DP法を適用した事故復旧操作手順決定法

正員 辻 浩一 (有限会社 テクノ辻)

正員 牧野 理一 (北陸電力株式会社)

A Method of Determining Restorative Operation
Process using Dynamic Programming

Kouichi Tsuji, Member (Techno Tsuji Ltd)

Riichi Makino, Member (Hokuriku Electric Power Co.Ltd)

There have been many studies for automatic failure restoration problem of power system. This paper proposes a new method of determining restorative operation process using dynamic programming. In this paper, a branch on-off operation is corresponding to a multi-stage decision of DP method, and the operation is carried out on every stage from initial failure system to final restorative system. Moreover, a power system configuration is formularized by laws of Kirch-Hoffs.

For a practical use of this method, it is necessary to accelerate calculation time. Therefore, two measures are taken as follows, 1) priority branch method for selecting an operation branch. 2) state reduction method for reducing system states with lower estimation evaluated by the objective function on every stage. By using this method on a model system, the effectiveness of this algorithm has been demonstrated.

キーワード：事故復旧，操作手順，DP法，多段決定，系統状態数，優先ブランチ

1. まえがき

電力系統における「事故復旧の自動化、迅速化」は初期の研究発表⁽¹⁾があつて以来、様々な開発努力が続けられてきたが、まだ本格的な自動化のレベルに達していないと言えるであろう。

事故復旧操作の論理を難しくしている理由は種々指摘されているように⁽²⁾開閉器の状態が開・閉の離散変数となり、広汎な組合せ問題となるため連続変数を前提とする通常の最適化手法が適用できないことである。

事故復旧操作をコンピューターで決定しようとするアプローチには「知識工学的手法」、「ヒューリスティック手法」、「数値計画的手法」などが発表されているが、適用系統に左右されず普遍的な解が求められる「数値計画的手法」を論理の核とすべきだと筆者は考えている。

事故復旧操作の論理は、複雑で大規模な復旧操作の過程を整理し⁽²⁾「事故状況把握」、「事故区間判定」、「復旧目標系統の決定」、「復旧操作手順の決定」に区分することができる。この論文の対象は事故直後の初期系統から目標系統に至る「復旧操作手順の決定」である。復旧操作手順決定に、数値計画的手法を適用した例には文献^(3,4,5)などがあるが、このうち文献⁽³⁾は混合整数計画法で問題を解いており、系統規模が大きくなった場合、演算時間が長くなり現状では実用化に限界があると考えられる。文献^(4,5)は目的関数を初期から復旧までの供給支障電力量とすることが困難である。

数値計画的手法の中で、歴史の古い動的計画法(DP)

は多段決定法とも呼ばれ操作手順のような時系列的最適化問題には向いていると言われている。しかしながら、DP法の最適性が数学的に保証されるためには各段における決定がその段以前の目的関数値に影響を与えないこと(マルコフ過程)が必要である。

本論文では、初期系統と復旧目標系統で開・閉状態に差があるブランチを操作対象とし、操作は1ステップずつ直列に実行し、初期から復旧までの供給支障電力量を最小とする手順を求めている。このため一度復旧した負荷の供給支障電力量は確定され、以後の操作には影響されないの、マルコフ過程を満足していると言える。

DP法を復旧操作問題に適用する場合、手順数を m とすると操作手順の組合せ数は $m!$ 通りあり、手順数が増すと組合せ数が急激に増加する。これは“次元の呪い”⁽⁶⁾と呼ばれ、DP法の致命的な欠点となっている。そこで、すべての組合せから厳密な解を求めるのではなく、経験にもとづくヒューリスティックな手法を加味し、最適性は保証されないが、実用性のある準最適解を得る方策をとることとした。DP法を操作手順決定問題に適用するには、操作による系統状態変化をいかに速く計算し、系統状態数をいかに抑制するかが課題となる。

筆者らはi)ブランチの開・閉状態を仮想の移相器で表現し、系統操作をLP法におけるピボット操作に対応させることにより潮流計算を高速化しii)系統操作をDP法の段階に対応させ途中の段階で評価値の判定によって状態数を削減する手法を導入し、発電・負荷混在系統の50ステップ操作問題を約36秒で解くことができたので、その論理とシミュレーション

ョン結果について報告する。

2. 手順決定問題とDP法

<2.1>問題設定 操作手順決定は平常時・作業時の運用にも適用できるが、ここでは事故時にしぼり次のように問題設定する。

「事故直後の一次安定な状態（初期系統）と復旧目標系統のそれぞれ設備諸元、系統構成、電源・負荷の状態が与えられて、初期から復旧までの供給支障電力量を最小とする復旧操作手順を求めよ。ただし、無効電力は無視し、電力系統の諸量は有効電力でのみ表されるものとし、送電線の1号線2号線や線路開閉器はまとめて一つのブランチに簡略化できるものとする。

操作対象は初期系統と復旧目標系統で、開・閉状態に差があるブランチと出力に差がある発電機とし、ブランチ操作速度と発電機出力の立ち上がりカーブは与えられているものとする。」

