UDC 621.311:621.355:621.318.4:537.312.62

論文

60-B111

分散形電力貯蔵装置の系統復旧時に 効果的な配置と運用法

正員 奈良 宏 一 (北見工大)

正員 山城 迪 (北見工大)

1. ま え が き

現在、電力貯蔵装置としては揚水発電所が唯一実用に供されているが、更に効率が良いかあるいは立地点に制約を受けない二次電池などの新形電力貯蔵装置が開発されつつある⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

負荷率向上の目的で電力貯蔵装置を設置する場合、送電損失や経済性などの観点から、系統の負荷端に分散配置する方が良いとされている^{(4),(5)}。その場合、大容量発電所または上位系統の事故によって電力貯蔵装置を有する母線が停電したとしても、自動式インバータを用いて貯蔵電力を放電することによって負荷への無停電供給が可能である⁽⁶⁾。

以上のような背景から、本論文では電力貯蔵装置が系統の負荷端に分散配置された場合の事故復旧時における効果を停電損失⁽⁷⁾の観点から検討するための二種類のアルゴリズムを提案する。第一は、期待停電損失を最小にする電力貯蔵装置の配置を求めるものである。電力貯蔵装置の配置は前述の経済性の他、安定度、信頼度、運用の柔軟性などの条件を考慮して総合的判断から決定されねばならない。提案する手法は停電時の運用の観点から配置を求めており、経済性以外の条件をも考慮して配置を決定する場合の重要な手掛りとなるものの一つである。第二は、与えられた電力貯蔵装置の配置のもとで個別の停電が発生した場合に、利用可能貯蔵電力を考慮に入れて期待停電損失を最小にする負荷復旧順序を決定するものである。このような手法として線形計画法を用いた手法⁽⁷⁾があるが、負荷パターンを考慮すると不連続(非線形)制約が加わるため、これを利用できない。本論文ではこの問題を0-1計画問題として定式化し、分枝限定法を用いて解く。

以下、第2章では全体の検討に用いた前提条件を述

べ、第3章では電力貯蔵装置の最適配置手法、第4章では貯蔵電力を考慮に入れた最適負荷復旧順序決定手法についてその定式化、解法、数値例を示している。また、数値例の結果から電力貯蔵装置の復旧時における効果および配置の方針について考察を加えている。

2. 前提条件

〈2.1〉 仮定 本論文を通じて以下の仮定をおく。

(1) 貯蔵装置を有する変電所(母線)が停電した場合、自所(母線)負荷に対してだけ緊急放電を行ない、他所(母線)負荷への応援は考えない。なお、貯蔵装置が配電用変電所に設備され、他変電所への連絡線がある場合には、他所負荷の充電を防ぐため、貯蔵電力放電前に連絡線遮断器または変圧器二次(一次)側遮断器を開放するものとする。

(2) 貯蔵装置全体としての定格貯蔵容量、定格出力、日運用計画は、負荷率改善のための最適運用計画から既知である^{(1),(4)}。

(3) 変電所ごとにフィーダ単位の日負荷曲線、停電発生確率、平均停電復旧時間($1/\mu_i$)を既知とし、変

図1 一回の事故による停電の断続パターン

Fig. 1. Black-out patterns by a fault.

Effective Arrangement and Operation of Dispersed Energy Storage Devices in Power Systems Restoration State. By Koichi Nara, Member & Susumu Yamashiro, Member (Kitami Institute of Technology)

奈良宏一: 正員, 北見工業大学工学部電気工学科
山城 迪: 正員, 北見工業大学工学部電気工学科

図2 停電損失曲線

Fig. 2. Electrical power interruption cost.

