

ISM 0914-7896

DENCHUKEN REVIEW

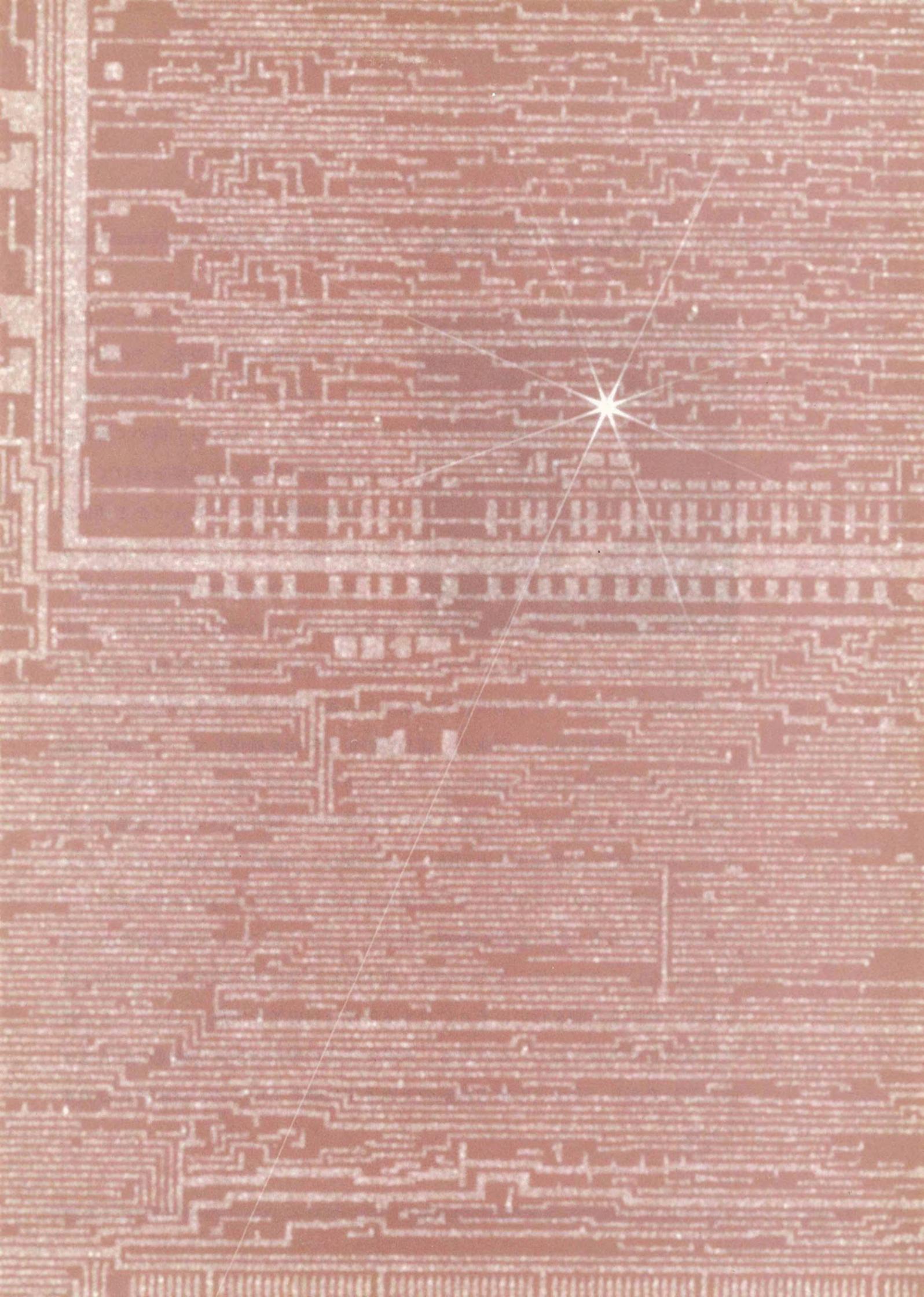
電中研レビュー

電力系統の高度安定運用に向けて
安定度総合解析システムの開発とその適用

NO.25 1990.10

電中研レビュー第25号 ● 目次
電力系統の高度安定運用に向けて
—— 安定度総合解析システムの開発とその適用 ——
編集担当 ● 狛江研究所 主席専門役 高橋 一弘
狛江研究所 電力システム部長 坪井 昭

巻頭言	関西電力株式会社 取締役副社長 成松 啓二	2
はじめに	理事 狛江研究所長 尾崎 勇造	5
第1章 開発のねらい		
1-1	● 系統安定度の概念と分類	9
1-2	● 安定度解析手法の歴史	12
1-3	● 安定度総合解析システムの開発とそのねらい	17
第2章 開発した総合解析システム		
2-1	● 電力系系統構成要素とモデル	21
2-2	● 固有値法 —— 振動の成分に分離する方法 ——	27
2-3	● シミュレーション法 —— 時々刻々の動きを追跡する方法 ——	35
2-4	● ユーザのための支援機能	39
第3章 開発したシステムの実システムへの適用例		
3-1	● 大規模連系システムにおける長周期動揺の安定化対策	45
3-2	● 長距離大電力送電の安定度向上対策	52
3-3	● 重大事故時の事故波及防止対策	56
3-4	● 事故復旧時の制限条件の検討への適用	62
第4章 新技術の導入効果の検討例		
4-1	● 新しい制御技術の検討	69
4-2	● 超電導発電機の導入効果の評価	76
第5章 今後の展望		
5-1	● 今後どのような分野に利用されてゆくか？	85
5-2	● どのような要素を新たに開発してゆくべきか？	86
おわりに	狛江研究所 副所長 鈴木 治朗	87
関連する主な研究報告書		88



かんとうげん



わが国は、過去二度にわたる石油ショックを克服してきたが、その過程において、エレクトロニクス産業や金融・サービス業がコアとなって極めて短期間に高度情報化社会へと進展を遂げてきた。この高度情報化はコンピュータと通信伝送技術の結合をベースとしていることから、それらを支える電力供給の安定性・信頼性についての要求は飛躍的に高まり、

電力会社は電力の量的確保だけでなく、質的向上にも大きな努力を払ってきた。この傾向は社会がますます高度化するなかで今後一層進展するものと考えられる。

このような状況に応え、将来共、高品質の電力供給を確保していくためには高信頼度の電力系統を構成・運用することが不可欠の要素である。これに対して電力系統は、年々増加してゆく需要とますます遠隔化・偏在化してゆく電源とに対応して大規模化・複雑化すると同時に、その運用や制御も一層複雑になっていくと予想される。しかしながら、その結果電力系統に思いもよらぬ事象が発生し、それが引き金となって大規模な停電に至るといようなことは到底許されるべきものではない。これに備えるためには、電力系統で発生する現象についての正確な解析、適切な予測を行い、それに対する的確な対応策を実施していくことが従来にも増して重要となる。なかでも、系統安定度の維持は供給信頼度の最も基本的な部分であり、今後とも電力系統の計画運用に際して中心的に論議される課題である。

系統安定度の解析については、現在コンピュータによるデジタル型計算が広く一般に用いられており、その意味から今回安定度総合解析システムについての長年かつ多岐にわたる研究の成果が取りまとめられたことには大きな意義があると言えよう。また、このほかに最近では電力系統の現象をより一層実系統に近いものとしてとらえるため、アナログシミュレーションの有効性も見直されており、当社でも、メーカー2社の協力を得て、実系統における事故発生プロセスの解明等を目的とした、世界でも最大規模の電力系統解析装置を開発した。この装置は電力系統に発生する現象を広い周波数領域にわたって連続して解析できることを特徴としており、これまた我々電気事業に携わる者にとって心強い武器となるものと考えている。

21世紀に向けて、制御性・利便性・クリーン性といった電気の優れた特性により、産業構造の変容とともにエネルギー需要の電力依存度は着実に高まっていくと予想され、さらに生活面におけるアメニティー志向もその傾向を一層加速していくものと考えられる。このような状況を踏まえ、今後とも各方面において技術開発を重ね、電力系統の高度安定運用がより一層確固たるものとなっていくことを期待するものである。

関西電力株式会社 取締役副社長

成 松 啓 二

〔電力中央研究所 参与〕

電力中央研究所・安定度解析研究の歩み(～1989年度)

西暦年度	当所の安定度研究の歩み	世の中の動き
1970 以前	<p>交流計算盤設置('57) 交流模擬送電線設備設置('58)</p> <p>電子計算機による電圧無効電力の制御基礎(オンライン制御の基礎)理論を開発('65)</p> <p>動的交流計算盤設置('68) 基礎研究用電力系統シミュレータ設置('68)</p>	<p>電気事業広域運営方式発足('58) 中地域における275kV超高压連系実現('60) 中西地域超高压連系実現('62) 佐久間周波数変換所運開('65) 御母衣幹線事故('65) 米国北東部事故('65) 中央電力協議会広域運営の新展開発表('68)</p>
1971 ～ 1975	<p>直流送電系統異常電圧シミュレータ設置('72) 詳細シミュレーション手法(Z法)の開発着手('73)</p> <p>直流多端子集中制御装置設置('75)</p>	<p>第一次石油危機('73) 初の500kV送電開始(東京電力、房総線)('73) 米国電力研究所(EPRI)設立('73) 9電力社長および電源開発総裁の会議において「広域運営の拡大」新方針を決定('75)</p>
1976 ～ 1980	<p>安定度詳細シミュレーション手法(Y法)の開発着手('77)</p> <p>超電導発電機の日立との共同研究開始('79)</p> <p>新しい定態安定度解析手法(S法)の開発着手('80)</p>	<p>ニューヨーク事故('77) 新信濃周波数変換所運開('77) 仏EdF事故('78) 北海道・本州直流幹線運開('79) 第二次石油危機('79) 中西地域500kV基幹系統の完成('80)</p>
1981 ～ 1985	<p>系統解析データファイルシステム提供開始('81) 交・直流電力系統シミュレータ設置('82) UHV送電系統の基本特性の検討('82) 電力系統解析技術研修コースの開設('83) EPRIとの電力系統解析ワークショップ開始('83) 不平衡故障などY法の大規模バージョンアップ('84) 超電導発電機など新種電源の解析モデルの開発('85)</p>	<p>わが国の原子力発電量初めて水力を抜く('82) OPEC初めて基準原油価格引き下げ('82) スウェーデン系統事故('83)</p> <p>9社最大電力1億kW突破('84) 民間会社として東京電力の原子力設備世界一('85)</p>
1986 ～ 1989	<p>制御系の最適定数設定協調論理の開発('86) 原子力・火力プラントの簡易シミュレーション手法の開発('87)</p> <p>電協研、電力系統安定運用技術専門委員会参加('88) 安定度解析用負荷モデルの開発('88) 電力系統解析に関するEPRIとの合同シンポジウム開催('89) 安定度解析システムの総合化('89)</p>	<p>仏EdF事故('86) わが国で電圧不安定性とみられる系統事故発生('87) UHV設計送電線の建設開始('87)</p> <p>関西電力、電力系統解析装置の開発('89)</p>

はじめに

理事 狛江研究所長 尾崎 勇造



電力系統における安定度維持の問題は、電力を信頼度高く供給するための基本的な条件であると同時に、系統の経済的運用をはかる上での大きな制約条件であり、その評価のあり方は電力系統を計画し、運用する際の最も重要な課題となっている。

当研究所の電力系統安定度の分野における研究は長い歴史を有し、小規模な交流計算盤と手回しによるタイガー計算機の時代から、動的交流計算盤の時代を経て、デジタルコンピュータによる大規模系統の解析に至るまで、その時代時代に対応して常に先駆的な成果を挙げてきた。

今般、完成した大規模電力系統の安定度総合解析システムは、これらの長年かつ多岐に亘る当所の独創的成果を総合し、体系的に取り纏めたものであり、既にわが国の全ての電力会社において必要、不可欠の解析ツールとして日々の運用業務に活用されている。

この解析システムでは、なによりもまず、実用的でかつ高精度の解析結果が得られるよう、水力、火力、原子力などの発電プラント、発電機本体とその制御系、直流送電ならびに調相設備を含む送変電網、需要家機器群など、電力系統を構成するあらゆる関連要素の特性を綿密に分析し、これをもとに解析モデルを構築した。

