

# 地震時における電力2次系統の信頼性評価法

朱牟田善治<sup>1</sup>・桃井直美<sup>2</sup>・石田勝彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工修 (財) 電力中央研究所 耐震部 (〒270-11千葉県我孫子市我孫子1646)

<sup>2</sup> (財) 日本科学技術振興財団 情報システム開発部 (〒102東京都千代田区北の丸公園2-1)

<sup>3</sup> 工博 (財) 電力中央研究所 企画部 (〒102東京都千代田区大手町1-6-1)

地震時における電力2次系統の供給信頼性評価法を開発した。まず、従来まであいまいであった地震時の供給支障電力についての概念を整理し、供給信頼度評価に用いる供給支障電力を定義した。つぎに、放射状系統を対象として、系統切り替え操作の効果を考慮して供給支障電力を確率的に推定する方法を提案した。さらに、仮想の変電所モデルおよび電力系統モデルを用い、本手法の有効性を示した。最後に北海道の実規模系統に本手法を適用し、地震時を対象とする設備計画問題について検討した。

**Key Words** : seismic supply reliability, electric power transmission system, genetic algorithm, radial system, seismic countermeasures

## 1. はじめに

電力系統の総合的な地震防災という観点から、近年、地震時の供給信頼性を定量的に評価して系統全体の耐震補強計画を具体的に検討することが急務な課題となってきた。このような課題を受けて筆者らは地震時の電力基幹系統を対象とした信頼性評価法を開発した<sup>1)</sup>。

日本の電力系統は、その運用目的や電圧階級別に基幹(1次)、2次、配電系統とに分類できる。基幹系統は通常、ループ状に運用され、2次・配電系統は放射状に運用される。ループ状に運用されている基幹系統と比較して本論文で対象とする2次系統の場合、系統構成としてはループ状であっても放射状に系統が運用されているため、電圧や電流が供給源から末端の変電所に向かって単調に減少するなどの特徴を有している。このため、地震後は主に過負荷に着目した系統切り替え操作による応急復旧が行なわれる。

これまでの地震時を対象とした2次系統を含む電力系統の供給信頼性評価法の多くは、系統をノードとリンクにモデル化し、それぞれに被害確率を与え、地震後の供給支障電力を確率的に推定してきた。しかしながら、従来までの手法では、地震後の仮定される系統状態が、実際の現象と一致していないことが多い。たとえば、1994年北海道東方沖地震直後の北海道電力釧路支店管内の2次系統には、(1)変電所の地絡事故、(2)変電所再閉路装

置の誤動作、(3)送電線用継電装置誤動作など、物理的な機器の地震時被害とは関係のないことが原因で供給支障事故が発生している。この例が示すように、実際には、地震により機器が損傷されなくても地震後には、供給支障が発生することが多いのである。このことは、物理的な機器の損傷に基づいて定義される地震時被害確率のみから供給支障電力を推定することは十分ではないことを意味している。また、本論文で対象とする放射状に運用される2次系統の場合には、事故時に系統の冗長性を利用した応急復旧として系統切り替え操作が行われるため、操作の各段階で系統構成が大きく変化してしまう。特に、地震時を対象とした系統切り替え操作については、研究された例<sup>2)</sup>がほとんどなく、地震時には、系統運転員の経験的な判断により系統切り替え操作が行われているのが現状である。このことは、解析的に各復旧段階の供給支障電力を推定することをより困難にしている。

本論文では放射状に運用される2次系統を対象として、地震外力による物理的な損傷に基づいて定義される機器の地震時被害確率を用いて、地震時における系統切り替え操作後の供給支障電力を確率的に求める手法を提案する。即ち、本論では推定が困難な地震直後の系統状態や実際の復旧過程を模擬することを意図したわけではなく、地震で被害を受けた2次系統が物理的な修復をしない状態でどの程度、供給能力を維持できるのかを客観的に一貫した基準のもとで評価することを目的としている。

以下では、まず、本論文で対象とする供給支障電力を定義することにより入力として与える地震時の電力機器の被害確率とそれに基づいて推定される系統全体の供給支障電力の関係を明確にする。つぎに、系統切り替え問題について、現状の研究における問題点を指摘するとともに、変電所の保護リレーシステムと系統切り替え操作を解析的に取り扱うために提案した手法のアルゴリズムについて述べる。最後にこの手法を仮定の電力系統モデルに適用し、その有効性を示すとともに、釧路支管内の实在2次系統に適用し、設備計画について検討した例を示す。

## 2. 供給支障電力の定義

図-1は、地震で被害を受けた電力系統の地震後の復旧過程を単純化したものである。横軸に地震発生からの経過時間を取り、縦軸に対象とする電力系統の供給電力を示している。地震により電力系統が被害を受けると系統全体での供給可能電力は、図中の $S_1$ まで減少する。 $S_1$ とは、想定地震 $i$ の発生直後の系統全体での供給可能電力を示す。一方、 $S_2$ とは、機器の物理的な修復を伴わない応急復旧が完了した時点での供給可能電力を示す。地震直後から系統運転員は、供給支障を最小化するために系統の冗長性を利用した系統切り替え操作を行い、供給レベルを $S_1$ から $S_2$ まで回復させる。続いて設備管理者が設備の修理を行い、供給支障が解消する。ここで、供給支障の解消した時点を地震直前の供給電力と仮定して $D_i$ で示すと、本論で評価する供給支障電力( $Z_i$ )とは、 $D_i$ と $S_2$ の差として式(1)のように定義できる。

$$Z_i = D_i - S_2, \quad \{Z_i \geq 0\} \quad (1)$$

式(1)は系統切り替え操作により供給支障を最小化した状態での供給支障電力を意味する。この時点では地震直後に問題となる地絡、短絡、継電器誤動作など電気的な異常で遮断器が開放してしまう現象は、系統運転員により調整され発生しないものと仮定できる。よって、系統切り替え操作後の供給支障電力を推定するためには、地震による物理的な被害だけを想定しておけばよく、解析モデルに与える被害確率はすべて物理的な被害に基づいて定めることができる。本論文では、この $Z_i$ を地震時の電力機器の耐力などの不確実性を考慮して確率的に評価することを目的としている。

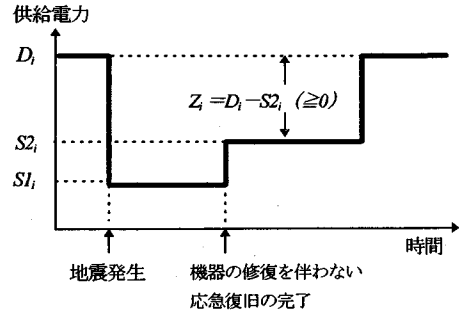


図-1 供給支障電力 ( $Z_i$ ) の定義

## 3. ハイブリッドGAを用いた2次系統の信頼性評価法

### (1) 系統切り替え操作問題

系統切り替え操作の目的は、事故時に健全な設備だけを利用して供給支障電力が最小になる復旧目標系統を構築することである。特に、放射状に運用されている2次系統の場合は、放射状制約を満たす系統構成が数多く存在することになり、電気工学の分野では、離散組合せ最適化問題として古くから研究されてきた<sup>3)</sup>。