<2.2>DP法適用の概念 電力系統の運用問題にLP法が適用されることが多く筆者らもLP法にこだわってきたが、復旧操作手順決定の場合次のような問題がある。一つの時間断面の電力系統状態は一次式で定式化できるがブランチの開閉状態を時系列的に結びつける方法が見つからないこと、無理に断面毎に変数を定義すると制約条件マトリックスの規模が大きくなり演算時間の面から、実用化の目度が立たなくなる。

一方DP法は多段決定法とも呼ばれ、一つの段階での組合せ計算結果を記憶しておき、以降の段階で無用な組合せ計算を回避する手法である。このDP法で操作手順を求め一般的な概念を図1で簡単に説明する。

図1 DP法 の概念図
Fig.1 Concept diagram of DP method

システムの状態 i が1から m までの段階で表わされるものとし、すぐ前の状態 x_{i-1} と操作 u_i によって状態変換 T^i が起こり状態 x_i に移行するものとする。この状態変化の出力 y_i を段階 i における評価値とすれば (1) 式の F がシステム総合の目的関数となる。

$$F = y_1 + y_2 + \dots + y_m \longrightarrow \min \quad (1)$$

この F を最小化ならしめる操作 $u_1, u_2, \dots, u_m$ を決定することがDP法のねらいである。操作手順では u がブランチ操作に対応し、 x_0, x_m はそれぞれ初期、復旧時の系統状態である。出力 y_i は段階 i で復旧した負荷の供給支障電力量で F は復旧完了までの供給支障電力量を表している。電力系統の平常

時や作業時にはループ切替や回線切替で同一ブランチの開・閉操作が行われるが、事故時に復旧系統が決まったあと、現在系統から目標系統への移行過程では複数回の操作がほとんどないので、操作は1ステップずつ直列に且つ等間隔 (ex.1分間) に実行されるものとする。なお、以下の説明において操作手順の時系列的意味をもたす場合、“時点”という表現を使うが、これはDP法の段階と同義語であることをこわしておく。

3. 問題の定式化

DP法で系統状態の組合せを比較し、各段における新しい系統状態を設定するには具体的に次の3項目の演算処理が必要になる。

- 操作候補を検出する。
- ブランチ過負荷など、操作の実行可能性をチェックする。
- 操作を評価し、有利な組合せを決める。

系統状態の組合せ数が多いので、状態把握と操作による潮流変化を高速に計算できるよう電力系統の表現に工夫をこらしており、ループ系統と放射状系統に分けて説明する。

なお、以下の記述においてマトリックスの高速処理を理解しやすくするため、LP法のタブローに準拠し、マトリックス A とベクトル x の乗算 $A \cdot x$ を次のように表現する。

x_1	x_2		x_n	x
a_{11}	a_{12}		a_{1n}	A
a_{21}			$:$	
$:$			$:$	
a_{m1}			a_{mn}	

<3.1>電力系統の表現(ループ系統)

(1) キルヒホッフの第一法則 ノードに接続されるブランチ潮流 P_B と負荷 P_L 、発電機出力 P_G でキルヒホッフの第一法則が成立する。ここでブランチ潮流を $\bar{P}_B \cdot P_B$ としているのは過負荷を検出しやすくするため、ブランチ容量を1.0とする単位法表現にしているからである。

$$\sum \bar{P}_B(j) \cdot P_B(j) + P_G(n) - P_L(n) = 0 \quad (2)$$

図2 ノードに出入りする潮流
Fig.2 Power flow for node

ノード毎に (2) 式を設定し、連系点などのスラックノードには連系潮流変数 P_s を付加する。

(2) キルヒホッフの第二法則 遮断器のオン・オフをブランチに直列に挿入された仮想の移相器の $E_B(B)$ で等価的に模擬し、キルヒホッフの第二法則を (3) 式で表わす。

図3 ブランチ開閉の等価回路

Fig. 3 Equivalent circuit for branch open and shut

$$(S(NF)-S(NT)) S_0 = X_B(B) \bar{P}_B(B) P_B(B) + S_0 E_B(B) \dots (3)$$

$X_B(B)$: ブランチのリアクタンス (単位法表現)

$S(NF)$, $S(NT)$: 両端ノードの位相角

(単位法表現で充電時ほとんど1.0)

S_0 : スラックノードに与える基準位相角 (rad)

ここで、ブランチ潮流 $P_B(B)$ と $E_B(B)$ はいずれか片方が零の値をとる排他変数⁽⁷⁾とする。

これによって、ブランチオン・オフの離散的制御を線形な式で表現することができ、LP法におけるピボット操作(基底変数と非基底変数の交換)で P_B と E_B を入替え系統構成を変化させることができる。

(3) 負荷の模擬 送電線CBが投入と同時に当該変電所の負荷が生きたとするとブランチ操作で負荷を制御することになる。負荷をノードの位相角に比例させた等価アドミッタンス $Y_L(n)$ で表現し、ブランチオフによりノードの位相角が零になると(停電を意味する)負荷の値 $P_L(n)$ が連動して零となる回路で模擬する。

$$P_L(n) = Y_L(n) \cdot S(n) \dots (4)$$

ただし $Y_L(n) = P_{Lo}(n)/S_0$ $P_{Lo}(n)$: 事故前の負荷の値
ブランチ潮流によって、ノードの位相角は変化し(4)式の $P_L(n)$ は一定でないが、スラックノードの基準位相角 S_0 を100rad程度に大きく設定すると、 $P_L(n)$ の誤差は0.1%以下に抑制できる。

