停電損失を考慮した事故時負荷復旧順序の決定方法

正 員 奈 良 宏 一 (北見工業大)

正 員 山 城 迪 (北見工業大)

正 員 小 池 東 一 郎 (北見工業大)

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、従来、負荷の重要度という観点から負荷に優先順位を付け、その順序に従って復旧する手法がとられてきた^{(1)~(4)}。

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筆者らは、固定的な優先順位ではなく、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⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

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、社会的影響など、停電によって生ず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の算出は場合によっては非常に困難であろうが、そのような場合でも大多数の同意を得られるような値の推定は可能であろうと考えられる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

本論文では、停電損失の全考察期間にわた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手法について提案する。しかし、電力会社の方針や需要家との契約によっては、停電損失とは別に優先順序を維持したい場合もあり得ることを考慮し、負荷ブロック単

位に優先順位を与えるブロック優先の概念も同時に提案する。なお、本論文では停電負荷の復旧順序のみを対象としており、脱落発電機や個々のしゃ断器の復旧順序については対象外としている。

以下では、まず、停電に起因する不都合が主に停電の大きさと継続時間によって影響を受けることを述べ、停電損失をこれらの関数として表現する。次に停電損失を最小とする問題が、適当な仮定のもとで線形計画問題として定式化できることを示し、その解法について述べる。最後にモデル系統への適用例を示し、提案する手法の有効性を立証する。

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 Δ 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なわない。
- (3) 発電コスト、送電損失など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 Δ 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などが発生することなく、無条件に可能であるものとする。

上記仮定のうち、(2)、(5)、(7)に関しては多少説

Determination of the Load Restoration Sequence Taking into Account the Cost of Interruptions Electrical Service. By Koichi Nara, Member, Susumu Yamashiro, Member, & Toichiro Koike. Member (Kitami Institute of Technology).

奈良宏一: 正員, 北見工業大学工学部

山城 迪: 正員, 北見工業大学工学部

小池東一郎: 正員, 北見工業大学学長

明を要する。まず、(5)については、通常、脱落発電機母線の復旧が負荷の復旧に先立ってなされることから負荷の復旧以前に発電機母線が充電されていると仮定しても不都合はない。但し、脱落発電機母線の復旧順序に関しては、起動時間などの条件から、あらかじめ決められているものと仮定し、本論文の対象外としている。(2)と(7)は、しゃ断器の投入順序に関する仮定である。投入すべき負荷が指定された場合に他の負荷の再しゃ断や過負荷が発生しないように、その負荷を復旧するためのしゃ断器投入順序の決定論理については、すでにいくつか発表されている^{(2)~(4)}。ここではこれらの論理を電圧正常の条件も含めて適用可能であるものとして、(2)、(7)の仮定をおいている。

〈2・2〉 波及事故への対処 電力系統に事故が発生した場合、一次的な事故原因が波及し、大事故に至るケースがあり、特にこのような場合の復旧に本手法の適用が期待される。

種々の原因⁽⁷⁾による事故波及は、最初の事故が発生した後、ある時間を持って発生する。そのため、系統は最初の事故発生後、1977年のニューヨーク大停電事故などに見られるように、ある時間をおきながら次々と負荷しゃ断、発電機脱落を繰返し、崩壊していく。

本手法の計算は、連系点や上位系統からの緊急融通緊急負荷しゃ断、再閉路などの系統安定化操作も含め一連の系統崩壊過程が終了した後、事故様相を認識し、可能な発電機母線を復旧してから、この時刻を 0 ($u=0$) としてここから開始される。しかし、発電機や負荷の脱落は $u=0$ の時点より以前に発生しており、負荷の停電損失や発電機停止時間の計算にはこの間の時間も考慮されねばならないという問題が生ずる。

以下では、基準時間 u との混乱を防ぐため、この時間を発電機または負荷 i に対して t_{iers} の記号で与え、発電機停止時間または停電継続時間 t_i を $t_i = u + t_{iers}$ として波及事故に対処している。

〈2・3〉 停電損失の定義 停電による損失を価格に換算する調査は各国でなされており、その調査値が報告されている^{(9)~(14)}。

DeSalvo 氏らは、停電による損失を不快感という言葉で表わし、これが、(1)停電のひん度、(2)停電の大きさ、(3)停電の継続時間、(4)停電が発生する時間帯、(5)停電が発生する季節、(6)停電の原因の六つの属性によって大きく影響を受けるとして各々についてその変化の曲線を与えている⁽⁹⁾。この報告では、負荷の種別による不快感の変化についてはふれていないが、文献(10)、(11)において、各種工業、商業、農業、輸送業、家庭などの停電損失の調査結果が報告さ

