

# 電力系統運転支援エキスパートシステム

## Expert Systems for Electric Power System Operation

電力系統の分野では、電力供給信頼度向上の要求や運転員の世代交代といった状況の中で、ヒューマンエラーの防止やエキスパートの知識の伝承を目的とした運転支援システムの必要性が高まっている。特に、変電所や制御所での事故発生時の迅速かつ的確な対応が重要であり、運転員のノウハウが生かせる知識工学の応用が不可欠である。そこで、知識工学を応用した事故区間判定法や復旧操作手順作成手法、それらを実現する知識表現方法など、さまざまな技術が研究開発されており、基本技術はほぼ確立された状況にある。また、それらの技術を適用した運転支援システムの開発も進んでいる。本稿では、知識工学応用技術の概要について述べ、適用例として基幹系変電所の運転支援システムを紹介する。

進 雅美\* Masami Shin  
黒木登茂男\*\* Tomoo Kuroki  
天野雅彦\*\*\* Masahiko Amano  
川上潤三\*\*\*\* Junzō Kawakami  
丸山 彰\*\*\*\*\* Akira Maruyama

### 1 緒 言

電力系統の分野では、電力供給信頼度の向上という社会の要求に対して、ハードウェアの面からは送変電設備の高信頼度化、ソフトウェアの面からは計算機による監視制御などの対応が進められている。

しかし、変電所や制御所での機器操作、事故発生時の事故状況の把握や復旧操作、設備の異常診断など高度な知的判断が要求される業務では、熟練した運転員の判断に頼る部分も多く残っている。特に、系統に事故が発生した際、迅速かつ的確に判断を下し、事故の影響を極小化することは重要である。近年の電力系統の大規模化、複雑化に伴って、事故時の様相も複雑化し、その影響も広範囲に及ぶようになってきており、運転員には相当の経験と集中力が要求される。一方、設備の高信頼度化による事故発生件数の減少や運転員の若年化などによって、熟練した運転員が減少する傾向にある。

そこで知識工学を応用し、運転員のノウハウを取り込んだ運転支援システムの必要性が高まっている<sup>1)</sup>。運転支援システムの開発によって、次に示すような効果が期待できる。

- (1) 運転員の知的判断の一部を計算機に推論させることによって運転員の負担を軽減し、ヒューマンエラーの防止を図る。
- (2) 個々の運転員が持つノウハウを体系化し、知識の伝承を行う。

本稿では、まず事故発生時の運転支援を例にとって、事故区間判定や復旧操作手順作成の推論方法、および知識表現方法について述べ、さらに今後の技術課題について述べる。ま

た、適用例として関西電力株式会社での変電所運転支援システムを紹介する。

### 2 知識工学の応用

変電所や制御所、給電所の運転員は、電力系統から時々刻々送られてくる情報をもとにさまざまな状況を認識し、それらの状況に対応した処置行動をとっている。知識工学の分類で言えば、状況の認識は診断型問題、処置行動は計画型問題の一種と考えられる。

ここでは、診断型問題の一例として事故区間判定、計画型問題の一例として復旧操作手順作成の推論方法を示し、それらを実現するための知識表現方法や、またシステム実用化の際に必要な今後の技術課題について述べる。

#### 2.1 事故区間判定<sup>2)~6)</sup>

電力系統に地絡や短絡などの事故が発生すると、運転員は、事故によって動作した保護リレーや遮断器の情報をもとに、どこでどんな事故が発生したかを推論して判別する。一般に、リレーにはそれぞれ保護範囲が定まっており、事故区間は動作したリレーの保護範囲内にあると考えられる。しかし、リレーが複数個動作した場合、リレーや遮断器が誤動作・誤不動作した場合、多重事故が起こった場合など、さまざまな複雑な状況に対して事故区間を推定するのは、そう単純なことではない。

以下に、リレー誤不動作を考慮した事故区間判定手順の一

\* 関西電力株式会社工務部 \*\* 関西電力株式会社中央送変電建設事務所 \*\*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\*\* 日立製作所日立研究所 工学博士 \*\*\*\*\* 日立製作所大みか工場

例を述べる。

(1) 仮の事故区間の導出

入力情報として与えられた動作リレーの保護範囲を仮の事故区間とする。動作リレーが複数個ある場合は、リレーの誤動作や多重事故がないという仮定のもとで、各動作リレーの保護範囲の共通部分をとる。図1の例では、87リレーとT87リレーの保護範囲の共通部分から、変圧器本体が仮の事故区間となる。

(2) リレー誤不動作の判定

仮の事故区間に含まれる機器について、そこを事故点と仮定した場合に、動作すべきなのに動作していないリレー(誤不動作リレー)がないかを調べる。誤不動作リレーは、事故点を保護範囲に含む、動作条件を満足しているなどの条件から求める。図1の例では、変圧器の二次巻線を事故点と仮定した場合、87Gリレーが誤不動作となる。

