HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	電力系統におけるエネルギー貯蔵装置の最適運用 : 線路潮流制約を考慮した運用最適化のための高速計算法
Author(s)	諸住, 哲; 西谷, 健一; 長谷川, 淳
Citation	北海道大學工學部研究報告, 132, 77-88
Issue Date	1986-07-31
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/41997
Type	bulletin (article)
File Information	132_77-88.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第132号（昭和61年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 132 (1986)

電力系統におけるエネルギー貯蔵装置の最適運用
——線路潮流制約を考慮した運用最適化のための高速計算法——

諸住　哲　西谷　健一　長谷川　淳

（昭和61年3月31日受理）

An Optimal Operating Strategy of Energy Storage Systems in Electric Power Systems
—— A Fast Calculating Method for the Optimization of Operation Considering Line Flow Limits ——

Satoshi MOROZUMI, Ken-ichi NISHIYA and Jun HASEGAWA

(Received March 31, 1986)

Abstract

A fast calculating method for optimization of operating strategies of energy storage systems in electric power systems was proposed by authors in the past and is extended to the case of considering line flow limits in this paper. It is possible to take the line flow limits into account by using an optimal power flow calculation with line flow limits as a subroutine of the fast calculating method. However, in this case, it becomes difficult to decide several modes of storage operation (such as input mode, output mode and waiting mode) simply by incremental cost of the power system as in the case without line flow limits. Thus, the authors propose a forecasting method, which calculates the cost change against small change of input or output power of storage system and can offer criteria available for the decision of the operating modes.

Using the forecasting method, some reconstructed manners of the fast calculating method are investigated and simulated. Based on the results of the simulations, it is concluded that the manner including successive applications of the fast calculating method for one storage system is avaiable for most cases of the optimizations for plural storage systems when the line flow limits are considered.

1. まえがき

近年，ピーク負荷対策として夜間などの軽負荷時に充電し，昼間の重負荷時にその電力を放出する運用が行える，各種のエネルギー貯蔵装置の電力系統への導入が注目されている[1]。貯蔵装置の運用方法としては，負荷変動サイクルに合わせたある最適化期間での系統の運転費，例えば日間での火力の総燃料費を最小化するような，いわゆる経済運用が基本となる。この運用最適化問題が多段階決定問題として定式化でき，動的計画（ＤＰ）法[2][3]により解が求まることは既に知ら

電気工学科　電力工学講座

れている[(4)~(6)]。ＤＰ法は運用最適化の上で，貯蔵装置の各種運用損失や運用制約を考慮するには便利な反面[(7)]，長い計算時間を要する欠点がある。特に貯蔵装置が複数ある場合には，状態変数を複数とした多次元ＤＰの形で扱うことになり，その実用性は乏しい。このような場合，１個の状態変数のみに着目したＤＰ計算法を，逐次各変数に対し繰り返してゆき，最適状態へ近づける逐次近似ＤＰ（ＤＰＳＡ）法[(8)(9)]の適用も考えられるが，多数台の貯蔵装置の運用最適化にはまだ計算時間の短縮という面で難がある。これに対し筆者らは，文献(10)，(11)，(12)等において，ＤＰ計算によらず複数の貯蔵装置の運用を最適化する，いわゆる高速計算法を提案してきた。この手法は，最も効果的な時間帯，貯蔵装置を選んで，その運用を微小量ずつ増加させる作業を積み重ねて最適運用に近づける，一種の傾斜法の形態をとっているところに特徴がある。

ところで，電力系統における貯蔵装置導入のメリットのひとつには，負荷側に設置されることによる潮流平滑化の効果が挙げられており，この効果による送電設備の軽減とその効率的な運用が期待されている[(1)]。このような状況が実現すれば，貯蔵装置が適正に運用されることにより，信頼性を損わずに効率的な系統運用が達成できるが，その反面，貯蔵装置が運用されなければ線路過負荷が起こりやすくなるものと思われる。そのため，貯蔵装置の運用決定に際しては，線路潮流の制約など送電設備の制約に十分気をつける必要があろう[(13)]。そこで本論文では，まず従来の高速計算法の概要を述べた後，特に線路潮流制約に着目し，この制約が貯蔵装置の運用最適化の上で与える影響を明らかにするとともに，これを考慮した場合の高速計算法の拡張を検討する。

２．貯蔵装置運用最適化問題の構造と高速計算法の概要

線路潮流制約を考慮した高速計算法の拡張に先立ち，本章では貯蔵装置の運用最適化問題の構造と，従来の高速計算法のアルゴリズムの概要について説明する。現実の電力系統では，刻々と変わる負荷需要に対応して，発電設備の出力も変動している。しかし，貯蔵装置運用最適化などのようなオフラインのスケジューリング問題では，負荷変動サイクルに合わせて日間などの最適化期間を定め，これをいくつかの時間帯に分割し，各時間帯内では負荷，発電機出力，貯蔵装置入出力は一定であると仮定する，離散値化されたモデルで考えるのが一般的である。従って，貯蔵装置の運用最適化問題は，最小化すべき目的関数を各時間帯での火力燃料費の総和，最適化すべき状態変数を各時間帯終わりでの貯蔵エネルギー量，制御変数を貯蔵装置の入出力と考えて，以下のように定式化できよう。すなわち，

① 貯蔵装置の動作を表わす差分方程式

・入力時（$P_{Sn}(k)<0$ なる時間帯k，貯蔵装置nに対して）

$$E_n(k)-E_n(k-1)=-E_{SLn}(k)-P_{Sn}(k)\cdot T\cdot\eta_{\mathrm{in}\,n} \tag{1}$$

