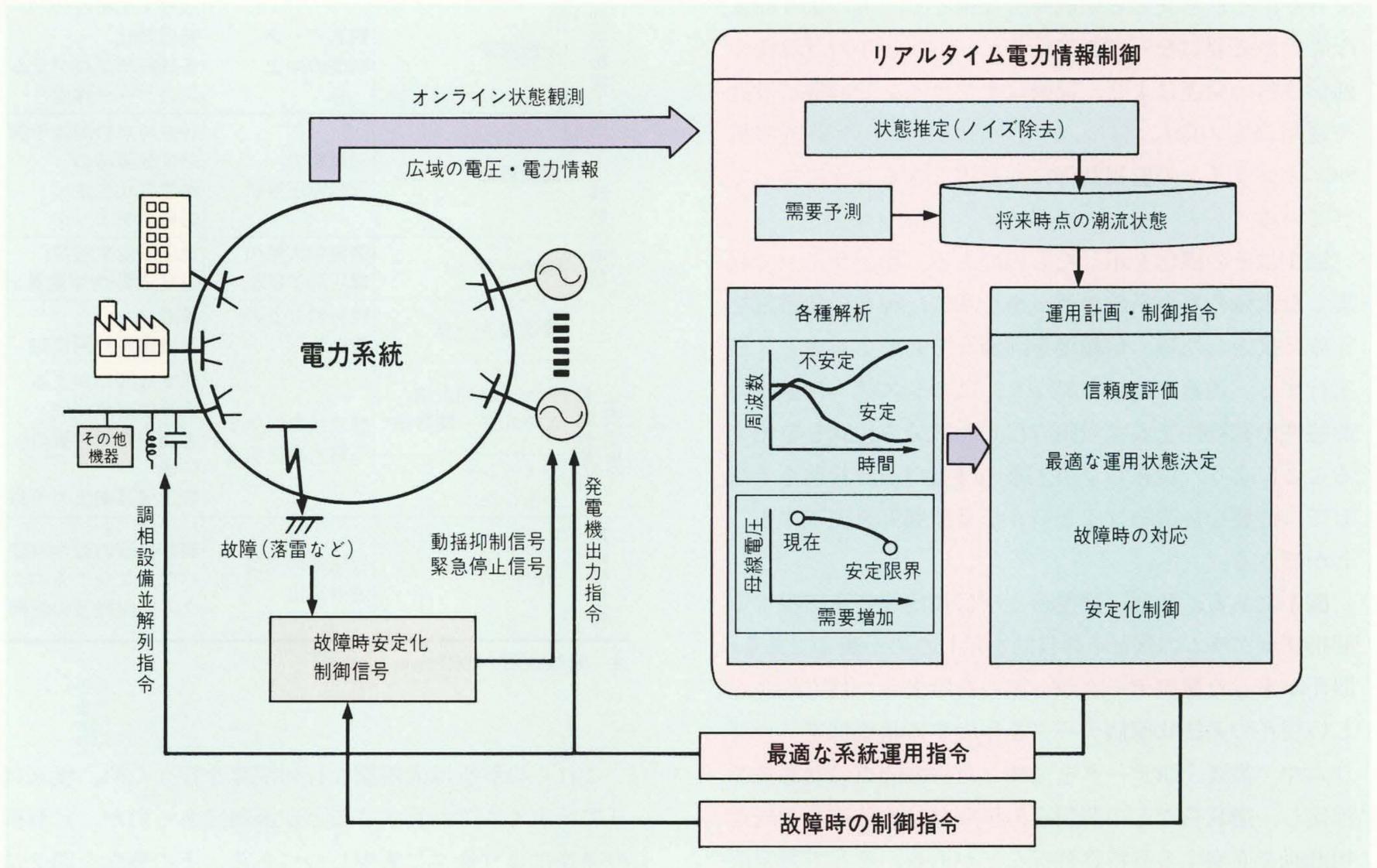


リアルタイム電力情報制御を支える系統解析技術

Power System Analysis Techniques for Real-Time Power System Control

福井千尋* Chihiro Fukui 後藤益雄** Masuo Gotō
 天野雅彦* Masahiko Amano



リアルタイム情報制御への系統解析の適用
 系統解析技術の適用により、最適かつ適応形の制御が実現できる。

電力系統の静特性・動特性を把握するための系統解析は、設計・計画段階での評価手段として以前から用いられている。この本質的な意味に加え、近來の驚異的なコンピュータ・通信技術の発達により、オンラインで系統状態を取り込み、解析を実行し、時々刻々変化する系統特性に合わせた高度な適応制御を可能とするリアルタイム電力情報制御が望まれている。