(4) 発電機の出力カーブ 発電機出力は引出しブランチ投入後個々の速さで立ち上がるので、あらかじめ運転出力カーブを決めておく必要がある。

出力カーブは、各時点のブランチ潮流計算がしやすいように出力変化をテーブルで設定しておく。一つの操作時間をステップ時間 t_u とし、ステップ毎に ΔP_G を与える。

出力変化テーブル例

0	0	0.5	0.2	0.2	0.1	0	0
---	---	-----	-----	-----	-----	---	---

図4 発電機立ち上がりカーブ

Fig. 4 Starting curve of generator operation

発電機出力は、現在値を $P_G(t-1)$ として (5) 式で計算する。

$$P_G(t) = P_G(t-1) + \Delta P_G(t) \dots (5)$$

(5) マトリックス表現 (2)~(4)式において制御変数は P_B , E_B 、従属変数は S , P_L , P_G , P_S であり、図(5)の3ノードモデルを対象にマトリックス表現すると電力系統は(6)式で表現される。

図5 3ノードモデル

Fig. 5 3Node model

$S(1)$	(2)	(3)	$P_L(1)$	(2)	P_L	$P_G(1)$	(2)	(3)	$E_B(1)$	(2)	(3)	S_0	$P_G(1)$
S_0	$-S_0$					$H1$			$-S_0$				
S_0		$-S_0$					$H2$			$-S_0$			
S_0		$-S_0$						$H3$			$-S_0$		
$-Y_{L1}$			1										
$-Y_{L2}$				1									
					1	$-P_{B1}-P_{B2}$							
						P_{B1}	$-P_{B2}$						
						P_{B2}	P_{B1}						
S_0												1	

$$Hb \equiv X_B(b) \cdot \bar{P}_B(b) \dots (6)$$

(6)式を対角化すると(7)式となる。(7)式の D_B , D_B マトリックスサイズは (IYM, NBM) , $(IYM, NGM+1)$ である。

$$IYM = NDM + NLM + 1 + NBM \quad NGM$$

ノード数 負荷数 ブランチ数 発電機数

$$\begin{matrix} \text{基底変数} & \text{非基底変数} & \text{右辺定数} \\ \leftarrow S & P_L & P_S & P_B & E_B & S_0 & P_G \\ \begin{matrix} 1 & & & & & \\ & 0 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \end{matrix} & D_E & = & D_B & \dots (7) \end{matrix}$$

(7)式で非対角化部分の変数がLP法における非基底変数に対応する。潮流計算に必要な不可欠な変数だけから構成されるよう(7)式を次のように処理する。

- ノード位相角 S は以後の簡略潮流計算に不要であり削除する。
- 初期系統で、すでに供給されている負荷 P_L の行は削除する。
- 復旧系統で閉に状態するブランチにサフィックス A をつけ E_A を基底変数に、 P_A を非基底変数に入れる。
- 復旧系統で開に状態するブランチにサフィックス F をつけ P_F を基底変数に、 E_F を非基底変数に入れる。
- 目標系統において負荷だけと、発電だけを対象とする潮流計算をそれぞれ行い、過負荷が発生するブランチを要監視ブランチとする。(混合しない方が厳しい潮流)
- 操作対象ではないが、要監視対象ブランチにサフィックス K をつけ P_K を基底変数に入れ、 E_K は削除する。

以下の説明において「ブランチ潮流 P_B 」と表現した場合、上記 P_A, P_F, P_K を指しているものとする。以上の処理を

したマトリックスを対角化し、右辺定数マトリックスの演算 (8) 式を行い、右辺定数項 b_o に移すと (9) 式が得られる。ここで b_o は操作前の負荷の値とブランチ潮流状態を表している。 ΔP_G は前の状態からの発電機出力の変化である。

$$b_o = D_B \cdot [S_o, P_{GO}]^T \quad \dots\dots (8)$$

P_{GO} : 初期発電機出力

$$\begin{bmatrix} P_L & P_S & P_K & E_A & P_F & P_A & E_F \\ 1 & & & & & & \\ & 0 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & 0 & & & \\ & & & & D_Z & & \\ & & & & & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_o \\ 1 \\ \Delta P_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (9)$$

