

# (138) 電力供給システムの震後復旧計画策定のための実用的な支援システムの開発

芙蓉情報センター 安藤知明 京都大学工学部 野田 茂  
 東海大学海洋学部 浜田政則 京都大学工学部 山田善一

## 1. まえがき

本研究の目的は、地震時における大規模電力システムの被害想定に対し、復旧人員・資材の地域的・時間的配分を考慮した電力システムの復旧過程のシミュレーションを行うために、実用的な支援システム（プログラム）を開発することである。これにより、地震直後に一時的に低下した電力需要の回復に伴って、供給側が系統復旧によってどの程度に必要電力を確保しうるか、また、復旧に際してはどのような戦略の下に復旧活動を進めることが効果的か、などの検討に有用な情報を提供することが可能となる。

## 2. 系統操作による復旧シミュレーション

### (1) 概要

電力設備が被災することにより、供給能力は大幅に低下し、その状態がある時間継続する。しかし、その後健全な送電線・変電所を使用して系統復旧操作を行うことにより、健全区間の供給力が急激に回復し、さらに被災した設備の修復が進むにつれ、全体の供給力が逐次回復していく。このことから、ここでは、電力供給システムの地震時における供給支障を算定し、あわせて系統切替操作および応急復旧による支障電力の回復をシミュレートする。そのため、復旧シミュレーションプログラムは、系統復旧操作部分と設備応急復旧部分に分けて開発した。

### (2) プログラムの全体像

系統操作による復旧シミュレーションプログラムは、地震直後の電力供給システムの機能損失すなわち供給支障電力を算定する部分と、系統操作をシミュレートして系統復旧操作後の各変電所の供給支障電力を算定する部分からなっている。系統操作による復旧シミュレーションの概略フローを図1に示す。本シミュレーションは、各変電所内の機器被害による系統の損傷と系統切替による出力回線の通電性（連結性）を判断し、配電能力の回復をシミュレートするプロセスより構成されている。これは、地震発生から数時間程度で行われる作業よりなり、一時的に開いた断路器などを閉じることによって回復可能な電力量を算定する。なお、機器の修復はこの時点では行わない。

### (3) 電力システムのネットワーク化

図2に電力システムのネットワーク化の概念図を示す。ここでは、発電所と変電所を1ノード、送電線2回線を1リンクで表し、電力システムを簡素化した。本シミュレーションでは、ネットワーク化された電力システムにおける各変電所間の連結性を「最短経路問題」として取り扱い、ノード間の距離（負荷）が有限であれば、その変電所間は連係されているものとした。また、図3に示すようなTブランチ送電線においては、 $L_1$ 、 $L_2$ と $L_3$ のリンクを同一の送電線と見なした。いずれかが被災した場合には、 $L_1$ 、 $L_2$ と $L_3$ を同時に停止する必要があるため、本研究ではTブランチ点に仮想ノードを設け、仮想ノードを停止する方法をとった。

### (4) 変電所のモデル化とネットワーク表現

電力供給システムの機能損失は地震発生直後に大幅に低下し、数時間後に急激に回復する。これは健全な設備を使用して系統復旧操作が行われることによるものである。このように系統復旧操作が復旧シミュレーションの精度に大きく影響するが、これを支配するのは変電所の機能回復である。従って、変電所をどのようにモデル化し、処理するか重要なポイントと言える。そこで、変電所のモデル化に当たっては基本的には母線をポイントとし、母線を連結する開閉装置をエレメントとしてグラフ表現し、このタイセットの連結性でもって、機能損失を算定した。

#### a) 配電用変電所のモデル化

配電用変電所は全変電所の大部分を占めており、標準的なスケルトンは図4(a)のようにになっている。このスケルトンをポイントとエレメントで表現すると、図4(b)のようになる。

#### b) 超高圧変電所のモデル化

超高圧変電所ではほとんどがダブル母線方式となっている。これを配電用変電所と同様にグラフ表現してモデル化すると、変電所のタイセットの計算には、ぼう大な記憶容量を必要とする。このため、図5に示すように、便宜的に変圧器を中心に変電所を上位系と下位系に分類し、連結性を判断させる方法をとった。このような方法を採用したことから、図2における電力システム全体

