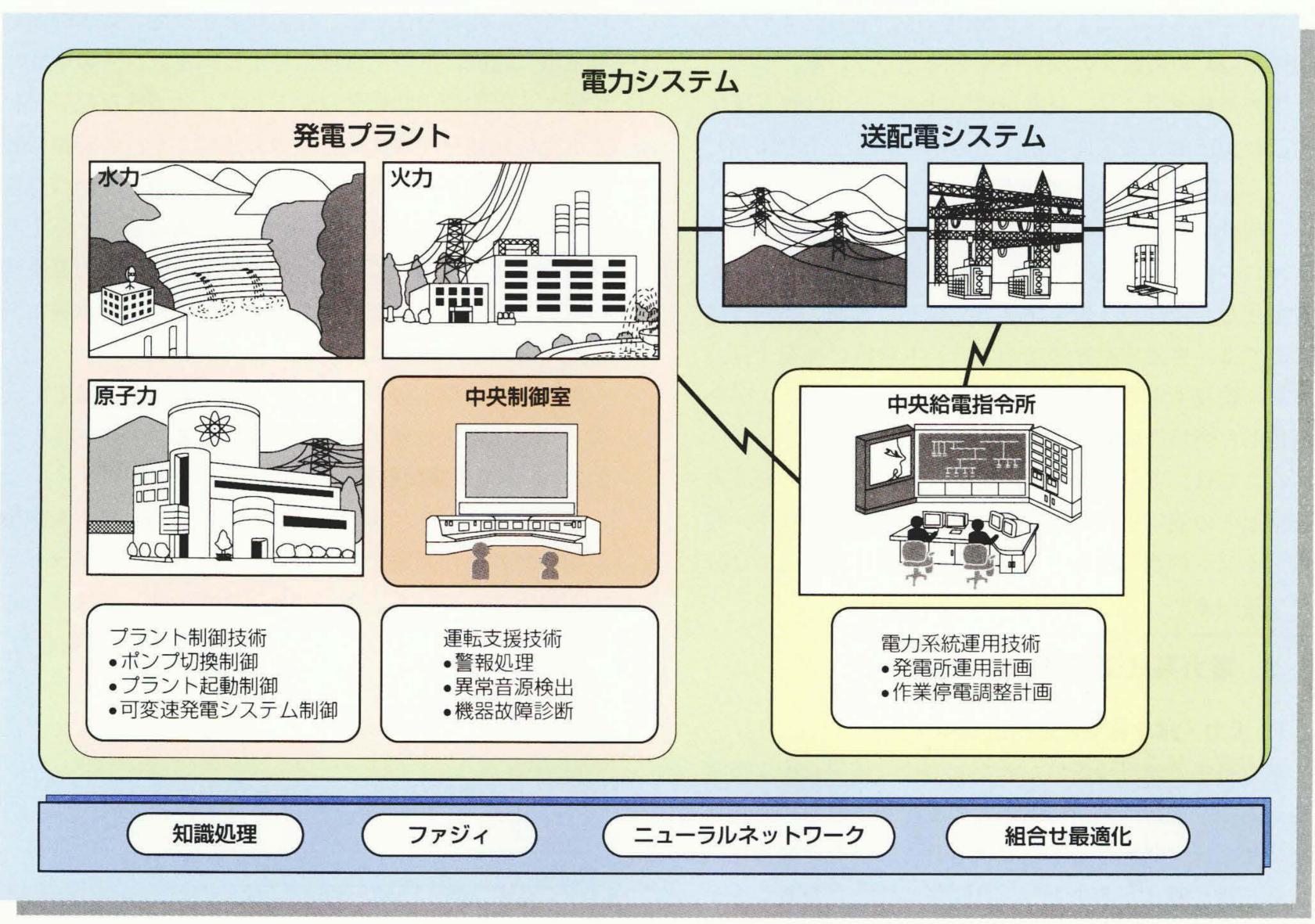
電力システムの最適運用を支える制御技術

Control Technologies Supporting Optimum Operation of Electric Power Systems

大賀幸治*
中田祐司**

Yukiharu Ôga Yûji Nakata

本部光幸* 甲元 洋*** Mitsuyuki Hombu Hiroshi Kômoto



電力システムと開発した要素技術

電力システムを構成する発電プラントや送配電システムの制御技術を、知識処理、ファジィなどの基盤技術を基に高度化することにより、信頼性の高い、効率的な運用を実現している。

電力システムの運転信頼性や運用効率を向上するためには、発電プラント、送配電システムで構成する電力系統の運用技術が必要となる。また、発電プラントについて、プラント特性を向上するための制御技術と、プラント運転員を支援する運転支援技術が必要となる。

