UDC 621.311.6:510.5:681.3.02-185.4

論文

61-B28

電力貯蔵装置最適運用決定のための 高速計算法

准員 皆川和志 (北海道大) • 正員 諸住 哲 (北海道大)
正員 西谷健一 (北海道大) • 正員 長谷川 淳 (北海道大)
正員 藤原 一 (北海道大)

1. ま え が き

電力需要は年々増加する一方、負荷率の低下、発電機の大形化が著しく、このため負荷率向上策として、各種電力貯蔵装置の電力系統への導入が検討されている。電力貯蔵装置としては、既存の揚水発電のほか、電池、フライホイール、超電導コイル、圧縮空気などが注目されているが、中でも電池はその実用化が近いと予想される。電池のような小容量の貯蔵装置は、立地制約が少ないため電力輸送効率化の面から需要端あるいはその周辺に分散して配置されることになる⁽¹⁾。

さて、系統内に分散配置されている電力貯蔵装置に対する、火力発電機の燃料費の合計を最小とする経済運用を考えると、筆者らが既に文献(4)で明らかにしたように、基本的にはダイナミック・プログラミング手法(以下 DP と記す)、装置が複数台の場合には多次元 DP や DPSA (逐次近似 DP)⁽²⁾により解くことができる。しかし、複数の状態変数を扱う DP は、かなりの計算量を必要とし、特に、装置の台数に伴ない計算時間が急増するという欠点があるから、各貯蔵装置の最適運用決定のための、効率的なアルゴリズムの確立は重要な課題である。そこで文献(4)ではまた、貯蔵装置間の優先・協調運用の判定を組み込み、DP の効率化を図った決定手法を提案したが、その判定の際、系統内送電損失を考慮するため、“対象時間帯限定時(貯蔵装置の)等価効率”ともいうべき指標 H (ラージ・イータ)を用いていた。本論文は、この指

標 H の物理的意味に基づき、DP にはよらない更に高速な運用決定手法を開発したものである。

まず初めに、貯蔵装置運用最適化問題の定式化について述べ、その後第3章では、貯蔵部でのエネルギー損失を考慮しない基本的な高速計算法を提案する。具体的には、系統増分費 λ が最大、最小となる時間帯に着目し、 H の値が最も大きな装置の入出力を、微量増加する操作の繰返しにより最適運用を得ている。ところで、フライホイールのように特にエネルギー形態が動的なものでは、貯蔵部でのエネルギー損失を無視することはできない。この場合、複数台装置の運用決定のためには、DPSA のような逐次反復が必要となり、このアルゴリズムを第4章で確立している。

なお、提案する手法は、運用決定問題をラグランジュ関数を用いて定式化することにより得られる、協調方程式を数値的に解く上での一変形になっており、この点についても詳細な検討を加える。

2. 電力貯蔵装置運用最適化問題の定式化⁽⁴⁾

電力貯蔵装置は、図1に示すように電力を他のエネルギー形態に変換する変換部と、そのエネルギーを貯える貯蔵部から成る。このような構造を踏まえ、運用最適化問題は次のように定式化される。なお、各変数、定数の意味は表1の通りである。

図1 貯蔵装置のモデル

Fig. 1. Model of a storage system.

A Fast Method for Deciding the Optimal Operating Strategies of Energy Storage Units. By Kazushi Minagawa, Associate Satoshi Morozumi, Member, Ken-ichi Nishiya, Member Jun Hasegawa, Member & Hajime Fujiwara, Member (Faculty of Engineering, Hokkaido University)

皆川和志: 准員, 北海道大学工学部電気工学科
諸住 哲: 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
藤原 一: 正員, 北海道大学工学部電気工学科

表 1 記号一覧表
Table 1. List of symbols.

T ; 時間帯の長さ, $E(t)$; 貯蔵エネルギー量 (MWh)
$E_L(t)$; 時間帯 t での貯蔵エネルギー損失量 (MWh)
$P_T(t)$; 火力発電所の出力 (MW), $P_S(t)$; 貯蔵装置入出力 (MW)
$P_{SL}(t)$; 貯蔵エネルギー損失 (MW), $P_D(t)$; 総負荷 (MW)
$P_L(t)$; 全送電損失 (MW), $L(t)$; ELD におけるペナルティ係数
$F(P_T(t))$; 火力の燃料費特性 (円), η_{in} ; 貯蔵装置変換部の入力時効率
η_{out} ; 貯蔵装置変換部の出力時効率
η ; 貯蔵装置変換部の総合効率 ($=\eta_{in} \times \eta_{out}$)
i ; 火力の番号, j ; 貯蔵装置の番号
N ; 火力の数, M ; 貯蔵装置の数
—, —; 変数の上, 下限値を表わす記号