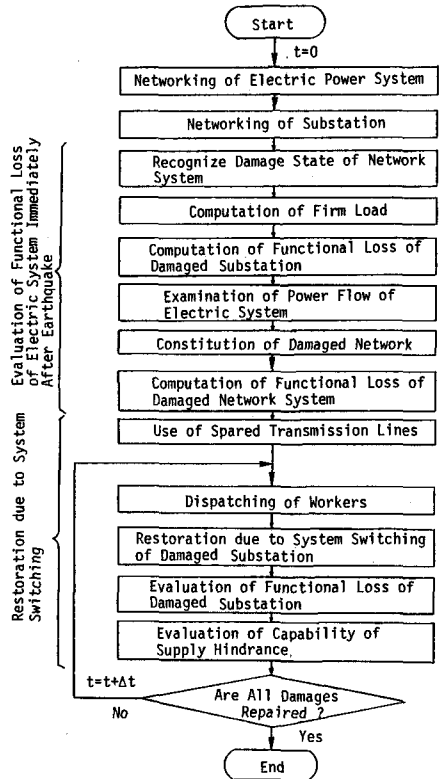


図1 系統操作による復旧シミュレーション

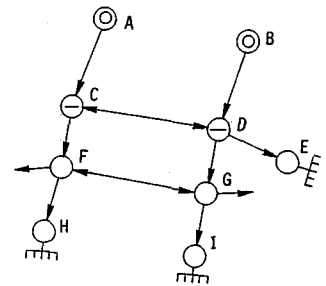


図2 電力システムのネットワーク化

のネットワークの中では、図6のように、2ノードとして取り扱った。

**c) 変電所の機能損失の評価**

変電所の機能損失を算定するために、被災機器が変電所モデルのポイントとエレメントのどれに該当するかをデータで与えた。これにより、対応するポイントとエレメントを不通処理することができる。また、変電所における系統復旧操作による機能回復は、操作により生きるポイントとエレメントおよび復旧時間をデータで与えることにより算定することができる。このため、変電所の機能損失を評価するためのデータ表を作成した。この表から、地震直後に停止するポイントとエレメントを処理して、図7(a)に示すように変電所内のネットワークを構成し、生きているポイントとエレメントを判断して供給している電力を算定した。さらに、変電所の復旧操作により生きるポイントとエレメントを表から読み取り、復旧操作後の変電所内のネットワークを図7(b)のように構成し、機能損失を同様に算定した。

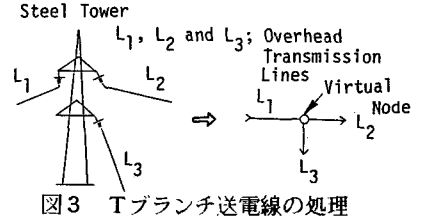


図3 Tブランチ送電線の処理

**(5) 供給支障電力の算定**

供給支障電力の算定には生きている変電所を対象とした。そして、各変電所が供給している電力を合計し、発災前の平常負荷から差し引いて供給支障電力を算定した。負荷は77KV, 22KV, 6KVに大別でき、図8に示すような変電所において、次の方法で計算した。6KV, 22KVの供給支障電力  $M_{06}, M_{22}$  は次式により求められる。

$$M = \bar{M} (m + n - m \cdot n / l) / l$$

ただし、 $\bar{M}$  ( $\bar{M}_{06}, \bar{M}_{22}$ ) は平常時負荷 (MW),  $l$  ( $l_{06}, l_{22}$ ) は総引出し回線数 (本)、 $m$  ( $m_{06}, m_{22}$ ) は停止引出し回線数 (本)、 $n$  ( $n_{06}, n_{22}$ ) は停電配電線数 (本) とした。なお、 $n_{06}$  は  $\max$  (地中事故数、架空事故数) とした。77KV負荷の供給支障電力  $M_{77}$  は次式により計算した。

$$M_{77} = \bar{M}_{77} \cdot m_{77} / l_{77}$$

ただし、 $\bar{M}_{77}$  は77KV平常時負荷 (MW),  $l_{77}$  は77KV総引出し回線数 (本)、 $m_{77}$  は77KV停電送電線数 (本) である。

