

# 系統解析技術の現状と動向

伊原木 永二朗(いばらぎ えいじろう)

鈴木 智宏(すずき ともひろ)

中西 要祐(なかにし ようすけ)

## ① まえがき

われわれの社会生活の基盤となる各種エネルギーのなかで、電気エネルギーはその利便性から需要が増大し、いわゆる電化率は上昇の一途をたどっている。一方、電気エネルギーを供給する電力系統は巨大なシステムであり、電力供給者は、その効率的運用と安定供給を行うため、多大の努力を払ってきている。この巨大な電力系統の応動を正確に解析し、また将来直面する可能性のある種々の問題をあらかじめ回避するため、各種のシミュレーション技術を開発する必要がある。

現在、機器設計においては、サイリスタ変換器に代表されるパワーエレクトロニクス応用による電力機器の系統への導入により、そのデジタル制御も含めた瞬時現象の詳細な解析が重要となってきている。また、電力系統の系統制御システムの計画・運用の立場にたつと、供給支障の社会的影響の増大や系統自体の複雑化・大規模化とともに、さらに困難になりつつある系統事故の未然防止・波及防止を達成すべく、ますますシステムとしての信頼ある系統制御・運用が望まれる。以上の状況に対し、これらの技術を支える系統解析技術の高度化が強く望まれているところである。

普段、安定に設計・運用されている電力システムでも、システムに内在する悪条件が重なりあい、許容値を超える外乱が組み合わされて発生する異常現象、希頻度現象に遭遇する可能性がある。この不測の問題を防ぐため、その物理現象を定性的に、しかも、数値的に解析して、適切な対策を施した制御・保護システムの開発が強く望まれている。

富士電機においては、電力機器メーカーとしての立場に加え、電力系統制御用コンピュータの納入と、それらのエンジニアリングの立場から、電力系統の解析技術の確立をめざし、さまざまなシミュレーション手法・ソフトウェアの研究開発を推進してきた。

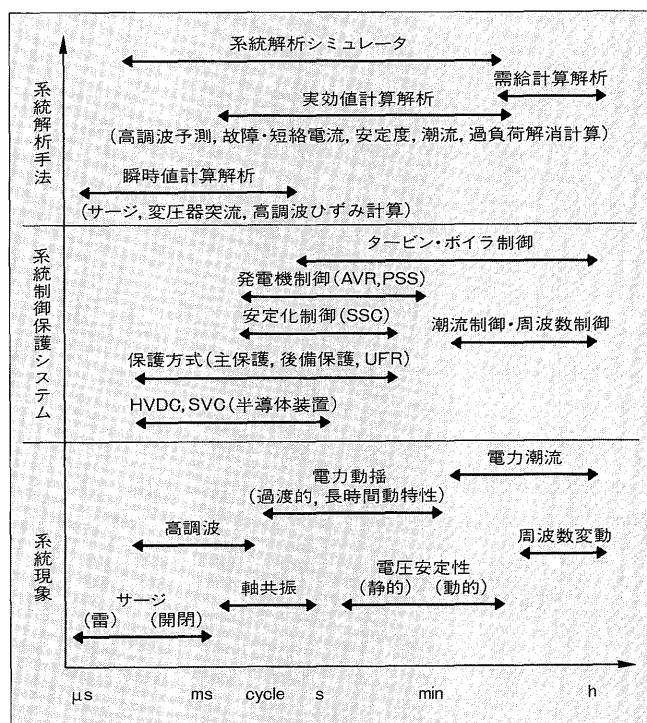
本稿では、現状の系統解析技術の取組みと将来の動向について述べる。

## ② 系統解析技術と富士電機の取組み

ここ数十年の間、コンピュータ能力の目覚ましい向上と相まって、系統解析業務として、数式モデルを前提としたコンピュータによる数値解析シミュレーションなどの解析プログラムが多く利用されてきた。これらは、図1に示すような各種系統現象に対し、瞬時値計算解析と実効値計算(1),(2)解析の両者に区分されたプログラムにより対応してきた。一方、系統現象の擬似的再現性を、数値解析のような演算アルゴリズムによらず、実系統と酷似させたさまざまな物理モデルを組み合わせての物理現象を発生させ、シミュレーションを行う系統解析シミュレータ(ハイブリッドシミュレータ)<sup>(3)</sup>が利用されている。

これらの解析手法は、解析の目的により使い分け、場合によっては両者の比較を行いながら解析を進める必要がある。

図1 系統解析手法と系統現象・系統制御保護システム



伊原木 永二朗



電力系統の制御・保護装置に関する研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所電力技術開発研究所制御保護装置開発グループ開発マネージャー。

