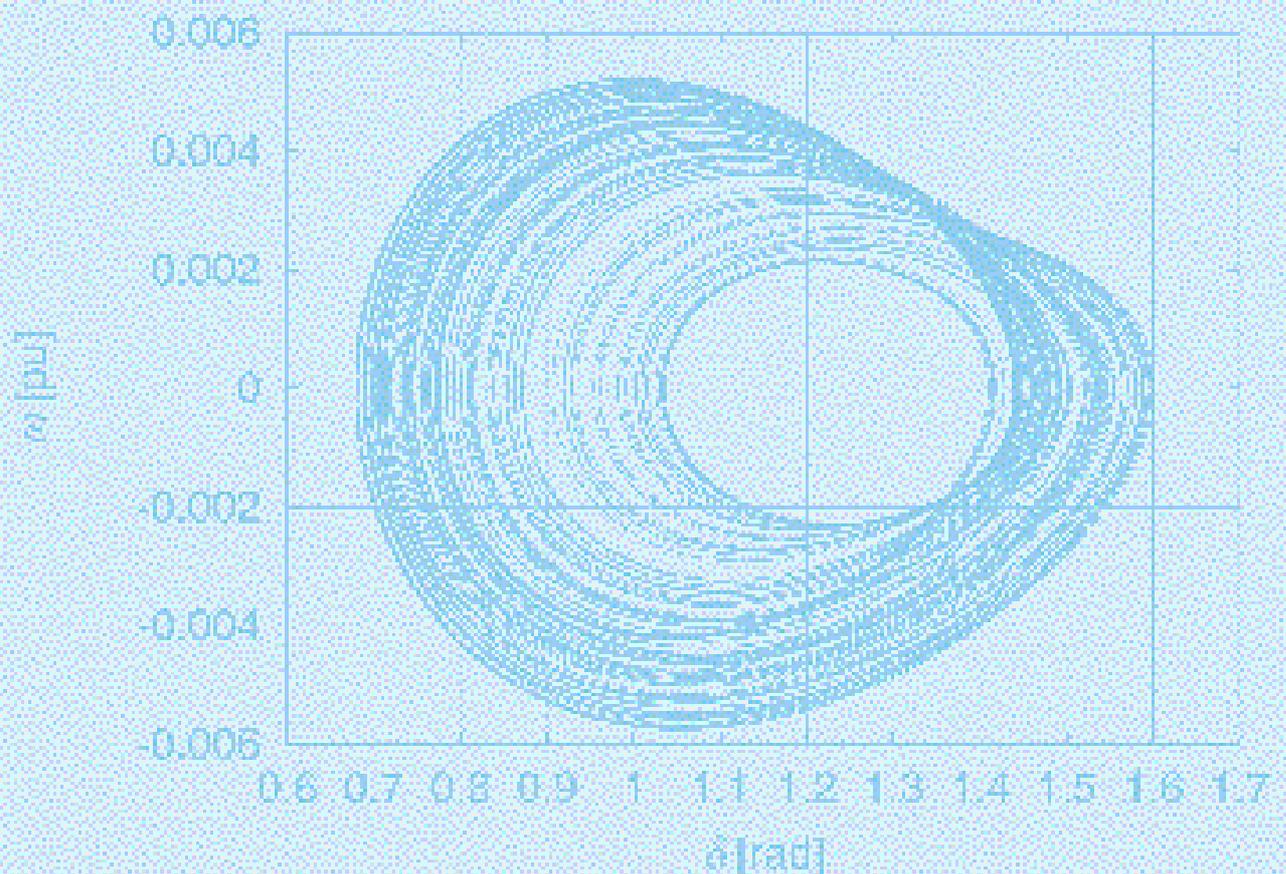
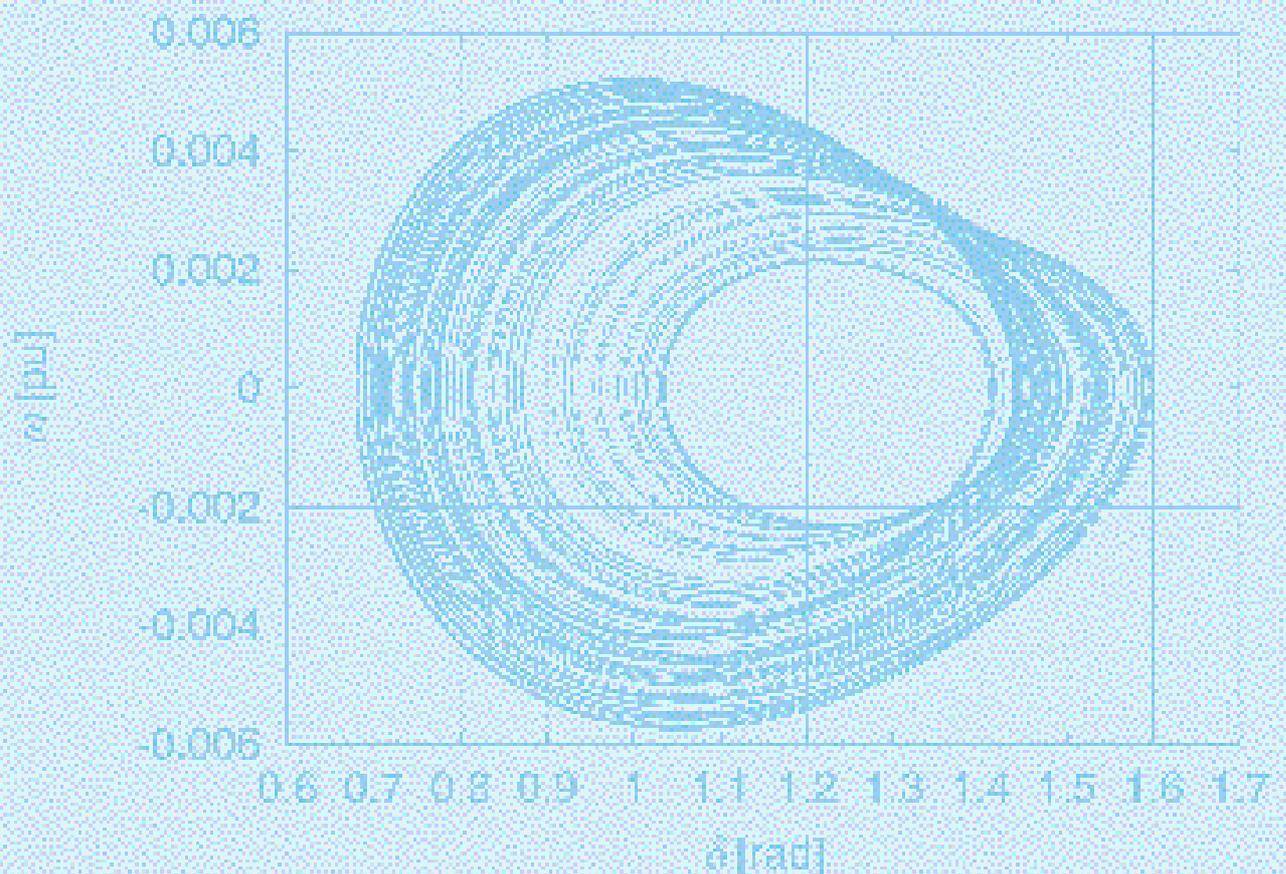


第 5 章

5

新時代の解析手法



| | | | |
|--------------|-------|----|----|
| 狛江研究所電力システム部 | 上席研究員 | 田中 | 和幸 |
| 狛江研究所電力システム部 | 上席研究員 | 井上 | 俊雄 |
| 狛江研究所研究参事 | 上席研究員 | 林 | 敏之 |
| 狛江研究所電力システム部 | 上席研究員 | 高崎 | 昌洋 |
| 狛江研究所電力システム部 | 上席研究員 | 内田 | 直之 |
| 狛江研究所電力システム部 | 主任研究員 | 永田 | 真幸 |
| 狛江研究所電力システム部 | 上席研究員 | 竹中 | 清 |

| | | |
|-------|-----------------|----|
| 5 - 1 | 電圧安定性解析手法 | 61 |
| 5 - 2 | 長時間動特性解析手法 | 64 |
| 5 - 3 | パワーエレクトロニクス解析 | 67 |
| 5 - 4 | 並列計算によるY法高速化 | 69 |
| 5 - 5 | 電力系統解析システムの高機能化 | 72 |

田中 和幸 (44ページに掲載)

井上 俊雄 (24ページに掲載)

林 敏之 (12ページに掲載)

高崎 昌洋 (24ページに掲載)