電力系統の運用について、最新の組合せ最適化技術を 基に、発電所運用計画や作業停電調整計画を策定する運 用計画支援技術を開発した。一方、発電プラントの制御 技術として開発したものが、ファジィ、ニューラルネッ トワーク技術を応用した、原子力プラントの給水ポンプ の安定・高速な切換技術,および火力プラントの起動時間を短縮する起動制御技術である。また,可変速揚水発電プラントを用いて電力系統の周波数調整能力や安定性を大幅に向上する技術も実現した。さらに,運転支援技術として,ニューラルネットワークと知識処理を組み合わせて監視上重要な警報を選択提示する技術,複数の音響信号からプラント内での異常音源を検出する技術,およびファジィ推論によって機器故障の診断と復旧を支援する技術を開発した。

^{*}日立製作所 電力・電機開発本部 工学博士 **日立製作所 大みか工場 ***日立製作所 日立工場

1. はじめに

電力システムでは,運転信頼性や運用効率の向上を図るために,最新の計算機技術,情報処理技術を取り込んだ制御技術の高度化が進められている。

このニーズにこたえて日立製作所は,電力システム最適運用のための数々の制御技術を開発している。

電力系統運用では、発電所運用計画などの計画支援技術、および過渡安定度判定などの系統解析技術を開発している。発電プラント制御では、ポンプ切換制御、プラント起動制御などの通常時の制御技術に加え、異常時の制御についても、過渡事象の影響緩和、異常対応操作の自動化などの制御技術を開発している。また、運転支援の面では、異常の検知診断やプラント状態の推定予測、さらに監視上重要な情報の選択提示やマルチメディアを利用した情報表現などの技術を開発している。

ここでは、電力システムの制御に関して開発した要素 技術とその適用事例の一部を、電力系統の運用技術、発 電プラントの制御技術、および運転支援技術の三つに分 けて述べる。

2. 電力系統運用技術

2.1 火力・揚水発電所運用計画1)

電力系統の運用技術の主要なものに,運用計画支援技術がある。運用計画問題は多数あるが,これらの問題は組合せ最適化問題として定式化される。組合せ最適化問題を正確に解こうとすると,計算量が膨大になることから,従来,問題を簡略化することによって運用解を求めていた。

組合せ最適化問題は、最近の計算機処理能力の向上や新しいアルゴリズムの出現により、簡略化することなしに精度よく、かつ速く解ける状況になっている。ここでは、動的計画法を用いた計画支援技術を開発して、火力・揚水発電所運用計画に適用した。

火力・揚水発電所運用計画では、1日あるいは1週間の各時刻の予想電力需要に見合う電力を供給する際に、電力系統の運用制約条件を満足し、燃料費と起動費の和である発電費用が最小となる発電機の起動・停止時刻やその発電機の出力を決定する。このうち、各時刻の起動・停止発電機の決定は、例えば、0が停止、1が起動を示す0-1組合せ問題となる。組合せ数は、発電機の数と計画作成時間数の積の指数関数で増大し、膨大な数となる。

動的計画法は, 始点から途中の時刻までの最適な計画

の探索を繰り返して、計画最終時刻までの最適計画を求める手法である(図1参照)。動的計画法を起動・停止計画に適用するためには、膨大な起動・停止の組合せの中から各時刻の経済的な起動・停止計画の候補をいかにして絞り込むかが、実用化のポイントとなる。

そこで、効率の高い順に発電機を並べて、効率の高い 発電機は起動、低い発電機は停止に固定し、その中間に 位置する発電機の状態を可変として、経済的な起動・停 止計画の候補を作成する。この方法により、各時刻の起 動・停止計画を順次求めて制約条件を満足し、かつ発電 費用が最小となる1日、あるいは1週間の起動・停止計 画を作成する。次いで、相対的に効率の低い火力発電機 の電力を揚水発電に切り替えることにより、揚水発電所 の運用計画を作成する。

開発した計画支援手法により,発電費用を低減した火力・揚水発電所の運用計画が作成できる。

2.2 作業停電調整計画2)

遺伝的アルゴリズム法やタブーサーチ法など,大規模な組合せ最適化問題を効率よく解く,新しいアルゴリズムが提案されている。ここでは,タブーサーチ法による計画支援技術を開発して,作業停電調整計画に適用した。