(a) 貯蔵装置の動作

① 入力時 ($P_{Sj}(t) < 0$)

$$dE_j(t)/dt = -P_{SLj}(t) - P_{Sj}(t) \cdot \eta_{in} \quad \dots (1)$$

② 出力時 ($P_{Sj}(t) > 0$)

$$dE_j(t)/dt = -P_{SLj}(t) - P_{Sj}(t)/\eta_{out} \quad \dots (2)$$

(b) 制約条件

① 貯蔵エネルギー量について

$$0 \leq E_j(t) \leq \bar{E}_j \quad \dots (3)$$

② 貯蔵装置入力について

$$P_{Sj}(t) \leq P_{Sj}(t) \leq \bar{P}_{Sj}(t) \quad \dots (4)$$

③ 火力発電機出力について

$$P_{Ti}(t) \leq P_{Ti}(t) \leq \bar{P}_{Ti}(t) \quad \dots (5)$$

④ 需給バランスについて

$$\sum_{i=1}^N P_{Ti}(t) + \sum_{j=1}^M P_{Sj}(t) - P_L(t) - P_D(t) = 0 \quad \dots (6)$$

(c) 最小化する目的関数

$$\phi = \int_0^T \sum_{i=1}^N F_i(P_{Ti}(t)) dt \quad \dots (7)$$

なお(7)式中, 内燃タービンを用いる圧縮空気貯蔵装置などにおける燃料消費は考えないものとする。

3. 最適運用決定のための高速計算法

本章では, 貯蔵装置の設置点により異なる送電損失の影響を考慮して, 貯蔵装置の効率および増分送電損失から算定されるペナルティ係数より求められる指標 $H^{(4)}$ を用いた高速計算法を提案する。なお, ここでは貯蔵部でのエネルギー損失の影響は無視している。

〈3.1〉 運用決定アルゴリズム いま, 対象とする運用期間を単位時間で分割し, 各時間帯の間負荷は一定と仮定する。指標 H には, 対象時間帯限定時等価効率とも言うべき物理的意味があり, その導出については文献(4)で詳細に述べられているが, j 番目の貯蔵装置に対して, t_i 時間帯での火力出力増分によるコスト増が, t_h 時間帯での火力出力減分によるコスト減

より小さくなる条件は, 次式で示される。

$$H_j(t_i, t_h) > \lambda(t_i)/\lambda(t_h) \quad \dots (8)$$

$$H_j(t_i, t_h) = \eta_j \cdot L_j(t_i)/L_j(t_h) \quad \dots (9)$$

この不等式が成立している限りは, ある軽負荷時間帯 t_i と重負荷時間帯 t_h において, 貯蔵装置を運用することによるメリットがあると判断される。また, H の値が大きいくほど, 燃料費改善の効果が大きなことも(8)式から容易に理解できる。

(9)式では, λ および L が時刻の関数であるから, $\lambda(t)/L(t)$ の値が最大, 最小となる時間帯を選択し,

$$\eta_j > \frac{\{\lambda(t)/L_j(t)\}_{\min}}{\{\lambda(t)/L_j(t)\}_{\max}} \quad \dots (10)$$

が成立すれば, その貯蔵装置の運用は燃料費改善に対し, 効果があるといえる。ここで, $\lambda(t)/L(t)$ の値に着目すると, この値が最大, 最小となる近傍では系統状態に大きな変動がない限り, $L(t)$ の動きよりも, $\lambda(t)$ の値の動きの方がより支配的なことが経験的に知られている⁽⁴⁾。つまり, $H_j(t)$ を $\lambda(t)$ が最大, 最小となる時間帯で算定して差しつかえないことになる。以上の考察より, 複数台貯蔵装置の運用は次のような方法で決定できる。

(1) 系統増分費 λ が, 最大, 最小の時間帯を選択し, 各貯蔵装置の H の値を計算する。

(2) H の最も大きな装置の入出力量を微量増加する。

(3) 新たな状態でのコストを再計算し, 以前の値より減少していれば, 同様の計算を繰返す。

図2は具体的な運用決定アルゴリズムである。ペナルティ係数, 燃料費算出のため, 提案する手法と組合せる潮流最適化手法としては, 直流法による手法(文献(3)における厳密解法)を採用する。

〈3.2〉 協調方程式の導出 貯蔵装置の入出力を次式のように, 入力分 P_{S-} と出力分 P_{S+} に分けて考

図 2 最適運用決定アルゴリズム

Fig. 2. Algorithm for deciding optimal operation.

える。

$$P_s(t) = P_{s+}(t) + P_{s-}(t) \dots\dots\dots (11)$$

$$P_{s+}(t) \geq 0, P_{s-}(t) \leq 0 \dots\dots\dots (12)$$

貯蔵装置の運用が最適化された状態を考えると、入力されたエネルギーはすべて放出されなければならないことは、容易に理解できる。つまり、エネルギーの入出力平衡条件として、

$$\int_0^T \eta_{inj} \cdot P_{s-j}(t) dt + \int_0^T \frac{P_{s+j}(t)}{\eta_{outj}} dt = 0 \dots (13)$$

が満足されなければならない。更に、いま日間の運用決定問題を想定し、貯蔵装置への入力時間帯と出力時間帯が完全に分離できると仮定すると、(3)式より、貯蔵装置の容量制約を

$$-\int_0^T \eta_{inj} \cdot P_{s-j}(t) dt + \int_0^T \frac{P_{s+j}(t)}{\eta_{outj}} dt \leq 2 \bar{E}_j \dots\dots\dots (14)$$

