

停電損失を考慮した事故時負荷 復旧順序の決定手法*

—分枝限定解法の演算時間の検討—

奈良宏一**

山城迪**

(昭和55年4月30日受理)

Determination of the Load Restoration Sequence Taking into Consideration of the Cost of Power Interruptions

—An Investigation of Computing Time of Branch
and Bound Method's Solution—

by Koichi NARA and Susumu YAMASHIRO

When power interruptions happen through fault in a power system, the load should be restored by a sequence which minimizes the cost of power interruptions. Although this problem can be formulated as a linear programming problem based on certain assumptions, it must be formulated as a nonlinear programming problem, if some of these assumptions cannot be held.

In latter case, the problem can be effectively solved by the branch and bound method, but, generally, the computing time exceeds the range of practical use. This is a result of the large number of variables.

In this problem, it is discovered that the computing time is more than 10 minutes using HITAC/M-180, as the number of variables increases to more than 400. This difficulty can be overcome by introducing a new concept: block priority. Block priority maintains the priority order of one load and the others, as well as minimizing the cost of power interruptions. It allocates simultaneously, the variables of the problem to different levels of priority, giving less than 400 variables to any one priority level, this can reduce the computing time significantly.

Nevertheless, it is considered that more work is necessary to develop different effective methods which can further decrease the computing time.

1. ま え が き

電力系統で事故が発生し、系統の一部に停電区間が生じた場合、すみやかに停電の復旧を

* 昭和54年度電気学会北海道支部大会で一部発表 (昭和54年10月)

** 北見工業大学電気工学科

はからねばならない。停電負荷を健全系統に並列する場合、その順序をどのようにして決定するかということは重要な問題であり、従来、負荷の重要度という観点から負荷に優先順位を付し、その順序に従って復旧する手法がとられてきた^{1),2),3)}。

しかしながら、負荷の性質や停電の大きさ・継続時間によっては需要家の不快の度合いや停電による損害の大きさが変化し、そのために優先順位は常に一定であるとは限らない。このような観点からすれば、固定的な優先順位に従って復旧していく方法は必ずしも最適であるとは言いがたい。そのため、筆者らは、需要家の停電による不快の度合いを新しい尺度としてとり上げることが提案してきた^{4),5)}。

停電による不快の度合いは、より一般的に、停電による損失と言い換えることができる。停電による損失（以下停電損失と呼ぶ）とは、停電による工場の生産低下、商店の売上げ減少といった直接金銭に係る損失から、家庭の冷蔵庫での食品の腐敗、冷暖房設備や照明の停止による不快・不満の増加、地下街や交通機関の混乱といった物的被害、社会的影響に至るまで、停電によって生ずるあらゆる不都合を価格に換算した値として定義される。このようにして定義された停電損失が、停電負荷の大きさと停電継続時間の増加に伴って増加していくことは自明である。

さて、停電損失の全考察期間に亘る累積値が最小になるような負荷の復旧順序を決定する問題が割当て問題として定式化され、2章の仮定のもとで線形計画法によって解かれることは先に示した^{4),5)}。しかし、水力発電機が多い系統のような場合には、2章の仮定が成立しないこともあり、その場合、非線形な目的関数または制約条件を持つ割当て問題として解かねばならない。非線形割当て問題には効果的な解法が開発されておらず、最悪の場合、変数の全ての0と1の組合せ（変数の数を n とすると 2^n 組ある）を調査しなければならない。したがって、このような場合、できるだけ調査対象を削減できる解法が適用されるのが普通であるが、それによっても n の増加に伴って演算時間は極端に増加する傾向にあり、演算にどの程度時間を要するかあらかじめ調査しておくことは重要である。

筆者らは、このような問題で最も効果的に調査対象を削減できるとされている分枝限定法を適用した場合の変数の増加に伴う演算時間の増加傾向について調査するため、定式化された線形割当て問題に、直接分枝限定法を適用してみた。本稿ではその結果について報告する。以下、2章では問題を定式化し、3章ではこれを Little, J. D. らが巡回セールスマン問題に適用した分枝限定法¹²⁾を用いて解く手法を示す。4章では、モデルシステムを用いて変数の数を変化した場合とブロック優先（後述）を適用した場合について、分枝限定法による演算時間の傾向を調査した結果について報告している。

2. 問題の定式化

2.1 問題の前提条件

筆者らは以下に述べる前提条件のもとに問題の定式化を行なっている。

- (1) 負荷の大きさは一定の量 L の整数倍で与えられるものとする。
- (2) 一度投入した負荷の再しゃ断は行わない。
- (3) 発電コスト、送電損失等の最小化は考慮せず停電損失の最小化のみを考慮する。
- (4) 負荷の大きさは停電前、中、後を通して変らないものとする。
- (5) 発電機の脱落があった場合は、脱落発電機の系統並列を第一優先として、その後に負荷の復旧を行なうものとし、後述の計算開始時点で脱落した発電機母線はすでに系統から充電されているものとする。
- (6) 停電負荷に相当する発電機出力の増加は有限時間内に得られるものとする。また、注目する負荷の並列に要するしゃ断器の操作は、発電機が L だけ出力を増加するのに要する時間以内に完了しているものとする。
- (7) 系統の復旧にあたって、指定された負荷の投入は、それによって過負荷や電圧異常等が発生することなく、無条件に可能であるものとする。

