

# 電力系統操作の自動化に関する研究

平成 7 年 6 月

永 田 武

## 緒 言

近年における産業の発展と国民生活の向上から、電力需要は増大の一途を辿っている。このような電力需要の堅調な増大に伴って、電力システムはますます大規模化・複雑化の様相を呈している。それと共に、電気エネルギーに依存する割合が一層大きくなり、高品質な電力の供給に対する社会的要請は極めて高い。このような状況下において、需要家へ高品質で安定な電力を供給し続け、かつ経済的に電力システムを計画・運用するためには、合理的な電力システムの設備計画と運用計画が必要である。そのような電力システムの計画・運用業務には計算機による自動化が不可欠になっている。

電力システムの計画・運用の中で「系統操作」に関連する部分は、日常実施されている「平常時操作」と、事故等による停電システムの復旧のために実施される「事故時操作」に分類されるが、いずれも安全かつ的確に実施されなければならない。平常時操作は、電力システムの円滑な運用のために日常行われている操作である。すなわち、電力システムを構成する設備・機器を保守や点検作業のために停止したり、停止したものをその後使用する操作である。このような操作は、給電所と制御所、発変電所などが連絡をとりながら安全かつ的確に実施されなければならない。一方、電力システムに事故が発生すると高速な自動保護装置がまず働いて事故点が除去されるが、一般には事故による停電部分が残ることになる。この事故後の系統状態に対し、適切な事故操作を行ってなるべく停電範囲の少ない系統構成へと迅速に復旧させていく必要がある。

このような系統操作には、円滑な運用のために系統運用計算機による自動化が積極的に行われている。特に、最近の系統操作はその多様な要求のために系統運用計算機のアプリケーションソフトの中で最大の規模（60%以上）を占めるようになってきている。従って、この「系統操作」のアプリケーションソフトを作成する上でいかに信頼性と拡張性も有しながら要求される多様な機能を実現していくかが重要な課題となっている。

この論文は、電力システムにおける系統操作に関して、特に、多様な要求を実現するための知的なシステムの構築方法について述べたものである。本論文は、電力システムの「平常時操作」と「事故時操作」のそれぞれに対して

- 平常時操作への論理生成方式の適用検討と開発・評価
- 平常時操作への知識ベース方式の適用検討と開発・評価



○事故時操作への組合せ最適化方式の適用検討と開発・評価

○事故時操作への知識ベースと数理計画法の融合方式の適用検討と開発・評価

について示している。

第1章においては、研究の背景ならびに研究の目的とその方針について示した。

第2章においては、平常時操作に関してヒューリスティックな方法である論理生成方式について述べ、その基本的考え方を示すと同時に、それに基づいたソフトウェアの構成法について述べた。本手法によるソフトウェアは、系統運用計算機に対して初めて知的な動作をさせることに成功したものである。このプロジェクトは、電力会社（東京電力）と主要重電機メーカー3社（東芝・日立・三菱）との共同研究により7年間の歳月を費やして昭和62年（1987年）に完成されたものである。著者は、このプロジェクトに最初から最後まで参加する機会を得ることができ、論理生成による平常時操作の実現方法にさまざまな提案を行った。また、本手法によるソフトウェアは実際に系統運用計算機に搭載され現在稼働しているものであり、それ以後の平常時操作の研究の基本となっているものである。

第3章においては、知識ベース処理による平常時操作システムの構築方法について述べた。また、系統操作に関する深い知識を用いて、知識ベース処理の弱点とされている不良知識の検出のための動的検証の枠組みも検討した。提案した方式は、制御所の制御卓に見立てて連携した2台のパーソナルコンピュータ上にインプリメントし、その操作性も含めて評価し、このようなオフライン的な業務においてはパーソナルコンピュータでもかなりの部分がカバーできることを指摘した。

第4章においては、事故時操作における重要問題である復旧目標系統（復旧の目標となる解）を求める問題に対し、線形計画法を適用して極めて高速に解を得る方法を提案した。事故時操作は停電した需要家を出来るだけ迅速に復旧しなければならない。この目標のために、事故復旧問題は復旧に要する時間と停電負荷の最小化問題とし定式化しなければならないが、一般に目的関数として復旧に要する時間の最小化を直接表すことは困難である。そこで、本章では復旧優先度に対応する新しい“復旧操作コスト”という概念を導入し、熟練運用者の持っている復旧戦略をこのコストで表現することにより、熟練運用者の考えるものと同様な結果が得られることを示した。すなわち、復旧に要する時間の最小化を“復旧操作コスト”を最小化する問題として解いている。

第5章においては、電力系統の事故復旧問題を、復旧目標系統を構成するブランチの採否および復旧対象負荷の採否を0-1変数に割当て、また各種の運用制約は連続変数により表す0-1混合整数計画問題として定式化し、分枝限定法により解く方法を提案した。この方法は、目的関数として停電負荷の最小化

だけでなく運用者の持っている復旧戦略との相異の最小化も目的としているため、従来の運用法に馴染まない目標系統が構成されるという問題点を解決することができる実用化に近づいた方法である。

第6章においては、事故時操作を実施する上で必要になる復旧操作手順の自動合成まで含んだ実用システムを構築するために、知識ベースと数理計画法を融合した方式を提案した。数理計画法での処理を高速化するために、原問題を知識ベース処理で部分問題に分解して解く方法を示した。この結果、部分問題に分解しない場合に比べて30%の処理時間にまで高速化できた。さらに、従来の知識ベースに格納していた知識の約2/3を数理計画法的方法に移しかえることができたために、その開発と維持のためのコスト削減の効果も期待できるという実用面からも望ましいシステム構成になっている。

第7章においては、各章の主要な結果を要約し、今後の課題を整理して結論とした。

# 論文目次

## 緒言

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3
1.3 本論文の研究概要	4
1.3.1 論理生成方式による平常時操作手順の決定法に関する概況	4
1.3.2 知識ベースによる平常時操作手順の決定法に関する概況	5
1.3.3 線形計画法の適用による復旧目標システムの決定法に関する概況	5
1.3.4 混合整数計画法の適用による復旧目標システムの決定法に関する概況	5
1.3.5 知識ベースと数理計画法の融合による復旧手順の決定法に関する概況	6
第2章 論理生成方式による平常時操作手順の決定	7
2.1 概説	7
2.1.1 平常時操作の自動化に関する概況	7
2.1.2 提案手法の概況	8
2.2 論理生成方式	9
2.2.1 論理生成方式の基本的考え方	9
2.2.2 論理生成方式の生成規則	12
2.3 実現方法	13
2.3.1 論理生成方式の処理の流れ	13
2.3.2 電力系統の実現方法	16
2.3.3 論理生成方式の基本機能	17
2.4 実系統への適用例	19
2.5 結言	23



第3章	知識ベース方式による平常時操作手順の決定	24
3.1	概説	24
3.1.1	平常時操作への知識ベース方式の適用に関する概況	25
3.1.2	提案手法の概況	25
3.2	知識ベース処理の実現方法	26
3.2.1	平常時操作の基本知識	26
3.2.2	知識ベース方式の処理の流れ	27
3.2.3	動的検証用知識	29
3.2.4	操作順序の決定	31
3.2.5	指令用語の決定	32
3.2.6	個別機器操作への展開方法の決定	33
3.3	システム構成	34
3.3.1	システム構成	34
3.3.2	知識表現	35
3.4	適用例	38
3.4.1	ケース1（単一の停止件名）	38
3.4.2	ケース2（複数の停止件名）	41
3.5	結言	44
第4章	線形計画法の適用による復旧目標系統の決定	45
4.1	概説	45
4.1.1	事故時操作の自動化に関する概況	47
4.1.2	提案手法の概況	47
4.2	事故復旧問題の定式化	48
4.2.1	基本的考え方	48
4.2.2	最小費用流問題としての定式化	48
4.3	実現方法	53
4.3.1	処理の流れ	53
4.3.2	効率的な計算方法	55
4.3.3	復旧操作コスト	62



4.4	適用例	64
4.4.1	ケーススタディの条件	64
4.4.2	ケーススタディの結果と考察	66
4.5	結 言	70
<b>第5章</b>	<b>混合整数計画法の適用による復旧目標系統の決定</b>	<b>72</b>
5.1	概 説	72
5.1.1	数理計画的方式による復旧目標系統決定に関する概況	72
5.1.2	提案手法の概況	73
5.2	事故復旧問題の定式化	73
5.2.1	基本的考え方	73
5.2.2	混合整数問題としての定式化	74
5.2.3	簡単な系統での提案方式の説明	76
5.3	実現方法	79
5.3.1	処理の流れ	79
5.3.2	高速化手法	82
5.4	適用例	82
5.4.1	ケーススタディの条件	82
5.4.2	ケーススタディの結果と考察	84
5.4.3	事故復旧システムへの適用方針	88
5.5	結 言	88
<b>第6章</b>	<b>知識ベースと数理計画法の融合による復旧手順の決定</b>	<b>89</b>
6.1	概 説	89
6.1.1	知識ベース処理による事故復旧システムに関する概況	89
6.1.2	提案手法の概況	90
6.2	復旧目標系統の決定	91
6.2.1	復旧目標系統決定問題の定式化	91
6.2.2	知識ベースによる高速化	93
6.3	知識ベースによる復旧操作手順作成	99

6.4	実現方法	100
6.4.1	処理の流れ	100
6.5	適用例	101
6.5.1	ケーススタディの条件	101
6.5.2	ケーススタディの結果と考察	102
6.6	結 言	109
第7章	結 言	110
	謝 辞	113
	参考文献	114
	付 録	118
A	電力系統操作関連用語	118
B	平常時操作指令手順作成知識	123
C	事故復旧用モデルシステムと入力データ	129
	研究業績	136

# 第1章 序 論

本章では、本論文の研究の背景と研究目的について述べ、本研究の位置付けを明確にした後、本研究の概要について述べる。

## 1.1 研究の背景

近年における産業の発展と国民生活の向上から、電力需要は増大の一途を辿っている。このような電力需要の堅調な増大に伴って、電力システムはますます大規模化・複雑化の様相を呈している。さらに、近年社会全般として電気エネルギーに依存する割合が一層大きくなり、高品質な電力の供給に対する環境的・社会的要請も複雑かつ高度化している。このような状況下において、需要家へ高品質で安定な電力を供給し続け、かつ経済的に電力システムを計画・運用するためには、合理的な電力システムの設備計画と運用計画が必要である。そのような電力システムの計画・運用業務には計算機による自動化が不可欠になっている。

わが国のシステム運用への計算機の本格的な適用の歴史は比較的新しく、約20年前の昭和50年代に導入されたのが最初である。各電力会社における給電所の役割や位置付けが若干異なっているが、システム運用計算機の機能は、概略表1.1に示すように整理される<sup>(7)</sup>。これらの中で「需給制御や系統制御」、さらに「運用計画」に関連する領域については従来より非常に多くの研究がなされてきている。これに引き換え、「系統操作」と「記録」の分野においてはシステム運用業務の中で非常に重要な機能にもかかわらず、これまでに多くの研究者達の興味が集まらなかったと言っても過言ではなからう。しかし、昭和50年代後半にAI技術の電力への適用例として「系統操作」が扱われたのを契機に、新しい問題領域の一部としての「系統操作」もようやく注目を集めるようになってきた。また、「系統操作」は現在のシステム運用計算機のアプリケーションソフトの中において、その占める割合が各機能の中で一番大きく全体の60%以上を占めるまでになっており、その取り扱い是非常に難しくなっているのが実状である。



表 1.1 系統運用計算機の機能<sup>(7)</sup>

項 目	内 容
監 視	現在の系統状態を表示するとともに、状態変化発生時、事故時には、運用者に把握しやすい形に加工処理して表示する。
需 給 制 御 系 統 制 御	発電力・周波数制御，電圧・無効電力制御，系統制御を，コンピュータシステムを通じて自動的あるいは手動によりオンラインで実施する。
系 統 操 作	予定作業・系統変更を実施するための操作手順表を，マンマシン対応的または自動的に作成する。 また，事故時および緊急時の操作手順表も同様に生成する。
記 録	系統運用関係の諸記録を自動的に記録，保存，編集，印字する。
運 用 計 算	経済的な発電機運転計画作成のための需給計画計算，系統特性把握のための潮流計算，系統保護運用のためのリレー整定計算および水系の効率運用のための水系運用計算をオンラインで処理する。

(注：文献(7)を一部修正)

電力系統の計画ならびに運用に当たっては、表 1.1 に示す項目を迅速かつ的確に実施しなければならない<sup>(7)</sup>。これらの諸課題のうち、本研究は系統運用計算機のアプリケーションソフトの中で最大規模である「系統操作」の自動化における基礎的な課題を取り上げたものである。本論文は、主として以下の 4 つの部分から構成されている。

- 「平常時操作」への論理生成方式の適用検討と開発・評価
- 「平常時操作」への知識ベース方式の適用検討と開発・評価
- 「事故時操作」への組合せ最適化方式の適用検討と開発・評価
- 「事故時操作」への知識ベースと数理計画法の融合方式の適用検討と開発・評価

本論文は、系統運用計算機による「系統操作」の中で「平常時操作」と「事故時操作」について、従来の運用者の手動方式に代わり、知的な自動化システムとして実現するための方式を検討して得られた成果をまとめたものである。



## 1.2 研究の目的

電力系統の運用状態は、図 1.1 に示すように“平常状態”，“緊急状態”，および“復旧状態”に大別される。これらの状態のある状態から別の状態へ移行させるために実施される操作に「緊急操作」と「復旧操作」がある。また、状態は移行しないが毎日のように実施されている「平常時操作」がある。以下、各運用状態と関連する操作について概説する。

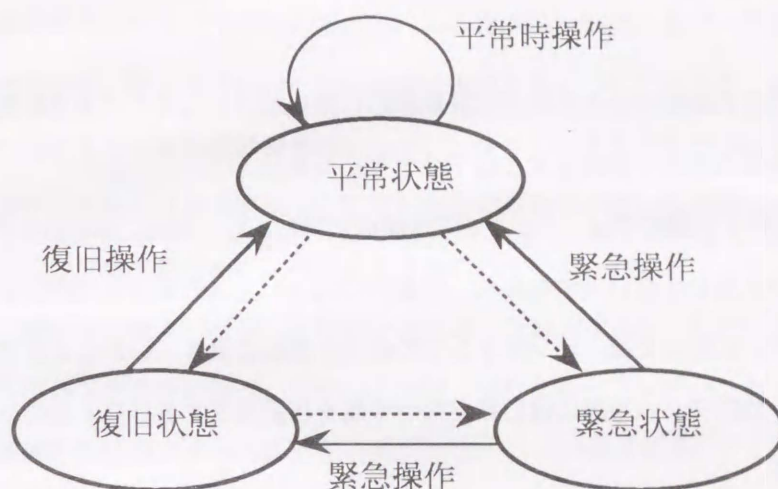


図 1.1 電力系統の状態と系統操作

### (1) 平常状態

負荷供給、周波数、電圧、潮流などが適性に維持されている状態で、系統に多少の擾乱があっても電力の安定供給が可能な状態である。電力系統を構成する設備や機器は、保守作業のための作業停電操作や運用上の理由で停止したり、停止したものをその後使用したりすることが日常実施されている。これらの系統操作を総称して「平常時操作」と呼んでいる。このような「平常時操作」が実施されたとしても、運用状態は“平常状態”を維持しなければならない。近年の電力系統の大規模化・複雑化のために、このような「平常時操作」を運用者のみの判断で安全かつ的確に実施することは非常に困難になってきている。

### (2) 緊急状態

なんらかの原因で発生した事故または異常事態により系統が不安全になり、そのまま放置しておく事故が波及し送電線トリップ、電源・負荷の脱落等がカスケード的に発生して、系統崩壊となり大規模停電に進展する恐れのある状態である。この状態においては、事故または異常事態の拡大波及を急いで抑制し、

可能な限り供給支障を少なくする必要がある。従って、この場合は“平常状態”，または“復旧状態”に移行させる操作が必要となる。このような操作を「緊急操作」と呼ぶ。

### (3) 復旧状態

この状態は、「緊急操作」などのためにシステムが一応安全化しているものの、システムの一部に供給支障、発電支障、送電停止などを残している状態である。このとき、停電を速やかに解消するための操作が必要になるが、これを「復旧操作」という。この「復旧操作」の自動化は、高品質の電力供給に対する社会的要請の高度化に対応して、近年のシステム運用計算機に装備すべき主要な機能として重要な開発テーマになっている。

本論文では、これらの操作中からシステム運用計算機の自動化項目として、「平常時操作」と「復旧操作」を取り上げる。本論文の目的を要約すると以下のようなになる。

- (1) 「平常時操作」に関しては、いかなるシステム構成に対しても、知的に操作指令手順を自動合成でき、かつソフト量の少ない（すなわち、信頼性の高い）方式の確立を目的とする。
- (2) 「復旧操作」に関しては、オンラインでの使用を念頭に置き、いかなるシステム構成と運用状態に対しても、知的にかつ高速に復旧操作指令手順を自動合成するソフト量の少ない方式の確立を目的とする。

なお、「緊急操作」については、現段階の電力システムにおいては計算機による自動化項目ではなく現地の個別装置がその役割を担っているため除外する。

## 1.3 本論文の研究概要

本節では各章の主な結果を含めて本論文の概要を述べる。

### 1.3.1 論理生成方式による平常時操作手順の決定法に関する概況

第2章では、日常実施されている「平常時操作」に関してヒューリスティックな方法である論理生成方式について述べる<sup>(21)</sup>。まず、従来の方式の問題点を明らかにして平常時操作指令手順の自動合成の必要性を示し、「平常時操作」の基本的考え方を述べる。次に、その基本的考え方に従ってソフトウェアを構築する際に有用となるように電力システムを幾つかの設備グループに分類することを提案する。そして、運用者の運用ノウハウを知識モジュールとしてまとめ、その適用方法を「平常時操作」の基本的考え方に基づいて従来の手続き型言語で制御する構造を示す。また、操作手順の合成の際には「運用計算」で使用され



ているような電力システムのモデルとは異なった“論理設備”と“論理開閉器”がそのモデル化の際に有用な概念であることを示す。最後に、提案する方式を電力会社の系統運用計算機に導入し良好な結果が得られたことを示す。

### 1.3.2 知識ベースによる平常時操作手順の決定法に関する概況

第3章では、「平常時操作」に関して、知識ベースを用いた予定作業停止操作と運用停止操作の件名に対する停止側と使用側の操作指令手順の決定方法について示す<sup>(31)(33)(55)</sup>。まず、従来の知識ベースシステムの中で知識の不完全性という問題に着目し、ある種の深い知識に基づく知識の動的検証が有効な解決手段であることを示す。そしてその動的検証機構の実現方法について述べる。次に、合成された操作指令手順の妥当性を検証するための機器操作のシミュレーションの実現方法についても述べる。機器の開閉操作シミュレーションの際には論理開閉器を拡張した論理接続子の概念が重要であることを示す。最後に、これらの実現方法を評価するために、関係した2台のパーソナルコンピュータを用いたエキスパートシステムを開発し、モデル系統上で評価した結果を述べる。なお、本エキスパートシステムは、操作性の向上対策のために大画面スクロール機能、音声出力機能、マウスカーソルのコンピュータ間連続移動等も実現しており、完成度の高いシステムとなっている。

### 1.3.3 線形計画法の適用による復旧目標系統の決定法に関する概況

第4章では、「事故時操作」に関して線形計画法を適用する方法について述べる<sup>(42)(47)</sup>。まず、従来の「事故復旧操作」の方式を分類しその問題点を明らかにし、それらの解決方法の一つとして数理計画法的手法に着目し、事故復旧問題の定式化を示す。事故復旧操作は高速な処理が必要であることから、復旧対象系統に対する復旧戦略を考慮して、最小費用流問題として定式化できることを示す。すなわち、復旧戦略を復旧ルートの上のコストとして表現すれば、従来熟練運用者が実施していた復旧方法と同等な解が最小コストを実現するフローとして得られるのである。本方式は、ネットワークシンプレックス法に関連する方式であり、問題構造の特殊性のために非常に効率のよいアルゴリズムが構築できる。そして、実系統の事故例に本方式を適用した結果について示す。その結果から、通常の運転状態での事故に対しては極めて高速に解が得られることを示す。

### 1.3.4 混合整数計画法の適用による復旧目標系統の決定法に関する概況

第5章では、「事故時操作」を組合せ最適化問題としてとらえ、混合整数計画問題として定式化し解く

方法について述べる<sup>(49)</sup><sup>(53)</sup><sup>(54)</sup>。まず、第4章で提案した方式が対応できない重負荷に対する事故復旧問題を、厳密な解法である混合整数計画問題として定式化する。この場合には、開閉器の開閉と過負荷による負荷切り離しを0-1変数に割り当てる。そして、停電負荷および熟練運用者の復旧操作との相異の両方を最小化すべき目的関数として解く方法を示す。従来は、停電負荷の最小化あるいは操作回数最小化の単一目的での定式化のみであったので、実用に供される可能性はほとんどなかったものである。特に、熟練運用者の操作に近付けるために“復旧操作コスト”の概念を提案する。この新しい概念は、数理計画法で表現できる問題に対してエキスパートシステムで使用されるような専門家の知識を導入するために非常に有効であり、さまざまな問題への応用が期待できるものである。そして、実システムの事故例に本方式を適用した結果について述べる。その結果、あらゆるシステムの運転状態において“操作コスト”が効果的に機能し最適な解が得られることが判明したことを述べる。

### 1.3.5 知識ベースと数理計画法の融合による復旧手順の決定法に関する概況

第6章では、「事故時操作」を支援する計算機システムとして最も望ましいと考えられる“知識ベースと数理計画法を融合した方式”を提案する<sup>(59)</sup>。従来の事故復旧に対して提案されている方法は、知識ベースか数理計画法のいずれかを用いているためにそれぞれの欠点を本質的に有している。すなわち、知識ベース処理においては知識の不完全性とシステムの開発と維持のためのコストの増大がある。また、数理計画的処理においては最適解は得られるものの処理時間の長さがネックになる。従って、これら問題を解決するために両者を融合したシステムの提案を行なう。まず、復旧目標システムの決定は第5章で述べた混合整数計画法によっているが、処理時間の高速化のために知識ベース処理により原問題を幾つかの部分問題に分解する方法を示す。この部分問題への分解の手法は事故復旧特有の復旧戦略によるものであり、組合せ最適化問題における探索空間の縮小化に運用者のもつ復旧戦略を使用したものと考えらるべきことができる。部分問題に分解しない場合に比べて約30%の処理時間にまで高速化できる。さらに、従来知識ベースに格納されていた知識の約2/3を数理計画的処理に移し替えることができたため、その開発と維持のためのコストは大幅に抑制できることが予想されるようになった。次に、復旧操作指令手順の作成は第3章で示したような知識ベース処理により実現する。最後に、非常に大規模なモデルシステムに対して本方式を適用した結果について述べる。その結果、妥当な復旧操作指令を高速に合成できることが判明したことを述べる。



## 第2章 論理生成方式による平常時操作手順の決定

本章では、「平常時操作」に関して、系統運用計算機に対して初めて知的な動作をさせることを指向した「論理生成方式」について述べる。プログラムによる知的な問題解決を目指した計算制御論理あるいは論理生成と呼ばれる方式は、かなり古くから検討されているものであるが、昭和45年（1970年）に鈴木ら<sup>(1)</sup>により提案された論文がその最初のものであろう。その後、昭和55年（1980年）から電力会社（東京電力）と主要重電メーカ（東芝、日立、三菱）との共同研究として開始された“設備総合自動化計画プロジェクト”の重点項目として論理生成による平常時および事故時操作の自動生成が取り上げられ、詳細な検討が実施された。約5年間の検討に引き続いて約2年間を費やしてソフトウェアが開発され、昭和62年（1987年）に系統運用計算機上で我が国で最初の「論理生成方式」による平常時操作支援システムが稼働を開始した。現在も同一のソフトウェアが十数箇所の給電所で順調に稼働している。さらに、他の電力会社用に一部変更されたソフトウェアも実用システムに供されており、その数はかなりの数にのぼる。著者は、この“設備総合自動化計画プロジェクト”に最初から最後まで参加する機会を得ることができ、その論理生成を用いた平常および事故時の実現方法に関するさまざまな提案を行った。「平常時操作」の論理生成についてはその設計から開発の全てを行い、その成果を論文（21）としてまとめている。本章の内容はその論文に基づいたものである。

### 2.1 概説

#### 2.1.1 平常時操作の自動化に関する概況

一般に、電力系統は遮断器、断路器、変圧器、母線、調相設備などの変電設備と、送電線、開閉塔などの送電設備からなる。これらの設備は保守作業のため、あるいは電力系統の運用上のために停止したり、停止したものをその後使用する必要がある。これらの停止対象となる設備（以下、停止対象設備という）の停止および使用の操作は複数の手順ステップからなる操作指令手順により実施される。

この操作指令手順の作成は、「手動設定方式」、「ファイル方式」、「論理生成方式」、「知識ベース方式」の4つに大別される。まず第一の方法は、給電所等の運用者が系統の運転状態や安全性を考慮しな

がら 1 ステップずつ作成する方式である。しかし、大規模で複雑な系統構成に対応するには運用者の負担が大きくなりすぎている。「ファイル方式」は、あらかじめ主要設備に関する標準的な手順表を計算機に保存しておき必要に応じて呼び出し、一部修正の上再利用する方法である。しかし、系統構成の変更と同期して保存されている標準的な手順表も変更しなければならず、計算機システムのデータベースの管理を難しくしている。「論理生成方式」は、本章で述べる方式であり、運用者が実施している平常時操作の考え方をいくつかの処理単位として計算機の中に格納し、それらの組合せをある規則に従って行うようにしたものであり、計算機による操作指令手順の自動生成がほぼ可能になっている。「知識ベース方式」は、現在急速に広まっている方式で問題解決の手続きを汎用性をもつ推論機構と問題向きの知識に分離した手法であり優れた方式であるといえる。この方式については、第 3 章で詳しく述べる。

### 2.1.2 提案手法の概況

ここで述べる「論理生成方式」による操作指令手順の作成方式は、給電所に設置する自動給電システムに導入したものであり、電力系統設備の作業停止や運用停止などの平常時操作における実際の運用規則や運用経験から生じた考え方や方法の中から、幾つかの知識を抽出し、これを規則の形に表現し、これらの規則と実際に操作をする時点の電力系統設備の系統状態を比較することにより、停止操作指令手順と使用操作手順を決定する方式をとっている。このため、電力系統内のいかなる停止対象設備に対しても、操作を実施する時点の系統運用状態で最も適切と考えられる操作指令手順を自動的に作成できる方式である。系統構成が変更（設備の追加や削除）されてもプログラムの変更は一切不要であるという特長を有する。

従来、この種の自動生成論理は、供給信頼度向上という目標に向かって平常時・事故時における開閉操作をいかにするかの問題を扱うものが主流であり、過負荷を解消するために特定線路を母線間で切り換えることなどがこれに含まれている。しかし、本章で述べている電力系統の作業停止や運用停止といった平常時操作に対する自動作成論理はこれまで報告されていない。

本章で対象とする「平常時操作」は、地方供給系統すなわち一次変電所とそれらを連係する送電線、およびそれらの送電線から電力の供給を受ける配電用変電所や特別高圧需要家（以下、配変、特高と略記）から構成されている系統を対象とする。ここで「平常時操作」とは、系統構成、電圧、潮流などが的確に維持された状態での系統設備の保守のために行う「予定作業停止操作」や「運用停止操作」をいう。



## 2.2 論理生成方式

### 2.2.1 論理生成方式の基本的考え方

一般に、「平常時操作」を行う場合には、系統の安定供給を維持しながら安全に操作を実施する必要性から、下記のような考え方のもとで操作指令手順を作っている。

(C-1) 停電範囲を最小化する

(C-2) 停電時間を最短にする

(C-3) 操作の安全性を確保する

「論理生成方式」による操作指令手順を作成するためには、上述の(C-1)～(C-3)を制約条件として操作対象設備を停止し、さらに使用する適切なアルゴリズムを確立することが必要である。

「平常時操作」に着目すると、電力系統は以下のように表される。

$$G = \{G a, G b, G c, G d, G e, G f\} \quad (2.1)$$

ここで、

G : 給電所システムにより監視している電力系統設備の全体集合

G a : 停止対象系統を構成する設備の集合

G b : 停止により影響を受けない充電系統を構成する設備の集合

G c : 停止前に停止対象系統の操作をし、停電を回避できる系統の設備の集合

G d : 停止対象系統を停止したため一時的に停電するが、再課電操作(系統運用の用語では“加電”ではなく“課電”を用いている)により充電となる系統を構成する設備の集合

G e : 停止対象系統の停止のために従属的に停電が避けられない系統

G f : 停止操作前から停電していた系統

である。

従って、停止対象設備の停止後の状態においては、

$$\text{充電中系統} = \{G b, G c, G d\}$$

$$\text{停電中系統} = \{G a, G e, G f\}$$

である。

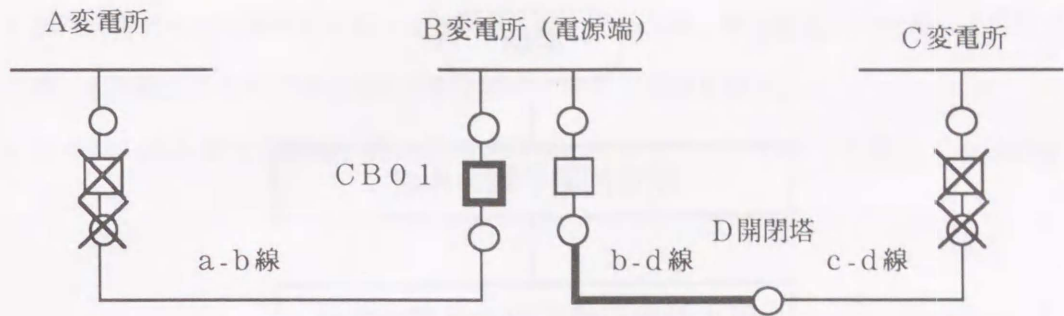
制約条件(C-1)は、G cおよびG dを最大にすることである。

$$\max \{G c, G d\} \quad (\text{充電中系統の最大化})$$

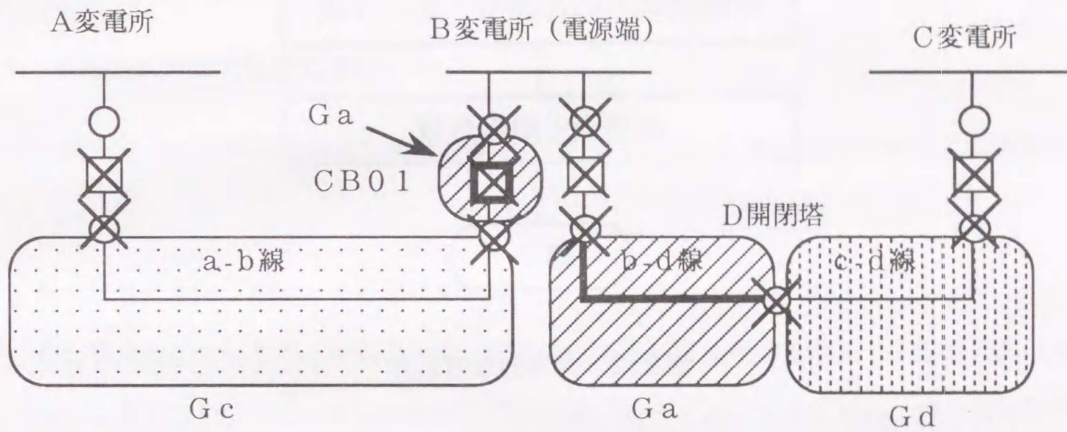
制約条件 (C-2) は, G a 操作指令手順作成時に充電時間を最小とするために, 特高が全停となるような操作順序を遅くすることで実現している。すなわち, 送電線に連係する特高の操作順位は二回線受電特高を優先し, 最後に一回線受電特高としている。一方, 制約条件 (C-3) は, 操作指令手順作成時に安全性を確保するために操作順序を適切に構成することである。

図 2.1 は, 「論理生成方式」の基本的な考え方を説明するための簡単なモデル系統である。(a) 図に示すように, 停止対象設備は B 変電所の遮断器 C B 0 1 と, B 変電所と D 開閉塔間の送電線 b-d 線とする (図中の太線で示す)。また, 各送電線は B 変電所側から課電されており, D 開閉塔の開閉器は無電圧操作開閉器であるとする。従って, D 開閉塔の開閉器の操作時には開閉器の両端が無電圧でなければならない。停止対象設備を停止すると, (b) 図に示すように網かけの部分 that 停電となる。この停電系統は停止対象系統 G a と, 停止前に A 変電所から a-b 線を課電することにより, 停電を回避できる系統 G c と, 停止対象設備を停止後 C 変電所から c-d 線を再課電することによる充電可能な系統 G d に分けられる。これらの操作を実施した後の系統を (c) 図に示す。同図は制約条件 (C-1), (C-2) を満たした結果となっている。一方, 制約条件 (C-3) を満たすために, 停止対象設備の送電線 b-d 線を停止する際には, 一旦, D 開閉塔の開閉器の両端が無電圧にしている。

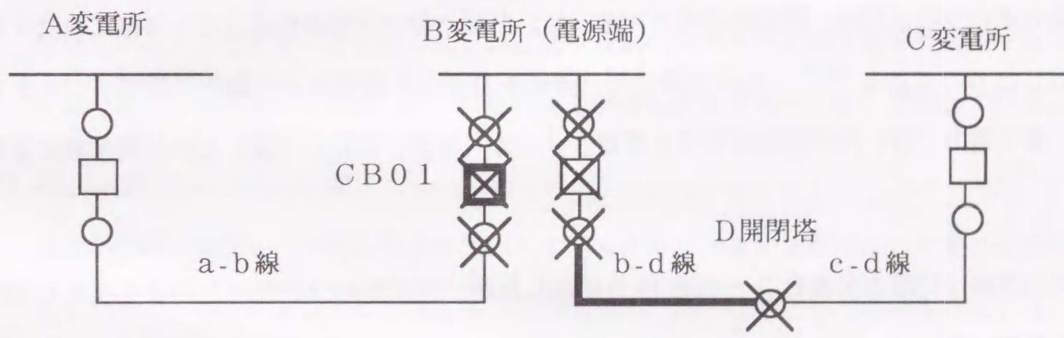




(a) 初期系統



(b) 停止設備切離し系統



(c) 停止操作実施後系統

停止対象設備 (図中の太線で示す)      □ : 遮断器 (閉)      ⊗ : 遮断器 (開)  
 B変電所 遮断器 CB01                      ○ : 断路器 (閉)      ⊗ : 断路器 (開)  
 送電線 (B変電所～D開閉塔)

図 2.1 モデル系統

図 2.2 は以上の考え方の適用順序を示した流れ図である。

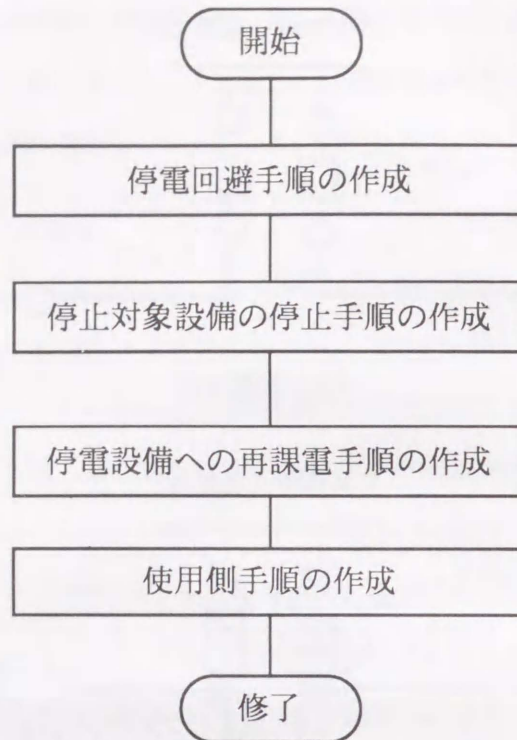


図 2.2 基本的な考え方

### 2.2.2 論理生成方式の生成規則

論理生成方式の生成規則は、熟練運用者が実施していた操作指令手順の作成方法を詳細に検討することにより抽出したものである<sup>(21)</sup>。この作業には、著者も従事した設備総合自動化計画プロジェクトの中において、東京電力（株）技術開発研究所と重電3メーカー（東芝、日立、三菱）との共同作業により行なわれた。

生成規則の詳細は付録の付表B.1～付表B.5に示したが、生成規則は概略以下のような考え方によってまとめられている。

- (1) 図2.2に示した停電回避手順の作成、停止対象設備の停止手順の作成、停電設備への再課電手順の作成、使用側手順の作成の各機能毎に適用する規則をグループ化する。
- (2) 各機能毎に、操作対象設備を特定する規則と操作開閉器を特定する規則を設ける。
- (3) 操作対象設備と操作開閉器が複数抽出された場合に、一つの設備や開閉器を選択するための規則を設ける。
- (4) 設備種別と開閉器種別に従って、運用上および安全面から必要となる操作指令手順を付加する規則を設ける。

- (5) 操作目的が予定作業停止あるいは運用停止操作の場合は、停止件名データをもとにして接地の着脱、連絡確認のための操作指令手順を自動作成する規則を設ける。
- (6) 使用側の操作指令手順は、停止側の逆順序となるような操作指令手順とする規則を設ける。

## 2.3 実現方法

### 2.3.1 論理生成方式の処理の流れ

「論理生成方式」の処理の具体的な流れを図2.3に示す。以下、図に従って本方式の実現方法を説明する。

#### (1) 停止件名グループ抽出と着目順位の決定

停止要求の出ている停止件名の中で、停止時刻あるいは使用時刻がある一定時間内（例えば、60分以内）に収まっているものを件名停止件名グループとしてまとめる。停止側時間でまとめられたグループを停止側グループ、使用側時間でまとめられたグループを使用側グループと呼ぶ。本方式では、時刻の早いグループを優先して処理を行う。このように複数の停止件名をその要求時刻でグループ化することによって、ほぼ同一時刻の作業をまとめた効率的な操作指令手順表を作ることができるようになる。以下の処理はこの停止件名グループ毎に着目して行う。

#### (2) 停止設備切離し系統の作成

着目中の停止側グループ内に含まれているすべての停止対象設備が停止した後の系統状態を検討するために、停止対象設備に接続している開閉器を“開”状態とした系統を作成する。このようにして得られた系統を停止設備切離し系統と呼ぶ。この系統上で充電設備判定を行い、充電設備の集合である充電設備グループと停電設備の集合である停電設備グループに分ける。さらに、停電設備グループを初期系統の状態と“開”状態とした開閉器の種別とにより、停止設備グループ、従属停止設備グループ、関連停電設備グループおよびその他停電設備グループに分類する。

この分類において、停止設備グループは停止対象設備の集合である。従属停止設備グループは、停止対象設備を停止するために、無電圧操作開閉器の操作を必要とするために従属して停止せざるを得ない設備の集合であり、関連停電設備グループは停止対象設備を停止した結果として停電した設備の集合である。その他停電設備グループは初期系統において既に停電していた設備の集



合である。

(3) 停電回避手順の作成

停止対象設備の停止に伴って停電する関連停電設備グループに対して、停止設備の停止に先立って、あらかじめ他の充電設備と併用する操作指令手順を作成する。

(4) 停止対象設備の停止手順の作成

停止設備グループ、従属停止設備グループ内の設備、および前記(3)で停電回避できなかった関連停電設備グループの設備を停止する操作指令手順を作成する。

(5) 停電設備への再課電手順の作成

停止対象設備の停止手順の作成で、停止した従属停止設備グループ内の設備を他の充電設備から課電する操作指令手順を作成する。

(6) 再課電設備の初期受電形態維持手順の作成

停止対象設備の停止操作に伴って受電停止した特高あるいは受電切換した配変は、前記(5)により、受電停止中の特高の受電操作および配変の受電切り戻し操作が可能となるので、そのような操作指令手順を作成する。