鈴木 智宏



電力系統の制御システムおよび解析シミュレータの研究開発、系統現象解析に従事。現在、電力事業本部電力システム事業部系統制御技術部課長。

中西 要祐



電力系統のシミュレーション・制御・解析に関する研究・開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所電力技術開発研究所系統制御開発グループ主任技師。

る。ここでは、富士電機の両手法の取組みについて述べる。

## 2.1 ディジタルコンピュータによる解析技術

富士電機における基本的な系統解析プログラムは、1980年代中ごろにほぼ完成し、現在は高機能化・高速化などの改善が繰り返されている。また、パソコンユースを目的としてエンジニアリングワークステーション（EWS）への機種移行を進めている。近年の電力系統解析分野においては、以下のような研究課題が挙げられる。

### 2.1.1 電力潮流計算プログラム

発電所から出力される電力と需要家などにおける消費電力のエネルギーバランスを計算するもので、系統内の送配電線に流れる電力および各母線の電圧分布を求め、設備・運用計画、各系統解析の初期状態の設定などに用いられる基本的計算である。

本解析プログラムは、系統計画・運用の基本的解析であり、系統制御所の核プログラムとしても、重要な位置づけにあり、以下のような開発課題がある。

#### (1) 三相回路への拡張

従来の正相回路による潮流計算に対し、コンピュータ能力の向上を背景に、不平衡を考慮した詳細な潮流状態の把握が可能であり、逆相電流問題・配電潮流問題への適用が望まれる。

#### (2) 状態推定機能・最適潮流計算との結合

系統の監視・制御を前提に観測データに対する状態推定機能や、最適潮流制御への基本計算とする。

#### (3) 放射状系統への前進・後退手法の適用

放射状系統を前提とした状態量の選択や、それに適した繰返し計算手法の開発により高速化を図る。

#### (4) 並列処理による高速化

マイクロプロセッサ間の効率的な処理配分と通信処理により高速化を図る。

#### (5) 間接法による大規模化への対応

従来の直接法に対し、前処理行列を用いた間接解法（反復法）により大規模行列の解法を可能とする。

#### (6) マンマシンインタフェース

高度なグラフィックユーザーインターフェース（GUI）技術を用いて、インピーダンスマップ・潮流状態の可視化を図り、解析者・運用者にフレンドリーなヒューマンインターフェースを構築する。

### 2.1.2 安定度解析プログラム

電力系統になんらかの外乱（例えば、負荷投入、回線遮断、系統故障など）が加わった場合、制御動作も考慮した系統に接続されている複数の発電機・系統制御機器などの機器動特性の挙動をシミュレーションし、それらの安定性を解析する。また、最近ではそれらの長時間にわたる動特性や、近年問題となっている無効電力の需給アンバランスに起因する電圧安定度の解析まで、問題が拡張されつつある。

本解析は、系統運用における供給信頼性の確保のために不可欠であり、現在以下の開発課題がある。

#### (1) ディジタル制御系の安定度へ及ぼす影響

従来のアナログ制御からディジタル制御に変わったときの量子化、標本化による安定性への影響を評価する。

#### (2) パワーエレクトロニクス機器の動特性解析

パワーエレクトロニクス機器のスイッチング現象と系統現象への瞬時から長時間までの動特性を解析する。

#### (3) 安定性指標の可視化

系統運用における有効電力の安定余裕や、電圧無効電力制御装置の挙動を含めた安定性指標の可視化を行う。

#### (4) マンマシンインタフェース

オンライン安定度解析プログラムなどに要求される系統の監視・制御の高度化に対する入出力機能の高度化を図る。

### 2.1.3 その他

その他の基本的な系統解析プログラムとして、高機能化が進められているものを以下に記す。

#### (1) 短絡電流計算プログラム

遮断器の選定、リレー整定、電力機器の機械的・熱的強度の検討のために、①事故直後の短絡電流、②1.5~4サイクル後の短絡電流、③永久短絡電流の計算を行う。

#### (2) 一線地絡故障計算プログラム

高抵抗、非接地系統の場合の異常現象対策のために、対称座標法を用いた地絡電流、健全相電圧・電流の計算を行う。

#### (3) 高調波予測計算プログラム

アーク炉、サイリスタ機器などの系統への高調波の影響を検討するために、高調波発生源、系統構成などの条件から、系統機器に流れる高調波電流、各母線の高調波電圧を計算する。