電所 i の停電継続時間 $t \sim t + \Delta t$ 間の復旧確率は

$$p_i(t, t + \Delta t) = P_i(t) - P_i(t + \Delta t) \\ = \mu_i e^{-\mu_i t} \Delta t \quad \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる^{(8), (11)}。

(4) 停電時、貯蔵電力はあらかじめ決められたフィードの優先順位に従って、残りの貯蔵装置出力で供給可能なフィードが無くなるまで供給される。供給中の負荷はその大きさが貯蔵装置定格出力を超えるか、または貯蔵電力が無くなったとき、優先順位の低いフィードから順に供給を停止される。一度停止されたフィードは供給の断続による不快感の増長を避けるために、負荷の総量が定格出力以下になり、かつ残存貯蔵電力量で一定時間（本論文では30分とした）以上供給可能な場合に限り、一度だけ再供給される。従って、一回の事故による停電の継続はただか二回であり、その起り得るすべての断続パターンを図1に示す。

(5) すべての貯蔵装置は放電深度^{(12), (13)}を考慮して日間運用される。各母線に設置された貯蔵装置は貯蔵容量に比例した割合で充放電を受持つものとする。従って、貯蔵装置は次式を満足しなければならない。

$$\left. \begin{aligned} x_i &\geq (y_i/Y_0) \cdot \text{Max}\{|x_i'(u)|\} \quad (\text{放電時}) \\ x_i/\eta_i &\geq (y_i/Y_0) \cdot \text{Max}\{|x_i'(u)|\} \quad (\text{充電時}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

但し、 x_i : 母線 i の貯蔵装置の定格出力、 y_i : 母線 i の貯蔵装置の定格貯蔵容量、 Y_0 : 全体設備の貯蔵容量、 η_i : 母線 i の貯蔵装置の効率、 $x_i'(u)$: 母線 i の貯蔵装置の時刻 u における充放電出力 ($x_i'(u) > 0$: 放電時, $x_i'(u) < 0$: 充電時)

〈2.2〉 停電損失 停電損失に関する多くの調査報告から、停電損失は一般に停電継続時間 t の二次式で近似でき、時間帯による停電損失の変動は二次式の係数を変えることで対処できるとして良い⁽⁷⁾。従って、時刻 u_{bs} に停電した母線 i フィード l の第 h 時

間帯 ($U_{h-1} \sim U_h$) の停電損失は次式で定義できる。

$$f_{ilu_{bs}}(L_{il}(u), t_{il}) = L_{il}(u)(a_{ilh}t_{il}^2 + b_{ilh}t_{il}) \\ + c_{ilh} = L_{il}(u) \cdot g_{ilh}(t_{il}) + c_{ilh} \quad \dots\dots (3)$$

但し、 $g_{ilh}(t_{il}) = a_{ilh}t_{il}^2 + b_{ilh}t_{il}$

$L_{il}(u)$: 時刻 u における負荷の大きさ、 t_{il} :

母線 i , フィード l の停電継続時間

また、時間帯の境界における停電損失は不連続にはならないから、図2を参照して、 c_{ilh} は、

$$\left. \begin{aligned} c_{ilh_0} &= L_{il}(U_{h_0})c'_{ilh_0} \\ c_{ilh} &= L_{il}(U_{h-1})g_{ilh}(t_{il}) \\ &\quad - L_{il}(U_h)g_{ilh}(t_{il}) + c_{ilh-1} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (4)$$

但し、 $u_h = U_{h-1} - u_{bs}$, u_{bs} : 停電発生時刻、

c'_{ilh_0} : 停電発生時の kW あたりの固定損失、

h_0 : 停電が発生した時間帯

を満足しなければならない。

フィードごと、時間帯ごとに(3)式の係数 a_{ilh} , b_{ilh} , c_{ilh} の正確な値を得ることは多少難かしいかもしれないが、調査対象がフィード単位であり対象負荷が限定されるため、例えば、文献(14), (15)の調査結果のように利用可能な程度の情報（相対的な停電損失の値がわかれば良い）を得ることは可能であろう。

(3), (4)式から、電力貯蔵装置が設置された母線 i で時刻 u_{bs} に発生した一回の事故における停電継続時間 t までの停電損失は次式で与えられる。

$$f_{iu_{bs}}(t, x_i, y_i) = \sum_{l \in L_0} f_{ilu_{bs}}(L_{il}(u), t_{il}) \\ + \sum_l f_{ilu_{bs}}(L_{il}(u), t_{il}') \quad \dots\dots\dots (5)$$

但し、 $t_{il}' = t - t_{sil}$, t_{sil} : 母線 i のフィード l が停電後、一旦貯蔵装置より電力供給を受け、その後再停電するまでの時間、 $L_0 = \{l | t = 0 \text{ で貯蔵装置から供給可能なフィード}\}$