以上の課題を解決するため、日立製作所はオンライン実行に適した各種の高速系統解析技術を開発した。これらは観測誤差を統計的処理によって排除する状態推定、需要増大時の電圧低下を計算する電圧

安定度計算、落雷などの系統故障が発生した場合の発電機の応動を予測する過渡安定度計算などである。

これらの解析をオンラインで実行可能としたことにより、精度の良い系統監視や信頼度を考慮した最適な系統運用計画、また、想定故障時の緊急対策立案などがリアルタイムで実現可能となった。

上記の解析技術は今後ますます大規模化・複雑化する電力系統の供給信頼度を向上させることができるため、中央給電指令をはじめとする給電制御所の運用計画・制御支援機能や、各種系統安定化装置の制御論理などに適用が始まっている。

* 日立製作所 日立研究所 ** 日立製作所 電力事業部 工学博士

1 はじめに

電力需要の増大に伴う電力系統の大規模化、複雑化に対応するため、年々新しい情報制御手法が導入されてきており、それを支える系統解析技術としても、より高度なものが必要になってきている。一方、近年の計算機や通信技術の発達により、従来はオフラインでの機器設計や運用決定の際にだけしか用いられなかった系統解析が、オンラインの監視制御にも適用できるようになってきている。

図1はその概念を示したものである。オンラインで収集した大量の電力系統のデータを基に、現在の状態量を正確に推定した後、信頼度を評価して必要な対策を立案実行する。通常の制御と異なり、このシステムは系統の静特性や動特性を表す回路方程式や微分方程式を駆使することにより、現在および未来の時点の系統状態を予測して、必要な処置を行うという予見型制御を実現することができる。

図1にある、状態の把握および信頼度評価を実現する解析プログラムの例とその目的を示したのが表1である。誤差が乗った観測データから誤差を除去し、最も確からしい現在の系統状態値データを作成する状態推定プログラムや、需要予測データを加味した将来時点の状態量を推定し、過負荷などの問題点の早期発見や最適な系統運用計画を立案する静特性解析などがある。そして想定故障が発生した場合の応動を解析し、必要があれば安定化などの対策案を立案・評価・実行する動特性解析などが代表的なりアルタイム電力制御のための解析手法である。

表1 各種解析手法とリアルタイム電力情報制御への応用例
コンピュータ・通信技術の発達により、各種の解析手法はさまざまなりアルタイム制御で利用されるようになってきている。

解析種類	プログラム名称	内 容	リアルタイム制御での応用例
静特性解析	状態推定	観測データ精度の向上	監視制御機能の高信頼化 各種解析プログラム入力データ作成
	潮流計算	送電電力、母線電圧解析	将来時点の潮流予測 想定故障時の潮流変化推定 過負荷チェック
	PVカーブ 最適潮流計算	需要増大時の電圧降下解析 燃料費などの最小化	電圧安定度監視 安定限界・余裕量算出 最適な系統運用計画策定
動特性解析 (安定度)	ニューロ判定法 エネルギー関数法	想定故障に対する電力動揺判定	想定故障に対する過渡安定度判別 各種安定化装置の評価 安定限界潮流の予測
	シミュレーション法		
瞬時値解析	EMTP	故障時の交流波形算出	制御機器の動作検証 パワーエレクトロニクス応用機器の制御

注：略語説明 PV(Power-Voltage)

これらの解析は大規模な行列演算を伴うため、従来はリアルタイムで計算することが困難であったが、計算機の発達により徐々に実現しつつある。その概念を図2に示す。同図は横軸に要求計算量、縦軸に標準計算機に対する性能倍率を示している。ここでいう要求計算量とは、標準計算機に必要な計算時間と各種プログラムに必要な