2.2 停電損失の定義

停電による損失を何らかの形で価格に換算できないかという調査は各国でなされており、停電による損失価格の調査値が報告されている^{6)~11)}。これらの報告から、電力需要の形態によって停電損失に非常に大きな差があり、また、全く同種の需要であっても地域や工場によっては、かなり停電損失に差が生じることがわかっている。

一方、停電の継続時間による停電損失の変化は、負荷を全体として見た場合の傾向が文献(6)に、また、12種類の工業に分類した場合の傾向が文献(11)に報告されている。これらの文献によると、一般的な傾向として、停電損失は、ほぼ停電継続時間の r 乗に比例して増大しており、また、負荷の種別毎に増加の度合いが全く異なることがわかる。

H. Persoz によると、工業負荷の停電損失は、一般的に、

$$F = (a + bt + ct^2) L \quad (1)$$

但し、 F ; 停電損失、 t ; 停電継続時間、 L ; 停電の大きさで近似されとしている⁹⁾。(1)式の aL は停電が発生したことによる機器の保守などの固定的な費用を、 btL は停電継続期間中の生産の停止などによる時間に比例する損害を表わしており、また、 ct^2L は、たとえば、停電によるいろいろな混乱の収拾、特別な機器の復旧に要する損害といったような停電継続時間の r 乗で増加する損失の項の近似を表わしていると考えられる。したがって、もし、停電が発生する時刻や季節など、停電の大きさと継続時間以外の

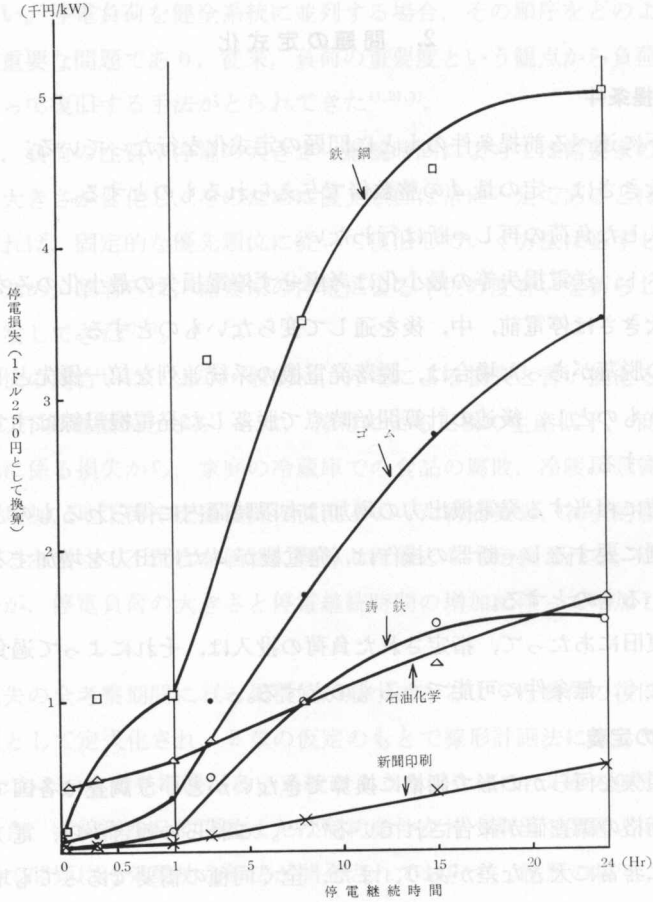


図-1 負荷の停電損失

関係する他の要素に変化がある場合には、 a, b, c の値を変えるものとすれば、時間を適当な長さに区分し、各区分毎に停電損失を(1)式で表現することで、ほぼ正確な停電損失の近似が可能である。図-1に文献(11)に報告された値と、筆者らがそれを2次曲線で近似した例を示す。図-1は、1時間と24時間を境に区分しているが、境界に近づくにつれて一部で損失の増加の割合が減少している(上に凸の2次曲線となっている)のは心理的な効果によるものと考えられる。以上から停電負荷の損失は、負荷の種別毎に異った2次曲線で近似されると考えて良い。

