

# 地震時における電力基幹系統の信頼性評価法

朱牟田善治<sup>1</sup>・竹中清<sup>2</sup>・桃井直美<sup>3</sup>・石田勝彦<sup>4</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>工修 (財)電力中央研究所 電力システム部 (〒201東京都狛江市岩戸北2-11-1)

<sup>3</sup>(財)科学技術館 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>4</sup>工博 (財)電力中央研究所 耐震部 (〒270-11千葉県我孫子市我孫子1646)

電力基幹系統の地震時における供給信頼度を定量評価するための手法を開発した。まず、地震時に行われる電力潮流の調整を模擬したアルゴリズムを提案した。つぎに、米国電気電子学会の2ノードモデルを用い、本手法が既存の手法に比べ、より現実的に供給信頼度を評価できることを明らかにした。最後に、米国メンフィス市の実系統に適用し、リスクカーブ(供給支障電力に対する超過確率のカーブ)を用いて、実務における設備計画等に本手法が有効であることを示した。

**Key Words** : seismic reliability, electric transmission system, connectivity, adequacy, flow control

## 1. はじめに

電力系統は、発電、送電、変電、配電、制御通信、情報システム設備等から構成され、目的別に基幹(1次)、2次、配電系統と分類される。基幹系統は通常ループ状に構成され、2次・配電系統は、放射状に構成される。このような電力系統の地震防災に関する研究は、これまで個々の構造要素の耐震性の向上を主眼とするものであった。しかし、これらハード的な研究がかなりのレベルにまで到達した近年、設備計画や震後の復旧計画を最適化し、地震時の系統全体の機能低下を最小限に抑えることを主眼とするソフトな観点からの研究が望まれるようになった。このため、系統全体として地震時にどれくらい機能を維持できるのかといった需要家への供給信頼度を、その復旧の効果も考慮にいれて評価するような研究が急務な課題となってきた。

このような地震時における電力系統の供給信頼度評価に関する初期の研究は、系統を構成する複数の機器に同時に事故が発生(多重事故)したことを想定し、供給側から需要側まで物理的につながっているかどうかを確率的に評価するといった方法であった<sup>1)~4)</sup>。しかし、供給信頼度を正しく評価するためには、①系統構成機器が許容する電流値や電圧値で需要家の要求する電力を供給する能力(アデカシー)や②系統の短絡や予期しない系統構成要素の損失など突然の擾乱に系統が耐える能力

(セキュリティ)なども合わせて評価する必要がある<sup>5)</sup>。すなわち、供給端から需要端まで物理的な連結性を保つことは、電力供給を行うための必要条件でしかなく、十分条件を満たすためには、上記のような電氣的な特性も考慮しなければならない。

このような観点から山田・野田<sup>6)</sup>は、系統構成機器の過負荷(最大電流値)に許容基準を設け、電力2次系統を対象とした地震時の供給信頼度評価法を開発した。また、Angら<sup>7)</sup>は、系統構成要素の許容電圧値や系統周波数に関連する供給電力と需要電力のバランス比に許容基準を設け、電力基幹系統を対象とする地震時の供給信頼度評価法を開発した。いずれの方法も連結性の評価の他に電氣的な特性の一部を考慮できるように工夫して開発された評価手法である。

ところで、実際の電力系統において地震時に頻繁に発生する電氣的な問題は、①系統周波数の異常(供給電力と負荷電力の不一致)、②異常電圧(電圧値が異常に上下する)、③過負荷(送電線の最大電流値を超えた電流値が流れる)と呼ばれる異常潮流状態である。この3つの状態のうちどれかひとつでも系統に発生した場合、まず、系統を構成している機器のうち、潮流調整機能を持つ機器が、自動的に異常潮流状態を回避するような調整を行う。このとき、各機器の調整機能によって異常潮流状態が回避できない場合、保護リレー動作が働き異常潮流状態を有する機器が隔離され系統が分断し、需要家に

供給支障が発生する。この場合、電力基幹系統では運用時に健全な設備をすべて利用するような系統構成がとられているため（ループ系統）、発電機の出力調整やコンデンサによる電圧調整など電力機器の潮流調整能力を活かした調整が主に行なわれる。これに対し、2次系統や配電系統においては遮断器等により系統を区切り直して系統構成そのものを変化させる調整が主に行なわれる。このように電気的な特性を考慮して地震時の供給信頼度を評価する場合には、上記のような系統固有の調整効果も同時に評価する必要がある。

これに対し、山田・野田、Angらの文献に代表される既存の手法は系統分断後の系統切り替え操作に代表される系統構成そのものを変化させることによる調整効果のみに着目したものであり、コンデンサのような電力機器の持つ潮流調整機能を評価したものではない。

本論文では、特に、系統構成機器の持つ潮流調整機能に着目し、基幹系統を対象とした電力系統の地震時の最小供給支障電力を現実的な系統制御に沿って確率的に評価する手法を提案する。ただし、本論で提案する手法は、Andoら<sup>8)</sup>が行ったような物理的な機器の修復の効果まで含めて地震時の電力供給支障を時系列上で評価するのではなく、系統構成機器が地震により破壊された場合に、物理的な修復がなされない状態での程度システムとして機能を維持できるのかを定量評価することを目的としている。

以下では、まず、物理的な連結性と異常潮流状態である①周波数異常、②異常電圧、③過負荷のそれぞれの評価と、その状態を回避する調整機能を模擬する解析アルゴリズムについて述べる。次に、小規模モデル（2ノード）を用い、①本手法による結果と②物理的な連結性解析だけの結果③機器の調整能力を無視した場合の供給支障電力を比較し、本手法の有用性を示す。最後に、米国メンフィス市の実際の電力系統に本手法を適用し、設備計画法について考察した結果について示す。

## 2. アデカシー評価を用いた供給信頼度評価手法

### (1) 評価手法の概説

本手法は、2つの解析ステップから成っている。解析ステップ1では、物理的な連結性から算定される供給支障電力と、解析ステップ2で行う異常潮流状態の評価を行うための系統（ブロック）を構成する。ステップ2では、ステップ1で構成された系統ごとに①周波数異常、②異常電圧、③過負荷の評価を行い（以後、アデカシー評価と呼ぶ）、判定基準を越えた場合には、事故時の系統制御を模擬した調整を行う。最終的に上記①～③の項目に対する判定基準を満たしたときにどれだけ負荷抑制が必要になるかを計算し、トータルの供給支障電力およ