(7) 接地つける、作業開始などの手順の作成

「接地つける」および「作業開始」などの連絡確認のための操作指令手順を作成する。

(8) 接地はずす、作業終了などの手順の作成

「接地つける」、「作業開始」などの逆手順として「接地はずす」および「作業終了」などの連絡確認のための操作指令手順を作成する。

(9) 使用側手順の作成

使用側手順は、手順作成過程系統の状態では停止中となっている停止対象設備を初期系統の状態へ戻すための一連の操作指令手順を作成する。

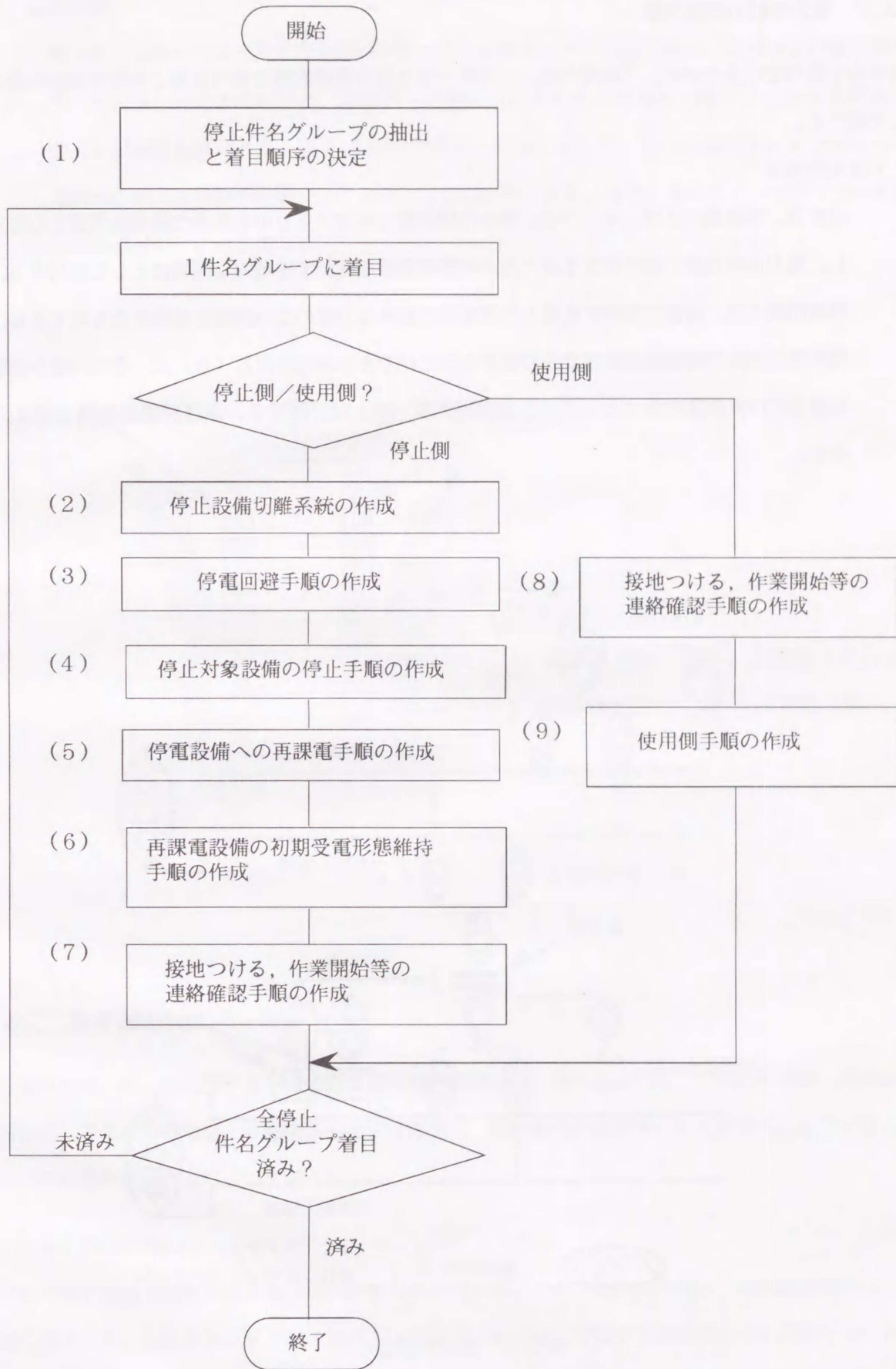


図 2.3 全体の処理の流れ

### 2.3.2 電力系統の表現方法

効率的な処理を行うために、「論理生成」の対象とする電力系統設備を論理設備と論理開閉器の集合として表現する。

#### (1) 論理開閉器

遮断器，断路器およびジャンパなど個々の開閉器で関連するものを集めて論理開閉器として定義し，電力系統設備の接続状態を表すための開閉状態を表わす論理的な開閉器として使用する。論理開閉器とは，設備に所属する個々の開閉器で直列な分岐のない開閉器を集めたものである。論理開閉器はその両端が充電中でも開閉することができる論理開閉器（A）と，その両端が無電圧の場合にのみ開閉することが可能な論理開閉器（B）に分類する。論理開閉器の例を図 2.4 に示す。

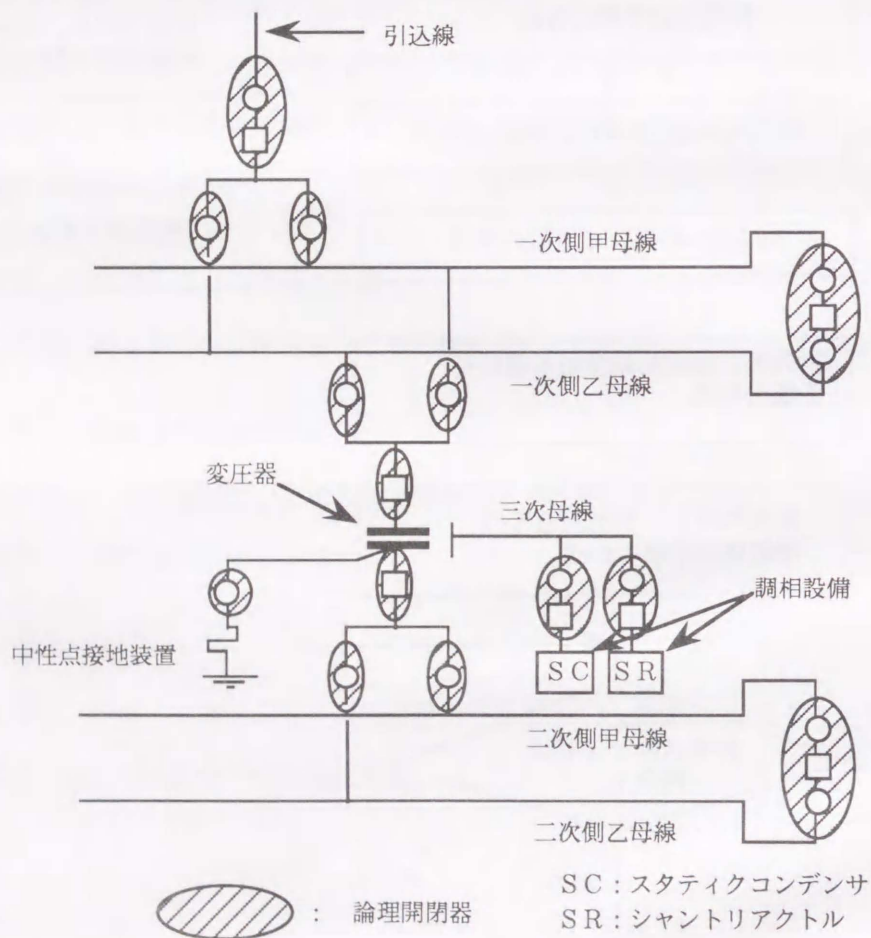


図 2.4 論理開閉器の例



(2) 論理設備

電力系統設備から論理開閉器を除いたすべての設備をいう。論理設備は、母線および変圧器のように実設備に対応するものと、仮想的な設備に対応するものがある。図 2.4 の論理開閉器以外の部分が論理設備である。図 2.5 は抱き合わせ設備と称して、一つの開閉器により異なる送電線への課電を行なう設備であり仮想的な設備の例である。なお、本システムで扱っている設備の詳細は付録 C に示している。

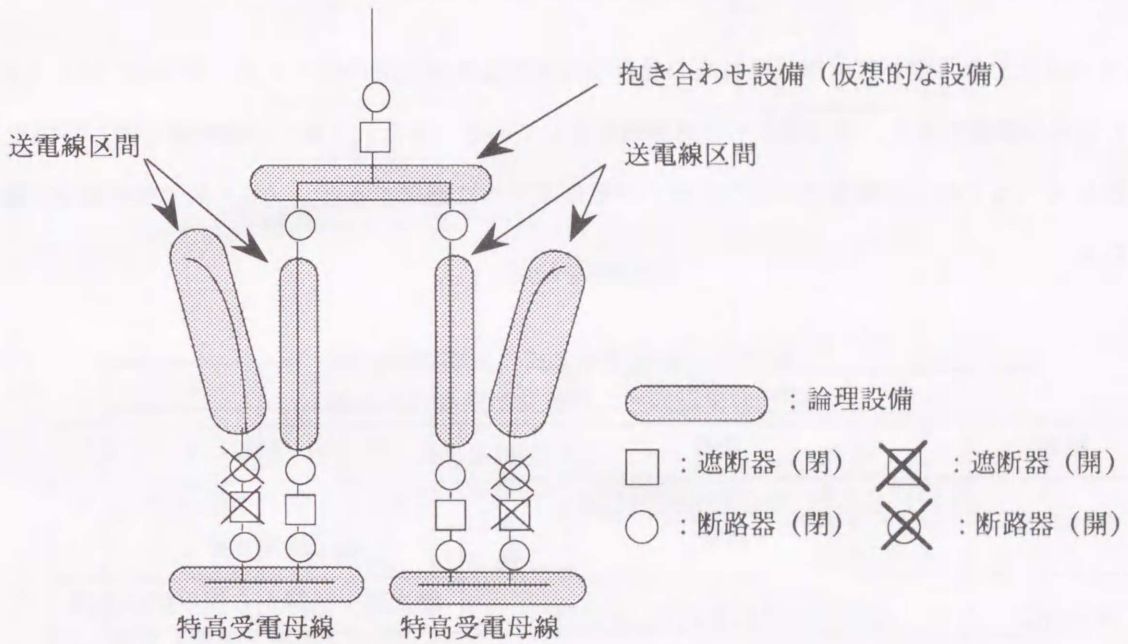


図 2.5 仮想的な設備に対応する論理設備の例

2.3.3 論理生成方式の基本機能

「論理生成方式」を実現する上で必要になる基本機能には、操作規則判定、停電設備判定、課電操作開閉器抽出、送電線の電源端－負荷端間の最短経路抽出、操作指令の模擬実行などがある。ここでは、これらの中から操作規則判定について述べる。

(1) 操作規則判定

前項で操作指令手順を作成する際に用いられる規則を示したが、これらの数多くの規則を整理して、効率良く判定させ、しかもメンテナンス性を向上させるためには、プログラムからいかに規則を独立させて扱うかが一つのポイントである。このため、操作対象設備毎に「条件部」と「結論部（指令用語）」から

なるテーブルを作成し、条件を逐次判定し条件を満足する場合に指令用語を決定し、操作指令手順を作成する。

ここで、「条件部」は通常複数（10個程度）の条件の集合で表現されていることが多い。このような設計方針を採用したことにより、結果として第3章で述べる知識ベース処理に類似したシステムとなっている。計らずも、AIブームの火付け役になった松本と坂口らによる論文<sup>(8)</sup>が提出されたのと同時期にこのような設計を実施していたのは興味深い。知識ベース処理との大きな違いは、IF～THENで表現した規則がプログラムのロジック部に配置されているか否かである。

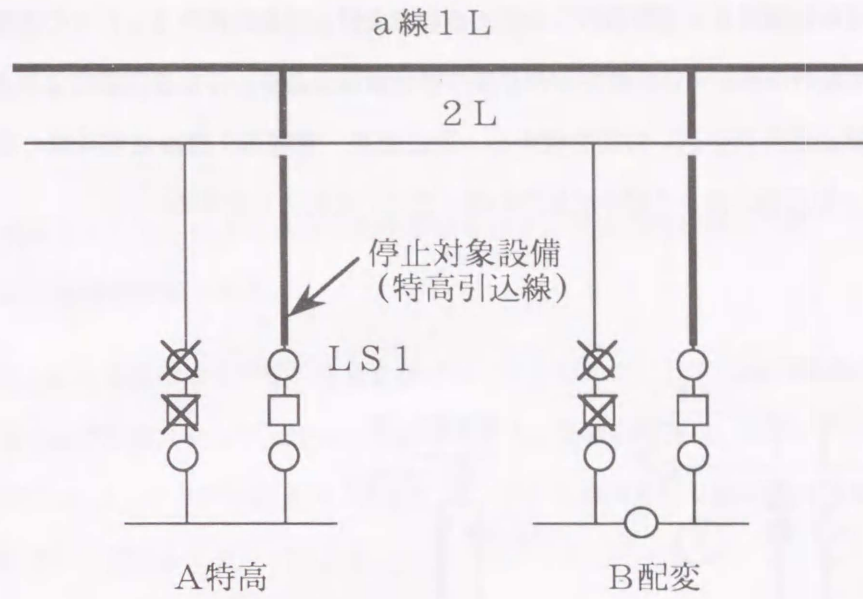
表2.1は停止対象設備が二回線受電特高の場合の具体的な生成規則の例である。表中のCH<sub>i</sub>（i = 1～8）は論理変数であり、備考欄にその論理値を示している。また、“&”は論理積を表している。本規則を図2.6（a）の二回線受電特高引込線の予定作業停止に適用すると、（b）図の操作指令手順が作成される。

表2.1 論理生成方式の生成規則の例  
（停止対象設備＝二回線受電特高の引込線）

規則	条件	結論
ルール1	CH <sub>1</sub> &CH <sub>2</sub> &CH <sub>3</sub> &CH <sub>4</sub> &CH <sub>5</sub> & CH <sub>6</sub>	関連併用配変の予備線側引込線を“併用する”。
ルール2	CH <sub>1</sub> &CH <sub>2</sub> &CH <sub>3</sub> &CH <sub>7</sub>	停止側引込線から相手側引込線へ“ループ切替（作業）する”。
ルール3	CH <sub>1</sub> &CH <sub>2</sub> &CH <sub>3</sub> &XH <sub>8</sub>	停止側引込線から相手側引込線へ“ループ切替（運用）する”。
.	.	.
.	.	.
.	.	.
ルールk	CH <sub>1</sub> &CH <sub>2</sub> &CH <sub>7</sub>	停止側引込線の線路側LSを“操作ロック”する。
.	.	.
.	.	.
ルールn	ルール1による手順作成有無 = 有	関連併用配変の予備線側引込線を“併用とく”。

備考 CH<sub>1</sub>の説明

CH<sub>1</sub>：停止側引込線の開閉状態＝“閉”      CH<sub>2</sub>：相手側引込線の開閉状態＝“開”  
 CH<sub>3</sub>：特高の切替方式＝ループ切替      CH<sub>4</sub>：ループ切替可否判定結果＝“可”  
 CH<sub>5</sub>：関連併用配変有無＝“有”      CH<sub>6</sub>：関連併用配変併用可否判定結果＝“可”  
 CH<sub>7</sub>：停止要求の種類＝“予定作業停止”      CH<sub>8</sub>：停止要求の種類＝“運用停止”



切替方式：ループ切替

(a) 初期系統

No.	所名	操作内容
i	B配変	a線 2 L 併用
i + 1	A特高	a線 1 L から 2 L へ ループ切替
i + 2	A特高	a線 1 L LS 1 操作ロック
i + 3	B配変	a線 2 L 併用とく

(b) 操作指令手順表

図 2.6 二回線受電特高の引込線作業停止の例

## 2.4 実系統への適用例

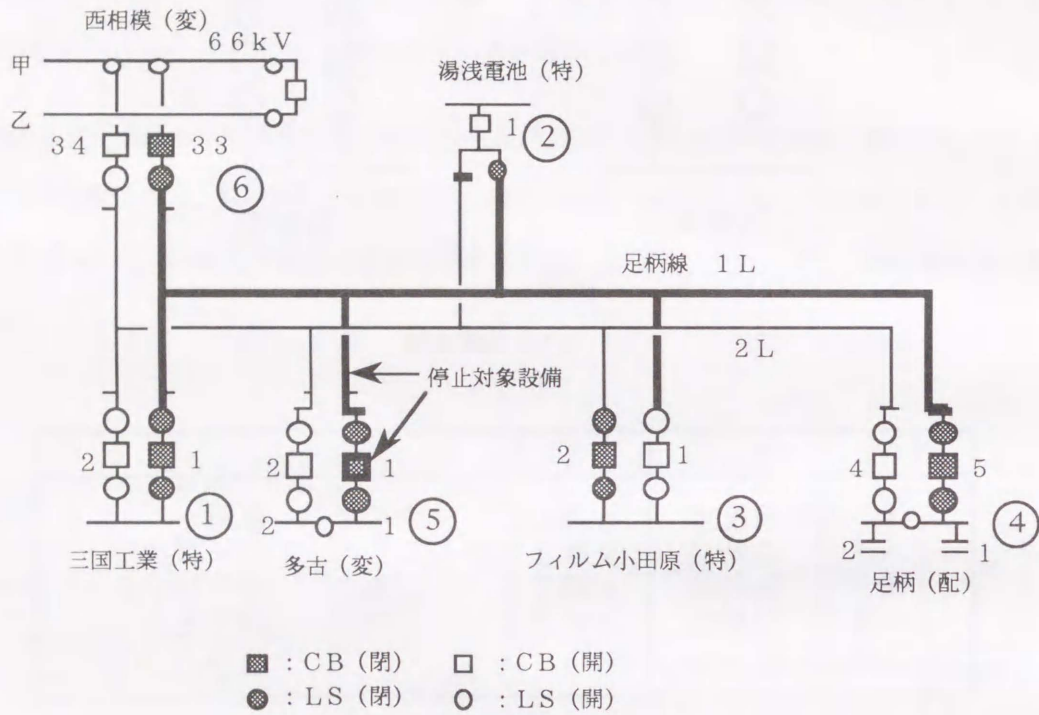
本方式を電力会社の給電用計算機システムに適用して、各種の停止対象設備を与えて作成した操作指令手順の妥当性と処理時間を評価した。その中から停止設備が二つの場合の例を用いて説明する。

図 2.7 (a) にこれから「論理生成方式」で操作指令手順を作成しようとしている実系統の初期系統を示す。本例では、送電線に三つの特高（三国工業，湯浅電池，フィルム小田原）と一つの配変（足柄），および二つの変電所（多古，西相模）が関係している。停止要求のあった設備は，(b) 図に示すように

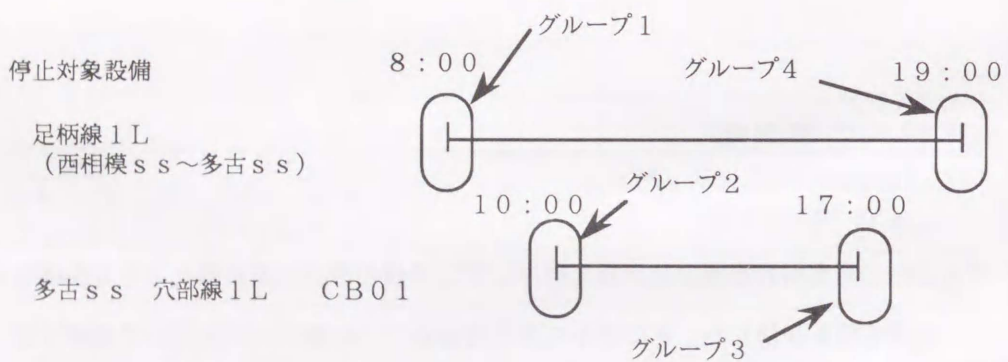


送電線とその送電線に係る遮断器の二つである。この停止対象設備を (a) 図の太線で示している。

(a) 図において丸の中に記入した数字が停止操作優先順位である。停止優先順位は停止対象送電線の電源端である西相模変電所側に近い特高を優先し、次に配変、変電所、最後に電源端の変電所としている (表 2.1 の停止対象設備の停止手順作成処理の第一番目の規則に対応する)。



(a) 初期系統



停止側グループ : 1, 2

使用側グループ : 3, 4

(b) 停止件名グループ

図 2.7 論理生成方式の適用例

(b) 図に示したように、本ケースの停止対象設備の送電線と関係している遮断器 (CB) の停止の時間帯 (停止時刻から使用時間まで) が互いに関係しているために、操作指令手順の作成が比較的難しい例である。

図 2.8 に本方式により自動生成された操作指令手順を示す。同図の操作指令手順においては、No. 1 ~ No. 10 までが停止操作手順である。

「論理生成方式」による操作指令手順の作成を要求してから結果が CRT 画面に表示されるまでの処理時間は、本ケース (27 手順ステップ) では 26 秒であった。使用計算機は、制御用計算機 TOSBAC-7/70G、使用言語は、FORTRAN である。マンマシン処理を除く論理生成の核の部分は、プログラムソースで約 30,000 ステップである。

表 2.7 は、主要な停止対象設備毎の標準的な手順数に対する停止設備毎の標準的な手順数に対する本方式と手動設定方式による所要時間の比較を示すものである。同表からわかるように、従来運用者が系統の運用方法、人身の安全などを総合的に判断しながら行っていたのに比較して、的確な操作指令手順を極めて高速に作成することが可能となった。特に、送電線停止のように手順数が多いものや、複数の停止設備が重なり合う場合にはその効果が顕著に表れている。

表 2.7 手動方式と論理生成方式の所要時間の比較

項目	標準手順数	所要時間	
		論理生成方式	手動方式
母線	4	5 (秒)	30 (秒)
変圧器	6	6 (秒)	60 (秒)
送電線 (小)	30	29 (秒)	20 (分)
送電線 (大)	60	65 (秒)	45 (分)
送電線 (大)	60	65 (秒)	45 (分)
送電線 (小) + CB	34	35 (秒)	22 (分)
母線交互停止	8	8 (秒)	2 (分)

## 操 作 指 令 手 順 表

停止件名： 足柄線 1 L (西相模 s s ~ 多古 s s)  
多古 s s 穴部線 CB01

No.	所 名	操 作 内 容	
1	三国工業	三国工業線 1 L 1	開放確認
	三国工業	三国工業線 1 L 1	操作ロック
2	湯浅電池	足柄線 1 L 足柄線 2 L 0 1 開 1 開 2 閉 0 2 閉	
	湯浅電池	足柄線 1 L 1	操作ロック
3	フィルム小田原	富士小田原線 1 L 富士小田原線 2 L 2 閉 0 2 閉 0 1 開 1 開	
	フィルム小田原	富士小田原線 1 L 1	操作ロック
4	足柄 s s	足柄線 1 L	作業停止
5	多古 s s	穴部線 1 L	作業停止
6	西相模 s s	足柄線 1 L	作業停止
7-1	西相模 s s	足柄線 1 L	A 接地つける
7-2	多古 s s	穴部線 1 L	A 接地つける
8	松田送電	足柄線 1 L	作業開始
9	多古 s s	穴部線 1 L 0 1	作業停止
10	多古 s s	穴部線 1 L 0 1	作業開始
11	多古 s s	穴部線 1 L 0 1	作業終了
12	多古 s s	穴部線 1 L 0 1	復旧
13	多松田送電	足柄線 1 L	作業終了
14-1	多古 s s	穴部線 1 L	A 接地はせず
14-2	西相模 s s	足柄線 1 L	A 接地はせず
15	西相模 s s	足柄線 1 L を 66 kV 甲母線より	使用
16	多古 s s	穴部線 1 L	作業停止
17	足柄 s s	足柄線 1 L	復旧
	フィルム小田原	富士小田原線 1 L 1	ロック解除



18	フィルム小田原	富士小田原線 1 L 富士小田原線 2 L 1 閉 0 1 閉 0 2 開 2 開	
	湯浅電池	足柄線 1 L 1	ロック解除
19	湯浅電池	足柄線 1 L 足柄線 2 L 0 2 開 2 開 1 閉 0 1 2 閉	
	三国工業	三国工業線 1 L 1	ロック解除

図 2.8 操作指令手順表の作成例

## 2.5 結言

本章では、電力系統の平常時操作指令手順作成を制御用計算機を用いて自動生成する「論理生成方式」について述べた。本方式は、電力系統の「平常時操作」のノウハウを熟知しない若年者でも熟練者と同等の操作指令手順を作成することが可能となり運用者の負担を減少できる。また、使用する都度、その時点の電力系統に合わせて作成するので、系統変更に伴う操作指令手順の修正も不要である。また、2.2.2 項で述べた論理生成の生成規則は、計算機による平常時操作の本格的な自動化における重要な考え方を示しており、現在開発されているシステムのほとんどがこの考え方を利用している。

本章で述べた「論理生成方式」は、昭和 62 年（1987 年）2 月より実運用の給電用計算機システム（東京電力（株）厚木給電所）に組み込まれて順調に稼働中であり、運用面からも運用者の負担軽減の面で良好な結果が得られている。また、本プログラムは同給電用計算機システムの操作訓練機能の一部にも取り入れられて系統運転員の新人教育にも利用されている。

## 第3章 知識ベース方式による平常時操作手順の決定

本章では、「平常時操作」に関して、知識ベースを用いた予定作業停止操作と運用停止操作の件名に対する停止側と使用側の操作指令手順の決定方法<sup>(31)(33)(52)(55)</sup>について述べる。本章の内容は、第2章で示した手順の自動生成に対する規則を知識ベースシステムのルールとして記述し、更に、操作手順の妥当性を検証するために新たに必要となるルールも付加したものである。知識処理言語としては、Prologでの検討から開始したが、最終的には処理時間と他言語との柔軟なインターフェイスを備えている点でOPS83言語を用いたシステムを構築した。また、本システムを構築中に遭遇した知識ベース自体の不完全性に起因する問題を検討し、知識の動的検証機構を本システムへ組込む方法を提案する。本章で述べた方式は、制御所の操作卓に類似した環境を実現するためパソコン2台を連結したシステム上にインプリメントし、電力会社の実システムデータをモデル化したシステムを用いて評価し良好な結果が得られたことを示す。現段階において知識ベースシステムの開発や維持に要するコストは非常に大きく、システム運用業務でそれを手軽に利用するまでにはなっていない。しかし、平常時操作指令手順の作成のようにオフライン的な業務を支援するには、本章で提案したパソコンによるシステムでもかなりの部分がカバーできるように考えられる。本章の内容は、一連の研究成果をまとめた論文(52, 55)に基づいたものである。

### 3.1 概説

#### 3.1.1 平常時操作への知識ベース方式の適用に関する概況

「平常時操作」への知識ベース適用の検討は昭和60年(1985年)頃から始まったが、「事故時操作」に対する検討に比較すると、その実際の適用は比較的最近のことである<sup>(23)(24)(31)(52)(55)</sup>。その理由は、異常時における電力の供給信頼度確保の点から「事故時操作」の方が「平常時操作」よりも技術者や研究者の興味を引いたためだと思われる。しかし、常時の電力の安定供給のためにはシステムの運用や設備保守が必要である。更に、「平常時操作」は非常に重要な業務としてシステム運用計算機上のこのソフトウェアの規模は機能単独として最大規模(60%程度)となっており、その維持管理が難しくなっている。従って、第4章以降で述べる「事故時操作」の自動化と同等に、近年「平常時操作」にも技術者や研



究者の関心が向けられてきたことは喜ばしいことである。

「平常時操作」へ知識ベース適用した最初のプロトタイプシステムは、平成元年（1989年）の沖ら<sup>(22)</sup>による作業停電計画に対するものであろう。作業停電計画とは「停止計画」あるいは「停止調整」とも呼ばれ、「平常時操作」業務の最初に扱われる機能である。電力系統設備の拡充・改良や保守点検のための作業停電、あるいは運用上の理由による運用停止は、電力系統の電圧階級別に年単位、月単位に作業要求を取りまとめ、系統の信頼度の低下や設備・機器の過負を最小限に留めるよう各所から提出された要求を相互調整して、全体の実施計画を策定するものである。文献（22）の知識処理部は、Symbolics-3670を用いてLisp言語により検討されたが、最終的にはガーベッジの発生による処理速度の悪化のためにSUN3上にC言語とFORTRANとで構築されている。

一方、平常時操作指令手順の作成に知識ベースを適用したシステムは、平成2年（1990年）の長谷川ら<sup>(23)</sup>の報告によるものが最初であるが、そこでは具体的な操作指令手順は示されていない。その後、平成5年（1993年）の幅ら<sup>(24)</sup>の論文で本格的なシステムとして報告され、平成6年（1994年）の著者<sup>(55)</sup>によるパソコンを利用したシステムの報告へと続いている。幅らのシステムは知識表現にオブジェクト指向による階層的系統表現を用いているのが特徴である。しかし、特定の計算機に依存したエキスパートシステム構築ツール（EUREKA-II）を用いているため汎用的とは言い難いものである。

### 3.1.2 提案手法の概況

ここで述べる「知識ベース方式」による操作指令手順の作成方式は、第2章で述べた「論理生成」の規則を知識ベースシステムのルールとして記述し、更に、操作手順の妥当性を検証するために新たに必要となる“機器展開ルール”と、知識の動的検証を行うための“検証用知識”を付加したものである。知識ベースによる方式は、問題解決の手続きを汎用性をもつ推論機構と問題向きの知識に分離した手法であり、優れた方式であるといえる。しかし、本手法は本質的に知識の不完全性という問題点が残る。高野らの論文<sup>(38)</sup>は、このような問題解決のために電力系統操作手順作成に対する知識の動的検証の枠組みを提案した先駆的なものである。そこでは、システムが満足すべき仕様を「状態禁止」、「遷移禁止」、および「サブゴール到達」の3つの制約条件として知識ベースに格納し、ワーキングメモリ上にこれらの制約条件に違反する状態が発生すれば、推論を中断させている。しかし、同論文で示されている3つの制約条件の具体的な実現方法は、実在の開閉器毎の状態を個々に規定して知識ベースに格納しており、実用的なシステムに搭載するには、開閉器数に比例する膨大な数のルールを入力しなければならず煩雑すぎる。さらに、知識ベースによる方式は、その開発や維持に要するコストが従来のシステムに比べ著しく増大する傾



向にある。その理由の1つとして知識ベース処理を実現するための高性能な計算機の必要性がある。

本章では、知識ベースによる方式の上述の問題点を克服する目的で、「平常時操作」の基本的な考え方に基づいたより深い知識を用いて、検証用の知識数を少なくした動的検証機構を備え、さらに、安価なパソコンと汎用的な言語を用いて開発コストを抑ええた平常時操作支援システムを提案する。提案方式の特長は以下の3点である。

- (A-1) 動的検証用の知識として、「平常時操作」の基本的考え方に基づく深い知識を導入するとともに、パソコン用に簡易な動的検証機構を提案していること。
- (A-2) 2台のパソコンの並列駆動により、制御所等の実システムと同等な感覚で操作指令手順の作成とシミュレーションが行えること。
- (A-3) 系統図の大画面スクロール、マウスカーソルの2画面連続移動、および音声出力を組み込み操作性の向上を図っていること。

ここで、(A-1)は信頼性の高い実用の知識ベースシステムにするためには必要不可欠なものである。本システムでは、次章で述べる「平常時操作」の基本的な考え方の制約条件を個々の開閉器のレベルではなく、もっと抽象的な電力系統設備・機器の充停電状態と運転状態（使用中、運用停止中、作業中）を用いて記述して、検証用の知識数の低減を図っている。また、シングルタスクの動作が基本であるパソコン上でシステムを構築するために、文献(38)の機構を簡易にして実現している。両者の相違は、推論エンジンとワーキングメモリを監視している検証用のタスクが独立に存在するか否かであり、検証結果に影響を与えるようなものではない。次に、(A-2)は実システムでの操作性に極力近づけるためである。実システムの平常時操業業務は、操作指令手順表と系統図を同時に表示させながら実施されているからである。また、(A-3)は操作性の向上のために考慮した機能である。マウスカーソルの2画面連続移動により、実システムよりも操作性が向上している。すなわち、実システムではライトペン等のポインティングデバイスは、左右切替え釦を押下した側のCRT画面の受け付けを可能とさせているが、本方式はこの釦押下の行為を不要とし左右のCRT表示装置間でマウスカーソルを自由に移動できるからである。また、操作シミュレーション時に操作手順内容の音声出力を付加したため、使用者は系統図上の状態変化に意識を集中させることができ、より確実な手順の検証ができる。

## 3.2 知識ベース処理の実現方法

### 3.2.1 平常時操作の基本知識

一般に平常時操作を行う場合には、系統の安定供給を維持しながら安全な操作を実施する必要性から、第2章2.2.1で示したような考え方のもとで操作指令手順表を作っている。

(C-1) 停電範囲を最小とする (制約条件(1))

(C-2) 停電時間を最短とする (制約条件(2))

(C-3) 操作の安全性を確保する (制約条件(3))

知識ベース方式による操作指令手順を作成するためには、上記(C-1)～(C-3)を制約条件として操作対象設備を停止し、さらに使用する適切な知識の集合を抽出することが必要である。平常時操作の知識を整理しやすくするため、「論理生成方式」の場合と同様に電力系統を以下のグループに分類する(第2章2.2.1項参照)。

(i) 停止対象設備グループ

(ii) 関連停電設備グループ

(iii) 従属停止設備グループ

(iv) その他停電設備グループ

(v) 操作の影響を受けない充電系統設備グループ

ここで、「停止対象設備グループ」は停止件名として入力された停止対象の設備の集合、「関連停電設備グループ」は停止対象設備を停止した結果として停電する設備の集合、「従属停止設備グループ」は停止対象設備を停止するために無電圧操作開閉器の操作を必要とするために従属して停止せざるを得ない設備の集合、「その他停電設備グループ」は初期系統において既に停電している設備の集合である。

これらのグループの中で、制約条件(C-1)は「関連停電設備グループ」と「従属停止設備グループ」の最小化問題として扱うことができる。すなわち、「関連停電設備グループ」の最小化のためには、停止対象設備の停止に先立って予め他の充電設備と併用する知識を、「従属停止設備グループ」の最小化のためには、停止対象設備の停止後に他の充電設備から課電する知識を知識ベースに登録すればよい。一方、制約条件(C-2)(C-3)は同一グループ内の操作順序を適切に行うための知識を知識ベースに登録することにより実現できる。

## 3.2.2 知識ベース方式の処理の流れ

一般的な平常時操作の処理の流れを図3.1に示す。同図の(2)～(5)が知識ベース処理に関する部分である。以下、図に従って説明する。

## (1) 停止対象設備の入力

停止対象設備コード，作業目的および作業開始・終了時間等の入力する。

## (2) 操作順序の決定

停止対象設備として入力した設備を停止するためには，その停止対象設備の境界にある開閉器を開く必要がある。例えば，送電線の場合に操作を必要とする箇所は複数の異なった発電電所や配電用変電所，そして特別高圧需要家（特高）等の引込み線になる。従って，操作の安全性や開閉する機器種別の制約により，操作の順序を決定する。

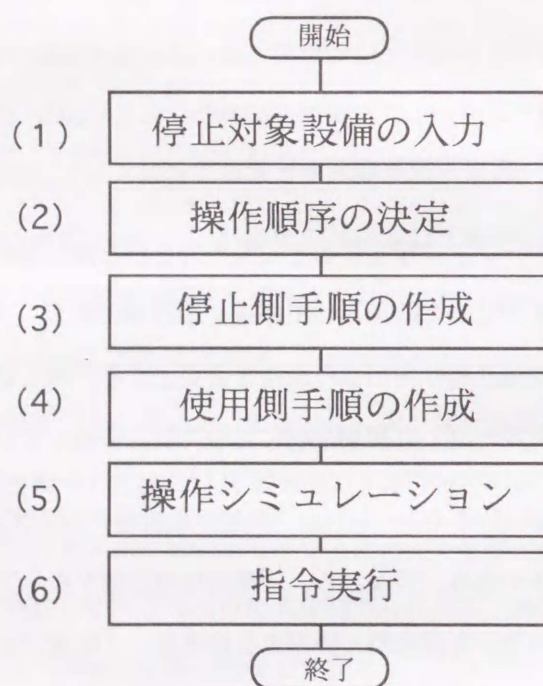


図3.1 処理の流れ



(3) 停止側手順の作成

操作順序に従って停止側操作指令手順を作成する。また、給電所で作成される操作指令手順は効率化のために目的指令用語（1つの指令用語で実際には複数の開閉器が操作される：“作業停止”，“使用”等）を用いて作成する。

(4) 使用側手順の作成

実際の作業等が完了した後、停止している停止対象設備等を操作前の初期系統に戻すために、一連の操作指令手順を作成する。

(5) 操作シミュレーション

完成した操作指令手順が正しいか否かを1ステップ毎の操作シミュレーションにより検証する。

(6) 指令実行

実際に、現地の開閉器を操作する信号を送出する。

本システムでは指令実行を除いた(1)～(5)をカバーしている。

### 3.2.3 動的検証用知識

一般に、知識ベースによる処理は知識の不完全性という大きな問題がある。この知識の不備を発見するためには個々の知識の適用によって生ずるすべての中間結果を予測し、知識の適用条件を厳密に記述しなければならない。これには相当な時間と高度な知識情報処理技術者の力を必要とするため、完全に誤りを除くことは事実上不可能である。従って、知識自体には誤りがないが、知識適用過程で発生する誤推論を検証するような機構を構築することができれば非常に有効である。

知識ベースによる処理ではその推論過程の全ての情報をワーキングメモリに保有しているので、その過程を何等かの方法で監視すればよい。このことを知識の動的検証と呼び、その機構の一例が既に高野ら<sup>(38)</sup>により提案されている。しかし、文献(38)の検証用知識は開閉器毎の状態を全て制約条件として規定しなければならない。これは、実システムにおいては、検証用知識の初期入力量が膨大になるばかりでなく、頻繁に実施されている系統設備・機器の追加・削除等に同期して検証用知識を更新しなければならず現実的でない。そこで著者は、動的検証用知識として平常時操作の基本的考え方に基づくより深い知識を導入した方式を提案している<sup>(33)</sup>。本システムの動的検証用知識ベースには、3.2.1で説明した3つの制約条件に対応する知識を組み込んでいる。以下にその一例を示す。

(K-1) 停電範囲最小化

IF 停止対象設備が送電線の 1 回線 and  
 連係する 2 回線受電特高が停電  
 THEN 推論過程に誤りがある

(K-2) 停電時間最小化

IF 停止対象設備が送電線の 1 回線 and  
 1 回線受電特高の停電時間が 2 回線受電特高より長い  
 THEN 推論過程に誤りがある

(K-3) 操作上の安全確保

IF 停止対象設備が複数ある and  
 ある停止対象設備の作業終了後の復旧操作により停止中の停止対象設備に影響がある  
 THEN 推論過程に誤りがある

現在、深い知識を統一的に抽出する手法は確立されていないが、対象とする物事の原理や原則に関する知識が深い知識であると考えられる。今、「2 回線受電特高が何故存在するのか」ということを考えてみる。それは、片回線の引込み線の作業停電時等に他回線から受電し、特高が全停しないように考えられた特高受電形態であると考えられる。従って、そのような知識からワーキングメモリを検証しようとするのが上述の (K-1) の知識である。これは、停電範囲最小化という平常時操作の基本的考え方の制約条件 (K-1) に対応するものである。以下の検証用知識もこのようにして抽出している。

図 3.2 が、本システムの動的検証の機構である。シングルタスクの動作が基本であるパソコン上でシステムを構築するために、文献 (38) の機構を簡易にして実現している。両者の相違は、推論エンジン