#### (4) リレー保護協調曲線作図システム

被保護機器である電動機、ケーブル、変圧器に対する各保護機器の保護動作時間の協調を計算する。

一方、これらの自主開発のプログラムが各種改良、適用変更が可能であることに対し、近年社外の汎用系統解析プログラムが作成されており、一般性・共通性を目的として、富士電機にも導入されている。特に、米国ボンネビル電力庁が開発し、広く世界的に利用されているEMTP、マニトバHVDC研究所が開発し、GUIに優れたEMTDC、(財)電力中央研究所が開発し、電力会社共通のデータベースをもつY法などの利用を促進している。<sup>(4), (5), (6)</sup>

これらの汎用ソフトウェアの導入には、常に内製プログラムや他プログラムとの比較検討を行い、ユーザー会との連絡を密にとりながら、間違いない利用に努めている。さらに、マンマシンインタフェースプログラムを結合することにより使用環境を向上させ、入力ミスの防止や解析作業の向上を図っている。

### 2.2 系統解析シミュレータによる解析技術

富士電機は、系統解析の目的である未解明現象解析に対する定式化や、リアルタイム性、物理的実現性を必要とする開発機器の検証のために、系統解析シミュレータ（ハイブリッドシミュレータ）を開発してきた。このシミュレー

表1 系統解析シミュレータの納入例

納入先	目的	規模	系統の結線方法
早稲田大学	安定度などの系統現象の学習と研究	発電機3機	教育目的からすべて手動結線
同志社大学	系統・配電系サージ解析	発電機1機 サージ用線路	系統・線路モデルを検討するため手動結線
関西電力(株) 中部電力(株)	長時間動特性を含む大規模系統の潮流・安定度・故障解析	発電機30機	効率を考慮して自動結線
東京電力(株)	長時間動特性を含む大規模系統の潮流・安定度・故障解析	発電機11機 〔デジタル方式とのハイブリッド〕	容易性、柔軟性を考慮しガイド付き手動結線

タでは、さまざまな物理モデルを組み合わせ、低電圧・低電流ながらも実系統と酷似させた物理現象の発生によりシミュレーションを行うことが可能である。

このシミュレータは、系統解析に対する物理現象への洞察力の向上や機器開発、他のシミュレーション手法との比較検証のために、1980年（昭和55年）から社内研究向け設備として開発されたものである。その使用・用途を拡大し、現在まで6社7大学に系統解析シミュレータとして納入してきている。これらの系統解析シミュレータによる解析目的は、大学での教育・研究、企業における現象解明などさまざまであるが、特徴ある目的として、表1に示す納入例が挙げられる。特に、それらの目的にあった各種系統の結線手法にそれぞれの特徴を見いだすことができる。

今までに、これらのシミュレータにより、事故解明とその対策の確認、新規開発のデジタル解析プログラムの妥当性の検証、新形保護リレーの開発などに実績を上げている。また、従来の解析プログラムとの比較検証については、CIGREの提案する長時間動特性現象用試験系統における複数のシミュレーション手法による比較など、数多くの検証を行ってきており<sup>(8)~(10)</sup>いる。

### ③ 系統解析技術とキーテクノロジー

系統解析を支える技術として、図2に示す四つの主要な技術があげられる。これらの技術の発展に伴い、それぞれのシミュレーション手法の利点の拡充と、欠点の克服に寄与している。

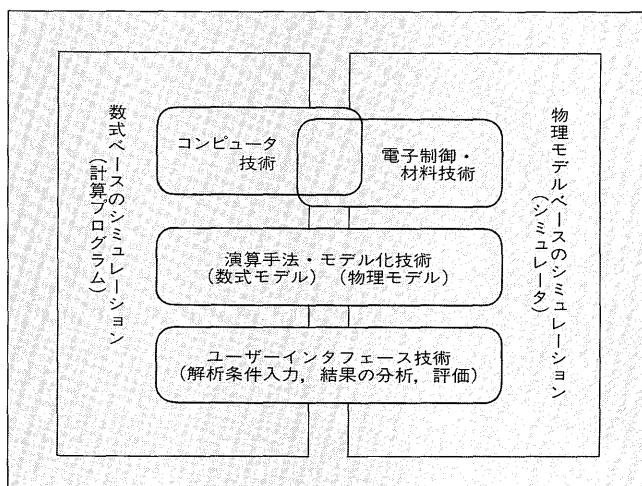
#### (1) 電子制御・材料技術

特に、シミュレータに大きく寄与している技術である。線路モデルに使用されている板厚0.05mmのケイ素鋼板などの非標準品の低コスト生産技術の進展および物理モデルに使用され、デジタルシグナルプロセッサ(DSP)に代表される制御・計測のための電子技術の進展は、ハードウェア面の小型化、アナログとデジタルの結合とリアルタイム処理などを支えている。