**(6) 復旧作業**

系統復旧作業としては、故障機器により、要員が現地へ移動して切り離しを行う場合と、制御所からの遠隔操作で行う場合の2通りを考えた。判断としては、1つでも要員移動を必要とする機器に被害があれば、作業員は移動作業を行うとした。作業時間は各変電所に入力データとして与え、被害個数・種類による変化は考慮しなかった。本研究では、各変電所の状況と送電設備の被害状況から、送電系統の確認を行い、解析対象地域の供給可能電力を算定した。さらに、系統復旧操作に伴う要員の要否、人員数・作業・移動工程をシミュレートしつつ、供給可能電力の回復過程を評価した。

**3. 設備応急復旧シミュレーション**

**(1) 概要**

設備応急復旧による復旧シミュレーションプログラムは、復旧方針に基づき、変電所、送電線と配電線の復旧順位付けを行う部分と、復旧人員の参集や復旧資材の入荷状況に応じて復旧活動を行った際の時間経過に伴う供給電力の回復状況を算定する部分からなっている。設備応急復旧によるシミュレーションプログラムの概略フローは図9のようになる。

**(2) プログラムの全体像**

本シミュレーションでは、復旧人員の参集や復旧資材の入荷状況などの外的条件ならびに復旧機会優先度・工程の順序などの内的条件のもとで復旧活動を行った場合に、復旧時間の経過に伴う系統復旧操作後の各変電所内機器・停止配電線・送電設備の修復過程や供給電力 (あるいは供給支障電力) の回復状況を時々刻々算定し、復旧にどの程度の時間を要するか、また復旧にかかる工数はどの程度かなどを推算した。具体的には、1) 復旧工数の算定、2) 復旧順位の決定 (戦略1~4)、3) 変電所の復旧、4) 送電設備の復旧、5) 停電配電線の復旧、6) 3)~5) に伴う人員・資材の配分コントロール、7) 回復供給電力の算定、8) 復旧工数累計・使用資材量などの集計に関する処理を実施した。なお、復旧工数は、変電所・配電エリア・送電線ごとに、復旧工数原単位データを参照して、被害機器に対して計算した。

**(3) 復旧戦略**

本プログラムでは、4つの復旧戦略が用意され、いずれかの戦略を選択することによって復旧過程をシミュレートできるように設計されている。各戦略には、変電所 S/S の復旧とそれに伴う送電線の復旧に順位付けをしている。基本的には、S/Sや配電エリアの仮順位付け→送電ルートの決定→容量チェック→上位より送電線の順位付け→上位より S/S の順位付け直しを反復操作している。ここでは、

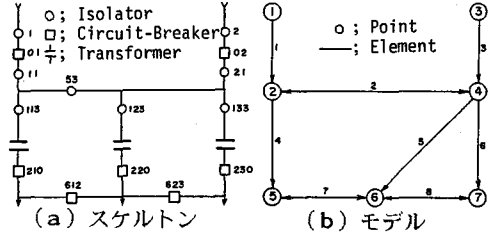
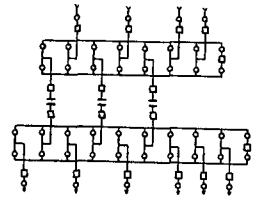
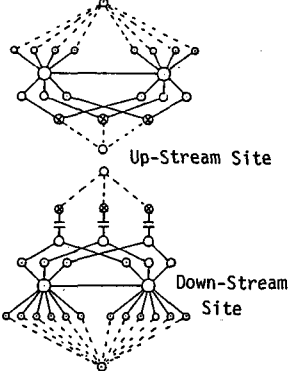