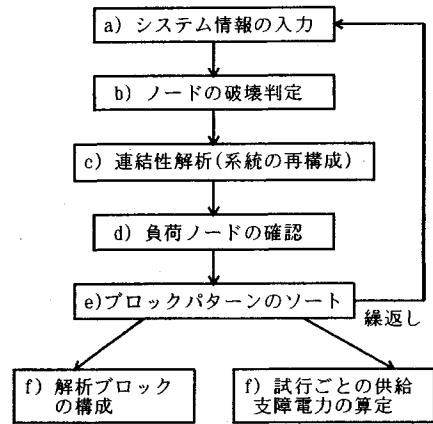


図-1 現実的な系統制御を模擬した供給信頼度評価法の第1ステップにおける解析フロー

びその生起確率を算定する。以下に、供給支障電力とその生起確率の算定方法について解析ステップごとに解説する。

### (2) 解析ステップ1の概要

図-1には、解析ステップ1のフローを示す。解析ステップ1では、モンテカルロ法により、①系統を再構成してステップ2の解析を行う電力系統（ブロック）を構成し、②試行ごとに物理的な連結性だけから求まる供給支障電力を算定する。ただし、解析ステップ1の基本的な考え方は、文献6）と同じである。

#### a) 系統情報の入力

系統情報とは、電力系統を構成している母線をノード、送電線、変圧器をリンクとして解析モデルを構成したときの、総ノード数、総リンク数、供給ノード数（発電機から直接電力を受ける母線）、負荷電力、ノードおよびリンクの破壊確率などである。ただし、ノードやリンクの破壊確率の算定法については、供給信頼度評価の精度を決めるうえで重要な問題であるが、ここでは、ノードとリンクごとに破壊確率が与えられたものとする。

#### b) 破壊判定

モンテカルロ法によって、試行ごとに各ノードの破壊（destruction）、非破壊（non destruction）を判定する。具体的には、ノードごとに独立に発生させた一様乱数 $[0, 1]$ とそれぞれの破壊確率を変数とする式(1)によりノードの破壊、非破壊を判定する。

$$Z_i = \begin{cases} P_i & Z_i \geq 1 \quad (\text{destruction}) \\ R_i & Z_i < 1 \quad (\text{non destruction}) \end{cases} \quad (1)$$

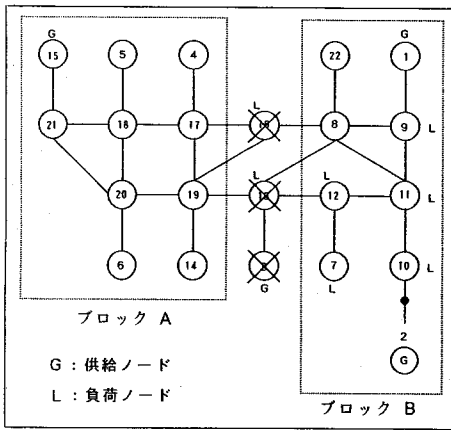


図-2 ブロック (システム) 構成例

ここで、 $Z_i$  は、ノード  $i$  に対する性能関数を示し、 $P_i$  は、ノード  $i$  の破壊確率を示し、 $R_i$  は、ノード  $i$  に発生させた乱数値をそれぞれ示す。また、リンクにおいても同様に行う。

c) 連結性解析 (ブロックの構成)

連結性解析を実行し、供給ノードと連結性が保たれているノード群を独立した1つのシステムとして抽出する。このシステムをブロックと呼ぶ。図-2の22ノードモデルをもとに、ブロックの構成例を示す。まず、b)の手順により、ノード3, 13, 16は、破壊されたものとする。これと隣接しているノード8, 12, 17, 19間の距離を $\infty$ とする。それ以外のノード間の距離はすべて1.0とする。次に、破壊されていない供給ノードGから各ノードまでの最短距離をダイクストラ法<sup>4)</sup>により算定する。図-2の例では、供給ノード1, 2, 15から各ノードの最短距離を求めている。最後に、供給ノードGからの最短距離が $\infty$ となるすべてのノードを切り離し、ブロックを構成する。図-2の例では、2つのブロックA, Bが構成されている。

d) 負荷ノードの確認

ブロックごとに負荷ノード(L)があるかどうかを確認し、ない場合にはシステム制御に関するステップ2の解析を行わない。図-2の例では、ブロックBが第2ステップの解析対象ブロックとなり、ブロックAは、負荷ノードがないために、解析対象ブロックとはならない。

e) ブロックパターンのソート

生起するブロック群を整理する。具体的には、試行を何度か繰り返すと同じ構成ノードをもつブロックが多数生起することがある。たとえば、図-2の例ではブロックBが何回かの試行のあと数回生起した場合、同じブロックBとして認識し、同じ構成ノードをもつ同一のブロックを重複して記憶しないようにする。これは、以下

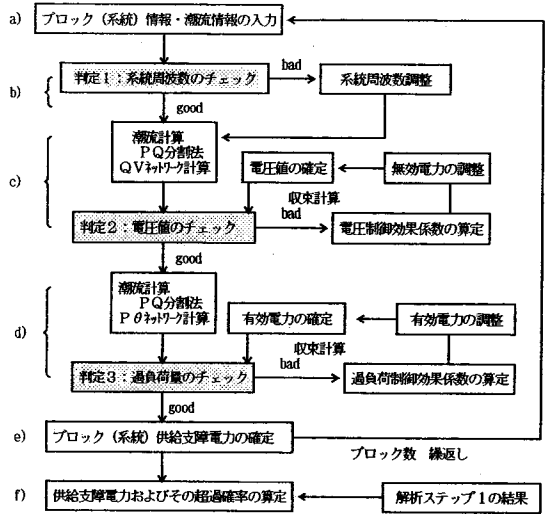


図-3 現実的なシステム制御を模擬した供給信頼度評価法の第2ステップにおける解析フロー

の解析を重複しないようにするために行うものである。

f) 解析ブロックの構成および試行ごとの供給支障電力の算定

ソートしたブロック群をステップ2の解析を行うためのシステム(アデカシー評価対象ブロック)として登録するとともに、各試行ごとに、物理的な連結性だけから求まる供給支障電力を算定する。以下にその算定方法について示す。

まず、負荷ノードLと供給ノードGとの最短距離を  $\min(D_{LG})$  とし、 $n$  を供給ノード数として、以下の式により、負荷ノードLの連結係数 ( $\delta_L$ ) を定義する。

$$\forall \min(D_{LG}) = \infty (1 \leq G \leq n) \Rightarrow \delta_L = 1 \quad (2)$$

$$\exists \min(D_{LG}) \neq \infty (1 \leq G \leq n) \Rightarrow \delta_L = 0 \quad (3)$$