そこで、まず、負荷をほぼ同一種類の負荷に分割されるようなある一定の大きさ Δ に分割するものとしよう。もし、 Δ がちょうど種類の負荷を表わすならば、停電継続時間の h 区間目、すなわち、 $t_{h-1} \leq t = u + t_{ers} < t_h$ の時間帯におけるその Δ に対する停電損失を表わす曲線は、次式で定義できる。

$$F^h(t) = (a^h + b^h t + c^h t^2) \Delta \tag{2}$$

但し、 $F^h(t)$; 停電継続時間の h 区間目における停電損失

t_{ers} ; 負荷脱落時点から停電損失および負荷復旧順序の計算開始までの時間

u ; 停電損失および負荷復旧順序の計算開始時点を0とした相対時間

もし、 Δ がやむを得ず、 n_0 種類の負荷を含んでしまう場合には、各々の負荷の加重平均をとり、停電損失を(2)式の代りに(3)式で定義する。

$$F^h(t) = \sum_{i=1}^{i=n_0} L_i(a_i^h + b_i^h t + c_i^h t^2) \quad (3)$$

但し、 L_i ; 第 i 種類目の負荷の大きさ ($0 < L_i \leq \Delta$, $\sum_{i=1}^{i=n_0} L_i = \Delta$)

2.3 発電機出力可能増加特性曲線

発電機出力可能増加特性曲線は折れ線で与えられるものとし、次式で表わす。

$$P_g(t) = d_g(t - t_{g1}) + e_g \quad (4)$$

但し、 $\begin{cases} \text{零出力時} & (t < t_{g1}); d_g = 0, e_g = 0 \\ \text{出力上昇時} & (t_{g1} \leq t < t_{g2}); d_g > 0, e_g \geq 0 \\ \text{出力一定運転時} & (t_{g2} \leq t); d_g = 0, e_g = P_g(t_{g2}) \end{cases}$

$t = u + t_{ers}$

t ; 発電機脱落時刻を0とした相対時間

t_{g1} ; 発電機 g が脱落后、負荷をとり始めるまでに要する時間

t_{g2} ; 発電機 g が脱落后、再び負荷をとり、その出力が定格出力になるまでに要する時間

t_{gers} ; 発電機 g が脱落后、停電損失および負荷復旧順序の計算開始時点までの時間

$P_g(t)$; 時刻 t における発電機 g の出力

(4)式で出力上昇時に $e_g > 0$ となるのは、発電機が脱落に至らなかった場合である。

一方、 t_{g1} は、発電機が脱落してから起動を開始するまでの時間 t_{g0} と、起動を開始してから並列するまでの時間 t_{gp} の和で与えられる。すなわち、

$$t_{g1} = t_{g0} + t_{gp} \quad (5)$$

また、 t_{gp} はボイラやタービンの冷却を考慮して次式で定義する。

$$t_{gp} = q_g(1 - \varepsilon^{-r_g t_{g0}}) + c_{gp} \quad (6)$$

但し、 c_{gp} ; 発電機 g が起動開始後、出力をとり始めるまでに最小限必要な時間

q_g ; 発電機 g が無限時間停止した後、出力をとり始めるまでに必要な時間

r_g ; $1/(\text{発電機 } g \text{ のボイラ、タービンの温度上昇の時定数})$

したがって、(5)式は(7)式のように t_{g0} のみの関数となる。

$$t_{g1} = t_{g0} + \left\{ q_g(1 - \varepsilon^{-r_g t_{g0}}) + c_{gp} \right\} \quad (7)$$

なお、 t_{g2} は定格出力を P_{g0} とすれば次式で与えられる。

$$t_{g2} = \left\{ P_{g0} - (e'_g - d_g t_{g1}) \right\} / d_g = (P_{g0} - e'_g) / d_g \quad (8)$$

但し, $e'_g = e'_g - d_g t_{g1}$

e'_g ; 発電機 g が脱落に至らな
 かった場合の出力上昇直前の
 出力

(4)~(8) 式で表わされる 発電機出
 力可能増加特性曲線と時間の関係
 を図-2 に示す。

2.4 累積停電損失

ある母線の脱落負荷 l の大きさ L_l
 は 2.1 節の仮定 (1) より D の整数倍で
 あるから, 脱落負荷 l は $n_l (= L_l/D)$ 個
 に分割でき, その各々について (2) 式
 または (3) 式を与えることができる。
 今, すべての脱落負荷が分割された個
 数の全体を $n (= \sum_l n_l)$ とすると, n 個
 の分割負荷の投入時刻は仮定 (6) より
 発電機出力の増加に要する時間のみに
 よって制約を受ける。ゆえに, 分割負
 荷 i が時刻 t で投入されたと仮定する
 と, その時の分割負荷 i の停電損失は

$F_i^h(t), (t_{h-1} \leq t < t_h)$ で計算される。発電機出力は, (4) 式を全発電機について合成した曲線に
 そって上昇していくこと, および, 分割負荷は発電機が D だけ増加される毎に 1 つずつ投入さ
 れていくことから, t は分割負荷毎に異った値をとることになる。今, 発電機出力が $j \cdot D$ だけ
 増加するのに要する時間を t_j とし, 分割負荷 i が時刻 t_j に投入された時の停電損失を F_{ij} と
 するなら, 全分割負荷の停電損失は次式で表わされる。

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F_{ij} x_{ij} \tag{9}$$

但し, $F_{ij} = F_i^h(t_j)$ (10)

$$x_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{分割負荷 } i \text{ を時刻 } t_j \text{ で投入した時} \\ 0; & \text{上記以外} \end{cases} \tag{11}$$