とすることができる。以上の(13)、(14)式および(6)式の電力平衡に関する制約、(7)式の目的関数より、拡張目的関数は次式となる。

$$\begin{aligned} I = & \int_0^T \sum_{j=1}^N F_i(P_{Ti}(t)) dt - \int_0^T \lambda(t) \cdot \left\{ \sum_{i=1}^N P_{Ti}(t) \right. \\ & \left. + P_s(t) - P_L(t) - P_D(t) \right\} dt + \sum_{j=1}^M \gamma_j \\ & \times \left\{ \int_0^T \eta_{inj} \cdot P_{s-j}(t) dt + \int_0^T \frac{P_{s+j}(t)}{\eta_{outj}} dt \right\} \\ & + \sum_{j=1}^M \gamma'_j \cdot \left\{ -\int_0^T \eta_{inj} \cdot P_{s-j}(t) dt \right. \\ & \left. + \int_0^T \frac{P_{s+j}(t)}{\eta_{outj}} dt - 2 \bar{E}_j \right\} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

なお、貯蔵装置入出力および火力出力に関する制約、(4)、(5)式は増分燃費曲線を入出力の上下限で急激に立上がる、あるいは急激に落込む形にすることで考慮される。(15)式が最小となる条件は次に示す通りである。

(a) 火力については、全時間帯にわたり

$$\lambda(t) = \left(\frac{dF_i}{dP_{Ti}} \right) / \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{Ti}} \right) = \frac{dF_i}{dP_{Ti}} L_i(t) \dots\dots\dots (16)$$

(b) 貯蔵装置について、 $P_{s-} < 0$ なる時間帯では

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= (\gamma_j - \gamma'_j) \cdot \eta_{inj} / \left(1 - \frac{\partial P_L}{\partial P_{sj}} \right) \\ &= (\gamma_j - \gamma'_j) \cdot \eta_{inj} \cdot L_j(t) \quad (17) \end{aligned}$$

$P_{s+} > 0$ なる時間帯では

$$\lambda(t) = \frac{\gamma_j + \gamma'_j}{\eta_{outj}} \cdot L_j(t) \dots\dots\dots (18)$$

以上の(16)~(18)式により協調方程式が得られた訳だが、ここで、 η_{inj} 、 η_{outj} は1未満の正の値であるから最適運用では、 P_{s+} と P_{s-} が同時に非零となることはない。なお、 γ_j は運用期間にわたっての貯蔵装置入出力平衡を示すので、期間中は定数、 γ'_j も同様の意味から定数である。仮に、貯蔵装置の容量に制約がないとすると γ'_j の値は零となる。

〈3.3〉 協調方程式による考察 貯蔵装置の最適運用は、基本的には、前節で導いた協調方程式を解くことにより決定できる。しかし、増分送電損失 $\partial P_L / \partial P_{sj}$ はその関係を明白に与えることができず、従って、協調方程式を直接解くことは困難となる。

本節では、〈3.1〉節で提案したアルゴリズムと協調方程式との関連について考察を加えるが、はじめに、貯蔵装置が1台で、2時間帯の場合を考えてみる。いま、ある運用状態が与えられたとき、ペナルティ係数をその状態で定まる定数とすると、(16)~(18)式の右辺、すなわち増分燃費曲線は図3に示すように直線であると仮定できる(火力の燃費曲線は火力出力の2次関数として表す)。図中の S_1 , T_1 , S'_1 , T'_1 は貯蔵装置を全く使用しない状態であり、 γ' により、貯蔵量に関し、 $\bar{E}=0$ という制約を受けている状態と解釈される。この γ' による制約を少しゆるめと、すなわち貯蔵装置の入出力を微量増加すると、ペナルティ係数の変化により、増分燃費曲線も変わるが、運用点はおおむね、 S_2 , T_2 , S'_2 , T'_2 に移る。この動作を繰返すことにより、もし、貯蔵量制約を受けなければ、最終的に $\gamma'=0$ となり、最適な $\lambda_{\max}^{(\text{opt})}$, $\lambda_{\min}^{(\text{opt})}$ で決まる協調方程式の解が得られることになる。貯蔵量制約を受ける場合は、繰返しの途中で γ' がある正の値で運用が固定される。

次に、やはり2時間帯で、複数台の貯蔵装置を考え

図3 増分燃費曲線

Fig. 3. Incremental fuel cost curve.

図4 $\lambda_{\max}$, $\lambda_{\min}$ の変化

Fig. 4. Movements of $\lambda_{\max}$, $\lambda_{\min}$.