また、解析手法としては、比較的微小な外乱に対する電力系統の安定度現象を振動成分に分解して解析する固有値解析と、幅広い外乱条件を対象に時々刻々の実現象を時間領域で忠実に追跡するシミュレーション解析とを有し、これらを自在に使い分けることにより大規模系統の安定度解析が効率的に行えるようにした。

さらに、利用者が使い易いよう、所要データの作成、管理、更新、解析目的にあったデータの加工処理など、解析を支援する機能を備えている。

電力系統はますます拡大、複雑化していくものと考えられ、その安定度解析は一段と重要になると共に高度化が要請されている。当研究所は、今後とも一層の研究開発に務め、最近注目されている電圧不安定現象問題の取り込みなど、本解析システムの機能拡充を図って電力各社の業務の効率化に貢献していく所存である。



第1章

開発のねらい

第1章 開発のねらい ● 目次

狛江研究所 電力システム部長 坪井 昭
狛江研究所 電力システム部 次長 長尾 待士

1-1	系統安定度の概念と分類	9
1-2	安定度解析手法の歴史	12
1-3	安定度総合解析システムの開発とそのねらい	17

1-1 系統安定度の概念と分類

送電線への落雷などが発生すると、その影響が系統全体に及び、系統内の発電機の回転に乱れを与え、その結果、電力の流れに動揺が生じ、それが大きい場合には安定して電力を供給できなくなる場合がある。

この問題は、古くから、電力系統の安定度という言葉で論じられているが、その物理的概念や種々の系統構成要素の特性との関連は、電気工学を専門とする技術者の間でも難解なものの一つとされている。

さて、発電所の発電機で作られた電気は送電線を介して需要地へ送られる。需要地には各家庭の電気器具をはじめとして、多くの電気消費物がある。これらは総称して「系統負荷」あるいは単に「負荷」と呼ばれる。

負荷は回転する発電機にとってブレーキの作用をする。これに対してボイラーやダムから発電機に供給される蒸気や水の流れはアクセルの作用をする。これらの作用をもとに発電機の加速減速を論ずることが安定度の基本である。

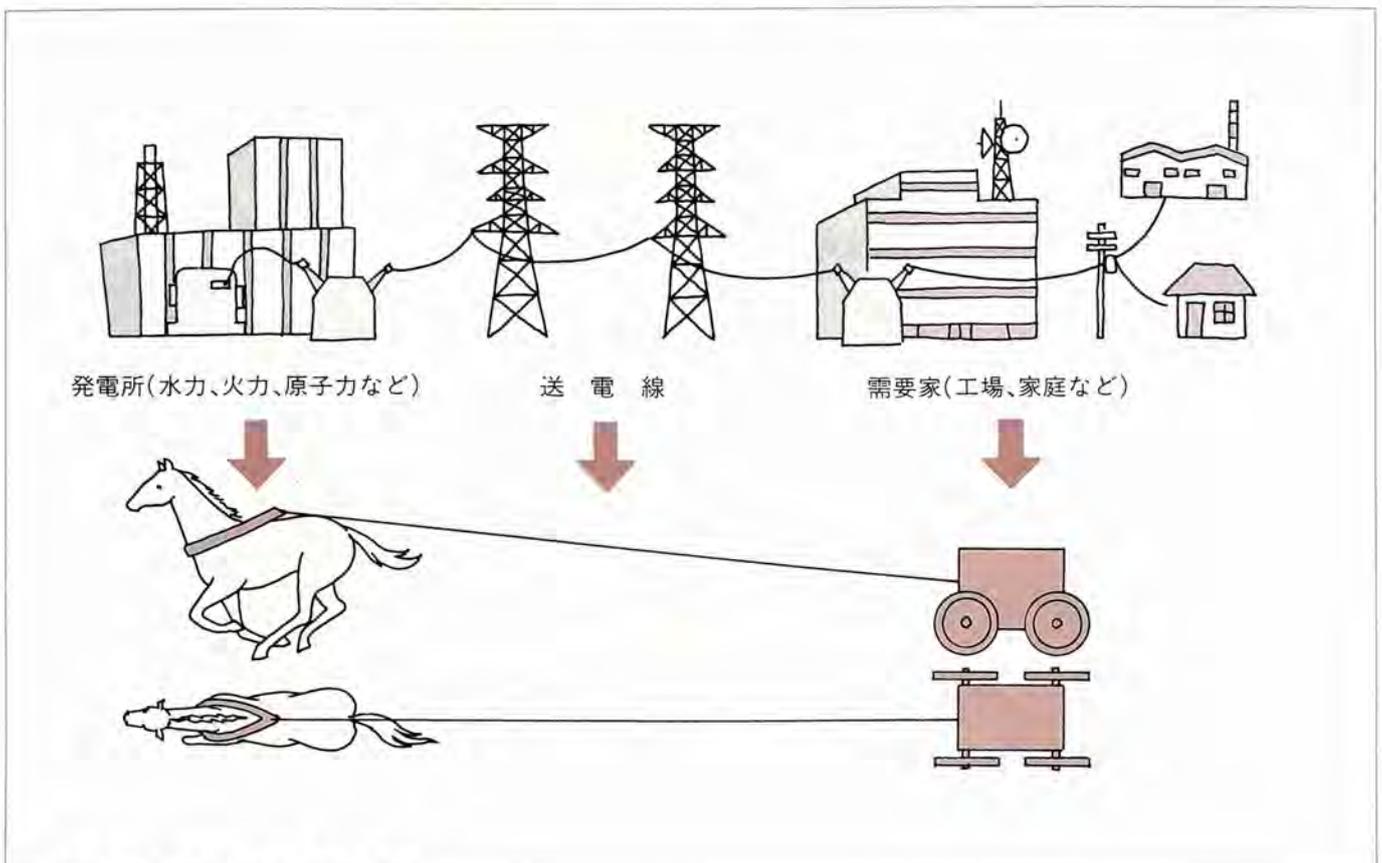


図1-1-1 発電機は馬で負荷は荷車

これらの関係を荷馬車にたとえるなら、発電機とそのエネルギー供給源は馬であり、負荷は荷車であろう。送電線は両者を結ぶロープのようなものである（図1-1-1）。ロープが切れれば馬は暴走するし荷車は置いてきぼりをくう。馬の暴走は御者（発電機の制御装置）が取り抑えるが、荷車の停止は需要地での停電を意味する。

荷車の停止を防ぐにはロープを複数本にするのも良い。しかし他に沢山の馬と荷車が走っている場合にはもっと有効な方法がある。これらを横に継いでしまうのである。実際には馬や荷車どうし、あるいはロープの中間点どうしを継いだりする。こうすることにより置いてきぼりをくう荷車は皆無に近くなり、電力システムの信頼性は著しく改善され

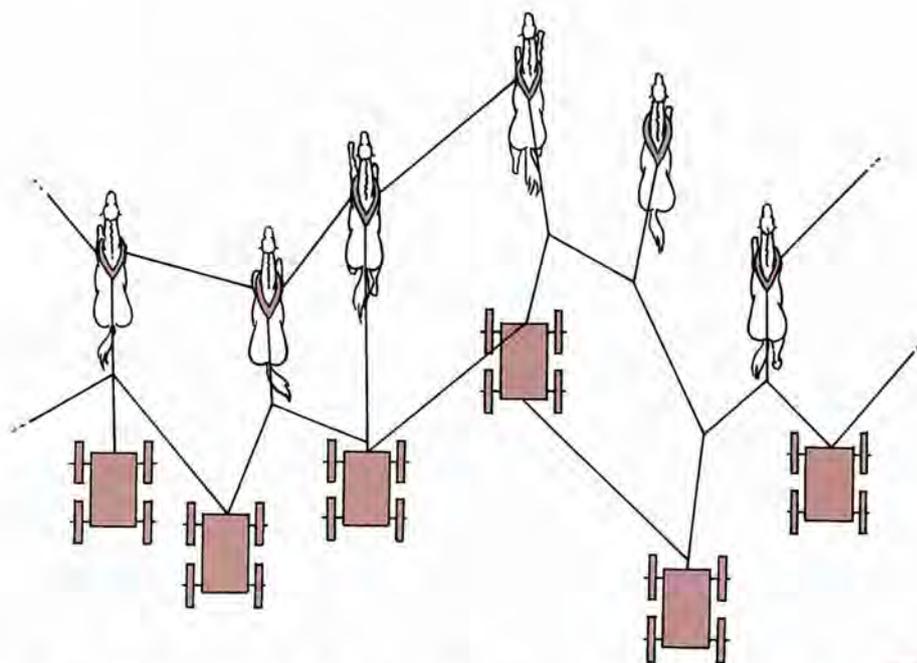


図1-1-2 電力系統を荷馬車の群れに例えれば

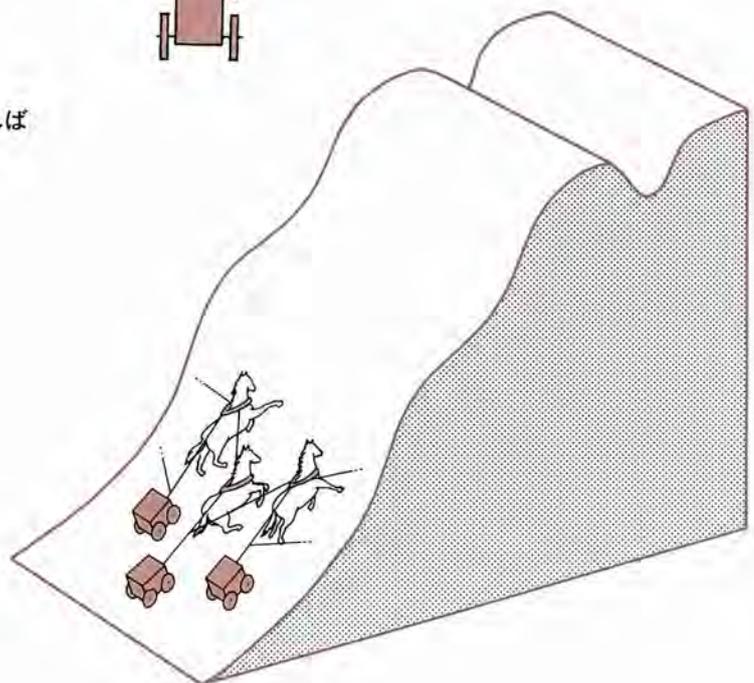


図1-1-3 電力系統における負荷変動の概念

る（図1-1-2）。

実際の電力系統をたとえば、沢山の馬と荷車を結ぶロープが縦横に走っていることになる。また荷車の荷が重くなってくると適当な箇所新しい馬が加えられる。こうなると最早どの馬がどの荷車を引っ張っているのか判然としなくなる。したがって一頭の馬の加速減速を論じようとするれば、全体の動きを見なくてはならない。

このように、以前は「発電機の安定度」と言われてきたものが、近年ではほとんどの場合「系統安定度」と言う概念で扱えられるようになってきている。

ところで電力系統の安定度には2つの種類がある。1つは比較的小さなショックに対する安定度であり、定態安定度と呼ばれる。小さなショックとしては、先ず負荷の変動

によるものが挙げられるが、その他にも種々の日常的操作や機器動作などによるものもある。電力系統を象徴する荷馬車の群は、この凹凸した野山を無事に走り抜けなければならない（図1-1-3）。定態安定度の解析では、想定するショックが小さいため、電力系統の代表的な状態を抽出してこれを線形表示し、その特性行列に対する数学的安定判別が主に用いられる。その方が後述するシミュレーション法より桁違いに解析効率が高いからである。

他の1つは送電線への落雷など比較的大きなショックに対する安定度であり、これを過渡安定度と言う。過渡安定度の解析はシミュレーション法によってなされるのが通常である（図1-1-4）。