復旧目標系統決定問題の理論的な取り組みとは、熟練系統運転員の経験を生かした知識工学的な手法<sup>4)</sup>と数理計画的な手法<sup>5)6)</sup>とに大別できる。前者の方法は、運転の知識が系統固有のものであることなどから汎用性の面で問題がある。一方、後者には、放射状系統をノードとリンクにモデル化したときのリンクにコストをもたせ、そのコスト和が最小となる系統形態を決定する方法<sup>5)</sup>や解析に必要なパラメータを1種類に限定し、最小費用流量問題に置き換えてシンプレックス法により解く方法<sup>6)</sup>等がある。しかし、これらの手法は供給源として取り扱う1次変電所(母線)を1つに限定して解候補となる放射状系統を求めており、地震時に問題となる複数の1次変電所を持つ支店レベルの系統規模を対象としていない。

複数の供給源が存在する系統を対象とした研究例には、変電所の供給余力を過負荷ポテンシャルとして定義して評価関数として用い、系統構成を次々に変化させて復旧目標系統を求める方法(Branch Exchange Method; 以下BEMとする)<sup>7)</sup>や、生物進化のプロセスを模擬した遺伝アルゴリズム(Genetic Algorithm; 以下GAとする)<sup>8)</sup>を用いた方法<sup>9)</sup>、およびニューラルネットワーク(Neural Network; 以下NNとする)を用いた方法<sup>10)</sup>等がある。BEMは、系統切り替えにより単調に供給支障電力が減少してゆく系統には非常に高速で有効な解が求まるものの、単調に減少していかないような系統にたいしては、最適値よりもかなり大きな局所解で収束してしまう可能性がある。一方GAによる方法は、①様々な評価関数を柔軟に考慮できる、②他手法との融合も容易、③探索空間が膨

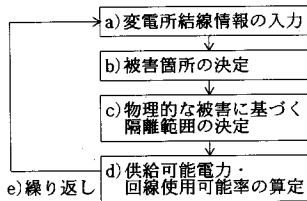


図-2 第1ステップの解析フロー

大な場合の大域的な探索が得意である、という反面、局所探索には向かず、その収束性に問題を抱えている。NNの方法は、GAと比較して高速性が期待できるものの動作上の制約が多く他手法との融合（ハイブリッド化）や運用者の好みに合わせた高度化が難しいなどの問題がある。

最近では、複数の手法をハイブリッドした方法が検討されている。たとえば、BEMとGAをハイブリッドした方法（Hybrid Genetic Algorithm；以下HGAとする）は、工夫しだいでそれぞれの手法の短所を補いより収束性の高い解を期待できることがわかっている<sup>11)</sup>。本論文では、地震で被害を受けた放射状制約をもつ2次系統の最小供給支障電力を確率的に推定するために、このHGAを応用する。

## (2) 本手法の概要

本手法は、2つの解析ステップからなる。第1ステップでは、個々の変電所内部の結線状況をモデル化してサブネットワークを構築し、母線からの最短経路探索により被害を受けた変電所の機能低下の範囲を特定する。変電所では地震により被害を受けると、損傷した機器を母線から切り離すために、開閉機器（遮断器や断路器）が開放される。これにより、下位の変電所や需要家に供給支障が発生する。このとき発生する変電所の機能低下の範囲（隔離範囲）を特定するのが第1ステップである。第2ステップでは、第1ステップで評価された変電所の隔離範囲を初期条件として入力し、系統全体の供給支障電力が最小となる復旧目標系統を求め、その系統での供給支障電力を算定する。ただし、地震時に問題となる電気的な異常は、放射状運用であるため、送電線の定格容量で定まる過負荷のみとした。最終的に上記の第1ステップ、第2ステップをモンテカルロ法により繰り返して、確率的に供給支障電力を推定する。

## (3) 第1ステップ

図-2は、第1ステップの解析フローを示す。

### a) 変電所結線情報の入力

変電所結線情報とは、変電所を構成している母線、断路器、遮断器、変圧器、送電線などの変電機器をノード

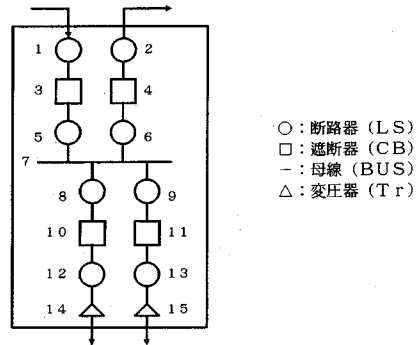


図-3 単母線形式変電所の単線結線図

表-1 単母線変電所の事故時開放断路器

No	設備名	開放断路器															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	断路器																
2	断路器																
3	遮断器	●															
4	遮断器		●														
5	断路器	●															
6	断路器		●														
7	母線																
8	断路器																
9	断路器																
10	遮断器																
11	遮断器																
12	断路器																
13	断路器																
14	変圧器																
15	変圧器																

に、機器間を接続しているリード線をリンクとしてモデル化したときの接続情報、総ノード数、総リンク数、負荷電力およびノード被害確率を意味する。なお、各ノードの被害確率は、地表面に生起する最大加速度分布と碍子の許容応力によって定まるフラジリティカーブにより定めるものとする。

### b) 被害箇所の決定

モンテカルロ法により各ノードの破壊、非破壊を判定する。この方法は、文献1)と同じである。

### c) 物理的な被害に基づく隔離範囲の決定

本論では地震直後に発生する地絡や短絡など電気的な動揺は考慮しないために、断路器の開閉操作を規準に隔離範囲を特定している。これは、地震後に物理的な機器を系統から切り離すことを目的とする損傷機器の隔離は最終的に断路器によって行われるためである。このとき開放される断路器は、一般に、損傷した機器の両端に物理的にもっとも近い断路器が開放されると考えられる。

図-3には、このことを具体的に説明するために、変電所の母線方式のうちもっとも単純な単母線形式の母線構

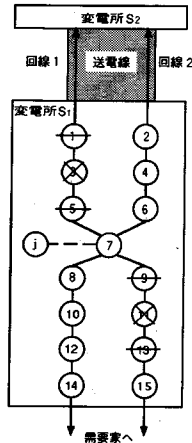


図-4 変電所モデル

成を母線、断路器、遮断器、変圧器で代表し、モデル化して示す。図中、実線7が母線、○が断路器、□が遮断器、△が変圧器をそれぞれ示している。表-1は、図-3の変電所の機器が損傷した場合に、最終的に開放状態となる断路器をマトリクス表示している。表-1の左端の縦列の機器が損傷した場合に、同じ番号行上の開放状態となる断路器番号を●で示している。たとえば、表-1で、3の遮断器が損傷した場合、その遮断器にもつとも近い両端の断路器1,5が開放される。また、このように整理すると、同時に複数の機器が損傷された場合でも開放状態となる断路器は、単一事故による隔離範囲の単純な重ね合わせにより決定することができる。たとえば、遮断器3と母線7が同時に被害を受けた場合には、開放される断路器は、1,5,6,8,9である。本手法では、上記のルールに基づき自動的に隔離範囲を決定している。