図4 配電用変電所のモデル化

o; Isolator  
□; Circuit-Breaker  
≡; Transformer



(a) スケルトン



(b) モデル

図5 超高压変電所のモデル化

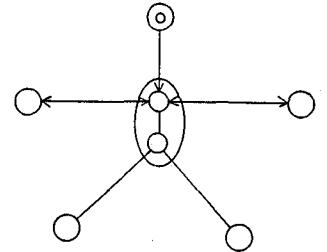


図6 ネットワーク中の超高压変電所の表現

3つの復旧戦略を下記に示す。

a) 戦略A：回復電力の最大を指向した戦略 S/Sの供給支障は、配電エリアの事故とS/S内の機器事故による健全引出しブスの減少、送電ルート事故によってS/Sに電気がこないという3種の要因により決定される。従って、支障負荷をS/S側責任 $M_s$ と配電側の責任 $M_H$ に分けて、供給支障の大きなところから復旧を行い、電力の速かな立上りを目指すのがこの戦略の特徴である。 $M_s$ と $M_H$ はそれぞれの引出し停止数で分配して計算する。そして、それぞれの負荷としては、1) S/Sが負荷を持っているか 2) 持っていないかにより、また1)でも、3) S/Sに通電しているか 4) 送電ルートの事故によりS/Sに通電していないかによって、 $O$ 、 $M_s$ 、 $M_H$ 、常時負荷 ( $M_{06} + M_{22} + M_{77}$ ) または常時潮流による負荷を採用する。

b) 戦略B：上位系統から下位系統へ復旧する戦略 入力データで与えられたS/Sの供給側の電圧を比較し、電圧の高いS/S(上位系統)から優先的に復旧していく。

c) 戦略C：復旧の容易なS/Sから復旧する戦略 S/Sに通電させるための復旧時間の最も短いルートから復旧していく方法をとる、被害様相により復旧順位が変わる。送電ルートは常時ルートを採用するため、容量チェックは行わない。戦略Cでは、復旧の容易な所、すなわち、復旧工数が少なくて済む所から先に修復し、早く広範に電力が行きわたるように指向する。

(4) 復旧プロセス

復旧プロセスとしては、変電所、送電設備と配電線ごとに、復旧人員・応援人員・復旧資材・移動(行き)・作業の開始・休憩・作業の完了・帰りの移動からなる復旧工程と条件を綿密に設定し、シミュレーションを実施する。図10は復旧に伴う人員・資材の流れを、図11は復旧工程の進行状況のパターン例を示す。