(5)式の右辺の第1項は一度目の停電、第2項は二度目の停電の停電損失を表している。なお、停電の一度目と二度目で停電損失が変るならば、(3)式の係数をそれに応じて変えることで対処できる。

〈2.3〉 電力貯蔵装置の運転特性 電力貯蔵装置設置変電所母線が停電した場合には、日間運用に関係なく貯蔵電力を緊急放電する。緊急時の放電深度は常時と同じかそれより大きくとれるものとする。さて、時刻 u_s から時刻 u_e まで日間運用した場合の時刻 u_e における残存貯蔵容量は次式で与えられる。

$$y_{irs}(u_e) = \int_{u \in U_d} x_i'(u) du + \eta_i \int_{u \in U_c} x_i'(u) du \\ + y_{irs}(u_s) \quad \dots\dots\dots (6)$$

但し、 $y_{irs}(u)$: 時刻 u における残存貯蔵容量、

$U_d: u_i \sim u_e$ 間のうち放電している時間帯,

$U_c: u_i \sim u_e$ 間のうち充電している時間帯

また, 貯蔵装置の充電電力量と放電電力量が等しければ, ρ_i を貯蔵装置 i の放電深度として次式が成立つ。

$$\int_{u \in U_d} x_i'(u) du = -\eta_i \int_{u \in U_c} x_i'(u) du \leq \rho_i y_i \quad (7)$$

一方, 停電中または停電復旧時の残存貯蔵容量 y_{ir} は,

$$y_{ir} = y_{irs}(u_{bs}) + \int_{u_{bs}}^{u_{br}} w_i(u) du \quad (8)$$

但し,

$$w_i(u) = \sum_{l \in L_u} L_{il}(u) \quad (9)$$

u_{bs} : 停電発生時刻, u_{br} : 停電復旧時刻, L_u :

時刻 u において貯蔵装置より供給中のフィード番号の集合

として計算される。

〈2・4〉 発電機出力上昇特性 時刻 t_g の発電機出力 $P_g(t_g)$ は折れ線と与えられ, 次式で表わす⁽⁷⁾。

$$P_g(t_g) = d_g(t_g - t_{g1}) + e_g \quad (10)$$

ここで d_g は発電機出力の上昇こう配 ($t_g < t_{g1}$, $t_g > t_{g2}$ で $d_g = 0$), t_g は発電機 g が脱落してから相対時刻 ($t_g = 0$ で発電機 g が脱落), t_{g1} は発電機 g が脱落後負荷をとるまでの時間, t_{g2} は発電機 g が脱落後再び負荷をとり, 定格出力に至るまでの時間である。

3. 停電損失最小化を目的とした電力貯蔵装置の最適配置手法

〈3・1〉 問題の記述

(1) 電力貯蔵装置の最適配置問題 期待停電損失最小を目的とする電力貯蔵装置配置問題は以下のよう記述できる。

〔目的関数〕

$$F_T = \sum_{m=1}^M B_m (F_{Lm} + F_{Pm}) \rightarrow \text{最小} \quad (11)$$

但し, F_T : ペナルティを含めた総期待停電損失, F_{Lm} : 事故ケース m の全停電期間にわたる期待停電損失, F_{Pm} : 停電事故ケース m の貯蔵電力消費による負荷率悪化に対するペナルティ, B_m : 事故ケース m の重み係数 ($\sum_{m=1}^M B_m = 1$), M : 考察する事故ケースの数

〔制約条件〕

$$\left. \begin{aligned} \text{貯蔵容量制約: } \sum_i y_i &\leq W H_0 \text{ (全体設備)} \\ y_{00} &\leq y_i \leq y_{0i} \text{ (個別設備)} \end{aligned} \right\} \dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{定格出力制約: } \sum_i x_i &\leq W_0 \text{ (全体設備)} \\ x_{00} &\leq x_i \leq x_{0i} \text{ (個別設備)} \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

$$\text{最小供給可能時間制約: } y_i/x_i \geq T_{0i} \dots (14)$$

但し, y_i, y_{0i}, y_{00} : 母線 i に設置される貯蔵装置の貯蔵容量およびその上限, 下限, x_i, x_{0i}, x_{00} : 母線 i に設置される貯蔵装置の定格出力およびその上限, 下限, W_0, WH_0 : 全体設備について合計した定格出力および貯蔵容量の上限値, T_{0i} : 母線 i に設置される貯蔵装置の最小供給可能継続時間