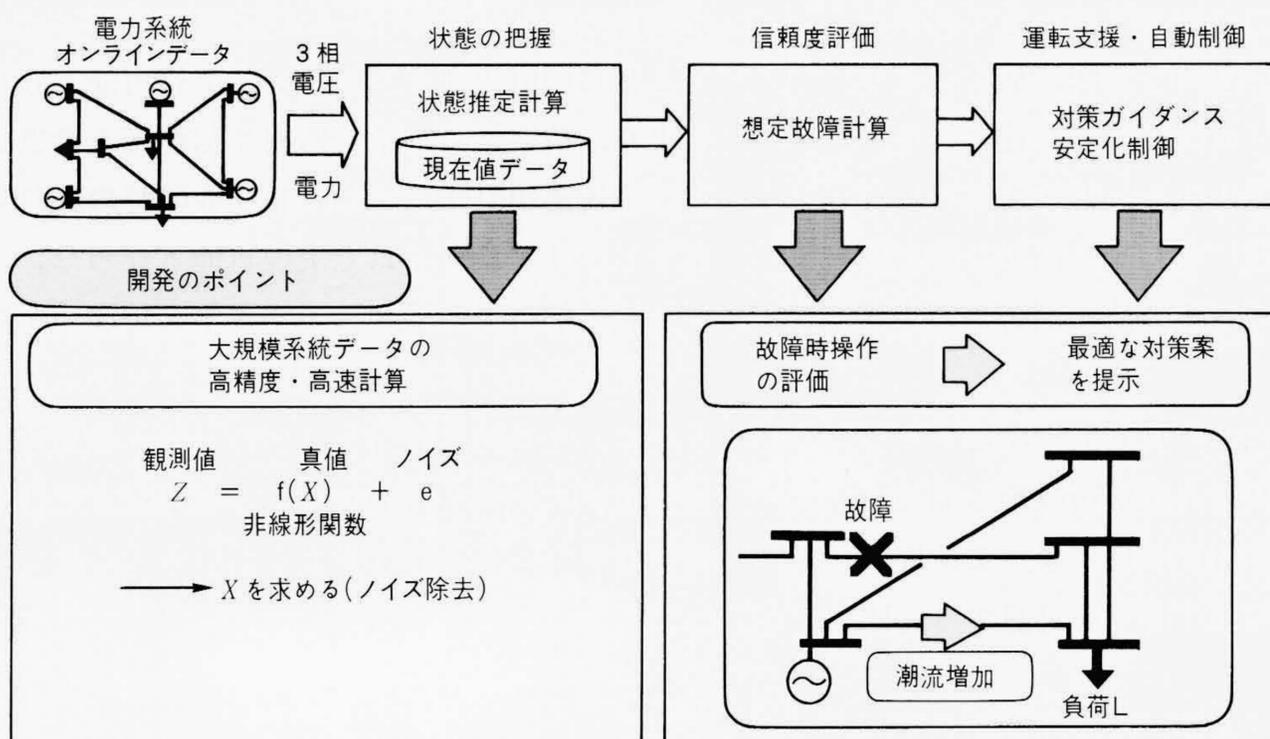


図1 リアルタイム電力情報制御のコンセプト
大量のオンラインデータを基に解析を実施し、供給信頼度維持のための制御を実現する。

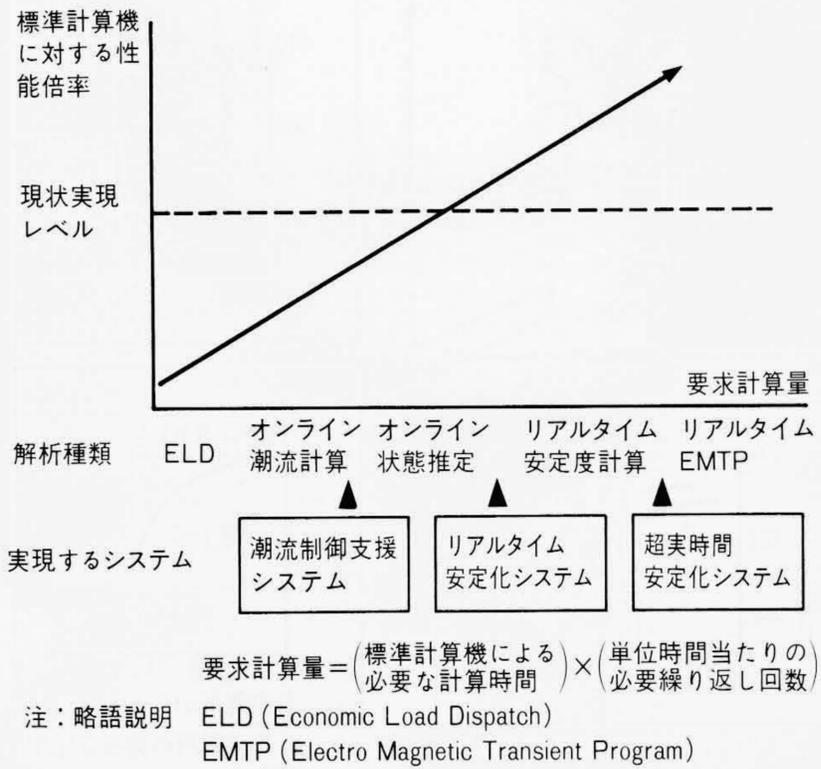


図2 各種解析の計算量と要求される性能
計算機の実力が向上すれば、より高度な制御システムが実現する。

単位時間当たりの必要繰り返し回数を乗じたものとする。計算機の性能が向上するに従って、燃料費を最小にする最適な発電機出力値を決定するELD(Economic Load Dispatch)計算やオンライン潮流計算などが順次実用化されてきた。現状は、オンライン状態推定からリアルタイム安定度計算が実現しつつある段階である。これらの解析を用いて、信頼度を維持しながら最適な系統運用計画を立案する潮流制御支援システムやリアルタイム安定化システムが実現している。