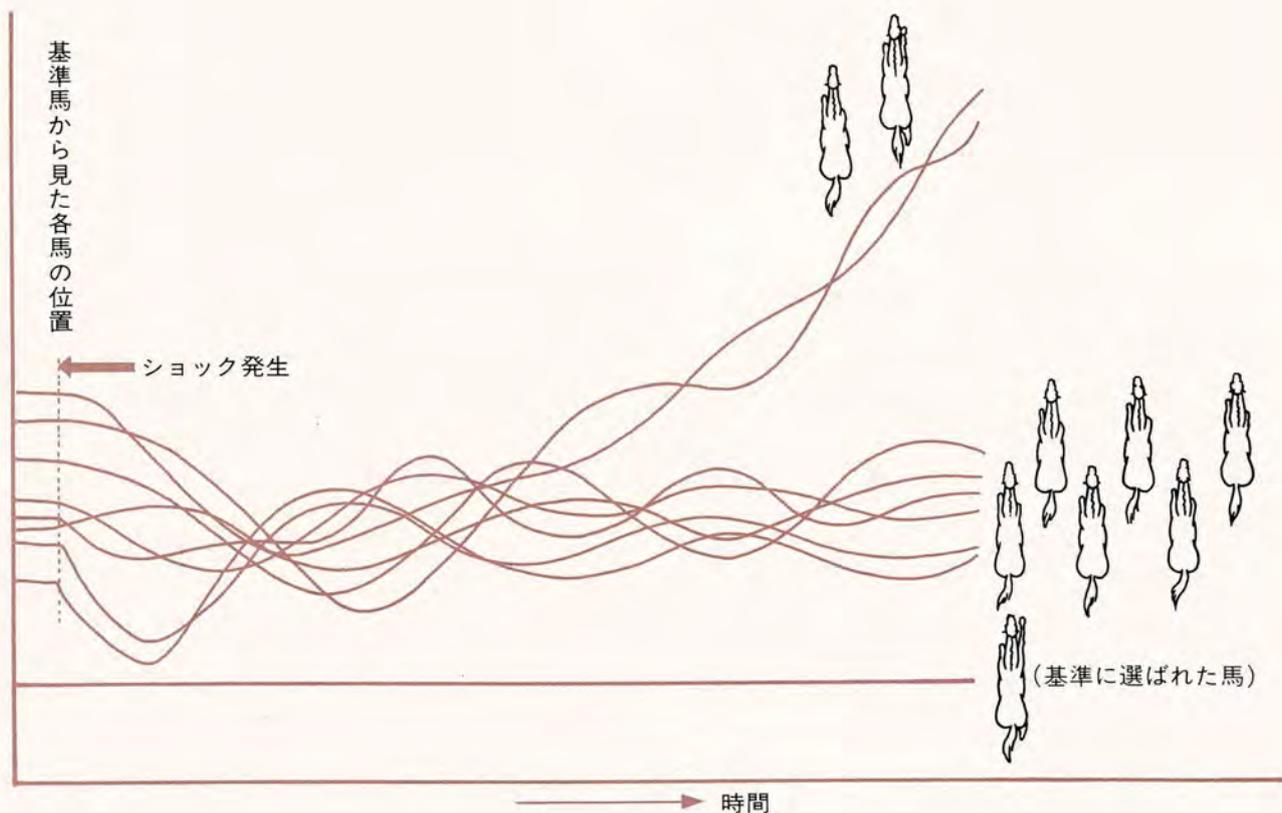


図1-1-4 最近の過渡安定度解析例

1-2 安定度解析手法の歴史

(1) 一機無限大系統の安定度解析

安定度解析の歴史は一台の発電機に着目したものから始まっている。これは「一機無限大母線の安定度解析」と言われ、最も基本的なものである。

一機無限大母線モデルを適用する場合は、対象となる発電機から見て、その送電線の先に動揺の極めて小さい地点が存在し、他の発電機との相互干渉が無視し得るほど小さいことが必要である。水力発電が主体であった時代には、山奥の水力発電所が専用の長距離送電線を介し、大都市を取り巻く強固な外輪線へ直結されるという系統構成が多く、このようなモデルによる解析が十分有効であった（図

1-2-1）。

ここで、送電線の特性のたとえとして用いた、馬と荷車をつなぐロープの性質について触れておく。実はこのロープはまるでゴムで出来ているように大きく伸び縮みするのである。しかも、通常のコムは伸びが増すと張りも増して適当なところでバランスがとれるが、このロープはある程度以上伸びると逆に張りが減り始めるロープなのである。最も、これは送電線の電気的性質（電圧位相のねじれ）をたとえて言っているのであり、ロープの伸び縮みが実際の送電線路の物理的な伸び縮みを意味するわけではない。これは馬（発電機）の加速・減速が発電所の移動を意味しないのと同様である。

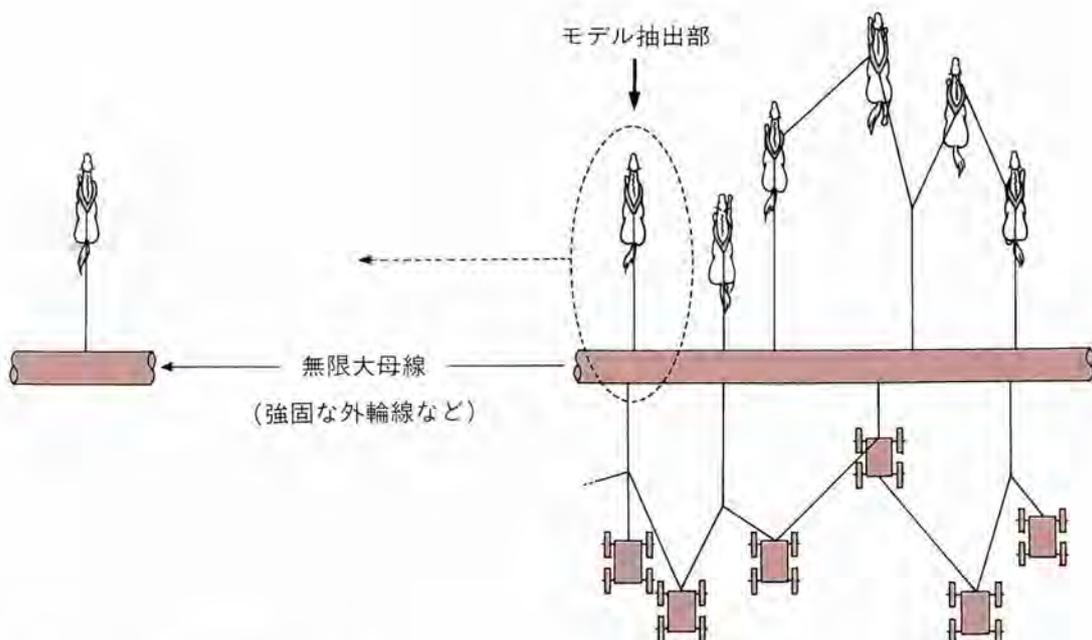


図1-2-1 一機無限大母線モデルの本来の意味

さて、一機無限大母線モデルの安定度解析をたとえて示せば、一頭の馬とこれが繋がれた一定速度の巨大な丸太（無限大母線）を結ぶロープの伸びに着目すれば良い。通常ロープは2本づつ張られており、過渡安定度解析ではこのうち1本が切れた場合をよく想定する。これは2回線の送電線のうち1回線に落雷があった場合に対応している。ふつう落雷によって発生した火花（アーク）は送電線に電圧がかかっている間は消滅せず、言わば送電線はこの地点でショートしたままの状態となる。この状態を抜け出すため、落雷（故障）を受けた回線の両端の遮断器を開放する。ここで送電線は1回線だけで使用することになる。開放された回線は無電圧状態となり、やがてアークは消える。そしてアーク消滅後に遮断器を再投入し、落雷前の送電状態に戻すということが行われる。

1回線がショートしている間は、他の回線の電圧も瞬時に大幅に下がる。これはロープが急に細くなったことを意味し、馬は急激に加速する。故障回線が遮断されると健全回線の電圧も回復するため、残された1本のロープの太さは元に戻る。しかし、馬の引っ張る力は1本のロープに全てかかるため、ロープが耐え得るかどうか、すなわちバラ

ンス点の存否が心配される。また、たとえバランス点が存在しても、故障中の加速が大きすぎるとそこに到達し得ない場合もある。このような場合には、切れたロープを再結合し、加速した馬を引き戻すことが行われ、そのタイミングをどうとるのが重要となる（図1-2-2）。

一機無限大母線モデルによる安定度解析は、現在でも発電機制御系の基本仕様の検討に用いられる。

（2）多機系統の安定度解析

電力系統の信頼性向上や経済運用などを目的に、広域連系線によって電力系統内の発電機間の結合が強められるにつれ、安定度面での相互作用も大きくなり、一機無限大母線モデルでは扱えない現象が次第に多く見られるようになってきた。

例えば、何らかのショックにより、群の一部に加速や減速が起きると、これは近くのロープの張り具合を変えることになり、隣接する馬や荷車を加速あるいは減速させる。一般に減速した馬はロープの張りが減り荷が軽くなるのでやがて加速し始め、加速が続くと再びロープの張りが増し

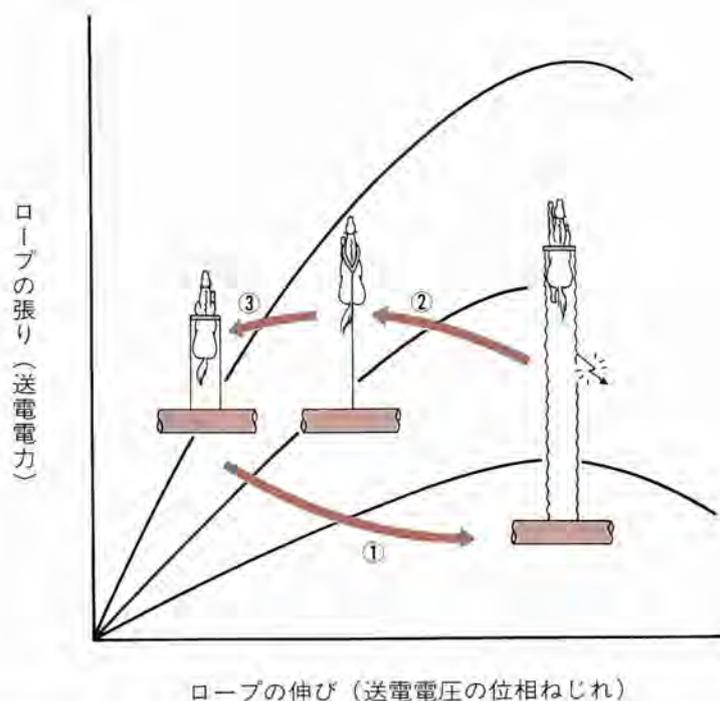


図1-2-2 故障時のロープの伸びと張りの関係

荷が重くなるので減速に向かう。この動きは順次遠くへ伝搬してゆき、各ロープは新しいバランス点を求めて伸び縮みを繰り返す。その様子は、波の伝搬、反射、重なり合いとよく似ており、電力系統の構成によって極めて複雑な振舞いを見せる。この過程で伸び過ぎたロープ（そのようなロープは伸びるほど逆に張りが緩む）が出現すると、一団となって走っていた群の統制が効かなくなることがある。この現象が系統安定度の崩壊であり、一部の馬の暴走という形で現れる（図1-2-3）。

(3) 定態安定度解析の歴史

定態安定度の解析は、一機無限大母線モデルを対象とした円線図法と呼ばれる図式解法に始まる。これは、発電機の特性を静的なモデルで扱ったものであったが、やがてナイキスト法などの線形制御理論を応用して、発電機の動特性や制御系の遅れなどを加味した詳細な解析法も現れた。

しかし定態安定度の問題は、過渡安定度の場合と異なり、電力系統のどこにショックが発生するかを特定するものではなく、基本的には全系の安定性を論ずるものであるため、多機系統解析への要請は過渡安定度の場合より強かったようである。このためか、早くも1920年代に数百機系を取り扱う手法がゼネラルエレクトリック社のクラーク女史により提案されている。しかし、これは円線図法を同期化力係数（ロープの弾性値）に置き換え、多機系統へ拡張したもので、発電機の慣性など重要な要素を無視していたため、精度的に大きな欠陥があった。同じ頃、ウェスティングハウス社のワグナー氏は、発電機の運動方程式を組み込んだ多機系統の安定度問題の基本式を示した。この式は当時では一般的に解く方法が無かったため、同氏は同時に簡易判別式を示した。しかし、この判別式も4機系までしか適用できなかったため、実務には十分なものと言えなかった。