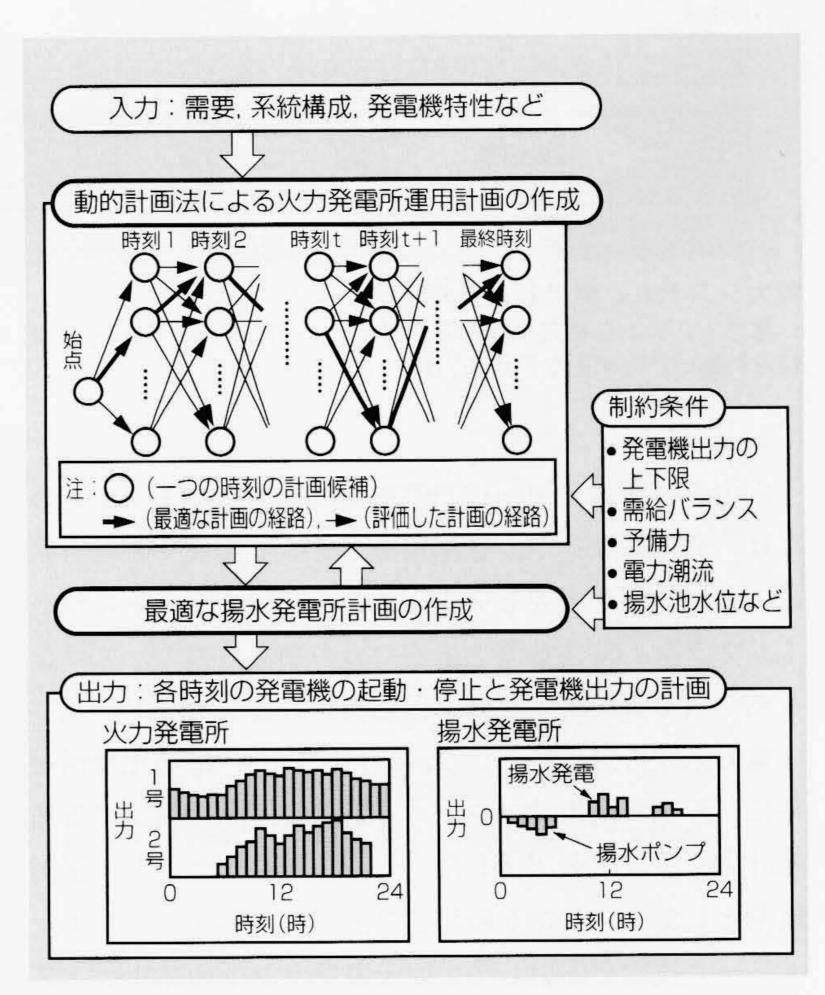


図1 発電所運用計画の概要

予測電力需要に合わせて制約条件を考慮し、I 日24時点の火力と 揚水の発電機の起動・停止計画や発電機の出力を決定する。

作業停電調整計画では、電力系統の信頼度を維持しな がら、設備の新設・増設工事や定期点検などで電力設備 を停止する作業日を決定する。送電線、変圧器などの電 力設備の停止中に事故が万一発生しても、系統信頼度を 維持する必要がある。このため、同時に停止してはなら ない電力設備の組合せと、電力設備に流せる電力潮流の 制約を考慮する必要がある。制約違反を解消する対策と して,作業日の調整,電力の送電経路の調整などの問題 がある。これらは、それぞれが組合せ最適化問題となり、 作業停電調整計画を実用化するには、高速化が重要なポ イントとなる。

そこで、最も高速な組合せ最適化手法と言われている タブーサーチ法を採用した。この手法では、現在の計画 に類似しているもの、すなわち近傍の計画案の中で最も 良い計画を選択して、計画案の更新を繰り返す。また、 選択した計画へ移る際に、計画の変化状況をタブーリス トとして記憶しておき, 同一の計画へ後戻りすることを タブーとして回避する(図2参照)。この方法により、極 小解で更新が終了することを防ぎ、かつ探索が効率的に 実施できる。

タブーサーチ法による計画支援技術を作業日の調整 と,電力の送電経路の調整に適用し,作業停電調整計画 を自動化した。作業日の調整についての例を図3に示す。 この例では、(1)同時停止禁止を回避して着目作業を実施 するための他作業の作業日の移動,(2)潮流制約を満足さ せるための着目作業の作業日の移動を順に実行する。作 業日はタブーを除いて、最もよい日へ移動させる。着目 作業を変更しながら、作業日の移動処理を繰り返すこと

