

特集

人工知能（AI）とエネルギー・資源

電力系統分野におけるAI

A View of AI Technology in Power System Operation

湯木 勝*

Masaru Yuki

・ 松浦 敏之**

Toshiyuki Matsuura

・ 渡辺 進***

Susumu Watanabe

1. まえがき

電力系統の大規模・複雑化に伴い、電力エネルギーの安定かつ経済的供給に対する社会的要請は益々高まってきている。このため、従来、自動化が困難とされてきた電力系統の各分野に対し、AI技術、特にエキスパート・システムを適用した機械化・自動化システムの研究開発が盛んに進められている。

本稿では、まず、電力系統分野におけるエキスパート・システムの取組み状況を紹介し、次に運用制御への具体的適用例として電力系統の事故復旧支援システムについて述べる。そして、最後にエキスパート・システムを適用するにあたっての現状の課題と今後の展望について述べる。

2. 電力系統におけるエキスパート・システムの応用分野

2.1 電力系統分野での取組み状況

エキスパート・システムが適用可能な業務の条件としては次のものが考えられる。

- ① 業務が抱えている問題を解決できる専門家が存在する。
- ② 専門家の能力が、ある特別な知識、判断、経験などに根ざしている。
- ③ 専門家が駆使している知識を何らかの形で表現できる。

電力系統分野における様々な業務は、これらの基本条件を満たしているものが多く、広く制御システムや情報処理システムに取り入れられ、従来の数値処理機能に知識を取り扱う記号処理機能を加えて、複雑な多変数・非線形問題や経験的な知識を必要とする問題が

表1 電力系統における応用分野

分野	適用業務
監視	系統監視、アラーム解析、事故設備判定
運用	発電所の異常診断や運転ガイダンス、系統解析の知的支援
制御	電圧・無効電力制御、平常時操作、事故時復旧操作、系統操作手順作成
計画	系統計画、需給計画、停電作業計画、変電所レイアウト設計、保護リレー整定値決定
保守	変電所設備故障診断、保守作業ガイダンス
訓練	訓練用シミュレータ、CAI (Computer Assisted Instruction)

解決できると期待されている。また、知識を追加することにより、対象としている事象の観察や管理・制御を高度化したり、システムの構築を段階的に行うことが可能となる。

更に、これまでのエキスパート・システムは質問応答システムのものが多かったが、これをさらに拡張し、制御対象の状況に応じて、下位の制御機器に直接に指令を出し、トータルシステムの制御や運用を行わせようという研究も進められている。具体的な電力系統への応用分野を表1に示す。

関西電力㈱においては、現在46件のAIの取組みがあるが、その内の約半数は運転支援・設備診断となっている。代表的なものとしては、給電所・制御所の事故復旧支援システム、給電所の作業停電計画作成支援システム、一次変電所の運転支援システムなどがある。全国的なAIの取組み状況は現在電気学会等で集計中であるが、全国的にもほぼ同様な傾向と見込まれ、電力系統用のエキスパート・システム開発は、電力サイドのニーズを背景に相当数取り組まれている。

本稿では、これらの応用分野のうち事故設備判定、

* 関西電力㈱系統運用部系統技術課長

** 関西電力㈱研究開発部課長

〒530 大阪市北区中之島3-3-22

*** 三菱電機㈱電力系統部系統技術第二課長

〒652 神戸市兵庫区和田崎町1-1-2

事故時復旧操作などの復旧制御への適用について述べる。

電力系統の復旧制御は経験豊かな運用者が系統操作要項と実務を通して体得した系統運用知識をベースに、高度な知的判断を駆使しながら実施しているのが現状である。しかし、電力系統の巨大化・複雑化と事故に伴う心理的要因も加わり、運用者への負担が益々過大となっている。また、事故の発生頻度も年々減少してきており、育成に長期間の訓練と経験を要するベテランの運用者が得難くなってきている社会的な状況も存在する。