れている。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(9)に、また、12種類の工業に分類した場合の傾向が文献(14)に報告されている。これらの文献によると、一般的傾向として、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、負荷の種別ごとに増加の度合いが全く異なることがわかる。

Personoz 氏らによると、工業負荷の停電損失は、一般的に、

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

但し、 F : 停電損失、 t : 停電継続時間、 L : 停電の大きさ

で近似されるとしている⁽¹²⁾。(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 は例えば、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

第 1 図 負荷の停電損失

Fig. 1. A cost of interruptions electrical service.

で増加する損失の項の近似を表わしていると考えることができる。従って、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、各区分ごとに停電損失を(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。

第1図に文献(14)に報告された値と、筆者らがそれを二次曲線で近似した例を示す。図で、○, ●, ×などは各々文献(14)に報告された値を表わし、実線が近似二次曲線を表わしている。図では0~1時間と1~24時間に分離して二次曲線で近似している。また、時間のスケールも0~1時間と1~24時間で異っている。停電損失の増加の割合は一般に時間の経過と共に大きくなる傾向にあるが、24時間に近づくにつれて、一部で時間の経過に従って停電損失の増加の割合が減少し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、負荷の種別ごとに異った二次曲線で近似され则认为て良い。

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、これを分割負荷と呼ぶことにしよう。もし、 i 番目の分割負荷がちょうど種類の負荷しか含んでいなければ、停電継続時間の h 区間目、すなわち、

$$t_{h-1} \leq t_i = u + t_{iers} < t_h$$

の時間帯における分割負荷 i に対する停電損失を表わす関数は、次のようになる。

$$F^h(t_i) = (a^h + b^h t_i + c^h t_i^2) \Delta \quad \dots\dots\dots (2)$$

但し、 $F^h(t_i)$: 停電継続時間の h 区間目における分割負荷 i の停電損失、 t_{iers} : 負荷脱落時点から復旧順序計算開始までの時間、 u :

復旧順序計算開始時点と0とした相対時刻

もし、分割負荷 i が止むをえず n_0 種類の負荷を含んでしまう場合には、各々負荷の加重平均をとり、停電損失を表わす関数を(2)式の代りに、次式とする。

$$F^h(t_i) = \sum_{w=1}^{w=n_0} L_i (a_w^h + b_w^h t_i + c_w^h t_i^2) \quad (3)$$

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・4〉 発電機出力上昇曲線 発電機出力上昇曲線は折れ線で与えられるものとし、次式で表わす。

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

但し、

$$\text{零出力時 } (t_g < t_{g1}): d_g = 0, e_g = 0$$

$$\text{出力上昇時 } (t_{g1} \leq t_g < t_{g2}): d_g > 0, e_g \geq 0$$

$$\text{出力一定運転時 } (t_{g2} \leq t_g): d_g = 0, e_g = p_g(t_{g2})$$

$$t_g = u + t_{gers}$$

t_g : 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、復旧順序計算開始までの時間

$p_g(t_g)$: 時刻 t_g 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か、または、発電機に最低出力の制限がある場合である。

一方、 t_{g1} は発電機が脱落后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、

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

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。

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

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/(発電機 g のボイラ、タービンの温度上昇の時定数)

従って、(5)式は、

$$t_{g1} = t_{g0} + \{q_g(1 - \varepsilon - r_g t_{g0}) + C_{gp}\} \quad \dots\dots (7)$$

として t_{g0} のみの関数となる。

なお、 t_{g2} は、定格出力を P_{g0} とすれば、

$$t_{g2} = (P_{g0} - e_g'')/d_g \quad \dots\dots\dots (8)$$

但し、

$$e_g'': e_g' - d_g t_{g1}$$

e_g' : 発電機 g の最低出力、または、脱落に至らなかった場合は出力上昇前の出力

で与えられる。

(4)~(8)式で表わされる発電機出力上昇曲線と時間の関係を第2図に示す。

〈2・5〉 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 Δ の整数倍であるから、脱落負荷 l は $n_l (= L_l/\Delta)$ 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

第2図 発電機出力上昇曲線と時間の関係

Fig. 2. Relation of time and incremental power characteristic of generators.