#### d) 供給可能電力、回線使用可能率の算定

隔離される範囲が決定されたら、その隔離されたことによって母線と連結性が保てなくなるノードを連結性解析により特定する。図-4は、図-3の単母線形式の変電所モデルをノードとリンクでモデル化し、連結性解析で起点として用いるダミーノードを番号*j*として付け加えたものである。ダミーノードは、2重母線形式など多重母線構成の変電所の場合に、各母線と機器間の連結状態を特定するための連結性解析が1回で済むように、全母線ノードの上位側に直結するように1つ設けている。また、各リンクの長さを1とし、片端のノードが開放されるかあるいは被害を受けた場合には、そのリンクの長さを $\infty$ とする。この状態で、変電所内の任意のノード*i*のダミーノード*j*からの最短距離 [ $\min(D_{ij})$ ] をダイクストラ法<sup>12)</sup>より算定し、式(2)で定義する連結係数 ( $\delta_i$ ) の値を算定する。

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & (\min(D_{ij}) \neq \infty) \\ 0 & (\min(D_{ij}) = \infty) \end{cases} \quad (2)$$

たとえば、図-4の場合、ノード3,11が被害を受けると最終的に断路器1,5,9,13が開放される。よって、ノード1,3,5,9,11,13,15の各ノードの連結係数は0となり、他のノードは1となる。

ここで、ノード*i*の負荷電力を $W_i$ 、変電所*S*内の総ノード数を $ns$ とすると、*S*の供給可能電力( $P_s$ )および供給支障電力( $DP_s$ )は、式(3)、式(4)から算定できる。

$$P_s = \sum_{i=1}^{ns} \delta_i \cdot W_i \quad (3)$$

$$DP_s = \sum_{i=1}^{ns} (1 - \delta_i) \cdot W_i \quad (4)$$

さらに、系統送電線と接続しているノード(変電機)が使用不能なことにより、変電所間の電力送電が制限される場合が生じる。ここでは、2つの変電所間をバイパスしている送電線群を送電線と呼び、1本1本の送電線を回線と呼ぶ。たとえば、図-4の場合、変電所間は2回線の送電線でつながれていることを意味する。このような状態で、ノード1が損傷した場合には、ノード2に接続している1回線だけが使用可能となる。このような回線が使用不可能の場合を模擬するために、送電線*l*の回線数を*k*、着目している変電所内で送電線*l*に直接接続しているノードを*i*とし、式(5)により、送電線*l*の回線使用可能率( $\alpha_l$ )を定義する。

$$\alpha_l = \frac{\sum_{i=1}^k \delta_i}{k} \quad (5)$$

ただし、1つの送電線は両端に1つずつの変電所をもつため、 $\alpha_l$ の値は、常に2つ存在することになる。第2ステップの解析では、このうち、値の小さい $\alpha_l$ を採用するものとする。

#### e) 繰返し

モンテカルロシミュレーションによりd)で定義した供給可能電力、回線使用可能率を各変電所ごとに試行回数分だけ算定し、第2ステップの初期系統状態とする。

#### (4) 第2ステップ

第2ステップは、式(6)を評価関数、式(7)、式(8)を制約条件とする離散組合せ最適化問題として以下のように定式化できる。

$$Z = \sum_{j=1}^n DP_j + \sum_{j=1}^n (P_j - RP_j) \Rightarrow \min \quad (6)$$

$$I_l^{\max} \geq I_l \quad (l = 1, \dots, nl) \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (i = 1, \dots, n), x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (8)$$

ここで、*Z*は式(1)によって定義された供給支障電力を

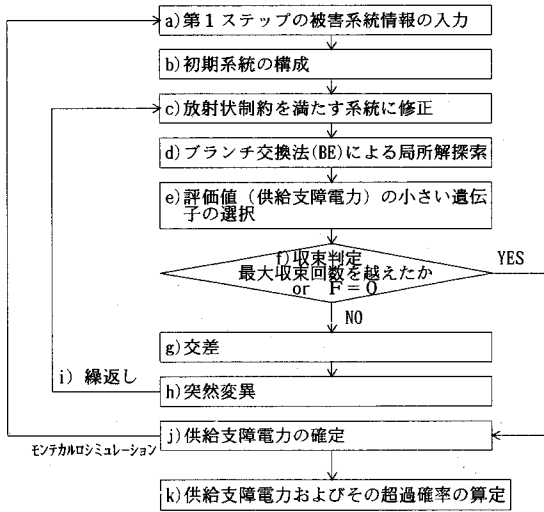


図-5 第2ステップの解析フロー

意味する評価関数、 $RP_i$ は変電所 $j$ が上位系統から需要できる供給電力を示す。また、 $DP_i$ と $P_i$ は第1ステップの式(3)、式(4)によって計算される値である。

$n$ と $nl$ は系統の全変電所数と全送電線数、 $I_l^{\max}$ は送電線 $l$ の定格容量、 $m_i$ は変電所 $i$ に直接接続している全変電所数、 $x_{ij}$ は変電所 $j$ から変電所 $i$ へ電流が流れる系統構成の場合には1、それ以外であれば0となる放射状制約係数である。 $x_{ij}$ により、任意のノード $i$ に他ノードとの接続状態に対する制約を与え、系統全体を放射状に保つことができる。

また、本論文では、放射状系統の構成要素となっている送電線をブランチ、系統切り替え操作により系統から切り離され放射状系統の構成要素から外れた送電線をサブブランチと定義する。系統切り替えとは、このブランチとサブブランチの組合せを変化させることを意味する。

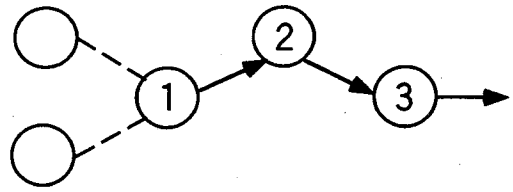
図-5には、第2ステップの解析フローを示す。

**a) 第1ステップの被害系統情報の入力**

ここでは、変電所をノード、送電線をリンクとしてモデル化したときの接続情報(3-(3-a)と同じ)と第1ステップで算定した地震直後の供給可能電力、回線使用可能率( $\alpha_i$ )を入力する。回線使用可能率は、変電所の被災状況に応じて、①回線がまったく使えない、②1回線だけ使用可能、③2回線使用可能、の3つの状況を式(9)により模擬するために用いる。

$$I_{l(new)}^{\max} = I_{l(mi)}^{\max} \cdot \alpha_i \quad (9)$$

ここで、 $I_{l(new)}^{\max}$ は $\alpha_i$ から算定された送電線 $l$ の最大許容電流値、 $I_{l(mi)}^{\max}$ は被災前の初期系統における送電線 $l$ の最