今後、単体計算機の能力の向上および並列処理技術が進むに従って、リアルタイムで実現できる解析技術が向上していくことが予想される。図2では超実時間安定化システムという例をあげている。超実時間とは10秒間の電力動揺などの現象を、例えば0.1秒でシミュレーションすることを意味している。このような解析ができれば系統故障が発生した後にどのような不具合が発生し、どのような対策が最も効果があるかを比較検証して、最適な制御手法を立案することが可能となる。

以上がリアルタイム電力情報制御のコンセプトである。ここでは上記の解析技術のうち、実現した解析技術と応用例について述べる。

2 状態推定

電力システムのオンライン監視制御システムでは、系統の現時点での状態を正しく認識することが必要である。と

ころが、系統の各地点から時々刻々送られてくる電圧、電流などの観測値には、測定誤差や伝送遅延、伝送路のトラブルなどに起因する誤差が含まれている。そこで、統計的処理でこの誤差を除去し、最も確からしい状態を認識する処理が必要となる。これを状態推定(State Estimation)と呼ぶ。

オンラインデータを基に種々の解析計算を行うためには、各母線で潮流バランスの取れた初期状態を作成する必要がある、そのための前処理としても状態推定は欠かせないものである。状態推定の概要を図3に示す。

潮流バランスの取れた状態とは、系統内の電圧、電流が、接続状態やインピーダンスによって決まる回路方程式を満たすような状態をいう。誤差を含んだ観測値は、その方程式を満たさない。そこで、系統全体で誤差の二乗和が最小になるように観測値を修正し、回路方程式を満たす状態を作り出す。

観測誤差がホワイトノイズという仮定の下で最小化問題として定式化し、これを制約付き最小二乗法などを用いて解く計算手法がある^{2),3)}(図3参照)。また、観測値と推定値との差が大きいものについては、 χ 二乗検定などの統計的処理により、誤りデータとして同定し除去する。誤りデータを除去した後、再度状態推定計算を行う。

以上のような手順で、回路方程式を満たす最も確からしい状態を求める。求めた結果は各種のオンライン監視

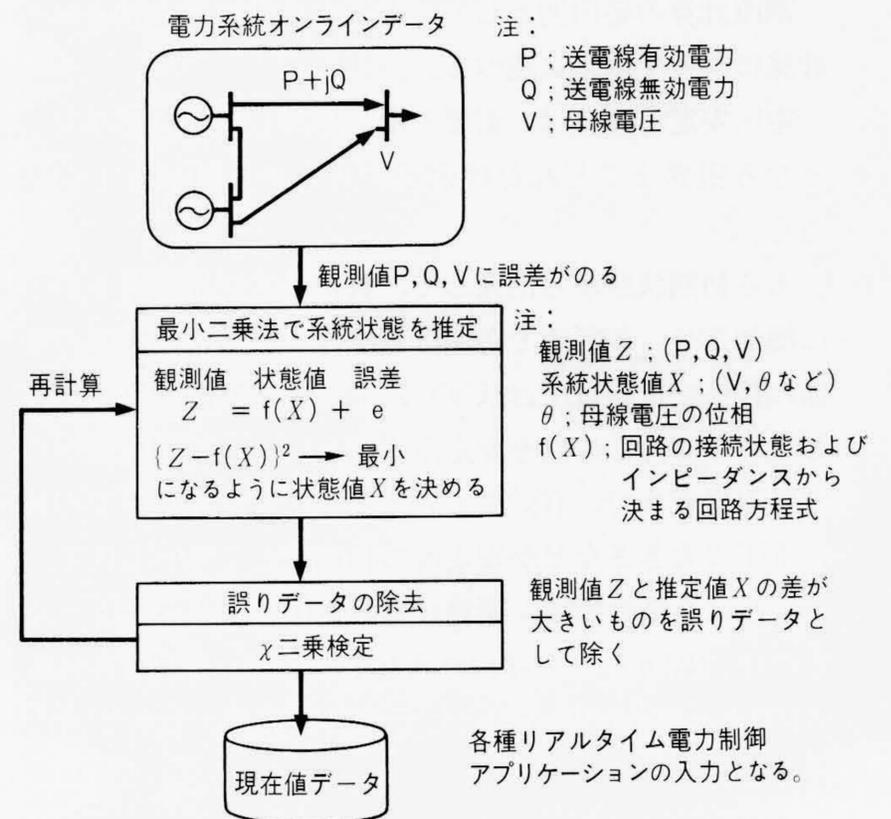


図3 状態推定の概要
統計的処理により、誤差が乗った観測値から正しい状態量を推定する。

制御のアプリケーションのベースデータとして用いられる。系統規模にもよるが、状態推定計算に要する時間はせいぜい数秒程度であり、現在では給電制御システムの各種制御機能や解析計算の入力データ生成機能として実用化されている。