は、連系点も、等価的に発電機母線とみなせば、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 u で投入され、そのときの分割負荷 i の停電継続時間を t_i と仮定すると、分割負荷 i の停電損失は、 $F_i^h(t_i)$ ($t_{h-1} \leq t_i < t_h$)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 Δ だけ増加されるごとに一つずつ投入されていくことから、 t_i は分割負荷ごとに異った値をとることになる。今、発電機出力が $j \cdot \Delta$ だけ増加した時点の時刻を u_j とし、分割負荷 i が時刻 u_j に投入されたときの停電損失を F_{ij} とするなら、全分割負荷の累積停電損失は次式で表わされる。

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n'} F_{ij} x_{ij} \quad \dots\dots\dots (9)$$

但し、

$$F_{ij} = F_i^h(t_i) \dots\dots\dots (10), \quad t_i = u_j + t_{iers} \dots\dots\dots (11)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1: \text{分割負荷 } i \text{ を時刻 } u_j \text{ で投入したとき} \\ 0: \text{上記以外} \end{cases}$$

n' : 分割負荷を投入する時刻の数 (すべての分割負荷が異った時刻に投入される場合は $n'=n$)

〈2・6〉 発電機の出力上昇に制約がない場合の定式化
どの発電機にも、定められた発電機出力の上限と出力上昇率以外に出力上昇に関する制限がない場合には、(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 に対して一つの j を定め、目的関数 F を最小にする」という割当て問題(付録参照)として定式化できる。すなわち、

〔目的関数〕

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

〔制約条件〕

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

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

〔目的関数〕

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

〔制約条件〕

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

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

〈2・7〉 発電機の出力上昇に制約がある場合の定式化
発電機出力上昇に関する制約には、①発電機出力の上限(定格出力または故障などによる制限)、②発電機出力上昇率、③最低出力制限の3通りが考えられる。このうち①は発電機の定格出力 P_{00} 、②は出力上昇率 d_0 で与えられ、制限値に変更があった場合は P_{00} または d_0 を変更することによって対処できる。そこで、ここでは、最低出力に関する制約のみについて考察する。いま、発電機に最低出力制限値 $P_{lk} > \Delta$ がある場合を考えると、この場合には、時点 j で $a_j \cdot \Delta$ の負荷をとらねばならない。但し、 $a_j = P_{lk} / \Delta$ であり、 P_{lk} は Δ の整数倍と仮定する。この場合、(12)'式の目的関数に対し、制約条件式を、

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=m} x_{ij} &= a_j \quad (\text{for } j=1, 2, \dots, n') \\ \sum_{j=1}^{j=n'} x_{ij} &= b_i \quad (\text{for } i=1, 2, \dots, m) \\ x_{ij} &\geq 0 \quad (\text{for } i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n') \end{aligned} \right\} (15)$$

$$\text{但し, } \sum_{i=1}^{i=m} b_i = \sum_{j=1}^{j=n'} a_j = n$$

$$n': \sum_{j=1}^{j=n'} a_j = n \text{ を満足する最小の正の整数と}$$

でき一般的な最小費用流量問題として定式化できる。

〈2・8〉 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)～(15)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)～(15)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。この場合、問題は次式で与えられる。

〔目的関数〕

$$F = {}^1F + {}^2F + \dots + {}^kF + \dots + {}^mF \rightarrow \text{最小} \quad (16)$$

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〕

$${}^kF = \sum_{i \in I} \sum_{j=S_{(k-1)}}^{j=S_k} F_{ij} x_{ij} \rightarrow \text{最小} \dots \dots \dots (17)$$

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

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_{ri} : 負荷 i の優先順位

〔制約条件〕

(a) 発電機の出力増加に関する制限および同一の停電損失を与える負荷を考慮しない場合 ($S_k = S_{(k-1)} + s_k$)

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

.....(18)

(b) 発電機の出力増加に関する制限および同一の停電損失を与える負荷を考慮した場合 ($S_k \leq S_{(k-1)} + s_k$)

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i \in I} x_{i, S_{(k-1)}} &= a_{S_{(k-1)}}'' \\ \sum_{i \in I} x_{ij} &= a_j \quad (\text{for } j = S_{(k-1)} + 1, S_{(k-1)} + 2, \dots, S_{k-1}) \\ \sum_{i \in I} x_{i, S_k} &= a_{S_k}' \\ \sum_{j=S_{(k-1)}}^{j=S_k} x_{ij} &= b_i \quad (\text{for } i \in I) \\ x_{ij} &\geq 0 \quad (\text{for } j = S_{(k-1)}, S_{(k-1)} + 1, \dots, S_k, i \in I) \end{aligned} \right\} \dots (19)$$

