

停電損失を考慮した電力貯蔵装置 の最適配置手法*

奈良 宏 一**
仲村 宏 一**
中村 陽 一**
山城 迪**

(昭和57年4月30日受理)

The Optimum Arrangement of Electric Energy Storage Facilities Taking into Account the Cost of Interruption of Electrical Service

by Koichi NARA, Koichi NAKAMURA, Yoichi NAKAMURA
and Susumu YAMASHIRO

It is expected that electrical energy storage facilities will be installed for improving load factor. Although there are no constraints for places to install, ordinarily, a site is considered as a possibility if it is one where transmission loss is minimized or where voltage or frequency can be easily controlled by setting up storage facilities.

If storage facilities are installed at load buses, electric power would be maintained by supply from the storage facilities to the loads, even when outage should occur at the power source side of the buses in question.

In this paper, the authors propose a method to determine the arrangement of storage facilities, for the objective of minimizing the cost of interruption of electrical service, assuming that the facilities are installed at load buses.

The problem is formulated and solved by using the dynamic programming method.

From the examples, it is confirmed that we can reduce the cost of interruption by the ratio of (maximum output)/(interrupted load), if the corresponding maximum capacity is 2~5 times larger than the mean outage duration time, and also it is confirmed that it is better to install larger storage facilities for larger capacity loads and for loads with larger mean outage duration time.

1. ま え が き

近年、ピーク負荷需要の増大に伴い、その平均負荷との比が大きくなり、いわゆる負荷率

* 昭和56年度電気四学会北海道支部連合大会(昭和56年10月)で発表

** 北見工業大学電気工学科

が悪化してきた。一方、電力発生側からすると、発電所立地点を新規に選択するのが難かしくなり、ピーク負荷の増加に見合う発電所の建設が困難になりつつある。さらに、そのため、建設可能な発電所の単機容量を大きくせざるを得なくなり、結局、短時間の起動停止あるいは大きな出力変化の困難な大容量火力発電所または原子力発電所が多くなってきた。そこで、昼間ピーク負荷は小さく、一方、深夜最低負荷はこれら大容量発電所の定格出力に見合うように大きくなってほしい。すなわち、需要の平滑化による負荷率の向上が電力発生側からは望まれる。

現在、負荷率向上のための電力貯蔵装置として揚水発電が実用に供されているが、効率が悪く、また立地点も限られるため、さらに、より効率が良く、扱い易くなることが期待されている他の電力貯蔵装置（たとえば、超電導コイル、フライホイール、二次電池など）も負荷率向上の目的に利用されることが考えられている¹⁾。

負荷率向上の目的で電力貯蔵装置を設置する場合、設備容量(kWh)と最大出力(kW)が決まれば、設置場所に関する制限は負荷率向上の観点からはない。設置場所としては、送電損失最小となる場所、または、電圧・周波数制御に都合の良い場所などが考えられており、送電損失の観点からは大容量負荷端に設置すれば効率が良いことが既に報告されている²⁾。したがって、フライホイールや二次電池のように立地条件にほとんど制約がない小規模電力貯蔵装置については、将来、電力系統の負荷端に設置されるであろうことが予想される。

ところで、電力系統における最悪の事態が停電であることを考えると、電力貯蔵装置は負荷の無停電の目的のためにも活用されることが望ましく、また、西暦2,000年代にはその実現も期待されている³⁾。そのような観点から、本論文では、電力貯蔵装置が負荷側変電所に設置されると仮定した場合に、予想される停電による損失（以下「停電損失」と呼ぶ）の期待値を最小にするような電力貯蔵装置の配置を求める手法⁴⁾について述べている。

以下では、停電時に電力貯蔵装置は定格まで充電されており、他母線に設置されている貯蔵装置からの応援はないものと仮定した場合の問題を、動的計画問題(DP)として定式化し、この解法と例題による結果を示して考察を加えている。