(9) 式が事故復旧のためのブランチ操作と系統状態把握の基本式である。

(6) ブランチ潮流計算法

a. ブランチ操作 ブランチの開閉操作は (9) 式のマトリックス上のピボット操作に対応させ、オン→オフは E_F と P_F のペアで、オフ→オンは P_A と E_A のペアで実行する。この結果は右辺定数項 b_o から取り出し、 P_B からブランチ過負荷を又 P_L から負荷の復旧量を把握する。

b. 発電機出力 発電機の出力変化による系統状態変化は次の手順で計算する。

- 発電所受電ブランチが投入された時点を超動ベクトル (21) 式から読み出し、現在時点との時点差を求める。
- 図 4 のテーブルから出力変化幅 ΔP_G を取り出す。
- 各発電機の ΔP_G をベクトル

$$\Delta P_G = [\Delta P_G(1), \Delta P_G(2), \dots]^T \text{ とする。}$$

T は転置を表す。

- (9) 式における基底変数 X を (10) 式で定義すると

$$X = [P_L, P_S, P_K, E_A, P_F]^T \quad \dots\dots (10)$$

非基底変数 P_A, E_F を零として (11) 式が成立する。

$$X = b_o + D_G \cdot \Delta P_G \quad \dots\dots (11)$$

これによって発電機出力変化によるブランチ潮流変化を求めることができる。

<3.2> 電力系統の表現 (放射状系統) 放射状系統の場合、系統状態を表す基本式が単純 (D_Z マトリックス不要) になるので記憶容量が少なくすみ操作ステップ数が多い広範囲停電に適用可能である。

(1) 系統集約の考え方 系統状態毎の潮流計算を高速に行うには全系のノード・ブランチを極力削減する必要がある。キルヒホッフの法則から作成されたマトリックスを対角化した (7) 式において、系統操作も監視も必要としないブランチ b について、 $P_B(b)$ 行と $E_B(b)$ 列のマトリックス要素をすべて零としても他のブランチのピボット操作 (ブランチのオン・オフ) によって系統の潮流状態は影響を受けない。これは対角化後の D_B 、 D_G マトリックスに電気回路の特性が折り込まれているからで、これによって不要なブランチ変数をマトリックスから除外し系統の集約ができる。回路構成上は不

要ブランチの両端ノードを重ねて 1 を除外することである。又ブランチ過負荷の可能性はループ系と同様な手法で判定する。

(2) 系統集約の例

P_S : 連係点潮流 P_B : ブランチ潮流 L : 負荷
 P_A : 操作ブランチ P_F : 固定ブランチ $\bigcirc$: ノード No
 —: 閉ブランチ - - -: 開ブランチ

図 6 放射状系統の集約

Fig.6. Reduction of radial system model

事故復旧では初期と目標系統でブランチの状態変化がある操作ブランチと要過負荷監視のブランチだけからなる放射状系統を作成しておく。図 6 の (1) は 8 ノードの初期系統で状態のないブランチ $P_B(4)$ 、 $P_B(6)$ とノード 5、8 は消去し、負荷は上流側ノードに集約してある。負荷の値は図 7 の通りで $L(5)$ は発電機であるが負の負荷として表現している。図の (2) は集約した系統で操作ブランチは P_A 、固定で潮流監視ブランチは P_K と表現し、それぞれ新しいブランチ No を与えてある。ループ切替で移行するノード 6 については放射状表現の前提を維持するため、仮想ノード 4、5 に分けて設定する。

(3) キルヒホッフの第一法則による定式化⁽⁶⁾ ノードに接続されるブランチ潮流 P_A とノード負荷 P_L をキルヒホッフの第一法則で定式化する。ここでは、ブランチ潮流過負荷を検出しやすくするため $<3.1>$ と同様に単位法表現を使っている。

$$\sum_j \bar{P}_A(j) \cdot P_A(j) = \bar{P}_L(n) \cdot P_L(n) \quad \dots\dots (12)$$

j : ノード n に接続されるブランチ No

$\bar{P}_A$: ブランチ容量

P_A : ブランチ潮流 (単位法表現)

$\bar{P}_L$: 事故復旧時のノード負荷 (発電も含む)

P_L : ノード負荷 (単位法表現で復旧時 1.0)

(4) マトリックス表現 図 6 (2) の集約系統を例にして (12) 式をマトリックス表現し、これを対角化後、右辺定数マトリックスから固定負荷 $P_{LF}(1)$ 、 $P_{LF}(2)$ の列要素を取除いたマトリックスを D_B とし、初期のブランチ潮流を b_o とすると (13) 式が得られる。

$$\begin{array}{c}
 P_{P1} \ P_{P2} \ P_{A1} \ P_{A2} \ P_{A3} \ P_{A4} \ P_{A5} \\
 \begin{bmatrix}
 1 & & & & & & \\
 & 1 & & & & & 0 \\
 & & 1 & & & & \\
 & & & 1 & & & \\
 & 0 & & & 1 & & 1 \\
 & & & & & 1 & \\
 & & & & & & 1
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 1 \\
 0.75 \\
 0.17 \\
 0 \\
 0 \\
 0.80 \\
 0
 \end{bmatrix}
 +
 \begin{bmatrix}
 P_{L1} & P_{L2} & P_{L3} & P_{L4} & P_{L5} \\
 0.25 & 0.38 & -0.50 & 0.50 & \\
 & 0.50 & 0.75 & -1.00 & \\
 & & 0.75 & & \\
 & & & -1.00 & \\
 & & & & 0.80 \\
 & & & & & 1.00
 \end{bmatrix}
 D_A
 \end{array}
 \quad (13)$$