・出力時（$P_{Sn}(k)>0$ なる時間帯 k，貯蔵装置 n に対して）

$$E_n(k)-E_n(k-1)=-E_{SLn}(k)-P_{Sn}(k)\cdot T/\eta_{\mathrm{out}\,n} \tag{2}$$

・待機時（$P_{Sn}(k)=0$ になる時間帯 k，貯蔵装置 n に対して）

$$E_n(k)-E_n(k-1)=-E_{SLn}(k) \tag{3}$$

② 等式制約条件

・各時間帯での需給平衡（$k=1$，……，K）

$$\sum_{m=1}^{M} P_{Tm}(k)+\sum_{n=1}^{N} P_{Sn}(k)-P_{LL}(k)=P_D(k) \tag{4}$$

・最適化期間の初めと終わりでの貯蔵エネルギー量の指定（$n=1$，……，N）

$$E_n(0)=E_0,\ \ E_n(K)=E_K \tag{5}$$

が成立しているもとで，

③　目的関数

$$\phi=\sum_{k=1}^{K}\sum_{m=1}^{M} C_m(P_{Tm}(k))\cdot T \tag{6}$$

を最小とするような状態変数の変化（軌道）$E_n(1)$，$E_n(2)$，……，$E_n(K-1)$を求める問題である。

また，この問題を解くにあたっては，少なくとも次のような運用上の制約を不等式制約条件の形で考慮する必要がある。

④　不等式制約条件

・貯蔵装置の貯蔵エネルギーの上下限($k=1$，……，K；$n=1$，……，N)

$$0 \leqq E_n(k) \leqq E_n^{UP} \tag{7}$$

・貯蔵装置の入出力の上下限($k=1$，……，K；$n=1$，……，N)

$$P_{Sn}^{LOW} \leqq P_{Sn}(k) \leqq P_{Sn}^{UP} \tag{8}$$

・火力発電所の出力の上下限

$$P_{Tm}^{LOW} \leqq P_{Tm}(k) \leqq P_{Tm}^{UP} \tag{9}$$

表1　変数、定数、添字

$P_s(k)$	：貯蔵装置入出力。但し、正のときが出力、負のときが入力。(MW)
$E(k)$	：時間帯 k の終末での貯蔵装置の貯蔵エネルギー量。(MW)
$E_{SL}(k)$	：貯蔵装置の時間帯 k での貯蔵エネルギー損失。(MWh)
η_{in}	：貯蔵装置入力効率。(%)
η_{out}	：貯蔵装置出力効率。(%)
T	：時間帯長。(時間)
$P_T(k)$	：火力発電所出力。(MW)
$C(P_T(k))$	：火力の燃料費特性。(円／時間)
$P_{LL}(k)$	：系統の送電損失。(MW)
$F(k)$	：線路潮流。(MW)
λ	：系統増分費。(円／MW)
dC/dP_T	：増分燃料費。(円／MW)
dF/dP	：線路潮流感度。
k	：時間帯番号。$k=1$ .....K
n	：貯蔵装置番号。$n=1$ .....N
m	：火力番号。$m=1$ .....M
l	：線路番号。$l=1$ L
α, β, γ	：発電機定数。
ξ, μ	：未定定数。
X^{UP}	：変数 X の上限。
X^{LOW}	：変数 X の下限。

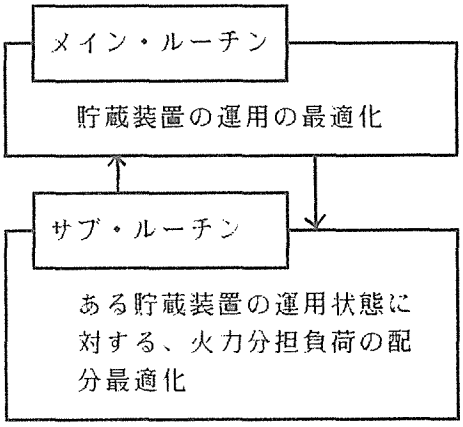


図1　貯蔵装置運用最適化計算の階層構造

なお，本論文で用いられている変数，定数，添字の意味は，表1の通りである。

目的関数(6)式は，その時間帯での火力出力のみに依存する燃料費の和の形になっているので，最適運用状態では各時間帯での火力分担負荷に対して，火力出力は最適配分されていることが必要条件となる。ゆえに，この最適化問題の解法として，常に火力間の配分については最適状態を保ちながら，貯蔵装置の運用を最適化する方法が考えられる。この解法は，図1のように上位に貯蔵装置の運用最適化ルーチン，下位に火力出力最適化ルーチンを持つ，階層的な構造となる。下位ルーチンとしては，送電損失 $P_{LL}(k)$ を無視する場合には等増分燃料費則[14]，考慮する場合には潮流最適化手法[15][16]を用いれば良い。上位ルーチンの手法としては，DP法を用いることも考えられるが，計算時間の面で難があり，筆者らはDP法によらないいわゆる高速計算法を提案してきた。この手法の特徴は，微小運用増によるコスト改善効果の最も大きい時間帯，貯蔵装置を選んで，その運用を微小量ずつ増やす手順を繰り返す，傾斜法の形態をとることで高速性を実現していることである。

ここで，貯蔵部損失 $E_{SL}(k)$ を無視した最も基本的な貯蔵装置運用最適化に対する，高速計算法のアルゴリズムを図2に示す。このアルゴリズムは，貯蔵装置が全く運用されていない状態を初期状態として計算を始め，常に，系統増分費 λ が最小となる時間帯を入力を増やすべき時間帯とし，また λ が最大となる時間帯を出力を増やすべき時間帯とし，さらに次式で定義される指標 H（ラージ η）が最大となる貯蔵装置を運用を増やすべき貯蔵装置として選択し，微小量ずつ運用を増やすという手順を，コスト改善が見られなくなるまで繰り返す形になっている。

