



Title	経済運用からみた電力システムのエネルギー貯蔵装置の最適配置
Author(s)	諸住, 哲; Morozumi, Satoshi; 西谷, 健一 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 131, 1-9
Issue Date	1986-05-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41987
Type	departmental bulletin paper
File Information	131_1-10.pdf



経済運用からみた電力系統のエネルギー貯蔵装置の最適配置

諸住 哲 西谷 健一 長谷川 淳

(昭和 60 年 12 月 27 日受理)

An Optimal Allocation of Energy Storage Systems in Electric Power Systems from an Economical Operating Viewpoint

Satoshi MOROZUMI, Kenichi NISHIYA and Jun HASEGAWA

(Received December 27, 1985)

Abstract

This paper describes an optimal allocation of energy storage systems in a power system from an economical operating viewpoint.

First, the optimal location of one energy storage system is discussed. Although it may be decided basically by a comparison run among all operating costs for each candidate location, an effective technique for the reduction of the number of locations where it would be required to calculate the operating cost is proposed in this paper. Some features of the optimal location are concluded from various results based on numerical simulations.

The optimal allocation of plural energy storage systems is also discussed in the latter part of this paper. It would be very difficult to find the optimal allocation by comparison of all allocating pattern, if the number of storage units or allocating sites increases in number. The present workers propose two algorithms by which to determine optimal or suboptimal allocation effectively. One of them, which is based on the branch-and-bound method is effective in determining the optimal one. The other, which includes successive applications of the optimal locating method in the earlier part of this paper, is only sufficient in finding the optimal or suboptimal one, however it may be faster than the first algorithm. The two algorithms proposed are compared and discussed based on the results of some example problems.

1. ま え が き

近年、電力需要の伸びと原子力発電の普及に伴って火力発電所の負荷率が低下する傾向にあり、その対策として電力系統へのエネルギー貯蔵装置の導入が検討されている。電力系統用エネルギー貯蔵装置¹⁾としては、大容量集中型のものとして揚水発電、超電導マグネットなど、また小容量分散型のものとして二次電池、フライホイールなどが挙げられる。これらのうち、揚水発電は既に実用化されており、その他のものは現在研究開発中であるが、その中でも分散型の二次電池^{2)~5)}の実用化が最も早いと予想されている。

電力系統における貯蔵装置の運用形態としては、電力系統の各種の運用制約をクリアするために運用されるニーズ運用の形も考えられるが、一般的にはある運用期間中の系統の運用コスト、
電気工学科 電力工学講座

例えば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ろう。ところで二次電池のような分散型の貯蔵装置は、揚水発電など大容量型のものとは比べ立地の制約が少なく、系統内に比較的自由に配置できるメリットがある。この場合、系統内の貯蔵装置の設置点、配置パターンにより、経済運用を行った時の運用コストは異なる⁶⁾ため、分散型貯蔵装置については系統内にもどのように配置をすべきかという最適配置の問題が生じてくる。

本論文は、この貯蔵装置の最適配置問題を、経済運用の立場から論じている。具体的には、まず1台の貯蔵装置の最適設置の問題から考え、設置点決定のためのアルゴリズムの確立と、計算例による最適設置点の傾向についての考察を行なっている。さらに、複数の貯蔵装置を考えた最適配置問題を考察し、分枝限定法に基づいた最適な配置を求めるアルゴリズムと、1台の最適設置の手順を逐次積み重ねて最適ないし準最適な配置を求めるアルゴリズムとを提案して、計算例によりこれらの手法の得失を論じている。

2. 1台の貯蔵装置の最適設置点の決定

本章では、容量、効率が決っている1台の貯蔵装置に対し、ある運用期間中の系統内の火力の総燃料費を最小とする設置点を決める最適配置問題を考える。最適設置点の決定は、原則的には設置候補点すべてに対し、その点に貯蔵装置を設置した場合の最適運用を求め、各候補点での運用コストを比較することにより可能であるが、ここでは筆者らが文献6)で定義した対象時間帯限定時等価効率とも言うべき指標 H (ラージ η) を用いて、最適設置点決定の手順を効率化する方法を提案する。また、モデルシステムを用いた計算例を基に、最適設置点の傾向に対しても考察を加える。