上位ノード番号	2	3	
下位ノード番号 (配列番号)	1	2	

図-6 上位ノード表現による遺伝子(系統情報の数値列)の概念



図-7 上位ノード表現で問題となる系統構成例

大許容電流値、 $\alpha_i$ は送電線 $l$ の両端に接続している変電所の回線使用可能率のうち、値の小さいほうを意味する。

なお、本手法では送電線自体の地震による被害は、第1ステップの変電所モデルを構築する際に、送電線をノードとしてモデル化することにより考慮することができる。

**b) 初期系統の構成**

GAにおいては評価関数で評価される解の状態を遺伝子と呼ぶ。本論文において遺伝子とは、解析の対象とする2次系統の接続関係を記述した数値列を意味する。GAでは、遺伝子の構成方法に決まった方法がなく、問題に応じて研究者が工夫しているのが現状である。ここでは、佐藤ら<sup>9)</sup>が提案した上位ノード表現により初期系統の接続状態を数値列化した初期遺伝子を構成した。上位ノード表現とは、図-6に示すようにノード番号と同じ配列上に、供給源から見て上位側のノード番号を記述して数値列を作成することを意味する。上位側とは電流の流れに対して上流側を意味する。上位ノード表現で遺伝子を構成することにより、膨大な量の系統構成パターンの中から式(8)を満たさない系統構成の発生率をかなり減少させることができる。本手法では、系統の接続情報から与えられる上位ノード候補の中から乱数を発生させて指定することにより任意の上位ノードを選択し、初期遺伝子を構成している。なお、供給ノードは電流の流れの起点であるため、供給ノード番号に位置する数値列上には、常に0を入力しておく。

**c) 放射状制約を満たす系統に修正**

上位ノード表現により、遺伝子を構成すると、図-7

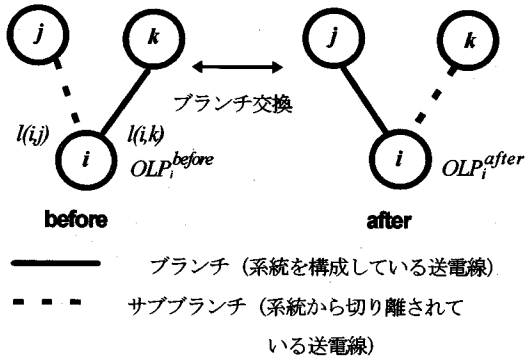


図-8 ブランチ交換法 (BEM) の概念

に示すように、お互いに上位ノード指定してしまう場合など式(8)の制約条件を満たさない系統が構成されることがある。このような系統の場合、1つのリンクを2重に認識してしまうため、系統構成要素から外れているリンクであるサブブランチの数 ( $HL$ ) が、過大評価される。そこで、式(8)の制約条件を満たしたすべてのノードが、お互いに上位ノード指定しないための必要条件を式(10)で表す。

$$\min(HL) = TL - (N - PS) \quad (10)$$

ここで、 $\min(HL)$  は系統全体の最小サブブランチ数、 $TL$  は総リンク数、 $N$  は総ノード数、 $P$  は供給ノード数 (1次変電所数) である。そうしておいて、式(8)を満たさない系統をできるだけ少なくするために、式(10)を満たすまでサブブランチをランダムに選択し、選択したサブブランチをブランチに変換して初期系統を修正する。ただし、上記のように式(10)に着目して修正を進めていくと、式(8)を満たさないケースが発生することがある。この場合には、選択したサブブランチをサブブランチのままにして別のサブブランチをランダムに選択してブランチとして再認識し、上記の操作を続けるものとする。

#### d) ブランチ交換法 (BEM) による局所解探索

c) で修正した遺伝子を対象として、栗原ら<sup>7)</sup> が用いたブランチ交換法 (BEM) を応用して系統切り替え操作を行い、修正した系統ごとの供給支障電力を評価関数値として算定する。すなわち、BEMでは、まず、送電線  $l$  の過負荷量を意味する過負荷 ( $OL_l$ ) とノードよりも供給源から見て上位側の過負荷量を意味する過負荷ポテンシャル ( $OLP$ ) を式(11)、式(12)により定義して、系統内のすべての送電線の過負荷およびすべてのノードの過負荷ポテンシャルを算定し、指標として用いる。

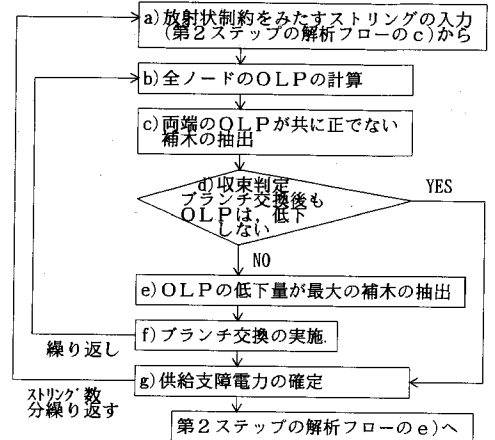


図-9 ブランチ交換法 (BEM) の解析フロー

$$OL_l = \sum_{i \in M_l} W_i - I_l^{\max} \quad (11)$$

$$OLP_{i+1} = \max(OL_{l(i,i+1)}, OLP_{i-1}) \quad (12)$$

ここで、 $M_l$  は送電線  $l$  より供給源からみて下位側に位置しているノード集合、 $o$  は送電線  $l$  の下位側に位置しているノード数、 $W_i$  はノード  $i$  のもつ負荷電力、 $l(i, i+1)$  はノード  $i, i+1$  間の送電線を意味する。ただし、 $OLP_i$  は、放射状の起点となる1次変電所の供給可能電力の値を負の値として与える。

なお、式(12)は、供給ノードから末端ノードに向かって順々にノード番号を増やしていった状態で定義し、供給ノードが複数存在する場合には、式(11)、(12)を供給ノードに接続しているノードごとに適用して、すべてのノードの過負荷ポテンシャル ( $OLP$ ) を求めておく。

ブランチ交換法の手順は、まず、両端ノード  $i, j$  の過負荷ポテンシャル ( $OLP$ ) が共に正でないサブブランチを抽出し、各サブブランチの片端のノード  $i$  を起点としてサブブランチとブランチのブランチ交換を行う。図-8には、BEMの概念図を示している。たとえば、サブブランチである  $l(i, j)$  は、ブランチ交換後にブランチとなっている。その代わりに、ブランチである  $l(i, k)$  は、ブランチ交換後にサブブランチとなる。このブランチ交換後の起点ノード  $i$  の過負荷ポテンシャルを式(13)により  $OLP_i^{after}$  として定義する。

$$OLP_i^{after} = \max(OL_{l(i,k)} + OLP_j^{before}, OL_{l(i,j)} - I_{l(i,j)}^{\max}) \quad (13)$$

ここで、 $k$  はブランチ交換を行う前の交換の対象となるブランチの起点ノードと逆側のノードを意味し、

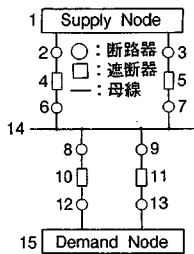


図-10 単母線構成モデル

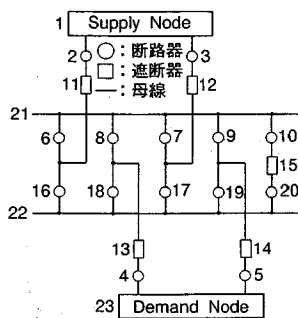


図-11 2重母線1ブスタイモデル

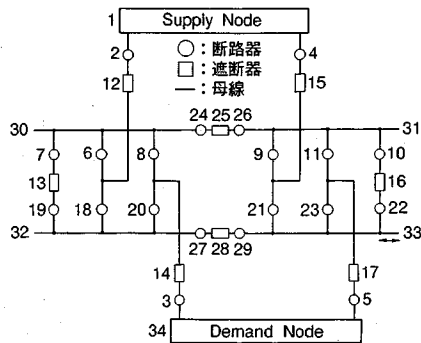


図-12 2重母線4ブスタイ構成モデル

$OLP_j^{before}$  はブランチ交換前のノード  $j$  の過負荷ポテンシャルを示す。

両端ノードの  $OLP$  が共に正でない (どちらかが負または 0) すべてのサブブランチ群に対してブランチ交換後の  $OLP_i^{after}$  を計算し、ノード  $i$  におけるブランチ交換前後の  $OLP$  の差を  $F_i$  として(14)式に定義する。