ると、前述の議論により、ある運用状態では、 γ_j および γ_j' が与えられ、(17)、(18)式より、次式が成立している。

入力時

$$\lambda_{\min} = (\gamma_j - \gamma_j') \cdot \eta_{in,j} \cdot L_j(t_i) \dots\dots\dots (19)$$

出力時

$$\lambda_{\max} = \frac{\gamma_j + \gamma_j'}{\eta_{out,j}} \cdot L_j(t_h) \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 j 番目の貯蔵装置に対して、 $\gamma_j' = 0$ としたときのレベルを、入出力時それぞれにおいて、 $\lambda_{\min,j}$, $\lambda_{\max,j}$ とすると、

$$\lambda_{\min,j} = \gamma_j \cdot \eta_{in,j} \cdot L_j(t_i) \dots\dots\dots (21)$$

$$\lambda_{\max,j} = (\gamma_j / \eta_{out,j}) \cdot L_j(t_h) \dots\dots\dots (22)$$

となる。これらの量は、そのときの運用状態からみて、 j 番目の貯蔵装置を使用したときに、 $\lambda_{\max}$, $\lambda_{\min}$ が到達し得る目標値を意味しており、(21)、(22)式の値の差が小さい貯蔵装置ほど、コスト改善の効果が高いといえる。両式の比をとることにより、

$$\frac{\lambda_{\min,j}}{\lambda_{\max,j}} = \eta_{in,j} \cdot \eta_{out,j} \cdot \frac{L_j(t_i)}{L_j(t_h)} \dots\dots\dots (23)$$

が得られるが、上式は H_j の定義(9)式と同じものであり、結局、 H_j の算定によってコスト改善効果の高い装置を判定できる。

さて、貯蔵装置の入力が増えると、一般に送電損失も増加し、さらなる入力微少増に伴う送電損失の増加割合（その貯蔵装置設置母線の増分送電損失に負の符号をつけたものに対応する）も大きくなる。従って、貯蔵装置の入力が増えるとペナルティ係数は減少し、逆に出力が増えるとペナルティ係数は増えるので、(21)式に示す $\lambda_{\min,j}$ の値は減少、(22)式に示す $\lambda_{\max,j}$ の値は増加する。ゆえに、図4に示すように、もし m 番目の装置の $\lambda_{\min,m}$, $\lambda_{\max,m}$ が最も内側にあれば、入出力微少増加により、それらのレベルは上下に広がることになる。その結果 n 番目の装置に対する $\lambda_{\min,n}$, $\lambda_{\max,n}$ との間で逆転が生じた場合には、繰返しにより両方の装置が協調的に運用され、最終的に系統増分費が同じ値に収束する。ところで、 λ は貯蔵装置の運用により負荷を平均化できるレベルを与えており、少なくとも送電損失を無視できるときには、最高の総合効率を持つ装置の $\lambda_{\min}$, $\lambda_{\max}$ が最も内側に存在している。もし、ペナルティ係数の影響で $\lambda_{\min,m} > \lambda_{\min,n}$ かつ $\lambda_{\max,m} > \lambda_{\max,n}$ となるようなことが起れば、 H_j による判定が必ずしも適切かどうか解らないが、上述した現象は運用量が収束値に近づいたときに生じ易く、また入出力は微少量ずつ増加するから最終的な運用量に大きな誤差はないと考えられる。また、 m 番目の装置の運用

によって逆転が起らずに最適状態が得られれば、その装置だけの優先運用となる。

なお、入出力時間帯が複数の場合には、対象となる時間帯の組合せが複数となるため上述の議論は複雑となる。しかし、本手法で提案している $\lambda(t_h)/\lambda(t_i)$ の比が最大となる2時間帯で、 $\eta_j \cdot (L_j(t_i)/L_j(t_h))$ が最大となる貯蔵装置の運用を微少量増やすという作業は、この両方の値をともに減少させる方向の調整となる。よって、最終的に貯蔵装置の貯蔵容量上限にかからないような解が得られる場合には、すべての時間帯にわたり $\gamma' = 0$ として最適化を行なったと考えることができ、微少量運用を増やす手順の繰返しにより、貯蔵装置 j の任意の入出力時間帯 t_{in} , t_{out} の間で、

$$\frac{\gamma_{out}}{\gamma_{in}} = \eta_j \frac{L_j(t_{in})}{L_j(t_{out})} \cdot \frac{\lambda(t_{out})}{\lambda(t_{in})} = 1 \dots\dots\dots (24)$$

が成立する運用に収束し、すべての入出力時間帯で唯一の γ が存在する最適解が得られたことになる。一方、最終解が貯蔵容量上限にかかる場合には、

$$\frac{\gamma_{out} + \gamma_{out}'}{\gamma_{in} - \gamma_{in}'} = \eta_j \frac{L_j(t_{in})}{L_j(t_{out})} \cdot \frac{\lambda(t_{out})}{\lambda(t_{in})} = k > 1 \dots\dots\dots (25)$$