(2) 期待停電損失の計算 (11) 式の F_{Lm} は全変電所の期待停電損失の和であり次式で計算される。

$$F_{Lm} = \sum_i F_{im} \quad (15)$$

$$F_{im} = \int_{u_s}^{u_e} A_{ium} \cdot F_{ium} du \quad (16)$$

ここで, F_{ium} は事故ケース m で時刻 u に停電が発生した場合の変電所 i の期待停電損失, A_{ium} は事故ケース m の時刻 u における停電発生確率または重み係数で $\int_{u_s}^{u_e} A_{ium} du = 1$ である。従って, F_{im} は全考察期間にわたる事故ケース m における変電所 i の期待停電損失である。 F_{ium} は, $f_{ium}(t, x_i, y_i)$ を事故ケース m における(5)式の値として, 次式で与えられる。

$$F_{ium} = \int_0^\infty p_i(t) f_{ium}(t, x_i, y_i) dt \quad (17)$$

(3) 負荷率改善効果減少に対するペナルティ

停電による放電または充電不足によるピーク時不足電力にペナルティを与え, 停電損失の減少と発電原価の上昇との協調をとることが考えられる。通常停電継続時間が短い場合には停電復旧直後に停電直前の負荷まで立上ると仮定して良く, 逆に長い場合には後述するようにペナルティが停電損失と比較して無視できるほど小さいので, 停電復旧直後に計画通りの負荷をとり, また, 充放電を行なうものと仮定すると, 停電によるピーク時の不足電力量は, 次式で計算される。

$$P_{di} = H_{ip} - y_{ir} \quad (P_{di} = 0 \text{ if } P_{di} < 0) \dots (18)$$

但し,

$$H_{ip} = \int_{v_{ps}}^{v_{pe}} x_i'(u) du \quad (19)$$

P_{di} : ピーク時の不足電力量, v_{ps}, v_{pe} : 停電復旧後の放電開始および終了時刻

この不足電力量は予備力起動などで補うので, 運転費と固定費とを考慮してペナルティを次式で定義する。

$$F_p = a_p \left(\sum_{i=1}^N P_{di} \right) + b_p \quad (20)$$

ここで, a_p, b_p は定数, N は変電所数である。

〈3・2〉 問題の解法 (11)~(14) 式の問題は, (11)

図3 動的計画法による解法

Fig. 3. Solution method by DP.

図4 解法のフローチャート

Fig. 4. Flowchart for the solution.

式が非線形のため非線形計画問題として解く必要がある。本論文では、ステップに変電所番号を取り、第 i ステップにおいて、

$$X = \sum_{k=1}^i x_k, \quad Y = \sum_{k=1}^i y_k$$

において動的計画問題として解く。いま、変電所 i の期待停電損失を $EF_i(x_i, y_i)$ 、変電所 1 から変電所 i

までの累積期待停電損失を $f_i(X, Y)$ として漸化式を作ると次のようになる。

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

但し、(12)~(14)式の制約から、

$$\left. \begin{aligned} f_0(X, Y) &= 0 \\ \min(X, x_{0i}) &\geq x_{00} \\ \min(Y, y_{0i}) &\geq y_{00} \end{aligned} \right\} \dots (22)$$

が満足されねばならない。この制約下で、 $\Delta X, \Delta Y$ を増設の最小単位として、 $i=N$ のときの (21) 式の値を最小にする各ステップの x_i, y_i の値を図3に示すように順次ステップを進めて求めていけば良い。なお、 $X=0$ かつ $Y>0$ または $X>0$ かつ $Y=0$ のケースは起り得ない。全体の解法を図4に示す。

〈3・3〉 数値例 まず、一般的な傾向を見るため、負荷を一定 (1.0 p.u.) とし、停電損失 ($f_{iub} = a_i t_i^2$;

(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

図5 停電損失と平均停電継続時間による貯蔵装置の配置の変化

Fig. 5. Power storage arrangement depending on the cost and the duration of electrical power interruption.