$$F_i = OLP_i^{before} - OLP_i^{after} \quad (14)$$

この  $F_i$  の値が最大となるノードを基点とするブランチ交換を行う。このプロセスを  $F_i$  が 0 または負になるまで繰り返し、最終的な状態を復旧目標システムとする。つぎに、復旧目標システムで式(7)で示した送電線の過負荷に対する制約条件を満足するまで、負荷電力を負荷量や負荷の重要度に基づき抑制する。最終的にこの負荷抑制量を供給支障電力とみなして式(6)により評価値 (供給支障電力) を算定する。図-9にブランチ交換法(BEM)の解析フローを示す。なお、ブランチ交換法の詳細については、文献7)を参照されたい。

#### e) 評価値 (供給支障電力) の小さい遺伝子の選択

本手法では、収束計算ごとに遺伝子 (解候補となるシステム構成を示した数値列) を新たに生成するため、収束計算が進むにつれ遺伝子の総数が増加してくる。そこで、本手法では、評価値が大きくなる遺伝子を削除して、常に、遺伝子数は初期に発生させる遺伝子数としている。

#### f) 収束判定

ここでは、評価値が 0 あるいは収束回数が最大回数を越えた場合には、収束したものとして  $j)$  に進む。

#### g) 交差

交差操作は、まず、e) により選択された遺伝子群の中から任意に 2 つの遺伝子を選ぶ。次に、遺伝子を 2 つに分断する任意の交差点  $k$  を乱数により指定する。さらに、交差点を境として遺伝子である数値列を上位側と下位側にわけ、選択した 2 つの遺伝子の下位側数値列どうしを入れ替える。こうすることにより優位なシステム構成を継承しながら全体のシステム構成に変化を与えることができる。

なお、交差を行う割合 (交差率) は、解析の対象とするシステムごとに交差率をパラメータとして第 2 ステップだけを行い、もっとも効果的な値を経験的に与えるものとする。

#### h) 突然変異

初期遺伝子を生成したときと同じ方法で、システムの接続状態を示す遺伝子を生成する。このとき生成する遺伝子は、突然変異率 (遺伝子の発生率) によって定めるものとし、この値も  $g)$  と同様にシステムごとに経験的に与えるものとする。

#### i) 繰返し

上記c)~h)のプロセスを繰り返す。

#### j) 供給支障電力の確定

もっとも小さい供給支障電力となる遺伝子を復旧目標システムとして確定する。

#### k) 供給支障電力およびその超過確率の算定

モンテカルロシミュレーションにより a)~j) のステップを繰り返した後、各試行ごとの供給支障電力を算定する。そして、文献1)と同様に供給支障電力ごとの度数分布を作成して試行回数で割り、供給支障電力に関する超過確率や供給支障電力の期待値を算定する。

## 4. 手法の有効性の検証

### (1) 変電所母線構成方式をパラメータとした母線事故に対する変電所の供給信頼性評価

第 1 ステップの有効性を示すために、変電所母線構成の違いに着目して、母線事故を想定したパラメトリックスタディを行った。図-10、図-11、図-12は、日本でもっとも多く用いられている変電所の母線構成方式である単母線、2重母線1ブスタイ、2重母線4ブスタイ方式の変電所モデルを示している。なお、ブスタイとは、断路器と遮断器で構成される母線間を連結する開閉装置を意味する。ここでは変電所の結線状況を母線 (BUS)、遮断器 (CB)、断路器 (LS) で代表し、それぞれを

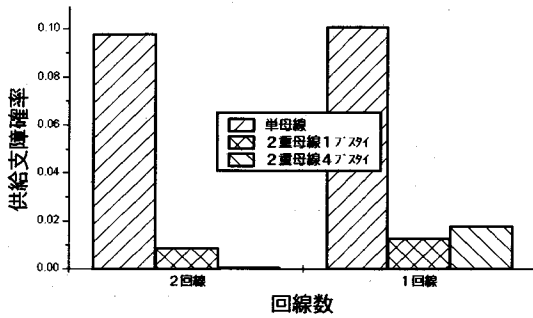


図-13 母線構成と回線数をパラメータとした供給支障確率の比較

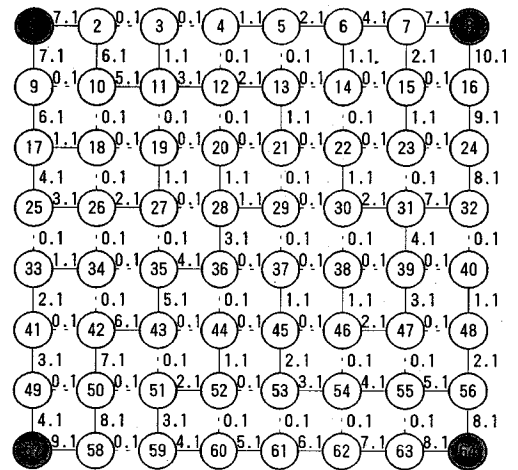
ノードとしてモデル化して、モデルの末端に供給ノードと需要ノードを設置した。また、各母線ノードには0.1、他のノードには、0.0の被害確率を与え、母線事故のみが生起するようにし、3-(3)-e)の繰返し数を1000回として第1ステップにより、供給ノードから需要ノードへの供給支障確率を算定した。さらに、解析にあたっては、回線数の違いも考慮できるように上記の3つのモデルを2回線用と定義して、これらから1回線用のモデルも作成して同様の解析を行った。ここでいう、1回線用変電所モデルとは、図-10の場合、ノード9,11,13を、図-11の場合、ノード9,19,14,5を、図-12の場合、ノード11,23,17,5を削除したモデルを意味する。

図-13には、母線構成の違いと回線数の違いをパラメータとして供給支障確率を算定した結果を示している。図-13の日本の変電所でもっとも標準的な2回線の場合、2重母線4ブスタイ形式の変電所の供給支障確率をもっとも小さく、以下2重母線1ブスタイ、単母線形式の順に供給支障確率が大きくなっている。また、回線数も含めてパラメータとして考慮した場合、母線構成をもっとも多重となっている2重母線4ブスタイ形式でかつ2回線の変電所がもっとも供給支障確率が小さくなっている。これらの結果は、母線事故に対する供給信頼性の向上を目的として発展してきた母線構成方式の設計コンセプトと一致し、本手法で提案した第1ステップの有効性を示している。

## (2) 系統規模や手法をパラメータとした2次系統の供給信頼性評価

第2ステップのハイブリッドGA法(HGA)の有効性を確認するために、以下のような解析を行った。

図-14は、グリッド形状をした仮定の電力2次システムモデルを示している。このモデルは、グリッドの角に4つの供給ノードをもつノード数64、リンク数112個のモデルである。ノードは変電所、リンクは送電線をそれぞれ意味している。各ノードの負荷電力はすべて1とし、供