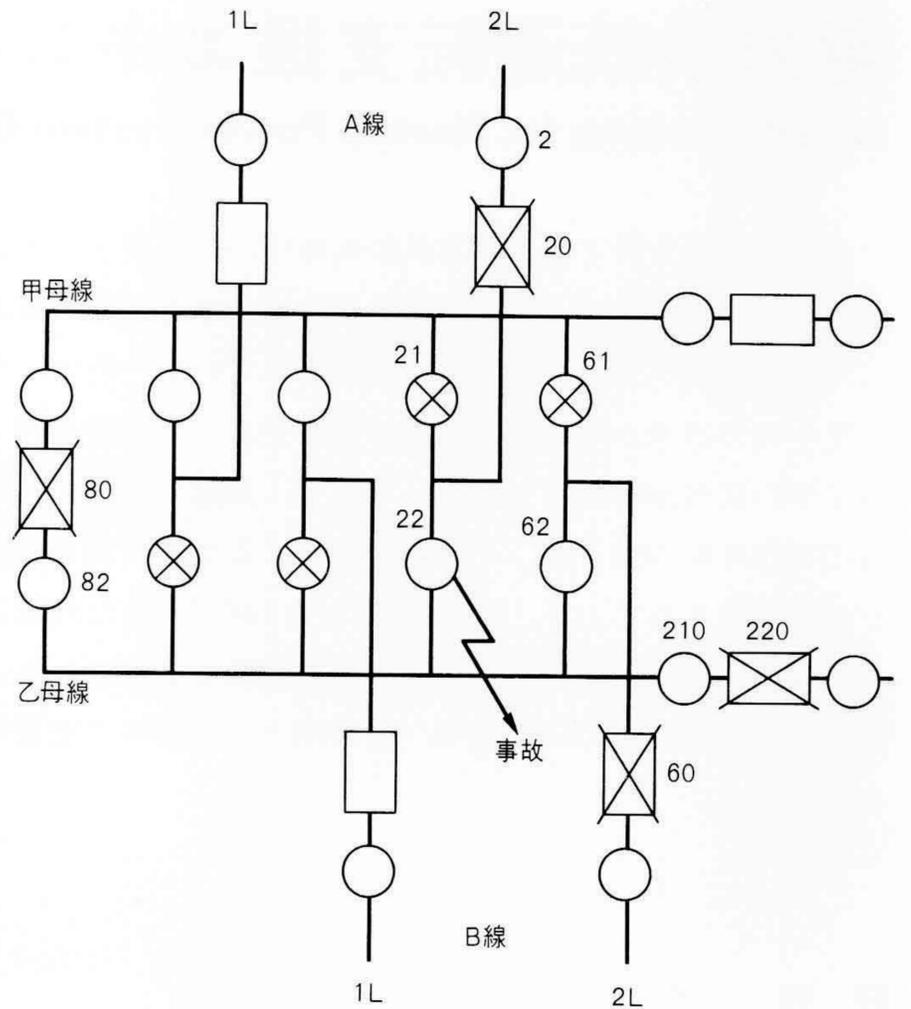
(3) 事故区間の絞り込み

仮の事故区間に含まれる機器のうち、(2)で求めた誤不動作リレーの数がもっとも少ない(多くの場合は0個)機器がもっとも可能性が高い事故点と言える。そこで、それらの機器の集合を最終的な事故区間とする。図1の場合、変圧器本体のうち二次巻線を除いた部分が事故区間となる。

2.2 復旧操作手順作成<sup>7)</sup>

事故によって遮断器が動作し停電区間が発生した場合、事故点が判明した後で、事故点を断路器によって切り離し(事故点切り離し)、それ以外の健全区間を復旧させる(復旧操作)必要がある。復旧操作には、変電所、制御所、給電所など管轄する範囲の違いによって、局所的なものから全系統を考慮するものまでさまざまなレベルがある。ここでは、変電所構内の母線切換えを例にとって、その手順作成方法を説明する。

例えば、図2に示すような二重母線で乙母線側のLS22に事故が発生し、B線2Lが停電したとする。この場合、B線2Lを



● 操作手順

1. 事故点切り離し
  - (1) LS62開放
  - (2) LS82開放
  - (3) LS210開放
  - (4) LS2開放
2. B線2Lの復旧
  - (1) LS61投入
  - (2) CB60投入

注：○〔閉LS(断路器)〕  
 ⊗〔開LS〕  
 □〔閉CB(遮断器)〕  
 ⊗〔トリップしたCB〕

図2 復旧操作手順作成の例 事故点、スイッチの操作可否、復旧条件、操作優先順位などを考慮して操作手順を作成する。

甲母線につなぎ換えることによって復旧させることができる。手順作成の方法の一例を次に述べる

(1) 事故点の切り離し

健全区間を復旧するための準備操作として、事故点を含む区間(復旧禁止区間)と健全区間(復旧可能区間)とを断路器によって分離する。復旧禁止区間は、事故点を含むもっとも小さい区間となるように決定する。また、断路器の操作可否を考慮し、操作不可能な断路器があれば、その外側の操作可能な断路器で切り離すようにする。図2の例では、LS2、62、82、210を開放して事故点(LS22)を切り離す。