ペナルティ無視)の二次項の係数 a_i 並びに(1)式の μ_i をパラメータとして(11)~(14)式を解くと、図5(a),(b)のような結果が得られる⁽⁸⁾。図5から、他の条件が同じであれば、その時間帯の停電損失が大きい

図6 数値例1の日負荷曲線(t の二次式は停電損失曲線:単位 10^8 円/10 MW)

Fig. 6. Daily load curve for numerical example (1).

い負荷または平均停電継続時間の長い負荷ほど大容量の貯蔵装置を設備した方が良いことがわかる。

次に、より一般的な例として、図6(a)~(d)および表1に示すような、フィーダ各2本を持つ3変電所へ電力貯蔵装置を配置する場合を考える。考察中の全変電所が停電に至る事故ケースだけを取扱って得られた結果の一部を図7、図8、表2、表3に示す。図7並びに表2は停電発生時刻に関して一日の停電損失の期待値(本例題では毎時30分に停電が等しい確率で発生すると仮定して平均をとった)をとった場合の結

表1 例題の定数

Table 1. Constants for the example.

$x_{00}=0.2$, $x_{01}=4.0$, $W_0=4.0$ [P.U.]
$y_{00}=1.0$, $y_{01}=16.0$, $W_{H0}=16.0$ [P.U.]
$a_p=5.0$, $b_p=0.0$ [$\times 10^8$ 円/P.U.]
$\mu_1=\mu_2=\mu_3=0.04$, $y_i/x_i \geq 0.5$, 1 P.U.=10 MW

図7 貯蔵容量と停電損失の関係(停電発生時刻に関する期待値)

Fig. 7. Relationship between power storage capacity and electrical power interruption cost.

図8 貯蔵容量と停電損失の関係(停電発生時刻別)

Fig. 8. Relationship between power storage capacity and electrical power interruption cost.

果である。表2の配置は、特定の時刻に停電が発生すると仮定して求めた表3のいずれの配置とも一致しないが、停電発生時刻に関して平均的な効果が期待できる。図7は貯蔵容量に対する停電損失の傾向を示したものである。貯蔵容量の増加に伴う停電損失の減少は負荷パターンや平均停電継続時間など、系統の特性か

表2 放電深度に対する最適配置
(停電発生時刻に関する期待値)

Table 2. Optimum storage facility arrangement for different discharge depth.

緊急時 放電深度	S/S 名	定格出力 (P.U.)	貯蔵容量 (P.U.)	停電損失 ($\times 10^5$ 円)
50%	S/S 1	1.2	4.0	20.71
	S/S 2	0.8	4.0	29.76
	S/S 3	2.0	8.0	16.76
	合 計	4.0	16.0	67.23
55%	S/S 1	1.2	4.0	17.23
	S/S 2	0.8	5.0	19.86
	S/S 3	2.0	7.0	8.49
	合 計	4.0	16.0	45.570
60%	S/S 1	1.2	4.0	15.01
	S/S 2	0.8	4.0	18.06
	S/S 3	2.0	8.0	3.00
	合 計	4.0	16.0	36.07
65%	S/S 1	1.2	4.0	13.65
	S/S 2	0.8	4.0	16.72
	S/S 3	2.0	8.0	1.33
	合 計	4.0	16.0	31.70

表3 停電発生時刻ごとの最適配置

Table 3. Optimum storage facility arrangement for different fault occurrence time.

停 電 発生時刻	S/S 名	定格出力 (P.U.)	貯蔵容量 (P.U.)	停電損失 ($\times 10^5$ 円)
0時30分	S/S 1	1.0	4.0	0.696
	S/S 2	0.6	3.0	0.335
	S/S 3	1.0	9.0	0.398
	合 計	2.6	16.0	1.429
8時30分	S/S 1	1.2	5.0	3.214
	S/S 2	0.8	2.0	6.622
	S/S 3	2.0	9.0	0.476
	合 計	4.0	16.0	10.312
14時30分	S/S 1	0.0	0.0	38.953
	S/S 2	1.8	7.0	2.054
	S/S 3	2.0	9.0	1.510
	合 計	3.8	16.0	42.517
20時30分	S/S 1	1.8	6.0	4.835
	S/S 2	0.6	5.0	2.420
	S/S 3	1.0	5.0	7.020
	合 計	2.4	16.0	14.275