内田 直之 (昭和53年入所)
定態安定度解析手法や安定化技術に関する研究の他、近年では電力系統解析の並列計算手法に従事してきた。現在、モード法の応用による過度安定度解析の高速化、信頼度解析用の高速定態安定度解析に関する研究に取り組んでいる。



永田 真幸 (平成8年入所)
電力系統過渡安定度解析計算の並列化、短絡電流面等から見た限流器の導入効果評価など、送電網特性解析に関する研究に従事してきた。現在、系統余力評価の解析手法などに関する研究に取り組んでいる。



竹中 清 (昭和53年入所)
主に交直連系・分散電源・電圧安定性の解析・シミュレーション等の研究に従事してきた。現在は、安定度解析手法の高機能化やパワーエレクトロニクスモデリング等に関する研究に取り組んでいる。

第5章 新時代の解析手法

第3章ならびに4章において、電力輸送力の増強技術ならびに信頼度評価手法という近年関心の高い課題について述べた。

電力系統解析には、これらの解析技術や解析手法を支える基礎・基盤的な位置付けにあり、かつ将来的にその進展が期待されている種々の解析分野がある。そこで本章ではこれに属する解析手法として、電圧異常

現象に対する安定性解析手法、過渡安定度領域から周波数領域までの数分オーダーの系統動揺現象を効率的に解析する長時間解析手法の他、輸送力増強に大きい期待のあるパワーエレクトロニクス技術の解析技術、Y法(過渡安定度解析プログラム：表5-5-1参照)による安定度計算の並列処理による高速計算などを取り上げ、各々についての成果や進捗の状況を概説する。

5-1 電圧安定性解析手法

電圧不安定現象とは、長距離送電線により大電力を送電する際に、その受電端電圧が異常に低下する現象である。近年におけるコストダウンへの要請あるいは送電線増設の困難さといった要因から、本現象への対処は今後一層重要性を増すものと考えられる。

そのため、電圧安定性を効率的に解析する2種類の計算プログラムを開発した。

5-1-1 電圧不安定現象の基本特性

電力の品質を決めるのは、大別して周波数と電圧の2つである。周波数とは50Hzないしは60Hzといった状態量であり、これは全系の有効電力の需給バランスに依存する。この需給バランス、すなわち周波数の調整指令は各電力会社の中央給電指令所で一元的に行われている。

一方、電圧レベルは系統の各地点で一様ではなく、送電線で輸送する電力の量に応じて275kVや66kVといった規定の電圧階級が設けられている。これら系統各部の電圧は電力需要の増減等に伴って変動するが、常に規定レベル近傍に維持しておく必要がある。電圧は、調相設備や変圧器タップ等を用いて無効電力の流れを制御することによって調整することができる。これを電圧・無効電力制御という。

電圧不安定現象とは、通常は効果的なこうした電圧制御の効き目が不十分もしくは無くなって、電圧が異

常なレベルまで低下していく現象である。図5-1-1はわが国で1987年に発生した電圧異常低下現象の事例である。事故直後、500kV系の受電地域の電圧が370kV程度まで低下し、一時的に800万kW余の供給支障が生じたと報じられた。その後の詳細な検討から、無効電力消費の予想外の急増に起因する電圧不安定現象であったことが、今日ではほぼ定説となっている。

電圧不安定現象は、複数発電機の同期運転の可否を対象とする同期安定度とは異なり、次のような特徴があるとされている。

- ・送電線の送電能力に比べて大きな電力を受けている需要地域で多く問題となる
- ・現象の進展が分オーダーであり、同期安定度に比べればかなりゆっくりしている
- ・電圧低下は多くの場合30%程度で収まる

図5-1-2は、電圧不安定現象の発生が危惧される系統条件を大まかに例示したものである。図中の需要地点に設置される調相設備は、大電力送電により低下する需要地点の電圧を電圧運用許容範囲に維持するための無効電力補償装置である。図で右側に膨らんだ曲線はP-Vカーブと呼ばれるものであり、この形状は送電ネットワークの特性で決まる。P-Vカーブの先端は、電圧面から見た安定送電限界を意味している。

電圧不安定現象の発生が危惧されるのは、電圧の運用点がP-Vカーブの先端に近づく場合である。

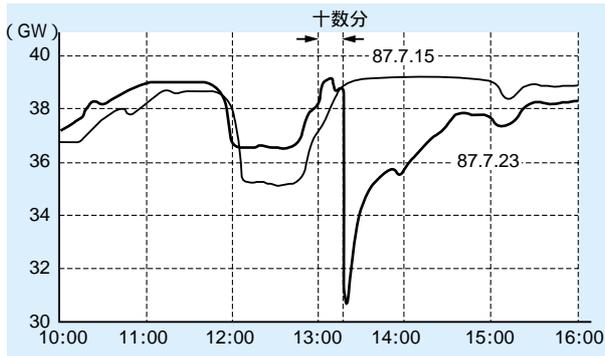


図5-1-1 電圧不安定現象の事例

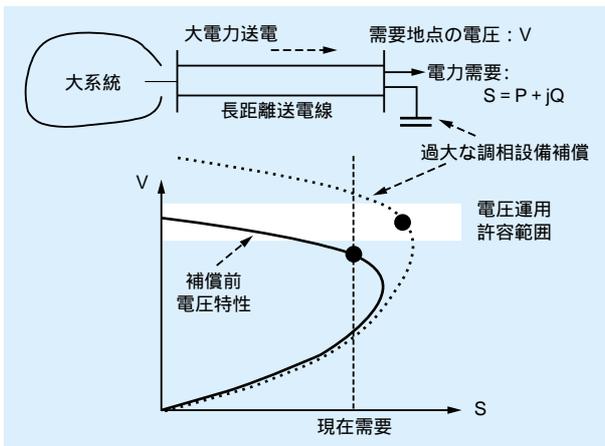


図5-1-2 電圧不安定性現象が発生し易い代表例

図5-1-2の過大な調相設備補償はその典型的な例であり、過大な調相補償は電圧の運用点をP-Vカーブの先端に近づけることを意味している。

現実的に図5-1-2のような条件が成立する可能性が高いのは、たとえば需要点近くの送電ルートで事故が発生し、送電線の一部が送電不可能となったり、近傍の発電機が停止した場合である。前者の場合で、送電線の事故開放により横軸方向に縮まるP-Vカーブが現在需要(縦軸と平行な直線)と一定の余裕をもって交点を持つようであれば問題ないが、交点を持たない場合は電圧不安定現象の有力な発生要因となる。

5-1-2 2種類の電圧安定性解析プログラム

電圧安定性は将来、同期安定度に加えて大きな問題になると予想される。そこで当研究所では、電圧安定性を効率的に解析する2種類の計算プログラムを開発している。開発したプログラムには、電圧安定性の検討に重要な下記3点に係わる解析機能を付加している。

- ）需要地点におけるP-V特性の把握
- ）需要地点における電圧安定性余裕の把握
- ）送電線事故や需要急増時の電圧安定性の確認

静的解析プログラム

上の)および)は静的解析の範疇であり、これは既開発の潮流計算プログラム(L法)の機能向上を図ることにより達成している。

)については、注目する需要地点におけるP-Vカーブを得ることを意味する。P-Vカーブの上側は、ごく一般的な潮流計算により得ることができ、カーブの先端に近づくほど得ることが困難になる。そこで潮流計算によりいったん現在値を得た後、需要特性を“定インピーダンス”に変更してこの値を徐々に減少させつつ潮流計算を繰り返すことによりP-Vカーブを効率的に計算する手法を開発した。IEEE(米国電気・電子学会)の118ノード標準モデルシステムに対するP-Vカーブの計算例を図5-1-3に示す。

)に関しては、電圧安定性余裕は基本的に需要地点ごとに異なる点が解析上のネックである。それらの余裕は、基本的には各需要地点ごとに上述したようなP-Vカーブを描くことによって計算できる。しかし一般に需要地点は数百以上と多いため、個々に計算する手順では多大な計算労力を伴い、極めて非効率である。そこで、全ての需要地点の安定度余裕を一括して推定する「電圧安定性指標」を開発した。本指標は、需要の現在値からその電圧安定度限界までの余裕をパーセンテージで表すものであり、各需要地点でのP-V特性を集約化して数値表現することにより、個々にP-Vカーブを描くことなく効率的に指標を計算することができる。

図5-1-4は前出IEEE118ノード標準モデルシステムに対する計算例である。同図でたとえば負荷ノード42に対する指標(電圧余裕の推定値)は30%強であるが、図5-1-3の厳密解33%と比較すると精度良く推定されていることが分かる。