●：供給ノード（1次変電所）  
 -：ブランチ  
 ○：サブブランチ  
 ○：2次変電所  
 注：送電線横の数字（たとえば、4.1）は、送電線定格容量を示す。

図-14 電力システムモデル（ノード数64、リンク数112）

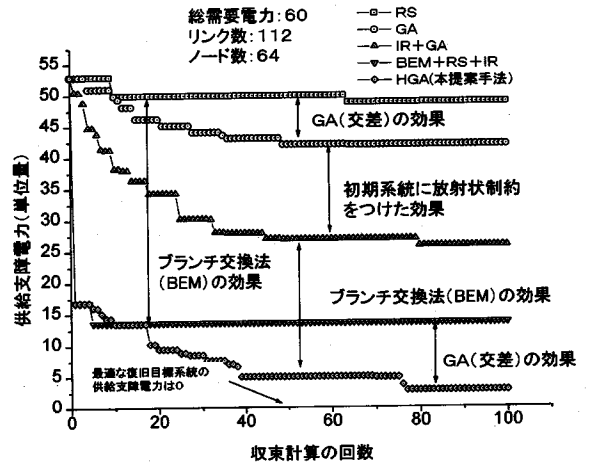


図-15 手法の違いによる収束性能の比較

給ノードは十分に大きな供給力（OLPの値をそれぞれ-100に設定）を有するものとした。図中、リンクの横には、実線で示したリンク（ブランチ）のとおりに放射状系統が構成された場合のみ供給支障電力が0となるようにして決めたリンクの定格容量を示している。このモデルを用い、本手法で開発したハイブリッドGA法の核となる5つの解析手法を用いて、図-14で定めた供給支障電力が0となる系統構成を求める解析を行った。

なお、このモデルの系統切り替えの組合せ総数は $2^{112}$ である。

GAを用いた手法の有効性を示すためには、GAの収束



表-2 手法の違いによる最良値の比較

	平均値	標準偏差	最小値	最大値
RS	48.10	2.12	44.08	51.05
GA	47.53	2.53	41.95	49.90
IR+GA	32.23	3.64	25.80	36.80
BEM+RS+IR	15.20	0.87	13.53	16.27
HGA(本提案手法)	9.23	3.27	2.70	13.53

計算の回数に対する評価値の推移を示す収束性能を検討することがよく行われる<sup>8)</sup>。図-15には、本研究で提案した手法の収束性能を示すために、横軸に収束計算の回数を取り、縦軸に各回数でもっとも適応度の高い評価値(供給支障電力)をとって手法ごとに比較している。この比較解析は、図-5の解析フローにおけるi)の項目による繰返しの各段階を収束計算の回数として、本手法でハイブリッドしている各手法を比較することを意味する。凡例中の「RS」とは、上位ノード表現による遺伝子

(系統の接続関係を示した数値列)をランダムに生成することを繰り返すことにより、適応度の高い系統構成を求めることを意味する。「GA」とは、本手法において図-5のc)、d)のステップを省いて、単純GAにより系統構成を求めることを意味し、佐藤ら<sup>10)</sup>と同じ方法である。「IR+GA」とは、図-5のd)のステップのみ省いて初期系統が常に放射状制約を満足するようにして系統構成を求めることを示す。「BEM+RS+IR」とは、栗原ら<sup>7)</sup>の方法に多点探索的な要素を取り入れた図-5のg)のステップである交差を省いて系統構成を求めることを意味する。「HGA」とは、本研究で提案する手法である。また、GAのパラメータは初期遺伝子数を10個、交差率を0.3、突然変異率を0.1とした。なお、表-2には、図-15が初期値に依存した特異解でないことを示すために、乱数の初期値を変えてそれぞれの手法で10回解析を行い、最終的にもとまった最良値(それぞれの手法で求まる最小供給支障電力)の統計量を示した。

「RS」と「GA」および「BEM+RS+IR」と「HGA」

(本提案手法)の違いは適応度の高い系統構成の一部を新たに生成する遺伝子に引き継がせることを目的とする交差操作を行うかどうかである。図-15は、ともにこの交差操作が収束性能を高めるうえで効果的であることを示している。特に、本手法で行う交差は、BEMで局所解に収束してしまった遺伝子に対して、解の近傍で振動させることにより、より最適解に近い系統構成を探索するような役割を果たしていると考えられる。

「GA」と「IR+GA」は、生成するすべての遺伝子が、式(10)で示した制約条件を満たすかどうかの違いがある。図-15は、放射状制約をつけて初期系統を生成することが、致死遺伝子(放射状制約を満たさない系統構成)の発生を抑制する効果があることを示している。

「IR+GA」と「HGA」(本提案手法)は、BEMをGAにハイブリッドさせたかどうか異なる。この2つの手

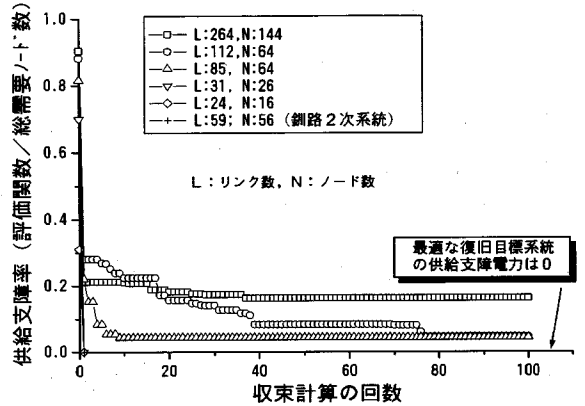


図-16 系統規模の違いによる収束性能の比較

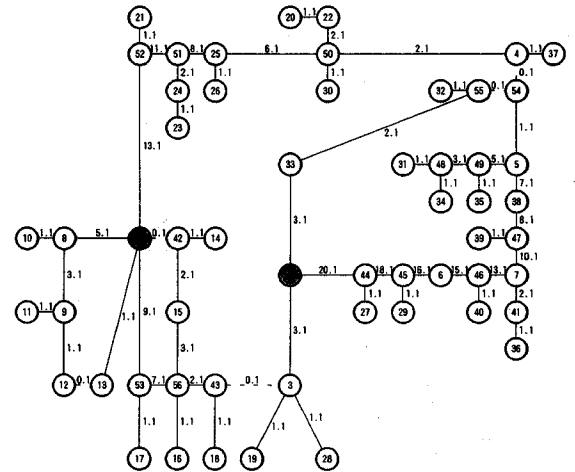


図-17 釧路2次系統モデル(ノード数56, リンク数59)

法の収束性能の差は、大域的な探索能力しかないGAに、局所探索の得意なBEMを適切に組み合わせることにより、大幅な解の収束率の向上が期待できることを示している。

上記の結果は、それぞれ単独の手法よりも、適切にそれぞれの手法をハイブリッドさせることにより手法の収束率を高めることができることを意味している。

なお、上記のようにそれぞれの手法をハイブリッドして解析すると、演算時間が余計にかかることは、否定できない。たとえば、「IR+GA」と「HGA」(本提案手法)を比較するとDEC3000-700のEWSを用いて100回の収束計算をした場合、USERのCPU時間でそれぞれ、231秒、777秒かかった。しかし前者の方法で2260秒かかる1000回の収束計算を行っても最終的に求められる最良値は後者の最良値の25.3よりも小さくならなかった。つま