但し,

$$\left. \begin{aligned} a_{S_k}' &= s_k - a_{S_{(k-1)}}'' - \sum_{j=S_{(k-1)}+1}^{j=S_{k-1}} a_j \\ a_{S_{(k-1)}}'' &= a_{S_{(k-1)}} - a_{S_{(k-1)}}' \\ \sum_{i \in I} b_i &= \sum_{j=S_{(k-1)}+1}^{j=S_{k-1}} a_j + a_{S_k}' + a_{S_{(k-1)}}'' = s_k \end{aligned} \right\} \dots (20)$$

ここで、 a_{S_k}' は、ブロック優先順位 k に属する負荷が投入される最終の時点 S_k で投入される分割負荷の数である。また、 $a_{S_{(k-1)}}''$ は、ブロック優先順位 $(k-1)$ に属する負荷が投入される最終の時点 $S_{(k-1)}$ で、ブロック優先順位 $(k-1)$ に属する分割負荷をすべて投入した後、残りの発電機出力に見合う分割負荷の数である。すなわち、第3図において時点 S_k でブロック優先順位 k に属する分割負荷は $a_{S_k}' \cdot \Delta$ だけこの時点の発電機出力から受電すれば良く、残りの発電機出力 $a_{S_k}'' \cdot \Delta = (a_{S_k} - a_{S_k}') \cdot \Delta$ はブロック優先順位 $(k+1)$ に属する分割負荷にまわされる。また、 $a_{S_k}' \cdot \Delta$ はブロック優先順位 k に属する分割負荷が、時点 $S_{(k-1)}$ で受電した電力 $a_{S_{(k-1)}}'' \cdot \Delta$ と時点 $S_{(k-1)} + 1 \sim S_{k-1}$

第3図 発電機増加出力の割当て

Fig. 3. Assignment of incremental generator output power.

第 4 図 解法のフローチャート

Fig. 4. Flow chart of a solution.

に受電した電力 $\sum_{j=S_k-1}^{j=S_k-1} a_j \cdot \Delta$ をブロック優先順位 k に属する負荷の大きさ $s_k \cdot \Delta$ より差引いた値であることがわかる。もし、すべての k について $a_{s_k}=1$ であるなら、すべての k について $a_{s_k} s_k = 0$ となり、これは(18)式の場合に相当する。

3. 問題の解法

以上に定式化された問題は、次の三つの手順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) u_j の計算, (2) F_{ij} の計算

(3) ブロック優先ごとの線形計画問題の解の計算

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。以上の計算手順を第 4 図にフローチャートの形で示している。

〈3.1〉 F_{ij} の計算 F_{ij} は u_j が決まれば、(10)式ならびに、(2), (3)式より計算される。 u_j は復旧順序計算開始時刻 0 より発電機出力を $j \cdot \Delta$ だけ増加するのに要する時間であり、 $u_0=0$ として、

$$u_j = u_{(j-1)} + u_{\Delta, (j-1)} \dots \dots \dots (21)$$

より計算される。ここで、 $u_{\Delta, (j-1)}$ は、時刻 $u_{(j-1)}$ より発電機出力を Δ だけ増加するのに要する時間であり、(4)式を全発電機で合成した曲線のこう配から、

第 5 図 Ford-Fulkerson 法のフローチャート

Fig. 5. Flow chart of Ford-Fulkerson method.

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〉 線形計画問題の解の計算 (17), (18)式または、(17), (19)式はシンプレックス法などによっても整数解を得ることができるが、Ford-Fulkerson 法によって、より高速に解を得ることができる。Ford-Fulkerson 法は(17), (18)式または、(17), (19)式の双対問題に対する解法であり⁽¹⁵⁾、本問題に適用した論理のフローチャートを第 5 図に示している。

4. 適用例

〈4.1〉 モデル系統 以上の手法を第 6 図に示す 30 ノード 9 機系モデルに適用する。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、出力上昇特性を第 1 表に、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第 2 表に示している。

〈4.2〉 結果の検討および考察 モデル系統に対

第 6 図 モデル系統

Fig. 6. Power system model.

第 1 表 発電機の特性

Table 1. Characteristics of generators.