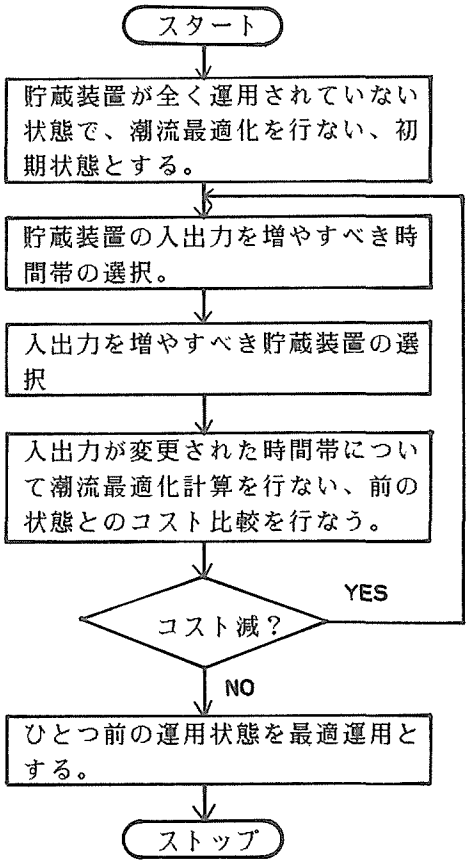


図2　従来の高速計算法のアルゴリズム

$$H_n = \eta_n \frac{L_{\mathrm{in}\,n}}{L_{\mathrm{out}\,n}} \tag{10}$$

但し，L_n は貯蔵装置設置母線でのペナルティ係数で，その母線での注入電力増による増分送電損失 $\partial_{LL}/\partial P_{Sn}$ から，次のように算出されるものである。

$$L_n = \frac{1}{1-\partial P_{LL}/\partial P_{Sn}} \tag{11}$$

また，添字 in, out はそれぞれ，入力および出力を増やすべき時間帯での値であることを意味している。この指標 H は，送電損失の影響をも含めた微小運用増分に対する貯蔵装置の等価的な効率という物理的意味を持っている[6]。

なお，貯蔵エネルギー損失 $E_{SL}(k)$ が無視できない場合，その中でも特に $E_{SL}(k)$ が運用状態に依存するような場合には，図2のアルゴリズムのような，運用を増やすべき時間帯や，貯蔵装置

の選択を一度に行ない，複数の貯蔵装置の運用を一括して増やしてゆく形での最適化は困難となる。この場合，１台ごとに高速計算法を適用する作業を逐次反復させる，逐次近似法の適用が必要となる[11][12]が，本論文の以下の議論では簡単化のため，貯蔵エネルギー損失は無視できるものと仮定して話を進めることにする。

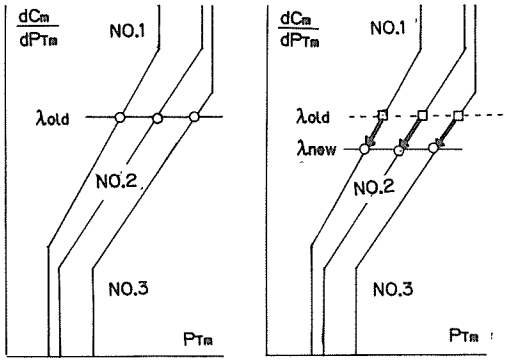
3．線路潮流制約を考慮する場合の問題点

線路潮流制約を考慮する場合に，図１の階層構造を持つ貯蔵装置運用最適化アルゴリズムを実現するためには，下位ルーチンとして線路潮流制約付き潮流最適化手法[17]を用いれば良い。このことは，前章での運用最適化問題の定式化において，新たに次式に示す線路潮流制約を考慮したことを意味する。

$$0 \leqq |F_l(k)| \leqq F_l^{UP} \tag{12}$$

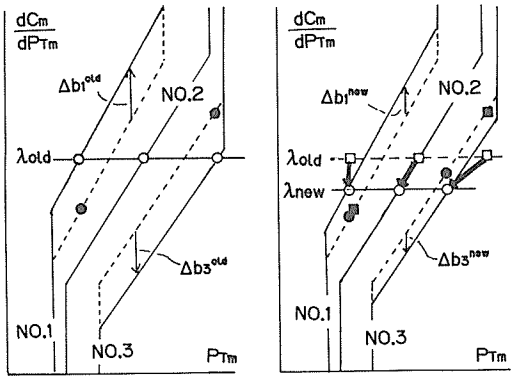
ところで，線路潮流制約にかかる時間帯がある場合，貯蔵装置の運用においてどのような影響が出るか考察してみよう。まず比較のために，線路潮流制約にかからない時間帯で，貯蔵装置の出力を微小量増やす場合から考えてみる。図３の(a)の状態は貯蔵装置出力が増やされる前における，火力の増分燃料費特性上の運転点の位置を示したもので，火力が分担すべき負荷に対して等λ則[14]に基づく負荷配分がなされている。次に図３(b)の状態は貯蔵装置出力が増やされた後の状態であるが，火力分担負荷が減少するため新しい等λ配分レベルλ_{new}の位置に運転点が移動している。厳密に送電損失を考慮すると，(a)の状態と(b)の状態では，潮流状態の変化に伴なうペナルティ係数の変化により，図中の増分燃料費特性は微妙に移動する。しかし，その移動は極めて小さく，火力の運転点の移動は増分燃料費特性に沿ったものとなる。この場合，同じ量の火力出力減に伴なうコスト減少量は，増分燃料費が高いほど大きくなるので，貯蔵装置の設置点にかかわらず，系統増分費λのより高い重負荷時間帯ほど貯蔵装置の出力には有利となり，また系統増分費λのより低い軽負荷時間帯ほど貯蔵装置の入力に有利な時間帯となっている。