ら決めるある大きさ以上の貯蔵容量では期待できない。この理由は、貯蔵装置定格出力より負荷の方が大きい時間帯には貯蔵電力を負荷に供給できないためである⁽⁸⁾。また、緊急時の放電深度が小さい場合には、大きくとった場合に比べて停電損失の減少は小さい。更に、図7で、緊急時放電深度が60%の場合にピーク時不足電力に対するペナルティを考慮しない場合の結果を示しているが、考慮した場合との差は1%以下であり、通常の運用ではこれを無視できる。この理由は、停電継続時間が短い場合には貯蔵電力の消費が小さく、従ってペナルティも小さくなり、逆に停電継続時間が長ければ、その二次式で計算されるペナルティに比較して、その二次式で計算される停電損失の方が極端に大きくなることによっている。

一方、表3と図8とは停電発生時刻ごとの結果を示している。これから、停電発生時間帯によって貯蔵装置の効果と最適配置が大きく異なることがわかる。これは、図5の傾向並びにその時間帯の負荷の大きさと設備の定格出力との関係で緊急放電可能量が決ることなどに起因している。また、緊急時の放電深度が変わると、最適配置も多少変わるが、この影響が大きいのは日間運用の放電終了後の数時間に限られており、一日平均するとほとんど無視できる。表2で放電深度による差が見られないのはこのためである。なお、停電発生時刻はあらかじめ予測できないので、最適配置は前述の発生時刻に関する期待値をとったものとなる。

ところで、表2並びに表3では、負荷の大きさがほぼ同じであれば停電損失が大きい工場地区に大きな貯蔵装置を配置すれば良いという結果になっている。これは、図5の傾向からも明らかであり、経済性の観点から検討された結果⁽³⁾とも一致している。

4. 電力貯蔵設備を持つ系統の最適負荷復旧順序決定手法

〈4.1〉 問題の記述 前章の方法などにより求められた最適配置のもとで個別の事故が発生した場合、停電の状況によって、発電機出力の増加に応じて負荷をとっていく過程での電力貯蔵装置利用の状況も異ってくる。そのため、その場合の停電損失を最小にするような負荷復旧順序が決まるはずである。この問題は、負荷を単位量 Δ の整数倍で表わし、発電機の総増加出力が $j\Delta$ に達する時点を j とすると、次のように0-1計画問題として定式化できる⁽¹⁰⁾。

〔目的関数〕

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N'} F_{ij} z_{ij} \rightarrow \text{最小} \quad \dots\dots\dots (23)$$

図 9 数値例 2 の日負荷曲線 (t の二次式は Δ あたりの停電損失曲線: 単位 10^6 円)

Fig. 9. Daily load curve for numerical example (2).

(制約条件)

$$\sum_{j=1}^{N'} z_{ij} = 1 \quad (i=1, 2, \dots, N) \dots \dots \dots (24)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} \begin{cases} \geq 1 & \text{if } \exists i \in I', I' = \{i | k' \geq L_{ij}\} \\ = 0 & \text{if } \forall i, k' < L_{ij} \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, N') \dots \dots \dots (25)$$

但し,

$$k' = j - \sum_{i \in I_{j-1}} L_{ij} \dots \dots \dots (26)$$

$$I_{j-1} = \left\{ i \mid \sum_{k=1}^{j-1} z_{ik} \neq 0 \right\} \dots \dots \dots (27)$$

変数 z_{ij} は時点 j で負荷 i が復旧されたとき 1, それ以外で 0 をとる変数である。また, L_{ij} は時点 j における負荷 i の大きさであり, F_{ij} は負荷 i が時点 j で復旧したときの停電損失である。 F_{ij} は, x_i, y_i が既知であり, 負荷パターンから停電中の貯蔵装置の運用がわかることおよび時点 j までの停電継続時間が発電機の出力上昇曲線から容易に求められることから, (5) 式で直接計算される。