2.1 最適設置点決定アルゴリズムの効率化

先に述べたように、最適設置点は原則的には各候補点での最適運用を比較することにより決定できるが、もし何らかの方法で不利な設置点を事前に考察対象から除去できれば計算量の軽減が可能となる。ところで、筆者らは文献6)において次式の指標 H を定義し、複数の貯蔵装置の運用最適化計算の中で、この指標により貯蔵装置間の優先運用、協調運用の判定を行ない、計算量の軽減を図る工夫を提案した。

$$H_j = \eta \cdot \frac{L_j(t_{in})}{L_j(t_{out})} \quad (1)$$

ここで、 η は貯蔵装置の効率であり、 L_j は次式のように、貯蔵装置設置母線 j での増分送電損失 $\partial P_i / \partial P_j$ から計算できるペナルティ係数である。

$$L_j = \frac{1}{1 - (\partial P_i / \partial P_j)} \quad (2)$$

なお、変数 t_{in} , t_{out} は、それぞれ貯蔵装置が入力、あるいは出力を行なっているある時間を表わしている。この指標 H_j は物理的には、入力および出力を行なっているある2時点に注目し、この間でさらに貯蔵装置の運用を微小量増加させた時の、増加分に対する送電損失の影響を含めた等価的な効率という意味があり、値が大きい装置ほど微小運用増による燃料費改善効果大きい。

文献6)では、最も負荷の軽い時間を t_{in} 、最も重い時

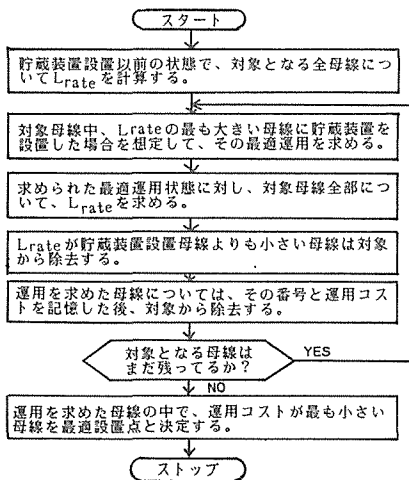


図1 最適設置点決定アルゴリズム

間を t_{out} とし、系統に複数台分散配置されている貯蔵装置間の運用上の優先関係、協調関係を指標 H_j を用いて判定し運用最適化計算を効率化する手法を提案した。最適設置点決定問題においても同様の考え方に基づいて、上述の優先関係の上で明らかに劣るとと思われる設置点を指標 H_j を用いて判断し、そこでの運用を求めることなく検討対象からはずすことができる。具体的な最適設置点決定アルゴリズムは図1に示す通りであるが、この問題では貯蔵装置の効率 η は予め与えられているので、この判断は(1)式右辺のペナルティ係数の比の部分のみで行なえる。従って、これ以降はこの比を L_{rate} として次式で定義する。

$$L_{rate-j} = \frac{L_j(t_{in})}{L_j(t_{out})} \tag{3}$$

2.2 モデル系統による計算例

本節では、モデル系統による計算例により、図1のアルゴリズムの具体的なメカニズムを説明し、最終的に求められた最適設置点の傾向についても考察を加える。モデル系統としては図2の30母線系統を考える。図中の矢印はピーク負荷時の潮流の向きと大きさを表わしている。また、各母線での負荷パターンは貯蔵装置が入、出力を行なう時間帯のみに着目し、表1に示すようにピーク負荷が6時間、その半分のベース負荷が6時間ある2時間帯モデルを考える。また同表には、この負荷パターンに対し、貯蔵装置を全く運用しない場合について求められた、各母線での L_{rate} の値の大きさの順序も示している。