が、任意の入出力時間帯 t_{in} , t_{out} で成立する状態で貯蔵装置 j の運用増は止められる。他の貯蔵装置で更に運用が増やされていく場合には、 $\lambda(t_{out})/\lambda(t_{in})$ が更に小さくなるので、貯蔵装置 j の運用が変更されなくても(25)式右辺の k の値は減少してゆくことになる。しかし、他の装置の運用増も、出力時間帯で $\lambda(t_{out})$ 最大、入力時間帯で $\lambda(t_{in})$ 最小となる時間帯を選んで行なうため、 $\lambda(t_{out})/\lambda(t_{in})$ の比は任意の t_{in} , t_{out} の間で同じ値となる状態が保持され、また、他の母線に設置されている貯蔵装置の運用変更による母線 j のペナルティ係数 L_j の変化は小さいため、貯蔵装置 j については、最後まで任意の t_{in} , t_{out} において、 $\gamma_{out,j} + \gamma_{out,j}'$, $\gamma_{in,j} - \gamma_{in,j}'$ の比が一定となる(25)式の状態がほぼ保たれていることになる。このとき、 $\gamma_{in} = \gamma_{out} = \gamma$, $\gamma_{in}' = \gamma_{out}' = \gamma'$ となるように γ , γ' を定めることができる。従って、(3・1)節のアルゴリズムは、 γ , γ' を直接扱うことなく、数値的に協調方程式を解いていることとはほぼ等価であると言えよう。

4. 貯蔵部損失を考慮した場合の計算手法

まえがき中にも触れたように、貯蔵装置の運用損失としては、例えばフライホイールの回転体の風損、軸受損のような、貯蔵部でのエネルギー損失を考慮することができるが、本章ではこれを考慮した場合への高速計算法の拡張をはかる。

(4・1) 協調方程式の導出 貯蔵部損失は、一般

に貯蔵エネルギーの一次関数に近い特性を示すことが多く、ここでは P_{SL} を E の一次関数として次のように定義する。

$$P_{SL}(t) = a \cdot E(t) + b \quad (26)$$

再び、貯蔵装置の入出力 P_S を P_{S+} , P_{S-} に分けて考えると、エネルギー入出力平衡の条件は次のように表せる。

$$\dot{E}(t) = \eta_{in} \cdot P_{S-}(t) + P_{S+}(t) / \eta_{out} + P_L(t) = 0 \quad (27)$$

従って、貯蔵量制約のない1台の貯蔵装置の場合について、(7)式の目的関数に(6), (27)式の制約を考慮した拡張目的関数を考えると次式となる。

$$I = \int_0^T \sum_{i=1}^N F_i(P_{Ti}(t)) dt - \int_0^T \lambda(t) \cdot \left\{ \sum_{i=1}^N P_{Ti}(t) + P_S(t) - P_L(t) - P_D(t) \right\} dt + \int_0^T \gamma(t) \{ \dot{E}(t) + \eta_{in} \cdot P_{S-}(t) + P_{S+}(t) / \eta_{out} + P_{SL}(t) \} dt \quad (28)$$

上式を最小化する条件は、火力については(16)式のままだが、貯蔵装置については、

入力時

$$\lambda(t) = \gamma(t) \cdot \eta_{in} \cdot L(t) \quad (29)$$

出力時

$$\lambda(t) = (\gamma(t) / \eta_{out}) \cdot L(t) \quad (30)$$

となる。また、(28)式を $I = \int_0^T f(t) dt$ と表わすと、オイラー・ラグランジュの方程式⁽⁸⁾

$$\frac{\partial f}{\partial E} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial f}{\partial \dot{E}} \right) \quad (31)$$

より、 $\gamma(t)$ の初期値を γ_0 として、

$$a\gamma(t) = \frac{d}{dt} \gamma(t), \quad \gamma(t) = \gamma_0 e^{at} \quad (32)$$

と記述できる。貯蔵部損失を無視したとき、 γ は定数であったが、ここでは時間の関数となっている。(26)式中の一次の係数 a は正の値なので、 γ は(32)式により単調増加関数となる。従って、入出力時間帯それぞれにおいて火力の出力は一定とせずに、後の時間帯になるほど火力出力が大きくなるように傾斜をもたせる運用が最適となる。また、 a の値が大きいくほど、その傾斜は急になり、貯蔵装置の運用量は少なくなる。

〈4.2〉 貯蔵装置が1台の場合 本論文では複数の貯蔵装置の運用を考えている訳だが、その前に1台の装置に対する計算手法の考察を行なう。(29)~(32)式により、最適状態においては入力時刻 t_i 、出力時刻 t_h において次式が成立することが解る。

$$\eta \cdot \frac{L(t_i)}{L(t_h)} \cdot \frac{\lambda(t_h)}{\lambda(t_i)} \cdot e^{-a(t_h-t_i)} = 1 \quad (33)$$

ここでも、離散時間系を考え入出力時間帯をそれぞれ t_i , t_h とすると、(33)式における、 $\exp\{-a(t_h-t_i)\}$ は $\exp(-anT)$ と表わせる ($nT = t_h - t_i$)。また、台形近似により、

$$e^{-anT} \approx \left(\frac{1-aT/2}{1+aT/2} \right)^n = \alpha^n \quad (34)$$

となるので、最適状態では次式が成立すると考えられる。

$$\eta \cdot \frac{L(t_i)}{L(t_h)} \cdot \frac{\lambda(t_h)}{\lambda(t_i)} \cdot \alpha^n = 1 \quad (35)$$

