 (MW) (構成比)	最終台数 (台) (増設台数)	設備容量 (MW) (構成比)
原子力	4	4,000 (36%)	6 (2)	6,000 (30%)	8 (4)	8,000 (41%)
石 炭	6	3,000 (27%)	11 (5)	5,500 (28%)	6 (0)	3,000 (15%)
LNG	4	1,200 (11%)	9 (5)	2,700 (14%)	6 (2)	1,800 (9%)
石 油	14	2,800 (26%)	28 (14)	5,600 (28%)	20 (6)	4,000 (20%)
貯蔵 システム	0	0 (0%)	0 (0)	0 (0%)	3 (3)	3,000 (15%)
年間総経費 (億円)	8,669		14,775		14,710	

それぞれ図 7, 図 8 に示されている。貯蔵システムの最適導入台数は 3 台である。貯蔵システムの導入により、貯蔵システムを除く電源の平均設備利用率は貯蔵システムなしの場合の 53% から 64% に改善され、年間総経費も約 65 億円改善された。貯蔵システムなしの場合は、ミドルとピーク用電源が主として導入されており、ベース電源である原子力は 2 台しか導入されていない。これは目標年の負荷率があまり良くないため、新たにベース電源を導入しても稼働率が低く、経済的なメリットが少ないためである。これに対して、

図 7 目標年における年負荷持続曲線と負荷分担 (貯蔵システムなし)

Fig. 7. Annual load duration curve and optimal generation mix without energy storage systems at target year.

図 8 目標年における年負荷持続曲線と負荷分担 (貯蔵システムあり)

Fig. 8. Annual load duration curve and optimal generation mix with energy storage systems at target year.

貯蔵システムを導入した場合は、貯蔵システムを除く電源の平均設備利用率が改善されるため、ベース電源導入のメリットが生じ、結果として貯蔵システムなし

表 4 現在から目標年に至る電源の最適導入手順
Table 4. Optimal generation addition process from starting year to target year.

年 度	現 在	3	6	9	12	15	目標年
電 源	既設台数 (台)	増設台数 (台)					最終(増設) 台数(台)
原子力	4	1	0	1	1	1	8(4)
石 炭	6	0	0	0	0	0	6(0)
LNG	4	0	2	0	0	0	6(2)
石 油	14	2	0	4	0	0	20(6)
貯蔵システム	0	0	1	0	1	1	3(3)
増設容量 (MW)	—	1,400	1,600	1,800	2,000	2,000	—

の場合に比べて2台多い4台の原子力が導入されている。

一方、表4は現在から15年後のベストミックスに至る貯蔵システムを含む各種電源の最適な導入手順、ならびに各年度ごとの総増設容量を示したものである。3台の貯蔵システムはそれぞれ6, 12, 15年後に導入するのが最適となっており、貯蔵システムの導入に際しては貯蔵源資である原子力が直前もしくは同時に導入されていることがわかる。

なお、計算時間はベストミックス決定に25秒を要し、最適導入手順決定に30分を要した。

5. あとがき

本論文では電力貯蔵システムを含む各種電源の最適組合せ(ベストミックス)ならびに最適導入手順決定のための動的計画法に基づく手法を提案し、数値例により手法の有効性を明らかにした。提案手法の特長は以下のとおりである。

(1) 新設電源だけでなく、既存電源や貯蔵システムをも含めたベストミックスならびに最適導入手順の決定が可能であり、得られたベストミックスは各種電源ごとの離散的な単機容量を完全に満足する。

(2) 年負荷持続曲線ではなく、貯蔵システムの運用サイクルに合致した日負荷持続曲線に基づいているので、貯蔵システムの導入効果をより正確に評価できる。

(3) 四種類28台の既存電源、貯蔵システム一種類を含む五種類の導入電源を有するモデル系統に適用

した結果、ベストミックス決定に25秒を要し、最適導入手順決定に30分を要した。

また、今後の課題としては、

(i) 電源の補修計画や複数の異なる種類の貯蔵システムの考慮

(ii) 計画問題に内在する不確定要因、例えば諸経費の経年変化や負荷予測の考慮

などがあげられる。

最後に、本研究を行うにあたり終始御指導いただいた本学工学部 田中英一助手、ならびに数値計算で御協力いただいた本学大学院生 福島知之君(現在、北海道電力勤務)に深謝申し上げます。なお、本研究は文部省科学研究費エネルギー特別研究および重点領域研究の補助を受けて行いました。また、数値計算はすべて北海道大学大型計算機センター HITAC-M682Hを使用いたしました。

(昭和63年3月22日受付、同63年6月17日再受付)

文 献

- (1) N. M. Stoughton, et al.: "Direct Construction of Optimal Generation Mix", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, **PAS-99**, 2, 753 (1980)
- (2) A. B. Borison, et al.: "An Efficient Approach to The Optimal Static Generation Mix Problem", *ibid.*, **PAS-103**, 3, 576 (1984)
- (3) N. Levin, et al.: "Optimal Mix Algorithms with Existing Units", *ibid.*, **PAS-103**, 5, 954 (1984)
- (4) 茂木, 他: 「系統の信頼度を考慮した新設電源の最適規模の多段決定」, 電気学会電力技術研資, PE-86-26 (昭 61-7)
- (5) 野崎, 他: 「系統信頼度を考慮した電源導入手順の多段決定」, 同上, PE-87-87 (昭 62-7)
- (6) 大庭・七原: 「電源構成における電力貯蔵設備の役割の評価——原子力と電力貯蔵設備の組合せ最適化——」, 電学論B, **105**, 427 (昭 60-5)
- (7) 豊田・河野: 「貯蔵設備を含む電源ベストミックスの決定とその特徴」, 同上B, **106**, 279 (昭 61-3)
- (8) 諸住, 他: 「各種運用損失を考慮した電力貯蔵装置の最適運用」, 同上B, **105**, 355 (昭 60-4)
- (9) J. Hasegawa, et al.: "Optimal Operating Strategies of Various Storage Systems in the Power System", *Res. Effective Utilization & Densification Elect. Energy*, p. 141 (1983)
- (10) J. Hasegawa, et al.: "Total Economic Evaluation of Energy Storage Systems", *ibid.*, p. 197 (1987)
- (11) 皆川, 他: 「電力貯蔵装置最適運用決定のための高速計算法」, 電学論B, **106**, 225 (昭 61-3)
- (12) 安田, 他: 「電力貯蔵システムを含む各種電源のベストミックスならびに最適導入手順の決定」, 昭63電気学会全大, No. 857