一方、復旧制御の計算機による自動化は、平常時の系統監視などの予防制御に比較して遅れている。この原因としては、復旧制御自体がアルゴリズム化しにくいとめと考えられる。こうした難点を克服する一つの有力なアプローチとして、エキスパート・システムの適用が進められている。

2.2 復旧制御への応用^{1),2)}

電力系統の復旧制御支援システムが、本来具備すべき機能として次のものが考えられる。

① 電力系統の状況認識と理解

システムは、事故時における電力系統の状況を適確に把握できなければならない。例えば、給電所で事故時に得られるオンライン情報は、情報伝送量の容量からくる制約により、管轄内の制御所／変電所つまり、オンライン情報の発生源で、ある程度縮約されて伝送されるため、個別の動作保護リレー名が得られることは希である。このように、実際には縮約されている情報からでもその意味を正しく認識し、電力系統の状況を正しく理解できる能力が必要となる。

② 復旧のための問題解決と方針立案

システムが知的であるためには、その認識した電力系統の状況変化に対して的確な行動が取れなければならない。例えば、電力系統に供給支障や過負荷設備が発生している問題があれば、現状の電力系統の状況に照らし合わせて自己の目標、すなわち供給支障や過負荷の解消を達成するために問題解決を行い、復旧方針を立案してその方針通りに復旧操作を実行していく能力が必要となる。

③ 環境適応と最適化（学習能力）

システムは、過去の事故に対して行った復旧のための問題解決・行動及び電力系統の状況変化への対処等の経験を蓄積させ、それに基づいて状況認識・理解と問題解決・方針立案を無駄な試行をできるだけ少なく

なるよう最適化したり、あるいは過去に遭遇しなかった環境変化（電力系統の状況変化・事故等）に対しても適応できるような能力（学習能力）が必要となる。

これらの機能を実現させるためには、伝送系を通じてのオンライン情報や運用者からのオフライン情報まで多種多様な形式の入力情報が扱え、それらの情報に柔軟に対応するために、現状、運用者が行っている思考プロセスに合わせた膨大な数の内部状態をシステムに持たせなければならない。

従って、従来の手続き型処理言語でそのまま実現させようとすると、電力系統の復旧過程を全て明確に記述しなくてはならなくなり非現実的となる。これがアルゴリズム化することを困難にしている原因と考えられる。この解決策としてエキスパートシステムの適用が考えられる。つまり、復旧過程を明確に記述して処理の手順を与えるのではなく、到達すべき目標を与えるのである。

システムは、与えられた目標、すなわち系統の復旧という目標へ至る操作手順を探索する過程で事前に準備された専門家の持つ系統復旧固有の知識を利用して、目標への探索をガイドする。この考え方は数理計画法でも一部採用されているが、利用できる知識は数量的に表現できるものに限定される。これに対してエキスパート・システムではこの考え方を一層発展させ、定量的に表現しにくい知識も積極的に活用できるようになっている。

復旧制御では系統運用上の規定など定量化しにくい知識がかなり重要な役割を果たしている場合が多い。従って、知識表現は状況そのものを必ずしも数量的に評価するのではなく、パターンとして表現し「ある状況では、これこれの行動を行え」などと指示する方式となっている。例えば、定量的に表現しにくい操作規定などの文書化された内容もそのままの形で表現できる。このため、より効率的で形式的なアプローチが可能となる。