(5) 潮流計算法 放射状系統におけるブランチ潮流計算はブランチと負荷を1:1に対応させておきブランチの操作によって生じる負荷を加算すればよい。(12)式における負荷ベクトル P_L を(14)式で定義する。

$$P_L = [P_L(1), P_L(2), \dots, P_L(5)]^T \quad (14)$$

ある系統状態の負荷ベクトルを P_{LO} とし、一つのブランチ操作によるベクトル変化を ΔP_L とすると新しいブランチ潮流ベクトル P_A は(15)式で表すことができる。

$$P_A = P_{AO} + D_B \cdot \Delta P_L \quad (15)$$

$$\text{ただし } P_{AO} = b_0 + D_B \cdot P_{LO} \quad (16)$$

ブランチ a を投入したとすると ΔP_L ベクトルの $P_L(a)$ だけがある値を持ち他は零であるから、この演算は D_B マトリックスの a 列にだけ $P_L(a)$ を乗じ、 P_{AO} に加算すればよいことになる。更に、 ΔP_L は単位法の1.0であり、実質的にはマトリックス要素を加算するだけでよい。

発電機(ex. P_{L2})については受電時点以降の経過ステップに対応する出力変化幅を図4のテーブルから参照し、その ΔP_G を使い(15)式の演算をする。

<3.3> 目的関数 事故復旧操作手順決定問題の目的関数は、初期から復旧操作完了までの供給支障電力量の最小化とする。操作開始から時点 t までの経過時間を $T(t)$ 、時点 t に停電回復した負荷を $P_L(t)$ とすれば目的関数 F は(17)式で表せる。

$$F = \sum_{t=1}^m T(t) \cdot P_L(t) \rightarrow \min \quad (17)$$

$$F(t_0) = \sum_{t=1}^{t_0} T(t) \cdot P_L(t) \quad (18)$$

時点 t_0 までに復旧した負荷の供給支障電力量 $F(t_0)$ は(18)式で、この値は全負荷を対象としてはいいない。

時点 t で復旧した負荷の供給支障電力量を $\Delta F(t)$ とするとDP法の漸化式は(19)式となる。

$$F(t) = \min [F(t-1) + \Delta F(t)] \quad (19)$$

事故復旧操作においては強電源側から順次ブランチの操作を行い、一旦復旧した負荷を再停止させることはないの、前の時点の F を変化させることはない。

以後の説明において各段における目的関数の値を評価値と呼び、状態推移に伴う評価値の変化を増分評価値と呼ぶこととする。

4. 問題の解法

DP法では、各段で操作候補ブランチを選定し、状態推

移の評価値比較から結合を決定し、最終段まで到達したあと最適解を決定する。解法の手順を記述したあと7ノードモデルで計算法を具体的に説明する。

<4.1> DP法による解法

(1) 系統状態の定義 ブランチ操作の実行を表わす系統状態をブランチナンバーに対応させ(20)式のベクトル A で定義する。

ブランチNo. 1, 2, 3, ... b_m

$$A = [1, 0, 1, -1, \dots]^T \quad (20)$$

1: ブランチ操作未実行(閉操作)

-1: ブランチ操作未実行(開操作)

0: 実行済

発電機については、接続ブランチの操作時点が違えば異なる発電機状態であり、状態ベクトル G で定義する。

$$\text{発電機No. } 1 \ 2 \ 3 \ 4 \dots$$

$$\text{発電機の起動ベクトル } G = [0 \ 0 \ 2 \ 4 \dots]^T \dots (21)$$

0: 未起動 2: 起動時点が2

この問題において制御はブランチのオン・オフであり、発電機出力は従属変数である。

(2) 操作候補ブランチ 停電区間のブランチは、電源側から順次直列に操作する必要がある。上流側ノードの負荷の値が単位法表現で1.0であれば、片端ノードが充電されたブランチと判定できるので操作候補のグループに入れることができる。開放すべきブランチ P_A については、開放操作によって供給支障が発生しない条件で操作候補の判定ができる。放射状系統の場合、1ヶ上位のブランチNoを接続テーブルで記憶しておき、このブランチが閉の場合に操作候補ブランチとする。ブランチ操作では並列的な複数操作も考えられるが、段間の結合数が膨大となるので割り切っている。又、発電機出力の立ち上がり速度によっては途中段階でブランチ操作なし(発電機出力の変化待ち)という操作手順が有利なケースもあるが、段数が不確定となり系統状態数が極端に増えるのでこれも想定外としている。

(3) 各段階における計算法

a. 次段系統状態の作成 まず時点 t に存在する系統状態候補を列挙する。時点 t の状態は前段の $t-1$ 時点の状態から1ヶのブランチ操作を行うことによって出現する。発電機は接続ブランチが投入されたあと図4で指定された立ち上がりカーブで出力が変化するので起動ベクトル

(21)式で状態を把握する。 $t-1$ 時点の系統状態数を i_n とすると i_n 個の状態からの推移を対象とする必要があるが次の条件を満足している必要があり、大半は切捨てられる。

i) 強電源側から順次操作するため充電されているノードに接続されているブランチであること。これは放射状構成接続ベクトル R (ブランチの上位・下位を表すテーブルで事前に作成してある)と状態ベクトル $A(t-1, i)$ (実行済ブランチは(20)の0で認識)から判定する。

ii) ブランチ操作時の潮流計算(ループ系は<3.1>(6)a, 放射状系は(15)式の P_A)によってブランチ過負荷 $|P_B| > 1.0$ が発生しないこと。