〈4.2〉 問題の解法 (23) 式 ~ (27) 式の問題は (24), (25) 式の制約のもとで (23) 式を最小にするような $z_{ij}=1$ の組合せを求める組合せ問題になっている。最適性の原理が適用できないので, 以下は負荷 i を幅, 時点 j を深さとする分枝限定解法を用いる。

(1) 分枝法 一般に, 考察中の時点から全負荷復旧に至るまでの期待停電損失が大きい負荷ほど早く投入した方が全体の停電損失を小さくするのであることが予測される。そこで, 時点 j までにまだ分枝を試みしていない負荷 i について次式を満足するものを次の分枝の最優先候補として深さ優先探索を行なう。

$$\text{Max}_{i \in I_{j-1}} \{F_i\} = \text{Max}_{i \in I_{j-1}} \left\{ \left(\sum_{k=j}^{N'} F_{ik} \right) / (N' - j + 1) \right\} \dots \dots \dots (28)$$

表 4 停電発生時ごと刻の最適配置

Table 4. Optimum power storage arrangement for different fault occurrence time.

変電所名	平均形配置		0:10'形配置		8:10'形配置		16:10'形配置	
	定格出力	貯蔵容量	定格出力	貯蔵容量	定格出力	貯蔵容量	定格出力	貯蔵容量
S/S 5	3Δ	30Δ	6Δ	60Δ	4Δ	40Δ	0	0
S/S 7	0	0	0	0	0	0	0	0
S/S 8	4Δ	40Δ	1Δ	10Δ	3Δ	30Δ	7Δ	70Δ

表 5 最適負荷復旧順序と停電損失

Table 5. Optimum load restorative sequence and interruption cost.

停電発生時刻	事故 ケース 1		事故 ケース 2	
	貯蔵設備あり	貯蔵設備なし	貯蔵設備あり	貯蔵設備なし
0:10'	13→11→6→5→7→8 4,417.2 千円	8→6→5→13→7→11 6,118.2 千円	6→13→5→7→11 4,372.8 千円	6→5→13→7→11 5,570.4 千円
8:10'	6→5→13→7→11→8 8,907.2	8→6→5→7→13→11 13,893.1	6→5→13→7→11 9,709.4	6→5→13→7→11 9,709.4
16:10'	6→5→13→7→11→8 10,446.2	8→6→5→7→13→11 19,251.2	6→5→7→13→11 11,284.6	6→5→7→13→11 11,284.6

(2) 限定法 全負荷復旧までの累積停電損失は、時点 j までに復旧した負荷の累積停電損失と、残りの負荷を時点 $(j+1)$ ですべて投入した場合の停電損失の和よりは小さくはなり得ない。ゆえに、時点 j までの q 番目の部分解集合 Ω_j^q を選択したときの累積停電損失の下界値は次式の $E(\Omega_j^q)$ で与えられる。

$$E(\Omega_j^q) = f_j + \sum_{i \in I_j} F_{i(j+1)} \dots \dots \dots (29)$$

但し、

$$f_j = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^j F_{ik} z_{ik} \dots \dots \dots (30)$$

また、発電機の運転限界を超えて運転することはできないので、次式を満足しない分枝は許されない。

$$k'(j) \leq k' \leq \bar{k}'(j) \dots \dots \dots (31)$$

但し、 $k'(j)$ 、 $\bar{k}'(j)$ は各々、時点 j における総発電機増加出力の下限値と上限値である。

〈4.3〉数値例 上記手法を文献(7)と同一の 30 ノード系統へ適用した。但し、各負荷の日負荷曲線並びに時間帯ごとの停電損失曲線を必要とするため、これを図 9(a)~(c)のように与えている。この系統において、電力貯蔵装置の設置候補母線番号を、5, 7, 8 として、この 3 母線を含む停電事故に対して前章の最適配置手法を適用すると表 4 に示す解が得られる。この解は、放電深度を常時 50%、緊急時 65%、 $W_0 = 7.0 \text{ P.U.}$ 、 $WH_0 = 70.0 \text{ P.U.}$ とし、(21)式のペナルティを無視して得られたものである。得られた結果の 24 時間平均形配置に対する負荷率改善日間運用の充放電計画を図 9 に重ねて記入してある。この配置のもとで、文献(7)の事故ケース 1, 2 に対して本手法を適用して得られた最適負荷復旧順序とそのときの累積期待停電損失減少効果を表 5 に示している。

一方、平均形配置の効果を確認するため、貯蔵装置の配置を変えた場合に種々の時刻に発生する停電による累積期待損失の大きさを、貯蔵装置を設置しない場合の値を 100 として表 6 に示している。なお、表 6 の事故ケース 2 で停電損失減少効果が小さいのは、母線 8 が停電に至っていないためである。

表 6 相対的停電損失

Table 6. Relative interruption cost.