つぎに、負荷ノードLの負荷電力を  $W_L$ 、負荷ノード数を  $m$ 、各試行  $t$  ごとの総供給支障電力を  $DW^{(t)}$  とすると、 $DW^{(t)}$  は連結係数を用い式(4)から算定される：

$$DW^{(t)} = \sum_{L=1}^m \delta_L^{(t)} \cdot W_L \quad (4)$$

(3) 解析ステップ2の概要

図-3に、システム制御に関するステップ2の解析フローを示す。ステップ2は、ステップ1で再構成したシステム(ブロック)が、アデカシー基準を満たして電力を供給するために、どの程度の負荷抑制が必要になるかを算定するステップである。ここでは、負荷抑制量を供給支障

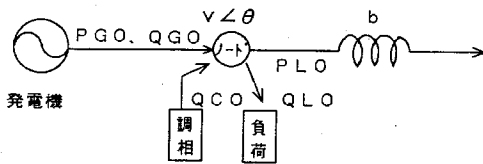


図-4 本手法で取り扱う解析モデル

電力と考える。

アデカシー評価を行うには、通常、有効電力 ( $P$ )、無効電力 ( $Q$ )、電圧 ( $V$ )、電圧位相角 ( $\theta$ ) の4つの変数を求める潮流計算を行う必要がある。潮流計算とは、上記4つの値が、必要とする電力を供給するうえで、決められた許容範囲内におさまっているかどうかを明らかにするために行う計算である。ここでいう有効電力とは、実際に仕事を行う電力を意味し、無効電力とは、交流回路において、有効電力に伴って発生する熱消費の伴わない電力を意味する。ともに電気工学の分野で一般的に用いられている専門用語である。また、潮流計算を行うための方程式は一般に非線形形であるが、本研究では、 $PQ$  分割法による近似線形解法 (直流法)<sup>9)</sup> を用いた。この方法によれば、 $Q$  と  $V$  および  $P$  と  $\theta$  をそれぞれ  $QV$  潮流計算、 $P\theta$  潮流計算を行って独立に算定および調整することが可能となる。

図-4には、本手法でパラメータとして取り扱う電気的な物理量を示す。発電機からノードへ供給される有効電力 ( $P$ ) と無効電力 ( $Q$ ) をそれぞれ  $PGO$  と  $QGO$  とし、無効電力を調整する機能を有する調相設備から供給される  $Q$  を  $QCO$ 、負荷の消費する  $P$  と  $Q$  を  $PLO$ 、 $QLO$  とし、ノード電圧を  $V$ 、その電圧位相角を  $\theta$  とする。潮流調整は、これらの量を増減させることにより行う。図中  $b$  とは、送電線のアドミタンス (インピーダンスの逆数) を示す。以下に、図-3の解析フローに沿って解説する。

なお、山田・野田は図-3のうち過負荷に対して、 $\text{Ang}$  らは周波数異常と電圧異常に対してそれぞれ許容基準を設けているが、前述したようにどちらの手法も本手法で着目している系統構成機器の調整効果を考慮したものではない。

#### a) ブロック・潮流情報の入力

ステップ1で算定されたブロック情報と潮流情報を入力する。具体的には、解析ブロックを構成する母線、変圧器、送電線ごとに、図-4のモデルで示した各変数を初期値として入力する。この値は、初期系統の潮流状態からもとまる値を入力する。

#### b) 需給バランスの評価と調整

ステップ1で構成されたブロック内の発電機有効電力の総量 ( $\sum PGO$ ) とブロック内の負荷有効電力の総量

( $\sum PLO$ ) の割合が許容範囲を満たしているかどうかを式(5)によりチェックする。

$$n < \sum PGO / \sum PLO < m \quad (5)$$

ここで、 $n$ 、 $m$  とは系統固有の許容需給バランス比の最大、最小値をそれぞれ示す。

式(5)を満たさない場合には、次のように実際の調整を模擬して一致させる。

まず、 $\sum PGO$  を式(5)の許容範囲を満たすように増減させる。増減は、供給ノード  $i$  の発電機有効電力 ( $PLO_i$ ) に比例させて行う。このとき、 $PGO_i$  は、式(6)のような制約条件下にある。

$$PGO_i^{\min} \leq PGO_i \leq PGO_i^{\max} \quad (6)$$

ここで、 $PGO_i^{\max}$ 、 $PGO_i^{\min}$  とは、それぞれノード  $i$  の最大、最小有効電力を示す。ただし、ブロック内の供給ノードの最大発電機有効電力の総量 ( $\sum PGO^{\max}$ ) よりも、ブロック内の負荷有効電力の総量 ( $\sum PLO^{\max}$ ) のほうが大きければ、負荷有効電力に比例させて  $PLO_i$  を減少させる。この場合には、負荷の消費する電力である  $PLO$  と  $QLO$  の比は実際には、ほぼ一定であるため、 $PLO_i$  を調整した場合には、この比が一定値を保つように  $QLO$  も調整する。

これらの操作は、周波数安定のために、変電所の出力を調整したり、負荷抑制を行ったりすることを模擬したものである。

#### c) 電圧値の評価とその調整

$QV$  潮流計算により解析ブロックの電圧分布を求め、各電圧値が式(7)の制約条件を満たしているかどうかをチェックする。

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (7)$$

ここで、 $V_i^{\max}$ 、 $V_i^{\min}$  とは、ノード  $i$  の最大、最小許容電圧値を示す。式(7)の範囲内に各ノードの電圧値が取まらない場合には、まず、発電機無効電力 ( $QGO$ ) と調相設備無効電力 ( $QCO$ ) を調整する。それでも各ノードが式(7)の制約条件を満たさない場合には、負荷無効電力 ( $QLO$ ) を調整する。こうして、すべてのノードが式(7)の制約条件を満足するようにする。ただし、各無効電力も式(7)と同じように最大無効電力 ( $QGO_i^{\max}$ 、 $QCO_i^{\max}$ 、 $QLO_i^{\max}$ ) と最小無効電力 ( $QGO_i^{\min}$ 、 $QCO_i^{\min}$ 、 $QLO_i^{\min}$ ) をもつ制約条件下にある。また、 $QLO_i$  を調整した場合には、 $QLO_i$  との比率を一定に保つように、 $PLO_i$  も調整する。