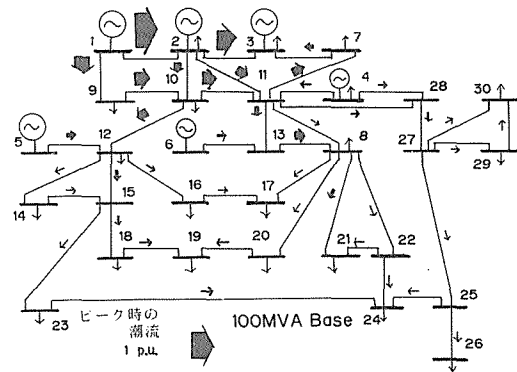


図2 モデル系統

表1 ピーク負荷と初期状態での L_{rate} の順位

母線番号	ピーク負荷 (MW)	L_{rate} の順位	母線番号	ピーク負荷 (MW)	L_{rate} の順位
1		30	16	4.20	23
2	26.04	29	17	10.80	18
3	113.04	4	18	3.84	7
4	36.00	24	19	11.40	5
5		26	20	2.64	9
6		20	21	20.40	12
7	27.36	8	22		13
8	6.96	19	23	3.84	10
9	2.88	28	24	10.44	6
10	9.12	25	25		11
11		22	26	4.20	3
12	13.44	26	27		16
13		20	28		17
14	7.44	15	29	2.88	2
15	9.84	14	30	12.72	1

いま、効率 $\eta=80\%$ のある容量を持った貯蔵装置を、母線 2, 3, 27, 30 のいずれかに設置する問題を例にとろう。図1のアルゴリズムに基づけば、表1の L_{rate} の順位で一番若い母線 30 での運用をまず求めることになる。図3は母線 30 で貯蔵装置の運用量と各母線での L_{rate} の値の関係を示したものである。通常、貯蔵装置が運用されると、設置母線での L_{rate} の値が最も激しく落ちる傾向にあり、着目する貯蔵装置の容量が大きいと、それが運用されることにより他の母線との間で L_{rate} の値の大小が逆転する可能性が高くなる。例えば図3で、貯蔵装置容量が 10 MWh の場合には、母線 30 と母線 3 との間で L_{rate} の逆転が起っている。図4は貯蔵装置の容量を横軸にとり、その貯蔵装置を各候補点に設置した場合の1日あたりのコスト改善量を見たグラフである。この図では、母線 30 は小容量の装置では有利な設置点であるが、容量が大きくなるにつれて他の母線の方が有利な設置点となっていく特徴を読みとることができる。図3、図4ではともに、小容量側で母線 30 の特性曲線が上にありながら、容量が大きくなるに従って他の母線との間で逆転現象を見せているが、この逆転現象は全て図4

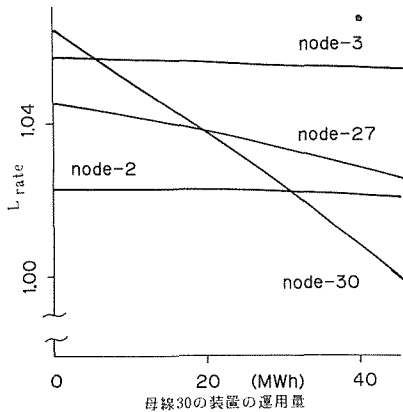


図3 L_rateの値の推移

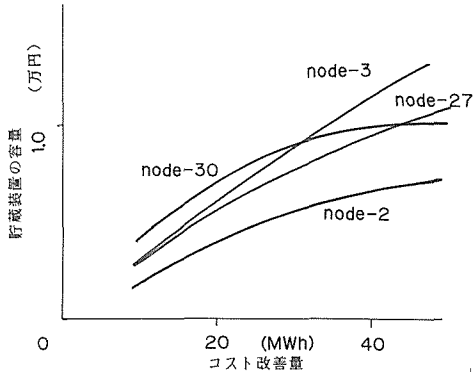


図4 コスト改善量の推移

の方が大容量側で起っている。このことは10 MWhの装置の例で考えれば、図3で母線30との間で逆転が起らない母線2, 27については、図4でも母線30との間でコスト改善量の面で逆転が起らないと考えてよいことを意味している。従って、母線30での運用を求めた段階で、母線2, 27は母線30より有利な設置点になり得ないと判定でき、これらの母線での運用を求めずに最適設置点を決めてさしつかえないことになる。図3と図4の逆転点の位置関係は、元来(1)式の H_j が貯蔵装置の微小運用増についての等価的な効率という物理的意味を持つことを考えれば、貯蔵装置の運用問題全般に成立すると考えられるので、図1のアルゴリズムのメカニズムは貯蔵装置の最適設置問題一般に適用可能と言えよう。