一方，線路潮流制約にかかわる時間帯では，その線路の潮流を制約内，すなわち線路潮流制約の上限まで減らすために，図４(a)のように増分燃料費特性をΔｂだけ平行移動した状態で等λの火力出力配分を行なっているもの[17]と理解できる。すなわち，平行移動前の増分燃料費特性(図



(a) 出力増加前　　(b) 出力増加後

図３　貯蔵装置出力増による火力運転点の移動
(線路潮流制約を考慮しない場合)



(a) 出力増加前　　(b) 出力増加後

図４　貯蔵装置出力増による火力運転点の移動
(線路潮流制約を考慮した場合)

中点線）の上で考えると，黒丸印のように，等 λ 配分を逸脱した形で負荷配分を行ない潮流制約を満足させている。このような状況で貯蔵装置の出力を増やすと，これに伴い火力分担負荷が減少するのみでなく，増分燃料費特性の平行移動量 Δ b も大きく変化する。図4の例では，(b)のように，火力の運転点は白四角印から白丸印の位置へ移動することになる。図4の例のように，貯蔵装置の出力増により Δ b が縮小する場合には，火力分担負荷が減少するのみでなく，平行移動前の増分燃料費で考えた本来の等 λ 配分状態に近づくことを意味するので，貯蔵装置出力増による火力燃料費削減効果は大きい。逆に Δ b が増大する場合には，火力の運転は本来の等 λ 配分状態から離れてゆくので，燃料費削減効果は小さく，場合によっては火力出力合計が減っているにもかかわらず，燃料費が増加する可能性もある。一般に，制約にかかっている線路の潮流の下側にある貯蔵装置の出力増では前者の変化がみられ，上側では後者の変化がみられる。入力に対しても同様な議論ができ，この場合には制約線路の上側での入力増の方が燃料費上昇が少なく有利となる。結論的にいえば，線路潮流制約にかかる時間帯がある場合の貯蔵装置の運用最適化においては，入力および出力に有利な時間帯は貯蔵装置の設置点により異なる可能性があり，負荷の軽重だけで簡単に決めることができない。

4．コスト感度計算を用いた高速計算法

線路潮流制約にかかる時間帯がある場合には，負荷の軽重だけで貯蔵装置の入力および出力に適した時間帯を決められないという前章の結論を踏まえ，本章では新しい入力，出力時間帯選択基準を用いた高速計算法の拡張について検討する。ここで検討される新しい入力，出力時間帯選択基準は，線路潮流制約の影響を考慮したコスト感度計算による，微小入出力変化に対するコスト変化予想値である。

高速計算法は，常に火力分担負荷については制約内で各火力に最適配分されている状態を保ちながら，貯蔵装置の入出力を微少量ずつ増やしてゆく形態をとる。そこで，貯蔵装置が ΔP_{Sn} だけ入力を増やし，火力出力 P_{Tm} $(m=1,\cdots,M)$ が最適配分される状態から，$P_{Tm}+\Delta P_{Tm}$ という配分状態に変化したと考えよう。新しい状態においても，火力分担分については火力間で最適配分されているはずなので，火力出力増に伴うコスト変化 $\Delta\phi$ は最小の変化となっているはずである。ここで，火力の燃料費特性を表2のような2次式とすると，$\Delta\phi$ は次のようになる。

$$\Delta\phi=\sum_{m=1}^{M}\{\alpha_m\cdot(P_{Tm}+\Delta P_{Tm})^2+\beta_m(P_{Tm}+\Delta P_{Tm})-\alpha_m P_{Tm}^2-\beta_m P_{Tm}\} \tag{13}$$

元の状態での火力の増分燃料費 $2\alpha_m\cdot P_{Tm}+\beta_m$ を dC_m/dP_{Tm} で表わすと，(13)式は次のように書き直される。

$$\Delta\phi=\sum_{m=1}^{M}\left(\alpha_m\cdot\Delta P_{Tm}^2+\frac{dC_m}{dP_{Tm}}\cdot\Delta P_{Tm}\right) \tag{14}$$

ところで，火力出力変化は貯蔵装置の出力変化および送電損失の変化との間で，需給平衡がとれていなければならない。ゆえに，最小な $\Delta\phi$ を求めるにあたっては，送電損失の増加を ΔP_{LL} とし，貯蔵装置の入出力変化 ΔP_{sn} を出力増を正（入力増は負）として定義すれば，次の制約を考慮する必要がある。

$$\sum_{m=1}^{M}\Delta P_{Tm}+\Delta P_{Sn}-\Delta P_{LL}=0 \tag{15}$$

ΔP_{LL} は，増分送電損失を用いて次のように近似ができるので，

$$\Delta P_{LL}=\sum_{m=1}^{M}\frac{\partial P_{LL}}{\partial P_{Tm}}\cdot\Delta P_{Tm}+\frac{\partial P_{LL}}{\partial P_{Sn}}\cdot\Delta P_{Sn} \tag{16}$$

(15)式は，最終的に次のように書き直せる。

$$\sum_{m=1}^{M}\Delta P_{Tm}\cdot\left(1-\frac{\partial L_{LL}}{\partial P_{Tm}}\right)+\Delta P_{Sn}\cdot\left(1-\frac{\partial L_{LL}}{\partial P_{Sn}}\right)=0 \tag{17}$$