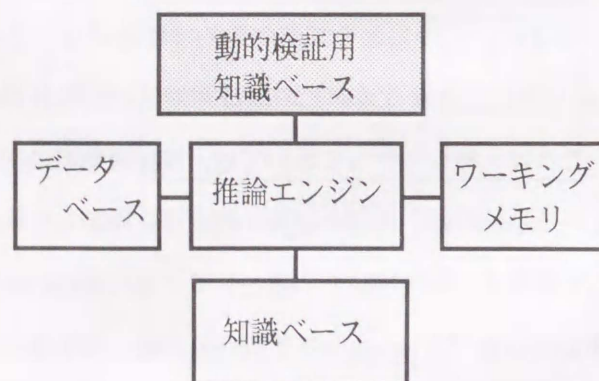


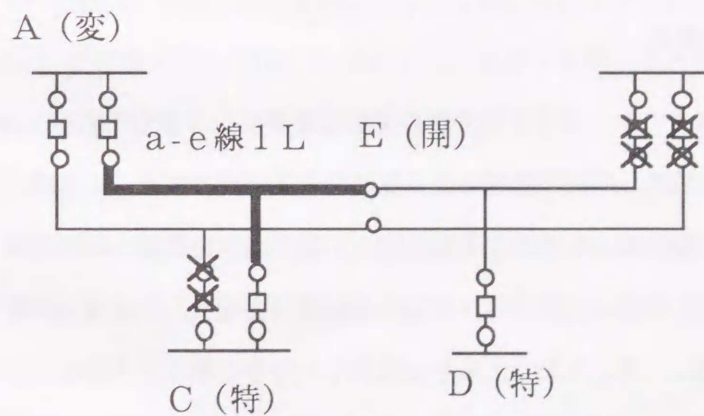
図 3.2 動的検証機構



とワーキングメモリ監視用の検証用のタスク（文献（38）ではコレクトネスチェッカーと称している）が独立に存在するか否かであり、検証結果に影響を与えるようなものではない。本方式では、ワーキングメモリの内容の更新の都度、同じ推論エンジンを用いて検証用知識を適用した検証を実施している。

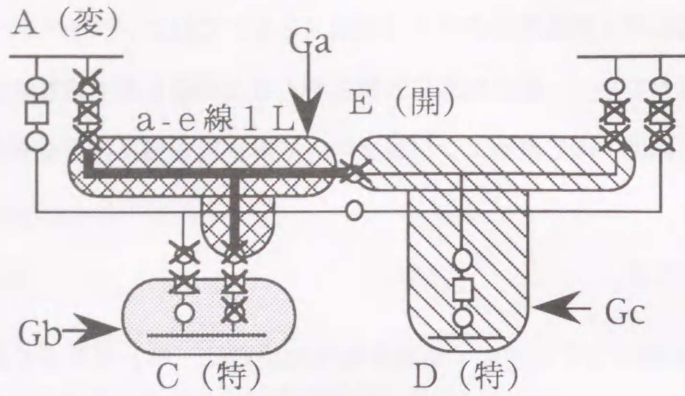
### 3.2.4 操作順序の決定

図3.1の処理の流れの（2）に対応する操作順序の決定は、本システムで重要な役割を持つ。操作順序の決定における考え方を説明するために図3.3の簡単なモデルシステムを用いて説明する。（a）図に示すように、停止対象設備はA変電所とE開閉所間の送電線a-e線1Lとする（図中の太線で示す）。停止対象の送電線はA変電所側から課電されており、E開閉所の開閉器は無電圧操作開閉器とする。従って、E開閉所の開閉器の操作時には開閉器の両端が無電圧でなければならない。停止対象設備を停止すると、（b）図の囲みを入れた部分が停電となる。この停電系統は「停止対象設備グループ」G a, 「関連停電設備グループ」G b, 「従属停止設備グループ」G cに分類される。ここで、G bに含まれるC特高は2回線受電特高であるから停止対象設備の停止に先立って、2L側から受電するような操作を実施すれば停電を回避できる。一方、G cに含まれるD特高は停止設備の停止後にB変電所側から課電すれば、停電を回避できる。これらは共に、停電範囲を最小とする考え方を実現するための方法である。それらの操作を実施した系統を（c）図に示す。同図において数字1～7はその操作順序を表している。操作順序6と7は従属停止設備グループへの再課電操作に対応するものである。以上のように初期系統と停止対象設備から、電力系統をグループに分類し、「関連停電設備グループ」の停電回避操作、「停止対象設備グループ」の停止操作、「従属停止設備グループ」への再課電操作の順序で操作するように知識ベースに登録すれば、適切な操作順序が決定できる。

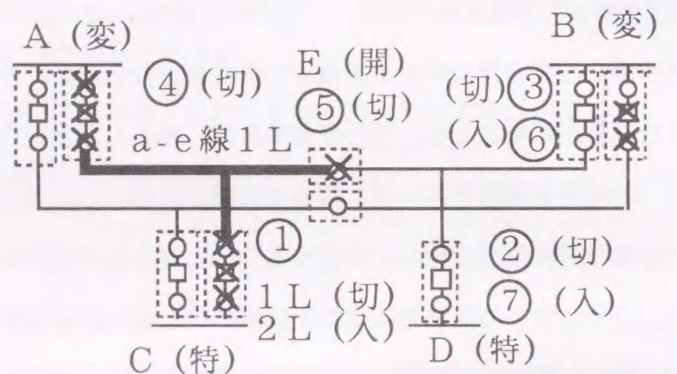


(a) 初期系統





(b) 停止設備切離系統



数字は操作順序を示す

(c) 停止操作実施後系統

図 3.3 簡単な系統

### 3.2.5 指令用語の決定

図 3.1 の処理の流れの (3) ~ (4) の手順の作成で必要になる指令用語は、操作対象設備の種類、所属の事業所種別、操作目的、系統の状態により決定できる。本システムで考慮している操作対象設備の種類は、母線（単母線、複母線、変圧器 3 次側母線）、変圧器、発電機、調相設備（SC、SR）、引込み線である。所属の事業所種別は、変電所、発電所、配電用変電所、特高（1 回線受電、2 回線受電）、開閉所である。操作目的は、予定作業停止操作と運用停止操作である。系統の状態とは、操作対象設備に隣接する開閉器の開閉状態、設備の充停電状態、そして運転状態（使用中、作業中、運用停止中）である。表 3.1 に本システムの知識ベースに格納している指令用語を示す。

表 3.1 指令用語

入れる	解列
開く	並列
作業停止	発電停止（作業）
運用停止	発電停止（運用）
停止	受電
復旧	A接地つける
使用	A接地はずす
併用解く	作業開始
併用	作業終了
ループ切替（作業）	運用停止開始
ループ切替（運用）	運用停止終了
停電切替（作業）	開放確認
停電切替（運用）	操作ロック
切替	ロック解除

### 3.2.6 個別機器操作への展開方法の決定

図 3.1 の処理の流れの (3) ~ (5) で必要になる個別機器（遮断器や断路器）操作への展開方法の決定は、操作指令手順作成における指令用語の決定と、生成された操作指令手順が妥当であるか否かを検証するために重要である。操作指令手順の指令用語を遮断器や断路器等の個別機器の開閉操作に展開するには、開閉器の集合としての接続子の概念<sup>(25)</sup>を用いるのがよい。接続子とは設備と設備を結合する開閉器の集合で、図 3.3 (c) の破線で囲んだ部分に対応する。接続子を用いると設備データの管理が容易になり、個別機器操作への展開方法を容易に知識表現することができる。すなわち、指令用語と操作対象設備と隣接する接続子内の開閉器の開閉状態により、どのように個別操作すればよいかが決定できる。例えば、指令用語が「作業停止」の場合は操作対象設備に接続する接続子内の全開閉器を“開”状態にするような知識を知識ベースに格納すれば、操作対象設備に接続する開閉器の集合（すなわち接続子内の開閉器）が非標準な開閉器の形態であったとしても、この知識で対処できる。また、個別機器操作が完了すると当該操作対象設備と機器の状態は、図 3.4 に示すように、“作業中”、“運用停止中”、“使用中”のいずれかに状態を更新する。

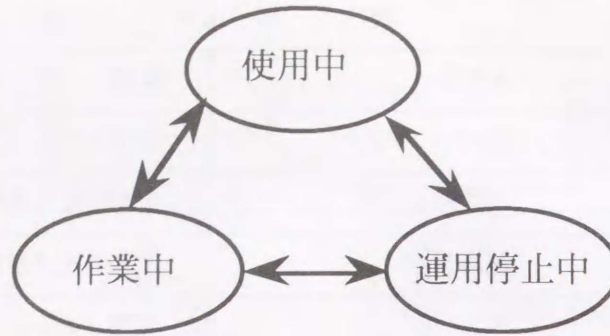


図3.4 運転状態

### 3.3 システム構成

#### 3.3.1 システム構成

図3.5に本エキスパートシステムの構成を示す。CPUとして80286を用いた汎用パソコン2台を、RS-232Cインターフェイスを用いて接続している。制御所等の計算機システムの構成に合わせて、パソコン“右”は系統図、パソコン“左”は操作指令手順表を表示させている。系統図は拡張メモリ(EMS)を用いて大画面スクロール機能をソフト的に実現している。すなわち、EMSに格納している画面データに対して表示すべき部分のアドレスを計算し実メモリ上に復元させている。2台のパソコンの画面とのマンマシンインターフェイスは主にマウスを用いている。このためマウスカーソルの2画面連続移動を実現している。すなわち、パソコン“右”にマウスを接続し、マウスカーソルの(x,y)座標と左右どちらの画面上にあるのかを示す情報をRS-232Cを介してパソコン“右”からパソコン左に送り、マウスカーソルの表示が必要なパソコン側で表示させている。また、操作シミュレーション時はマウスによりパソコン“左”の操作指令手順表の該当ステップをクリックすれば、当該ステップの表示色が白色から黄色に変化し、パソコン“右”の系統図の該当する開閉器の形状と表示色、および設備の充停電色(赤:充電,青:停電)が変化する。さらに、その操作の内容が音声出力される(出力装置:VCS11A-CIF)。使用言語は、OPS83とMS-Cである。図3.6に表示画面の例を示す。



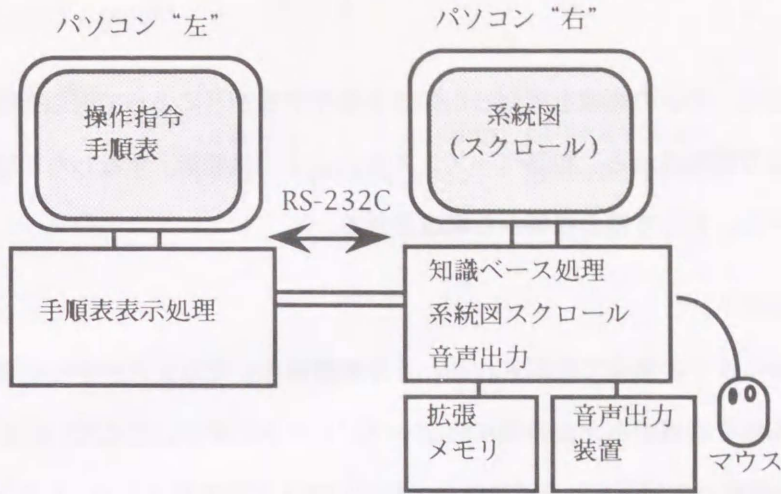


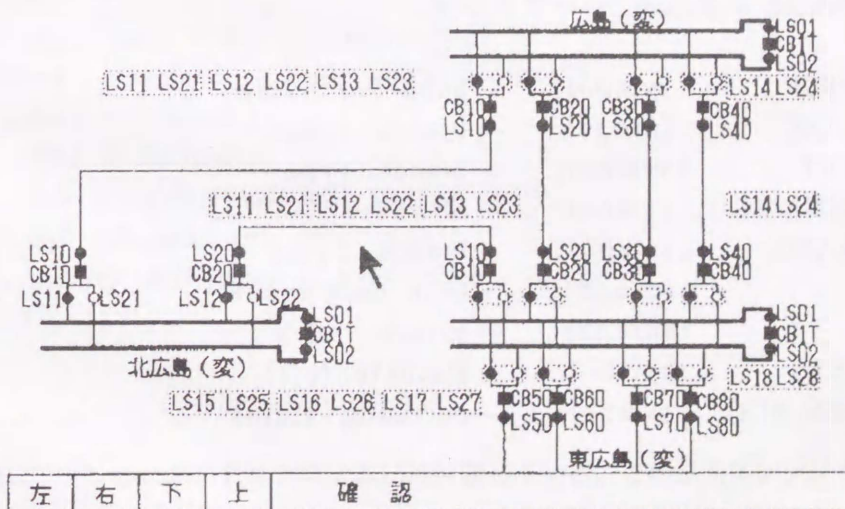
図 3.5 システム構成

# 電力系統操作手順表

番号	所 名	操 作 内 容
1	坂 (特)	坂支線 1 L → 2 L ループ切替 (作業)
2	坂 (特)	坂支線 1 L LS11 操作ロック
3	上平原 (変)	上平原線 1 L 作業停止
4	東広島 (変)	上平原線 1 L 作業停止
5		上平原線 1 L 作業開始
6		上平原線 1 L 作業終了

次  
戻  
終

(a) パソコン左



(b) パソコン右

図 3.6 表示画面の例

## 3.3.2 知識表現

知識ベースシステムでは、特定の領域を規定した知識を操作することによって問題を解決する。そしてこの知識は推論機構により制御される。知識ベースシステムは3つの要素、すなわち領域内のオブジェクト、プロダクションルール、そして推論機構から構成される。

## (1) 領域内のオブジェクト

一般に、領域はオブジェクトの集合で表現される。「平常時操作」では、ノードとブランチと接続子の3つのオブジェクトが領域を表現するための基本的なオブジェクトである。ここで、“ブランチ”は、潮流計算モデル等の電力系統解析で使用される送電線や変圧器に加えて開閉器（CB, LS）も表す。“ノード”も潮流計算モデルで使用されるものとは少し異なっており、2つの開閉器の接続点にも定義される。接続子は、関連する開閉器群をまとめたものである。以下にこれらのオブジェクトのOPS83での記述例を示す。

```
Type node = record  --ノード
(
  NDPKN      :symbol;  -- point key name
  ND_IDX     :integer;  -- node index
  ND_TYP     :symbol;  -- node type
  NDSSNAME   :symbol;  -- SS name
  NDNAME     :symbol;  -- node name
  CELLPTR   :integer;  -- to cell pointer
  ND_STS     :symbol;  -- status
  NDOPE_STS  :symbol;  --operating ststus
  NETWORK    :integer;  -- network index
)
Type branch = record  --ブランチ
(
  BRPKN      :symbol;  -- point key name
  BR_IDX     :integer;  -- branch index
  BR_TYP     :symbol;  -- branch type
  BRSSNAME   :symbol;  -- SS name
  BRNAME     :symbol;  -- branch name
  NF         :integer;  -- from node index
  NT         :integer;  -- to node index
  BR_STS     :symbol;  -- ststus(on/off)
  BROPE_STS  :symbol;  -- operating status
)
```

```

Type cell = record  -- 接続子
(
  CELL_IDX      :integer;  -- cell index
  NUM           :integer;  -- number of branches
  BR            :array(10:integer); -- branch index
)

```

## (2) プロダクションルール

問題を解決するためには、オブジェクト間の関係を表す知識（プロダクションルール）が必要である。本システムには、図 3.1 の処理の流れの (2) ~ (5) に対応する以下のプロダクションルールを備えている。

- (a) 操作順序決定ルール
- (b) 停止側手順決定ルール
- (c) 使用側手順決定ルール
- (d) 操作シミュレーションルール

例えば、以下は上記 (d) に含まれるルールの例である。

(プロダクションルール)

```

IF      操作指令用語が“ループ切替(作業)”である
THEN   相手回線の引込線の接続子(開閉器群)の状態を“閉”とし、
        操作対象設備(引込線)に対応する接続子(開閉器群)の状態を“開”とする

```

このルールを OPS 83 言語で示すと以下のようなになる。

```

Rule exp10
{
  &G(goal staus = active; class = step4 );
  &F(fact command = "loop change(mnt)");
  -->  &n1 = &F.node1;
        &n2 = &F.node2;
        call dBupdate(on, &n2, mnt);
        call dBupdate(off, &n1, mnt);
        modify &G(status = done; class = step4);
};

```

## (3) 推論エンジン

標準的な推論エンジンが OPS 83 システムには付属している。この推論エンジンもまた OPS 83 で記述されている。本システムではこの推論エンジンをそのまま使用している。



### 3.4 適用例

本システムの有効性を確認するために、実システムの一部をモデル化した送電系統に適用しケーススタディを行った。その中から停止対象設備が1つと2つの場合のケースを図3.7の系統（モデル系統の一部）を用いて説明する。

まず、本システムの利用者はパソコン右に表示されている系統図を操作当日の系統構成に変更する。すなわち、マウスカーソルを開閉器のシンボルに合わせてクリックして開閉器の状態（開、閉）を変更し、操作当日系統が完成したら画面の下部にある“確認”をクリックする。この時点でこの系統は初期系統としてデータベースに格納され、画面上には停止件名の入力画面が表示される。停止件名は停止対象の設備や機器に対応するポイントキーネーム（8桁の英数字）と作業開始・終了時間と作業目的を入力する。この件名は複数の入力が可能である。そして、この停止件名の入力が完了すると推論が開始され、推論が完了すれば、パソコン左に合成された操作指令手順表がパソコン右に初期系統（操作当日系統）が表示される。利用者はこの2つの画面を用いて操作指令手順表の妥当性をステップ毎に検証できる。この模擬操作の実行時には、操作内容が音声出力されるので系統図の変化に利用者の意識を集中させることができるようになりより確実な検証ができる。

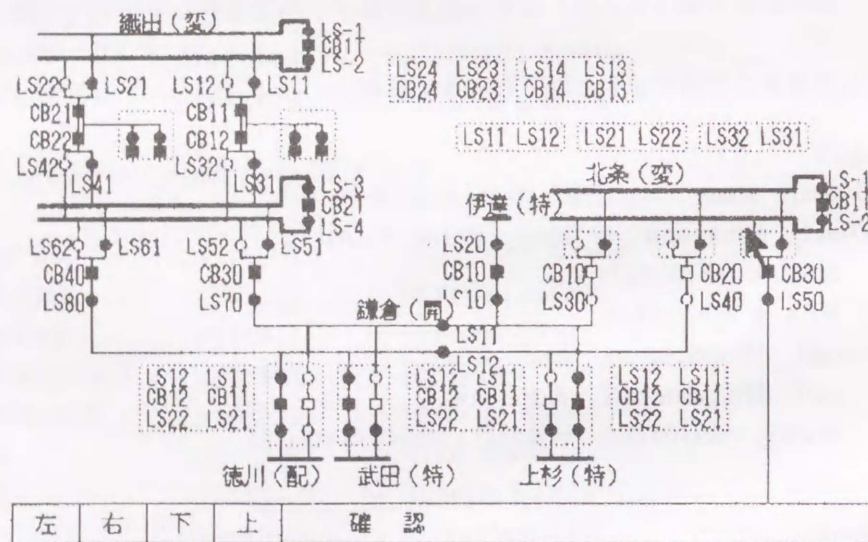


図 3.7 対象系統（一部）と停止対象設備

### 3.4.1 ケース1 (単一の停止件名)

まず、比較的簡単な例として以下に示す送電線 1 回線の停止件名の手順を作成する。本例では織田変電所から鎌倉開閉所の送電線の予定作業停止の操作指令手順を作成しなければならないが、鎌倉開閉所の開閉器は無電圧操作の単独LSであることに注意しなければならない。すなわち、3.2.4 項で示した「関連停電設備グループ」G bと「従属停止設備グループ」G cに関連したより知的な手順を合成しなければならない。

停止対象設備	停止時間	終了時間	作業目的
織田-鎌倉線 1 L	8 : 0 0	1 9 : 0 0	予定作業停止

図 3.8 に本システムが合成した操作指令手順を示す。第 1 ～ 1 3 手順が停止側操作指令手順であり、第 1 4 ～ 2 5 手順が使用側操作指令手順である。

## 操作指令手順表

停止件名： 織田-鎌倉線 1 L

番号	所名	操 作 内 容	
1	武田 (特)	武田線 1 L	LS11 開放確認
2	武田 (特)	武田線 1 L	LS11 操作ロック
3	上杉 (特)	上杉線 1 L → 2 L	ループ切替 (運用)
4	上杉 (特)	上杉線 1 L	LS11 操作ロック
5	徳川 (配)	徳川線 1 L	作業停止
6	伊達 (特)	伊達線 1 L	受電停止 (運用)
7	北条 (変)	北条-鎌倉線 1 L	運用停止
8	織田 (変)	織田-鎌倉線 1 L	作業停止
9	鎌倉 (開)	鎌倉-織田線 1 L	LS11 開く
10	北条 (変)	北条-鎌倉線 1 L	使用
11	伊達 (特)	伊達線 1 L	受電
12	織田 (変)	織田-鎌倉線 1 L	A 接地つける
13	---	織田-鎌倉線 1 L	作業開始
14	---	織田-鎌倉線 1 L	作業終了
15	織田 (変)	織田-鎌倉線 1 L	A 接地はずす
16	伊達 (特)	伊達線 1 L	受電停止 (運用)
17	北条 (変)	北条-鎌倉線 1 L	運用停止
18	鎌倉 (開)	鎌倉-織田線 1 L	LS11 入れる
19	織田 (変)	織田-鎌倉線 1 L	使用
20	北条 (変)	北条-鎌倉線 1 L	復旧
21	伊達 (特)	伊達線 1 L	受電
22	徳川 (配)	徳川線 1 L	使用
23	上杉 (特)	上杉線 1 L	LS11 ロック解除
24	上杉 (特)	上杉線 2 L → 1 L	ループ切替 (運用)
25	武田 (特)	武田線 1 L	LS11 ロック解除

図 3.8 操作指令手順 (ケース 1)



## 3.4.2 ケース2（複数の停止件名）

次に、動的検証に対するシステムのレスポンスを示すために複数の停止件名に対する手順を作成する。本ケースの停止対象設備は、送電線と送電線に接続している遮断器であり、停止の時間帯（停止時刻から使用時刻まで）が互いに関連するやや複雑なものである。

停止対象設備	停止時間	終了時間	作業目的
織田-鎌倉線 1 L	8 : 0 0	1 9 : 0 0	予定作業停止
織田 (変) CB 3 0	1 0 : 0 0	1 5 : 0 0	予定作業停止

図 3.9 は、操作指令手順作成中に知識の動的検証により知識に不備があることが指摘されている例である。第 17 手順の遮断器の作業終了後の使用操作で、“作業中”であるべき送電線への課電が発生し、システムが警告メッセージを出力している。すなわち、これは 3.2.1 項で述べた制約条件 (C-3) 「操作の安全を確保する」に対応した動的検証用の知識により導出された結果である。この警告メッセージをもとに知識ベースを調べてみると、遮断器の作業終了後の使用側操作の時点で、使用側操作により他の停止対象設備に影響を与えるか否かの検証を実施しなければならないことがわかる。すなわち、指令用語を「使用」ではなく「復旧」にするための知識が不足していたのである。このような知識を追加すれば、図 3.10 に示すように妥当な操作指令手順が作成される。同図において、第 3 手順が「関連停電設備グループ」に対する停電回避手順であり、第 10～11 手順が「従属停止設備グループ」への再課電手順である。

<<AI 応用平常時操作指令手順作成・検証システム>>

停止件名を入力して下さい

設備コード	機器コード	目的	開始時間	終了時間	c/e
LN001001	—	sagyou	8:00	19:00	c
—	CB001001	sagyou	10:00	15:00	e

平常時指令手順の作成を開始します

- |    |        |        |           |      |            |
|----|--------|--------|-----------|------|------------|
| 1  | 武田 (特) | 武田線    | 1 L       |      | 開放確認       |
| 2  | 武田 (特) | 武田線    | 1 L       | LS11 | 操作ロック      |
| 3  | 上杉 (特) | 上杉線    | 1 L → 2 L |      | ループ切替 (運用) |
| 4  | 上杉 (特) | 上杉線    | 1 L       | LS11 | 操作ロック      |
| 5  | 徳川 (配) | 徳川線    | 1 L       |      | 作業停止       |
| 6  | 伊達 (特) | 伊達線    | 1 L       |      | 受電停止 (運用)  |
| 7  | 北条 (変) | 北条-鎌倉線 | 1 L       |      | 運用停止       |
| 8  | 織田 (変) | 織田-鎌倉線 | 1 L       |      | 作業停止       |
| 9  | 鎌倉 (開) | 鎌倉-織田線 | 1 L       | LS11 | 開く         |
| 10 | 北条 (変) | 北条-鎌倉線 | 1 L       |      | 使用         |
| 11 | 伊達 (特) | 伊達線    | 1 L       |      | 受電         |
| 12 | 織田 (変) | 織田-鎌倉線 | 1 L       |      | A 接地つける    |
| 13 | ———    | 織田-鎌倉線 | 1 L       |      | 作業開始       |
| 14 | 織田 (変) | 織田-鎌倉線 | 1 L       | CB30 | 作業停止       |
| 15 | ———    | 織田-鎌倉線 | 1 L       | CB30 | 作業開始       |
| 16 | ———    | 織田-鎌倉線 | 1 L       |      | 作業終了       |
| 17 | 織田 (変) | 織田-鎌倉線 | 1 L       | CB30 | 使用         |

```

*****
** The following illegal element was detected **
** in the working memory ! **
*****
<6>
(goalx statusx = lerror!;
 classx = ldeep30!;
 ssname = |織田 (変) |;
 ndname = |織田-鎌倉線 1 L|;
 ndstatus = |作業中|;)
*****
** Apparatus being maintained will be charged. **
** ----> Check the Knowledge-base **
*****

```

図 3.9 動的検証の例

### 操作指令手順表

停止件名：織田-鎌倉線 1 L + 織田 (変) CB01

番号	所名	操 作 内 容	
1	武田 (特)	武田線 1 L	開放確認
2	武田 (特)	武田線 1 L LS11	操作ロック
3	上杉 (特)	上杉線 1 L → 2 L	ループ切替 (運用)
4	上杉 (特)	上杉線 1 L LS11	操作ロック
5	徳川 (配)	徳川線 1 L	作業停止
6	伊達 (特)	伊達線 1 L	受電停止 (運用)
7	北条 (変)	北条-鎌倉線 1 L	運用停止
8	織田 (変)	織田-鎌倉線 1 L	作業停止
9	鎌倉 (開)	鎌倉-織田線 1 L LS11	開く
10	北条 (変)	北条-鎌倉線 1 L	使用
11	伊達 (特)	伊達線 1 L	受電
12	織田 (変)	織田-鎌倉線 1 L	A 接地つける
13	---	織田-鎌倉線 1 L	作業開始
14	織田 (変)	織田-鎌倉線 1 L CB30	作業停止
15	---	織田-鎌倉線 1 L CB30	作業開始
16	---	織田-鎌倉線 1 L CB30	作業終了
17	織田 (変)	織田-鎌倉線 1 L CB30	復旧
18	---	織田-鎌倉線 1 L	作業終了
19	織田 (変)	織田-鎌倉線 1 L	A 接地はずす
20	伊達 (特)	伊達線 1 L	受電停止 (運用)
21	北条 (変)	北条-鎌倉線 1 L	運用停止
22	鎌倉 (開)	鎌倉-織田線 1 L LS11	入れる
23	織田 (変)	織田-鎌倉線 1 L	使用
24	北条 (変)	北条-鎌倉線 1 L	復旧
25	伊達 (特)	伊達線 1 L	受電
26	徳川 (配)	徳川線 1 L	使用
27	上杉 (特)	上杉線 1 L LS11	ロック解除
28	上杉 (特)	上杉線 2 L → 1 L	ループ切替 (運用)
29	武田 (特)	武田線 1 L LS11	ロック解除

図 3.10 操作指令手順 (ケース 2)



## 3.5 結言

本章では、パソコンによる知識ベースによる電力系統の平常時操作支援システムについて提案した。「平常時操作」の基本的な考え方に基づいたより深い知識を用いて、検証用知識数を少なくした動的検証機構を備え、さらに安価なパソコンと汎用的な言語を用いて開発コストを抑えた平常時操作支援システムが構築できた。実系統規模のモデルシステムを用いたケーススタディにより本システムの有効性を示した。本システムは、実用の操作支援システムだけでなく、系統運転員の新人教育用システムとしても有効であると考えている。すなわち、異なった系統構成と停止対象設備に対して、知識ベース処理で作成した手順の操作を画面上で繰り返し実行することにより、短期間に熟練運用者が行う操作のノウハウを体得できると予想される。

実際の制御所等で実施されている操作シミュレーションは、2つのCRT表示装置に系統図と操作指令手順表を表示させ、1手順ステップ毎に模擬操作を実施し、その系統状態変化の可否を目視により判定している。本システムでも、パソコン右はスクロール付きの系統図、パソコン左は操作指令手順表を表示させているため、実システムと同様な操作シミュレーションが可能である。さらに、操作対象の手順ステップの内容の音声出力も付加したため、運用者は系統の状態変化に意識を集中させることができ、より確実な手順ステップの検証ができる。また、図3.10に示す程度（30手順ステップ程度）の操作指令手順を作成するための所要時間は、運用者が考えながら行う手動設定方式だと20分程度であるが、本システムでは5秒程度である。

電力系統制御のための計算機は信頼性と性能の面で制御用計算機が不可欠であるが、本章で対象としたようなオフライン的な業務を支援する計算機システムには、パソコンでもかなりの部分がカバーできるように考えられる。しかし、系統運用計算機システムの一部としてパソコンによるシステムを組み込むためには、パソコン側のデータと系統運用計算機側のデータの共有化をいかに実現するかが大きな課題であるが、適切なコンピュータネットワークを構築し分散処理環境として実現するのも一方法であろう。

## 第4章 線形計画法の適用による復旧目標系統の決定

本章では、「事故時操作」に関して、線形計画法の適用による復旧目標系統の決定方法について述べる。電力系統において事故が発生した場合は、生じた供給支障を解消するための系統操作が行われる。これは、過負荷や電圧になどに関する制約のもとで、供給支障電力最小、供給支障電力量最小（すなわち復旧時間最小）などを目的とした操作となる。開閉器による系統の接続・切離し操作や、過負荷解消のための負荷切離し操作を伴うため、系統の離散的状態を扱う組合せ最適化問題として考えることができる。本章では、放射状系統を対象に、系統をグラフ表現し、運用者の復旧戦略を“復旧操作コスト”としてブランチに割り当て、最小費用流問題として非常に高速に解く方法を提案する。この方法は、ネットワークシンプレックス法と呼ばれる範疇に属するものであり、グラフ的なデータ構造を用いることにより効率的なプログラムが構築できる。そして、実系統の事故例に本方式を適用して評価し、通常の運転状態に対しては極めて高速に解が得られることを示す。本章の内容は、一連の研究成果をまとめた論文（42, 47）に基づいたものである。

### 4.1 概説

#### 4.1.1 事故時操作の自動化に関する概況

電力系統に事故による停電が生じた場合、まず事故設備を特定し、迅速に事故設備を含む区間以外の停電系統を復旧しなければならない。このような事故設備以外の停電系統を復旧していく操作を事故復旧と呼んでいる。従来、事故復旧における復旧目標系統の決定は系統運用の熟練者が行っているが、系統保護システムの充実により、実際に系統運用者が大規模な系統事故に遭遇する機会が非常に少なくなってきている。このような状況を踏まえて、事故復旧を自動化する試みが積極的に採られている。「事故時操作」に関連した研究は、「平常時操作」に比較して非常に多くの研究が実施されている。国内では、昭和48年（1973年）に鈴木ら<sup>(3)</sup>が実際の系統で実際に行っていた運用を計算機により模擬したものが最初であろう。海外でも「事故時操作」の自動化に関する興味は高く、多くの論文が提出されている。計算機による事故復旧に用いられる手法は、複数の復旧論理の適用による「論理生成方式」、 「知識ベース処理



方式」，そして「数理計画的方式」による方法の3つに大別される。「事故時操作」を体系的に紹介している文献は，国内では電気学会技術報告の“電力系統の事故時操作”<sup>(29)</sup>が，海外ではIEEEの“Power System Restoration - A Task Force Report”<sup>(13)</sup>がある。

まず，複数の復旧論理の適用による「論理生成方式」は，かなり古くから検討されているものである。いずれも運用者の実施している方式を検討して計算機に置き換えられる部分をプログラム化する方法を採っている。超高圧・一次系を対象に事故後の分離系統を把握しその分離系統毎に試行錯誤的に復旧方針を決定する方式<sup>(3)</sup>や，二次系を対象に復旧負荷の優先順位と供給支障量を評価基準にして復旧操作の順序に焦点を当てたものがある<sup>(4)</sup>。そして，この方式は「平常時操作」と同様に昭和55年（1980年）から開始された“設備総合自動化計画プロジェクト”の「論理生成方式」による事故時操作の自動生成でほぼ完成した<sup>(18)</sup>。この「論理生成方式」は，運用者が実施している復旧の考え方をいくつかの処理単位にまとめ手続き型言語で記述し，リアルタイム性も考慮した本格的な方法である。この方式の検討時には，国内重電メカ三社（東芝，日立，三菱）がそれぞれ個別に同一の電力系統データを用いたプロトタイプシステムを約一年の期間かけて開発し，そのオンライン性能が徹底的に評価された。著者はこのプロトタイプシステムの開発を担当し，プログラム作成上の工夫（特に，データ構造）の結果，幸運にも三社の中で最高速のシステムを開発した経験を有している。特に，実システムでは国内の系統運用計算機では初めて計算機のデュアル方式（通常，デュープレックス方式）を採用し，二つの計算機で個別に計算し途中結果を互いに確認しあいながら処理を進める設計になっており信頼性の高いシステムになっている。現在も同一のソフトウェアが十数箇所の給電所で順調に稼働している。しかしながら，ソフトウェア規模が非常に大きくなっておりソフトウェアメンテナンスの点からすると難点があると言わざるを得ない。海外では，復旧操作回数の低減を目標とした一括充電のシミュレーション<sup>(5)</sup>や，計算機との会話により復旧方針を決定する方法<sup>(6)</sup>が検討されているが，国内での全自動化を目指した研究に比較して一部機能の自動化を目標としており，その内容はかなり異なっている。これら複数の復旧論理の適用による方式は，第2章の論理生成による平常時操作指令手順の作成と同様な手法であるため，本論文ではこれ以上立ち入らない。

一方，「知識ベース処理方法」は，問題解決の手続きを汎用性をもつ推論機構と問題向きの知識に分離した手法である。現在のところ実システムの多くはこの知識ベースによる方法を採用している。この理由は，運転員の経験を知識として蓄積し復旧操作手順を推論するエキスパートシステムとして導入されているからである。これは，誤った操作を行わないことを大前提に，準最適でありさえすれば厳密に最適な操作手順である必要はないとする考え方に基づくものである<sup>(29)</sup>。しかしながら，知識ベースに基づくシステムは，その開発や維持に要するコスト（開発工数・保守費用等）が増大してしまうという問題点が指



摘されている。坂口と松本は、昭和58年（1983年）に「事故時操作」に初めて知識工学を適用した<sup>(8)(10)</sup>。この論文が引き金になって、国の内外を問わず電力の分野への知識工学の適用が積極的に実施されるようになった。昭和63年（1988年）に、九州電力の武雄制御所で運用開始されたシステムが電力系統へ適用された実用エキスパートシステムの第一号である。その後、幾つかの実用システムが開発されてきている。

次に、「数理計画的方式」は、目的を達成する上で課される数々の制約条件を等式・不等式制約条件で表し、なんらかの評価に基づいて数式化された目的関数を最大もしくは最小とする解を決定する手法である。開閉器の入り切りを0-1変数に、潮流値を連続変数に割当てた混合整数計画問題として定式化し、分枝限定法やその改良方法により解くものであり、比較的最近になってから研究され始めたものである。奈良は<sup>(11)</sup>、「遮断器操作回数最小化」を目的関数にして辞書的列挙法を適用した解法を示している。駒井ら<sup>(12)</sup>は、「供給支障量最小化」問題として分枝限定法により解いている。さらに、辻ら<sup>(19)</sup>は、線路潮流を変数として通常の線形計画法として定式化しシンプレックス法を用いた解法を示している。また、中村<sup>(37)</sup>は、系統をグラフ表現し最小木を用いて復旧目標系統を求める方法を示している。しかし、これらの手法による解は単一の目的関数の実現を目指すものであり、運用面から馴染まない系統が構成されるという問題点があった。その後、著者<sup>(42, 47, 53, 54, 58)</sup>により本論文で示している“復旧操作コスト”の概念を導入し、運用面からも満足のいく解が得られるように工夫した一連の研究がなされている。一般に、「数理計画的方式」は、最適な結果が得られるという長所があるものの、計算時間が長いために未だ実用化の例がないものである。しかし、計算機ハードウェアの著しい性能向上と優れたアルゴリズムの開発により、前述の「知識ベース方式」の欠点を克服する目的で、その方式に代わる（あるいは、補完する）方式であると考えられる。第6章では、このような見地から「知識ベース方式」に「数理計画的方式」を取り込んだ実用に近づいた方式を提案する。

#### 4.1.2 提案手法の概況

ここで述べる線形計画法の適用による復旧目標系統の決定方式は、計算時間の短縮と運用者の復旧戦略に沿った系統構成の作成を目標とした方式である。文献（19）は、復旧目標系統の決定を「事故により使用不能となった設備が与えられたとき、送電損失、燃料費損失、需要家の停電損失の線形和を最小とする復旧目標系統を決定せよ」と定式化して解いている。しかし、運用者の考える復旧操作との整合性の点から解の妥当性についての検討が行なわれていない。文献（37）は、グラフ表現された系統に対してグラフ理論の最小木を数理計画法により解き、過負荷情報を巧みに組み合わせて復旧目標系統を決定し、

さらに運用者の復旧操作との整合性についての検討も行っている。しかし、この方法は多くのパラメータをうまく決定する必要があり、数理計画法の熟練者のもつパラメータの設定に関する知識が要求されるためその実用化は困難である。

本章では、地方供給系統で広く使用されている放射状系統を対象に、復旧目標系統の決定に線形計画法を適用する方法を提案し、実系統へ適用しその有効性を検証する。本方式においては、復旧目標系統の作成問題を復旧操作の優先度をブランチコストに対応させ、最小費用流問題に置き換えて線形計画法により解く。本手法は、従来のSCADAシステムに登録されているブランチデータに、復旧操作の優先度に対応したコストを追加するだけで良く、非常に簡単である。また、得られたトータルコストが開閉器操作量に一致しているので運用者の理解が得られやすいという長所もある。

## 4.2 事故復旧問題の定式化

### 4.2.1 基本的考え方

提案する復旧目標系統の決定方法の基本的考え方は、下記のとおりである。

- (1) 各ブランチに操作の優先度に対応させたコスト（復旧操作コストと称する）と、設備許容値に対応させた容量を持たせる。
- (2) 電源の各ノードに応援可能電力値（有効電力）と、負荷の各ノードに負荷電力値（有効電力）を持たせる。
- (3) 上記（1）（2）のデータを用いて、復旧目標系統を線形計画問題の最小費用流問題として解き、有効潮流の分布から復旧目標系統を決定する。

### 4.2.2 最小費用流問題としての定式化

この問題は線形計画問題の代表例として古くから研究されている。Dantzing は、最小費用流量問題の基底行列が基底木というグラフ構造で表わされることを示している<sup>(9)</sup>。ここでは、簡単にその概要について述べる。n個のノードとm本のブランチをもつネットワークを考えよう。有向ブランチkは、図4.1に示すようにその始点NF(k)と終点NT(k)で表わされ、非負の容量U(k)と単位流量あたりの費用係数C(k)をもつ。各ノードiの流量B(i)は、B(i) > 0ならば湧き出し点、B(i) < 0ならば吸い込み点であり、B(i) = 0ならば流入量と流出量が等しい通過点である。図4.2はこのようなネットワークの一例である。