図2のモデル系統の全母線を候補点として、 $\eta=80\%$ で貯蔵容量が50 MWh, 10 MWhの貯蔵装

表2 50 MWhの装置の場合の計算過程

1. 初期状態でのL_rateの算出。
2. 母線30に設置した場合の運用を求め、(この結果、母線1が候補を除外される。)
3. 母線29に設置した場合の運用を求め、
4. 母線26に設置した場合の運用を求め、
5. 母線3に設置した場合の運用を求め、(この結果、母線2, 4, 17, 21, 22, 27, 28が除外。)
6. 母線19に設置した場合の運用を求め、
7. 母線24に設置した場合の運用を求め、
8. 母線18に設置した場合の運用を求め、
9. 母線20に設置した場合の運用を求め、
10. 母線23に設置した場合の運用を求め、
11. 母線25に設置した場合の運用を求め、
12. 母線30, 29, 26, 3, 19, 24, 18, 20, 23, 25での運用を比較し、母線3が最適と決定。

表3 10 MWhの装置の場合の計算過程

1. 初期状態でのL_rateの算出。
2. 母線30に設置した場合の運用を求め、(この結果、母線1, 2, 4~17, 21~23, 25, 27~29, 除外)
3. 母線26に設置した場合の運用を求め、
4. 母線3に設置した場合の運用を求め、
5. 母線30, 26, 3での運用を比較し、母線30が最適と決定。

表4 貯蔵装置の設置点の順位

母線番号	50MWhの順位	10MWhの順位	母線番号	50MWhの順位	10MWhの順位
1	30	30	16	21	24
2	28	29	17	16	17
3	1	3	18	9	6
4	17	23	19	4	4
5	22	25	20	8	9
6	12	20	21	5	12
7	2	10	22	6	13
8	14	21	23	15	8
9	27	28	24	3	4
10	19	27	25	20	11
11	10	22	26	29	7
12	22	25	27	18	16
13	12	19	28	7	15
14	25	18	29	26	2
15	11	14	30	24	1

置の最適設置点決定を図1のアルゴリズムで行なった場合の過程を表2, 表3に示す。比較のため表4に、全母線を対象に厳密に最適運用を求めた結果から得た、50 MWh, および10 MWhの装置のコスト改善の大きさの順位をそれぞれ示している。表2, 3で、ある母線Aでの運用を求めた結果によって検討対象候補から除去されることになった母線Bは、表4の順位では必ず母線Aよりも低くなっていることがたしかめられよう。また図1のアルゴリズムにより最終的に得られた最適設置点(表2, 表3の結果)も表4の結果と一致しており、提案したアルゴリズムが有効に働いていることがわかる。なお、このア

- ① TABLEのK行目まで記述されている1～m台目までの装置の最適運用を求める。
- ② さらに、各候補点に仮想的に十分大きい貯蔵装置を付加し、それらの運用量合計が残りのm+1～M台目の装置の容量合計になるように最適運用を求め、この時のコストをCOST(K)とする。

なお、COST(K)の算出においては高速化のため、文献11)の手法を用いた。

図5のアルゴリズムIの計算のメカニズムを説明するため、2候補点3貯蔵装置の配置問題を考えてみよう。この場合、問題は2候補点での運用量を2軸としたコスト平面を用いて説明できる。2候補点は図2のモデルシステムの母線3と30とし、3台の貯蔵装置はそれぞれ、A(20 MWh)、B(20 MWh)、C(10 MWh)とする。コスト平面の縦軸、横軸はそれぞれ母線3、30での貯蔵装置の運用を表わしている。

まず、装置Aを3、30の両地点にそれぞれ置いた場合の達成可能コストを求める(図7)。Aを3に置いた場合(A_3)の達成可能最小コスト点は●印、Aを30に置いた場合(A_{30})は○印で示されている。●印の方のコストがより小さいので、次の段階(図8)では A_3 の方を部分領域に分割する。すなわち、 A_3 の状態、装置Bをそれぞれ3、30に設置した場合の達成可能コストを求め、 A_{30} 、 A_3B_3 、 A_3B_{30} の3つの部分領域の間でコストを比較する。先に示した図6のTABLE