り、図-14の系統において、本手法以外の方法では、どんなに収束計算の回数を多くしても最適値とは、かなり誤差のある局所解で収束してしまう可能性が高いことを示している。

図-16は、本手法の解析精度の限界を把握するためにモデルのノード数とリンク数をパラメータとして収束性能を比較したものである。凡例中のLはリンク数をNはノード数をそれぞれ示し、それぞれのモデルは、図-16と同じように、唯一の系統構成をとった場合に評価値（供給支障電力）が0となるようにリンクの定格容量を設定した。ただし、リンク数(L)が59、ノード数(N)が56の実モデルは、リンクの定格容量や負荷電力は任意に設定したが、図-17に示す北海道釧路支店管内の実際の2次系統をモデル化している。

図-16は、リンク数が多いほど①本手法でもとまる最良値と設定した最適値の誤差が大きくなること、②解の収束性能が低下することを示している。また、図-16は、実2次系統よりも規模の小さい系統モデルに関しては、1回の収束計算だけで評価値が0となっている。このことは、本手法が、釧路系統程度の規模の系統に対しては、かなりの確度で最適値を与えることができることを示している。

## 5. 地震に対する電力施設の設備計画への適用について

### (1) 北海道釧路地方の実2次系統のモデル化

本手法を北海道釧路地方に実在する二次系統に適用し、地震を想定した系統設備計画について検討した例を示す。この系統の変電所をノードに、送電線をリンクにモデル化するとそれぞれ56個、59個となりその系統構成は、図-17と同じになる。この系統の負荷電力は、1994年10月19日の負荷電力がピークになったときの値を使用し、総負荷電力は約661MVA (MVA ≒ MW) である。また、送電線の定格容量はこの時点の実際の値を使用した。さらに、各ノードは、それぞれ変電所母線構成に応じてサブネットワークを持っており、サブネットワークは、変圧器、母線、遮断器、断路器の碍子系機器をノードとし、各機器間のリード線をリンクとした。メインネットワークでモデル化した釧路系統の変電所のうち6つは、2重母線1ブスタイ形式の変電所であり、33個が単母線形式変電所で残りのノードは、送電線の分岐点に設定したダミーノードとした。サブネットワークの系統全体での総ノード数は、853個、総リンク数は、885個に達する。

### (2) 機器の被害確率

サブネットワーク中の各ノードの被害確率を以下のよりに仮定した。まず、想定地震を1993年釧路沖地震とし

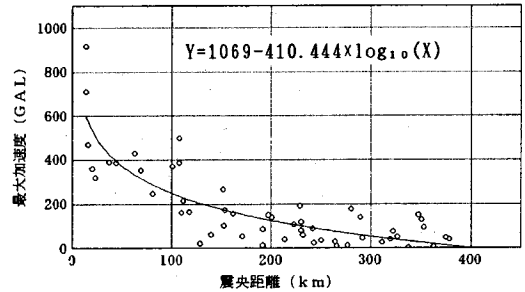


図-18 1993年釧路沖地震における最大加速度分布とその回帰式

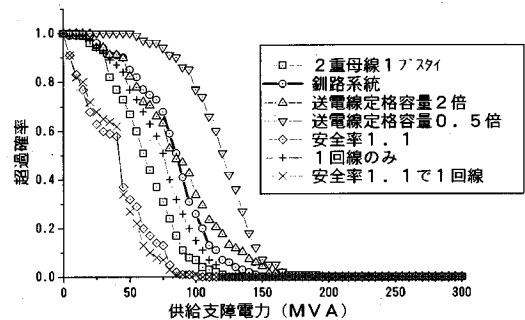


図-19 耐震対策の違いをパラメータとしたリスクカーブの変化（地震時の多重事故を想定した場合）

て、実際に地表面で観測された最大加速度分布<sup>13)</sup>から回帰式を作成した。この回帰式から各変電所の地表面最大加速度を推定した。図-18には、ここで用いた震央距離に対する最大加速度分布とその回帰式を示す。また、機器のフラジリティを平均値541.5kg/cm<sup>2</sup>、標準偏差74.2kg/cm<sup>2</sup>で正規分布する碍子のフラジリティカーブで代表した。さらに、過去に行われた代表的な変電機器に対する振動実験のデータ<sup>14)</sup>から、安全率 (= 許容応力 / 発生(計算) 応力) が1.0の機器において0.3Gの最大加速度が変電機器に作用した場合に碍子に発生する最大応力を200kg/cm<sup>2</sup>と仮定し、変電所の各ノードに作用する最大応力を最大加速度に換算して各ノードの被害確率を推定した。なお、送電線の被害確率については、被害調査結果<sup>15)</sup>をもとにしてすべて0.0として被害はないものとした。

### (3) 設備計画の違いによる供給信頼性評価

本手法を上記のモデルに適用し、その供給信頼性を評価した。ここでは、モンテカルロシミュレーションの試行回数を100回とし、本提案手法の収束計算の最大回数(図-5のi)を予備解析の結果から20回とした。

図-19には、設備対策や解析手法の違いをパラメータとし、地震力として1994年釧路沖地震を想定した場合

のリスクカーブの変化を示している。リスクカーブとは、任意の供給支障電力以上が生起する確率（超過確率）を意味している<sup>1)</sup>。リスクカーブにより、系統全体の供給信頼性を定量的に示すことが可能である。図-19の「2重母線1ブスタイ」はモデルのすべての変電所母線構成を2重母線1ブスタイ方式としたときを示し、「釧路系統」とは、実際の状態をモデル化したことを示す。「送電線定格容量2倍」、「送電線定格容量0.5倍」とは、送電線の定格容量をそれぞれ釧路系統の2倍、0.5倍にした場合を示し、「安全率1.1」とは、系統内のすべての変電機器の安全率を「釧路系統」の1.1倍にしたことを示す。「1回線のみ」とは、変電所内の開閉機器の数を減少させるために、釧路系統の回線数をすべて1回線とすることを示す。「安全率1.1で1回線」とは、釧路系統の回線数をすべて1回線として機器の安全率を1.1倍にしたことを示す。ただし、2回線を1回線とした場合にも、送電線の定格容量は変化しない（1回線が2回線分の容量をもつ）ものとした。

まず、「釧路系統」と比較して、「安全率1.1」の場合には、図-19のリスクカーブにより信頼性が高くなっていることがわかる。たとえば、超過確率0.5の供給支障電力を比較すると、「安全率1.1」のほうが、約45MVA（全供給電力の約6.8%）少ない。安全率1.1とは、0.3Gの最大加速度が作用した場合の最大応力が、1.0の安全率の機器の1/1.1倍である180kg/cm<sup>2</sup>である変電機器を意味する。このことは、釧路系統のすべての機器の碍子への発生応力を20kg/cm<sup>2</sup>減少させることは、超過確率0.5となる全系統の供給支障電力を約45MVA減少させることを意味している。

また、「送電線の定格容量2倍」と「釧路系統」のリスクカーブには、あまり変化がみられないが、「送電線の定格容量0.5倍」では、前者2つに比べ、リスクカーブが上昇している。このことは、釧路系統が、負荷に対して充分供給余力を持っていることを示すとともに、負荷の状態によっては、定格容量の増強が供給信頼性を向上させるうえで、効果があることを示唆している。