2.5 問題の定式化

(9) 式で, $x_{ij} = 1$ ならば, $x_{ik} = 0 (k \neq j), x_{kj} = 0 (k \neq i)$ であるから, 問題は, 「ある i に対し
 て 1 つの j を定め, 目的関数 F を最小にする」という割当て問題として定式化できる。すな
 わち,

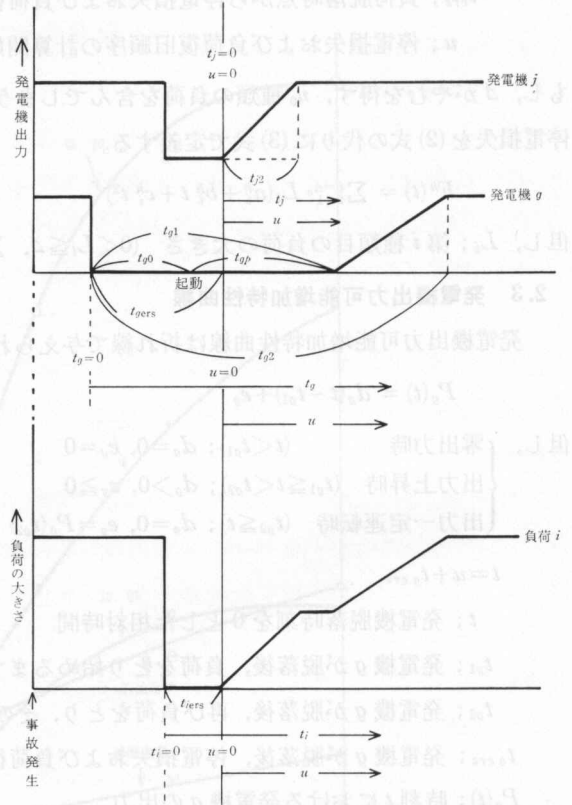


図-2 発電機出力可能増加特性曲線と時間の関係

〔目的関数〕

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F_{ij} x_{ij} \longrightarrow \text{最小} \quad (12)$$

〔制約条件〕

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_{ij} &= 1 && (\text{for } j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &= 1 && (\text{for } i = 1, 2, \dots, n) \\ x_{ij} &\geq 0 && (\text{for } i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

もし、同じ停電損失を持つ分割負荷が複数個ある場合は、それを1本の制約条件式にまとめることができ、制約条件式は、

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_{ij} &= 1 && (\text{for } j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &= b_i && (\text{for } i = 1, 2, \dots, n) \\ x_{ij} &\geq 0 && (\text{for } i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

とできるから、この場合には、最小費用流量問題として定式化できる。ここで b_i は i 番目の式にまとめられた式の数、また、 $m = n - n_d$ であり、 n_d は1本の式にまとめられたため、消去された条件の数である。

2.6 ブロック優先

一般に、ある負荷群と他の負荷群との間に投入の優先関係をつけたい場合が考えられる。いま、(12)~(14)式を全負荷に対して一括して適用するなら、この優先関係は必ずしも満足されるとは限らない。このような場合、すべての負荷を適当な負荷群に分割し、それら負荷群に対して優先順位を付し(これを「ブロック優先」と呼ぶ)、優先順位の高い順に、同一ブロック優先に属する負荷に対してのみ(12)~(14)式を順次適用していくという手法をとることによって投入の優先関係を維持した解を得ることができる。すなわち、この場合、問題は次式で与えられる。

〔目的関数〕

$$F = {}^1F + {}^2F + \dots + {}^kF + \dots + {}^mF \longrightarrow \text{最小} \quad (15)$$

但し、 P_m は最下位の優先順位を示し、 kF は優先順位 k に属する負荷について、次の部分問題を解いて得られる解である。

〔目的関数〕

$${}^kF = \sum_{i \in I} \sum_{j=S_{(k-1)}}^{j=S_k} F_{ij} x_{ij} \longrightarrow \text{最小} \quad (16)$$

但し、 $S_0 = 0, S_k \leq S_{(k-1)} + s_k$

S_k ; ブロック優先順位 k の負荷が投入される最終の時点

s_k ; ブロック優先順位 k に属する負荷の分割負荷数

$I = [i | (P_{ri} = k \text{ であるような負荷 } i \text{ に属する分割負荷番号}]$

P_{rl} ; 負荷 l の優先順位

[制約条件]

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i \in I} x_{ij} &= 1 && (\text{for } j = S_{(k-1)}+1, S_{(k-1)}+2, \dots, S_k) \\ \sum_{j=S_{(k-1)}+1}^{j=S_k} x_{ij} &= 1 && (\text{for } i \in I) \\ x_{ij} &\geq 0 && (\text{for } j = S_{(k-1)}+1, S_{(k-1)}+2, \dots, S_k, i \in I) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