上式は前章における(24)式に対応しており、従って、 λ が最大、最小となる付近では L_m の値の動きに比べ λ の動きの方がより支配的であることを考慮に入れると、貯蔵装置の入出力を微量増加させる時間として $\{\lambda(t_h)/\lambda(t_i)\} \cdot \alpha^n$ の値が最大となる時間帯を選べばよいことになる。次に、貯蔵エネルギーの推移を考えると、 t_i 時間帯でのエネルギー $\Delta E(t_i)$ は、 $t_i + T$ 時間帯で $\Delta E(t_i + T)$ に減少する。すなわち、

$$\Delta E(t_i + T) = \Delta E(t_i) - \Delta E_L(t_i + T) \quad (36)$$

となるが、ここで、 ΔE を貯蔵エネルギー量の微量変化分とすると、貯蔵部損失の固定分を考慮する必要はなく、 ΔE_L としては貯蔵エネルギー量に比例する成分のみを考えればよい。貯蔵部損失の貯蔵量に対する割合は一般に極めて小さいから、この間 E は時間に対し線形に推移すると仮定でき、

$$\Delta E(t_i + T) = \Delta E(t_i) \cdot \frac{1-aT/2}{1+aT/2} \triangleq \Delta E(t_i) \cdot \alpha \quad (37)$$

が得られる。従って $\Delta E(t_i)$ と $\Delta E(t_h)$ との間には次式が成立する。

$$\Delta E(t_h) = \Delta E(t_i) \cdot \alpha^n \quad (nT = t_h - t_i) \quad (38)$$

以上の考察により、貯蔵装置1台の場合の運用は次のように求めることができる。

(1) $\{\lambda(t_h)/\lambda(t_i)\} \cdot \alpha^n$ の値が最大となる入出力時間帯 t_i , t_h を求める。

(2) 貯蔵装置の運用量を微量増加する。(t_i 時間帯で $\Delta E(t_i)$ のエネルギーを貯え、 t_h 時間帯において、 $\Delta E(t_i) \cdot \alpha^n$ のエネルギーを放出する。)

(3) コストが減少する限り、上記動作を繰返す。なお、このアルゴリズムは、ステップ(1), (2)中の α を除けば、第3章に述べた貯蔵部損失がないときの方法と全く同じである。

〈4.3〉 複数台装置の運用決定アルゴリズム

筆者らは、文献(4), (5)において系統内送電損失

を無視してはいたが、貯蔵部損失が貯蔵エネルギー量の一次関数となるときの解析を詳細に行なった。その結果、貯蔵装置の入力あるいは出力時間帯で、系統増分費 λ が時間に対し一次関数的に増加するような形をとり、貯蔵装置の容量に制約があるような場合、複数台の装置に対しては、(26)式中の比例成分が異なれば、各装置の入出力時間帯が分離されるなどの結論を得た。以上の運用特性より複数台装置の運用決定アルゴリズムは、貯蔵部損失がない場合の単純な拡張とはならないことが理解される。

さて、複数台の場合も、繰返し計算の途中のある時点において、各装置につき $\{\lambda(t_i)/\lambda(t_1)\} \cdot \alpha^n$ の値をチェックすることにより、それぞれに対して最適な入出力時間帯が存在する。また、 t_i, t_h 時間帯とある i 番目の装置の選択により、(35)式左辺の値が最大になるなら、その装置の微少運用はその時点では最適といえる。しかし、ここで得られた結果は、 i 番目の貯蔵装置のみが使われるという前提を含んでおり、その装置に運用量の制約があると、前述した入出力時間帯の分離という運用特性に対し、最終的に i 番目の装置が運用されるべき時間帯を選択しているとは限らない。すなわち、前節に述べた微少運用の繰返しのみでは先の分離傾向は現われず、一般には最適解が得られないことになる。なお、このことは、繰返しの途中で、各装置に対し異なる t_i, t_h 時間帯において、(35)式左辺を比較することに起因しているとも考えられる。

図 5 貯蔵部損失を考慮した最適運用決定アルゴリズム

Fig. 5. Algorithm for deciding optimal operation including storage losses.

以上の考察により、貯蔵部損失を考慮すると、複数台装置の最適運用を求めるためには、前節に示した1台の場合の運用決定手法を、複数台に対して逐次反復させる必要があると判断できる。このことは、DP SA 手法が一次元 DP を各変数につき逐次反復させて解き、最適解を得ているのと同様である。図 5 に最終的なアルゴリズムを示す。

5. 運用最適化の試算結果

本章では、提案した手法の有効性を確認するため、DP および DP SA との比較を含めて、種々の計算結果について述べる。なお、本論文で提案する高速計算法の計算例では、すべて運用増の初期きざみ幅を 0.5 MWh とし、運用増によるコスト改善が見られなくなったら、そのひとつ前の状態からきざみを 1/10 とする操作を、きざみ幅 0.005 MWh まで繰返している。

〈5・1〉 貯蔵部損失を無視した場合 表 2 のモデル負荷、図 6 のモデル系統に、第 3 章で提案したアルゴリズムを適用した。増分燃費曲線として表 3 の(1)に示すものを用い、〈3・1〉節中にも記述したように潮流最適化手法として直流法⁽³⁾を採用している。表 4 には、負荷率の異なる二つのケースの計算結果を示す。ケース 1 は負荷率 65% の場合で、貯蔵装置の運用量が容量制約にかからない例である。DP SA 手法に比

表 2 モデル負荷 (12 時間帯)

Table 2. Load data.

