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

正員 有田 義典 (九州電力)

正員 石野田 元司 (九州電力)

正員 功刀 正彦 (東 芝)

正員 和田 憲雄 (東 芝)

正員 島田 和恵 (東 芝)

Development of an Operation Supporting Expert System for Power Networks in an Integrated Control Center

Yoshinori Arita, Member, Motoji Ishinoda, Member (Kyushu Electric Power. Co., Inc.),
Masahiko Kunugi, Member, Norio Wada, Member, Kazue Shimada, Member (Toshiba Corp.)

To realize an operation supporting expert system for large-scale power networks, two items are considered to be especially important. The first is inference speed and the other is an interface between an expert system and a conventional energy management system (EMS) or a SCADA system.

To improve inference speed a dedicated artificial intelligence processor and a specific domain shell for real-time expert systems are adopted, and also reduction of rule-search space size is devised considering features of power networks. Tightly coupled interface and distributed database between a logic-program-based system and a procedural-program-based system are desirable.

An operation supporting system for a large-scale power network has been developed and installed in Fukuoka Integrated Control Center, Kyushu Electric Power Company. The system is configured of triple super-minicomputers with back-ended artificial intelligence processors, and also of dual micro-processor-based front-end-processors (FEPs). Knowledge-based functions, such as fault determination, restoration procedure generation, security monitoring and operation planning are installed in addition to conventional functions of an EMS and a SCADA system. The inference results and their inference speed are satisfactory.

キーワード：電力系統，運用支援，エキスパートシステム

1. ま え が き

良質な電力の安定供給は、近代的社会生活を維持するためのインフラストラクチャであり、高度情報化社会への進展はその重要性をますます高めている。電力系統の大規模化・高密度化は、系統運用の自由度を高めたが、一方では最適な運用を行うための負担を運用者に強いることとなり、電力系統運用自動化システ

ム・電力系統運用支援システムの必要性を高めている。

系統運用方法は、経験的な知識に基づく部分も多く、特に系統事故時の対応業務についてはそうである。従って系統運用へのエキスパートシステムの適用が比較的早くから検討され、研究開発の成果も数多く報告されている〔例えば、文献(1)(2)〕。しかし、これらの多くは、(i)小規模のモデル系統により実現性の検証を行っている、(ii)大規模系統を対象としてい

でもプロトタイプシステムであり、系統運用にあたって最も重要な特性である応答性能が必ずしも満足できる値ではない、(iii)既設の自動給電システム(EMS)や発電所集中制御システムに付加したシステム構成をとっており、従来システムとエキスパートシステムとは互いに独立性の高い粗結合をしており、リアルタイム処理システムにおける手続き形プログラムと論理形プログラムとのインタフェースとして必ずしも望ましい形態でない、などの課題を含んでいる。

このたび、著者らは、これらの課題に対処した大規模系統運用支援システムを開発した。その特徴は、次のとおりである。

(1) 従来システムとの密結合形インタフェース方式

従来の自動給電システム・発電所集中制御システムに代表される、手続き形言語を用いて構成されている従来システムと、コンピュータ内部バスにより密結合している。

(2) リアルタイム処理性能の向上

系統運用支援エキスパートシステムを大規模系統に適用する際に最も重要な特性の一つであるリアルタイム処理性能を向上するために、下記手法をとった。

(i) AI 処理専用プロセッサの採用

(ii) リアルタイムエキスパートシステム構築ツールの採用

(iii) 電力系統の特性を考慮した探索空間の制限

以下の章で、従来システムとのインタフェース方式およびリアルタイム処理性能向上手法についての実現方式を述べ、更に、大規模系統を対象とする系統運用支援システムの実現例として、九州電力福岡支店総合制御所用に開発したシステムについて、構成・機能・性能などを述べる。

2. 従来システムとのインタフェース方式

従来の EMS などとのインタフェースの方式として

は、(1)一体形、(2)密結合形、(3)の別置形が考えられる(図1参照)。

(1) 一体形 オンラインの処理コンピュータ上に AI 処理が同居する形態である。

(2) 密結合形 オンライン処理コンピュータに内部バスによる密結合の AI 専用プロセッサを密結合する形態である。

(3) 別置形 オンライン処理コンピュータに疎結合のエキスパートシステムコンピュータ(例:エンジニアリングワークステーション)を設ける形態である。

以上述べたように三種類の方式があるが、今回開発したシステムは以下の理由により密結合形を採用した。

〈2・1〉 密結合形を採用した理由 系統事故時の対応を主とする系統運用支援システムは、従来の EMS の機能である系統の監視・制御・運用計画などと密接な関係がある。それゆえ、密結合であることが望ましい。また事故時の対応を考えると特に高速処理性が必要となる。ところが、事故時は EMS のコンピュータの負荷も高くなるので、エキスパートシステム用のコンピュータは EMS のコンピュータとは独立して動くことが望ましい。