シミュレーション解析プログラム

最後に上記の)に関する機能であるが、上述した諸計算にあたっては通常、需要の増加等に伴って電圧が低下する場合の対策、すなわち電圧・無効電力制御

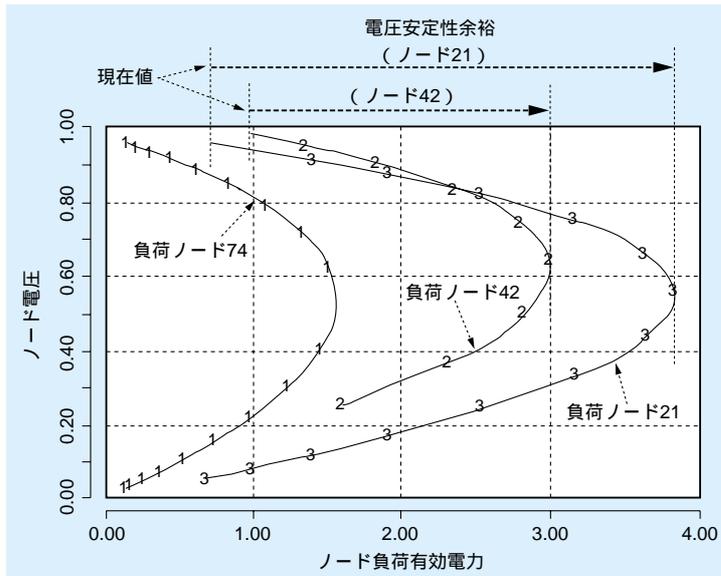


図5-1-3 P-Vカーブの求解例 (IEEE-118ノード系統)

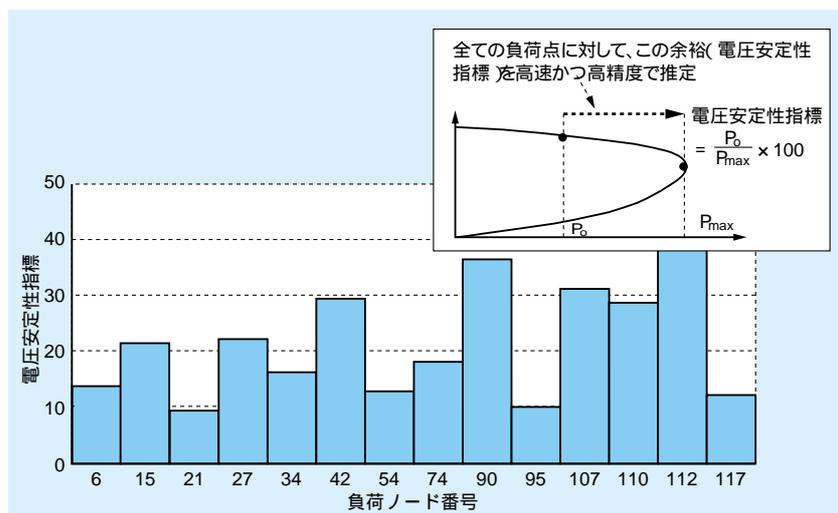


図5-1-4 電圧安定性指標の求解例 (IEEE-118ノード系統)

は考慮しない場合が多い。その主な理由は、種々考えられる制御によって結果が異なるため、需要地点ごとの相互比較等の客観的な評価が行いにくいことがその一因にある。

しかし電圧安定性が厳しい場合、変圧器タップや調相設備等による電圧・無効電力制御を考慮に入れた具体的な検討が必要になることがある。厳しい場合とは、たとえば昼休み後の需要急増時とか、あるいは送電線事故時などである。こうした計算を行う最も効率的な方法は、時間軸に沿ってできるだけ現実に近い条件で電圧の推移を計算するシミュレーション法と呼ぶ方法である。

そこで、調相設備や変圧器タップなど各種の電圧・無効電力制御モデルの応動を考慮できるシミュレーション法を開発した。計算例を図5-1-5に示す。図は需要が時間と共に増加する例である。同図には主要負荷点の電圧を示しているが、その時間推移がギザギザしているのは、変圧器タップなど電圧制御系の動作によるものである。時間が進んで、ある負荷点の電圧が異常に低下していく様子が分かる。この手法では、どの時点で電圧不安定領域(図5-1-2のP-Vカーブの下領域)に入ったかを明示するため、計算の各時間断面ごとに上述した電圧安定性指標を算出する機能を併設している。

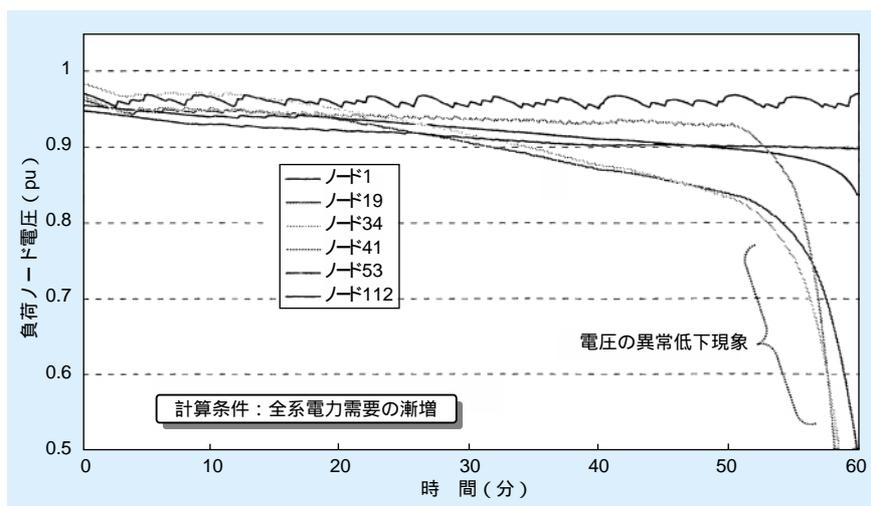


図5-1-5 電圧シミュレーション計算例 (IEEE-118ノード系統)

5 - 2 長時間動特性解析手法

電力システムには種々の事故が発生し得るが、中でも多重事故のような過酷な事故の場合、その影響がシステムの広範囲に拡大・波及する恐れがある。そこで事故波及防止制御などの緊急時制御をより適切に行えば、信頼度の維持向上のみならず、既設の発電変電設備を一層有効に活用することができ、これにより電力輸送力を向上することが可能である。

大規模な電力システムにおけるこのような緊急時制御方式の検討には、事故発生時のシステムの安定度、電圧、周波数等の他に、大容量発電プラントの応動や脱落など、相互に複雑に関連した分オーダーにわたる長時間のシステムの現象(動特性)を解析する必要がある。

しかしこうした現象解析には、秒オーダーの過渡安定度を主対象とする解析プログラム(たとえば当研究所Y法: 5.5節参照)は、解析に要する膨大な計算時間面からその適用が困難であり、この種の解析を高速に実行できる新しい解析ツールに対する必要性が近年大きくなっている。

そこで当研究所では、このような分オーダーにわたる長時間の現象を精度よく高速に解析するため、可変時間ステップの数値積分法を提案し、また解析モデル追加などの機能拡張性に優れた基本プログラムの開

発を進めている。

本節では、長時間解析を目的として開発した基本プログラムの概要について述べるとともに、解析機能の検証例として火力プラントモデルを含めた長時間の現象解析を行い、その解析精度や計算速度を当研究所Y法と比較した結果について記述する。

5-2-1 基本プログラムの概要

開発したプログラムでは、発電機など機器の動特性を表した微分方程式にトラペゾイダル法を適用して代数近似した方程式と、送電線の電圧・電流特性を表した系統方程式からなる連立非線形代数方程式を、可変時間ステップの数値積分法シミュレーションにより解く。

その解法にはニュートンラフソン法(NR法)を用いており、また積分器や加算器など種々の基本要素を用意し、これらの組合せによって解析モデルを表現することにより、NR法に必要なヤコビアン行列をプログラム内部で自動的に作成する構造としている。

積分時間ステップの自動調整は、各積分変数について各時点で推定した局所打ち切り誤差の大きさに基づ

いて行く。その最大値が予め設定した基準を超える場合は直ちに時間ステップを現行より短縮し、一方この基準よりも小さい状況がある程度連続した場合は時間ステップを拡大するというロジックを採用している。

5-2-2 モデル系統への適用

発電機の電氣的応動などの速い現象とプラントの機械的応動など緩やかな現象を含む一例として、系統単独運転移行時の長時間にわたる現象を火力プラントモデルを含めて解析し、その解析精度と計算時間を従来プログラムの代表例であるY法と比較した。