時間帯番号 (長さ 2 時間)	負 荷 (MW)		
	母 線 4	母 線 5	母 線 6
1	44.4	53.3	79.9
2	38.8	46.6	69.8
3	38.8	46.6	69.8
4	55.5	66.6	99.9
5	86.1	103.3	155.0
6	91.7	110.0	165.0
7	100.0	120.0	180.0
8	94.4	113.3	170.0
9	72.2	86.6	129.9
10	61.1	73.3	109.9
11	52.7	63.3	94.9
12	44.4	53.3	79.9

図 6 モデル系統

Fig. 6. Model system.

べ、貯蔵装置の運用量に若干の差はあるが、燃料費改善分はほぼ同じで、計算時間は提案した手法はるかに短いことが解る。ケース2は負荷率60%（ピーク負荷は同じ値で他の負荷を比例的に減少させたもの）の場合である。負荷率が低い場合貯蔵装置が容量いっぱい使用されており、ケース1よりも燃料費改善効果が高くなっている。DPSAによる計算時間がケース1より短いのは容量制約にかかっているためDPの逐次反復回数が少ないからである。

DPSAで最適運用を求める際には、一台の装置に着目し、貯蔵エネルギー量を量子化してDPを適用する操作を逐次反復させるのに対し、提案した手法では、 λ が最大、最小の時間帯間で、 H_t の値最大の貯蔵装置を選んで微少運用増を行なう操作の積み重ねを行なうので潮流最適化計算の回数はるかに少なくなる。このため、時間帯数、貯蔵装置数が多くなるほど提案した手法が有利であることは容易に理解できよう。

〈5・2〉貯蔵部損失を考慮した場合 貯蔵部損失が(25)式の特性を持つような貯蔵装置に対して、第4

表3 発電機定数

Table 3. Generator data.

モデル	火力 No.	母線 番号	増分燃料費特性 $dF/dP_T = 2\alpha P_T + \beta$ (千円/MWh)	
			α	β
(1)	1	1	0.00145	1.17
	2	2	0.00163	1.90
	3	3	0.00226	1.48
(2)	1	—	0.00300	1.00
	2	—	0.00200	1.00
	3	—	0.00100	1.00

表4 貯蔵部損失を無視した場合の計算結果

Table 4. Results of calculation without storage losses.

		ケース1		ケース2	
モデル負荷		表2の通り		ピーク負荷は同じ値で、パターンは表2と同様	
負荷率		65%		60%	
貯蔵装置番号		No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
設置母線		5	6	5	6
容量 (MWh)		100	100	100	100
変換部容量 (MW)		± 20	± 20	± 20	± 20
効率 η (%)		80	80	80	80
提案手法	運用量 (MWh)	20.6	58.1	74.2	100.0
	コスト改善分 (千円)	4.67		17.56	
	計算時間 (秒)	0.7		1.4	
DPSA法	運用量 (MWh)	20.0	65.0	75.0	100.0
	コスト改善分 (千円)	4.71		17.56	
	計算時間 (秒)	162.6		93.6	

* $\eta_{in} = \eta_{out} = \eta^{1/2}$

章で提案したアルゴリズムを適用した。負荷パターンは表5の通りである。増分燃費曲線は表3の(2)に示すものを用いる。簡単のため送電損失の影響は無視しており、貯蔵装置設置母線は特に指定しない。

表6は貯蔵装置が1台の場合で、容量500MWh、変換部効率 η が81%の装置に対する、貯蔵部損失中の a の値が異なる2ケースの計算結果を示す。ケース1は a が0.01、ケース2では a が0.03である。ケー

表5 モデル負荷 (24時間帯)

Table 5. Load data.

時間帯番号 (長さ1時間)	負荷 (MW)	時間帯番号 (長さ1時間)	負荷 (MW)
1	880.0	13	1,520.0
2	880.0	14	1,840.0
3	880.0	15	1,920.0
4	880.0	16	1,680.0
5	720.0	17	2,000.0
6	720.0	18	1,840.0
7	720.0	19	1,760.0
8	800.0	20	1,440.0
9	800.0	21	1,200.0
10	880.0	22	1,200.0
11	960.0	23	1,040.0
12	1,200.0	24	1,040.0

表6 貯蔵装置が一台の場合

Table 6. Results of calculation for one storage unit.

		ケース1	ケース2
貯蔵装置		容量 500 MWh $\eta = 81\%$ ($\eta_{in} = \eta_{out} = \eta^{1/2}$)	
係数 a		0.01	0.03
提案手法	運用量 (MWh)	500	429
	コスト改善分 (千円)	236.2	58.6
	計算時間 (秒)	0.6	0.5
DPSA法	運用量 (MWh)	500	401
	コスト改善分 (千円)	238.3	58.5
	計算時間 (秒)	5.3	5.6

図7 貯蔵装置が一台の場合の運用例

Fig. 7. Example of optimal operation of one storage unit.

表 7 貯蔵装置が複数台の場合
Table 7. Results of calculation for two storage units.