2. 問題の定式化

2.1 期待停電損失最小化問題

いま、負荷母線に番号を付し、その最大を n とする。 i 番目の母線が停電継続時間 t_{i1} と $t_{i,i+1}(=t_{i1}+\Delta t)$ の間の長さだけ停電する確率を $P_i(t_{i,i+1})$ とすると、負荷 i の停電損失の期待値は次式で与えられる

$$E(F_i) = \sum_{t_i=1}^{\infty} P_i(t_{i,i+1}) \cdot F_i(t_i, x_i, y_i) \quad (1)$$

ここで、 $F_i(t_i, s, p)$ は、定格出力 s 、定格容量 p の電力貯蔵装置を有する母線 i が、 $t_i \div t_{i+1}$ だけ停電したときの停電損失の大きさである。停電損失については文献7)に詳しい。(1)式を

用いると、全系統の停電損失の期待値は次式で与えられる。

$$F = \sum_{i \in I} E(F_i) \tag{2}$$

ここで、

$$I = [i | \text{停電負荷母線番号}] \tag{3}$$

ただし、電力貯蔵装置が設置されている場合の F_i は (2, 3) 節のような方法で計算されねばならない。なお、本論文では、停電時、電力貯蔵装置は定格容量まで充電されているものとし、また、負荷への電力の供給は、停電が発生した母線に設置されている貯蔵装置のみからなされ、他母線に設置されている貯蔵装置からの応援はないものと仮定している。

ところで、本問題の目的は、設置されるべき電力貯蔵装置の定格容量と定格出力を決めることであるが、貯蔵装置の種類や設置箇所の物理的条件によって、それらに制約が生じるのが普通である。また、最小運転継続可能時間についても、現実的な値を採用する必要がある。

以上を考慮すると、問題は、期待停電損失 F を最小にするように、電力貯蔵装置の定格出力 x_i 、定格容量 y_i を決定する問題として、以下のように定式化できる。

〔目的関数〕

$$F = \sum_{i \in I} E(F_i) \rightarrow \text{最小} \tag{4}$$

〔制約条件〕

a. 設備容量制約

$$\left. \begin{aligned} \sum \alpha_i &\leq WH_0 && \text{(全体設備)} \\ y_{00} &\leq y_i \leq y_{01i} && \text{(個別設備)} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

b. 瞬時電力制約

$$\left. \begin{aligned} \sum x_i &\leq W_0 && \text{(全体設備)} \\ x_{00} &\leq x_i \leq x_{01i} && \text{(個別設備)} \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

c. 最小供給可能時間制約

$$y_i / x_i \geq T_{0i} \tag{7}$$

ただし、

- y_i : 母線 i に設置される貯蔵装置の設備容量
- y_{00} : " " " " の下限
- y_{01i} : " " " " の上限
- x_i : " " の定格出力
- x_{00} : " " " " の下限
- x_{01i} : " " " " の上限

T_{0i} : 母線 i に設置される貯蔵装置の最大電力供給可能継続時間

WH_0 : 全システムにおける設備容量の上限

W_0 : 全システムについて合計した定格出力の上限

2.2 電力貯蔵装置の特性

電力貯蔵装置は、たとえば二次電池を考えると⁵⁾,

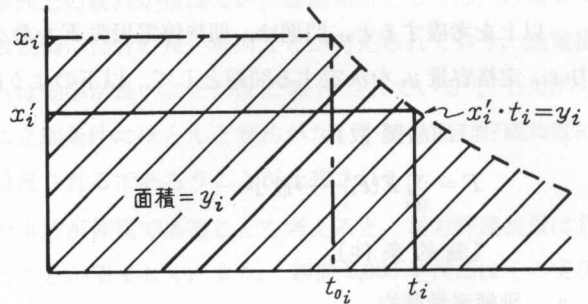
$$y_i = \int_0^{t_{\max}} x'_i dt \quad (8)$$