その後、ワグナー氏とクラーク女史の方法を組み合わせて一般解を求める方法が当所の梅津氏により提案された。この方法では判別式の記号はギリシャ文字の ρ （ロー）で示されたことから、一般には ρ 法と略称され、当初、十機程度の系統を対象にタイガー計算機（手廻し型の計算機）を用いて解かれていた。やがてデジタル計算機が導入さ

れ、数10Kワードのメモリーがあれば百機以上の系統の定態安定度解析が行えることから、わが国における定態安定度解析に一時代を画した。しかし ρ 法の基本論理はワグナー氏の簡易判別式を踏襲していたため、多機系統の複雑

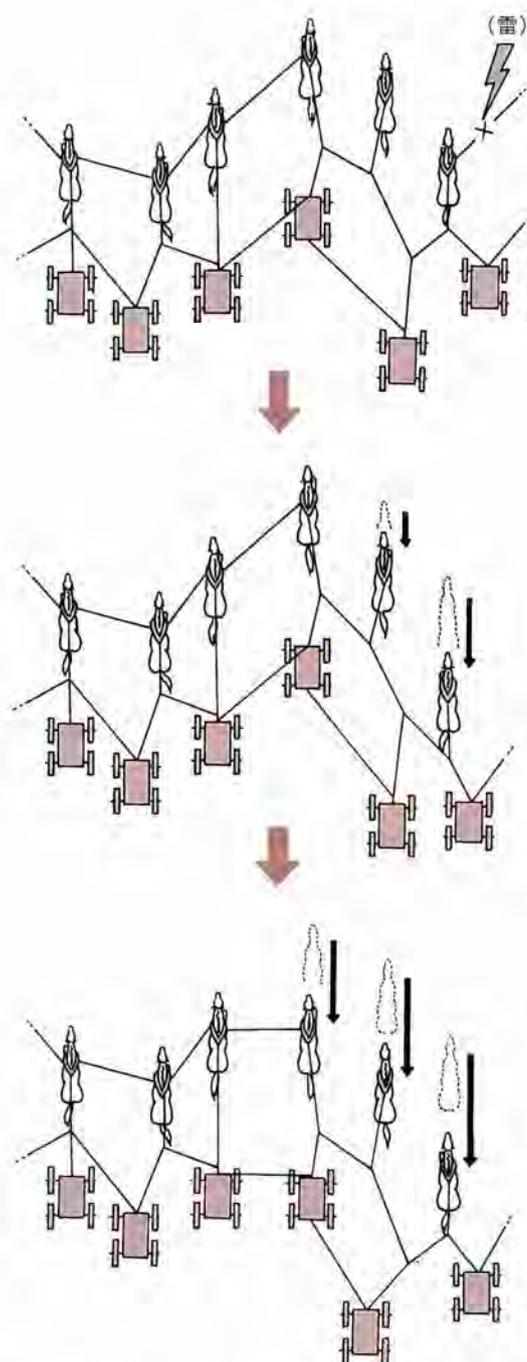


図1-2-3 動揺の伝搬の概念

な振動現象をチェックする面では不十分なものであった。

1970年代以降のデジタル計算機の著しい進歩は定態安定度解析に対する考え方を一変させた。それは従来、一機無限大母線モデルでしか扱えなかったナイキスト法型の発電機詳細モデルを多機系統へも適用しようというものであった。これには汎用固有値解法の開発が重要な鍵となっている。汎用固有値解法の開発については、米国のアルゴンヌ国立研究所が各国に呼びかけ、日本の電気事業も当所を通じて参画した。この解析ソフトは1970年代前半に公開され、EISPACと言うパッケージ名を持つ汎用ソフトとして、現在でも揺るぎない立場を維持し続けているものである。

しかし、このように世界の英知を集めた固有値解法でも、解析対象の次数が500次程度になると、所要メモリーや計算時間が極端に大きなものとなり、スーパーコンピュータを用いても実用性の面から困難があった。

このため当所では、1970年代後半に、安定度解析に通常必要となる固有値の数が限られていることに着目し、新しい効率的な固有値解法を開発した。この方法では、比較的減衰のわるい数個の固有値のみを求めるために、行列の変換を行うが、変換された行列をS行列と称することからS法と名付けた。このS法は数百機の詳細発電機モデルを持つ系統の安定度解析が可能など、対象系統規模、所要メモリー、所要計算時間の面で十分な実用性を有しており、ここ数年来の試行的な過程を経て、電力各社の日常業務に定着してきている。

(4) 過渡安定度解析の歴史

多機系統の現象を解析するためには、歴史的にはまず、交流計算盤(アナログ型潮流計算装置)に簡易な発電機動特性模擬機構を付け加えた動的交流計算盤が使用された。また、より詳細な発電機動特性モデルをデジタルで模擬し交流計算盤と組み合わせたハイブリッド型のシミュレータも開発された。これらのアナログ型(模擬送電線を含む)あるいはハイブリッド型のシミュレータは、現象がまさしく目の前で再現されるので、理解し易く、教育あるいは訓練に適している。

また、シミュレータの構成によっては、過渡現象など電力系統の短時間の現象から、周波数変動など長時間の現象に至るまで、同一のシミュレータで検討することが可能であり、多目的にこれを使用することができる。さらに、変成器2次側に直接、系統の保護・制御装置を接続して、それら実装置の性能を検証することも可能となる。模擬送電線設備はこの代表である。

しかし、これらのシミュレータが扱う発電機モデルなどは比較的固定されたものであり、しかもコストパフォーマンスとの兼ね合いから、その機数もせいぜい数十程度であり、こうした装置はおのずと限界があると考えられている。

さて、一機無限大母線モデルには無かった動揺の伝搬という概念は、近來の電源・負荷の混在や広域運営の強化によりますます顕在化し、現在ではむしろ動揺の伝搬現象が系統安定度解析における研究の主対象となっている。例えば、ある地点で生じたショックが四方に伝搬し、種々の経路を経てこれが反射し合い、ある所で大きな波に重なり合うということも考えられる。現在こういった問題の解析には、数百機からなる実系統をできるだけ忠実に模擬することが行われており、そのための手段としてはもっぱら大型のデジタル計算機を用いて、電力系統の振る舞いを時間領域でシミュレーションすることが主流となっている(図1-2-4)。

デジタル計算機によるシミュレーション手法を電気事業の実務面から見ると、扱いうる系統の規模、計算に要する時間、得られる解の精度、プログラムなどの使い易さの4つの面から十分な実用性のあることが要求される。特に規模については、多くの場合、1,000から1,500母線、300~400発電機程度が扱えることが必要である。

シミュレーションによる解析手法は、海外では1970年に公表されたウェスティングハウス社のものや1972年のボンネビル電力庁のものがよく知られている。国内でも同じ頃から検討が進められた。当所では、大規模系統を対象とするシミュレーション解析手法を昭和40年代始め頃から開発し、電力各社の実用に供してきたが、そこでは、発電機を1つの電圧源と1つの内部インピーダンスで表現し(X'd背後電圧一定モデル)、制御系も簡単な1次送れモデルで表現したものであった。

また、昭和50年代初め頃までは特に大規模システムを対象とする場合、解析手法上困難な点が多かった。この他、システムを構成する各要素の数式モデル自体が不備であり、一般性もなかったため、解決すべき課題毎に数式モデルや解析手法の選択を行うという煩雑は方法が採られていた。

このため、作業そのものに多大な労力を要するのみでなく、担当者の判断により結論が異なるという問題があった。

この問題を解決すべく、当所は昭和55年までに、システムを構成する各要素の数式モデルを改善し、数値解析面でも多くの工夫、改良を行って大規模電力システムを対象として安定度の詳細評価を行う真に実用的なシミュレーションプログラムを開発し、電力会社へ提供した。このプログラムは、当初、多地点の不均衡故障を詳細に解析するため、系統計算にZ行列（インピーダンス行列）を使用していたことからZ法と称していたが、その後大規模システムを効率的に処理できるよう行列をY行列（アドミタンス行列）に変更した他、多くの改良を行って以後これをY法と称した。このY

法は十分な精度と高い効率を有し、かつ誰が用いても同じものさしで議論ができるという業務上の利点から、電力各社の高い評価を得た。

また、昭和60年以降は、さらに原子力プラントの内部状態のモデル化とその組み込み、超電導発電機など将来技術のモデルなど、様々な機能の改良や追加を行った。

本節の終りに、デジタルシミュレーションで用いられる系統構成要素の数式モデルと模擬送電線設備との関係について述べておく。数式モデルは、文字通りモデルであって、厳密には、いかなるモデルも解析しうる現象には限界がある。この点、模擬送電線設備は機数が少ないこと、機器の容量が小さいことなどからくる制約はあるものの、現象面での適用限界は、はるかにゆるやかなものである。従って、当所では、シミュレーションプログラムで使用する数式モデルの精度については、解析対象とする現象の種類毎に、模擬送電線により再現される現象との対比を行い、その妥当性を確認することを常としている。

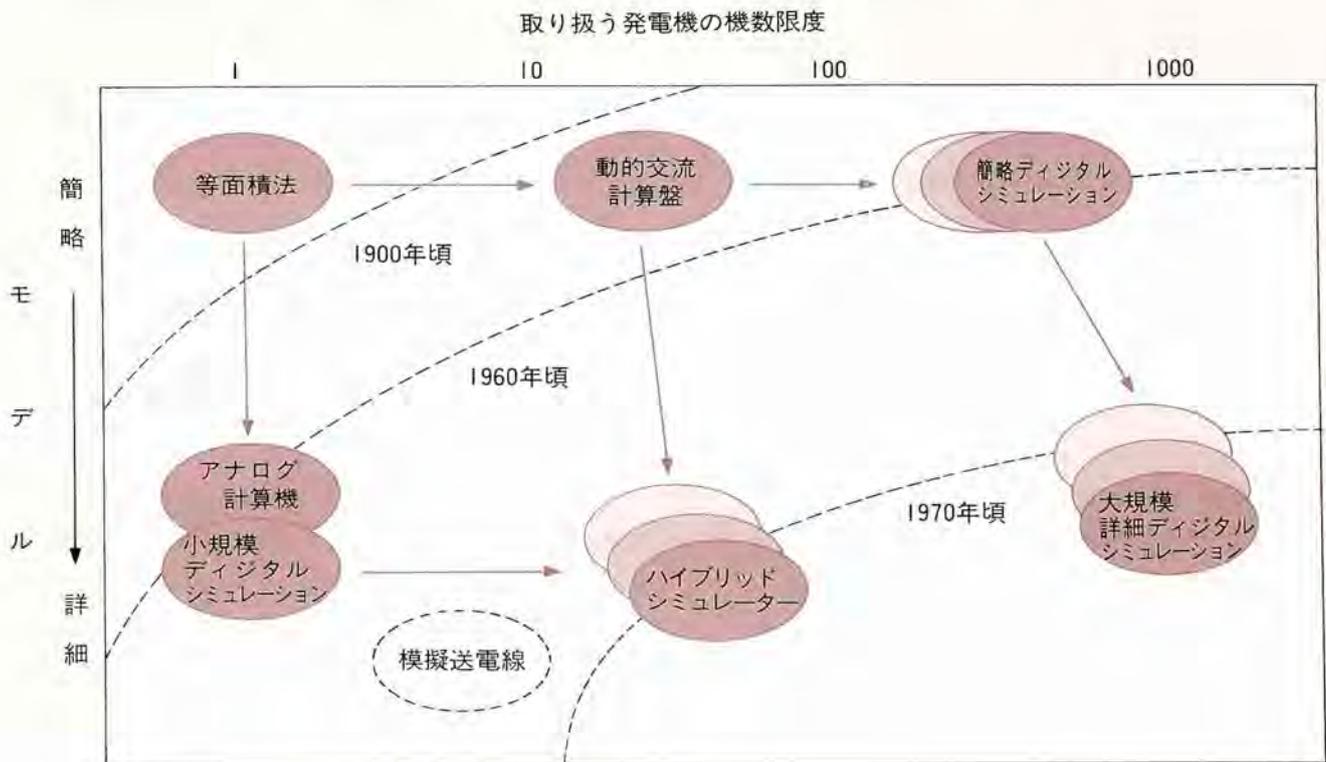


図1-2-4 過度安定度解析の歴史

1-3 安定度総合解析システムの開発とそのねらい

当所が開発してきた定態安定度解析（S法）と過渡安定度解析（Y法）の2つのプログラムはわが国のすべての電力会社の系統計画や系統運用の業務に速やかに定着し共通的に用いられるようになった。このような状況を踏まえ、当所ではこれらのプログラムを有機的に結び付けた安定度総合解析システムの開発に着手した。このシステムは、大規模システムの安定度解析を正確、容易かつ迅速に処理することを狙ったものであり、初期の段階から、特に、広域連系に伴う会社間にわたる問題解決に有用なものとなるよう配慮した。