最小費用流量問題は、このネットワーク上で、ノード  $i$  の流入出力量  $B(i)$  およびブランチ  $k$  の容量  $U(k)$  の制約を満たし、かつ全ブランチの費用の和を最小にする非負の流れ  $X(k)$  を求める問題であり、次のように定式化できる。

目的関数：

$$\text{minimize } \sum_k C(k)X(k) \quad (4.1)$$

制約条件：

$$\begin{aligned} \sum_{k \in F} X(k) - \sum_{k \in T} X(k) &= B(i) \\ F &= \{k \mid NF(k) = i\} \\ T &= \{k \mid NT(k) = i\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq X(k) &\leq U(k) \\ &(k = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\sum_i B(i) = 0 \quad (4.4)$$

ここで、 $C(k)$  は正負いずれでも良く、また、(4.4) 式は全流入出力量の均衡条件である。

最小費用流量問題の初期実行可能解を得るには、ネットワークに追加ノード  $(n+1)$  を設け、 $B(i) \geq 0$  なるノードからは、ブランチ  $k = (i, n+1)$  を作り  $X(k) = B(i)$  とおく。 $B(i) < 0$  のノードからは、ブランチ  $k = (n+1, i)$  を作り、 $X(k) = -B(i)$  とする。その他のブランチについては  $X(k) = 0$  とする。追加ブランチの費用係数は十分大きな正の値  $L$ 、その容量も十分大きな正の値  $U$  と定める。また、 $B(n+1) = 0$  とする。図 4.2 の網かけの部分がこの追加ノードとブランチを示している。

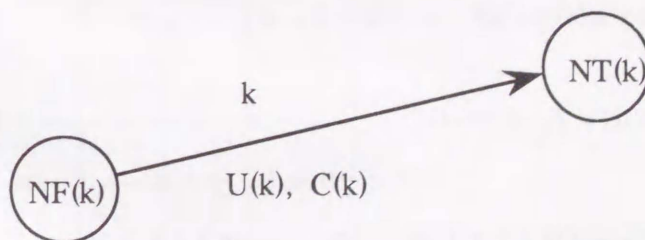
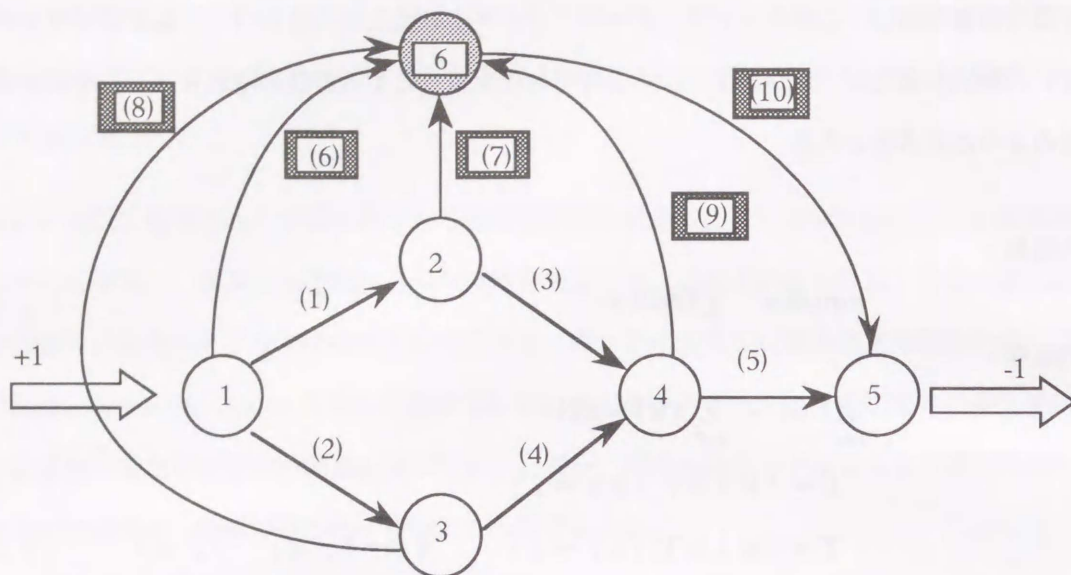


図 4.1 ブランチ  $k$  の容量  $U(k)$  とコスト  $C(k)$





ブランチ (6) ~ (10) は初期実行可能解を得るために追加された仮想ブランチ  
追加ブランチの方向に注意のこと

図 4.2 ネットワークの例

このように修正した後の最小費用流量問題は、以下ようになる。

目的関数：

$$\text{minimize } \sum_k C(k)X(k) \quad (4.5)$$

制約条件：

$$\sum_{k \in F} X(k) - \sum_{k \in T} X(k) + \text{sgn}(B(i)) \cdot X(m+i) = B(i)$$

$$F = \{k \mid NF(k) = i\}$$

$$T = \{k \mid NT(k) = i\}$$

$$(i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.6)$$

$$0 \leq X(k) \leq U(k) \quad (k = 1, 2, \dots, m') \quad (4.7)$$

$$C(k) = L, \quad U(k) = U \quad (4.8)$$

$$(k = m+1, m+2, \dots, m')$$

$$\text{sgn}(B(i)) = \begin{matrix} 1 & : & B(i) \geq 0 \\ -1 & : & B(i) < 0 \end{matrix}$$

ここで、 $m'$  ( $=m+n$ ) は修正後のブランチ数であり、また、追加ノード ( $n+1$ ) の制約条件は他の  $n$  個のノードの条件で表されるため除いてある。

制約条件の係数行列を、図 4.2 の例により示すと以下のようになる。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(1)	1	1				1				
(2)	-1		1				1			
(3)		-1		1				1		
(4)			-1	-1	1				1	
(5)					-1					-1

(1 : ノードから流出, -1 : ノードへ流入)

この制約条件の係数行列から適当な  $n \times n$  正則部分行列を選ぶと 1 つの基底行列が定まる。例として、第 2, 3, 4, 7, 10 列からなる基底行列を考えてみる。

	2	3	4	7	10
(1)	1				
(2)		1		1	
(3)	-1		1		
(4)		-1	-1		
(5)					-1

(4.9)

この基底行列  $B$  の行と列を入れ替えると、 $B$  は上三角行列になる。本例の結果を以下に示す。

	10	7	3	4	2
(5)	-1				
(2)		1	1		
(4)			-1	-1	
(3)				1	-1
(1)					1

(4.10)

これをグラフで表現すると図4.3 (a) となり、ブランチは閉路を作らず全域木となる。ここで、非零要素をただ1つ持つ列は、対角要素のノードと追加ノード6と接続するブランチを表す。

全域木において、追加ノードを根として全てのブランチの方向を根に向けたものを基底木という。図4.3 (b) に基底木を示す。これは、逆方向のブランチkについて、変数X (k) を変数U (k) - X (k) に置換えることに相当する。その結果、行列Bの対角要素は全て1に統一される。

	1	0	7	3	4	2	
(5)	1						
(2)			1	1			
(4)				1	-1		
(3)					1	-1	
(1)						1	(4.11)

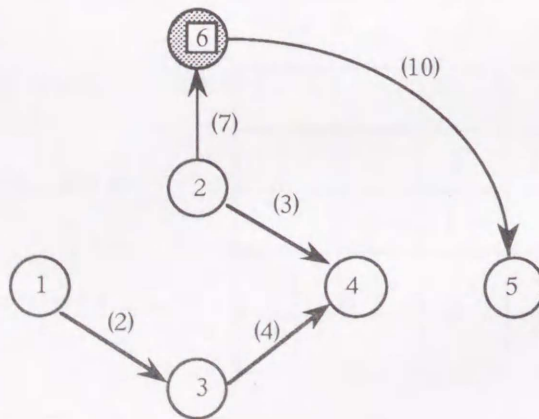
基底木のブランチは基底変数に、それ以外のブランチは非基底変数に対応する。また(4.7)式により、非基底変数X (k) は下限値0あるいは上限値U (k) に固定される。基底変数の値は、Bが三角行列であることを利用すれば、簡単に求めることができる。

すなわち、基底木の葉ノードから根に向けて、各ノードの流量の制約条件を満足するように、そのノードから出るブランチ(基底変数)の流量を決めればよい。

得られた解が、全ての基底変数X (k) について、

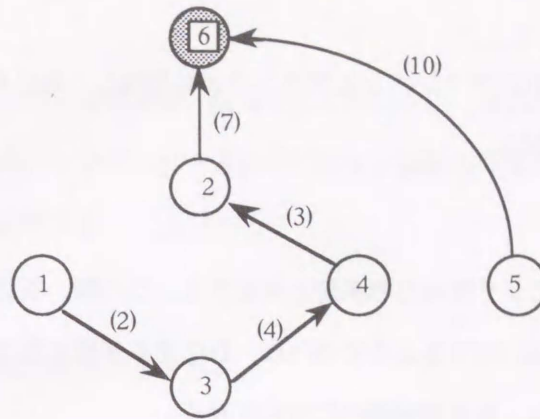
$$0 \leq X (k) \leq U (k)$$

を満足すれば、実行可能解である。この実行可能解を出発点にして線形計画法で最適解を求めていく。



(a) 基底を表わす木





(b) 基底木

図4.3 基底のグラフ表現

## 4.3 実現方法

### 4.3.1 処理の流れ

図4.4に具体的な処理の流れを示す。以下、図に従って説明する。

#### (1) 系統データの読み込み

事故設備を除いた電力系統のノード・ブランチの接続関係と、事故前の負荷データ、およびブランチの容量（設備容量に対応）とコスト（復旧操作コスト）のデータを読み込む。

#### (2) 初期基底木の作成

基底木の根になる追加ノード ( $n+1$ ) と、 $n$ 本の追加ブランチにより構築する。

#### (3) ピボット列の選択

新たに基底に入るべきブランチ  $k$  を求める。

#### (4) 終了判定

ピボット列が選択されなければ、最適解が得られたことになり、(7)の処理に移る。

#### (5) 非基底変数の決定

新たに非基底変数になるブランチ  $r$  を決定する。

(6) 基本木の更新

(3) と (5) で得られたブランチ  $k$  とブランチ  $r$  を交換し “基底木” を再構築する。  
 そして (3) の処理に戻る。

(7) 操作開閉器の決定

ブランチ上の潮流分布により復旧目標系統を決定する。この際、基底木の根と負荷ノード間の追加仮想ブランチに潮流が現れるようであれば、対応する基底変数は実行不可能基底解である。そのような負荷ノードは、負荷切離操作に対応させる。

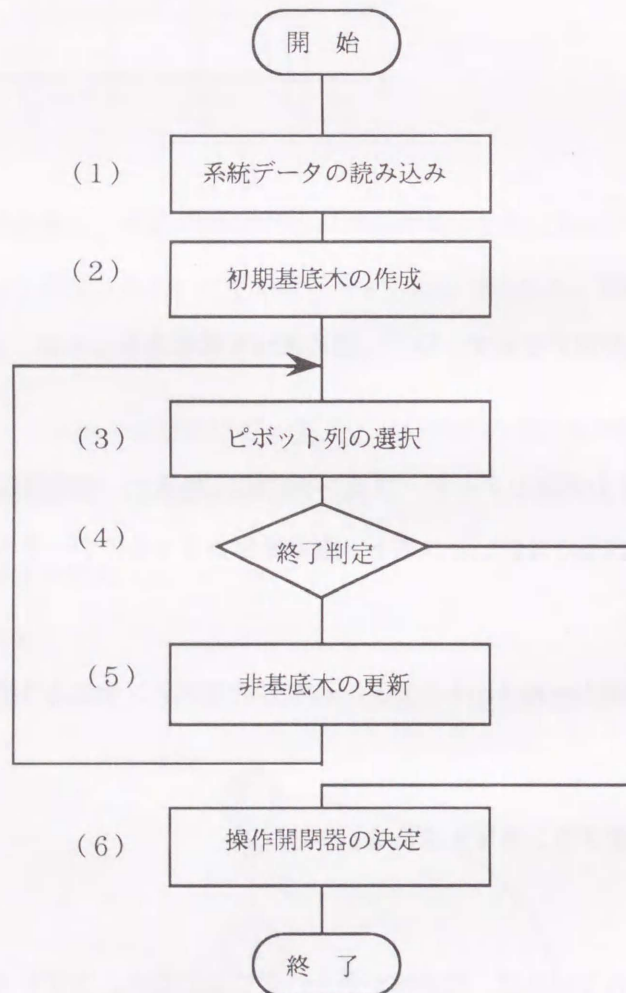


図4.4 処理の流れ

## 4.3.2 効率的な計算方法

本章で扱っているような最小費用流問題は、前項で示したように“基底行列”が“基底木”というグラフ構造で表すことができるため、シンプレックス法のピボット演算の効率の良い解法を設計することができる。以下その方法について説明する。

## (1) 線形計画問題の標準形

まず、線形計画問題の標準形は次式で示される。

目的関数：

$$\text{minimize } C^T X = b \quad (4.12)$$

制約条件：

$$\begin{aligned} AX &= b \\ \ell &\leq X \leq u \end{aligned}$$

Aは $m \times n$ 行列、 $x$ ,  $\ell$ ,  $u$ ,  $c$ は $n$ 次元ベクトル、 $b$ は $m$ 次元ベクトル、 $T$ は転置記号である。

まず、制約条件の係数行列Aの列から正則な正方行列B ( $m \times m$ )を構築するために、 $m$ 本の列ベクトルを選ぶ。さらに、残りの $(n - m)$ 本の列ベクトルの集合を適当に分割して得られる行列を $N_1$ ,  $N_2$ とする。 $N_1$ は $m \times n_1$ 行列、 $N_2$ は $m \times n_2$ 行列とする ( $n_1 + n_2 = n - m$ )。

$$A = [ B, N_1, N_2 ] \quad (4.13)$$

この分割に伴って、ベクトル $x$ ,  $\ell$ ,  $u$ ,  $c$ も以下のように分割できる。

$$X = \begin{bmatrix} X_B \\ X_{N_1} \\ X_{N_2} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_B \\ C_{N_1} \\ C_{N_2} \end{bmatrix}, \quad \ell = \begin{bmatrix} \ell_B \\ \ell_{N_1} \\ \ell_{N_2} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_B \\ u_{N_1} \\ u_{N_2} \end{bmatrix}$$

このようにして選ばれた正則な行列Bは、基底行列と呼ばれ、Bの各列に対応する変数 $x_B$ を基底変数、それ以外の変数を非基底変数という。

この分割に伴って、LP問題(4.12)の制約条件式は、

$$B \cdot X_B + N_1 \cdot X_{N_1} + N_2 \cdot X_{N_2} = b \quad (4.14)$$

となるので、



$$X_B = B^{-1}(b - N_1 \cdot \ell_{N_1} - N_2 \cdot u_{N_2}) \quad (4.15)$$

$$X_{N_1} = \ell_{N_1}, \quad X_{N_2} = u_{N_2} \quad (4.16)$$

として解が一つ得られる。この解を基底解と呼ぶ。

$$X = (X_B, X_{N_1}, X_{N_2})$$

もし、この解が

$$\ell_B \leq X_B \leq u_B$$

を満足すれば、LP問題の全ての制約条件式を満足するので、実行可能基底解と呼ぶ。

線形計画法では、もし最適解が存在するなら、実行可能基底解の中に最適解が必ず存在することが知られている。このような実行可能基底解の有限集合の中から最適解を系統的に求める方法はシンプレックス法として知られている。

いま、一つの実行可能解

$$X = (X_B, X_{N_1}, X_{N_2})$$

が得られているものとすれば、

$$X_B + B^{-1}N_1 \cdot X_{N_1} + B^{-1}N_2 \cdot X_{N_2} = B^{-1}b \quad (4.17)$$

が成立する。目的関数値を  $z$  とすれば、

$$z - C^T X = z - C_B^T X_B - C_{N_1}^T X_{N_1} - C_{N_2}^T X_{N_2} = 0$$

であるが、この式から (4.17) 式を用いて基底変数  $X_B$  を消去すれば

$$z + (C_B^T B^{-1}N_1 - C_{N_1}^T)X_{N_1} + (C_B^T B^{-1}N_2 - C_{N_2}^T)X_{N_2} = C_B^T B^{-1}b$$

すなわち、目的関数は次式で表される。

$$z = C_B^T B^{-1}b + \bar{C}_{N_1}^T X_{N_1} + \bar{C}_{N_2}^T X_{N_2} \quad (4.18)$$

ただし、

$$\bar{C}_{N_1}^T = C_{N_1}^T - C_B^T B^{-1}N_1 \quad \bar{C}_{N_2}^T = C_{N_2}^T - C_B^T B^{-1}N_2 \quad (4.19)$$

この基底において、非基底変数は下限 ( $\ell_{N_1}$ ) と上限 ( $u_{N_2}$ ) の値をとるので、目的関数の値は、

$$\bar{z} = C_B^T B^{-1}b + \bar{C}_{N_1}^T \cdot \ell_{N_1} + \bar{C}_{N_2}^T \cdot u_{N_2} \quad (4.20)$$

であり、基底変数  $X_B$  は、

$$\bar{b} = X_B = B^{-1}(b - N_1 \cdot \ell_{N_1} - N_2 \cdot u_{N_2}) \quad (4.21)$$

である。

ここで、非基底変数  $x_{N_1}$  と  $x_{N_2}$  の値を現在の値から変化させることを考える。すなわち、

$$X_j = \ell_j \longrightarrow X_j = \ell_j + \Delta_j \quad (j \in N_1, \quad \Delta_j \geq 0) \quad (4.22)$$

$$X_j = u_j \longrightarrow X_j = u_j - \Delta_j \quad (j \in N_2, \quad \Delta_j \geq 0) \quad (4.23)$$

が許容される変化である。

一方、(4.17) 式は

$$\bar{A}_{N_1} = B^{-1}N_1, \quad \bar{A}_{N_2} = B^{-1}N_2 \quad (4.24)$$

とすると、基底変数は次式で表される。

$$X_B = B^{-1}b - \bar{A}_{N_1}X_{N_1} - \bar{A}_{N_2}X_{N_2} \quad (4.25)$$

(4.22) (4.23) 式のような非基底変数の変化に対応して、基底変数  $x_B$  の各成分は、各成分  $x_{B_i}$  に対応して、(4.21) (4.25) 式より

$$X_{B_i} = \bar{b}_i - \sum_{j \in N_1} \bar{a}_{ij} \Delta_j + \sum_{j \in N_2} \bar{a}_{ij} \Delta_j \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (4.26)$$

となる。目的関数値は、(4.18) (4.21) 式より

$$z = \bar{z} + \sum_{j \in N_1} \bar{C}_j \Delta_j - \sum_{j \in N_2} \bar{C}_j \Delta_j \quad (4.27)$$

に変化する。ここで、 $\bar{C}_j$  は非基底変数の相対コスト係数（非基底変数の 1 単位の変化に対応する目的関数の変化量を示す）という。

以上をまとめると、ある実行可能解に対して、以下のシンプレックス・タブロー（単体表）得られる。実行可能解の一つ一つに対応してこのようなタブローが存在する。

	$X_{N_1}$	$X_{N_2}$	
$X_B$	$\bar{A}_{N_1}$	$\bar{A}_{N_2}$	$\bar{b}$
$z$	$-C_{N_1}^T$	$-C_{N_2}^T$	$\bar{z}$

(4.28)

基底変数  $x_B$  の値は、(4.21) 式より

$$X_{Bi} = \bar{b}_i \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (4.29)$$

と書けるので、実行可能性の条件より以下が成り立つ。

$$l_{Bi} \leq b_i \leq u_{Bi} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (4.30)$$

すなわち、タブローの列  $\bar{b}$  の各成分の値は、対応する基底変数に対する上下限値の間にある。

次に、現在の基底に対する目的関数は

$$z = C_B^T B^{-1} b + \sum_{j \in N1} \bar{C}_j X_j + \sum_{j \in N2} \bar{C}_j X_j \quad (4.31)$$

で与えられ、各非基底変数に(4.16)式を代入した(4.20)式の  $\bar{z}$  に等しい。

ところで、

$$C_j \geq 0 \quad (j \in N1) \quad (4.32)$$

$$C_j \leq 0 \quad (j \in N2) \quad (4.33)$$

が成立している時には、非基底変数の実行可能性を損なわない範囲でどのように変化させても、目的関数値を減少させることはできない。これは、現在の実行可能基底解がLP問題の最適解であることを示している。

## (2) ピボット列の選択

さて、シンプレックス法の基本ステップであるピボット列(新しく基底に入る変数)の選択とピボット演算が基底木を用いてどのように処理されるのかを示す。ピボット列には、(4.18)(4.19)式に従い非基底変数  $x_k$  の相対コスト係数

$$\bar{C}_k = C_k - C_B^T B^{-1} A_k \quad (4.34)$$

を求め ( $A_k$  は係数行列の第  $k$  列) 、

$$\bar{C}_k < 0 \quad x_k = 0 \quad \text{の場合} \quad (l_k = 0)$$

$$\bar{C}_k > 0 \quad x_k = u_k \quad \text{の場合}$$

を満たすものを一つ選択する。相対コスト係数を求めるためには、

$$d^T = C_B^T B^{-1} \quad (4.35)$$

を計算する。この  $d$  の各要素はポテンシャルと呼ばれ、 $B$  の三角性により容易に求めることができる。



すなわち、基底木の各ブランチ  $k$  にコスト

$c_k$  : ブランチ  $k$  が  $x_k$  を表す場合

$-c_k$  : ブランチ  $k$  が  $(u_k - x_k)$  を表す場合 (方向を変えたブランチ)

を与え、根  $(n+1)$  のポテンシャル  $d_{n+1} = 0$  から下に向かって、親ノード  $j$  のポテンシャル  $d_j$  に上記のコストを加えて子ノード  $i$  のポテンシャル  $d_i$  を計算すればよい。

このようにして得られたポテンシャルを用いると、非基底変数の相対コスト係数は (4.34) 式より、

$$\bar{C}_k = C_k - d^T A_k$$

となるが、ブランチ  $k = (i, j)$  に対する  $A_k$  の第  $i$  要素は 1, 第  $j$  要素は  $-1$ , その他は 0 であるので、次式のように簡単に求められる。

$$\bar{C}_k = C_k - d_i + d_j \quad (4.36)$$

従って、非基底変数  $X_k$  に対して、

$$\bar{C}_k^* = \bar{C}_k \quad : \quad X_k = 0 \quad \text{の場合} \quad (4.37)$$

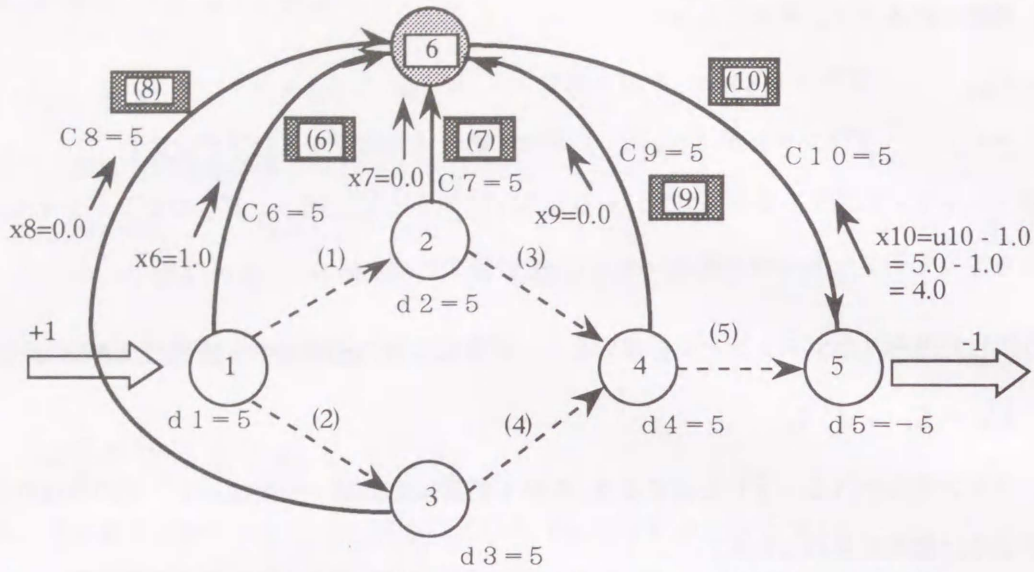
$$-\bar{C}_k \quad : \quad X_k = U_k \quad \text{の場合}$$

とすれば、

$$\bar{C}_k^* < 0 \quad (4.38)$$

を満たすものをピボット列に選択すればよい。

図 4.2 のネットワークに対する初期実行可能解における基底変数  $x_B$ , ポテンシャル  $d_i$ , 非基底変数  $x_k$  (図中の破線で示したブランチに対応) の相対コスト係数を図 4.5 に示す。この結果から、(4.38) 式によりピボット列に選択される非基底変数は  $x_5$  となる。



非基底変数	コスト	相対コスト係数
(1)	0. 1	0. 1 (=0. 1 - 5 + 5)
(2)	0. 2	0. 2 (=0. 2 - 5 + 5)
(3)	1. 0	1. 0 (=1. 0 - 5 + 5)
(4)	0. 3	0. 3 (=0. 3 - 5 + 5)
(5)	0. 4	-9. 6 (=0. 4 - 5 + (-5))

図 4.5 ピット列 (新しく基底に入る変数) の選択の説明図

(3) 非基底変数となる基底変数の決定

ピット列  $k$  が決定されると、次は  $x_k$  の変化の上限  $\Delta_k$  と、 $x_k$  に代わって非基底変数となる基底変数  $x_r$  の決定をする。 $\Delta_k$  は図 4.6 に示すようにブランチ  $k$  の端点  $j$ 、 $j$  の共通の祖先のうち深さ最大のもの  $p$  を通る閉路  $j \rightarrow i \rightarrow p \rightarrow j$  に沿って還流することのできる最大値に等しい。すなわち、閉ループを構成する各ブランチの  $\Delta_\ell$  のうちの最小値で抑さえられる。各ブランチの  $\Delta_\ell$  はブランチの方向に注意して以下のように与える。

(a) ブランチ  $k$  :  $\Delta_k = U_k$

(b)  $i \rightarrow p$  の路ブランチ  $\ell$  :

$\Delta_\ell = U_\ell - x_\ell$  (ブランチの向きが下から上の場合; ブランチ  $\ell$  の流れは  $X_\ell$ )

$\Delta_\ell = x_\ell$  (ブランチの向きが上から下の場合; ブランチ  $\ell$  の流れは  $\Delta_\ell = U_\ell - x_\ell$ )

(c)  $j \rightarrow p$  の路ブランチ  $\ell$  :

$\Delta_\ell = x_\ell$  (ブランチの向きが下から上の場合)

$\Delta_\ell = U_\ell - x_\ell$  (ブランチの向きが上から下の場合)

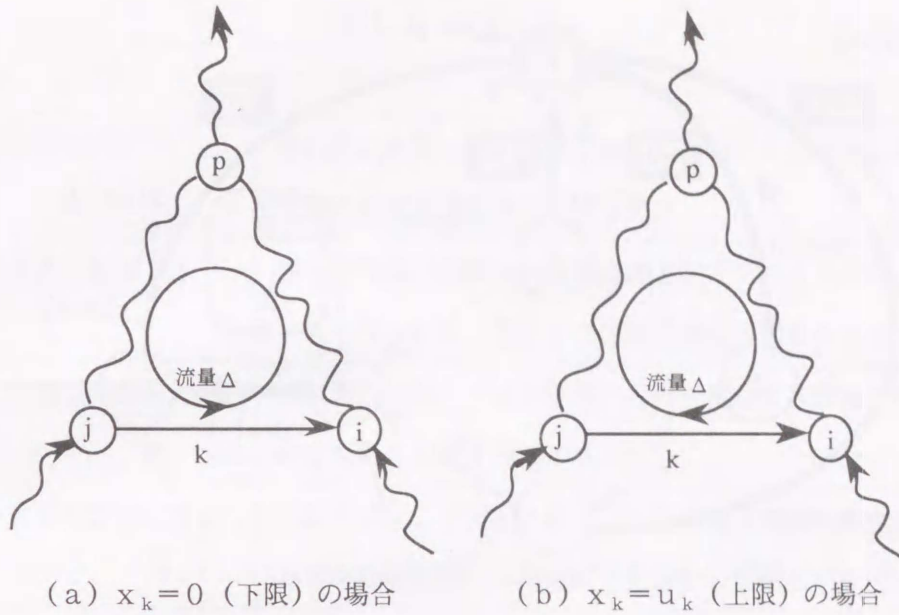


図4.6 流量 $\Delta$ の還流

次に閉路に沿って流量 $\Delta$ を還流させる。すなわち、閉路中の各ブランチ $l$ について以下のようにする。

$$x_l = x_l + \Delta \quad : \quad \text{ブランチ } l \text{ と閉路の向きが一致} \quad (4.39)$$

$$x_l = x_l - \Delta \quad : \quad \text{ブランチ } l \text{ と閉路の向きが逆}$$

閉路以外のブランチの流量は変化しない。これが、ピボット操作である。

さて、非基底変数となる基底変数 $x_r$ は以下のように求める。すなわち、閉路中で $\Delta_l = \Delta$ を満たしていたブランチ $l$ では、新しい流量は、 $x_l = 0$ 、あるいは上限値 $u_l$ になる。従って、そのような $x_l$ を新しい非基底変数 $x_r$ にすればよい。もし、複数存在すれば任意の一つ選ぶ。

(1)  $r = k$  の場合：基底木は変化しないが、非基底変数 $x_r$ の値は以下に変更する。

もし、 $x_r = 0 \rightarrow x_r = u_k$  とする。

もし、 $x_r = u_k \rightarrow x_r = 0$  とする。

(2)  $r \neq k$  の場合：ブランチ $k$ が基底に入り、ブランチ $r$ が基底から出る。

もし、 $\Delta_r = x_r \rightarrow x_r = 0$  とする。

もし、 $\Delta_r = u_r - x_r \rightarrow x_r = u_r$  とする。

図4.5のネットワークにおける第1回目のピボット操作の例を図4.7に示す。本例では、負の相対コストを有するブランチ5が基底に入り、ブランチ9が基底から出ている。



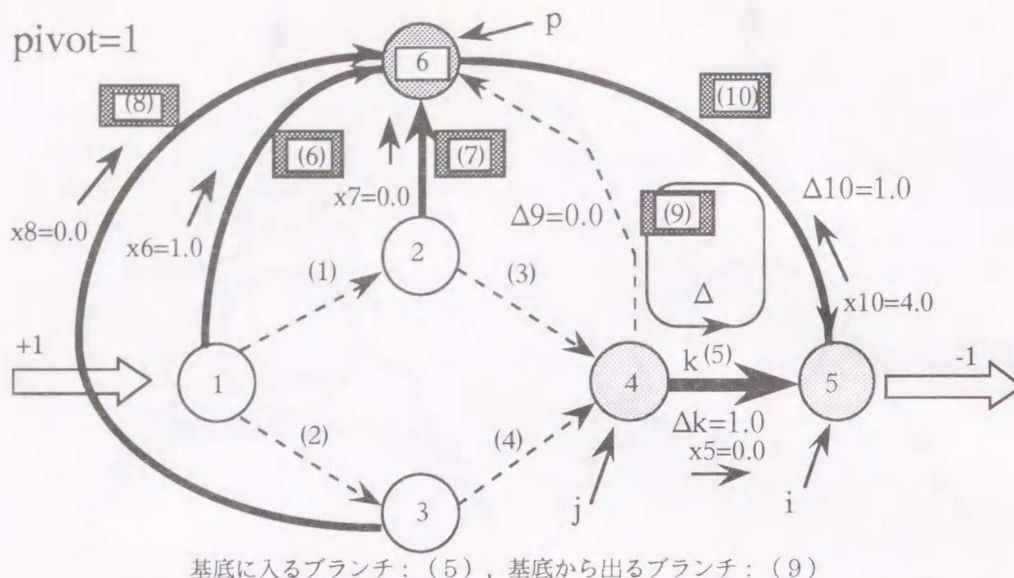


図 4.7 ピボット操作後の基底解 (太線)

### 4.3.3 復旧操作コスト

さて、以上で最小費用流問題の基底行列  $B$  が基底木というグラフ構造で表され、シンプレックス法の基本的操作であるピボット演算がそのグラフを用いて効率的に計算できることを示した。4.2.1 項で述べたように事故復旧問題の定式化において、ブランチの上に定義されるコストを運用者の復旧方針を反映するように工夫しなければならない。文献 (18) にはそのような復旧方針が示されている。これは、“設備総合自動化プロジェクト”で過去の事故例を詳細に検討した結果であり、著者もその検討に加わった。この復旧方針を優先順位順に示すと表 4.1 のようにまとめられる。

従って、この復旧優先順位を復旧操作コストに反映するために以下のような考え方をを用いる。

- (1) “閉”のブランチに対する復旧操作コストは、“0”にする。最小化問題として定式化するため、そのようなブランチは復旧ルートとして採用してもコストは要しないと考えるのである。
- (2) “開”のブランチに対しては、復旧優先順位を反映した“復旧操作コスト”を与える。すなわち、優先度の高い復旧方策に用いられるブランチに対しては小さいコストを与える。表 4.1 の (1) (2) (3) は上位電圧階級の開閉器に対応するブランチに対するものであり、同表 (4) (5) は下位電圧階級の開閉器に対応するブランチに対するものであるから、対象としている電力系統から直ちに決定できる。また、同表 (2) はその開閉器がブスタイCBとセクションCBの場合に限ればよい。

表4.1 復旧方針

(1)	原形復旧方式	事故前に受電していた送電線またはバンクを電源として 停電発電所母線を復旧する方式
(2)	ブスタイ復旧方式	同一発電所の隣接母線を電源としてブスタイCB, セクション CBを投入することにより停電母線を復旧する方式
(3)	上位他電源復旧方式	事故前とは別の上位他電源からの送電線を電源として停電した 発電所の母線を復旧する方式
(4)	下位他電源復旧方式	上記方式により復旧されなかった停電送電線を健全な母線 あるいは復旧した2次母線を電源として復旧する方式
(5)	下位バス回し復旧方式	上記方式により復旧されなかった発電所の下位母線を下位 連係線母線を電源として復旧し停電負荷を復旧する方式

以上の考え方に沿って設定した復旧操作コストの設定内容を表4.2にまとめる。

表4.2 復旧操作コスト

甲乙母線切替用LS	閉：0.0	開：5.0
送電線開閉器（低次）	閉：0.0	開：2.5
送電線開閉器（高次）	閉：0.0	開：1.5
ブスタイCB	閉：0.0	開：0.5
負荷切替用開閉器	閉：0.0	開：0.3

## 4.4 適用例

### 4.4.1 ケーススタディの条件

本方式の有効性を確認するために、実系統の事故例<sup>(37)</sup>に適用してケーススタディを実施した。この事故例はB変電所 (Bs/s) , E変電所 (Es/s) が全停, F変電所 (Fs/s) が片母線停電という復旧目標系統の作成が非常に難しいものとなっている。図4.8にその事故例を示し, 図4.9に本系統のノード・ブランチ表現を示す。ここで行うケーススタディの目的は, 実用レベルのモデルを用いて負荷条件と設備許容値を変えた場合に最適解が求まるか否かを評価することにある。本章では, これらのケーススタディの中から典型的な4つのケースについて述べる。表4.3にケーススタディで用いたケース毎のパラメータを示す。

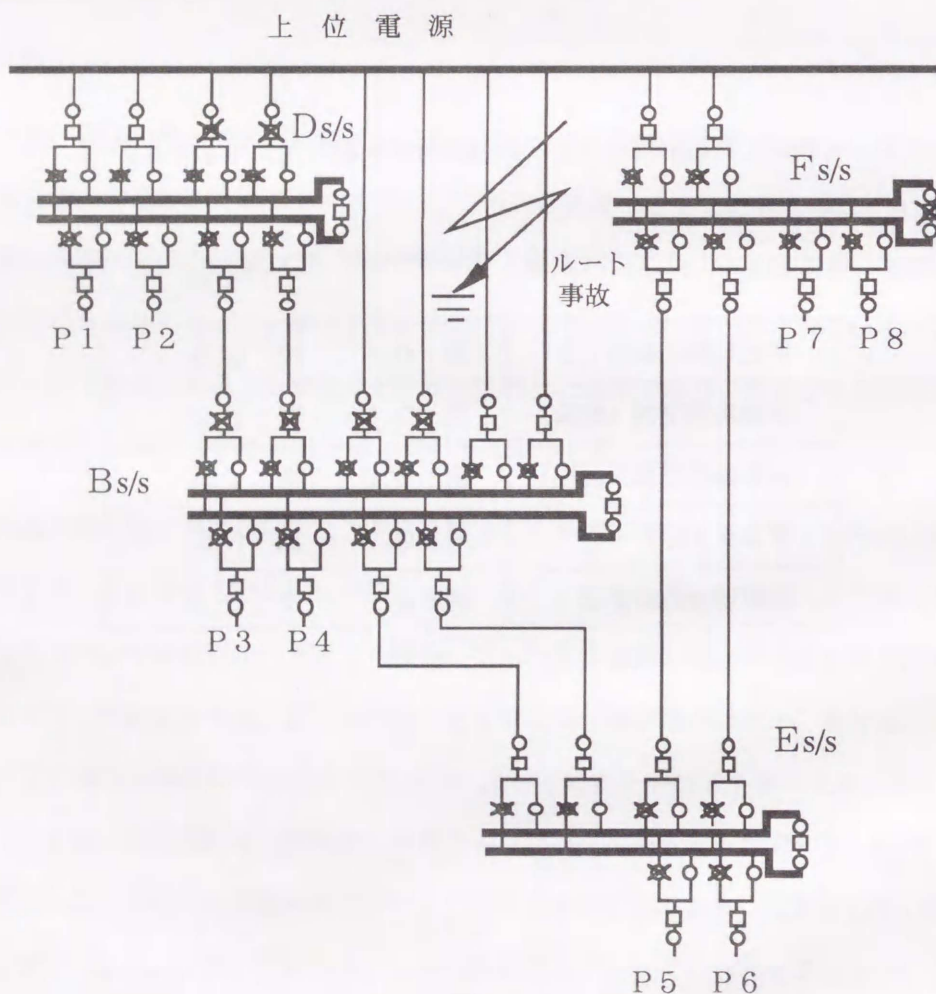


図4.8 実系統の事故例



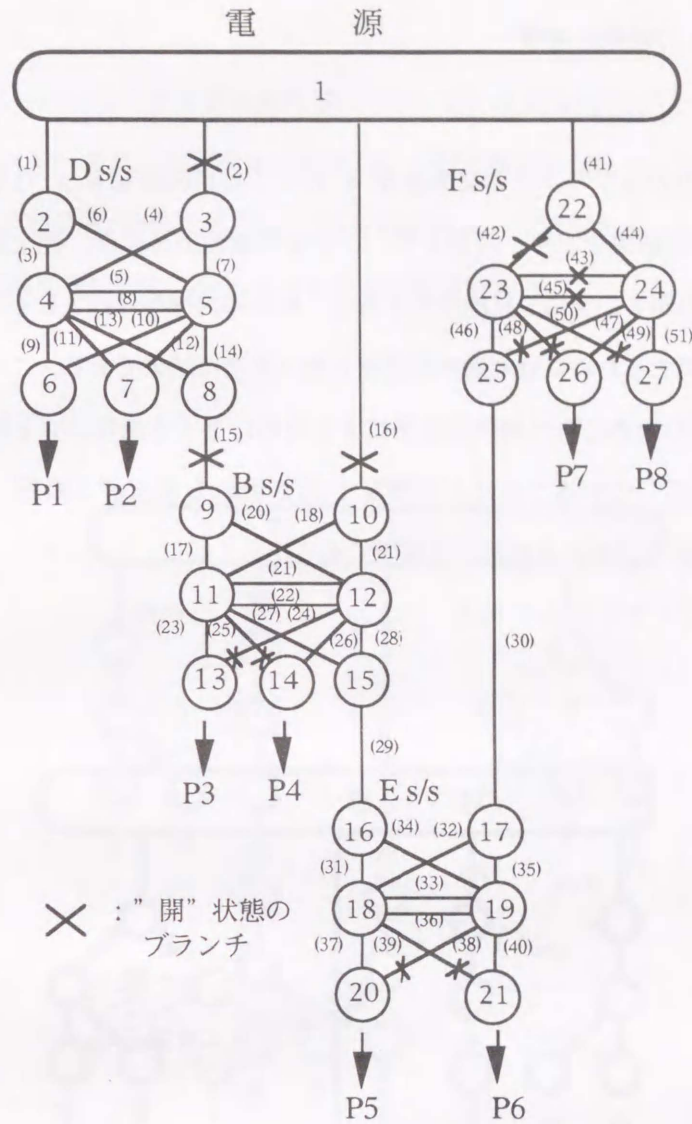


図 4.9 復旧対象系統のノード・ブランチ表現

表 4.3 ケース毎のパラメータ

ケースNo.	負 荷 条 件	設 備 許 容 値
1	P1~P8全て0.5	全てのブランチ: 1.0
2	P5=0.6 その他 0.5	全てのブランチ: 1.0
3	P1~P8全て0.5	41, 42, 43, 44, 45ブランチ: 2.0 その他のブランチ: 1.0
4	P4=0.6, P6=0.6 その他 0.5	41, 42, 43, 44, 45ブランチ: 2.0 15ブランチ: 0.0 その他ブランチ: 1.0