3 静特性解析

静特性解析の代表例は潮流計算であり、さまざまな場面で基本解析手法として用いられている。特に監視制御システムでは、想定した系統状態での線路潮流や母線電圧をチェックするために欠かせない機能である。

潮流計算は、各母線の発電量や負荷量を設定し、潮流方程式と呼ばれる非線形の代数方程式を解くことにより、設定条件を満たすような母線電圧の大きさと位相を計算するものである。母線電圧が求めれば線路潮流などが計算できる。解法としてはニュートン＝ラフソン法が一般に用いられている。

監視システムでは、将来時点での需要予測値や発電機出力配分値に対して、線路潮流や母線電圧が許容範囲にあるかどうかをチェックが必要があり、その際に潮流計算が用いられる。また、送電線1回線開放やループ系のルート断など、想定故障に対してもチェックする必要があり、特にループ系が多い海外の系統では必須(す)の機能となっている。故障発生後の復旧ルート探索の際などにも、過負荷チェックとして潮流計算が用いられる。

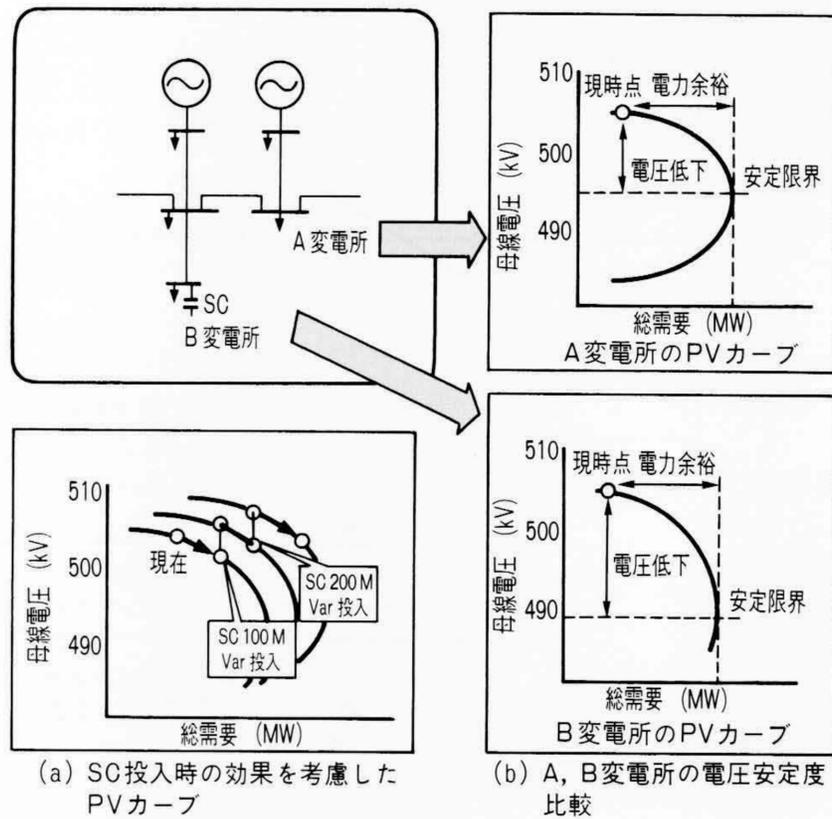
潮流計算の応用例として、電圧安定度計算と最適潮流計算について以下に述べる。

電圧安定度計算は、需要の増加に対して、電圧不安定となる限界までどれだけ余裕があるかを調べるものである。

ある初期状態から出発して、負荷および発電量を徐々に増加させ、各断面で潮流計算を行う。通常、需要の増加に伴って母線電圧は低下し、ある点で潮流計算が収束しなくなる。この点を安定限界点といい、初期状態から安定限界点までの有効電力の余裕や、安定限界点での母線電圧の大きさなどが安定度の指標として用いられる。

横軸に全系の需要、縦軸に母線電圧の大きさをとったものは、PVカーブと呼ばれる(図4参照)。系統の各母線のPVカーブを比較することで電圧安定度の比較が可能となる。

また、電圧を調整するために調相設備を投入した場合の効果も推定することができる。オンラインデータを基にこのPVカーブを描き、電圧安定度監視を行うシステム



注：略語説明 SC (Static Condenser)