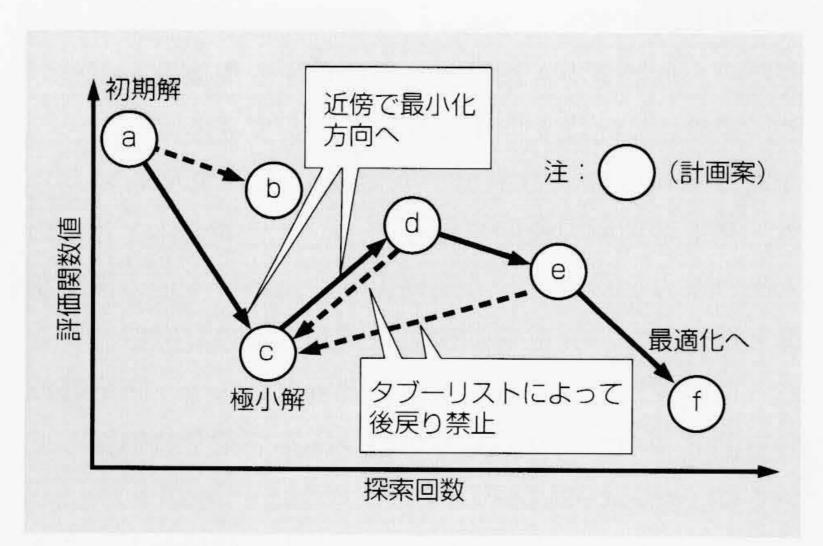
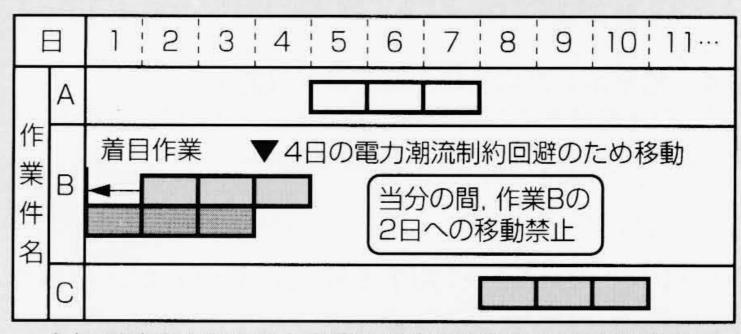


図2 タブーサーチ法による探索の様子

タブーサーチ法では、極小解cの近傍の計画案の中で評価関数が 最小の計画dに移動する。また、最近移動した情報を基に、極小解c などの同一の解へ戻ることを回避して極小解から抜け出すととも に、効率よく新しい解が探索できる。



(a) 同時停止禁止制約による調整処理



(b) 同時停止禁止および電力潮流の制約による調整処理

図3 タブーサーチ法による作業日調整

(a)では、着目作業Aと同時禁止となる作業B、Cの作業日を移動さ せて、着目作業Aが実施できるようにする。設定した探索回数の間、 作業Bを元の作業日の4日へ戻すことを禁止する。(b)では、電力潮 流の制約を回避するために、着目作業Bを移動させる。

により、制約条件を満たす最大数の作業が実施できる作 業停電調整計画を自動的に作成することができる。

電力系統の運用計画支援問題としては、ほかに系統事 故時の復旧系統を決定する事故復旧問題, ロスを最小と する系統構成を決定するロス最小系統構成問題などがあ る。開発した動的計画法やタブーサーチ法を用いた計画 支援技術は、これらの問題にも適用することが可能である。

3. プラント制御技術

3.1 原子カプラントの給水ポンプ切換制御

数学モデルの構築が困難で運転員のノウハウの活用が 必要なシステムに対し、有効なファジィ制御方式を開発 して,原子力プラントの制御に適用した。

プラントの起動・停止時には、タービン駆動の給水ポ ンプとモータ駆動の給水ポンプを切り換えて使用する。 この給水ポンプ切換は重要操作の一つであるが、ポンプ 流量間の相互干渉のため、自動制御が難であった。この ため、給水ポンプ切換は、運転員の操作ノウハウに負う ところが大であった。そこで、給水ポンプ切換の自動化 にファジィ制御方式を適用した³⁾。

給水ポンプの制御系に、運転員の切換操作ノウハウお

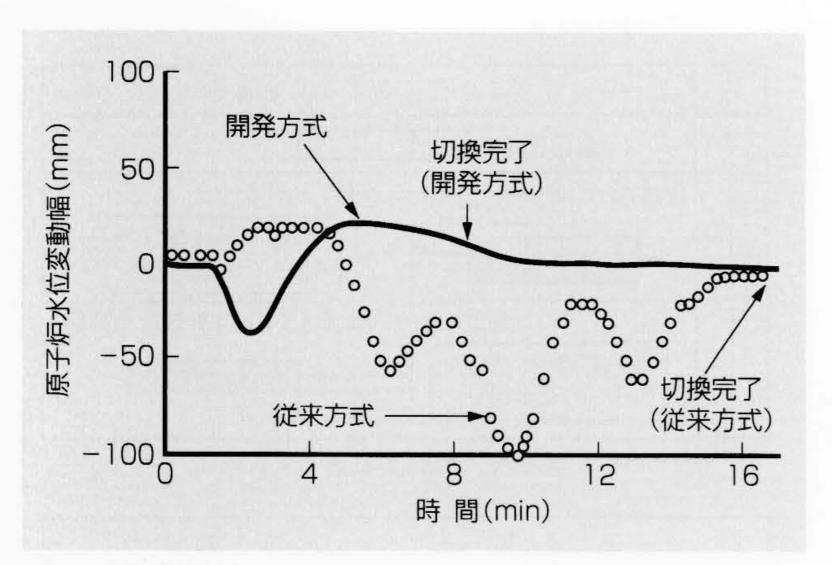


図 4 給水ポンプ切換時の原子炉水位変化

ファジィ制御方式の適用により,給水ポンプ切換時の原子炉水位の変動幅の抑制と切換時間の短縮が図れた。

よび給水系の動特性に関する知見に基づいた、給水ポンプの切換操作指令をファジィルールとして実装した。給水ポンプ切換時の原子炉水位の変化例を図4に示す。原子炉水位状態に応じて適切な切換操作指令が得られ、切換時の原子炉水位の変動幅の抑制と切換時間の短縮が実現できることを確認した。