(2) 復旧操作

動作した遮断器について、投入してもよいか、投入によって健全区間が復旧されるかを、さまざまな条件をチェックしながら判定する。また、母線切換えのために投入すべき断路器を求める。図2の場合、CB60とLS61とを投入して母線切換えすることによってB線2Lが復旧される。CB20、80、220に関しては、投入しても健全区間の復旧に結びつかないため操作

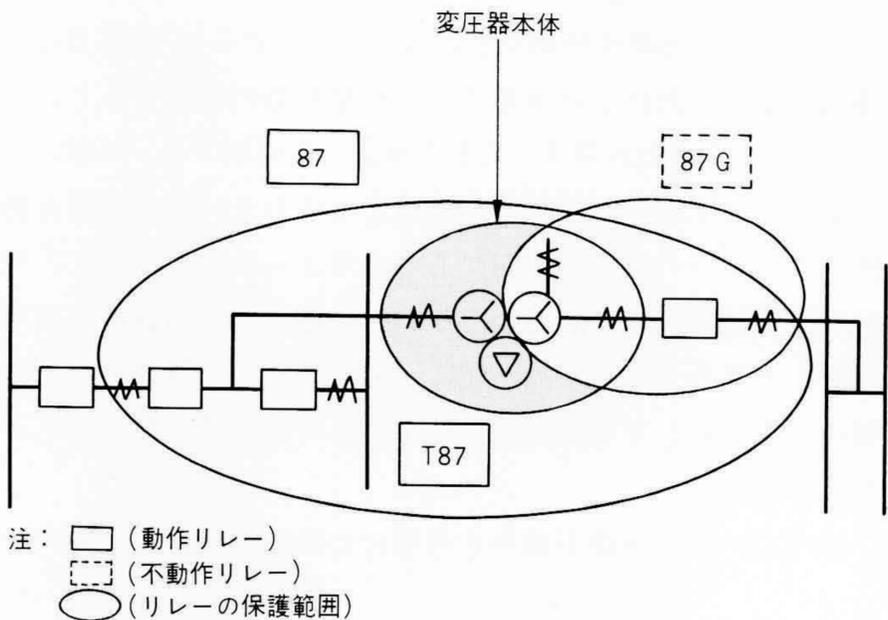


図1 事故区間判定の例 動作リレーと不動作リレーの保護範囲から、事故区間を判定する。

しない。

(3) 手順作成

以上で求めた開放または投入すべき遮断器，断路器について，その操作手順を作成する。一般的には，断路器開放，断路器投入，遮断器投入の順に操作する。機器の操作優先順位は，開放の際は負荷側から電源側へ，投入の際はその逆となるように定める。手順の一例を図2に示す。

2.3 知識表現

以上述べたような推論を実現するためには，必要な知識を知識ベースに記述しておく必要がある。ここでは，一般的なフレームとプロダクションルールとを用いた表現方法の一例を示す<sup>8)</sup>。

(1) フレーム

フレームには，個々の要素に関する静的な知識を表現する。例えば，システムを構成する一つ一つの機器や保護リレーなどを一つのフレームとし，それぞれの属性をフレーム内に記述する。図3に機器フレームとリレーフレームの記述例を示す。このように，機器フレームには機器種別，開閉状態，接続機器などの，リレーフレームにはリレー名称，トリップさせる遮断器，保護範囲などの属性を記述する。