また，潮流が過負荷になるような線路があれば，火力の分担を変えることによりその線路の潮流は上限値まで戻した状態になっているはずであり，貯蔵装置の入出力変化があっても，火力の分担変更で過負荷を解消しなければならない状態が続いていれば，その線路の潮流は上限に張り付いたままであると考えられる。よって，制約に張り付いた線路 l に対しては，次のような制約条件があるものと考えられる。

$$\sum_{m=1}^{M}\frac{\partial F_l}{\partial P_{Tm}}\cdot\Delta P_{Tm}+\frac{\partial F_l}{\partial P_{Sn}}\cdot\Delta P_{Sn}=0 \qquad (l\in R) \tag{18}$$

但し，$\partial F_l/\partial P$ は火力や貯蔵装置出力増（入力減）に対する線路 l の潮流感度で，R は制約に張り付いている線路の集合である。

(17), (18)式の制約を考慮して $\Delta\phi$ を最小化する問題は，未定定数 ξ, μ を導入した，次式の拡張目的関数を最小化する問題として扱うことができる。

$$\Phi=\sum_{m=1}^{M}(\alpha_m\cdot\Delta P_{Tm}^2+\frac{dC_m}{dP_{Tm}}\cdot\Delta P_{Tm})+\xi\cdot\left\{\sum_{m=1}^{M}\Delta P_{Tm}(1-\frac{\partial P_{LL}}{\partial P_{Tm}})+\Delta P_{Sn}(1-\frac{\partial P_{LL}}{\partial P_{Sn}})\right\}$$
$$+\sum_{l\in R}\mu_l\left\{\sum_{m=1}^{M}\frac{\partial F_l}{\partial P_{Tm}}\cdot\Delta P_{Tm}+\frac{\partial F_l}{\partial P_{Sn}}\Delta P_{Sn}\right\} \tag{19}$$

ある貯蔵装置の入出力変化に対するコスト変化予想を目的としているので，Φ の最小化にあたっては，ΔP_{Sn}は既知量として扱うことになる。従って，(19)式を最小化する条件は，未知数 ΔP_{Tm}, ξ, μ_l について，$d\Phi/d\Delta P_{Tm}=0$, $d\Phi/\xi=0$, $d\Phi/d\mu_l=0$ が成立していることとなり，未知数 ΔP_{Tm}, ξ, μ_l を持つ，{(発電機数)＋1＋（潮流制約に張り付いている線路)} 本の連立1次方程式を形成する。

$$\left[\begin{array}{ccc:c:c}
2\alpha_1 & & 0 & 1-\partial P_{LL}/\partial P_{T1} & \partial F_l/\partial P_{T1} \quad \cdots \\
 & \ddots & & \vdots & \vdots \\
0 & & 2\alpha_M & 1-\partial P_{LL}/\partial P_{TM} & \partial F_l/\partial P_{TM} \quad \cdots \\
\hdashline
1-\frac{\partial P_{LL}}{\partial P_{T1}} & \cdots & 1-\frac{\partial P_{LL}}{\partial P_{TM}} & 0 & 0 \\
\hdashline
\frac{\partial F_l}{\partial P_{T1}} & \cdots & \frac{\partial F_l}{\partial P_{TM}} & 0 & 0 \\
\vdots & & \vdots & \vdots & \vdots
\end{array}\right]
\left[\begin{array}{c}
\Delta P_{T1} \\ \vdots \\ \Delta P_{TM} \\ \hdashline \xi \\ \hdashline \mu_l \\ \vdots
\end{array}\right]
=
\left[\begin{array}{c}
-dC_1/dP_{T1} \\ \vdots \\ -dC_M/dP_{TM} \\ \hdashline -\Delta P_{Sn}(1-\frac{\partial P_{LL}}{\partial P_{Sn}}) \\ \hdashline -\Delta P_{Sn}\frac{\partial F_l}{\partial P_{Sn}} \\ \vdots
\end{array}\right]$$

上の連立方程式を解けば，まずある貯蔵装置入出力変化 ΔP_{Sn}に対する火力出力変化 ΔP_{Tm} ($m=1$, …, M)が求まり，これを(14)式に代入すればコストの変化が算出できる。

以上が，本論文で提案する，貯蔵装置入出力変化に対するコスト感度算出法である。高速計算法での貯蔵装置の入力および出力時間帯の選択に本コスト感度計算によるコスト予想値を利用するためには，ある運用状態（初期状態および最適化途中の状態）において全時間帯にわたり，入

力および出力変化に対するコスト変化予想値を用意しなければならない。このコスト変化予想値は，高速計算法プログラムにおける一回の微小運用増による，入力時間帯から出力時間帯へ融通する電力量の増分を ΔE として，入力変化に伴なうコスト変化予想値を計算する場合には，ΔP_{Sn} を次のように定めて(20)式を解くことにより算出することになる。

$$\Delta P_{Sn(\mathrm{in})} = -\Delta E/(T \times \eta_{\mathrm{in}}) \tag{21}$$

また，出力変化に伴なうコスト変化予想値を計算する場合には，ΔP_{Sn}を

$$\Delta P_{Sn(\mathrm{out})} = (\Delta E \times \eta_{\mathrm{out}})/T \tag{22}$$