これらの調整は、異常電圧により系統崩壊が発生しないように、系統制御を模擬したものである。この制御論理については、3章で詳しく述べる。

#### d) 過負荷の評価とその調整

解析ブロックの有効電力分布とc)により求まる無効電力分布から線路電流値を求め、その値が、式(8)の制約条件を満足しているかどうかを評価する。

$$I_l^{\min} \leq I_l \leq I_l^{\max} \quad (8)$$

ここで、 $I_l^{\max}$ 、 $I_l^{\min}$ とは、リンク $l$ の線路電流値の最大、最小値をそれぞれ示す。

式(8)の範囲内に各線路電流の値が収まらなければ、まず、発電機有効電力( $PGO$ )を調節する。それでも式(8)の制約条件を満たさない場合には、負荷有効電力( $PLO$ )を調整する。このように各変電機器の調整機能に応じた調整を行い、すべての線路電流値がこの制約条件を満足するようにする。

ただし、各有効電力も式(8)と同様の最大有効電力( $PGO_i^{\max}$ 、 $PLO_i^{\max}$ )と最小有効電力( $PLO_i^{\min}$ 、 $PLO_i^{\min}$ )をもつ制約条件下にある。

これらの調整は、過負荷による系統崩壊を防ぐための系統制御を模擬したものである。この制御論理については、3章で詳しく述べる。

#### e) ブロック供給支障電力の確定

許容範囲内に①需給バランス比、②ノード電圧、③線路電流が収まった時点の負荷有効電力抑制量の合計を、このブロックの供給支障電力とする。この計算をブロック数だけ繰り返す。

#### f) 供給支障電力およびその超過確率の算定

解析ステップ1から算定される供給支障電力と解析ステップ2から求まる供給支障電力を合計し、各試行ごとの供給支障電力を算定する。この結果から供給支障電力に対する超過確率や供給支障電力の期待値を算定する。

具体的には、2つの解析ステップからもとまる試行ごとの系統全体の総供給支障電力を $DWW^{(i)}$ 、試行中に $DWW^{(i)}$ が $DWW \geq W$ となる回数を $N_w$ 、試行回数を $M$ とすると、少なくとも供給支障電力が $W$ となる超過確率( $P(DWW \geq W)$ )および供給支障電力の期待値( $E$ )は、式(9)(10)によりそれぞれ求めることができる。

$$P(DWW \geq W) = \frac{N_w}{M} \quad (9)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M DWW^{(i)}}{M} \quad (10)$$

式(9)(10)は、系統全体の超過確率および期待値であるが、本解析プログラムは上記の式を利用してノードごとにこれらの値を算定することも可能としている。

### 3. 系統制御アルゴリズム

#### (1) 電力潮流計算の定式化

ノード $i$ の有効電力( $P_i$ )、無効電力( $Q_i$ )は式(11)(12)により定義される<sup>(付録a)</sup>。

$$P_i = \sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} (\delta\theta_i - \delta\theta_j) \quad (11)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} (\delta V_i - \delta V_j) \quad (12)$$

ここで、 $n_i$ とは、ノード $i$ に接続している送電線数を示し、 $b_{ij}$ はノード $i$ 、 $j$ 間の線路アドミタンスを示す。また、 $P_i$ 、 $Q_i$ は、式(13)(14)により与えられる。

$$P_i = PGO_i - PLO_i \quad (13)$$

$$Q_i = QGO_i + QCO_i - QLO_i \quad (14)$$

ただし、プログラム上では、式(11)(12)を全ノード数だけ連立させたときに求まるアドミタンス行列の逆行列を求め、式(15)(16)により電圧位相角変化量、電圧変化量である $\delta\theta_i$ 、 $\delta V_i$ をそれぞれ算定している。

$$[\delta\theta_i] = [Y_p]^{-1} \cdot [P_i] \quad (15)$$

$$[\delta V_i] = [Y_q]^{-1} \cdot [Q_i] \quad (16)$$

ここで、 $[Y_p]^{-1}$ 、 $[Y_q]^{-1}$ とは、それぞれ式(11)(12)のアドミタンス( $b_{ij}$ )逆行列を示す。アドミタンス行列を作成する方法の詳細については、文献9)にゆずる。

ノード $ij$ 間のリンク $l$ に流れる線路電流値<sup>(付録a)</sup>は、線路有効電力( $P_{ij}$ )、線路無効電力( $Q_{ij}$ )を用いて式(17)により求める。

$$I_l = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2} \quad (17)$$

#### (2) 系統制御アルゴリズム

本論で提案した地震時の系統制御アルゴリズムは、電力系統の安定度解析を行うために、初期潮流断面を適切

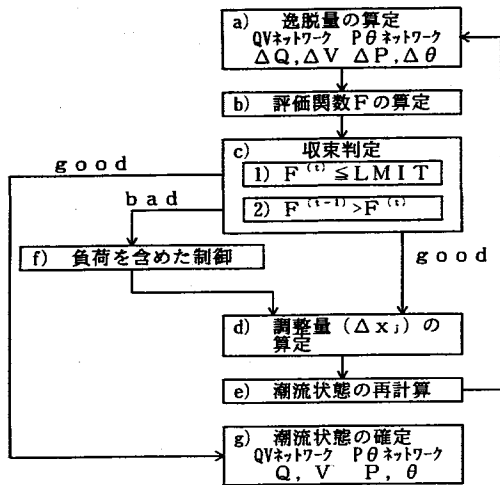


図-5 系統制御論理フロー

に決定することを目的とする判定関数法<sup>10)</sup>を応用したものである。判定関数法とは、母線電圧と無効電力の運用幅からの偏差の2乗和を評価関数とし、その値を最小とすするために最も効果のある無効電力調整機器を選択・調整して初期潮流断面を決定する手法である。図-5には、本手法で提案した系統制御フローを示す。本手法では電圧調整も過負荷調整も同じアルゴリズムを用いている。以下、フローに沿って解説する。

#### a) 逸脱量の計算

ノード $i$ またはリンク $i$ における電圧( $V_i$ )、無効電力( $Q_i$ )、線路電流( $I_i$ )、有効電力( $P_i$ )のそれぞれの変数を $X_i$ で代表すると、許容値からの逸脱量は、(18)式により算定できる。

$$\Delta X_i = \begin{cases} X_i - X_i^{\max} & (X_i > X_i^{\max}) \\ X_i - X_i^{\min} & (X_i < X_i^{\min}) \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 $\Delta X_i$ とは、各変数の許容値からの逸脱量を、 $X_i^{\max}$ 、 $X_i^{\min}$ とは、各変数の許容最大値、最小値を示す。