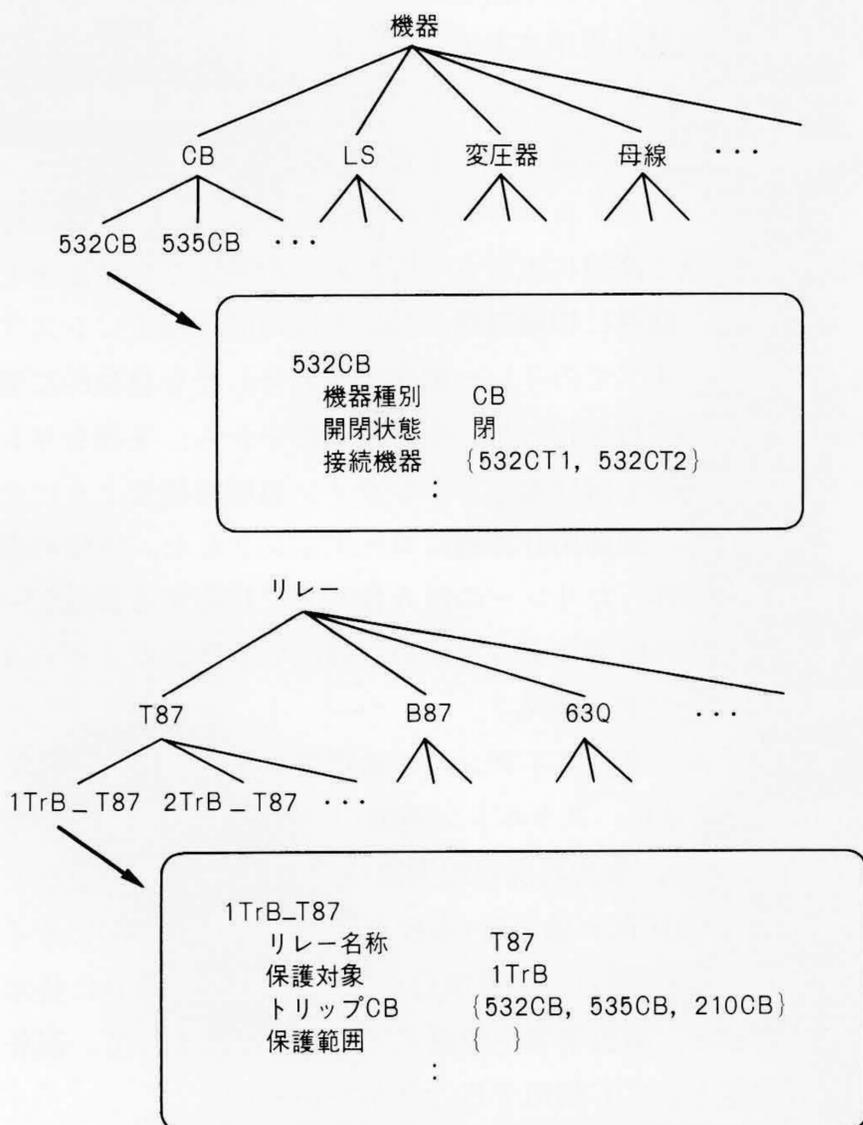


図3 フレームの階層構成と記述例 個々の機器やリレーに関する知識をフレームに記述する。また，種別ごとに上位クラスを定義して階層構成をとる。

また，図3に示すように，機器種別やリレー種別ごとに上位のクラスを定義し階層構成をとることによって，処理効率や知識の保守性の向上を図ることができる。

リレーの保護範囲については，遮断器や断路器の開閉状態によって変わるため，リレー種別ごとの探索方法に従って機器間の接続を探索し，自動導出する。このような知識の自動生成手法を用いることによって，知識記述の省力化を図れる。

(2) プロダクションルール  
事故判定や復旧操作手順作成などを行うための動的な知識は，if~then~型のプロダクションルールで表現する。図4にルールの記述例を示す。この例は，事故区間判定の中の「動作リレーが複数個ある場合は，保護範囲の共通部分(intersection)を仮の事故区間とする。」というルールを記述したものである。

各ルールは，実行制御の容易さや保守性向上のため，機能ブロックごとにルール群に分割して記述する。ルール群の切り替えは，メタルールと呼ぶルール群制御用のルールによって行う。

(3) メソッド

動的な知識のうち，システムの探索など手続き的でプロダクションルールでの表現になじまないものは，メソッドと呼ぶ手続き型言語(例えばC言語)の関数で表現する。メソッドのうちフレームが持つべきものについては，フレーム内の知識として記述しておき，フレーム間のメッセージ通信で処理を進めることができる。

2.4 今後の技術課題

これまでの研究開発によって，さまざまな電力システムの運転支援システムが構築され，そのいくつかはすでに実用化されている。しかし，実用化に際しては知識ベース構築上のさまざまな工夫を要しているのが現状である。今後は，実用レベルの知識ベースが容易に構築，保守できる環境の整備に取り組む必要がある。特に，現状の汎(はん)用知識処理用ツール

```
(ルール01
  if 動作リレー[?Ry].
    (?Ry @保護範囲 -> ?Pz)

  then
    (send 推論結果 assign(仮の事故区間,
      intersection(@仮の事故区間, ?Pz)))
    (delete_privatememo (動作リレー[?Ry]))
)
```

図4 ルールの記述例 if~then~型のプロダクションルールをEUREKA-II(Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II)の文法に従って記述した。

は、電力系統への応用に最適とは言えず、機能も十分ではない。そのため、以下に示すような電力系統での知識処理の特徴を考慮した専用ツール(ドメインシェル)を開発する必要がある。

(1) 多層型知識表現<sup>9)</sup>

電力系統を認識する場合、図5に示すように、変電所と送電線という大局的な見方から、変圧器の一次、二次を区別する局所的な見方まで、さまざまな見方がある。そこで、系統を表現する知識を、そのようなさまざまな見方の層に対応させて記述するとつごうがよい。その際、各層間で知識の整合がとれるよう管理機構を設ける必要がある。この多層型表現によって、知識記述の容易性、処理効率の向上が期待できる。

(2) 知識構築用インタフェース

実用規模の系統では、構成機器など大量のフレームを記述する必要があり、その構築、保守が問題となる。そこで、それらを系統図上や表形式で作成、変更できる機能が望ましい。また、記述した知識に矛盾がないかどうかを、ある程度自動でチェックする機能も必要である。