と定めて(20)式を解いて，コスト変化予想値を算出すれば良い。

複数台の貯蔵装置の場合については次章で述べることにして，ここではまず1台の貯蔵装置の運用最適化に対する高速計算法での利用方法を具体的に説明しよう。高速計算法の初期状態でまず，上述の要領で全時間帯にわたり微小入力増および微小出力増に対する2通りのコスト変化予想値を算出することになる。微小入力増は，入力増に対するコスト変化予想の中からコスト増が最小の時間帯を選び，その時間帯を対象に行なわれる。また微小出力増は，出力増に対するコスト変化予想の中からコスト減最大の時間帯を選び，その時間帯で実行される。運用が変更された時間帯では，新たな状態で潮流最適化計算を行ない実際のコスト変化を見るとともに，次なる運用増のために，この状態でのコスト変化予想値を再計算する。次の微小運用増では更新された予想値を含めたデータを用いて時間帯を選択し，同様な手順の運用増をコスト改善がみられなくなるまで繰り返す。具体的なアルゴリズムは，図5に示す通りである。

図5のアルゴリズムの計算例として，表2の発電機定数を持つ3台の発電所を含む，図6の5母線系統で，線路1－2の潮流上限を0.3 p. u. と設定したとき，表3のケース3のモデル負荷に対する，母線1または2に設置された貯蔵装置の運用最適化を考える。まずコスト変化予想値の妥当性を調べるため，2つの計算例について，貯蔵装置が運用されていない初期状態での最初の運用増に対して，入力または出力時間帯として選ばれた時間帯についての，本手法による火力出力変化予想値とコスト変化予想値と，運用増の後で行なわれる潮流最適化の結果評価されたそれらの値とを，表4において比較してみよう。本コスト感度計算に用いた潮流感度係数[18]と増分送電損失[16]は電力系統を線形回路とみなして算出する近似的なものであるが，運用状態を模擬する潮流最適化計算[17]では，非線形要素である送電損失を考慮したものとなっているため，本手法での火力出力変化の予想値には誤差がある。しかし，火力出力変化に対するコスト変化は，最適点近傍では極めてなだらかなので，この誤差の影響はコスト変化予想に対してはあまり大きくならな

表2　発　電　機　定　数

定数	$C_m = \alpha_m * P_{Tm}^2 + \beta_m * P_{Tm} + \gamma_m$		
発電機	α_m (10^3円/MW^2)	β_m (10^3円/MW)	γ_m (10^3円)
No. 1	0.01	1.50	10.0
No. 2	0.01	1.50	10.0
No. 3	0.004	1.80	20.0

表3　モデル負荷パターン

時間帯	負荷 (MW)		
	母線 1	母線 2	合計
1	50.0	110.0	160.0
2	50.0 (10.0)*	110.0 (150.0)*	160.0 (160.0)*
3	110.0 (70.0)**	220.0 (250.0)**	320.0 (320.0)**
4	110.0	220.0	320.0

基本パターンがケース1、＊印はケース3、4、
＊＊印はケース2、4で、時間帯長は3時間

表4　コスト変化予想値と潮流最適化計算後の結果との比較

ケース1（母線1に設置）		入力時間帯（時間帯2）			出力時間帯（時間帯3）		
		ΔP_{T1}	ΔP_{T2}	ΔP_{T3}	ΔP_{T1}	ΔP_{T2}	ΔP_{T3}
火力出力増	本手法による予想値	+7.50	+3.59	−7.31	−0.65	−1.10	−1.14
(MW)	潮流最適化再計算後の結果	+9.19	−0.47	−4.76	−0.69	−0.77	−1.71
コスト増	本手法による予想値	+3.395			−9.923		
(千円/時)	潮流最適化再計算後の結果	+4.790			−9.961		
ケース2（母線2に設置）		入力時間帯（時間帯3）			出力時間帯（時間帯4）		
		ΔP_{T1}	ΔP_{T2}	ΔP_{T3}	ΔP_{T1}	ΔP_{T2}	ΔP_{T3}
火力出力増	本手法による予想値	+1.03	+0.46	+2.38	+2.59	+1.14	−7.01
(MW)	潮流最適化再計算後の結果	+0.71	+1.40	+1.74	+3.64	−2.21	−4.62
コスト増	本手法による予想値	+9.177			−13.919		
(千円/時)	潮流最適化再計算後の結果	+9.256			−14.078		