3機無限大モデル系統において、系統故障(3LO)により無限大(主系統)から分離されて電源過剰となるケースを想定した。各発電機ともに詳細なモデル(d-q軸各1個の制動回路をもつParkモデル)とし、また励磁系(AVR)については系統安定化装置(PSS)付きの超速応型とした。

発電機2機(G1、G2)については図5-2-1に示す火力プラントモデルを用いた。タービンガバナ部分はインターセプト弁を含む詳細なモデルとした。一方、プラント部分については簡易なモデルとしたが、タービン出力の引き戻し制御、周波数バイアス制御などの貫流火力の基本的な応動特性を表現した。

5-2-3 解析精度

解析結果を図5-2-2に示す。系統単独移行から10数

秒間程度の短時間領域における発電機の有効電力、無効電力、端子電圧の応動は同図上段に示すとおりであり、この間の同期化力振動やPSSの速い応動についてもY法(従来プログラム)の結果とほとんど一致している。

一方、同図下段には系統単独移行から16分間程度(1000秒間)の長時間領域における発電機の回転数偏差、火力プラントのタービン出力、主蒸気圧力などの主要変数の応動を示す(G1の例)。発電機回転数の上昇・下降に対するガバナ要求の変化により加減弁リフト、タービン出力、主蒸気圧力が緩やかに変化する解析領域においてもY法と良く合致している。

5-2-4 解析効率

解析時間と計算時間(CPU時間)の関係を図5-2-3に示す。Y法(従来プログラム)では解析時間に比例して計算時間が増加しているが、開発プログラムでは系統周波数やプラント応動などの緩やかな現象変化が主体となっている時間領域では時間ステップが拡大されているため(図5-2-2下段)、計算時間の増加が軽減されている。この結果、300秒の現象解析に要した計算時間がたとえばY法では約750秒であったのに対し、開発プログラムでは約14秒と極めて高速な解析が可能となっている。

以上、電力系統の長時間動特性解析のために開発した基本プログラムの機能概要、ならびにモデル系統に

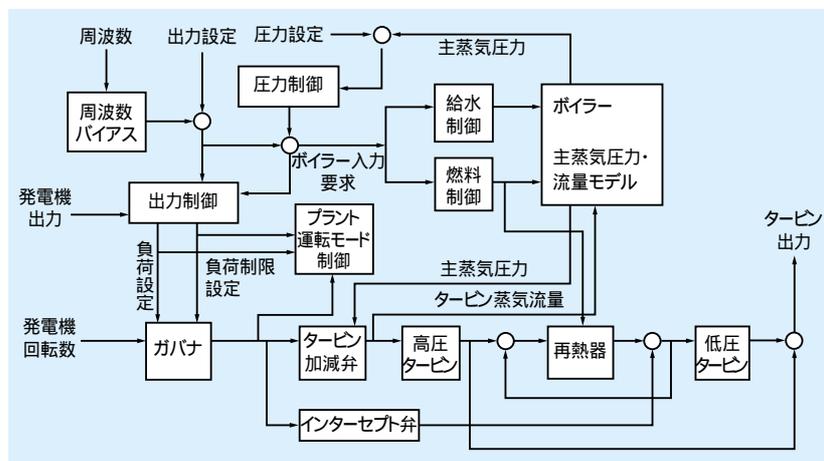


図5-2-1 火力貫流プラントモデルの概要

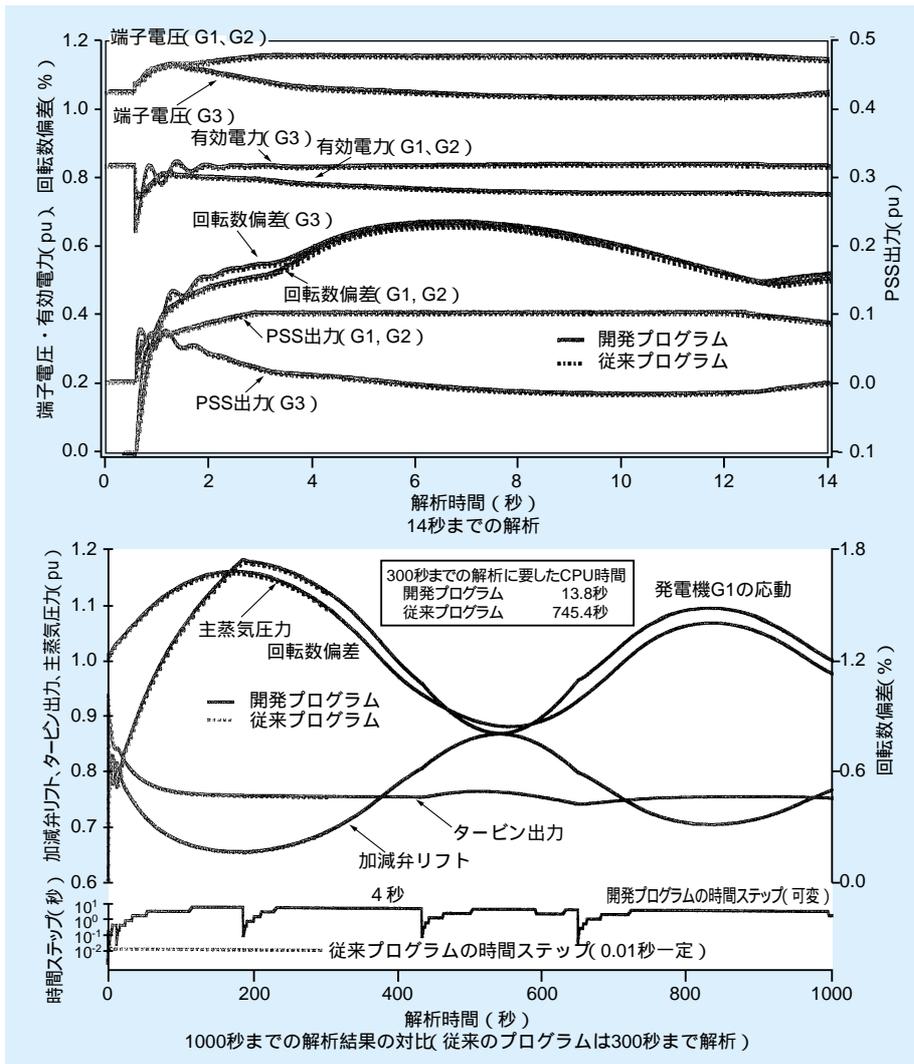


図5-2-2 シミュレーション結果の比較

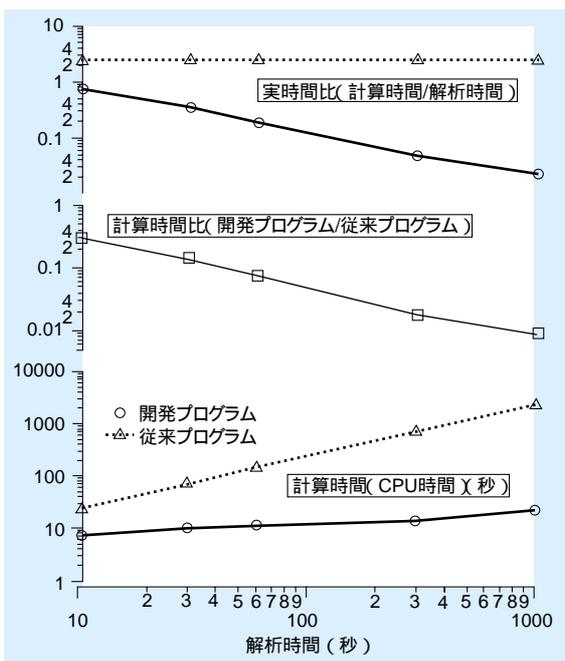


図5-2-3 解析時間と計算時間の比較

対する機能検証例について述べた。検証を通し、Y法と同等の解析精度を維持しつつ、プラント応動や周波数変動を主体とした現象変化の緩やかな領域を含む全領域で見て、高速に現象解析できることを明らかにした。

今後、大規模モデル系統への適用試算等を通して、Y法と並ぶ実用プログラムの開発を目標としている。

5-3 パワーエレクトロニクス解析手法

現在、FACTS(Flexible AC Transmission System)として開発が進められているパワーエレクトロニクス機器のほとんどが自励式変換器をベースとしたものであるが、静止型無効電力補償装置(SVC)やサイリスタ制御直列コンデンサ(TCSC)など他励式の機器もある。主なパワーエレクトロニクス機器の開発状況と解析手法を表5-3-1に示す。Y法については、他励式変換器を用いた直流送電やSVCの解析手法が電力各社で既に活用されており、またTCSCを含む解析手法は現在実用化されつつある。一方、自励式変換器を含む解析手法は、電力共同研究「連系強化技術開発」を進めるに当たって新たに開発したもので、今後電力各社で活用されることになる。