#### b) 評価関数(F)の算定

電圧調整や過負荷調整を行うための評価関数をそれぞれ $F_{VQ}$ 、 $F_{IP}$ として式(19)(20)に定義する。

$$F_{VQ} = \sum_{i=1}^n W_V \left\{ \frac{\Delta V_i}{V_i^{\max} - V_i^{\min}} \right\}^2 + \sum_{i=1}^n W_Q \left\{ \frac{\Delta Q_i}{Q_i^{\max} - Q_i^{\min}} \right\}^2 \quad (19)$$

$$F_{PI} = \sum_{i=1}^l W_I \left\{ \frac{\Delta I_i}{I_i^{\max} - I_i^{\min}} \right\}^2 + \sum_{i=1}^n W_P \left\{ \frac{\Delta P_i}{P_i^{\max} - P_i^{\min}} \right\}^2 \quad (20)$$

ここで、 $n$ 、 $l$ とは、それぞれブロックを構成している全ノード数、全リンク数を示し、 $W_V$ 、 $W_Q$ 、 $W_I$ 、 $W_P$ とは、各変数の重み係数を示す。

#### c) 収束判定

収束計算における $t$ ステップ時の2つの評価関数の値を $F^{(t)}$ とすると、 $F^{(t-1)} > F^{(t)}$ ならばdへ、 $F^{(t-1)} \leq F^{(t)}$ ならばfに進む。また、この値が評価関数の最小値(LMIT)よりも小さければその時点で収束したものととして、gに進みその時点の潮流状態を最終的な値とする。

#### d) 調整量( $\Delta q_i^{(t)}$ , $\Delta p_i^{(t)}$ )の算定

調整は、評価関数のグラジエント(偏微分値)を計算し、そのグラジエントが最大となる任意ノード $i$ の無効(有効)電力を単位量調節しながら逐次評価関数を小さくするという方法を採用。まず、評価関数の偏微分を可能とするようにノード $i$ またはリンク $i$ の $t$ ステップ時の電圧、無効電力、線路電流、有効電力の許容値からの逸脱量をそれぞれ $\Delta V_i^{(t)}$ 、 $\Delta Q_i^{(t)}$ 、 $\Delta I_i^{(t)}$ 、 $\Delta P_i^{(t)}$ として式(21)~(24)に定義する。

$$\Delta V_i = \Delta V_i^{(t-1)} + \sum_{j=1}^{nc} k_{ij} \cdot \Delta q_j^{(t)} \quad (21)$$

$$\Delta Q_i^{(t)} = \Delta Q_i^{(t-1)} + \Delta q_i^{(t)} \quad (22)$$

$$\Delta I_i^{(t)} = \Delta I_i^{(t-1)} + \sum_{j=1}^{lc} S_{ij} \cdot \Delta p_j^{(t)} \quad (23)$$

$$\Delta P_i^{(t)} = \Delta P_i^{(t-1)} + \Delta p_i^{(t)} \quad (24)$$

ここで、 $k_{ij}$ は、ノード $j$ の無効電力を単位量変化させたときのノード $i$ の電圧変化量を示し、 $S_{ij}$ とは、ノード $j$ の有効電力を単位量変化させたときのリンク $i$ の線路電流変化量を示す。これら $k_{ij}$ 、 $S_{ij}$ は、効果係数と呼ばれ相反の定理<sup>9)</sup>により簡単に求めることができるが、詳細は文献9)を参照されたい。また、 $\Delta q_j^{(t)}$ 、 $\Delta p_j^{(t)}$ とは、それぞれ $t$ ステップ時の $j$ ノードの無効電力および有効電力調整量を示し、 $nc$ 、 $lc$ とは、無効電力、有効電力を調整する機器を持つノード数をそれぞれ示す。

式(21)(22)を式(19)に代入し $\Delta q_j^{(t)}$ についてグラジエントをとり、式(23)(24)を式(20)に代入して $\Delta p_j^{(t)}$ についてのグラジエントをとるとそれぞれ式(25)(26)のようになる。



表-1 IEEEノード標準モデル (母線データ)

No	V			PGO			QGO			PLO			QLO			QCO			被害確率
	Min	Init	Max	Min	Init	Max	Min	Init	Max	Min	Init	Max	Min	Init	Max	Min	Init	Max	
*1	0.9	1.1	1.1	0.00	6.00	10.00	-5.00	1.16	10.00										0.00
2	0.9	1.0	1.1	0.00	5.00	10.00	-5.00	0.75	10.00										0.00
3	0.9	1.0	1.1							0.00	0.75	0.75	0.00	0.27	0.27	-5.00	0.37	10.00	0.01
4	0.9	1.0	1.1	0.00	5.00	10.00	-5.00	0.42	10.00										0.00
5	0.9	1.0	1.1																0.02
6	0.9	1.0	1.1							0.00	2.50	2.50	0.00	0.89	0.89	-5.00	1.70	10.00	0.10
7	0.9	1.0	1.1							0.00	2.00	2.00	0.00	0.70	0.70	-5.00	1.35	10.00	0.10
8	0.9	1.0	1.1							0.00	2.50	2.50	0.00	0.89	0.89	-5.00	1.45	10.00	0.10
9	0.9	1.0	1.1							0.00	1.75	1.75	0.00	0.61	0.61	-5.00	0.86	10.00	0.02
10	0.9	1.0	1.1							0.00	2.00	2.00	0.00	0.70	0.70	-5.00	0.67	10.00	0.10
11	0.9	1.0	1.1	0.00	5.00	10.00	-5.00	0.45	10.00										0.00
12	0.9	1.0	1.1	0.00	4.00	10.00	-5.00	0.54	10.00										0.00
13	0.9	1.0	1.1							0.00	2.00	2.00	0.00	0.70	0.70	-5.00	0.85	10.00	0.03
14	0.9	1.0	1.1							0.00	1.50	1.50	0.00	0.55	0.55	-5.00	0.57	10.00	0.00
15	0.9	1.0	1.1	0.00	0.25	10.00	-5.00	0.09	10.00										0.10
16	0.9	1.0	1.1							0.00	2.50	2.50	0.00	0.89	0.89	-5.00	1.91	10.00	0.10
17	0.9	1.0	1.1																0.07
18	0.9	1.0	1.1																0.10
19	0.9	1.0	1.1							0.00	2.50	2.50	0.00	0.89	0.89	-5.00	0.59	10.00	0.004
20	0.9	1.0	1.1																0.007
21	0.9	1.0	1.1							0.00	5.95	5.95	0.00	1.75	1.75	-5.00	1.26	10.00	0.10
22	0.9	1.0	1.1	0.00	1.18	10.00	-5.00	0.40	10.00										0.03