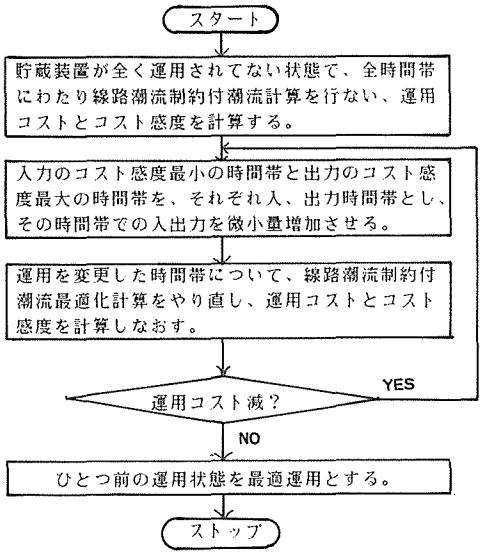


図5　1台の場合の高速計算法アルゴリズム
（コスト感度計算によるコスト変化予想利用）

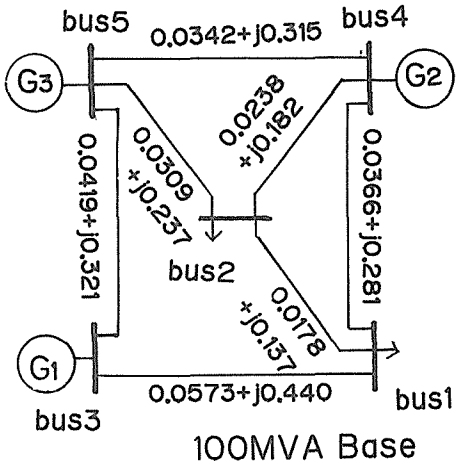


図6　5母線モデル系統

表5　高速計算法とDP法の結果の比較
（入出力は出力が正、入力が負となる。）

手法		時間帯	1	2	3	4	運用コスト改善量(千円)
ケース1	高速計算法	入出力(MW)	−12.0	−14.9	−11.2	30.5	35.07
		貯蔵量(MWh)	32.2	72.2	102.2	0.0	
	DP	入出力(MW)	−13.5	−13.5	−10.8	30.2	35.17
		貯蔵量(MWh)	36.1	72.2	101.2	0.0	
ケース2	高速計算法	入出力(MW)	−27.0	−27.2	26.9	16.4	76.23
		貯蔵量(MWh)	72.1	145.1	55.0	0.0	
	DP	入出力(MW)	−26.9	−27.0	27.3	16.0	76.25
		貯蔵量(MWh)	72.5	145.1	53.7	0.0	

い。しかし，ケース1の入力時間帯のように高負荷時間帯であるのにもかかわらず貯蔵装置入力を増やすなど，通常とは異なる運用がなされる場合に誤差が大きくなるケースが見られた。図5のアルゴリズムをそのまま適用すると，この誤差が計算終了判定の上で悪影響を及ぼした例がみられたので，実際のプログラミングでは，本手法のコスト変化予想値の中で最も効果的な入出力時間帯の組み合せでコスト改善が見られなくなっても，次点以下の時間帯の組合せについても改善が見られないかどうかを確認するように，組み直された。表5は，表4の2例について，高速計算法で求めた最終的な運用パターンと，DP法で求めた最適運用パターンを比較して載せている。本手法によるコスト変化予想は，貯蔵装置の運用時間帯選択の上では有効に働き，高速計算法でも十分満足できる結果が得られることがわかった。なおこの2例は，同一設定（系統，負荷パターン）においても，潮流制約にかかる線路があれば，貯蔵装置の設置点により入出力時間帯のパターンがちがってくる典型的な例である。

5．複数台の貯蔵装置の運用最適化への拡張

本章では，複数台の貯蔵装置の運用最適化に対する線路潮流制約を考慮した場合への高速計算法の拡張について検討する。前章までに述べてきたように，線路潮流制約を考慮する場合には貯蔵装置の設置点によって入，出力に適した時間帯が違ってくるうえ，仮に入出力時間帯が限定できたとしても，文献(19)，(20)に示すように，従来の H，(9)式，に相当する線路潮流制約の影響を考慮した貯蔵装置選択指標が複雑になる。そこで，本章では，前章で提案したコスト感度計算によるコスト変化予想を利用した高速計算法の拡張を検討する。

複数台の貯蔵装置の運用最適化のための高速計算法の形態としては，図2のアルゴリズムのように一括して複数の装置の最適化を試みることがまず考えられるが，この場合，コスト変化予想値を使った次の3種類の選択方法による貯蔵装置の微小運用増を繰り返す手法が考えられよう。

①（手法1）全時間帯，全貯蔵装置について用意されているコスト変化予想値の中で，出力時のコスト減と入力時のコスト増の絶対値の差が最大となる貯蔵装置，時間帯を選んで，入出力を微小量ずつ増やしてゆく方法

②（手法2）コスト変化予想値の中で，出力時のコスト減最大の貯蔵装置と出力時間帯を選び，入力時間帯については，その装置について入力増によるコスト増最小のものを選んで，入出力を微小量ずつ増やしてゆく方法。

③（手法3）コスト変化予想値の中で，入力時のコスト増最小の貯蔵装置と入力時間帯を選び，出力時間帯については，その装置について出力増によるコスト減最大のものを選んで，入出力を微小量ずつ増やしてゆく方法。

これらの手法のうち，手法1を全く線路潮流制約にかからない場合に適用するときには，指標 H を用いた従来の高速計算法と等価な手法となる。また，手法2は出力によるコスト減を最大化，手法3は入力によるコスト増を最小化することを目標とする手法と理解できる。

さらに，複数台の高速計算法の形態としては，貯蔵部損失を考慮した場合と同様に逐次近似を行なう方法，すなわち手法4が考えられる。

④（手法4）前章の1台ごとの高速計算法の適用を，逐次各貯蔵装置に対して繰り返してゆき，最適運用へ近づけてゆく方法。

これらの4手法を比較するため，図6の5母線系統の線路1－2に0.3 p.u. の潮流制約を設け，表3の4ケースの負荷パターンを与えたときの，母線1および2に設置された効率80％の貯蔵装置の運用を求めた結果を，表6に示している。表6には，比較のため，DPSA手法による結果(最

表6 各手法の比較

		手法1	手法2	手法3	手法4	DPSA法
ケース1	コスト改善	16.2	16.0	14.8	16.0	16.2
	計算時間	5.2	3.6	3.5	43.5	1140.6
	最適性	○	○	△	○	——
ケース2	コスト改善	62.6	76.2	52.9	76.0	76.3
	計算時間	3.8	4.9	6.5	20.0	649.1
	最適性	×	○	×	○	——
ケース3	コスト改善	63.6	51.6	62.7	63.1	63.7
	計算時間	3.6	6.5	3.6	25.4	833.8
	最適性	×	×	○	○	——
ケース4	コスト改善	109.9	109.8	100.9	123.6	123.7
	計算時間	4.2	7.2	7.2	19.3	692.0
	最適性	×	×	×	○	——

但し、コスト改善は(千円／日)、計算時間は(秒)である。また、最適性は、DPSA法のコスト改善量に対し、95%以上のときは○印、90%以上のときは△印、90%未満のときは×印とした。