4.4.2 ケーススタディの結果と考察

(1) ケース1

ケース1は、電源につながるブランチの総容量が 4.0 で、負荷の総和も 4.0 であり全復旧が可能なケースである。図4.10に結果を示す。同図より、上位他電源復旧2箇所、健全系内操作1箇所の最適解が求まっていることがわかる。実用的見地からすれば、健全系内操作は好ましくないが、本ケースの場合には供給支障を全て解消するためには本操作が必要であり妥当な結果である。このトータルコストは、4.8であり、これは復旧のために開の開閉器を閉にするために要する操作コストに一致している。すなわち、送電線開閉器を“閉”にすることにより潮流1.0が流れる箇所が3箇所、負荷切換用開閉器を“閉”にすることにより潮流0.5が流れる箇所が2箇所であるから、

$$1.5 \times 3 \times 1.0 + 0.3 \times 2 \times 0.5 = 4.8$$

である。

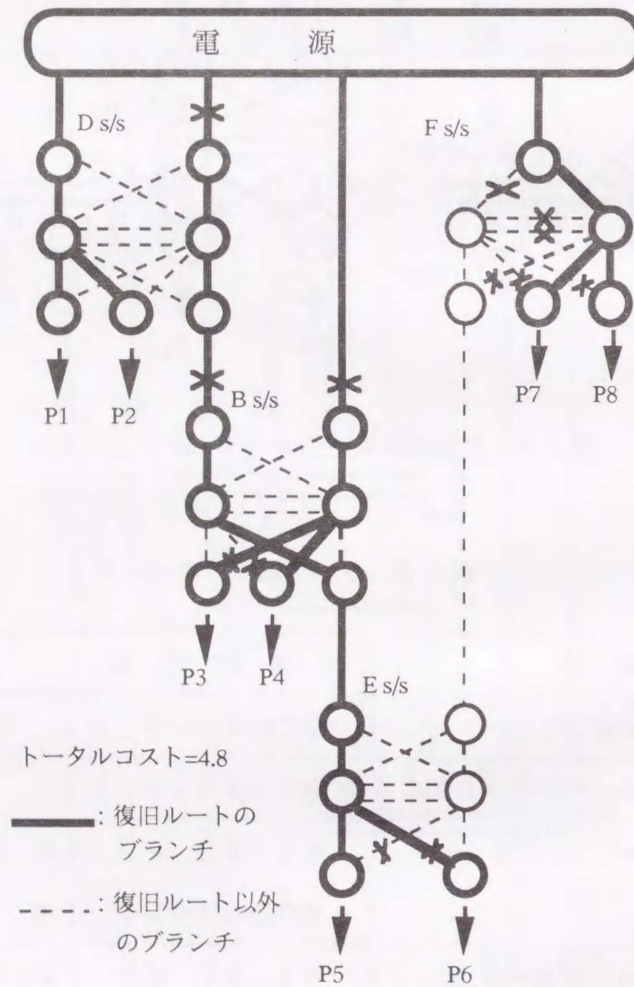


図4.10 ケース1の処理結果

(2) ケース2

ケース2は、電源につながるブランチの総容量が 4.0 で、負荷の総和が 4.1 という重負荷時に対応しており、Bs/s か Es/s のいずれかの負荷を切離さないと復旧ができないケースである。図4.11に結果を示す。ケース1とほぼ同様な結果であるが、Es/s の負荷 P6 に対応するノードが不可能解になっている。これは、P6 の負荷切離操作を意味しており妥当な結果である。

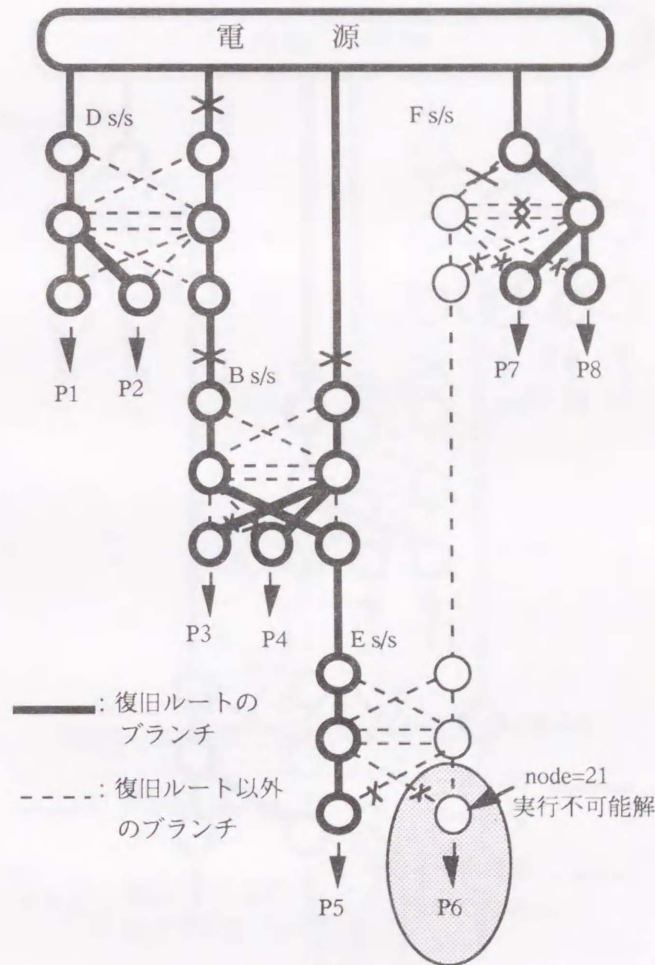


図4.11 ケース2の処理結果



(3) ケース3

ケース3は、電源とF s/sの送電線とF s/sの一部の容量を2.0にしたケースである。E s/sの復旧を操作コストの小さいF s/sのブスタイ復旧により行えるケースである。図4.12に結果を示す。トータルコストは、2.3 (=0.5+1.5+0.3)であり、復旧優先度の高いブスタイ復旧を用いた期待どりの結果が得られていることがわかる。

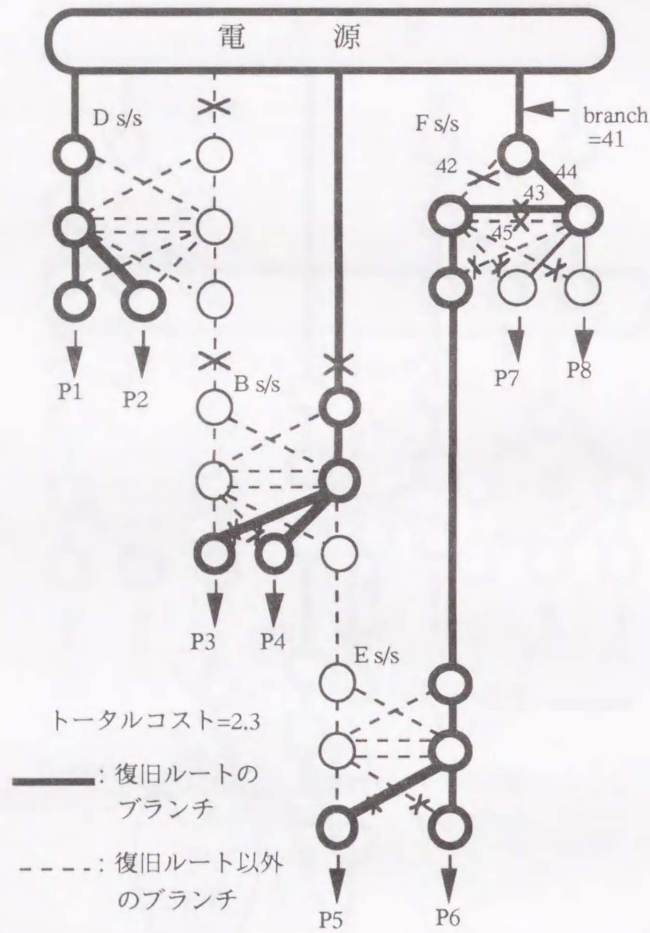


図4.12 ケース3の処理結果

(4) ケース4

ケース4は、ケース3においてBs/sとDs/sの送電線を作業中として復旧ルートに使用できないようにし、さらにBs/sとEs/sの負荷をそれぞれ0.6に増やし過負荷を発生させた、かなり複雑なケースである。図4.13に結果を示す。Bs/sとDs/sで負荷切離操作を行い期待通りの結果が得られていることがわかる。

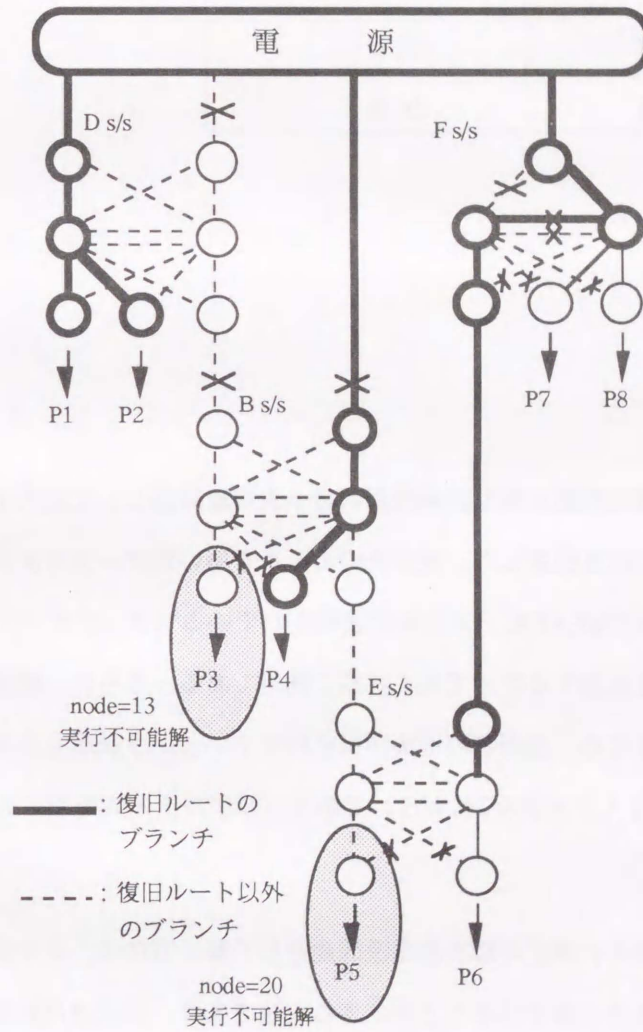


図4.13 ケース4の処理結果

#### (4) 実行時間と動作環境

このケーススタディは、3 MIPSのEWSを用いて行なった。表4.4に処理時間を示す。同表に示すようにすべてのケースにおいて処理時間は1秒以内であり、本提案方式が非常に高速であることがわかる。

表4.4 処理時間

ケース	処理時間 (秒)
1	0.4
2	0.5
3	0.5
4	0.5

## 4.5 結言

本章においては、系統復旧問題を線形計画問題の最小費用流問題として定式化し、有効潮流の分布から復旧目標系統を決定する方法を提案した。実系統のモデルを用いたケーススタディにより本方式の有効性を示した。本手法は、従来のSCADAシステムに登載されているブランチデータに、復旧操作の優先度に対応する復旧操作コストを追加するだけで良く非常に簡単である。さらに、最適解のトータルコストが開閉器操作量に一致しているため、運用者の理解が得られやすいという長所もある。また、全てのケースにおいて処理時間は1秒以内（3 MIPSのEWS）であり、リアルタイム処理にも十分に適用できると考えられる。

復旧目標系統の決定を線形計画法の最小費用流問題として解く方法は、従来提案されていない方法であるにもかかわらず非常に高速に解を得ることができる方法であり、系統運用計算機による事故復旧操作の自動化の面からすると一つの望ましい解決方法であると考えられる。しかし、ケース1の結果にみられるように同一変電所がブスタイを開放して異電源で復旧されるような解が得られることがある。この結果は、最適化問題の制約条件を満足する最適解であるが、従来実施されている運用面からすると運用者に馴染まない系統構成である。このような解が得られる理由は、最小費用流問題の制約条件の与え方に起因するものである。すなわち、この問題の制約条件は(4.2)式に示されるようにフローの平衡バランス制約と



上下制限約のみを扱っているため、発電機自体を一つのノードと見なしたような放射状制約が入れられない為である。このような問題を解決する目的で、第5章では各種の制約条件を満足し、かつ運用者の復旧方策に馴染みやすいような事故復旧問題の定式化を行う。

## 第5章 混合整数計画法の適用による 復旧目標系統の決定

本章では、「事故時操作」に関して、混合整数計画法の適用による復旧目標系統の決定方法について述べる。すなわち、復旧目標系統を構成するブランチと、復旧対象負荷に0-1変数を割当て、ブランチ潮流に連続変数を割り当てると、復旧目標系統の決定問題が自然な形で表現できる。本章では、放射状系統を対象に、従来より行なわれている復旧残負荷量の最小化に加えて系統の熟練運用者の持っている復旧戦略を実現できるように工夫した方法を提案する。一般に、この種の組合せ最適化問題の求解に要する時間は、大規模な問題になるにつれ指数関数的に増大するため、本章では事故復旧特有の性質を利用した幾つかの高速化のための方策についても提案する。そして、実系統の事故例に本方式を適用した結果望ましい解が得られたことを示す。本章の内容は、一連の研究成果をまとめた論文(54)に基づいたものである。

### 5.1 概説

#### 5.1.1 数理計画的方式による復旧目標系統決定に関する概況

前章で復旧目標系統の決定問題を線形計画法の最小費用流量問題として定式化して、その有効潮流分布から復旧目標系統を決定する方法(以下、簡易法と称する)を提案し、その有効性を実系統の事故例で実証した。この方法は地方供給系統の復旧で一般的に採用されている放射状制約が制約条件の中に入れられないために、ブランチの操作コストを上昇(停電系統内のブスタイを擬似的に開放することに相当)させて放射状系統を構築している。通常の電力系統では送電線容量に余裕があるため、ほとんどの場合、この方式により運用者の考えるような復旧目標系統を得ることが可能である。しかし、送電線容量に余裕がない場合にはブスタイを開放した変電所が異系統の電源から受電するような結果が得られている。この結果は放射状制約は満足しているものの運用者には受け入れ難いものである。

### 5.1.2 提案手法の概況

そこで本論文においては、運用者に受け入れられやすい解を得るために、放射状制約のみならず運用者の実施している復旧操作の優先度も考慮できるように混合整数計画問題として定式化し、その有効潮流分布から復旧目標系統を効率的にかつ高速に決定する方式を提案する。

本提案の方式の特徴は以下の2点である。

- (i) 混合整数計画問題としての定式化の際に、復旧残負荷量の最小化に加えて系統の熟練運用者の持っている復旧戦略を導入していること。
- (ii) 処理の高速化のために、前章で提案した簡易法を補完するように、本章の方式を組み合わせた復旧目標系統決定の枠組みを提案していること。

ここで、(i) は実用化に際して運用者が受け入れやすい解を得るために必要不可欠なものである。すなわち、従来の混合整数計画法を用いた方法<sup>(11, 12)</sup>のように、復旧残負荷量あるいは遮断器操作回数の最小化のみを目的とするだけでは、得られた解が必ずしも運用者の経験に基づくものにならないためである。次に、(ii) は復旧目標系統を効率的にかつ高速に決定するために、極めて高速な簡易法による問題のスクリーニングと、実質的な問題規模の縮小化を併用するものであり、実用化に近づいた方法である。

## 5.2 事故復旧問題の定式化

### 5.2.1 基本的考え方

提案する復旧目標系統の決定方法の基本的考え方は、下記のとおりである。

- (1) 復旧ルートとしてのブランチの採否、復旧対象負荷の採否に0-1変数を割り当てる。
- (2) ブランチの有効潮流に連続変数を割り当てる。
- (3) 各ブランチに操作の優先度に対応させたコストと、設備許容値に対応させた容量を割り当てる。
- (4) 各電源ノードに応援可能有効電力値を、各負荷ノードに負荷有効電力値を割り当てる。
- (5) (1)～(4)のデータを用いて、復旧操作優先度に対応する操作コストと復旧残負荷量の最小化問題として、復旧電源容量制約、需給平衡条件、線路容量制約、放射状制約のもとに、混合整数計画問題として解き、その有効潮流分布から復旧目標系統を決定する。



### 5.2.2 混合整数問題としての定式化

線形計画問題の変数において一部の変数のとりうる値が整数値に限定されたものを混合整数計画問題という。復旧目標系統を構成するブランチの採否を 0-1 変数で表し、更に地方供給系統の復旧問題では不可欠である過負荷による負荷切離しを表現するために復旧対象負荷の採否を 0-1 変数で表す。また、需給平衡条件などは連続変数で表す。このように系統運用者の意思を反映する 0-1 変数と連続変数を用いることにより復旧目標系統の決定方法の定式化が自然な形で行うことができる。

復旧目標系統決定問題は、以下に示すような制約条件の下で、“復旧操作コスト”と復旧残負荷量を最小化する問題として定式化することができる。

- (1) 復旧電源容量制約
- (2) 需給平衡条件
- (3) 線路容量制約
- (4) 放射状制約

ここで“復旧操作コスト”とは、復旧のための開閉器操作に要するコストである。本来復旧操作は、熟練運転員が実施している操作になるべく近付けるのが望ましいと考えられるので、本論文では文献(18)で述べられているような復旧操作方式の優先度に対応したコストをブランチに割り当て利用している。このことにより、運用者が行っている復旧方策(ブスタイ復旧や上位他電源復旧等)の優先度に従い、かつ上述の制約を満足する復旧が実現できる。

以上の問題は混合整数計画問題として以下のように定式化される。

#### (1) 変数の説明

$n$  : ノードの数

$m$  : ブランチの数

$n_s$  : 電源ノードの数

$n_l$  : 負荷ノードの数

$NF_k$  : ブランチ  $k$  の始点ノード

$NT_k$  : ブランチ  $k$  の終点ノード

$F_i = \{k \mid NF_k = i\}$  :  $i$  を始点とするブランチの集合

$T_i = \{k \mid NT_k = i\}$  :  $i$  を終点とするブランチの集合

$X_k = 1$  : ブランチ  $k$  を復旧ルートとして採用

$= 0$  : 不採用

$Y_p = 1$  : 負荷  $k$  を復旧対象として採用

$= 0$  : 不採用

$P_k$  : ブランチ  $k$  の有効潮流

$C_k$  : ブランチ  $k$  の操作コスト

$U_k$  : ブランチ  $k$  の容量

$L_p$  : 負荷  $p$  の負荷有効電力値

$G_q$  : 電源  $q$  の応援可能有効電力値

$z$  : 目的関数値

ここで、連絡線とブスタイに対応するブランチは、始点と終点が一意に決定できないために方向の異なる 2 本のブランチを割り当てる。

## (2) 目的関数

“復旧操作コスト”と復旧残負荷量を最小化することが目的であるから、目的関数は  $\alpha$  と  $\beta$  を正の定数として両者の線形結合で表される。

$$z = \min \left\{ \alpha \sum_{k=1}^m C_k X_k + \beta \sum_{p=1}^{nl} L_p (1 - Y_p) \right\} \quad (5.1)$$

ここで、右辺の第 1 項は運用者の復旧操作優先度に近付けるもので、第 2 項が復旧残負荷量の最小化に対応する。すべての負荷が復旧された場合には、第 2 項は零になる。この式を変形すると、

$$z = \min \left\{ \alpha \sum_{k=1}^m C_k X_k + \beta \sum_{p=1}^{nl} L_p - \beta \sum_{p=1}^{nl} L_p Y_p \right\} \quad (5.2)$$

のようになる。右辺の第 2 項は定数なので除外して考えることができ、目的関数として次式が得られる。

$$z = \min \left\{ \alpha \sum_{k=1}^m C_k X_k - \beta \sum_{p=1}^{nl} L_p Y_p \right\} \quad (5.3)$$

## (3) 制約条件

### (i) 復旧電源容量制約

$$\sum_{k \in F_q} P_k \leq G_q \quad (q = 1, 2, \dots, ns) \quad (5.4)$$

(ii) 需給平衡条件

$$\sum_{k \in T_i} P_k - \sum_{k \in F_i} P_k = L_i Y_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.5)$$

(iii) 線路容量制約

$$P_k - U_k X_k \leq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (5.6)$$

(iv) 放射状制約

$$\sum_{k \in T_i} X_k \leq 1 \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (5.7)$$

### 5.2.3 簡単な系統での提案方式の説明

上述の方式の理解を容易にするために、図 5.1 に示す簡単な系統上で動作原理を説明する。この図はノード番号 1 を電源ノード、ノード番号 4, 5, 6 を負荷ノードとし、ノード番号 2 とノード番号 3 を甲乙母線とする系統をノードブランチ表現したものである。両母線のブスタイが開放されているために、片母線が停電となり負荷が停電している状態であり、復旧過程においてよく遭遇する系統構成である。応援可能有効電力値 ( $G_1$ ) と負荷有効電力値 ( $L_1 \sim L_3$ ) を図に示した値とすれば、過負荷が発生し停電負荷の全復旧は出来ずに負荷切離しが必要になる。また、ブランチの容量は全て 1.0 とし、操作コストの値は図中に示す。

このネットワークに対して、(5.3) 式から (5.7) 式を用いて混合整数計画問題として定式化し、LP 緩和に基づき分枝限定法を用いて解く。X1~X9 を復旧ルートブランチの採否のための 0-1 変数、Y1~Y3 を復旧対象負荷 ( $L_1 \sim L_3$ ) の採否のための 0-1 変数とし、P1~P9 をブランチ潮流とする。分枝限定法は要領のよい列挙法で、原問題を次々に部分問題に分解し、その部分問題に簡単なテストを加えながら計算を進めていく。部分問題のテストの結果、その部分問題の最適解が求まったり、最適解が存在しないことが判明し終端したり、新たな部分問題が生成したりする。このため列挙法に比べて効率的に最適解を得ることができる。



図5.2に本問題の分枝図を示す。8個の部分問題への分解により最適解が求まっている様子がわかる。 $Z = -0.5$ が原問題の最適値、最適解はこのZを与えた $X = (0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)$ ， $Y = (1\ 1\ 0)$ ， $P = (0.0, 1.0, 1.0, 0.5, 0.5, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)$ である。すなわち、0-1変数の中で復旧ルートとして採用するブランチは、 $X_2 = X_3 = X_4 = X_5 = 1$ であり、復旧対象として採用する負荷は $Y_1 = Y_2 = 1$ である。

図5.3が対応する復旧目標系統である。復旧操作コストの低い（復旧操作の優先度の高い）ブスタイ復旧（ $X_3 = 1$ に対応）により、一番小さい負荷有効電力値（ $L_3 = 0.3$ ）を切離して復旧しており最適解が求まっていることがわかる。

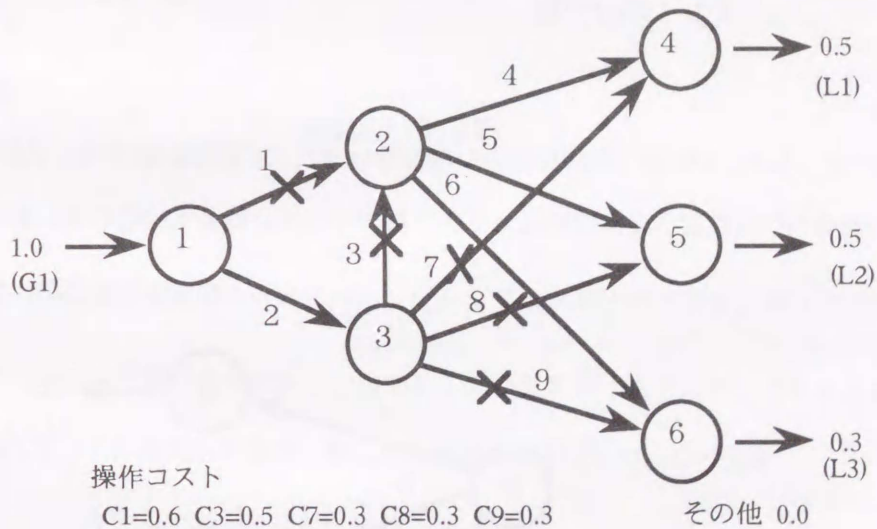


図5.1 簡単な例題系統

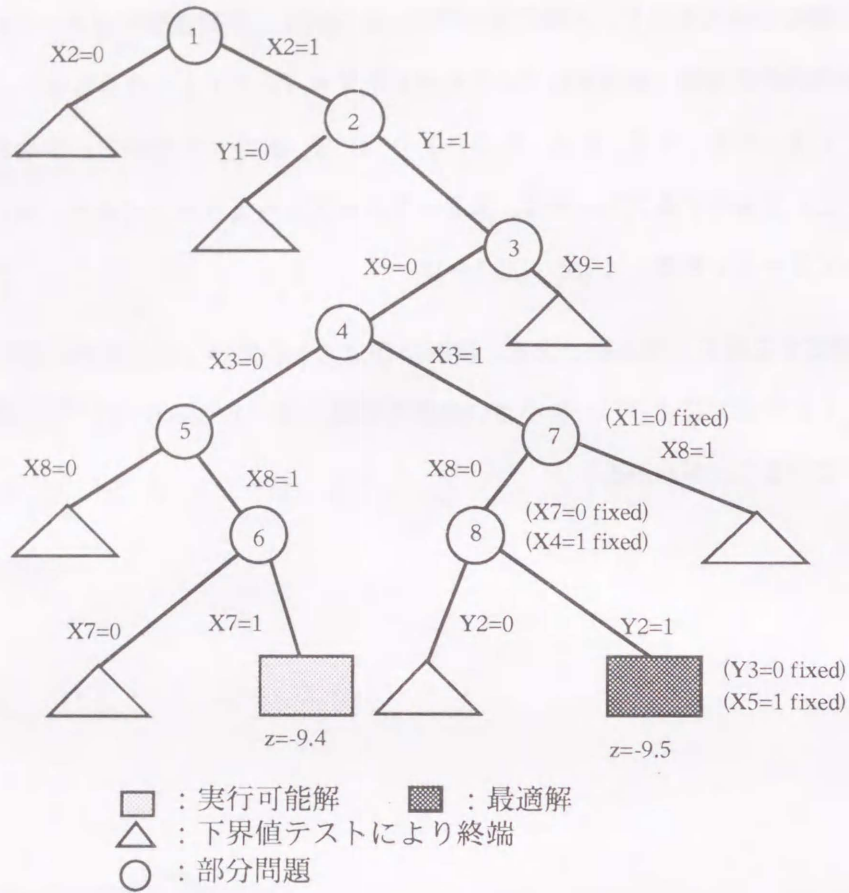


図 5.2 分枝図

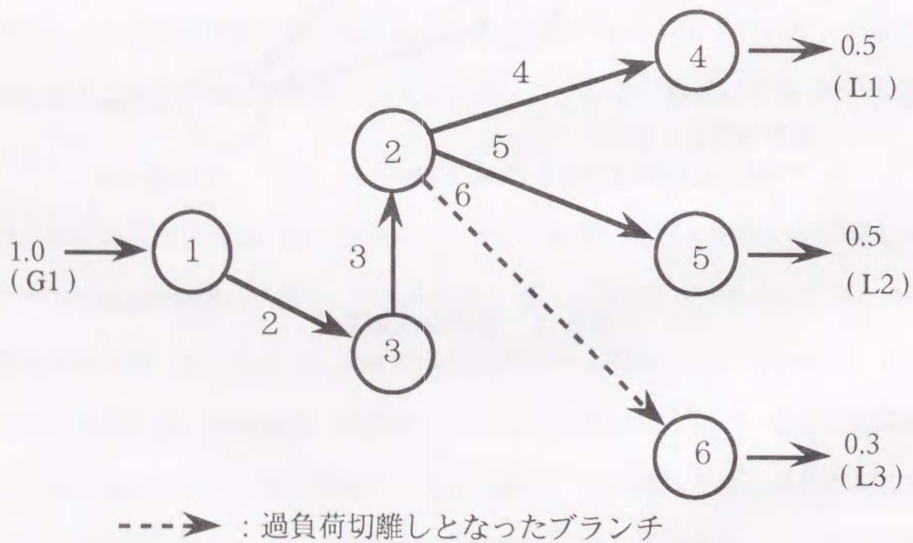


図 5.3 復旧目標系統

## 5.3 実現方法

### 5.3.1 処理の流れ

提案する詳細法を説明するために、原問題を  $Q_1$  とし、 $Q_1$  から変数の 0-1 条件を取り除いて緩和した問題を  $\overline{Q}_1$  とする。図 5.4 に具体的な処理の流れを示す。以下、図に従って説明する。

#### (1) 系統データの読み込み

事故設備を除いた電力系統のノード・ブランチの接続関係と、事故前の負荷データ、およびブランチの容量（設備容量に対応）と復旧操作コストのデータを読み込む。

#### (2) 初期LP解の算出

問題  $Q_1$  に対する分枝限定法は、 $Q_1$  から変数の 0-1 条件を取り除いた緩和問題初期問題  $\overline{Q}_1$  をシンプレックス法で解くことを出発点とする。この結果、 $\overline{Q}_1$  の最適値を  $\overline{Z}_1$  とおく。 $\overline{Q}_1$  は  $Q_1$  の緩和問題だから、 $Q_1$  の最適値を  $Z_1^*$  とすると、 $\overline{Z}_1$  は  $Z_1^*$  の下界値になる。

$$Z_1^* \geq \overline{Z}_1 \quad (5.8)$$

#### (3) 初期設定

初期問題  $Q_1$  を活性部分問題とし、その暫定解（近似最適解）を  $\infty$  とする。活性部分問題とは、分解も終端もされないまま残っている問題であり、分枝限定法の各時点では多数存在する。更に、目的関数の最適値の推定値も求めておく。0-1 変数を  $w_j$  とすると、 $w_j$  の中で 0 または 1 に固定されていない変数（自由変数）は、0 と 1 の中間値  $\overline{w}_j$  をとるが、これを 1 に切り上げて（0 に切り下げて）固定した場合、新しい LP 最適値の  $\overline{Z}_1$  からの増分を

$$h_j^+ \cdot (1 - \overline{w}_j), \quad h_j^- \cdot \overline{w}_j \quad (5.9)$$

とおく。ここで、 $h_j^+$ 、 $h_j^-$  は擬コストである。F を自由変数の集合として、この値を用いて目的関数の推定値を次式求める。

$$h(Q_1) = \overline{Z}_1 + \sum_{j \in F} \min \left\{ h_j^+ (1 - \overline{w}_j), \quad h_j^- \overline{w}_j \right\} \quad (5.10)$$

これは、各自由変数を 0 または 1 に固定したときに、目的関数の値の増分が最小になるように考え



たものである。

(4) 活性部分問題の選択

どの活性部分問題を選択するかは、計算の全体効率に大きな影響を与える。ここでは、深さ優先探索と幅優先探索の中間的方法を採用している。すなわち、深い部分問題から複数個以内の部分問題を探索し、その部分問題の中から目的関数の最小の推定値をもつ部分問題を選択する。

(5) 終了判定

活性部分問題がなくなれば計算を終了し、(9)へ移る。

(6) 部分問題のテスト (限定操作)

部分問題に対し下界値テストを実施する。緩和問題 $\overline{Q}_k$ の最適値を $\overline{Z}_k$  (下界値), 目的関数の暫定値を $Z^*$ とおくと,

$$\overline{Z}_k \geq Z^* \quad (5.11)$$

が成立すれば、もはやこれ以上の分枝操作は不要であり、終端できる。更に、0または1に固定できる変数があれば固定する。

(7) テスト結果判定

(6)の結果、部分問題に実行可能解が存在しないか、または下界値テストが成立することが判明すると、この部分問題は終端され(4)へ戻る。

(8) 部分問題への分解 (分枝操作)

どの分枝変数を選択するかも、計算効率に大きな影響を与える。ここでは、下界値テストの効果を高めるために、できるだけ下界値の大きな部分問題を生成させる。すなわち、

$$\min \left\{ h_j^+ (1 - \overline{w}_j), h_j^- \overline{w}_j \right\} \quad (5.12)$$

を最大とする添字 $j$ の0-1変数 $w_j$ を採用する。選ばれた分枝変数を用いて、以下の処理を行なう。

(i) 分枝変数を0に固定し最適タブローを求め、実行可能解が存在しないか、または下界値テストが成立することが判明すると、(ii)へ移る。実行可能解が存在すれば、暫定解 $Z^*$ を更新し

(ii)へ移る。以上が成立しなければ、新しい活性部分問題を生成し目的関数の推定値を計算し

(ii)へ移る。

(ii) 分枝変数を1に固定し最適タブローを求め、実行可能解が存在しないか、または下界値テスト

が成立することが判明すると、この部分問題を終端し(4)へ戻る。。実行可能解が存在すれば、暫定解  $Z^*$  を更新し(4)へ移る。以上が成立しなければ、新しい活性部分問題を生成し目的関数の推定値を計算し(4)へ戻る。

(9) 操作開閉器の決定

有効潮流分布から復旧目標系統を決定する。

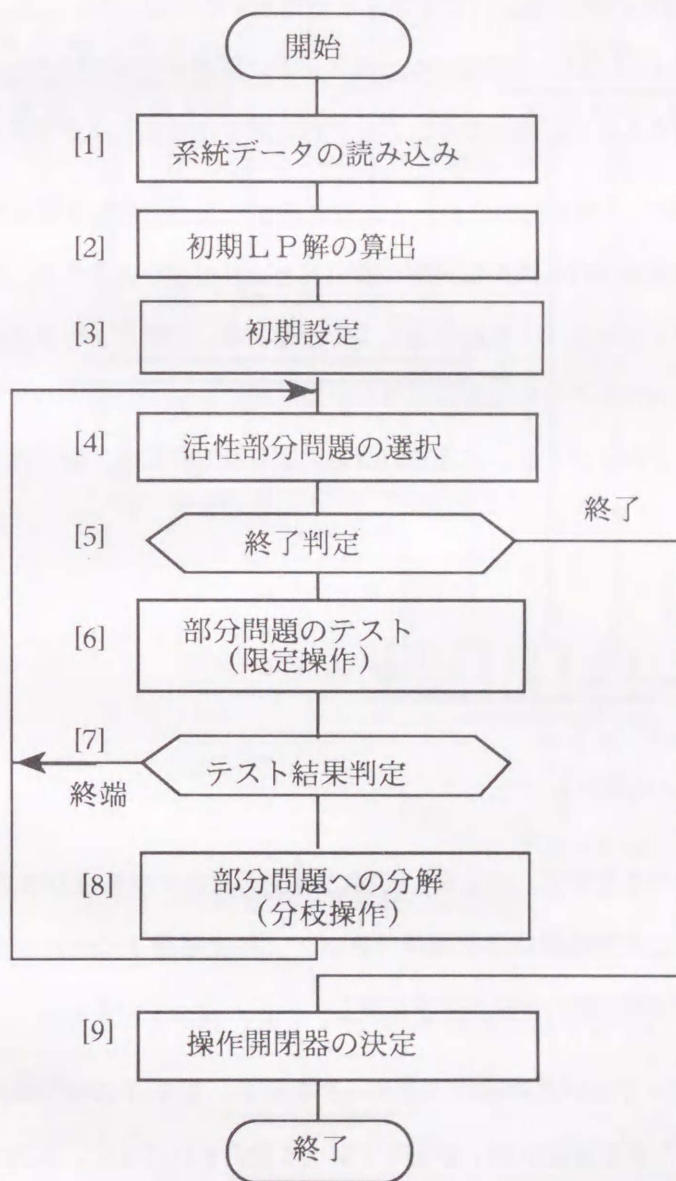


図 5.4 処理方式

### 5.3.2 高速化手法

分枝限定法のような厳密な最適解を求めるアルゴリズムは、一般に 0-1 変数の個数の指数関数オーダの計算量を必要とするため、問題の規模が大きくなると、許容範囲内で計算が終了しないという事態になる。そこで、事故復旧特有の性質を利用して問題規模の実質的な縮小化による高速化手法を行う。採用した手法は以下の通りである。

- (i) 復旧目標系統用の系統縮退の採用
- (ii) 復旧ルート対象ブランチ用 0-1 変数の固定

まず、上記 (i) は「復旧の過程においてブスタイを開放することはない」という前提のもとに、事故直後系統においてブスタイが“閉”の母線は 1 つのノードに縮退するものである。その結果隣接するノード（引込線等）も縮退することが可能となり、ノード数を減少させることができる。

次に、(ii) は健全系統と停電系統内の 0-1 変数に関する 2 つの内容を含んでいる。まず、「地方供給系統の復旧において健全系統内の操作は実施しない」という原則があるため、事故直後の健全系統において使用されているブランチの 0-1 変数を全て 1 に固定する。次に、「停電系統内においては原形復旧を優先させる」という原則があるため、事故直後の停電系統において使用されているブランチの 0-1 変数を全て 1 に固定する。このような 0-1 変数の固定により計算時間を大幅に減少させることができる。

## 5.4 適用例

### 5.4.1 ケーススタディの条件

本方式の有効性を確認するために、第 4 章と同様に図 5.5 に示す実系統の事故例<sup>(47)</sup>に適用してケーススタディを実施した。この事故例は B 変電所 (Bs/s)、E 変電所 (Es/s) が全停、F 変電所 (Fs/s) が片母線停電という復旧目標系統の作成が非常に難しいものとなっている。

表 5.1 にケーススタディで用いた共通のパラメータを示す。表 5.1 の復旧操作コストは一つの設定例であり、実際の適用に当たっては復旧操作優先度に従って設定すればよい。本例では、“甲乙母線切替用 LS”の操作コストが一番大きいとして、以下“送電線開閉器”、“ブスタイ”、“負荷切替用開閉器”の順に設定している。これは、負荷へ供給する母線を切り換えて復旧が完了することが一番望ましい復旧方策だからである。以下、同様にして復旧操作優先度に従った設定をしている。なお、復旧操作コストの



数値は各コストが差別化される程度のものでよい。

ここで行なうケーススタディの目的は、実用レベルのモデルについて、負荷条件と設備容量値を変えた場合に対する復旧目標系統の最適解が、従来の熟練運転員の習慣からみて受け入れ可能かどうかを評価するとともに、許容できる計算量で解が得られているか否かを評価することにある。