ところで、安定度解析の実際の作業においては解析精度を向上させるためにモデルを詳細なものとするとともに、解析に用いる膨大なデータの正確な設定が必要となる。

これらのデータは、電力系統を構成する発電機や送電線、変電所などの設備データをはじめ需給状況に対応した潮流断面などの運用データにわたる広範なデータである。また、年々電力系統は大規模化しているため、この多種で多量のデータを、計算の都度、実務担当者の手で白紙の状態から作成し、データの信頼性を確認することはほとんど不可能である。

さらに、近年会社間の連系が強化されてきているため、解析精度を向上させるためには、自社系統のみならず、連系他社系統についてのデータを収集することが必要であり、こうしたデータを体系的に整備しておくことは、連系各社間の協体制の基本条件となっている。また、あわせて相互の解析効率を向上するためには、解析目的によって相手の系統を適切な規模で模擬することが必要であり、このためのモデル化技術も必要である。

こうした点を考慮して、安定度総合解析システムでは関連業務の効率化のために必要な膨大なデータの収集、維持、

管理を容易に行えるようにするとともに、そのデータの信頼性をチェックし、データの処理加工、解析までを一貫して取り扱うことができる支援システムを開発した。システムの構成の概要を図1-3-1に示す。

これらのプログラムの解析精度については、大容量電源運用に伴う負荷遮断官庁試験時の系統動揺測定5件、系統運用対策上実施された試験時の発電機動揺測定3件など、数々の実系統現象との対比により、実用上十分なものであることを検証した。

システムの本体部分である解析プログラム部はY法とS法から成るが、両者に必要なデータ入力方式は共通とした。従って両手法の特徴を随時使い分け解析効率を向上することができる。すなわち、S法はY法で用いられているモデルを線形化しているため、Y法よりも計算時間は1桁短く、また、S法で得られる固有値、固有ベクトルやその感度係数の情報から、現象の因果関係や安定化対策の基本的評価が簡便に行なえる。この利点を利用して、S法でまず電力系統の概略的な安定性を判別し解析ケースのスクリーニングを実施したり、不安定要因の探索や安定化対策の基本的立案を行うことができる。Y法での解析は、時間領域でのシミュレーションであり発電機や制御系などの非線形性も考慮していることから、非線形効果の大きい大擾乱の解析、安定運用の判断のために系統の主要諸量の変動幅の把握が必要な解析、S法で絞り込まれた解析ケースの詳細確認などに用いるのが適当である。

これら一連の成果は電力各社から受け入れられ、開発した安定度総合解析システムは各社共通の有力なツールとなった。そして、そのより一層の効率的運用を図るため、連絡会が昭和57年から電事連に設置され、当所との密接な連携のもとに会社間にまたがる系統安定度問題の解析を行

うこととなった。現在、この連絡会は電力各社からの本解析システムに対する機能追加の要望集約を行う場ともなっている。

本解析システムの適用例としては、当所がこれまで直接関与してきたもののみを眺めても、70件程の依頼研究を受けており、送電網の拡充計画の検討や直流系導入効果の評価など設備計画に係わるもの、工事などによる系統構成変更に伴う対策や系統事故時の原子力・火力発電所の運転方式の立案など系統運用に係わるもの、また官庁試験や現場

試験のための事前検討やそれに伴う試験条件の設定など現場作業に係わるものなど多岐にわたる。

特に、最近では、中西社間連系系統において、数年後に火力発電所が新設された際の系統不安定現象の予測とその解明および適切な対策の立案に効力を発揮した。その結果、特定の発電機数台の制御協調を図るだけで現状の送電ルートのみで広域連系の運用が可能であることが判明し、大きな経済効果を与えている。

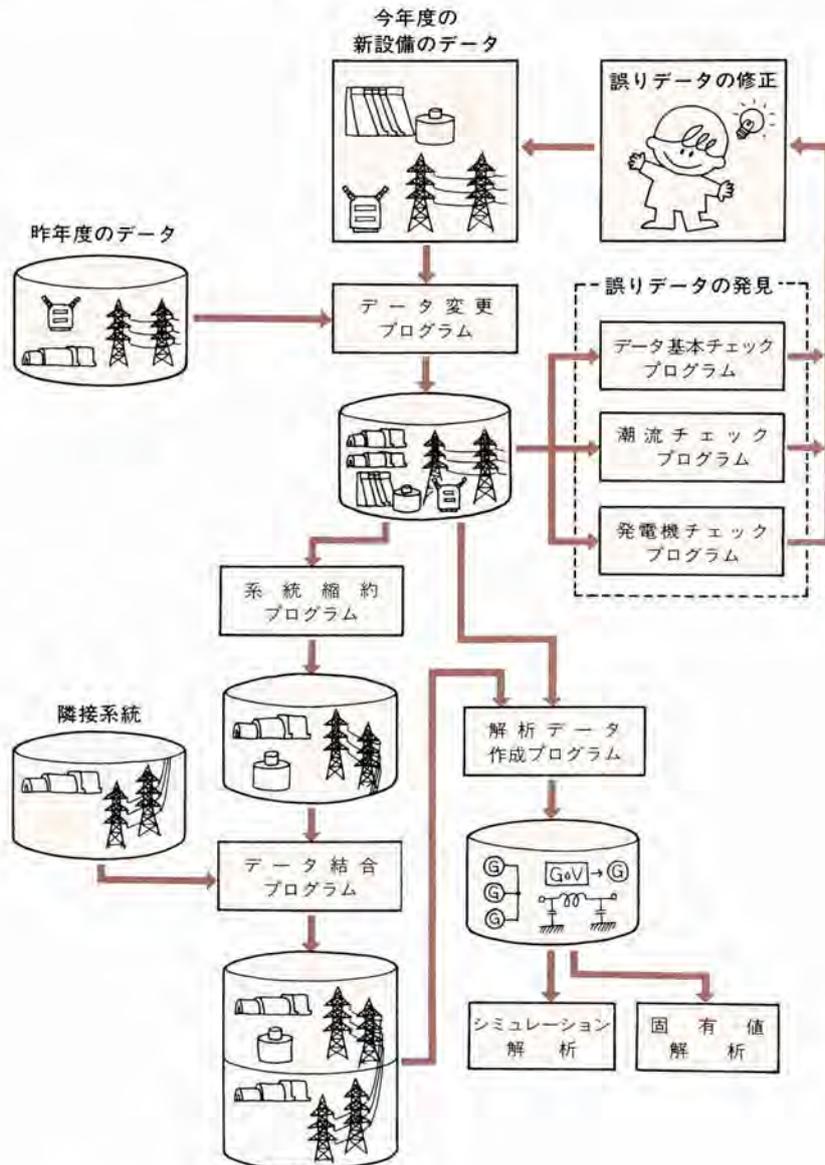


図1-3-1 ユーザ支援システム

第 3 章

3

3

開発した総合解析システム

第2章 開発した総合解析システム ● 目次

狛江研究所 電力システム部 系統制御研究室長 谷口 治人
 狛江研究所 システム部 系統計画研究室長 内田 直之
 企画部 研究計画課 主任研究員 田中 和幸
 狛江研究所 電力システム部 系統計画研究室 主査研究員 竹中 清
 狛江研究所 電力システム部 系統制御研究室 専門役 市川 建美

2-1	電力系統構成要素とモデル	21
2-2	固有値法——振動の成分に分離する方法——	27
2-3	シミュレーション法——時々刻々の動きを追跡する方法——	35
2-4	ユーザのための支援機能	39

本章では、まず開発した安定度総合解析システムで用いている、電力系統の主要構成要素の解析モデルについて、その基本的考え方を簡単に記述する。電力系統の構成要素は、図2-1に示すように大きく分けて、発電所、送変電網、負荷、ならびに安定化制御システムなどから構成されているが、当解析システムにはこれらのほとんどすべての要素をモデル化している。

ついで、開発したシステムの解析アルゴリズムとして、中核となるふたつの解析プログラムの論理的基盤の概要と、実用面から種々の工夫を凝らしている支援プログラム群、およびそれらの全体構成について述べる。