図4 PVカーブの例

電圧安定限界点までの有効電力余裕や電圧低下量が電圧安定性の指標となる。

も実用化されている。

最適潮流計算は、ある制約条件の下で電力損失などの目的関数が最小になるような潮流状態を求める計算である。通常、潮流計算は母線電圧を変数とした代数方程式を解く問題であるのに対し、最適潮流計算は発電機出力や調相量などを変数とする最小化問題となる。

制約条件としては、発電機出力、送電線潮流、母線電圧などの上下制限が通常用いられる。目的関数としては、電力損失、発電機燃料費などが用いられる。この問題は不等式制約のある非線形最小化問題となり、解法としてはニュートン法、線形計画法、二次計画法などが一般に用いられる。

最適潮流計算は、さまざまな制約条件を考慮しながら発電機や調相設備の最適運用を図るための解析ツールとして有用である。現在は運用計画段階での利用が主であるが、しだいにオンライン監視制御にも取り入れられるようになると思われる。

4 動特性解析

動特性解析の代表的なものは、落雷による地絡故障など電力系統に外乱が発生した場合の発電機の動揺を計算する過渡安定度計算である。

過渡安定度の判定には、エネルギー関数法やニューラ

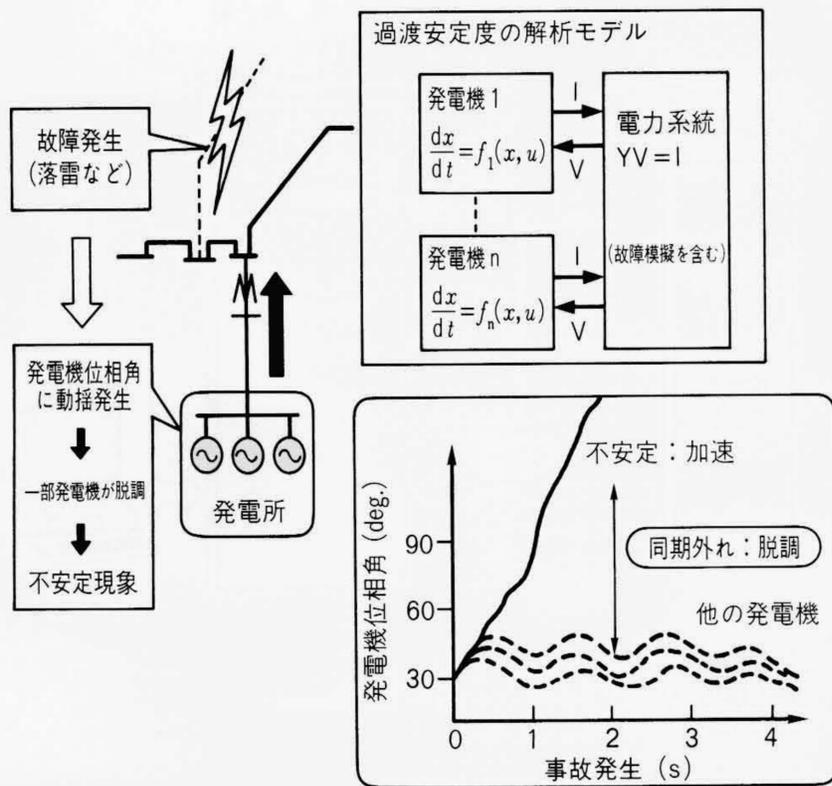


図5 過渡安定度計算の例

実効値ベースの時間軸シミュレーションによって安定・不安定を判別する。

ルネットによる方法など種々の方法があるが、実効値ベースの時間軸シミュレーションを行って、波形から直接安定度を計算する方法が最もよく用いられる(図5参照)。

時間軸シミュレーションは、発電機の動特性や励磁系、ガバナなどの制御系を表す微分方程式と、系統の回路方程式を合わせて解くことによって計算する。通常は、微分方程式をルンゲ=クッタ法などの数値積分法で解き、各積分ステップごとに回路方程式を解く手法が用いられる。

この過渡安定度計算には非常に多くの計算時間を要するため、従来は制御機器の設計段階や、将来時点での運用状態を決定するためのオフラインの解析として主に用いられてきた。しかし、近年の高速な計算機の登場により、これをオンライン監視制御に適用する例も出てきている。

オンラインの安定度計算を利用したリアルタイム安定化システム⁴⁾の例を図6に示す。このシステムでは現状の系統状態を取り込んだのち、例えば5分先の潮流状態を予測する。そして、想定される故障に対する安定度計算を行い、脱調などの不安定現象が予測されるなら、必要最小限の電源制限などの緊急安定化対策を立案しておく。そして、万が一、故障が発生したら、即座に立案しておいた安定化対策を実施するものである。