以上のことから、本システムではエキスパートシステム専用のバックエンドプロセッサ(AIP)を搭載したシステムを採用した。AIP は、参考文献(4)にあるように、RISC アーキテクチャに LISP・PROLOG 専用命令のファームウェア化、データタグ処理用ハードウェアの追加などの拡張を行い、AI 用言語(LISP, PROLOG)を高速に処理するコンピュータである。

〈2・2〉 AIP とオンラインシステムコンピュータ(ホスト)との機能分担 ホストコンピュータでは、監視・制御・運用計画が必要とする電力系統のデータ(設備の充停電状態、接続状態など)をリアルタイムに

図 1 従来システムとのインタフェース方式

Fig. 1. Expert system interfaced with EMS/SCADA system.

図 2 AIP を組込んだシステムのソフトウェア構成

Fig. 2. Software configuration of the system with AIP.

作成している。AIP 上に実現している事故判定・復旧手順作成のエキスパートシステムはこれらの電力系統のデータを用いている。AIP とホストコンピュータにおけるデータのもちかた、機能分担について図 2 を用いて説明する。AI 処理に必要な固定データ(例：設備定数、保護リレーの整定値など)を得るための AI 用設備データベース(DB)展開処理は、システムで一括管理している電力系統設備 DB から必要なデータを抽出して事故判定・復旧の処理しやすい形に並び替え編集しておく。これはシステムメンテナンス時にバックグラウンドの処理で実行しディスクメモリーに保存しておく。ホストコンピュータでオンライン処理が実行されるとき判定・復旧のロードモジュールと AI 用設備 DB は AIP インタフェース処理を介して AIP にダウンロードされる。事故判定・復旧の要求があったときには、AI 用オンラインデータ展開処理はオンラインデータのなかで事故判定・復旧に必要なデータのみを抽出し、AI 用オンラインデータとして編集する。編集したデータは AIP インタフェース処理が AIP に転送し推論を起動する。このように AIP で事故判定、復旧の推論処理を行うために必要なデータをホストコンピュータで作成し AIP 上に転送することによって、AIP とホストコンピュータとは並列処理を行うことが可能となる。

ところで事故復旧の推論過程では潮流計算が必要に

なる。手続き形言語(C, FORTRAN)で記述されている潮流計算処理は、ホストコンピュータ上でも AIP 上でも実行可能である。ホストコンピュータによる場合、その計算時間は AIP とホストコンピュータ間のデータ転送時間を考慮しても AIP による場合とほぼ同じであることと、ホストコンピュータでの EMS 機能が必要不可欠な機能として潮流計算ルーチンが準備されていることから、ホストコンピュータ上で実行することにした。潮流計算は、図 2 に示すように AIP インタフェース処理からサブルーチンの形式でコールされる。

復旧手順作成の推論実行時に潮流計算が必要になった場合は、AIP 側から系統変更データをホストコンピュータ上の AIP インタフェース処理に転送する。AIP インタフェース処理は転送された系統変更データに従って潮流計算用の系統情報を書き換え潮流計算を要求する。潮流計算の結果は AIP インタフェースから AIP に転送される。DB、オンラインデータ、潮流結果などのデータを転送する際に以下の 2 点に留意した。

(1) 転送サイズの縮小 転送時間は転送サイズに比例して大きくなる。オンラインデータを編集せずに一括して転送する方法と必要なものを取出して編集して転送する方法がある。本システムではオンラインデータの編集時間は短いので必要なものを取出して編集して転送する方法を採用した。

(2) LISP 型データへの変換 オンラインシステムコンピュータでの電力系統のデータベースは C 言語の配列データで、その型はビット型、整数型、浮動小数点型が混在した構造体となっている。AIP 上では C と LISP は両方共実行可能であるから C 言語の配列データのままでアクセス可能だが、LISP の推論機構で柔軟に扱えるようにデータベースを LISP のリストに変換している。変換方法は以下のとおりである。