次節では、このような考え方に基づいて開発された一例として事故復旧支援のためのエキスパートシステムを紹介する。

3. 電力系統の事故復旧支援システム³⁾⁴⁾

3.1 システムの概要

本システムは、図-1に示すように地方給電所のコンピュータ・システムとオンライン結合して、リアルタイムで給電運用者に事故時の運用を支援するものであ

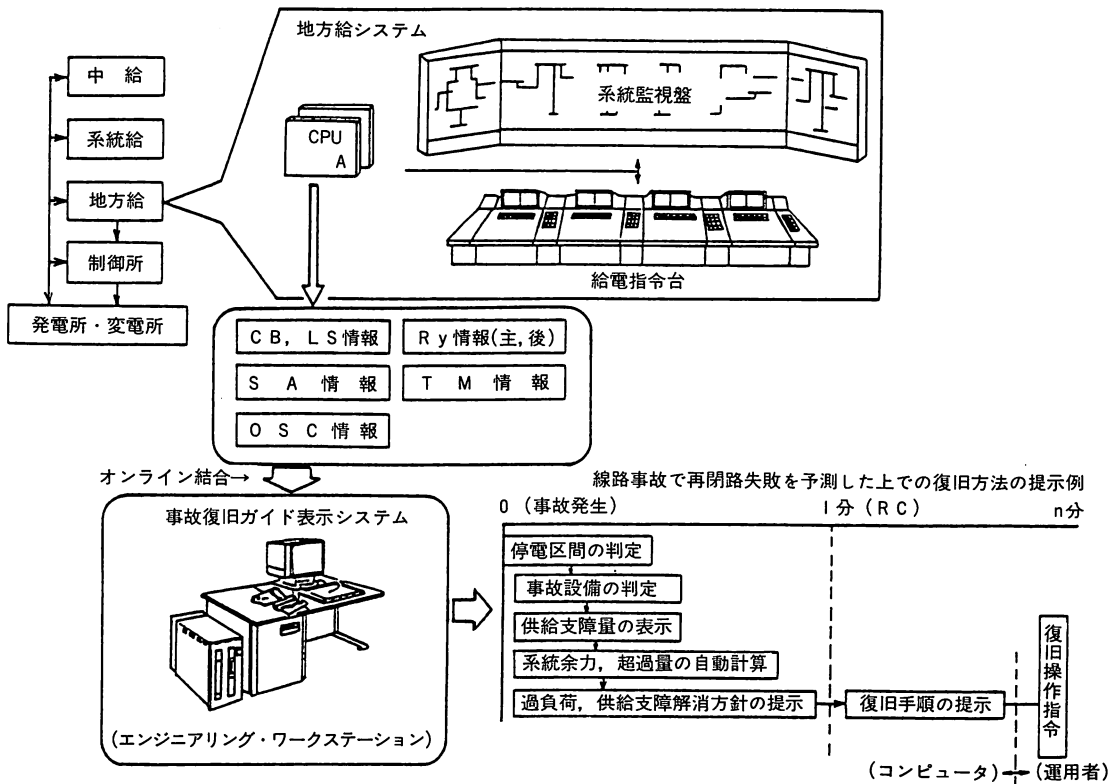


図-1 システムの概要

り、次のような特徴を持たせている。

① 実オンラインデータを用いることにより、実システムの事故に対する復旧支援がリアルタイム（事故直後、1分以内に復旧方針を提示）で実行できる。

② ベテラン運用者の系統運用知識を知識ベース化することにより、現実に即した復旧支援が迅速かつ適切に実行できる。

③ 分散処理用コンピュータ（エンジニアリング・ワークステーション）上で復旧支援を実行することにより、地方給システムへの影響を最小限に押さえている。

3.2 システムの機能

本システムは、オンライン運転とオフライン運転の二つの運転モードを持っている。

オンライン運転モードは、実システムでの事故発生時、事故設備の判定、復旧方針の立案、復旧操作のガイダンスを行う事ができる。またオフライン運転モードでは、実システムで仮想的に事故を設定することにより、運用者が復旧方針の立案、復旧操作など事故時の対応を学習する事ができる。

① 事故設備判定

事故により停電した設備の中から保護リレー情報（主保護・後備保護）を基にして、事故がどの設備にあるかを判定する。

② 復旧方針立案

・過負荷解消方針立案…健全系統内で過負荷が発生している場合、発電機出力調整、系統切替、負荷制御などにより過負荷を解消する復旧後の系統状態を立案する。

・供給支障解消方針立案…供給支障が発生している場合、試充電、系統切替、負荷制御などにより、系統に過負荷を発生させず供給支障を最小化する復旧後の系統状態を立案する。