4. 数値計算の一例

検討用地震により想定した電力供給システムの想定被害(確定事故相)をモデルにあてはめ、復旧人員、資材関係、負荷状況、系統運用方式などの入力データに基づいて、機能

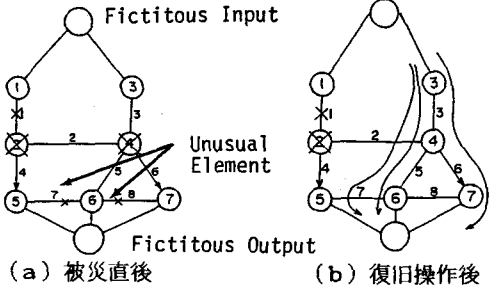


図7 変電所内ネットワーク

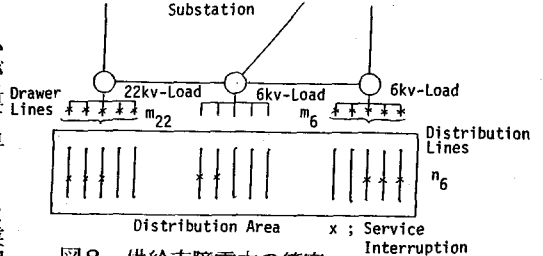


図8 供給支障電力の算定

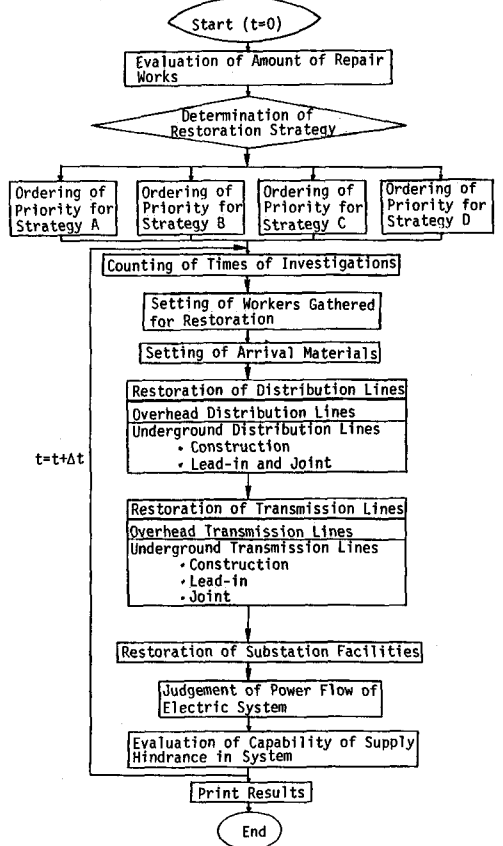


図9 設備応急復旧によるシミュレーション

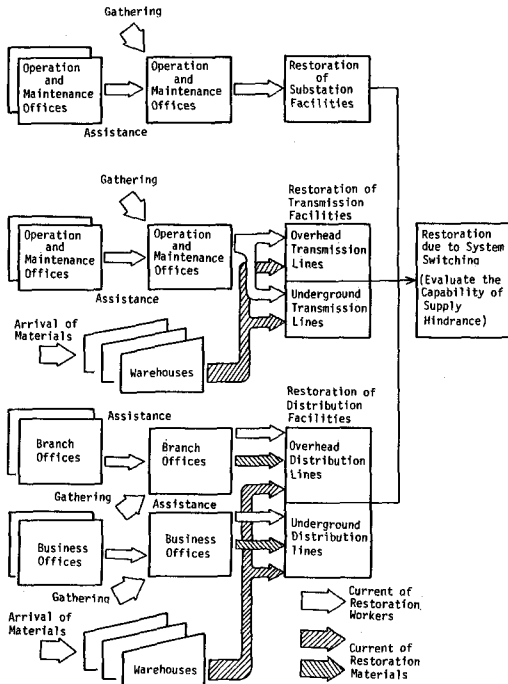


図10 復旧に伴う人員・資材の流れ

損失、復旧の予測・ケーススタディ解析を行った。

図12は、ある電力供給システムF12に対して地震を設定し、夏の平日昼間、自所優先による人員投入と本務集合による人員確保などの条件下で、系統復旧シミュレーションを行った結果である。地震発生から主要動が2〜3分継続し、5分後から操作を開始するとして、系統操作による復旧は15分後から立ち上がり始めるとした。図中、破線は需要量を、実線は供給力を示す。地震直前負荷が11,770MWであるF12のシステムは、発災直後に10,217MWに需要が落ち、供給力は7,389MWである。しかし、1時間10分後に復旧操作が完了し、2次災害などでさらに落ち込んだ需要10,180MWに対して、685MWの供給力が救済されている。なお、44変電所に対し、出勤時間は平均的に23分（標準偏差15分）を要した。