図7 7ノードモデルの初期・目標系統
Fig.7 Initial and final system for 7node model

iii)すでに登録されている系統状態と重複（ベクトルAの比較）しないこと。

このような組合せによって時点tにおける実行可能な状態が j_m 個あるとする。 $j=1, \dots, j_m$ に対する状態ベクトル $A(t, j)$ とブランチ潮流ベクトル $P_A(t, j)$ を記憶する。

b. 段間の状態結合 時点tの状態 ($j=1 \sim j_m$) と $t-1$ 時点の状態 ($i=1 \sim j_m$) において、iとjの結合は1本だけで、このルートは目的関数を比較して有利なものの中から決定する。ブランチ操作による復旧負荷の供給支障電力量の変化を(18)式で計算し $\Delta F(i, j)$ とするとi-j組合せによる目的関数値 $FF(i, j)$ は(22)式となる。

$$FF(i, j) = F(t-1, i) + \Delta F(i, j) \quad (22)$$

$$F(t, j) = \min_{i=1, \dots, j_m} (FF(i, j)) \quad (23)$$

状態 (t, j) のiとの結合は(23)式で決定できる。

ただし(23)式の比較となる組合せは次の条件を満足している必要がある。

- i) 状態ベクトル $A(t-1, i)$ と $A(t, j)$ の差はブランチ操作1ヶだけであること。
- ii) 発電機の起動ベクトル $G(t-1, i)$ と $G(t, j)$ に整合性がとれていること。

このような比較によって選ばれた組合せをテーブルに記入するとともに、目的関数値 $F(t, j)$ と操作ブランチNo.を記憶する。

(4) 最適解の決定 時点 t_m の最終段まで、前記a, bの計算が進むと最終段から時点逆をたどり、記憶テーブルから最適な組合せを取り出し、初期から目標系統までの操作手順を決定する。

図8 7ノードモデル事故復旧DP法計算結果
Fig.8 Calculation result of restorative operation process for 7 node model

<4.2> 7ノードモデルの解法例 図7の7ノードモデル（変数は図6(2)に対応）を対象に多段決定の手順を図8に示す。

初期系統、目標系統の差から着目ブランチは1, 2, 3, 4, 5でブランチ4は開操作である。⊗は状態として考えられるが過負荷で実行不可能を意味している。丸の中の数値は上段が操作済ブランチNo、下段がその状態での評価値である。

初期状態0からブランチ1を投入して状態11、ブランチ5を投入して状態12が出現する。ブランチ1の投入によって負荷 $P_L(1)$ が復旧し供給支障電力量は $2 \times 1 = 2$ 変化しているの、下段の評価値に2を記入している。ブランチ5の投入はブランチ4とペアで実行され、供給支障電力に変化がないので状態12の評価値は零である。

表1. 時点2の考える状態
Table 1. Considering state on Step 2

時点1の状態No.	ブランチ	1	2	3	4	5	時点2の状態No.
	ケース1	0	0	1	1	-1	21
11	2	0	1	0	1	-1	22
	3	0	1	1	1	0	23
12	4	1	1	1	0	0	

状態11から次段への推移を考えるのは表1のケース1～3であるが、ケース1のブランチ2の投入でブランチ $P_L(1)$ が過負荷となり棄却され、時点2の状態として21, 22が残る。状態12からはブランチがペアとして決まっておき状態23が残る。状態33と前段の連結のルートは状態22, 23の両方があるが、評価値2, 6の比較から状態22が選ばれている。最終段の状態51と前段の連結ルートは状態41, 42の両方があり評価値11, 17の比較から41が選ばれ、す

すべての組合せ計算が終了する。最適操作手順は太線で示すようにブランチ1,3,2,5,-4の順となり、供給支障電力量は11となる。(ブランチ4は開操作)

5. 計算の高速化手法

DP法の各段においてとりうる状態数が多くなると、組合せ数が指数関数的に増大し、演算時間が実用域を超えるおそれがある。そこで数学的厳密性を若干ゆめ、事故復旧問題の特性を運用経験から見出し、ヒューリスティックな手法で系統の状態数の爆発を抑制することとする。ここで採用したのは操作候補ブランチをしばらく込む優先ブランチ法と各時点において相対的に悪い評価値の系統状態を制限する状態数制限法である。

<5.1>優先ブランチ法 供給支障電力量が最小となる操作手順を求めるには当初電力流通に貢献度の高いブランチを優先して操作するのが効果的である。

復旧目標系統構成を対象にして、発電機出力を零にすると負荷だけの系統のブランチ潮流 $P_{BL}(b)$ が得られる。

次にすべての負荷を零にすると、発電機出力だけによるブランチ潮流 $P_{BG}(b)$ が得られる。潮流の大きいブランチほど電力供給の貢献度が高いわけで、両者の絶対値和の(24)式で、ブランチ操作の相対的優先度をほぼ把握できる。

$$P_{BF}(b) = |P_{BL}(b)| + |P_{BG}(b)| \quad \dots\dots\dots (24)$$

発電機の出力増を期待しなくてもよい場合は、第2項の P_{BG} は加えなくてよいが、停電規模が大きくなると一般に必要となる。30ノードモデル(図12の#1から#30ブランチ系統)を対象に、この $P_{BF}(b)$ の大きいブランチから順にならべて、デレーションカーブを作った例を図9に示す。