③ 復旧操作ガイダンス

復旧方針立案で作成した復旧後の系統と現在の系統を比較し、復旧後系統に到達するために現在必要な復旧操作を作成する。

3.3 ソフトウェア構成

図-2にシステムのソフトウェア構成を示す。復旧ガイド機能は高速推論が可能なプロダクションシステム記述言語 OPS 83と、数値解析を得意とする手続き言語 C で記述されており、約500個のルールと約200個の

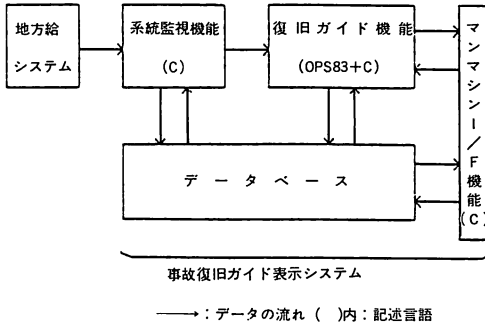


図-2 ソフトウェア構成

関数で表現されている。

3.4 知識ベースシステムの構築⁵⁾

(1) 復旧ガイド知識の獲得

知識獲得は運用者とともに、地方給電所の夏期事故対策の事故および過去に起こった重大事故を対象に代表的な約100ケースの事故例を抽出して、机上シミュレーションを行うことにより実施した。その結果、各事故に共通した復旧の考え方を抽出してそれを普遍的な知識とした。また、普遍的な知識では扱えないような事故に対してはその事故固有の復旧知識を積み重ねることにより対処することとした。

(2) 知識ベースシステムの構成

復旧ガイドの知識ベースシステムは、図-3に示すように4つの推論エンジンと電力系統の数値解析処理から構成されている。

復旧ガイド管理エンジンは、他の3つの推論エンジンの推論開始/終了を制御するもので、復旧過程における復旧ガイドの進捗状況を管理するものである。

他の推論エンジンは、診断型（事故設備判定）、計画型（復旧方針立案）、制御型（復旧操作ガイダンス）といった異なる性格を持っているため、それぞれの知識ベースを持たせることにより、推論の高速化と知識

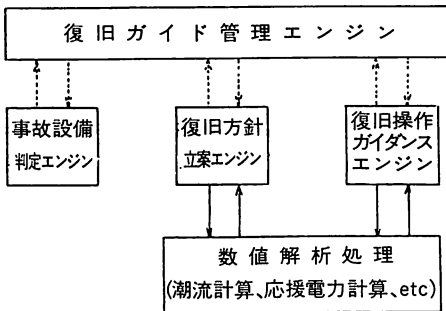


図-3 知識ベースシステムの構成

ベース全体のメンテナンス性の向上を目指している。また、これらの知識ベースに対して共通の基本構造と推論手順を与えることにより知識ベースが統一的理解できるように、また追加・修正が容易に行えるようにしている。

(3) 知識ベースの基本構造

復旧ガイドの各過程は、幾つかの定まったステップから構成されており、各ステップでは、その目標を達成するためのオンライン情報収集や推論が集中的に行われる。上位ステップでの推論のために下位ステップの結論やデータを必要とすることもある。その場合、一旦、下位ステップに入り、そこでの処理を終えてから上位ステップでの推論が再び行われる。本知識ベースではこのような推論過程の表現をコンテキストという概念により行う。コンテキストには様々なタイプのものであり、各タイプは復旧ガイドにおける各ステップの実態や概念に対応する。例えば、事故設備判定における処理の流れとして停電範囲の確定、動作リレーの保護範囲確定、事故設備の絞り込みなどがあるがこれらの各処理ステップが一つのコンテキストとして表現される。

各コンテキストは、復旧ガイドの進行に応じて上下関係が生じるため、コンテキスト・ツリーといえ木構造でこれを実現する。図-4では、各コンテキストはAND結合されている。例えば、コンテキストAという処理を行うためにはコンテキストBとコンテキストDという処理が完了している必要がある。あるコンテク