この原理を応用したシステムは、安定度計算の速度が問題となるが、クライアントサーバ方式による並列演算を用いることで、リアルタイム性を確保している。

このように時々刻々変化する系統状態に対応した最適な安定化制御が可能であることから、これは、予見型状況適応型安定化システムとすることができ、このような方式は今後、ますます広がっていくものと思われる。

5 瞬時値解析

これまでに述べた解析計算は主に実効値レベルでの解析であったが、高調波解析や交直変換器の解析などには交流波形を瞬時値ベースで解析することが必要になる。この領域の解析には、世界的に標準プログラムとして利

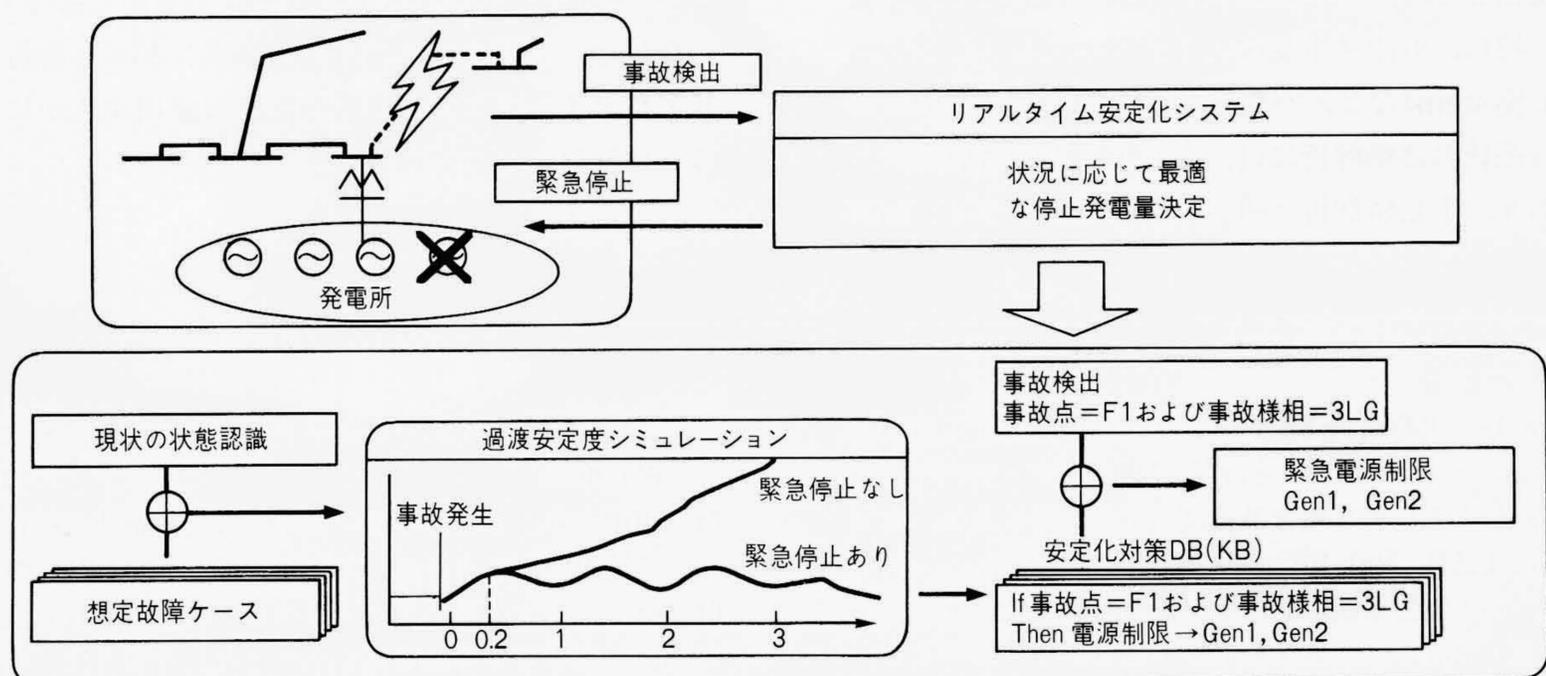


図6 状況適応型リアルタイム安定化システムの例

あらかじめ安定化対策を練っておくことにより、高速に最適な安定対策が実行できる。

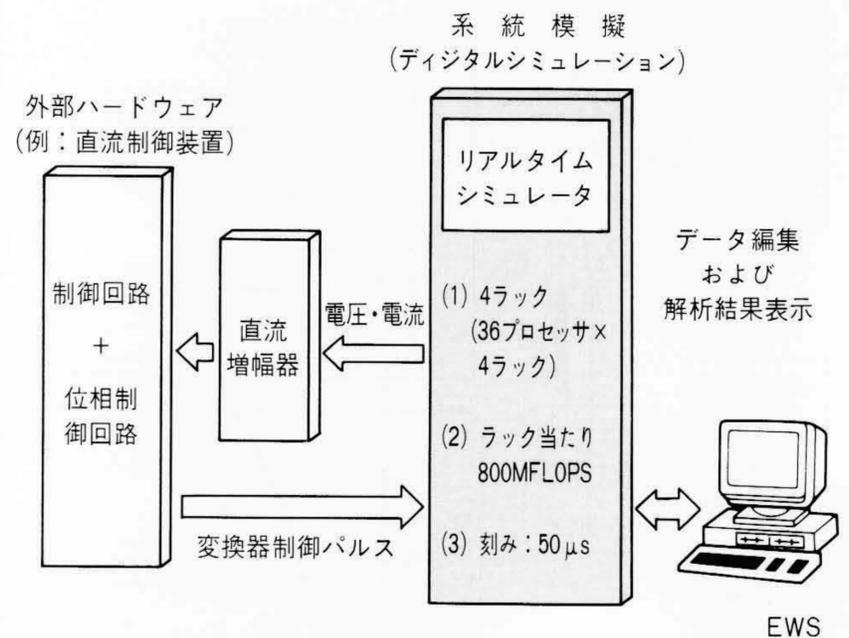
用されているEMTP(Electromagnetic Transients Program)が一般に用いられている。しかし、多大な計算時間がかかるため、主にオフラインでの利用に限定されていた。

近年、並列計算機を用いることにより、この瞬時値ベースの解析をリアルタイムで実行できる装置(RTDS: Real-Time Digital Simulator)が開発され、実用化されている⁵⁾。

この装置は、送電線の電圧、電流の伝搬時間を利用して電力系統を幾つかのサブシステムに分割し、並列計算を行うことによって大規模システムでも実時間で解析するというものである。実際の現象と同時刻で解析が進行することから、解析結果をD-A(Digital to Analog)変換することにより、実装置の現象をシンクロスコープで観測するのと同様に解析波形が観測できる。また、実装置と解析装置を組み合わせることで、試作装置などの機能検証を行うことができる。

直流送電制御装置とRTDSを組み合わせた装置検証システムの構成を図7に示す。ワークステーション上で対象とするシステムを組み、システムの電圧と電流を解析装置で解く。直流送電制御に必要なデータを解析装置から出力し、制御装置からは変換器制御パルスを解析装置に入力する。従来、装置の検証にはアナログシミュレータや試験設備を用いていたが、リアルタイムシミュレータを用いることによって試験・検証の時間が短縮できるようになった。