- (i) 全データを整数型の配列にする。
- (ii) LISP のデータの型タグを付ける。
- (iii) 整数型の配列データを LISP のリストに変換する。

全データを整数形にするのは LISP で扱う際の処理を簡潔にするためである。

3. リアルタイム処理性能向上手法

リアルタイム処理性能向上施策として以下の 3 点について述べる。

- (1) AIP の採用 AIP の機能については、前

章で述べた。

AIPを適用することにより、エキスパートシステムの性能は6～7倍向上する。しかも、事故時におけるホストコンピュータでの電力系統のアラーム処理には全く影響を与えずに実行できる。本システムの場合、10分間に1200状態発生という大規模系統事故のときに一体形と比較して10分間平均のホストコンピュータの負荷は、状態発生箇所によって異なるが20～40%減少した。

(2) コンパクトな実行環境を提供するリアルタイムエキスパートシステム構築ツールの採用 電力系統としては、「電源をさがす」「電源からの経路をさがす」のような手続き処理が知識処理の条件部、実行部に表れる。このように手続き処理を呼び出せることがツールとして必要不可欠である。本システムではリアルタイムエキスパートシステム構築ツールTDES 3上に構築した。TDES 3については文献(4)に説明されているが、以下の機能をもつ。

(i) 知識表現としてファクト、スキーマ、プロダクションルール、ルールモジュール、手続きがある。

(ii) 前向き推論、後ろ向き推論の両方の推論機能をもつ。

スキーマのデモン、プロダクションルールの条件部、実行部からの手続きの呼び出しを用いた推論が可能である。リアルタイムエキスパートシステム構築ツールとして実行時における高速性、コンパクト性を実現するために開発環境と実行環境を分離している。TDES 3の開発環境を用いて作成した知識ベースは、図2のAIメンテナンスコンソールで、まず知識ベースコンパイラによって実行可能なプログラムに変換される。更に知識リンクによって推論機構、外部インタフェースおよびユーザ定義外部関数と一体となって単独で実行可能な判定復旧ロード・モジュールへと変換される。このようにしてエキスパートシステムがシェルから分離され独立したタスク、プロセスとして実行できるように高速でかつコンパクトな実行環境を実現することができる。汎用のツールと比較して一けた程度処理速度が速い。

(3) 推論の探索空間の制限 TDES 3は(2)で説明したように高速なシェルではあるが、事故判定・復旧の処理でも以下のようにして推論の探索空間の制限を行って推論時間を短縮している。

(i) 事故判定に必要な系統の切出し 事故で停電した設備で実際に事故にあったと考えられるのは、保護リレーの整定と保護リレーの誤不動作の可能性を考えると保護リレーの動作した遮断器から送電線区間

にして高々3区間までである。ホストコンピュータ上でオンラインデータを編集する際に、トリップした遮断器から負荷側設備については3区間を切出して編集しAIPに転送する。このような系統切出し処理を行うことによってAIP上での事故判定推論の探索空間は減少し、また転送サイズも縮小し処理速度が向上する。

(ii) ルールのモジュール化 TDES 3の機能の一つにルールモジュールがある。事故復旧の知識は復旧処理の流れに従って全部で13のルールモジュールに分割されており、復旧の推論の途中経過で必要なルールモジュールのみを活性化することによって探索空間の減少、ひいては処理速度の向上を図っている。

(iii) 供給支障箇所のグルーピング方式 復旧電源や復旧ルートを供給支障箇所一つ一つについて検討するとその組合せ数が膨大になり、推論時間も長くなる。本システムでは、効率良く復旧電源や復旧ルートを見つけるために供給支障箇所のグルーピング方法を採用している。詳細は<4・5節>に述べる。

4. 運用支援エキスパートシステム

本章では、前述の検討結果に基づいて開発した大規模系統を対象とする運用支援エキスパートシステムについて述べる。

<4・1> 対象系統 本システムは、66 kV系統を主体に220 kV系統、110 kV系統からなる都市部の系統を対象としており、系統を構成する電気所数は、当初45箇所、将来100箇所程度である。

本システムで取扱う情報量は、遮断器・断路器の入/切状態、保護リレーの動作、切換スイッチの状態などのステータス情報：約18,000点、送電線の有効・無効電力、母線電圧、変圧器の有効・無効電力、タップ値などのテレメータ情報：約2,500量と膨大である。

<4・2> ハードウェアシステム構成 本システムのハードウェア構成を図3に示す。ホストコンピュータには、スーパーミニコンピュータTOSBAC-G 8050が3台使用されており、常時、2台は監視制御用として2重系オンライン運転を行い、残り1台は運用計画やメンテナンス用としてオフライン運転を行っている。各コンピュータには、AIPが各1台付加されており、これによって従来の監視制御処理と並行してAI処理を高速に実行することができる。

マン・マシンインタフェースの中心にはグラフィックCRT 2台を組込んだ操作卓が設けられており、監視制御情報やAI処理結果が提示される。またエキス

図 3 ハードウェアシステム構成
Fig. 3. Hardware configuration.