の放電特性を持っており、 t_{\max} は x'_i の履歴によって決まる。停電時間がある程度短いと仮定すると、停電中の負荷の大きさ x'_i は停電直前のままほぼ一定と考えて良い。この場合、(8) 式は (9) 式のように書き直すことができる。

$$y_i = x'_i t_i \quad (9)$$

ただし、 t_i : 放電継続可能時間

したがって、停電期間中の負荷が一定と仮定した場合の設備の運転可能範囲は第1図の斜線部で表わすことができる。



第1図 電力貯蔵装置の運転可能範囲

2.3 停電損失の計算

いま、母線 i の負荷の大きさを w_i とし、

$$w_{si} = w_i - x_i \quad (10)$$

$$t_{0i} = y_i / x_i \quad (11)$$

と定義する。 $F_i(w, i)$ を母線 i において w の大きさの負荷が時間 t だけ停電した場合の停電損失の大きさとする、 w_i と x_i の大きさによって停電損失 F_i を以下のように場合に分けて考えることができる。

(a) $w_i > x_i$ の場合

① $t_i > t_{0i}$ の場合

$$\begin{cases} 0 < t_i \leq t_{0i} \text{ のとき, (停電負荷)} = w_{si} \\ t_{0i} < t_i \text{ のとき, (停電負荷)} = w_i \end{cases}$$

であるから、

$$F_i(t, x_i, y_i) = F_i(w_{si}, t_i) + F_i(x_i, t'_i) \quad (12)$$

ただし、

$$\begin{cases} t'_i = 0 & (0 < t_i \leq t_{0i}) \\ t'_i = t_i - t_{0i} & (t_{0i} < t_i) \end{cases}$$

② $0 < t_i \leq t_{0i}$ の場合

$$F_i(t, x_i, y_i) = F_i(w_{di}, t_i) \tag{13}$$

(b) $0 < w_i < x_i$ の場合

① $t_i > t_{ip} = y_i/w_i$ の場合

$$F_i(t, x_i, y_i) = F_i(w_i, t_i) \tag{14}$$

② $0 < t_i < t_{ip}$ の場合

$$F_i(t, x_i, y_i) = 0 \tag{15}$$

①, ② の場合をまとめると,

$$F_i(t, x_i, y_i) = F_i(w_i, t_i) = F_i(w_{di}, t_i) + F_i(x_i, t_i) \tag{16}$$

(a), (b) の場合をまとめると,

$$F_i(t, x_i, y_i) = F_i(w_{di}, t_i) + F_i(w_{0i}, t_i) \tag{17}$$

ただし,

$$\left. \begin{aligned} t'_i &= 0 && (0 < t_i \leq y_i/w_{0i}) \\ t'_i &= t_i - y_i/w_{0i} && (t_i > y_i/w_{0i}) \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

$$\left. \begin{aligned} w_{di} &= w_i - x_i && (w_i > x_i) \\ w_{di} &= 0 && (0 < w_i \leq x_i) \end{aligned} \right\} \tag{19}$$

$$\left. \begin{aligned} w_{0i} &= x_i && (w_i > x_i) \\ w_{0i} &= w_i && (0 < w_i \leq x_i) \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

となり, 結局, (17) 式より電力貯蔵装置からの停電時の供給をも含めた停電損失 F_i の計算が可能である。

3. 問題の解法

3.1 期待停電損失の計算

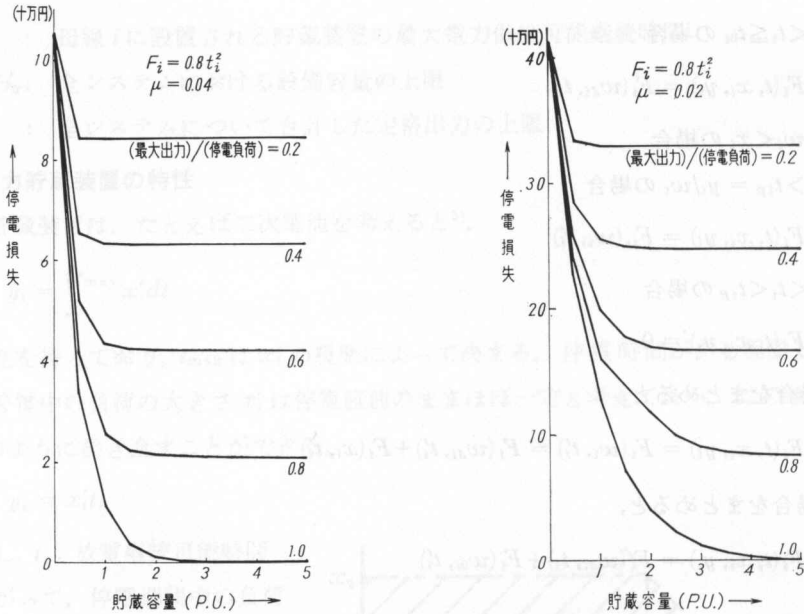
$P_i(t_l, t_{l+1})$ は $\Delta t = t_{l+1} - t_l$ がわかれば, 負荷 i の過去の停電統計より, 付録に示すような方法で計算できる。また, 期待停電損失 $E(F_i)$ は, (1) 式から計算できる。