このように、瞬時値ベースの解析もリアルタイムで実行できるようになってきている。現状は、シミュレータとして制御装置の動作検証などに用いられているが、将来この技術をオンライン監視制御に取り込むことも考えられる。特に、直流送電やFACTS(Flexible AC Transmission System)など、パワーエレクトロニクス応用機器を含むシステムの詳細解析には、このような瞬時値解析が必要であり、実効値解析と組み合わせてオンライン制御



注: 略語説明

MFLOPS (Mega Floating Operations per Second)

EWS (Engineering Workstation)

図7 RTDSによる装置の動作検証

実際の制御装置の動作をRTDSによって検証できる。

に組み込むような使い方が考えられる。

6 おわりに

ここでは、リアルタイム情報制御を支える電力系統解析技術について述べた。計算機を用いた電力系統の解析手法は、40年前からさまざまな検討が行われており、その多くはすでに確立した技術となっている。しかし、計算機技術や通信技術が大幅に進歩したことにより、その活用形態も大きく変化してきている。上述したように、解析技術がオンライン監視制御に適用される例が増えてきており、その傾向がますます強まるものと考えられる。

今後は、解析技術そのものの向上に加え、解析技術をリアルタイム情報制御にどのように活用するかについてさらに検討を進めていく。

参考文献

- 1) 河合, 外: 実時間シミュレーションを可能とする電力系統解析シミュレータ, 日立評論, 74, 2, 195~200(平4-2)
- 2) 田村, 外: 悪条件な電力系統に対する状態推定法, 電気学会論文誌B, Vol.107, No.1, 17~24(1987)
- 3) 石田, 外: 電力系統オンライン監視制御用状態推定機能の開発, 平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.166(1993)
- 4) 井上, 外: 500 kV基幹系統安定化システム(TSCシステム)のモデル検証, 電気学会電力技術研究会, PE-93-65(1993)
- 5) 田中, 外: 日立製作所における最近の系統解析技術とその適用例, 日立評論, 76, 12, 879~884(平6-12)
- 6) モレラート, 外: スパースベクトル法と逆行列法の組合せによる電力系統過渡安定度の並列計算方法, 電気学会論文誌B, Vol.113, No.10, 1120~1126(1993)