図9 優先ブランチカーブ
Fig.9 Curve of priority branch method

このカーブの50%程度のレベルに制限カーブ $P_{BLIM}(t)$ を設け、時点毎にこのカーブ以下の値を持つブランチは操作対象としないよう制限する。この制限レベルを優先度係数とここでは名づける。30ノードモデルで効果を測定したところ、実行可能であれば解に影響は出ず演算時間は167秒から19秒と約1/9に改善された。

なお、制限を厳しくしすぎると状態組合せが減少し実行不可能となることから、優先度係数40~60%が効果的である。

<5.2>系統状態数制限法 ブランチの操作手順と発電機出力の時系列変化を同時に組合せ問題とすると、その状態

組合せ数は莫大なものとなる。

図10の上欄に30ノードモデルにおける各時点の状態数を表示した。この例では時点とともに増大し最大状態数は1203であり、これが5000を超えると、演算時間の面から実用性はなくなる。そこで系統状態数を制限することとし、あらかじめ状態数の上限を指定する。図10のカーブは、評価値(その時点までに復旧した負荷の供給支障電力量)の推移をしめたもので、各時点の系統状態が評価値にはかなり幅があり、その中の最大値と最小値をプロットした。供給支障電力量の最小化を目的関数にしているの、早い時点にこの値が大きいことが望ましい。(大きい負荷を先に復旧)

図10 評価値の推移
Fig.10 Transition curve of estimation value

そこで、評価値の高いものを許容状態数だけ残し、あとを切捨て、次段の組合せ計算で無視する。なお、復旧時点には評価最小値に収束するので、後半の時点($t > 0.9t_m$)ではこの制限を設けない。状態数制限の効果を図11に示す。

状態数を50に制限しても評価値が変化しないことが図の(2)で分かる。状態数を1000から50に制限すると計算時間が22秒から1.8秒と1/12に改善されることが同図(1)で分かる。

図11 状態数制限法の効果
Fig.11 Effect on state reduction method

6. シミュレーション結果

<6.1>シミュレーション条件 ここで提案した操作手順決定の論理を検証するため、発電と負荷の混在系統での広範囲停電をシミュレーション対象に選んだ。図12が154kV~500kVの主幹系統で、実運用でループとなる2ヶ所を人為的に放射状にした50ブランチの系統構成である。ブランチ#1

が会社間連系線で、ここを基点に放射状系統が広がっている。発電機は一律に所内受電後25%/ステップで立ち上がると仮定している。復旧時の発電所・変電所の負荷は系統図の通りで、過負荷が発生する可能性のあるブランチの容量を〔 〕で示してある。計算諸元として i) ブランチ操作優先度係数を40%、ii) 各段の状態数制限値を200としている。

<6.2>シミュレーション結果

(1) 負荷復旧の推移 DP法で解いたブランチ操作手順を図13の下段に示した。同図の(2)は、操作ブランチNoを横軸にとり、全系の負荷・発電復旧の推移をグラフ表示したものである。上位ブランチから順次、下位ブランチに進んでいることが分かるが、比較的大きな負荷が後に復旧しているのは連系線の容量制限にかかるのが原因である。連系線の潮流は図の(3)に示したようにブランチ容量±3.0の制限の中に入っている。

(2) 評価値 図13の(1)は、各時点における系統状態の評価値の推移で、最大値、最小値、最適解を示している。最適解は当初最大値に近くにおり、最終段の近くで最小値に近づいている。全系復旧時の評価値は操作ステップ時間を1分として $1.18 \times 10^6 \text{ MW} \cdot \text{分}$ で、このシミュレーション結果は電源線を優先して投入し、そのあと大きい負荷から生かしており、給電運用者の感覚にほぼ合っている。しかしブランチ43(負荷229MW)が最終の操作になっており、この変電所は都市郊外に位置することから優先順位はもっと高いはずである。

今回のシミュレーションの目的関数は復旧完了までの供給支障電力量であるため、今後は停電の影響度(ex. Kwh当たりの停電損失)を目的関数に反映する必要があると考えている。

(3) 解の最適性 提案しているDP法は厳密解ではないので、求めた解がどれくらい最適値に近いかを調査した。状態数制限値を200から700に広げたところ評価値は $1.17 \times 10^5 \text{ MW} \cdot \text{分}$ と1%向上した。この結果と30ノードモデル効果曲線図11(2)から類推して、制限値200での解(1.18×10^5)が最適値に近いと考えている。なお計算時間は222秒と6倍にのびヒューリスティックな手法である状態数制限法の効果を再確認できた。