パワーエレクトロニクス機器を含む電力系統の解析は解析内容により異なるが、潮流計算、故障計算および動特性解析では交直変換器を電流源ないしは電圧源と考えればよく、一方瞬時値解析のためには変換器のスイッチングを模擬した詳細な回路方程式を解く必要がある。ここでは動特性解析のための新しい解析モデルについて述べる。

5-3-1 自励式変換器モデル

自励式変換器を用いた自励式SVCが実用化されており、直流連系あるいは直流送電他への活用が期待されている。

電圧形の自励式変換器1ブリッジ当たりの主回路構成を図5-3-1に示す。瞬時値解析における主回路モデルは、他励式の場合と同様、スナバ回路まで含めてブリッジ回路をアーム毎にモデル化しており、スイッチン

表5-3-1 主なパワーエレクトロニクス機器の開発状況と解析手法

| 分 | 類 | 開発状況 | 解析手法の開発状況 |
|-----|----------|------|----------------|
| 他励式 | 直流送電(連系) | 実用中 | Y法、EMTPモデル開発済み |
| | SVC | " | Y法モデル開発済み |
| | TCSC | 実用化 | " |
| 自励式 | 自励式直流送電 | 開発段階 | Y法、EMTPモデル開発済み |
| | 自励式SVC | 実用化 | Y法モデル開発済み |
| | UPFC | 実用化 | " |

注) UPFC(Unified Power Flow Controller); 並列、直列2組の自励式変換器により、電圧(無効電力)調整と位相(有効電力)調整を行う。

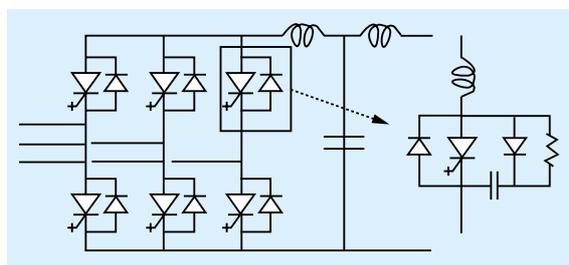


図5-3-1 自励式変換器の主回路モデル

グ素子は、通常は理想スイッチで取り扱われる。

制御系は階層構成を有し、上位の制御部ではAFCやパワーモジュレーション等の系統制御と変換所端子毎の有効および無効電力制御を行う。一方図5-3-2に示す下位の変換器制御部では、共通制御部からの有効・無効電力($P \cdot Q$)指令値を入力として、高速に交流出力電流を制御することにより、結果的に有効・無効電力を制御する。この変換器制御には、有効・無効電力が独立に制御可能なPQベクトル制御を用いている。モデリングにあたっては、サンプルホールドを考慮して図5-3-2の制御ブロックをそのままモデル化する。なお、共通制御部は通常msオーダーのサンプリングで動作するのに対し、変換器制御部は0.1ms程度の高速制御を採用している。

次に、Y法による実効値解析においては、共通制御部は瞬時値モデルと同じでよいが、変換器制御部と変換器本体は、瞬時値モデルとはかなり異なるモデルとなる。変換器本体は可制御電流源として模擬される。これは変換器の出力する基本波成分に着目した交流電圧を電流源変換したものであり、これにより有効・無効電流指令値に対応した交流電流を系統に注入する。

5-3-2 TCSC(SVC)モデル

サイリスタ制御直列コンデンサ(TCSC)は、図5-3-3に示すように逆並列サイリスタとリアクトルを直列コンデンサと並列に接続して、直列コンデンサの補償度を自由に変えることができる機能を持つ。

この回路における逆並列サイリスタとリアクトルは、静止型無効電力補償装置(SVC)と同じで、両端の交流

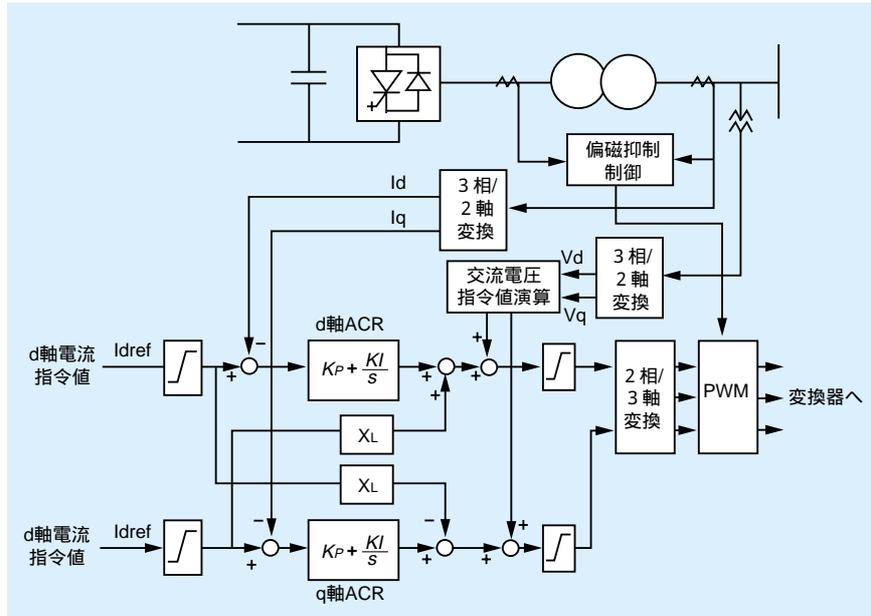


図5-3-2 自動変換器の制御系モデル

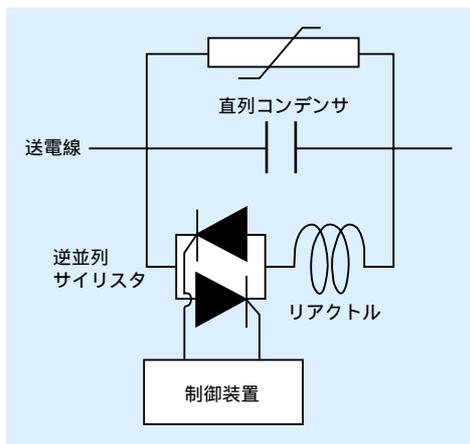


図5-3-3 TCSCの回路構成

電圧と制御角に応じた電流が流れることになる。瞬時値モデルにおいては変換器などと同様、スイッチング回路として直接モデル化されるのに対し、実効値モデルにおいては、基本波成分に着目した電圧と電流の関係式により表現される。

5-3-3 交直連系システムの技術検討項目と解析方法

交直連系システムのシステム設計や運用における技術検討項目を、対象現象の周波数領域に基づいて分類し、それらの解析手法を示したものが表5-3-2である。

表5-3-2 交直連系システムの計画・運用時の技術検討項目と解析方法

| 解析対象現象の周波数領域 | 技術検討項目 | モデリング/解析方法 |
|--------------------------|--|---|
| 定常時領域 | 常時運転性能 ・潮流バランス ・無効電力バランス ・電圧変動 ・発生高調波量 ・高調波分布 短絡容量/短絡電流 | モデル：潮流計算（定常時）モデル 解析方法： 潮流計算プログラム 短絡容量計算プログラム 高調波解析プログラム |
| 安定度領域（～数Hz） | 過渡時安定運転性能 ・直流系統の事故回復 ・交流系の同期安定度（パワーモジュレーションの効果） ・周波数安定度（AFCの効果） 電圧安定性 ・無効電力制御方法 | モデル：実効値モデル（シミュレータでは瞬時値） 解析方法： 安定度解析プログラム ・時間シミュレーション ・固有値解析 シミュレータ ・デジタル/アナログハイブリッド |
| 過電圧・過電流領域あるいは瞬時値領域（数Hz～） | 過電圧（絶縁協調） ・交流過渡過電圧 ・交流持続性過電圧 ・雷サージ ・閉閉サージ異常現象 ・軸ねじれ振動 ・転流失敗 ・高調波不安定 | モデル：3相瞬時値モデル（固有値解析では拡張実効値モデル） 解析方法： 時間シミュレーションプログラム 固有値解析プログラム シミュレータ ・デジタル/アナログハイブリッド |