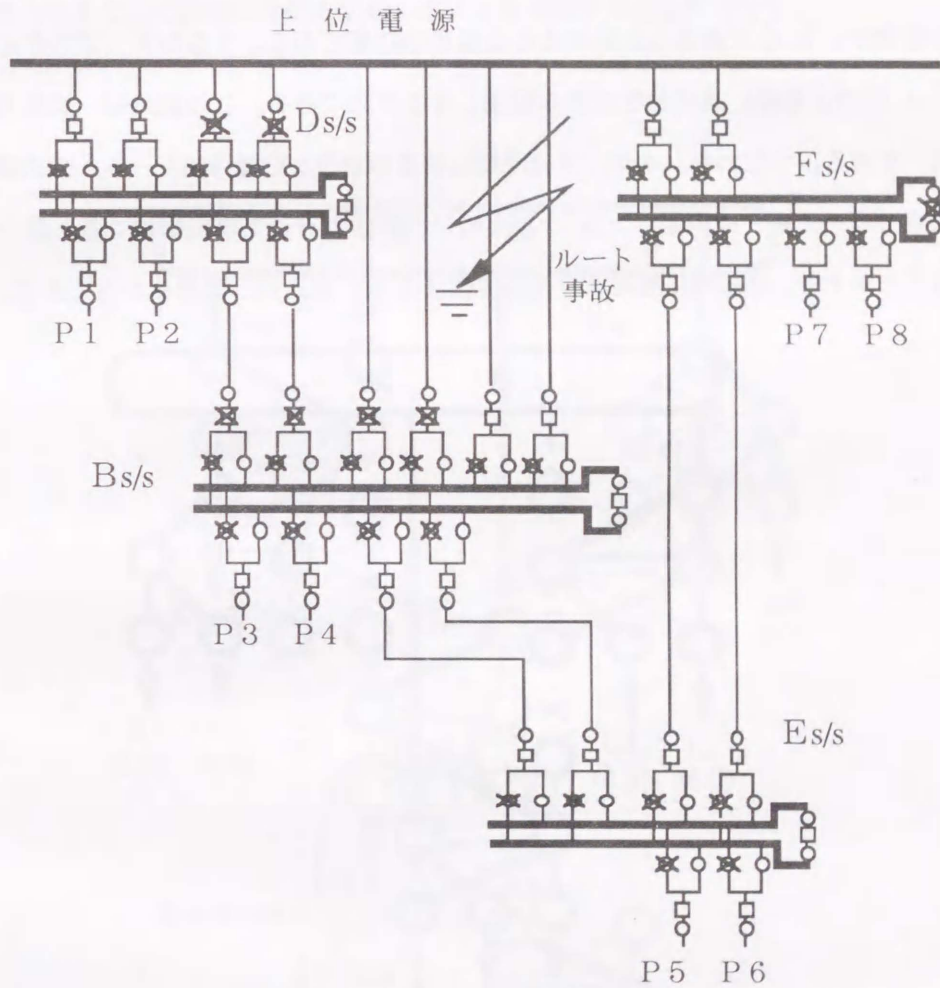


図 5.5 実系統の事故例

表 5.1 ケーススタディで用いた共通のパラメータ

種類	復旧操作コスト
甲乙切換用 L S	閉：0.0    開：1.0
送電線開閉器	閉：0.0    開：0.6
ブスタイ	閉：0.0    開：0.5
負荷切換用開閉器	閉：0.0    開：0.3

5.4.2 ケーススタディの結果と考察

(1) ケース 1

ケース 1 は、電源につながるブランチの総容量が 8.0、負荷の総和が 4.0 であり通常の電力系統の事故で遭遇することの多い負荷の全復旧が可能なケースである。図 5.6 に結果を示す。同図において太線が復旧ルートของ ブランチである。本ケースでは、Bs/s の上位他電源復旧により全ての停電負荷を復旧できている。運用者の復旧操作の優先度からすると、Fs/s のブスタイ復旧の方が望ましいと考えられるが、各ブランチの容量が、2.0 であることを考えると妥当な結果である。すなわち、ブスタイ復旧を適用すると電源と Fs/s 間の送電線に過負荷を生ずる結果となるためである。この結果は、前章の簡易法で得られる結果と同一である。すなわち、本ケースは停電負荷量の割合が応援可能ルート上の送電線容量に比較してあまり大きくないため、本問題は (5.3) 式の目的関数において復旧操作コスト最小化のみの問題として捕えることができ、結果的に簡易法の目的関数 (4.5) 式と同一になるからである。

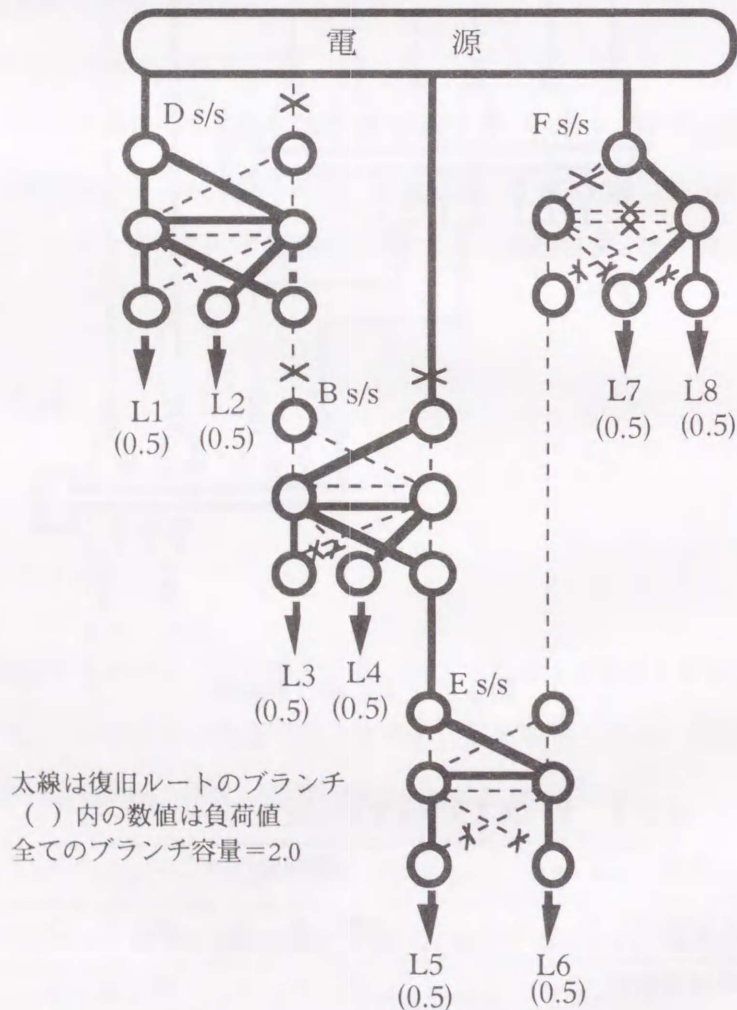


図 5.6 ケース 1 の処理結果

(2) ケース 2

ケース 2 は、ケース 1 の復旧対象負荷の総和を増加させており、負荷を切離さないで復旧ができない重負荷時に対応したケースである。すなわち復旧対象負荷の総和は 2.2 であるが、復旧対象の変電所が異電源からの受電を許さないために応援可能電力が 2.0 となるためである。図 5.7 に結果を示す。ケース 1 とほぼ同様な結果であるが、復旧対象負荷の中で一番小さい負荷有効電力値 (0.4) を有する B s/s の負荷 L3 の負荷切離しを実施しており、妥当な結果である。本ケースのように復旧対象負荷の採否を表す 0-1 変数を導入することにより、負荷の切離し優先度を考慮することができる。

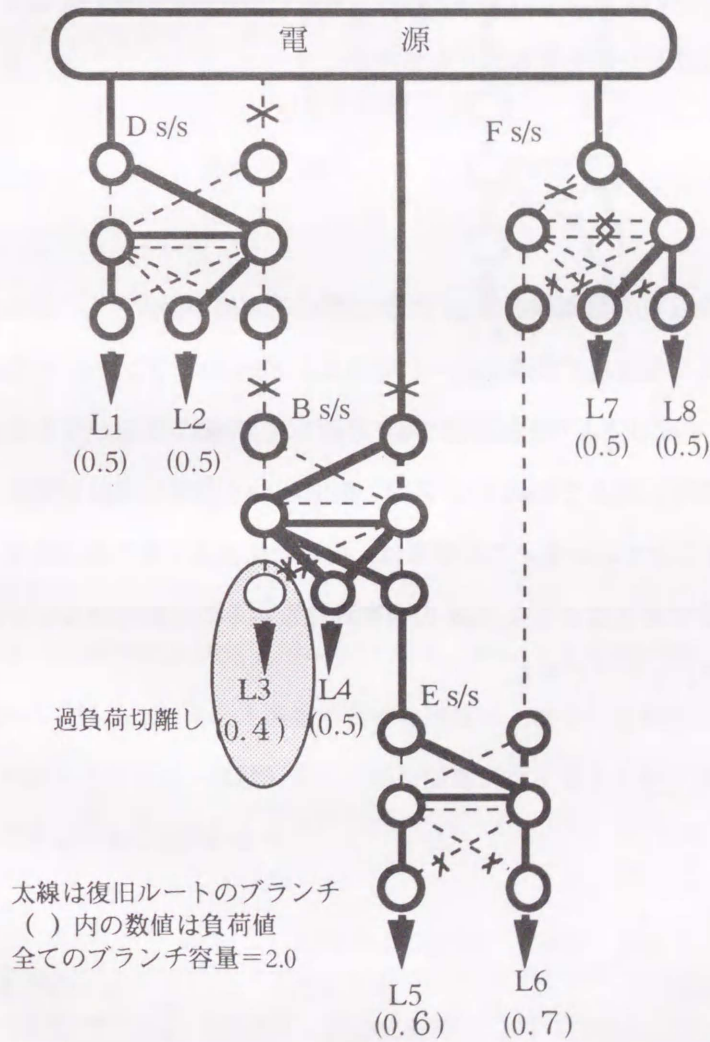


図 5.7 ケース 2 の処理結果



この結果は、前章の簡易法で得られる結果とは異なっている。すなわち、過負荷による負荷切離しを行なうBs/sは、簡易法ではブスタイを開放して異なったルートから受電し過負荷による負荷切離しは行なわない結果となる。この簡易法による結果は、停電負荷の最小化の目的からすると望ましい結果のように思われるが、従来の運用者の行なっている復旧操作の習慣からすると馴染まない系統構成である。なぜなら、実運用では後続の事故などの不測の事態に対処するために、系統構成はなるべく簡単に行なうという考え方が主流であるため、現在のところ停電変電所に対する異電源導入は行なわれていないからである<sup>(12, 18)</sup>。従って、本提案方式による結果は、「運用に馴染まない解が得られる」という従来の数値計画的手法による事故復旧の短所を克服することができたことを示すものである。また、ここでは(5.3)式に示したように負荷量の最小のものを優先して切離すように定式化しているが、同式のLpの代わりに重要負荷のランキングのようなものを与えれば、負荷の重要度を考慮した過負荷切離しも容易に実現可能であり、より実用に即した解を得ることもできる。

### (3) ケース3

ケース3は、電源とBs/s間の送電線とDs/sとBs/s間の送電線が両方とも、なんらかの原因で復旧ルートとして使用できないような極めて特殊なケースである。Fs/sのブランチの一部の容量を3.0にしてあるため、Fs/sのブスタイ復旧によりEs/sの母線を経由してBs/sの復旧が行えるケースである。図8に結果を示す。ブスタイ復旧に加えてEs/sのブス回し復旧という高度な復旧が実現されており、期待どうりの結果が得られていることがわかる。この結果は、前章の簡易法で得られる結果と同一である。すなわち、本ケースはケース2で述べたようなBs/sの異電源持ち込みの可能性がないために、結果として放射状の復旧ルートが構築されるためである。

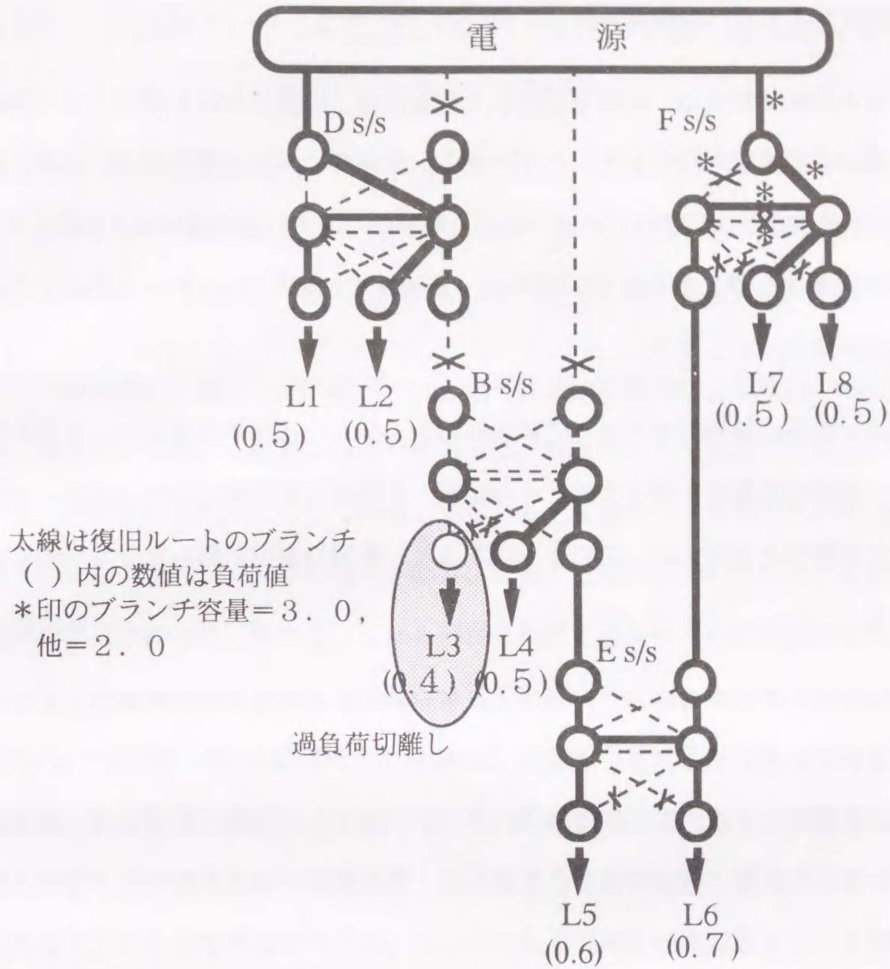


図5.8 ケース3の処理結果

(4) 実行時間と動作環境

このケーススタディは、3 MIPSのEWSを用いて行った。表5.2に処理時間について、第4章で示した簡易方式と、本章の方式で高速化対策を未実施の場合と実施した場合の比較を示す。これらの結果から高速化対策を実施した本提案方式では、処理時間の大幅な短縮（ケース1で約18%、ケース2~3では約3%に減少）が実現できていることがわかる。

表5.2 処理時間の比較 (単位: 秒)

ケース	第4章の方法 (簡易法 <sup>(47)</sup> )	提案方式 (詳細法: 高速化対策なし)	提案方式 (詳細法 <sup>(54)</sup> : 高速化対策あり)
1	0.4	87.0	16.0
2	0.5*	790.0	22.0
3	0.5	828.0	21.0

(\* : 異電源の受電による変電所復旧が発生)



### 5.4.3 事故復旧システムへの適用方針

通常の電力系統の運転状態では、前章で提案した簡易法は、本章における提案方式（詳細法）に比較して極めて高速に復旧目標系統を決定することができる。平常時の系統は夏季対策に代表されるように重負荷を念頭においた系統構成が採用されているために、簡易法で復旧目標系統が求まる場合が多い。しかし、なんらかの原因で送電線容量に余裕がない場合は、簡易法では表 5.2 のケース 2 のように異電源の受電による変電所復旧が発生してしまう。

従って、詳細法は簡易法を補完するように事故復旧システムに適用すればよい。すなわち、事故設備判定が完了後、まず高速な簡易法を適用する。その結果、変電所の異電源の受電が発生した場合にのみ、その結果を破棄して詳細法を適用する。このようにすると、最適な復旧目標系統を効率的にかつ高速に決定することができる。

一般に地方供給系統の事故復旧は、計算機による事故検出後から復旧手順作成完了までの処理時間の目安が 1 分以内とされている。従って、上述のように簡易法と詳細法を組み合わせると 3 MIPS 程度の計算機を用いたシステムを構築しても、復旧目標系統の作成が、ほとんどの場合 1 秒以内、詳細法を適用せざるを得ない場合でも 2.5 秒程度で完了できる。このため、事故検出や事故設備判定や復旧手順作成の処理を付加しても、本提案のような数理計画法的手法を用いて 1 分以内に処理が完了する可能性がでてきたと考えられる。

## 5.5 結言

本章においては、系統復旧問題を運用者に受け入れられやすい解を得るために、放射状制約のみならず運用者の実施している復旧操作の優先度も考慮できるように混合整数計画問題として定式化し、効率的にかつ高速に決定する方法を提案した。実システムモデルを用いたケーススタディにより本方式の有効性を示した。本方式は、復旧ルートを構成するブランチの採否と復旧対象負荷の採否を表す 0-1 変数と潮流を表す連続変数を用いることにより、復旧目標系統の決定方法の定式化が自然な形で行われるという特徴がある。更に、事故復旧問題特有の性質を考慮して問題規模の実質的な縮小化を行ったネットワークに対して計算することにより、ほぼ許容できる計算時間内で計算が終了している。本方式（詳細法）を前章で提案した簡易法を補完するように組み合わせると、より実用化に近づいた方法が確立できると考えられる。また、本章で述べたような簡易法による問題のスクリーニングと問題規模の縮小化とを併用する技法は、数理計画法を適用しようとするさまざまな実用規模の問題解決策への貢献が期待される。



## 第6章 知識ベースと数理計画法の融合による 復旧手順の決定

本章では、「事故時操作」に関して、知識ベースと数理計画法の適用による復旧手順の決定方法について述べる。従来の事故復旧に関して提案されている方法は、知識ベースか数理計画法のいずれかを用いているためにそれぞれの欠点を本質的に有している。すなわち、知識ベース処理においては知識の不完全性とシステムの開発と維持のためのコストの増大がある。また、数理計画的処理においては最適解は得られるものの処理時間がネックになる。従って、これら問題を解決するために両者を融合したシステムの提案を行う。まず、復旧目標システムの決定は第5章で述べた混合整数計画法による方法を拡張し、処理時間の高速化のために知識ベース処理により原問題を幾つかの部分問題に分解する方法を示す。この部分問題への分解の手法は事故復旧特有の復旧戦略によるものであり、組合せ最適化問題における探索空間の縮小化に運用者のもつ復旧戦略を使用したものと考えることができ。この結果、部分問題に分解しない場合に比べて約30%の処理時間にまで高速化できた。さらに、従来知識ベースに格納されていた知識の約60%を数理計画的処理に移し替えることができたため、その開発と維持のためのコストは大幅に抑制できることが予想される。そして、実システムの事故例に本方式を適用して評価し、極めて高速に解が得られることを示す。本章の内容は、一連の研究成果をまとめた論文(58, 59, 61)に基づいたものである。

### 6.1 概説

#### 6.1.1 知識ベース処理による事故復旧システムに関する概況

現在、「事故時操作」に対する計算機による自動化に一番多く採用されているのは、知識ベースによる方法である。事故復旧操作は、周波数制御、電圧制御、潮流制御などの電力系統技術を統合化した技術であり、異種の制約条件付き最適化問題としてとらえることができる。しかし、この最適化問題は、大規模、多目的、多段階、組合せ、非線形、制約付き最適化問題<sup>(17)</sup>であり、現状の技術で最適解を解くことはできない。従って、現在採用されている方法は、「誤った復旧操作を行なわないということを大前提に、

準最適な復旧手順でありさえすればよい<sup>(29)</sup>」とする考え方である。この考え方に従って、運転員の経験を知識として蓄積し復旧手順を推論により求めるエキスパートシステムが実システムに導入されているのである。

ところで、事故復旧のためのエキスパートシステムが制御所や給電所で稼働を開始し10年近くが経過し、以下のようなさまざまな問題点が指摘されるようになった。

- (i) エキスパートシステムが扱える範囲に限界があり、それを越える状況には対処できない。
- (ii) エキスパートシステムの格納されている知識に対する完全性の保証がないため、運用者に不安を与えている。
- (iii) エキスパートシステムの開発とシステムの運用開始後のメンテナンスに要するコストが、従来システムに比較して非常に大きくなる。

これらの問題点の中で、(i)は第2章でもふれたように従来の“浅い知識”ではなく、“深い知識”を導入したより知的なエキスパートシステムの確立に向けた研究がなされておりその成果が期待される。(ii)は、特に事故復旧のような切迫した状況を扱うシステムでは致命的な事項である。このため、システムの運用開始前には非常に多くの時間をかけてテストが実施されているが完全性の保証はない。しかも知識が相互に関連しており、一つの知識の変更に伴う知識ベースの完全性を確認することが極めて困難になっている。(iii)は、システムの利用者側からすると望ましくない事項である。これは、開発時における知識獲得の系統だった方法がなく、また運用開始後のメンテナンスは知識ベースの完全性の確認に要する労力は非常に大きくなっているからである。

### 6.1.2 提案手法の概況

本章では、地方供給システムに対して上述の課題を解決するために数理計画的手法と知識ベース的手法の融合による事故復旧問題の高速解法について提案する。すなわち、復旧目標システムは高速化を図った数理計画的手法を適用し、復旧操作手順は知識ベース処理的手法を適用する。これにより、運転員に説得力のある復旧操作手順を高速に決定することができ、また、従来管理の難しかった知識ベースに格納する知識を操作手順作成に関するものに限定しその取り扱いを容易にしている。提案手法の特徴は以下の2点である。

- (i) 復旧目標システムを決定する際に、事故復旧特有の性質を利用した知識ベース処理により復旧目標システムを部分システムに分解して数理計画的手法で解く方法を提案し、従来の方式に比べ大幅な高速化を達成していること。



(ii) 復旧目標系統を決定する部分の知識を数理計画的な手法に置き換えて、システム全体の知識数を減少させた知識ベースと数理計画的な手法を融合した事故復旧システムを提案していること。

ここで、(i) は、従来計算時間の点から事故復旧システムへの適用が困難とされてきた数理計画的な手法を実用システムに適用する際には必要不可欠な事項である。すなわち、最適性の保証がある解を許容時間内に得るようにするためである。次に、(ii) は現在実用化されている事故復旧エキスパートシステムの知識数を削減することができ、開発時や運用開始後の知識のメンテナンスに要するコストを低く抑えることが期待できる方法である。このように、提案方式は知識ベースと数理計画的な手法を融合することにより各々の短所を補い長所を伸ばした方法である。

## 6.2 復旧目標系統の決定

### 6.2.1 復旧目標系統決定問題の定式化

復旧目標系統の決定方法の定式化を自然なかたちで行うために、著者は文献(54)で混合整数計画問題として定式化して解く方法を提案している。すなわち、復旧目標系統を構成するブランチの採否や、過負荷による負荷切り離しを表現するための復旧対象負荷の採否を0-1変数で表し、需給平衡条件や線路容量制約等は連続変数で表す。そして、復旧操作コストという概念を用いると、復旧残負荷最小化のみでなく、運転員の実施している復旧方策(ブスタイ復旧や上位他電源復旧等)の優先度に従った復旧目標系統を決定することができる。

#### (1) 目的関数

復旧操作コストと復旧残負荷量を最小化することが目的であるから、 $\alpha$ と $\beta$ を正の定数として両者の線形結合で表される。なお、 $\alpha$ と $\beta$ の大きさは $C_k$ と $L_p$ の値から決定される。すなわち、文献(54)で述べたように、 $C_k$ と $L_p$ が同程度であるため復旧残負荷量の最小化が主目的との観点から $\alpha = 1.0$ 、 $\beta = 10.0$ としている。

$$z = \min \left\{ \alpha \sum_{k=1}^m C_k X_k - \beta \sum_{p=1}^{nL} L_p Y_p \right\} \quad (6.1)$$

#### (2) 制約条件

##### (i) 復旧電源容量制約

$$\sum_{k \in F_q} P_k \leq G_q \quad (q=1, 2, \dots, nS) \quad (6.2)$$



(ii) 需給平衡条件

$$\sum_{k \in T_i} P_k - \sum_{k \in F_i} P_k = L_i Y_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (6.3)$$

(iii) 線路容量制約

$$P_k - U_k X_k \leq 0 \quad (k=1,2,\dots,m) \quad (6.4)$$

(iv) 放射状制約

$$\sum_{k \in T_i} X_k \leq 1 \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (6.5)$$

(3) 変数の説明

$n$  : ノードの数

$m$  : ブランチの数

$n_S$  : 電源ノードの数

$n_L$  : 負荷ノードの数

$N_{F_k}$  : ブランチ  $k$  の始点ノード

$N_{T_k}$  : ブランチ  $k$  の終点ノード

$F_i = \{k | N_{F_k} = i\}$  :  $i$  を始点とするブランチの集合

$T_i = \{k | N_{T_k} = i\}$  :  $i$  を終点とするブランチの集合

$X_k = 1$  : ブランチ  $k$  を復旧ルートとして採用

$= 0$  : 不採用

$Y_p = 1$  : 負荷  $p$  を復旧対象として採用

$= 0$  : 不採用

$P_k$  : ブランチ  $k$  の有効潮流 (pu)

$C_k$  : ブランチ  $k$  の操作コスト

$U_k$  : ブランチ  $k$  の容量 (pu)

$L_p$  : 負荷  $p$  の負荷有効電力 (pu)

$G_q$  : 電源  $q$  の応援可能有効電力 (pu)

$z$  : 目的関数

ここで、連絡線とブスタイに対応するブランチは始点と終点が一意に決定できないために方向の異なる2本のブランチを割り当てる。

## 6.2.2 知識ベースによる高速化

## (1) 高速化のと基本的考え方

分枝限定法のような厳密な最適解を求めるアルゴリズムは、一般に0-1変数の個数の指数関数オーダーの計算量を必要とするため、問題の規模が大きくなると、許容時間内で計算が終了しないという事態になる。そこで、事故復旧特有の性質を利用して原問題を独立な複数の部分問題に分解することができれば、問題の求解に要する処理時間の大幅な短縮が期待できる。すなわち、原問題をそのまま解くより、0-1変数の数が少ない個々の部分問題をそれぞれ解いた後に、それらの解を合成し原問題の解を得るのである。

ところで、地方供給系統における事故復旧では、次のような方針のもとに復旧が実施されている。

(S-1) 健全系統内の操作は実施しない。

(S-2) 復旧系統内の停電変電所は異電源からの復旧は実施しない。

この簡単な方針を利用して事故復旧問題の定式化を行うと実質的な問題規模の縮小化が実現できる。すなわち、原問題を部分問題に分解するために以下のような分割知識を利用するのである。

(D-1) IF 健全系統内にノードが存在する

THEN 同一応援可能母線のノードは一つのノードにまとめる。

(D-2) IF 復旧対象系統内の変電所の開放されたブスタイの両端の一次側母線に対応するノードが存在する

THEN ブスタイを仮想的に併用し一つのノードにまとめる。

(D-3) IF 復旧対象系統内に異なった変電所の一次側母線が“閉”状態の連係線により接続され、かつ、各母線が他の復旧可能ブランチを有する

THEN 連係線ブランチを仮想的に開放する。

(D-1) は、(S-1) に対応する分解知識であり、この結果0-1変数を大幅に減少させることができる。この際に、健全系統内のブランチの事故前潮流値と許容値から応援可能有効電力値 ( $G_q$ ) を求めて復旧電源ノードを割り当てる。次に、(D-2) は (S-2) に対応する分解知識であり、一次側ブスタイを併用することにより変電所の復旧を異系統から受電するという状況が避けられ、0-1変数も一つ減少できる。また、(D-3) も (S-2) から導出される知識である。地方供給系統レベルの運用では上位電源から受電可能な変電所が各々独立に受電し、下位方向へ電力を供給している。従って、事



故による停電範囲はそれほど大きくなる。しかし、一部に上位電源からの大容量の送電線を有する変電所があるようなシステムでは、連係線を介して隣の変電所へ電力を供給している場合がある。このような場合に、その大容量送電線が事故により使用不可になった場合を想定すると、事故により停電する復旧対象システムは非常に大規模になることが予想される。この場合の復旧には連係線を開放して、両端の変電所がそれぞれ上位電源から受電する方策が望ましいと考えられる。なぜなら、復旧対象システム内の負荷が復旧ルート上の過負荷により切り離される量が少なくできる可能性が高いからである。これは海外でも採用されている方法で“vertical splitting”と呼ばれている。この結果、連係線の開放により非常に大規模だった復旧対象システムはいくつかの部分システムに分解される。そして、この部分システムは各々独立に復旧されるため、個別に分枝限定法を適用して許容できる時間内に解くことが可能になる。

以下、図 6.1 に示す大規模なモデルシステムを用いて説明する。対象としたシステムは 154 kV と 66 kV の 2 電圧階級のシステムで、A～M は管轄下の変電所、矢印は負荷である。今、D-H 送電線のルート事故が発生し図中に示すような広範囲な停電が発生した場合を考える。図 6.2 は事故復旧用の事故直後システムのノード・ブランチ表現である。0-1 変数を減少させるためにシステムを縮約してある。また、復旧電源母線ノードは理解を容易にするために電圧階級毎にまとめてある。L1～L11 は復旧対象になる負荷である。まず、上記 (D-1) によって、健全システムは電圧階級毎の 1 つの電源ノードとして表すことができる。また、上記 (D-2) によって、停電システム内のブスタイが“開”状態である H 変電所の一次母線を縮約する。そして、上記 (D-3) によって、停電システム内の連係線の G-H 送電線は復旧目標システムでは開放されるべき送電線となるので仮想的に開放する。なぜなら、G 変電所も H 変電所も復旧候補ブランチ (B-G 送電線、A-H 送電線に対応) を介して個々に復旧した方が、復旧対象システム内に過負荷が発生した場合に過負荷切り離しとなる負荷量を少なくできる可能性が高いと考えられるためである。また開放する連係線が負荷を有する場合には、当該負荷をいずれの部分システム側に接続させるかは一意に決定できないため、事故前潮流の方向を参照し流れ出る側の部分システムに含ませている。ただし、G または H 変電所のいずれかが、復旧候補ブランチを有さない変電所である場合は、このような仮想的な開放は実施しない。

このようにして、復旧対象システムは図 6.3 のように 2 つの部分システムに分解できる。この分解された部分システムに対して、それぞれ分枝限定法を適用する。図 6.2 の場合の 0-1 変数は 42 個であるが、図 6.3 の場合は 24 個と 16 個である (図 6.3 は、部分システム間のブランチに対応する 0-1 変数分だけ少なくなっている)。このように、分解された部分システム毎に分枝限定法を適用する。そして、それぞれの解を合成して復旧目標システムを完成させる。ここで使用している分枝限定法は、目的関数の推定値を擬コストを用いて計算し、部分問題の探索には深さ優先探索と幅優先探索の中間的方法を採用している。



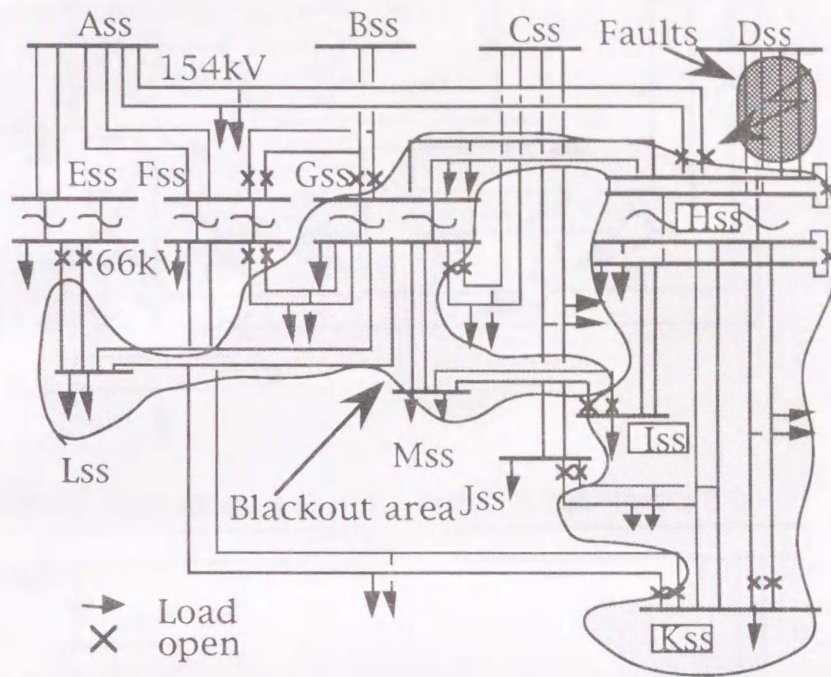


図 6.1 モデル系統

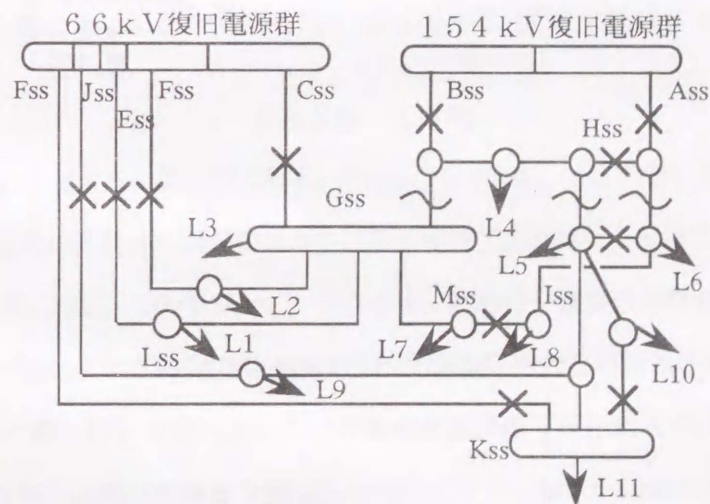


図 6.2 事故直後系統のノード・ブランチ表現

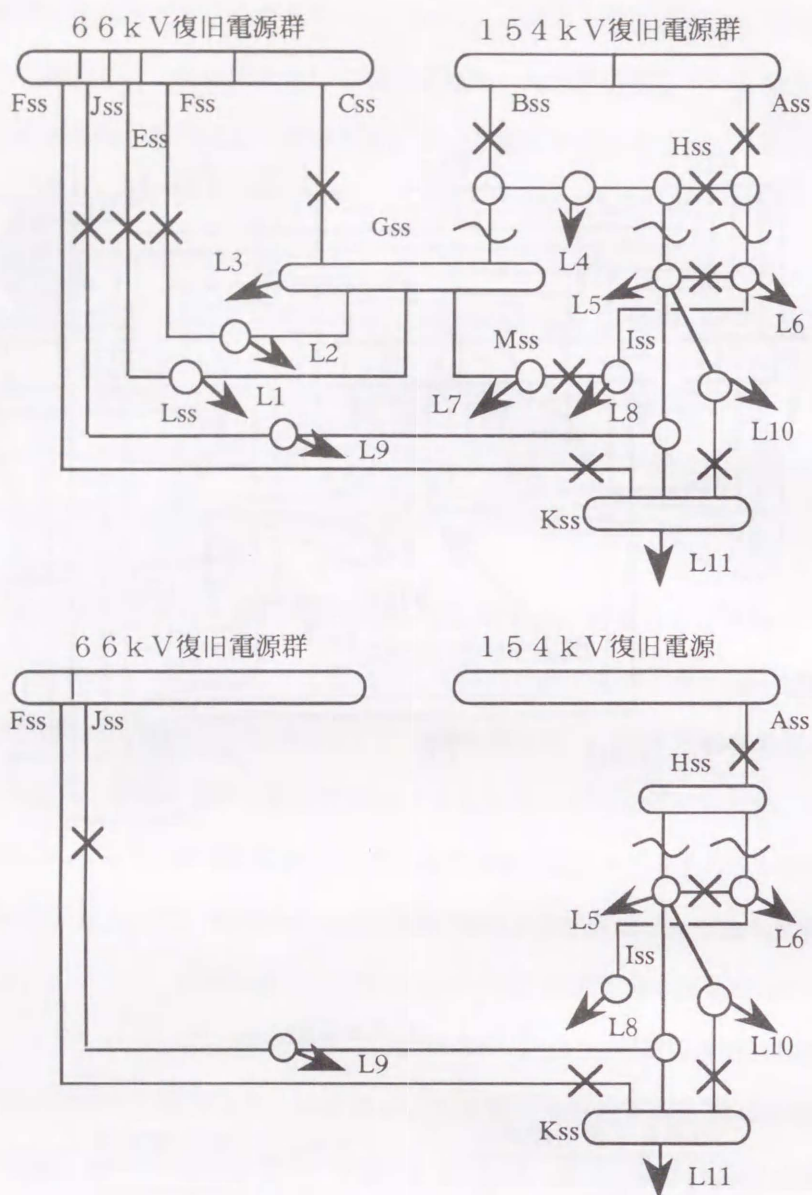


図 6.3 部分系統

(2) 知識処理による高速化の実現

上述の高速化のための基本的考え方を知識処理により実現する方法について説明する。本システムの知識ベース処理には汎用的な Prolog の処理系を採用している。図 6.4 は、電力系統を表わしている事実の例である。述語 “branch” は、ブランチデータに関する事実を表し、述語 “node” はノードに関する事実を表している。

branch (ブランチ番号,  
ネットワーク番号,

事故直後系統開閉状態 (on/off=閉/開) ,  
 処理過程系統開閉状態 (on/off=閉/開) ,  
 復旧目標系統開閉状態 (on/off=閉/開) ,  
 始端ノード番号, 終端ノード番号,  
 電圧階級,  
 設備容量, 種別,  
 所属電気所名称,  
 設備名称 ) .

node (ノード番号,  
 ネットワーク番号,  
 充停電状態 (charged/discharged=充電/停電) ,  
 電圧階級  
 種別,  
 所属電気所名称,  
 設備名称 ) .

ここで, “branch” の第4引数が知識ベース処理により更新される処理過程系統の開閉器状態であり, 第5引数の内容が復旧目標系統決定結果により更新される部分である。ここで, “branch” と “node” の第2引数のネットワーク番号が同一のものが部分系統を構成するノードとブランチになる。

図6.5は, 部分系統に分解する知識の例である。“rule3” は, (D-3) に対応する知識である。すなわち, 復旧対象系統内の関係線の両端変電所の母線が停電で復旧ルートを有するならば, 仮想的に当該関係線を開放する知識である。この中で, “cond3” が条件を表し, “action3” が条件が成立した時の動作を表す。このようにして得られた部分系統毎に分枝限定法を適用して復旧目標部分系統を決定するのである。



```

/* << fact >> ..... Branch Data .....*/
branch(1, 1, off, off,-,1,3,154,2.8, to_line, 'Hss','A-H Line' ).
branch(2, 2, off, off,-,1,6,154,1.0, to_line, 'Gss','B-G Line' ).
branch(3, 1, off, on,-,3,4,154,9.0, bus_tie, 'Hss','CB01 ' ).
branch(4, 0, on, off,-,5,4,154,4.0, to_line, 'Hss','G-H Line' ).
branch(5, 2, on, on,-,6,5,154,4.0, from_line, 'Gss','G-H Line' ).
branch(6, 1, on, on,-,3,7,154,4.0, trans, 'Hss','#1B ' ).
branch(7, 1, on, on,-,4,8,154,4.0, trans, 'Hss','#2B ' ).

/* << fact >> ..... Node Data .....*/
node(1, 0, charged, 154, source, -, - ).
. . .
node(6, 0, charged, 66, source, -, - ).
node(7, 1, discharged, 154, p_bus, 'Hss', '154kV-Bus' ).
node(8, 1, discharged, 154, p_bus, 'Hs's, '154kV-Bus' ).
node(9, 2, discharged, 154, line_load, -, 'Load4' ).
node(10, 2, discharged, 154, p_bus, 'Gss', '154kV-Bus' ).
node(11, 1, discharged, 66, s_bus, 'Hss', '66kV-Bus' ).