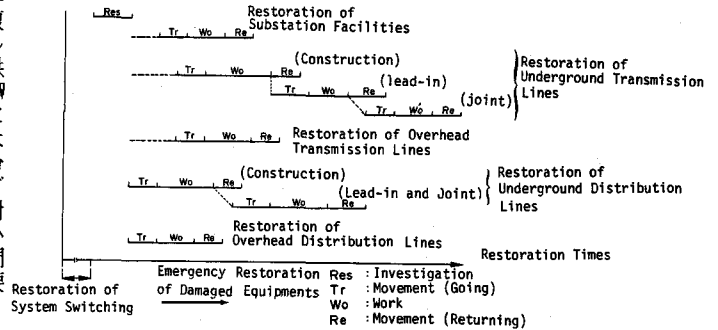


図11 復旧工程のパターン例

F12の電力供給システムについて、設備応急復旧の状況（復旧戦略A）を示したのが図13である。図の上から、システム全体および重要度ランクⅠ〜Ⅳ（重要な負荷を多く持つS/Sごとに分類した）ごとに求めた需要（破線）と供給力（実線）を示した。さらに、変電、架空送電、地中送電、架空配電と地中配電の各設備ごとに復旧工数比を示した。なお、ビル・木造の大破や焼失エリアなどは応急復旧の対象としなかった。図中（a）は現行の資材と復旧方法による結果、（b）は不足資材量を保有し、地中送電配電で効果的な復旧方法をとった場合である。例えば、地中送電設備では、2回線本のケーブルに被害が生じたときには無被害の線代替で、変電所の中で作業ができるときには土木作業が必要でないで、工程が短縮できる。現行の復旧方法では特に地中線がネックとなっていたが、効果的な復旧対策を施すことにより、地中送電設備は34日から6日で、地中配電では24日から13日で完全復旧をしている。復旧の進展に伴い、電力系統はネットワーク的な連結・機能特性を発揮してくるが、その状況は各設備の復旧に応じている。

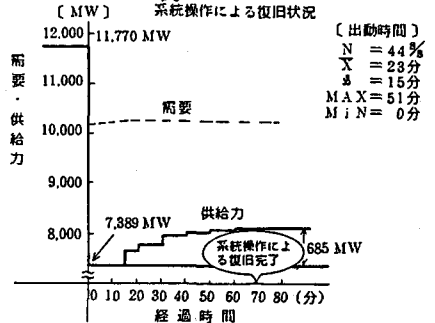
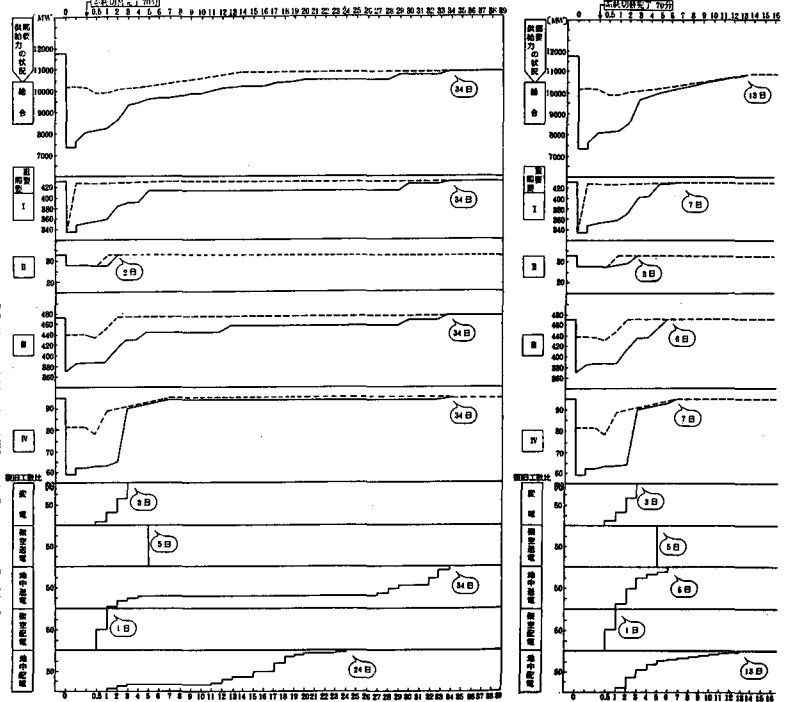


図12 系統操作による復旧状況例

5. あとがき

本プログラムは一万数千ステップよりなっている。そこでは、電力系統の被害状態や復旧の過程をできるだけ現実的にするため、変電所間のネットワークをほぼ実際に近い形で組上げるように配慮した。また、個々の変電所の機能については、より実際に近いものにするため、変電所内の系統をネットワーク化し、機器の被害による配電能力の低下と修復による回復過程を詳細に扱えるようにした。さらに、復旧に伴う各所轄の作業区分、人員の参集、倉庫への入荷、復旧資材の種類、被害対象による復旧工程の相異なる周辺の状況についても、さまざまな条件設定が可能となるように配慮した。

最後に、貴重な御助言を頂きました（財）地震予知総合研究振興会の委員会（委員長・久保慶三郎東京大学名誉教授）の委員各位に深甚なる謝意を表します。



(a) 現行の復旧状態 (b) 効果的な復旧方法の採用

図13 供給力と需要の回復状況（復旧戦略A）