注: No:ノード番号, Min:許容最小値, Init:初期値, Max:許容最大値, V:電圧値, PGO:発電機有効電力, QGO:発電機無効電力  
 PLO:負荷有効電力, QLO:負荷無効電力, QCO:調相設備無効電力, \*:基準ノードなお、表中の値はすべてPU値(付録b)を示す。

表-2 IEEE 22ノード標準モデル (送電線, 変圧器データ)

No.	接続ノード NF	NT	REACTANCE (p. u)	Imax (p. u)	破壊確率
23	5	18	0.07000	4.4000	0.0
24	18	21	0.10000	2.7500	0.0
25	21	15	0.05000	2.5000	0.0
26	18	20	0.05000	2.7500	0.0
27	20	6	0.10000	2.0000	0.0
28	4	17	0.05500	5.5000	0.0
29	17	19	0.02500	4.0000	0.0
30	16	19	0.04000	2.5000	0.0
31	19	14	0.01000	2.5000	0.0
32	22	8	0.10000	7.0000	0.0
33	8	13	0.10000	2.0000	0.0
34	13	3	0.05000	2.5000	0.0
35	12	7	0.10000	2.0000	0.0
36	8	11	0.03420	2.0000	0.0
37	9	11	0.00500	4.0000	0.0
38	18	17	0.02500	2.5000	0.0
39	17	16	0.00500	2.5000	0.0
40	16	8	0.02000	5.0000	0.0
41	8	9	0.02700	2.0000	0.0
42	9	1	0.08000	6.0000	0.0
43	21	20	0.04000	3.5000	0.0
44	20	19	0.02500	2.5000	0.0
45	19	13	0.02000	2.2500	0.0
46	13	12	0.03200	2.5000	0.0
47	12	11	0.03080	4.0000	0.0
48	11	10	0.05000	3.5000	0.0
49	10	2	1.00000	6.0000	0.0

注: No:ノード番号, Imax:線路許容最大電流値, NF:送端側ノード  
 NT:受端側ノード, REACTANCE:線路リアクタンス

図-6の×印で示した母線が損傷されると通常、保護リレー動作により図の点線で示す部分がブロック化され系統が再構成される。この状態でノード7, 16から電力供給を受けている需要家は、物理的に系統から切り離されて電力供給を受けることができなくなる。連結性解析の値は、この系統から切り離されるノードを特定するステップ1までの算定結果であり、この場合の供給支障電力は、ノード7と16の全負荷量となる。一方、系統が再構成されブロック化された状態では需給バランスがくずれ系統周波数が異常となる。具体的には、発電機有

効電力と負荷有効電力の合計がそれぞれP.U値(付録b)で18.45, 23.45となる。これは、連結性解析だけを行って算定した供給支障電力が現実に存在しない事を意味し、実際の供給支障電力を過小評価してしまうことを示している。

上記のような異常潮流状態になると実際の系統では発電機の出力を上げたり、負荷抑制を行うような調整を行うことにより需給量が一致するような調整が行われる。この調整を行わない調整なし1では、系統を再構成した時点で系統全体が周波数異常のため崩壊してしまい、供給支障電力は100%となる。つきに、需給バランスを調整した後に各ノードの電圧分布を計算してみると図-6中3, 6, 8のノードが許容最大電圧(P.U値で1.1)を越えた過電圧状態(それぞれP.U値で1.1021, 1.1072, 1.1060)となっていることが確認できる(各母線の許容最大電圧値は、表-1を参照)。この状態で電圧調整を行わない調整なし2では、系統が過電圧により崩壊してしまい、供給支障電力は100%となる。さらに、電圧調整を行った後に各リンクの線路電流値を計算するとリンク34, 42, 45が許容最大電流値(P.U値でそれぞれ2.5, 6.0, 2.25)を越えて過負荷状態(P.U値でそれぞれ5.0088, 6.0088, 2.7944)となっていることが確認できる(各送電線の許容最大電流値は、表-2を参照)。この状態で過負荷調整を行わない調整なし3では、供給支障電力は、やはり100%となる。これに対し、物理的な連結性、異常潮流状態、それらの調整効果を考慮して供給支障電力を算定した本手法の結果は、上記の手法で評価したいずれの値とも異なっていることを図-7は示している。



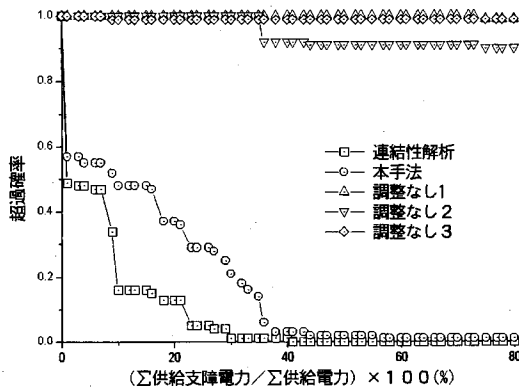


図-8 地震の不確実性を考慮した解析手法による供給支障電力の比較

図-8には、地震の不確実性を考慮してモンテカルロシミュレーションを100回行うことにより図-6に示す×印の位置や数を変化させて確率的に供給支障電力を評価した結果を上記の手法ごとに示している。横軸は、供給電力に対する供給支障電力の比を%表示し、縦軸をその超過確率で示している。連結性解析だけの結果は、電気的な評価も加えている他の手法と比べて供給支障電力を過小評価している。一方、調整なし1、2、3の結果は、いずれも超過確率の値がほぼ1.0に漸近してしまう。これは、地震時に異常潮流状態が発生すると、すぐにブロック全体の機能が失われ系統崩壊してしまうことを示している。しかし、過去の地震において実系統が系統崩壊した例はほとんど報告されていない。

このように、より現実的な評価を行うためには、物理的な連結性を評価する他に異常潮流状態に対する許容基準を設ける必要があるが、同時にその許容基準に対する調整の効果も考えないと調整なしの結果が示すように供給支障電力は、過大評価となってしまふ。このことは、既往の手法の概念を模擬している連結性解析だけの結果<sup>1)~4), 8)</sup>や調整なしの結果<sup>6) 7)</sup>では、それぞれ実際の供給支障電力を過小評価、過大評価してしまい、現実的な評価を行うためには不十分な場合が存在することを示している。ただし、文献6)では2次系統を対象としているため、得られる結果について単純に比較はできない。

上記のような供給支障電力に対する超過確率のカーブをリスクカーブとして定義する。このリスクカーブは、実務における設備計画等に広く応用することが可能である。次にその適用例を示す。