解析手法をモデリングと解法に分けて考えると、解法については時間シミュレーション、固有値解析を問わず、通常の交流系統解析と共通であり、ここではモデリングに関して簡単に現状での技術レベルを紹介する。

まず、定常時から安定度領域に関するモデリング技術については、実系統試験との対比等に基づき、ほぼ

確立しているものと考えられる。実システムを対象としたシミュレーションを行う際の課題も、制御系をどこまで詳細に模擬しているか、あるいは負荷特性、損失等をどの程度実際に近く模擬できるかといった、解析に使用するデータの精度の問題が中心となる。一方、過電圧・過電流領域については、変圧器や線路の周波数

特性の他、自励式変換器等の機器についても、解析対象に応じたパラメータの同定に課題を残している。このため、特にこの領域のモデリングについては、実システムや大規模アナログシミュレータによる試験結果との対比に基づき、より一層の精度向上を図っていく必要がある。

5 - 4 並列計算による Y 法高速化

近年における電力の規制緩和の動向を鑑みると、近い将来、電力システムの制御や運用計画において系統解析計算の高速化が、とりわけ過渡安定度解析プログラム(Y法)の高速化が一層重要になると考えられる。また現状の系統運用・系統制御においても、高度なオンライン監視・制御機能の実現に向けたY法高速化へのニーズは大きい。

そこで当研究所では、Y法過渡安定度計算の高速化のための並列計算手法を開発した。

2つに大別できる。Y法を始めとする一般的な安定度解析プログラムでは、前者を数値積分計算ロジックにより、後者を代数計算(連立一次方程式: Y行列の求解計算)ロジックを用いて処理している。

このY法のような逐次処理を行うプログラムに並列処理を適用して高速化を図る場合、現行計算ロジックが本来的に持つ並列性を最大限に引き出すことが、高速化実現のための重要な鍵となる。この点から見ると、上記2つの計算ロジックは以下の点で大きく異なる。

- 1) 前者の数値積分計算での微分方程式は発電機ごとに独立した計算となっており、個々の発電機ごとに並列に処理することが容易にできる
- 2) 後者の連立一次方程式は系統全体で一つの方程式となっており、従来の計算ロジックのままでは並列処理を行うことができない

5-4-1 過渡安定度計算の特徴

図5-4-1に示すように、電力システムの過渡安定度計算は発電機などのダイナミクスを持つ要素を扱う計算部分と、ダイナミクスを持たない送電網を扱う計算部分の

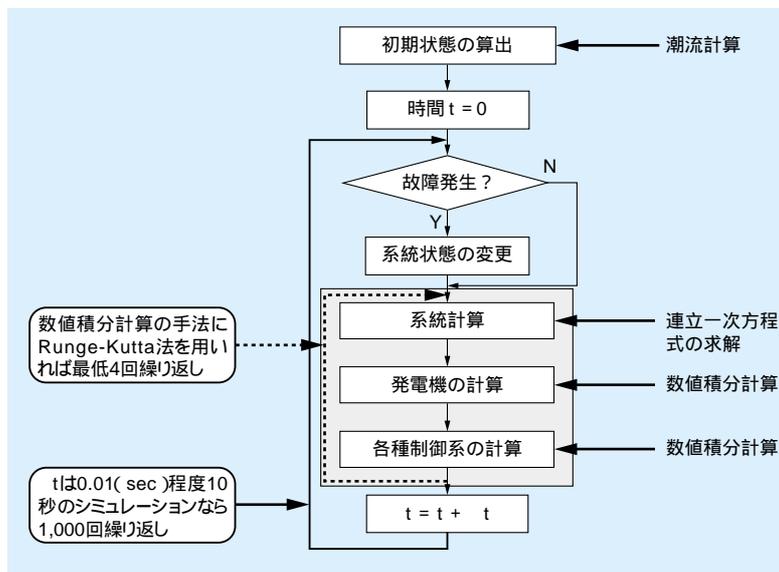


図5-4-1 過渡安定度計算の流れ

そのため、過渡安定度計算へ並列計算を適用する上で、系統計算の並列化手法の開発が主たるテーマとなっている。

いま、わが国における典型的な大規模モデル系統(1270ノード、1417ブランチ、275発電機)に対して20秒間のシミュレーション(積分計算での時間刻み幅は0.01秒)を行った場合の、Y法における上記各処理の実行回数と、実行に必要な時間の割合を表5-4-1に示す。Y法の場合、代数計算(ノード数の次元から成るY行列連立一次方程式の求解)に直接法と呼ばれる手法を用いている。この直接法は、Y行列のようにその行列要素中に占める非零要素数が5%程度以下と極めて小さい疎行列を係数行列とする連立一次方程式を逐次処理により解く手段として大変有効である。このため、過渡安定度計算に限らず潮流計算などほとんどの系統解析プログラムで多用されている。

5-4-2 直接法系統計算への並列処理の適用

上記直接法の処理を細かく見ると、さらに順序付け計算、三角化行列への分解計算、前進/後退代入計算の3つの計算に細分化される。これらの処理の内容については関連文献に譲るが、ここでは過渡安定度計算におけるこれら3つの処理の実行回数と計算処理時間に着目してみる。

表5-4-1から分かるように、Y法の実行時においては3つの処理のうち、前進/後退代入の実行回数および処理時間の占める割合が圧倒的に大きい。したがって前進/後退代入の部分を並列処理によって高速化することができれば、代数計算部分全体が高速化できることになり、さらにはY法全体の処理時間が短縮できることになる。

直接法に対して並列計算を適用する場合には、以下の点に留意する必要がある。

- ・上記分解計算の過程で新たに発生する非零要素数(fill-in)の増加をなるべく少なく抑えること
- ・計算処理のうち、並列に実行可能な部分をなるべく多く抽出すること
- ・計算処理を複数のCPUに割り当てる際に、処理量のバランスがなるべくとれるようにすること
- ・並列処理を行う上で必要となるCPU間のデータ転送(通信)回数をなるべく少なくすること

このうち、fill-inの発生抑制に関して、開発手法では並列計算向けのノードの順序付け手法を開発することで、その発生を逐次処理の場合と同レベルに抑えることが可能となっている。

並列に実行可能な計算処理の抽出には、計算処理の流れを表したツリー図を用いることで、これを可能としている。図5-4-2のように、送電網の構成(結合状態)が与えられた場合に、その計算処理をツリー上の構造に一意に変換する手法を開発した。このツリーにおいて、計算処理は横向きの矢印として表され、根からみて同じ高さにある計算処理は全て互いに並列に実行可能である。したがって、このツリー図から並列処理可能な計算処理を自動的に抽出することが可能である。開発手法ではこのような特徴を持つツリー図を用いることで、効率のよい並列処理を可能としている。

一般に計算処理の割り当てのバランスと通信回数の減少は相反するものであり、両者の間で何らかのバランスを取る必要がある。開発手法では、図5-4-2に示すように、計算処理の流れを表すツリーを用いて、計算処理のCPUへの割り当てを行っている。その際に、CPUに割り当てられるノード数の最大値と通信回数を用いた評価関数を最小化することで、計算処理量のバ

表5-4-1 Y法実行時の処理時間の内訳の例

| 処理内容 | | 実行回数 | 全計算時間に対する割合 [%] |
|--------------|---------------------------|-------|-----------------|
| 全体 | | - | 100.0 |
| 系統計算 | 計算処理の順序付け (ノードの順序付け) | 1 | 0.08 |
| | 行列の前処理(三角分解) | 3 | 0.01 |
| | 発電機の処理(注入電流計算) | 23354 | 15.2 |
| | 連立一次方程式の解の計算 (前進/後退代入) | 12455 | 23.9 |
| その他(積分計算を含む) | | - | 60.9 |