(15)式によって計算される値は、当然、全負荷を一括して計算した(12)式の値より小さくなり得ないが、負荷の投入順序はブロック優先順に維持されている。

3. 問題の解法

以上に定式化された問題は次の3つの手順を順に実行することによって解くことができ、同時に負荷の投入順序が求められる。

- (1) t_j の計算
- (2) F_{ij} の計算
- (3) ブロック優先毎の最適解の計算

得られた停電損失をすべてのブロック優先について加え合すことによって、対応する総停電損失が計算される。もし、ブロック優先を考慮しない場合は全負荷に同一のブロック優先順位を付すことによって、全く同一の手順で求められる。

3.1 F_{ij} の計算

F_{ij} は t_j が決まれば、(10)式並びに(2)、(3)式より計算される。 t_j は計算開始時刻0より発電機出力を j だけ増加するのに要する時間であり、 $t_0=0$ として、

$$t_j = t_{(j-1)} + t_{j,(j-1)} \quad (18)$$

より計算される。ここで、 $t_{j,(j-1)}$ は、時刻 $t_{(j-1)}$ より発電機出力を j だけ増加するのに要する時間である。 $t_{j,(j-1)}$ は、(4)式を全発電機で合成した曲線の勾配から、発電機が出力をとり始める時間と定格出力に達する時間を考慮して、容易に計算することができる。

3.2 分枝限定法による解の計算

Little J. D. らの分枝限定法¹²⁾をこの問題に適用すると次のようになる。

(1) 分枝法 今、時点 j で負荷 i を投入するとき、これを含む集合を (i, j) で表わし、逆に時点 j で負荷 i を投入しないとき、これを含む集合を (\bar{i}, j) で表わすものとしよう。すると、考慮中のすべての可能な投入順序は (i, j) か (\bar{i}, j) のいずれかに含まれることになる。したがっ

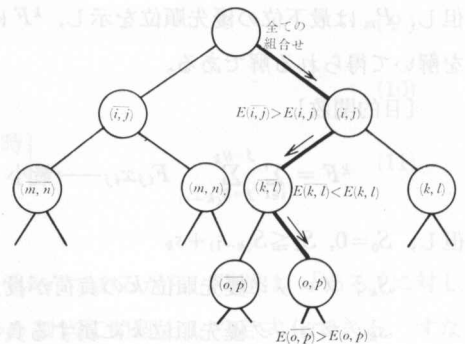


図-3 分枝の方法

て、考慮対象は、お互いに排他的な2つの部分集合に分割された。そこで、たとえば、各々の部分集合において、次に述べる限定によって求められる停電損失の増分の最も小さい (i, j) を次々に新しい考慮対象とすることによって、図-3のように分枝が可能である。図-3は、各ノードを通過する毎に、その円内に記された部分集合へ分枝することを意味している。

(2) 限定法 今、 (i_{k_b}, j_{k_b}) から (i_{k_b+1}, j_{k_b+1}) , $(\overline{i_{k_b+1}}, \overline{j_{k_b+1}})$ へ分枝したときの停電損失の下界を求める方法について考える。 (i_{k_b}, j_{k_b}) における下限は次のような関係から求めることができる。すなわち、 k_b 回目の分枝を添字 k_b で示すものとする、 $k_b=1$ のとき、下界 $E'(i_{k_b}, j_{k_b})$ は、

$$E'(i_1, j_1) = \sum_{m'=1}^n \left[\min_{l'} \left\{ F_{l'm'} \right\} \right] + \sum_{l''=1}^n \left[\min_{m''} \left\{ F_{l''m''} - \min_{l'''} (F_{l''m''}) \right\} \right] \quad (19)$$

として与えられ、 $k_b=k_b+1$ に対しては

$$E'(i_{k_b+1}, j_{k_b+1}) = \sum_{m' \in M_{k_b}} \left[\min_{l'} \left\{ F_{l'm'} \right\} \right] + \sum_{l'' \in L_{k_b}} \left[\min_{m''} \left\{ F_{l''m''} - \min_{l'''} (F_{l''m''}) \right\} \right] + E(k_b) \quad (20)$$

但し、 M_{k_b} ; k_b 回目の分枝の後においても $x_{im}=0$ (at $\forall i$) であるような時点 m の集合

L_{k_b} ; k_b 回目の分枝の後においても $x_{lj}=0$ (at $\forall j$) であるような負荷 l の集合

$E(k_b)$; k_b 回目の分枝の後の下界値。すなわち $E'(i_{k_b}, j_{k_b})$ または $E'(\overline{i_{k_b}}, \overline{j_{k_b}})$ のいずれか x_{ij} ; 負荷 i が時点 j で投入された時 1, それ以外で 0 をとるような変数

ここで、 F_{ij} は、新しい $x_{im}=1$ が選択されたとき、 $F_{lk_0}=\infty$, $F_{k_0m}=\infty$ ($k_0=1\sim n$) とおいた後、すべての i, j について、

$$F'_{ij} = F_{ij} - \min_i \left\{ F_{ij} \right\} - \min_j \left\{ F_{ij} - \min_i (F_{ij}) \right\} \quad (21)$$