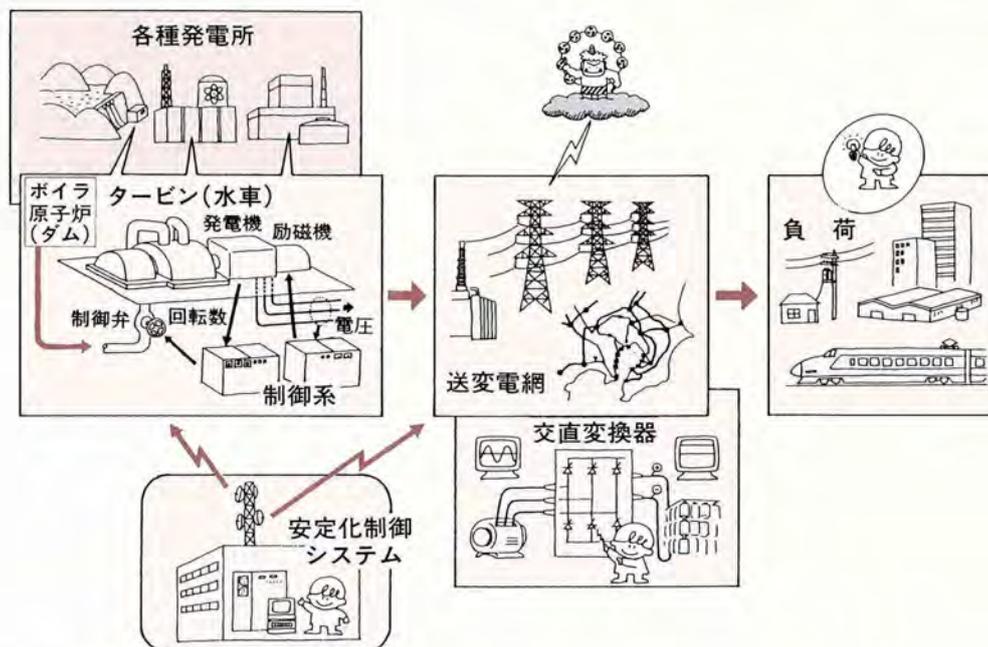


図2-1 電力系統の構成要素

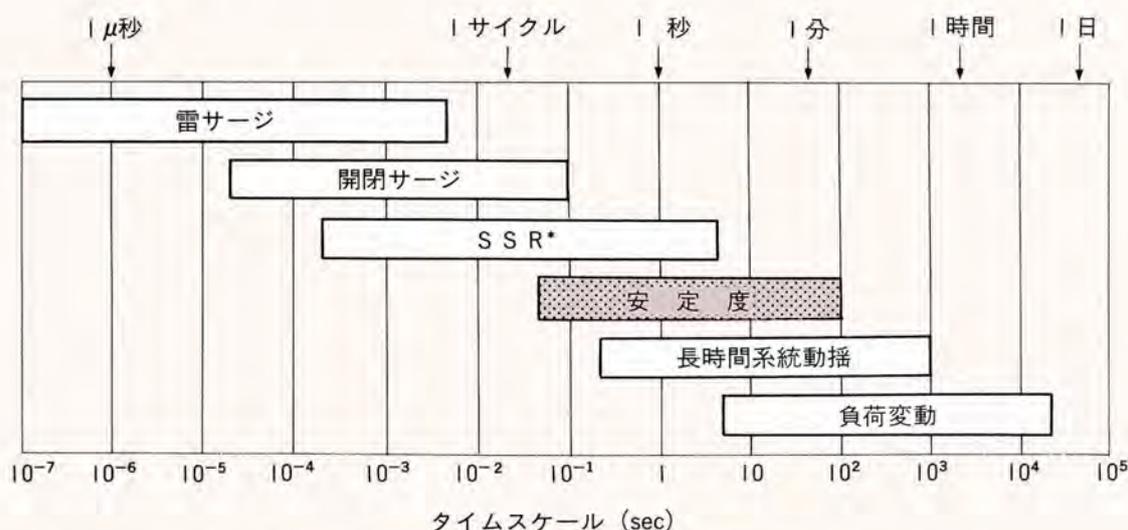
2-1 電力系統構成要素とモデル

電力系統に関わる各種の現象を時間領域で見ると、図2-1-1に示すように、雷サージのようにマイクロ秒オーダーの極めて速い現象から時間オーダーでの負荷変動のようにゆっくりした現象まで、幅広く分布している。これらすべての時間領域にわたる特性をひとつの解析モデルにまとめ上げようとする手に負えない程複雑なものとなる。それぞれの解析を効率的に行うためには、対象とする現象に応じた特性を抽出してモデルを構築する方が得策である。開発した安定度総合解析システムで扱う領域は図に示すように数秒～数10秒間にわたる発電機間の位相角動揺であり、その解析モデルはこの時間領域に合わせて多次元の集中定

数常微分方程式の部分と代数方程式の部分に分けて記述される。

ここでは、図2-1に示すような電力系統の主要コンポーネントの解析モデル、すなわち、①発電機モデル、②励磁系・ガバナ系など発電機制御系モデル、③負荷の動特性・静特性モデル、④送電線・変圧器など交流送電系統モデル、⑤直流線路・交直変換装置など直流系統モデル、⑥火力ボイラ系・原子炉系などプラントモデル、および⑦周波数リレーなど安定化保護モデルについて述べる。

ちなみに第1章の安定度の概念でたとえた一頭の馬のモデルは上記①、②、⑥の組み合わせからなり、図2-1-2のような内部構成になっているのである。



* : SSR : 発電機軸系と送電系の間で生じる共振 (Sub-Synchronous Resonance)

図2-1-1 時間領域で見た電力系統の各種現象

(1) 発電機モデル

電力システムの安定度などの動特性解析に当たっては、発電機のモデルは非常に重要なものとなる。

発電機としては、同期機が一般に使われている。同期機は、電磁石をタービンなどの力で回転させ、その外側に銅線をならべて電圧を発生させ、電力を取り出すものである。同期機のモデルとしては、1930年代にパークによって導き出された、DQ座標系モデルがある。これは、発電機そのものの特性をあらわすのに非常にすぐれたモデルであり、今でも種々の解析に用いられている。

しかし、この基本的なパークモデルでは、発電機の特性を十分表現できない部分（たとえば、飽和：電磁石と電圧との関係が非線形であること）があること、そのままでは、大規模システムの安定度解析では効率的に取り扱えないことなどのため、本解析システムでは、基本モデルの一部を修正・拡張して使用している。

また、新しい発電機の方式として、4章で述べるような超電導発電機や可変速機などが開発されてきている。これらの発電機は、発電原理そのものは変わらないが、従来の

モデルでは定量的な取扱いができないので、新しいモデルを開発し、試験的に製作された発電機の試験結果などとの比較、検証を積み重ねている。

(2) 発電機制御系モデル

発電機には、さまざまな制御系が付属していて、発電機の安定な運転を可能にしている。ここでは、安定度に関係の深い、励磁系（電磁石の強さを制御する）、ガバナ（タービンなどの出力を制御する）について述べる。

モデル化に当たっては、いたずらに複雑にして定数算定が困難にならないよう留意しつつ、安定度解析に必要なかつ十分な精度が保持されるようにしている。

これらの制御系は、馬でたとえると、その御者や馬自身の小脳、反射神経に対応し、安定度の解析では重要な要素となっている。

①励磁系モデル

励磁系の一般的な機能を以下に記す。

AVR(Automatic Voltage Regulator)は、同期機の端子電圧を一定にするように励磁機を制御する。ただし、図に示

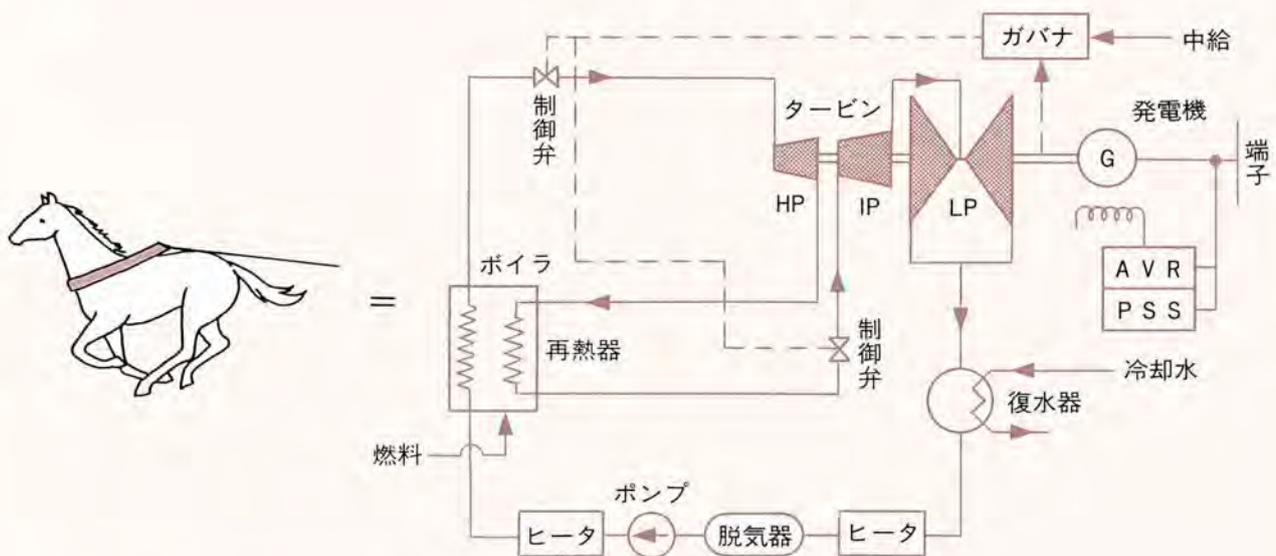


図2-1-2 一頭の馬の構成概要の例

されるように、PSS(Power System Stabilizer、2-2-4(1)で再掲)、AQR(Automatic Q(var)Regurator)やAPFR(Automatic PF(Power Factor)Regulator)、あるいはOEL(Over Excitation Limiter)やUEL(Under Excitation Limiter)、さらには横流補償装置(同期機の無効電流でAVR入力を補正する装置)などによってAVR出力は修正される。

励磁機は、AVR出力を受けて増幅し、同期機に界磁電圧を供給する機器であり、直流発電機、交流(同期)発電機、励磁用変圧器とサイリスタなどで構成される。

PSSは、発電機電気出力、回転数、あるいは端子電圧や電流を入力として、AVRに補助信号を加え、同期機の制動を改善する装置である。

AQR、APFRは同期機出力の無効電力や力率を一定にする装置である。また、OELは同期機の界磁巻線の温度上昇を限度以内とし、UELは安定度面から制限される同期機出力の低励磁側の運転範囲を制限する装置である。

これらの装置の内、電力系統の動特性に大きな影響を与える構成要素は、AVR、励磁機、PSSであるので、これらの要素についてはそれぞれ機器要素に対応した、計15種類の標準的なモデルをプログラムに内蔵させている。

なお、AQRやAPFRは一般にその応答速度が遅いこと、OEL、UELは特殊な条件下でのみ動作することから、標準モデルは内蔵せず、必要に応じて、後述の組み込みブロック論理で対応することとしている。特殊な励磁系モデルの場合も同様である。

②ガバナ

ガバナは、スピードガバナ(Speed Governor)の略称であり、日本語では調速機である。その基本的機能は発電機の回転速度を検出して、これが一定となるよう蒸気流量や水量などを調整するものである。例えば、発電機の電氣的出力を送りだす送電線路に落雷事故などが発生して、蒸気流量や水量などの入力に見合った出力が出せなくなると、発電機は加速を始める。このような場合、入力を絞って出力とのバランスを取る。また、近隣の発電機が何等かの原因で系統から離脱(トリップ)すると、送電網の電氣的調整機能により出力分担が自然に増加し、発電機は減速を始める。このような場合は蒸気流量や水量を出力とバランスす

るまで高める。このような制御を行うのがガバナである。このように考えると、ガバナは単に発電機の回転速度を調整・維持するものと言うより、回転速度を検出信号として利用した発電機入出力バランス機構と考える方がふさわしい。

最近、スピードガバナあるいは調速機と言うより、単にガバナと呼ぶことが多いのは、このような意味合いからである。

ガバナには機械的な要素が伴うため、必然的に通常運転時には励磁系のような高速な動きがとれない。このため、微小な周期的擾乱に対しては、電力系統の動特性に与える影響は小さい。しかし、擾乱が大きい場合、あるいは擾乱が小さくても周波数が一方向に変化する場合や、変動周期が長い場合には、ガバナの効果を無視できない。

火力や原子力機のガバナには、一般にボイラーの過熱器から高圧タービンへの蒸気流量を制御するCV(Control Valve)と、再熱器から中低圧タービンへの蒸気流量を制御するICV(Intercept Valve)とがある。また原子力機にはこの他に、CVを通さずに直接復水器へ蒸気をバイパスするBV(Bypass Valve)もある。ICVやBVは回転数(周波数)変動が大きい場合を想定したモデル化が必要である。

また、発電機負荷しゃ断時などでの回転数の過度の上昇を抑制するために緊急時弁制御機構がある。この機構は、回転数の上昇幅が大きい場合、その上昇速度が大きい場合、あるいはタービン出力と電気出力の差が大きい場合にICVやCVを急速に閉じるもので、擾乱が比較的大きい場合に考慮が必要となる。

水力機用のガバナは、一般的に水量調整用のガイドベーン操作機構からなっているが、 Kaplan水車などではランナ羽根角度を調節する機構となっている。

これらのガバナのモデルについては、緊急時弁制御機構も含めて標準的なモデルが組み込まれており、解析作業が容易となるようにしている。

③組み込みブロック論理

励磁系やガバナの代表的なモデルに関しては、前述したように標準的なモデルが内蔵されている。しかし、解析対象機の制御方式が標準的なモデルでない場合、特殊な解析

条件により標準的なモデルをさらに詳細に表現したい場合、あるいは新しい制御方式やモデルを検討する場合などには、組み込みブロック論理を用いることができる。

すなわち、各種の制御系個別要素（たとえば、積分器、一次遅れ要素、掛算器、非線形要素など）の定数と接続関係を指定することにより、任意のモデルを構成できるようにしている。また、この場合に面倒な初期値の設定作業を簡単化する工夫もしている。

（3）負荷モデル

電力システムの構成は、馬と荷車を結ぶロープの構成と対応したものである。発電機群の接続されている電圧階級の高い送電線（基幹送電線）ではループを含む複雑な構成となっている場合もあるが、需要地の電圧階級の低い送電線は変電所を中心とした放射状や樹枝状の構成となっている。このような構成上の特徴を生かし、負荷はある程度の大きさで一括して表現される。