ファジィ制御方式は運転員のノウハウに依存したプラント運転の自動化に有効であり,応用範囲が広い技術である。

3.2 改良型複合サイクル発電プラントの起動制御

ファジィ推論を応用した起動制御最適化技術を開発し、改良型複合サイクル発電プラント(ACC: Advanced Combined Cycle)の起動制御パラメータの探索に適用した。目的は、プラントの初期条件に応じて、タービン熱応力やNOxなどを制限値以内に抑制しながら、負荷変化率や負荷保持時間などの起動制御パラメータを最適化して、起動損失と起動時間を低減することにある。

パラメータの探索に際しては、プラントの動特性を1ケース数分で高速にシミュレーションする。このシミュレーションと、プラント動特性のエキスパートの知識を用いたファジィ推論を繰り返す。典型的なACCで評価した結果を図5に示す。同図に示すように、プラントの制限値を守りながら、起動時間を設計時当初計画の約60%に、起動損失を約70%にそれぞれ低減する起動制御パラメータ値が得られた。

さらに、ガスタービンの吸気温度・吸気湿度を制限値 として考慮に入れた起動制御パラメータの探索について も検討した。これについては、最初はファジィ推論で探 索し、その後、探索結果が蓄積された段階で、ニューラ

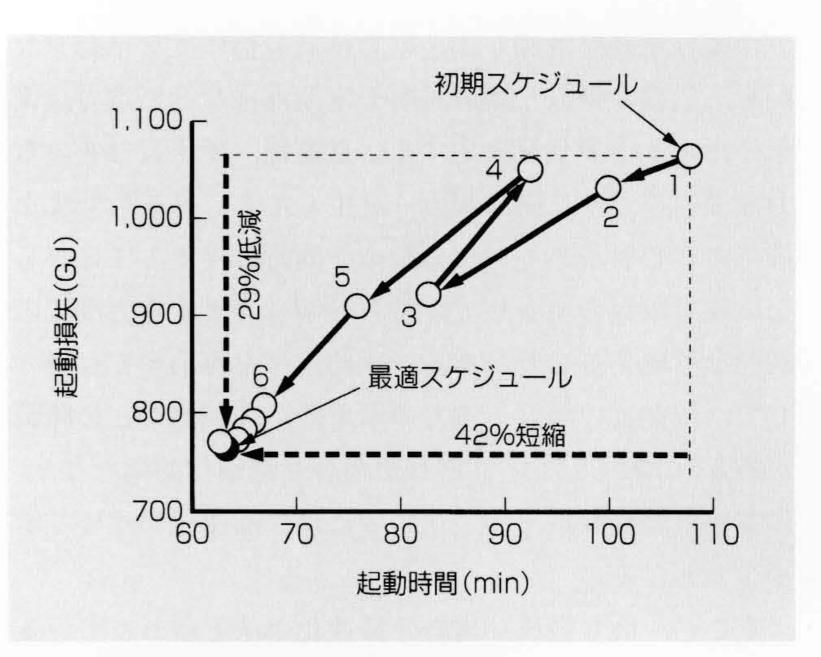


図 5 起動時間・損失の収束特性

図中の白丸 I は,設計時に設定された起動制御パラメータによる 起動時間・損失を示す。黒丸が II 回のファジィ推論による最良の結 果である。

ルネットワークによる推定に切り換える方法を提案し、ファジィ推論単独の場合よりも良い探索性能を得ている。 今後、通気タイミングなど、ほかの起動制御パラメータについての探索機能を追加するなどの拡張を実施することにより、火力プラントの効率的な運転制御が実現で

きる製品システムを開発する計画である。また開発技術は,運用上の制限値が設定されている対象であれば,汎 用的に適用可能であり,適用範囲の拡大を図る。

3.3 可変速発電システム制御

可変速発電システムでは、発電電動機の回転子に接続した励磁用電力変換器で、従来の直流ではなく交流で励磁し、この周波数を調整することによって速度を変える。発電電動機の入出力電力を大幅に変えることができ、また効率も向上する40。さらに、発電電動機の有効電力だけでなく、無効電力も制御して系統電圧や周波数が調整でき、系統の安定度を向上させることができる。