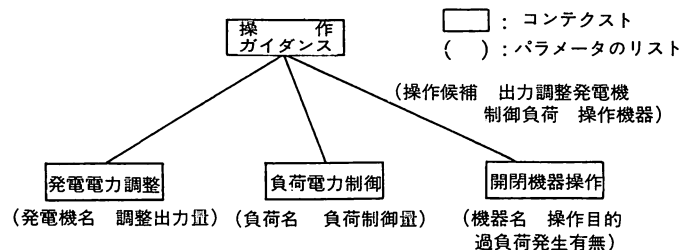
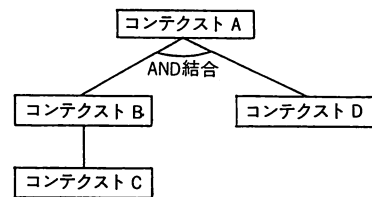


図-5 復旧操作ガイダンスのコンテキスト・ツリーとパラメータ

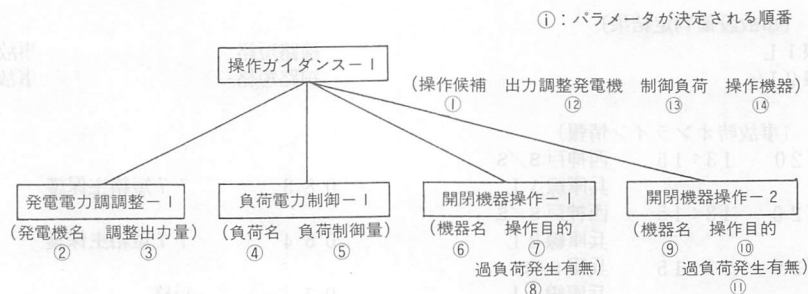


図-6 推論実行により生成されるコンテキスト・ツリー

ストの処理の完了は，そのコンテキストに関する様々な情報が決定されることにより達成される．これらの情報をパラメータと呼ぶ．

具体例として復旧操作ガイドランスのコンテキスト・ツリーとパラメータを図-5に示す。操作ガイドランスの対象は、発電電力の調整、負荷電力の制御、CB・LSなどの開閉機器操作の3つのコンテキストから表現されており、例えば、発電電力調整のコンテキストの処理はパラメータである発電機名と調整出力量が全て決定された時点で完了する。

(4) 推論手順

前節で述べたコンテキスト・ツリーは各コンテキストのパラメータを決定する順序を定めている。推論は

各コンテキストのパラメータを決定していくことにより行われ、この過程で図-5の静的なコンテキスト・ツリーから図-6に示すような具体的なコンテキスト・ツリーが動的に生成されていく。

図-6の例では、操作ガイダンス-1のパラメータの操作候補より各操作候補（この場合4つ）に対する下位のコンテキストとして、発電電力調整、負荷電力制御が1つずつと閉閉機器操作が2つ作成されている。これらの下位コンテキストの中から操作の優先順位及び系統の信頼度を考慮して現在ガイダンスすべき復旧操作が選択されて、操作ガイダンス-1の出力調整発電機、制御負荷、操作機器の各パラメータに転送される。