**3 変電所運転支援システム**

前章で述べた知識工学の技術を適用した電力系統運転支援システムの一例として、関西電力株式会社新生駒変電所に導入された運転支援システムを紹介する。また、その機能向上を図った次期システムのプロトタイプについて述べる。

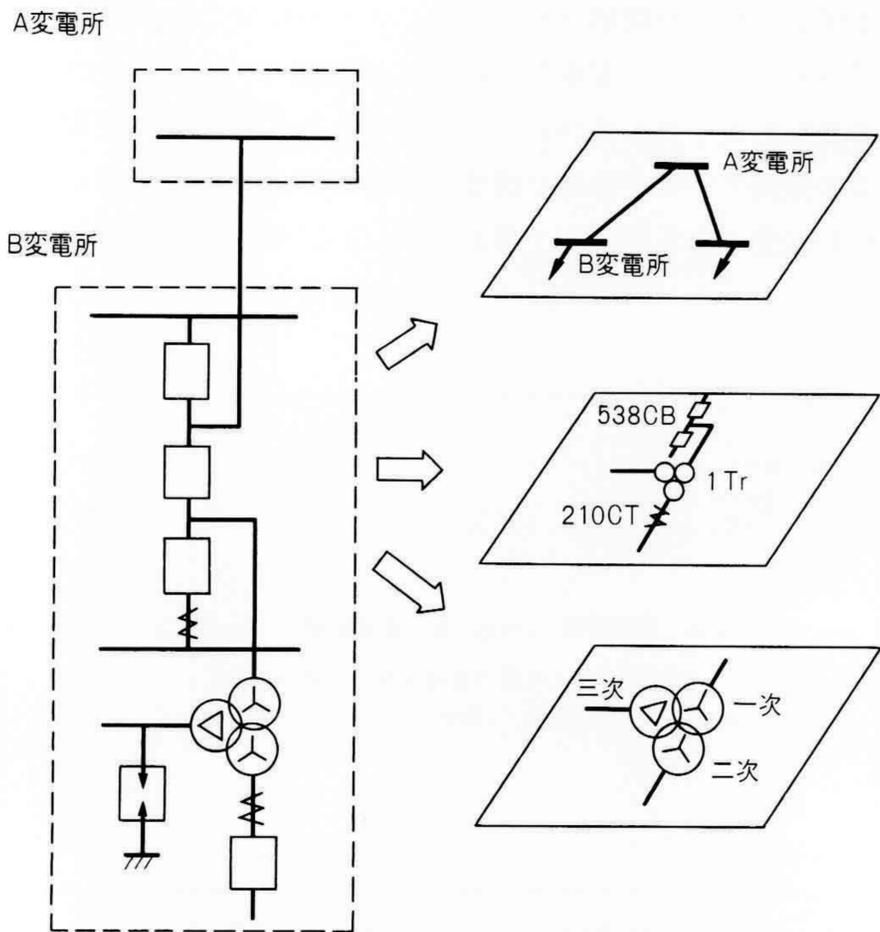


図5 多層型知識表現 系統の認識のレベルに応じて、層ごとに知識を記述する。層間の知識は管理機構によって整合をとる。

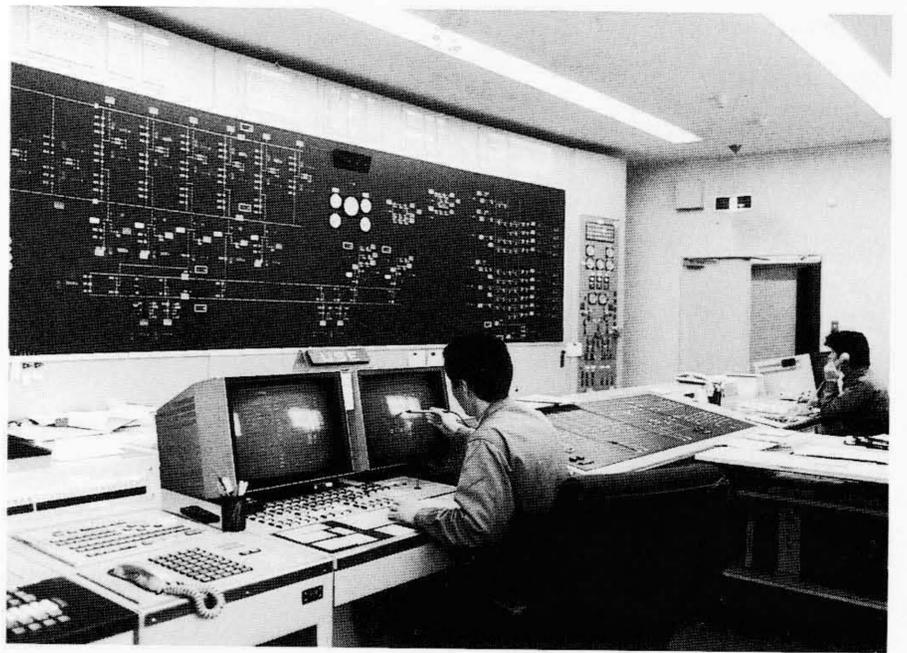


図6 関西電力株式会社新生駒変電所の制御室 既設監視制御システム(系統盤, 制御機)に運転支援システム(CRT(ディスプレイ装置), 操作卓)が併置されている。

**3.1 システムの構成と機能<sup>2)~4)</sup>**

システムは、図6に示すように500 kV基幹系変電所内の既設の監視制御システムに併置され、運転員に詳細監視情報の提供、記録の自動化および事故時のガイダンス表示を行う。このうち事故時のガイダンス表示は、動作リレー信号などの事故情報に基づいて、事故状況(事故点や事故様相)および応急処置を運転員に提示するもので、もっともエキスパートのノウハウを必要とする。そこで、前述した事故区間判定法や知識表現法など、知識工学の手法を応用している。

オンラインシステムへの導入の際には、知識処理を一般の制御用計算機で高速に実行させるため、次のような手法をとった。まず、高速に知識処理が行える汎用計算機上にシステムを構築し、すべてのリレー動作の組み合わせを自動的に発生させて模擬実行を行った。その結果の中から、主要なリレーの組み合わせを選び出し、オンライン処理可能なようにテーブル化して、制御用計算機にローディングした。実際の事故時には、動作したリレーの組み合わせに対応する事故ケースをテーブルの検索によって求め、該当する事故ガイダンス情報をCRT上に表示する。

本システムの事故ガイダンスの処理フローを図7に示す。同図に示すように、スケルトン画面(トリップした遮断器と停電範囲の表示)、事故状況把握画面(動作リレー、電圧値などの表示)、事故区間推論画面(事故点、事故要因の表示)、ガイダンス画面(確認項目、処置項目などの表示)が運転員に提示される。また、事故情報を模擬入力することによって、運転員の教育用としても利用することができる。