電力系統の周波数調整や安定度向上効果を高めるため、発電電動機の速度ではなく、システム全体としての入出力電力を最優先して制御する、いわゆる電力優先制御を採用した。発電電動機が系統から電力を吸収、すなわち電動運転しているときの有効電力のステップ応答波形を図6に示す。有効電力が速い応答で指令に追従している様子がわかる。

可変速発電システムの広範囲な電力調整機能と,ここで開発した電力優先制御による高応答有効電力制御の効果により,非常に高い確率で系統周波数を所定の範囲内に維持できることを揚水発電プラントで実証した5)。

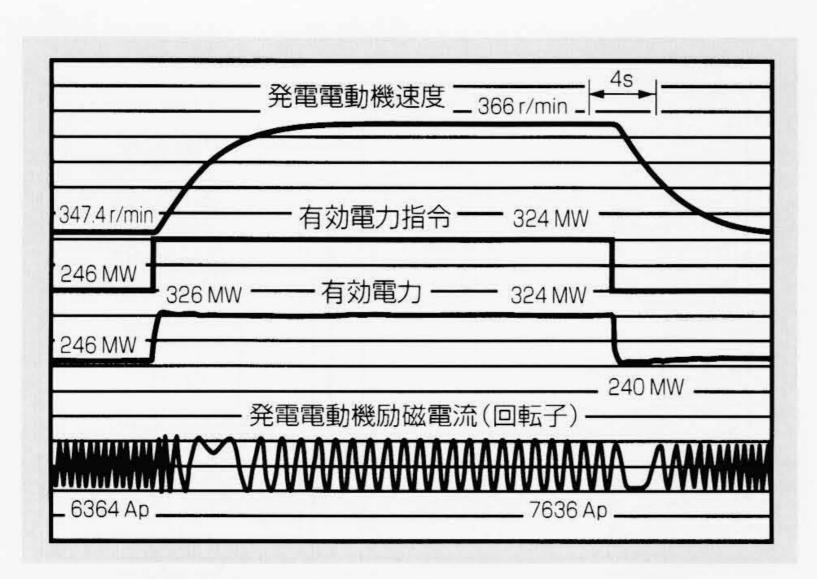


図 6 可変速発電システムの有効電力ステップ応答

有効電力の高応答制御を実現して,系統周波数調整精度や安定性 を大幅に向上させた。

このほか,系統事故時の電圧低下や不平衡,発電電動機の回転子側過電圧によって励磁用変換器に過電流が流れるのを防止し,運転を継続する制御法も確立している。この制御法により,系統安定度の大幅な向上が期待できる。

4. 運転支援技術

4.1 警報処理システム

プラント過渡時などに発生する警報から、プラント状態に応じて監視上重要な警報を選択して運転員に提供することは、運転員の負担軽減のために有効である。このため、重要警報を2ステップで選択する警報処理システムを開発した。

このシステムは、まず警報間の物理的な関係に基づいて重要警報を選択し、さらに発生事象の同定結果を用いて絞り込む(図7参照)。発生事象の同定では、ニューラルネットワークの高速性と知識処理の確実性に着目し、ニューラルネットワークで圧力などのアナログ信号の時系列パターンから発生事象の候補を絞り込み、その結果を知識処理で確認する独自の方式により、オンラインでの高速・正確な同定を実現した。

プロトタイプシステムの評価を原子力プラントの起動 試験時に実施した⁶⁾。起動試験での試験項目である負荷 遮断など3種類の事象について、事象発生時の原子炉出 力を変えた計9回の試験を対象に、システムの警報処理 性能をオンライン実環境で評価した。その結果、発生警 報の約30%が重要警報として選択できた。事象同定につ いては、解析結果を用いてニューラルネットワークにあ らかじめ学習させた9種類の事象の中から、3種類・計 9回の試験事象すべてを、0.1秒以下の処理時間で正確に