(4) プログラムサイズと演算時間 プログラムサイズはシミュレーション計算した50ノードモデルで、約30Mバイトである。CPUの演算時間は28MIPSのEWSで、36秒と実用可能な時間であった。

7. むすび

本論文では、ブランチ開閉操作をDP法の段階に対応させ、供給支障電力量を最小とする復旧操作手順を求めている。DP法における組合せの増大を抑制するため数学的厳密性を若干ゆるめ、ヒューリスティックな手法を加味した論理を構築し、その実用性を50ブランチの系統モデルで明らかにした。ここで得られた成果をまとめると、次の通りとなる。

(1) 初期系統と復旧目標系統で開・閉状態に差のあるブランチを操作対象とし、このブランチの状態と制御対象発電機の投入時点で系統状態を定義し、初期からのブランチ操作数をDP法の段階に対応させることによって、時系列的最適化を求める操作手順決定問題をDP法で定式化することができた。

(2) 計算対象系統を簡素にするために、操作ブランチと要過負荷監視ブランチだけから構成されるようあらかじめ電力系統を集約する。この系統を対象にループ系はキルヒホッフの第一、第二法則で、放射状系は第一法則で定式化し、対角化したあとのコンパクトなマトリックスを記憶し、ブランチ操作(ピボット操作)によって潮流変化を計算している。これによってブランチ操作の実行可能性と評価を高速に判定することができた。

(3) 発電機出力は所内受電後段階的に立ち上がるので、各時点のブランチ潮流計算がしやすいように出力変化テーブルで記憶している。これによって発電機は時間並列に、ブランチは直列に操作し、実状にマッチした手順を求めることができた。

(4) DP法の各段において、とりうる状態数が多くなると組合せ数が指数関数的に増大し、演算時間が実用域を超えることになる。本手法では、操作候補ブランチをしばり込む優先ブランチ法と各段において相対的に悪い評価の系統状態を制限する状態数制限法を採用し、放射状系統の場合で50ステップ操作まで適用範囲を広げることができた。

今回提案した操作手順決定の論理は送電系統・配電系統に区別なく、また目的関数をそれぞれに設定すれば、平常時・作業時の運用にも適用できると考えている。

今後の課題としては、i) DP法の段間の組合せ数を抑制するために系統状態数制限法を採用しているが他の事例にも適用し、手法の普遍性を明らかにする必要がある。ii) 本論理の目的関数は復旧完了までの供給支障電力量最小化であるが、停電の影響度をS/S毎に反映できるものにする必要がある。iii) 複数給電所にまたがる系統事故に適用できるよう階層的DPのアルゴリズムを開発する必要がある。

将来、事故復旧操作プログラムを実用化の域までレベルアップするには、現状の有効電力だけでなく、電圧無効電力、系統保護方式、設備の特殊制約、需要家の事情など多くの条件をとり込む必要がある。

DP法は制約条件を厳しくすればするほど、解が得られ易くなるという特性があり、操作手順決定問題における系統状態数を抑制する手法を更に工夫し、事故復旧操作の自動化を目指したいと筆者は考えている。

本論文における論理の構築にあたり広島工業大学の永田武助教授、ならびに電力中央研究所理事の高橋一弘氏の御指導を受けたこと、更に本論文の作成に北陸電力柳田系肖氏、松本吉永氏の御協力をいただいたことを明らかにし、深く感謝の意を表します。

(平成12年5月31日受付, 平成13年3月29日再受付)

文 献

- (1) 鈴木英行・幅 敏明:「事故時系統自動操作論理の開発」, 電気学会論文誌, 1973.8
- (2) 電気学会技術報告II部第345号:「電力系統の事故復旧操作」
- (3) 永田武・金鈞・安岡道弘・畠山秀一:「混合整数計画法による配電システム復旧問題の解法」, 平成10年電力技術研究会, PE-98-47
- (4) 道上誠一・辻浩一・曾場雅浩:「LP法を適用した事故復旧操作手順の決定法」, 平成8年電気学会全国大会, 1296
- (5) 長澤隆士・川瀬秀紀・中村静香・渡辺峰生・板屋伸彦:「基幹系統事故復旧支援のための復旧目標系統・復旧操作手順立案手法」, 平成3年電力技術研究会, PE-92-160
- (6) 高橋一弘 著:「電力システム工学」コロナ社, 昭和52年1月
- (7) 棚田一也・谷口治人・辻浩一:「線形計画法を適用した電力系統の事故時復旧操作のための系統表現法の開発」, 平成2, 電力中央研究所報告, T90004
- (8) 辻浩一:「線形計画法を適用した放射状系統構成決定法」, 電学論B, 120, No.2 (平成12-2)

辻 浩 一

牧 野 理 一

(正員) 1935年12月25日生。1958年3月金沢大学工学部電気工学科卒業。同年4月北陸電力入社。主として、電力系統の計画、運用、制御に関する業務に従事。1991年7月北電テクノサービス(株)入社、2000年7月 有限会社テクノ社設立、現在に至る。

(正員) 1949年7月6日生。1973年3月芝浦工業大学電子工学科卒業。同年4月北陸電力入社。主として、電力系統の制御システムの設計および運用に関する業務に従事。現在に至る。