本システムは、昭和62年11月から運転を開始しており、順調に稼動し、運転員の好評を得ている。

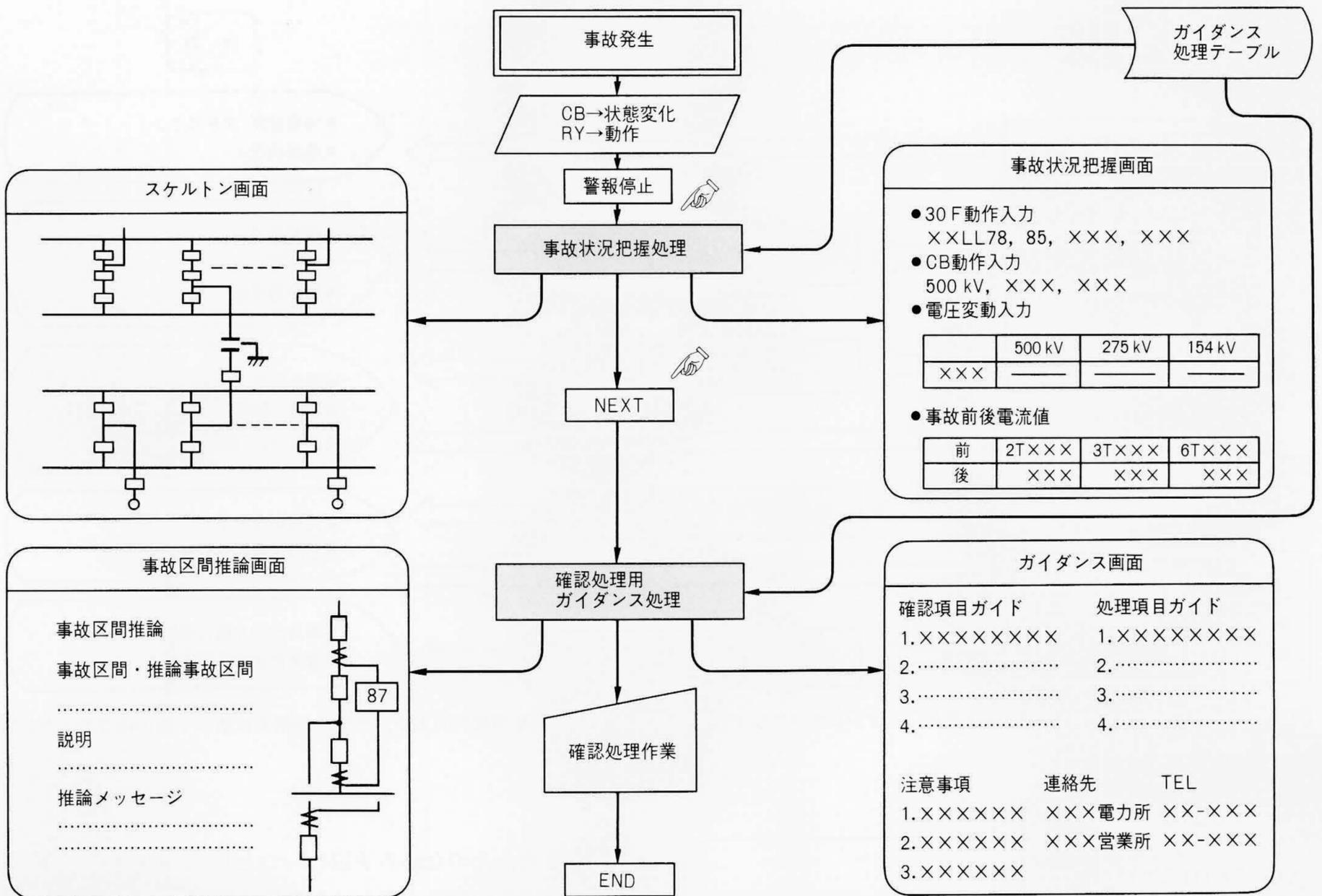


図7 事故ガイダンス基本処理フロー 事故発生時、運転員はCRTに表示される計算機の推論結果に従い、応急処置や現場確認などを行う。

### 3.2 次期システムのプロトタイプ<sup>8)</sup>

前述したシステムでは、計算機の制約などから、オフラインで推論した結果をもとにテーブルを作成し、オンラインでテーブルを検索する方式をとった。そのため、対応できる事故ケースに限りがあるなど機能の制約があった。そこで、以下に示すようなガイダンス機能の向上を目指した次期システムの開発を進めている。

#### (1) オンラインでのリアルタイム推論の実現

制御用の計算機上で推論処理が実行できる構築ツール EUREKA-II (Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation-II) を採用し、知識表現の工夫による処理速度の向上を図って、リアルタイム推論を実現する。

#### (2) 障害発生時のガイダンス

事故よりも発生頻度が高い障害(遮断器トリップに至らない異常)に対するガイダンスを行う。

#### (3) あらゆるケースに対応した最適なガイダンス

異常時の運転員の行動を応急処置、異常判定、現場巡視、復旧操作に4分類し、どんな状況のときに、どんな処置をとるかを明確にし、最適なガイダンスが提示できるようにする。

#### (4) 詳細情報による異常判定の精度向上

異常(事故および障害)の状況を、より詳細に把握するためオシログラフ動作や相別リレー動作など詳細情報を取り入れ、判定機能を向上させる。

開発したプロトタイプのガイダンスの流れを図8に示す。オンラインで入力されるプロセスデータをもとに、まず、過負荷チェックや試充電など応急処置のガイダンスを行う。同時に、異常判定によって、どこでどんな事故または障害が発生したかを推定する。異常判定の結果、変電所構内に事故の可能性がある場合には、現場巡視ガイダンスによって巡視ポイントやチェック項目を提示する。最後に、現場巡視の結果判明した事故点や機器の操作可否状況をもとに、復旧操作のガイダンスを行う。

ガイダンスの一例として、変圧器事故時の過負荷状況、現場巡視ガイダンスの出力例を図9に示す。

## 4 結 言

変電所や制御所でのヒューマンエラーの防止やノウハウの伝承を目的に、運転支援システムの研究開発が進められており、その一部はすでに実用化されている。知識工学を応用した事故区間判定法や復旧操作手順作成手法、またそれらを実