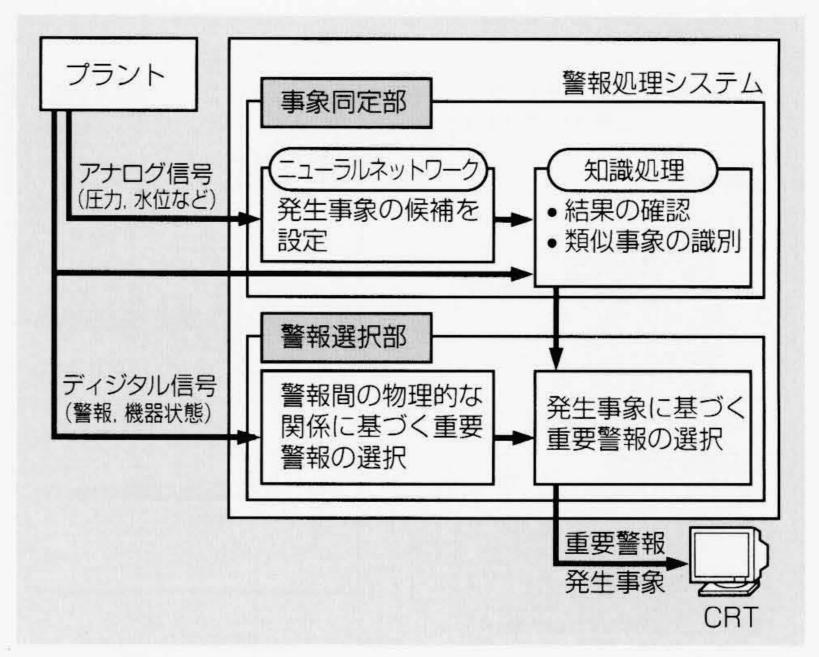


図7 警報処理システムの構成

発生事象をニューラルネットワークと知識処理を組み合わせて 同定し、プラント状態に応じて重要警報を2ステップで選択する。

同定できた。選択された重要警報や発生事象の同定結果 は、プラント状態の迅速・正確な把握に有効である。

ここで開発した警報処理システムは,原子力プラント だけでなく,火力・水力プラントなどの運転支援技術と しても幅広く使用できる。また,発生事象の同定方式に ついては,例えば,ポンプなどの機器が不具合となった 際の原因同定などにも適用が可能である。

4.2 異常音源の検出

プラント機器の多くは稼動中に音を発生するので、機器状態監視への音響監視の適用範囲は広い。機器状態監視では、異常音などの音源位置の検出が重要となる。これに対応するため、開口合成により、音源の位置と強度変化を推定する音響監視技術を開発した。

複数の音響センサによって監視対象領域の音源強度分布を推定する原理を図8に示す。同図のように、検出された音響信号から各仮想音源点での音源強度分布を得る。さらに、開発した技術では、反射音などの雑音の影響を低減するため、検出すべき対象事象を基に、使用する音響の周波数帯域を調整する。

有効性を評価するために、水を満たした円筒形の容器内部でガスを吹き出して漏洩(えい)を模擬し、8個の音響センサで容器内部の音源強度分布を推定した。この結果,反射率の高い容器壁からの反射音の影響を受けずに、ガスの吹出し位置での強い発生音が検出できた。

開発した技術は、従来困難であった複雑な容器内部や 閉空間内部での音源の有無、さらに音源ごとの強度変化 の監視に幅広く適用可能である。

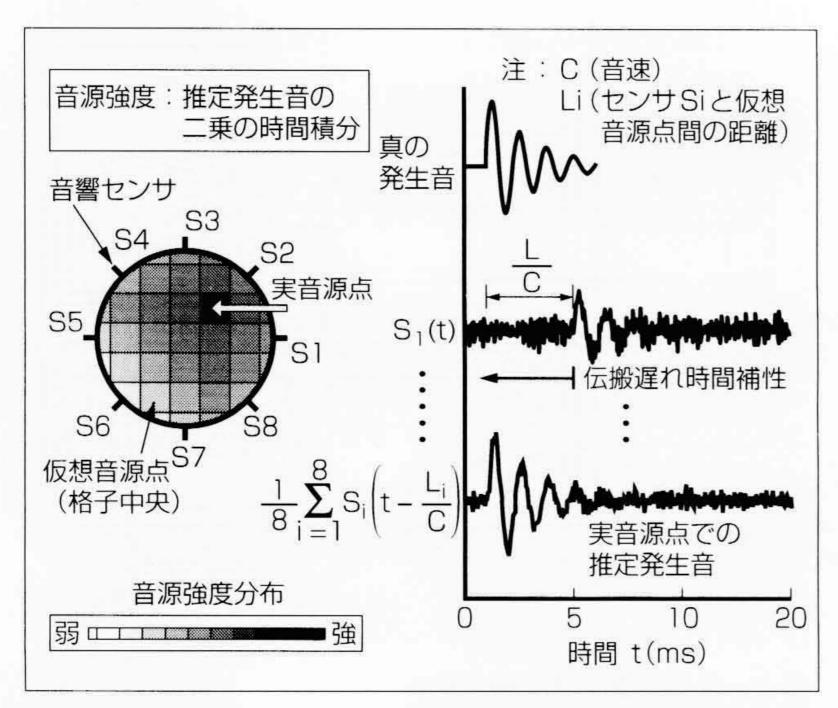


図8 開口合成処理による音源強度分布推定の原理

音響センサでの検出信号を,各仮想音源点ごとに,センサと仮想音源点間の伝搬遅れ時間を補正して加算し,仮想音源点での発生音を推定する。推定発生音の二乗の時間積分によって求まる音源強度は,実音源点で最強となる。