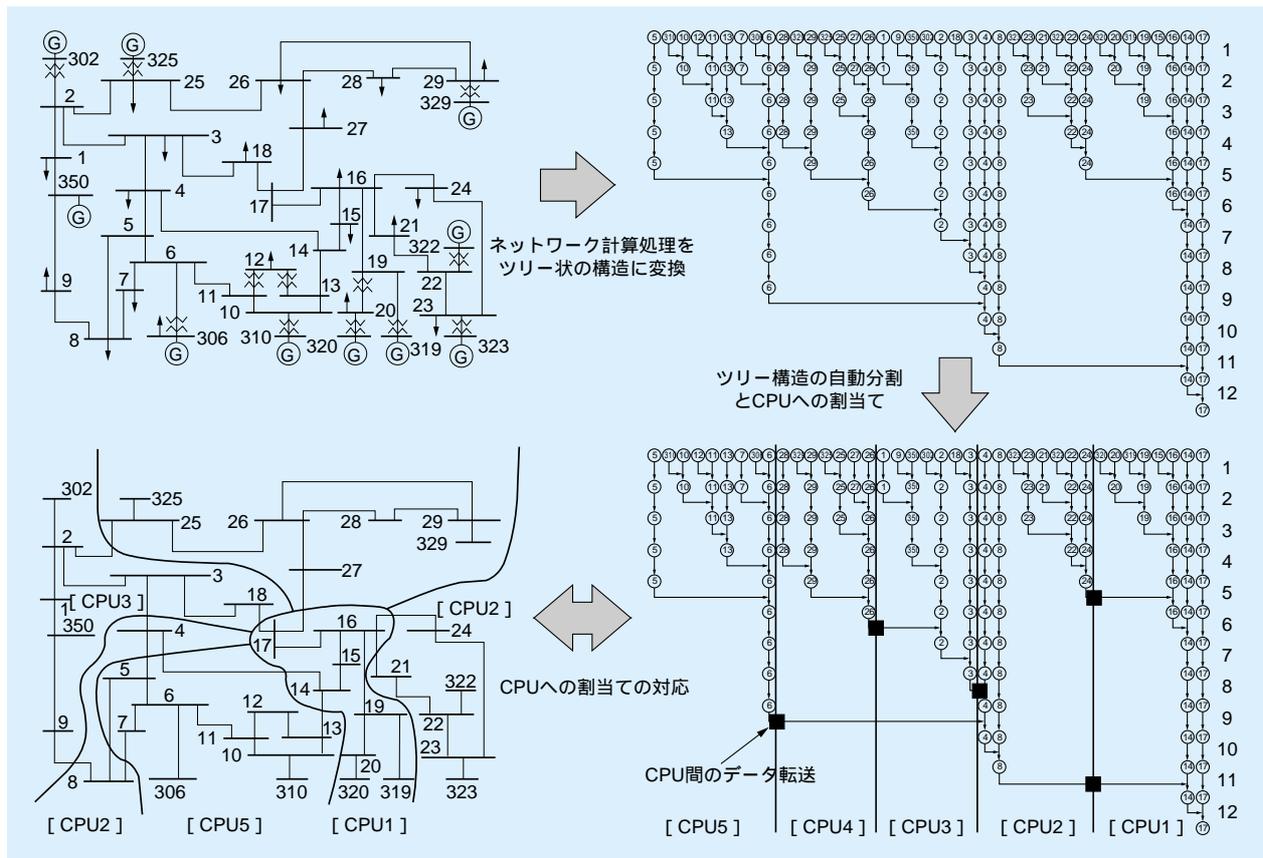


図5-4-2 ツリー/ネットワークの分割/割り当ての例

ランスと通信回数の減少を両立することを可能としている。開発手法で得られる割り当ての結果は、図4-5-2からわかるように、ネットワーク上では近接した結びつきの強い部分が同じCPUに割り当てられるようになっており、開発手法が適切な割り当ての結果を得られる方法であることが示されている。

5-4-3 系統計算以外の部分への並列処理の適用

系統計算以外の、発電機や制御系などの部分は、構成要素ごとに独立して処理できる場合が多い、すなわち通信処理をする必要がない。そのため系統計算に比べ容易に並列化することができる。ただし、計算処理量のバランスが取れるように、処理の割り当てについては留意する必要がある。開発手法では、発電機部分の処理の際に、各CPUでどの発電機を分担するかは、系統計算のためのノードのグルーピング結果に従うものとしている。電源(発電機)がネットワーク上で極端

に特定の地域に集中するような場合でない限り、このような割り当て方法で系統計算以外の部分での計算処理量のバランスが大きく損なわれることはない。

5-4-4 実規模系統への適用例

当所では、以上に述べた並列計算手法を当所開発の過渡安定度シミュレーション計算プログラム(Y法)の基本部分に適用して並列化した「並列版Y法 Version-0」を開発した。今回、並列化を実施したY法の基本部分とは、時間刻みで計算を繰り返すシミュレーション部分のうち、送電網と発電機本体部分であり、前処理部分ならびに計算機ハードウェアの制約により現状では並列化が難しい入出力部分は除いている。

この並列版Y法を、冒頭述べた実規模の大規模モデル系統に適用した結果を図5-4-3に示す。この図で「シミュレーション部分のみ」となっているのは、上記の並列化されていない部分を除いて比較した場合である。6 CPUを使用した場合には、並列版Y法は従来のY法

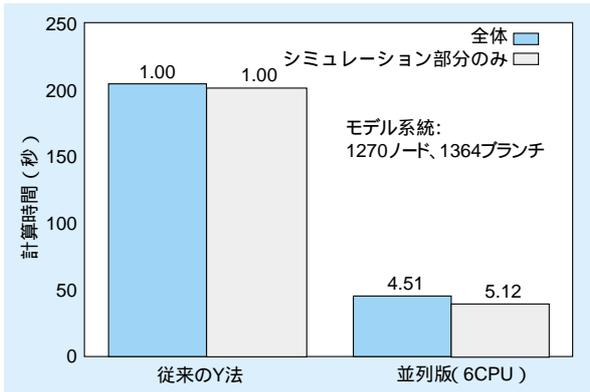


図5-4-3 大規模系統への適用結果

に比べて、全体で約4.5倍、シミュレーション部分のみでは、約5倍の速度向上が得られており、過渡安定度シミュレーション計算の高速化に十分な効果が得られていることがわかる。

本節の冒頭に述べたように、今後、電力系統解析計算への高速化へのニーズはさらに高まるものと考えられる。計算機技術の進展により、計算機自体の高速化はもちろん、並列計算が可能な環境も容易に構築することが可能となっており、並列計算技術の系統解析計算への応用が大きなメリットをもたらす。

5 - 5 電力系統解析システムの高機能化

5-5-1 Y法とS法

上述の各章・各節における安定度関連の解析技術や解析手法では、Y法あるいはS法といった略称で呼ばれる安定度解析プログラムが基本となっている。

Y法やS法の意味や解析機能の概要等は表5-5-1のようである。これらのプログラムは今日、わが国各電力会社における日々の電力系統運用や設備拡充計画等の検討業務において極めて重要な役割を担っている。

Y法やS法プログラムは1970年代、わが国全電力会社の協力を得て当研究所が開発したものであり、以降

表5-5-1 Y法とS法の機能概要

| 略 称 | Y 法 | S 法 |
|-------|---|--|
| 正式名称 | 電力系統動的過渡安定度解析プログラム | 電力系統動的定態安定度解析プログラム |
| 概略の機能 | 送電線への落雷など電力系統が比較的大きなショックを受けたときの複数発電機の同期安定運転の可否を計算 | 負荷の変動や種々の機器動作など小さなショックを受けたときの複数発電機の同期安定運転の可否を計算 |
| 計算の特徴 | <p>電力系統の動的特性をショック後の10～20秒間に回り時間を追ってシミュレーションする。計算結果は多くの場合、時間軸上での各種状態の動揺波形として出力される。系統解析の中では最も多くの計算労力を要する。</p> <p>【計算出力例】</p> <p>**** JIEE WEST 10-MACHINE MODEL(PEAK) BRANCH=20 ****</p> <p>内部相差角 (度)</p> <p>AG</p> <p>時間 (秒)</p> | <p>電力系統の動的特性を線形表示し、その特性式に対する数学的安定判別(固有値計算)を行う。計算結果は2次元平面の固有値分布として出力される。Y法より1桁程度計算効率に優れ、最適化などの定量的検討に適する。</p> <p>【計算出力例】</p> <p>#1 減衰率 (1/SEC): 1.434921e-02 周波数(Hz)</p> <p>IMAC < 10** -1 ></p> <p>REAL < 10** -1 ></p> |

今日まで、電力系統規模の拡大あるいは新しい技術・設備の導入といった電力系統の成長に伴う電力各社からのニーズに対応して、年ごとに解析機能の向上を図ってきた。

実務面から見た安定度解析の重要な点は、解析プログラムに用いられている演算論理の信頼性に加え、現象に係わる系統構成要素をどのように適正にモデル化するかという点にある。たとえば各発電機には種々の高度な制御装置が備えられており、これらの特性的確なモデル化が不可欠である。モデル化やその定数として何をを用いるべきか、といった点には高度な工学的判断が要求される。このため、実態に即した多種多様