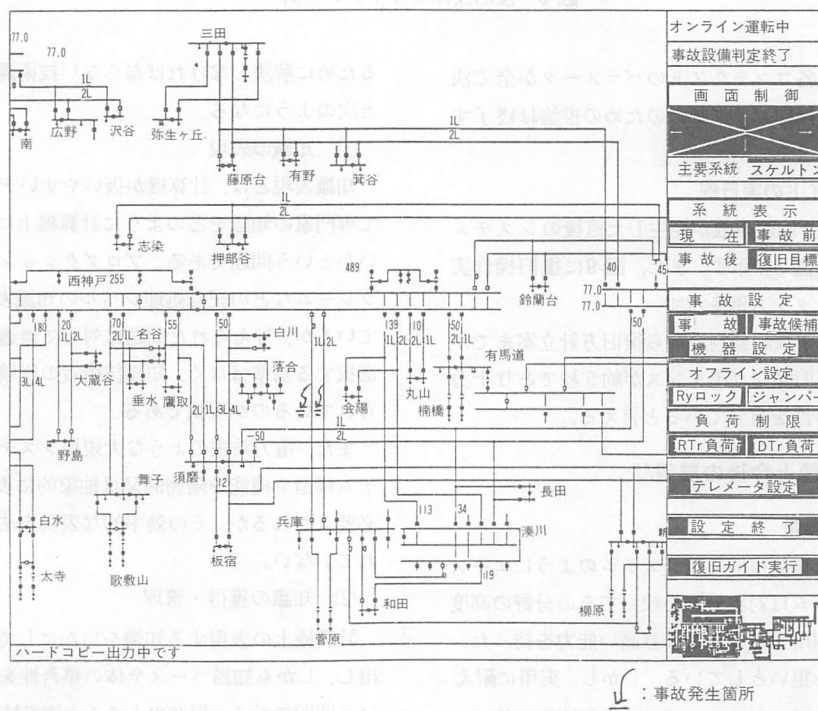


図-7 送電線 2 回線事故のケース

〔事故設備判定結果〕			線路短絡 線路短絡	事故発生 事故発生
兵庫線 1 L				
兵庫線 2 L				
〔事故時オンライン情報〕				
5 / 20	13 : 15	西神戸 S / S		
		兵庫線 1 L	0 8 3	7 7 短絡主保護
5 / 20	13 : 15	西神戸 S / S		
		兵庫線 2 L	0 8 4	7 7 短絡主保護
5 / 20	13 : 15	兵庫 S / S		
		兵庫線 1 L	0 1	短絡
5 / 20	13 : 15	兵庫 S / S		
		兵庫線 2 L	0 2	短絡
〔供給支障発生状況〕				
大和電機		3 6. 5 MW		
三菱電機神戸		1 4. 4 MW		
兵庫 S / S		2 8. 6 MW		R T r B 2 8. 6 MW
菅原 S / S		2 0. 6 MW	D T r B 2 0. 6 MW	

図-8 事故直後のメッセージ

〔操作ガイダンス〕				
負荷送電	湊川			
兵庫湊川線 1 L		C B 03	I N	電流確認
負荷送電	和田			
兵庫和田線 1 L		C B 02	I N	電流確認
〔操作ガイダンス〕				
ループ投入	和田			
兵庫和田線 1 L		C B 02	I N	潮流確認 位相差 - 0. 1°

図-9 復旧操作のガイダンス例

この時点で、各コンテキストのパラメータが全て決定され、1 回の操作ガイダンスのための推論は終了する。

3.5 復旧ガイドの実行例

図-7で、送電 2 回線事故が発生した直後のシステムのメッセージを図-8に示す。また、図-9に復旧操作実行時の操作ガイダンス例を示す。

処理時間は、事故設備判定から復旧方針立案までが 20秒、1 回の復旧操作ガイダンスが約 5 秒であり十分なリアルタイム性を有していると言える。

4. 現状の課題と今後の展望⁶⁾

4.1 現状の課題

前節で述べた事故復旧支援システムのようにエキスパート・システムは対象分野を絞ってその分野の高度な専門知識を利用することにより高い能力を持ったシステムの構築を狙いとしている。しかし、実用に耐えるようなエキスパート・システムの構築技術は確立されていないのが現状である。実用化システムを開発す

るために解決しなければならない技術課題をまとめると次のようになる。

(1) 知識の表現

知識表現とは、計算機が扱いやすいデータ構造として専門家の知識をどのように計算機上に表現したら良いかという問題である。プロダクション・システムやフレームなどの記号処理レベルの知識表現が用いられているが、与えられた問題に対して最適な表現方法を選択する基準はなく、知識技術者の経験的判断に委ねられているのが現状である。