ところで, 期待停電損失の傾向について多少検討してみよう。

停電継続時間に対する停電損失曲線を $F_i = 0.8 t_i^2$, 停電復旧率を $\mu = 0.04$ とした場合に, 貯蔵装置の定格出力と貯蔵容量をパラメータとして期待停電損失 $E(F_i)$ の値を計算した例を第2図(a), (b)に示している。他の停電損失や停電復旧率に対してもほぼ同様の傾向を示している。

結局, 第2図から,

- (1) 十分な貯蔵容量があれば, 停電負荷に対する貯蔵装置定格出力の割合にほぼ等しい停電損失の減少を期待できる。



(a) 平均停電継続時間が25分の場合

(b) 平均停電継続時間が50分の場合

第2図 電力貯蔵装置設置の効果

(2) 貯蔵容量については、ほぼ負荷の平均停電継続時間の2倍程度、負荷に供給可能であれば、80~90%程度の効果が期待でき、さらに、およそ5倍以上にしても、それ以上の効果の向上は期待できない。

ことがわかる。

3.2 問題の解法

(4)~(7)式の問題は、 x_i, y_i をパラメータとした離散形動的計画(DP)法によって解くことができる。いま、 $X = \sum x_i, Y = \sum y_i$ とおき、段(Step)に負荷番号をとると、次の漸化式を作ることができる。

$$f_i(X, Y) = \min_{x_i, y_i} [EF_i(x_i, y_i) + f_{i-1}(X - x_i, Y - y_i)] \quad (21)$$

ここで、 $EF_i(x_i, y_i)$ は母線*i*の貯蔵設備の定格出力を x_i 、定格容量を y_i と仮定した場合の母線*i*の期待停電損失であり、 $f_i(X, Y)$ は、母線1から母線*i*までに設置されている貯蔵装置の定格出力の合計を X 、貯蔵容量の合計を Y とした場合の、母線1から*i*までの最小累積停電損失の期待値を表わしている。なお、

$$f_0(X, Y) = 0 \quad (22)$$

である。

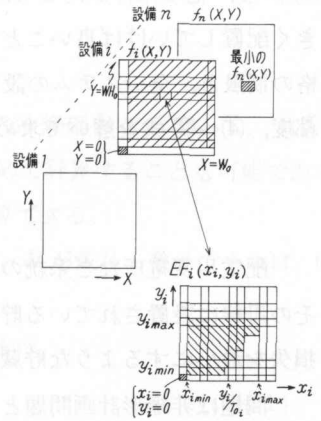
一方、(5)~(7)式の制約から、

$$\min(X, x_{0i}) \geq x_i \geq x_{00} \quad (23)$$

$$\min(Y, y_{01i}) \geq y_i \geq \max(x_i \cdot T_{0i}, y_{00}) \quad (24)$$

であり、これから、(21)式における x_i, y_i の変化範囲が定まる。
 $x_i=0, y_i=0$ のみが起り得、 $x_i=0, y_i>0, x_i>0, y_i=0$ のケースはあり得ない。したがって、各ステップにおける調査対象は第3図の斜線部のように限定でき、演算の高速化を図ることがができる。なお、貯蔵設備は、最小出力 x_{00} 、最小貯蔵容量 y_{00} 単位で増設可能なものとする。 x_{00} と y_{00} は製作、設置に要する費用などから、一般にあらかじめ決まっているものと考えて良い。