図 4 エキスパートシステム
Fig. 4. Functions of expert system.

パートシステム開発・保守用に AI メンテナンスコンソールが設けられている。

前述の電力系統のステータス情報やテレメータ情報は、フロントエンドプロセッサ(FEP)で状態変化検出処理やスケール変換処理が行われた後、ホストコンピュータへ取込まれる。

〈4・3〉 エキスパートシステム機能構成 本システムの機能構成は図4に示す通りで、ホストコンピュータ上で実行するプログラムとAIP上で実行するプログラムからなっている。ホストコンピュータでは、系統の監視・制御、運用計画などの機能やCRTとのインタフェース処理、AIPとのインタフェース処理が手続形言語(C, FORTRAN)で記述され、従来形のソフトウェアとして実現されている。一方、AIPでは、事故判定機能・事故復旧機能がリアルタイムエキスパートシステム構築ツール TDES 3 で記述され、コンパイルされた後 LISP プログラムとして実行される。

ホストコンピュータ上のプログラムとAIP上のプ

図 5 供給支障箇所のグルーピングの例
Fig. 5. An example of grouping of power outage area.

ログラムは並列動作を行うが、AIP上のプログラムの起動はホストコンピュータからの指令により行われる。例えば、系統事故が発生し、ホストコンピュータの監視機能が事故発生を確認すると、AIPインタフェースがAIP上の事故判定プログラムに起動をかけ、AIP上で事故判定処理が実行され、その結果はAIPインタフェースへ渡され、マン・マシンインタフェースを通してCRT上へ表示される。

〈4・4〉 事故判定システム 基本的には既発表論文⁽¹⁾⁽³⁾のとおりであるが、今回大規模系統を対象としている点から多重事故を最大6箇所まで考慮している。

〈4・5〉 事故復旧システム 本復旧システムは、(i) 事故設備の切離し、(ii) 過負荷解消、(iii) 供給支障解消、(iv) 復旧残対策の四つの機能で構成されている。特に過負荷解消と供給支障解消の実現手法として、事故前からもともと持っていた健全系統の負荷の一部を他の系統へ切替えるという多段切換方式を採用している。また、今回のような大規模系統では、広範囲にわたる供給支障が発生した場合、復旧に用いることのできる電源は複数個存在し、どの電源を用いてどの負荷まで供給すべきかを決定するためのルート探索空間が大きい。本復旧システムでは、この問題を解決するため以下に示す供給支障箇所のグルーピング方式を導入している。

図5に示すように、供給支障箇所の中で事故直後操作完了後に系統上接続されている系統設備の集合を小グループと呼び、現状接続されていないが、開閉器を投入することにより接続可能な系統設備の集合を大グループと呼ぶ。大グループ単位に供給可能な電源を確保し、小グループ単位に供給支障解消の操作を行うことにより、操作回数が少なく、かつ供給支障箇所を小さくする復旧操作が可能となる。

本復旧システムでは、事故復旧時に運転員の操作を

図 6 事故復旧支援におけるマン・マシンインタフェース

Fig. 6. Man machine interface for fault restoration guidance.

0361 復旧手順結果 89年7月21日(金)19時36分
次画面あり 復旧手順
住吉 66 kV # 2 母線 事故 89年7月21日19時26分12秒開始

No.	操作手順	残支障量MW	過負荷設備	負荷MW	負荷率
1	*NTT, 今泉6.6 kV # 2 母線と今泉22 kV # 1 母線, 須崎を荒戸經由西福岡系へ68.1 MW切替 荒戸 荒戸須崎線と 66 kV # 1 母線を系統ループ (荒戸-須崎30.8 MW $\theta=10.8$)	95.0	住吉天神線	115 ↓ 0	52
2	須崎 天神須崎線と 66 kV # 2 母線を系統ループオフ	73.0			
3	*土居町を 東福岡系から22.0 MW受電 土居町 66 kV # 1 母線を 古門戸土居町線から受電 (LS 操作)	54.0			
4	*堅柏66 kV # 1 母線, SBを 東福岡系から19.0 MW受電 堅柏 66 kV # 1 母線を 66 kV # 2 母線から受電 (LS 操作)	40.0			
5	*住吉22 kV # 1 母線を 住吉系から14.0 MW受電 住吉 22 kV # 1 母線を 22 kV # 2 母線から受電				

(注) *印は復旧方針, No.1~5は操作手順である。

図 7 復旧手順結果の表示例

Fig. 7. Display example of restoration procedures.