を計算し、これを再び F_{ij} とおいたようなマトリクスの要素である。

さて、 k_b+1 回目の分枝における (i, j) の選択は次のようにして可能である。今、(21)式実行後の F_{ij} について、明らかに、 $F_{ij} \geq 0$ が成立つ。そこで $\min_{i,j} F_{ij}$ ((21)式実行後は 0 に等しい) なる (i, j) を選択するならば、下界値は(20)式で計算される値に等しい。ここで、

$$O(i, j) = \min_{k_0 \neq i, j} \left\{ F_{ik_0} \right\} + \min_{k_0 \neq i, j} \left\{ F_{k_0j} \right\} \quad (22)$$

を考えよう。 $O(i, j)$ は時点 j で負荷 i を投入しないと考えた場合、負荷 i を他の時点で投入したときに増加する停電損失と、時点 j で負荷 i 以外を投入することによって増加する停電損失の最小値、すなわち、時点 j で負荷 i を投入しないことによって増加する停電損失の最小値を表わしている。したがって、 $(\overline{i_{k_b+1}}, \overline{j_{k_b+1}})$ に対する下界は次式で与えられる。

$$E'(\overline{i_{k_b+1}}, \overline{j_{k_b+1}}) = E'(i_{k_b+1}, j_{k_b+1}) + O(\overline{i_{k_b+1}}, \overline{j_{k_b+1}}) \quad (23)$$

これらの下界がこの時点までに見つかっている損失の最小値より大きければ、ここで分枝を中

止する。

分枝限定法は、上記の分枝と限定を交互に繰り返して停電損失最小の投入順序を求める方法であり、全体手順のフローチャートを図-4に示している。

なお、分枝をもどった後、再び分枝を進める場合には、同一の停電損失パターンを持つ負荷の同一時点での投入はスキップして分枝の数の減少を図っている。

4. 例題による検討

4.1 モデル系統

以上の手法を図-5に示す30ノード9機系モデルに適用した。モデル系統の発電機は水力発電機がNo.25の1機、火力発電機が他の8機とした。発電機の起動特性、出力上昇特性を表-1に、負荷の停電損失曲線の係数と優先順位、ブロック優先順位を表-2に示している。

4.2 結果の検討および考察

モデル系統に対して表-3に示す4ケースの事故についてシミュレーションを行なった。その結果を表-4(a), (b)に示す。全ケースについて $\lambda=0.1$ P.U. にとり、同一負荷番号に属する負荷の停電損失曲線は同一として計算した。もちろん、結果の投入順序と総停電損失は線形計画法(Ford-Fulkerson法)によるもの⁴⁾と同じであり、停電損失は、従来の優先順位に従った場合、ブロック優先を考慮した場合、全負荷一括して本手法を適用した場合の順に小さくなっている。

線形計画法による演算時間は表-4(b)並びに図-6に示すようにほぼ脱落負荷量の2乗に比例して増加している。一方、分枝限定法を用いた場合は、変数の数(脱落負荷量²)に比例の増加に伴って演算時間は極端に増加する傾向にある。脱落分割負荷の数が20を超えると、全負荷一括最適化の例にみられるように、演算時間は600秒を超え、実用上計算不可能にな