さらに、「2重母線1ブスタイ」は、「釧路系統」と比べて、リスクカーブが下降して供給信頼性が高くなっている。つまり、このことは、釧路系統の33個の単母線形式の変電所を2重母線1ブスタイ変電所にするにより、超過確率0.5の供給支障電力を約20MVA（80MVAから60MVA）減少させることができることを示している。

ここで、注目に値する結果は「釧路系統」よりも「1回線」のリスクカーブのほうが供給信頼性が高くなるという事実である。これは、3-(3)で示した保護リレー動作を模擬した隔離動作を考慮していることが原因と考えられる。通常、変電所内のすべての開閉機器の被害確率が同じで隔離動作を考慮しなければ、2回線の変電所が中

心の「釧路系統」のほうが、すべての釧路系統の送電線を1回線にした「1回線」よりもリスクカーブは低くなり、供給信頼性は高くなる。しかし、開閉機器の隔離動作を考慮した場合、開閉機器が損傷されると、各回線の機能停止は独立にならずある程度の相関性を持ってしまう。たとえば、図-4の場合、仮にノード5が被害を受けると1,6,8,9の断路器が開放される。この結果、回線1が使用できなくなるばかりでなく、3-(2)で示した変電所の隔離範囲の規則により回線2も使用できなくなってしまう。この影響で2回線化が進んでいる釧路系統のリスクカーブは隔離操作を考えない場合よりも上昇して、「1回線」よりも供給信頼性が低くなったものと考えられる。一方、同じ条件でも機器の被害確率が異なる「安全率1.1」と「安全率1.1の1回線」の場合には、リスクカーブに両者の違いはほとんどない。このことは、機器の耐震性によっても回線の多重化の効果が異なることを示している。

さらに、「安全率1.1の1回線」と「安全率1.1」のリスクカーブがほぼ一致していることは、釧路系統の開閉機器を135個（全ノード数の15%）減らし、地表面の最大加速度が0.3Gのときに残りの機器の碍子への発生応力を約20kg/cm<sup>2</sup>減少させるような耐震対策を行うだけで、同様の対策を釧路系統のすべての機器に行うほどの効果があることを示している。

## 6. まとめ

本研究では放射状に運用される二次系統を対象として地震時における系統切り替え操作による復旧の効果や変電所の結線状況の違いを考慮した供給信頼性評価法を開発した。つぎに、個々の変電所を対象としてサブネットワークを構築し、断路器の開閉操作に着目した変電所全体の機能低下範囲を特定する解析アルゴリズムを構築した。さらに、上記の結果を初期系統状態とした場合に、ハイブリッドGA法を応用して供給支障電力を最小とする復旧目標系統を構築し、その系統における供給支障電力を確率的に求める手法を提案した。最後に、本手法を小規模モデルおよび北海道釧路地方の実2次系統に適用し、以下の結論を得た。

(1)本手法を母線構成をパラメータとした変電所モデルに適用した結果、母線事故のみを対象とする供給信頼性に関しては、変電所の設計コンセプトと一致する結果が得られた。

(2)系統の規模や他手法との比較により、本手法がより効率的に復旧目標系統を構築できることを確認した。特に、北海道釧路地方に実在する2次系統程度の規模では、かなりの確度で厳密に供給支障電力が最小となる復旧目標系統を求めることが可能であることが明らかとなった。

(3)本手法を北海道釧路地方にある実際の2次系統に適用した結果、釧路系統にとって①個々の機器の耐震性を向上させる、②母線構成を多重化するほうが、地震時の供給信頼性を向上させるには効果的であることが明らかとなった。また、今後、負荷の増大に応じて定格容量を適度に増加させることも効果的な耐震対策となることが明らかとなった。さらに、1993年釧路沖地震が釧路系統に発生することを想定した場合、釧路系統のすべての送電線の回線数を減らして1回線とした場合には、開閉機器の耐震性によっては、供給信頼性が向上する場合があることを示した。

**謝辞：**本研究を行うにあたり、北海道電力釧路支店電力部の方々に多くの資料提供を受けた。特に、発変電課八幡副長には多大な協力を得た。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 朱牟田善治, 竹中清, 桃井直美, 石田勝彦: 地震時における電力基幹系統の信頼性評価法, 土木学会論文集No. 507/I-30, 243-253, 1995.1.
- 2) 山田善一, 野田茂: 地震時の電力供給系統の被害予測, 自然災害学会7-1, pp.10-25, 1988.
- 3) 電気学会・電力系統の事故時復旧調査専門委員会: 電力系統の事故時復旧操作, 電気学会技術報告(II部), 第354号, 1990.

- 4) 奥田健三, 渡辺博芳, 山崎勝弘, 馬場敬信: 事例ベース形推論による二次系統の事故復旧支援方式, 電学論B, 108, No.12, 1988.
- 5) 中村静香: 最小木ならびに過負荷情報に基づく探索機構を用いた電力系統復旧における最終復旧系統立案方式, 電学論B, III巻5号.
- 6) 永田武, 佐々木博司, 北川稔: 線形計画法の適用による電力系統の復旧目標系統の決定, 電学論B, 113巻5号, 1993.
- 7) 栗原郁夫, 高橋一弘, 荒尾公一: 2次系統の供給信頼性評価法の開発, 電力中央研究所報告, 研究報告, T90061, 1979.
- 8) 北野宏明編: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993.
- 9) 奈良宏一, 北川稔, 石原稔久: 遺伝アルゴリズムによる配電損失最小化, 電気学会電力技術研究会, PE-91-108, 1991.
- 10) 佐藤康生, 大山大山: 組合せ最適化問題による復旧目標系統作成, 電気学会電力技術研究会, PE-93-133, 1993.
- 11) 電力システム将来問題研究会: 新しい電力系統工学のために, AESOP/GRIMM, 1994.
- 12) 当麻純一, 大友敬三, 岩橋敏広: 地震時における電力流通システムの供給信頼度評価法の開発, 電力中央研究所報告, 研究報告, U90061, 1991.
- 13) 強震観測事業推進連絡会議: 強震速報No.41, 1993年1月15日平成5年釧路沖地震, 防災科学技術研究所, 1993.
- 14) 電気事業連合会: 変電設備耐震対策委員会報告書(詳細編), 1979.
- 15) 井上大栄代表: 1993年釧路沖地震被害調査報告, 電力中央研究所報告, 調査報告, U92047, 1993.

(1995.10.9 受付)

## A METHOD FOR SEISMIC RELIABILITY ANALYSIS OF SECONDARY TRANSMISSION SYSTEM

Yoshiharu SHUMUTA, Naomi MOMONOI and Katsuhiko ISHIDA

This paper presents a probabilistic method for estimating the minimum power loss of secondary transmission systems in a seismic event. First, the power loss was defined. Second, a state-of-the-art study for a system switching method was described and an algorithm was proposed on the basis of Genetic Algorithm (GA) and Monte Carlo simulation. Third, it was indicated that the developed method was an effective means of seismic-reliability analysis for secondary transmission systems. Finally, this method was applied to a seismic reliability analysis of a real secondary transmission system in Kushiro, Hokkaido, Japan.