支援するため, 図 6 に示すように復旧方針と操作手順の二つのレベルに階層化された操作ガイダンスとその操作の根拠(操作の妥当性・影響度)が合せて提示される。操作ガイダンスの内容を以下に示す,

- (1) 復旧方針メッセージ メッセージごとに,
(i)当該操作手順実施時の供給支障量, (ii)当該操作手順実施時, 最も過負荷率の高い設備および当該設備

図 8. 信頼度監視, 運用計画へのエキスパートシステムの応用

Fig. 8. Expert system application to security analysis and operation planning.

の過負荷量と過負荷率の操作前後の変化が提示される。

- (2) 操作手順メッセージ 操作手順ごとにループ切替時の相差角とループ潮流の値と方向が提示される。

これらのメッセージで構成された復旧手順の出力例を図 7 に示す。

<4・6> 信頼度監視への応用 平常時の系統信頼度監視において想定事故後の復旧手順作成にエキスパートシステムを適用している。その処理フローを図 8 に示す。これによって, 復旧手順と復旧後系統を考慮した上で系統の信頼度を把握できるので, 事前に系統切換えなどの対策を講じることができ, また事故発生時に行うべき復旧操作を事前に検討しておくこともできる。

<4・7> 運用計画への応用 図 8 に示すとおり, 将来系統に対し, 前節と同様にエキスパートシステムを適用している。これによって夏期ピークや軽負荷期などにおける系統運用計画をよりきめ細かく立案することができる。

<4・8> 処理性能 事故の種別および多重性により, 推論処理時算は変る。事故判定処理には, 20~30 秒, 復旧手順作成処理には 60~150 秒の応答性能が得られた。

5. あとがき

本システムは, 工場における製作・総合試験を完了し, 現在フィールドにおける試験中であり, 期待どお

りの出力結果が得られている。処理時間についても、ほぼ満足できる性能となっている。今後は、フィールドでの運用実績を踏まえて、知識の一層の充実を図っていく計画である。

本システムの開発にあたり、指導・助言・協力をいただいた九州電力および東芝の関係各位に深謝いたします。

(平成元年9月25日受付, 同2年2月21日再受付)

文 献

- (1) S. Moriguchi, et al.: "An Expert System for Power System Fault Analysis and Restoration", Proc. of CIGRE. SC 39, p. 23-1(1987)
- (2) D. S. Kirschen, et al.: "Artificial Intelligence Applications in an Energy Management System Environment", Proc. of Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, p. 17-1(1988)
- (3) N. Koike, et al.: "A Real-Time Expert System for Power System Fault Analysis", Proc. of IASTED Int. Symposium, p. 376(1986)
- (4) 川北, 他: 「リアルタイムエキスパートシステム用統合AI環境」, 電学論 C, 109, 101 (平成-9)

有 田 義 典 (正員)

昭和42年九州工業大学制御工学科卒業。同年九州電力(株)入社。現在, 工務部総合制御開発班課長。電力設備総合自動化開発業務に従事。

石野田 元 司 (正員)

昭和56年宮崎大学工学部電気工学科卒業。同年九州電力(株)入社。現在, 工務部総合制御開発班にて電力設備総合自動化開発業務に従事。

功 刀 正 彦 (正員)

昭和33年3月東京大学工学部電気工学科卒業。同年4月(株)東芝入社。府中工場勤務。主として, 電力用計算機システム開発に従事。人工知能学会, IEEE 各会員。

和 田 憲 雄 (正員)

昭和48年同志社大学工学部電気工学科卒業。同年(株)東芝入社。現在同社電力系統技術部に勤務。電力系統制御システムおよびAI応用システムの開発に従事。

島 田 和 恵 (正員)

昭和55年お茶の水女子大学大学院理学研究科修士課程終了。同年4月(株)東芝入社。府中工場勤務。主として電力用計算機システム開発に従事。