発電機母線 No.	d_g	q_g	r_g	P_{go}	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

して第3表に示す5ケースの事故について、発電機の出力制限を考慮しないとした場合のシミュレーションを行なった。その結果を第4表(a), (b)に示す。全ケースについて $d=0.1$ 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。発電機出力と負荷投入の関係を明確にするために結果の一例として、ケース No. 5 の発電機と負荷の立上りの状態を第7図に示している。第4表からわかる通り、停電損失は、期待されたように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おり、本手法の有効性が確認できる。もちろん、負荷の停電損失曲線の特性によっては大きな効果が期待できない場合もあり得るが(例えば例題のケース No. 4), 異なる負

第 2 表 負荷の特性

負荷母線 No.	負荷量	a^1	b^1	c^1	a^2	b^2	c^2	優先順位	ブロック 優先順位
5	1.2	175.0	1,500.0	0.0	125.0	7,500.0	-180,000.0	1	1
6	0.2	50.0	10,000.0	0.0	50.0	10,000.0	0.0	2	1
7	1.1	75.0	0.0	0.0	45.0	3,600.0	-108,000.0	6	2
8	0.5	50.0	17,500.0	0.0	75.0	14,500.0	90,000.0	5	2
11	0.2	100.0	0.0	0.0	45.0	6,500.0	-192,000.0	3	1
13	1.0	25.0	5,000.0	0.0	61.25	650.0	130,500.0	4	1

(注) a^h, b^h, c^h について $h=1: 0 \leq t < 60$ (min), $h=2: 60 \leq t < 1,440$ (min)

第 3 表 事故ケース

Table 3. Fault cases.

ケース No.	総 脱 落 負 荷 量	脱落負荷母線 No.	発 電 機 出 力 (出力が 0.0 のものは脱落発電機)								
			# 1	# 10	# 12	# 14	# 20	# 24	# 25	# 26	# 30
1	3.3	5, 6, 7, 8, 11, 13	0.1	0.1	0.0	0.0	1.255	1.345	0.0	0.0	0.0
2	2.8	5, 6, 7, 11, 13	0.1	0.6	0.0	0.0	1.255	1.345	0.0	0.0	0.0
3	2.6	5, 6, 7, 13	0.285	0.6	0.0	0.0	1.27	1.345	0.0	0.0	0.0
4	1.5	5, 11, 13	0.396	0.552	0.0	0.0	1.57	1.345	0.072	0.4	0.265
5	0.3	11, 13	0.395	0.454	0.343	0.955	1.57	1.345	0.072	0.4	0.265

第 4 表

Table. 4.

(a) 負荷の復旧順序

(a) Restorative order of the load.

ケース No.	全負荷一括最適化	ブロック優先順による最適化	従来の優先順による復旧
1	8→6→5→11→7→13	6→5→13→11→8→7	5→6→11→13→8→7
2	6→5→11→7→13	6→5→13→11→7	5→6→11→13→7
3	6→5→7→13	6→5→13→7	5→6→13→7
4	5→11→13	5→11→13	5→11→13
5	13→11	13→11	11→13

(b) 累積停電損失と演算時間

(b) Integrated cost of power interruptions and computing time.

ケース No.	全負荷一括最適化		ブロック優先		従来の優先順	
	停電損失 (千円)	演算時間 (秒)	停電損失 (千円)	演算時間 (秒)	停電損失 (千円)	演算時間 (秒)
1	6,572.75	1.4	7,265.0	1.14	7,514.75	0.89
2	3,561.75	1.03	3,565.5	0.92	3,674.25	0.87
3	3,487.25	0.94	3,492.25	0.95	3,600.25	0.84
4	3,671.5	0.77	3,671.5	0.84	3,671.5	0.75
5	146.0	0.77	146.0	0.74	193.5	0.64

荷の種別に対する停電損失が考察区間で交っているような場合には、一般に数%以上の停電損失の改善を期待できる。

次に演算時間は、最も大きな事故の例(ケース No. 1)でも 1.4 秒(北海道大学大形計算センタ HITAC M-180 を使用)であり、オンライン計算を行なっても演算時間の観点からは問題はないと考えられる。演算時間は第4表からわかる通り、およそ(脱落負荷量

Table 2. Characteristics of loads.

第 7 図 負荷と発電機出力の立上りの状態の例

Fig. 7. Example of power rising state of generators and loads.