4.3 プラント機器の故障診断

大規模で複雑な診断対象プラントの機能構成を階層的に表現し、上位レベルから下位レベルへと段階的に診断する故障診断技術を開発した。

この技術では、診断対象の階層構成の知識と故障原因 候補を絞り込むための試験の知識を使用して、知識処理 によって診断を進める。診断に必要な診断対象について の情報の一部は、オフラインで入力する。この中には、 運転員による判断情報もあり、個人差が診断結果に影響 を与えることが考えられる。これを解決し、診断確度の 向上を図る手段として、診断処理の一部にファジィ推論 を導入した。

開発した技術を揚水発電所の故障診断・復旧支援に適用した。システムは、知識ベース、データベース、ユーザーインタフェース、および推論機構で構成した(図9参照)。このシステムは、揚水発電所の警報をトリガとして

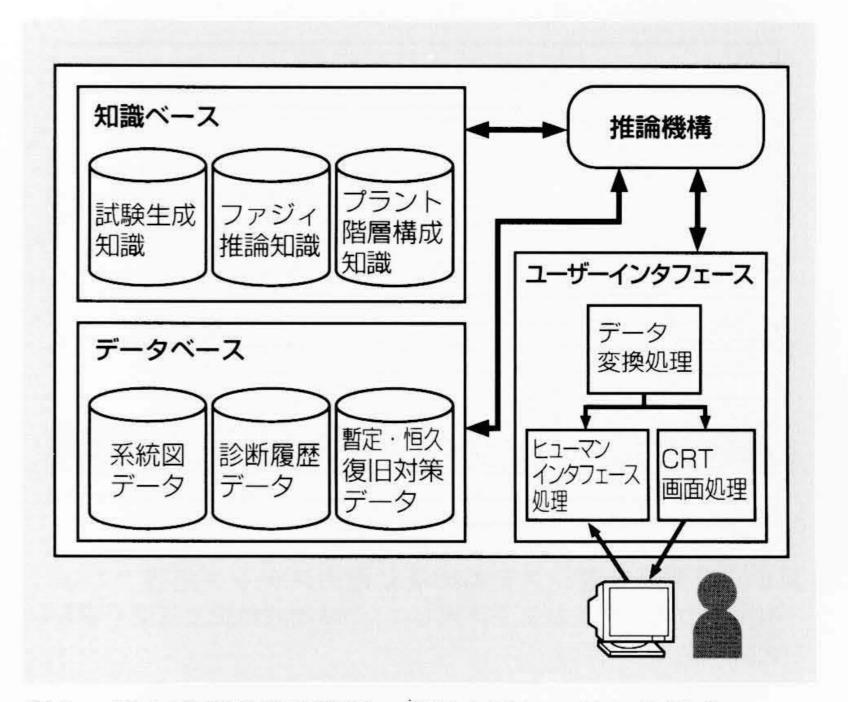


図 9 揚水発電所故障診断・復旧支援システムの構成 揚水発電所の警報をトリガとして,運転員と対話しながら警報発 生原因を診断し,復旧を支援する。

起動し、運転員と対話しながら警報発生原因を診断すると同時に、原因に対応する個所を示す系統図を表示する。

開発した技術は、知識の階層化によって診断対象の変更・拡張に対応し、比較的容易に知識が構築、追加できるという特徴を持つ。電力系統、発電プラントなどの大規模システムに幅広く適用することができる。

5. おわりに

ここでは、電力システムの最適運用のために開発した 要素技術を、適用例を含めながら述べた。

電力の安定かつ効率的な供給を実現するためには、ここで述べた電力系統の運用、発電プラントの制御、および運転支援などの電力システムの制御技術を総合的に高度化していく必要がある。今後も急速に進歩する関連技術を取り込みながら、積極的に研究開発を進め、運転信頼性や運用効率の高い電力システムの実用化を目指していく考えである。

参考文献

- 1) 澤,外:火力・揚水発電所の運用計画作成手法,電気学会論文誌B,114巻,12号(平6-12)
- 2) 澤,外:タブサーチを用いた作業停電調整支援システムの開発,電気学会電力技術研究会,PE-96-60(平8-9)
- 3) 青木,外:ファジィ制御による給水ポンプ自動切替システムの開発,日本原子力学会,1994年秋の大会予稿集,C13(平6-9)
- 4) 北:水力発電部門へのパワーエレクトロニクス適用技術,電気評論,pp.24~31(1993-9)
- 5) S. Mori, et al.: Commissioning of 400MW Adjustable Speed Pumped Storage System for Ohkawachi Hydro Power Plant, SIGRE, Symposium Tokyo 1995, 520-04
- 6) Y. Ohga, et al.: Evaluation Tests of Event Identification Method Using Neural Network at Kashiwazaki Kariwa Nuclear Power Station Unit No.4, J. Nucl. Sci. Technol., 33, 5, 439 (1996)