さて、送電ロスを無視すれば、負荷の消費するエネルギーは発電機が供給する総エネルギーに等しい。電力システムの安定度解析とは、エネルギーの発生と消費の動的なバランスを見るのが基本であるから、需要側の応動を表現する負荷特性は、供給側の応動を表現する発電機の特性と同様に、できるだけ正確に表現しておく必要がある。しかし、負荷特性は、地域、季節、時間帯などによって変化するとともに、産業構造や生活様式の変遷など、時代とともに変化している。

また負荷は、工場などのモータから、冷蔵庫、テレビ、空調機器などの電化製品、白熱灯、蛍光灯、水銀灯などの照明機器、電鉄などまで、多種多様な機器で構成されており、発電機のように一つひとつの構成要素に着目したモデル化は、ほとんど不可能である。したがって、電力システムの安定度解析の立場からは適切な範囲の集合体として捉え、配電系統の変圧器、調相設備、配電線などとも一括して取り扱うのが現実的である。

本解析システムで用意している負荷モデルには、負荷の応動を系統の電圧や周波数変動の線形、非線形関数（静特

性）あるいは伝達関数（動特性）として表現する一般負荷モデルと、負荷の大きな部分を占め大幅な電圧変動に対してはその動特性をより詳細に扱うべきと考えられる誘導機モデルがある。

なお、モデルの定数の把握については、数年来、当所の協力のもとに全国大で系統故障時の負荷応動の自動監視記録が実施され、データが蓄積・分析されつつある。

また、誘導機の数膨大となるため、その特性を一つひとつ調査することは困難であるが、その定数は、容量、電圧、極数、型式、構造、用途などによって決まり、とくに大まかな傾向は容量との相関で把握し得る。本解析システムでは、誘導機モデルを用いた解析を容易とするため、誘導機群の平均単機容量を入力するだけで標準的な定数を算出、設定する機能を具備させている。

（4）送電系統モデル

送電線も、極めて短時間の現象、たとえば落雷時のサージなどでの過電圧解析などでは発電機と同じように微分方程式で記述され、しかも厳密には偏微分方程式（分布定数系）という非常に複雑な表現となる。しかし、システムの安定度などの動特性解析においてはここまで詳細に表現する必要はない。したがって、定格周波数（50または60Hz）での定常状態を仮定して、微分方程式から等価的な複素代数式（集中定数系）に変換してモデル化される。

また、送電系統は3相一組の回線を最小単位として構成されているが、送電線の1本1本を個別に表現するのではなく、3相をまとめて表現している。ただし、各相毎の現象の特徴が異なる不平衡事故時などには、3相対称座標法を用いて対処している。

変圧器についても、対象とする時間領域では集中定数で表現できる。一部の変圧器にはタップがあり、それぞれの巻線の基準電圧と異なった巻線比で運用される場合がある。さらには、移相変圧器のように、直角分のタップがあり、位相を制御している方式もある。これらについても等価変換を行い、計算機の記憶容量と計算時間の短縮を図っている。

(5) 直流系統モデル

交流送電線で長距離、大電力を輸送すると、電圧位相のねじれ（ロープの伸び）により、発電機どうしの同期運転が困難になることがある。

直流系統は、交流を一旦直流に変換してから送電し、再度直流を交流に変換して電力を送電する方式であり、その送電区間では電圧位相のねじれの問題は完全に排除することができる。

わが国では、この目的のために北海道と本州の連系に、また周波数が異なるため、交流連系が不可能な50Hz系統と60Hz系統の連系に用いられている。

通常、直流系統は両端ふたつの交直変換装置とそれを結ぶ直流送電線（送電線がない場合もある）から成っている。交直変換装置は、変換器そのもの、変換器用制御系、変換器用変圧器、交流フィルタ、調相設備、直流リアクトルなどから構成されている。

本解析システムにおいては、これらの設備の特性を、安定度が解析できる範囲で簡略化し、変換装置の交流部分では他の交流送電系統と同じ表現（実効値レベルの複素代数表現）、直流部分では平均値的な微分方程式表現としている。

変換の方式や制御系あるいはその定数などについても、わが国の代表的な方式についてはモデルやデータを内蔵し、

解析効率面での配慮をしている。

(6) プラントモデル

発電機が馬の筋肉とすれば、プラントは、馬の消化器・循環器系に対応する部分である。馬にも品種によって違いがあるように、プラントにも大きく分けて、火力、原子力、水力の区別があり、応答特性も異なっている。ただし、プラントの効果は、これまでに述べた種々の電力系統の構成要素の応答速度に比べてゆっくりしているため、解析目的によってはプラント特性まで考慮する必要のない場合も多い。必要となるモデルの範囲を、擾乱の大きさと解析対象時間によって区分すれば、表2-1-1のようになる。

本解析システムにおいては、プラントの種別毎に（場合によっては、プラント個別に）モデルが用意されており、解析目的に応じてその使用が取捨選択される。

(7) 安定化制御・保護方式モデル

電力系統の安定度を向上させるために、種々の制御方式が採用、検討されている。また、安定度が崩壊する場合でも、できるだけ早目にその状態を検出し、その影響が大きくなならないような対策が採用されている。

これらの安定化制御・保護方式のうち、わが国での採用実績のあるあるいは採用が検討されている、各種方式の機

表2-1-1 プラント関係のモデル化の程度

モデル	主要な解析目的	擾乱の大きさ	解析対象時間	モデル化の程度		注)
				ガバナ	プラント	
I	定態安定度	小～中	短	簡略	無視	注) 擾乱の大きさ： 中：ICVが動作しない程度までの擾乱（一回線事故など） 大：ICVが動作する。周波数変動が大きい（±0.5Hzを越える程度） 解析対象時間： 短：5～10秒程度まで、中：数分まで、 長：数分以上 ガバナ： 簡略：CV制御のみ 詳細：ICVや緊急時弁制御機構を含む プラント： モデルIIにおいて、原子力の場合は応答速度が速いため、周波数変動が大きい場合には詳細プラントモデルが必要となる。
II	過渡安定度	中～大	短	詳細	無視	
III	LFC、電圧安定性	小	中～長	簡略	簡略	
IV	緊急時制御	中～大	中	詳細	詳細	

能がモデル化されている。なお、故障の除去を目的とした、いわゆる主保護、後備保護リレーシステムは、その動作時間が極めて短時間であることから、プログラム内でのモデル化は行わず、シミュレーション上でのシーケンス設定（時刻と操作内容を指定）で模擬することとしている。

〔安定化制御方式〕

個々の発電機に密接に関係した安定化制御方式、例えば PSS や EVA（Early Valve Actuation：事故直後にタービン出力を急速に減少させて過渡安定度を向上させる方式）は(2)項で述べた発電機制御系モデルで実現されるため、ここでは、本システムに内蔵されている系統側の安定化制御方式のモデルについて述べる。

- ①直列コンデンサー：ロープの長さを見かけ上短くするので、専門的に言えば線路のリアクタンスを補償するために、直列にコンデンサーを挿入し、過渡・定態安定度を向上させる設備。
- ②SDR（System Damping Resister 制動抵抗）：送電線路のエネルギー輸送能力が欠落あるいは著しく低下した時、故障回復までの間、発電機の発生エネルギーを吸収し、当該発電機の加速を抑制する装置である。具体的には、重大事故が検出されると過渡的に抵抗を発電機近傍で投入し、発電機の電氣的出力を吸収して過渡安定度を向上させるものである。

- ③SVC（Static Var Compensator 静止型無効電力補償装置）：直列コンデンサーがロープの長さを見かけ上短くするのに対し、SVCはロープの伸びをダイナミックに補償するものである。具体的には、リアクトル電流などをサイリスタなどで制御し、無効電力を制御する装置であり、電圧変動の抑制を主たる手段として、過渡・定態安定度あるいは電圧安定性の向上も図る。本解析システムではコンデンサ電流も制御できる方式とし、電圧制御方式の一般化を図っている。

〔安定化保護モデル〕

安定化保護モデルとしては、全系の需給アンバランスの回復を行う周波数関係リレーと、一部で発生した発電機不安定現象の波及を防止する脱調検出リレーをモデル化している。

- ①周波数リレー：周波数低下リレー、周波数上昇リレー、周波数低下率リレーの3種類のリレーがモデル化されている。これらのリレーが動作すれば、送電線や、発電機、あるいは、負荷の決められた割合が自動的にしゃ断されるようになっている。
- ②脱調検出リレー：電圧と線路電流の変化などから、脱調を検出あるいは予測して、当該線路をしゃ断するリレーであり、8種類の方式がモデル化されている。

2-2 固有値法

振動の成分に分離する方法

2-2-1 電力系統の振動と定態安定度

第1章で馬とロープと荷車にたとえて安定度の概念を説明したが、電力系統の安定度は、過渡安定度と定態安定度に分けることができる。過渡安定度が送電線への落雷など大きな外乱に対する安定度のことを言うのに対し定態安定度は小さな外乱に対する安定度のことを言う。大きな外乱に対する安定度を調べておけば小さな外乱に対して調べる必要はないと考えるのが普通であるが、何故小さな外乱に対する安定度を調べるかといえば2つの理由がある。ひとつの理由は、小さな外乱に対する安定度すなわち定態安定度を調べる方が簡単でありまずこれをチェックをしておくということがある。定態安定度の保てない運用断面はこの段階で没となる。

ふたつめの理由は、かなり本質的な部分にかかわるが、定態安定度は外乱の発生場所に関係なく電力系統全体の安定性を問題としているという点である。つまり、電力系統に発生した振動が増大するような性質になっているかどうかを全系的に調べるのが定態安定度解析である。

このような振動は、バネとおもりのモデルで考えるのが分かりやすい。ばねとおもりのシステムで言えば、定態安定度と言うのはバネの伸び縮みが小さいときの安定性である。伸び縮みが小さい範囲であれば、ばねにかかる力とばねの伸びとは一定の比例関係にある（これを線型

という）。バネの伸び縮みの幅が大きいとバネにかかる力とバネの伸びとの比例関係がくずれる（これを非線型という）が、ある範囲では線形のモデルが有効であり、線形解析の様々な有利性が活用できる。

2-2-2 固有値

(1) 振動の周波数とダンピング

電力系統に発生する定態的な振動は多数のおもりとバネのモデルで表すことができる。まず、一個のおもりが一本のばねで釣り下げられている簡単な場合を考えてみる。おもりを少し引っ張っておいて手を離すと（何かで外乱を与えると）、おもりは振動を始める。摩擦や空気抵抗などが

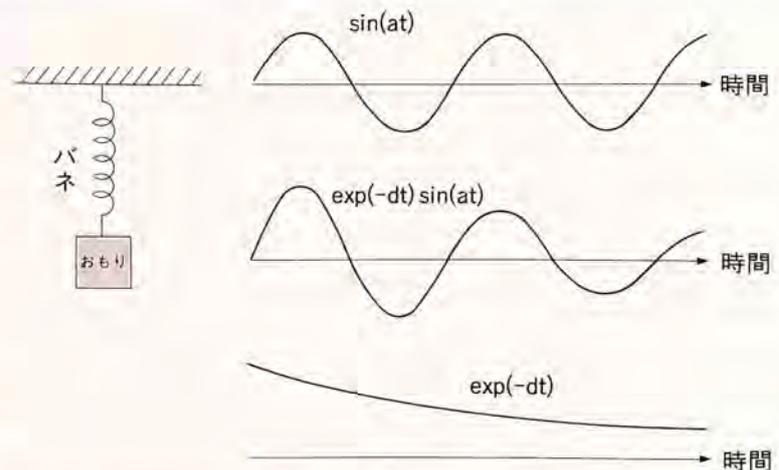


図2-2-1 おもりとバネの自由振動

なければこの振動は一定の振幅Cを保っていつまでも続く。このように一定の周期でおなじパターンを繰り返す振動を自由振動と言い、この場合縦軸におもりの位置、横軸に時間 t をとってグラフを書くと正弦波となる。つまりおもりの運動は $C\sin(at+B)$ の形の関数で表される。ここで a は振動の角周波数と言い、周波数 f に 2π をかけたものである。 B は振動の位相と呼ばれるもので正弦波のどの点から振動が始めるかを示すものである。