```

図 6.4 電力系統の事実の例

```

/* ..... << rule(3) >> ....分解ルール ( 3 ) .....*/
rule3(N):- /* write( 'rule(3) start!'),nl, */
repeat(N),
cond3(ID)->action3(ID), /* ID:ブランチ番号 */
fail.

rule3(_):- retract(counter2(B)).
cond3(ID):- /* Condition(3) 条件部 ( 3 ) */
count2,cnt2(ID), /* ブランチ番号のカウンタアップ */
is_close(ID), /* ブランチIDは “閉” か? */
is_tie_line(ID), /* ブランチIDは “関係線” か? */
is_teiden(ID), /* ブランチIDの両端ノードは “停電” か? */
has_rest_root(ID). /* ブランチIDの両端ノードは “復旧候補を有する” か? */
action3(ID):- /* Action(3) 実行部 ( 3 ) */
branch(ID,0,on,on,_,NF,NT,V,SS,'tie-line'),
assertz(branch(ID,0,on,off,-,NF,NT,V,SS,'tie_line')),
retract(branch(ID,0,on,on,_,NF,NT,_,_, 'tie_line')).
/* ブランチIDの復旧目標系統開閉状態を “閉 (on) ” とする*/

```

図 6.5 部分問題への分解知識の例

### 6.3 知識ベースによる復旧手順作成

事故直後の系統状態から復旧目標系統へ移行する操作手順を求めるのが、復旧操作手順の決定である。本システムは地方供給系統を対象としており、発電機の出力調整のように時間的制約を含まないため、比較的簡単に復旧操作手順を決定することができる。すなわち、基本的には事故直後系統と復旧目標系統の開閉状態を比較し両者に差異のある開閉器を操作する操作手順を作成すればよい。ただし、両系統の開閉器の開閉状態が“閉”状態であっても、変圧器加電時の突入電流を抑制するために行われている一時的な開放操作は作成する。このような実際の運用で実施されている項目は静的な復旧目標系統では表わすことができないために、提案システムでは知識ベース処理を採用している。

知識ベース処理は、対象とする問題領域が広がるにつれ非常に多くの知識が必要になる。その知識の獲得は現在のところシステムティックな方法が存在せず、ユーザとの数多くの打ち合わせの上で実施されているが、最終的にはシステム設計者（知識情報処理技術者）の判断に頼っている。さらに、知識数が増えるに従って知識間の相互関係が複雑になるため、知識の変更に伴う知識ベース全体の完全性の確認が難しくなってくる。従って、本提案のように復旧手順決定問題に対してのみ主に知識ベース処理で実現すると、知識数も限定されその取り扱いが容易になる

図 6.6 は、復旧手順作成知識の例である。“rule(50)”は、事故直後系統と復旧目標系統の開閉器状態がともに“on”であり、一次側母線の電圧階級が154kVである変圧器を一時的に停止する（指令用語=stop）操作手順を作成するための知識である。

```

/* ..... << rule(50) >> .....*/
rule50(N):- /* write( 'rule(50) start!'),nl, */
    repeat(N),
    rule5-1,
    fail.
rule50(_):- retract(counter2(B)).
rule50-1:-
    count2,cnt2(ID),
    branch(ID,on,on,154,tarns,SSNAME,DEVNAME)
    -> tejunput(SSNAME,DEVNAME,'stop ').

```

図 6.6 復旧手順作成知識の例

## 6.4 実現方法

### 6.4.1 処理の流れ

実用的な事故復旧システムを完成させるためには、復旧目標系統の決定に続いて、復旧操作手順の決定が必要である。図 6.7 に提案方式全体の構成を示す。同図に示すように、提案方式は復旧目標系統決定と復旧操作手順決定の 2 つの部分から構成されている。以下、図に従って説明する。

#### (1) 事故直後系統の取り込み

事故設備を除いた電力系統のノード・ブランチの接続関係と事故前の負荷データ、およびブランチの容量（設備容量）とコスト（操作コスト）を読み込む。

#### (2) 事故復旧問題の定式化

0-1 変数と連続変数を用いて事故復旧問題を混合整数計画問題として (6.1) 式～(6.2) 式を用いて定式化する。

#### (3) 部分問題への分解

1 変電所への異電源復旧を許さないという制約を積極的に利用した分解知識 (D-1)～(D-3) を用いて、上記で行った定式化を複数の部分問題へ分解する。

#### (4) 復旧目標部分系統の決定

分解された部分問題毎に分枝限定法を適用し復旧目標部分系統を決定する。

#### (5) 復旧目標系統の決定

復旧目標部分系統を合成して、復旧対象系統全体の復旧目標系統を決定する。

#### (6) 復旧操作手順の決定

事故直後系統と復旧目標系統の開閉器の開閉状態と、ブランチの属性（種別や電圧階級等）により復旧操作手順を知識ベース処理により合成する。



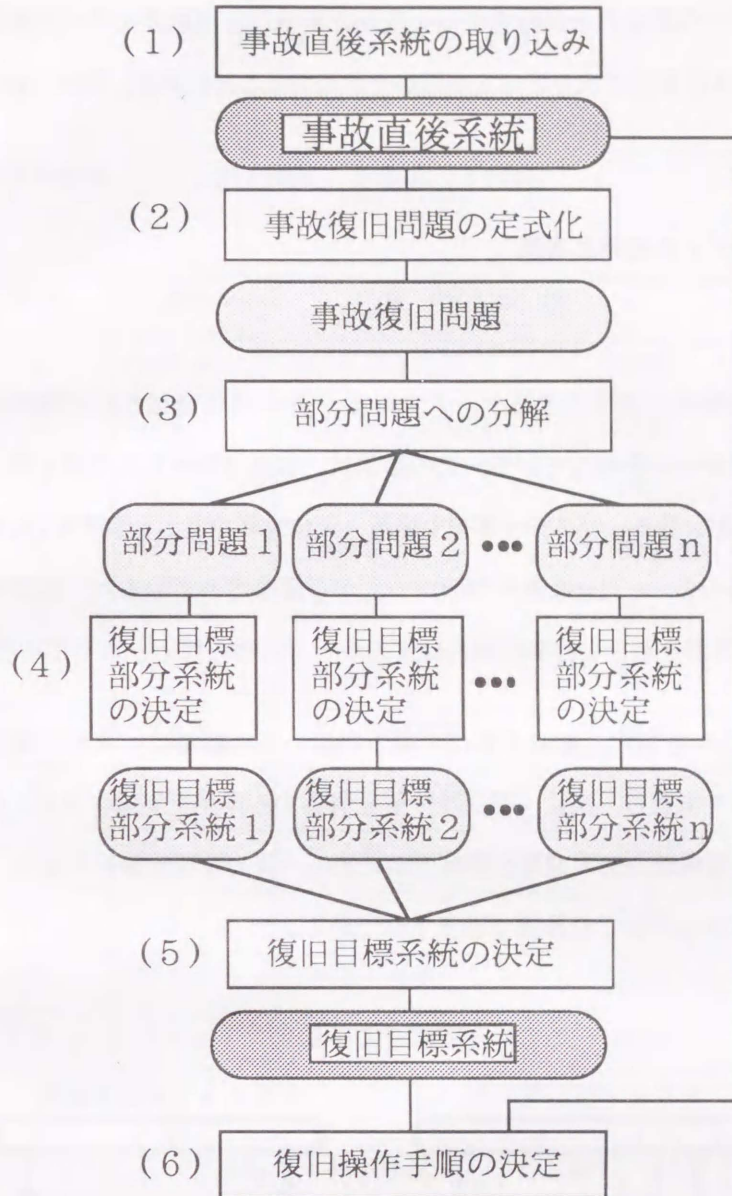


図 6.7 処理方式

## 6.5 適用例

### 6.5.1 ケーススタディの条件

本方式を図 6.1 に示す系統に適用する。この事故例は、G 変電所 (Gss)，H 変電所 (Hss)，I 変電所 (Iss)，K 変電所 (Kss)，L 変電所 (Lss)，および M 変電所 (Mss) が全停という広範囲にわたる停電区域のために復旧の難しいものになっている。ここで行うケーススタディの目的は、実用レベルの

大規模なモデルを用いて負荷条件と設備容量値を変えた場合に、熟練運転員が実施しているのと同様な復旧操作手順が許容できる計算量で出力されるか否かを評価することにある。以下では、典型的な3つのケースについて説明する。

### 6.5.2 ケーススタディの結果と考察

#### (1) ケース1

ケース1は、全ての負荷が復旧できるケースである。図6.8に結果として得られた復旧目標システムを示す。図中の太線が復旧ルートを示している。この結果は、文献(54)の方法を用いた場合と同一のものである。上位他電源復旧2箇所、ブスタイ復旧1箇所、下位他電源復旧1箇所という結果が得られている。開放した関係線の両端のGssとHssは各々別のルートから復旧されているが、応援可能電力の不足のために、KssはHssからの受電をあきらめ事故前とは別のルートからの復旧となっている。

図6.9に復旧操作手順を示す。復旧手順は、電圧階級の高い順番に、まず、復旧ルート以外のブランチに対して切離し操作を実施し、次に、復旧ルートを構築する操作を実施させるように決定している。6～7番手順は、変圧器加電時の突入電流を抑制するための一時的な開放操作である。これらの手順は、6.3項でも述べたよう知識処理により作成できる手順である。

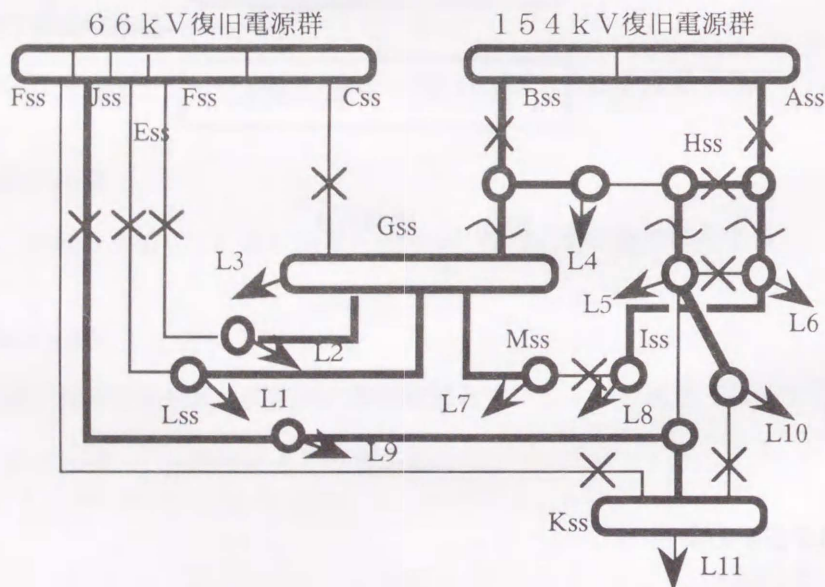


図6.8 復旧目標システム (ケース1)

## 事故復旧操作手順表

事故設備：D-H送電線ルート事故（4回線）

No.	所名	操 作 内 容
1	H s s	G-H送電線 切離
2	H s s	H-K2送電線 切離
3	G s s	#1・2B 停止
4	H s s	CB01 閉じる
5	H s s	#1B 停止
6	H s s	#2B 停止
7	H s s	A-H送電線 使用
8	G s s	B-G送電線 使用
9	H s s	#1B 使用
10	H s s	#2B 使用
11	G s s	#1・2B 使用
12	J s s	J-K送電線 使用

図6.9 復旧手順表（ケース1）



(2) ケース 2

ケース 2 は、ケース 1 の Bss と Gss 間の送電線の片回線作業中とした特殊なケースである。片回線の作業は Bss と Gss 間の送電線の容量を半分にするにより表現できる。図 6.10 に結果として得られた復旧目標システムを示す。文献 (54) と同一の結果である。上位他電源復旧 2 箇所、ブスタイ復旧 1 箇所、下位他電源 2 箇所まで全ての負荷が復旧されている。Gss の 2 次側母線を介したブス回し復旧という高度な復旧が実現されている。すなわち、Gss の 2 次側母線は変圧器を介した 1 次側母線からの復旧をあきらめ、2 次側母線に接続している連係線 (C-G 送電線) を用いて復旧することにより、同母線に接続している他の停電送電線を復旧している。

図 6.11 に復旧操作手順を示す。

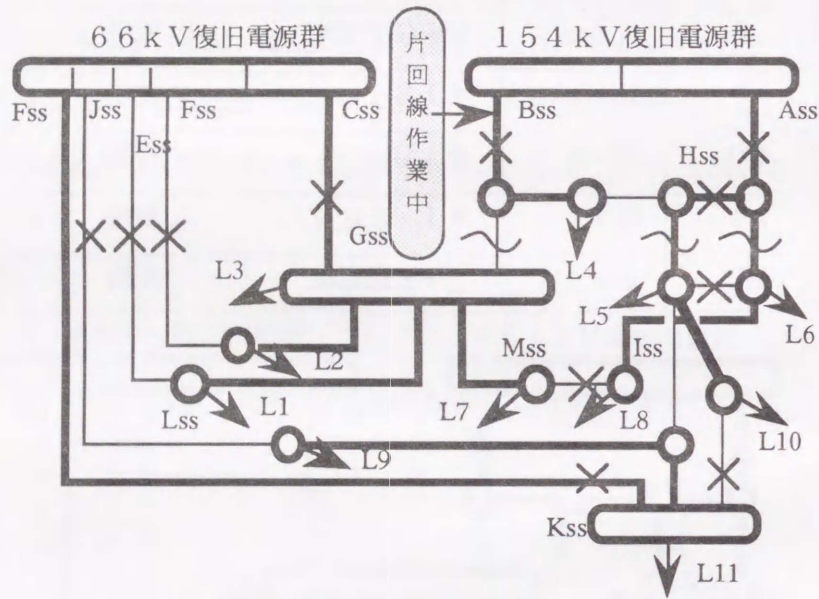


図 6.10 復旧目標系統 (ケース 2)

## 事故復旧操作手順表

事故設備：D-H送電線ルート事故（4回線）

No.	所名	操 作 内 容
1	H s s	G-H送電線 切離
2	H s s	H-K2送電線 切離
3	G s s	#1・2B 停止
4	H s s	CB01 閉じる
5	H s s	#1B 停止
6	H s s	#2B 停止
7	H s s	A-H送電線 使用
8	G s s	B-G送電線 使用
9	H s s	#1B 使用
10	H s s	#2B 使用
11	G s s	C-G送電線 使用
12	K s s	F-K送電線 使用

図 6.11 復旧手順表（ケース2）

(3) ケース3

ケース3は、さらに特殊なケースとしてケース2のブス回し復旧の応援ルートであったC<sub>ss</sub>とG<sub>ss</sub>間の送電線をなんらかの理由で使用できないようにしたものである。図6.12に結果として得られた復旧目標系統を示す。文献(54)と同一の結果である。過負荷切離し1箇所、上位他電源復旧2箇所、ブスタイ復旧1箇所、下位他電源2箇所を用いた復旧が実現されている。図6.13が結果として得られた復旧操作手順である。第1手順が過負荷による負荷の切離し手順、第7~8が変圧器課電時の突入電流を抑制するための一次的な開放操作である。簡単化のために図6.2のノード・ブランチレベルの手順にとどめて示してある。すなわち、第2手順を実際の給電指令レベルで表すと2回線送電線であるため実際には2ステップとなる。

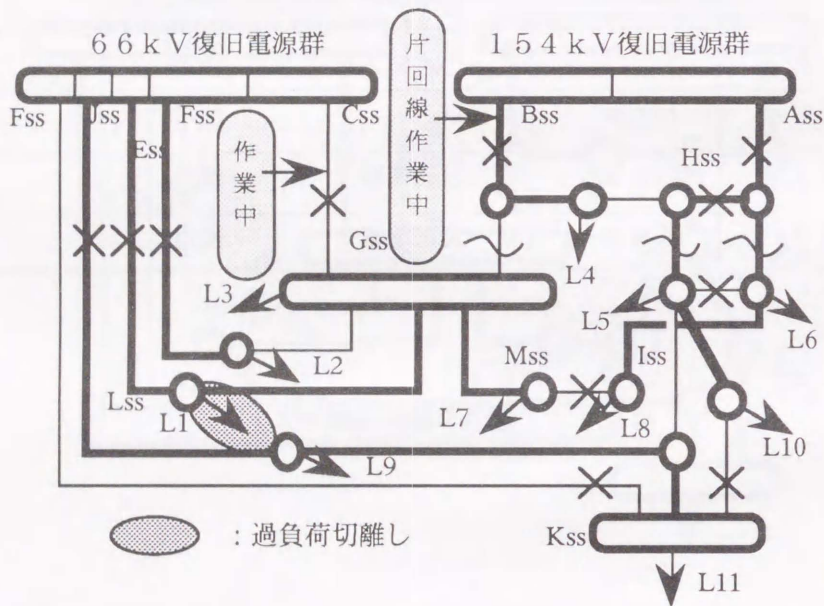


図6.12 復旧目標系統(ケース3)



## 事故復旧操作手順表

事故設備：D-H送電線ルート事故（4回線）

No.	所名	操 作 内 容
1	L s s	負荷01 過負荷切離
2	H s s	G-H送電線 事故切離
3	H s s	H-K2送電線 切離
4	G s s	F-G送電線 切離
5	G s s	#1B 停止
6	H s s	CB01 閉じる
7	H s s	#1B 停止
8	H s s	#2B 停止
9	H s s	A-H送電線 使用
10	G s s	B-G送電線 使用
11	H s s	#1B 使用
12	H s s	#2B 使用
13	F s s	F-G送電線 使用
14	E s s	E-L送電線 使用
15	J s s	J-K送電線 使用

図6.13 復旧手順表（ケース3）

(4) 実行時間と動作環境

このケーススタディは、3 MIPSのEWSを用いて行った。表6.2に復旧目標系統決定の処理時間について、文献(54)の方法と、提案する方式の比較を示す。いずれも目標系統の決定と復旧操作手順決定を含んでいる処理時間である。提案方式が非常に高速に復旧操作手順まで決定できることがわかる。また、復旧手順作成に要する時間は、全てのケースで1秒以内であった。第5章で述べた文献(54)の方法に比較して、約30%の処理時間で解を得ることができる。

表6.3に本システムの知識数(ルール数)を示す。参考のために実システムの概略の知識数も併記した。同表からわかるように本システムでは、全知識の約2/3を占めている復旧目標系統作成の知識のほとんどを数理計画法に置き換えているため、全体の知識数を40%程度にまで削減することができる。

表6.2 処理時間の比較 (秒)

(単位:秒, 3MIPSのEWS使用)

ケース	文献(54)の方法	提案方式
1	39	12
2	196	16
3	69	14

表6.3 知識数の比較

No.	項目	実システム	本システム
1	復旧目標系統作成	200程度	12(93)
2	復旧操作手順作成	100程度	43
備考	・( )内の数値は、本システムで数理計画法を適用しない場合の知識数 ・知識数の減少率: $(12+43) * 100 / (93+43) = 40.4 (\%)$ ・実システムと本システムの知識数の差異は、主として電力系統を表現するデータの詳細度の違いによる。		

## 6.6 結言

本章では、知識ベース的手法と数理計画的手法との融合による事故復旧システムについて提案した。復旧目標系統決定には知識ベースにより高速化を図った数理計画的手法を、復旧操作手順には知識ベース処理的手法を適用した。本方式は解の最適性を保ちながら処理時間も許容範囲におさめることのできる方法である。さらに、知識の一部を数理計画的手法に置き換えているため、知識の取り扱いに伴う開発コストや運用開始後の維持コストの削減が期待される。

実用に供されている事故復旧エキスパートシステムの知識数は、著者の実務の経験からするとルールベースで約300程度である。この内訳は、復旧目標系統の決定に200、復旧手順の決定に100程度である。本方式によると、復旧目標系統の決定を数理計画法に置き換えたために、実質のルール数は40%程度まで減少させることができ、従来管理の難しかった知識ベースに格納する知識の取り扱いも容易になることが予想される。そして、大規模なモデルを用いたケーススタディにより本方式が高速に復旧手順を決定することができることを示した。この処理速度は、事故発生から復旧手順の作成までの目標値が60秒であることを考えれば、事故検出の機能を加えても十分なりアルタイム性能を実現していると考えられる。

本方式は、ほとんどの場合には十分有効であると考えているが、部分問題の解に未復旧負荷が残るような場合には系統全体としての協調処理が必要であると考えられる。このような協調処理が必要となるのは、今回対象とした系統よりも多くの電圧階級を有するような複雑な系統構成の場合に考えられるが、そのような状況に対応できるより知的な事故復旧方式の開発が望まれる。多段決定問題としての解法もその一つの解決方法になろう。

計算機技術の進歩によりさまざまな手法を適用したシステムが、比較的容易に構築可能になってきた。しかし、どのような手法をとるにせよ複雑になり過ぎては、システムの信頼性や保守性の点から問題である。特に、現在の知識ベースシステムでは、知識数が増えるに従って知識間の相互関係が複雑になるため、知識の更新に伴うシステム全体の完全性の確認が難しくなっている。本論文のような数理計画的手法による復旧目標系統決定法を事故復旧エキスパートシステムに組み込むことにより、知識の数を減少させ、事故復旧システム全体の複雑さを緩和させるのも一つの解決方法であろう。



## 第7章 結 論

電力系統の計画・運用のための系統運用計算機の自動化項目として、「平常時操作」と「復旧操作」に着目して述べてきた。「平常時操作」では、いかなる系統構成に対しても知的に操作指令手順を自動合成し、かつ、その手順の検証ができる信頼性の高いシステムの構築方法について示した。「復旧操作」では、オンラインでの使用を念頭に置き、いかなる系統構成と運用状態においても知的にかつ高速に復旧操作指令手順を自動合成することができる信頼性の高いシステムの構築方法を示した。

以下、章毎に内容と得られた結果を要約する。

### (第2章) 論理生成による平常時操作手順の決定

計算機による「平常時操作」の本格的な自動化を目的として開発した論理生成方式について述べた。まず、「平常時操作」の基本的な考え方として、(i) 停電範囲最小、(ii) 停電時間最小、および (iii) 安全な操作の3つの目的に分類し、この目的を満足するような操作手順の自動合成方法を示した。そして、この目的を実現する効率の良いアルゴリズムを確立するために、電力系統を構成する要素を6つの設備グループに分類した。特に本方式は、不必要な停電を回避するために、あらかじめ実際の停止操作に先立って実施する“停電回避手順”や、停止操作後の“一時停電設備への再課電手順”も作成できる知的なシステムとして完成している。この開発により得られた考え方は、以後の「平常時操作」の核となり現在開発されている実用システムのほとんどで利用されている。

### (第3章) 知識ベース方式による平常時操作手順の決定

第2章で開発した手続き型言語を用いた論理生成による「平常時操作」システムは、そのソフトウェアの規模が非常に大きいために、その維持・管理の点で問題のあることが明らかになってきた。そこで、本章ではソフトウェアの維持・管理の簡素化を目的とし、第2章で示した手順の自動生成に対する規則を知識ベースシステムのルールとして記述し、手続きとデータの部分を分離した知識ベースシステムの提案を行なった。また、操作手順の妥当性を知識ベースで検証する機能や、ワーキングメモリ上に存在する推論の中間結果を“深い知識”を用いて動的に検証する機能の構築方法も示した。この知識の動的検証は、より信頼性の高いシステムを構築するためには必要であると考えられるが現在の実システムでは不足してい

る機能である。このシステムはシリアルインターフェイスで結合した2台のパーソナルコンピュータ上にインプリメントされ、その性能を評価した結果十分実用に供しうることが判明した。このように、本章で対象としたオフライン的な業務を支援する計算機システムには、パーソナルコンピュータでもかなりの部分がカバーできると考えられる。

#### (第4章) 線形計画法の適用による復旧目標系統の決定

本章以降は、「復旧操作」に関連した方式の提案を行なった。本章では、事故による停電が発生した場合に復旧の目標となる系統構成(復旧目標系統)を、最小費用流問題として解く方法の提案を行なった。グラフ的なデータ構造を用いることによって復旧目標系統を決定する効率のよいアルゴリズムを開発した。そして、実系統の事故例に適用して通常の運転状態では極めて高速に解を求めることが可能であることを示した。復旧目標系統の決定を最小費用流問題として解く方法は従来提案されていない方法であり、系統計算機による事故復旧操作の自動化の一つの望ましい方法であると考えられる。

#### (第5章) 混合整数計画法の適用による復旧目標系統の決定

第4章で示した復旧目標系統の決定方式は、系統の運用状態が重負荷の場合には運用面からすると運用者に馴染まない系統構成が得られる場合があった。このため、本章では復旧目標系統を構成するブランチの採否と、復旧対象負荷の採否に0-1変数を割当て、ブランチ潮流に連続変数を割当てて、復旧目標系統決定問題を定式化する方法を与えた。特に、従来全く考慮されていなかった運用者の復旧優先度に対応する“復旧操作コスト”の概念を提案し、運用者にも受け入れられやすい解が得られることを示した。この方式も第4章と同じ実系統の事故例に適用して、分枝限定法により良好な結果が得られたことを述べた。更に、「第4章の方式を問題のスクリーニングとして用いた後に本方式を適用する」という実用システムとしての枠組みの提案も行なった。

#### (第6章) 知識ベースと数理計画法の融合による復旧手順の決定

本章では、第5章で提案した方式を実用化する上で必要になる処理速度の向上に対する提案を行なった。よく知られているように分枝限定法のような厳密な最適解を求めるアルゴリズムは、0-1変数の個数の指数オーダーの計算量を必要とするため問題の規模が大きくなると、許容時間内に計算が終了しないという事態になる。そこで、原問題を事故復旧特有の知識で部分問題に分解して効率良く解く方法を提案した。この方法を、第4・5章で用いた実系統の事故例よりも更に大規模なモデル系統に対して適用し、極めて高速に解が得られたことを示した。この知識ベースと数理計画法の融合による事故復旧システムは、知識数の減少に伴う知識ベースシステムの開発や維持に要するコストの削減の効果も期待できる優れた方法であると考えられる。



本論文では、電力系統操作の計算機による自動化という観点から、知的で信頼性があり、かつ実用に供しうるレベルの方式の検討を行ないある程度の成果を収めることができたと考えているが、不十分と考えられる部分、あるいは継続した研究が必要であると考えられる部分も少なくない。今後の課題として更に研究が必要であると考えられる事項を以下に示す。

- (1) 「平常時操作」は，“停止調整”から“停止件名管理”，そして“操作件名作成”と“操作指令手順作成”および“検証”のような機能があるが、現状のシステムではいずれも一貫した思想のもとにシステムが開発されているとは言いがたい。また、電力系統のセキュリティとの関係も考慮した本格的なシステムは未だ存在していない。今後は、将来実施される操作の面から考えられた電力系統のセキュリティ指標の開発と共にこの指標を用いた「平常時操作」としてのトータルシステムの開発を目指していく必要があると考えられる。
- (2) 「復旧操作」に対しては現在まで本論文の提案も含めて様々な方法（論理生成方式，知識ベース方式，数理計画的な方式）が提案されているが，いずれも復旧操作全体をカバーするものではないと考えられる。今後は本論文でも一部実現したようにこれらの方法を融合し，総合的な事故復旧システムを目指していく必要があると思われる。また，個別な検討項目としては以下のものがある。
  - (i) 第4章のネットワークプログラミングによる方法における放射状制約の導入に関する検討。
  - (ii) 第5～6章の混合整数計画法の適用による方法における“全体協調処理”の実現方法の検討。
  - (iii) 「復旧操作」に対する新しい手法の適用に関する検討。特に，現在の計算機処理の定石にもなっている「復旧目標系統決定」と「復旧手順作成」の2段階アプローチの再検討。リアルタイム性からすると1段階アプローチが望ましいが，現在のところ効率的な手法が開発されていない。

以上，本論文で示した電力系統操作の計算機による自動化の研究は，“平常時操作”と“復旧操作”の両面からの検討により，それぞれの操作に対して新しい知見を提示することができたと考えている。本論文の内容は系統操作全体からすれば狭い範囲をカバーするにすぎないが，電力系統操作の計算機による自動化の発展に対して一助となれば幸いである。



## 謝 辞

本研究は、広島大学工学部 佐々木博司教授の御指導のもとに遂行されたものであり、終始時宜にかなった御教示と御鞭撻を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表す次第であります。

本研究を進めるあたり有益な御討論と御助言をいただきました広島大学工学部 山下英生教授、籙元孝夫教授、坂和正敏教授に厚く御礼申し上げます。

また、本研究遂行中に終始御激励を賜りました 宮崎大学工学部 石塚興彦教授、広島大学工学部 餘利野直人助教授、久保川淳司助手、輝平盛重技官、福山大学工学部 川原耕治助手に深く感謝の意を表します。

また、著者が株式会社東芝に在職中の約10年の間、公私ともに多大な御指導を賜った(株)東芝府中工場電力計算機システム部 陽田正彦主幹に心より感謝致します。

更に、著者を教育研究職に御導き下さった 松江工業高等専門学校 故山本忠賢教授には同学校に赴任以来終始御激励を賜りましたが、本論文執筆中にご健康を損なわれ突然ご逝去なさいました。本論文を御霊前にお供えして深く感謝の意を表しますとともに、ご冥福をお祈り致します。

また、松江工業高等専門学校 電気工学科主任教授 東村正己博士をはじめ教職員の皆様、および前松江工業高等専門学校 電気工学科主任教授 善波正夫博士には、終始変わらぬ温かい御支援と御協力を賜りました。厚く御礼申し上げます。

更に、本研究を行なう上で多大な便宜と貴重な援助を頂きました 中国電力株式会社技術研究センター 北川 稔部長、渋谷 紘主査、杉原弘章副主査、石川文雄副主査をはじめ関係各位に対して、心から感謝致します。

最後に、本論文の作成にあたって著者が文部省在任研究員(平成6年5月～平成7年2月)として広島大学工学部電力工学研究室に同席させて頂きました折に、大学院生 歌谷昌弘君をはじめ研究室の方々に大変お世話になりました。厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- (1) 鈴木, 尾出, 幅: “定常時系統自動操作論理の開発”, 電学論, 90巻, (1970).
- (2) 電気学会給電専門委員会: “電力系統の信頼度制御”, (1972).
- (3) 鈴木, 幅: “事故時自動操作論理の開発”, 電学論B, 93巻, 第8号, pp.323-330, (1973).
- (4) 鈴木, 児玉, 小林, 石塚: “二次系統の復旧時系統自動操作論理”, 電学論B, 97巻, 第3号, pp.111-118, (1977).
- (5) E. J. Simburger and F. J. Hubert, "Low Voltage Bulk Power System Restoration Simulation", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 11, pp. 4479-4484, (1981).
- (6) R. J. Kafka, D. R. Penders, S. H. Bouchey, and M. M. Adibi, "System Restoration Plan Development for a Metropolitan Electric System", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 8, pp. 3703-3713, (1981).
- (7) 電気共同研究会: “最近の系統運用施設”, 電気共同研究, 第39巻, 第4号, (1983).
- (8) 松本, 坂口: “知識ベースに基づく電力系統復旧方式の決定法”, 電学論B, 103巻, 第3号, pp.175-182, (1983).
- (9) ダンツィーク著, 小山訳: “線形計画法とその周辺”, HBJ出版局, (1983).
- (10) T. Sakaguchi, and K. Matsumoto, "Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration", IEEE Trans., Vol. PAS-102, No. 2, pp. 320-329, (1983).
- (11) 奈良, 山城, 小池: “ループを含む系統へ適用可能な復旧自動操作論理”, 電学論B, 104巻, 第3号, pp.133-140, (1984).
- (12) 駒井, 坂口: “系統復旧操作に関する知識の数理計画的分析と評価”, 電学論B, 107巻, 第6号, pp.269-275, (1987).
- (13) A. Adibi, et al., "Power System Restoration - A Task Force Report", IEEE Trans., Vol. PWRS-2, No. 2, pp. 271-277, (1987).
- (14) J. Gutierrez, M. Staropolsky, and A. Garcia, "Policies for Restoration of a Power System", IEEE Trans., Vol. PWRS-2, No. 2, pp. 436-442, (1987).
- (15) H. E. Dijk, A. W. van der Weegen and G. P. T. Roelofs, "An Expert System for Power System Restoration - Restoration strategies - ", Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, Stockholm-Helsinki, August 22-26, pp. 8.9-8.15, (1988).
- (16) 奥田, 渡辺, 山崎, 馬場: “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巻, 第12号, pp.553-560, (1988).



- (17) F. F. WU, and A. Monticelli, "Analytical Tools for Power System Restoration - Conceptual Design", IEEE Trans., Vol. 3, No. 1, pp. 10-16, (1988).
- (18) 糟谷, 小田, 井上, 飯塚: "地方供給系統における事故時復旧操作方式の開発", 電学論B, 109巻, 第4号, pp.177-184, (1989).
- (19) 辻, 柳田: "LP法による事故復旧操作手順の決定法", 平元年電気学会全国大会講演論文集, 924, pp.17-18(8), (1989).
- (20) 藁科, 小島, 加藤, 渡辺: "基幹系統事故復旧エキスパートシステム", 電学論B, 108巻, 第11号, pp.517-524, (1988).
- (21) 永田, 奥寺, 北口, 武田: "平常時操作指令手順の論理生成方式", 電学論B, 109巻, 第3号, pp.97-102, (1989).
- (22) 沖, 西森, 民辻, 小池, 倉岡, 山本: "作業停電計画システムの開発研究", 電気学会電力技術研資, PE-89-20, pp.31-39, (1989).
- (23) 長谷川, 横井, 田中, 北村: "エキスパート手法を用いた電力系統操作支援システムの開発", 電気学会電力技術研資, PE-90-82, pp.141-150, (1990).
- (24) 幅, 前田, 渡辺, 福井, 野本: "作業時操作手順自動作成システムの開発", 電学論B, 113巻, 第2号, pp.159-167, (1989).
- (25) 上杉, 梶沢, 中井, 小俣: "電力系統制御用計算機システムにおけるデータメンテナンス方式", 電学論B, 109巻, 第2号, pp.57-64, (1989).
- (26) Y. Kojima, S. Warashima, S. Nakamura, and K. Matsumoto, "Development of a Guidance Method for Power System Restoration", IEEE Trans., Vol. 4, No. 3, pp. 1219-1227, (1989).
- (27) Y. Kojima, S. Warashina, M. Kato, and H. Watanabe, "The Development of Power System Restoration Method for Bulk Power by Applying Knowledge Engineering Techniques", IEEE Trans., Vol. 4, No. 3, pp. 1228-1235, (1989).
- (28) 電気学会: "電力系統のエキスパートシステム", 電気学会技術報告, (II部)第339号, (1990).
- (29) 電気学会: "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).
- (30) 藁科, 小島, 中村, 松本: "基幹系統における事故復旧操作ガイダンス方式", 電学論B, 109巻, 第2号, pp.49-56, (1989).
- (31) 永田: "平常時操作指令手順作成に対するAIの適用", 平成2年電気学会全国大会講演論文集, 982, pp.66-67(9), (1990).
- (32) チャールズL. フォギー, 中間, 長坂訳: "OPS83オフィシャルマニュアル", パーソナルメディア, (1990).
- (33) 永田, 佐々木: "知識ベースシステムの動的検証法", 平成2年電気学会電力・エネルギー部門全国大会, 123, pp.45-46, (1990).
- (34) 有田, 石野, 功刀, 和田, 島田: "総合制御所における電力系統運用支援エキスパートシステムの開発", 電学論B, 110巻, 第6号, pp.504-510, (1990).



- (35) K. Hotta, H. Nomura, H. Takemoto, K. Suzuki, S. Nakamura, and S. Fukui, "Implementation of Realtime Expert Systems for a Restoration Guide in a Dispatcher", IEEE Trans., Vol. 5, No. 3, pp. 1032-1038, (1990).
- (36) 永田, 佐々木: "電力系統操作に対するニューラルネットワーク理論の適用", 平成3年電気学会全国大会講演論文集, 1162, pp. 204-205 (9), (1991).
- (37) 中村: "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, 111巻, 第5号, pp.543-551, (1991).
- (38) 高野, 松本, 坂口: "知識ベースシステムの動的検証法", 電学論B, 111巻, 第1号, pp.125-131, (1991).
- (39) D. S. Kirschen, and T. L. Volkman, "Guiding a Power System Restoration with an Expert System", IEEE Trans., Vol. 6, No. 2, pp. 558-566, (1991).
- (40) 金子, 植木, 福山: "火力プラントの動的な制約を考慮した電力系統自動復旧エキスパートシステム", 電学論B, 110巻, 第4号, pp.286-293, (1990).
- (41) 永田: "Hopfield型ニューラルネットワークの電力系統操作への適用と解析", 平成4年電気学会全国大会講演論文集, 1025, pp.61-62 (9), (1992).
- (42) 永田, 佐々木, 北川: "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", 電気学会電力技術研究資料, PE-92-163, pp.29-38, (1992).
- (43) K. Shimakura, J. Inagaki, Y. Matsunoki, M. Ito, S. Fukui, and S. Hori, "A Knowledge-Based Method for Making Restoration Plan of Bulk Power System", IEEE Trans., Vol. 7, No. 2, pp. 914-920, (1992).
- (44) R. Nadia, T. E. Dy Liacco, and K. A. Loparo, "A Hierarchical Interactive Approach to Electric Power Restoration", IEEE Trans., Vol. 7, No. 3, pp. 1123-1131, (1992).
- (45) M. M. Adbi, et al, "Special Considerations in Power System Restoration", IEEE Trans., Vol. 7, No. 4, pp. 1419-1424, (1992).
- (46) M. M. Adbi, et al., "New Approach in Power System Restoration", IEEE Trans., Vol. 7, No. 4, pp. 1428-1434, (1992).
- (47) 永田, 佐々木, 北川: "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, 第5号, pp.509-515, (1993).
- (48) 垣本, 林: "超高压系統全停時の系統再構成における給電指令の自動選択", 電学論B, 113巻, 第6号, pp.613-620, (1993).
- (49) 永田, 佐々木, 北川: "混合整数計画法の適用による復旧目標系統の決定", 平成5年電気学会全国大会講演論文集, 1118, pp.39-40 (9), (1993).
- (50) M. E. Cooper, et al., "Bulk Power System Restoration Training Techniques", IEEE Trans., Vol. 8, No. 1, pp. 191-197, (1993).
- (51) C. C. Liu, et al., "Generation Capability Dispatch for Bulk Power System Restoration: A knowledge based approach", IEEE Trans., Vol. 8, No. 1, pp. 316-325, (1993).

- (52) T. Nagata, H. Sasaki, J. Kubokawa, and M. Kitagawa, "Knowledge Based System for Power System Operation Procedure on Personal Computers", Conference on ADVANCES IN POWER SYTEM CONTROL, OPERATION & MANAGEMENT (APSCOM-93, Hong Kong), Proceedings Vol. 1, pp. 66-71, (1993).
- (53) 永田, 佐々木, 北川: "混合整数計画法の適用による事故復旧問題の高速解法", 平成6年電気学会全国大会講演論文集, 1144, p.52, (1994).
- (54) 永田, 佐々木, 北川: "混合整数計画法の適用による復旧目標系統の決定", 電学論B, 114巻, 第2号, pp.179-185, (1994).
- (55) 永田, 佐々木, 北川, 杉原: "パソコンによる電力系統平常時操作支援エキスパートシステム", 電学論B, 114巻, 第7/8号, pp.807-813, (1994).
- (56) T. Nagata, H. Sasaki, and N. Yorino, "A Personal Based Expert System for Power System Operation Education", International Symposium Power Systems & Engineering (IASTED-94, Wakayama Japan), pp. 57-60,(1994).
- (57) 永田, 佐々木: "知識ベースと数理計画的手法の融合による事故時自動復旧方式", 電気学会電力技術研究資料, PE-94-85, pp.131-140, (1994).
- (58) 永田, 佐々木, 北川: "知識ベースと数理計画的手法の融合による事故復旧", 電学論B, 115巻, 第5号, pp.459-465, (1995).
- (59) T. Nagata, H. Sasaki, and N. Yorino, "Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming Approach", Internatiobnal Power Engineering Conference (IPEC-95, Singapore), Proceedings Vol. 2, pp. 612-617, (1995).
- (60) T. Nagata, H. Sasaki, and M. Kitagawa, "A Personal Computer Based Expert System for Power System Operation Education," Jounal of Electrical Power & Energy Systems, submitted,(1995).
- (61) T. Nagata, H. Sasaki, and R. Yokoyama, "Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming Approach", IEEE Winter Meeting, (IEEE WM-95, New York), 95WM142-0-PWRS, (1995).