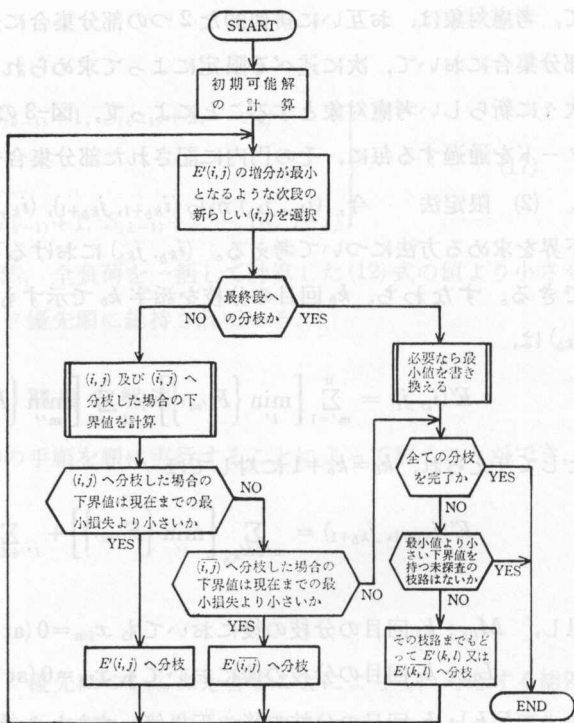


図-4 分枝限定法のフローチャート

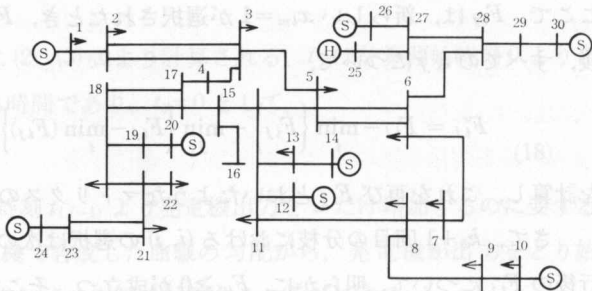


図-5 モデル系統

表-1 発電機 の 特性

発電機母線 No.	d_g	q_g	r_g	P_{y0}	c_{gP}
1	0.01	480.0	7.25×10^{-4}	0.396	20.0
10	0.05	600.0	8.78×10^{-4}	0.48	15.0
12	0.01	480.0	7.25×10^{-4}	0.617	20.0
14	0.05	360.0	9.82×10^{-4}	0.955	10.0
20	0.01	480.0	7.25×10^{-4}	1.57	20.0
24	0.02	420.0	8.34×10^{-4}	1.34	15.0
25	0.02	5.0	1.61	0.072	0.0
26	0.04	380.0	9.27×10^{-4}	0.40	15.0
30	0.05	360.0	9.84×10^{-4}	0.265	10.0

表-2 負荷 の 特性

負荷母線 No.	負荷量	a_i^1	b_i^1	c_i^1	a_i^2	b_i^2	c_i^2	ブロック 優先順位 (2レベル)	ブロック 優先順位 (3レベル)
5	1.2	175.0	1500.0	0.0	125.0	7500.0	0.0	1	1
6	0.2	50.0	10000.0	0.0	50.0	10000.0	0.0	1	1
7	1.1	75.0	0.0	0.0	45.0	3600.0	0.0	2	3
8	0.5	50.0	17500.0	0.0	75.0	14500.0	0.0	2	3
11	0.2	100.0	0.0	0.0	45.0	6500.0	0.0	1	1
13	0.1	25.0	5000.0	0.0	61.25	650.0	0.0	1	2

(注) a_i^h, b_i^h, c_i^h について $h=1; 0 \leq t < 60$ (min)
 $h=2; 60 \leq t < 1440$ (min)

表-3 事故 ケー ス

ケース No.	脱 落 負 荷 母 線 No.								総 脱 落 負 荷 量	
	運 転 中 の 発 電 機 母 線 No.									
	運 転 中 の 発 電 機 出 力									
1	5	6	7	11	13				2.8	
	1	10	20	24						
	0.1	0.6	1.255	1.345						
2	5	6	7	13					2.6	
	1	10	20	24						
	0.285	0.6	1.27	1.345						
3	5	11	13						1.5	
	1	10	20	24	25	26	30			
	0.396	0.552	1.57	1.345	0.072	0.4	0.265			
4	11	13							0.3	
	1	10	12	14	20	24	25	26		30
	0.396	0.454	0.343	0.955	1.57	1.345	0.072	0.4		0.265

表-4(a) 停電損失と負荷投入順序

ケース No.	全負荷一括最適化		ブロック優先 (2レベル)		ブロック優先 (3レベル)		従来優先順	
	停電損失 (千円)	投入順序	停電損失 (千円)	投入順序	停電損失 (千円)	投入順序	停電損失 (千円)	投入順序
1	3561.75	6→5→11 →7→13	3565.5	6→5→13 →11→7	3568.2	6→5→11 →13→7	3674.25	5→6→11 →13→7
2	3487.25	6→5→7 →13	3492.25	6→5→13 →7	3492.25	6→5→13 →7	3600.25	5→6→13 →7
3	3671.5	5→11→ 13	3671.5	5→11→ 13	3671.5	5→11→ 13	3671.5	5→11→ 13
4	146.0	13→11	146.0	13→11	193.5	11→13	193.5	11→13

表-4(b) 演算時間

(単位; 秒)

ケース No.	LP 法 (全負荷一括最適化)	分枝限定法		
		全負荷一括最適化	ブロック優先 (2レベル)	ブロック優先 (3レベル)
1	1.03	(>600)	375.56	112.33
2	0.94	(>600)	1.48	1.07
3	0.77	9.68	9.56	4.34
4	0.77	1.00	0.97	1.02

る。しかし、図-6並びに表-2~表-4からブロック優先によって脱落分割負荷の数が各々のブロックについて20以下になるように分割されると、長くとも300秒程度で演算が終了し、演算時間の減少に対してブロック優先が効果的であることがわかる。しかし、同一ブロック優先の負荷に脱落負荷が集中した場合は、ケース3(脱落負荷量1.5)に見られるように、ブロック優先による分割効果があまり期待できない場合もある。この場合、ブロック優先順位を付す段階で、 \downarrow と負荷量の兼ね合いから分割負荷の数が20を超えないよう配慮するならば、このような不安は解消される。また、表-4並びに図-6から、ブロック優先のレベル数の増加によって効果的に演算時間が減少していることがわかる。たとえば、ケー