	停電発生時刻	平均形配置	0:10'形配置	8:10'形配置	16:10'形配置
事故ケース 1	0:10'	72.2	34.5	90.2	92.2
	8:10'	64.1	75.6	50.6	64.1
	16:10'	54.3	80.3	100.0	52.2
事故ケース 2	0:10'	78.5	38.6	70.9	100.0
	8:10'	100.0	69.1	79.8	100.0
	16:10'	100.0	72.2	100.0	100.0

5. 結 論

電力系統復旧時に分散形電力貯蔵装置を効果的に運用する手法として、期待停電損失最小を目的とした貯蔵装置の最適配置と、その配置のもとでの個別事故に対する最適負荷復旧順序を決定する手法を示した。これらの手法の数値例によって、貯蔵装置が設備された場合とされない場合の停電損失を比較した。その結果、〈3.3〉節では電力貯蔵装置の配置に関する幾つかの方針を明確にし、〈4.3〉節では、復旧時における電力貯蔵装置の停電損失減少効果を確認した。

なお、北大大型計算機センター HITAC M/200 H を利用した演算時間は、最適配置問題と最適負荷復旧順序決定問題の最も複雑な数値例で各々 178.3 秒、1.95 秒であった。特に前者はオフラインでの評価手法であることを考えれば、実用上問題は無いと思われる。

終りに、一連の研究において御指導を賜る前北見工業大学長(現在、道都大学長)小池東一郎博士、北海道工学部 長谷川 淳教授に深謝申し上げます。

(昭和 60 年 1 月 23 日受付、同 60 年 4 月 22 日再受付)

文 献

- (1) Y. Sekine: "Load Factor Improvement of Power System and its Evaluation", *Research on Effective Utilization and Densification of Electric Energy*, p. 127 (1983-10)
- (2) 小特集:「エネルギー貯蔵技術」電学誌, 101, p. 507 (昭 56-6)
- (3) 小特集:「新型電池電力貯蔵システム」電学誌, 103, p. 757 (昭 58-8)
- (4) 諸住・西谷・長谷川・藤原:「電力系統における分散形電力貯蔵装置の最適運用」電学論 B, 103, p. 467 (昭 58-7)
- (5) 豊田:「電力エネルギー貯蔵システムの役割と経済評価」電学論 B, 104, p. 273 (昭 59-5)
- (6) F. C. Shweppe: "Power System 2000: Hierarchical control Strategies" *IEEE Spectrum* 15, 7, p. 42 (1978-7)
- (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」電学論 B, 101, p. 77 (昭 56-2)
- (8) 奈良・仲村・中村・山城:「停電損失を考慮した電力貯蔵装置の最適配置手法」北見工大研報, 14, 1, p. 69 (昭 57-11)
- (9) 奈良・山城・小池:「供給信頼性を考慮した電力貯蔵装置の最適配置手法」電学会電力技術研究会資料, PE-84-64 (昭 59-7)
- (10) 奈良・山城:「電力貯蔵設備を有する系統の負荷復旧方法」昭 59 電気関係学会北海道支部連大 151
- (11) 関根, 他:「電力系統工学」p. 170 (昭 54-3) コロナ社
- (12) 「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 55-10)
- (13) 「電力貯蔵用二次電池—その可能性と開発状況—」電気学会技術報告 II 部第 60 号, p. 7 (昭 52-8)
- (14) 太田・杉浦:「第 3 回工場配電実態調査報告」電学会電力技術研究会資料, ET-71-16 (昭 46-4)
- (15) 矢部:「需要者から見た電気の質と停電時の経済性」OHM, 59, p. 57 (昭 47-4)