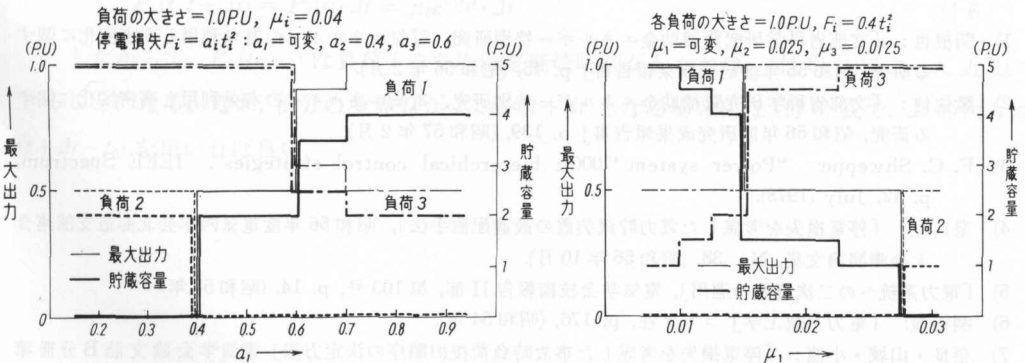
X と Y の変化範囲は、 $0 \leq x \leq W_0, 0 \leq Y \leq WH_0$ である。ただし、 $X=0, Y=0$ のみがあり得、 $X=0, Y>0$ 及び $X>0, Y=0$ のケースはあり得ない。また、変化幅 $\Delta X, \Delta Y$ は各々、 x_{00}, y_{00} に等しいものとする。



第3図 動的計画法による解法

4. 簡単な例題の結果と考察

3 負荷母線に貯蔵装置を設置するような簡単な例題を考える。この例題における設備の定格電力の合計 W_0 を 6.0 P.U., 合計貯蔵容量の最大 WH_0 を 1.5 P.U. とし、 $\Delta X=x_{00}=0.1$ (P.U.), $\Delta Y=y_{00}=0.5$ (P.U.) とする。また、各母線における負荷の大きさを 1.0 P.U., $x_{01}=1.0$ (P.U.), $y_{01}=5.0$ (P.U.) とし、負荷 1 の平均停電継続時間と停電損失をパラメータとして変化させて、(4)~(7)式を解いた結果をまとめて第4図(a), (b)に示す。ただし、平均停電継続時間を変化させる場合には、全負荷の停電損失を等しく、 $F_1=F_2=F_3=0.4 t^2$, μ_1 (可変), $\mu_2=0.025$, $\mu_3=0.0125$ とし、一方、停電損失を変化させる場合には、 $\mu_1=\mu_2=\mu_3=0.04$, $F_1=a t^2$ (a_1 可変), $F_2=0.4 t^2$, $F_3=0.6 t^2$ としている。全般的な傾向として、第4図(a)から明らかなように、他の条件が同じであれば、停電損失が大きい程大きな貯蔵容量及び定格出力が必要であることがわかる。同様に、第4図



(a) 停電損失 (a_1) 可変の場合 (b) 平均停電継続時間 (μ_1) 可変の場合

第4図 例題の結果

(b) から、他の条件が同じであれば、平均停電継続時間が長い順に貯蔵容量及び定格出力を大きく配置していけば良いことがわかる。なお、正確な配分については、個々の設備における定格の制限と、全システムの設備の定格出力の合計及び貯蔵容量の合計の制約によるため、その都度、(4)~(7)式を解いて求めねばならない。

5. あとがき

配電用変電所など系統の負荷側母線に電力貯蔵装置を設置する場合、当該母線停電時に、その母線に設置されている貯蔵装置から負荷に電力を供給できることを考慮して、負荷の停電損失を最小にするような貯蔵装置の配置を求める手法について提案した。