## (2) 実規模モデルでの供給信頼度評価

本手法で定義したリスクカーブの適用例を示すために、

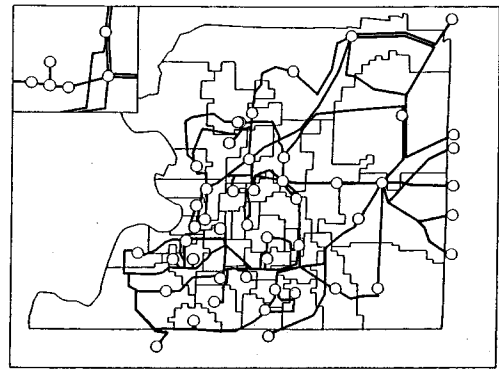


図-9 メンフィス市の電力基幹系統

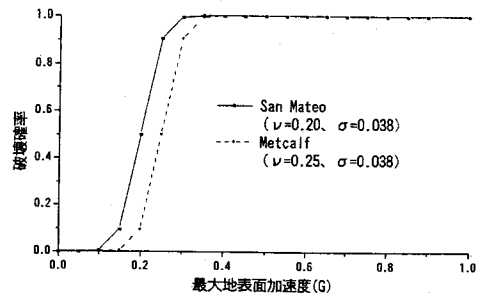


図-10 仮定した2つのノードフラジリティカーブ

米国メンフィス市の実電力系統を対象とした被害想定を行い、そのリスクカーブを算定した。図-9に米国メンフィス市の電力基幹系統モデルを示す。この系統を解析するために、メンフィス市の実際の電力系統の代表的な潮流データをもとに59個のノードからなる解析モデルを構成した。ここで、ノードごとの破壊確率を算定するために、まず、ニューマドリッド断層上にM8.2の地震を想定<sup>11)~13)</sup>してノード直下位の地表面加速度を推定した。つぎに、すべてのノードの地表面加速度に対する破壊確率を図-10に示す2つのフラジリティカーブを用い仮定した。これらの値は、文献7)のサンマテオ(San Mateo)変電所およびメットカルフ(Metcalf)変電所のそれぞれのフラジリティカーブを示している。さらに、すべての送電線の許容最大電流値(定格容量)が1000A、2000A、3000Aの場合を想定した。なお、解析における諸定数は、4-(1)と同じ値を用い、100回のモンテカルロシミュレーションを行った。

図-11には、上記2種類のフラジリティカーブと3種類の送電線の定格容量をパラメトリックに変化させた6種類のリスクカーブを示している。想定地震に対してすべてのノードフラジリティがサンマテオ変電所のフラ

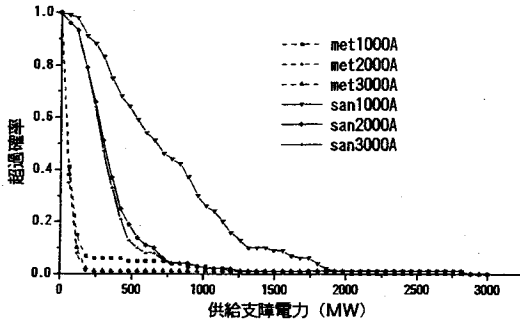


図-1.1 定格容量の違いによるリスクカーブの変化

イジリティと仮定した場合（図中では定格容量ごとに san1000A, san2000A, san3000A と表示）には、定格容量を 2000A から 3000A に増設するとリスクカーブにほとんど変化がみられないのに対し、1000A から 2000A に変更するとリスクカーブにかなり改善がみられる。一方、すべてのノードのフラジリティがメットカルフ変電所のフラジリティと仮定した場合（図中では定格容量ごとに met1000A, met2000A, met3000A と表示）には、定格容量を変化させてもリスクカーブにあまり変化がみられていない。この結果は、従来のように各電力施設の耐震裕度を向上させるという考え方以外に、送電線の定格容量を適度に増強しても供給信頼度を増すことが可能であることを示していると同時に、耐震性にすぐれ小規模な地震被害しか発生しない電力系統の場合には、定格容量を増しても供給信頼度を向上させるうえであまり効果のないことを示している。

上記の計算例は、リスクカーブが系統全体の供給信頼度を定量的に示し、地震時の設備計画、運用計画を検討するうえで必要な基礎データを提供できることを示している。

## 5. まとめ

本研究では、地震時の電力系統の信頼性を潮流調整の効果を考慮してより現実的に評価する手法を開発した。すなわち、最小供給支障電力を算定することを目的に、物理的な連結性と①系統周波数の異常、②電圧異常、③過負荷という異常潮流状態を評価し、潮流調整が最も効率的に行われた状態を模擬して、供給支障電力を算定できるアルゴリズムを構築した。この手法を小規模モデル（22ノード）に適用するとともに、米国メンフィス市の実際の電力系統を対象に被害想定を行った。これらの結果から以下のような結論が得られた。

(1) 地震時の異常潮流状態に対して3つのアデカンシー基準（①系統周波数、②電圧値、③線路最大電流値（定

格容量）を設けて電力系統の供給信頼度を評価することが可能な手法を開発した。

(2) 本手法によって、地震時の異常潮流状態を解消するために行われる潮流調整の効果を考慮して供給信頼度を評価することが可能である。

(3) リスクカーブを定義することにより電力系統の供給信頼度を向上させるような設備計画を検討するための定量的な基礎データを提供することを可能とした。

なお、本手法は、最適化計算手法として判定関数法を応用した方法を用いたがこの方法は、厳密な最適計算を行っているわけではない。これは、本論の目的が地震時の電力系統の供給信頼度を評価することであることを考え、厳密な最適解を求めるよりも電力潮流のオンライン制御用プログラムとして応用されているアルゴリズムを取り入れ、より現実的な評価を行うことを重要視したためである。

また、本手法は、健全な送電線はすべて利用することを前提として解析アルゴリズムを構築しているため、通常放射状に系統が構成され、使用していない送電線も多く含む日本の2次系統に適用することを検討していない。今後は、このような2次系統における適用性を検証し、本手法の適用範囲を拡張してゆくつもりである。

謝辞：本研究は、米国地震工学研究センター（NCEE R）との共同研究の成果に基づいてとりまとめられたものである。特に、プリンストン大学の篠塚教授には多くのデータ提供を受けた。ここに感謝の意を表す。