#### (2) コンピュータ技術

特に、汎用マイクロプロセッサの性能・機能向上は、より安価な、より速い系統解析を実現してきている。ここ10

図2 系統解析を支える技術



年のRISC形マイクロプロセッサの性能比較で見ると、従来の解析プログラムを変更しなくとも約50倍の処理速度の向上が得られ、大形コンピュータに頼らずに、個人の机上で即座に解析・分析処理を行う環境が整いつつある。<sup>(11), (12)</sup>

#### (3) 演算手法・モデル化技術

パワーエレクトロニクス機器の系統への導入により、瞬時現象から長時間動特性現象までの幅広い時間帯に関するシミュレーションが必要になってきている。シミュレータによる現象解析は、これらの要求を満たしているものの、大規模系統への適用に難がある。このため、解析プログラムにより、パワーエレクトロニクス機器のスイッチング刻みまでも適切にシミュレートできる数値解析の手法として、計算時間刻みの可変化と電圧零クロスに対する内挿手法などの数値解析の手法の確立が研究開発されつつある。

#### (4) ユーザーインターフェース技術

ユーザーインターフェース技術は、解析条件の入力とその結果に対する評価、分析に関する技術である。現在EWSにおけるGUIに大きく依存しているといつてよく、前述のコンピュータ技術とは別の意味で、シミュレータやコンピュータプログラムの両者に必要な支援機能といえる。すなわち、解析条件の入力やケーススタディの管理は、大規模かつ多面的な解析に必要な機能である。本来物理モデルによるシミュレータは、その物理的特性から、おのずと入力条件が限定され、非物理的設定が不可能である。しかし、各物理モデル内部については、pu (per unit) 化された数式モデルが使用されているため、計算プログラムによる解析と同様、ある種の解析設定条件を管理する必要がある。一方、解析結果の評価、分析は、解析の本質であり、解析技術の未熟な者に限らず、シミュレーション結果の妥当性評価と現象の分析には多大の労力を要しているため、これらを支援する機能が必要となる。

### ④ あとがき

富士電機の系統解析技術を、コンピュータプログラムによる解析技術と系統解析シミュレータによる解析技術の両

面から概括してきた。また、それらを支えるキーテクノロジーについて述べ、その基本技術が両手法に与える影響と今後について触れた。現段階で開発された解析プログラムやシミュレータについては、具体的には別稿に紹介した開発例を参考にしていただきたい。今後とも、解析技術については、解析プログラムと解析シミュレータの両系統解析手法の開発・整備を行い、電力系統技術への貢献を推進していく予定である。

#### 参考文献

- (1) 大塚敬ほか：電力系統解析技術，富士時報，Vol.53，No.12，p.913-919（1980）
- (2) 中島昌俊・高尾宣行：EMTPによる系統過渡現象解析，富士時報，Vol.66，No.4，p.245-248（1993）
- (3) Doi, H. et al. : Advanced Power System Analogue Simulator. IEEE Trans. on Power Systems, Vol.15, No.3 (1990)
- (4) BPA : EMTP User's Rule Book (1984)
- (5) Nayak, O. et al. : GUI Enhances Electro-magnetic Transients Simulation Tools. IEEE Computer Applications in Power (1995)
- (6) 電力中央研究所編：電力系統安定度解析システム解説書，電力中央研究所調査資料，No.T93910（1994）
- (7) Nakanishi, Y. et al. : Development of Power System Simulator for Research and Education. IEEE Trans. on Power Systems, Vol.15, No.2 (1990)
- (8) 中西要祐ほか：不平衡故障時の高調波過電圧，電力技術研究会，PE-85-106（1985）
- (9) 田村淳二ほか：同期機の電機子過渡現象を考慮した電力系統シミュレーション，電気学会論文誌B，Vol.116-B, No.2, p.225-234（1996）
- (10) 平山嘉之：回転機系分散型電源用系統連係保護方式の開発，電気学会電力・エネルギー部門大会（1995）
- (11) CIGRE Report TF38-02-03 : Long Term Dynamics Simulation (Phase II) (1996)
- (12) 日経エレクトロニクス：新世代マイクロプロセッサ，1989年特集号
- (13) 日経データプロ：ワークステーション用RISC系マイクロプロセッサの動向，No.8（1994）



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。