なモデルや参考とすべき標準定数を内蔵しておくことが重要な要件となっている。また、モデルの規模を微分方程式の次数で見れば、一発電機あたり平均で20～30次元程度、原子力プラントの場合に炉の挙動まで含めるとすれば100次元程度に及ぶ。さらに最近では、揚水機の可変速運転やSVC(静止型無効電力補償装置)など、従来なかった高度な制御機能の付加が進んでおり、こうした新しい技術のモデル化も不可欠である。

今日、Y法で解析できる機能は概略図5-5-1のようであり、開発当初に比べれば極めて広範な解析機能を有するまでに至っている。

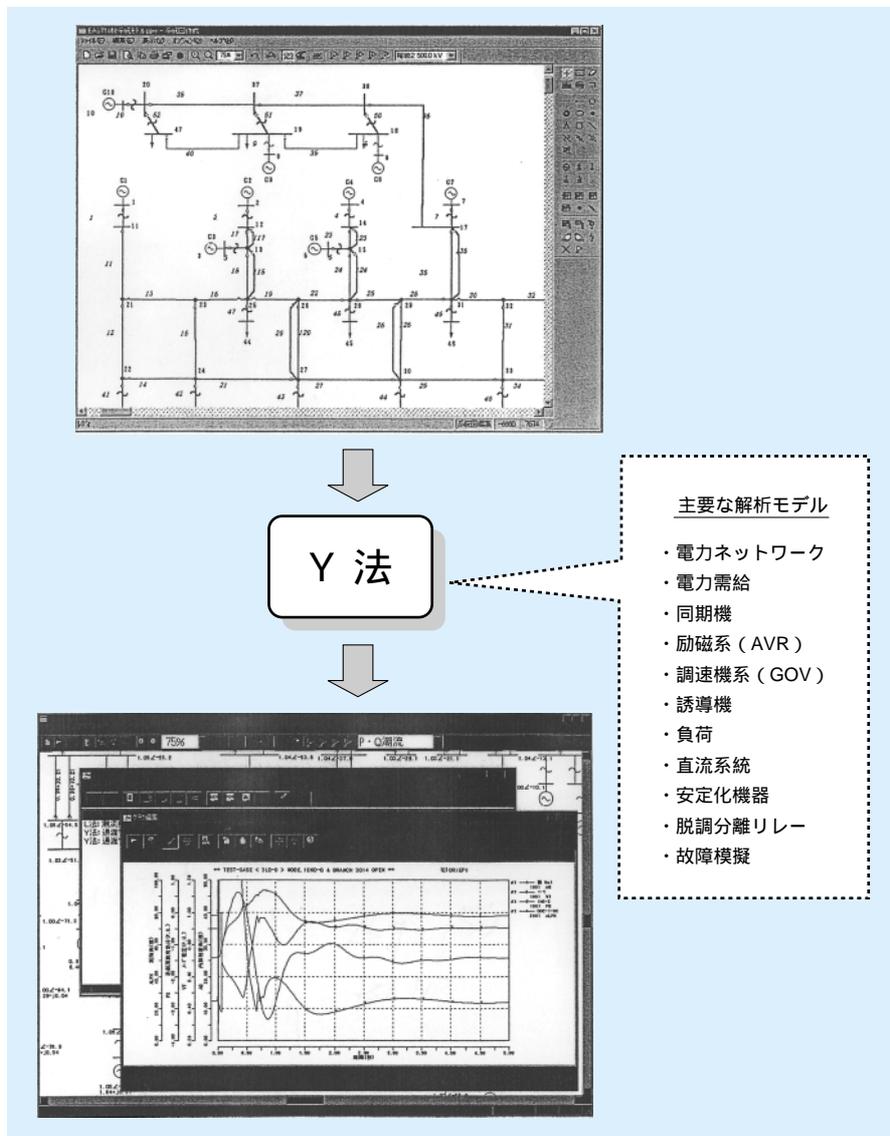


図5-5-1 Y法の解析機能の概要

5-5-2 高機能な電力系統解析システム

近年、Y法やS法に用いられているモデル系統規模は50Hz連系系統で2000母線余、60Hz連系系統の場合に1200母線余と、いずれも極めて大規模となっている。これを構成する入力データ種別は、各負荷点の負荷特性から原子力や大型火力発電のプラント特性まで多種多様であり、またこれら全体のデータ数はざっと10万にも達している。

そのため、Y法やS法の計算にあたってはこうした膨大な入力データ値の収集・維持・管理が、プログラム解析機能に劣らず重要である。また解析精度面からは自社系統のみならず、応分の精度を持った連系他社系統データも必要である。連系系統の解析データを体系的に整備しておくことは、各社における関連検討業務の効率化、また連系各社間の協力体制の基本条件となっている。

一方で今日、Y法やS法等の系統解析計算のための諸データを実務担当者の手で白紙の状態から短期間で作成することはほとんど不可能となっている。

そこで当研究所では、Y法データをマスターデータとし、この一元化されたデータの下でY法やS法の他、以下の関連系統解析を一貫して効率的に取り扱う電力系統解析システムを開発した。

- ・短絡電流計算：主に送電線の地絡故障時における遮断器電流値のチェックのために用いられる
- ・故障計算：種々の系統保護リレーの整定や動作チェックのために用いられる
- ・高調波分布計算：電力系統内の高調波電流や電圧分布計算のために用いられる

従来、これらの計算は各々個別のデータ入力様式に拠っていたため、データ作成や解析作業に多大な労力を要していた。しかし図5-5-2に例示するように、Y法データは各種系統解析に必要なデータをほぼ包含している。加えて現状、Y法データ構造は電力各社の実務者を主体に広く知られているため、Y法データ様式を基準とすることは利便性が高い。

こうした諸点に着目し、概略図5-5-3に示す電力系統解析システムを開発した。図中の系統縮約プログラムは、系統解析計算の効率向上のために原データの特性

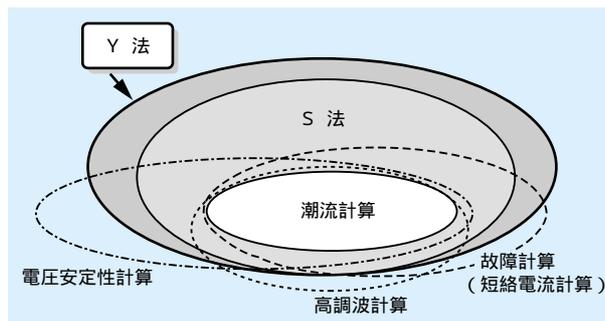


図5-5-2 各種解析プログラムのデータ範囲

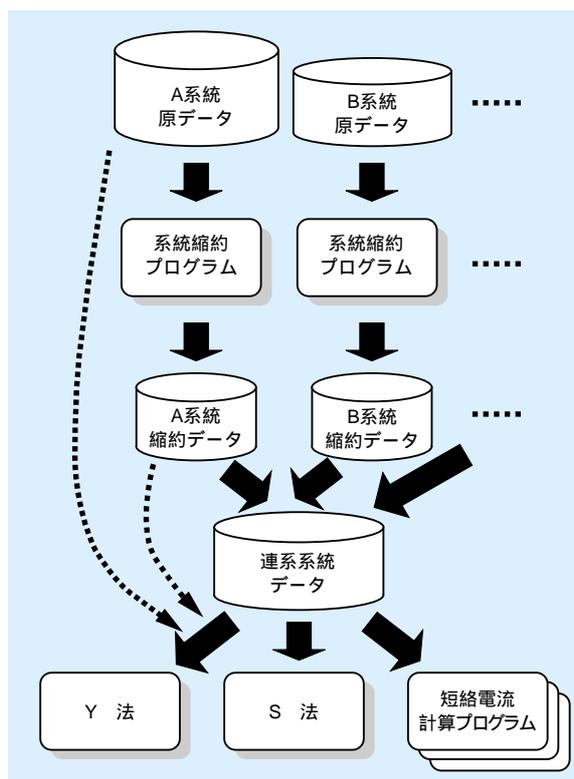


図5-5-3 電力系統解析システムの構図

をできるだけ保存しつつ規模を縮小化処理するものである。

図5-5-2の各系統解析プログラムは、各々に固有のオプション機能指定を除けば、Y法データそのまま計算することができる。

以上、当研究所で開発した電力系統解析システムの概要について述べた。本システムは、わが国電力各社の長年に亘る多大なバックアップを得て広く実用に供している。今後とも、時代の要請に先んじて解析機能や利便性の向上を図る予定である。

とくに利便性の向上という点では、系統解析に係わる近年の入出力支援機能の充実、すなわち GUI 機能の進展が見逃せない。そこで当研究所では、従来から実

施してきた解析機能の高度化に併せ、実業務における有用性を念頭に置いた GUI 支援機能の充実を図る計画である。