/Δ) の 2 乗に比例して増加する傾向にあるが脱落負荷量が大きくなった場合は、Δ の値も大きくすることによって、多少停電損失の精度を犠牲にするが演算時間を短縮することができる。

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負荷の損失が最小となるように決定する手法について提案し、停電復旧時のサービスレベル向上に寄与することができることを示した。

今後、更に、停電損失の確率的な取扱い、過負荷解消や電圧調整などを考慮した復旧手順⁽⁴⁾をも含めた総合的かつ統一的な事故時自動復旧操作論理への拡張などを課題として検討していきたい。

終りに、一連の研究において有益な御助言を頂く北海道大学工学部長谷川淳助教授に深謝申し上げます。(昭和 54 年 12 月 18 日受付, 同 55 年 8 月 25 日再受付)

文 献

- (1) 鈴木・幅: 電学論 B, 93, 223 (昭 48-8)
- (2) 鈴木, 他: 電学論 B, 97, 111 (昭 52-3)
- (3) 奈良・山城: 北見工大研報, 10, 1, 65 (昭 53-11)
- (4) 奈良・小池: 昭 54 電気学会全大, No. 812
- (5) 奈良・小池: 昭 54 年電気四学会北海道支大, No. 56
- (6) 奈良・小池: 同上, No. 57
- (7) 例えば, 関根: 「電力系統工学」, 266 (昭 41-5) 電気書院
- (8) R. Sugarman: IEEE Spectrum Nov. p. 44 (1978)
- (9) C.A. DeSalvo, et al.: AIEE Trans. Power Apparatus Syst. Feb. p. 1752 (1960)
- (10) R.B. Shipley et al.: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-91, Sep./Oct. p. 2204 (1972)
- (11) IEEE COMMITTEE REPORT: IEEE Trans. Industr. Applic IA-10, 2, p. 236 (1974)
- (12) H. Persoz et al.: IEE Conf. Publ. (Inst. Elect. Eng.) p. 123 (1977)

- (13) E. Dahl & J. Huse: *ibid.* p. 138 (1977)
- (14) E.M. Mackay & L.H. Berk: CIGRE 1978 Session 32-07 (1978)
- (15) L.R. Ford & D.R. Fulkerson: "Flows in Networks" (PRINCETON UNI. PRESS) p. 93 (1962)

付 録

割当て問題と最小費用流量問題 割当て問題は人員配置問題 (Assignment Problem) と呼ばれる。今, n 人のうちの i 番目の人間に n 種類の仕事のうち種類目の仕事を割当てたときの作業時間を C_{ij} , j 仕事の割当て状況を x_{ij} とし, 人に u 種類の仕事を割当てると,

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_{ij} = 1 \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (\text{付 } 1)$$

$$\sum_{j=1}^{j=n} x_{ij} = 1 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (\text{付 } 2)$$

という制約がある。また、目的関数として全体の作業時間を最小にすることをとれば次のようになる。

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} C_{ij} x_{ij} \rightarrow \text{最小} \quad \dots\dots\dots (\text{付 } 3)$$

すなわち、(付 1)~(付 3) 式のように定式化できる種類の問題を割当て問題と呼んでいる。

一方、最小費用流量問題 (Minimal Cost Flow Problem) とは、供給地 i (供給可能量 b_i) から消費地 j への単位輸送量あたりの費用 C_{ij} が与えられた場合に、消費地 j で需要 a_j を満すという条件で、供給地から消費地までの輸送費用を最小にする問題である。今ある物資を m 個所の供給地から n 個所の消費地へ輸送するものとする、輸送量 $x_{ij} \geq 0$ として次の制約式が成立つ。

$$\sum_{i=1}^{i=m} x_{ij} \geq a_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad \dots\dots\dots (\text{付 } 4)$$

$$\sum_{j=1}^{j=n} x_{ij} \leq b_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad \dots\dots\dots (\text{付 } 5)$$

目的関数は全体の輸送費用を最小にすることなので、

$$\sum_{i=1}^{i=m} \sum_{j=1}^{j=n} C_{ij} x_{ij} \rightarrow \text{最小} \quad \dots\dots\dots (\text{付 } 6)$$

となる。この種の問題では、一般に (付 4), (付 5) 式は等式であり, $\sum a_j = \sum b_i$ が成立つことが多い。従って、割当て問題は最小費用流量問題の特殊な場合である。これらの問題には、問題の特殊性を利用した簡単な解法が報告されており、中でも Hangrian 法, North-West End 法, Ford-Fulkerson 法などがよく利用される。