問題は非線形計画問題として定式化され、動的計画法を用いて解き得ることを示した。

結果として、電力貯蔵装置の定格容量が平均停電継続時間の2倍以上ある場合、ほぼ、(定格出力)/(負荷の大きさ)に比例して停電損失を減少でき得ることがわかった。また、定格容量を平均停電継続時間の5倍以上にしても、停電損失減少の効果はほとんど向上しないこともわかった。さらに、他の条件が同じであれば、平均停電継続時間の長い負荷、停電損失の大きい負荷程、大容量の貯蔵装置を設備した方が良いことが確認できた。

今後、他母線からの応援を考慮した場合、貯蔵装置が定格容量まで充電されている保障がない場合について考慮し、また、停電損失の大きさと負荷の大きさの相互関係が、貯蔵装置の最適配置に与える影響などについて検討を進めたい。

なお、この研究は、文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究(2)の補助によってなされたものである。

最後に、一連の研究において貴重な御助言をいただき、小池東一郎北見工業大学長、長谷川淳北海道大学工学部助教授に深謝申し上げます。

文 献

- 1) 関根也:「文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究, 電気エネルギーの有効利用と高密度化に関する研究, 昭和55年度研究成果報告書」p. 45, (昭和56年2月).
- 2) 諸住他:「文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究, 電気エネルギーの有効利用と高密度化に関する研究, 昭和56年度研究成果報告書」p. 139, (昭和57年2月).
- 3) F. C. Shweppe: "Power system '2000': hierarchical control strategies". IEEE Spectrum, p. 42, July (1978).
- 4) 奈良他:「停電損失を考慮した電力貯蔵装置の最適配置手法」, 昭和56年度電気四学会北海道支部連合大会講演論文集, No. 38, (昭和56年10月).
- 5) 「電力系統への二次電池の適用」, 電気学会技術報告II部, 第103号, p. 14, (昭和55年).
- 6) 関根他:「電力系統工学」コロナ社, p. 176, (昭和54年).
- 7) 奈良・山城・小池:「停電損失を考慮した事故時負荷復旧順序の決定方法」電気学会論文誌B分冊第101巻2号 p. 77 (昭和56年2月).

付 録

$P_i(t_{l,t+1})$ の計算

ある負荷 i の停電が t 時間継続する確率は、系統構成機器の故障確率を考慮して、負荷 i を停電に至らしめる機器のすべての故障パターンの組合せを求めて計算することも可能であるが、過去の負荷 i の停電に関する統計データから次のように計算できる。

過去の停電継続時間を $k \times \Delta t$ 毎に区切って度数表を作ると、 Δt が数秒～数分であれば、明らかに k →大に伴って度数は減少していく傾向にある。

いま、平均停電継続時間を $k \cdot \Delta t = T_0$ とすると、停電復旧率は、

$$\mu = 1/T_0 \tag{付 1}$$

で与えられる。一方、

$$P(t) = P_r\{k\Delta t \leq t\} \tag{付 2}$$

として停電継続時間が t より小さい確率を定義する。

さて、時刻 u で停電していた負荷が $u+t+\Delta t$ でも停電中である確率は、 $1-P(t+\Delta t)$ であるから、これを、その負荷が $u+t$ で停電していて、 $u+t+\Delta t$ までに復旧しない確率に等しいとおくことによって、次式を得る。

$$1-P(t+\Delta t) = \{1-P(t)\}(1-\mu\Delta t) \tag{付 3}$$

これから、時刻 t までに停電が復旧する確率が計算できる。すなわち⁶⁾、

$$P(t) = 1 - e^{-\mu t} \tag{付 4}$$

これを微分すると、確率密度関数

$$P'(t) = \mu e^{-\mu t} \tag{付 5}$$

が得られ、これから次式を得る。

$$P_i(t, t+\Delta t) = P'_i(t) \cdot \Delta t = \mu_i e^{-\mu_i t} \cdot \Delta t \tag{付 6}$$

したがって、 $P_i(t_{l,t+1})$ は負荷 i の平均停電継続時間がわかれば、(付 6) 式によって近似できることになる。なお、積分の境界 t_0 が $t < t_0 < t + \Delta t$ となる場合には (付 6) 式で、 Δt の代りに、 $(t + \Delta t - t_0)$ を用いれば良い。