	ケース 1		ケース 2	
	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
貯蔵装置番号	No. 1	No. 2	No. 1	No. 2
容量 (MWh)	500	500	500	500
変換部容量 (MW)	±200	±200	±200	±200
効率 η^* (%)	80	81	80	81
係数 a	0.01	0.02	0.02	0.02
提案した手法	運用量 (MWh)	500	371	180
	コスト改善量 (千円)	253.6	149.1	
	計算時間 (秒)	13.5	4.3	
	逐次反復回数 (回)	13	5	
DPSA 法	運用量 (MWh)	500	353	157
	コスト改善量 (千円)	255.2	149.2	
	計算時間 (秒)	166.1	33.9	
	逐次反復回数 (回)	16	3	

* $\eta_{in} = \eta_{out} = \eta^{1/2}$

図 8 複数台貯蔵装置の運用例

Fig. 8. Example of optimal operation of two storage units.

ス 2 ではケース 1 と比べて貯蔵部損失の影響が大きい
ため、容量いっぱい使われてはいない。図 7 は提案
した手法による運用パターンを示したもので、貯蔵装
置の入出力時間帯には λ が傾斜を持つように運用され
ているのが解る。提案した手法では、(34) 式による近
似の影響で、DP の結果に比べ運用量に若干の差が生
じているが、コスト改善への影響は 1% 程度であり、
この誤差は実用上問題は無いと思われる。一方、計算
時間は DP の約 1/10 である。

表 7 には 2 台の貯蔵装置を用いたときの計算結果を
図 8 には運用パターンを示している。 a の値が異なる
ケース 1 では 2 台の装置の入出力時間帯が分離して
おり、ケース 2 では 2 台の装置の入出力が並行してい
るのが解る。貯蔵部損失を考慮すると、逐次反復が必
要となるので貯蔵部損失を無視したときよりも計算量
は多くなるが、表 7 に示すように提案した手法と DPSA
の逐次反復回数に著しい差はなく、この場合も計算時

間の点で本手法は明らかに有利である。なお、貯蔵部
損失、効率の異なる 6 台の貯蔵装置に対して本手法を
適用しても、上述の特徴を持った解が得られており、
多数台の場合の逐次反復の収束性には何ら問題はない
と思われる。

6. むすび

本論文では、将来実用化が期待される分散形電力貯
蔵装置の最適運用を決定するための高速な計算法を提
案し、計算例によりその高速性、有効性を明らかにし
た。この手法の特徴として、次のことが挙げられる。

(1) 最適運用決定問題にラグランジュ関数を導入
し協調方程式を導出したが、提案した手法は、協調方
程式の未定係数 γ, γ' を直接求めることなしに、数値
的には協調方程式を解くのと同等である。

(2) 貯蔵部損失があれば、入出力平衡に関する未
定係数 γ が時間の関数となり、複数の装置の運用最適
化で、一台ごとの最適化の逐次反復が必要となる。

なお、基本的に DP による文献 (4) の手法では、
最も良いケースで、DPSA に比べ 1/3 程度のが必要
であったが、高速計算法では、貯蔵部損失を考慮した
場合でも約 1/10 程度に短縮できる。

最後に絶えず御支援を頂いている、北海道大学小池
東一郎名誉教授、ならびに貴重な御討論を頂いた、北
見工業大学山城 迪教授はじめ電力研究室の皆様
に深謝申し上げます。また、計算は北海道大学大型計算
機センター HITAC M-280 H を使用したこと、更に
本研究実施に際して、文部省科学研究費エネルギー特
別研究の補助を受けたことを付記して関係各位への謝
辞にかえたい。

(昭和 59 年 10 月 26 日受付, 同 60 年 5 月 29 日再受付)

文 献

- (1) 小特集:「エネルギー貯蔵技術」電学誌, 101, 507 (昭 56-6)
- (2) R. E. Larson & A. J. Korsak: "A Dynamic Programming Successive Approximation Technique with Convergence Proofs" *Automatica* 6, 245 (1970)
- (3) 山城:「直流法による電力潮流最適化」電学論 B, 97, 679 (昭 52-11)
- (4) 諸住, 他:「電力系統における分散型電力貯蔵装置の最適運用」電学論 B, 103, 467 (昭 58-7)
- (5) 諸住, 他:「電力系統におけるエネルギー貯蔵装置の最適運用に関する研究—貯蔵部損失を考慮した場合—」電力技術研究会 PE-82-4 (昭 57-9)
- (6) 長谷川, 他:「エネルギー貯蔵装置の最適配置による電力系統の負荷率向上とその最適運用 (第四報)」昭和 57 年度文部省科研費エネルギー特別研究成果報告 138 (昭 58-2)
- (7) 皆川, 他:「電力系統におけるエネルギー貯蔵装置の最適運用に関する研究—高速計算法及び協調方程式による考察—」電力技術研究会 PE-83-19 (昭 58-7)
- (8) 皆川, 他:「電力系統におけるエネルギー貯蔵装置の最適運用に関する研究—高速計算法及び協調方程式による考察 (続報)—」電力技術研究会 PE-84-63 (昭 59-7)