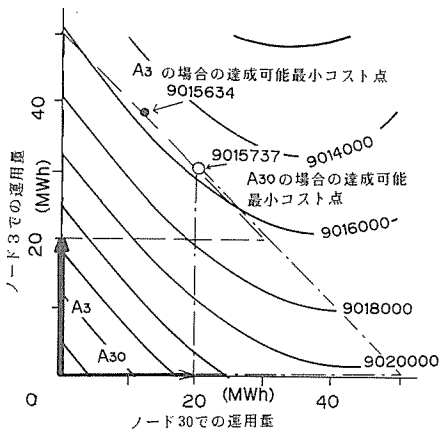


図7 コスト平面上の動き(1)

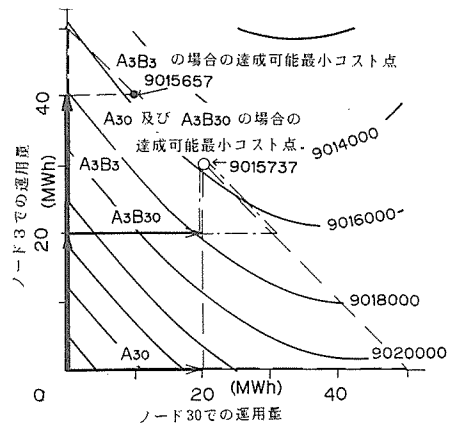


図8 コスト平面上の動き(2)

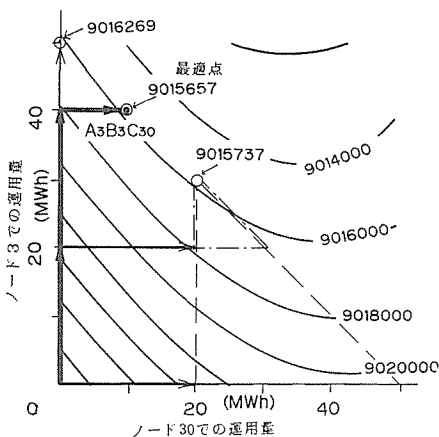


図9 コスト平面上の動き(3)

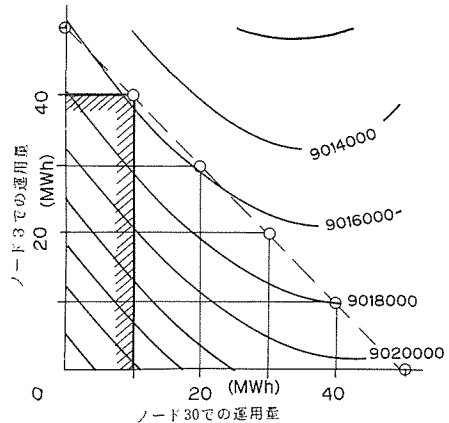


図10 最終的に求めた配置での運用制約領域(アルゴリズムI)

この例はこの段階のものである。ここで A_3B_3 が達成可能コスト最小であるから、さらに次の段階 (図9)では、 A_3B_3 を $A_3B_3C_3$, $A_3B_3C_{30}$ の2つの部分領域に分け、これと前の段階で残った A_{30} , A_3B_{30} との合計4つの状態の間でコスト比較を行なう。この中のコスト最小の部分領域 $A_3B_3C_{30}$ では、全ての貯蔵装置の設置点が決まっているので、これが最適配置パターンとなる。この配置パターンでのコスト平面上の運用可能な領域、すなわち制約領域は図10の形となり、右上隅がコスト最小点となる。

アルゴリズム I を用いれば、M 台を N カ所の候補点に配置するパターンのうち、運用コスト最小の配置パターンが求まるが、配置を決定すべき装置の分枝の順位は容量が大きいものを優先させると計算時間の面で効率的である。

3.2 積み重ね法による配置決定法 (アルゴリズム II)

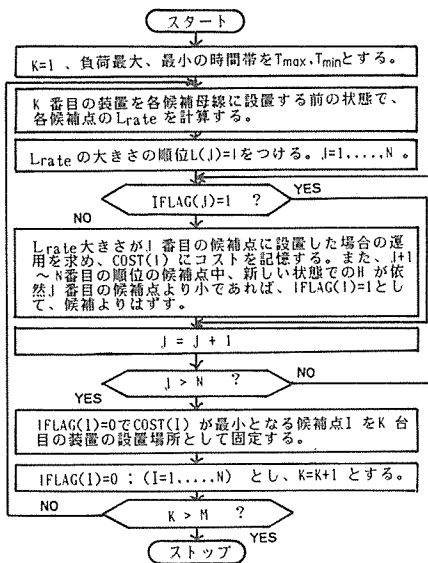


図11 積み重ねによるアルゴリズム (アルゴリズム II)