また、電力システムのような大規模システムでは、システム構造や機能を階層的又は抽象的に表現することが必要とされるが、その効率的な表現方法もまだ確立されていない。

(2) 知識の獲得・管理

計算機上の表現する知識をいかにして専門家から抽出し、しかも知識ベース全体の整合性をどうとるかという問題である。現在のところ、知識技術者による専門家へのインタビューや専門家が思考の過程を口述し

た内容分析等の方法により、知識獲得・管理がなされている、このような手作業的なものから帰納的推論、機械学習、truth maintenance といった知識獲得・管理のモデルの適用が期待される。

(3) 知識の利用

これは、計算機上に表現された知識をいかにして問題解決に利用するか、すなわち基本的には推論機構の設計に関する課題である。現在、提供されている A I ツールの多くは、推論機構に関して演繹的推論をベースとしたあまりに一般的で単純なメカニズムしか持っていない。従って、診断・計画・設計・制御などの領域固有の問題解決戦略を実現させるためには、その一部分を知識ベース側に持たせざるを負えなくなる。このため、本来のエキスパート・システムの利点と言われてきた推論機構と知識ベースの分離が不完全になってきており、知識ベースの設計と保守を困難にしている原因となっている。今後、電力系統における各種の問題解決のモデルを開発して A I ツールの中に取り込んで行くことが必要と思われる。

(4) ユーザーインターフェイス

エキスパート・システムを人間にとって、いかに使い易くするかという問題である。これには、自然言語処理、音声・画像認識やヒューマンインターフェイスなどの問題も含まれており、人工知能に更に一步近づくための要素技術として不可欠なものである。

4.2 今後の展望

電力系統の分野では、エキスパート・システムを中心に A I の技術はかなり広範囲に開発・試行されているが、今後は更にその範囲の拡大、内容の充実、高度化が図られるものと思われ、その効果としては次のようなものが考えられる。

(1) ヒューマンエラーの減少

電力系統の設計・運転・保守全般にわたり、更に広く普及することにより、平常時、異常時にかかわらず、運転員が迅速かつ適確に判断するのを助けることができ、人間の勘違いや緊迫した状況下での間違いなどいわゆるヒューマンエラーを減らすことができると考えられる。

(2) 制御システムの有機的連携・統合化

現在、個別に存在している給電所や発・変電所などの様々な制御システムは、エキスパート・システムの出現により一つのシステムに有機的に連携・統合され、より一層高度な知的判断を行えるようになると考えられる。

(3) 知能ロボットの普及

送電線の保守など危険な環境下での作業を効率的に行うためには、人間の代わりに或いは人間と協調して作業を行う知能ロボットが活躍すると考えられる。

5. あとがき

以上、電力系統分野における A I の取組み状況と具体的な適用システムとして事故復旧支援システムについて紹介した。また、エキスパート・システムを構築する際の現状の課題と今後の展望についても述べた。

今後、電力系統分野では、現在開発されているエキスパート・システムをベースとして更に高度な知識情報処理システムが推論計算に適した計算機アーキテクチャー及び大規模かつ広域のデータベース技術の発展とあいまって、本格的な実用期を迎えるであろうと大いに期待されている。

参 考 文 献

- 1) 小林; 「知識工学の産業への応用」, 計算自動制御学会 第3回産業システムシンポジウム, 昭和61年10月
- 2) 松本, 他; 「電力系統事故復旧制御への応用」, 電気学会 東京支部大会シンポジウム 電力技術における知識工学の応用, 昭和60年12月
- 3) 湯木, 他; 「給電所事故復旧ガイドのためのリアルタイムエキスパートシステム」, 電力技術研究会, 昭和63年7月
- 4) 湯木, 他; 「給電所における事故復旧ガイド表示システム」, 電気評論, 昭和62年12月
- 5) 松本, 他; 「知識ベースに基づく電力系統復旧方式の決定法」電気学会論文誌, 昭和58年3月
- 6) 「電力技術への A I 応用」, 電気協同研究, 昭和63年8月