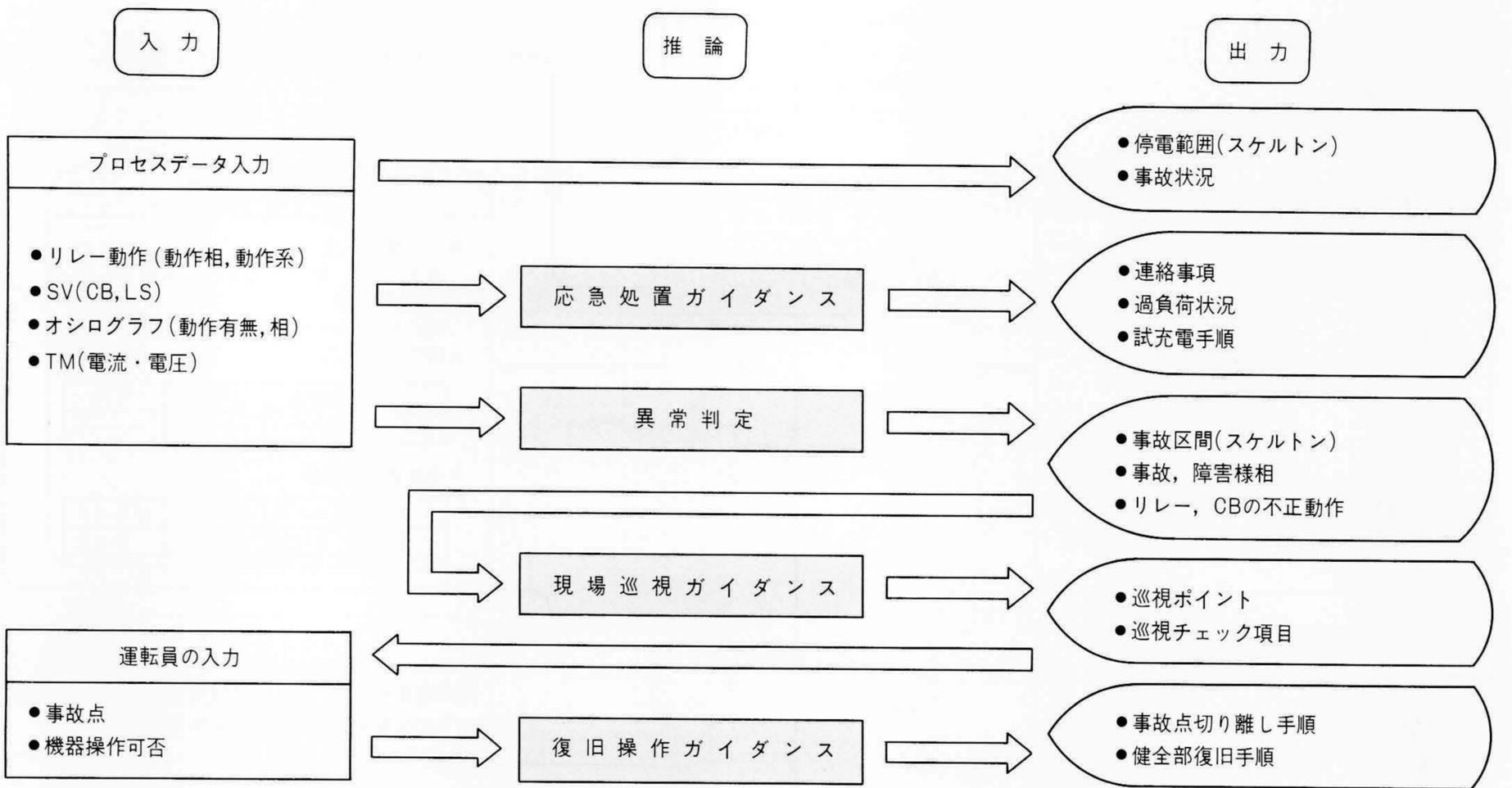


図8 次期システムのガイダンスの流れ オシログラフなど詳細情報による異常判定精度の向上や、現場巡視結果に基づく復旧操作ガイダンスなど、機能の向上を図っている。

```

<<< TrB負荷状況 >>>
*** 状況 ***
    2TrB 停止しました。(2TrB_87動作)
    2TrBの並列TrB[1TrB] S51L現在、動作無し
    負荷率    120.0%
    運転時間  30分
*** 処置 ***
    1TrB の負荷切替を依頼して下さい。
    
```

```

<<< 現場巡視ガイダンス >>>
以下の機器(変圧器)の巡視確認を行って下さい
機器名  2TrB
確認項目は、以下の通りです。
1) 上記対象機器(変圧器) 確認項目
(a) 噴油の有無
(b) 火災発生の有無
(c) 消火装置の起動の有無
(d) 消火装置不起動時手動起動
(e) 漏油の有無
(f) 漏油発生時側ゲート閉鎖の確認
(g) ゲート閉鎖していないとき手動閉鎖
(h) ガス発生の有無
(i) 温度上昇の有無
    
```

図9 ガイダンス出力例 変圧器(2TrB)事故発生時の過負荷状況、現場巡視のチェック項目が提示されている。

ある。また、そのための手段の一つとして、多層型知識表現など電力系統の特徴をとらえた専用の知識処理ツールの開発が必要と思われる。

参考文献

- 1) 電気協同研究会：電力技術へのAI応用，電気協同研究，第44巻，第1号(昭63-8)
- 2) 長谷川，外：500 kV変電所における知識工学を応用した運転支援システム，日立評論，70，8，871～876(昭63-8)
- 3) Ito, et al.：Application of Expert System to 500 kV Substation Operation Guide System, Symposium on Expert Systems Application to Power Systems(1988-8)
- 4) 長谷川，外：基幹系変電所の運転支援システム，電気学会論文誌D，108，10，887～894(昭63-10)
- 5) 福井，外：知識と対象の物理モデルに基づく電力系統故障区間の判別法，電気学会論文誌C，107，2，181～188(昭62-2)
- 6) Fukui, et al.：An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers, IEEE Trans. Power Delivery PWRD-1，4，83～90(1986-10)
- 7) 福井，外：変電所母線事故時の復旧手順の自動作成，昭和60年電気学会全国大会，1075(昭60-4)
- 8) 武居，外：変電所における異常時ガイダンスシステムのプロトタイプ，平成元年電気学会全国大会(平1-4)
- 9) 渡部，外：電力系統の多層型知識表現法，電気学会電力技術研究会，PE-88-27(昭63-7)

現する知識表現方法など、基本的な技術はほぼ確立されたと言える。

今後は、それら手法の改良を進めるとともに、特に実用化の際に問題となる知識ベース構築の容易性、保守性、処理速度、マンマシンインタフェースなどの向上に取り組む必要が