ある。このアルゴリズムによる計算手順を、アルゴリズム I と同じ設定でコスト平面上で説明しよう。

まず、A についての設置点を求める。3 と 30 の両地点を比較した場合、30 の方が運用コストが小さいので、A の設置点は 30 となる。次に A が 30 にある状態で B の設置点を求める。今度は 3 の方がコストが小さいので、B の設置点は 3 と決められる。最後に C についても、A が 30、B が 3 に設置されている状態で設置点を求めると、C は 3 に設置した方がコストが小さくなるので、最終的には $A_3B_3C_3$ の配置パターンが決まることになる。以上の手順をコスト平面上で描くと図

12 のようになり、求まった配置パターンの運用制約領域は図13の形となった。この結果はアルゴリズム I で求まった結果 (図10) とは異なっており、アルゴリズム II で求まる配置は必ずしも最適解である保障はないことがわかる。しかし、一般的にコスト関数は凸性を持っていることから、

ここでは、前章で提案した1台の貯蔵装置の最適配置決定を逐次積み重ね、複数の装置の配置を決定する方法を考える。具体的なアルゴリズムは図11の通りで

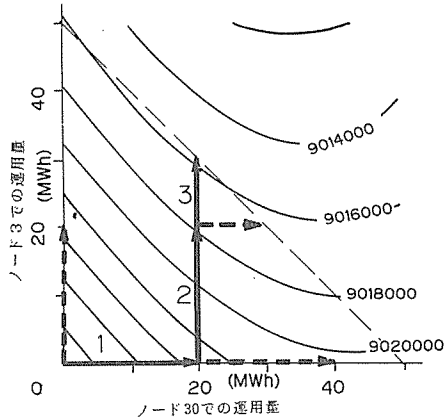


図12 コスト平面上の動き(4)

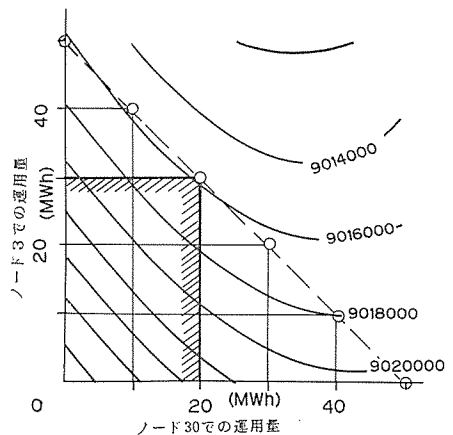


図13 最終的に求まった配置での運用制約領域 (アルゴリズム II)

この方法では最適な解が求まらなかった場合でも準最適な解が得られるものと思われる。

表5 計算例

	ケース1	ケース2	ケース3
装置容量	Ⓐ-20MWh Ⓑ-20MWh Ⓒ-10MWh	Ⓐ-20MWh Ⓑ-20MWh Ⓒ-20MWh	Ⓐ-20MWh Ⓑ-20MWh Ⓒ-10MWh Ⓓ-10MWh
候補母線	3,30	3,19,30	3,30
アルゴリズム I			
結果	Ⓐ-3 Ⓑ-3 Ⓒ-30	Ⓐ-30 Ⓑ-3 Ⓒ-19	Ⓐ-3 Ⓑ-3 Ⓒ-30 Ⓓ-3
コスト(万円)	901.566	901.396	901.396
最適性	○	○	○
計算時間	61.2(SEC)	338.7(SEC)	100.1(SEC)
アルゴリズム II			
結果	Ⓐ-30 Ⓑ-3 Ⓒ-3	Ⓐ-30 Ⓑ-3 Ⓒ-19	Ⓐ-30 Ⓑ-3 Ⓒ-3 Ⓓ-3
コスト(万円)	901.574	901.396	901.399
最適性	△	○	△
計算時間	49.4(SEC)	66.5(SEC)	74.8(SEC)