## 付 録

## A. 電力系統操作関連用語

本論文で使用している電力系統操作関連の用語の中で代表的な用語を説明する。

## (1) 事業所

事業所とは操作を実施する箇所を特定するために主に使用される用語であり、以下の種別が決められている。電気所という呼び方もあるが、電力会社では事業所と呼んでいる場合が多い。

付表A.1 事業所種別

事業所種別	説 明
発電所	発電機を所有し電力の供給源となる事業所。発電用変電所と呼ばれることもある。
変電所	発電機を所有せず電圧階級を変更することを目的とする事業所。送電用変電所と呼ばれることもある。
配電用変電所	需要家に対して電力を分配することを目的とする事業所。配変と略して呼ばれることが多い。
開閉所	送電線の途中に設置され遮断器を有し、送電線を分離あるいは他のルートに分岐させることを目的とする事業所。
開閉塔	送電線の途中に設置され遮断器を有さずに断路器のみを有し、送電線を分離させることを目的とする事業所。送電線の開放操作に一旦その送電線の停電状態を作り出す必要があり操作の手順を難しくする要因になっている。
特別高圧需要家	需要家の中で大口の需要家であり、66kVや22kVの電圧階級で受電している事業所。特高と略して呼ばれることが多い。
送電課	送電線の運用管理の責任を有する事業所である。送電線の作業などの場合には、送電課に対して作業開始・終了の連絡を行う必要があるために、操作指令手順にもこの連絡の手順が含まれる。

## (2) 設備

設備とは操作を実施する部分を特定するために主に使用される用語であり、以下の種別が決められている。また、設備は系統運用計算機で電力系統操作を管理するための最小の設備の単位であり、実体のある実設備と、実体のない（処理上の目的で導入された）仮想設備がある。設備は必ずいずれかの事業所に所属させることによりその管理責任が明確になっているため、操作の手順表の先頭には事業所を特定する項目が「所名」として記入される。



付表A.2 設備種別

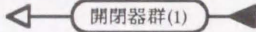
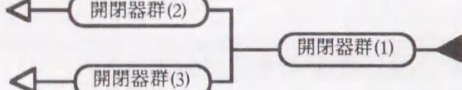
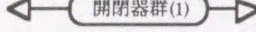
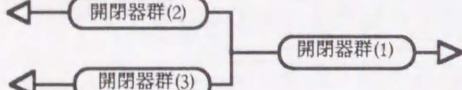
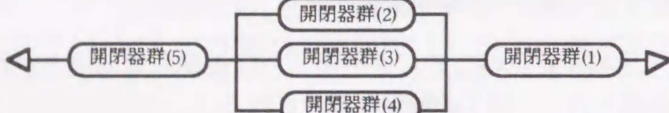
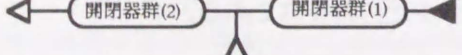
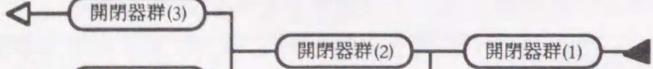
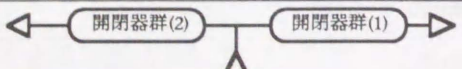
設備種別	説 明	
母線	発電所・変電所等に設置され複数の送電線や変圧器との電力の授受を行うための設備であり、その接続先等により以下の種類に細分される。	
	主母線	発電所・変電所の主たる母線であり、電圧階級の高い側を一次母線、低い側を二次母線と呼ぶ。また、その形態から、単母線（開閉器により分離できない母線）や複母線（開閉器により分離できる母線）とも呼ばれることがある。
	連絡母線	構内連絡線へ接続する場合の母線である。
	引込母線	一次側の主母線が用地などの原因で省略されている場合には、送電線が直接変電所に引き込まれる場合がある。このような部分に定義される仮想的な母線である。
	局配母線	発電所・変電所構内の局配変圧器へ接続する場合の母線である。
	調相母線	調相設備へ接続する場合の母線である。
	3次母線	変圧器の3次側の母線である。
	中性点母線	中性点設置装置へ接続する場合の母線である。
	発電機母線	発電機へ接続する場合の母線である。
	特高受電母線	特高に設置された電力の受電のための母線である。送電線の引込線から電力の供給を受ける。
変圧器	発電所・変電所に設置され変電所に設置され電圧階級の変更を行うための設備であり、その接続先等により以下の種類に細分される。	
	主変圧器	発電所・変電所の主たる変圧器である。
	局配変圧器	発電所・変電所構内の局部配電用の変圧器である。
	所内変圧器	発電所・変電所構内の所内電力用の変圧器である。
	起動用変圧器	発電所（火力）の補機を起動するための変圧器である。
接地用変圧器	中性点の接地のための変圧器である。	
発電機	発電所設置され電力を発生させるための設備である。	
調相設備	変電所に設置され電圧の安定化のために進相あるいは遅相の無効電力を電力系統から消費するための設備であり、以下の種類に細分される。	
	並列コンデンサ	進相無効電力を消費するための設備である。
	分路リアクトル	遅相無効電力を消費するための設備である。
	同期調相機	進相および遅相無効電力を消費するための設備である。
中性点接地装置	NR	接地用抵抗である。
	NL	接地用リアクトルである。
	PC	ペターゼンコイルである。

引込線	送電線から、発電所・変電所・配変・開閉所・開閉塔・特高の母線に引き込む部分の設備である。
抱合せ設備	変電所などの引込口で、複数の引込線が遮断器を有さないで断路器のみを介して接続される部分に定義される仮想設備である。電力系統にはこのような非標準な設備形態が存在するので、平常時・事故時ともに計算機での処理が難しくなっている。
構内連絡線	発電所・変電所の構内で距離的に離れた別の箇所へ送電するための設備である。
送電線区間	系統操作での送電線は、この区間と次の分岐との集合からなる総称名である。系統操作では、操作の対象となるのは発電所・変電所・配変・開閉所・開閉塔・特高などの引込線であるから、送電線自体はあまり意味がない。送電線区間は、引込線と引込線の間部分定義される設備である。
送電線分岐	送電線分岐は、送電線の分岐の部分に定義される仮想設備である。

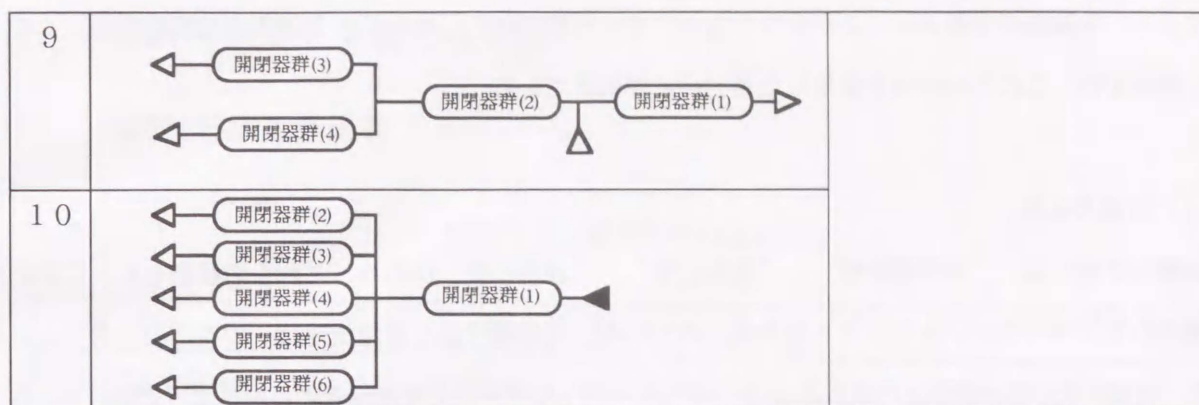
(3) 接続子

接続子は、設備と設備の接続部分に定義される開閉器群の集合であり、以下のような形態が考慮されている。

付表A.3 接続子の形態

No.	接 続 子 形 態	説 明
1		◄◄ : 自設備 接続子の所属する設備
2		◄◄ : 接続先端子 自設備が接続子を介して他の設備へ接続するための端子であり、他の設備に直接接続する場合と他の設備に所属する接続子内の接続元端子に接続する場合がある
3		
4		
5		△ : 接続元端子 他の設備が接続子内の分岐点へ接続してくる場合の端子である。
6		
7		◻ : 開閉器群 分岐のない直列に接続する開閉器の集合（論理開閉器ともいう）。
8		





#### (4) 停止件名と操作件名

停止件名とは、予定作業停止の要求のあった事項の総称であり、停止件名番号で管理されている。停止件名には、停止対象設備、停止要求日時、目的などの項目が含まれる。このような、停止件名は電力会社の各事業所から給電所などに集められて、停止調整（停止計画）業務により、電力の需要予想などを考慮したり、隣接の複数の停止件名を同時期にまとめる等の調整を行い、最終的に作業日時が決定される。停止調整が完了した停止件名は、操作件名としてその後は新しい番号体形のもとで管理される。すなわち、操作件名は複数の停止件名から構成されることが多い。このことは、その操作の手順が停止件名間で複雑に絡み合うことになり、手順の作成を難しくしている。本論文の第2～3章は、この平常時操作の手順の計算機による自動生成について述べている。

#### (5) 操作指令手順表

操作指令手順表は、実際に操作の手順をまとめたもので系統操作の中で一番重要な役割をもっている。操作手順表は、実際の操作の1週間前後に作成され十分に手順の誤りがないかが検証される。操作指令手順表は、手順番号、所名、操作対象設備、操作指令用語等から構成される。また、操作当日には操作の前に改めて想定していた系統構成や需要などのデータとの相違がないかを検証した後実施に移される。

#### (6) 目的指令と一操作一指令

従来の操作指令手順は、一操作手順ステップが一操作に対応していた。すなわち、操作対象の開閉器を特定して「入れる」、「開く」などの一操作一指令による操作が行われていた。しかし、この方式では近年の複雑化した系統操作では百ステップを越えるような手順表となり、操作の目的が見えなくなりその検証が非常に煩雑になってきた。そこで導入されたのが目的指令による操作の形態である。目的指令では、関連する開閉器操作をまとめて「使用」や「復旧」、「作業停止」などの指令にしたものである。こ



れにより、手順表の手順ステップが少なくなり、その手順で何をしたいのかが運用者に理解しやすくなった。現在では、この目的指令を採用した電力会社が増えている。

### (7) 設備の状態

設備の状態には、“充電状態”、“運転状態”、“運用状態”があり、これらの状態をもとに系統操作関係のアプリケーションソフトは作成されている。充電状態と運用状態は、実運用のシステムでは設備・機器の表示色とタグと呼ばれる印（“申”や“作”など）により運用者にわかるようになっている。

下表の（）内の色はあるシステムの表示色の一例である。また、運転状態は計算機での処理のために使用される。例えば、事故復旧では、運転状態が使用中の設備を用いて、復旧対象の系統（充電状態が停電中の設備の集合から運転状態が運用停止中、作業中、事故停止中の設備の集合を除いた設備の集合）を復旧するための手順を決定するのである。

付表A.4 設備の状態

状 態	種 類	定 義
充電状態	充電中（白）	当該設備が充電判定処理により充電と判定された状態。
	停電中（シアン）	当該設備が充電判定処理により停電と判定された状態。
運転状態	使用中	当該設備が充電中でかつなにも目的指令用語手順による指令が出されていない状態。
	運用停止中	当該設備が停電中あるいは「運用停止」等の目的指令用語手順による指令が出されている状態。
	作業中	当該設備が停電中あるいは「作業停止」の目的指令用語手順による指令が出されている状態。
	事故停止中	当該設備が事故設備判定処理により事故設備あるいは事故候補設備と判定された状態。
運用状態	申入作業実施中（黄）	当該設備が充電中でかつ「申入作業開始」の連絡用語手順による指令が出されている状態。
	運用停止実施中（シアン）	当該設備が停電中でかつ「運用停止作業開始」の連絡用語手順による指令が出されている状態。
	作業実施中（黄）	当該設備が停電中でかつ「作業停止作業開始」の連絡用語手順による指令が出されている状態。
	事故中（赤）	当該設備が事故設備判定処理により事故設備と判定された状態。
	事故候補中（紫）	当該設備が事故設備判定処理により事故候補設備と判定された状態。

## B. 平常時操作指令手順作成知識

## B.1 論理生成の生成規則

付表B.1 論理生成の生成規則

処 理	規 則
停電回避手順作成	<p>(1) 併用可能設備は、発電所の母線、変圧器、引込線のみとする。</p> <p>(2) 併用可能開閉器（課電操作開閉器）は電圧有操作開閉器であり、かつ初期系統で開であること。</p> <p>(3) 複数の課電操作開閉器が存在する場合は、事業所種別と設備種別の優先順位（表2.2，表2.3参照）により一つの課電操作開閉器を選択する。</p>
停止対象設備の停止手順作成	<p>(1) 複数の停止対象設備が存在する場合には、事業所種別と設備種別により優先順位（表2.4，表2.5参照）に従って手順を作成する。</p> <p>(2) 一つの停止対象設備を停止する操作の場合に、複数の手順の生成が必要なものは以下である。</p> <p>(2-1) ユニット変圧器の二次側操作が必要な場合</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ユニット変圧器の併用解く</li> <li>○三次母線の運用停止</li> <li>○ユニット変圧器の作業停止</li> </ul> <p>(2-2) 変圧器（三次側設備あり）の作業（運用）停止の場合</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○調相機（RC）を解列する</li> <li>○構内連絡線、引込線の運用停止</li> <li>○変圧器の作業（運用）停止</li> </ul> <p>(2-3) 中性点母線の作業停止の場合</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○中性点接地装置（NR，NL，PC）の運用停止</li> <li>○中性点母線の作業停止</li> </ul> <p>(2-4) 三次母線の作業（運用）停止の場合</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○調相機（RC）を解列する</li> </ul>

	<p>○構内連絡線，引込線の運用停止</p> <p>○三次母線の作業（運用）停止</p> <p>(2-5) 複母線（甲，乙母線）の作業（運用）停止の場合</p> <p>○甲，乙母線を併用する（母線停止前に併用していない場合）</p> <p>○対象母線以外の母線を併用解く</p> <p>○甲（乙）母線の作業（運用）停止</p> <p>(2-6) 単母線（変圧器一次側）の作業（運用）停止の場合</p> <p>○連絡母線との併用解く</p> <p>○バスセクションを介しての母線との併用解く</p> <p>○単母線の作業（運用）停止</p> <p>(2-6) 単母線（変圧器二次側）の作業（運用）停止の場合</p> <p>○連絡母線との併用解く</p> <p>○バスセクションを介しての母線との併用解く</p> <p>○単母線の作業（運用）停止</p> <p>(3) 複母線（甲，乙母線）あるいは主変圧器が操作対象設備の場合には，当該設備に関する常時予備設備があれば，あらかじめ使用する操作指令手順を作成した後に当該設備を停止する操作指令手順を作成する。</p> <p>(4) 特高の設備が操作対象設備の停止指令手順を作成する上で次のことを考慮した処理とする。</p> <p>(4-1) 特高に適用される操作指令については次の二種類があり，特高単位に該当する操作指令手順を作成する。</p> <p>○1 操作1 指令の特高</p> <p>○1 目的操作1 指令の特高</p> <p>(4-2) 開閉操作を伴う操作指令手順の中に次の連絡・確認のための操作指令用語を作成する。</p> <p>○開放確認</p> <p>○操作ロック</p> <p>○ロック解除</p>
--	--



	<p>(4-3) 特高の引込線をループ切替える場合は、あらかじめ受電回線受電回線を併用する操作指令手順を作成する。</p> <p>(5) 一定の停止操作手順を用いて操作指令手順を作成する上で、無電圧操作の単独LSを開閉する操作が含まれる操作指令手順がある場合は、その操作条件を考慮して停止操作順位の順位換えをする。</p> <p>(6) CBとそのCBが所属する設備がともに操作対象設備であれば、各々操作指令手順を作成する。</p>
<p>従属停電設備への再課電手順作成</p>	<p>(1) 再課電可能設備は、発変電所の母線、引込線とする。</p> <p>(2) 再課電可能開閉器（課電操作開閉器）は電圧有操作開閉器であり、かつ初期系統で閉であること。ただし、閉の開閉器がない場合は、課電操作開閉器となり得る開の開閉器を選ぶ。</p> <p>(3) 複数の課電操作開閉器が存在する場合は、事業所種別と設備種別の優先順位（表2.2，表2.3参照）に従って手順を作成する。</p>
<p>使用手順の作成</p>	<p>(1) 使用操作指令手順の作成順位は作成した操作指令手順の逆順位とする。</p> <p>(2) 使用操作を行うことにより、他の停止中でなければならぬ設備に影響を与えてはならない。この場合には、復旧するのみならず作成可能か否かを判断し、可能であれば復旧のための手順を作成する。</p>

## B.2 事業所種別による課電操作優先順位

付表B.2 事業所種別による課電操作優先順位

優先順位	事業所種別
1	発電所
2	送電用変電所（一次側電圧階級の高い送変を優先）

## B.3 設備種別による課電操作優先順位

付表B.3 設備種別による課電操作優先順位

優先順位	設備種別
1	一次側母線に接続する以下の操作対象設備 (一次側電圧階級の高い母線を優先)
	1 引込線（開閉器番号の若番を優先）
	2 母連（開閉器番号の若番を優先）
2	主変圧器 (二次側電圧階級の高い変圧器を優先, 複数あれば開閉器番号の若番順変圧器を優先)
3	二次側母線に接続する以下の操作対象設備 (一次側電圧階級の高い母線を優先)
	1 母連（開閉器番号の若番を優先）
	2 抱合わせ設備（開閉器番号の若番を優先）
	3 引込線（開閉器番号の若番を優先）

## B.4 事業所種別による停止操作優先順位

付表B.4 事業所種別による停止操作優先順位

停止操作優先順位（レベル1）		停止操作優先順位（レベル2）	
1	送電線に接続する配変，特高	1	電源の事業所に最も近い特高を優先し， 順次に停止順位を決定する。 (一回線受電特高は除く)
		2	電源の事業所に最も近い配変を優先し 順次に停止順位を決定する。
		3	一回線受電特高を対象に電源の事業所に最も近い 特高を優先し，順次に停止順位を決定する。
2	停止対象設備の送電線と関係 していない発電電所 (開閉器が開放中の場合)	1	電源端・負荷端データ（注）の古い番順
3	停止対象設備の送電線と関係 している発電電所	1	電源端・負荷端データの古い番順
4	その他	1	開閉塔（無電圧操作単独LSのみを有するもの）

（注） 電源端・負荷端データ

事業所を関係する送電線は，一つの送電線毎に複数の事業所と関連があり次の3種類に分類できる。

- (1) 送電線の電気を供給している事業所
- (2) 送電線から受電している事業所
- (3) 送電線の開閉器を開放しているが関係あるいは受電可能な事業所

上記，(1)を“電源端”の事業所，(2)(3)を“負荷端”の事業所とする。



## B.5 設備種別による停止操作優先順位

付表B.5 設備種別による停止操作優先順位

停止操作優先順位（レベル1）		停止操作優先順位（レベル2）	
1	主変変圧器二次側が接続する 主母線，補助母線に接続する 停止対象設備  (主変圧器自身は除く)	1	引込線（開閉器番号の若番を優先）
		2	配電線（開閉器番号の若番を優先）
		3	局配変圧器（号機番号の若番を優先）
		4	発電機（号機番号の若番を優先）
		5	補助母線（号機番号の若番を優先）
		6	抱合わせ設備（開閉器番号の若番を優先）
		7	接続設備（開閉器番号の若番を優先）
		8	上記以外の設備（順不同）
2	主変変圧器および主変変圧器 に接続する停止対象設備	1	三次母線に接続する設備（順不同）
		2	二次中性点母線に接続する設備（順不同）
		3	一次中性点母線に接続する設備（順不同）
		4	三次母線
		5	中性点母線（二次側優先）
		6	主変変圧器
3	主変変圧器一次側が接続する 主母線，補助母線に接続する 停止対象設備  (主変圧器自身は除く)	1	引込線（開閉器番号の若番を優先）
		2	配電線（開閉器番号の若番を優先）
		3	局配変圧器（号機番号の若番を優先）
		4	発電機（号機番号の若番を優先）
		5	補助母線（号機番号の若番を優先）
		6	抱合わせ設備（開閉器番号の若番を優先）
		7	接続設備（開閉器番号の若番を優先）
		8	上記以外の設備（順不同）
4	主母線，連絡母線，特高受電 母線	1	特高受電母線（順不同）
		2	連絡母線（順不同）
		3	二次側主母線
		4	一次側主母線

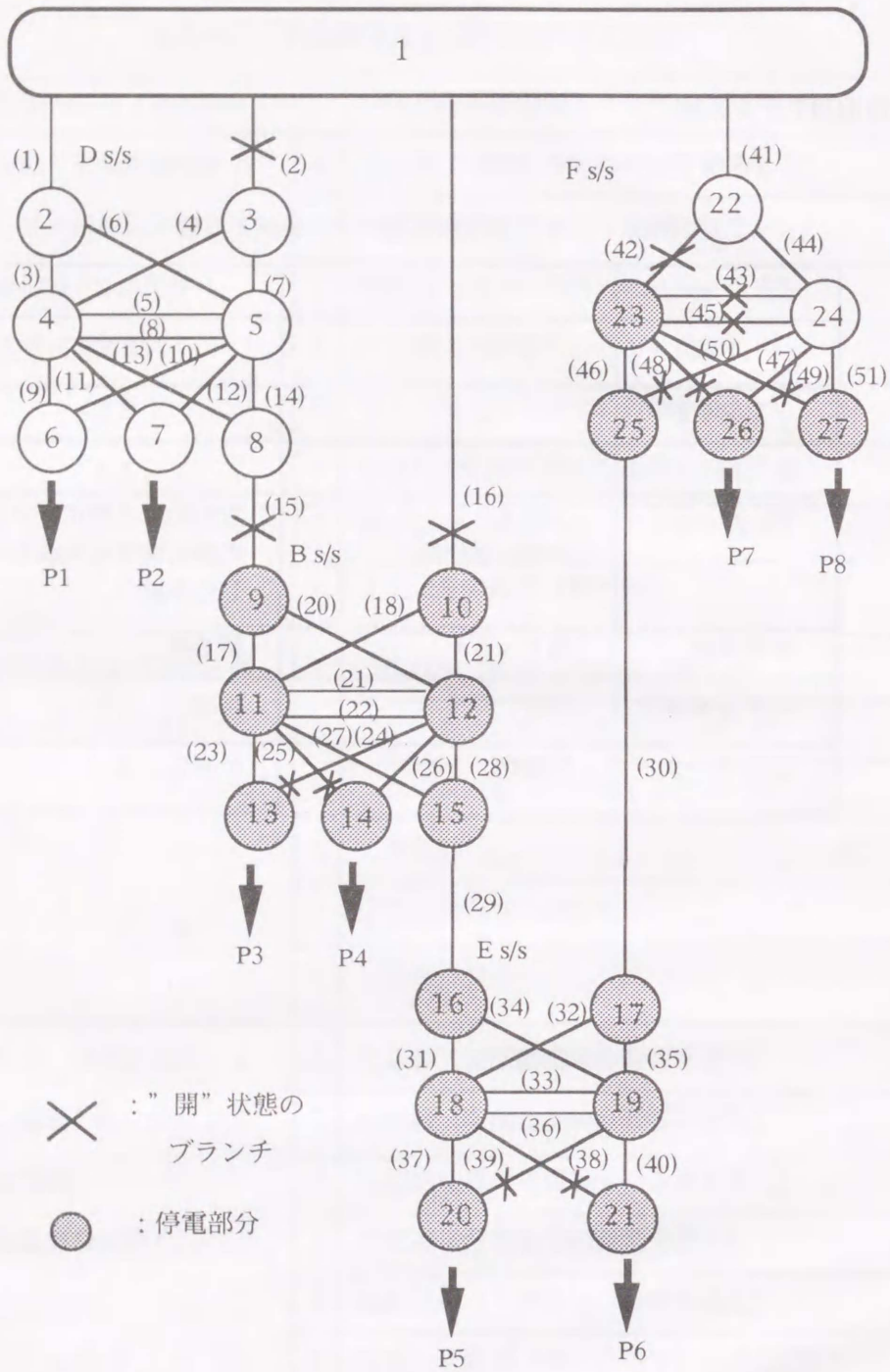
## C. 事故復旧用モデル系統と入力データ

### C.1 事故復旧用モデル系統

付表 C.1 事故復旧用モデル系統の概要

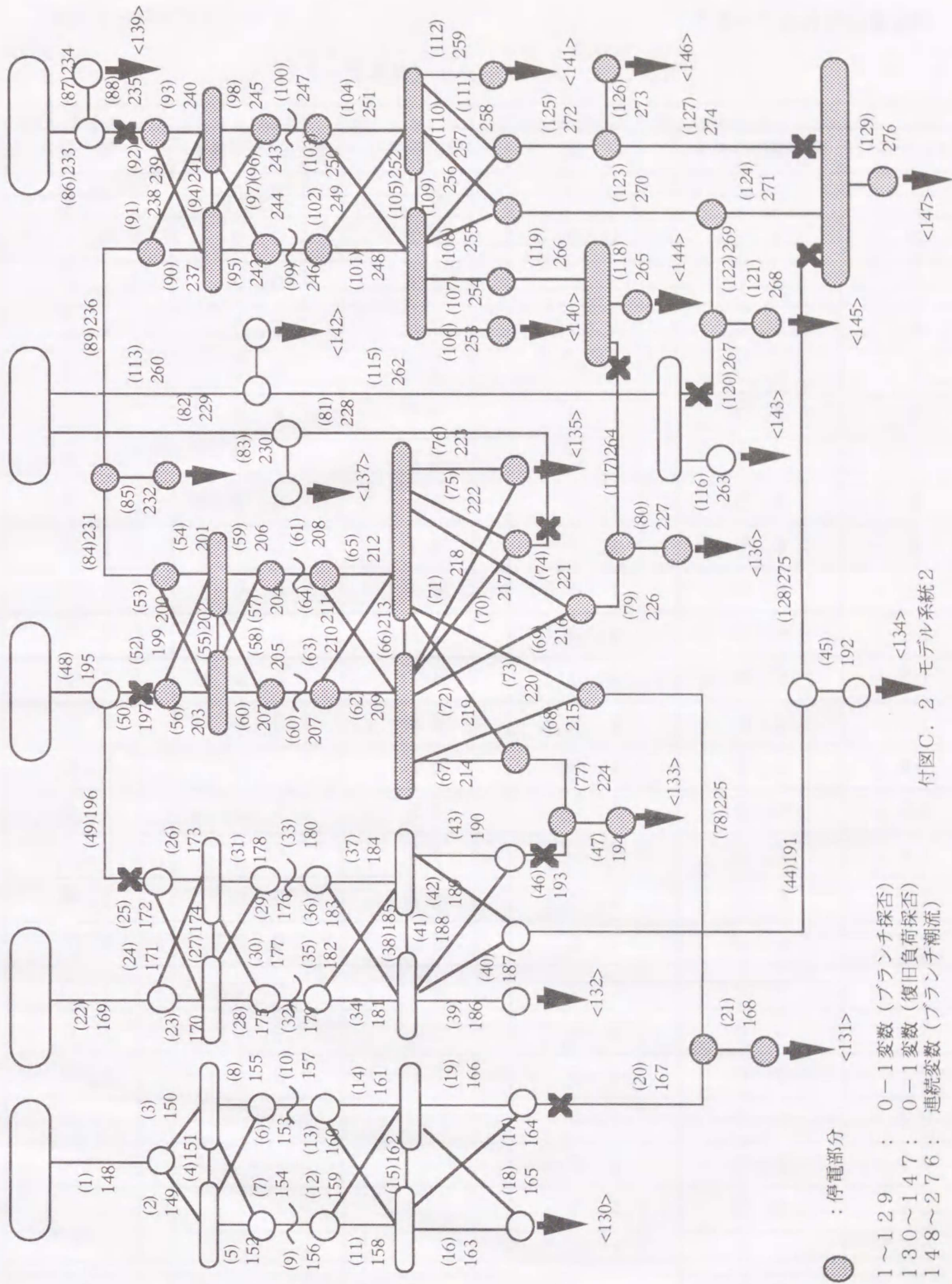
系 統	モデル1	モデル2
ノード数	27	86
ブランチ数	51	129
負荷数	8	11
特 徴	文献(37)による 実際の事故例	設備総合自動化プロジェクト の事前検討用系統を一部変更 した系統
参照箇所	第4～5章	第6章
モデル系統図	付図C.1	付図C.2
入力データ	付表C.1	付表C.2

電 源



付図C.1 モデル系統1





付図C. 2 モデル系統2

● : 停電部分

- 1 ~ 129 : 0-1変数 (ブランチ採否)
- 130 ~ 147 : 0-1変数 (復旧負荷採否)
- 148 ~ 276 : 連続変数 (ブランチ潮流)

## C.2 事故復旧用入力データ 1

付表C.1 入力データ 1 (基本データ)

ブランチ番号	復旧操作コスト	容 量	ブランチ番号	復旧操作コスト	容 量
1	0.0	1.0	31	0.0	1.0
2	1.5	1.0	32	0.0	1.0
3	0.0	1.0	33	0.0	1.0
4	0.0	1.0	34	0.0	1.0
5	0.0	1.0	35	0.0	1.0
6	0.0	1.0	36	0.0	1.0
7	0.0	1.0	37	0.0	1.0
8	0.0	1.0	38	0.3	1.0
9	0.0	1.0	39	0.3	1.0
10	0.0	1.0	40	0.0	1.0
11	0.0	1.0	41	0.0	1.0
12	0.0	1.0	42	5.0	1.0
13	0.0	1.0	43	0.5	1.0
14	0.0	1.0	44	0.0	1.0
15	0.0	1.0	45	0.5	1.0
16	0.0	1.0	46	0.0	1.0
17	0.0	1.0	47	5.0	1.0
18	0.0	1.0	48	0.3	1.0
19	0.0	1.0	49	0.0	1.0
20	0.0	1.0	50	0.3	1.0
21	0.0	1.0	51	0.0	1.0
22	0.0	1.0			
23	0.0	1.0			
24	0.3	1.0			
25	0.3	1.0			
26	0.0	1.0			
27	0.0	1.0			
28	0.0	1.0			
29	0.0	1.0			
30	0.0	1.0			

## C.3 事故復旧用入力データ2

付表C.2 入力データ2 (基本データ)

ブランチ番号	復旧操作コスト	容 量	ブランチ番号	復旧操作コスト	容 量
1	0.0	10.0	29	0.0	2.5
2	0.0	10.0	30	0.0	2.5
3	0.0	10.0	31	0.0	2.5
4	0.0	10.0	32	0.0	2.5
5	0.0	4.5	33	0.0	2.5
6	0.0	4.5	34	0.0	2.5
7	0.0	4.5	35	0.0	2.5
8	0.0	4.5	36	0.0	2.5
9	0.0	4.5	37	0.0	2.5
10	0.0	4.5	38	0.3	2.5
11	0.0	4.5	39	0.3	1.0
12	0.0	4.5	40	0.0	2.1
13	0.0	4.5	41	0.0	0.6
14	0.0	4.5	42	0.0	2.1
15	0.0	4.5	43	0.0	0.6
16	0.0	1.0	44	0.0	2.1
17	0.0	1.8	45	0.0	1.0
18	0.0	1.0	46	0.6	0.6
19	0.0	1.8	47	0.0	0.6
20	0.6	1.8	48	0.0	1.0
21	0.0	1.0	49	0.6	10.0
22	0.0	20.0	50	0.6	10.0
23	0.0	20.0	51	0.0	10.0
24	0.0	20.0	52	0.0	10.0
25	0.0	10.0	53	0.0	4.0
26	0.0	10.0	54	0.0	4.0
27	0.0	10.0	55	0.0	4.0
28	0.0	2.5	56	0.0	2.0



## 付 録 C 事故復旧用モデル系統と入力データ

ブランチ番号	復旧操作コスト	容 量	ブランチ番号	復旧操作コスト	容 量
57	0.0	2.0	86	0.0	3.2
58	0.0	2.0	87	0.0	1.0
59	0.0	2.0	88	0.6	3.2
60	0.0	2.0	89	0.0	4.0
61	0.0	2.0	90	0.0	4.0
62	0.0	2.0	91	0.0	4.0
63	0.0	2.0	92	0.0	3.2
64	0.0	2.0	93	0.0	3.2
65	0.0	2.0	94	0.5	4.0
66	0.0	2.0	95	0.0	4.0
67	0.0	0.6	96	0.0	4.0
68	0.0	1.8	97	0.0	4.0
69	0.0	1.4	98	0.0	4.0
70	0.0	1.4	99	0.0	4.0
71	0.0	1.0	100	0.0	4.0
72	0.0	0.6	101	0.0	4.0
73	0.0	1.8	102	0.0	4.0
74	0.0	1.4	103	0.0	4.0
75	0.0	1.4	104	0.0	4.0
76	0.0	1.0	105	0.5	4.0
77	0.0	0.6	106	0.0	1.0
78	0.0	1.8	107	0.0	1.4
79	0.0	1.4	108	0.0	2.0
80	0.0	1.0	109	0.0	2.0
81	0.6	1.4	110	0.0	2.0
82	0.0	1.4	111	0.0	2.0
83	0.0	1.0	112	0.0	1.0
84	0.0	4.0	113	0.0	3.6
85	0.0	1.0	114	0.0	1.0

## 付 録 C 事故復旧用モデル系統と入力データ

ブランチ番号	復旧操作コスト	容 量	ブランチ番号	復旧操作コスト	容 量
115	0.0	3.6			
116	0.0	1.0			
117	0.6	1.4			
118	0.0	1.0			
119	0.0	1.4			
120	0.6	2.0			
121	0.0	1.0			
122	0.0	2.0			
123	0.0	2.0			
124	0.0	2.0			
125	0.0	2.0			
126	0.0	1.0			
127	0.6	2.0			
128	0.6	2.1			
129	0.0	1.0			

## 研究業績

## I. 学会誌等学術研究論文

(1)	永田 武, 奥寺祐直, 北口 保, 武田次男: “平常時操作指令手順の論理生成方式”, 電気学会論文誌, Vol.109-B, No.3, pp.97-102, (1989).
(2)	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”, 電気学会論文誌, Vol.113-B, No.5, pp.509-515, (1993).
(3)	永田 武, 佐々木博司, 北川 稔: “混合整数計画法の適用による復旧目標系統の決定”, 電気学会論文誌, Vol.114-B, No.2, pp.179-185, (1994).
(4)	永田 武, 佐々木博司, 北川 稔, 杉原弘章: “パソコンによる平常時操作支援エキスパートシステム”, 電気学会論文誌, Vol.114-B, No.7/8, pp.807-813, (1994).
(5)	永田 武, 佐々木博司, 北川 稔: “知識ベースと数理計画的手法の融合による事故復旧”, 電気学会論文誌, Vol.115-B, No.5, pp.459-465, (1995).
(6)	Takeshi Nagata, Hiroshi Sasaki, and Ryuich Yokoyama, "Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming Approach", IEEE Winter Meeting, 95WM142-0-PWRS, (掲載決定), (1995).

## II. 国際会議発表研究論文

(1)	Takeshi Nagata, Hiroshi Sasaki, Junji Kubokawa, and Minoru Kitagawa, "Knowledge Based System Operation Procedure on Personal Computers", Conference on ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION & MANAGEMENT (APSCOM-93, Hong Kong), Proceedings Vol. 1, pp. 66-71 (1993).
(2)	Takeshi Nagata, Hiroshi Sasaki, and Naoto Yorino, "A Personal Based Expert System for Power System Operation Education", International Symposium Power System & Engineering (IASTED-94, Wakayama Japan), Proceedings No. 213-031, pp. 57-60, (1994).
(3)	Takeshi Nagata, Hiroshi Sasaki, and Ryuichi Yokoyama, "Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming", IEEE 1995 Winter Meeting Power Engineering Society, 95WM142-0-PWRS, (IEEE WM-95, New York), (1995).
(4)	Takeshi Nagata, Hiroshi Sasaki, and Naoto Yorino, "Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming Approach", International Power Engineering Conference (IPEC-95, Singapore), Proceedings Vol. 2, pp. 612-617 (1995).



## III. 学会技術研究会等研究発表

(1)	永田 武：“平常時操作指令手順作成に対するAIの適用”，平成2年電気学会全国大会講演論文集，982，pp.66-67(9)，(1990)。
(2)	永田 武，佐々木博司：“知識ベースシステムの動的検証法”，平成2年電気学会電力・エネルギー部門全国大会，123，pp.45-46(1990)。
(3)	永田 武，佐々木博司：“AI応用平常時操作指令手順作成システムの動的検証方法”，平成2年度電気関係学会中国支部連合大会，072103，p.168，(1990)。
(4)	永田 武，箕田充志，橋本和幸：“AI応用平常時操作指令手順作成・検証プロトタイプシステムの開発”，平成2年度電気関係学会中国支部連合大会，072104，p.169，(1990)。
(5)	永田 武，佐々木博司：“電力系統操作に対するニューラルネットワーク理論の適用”，平成3年電気学会全国大会講演論文集，1162，pp.204-205(9)，(1991)。
(6)	永田 武：“ニューラルネットワークの電力系統操作への適用”，平成3年度電気関係学会中国支部連合大会，050712，p.153，(1991)。
(7)	永田 武：“Hopfield型ニューラルネットワークの電力系統操作への適用と解析”，平成4年電気学会全国大会講演論文集，1025，pp.61-62(9)，(1992)。
(8)	永田 武，佐々木博司，北川 稔：“電力系統操作への線形計画法の適用”，平成4年度電気・情報関係学会中国支部連合大会，020623，p.58，(1992)。
(9)	永田 武，坪倉高德，杉原英治：“パソコンによる系統操作エキスパートシステム”，平成4年度電気・情報関係学会中国支部連合大会，020624，p.59，(1992)。
(10)	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”，電気学会電力技術研究資料，PE-92-163，pp.29-38，(1992)。
(11)	永田 武，佐々木博司，北川 稔：“混合整数計画法の適用による復旧目標系統の決定”，平成5年電気学会全国大会講演論文集，1118，pp.39-40(9)，(1993)。
(12)	永田 武，川上真澄，多久和倫宏：“オブジェクト指向による事故復旧”，平成5年度電気・情報関係学会中国支部連合大会，020612，p.51，(1993)。
(13)	永田 武，佐々木博司，北川 稔：“混合整数計画の適用による事故復旧問題の解法”，平成5年度電気・情報関係学会中国支部連合大会，020613，p.52，(1993)。
(14)	永田 武，佐々木博司，北川 稔：“混合整数計画法の適用による事故復旧問題の高速解法”，平成6年電気学会全国大会講演論文集，1144，p.52，(1994)。

研 究 業 績

(15)	永田 武, 佐々木博司: “整数計画法の適用による大規模発電機補修計画”, 電気学会電力技術研究資料, PE-94-81, pp.95-104, (1994).
(16)	永田 武, 佐々木博司: “知識ベースと数理計画的手法の融合による事故時自動復旧方式”, 電気学会電力技術研究資料, PE-94-85, pp.131-140, (1994).
(17)	永田 武, 佐々木博司, 餘利野直人, 北川 稔: “事故復旧手順作成システムの試作”, 平成6年度電気・情報関係学会中国支部連合大会, 110613, p.337 (1994).
(18)	Hiroshi Sasaki, Duo Zuang Zhen, Takeshi Nagata, Hideki Fujita, and Toshiaki Takayama : "A Solution for Unit Commitment Using Lagrange Relaxation with a Consideration of LNG Fuel Constraints", 平成7年電気学会全国大会講演論文集, 1228, p.6-1-6-2, (1995).
(19)	永田 武, 佐々木博司, 北川 稔: “混合整数計画法の適用による発電機起動停止計画の解法”, 平成7年電気学会全国大会講演論文集, 1234, p.6-11-6-12, (1995).