## 付 録

### a) 潮流計算基本式の誘導

通常、潮流計算を行うための基本方程式は、送電線とその両端に接続している母線（ $i$ 、 $j$ ）を基本とする  $\pi$  型モデルを用いて、式(A.1)(A.2)のように示される。

$$P_{ij} = b_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij} + g_{ij} (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (\text{A.1})$$

$$Q_{ij} = -g_{ij} V_i V_j \sin \theta_{ij} + b_{ij} (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) - \frac{1}{2} C_{ij} V_i^2 \quad (\text{A.2})$$

ここで、 $P_{ij}$  とは母線  $i$ 、 $j$  間の線路有効電力、 $b_{ij}$  は母線  $i$ 、 $j$  間の線路アドミタンスの虚数部（サセプタンス）、 $g_{ij}$  は、母線  $i$ 、 $j$  間の線路アドミタンスの実数部（コンダクタンス）、 $Q_{ij}$  は母線  $i$ 、 $j$  間の線路無効電力、 $\theta_{ij}$  ( $= \theta_i - \theta_j$ ) は母線  $i$ 、 $j$  間の電圧位相角の差、 $V_i$ 、 $V_j$  は、母線  $i$ 、 $j$  間の電圧値、 $C_{ij}$  は母線  $i$ 、 $j$  間の静電容量であるキャパシタンスをそれぞれ示す。

本論文で対象とする基幹系統の高圧送電系統を流れる電力潮流に関しては、各変数の値は、 $\theta_{ij} \approx 0.0$ ,  $V_i \approx V_j \approx 1.0$ ,  $C_{ij} = 0.0$ ,  $g_{ij} = 0.0$ と考えることができる<sup>9)</sup>。よって、 $V_i = 1.0 + \delta V_i$ ,  $V_j = 1.0 + \delta V_j$ ,  $\theta_{ij} = 0.0 + \delta \theta_{ij}$ とし、2次の微小項を無視すると式(A.1)(A.2)は、式(A.3)(A.4)のようになる。

$$P_{ij} = b_{ij}(\delta \theta_i - \delta \theta_j) \quad (\text{A. 3})$$

$$Q_{ij} = b_{ij}(\delta V_i - \delta V_j) \quad (\text{A. 4})$$

潮流計算の基本式である式(15)(16)は、式(A.3)(A.4)とキルヒホッフの保存則<sup>9)</sup>から導かれる。

#### b) 単位法

単位法とは、諸量を表すのにその基準値を1にとりこれに対する比で表す方法であり、その値は $P.U$  (*Per Unit*)値と呼ばれる。この手法により諸量の間のわずらわしい換算の手数を省くことができ、また機器の性能を直ちに知りうるという利点をもっている。本論で用いた $P.U$ 値の換算式を以下に示す。

$$V_{(PU)} = \frac{V}{V_s} \quad (\text{B. 1})$$

$$P(Q)_{(PU)} = \frac{P(Q)}{SMVA} \quad (\text{B. 2})$$

$$I_{(PU)} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_s \cdot I}{SMVA} \quad (\text{B. 3})$$

ここで、 $V_s$ は、定格電圧、 $SMVA$ は定格基準容量を示し、 $V_{(PU)}$ ,  $P(Q)_{(PU)}$ ,  $I_{(PU)}$ は、それぞれ電圧、有効電力(無効電力)、線路電流の $P.U$ 値を示す。

#### 参考文献

- 1) 片山幾夫, 佐藤正之, 福井史朗, 吉田郁政, 大橋良弘: 大都市電力送電網の大地震時危険管理系統の開発(その1), 東電設計技術研究誌, 1987年.
- 2) 片山幾夫, 佐藤正之, 福井史朗, 吉田郁政, 中瀬仁: 大都市電力送電網の大地震時危険管理系統の開発(その2), 東電設計技術研究誌, 1988年.
- 3) 片山幾夫, 佐藤正之, 福井史朗, 吉田郁政, 中瀬仁: 大都市電力送電網の大地震時危険管理系統の開発(その3), 東電設計技術研究誌, 1989年.
- 4) 当麻純一, 大友敬三, 岩橋敏広: 地震時における電力流通系統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年.
- 5) 栗原郁夫, 高橋一弘, 荒尾公一: 2次系統の供給信頼度評価系統の開発—基本論理の開発—, 電力中央研究所報告, 研究報告, T91032, 1992年.
- 6) 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年.
- 7) A.H.S.ANG, J.Pires, R.Schinzinger, R.Villaverde, I.Yoshida: Seismicreliability of electric power transmission systems-applications to the 1989 Loma Prieta Earthquake, *technical report, National Science Foundation (under Grant BCS-9011296) and National Center for Earthquake Engineering Research (Grant 90-30 10)*, Jan.1992.
- 8) Tomoaki Ando, Shigeru Noda, Masanori Hamada: Practical strategies for post-earthquake restoration ofelectric power systems, *9WCEE*, Vol. VII pp. 159-64, Aug. 1988.
- 9) 高橋一弘: 電力系統工学, 系統工学講座⑤, コロナ社, 1977年.
- 10) 児玉博明: 無効電力配分を最適化する初期潮流断面作成プログラムの開発, 電力中央研究所報告, 研究報告T91025, 1992年4月.
- 11) H.H.M.Hwang and C.H.S.Chen: SEISMIC HAZARD ALONG A CRUDE OIL PIPELINE IN THE EVENT OF AN 1811-1812 TYPE NEW MADRID EARTHQUAKE, *Technical Report NCEER-90-0006*, April, 1990.
- 12) H.H.M.Hwang, C.H.Chen and G.Yu: BEDROCK ACCELERATIONS IN MEMPHIS AREA DUE TO LARGE NEW MADRID EARTHQUAKES, *Technical Report NCEER-89-0029*, 1989.
- 13) H.H.WANG, C.S.LEE and K.W.Ng: SOIL EFFECTS ON EARTHQUAKE GROUND MOTIONS IN THE MEMPHIS AREA, *Technical Report NCEER-90-0029*, AUG, 1990.

(1994. 3. 11受付)

## A METHOD FOR SEISMIC RELIABILITY ANALYSIS OF ELECTRIC POWER PRIMARY SYSTEM

Yoshiharu SHUMUTA, Kiyoshi TAKENAKA, Naomi MOMONOI  
and Katsuhiko ISHIDA

We developed a method for estimating seismic supply reliability of electric power transmission system. At first, we proposed an algorithm for reliability analysis of power system by simulating electric power flow control after earthquake. Secondly, we showed this method is more effective than other existing methods using 22 node model of IEEE. Finally, we applied this method for Memphis electric power system in USA and showed it is effective for real construction planning of electric power facilities.