また、アルゴリズム I を追加分の配置に対して再び適用しても、全体での最適性はもはや保障されなくなる。一方、アルゴリズム II では、ケース 2 以外は準最適解が求まっているものの、計算時間はアルゴリズム I より短くなる傾向にある。アルゴリズム II は、逐次 1 台ごとの最適化を積み重ねていくので計算の分割が可能で、同定格小容量の貯蔵装置多数台の配置問題では最適解が得られる可能性が高い。従って、電池のような分散型貯蔵装置は、同一規格のモジュールを逐次系統に増設していく形で導入されるものと考えられているため、アルゴリズム II が比較的実用的な手法と言えよう。

4. あとがき

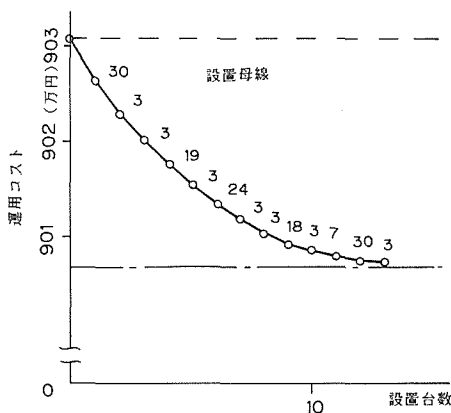


図 14 10 MWh 貯蔵装置設置台数とコストの関係

本研究では、経済運用の観点から電力系統におけるエネルギー貯蔵装置の最適配分問題を考察した。負荷パターンとしては日間の確定論的なものを考えて配置を論じ、最適配置の基本的な特徴を明らかにした。現実の配置問題では、もちろん変動するより長期間の負荷に対して最適化を行わなければならないが、その場合には負荷を確率論的に扱ったり、あるいは年間の負荷持続曲線などに基いて配置を考える必要がある。

図 14 はアルゴリズム II を用いて、図 2 のモデル系統に多数台の 10 MWh の貯蔵装置を配置していったときの運用コスト改善の様子を表わしたものである。同図から明らかなように、設置される貯蔵装置の台数が多くなるにつれて、1 台あたりのコスト改善効果が飽和してくる。また、配置パターンによる運用コストの差は基本的には送電損失の違いに起因するため、本論文のシミュレーション等でも明らかなように、全体の運用コストに対して占める割合はあまり大きくならない。従って

3.3 計算例による手法の比較

図 2 のモデル系統において、アルゴリズム I, II を適用した場合の計算例を表 5 に示す。ケース 1 は、3.1, 3.2 節でコスト平面を使って説明したケースである。ケース 2 は同じ容量の 3 台の装置を 3 カ所の候補点に、ケース 3 は 2 種類の容量の 4 台の装置を 2 カ所の候補点に配置する場合である。アルゴリズム I では各ケースとも最適解が求まっているが、ケース 2 のように同容量の装置を多数配置する場合などで計算時間がかかなり長くなる傾向があり、候補点あるいは装置台数が増えると適用困難となることも予想される。

現実問題では、運用コストのみならず貯蔵装置運用による付加的価値、例えば系統の信頼度、安定度の改善効果などを考慮して配置されることが重要と思われ、これらの新しい評価方法の確立が今後の検討課題となろう。

最後に、日頃から貴重な御支援、御指導をいただいている本学部電気工学科、藤原 一教授に深く感謝申し上げます。また、本研究実施に際しては、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、計算は北海道大学大型計算機センターを利用させていただいたことを付記して関係各位への謝辞にかえたい。

文 献

- 1) 上之蘭他 「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) 電気学会技術報告（II部）第60号 （昭和52年）
- 3) 電気学会技術報告（II部）第103号 （昭和55年）
- 4) 電総研調査報告 第201号 （昭和54年）
- 5) 諸住他 電気学会論文誌 B分冊 105巻4号 P.355（昭和60年）
- 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) 諸住他 昭和57年電気四学会北海道支部大会 96
- 8) 諸住他 昭和58年電気学会全国大会 961
- 9) 諸住他 電気学会電力技術研究会 PE-83-22（昭和58年）
- 10) 関根 「数理計画法」岩波書店
- 11) 皆川他 電気学会論文誌 B分冊 106巻3号 P.225（昭和61年）