適な運用結果）も示している。4ケースの負荷パターンは，ケース1は潮流制約にかかる時間帯が無いケース，ケース2は重負荷時間帯（時間帯3）で潮流制約にかかるケース，ケース3は軽負荷時間帯（時間帯2）で潮流制約にかかるケース，ケース4は軽，重負荷時間帯両方（時間帯2および3）で潮流制約にかかるケースである。

表6の結果では，手法1はケース1において有効な手法であるが，潮流制約にかかる時間帯のあるケース2～4においては最適解が得られていないことがわかる。また，手法2はケース2，手法3はケース3に対して有効ではあるものの，手法2は軽負荷，手法3は重負荷時間帯で潮流制約にかかっているケースで最適解が求められない。一方，逐次近似を行なう手法4は計算時間の面で手法1～3に劣るものの，すべてのケースで満足できる解が得られている。手法4が汎用的である理由としては，次のような説明ができよう。逐次近似は，複数ある貯蔵装置のうち1台に着目した最適化を全装置について逐次反復してゆくわけだが，ある1台の最適化にあたっては，その1回前の反復で決定された運用をキャンセルしてもう一度運用最適化をやり直していることになる。この時，新たな最適化の結果での運用量が，前回の反復の時の運用量よりも減少していることがあり得る。このことは，逐次近似手法全体でみれば，一度増やしたある貯蔵装置の運用を，最適化の過程の中で減少させる方向で調整していることを意味する。これに対し，手法1～3では，一度増やされた貯蔵装置の運用は減らされることはない。線路潮流制約を考慮した貯蔵装置の運用最適化では，他の貯蔵装置の運用があまり増えていない状態でコスト的に有利なある貯蔵装置の運用が，他の貯蔵装置の運用増によりコスト的に不利になるケースが出てくるものと思われる。このようなケースでは，手法4のような貯蔵装置の運用を減少させる方向に調整できる機能がないと，最適運用は求められないため，計算例では手法4のみが汎用的となった。従って手法1～3のように一括して複数の装置の運用を最適化する形の高速計算法を汎用化するためには，一度増やされた貯蔵装置の運用が最適化の過程でコスト的に不利となる場合に，その運用を減らすような工夫を組み込む必要があるものと思われる。

6．あとがき

本論文では，エネルギー貯蔵装置の運用最適化のための高速計算法を，線路潮流制約を考慮する場合に拡張する方法を検討してきた。高速計算法は傾斜法の形態をとり，DP法に比べ高速に運用が求まる利点がある反面，各種制約の考慮などが複雑となる欠点もある。線路潮流制約を考慮する場合においても，前章の結論に示すように，複数の貯蔵装置の運用を一括して増やしてゆくだけの従来の形の高速計算法アルゴリズムでは最適運用を求めることは困難であり，逐次近似を用いるか，あるいは従来の形のアルゴリズムに何らかの形で一度増やした貯蔵装置の運用を減らせる工夫を組み込んだ形の手法を開発する必要があることがわかった。

4章で提案したコスト感度計算によるコスト変化予想は，貯蔵装置の入出力時間帯を選択する上で有効である。本論文での計算例では，コスト感度計算に用いられる潮流感度係数，増分送電損失は，電力系統を線形回路として近似する直流法に基づいていたため，計算精度の面で若干の問題点が生じたが，この解消についても今後の検討課題のひとつとなろう。

なお，本研究のプログラム作成に際しては，北海道大学大学院工学研究科安田恵一郎君の御協力を頂いたことに深く感謝したします。また，本研究の実施に際しては，文部省科学研究費エネルギー特別の補助を受けたこと，計算は北海道大学大型計算機センターM－280Hを利用させて頂いたことを付記して関係各位への謝辞にかえたい。

参考文献

(1) 上之薗他　「小特集；エネルギー貯蔵技術」電気学会雑誌昭和56年5月号
(2) 小田中　「ダイナミック・プログラミング」　丸善
(3) 関根　「数理計画法」　岩波書店
(4) F. J. Rees et al. Joint Automatic Control Conf. P. 19 (1970)
(5) C. Dechamps et al. IEEE PES Winter Meeting A80, 085-1 (1980)
(6) 諸住他　電気学会論文誌B分冊，103巻7号，P. 467　(昭和58年7月)
(7) 諸住他　電気学会論文誌B分冊，105巻4号，P. 355　(昭和60年4月)
(8) 深尾他　「電気系統へのコンピューターの応用」　電気書院
(9) R. E. Larson et al. Automatica Vol. 6, P. 245 (1970)
(10) 皆川他　電気学会電力技術研究会　PE－83－19　(昭和58年7月)
(11) 皆川他　電気学会電力技術研究会　PE－84－63　(昭和59年7月)
(12) 皆川他　電気学会論文誌B分冊，106巻3号，P. 225　(昭和61年3月)
(13) 安田他　電気学会電力技術研究会　PE－85－38　(昭和60年7月)
(14) 関根　「電力系統工学」　電気書院
(15) H. H. Happ IEEE Trans. PAS－93, No. 3, P. 820 (1974)
(16) 山城　電気学会論文誌B分冊，97巻11号，P. 679　(昭和52年11月)
(17) 安田他　昭和59年電気関係学会北海道支部大会　158　(昭和59年9月)
(18) 植田他　電気学会論文誌B分冊，101巻7号，P. 367　(昭和56年7月)
(19) 諸住他　電気学会電力技術研究会　PE－85－37　(昭和60年7月)
(20) 諸住他　昭和60年電気関係学会北海道支部大会　137　(昭和60年9月)
(21) 諸住他　昭和60年電気関係学会北海道支部大会　138　(昭和60年9月)