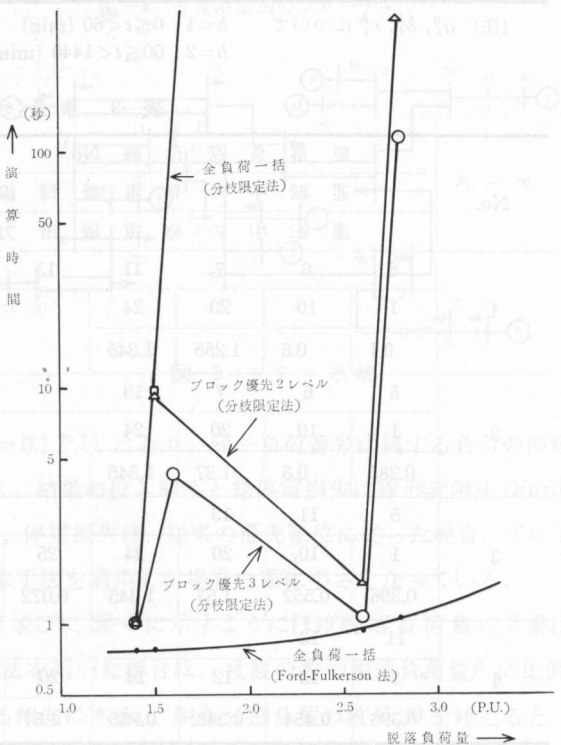


図-6 演算時間の比較

ス3のブロック優先(2レベル)とブロック優先(3レベル)の間では1つの負荷(分割負荷)がレベル1からレベル2へ移動しただけであるにもかかわらず、演算時間が半減しており、対象負荷数の減少も、同一停電損失パターンを持つ負荷の投入スキップによって演算時間の減少に寄与していることがわかる。

以上から、この問題に分枝限定法を適用した場合の演算時間について、次のようにまとめることができる。

(1) 脱落分割負荷の数がおよそ20以上になると、実用的な範囲の演算時間で結果が得られない。

(2) ブロック優先順位によって、各順位の分割負荷数を20以下になるように分割するならば、実用的な範囲の演算時間で結果を得ることができる。

(3) ブロック優先順位のレベル数を増すことは、脱落分割負荷の数を分散させるばかりでなく、各順位に属する停電損失パターンの数を減少することにもなり、演算時間の減少に効果的である。

なお、ブロック優先のレベル数を l 、異った停電損失パターンの期待数を k 、分割負荷数を n とするなら、演算時間は線形計画法の場合、およそ (n^2/l) に比例して増加するのに対し、分枝限定法の場合は、およそ $\sum_{i=1}^{k/l-1} (k/l-i+1)^{n/lk}$ に比例して増加する傾向にあることから、 k や n が大きい場合、 l も大きくするかまたは線形近似して線形計画法を適用する必要がある。したがって、変数の数が多い場合、より効果的な限定法を開発することが、この問題を解決する最も有力な手段と考えられ、今後の検討課題であろう。

5. あとがき

事故時、負荷に停電が発生した場合、その復旧順序を停電による損失が最小となるように決定する問題(線形割当て問題)が、仮定の変更によって非線形計画問題となる場合を考慮し、この問題に分枝限定法を適用して解いた場合の演算時間について検討した。

分枝限定法によって実用的な演算時間で解を得るためには脱落分割負荷の数を20以下とする必要があり、そのためにはブロック優先が効果的であった。しかし、脱落分割負荷の数が多く、ブロック優先のレベル数が小さい場合には効果が小さく、その場合、他の方法によって演算時間の減少を図る必要があり、今後、その方法(たとえば効果的な限定法)を開発する必要があることがわかった。

最後に、一連の研究において有益な御助言をいただき小池東一郎北見工業大学学長、長谷川淳北海道大学工学部助教授に深謝の意を表わします。また、計算には、北見工業大学データステーションを経由して北海道大学大型計算機センターのHITAC/M-180を利用したことを記し、関係各位に深謝申し上げます。

文 献

- 1) 鈴木, 幅: 電学論 B. Vol. 93, No. 8, p. 223 (1973).
- 2) 鈴木, 他: 電学論 B. Vol. 97, No. 3, p. 111 (1977).
- 3) 奈良, 山城: 北見工大研報. Vol. 10, No. 1, p. 65 (1978).
- 4) 奈良, 小池: 昭 54 年電気四学会北海道支部大会. No. 56, p. 66 (1979).
- 5) 奈良, 小池: 昭 54 年電気四学会北海道支部大会. No. 57, p. 68 (1979).
- 6) C. A. DeSalvo et al.: AIEE Trans. PAS. Feb. p. 1752 (1960).
- 7) R. B. Shipley et al.: IEEE Trans. PAS. Vol. 19, Sep./Oct., p. 2204 (1972).
- 8) IEEE COMMITTEE REPORT: IEEE Trans. Industr. Applic. Vol. IA-10, No. 2, p. 236 (1974).
- 9) H. Persoz et al.: IEE Conf. Publ. (Inst. Elect. Eng.) p. 123 (1977).
- 10) E. Dahl and J. Huse: IEE Conf. Publ. (Inst. Elect. Eng.) p. 138 (1977).
- 11) E. M. Mackay and L. H. Berk: CIGRE 1978 Session 32-07 (1978).
- 12) J. D. Little et al.: Oper. Res. Vol. 11 Nob./Dec. p. 972 (1963).