普通は摩擦や空気抵抗があるためこの振動は減衰してい

く。このとき、振動の振幅は一定の比率で小さくなっていく。たとえば、初めの一秒間に振幅が0.9倍に小さくなれば次の一秒間にも0.9倍の割合で小さくなり、初めの振巾に対しては0.81倍になる。このように減衰しながら振動を続ける重りの運動は、 \sin 関数に指数関数 $\exp(-dt)$ が掛かった形すなわち、 $C\exp(-dt)\sin(at+B)$ で表される。ここで d をダンピングと言い、通常は正で振幅は一定の速さで減衰するが、負となると振幅が一定の速さで増大し不安定となる。

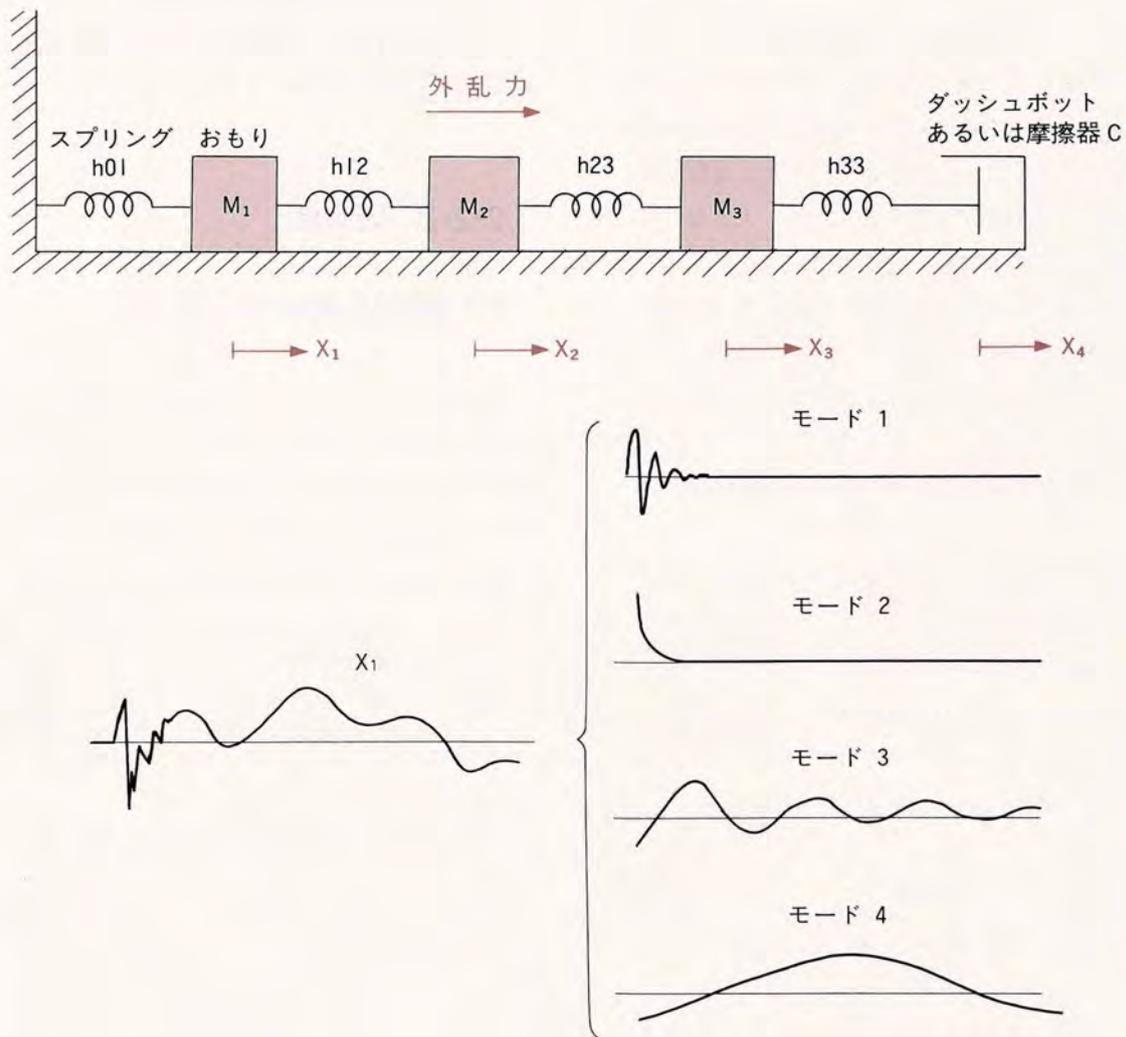


図2-2-2 おもりの振動と振動の成分(モード)への分解

d と a は振動の基本的性質を表わすもので、これら一対の組み合わせを振動の成分あるいはモードと言う。外乱の種類を変えてもモードすなわち d と a は変わらず、振動の振幅 C と位相 B が異なるだけである。

摩擦が極めて大きくなると、おもりは正弦波状の振動をしなくなり単調に一定の速さで元の位置に戻るような運動をしめすが、その場合の運動は単純な $C \exp(-dt)$ で表される。この場合にも d が正の数の場合は減衰、負の数の場合は発散を表す。これは周波数が 0 のモードと考えることができる。

上記のようにおもりの運動には正弦波状に振動しながら減衰あるいは発散するものと単調に減衰あるいは発散するものの 2 種類があって、前者を振動モード、後者を単調モードと呼んでいる。

(2) 複雑なシステムの振動のパターン

3 個のおもりと 4 個のバネにダッシュポット（摩擦器）からなるやや複雑なシステムを考えてみる。このシステムに外乱を加えた後の一番のおもりの自由振動の波形は図 2-2-1 に示すようになりかなり複雑なものとなる。この図をよく見てみると、いろいろな成分に分けられることに気がつく。初めのうちにだけ見られる細かな振動、それより幅広く長続きしている成分、全体にゆっくりとうねっている成分などが見られる。

波形分析器でこれらの成分をわけると図 2-2-2 に示すように 4 個の成分に分けられる。これら 4 個の成分はどれも前に示した。

振動モード…… $C \exp(-dt) \sin(at+B)$

あるいは

単調モード…… $C \exp(-dt)$

の形になっている。これら 4 個のモードにモード 1 ～モード 4 の番号を付けておく。実はどんなに複雑なシステムでも特別な場合をのぞいて線型のシステムであれば自由振動の波形はすべてモードに分けることができる。そして一つでも d が負となるモードがあると不安定となる。

他のおもりの振動波形を見てみると一番目のおもりの動きとは一見かなり違った波形となる。ところが、全部のお

もりの振動波形について同様に波形分析器で成分に分けてみるとどの振動波形も一番目のおもりの波形から得られた 4 個の成分（モード 1 ～モード 4）に分けられて、しかもこの 4 個以外の成分は含まれないのである。

ここで、モード 1 だけに着目してみる。3 個のおもりの振動波形にそれぞれ含まれるモード 1 の成分を分離してみると、

おもり 1 の波形…… $C_1 \exp(-dt) \sin(at+B_1)$

おもり 2 の波形…… $C_2 \exp(-dt) \sin(at+B_2)$

おもり 3 の波形…… $C_3 \exp(-dt) \sin(at+B_3)$

となり、振幅の比 ($C_1 : C_2 : C_3$) と振動の位相関係 ($B_2 - B_1, B_3 - B_1$, など) がどのような時点でも一定に保たれる。しかも、どのような外乱に対してもこの振幅の比と位相関係は同じになる。つまり常に一定のパターンを保って振動するのである。

このように、あるモードに着目すると、a で決まる周期と d で決まるダンピングの振動が、各観測量に (C_1, B_1)、(C_2, B_2)、(C_3, B_3) で定まる一定のパターンで現れることが分かる。種々の外乱によって生じる複雑な波形も多数のモードの組合せによって表すことができる。

(3) 固有値と固有ベクトル

振動モードの場合の d と a の組合せを複素数で表した $-d + ja$ を固有値という（実際には $-d + ja$ が固有値であればその共役である $-d - ja$ も固有値になるがここでは説明を簡単にするため虚部が正のものだけで説明する）。単調モードの場合は実数となるので $-d$ が固有値となる。単調モードは a が 0 として考えれば良いのでここでは振動モードについてだけ説明する。

初等数学の教科書にあるように、

$$\exp(-dt) \sin(at)$$

の代わりに複素数の指数関数

$$\exp[(-d + ja)t]$$

を用いると、振動モードを簡単に表すことができる。

この複素数の指数関数は図 2-2-3 に示すように複素平面上を一定の速さで回転しながら一定の割合で短くなっていく棒の先端の点の動きを表し、その影の位置を描いてみる

と振動モードの波形になっていることが分かる、
 (C_1, B_1) 、 (C_2, B_2) 、 (C_3, B_3) で定まるパターンにつ
 いて、次のような複素数のベクトル

$$[C_1 \exp(jB_1), C_2 \exp(jB_2), C_3 \exp(jB_3)]$$

で表したものを固有ベクトルと言う（厳密に言えば、他に
 も変数があるので固有ベクトルの一部である）。3個のお
 もりのこのモードの振動成分を固有値を用いて表すと

$$\text{おもり1の波形} \cdots C_1 \exp(jB_1) \exp[(-d+ja)t]$$

$$\text{おもり2の波形} \cdots C_2 \exp(jB_2) \exp[(-d+ja)t]$$

$$\text{おもり3の波形} \cdots C_3 \exp(jB_3) \exp[(-d+ja)t]$$

のように表すことができる。

この3つの指数関数は図2-2-3に示すように複素平面上

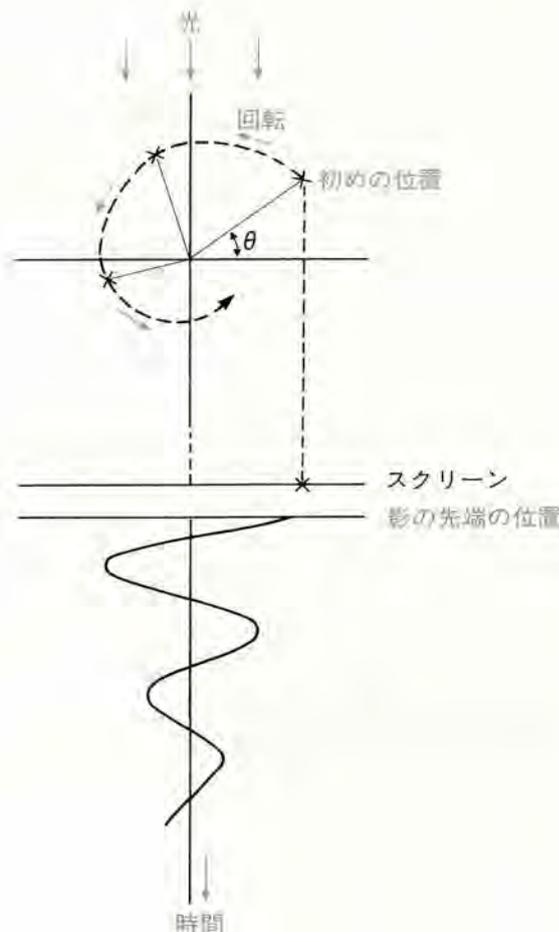


図2-2-3 回転する棒と影

を一定の速さで回転しながら一定の割合で短くなっていく
 3本の棒の先端の点の動きを表すことになる。影の位置を
 描いてみると3個のおもりのこの振動モードの波形になる。
 このとき3本の棒の長さの比と位相関係（角度のずれ）は
 常に一定に保たれる。つまり、固有ベクトルによりその振
 動モードのパターンが明瞭に分かることになる。

このように、ある角周波数 a とダンピング d を有する
 モードが、対象システムの特典部分にどのような大きさ C 、
 どのような位相 B で現れるかを、線型モデルから一括して
 分析するのが固有値解析であり、その結果得られた各 (a, d)
 に対する各部の (C, B) の組を固有ベクトルと言う。

2-2-3 大規模電力システムの固有値解析

(1) 定態安定度の解析手法

発電機、負荷、送電網によって構成される電力システムの動
 特性は一般に非線形微分方程式で表現される。

定態安定度は定常運転状態にある電力システムに微小外乱が
 加わったときの解析であるため、潮流計算によって得られ
 る平衡点からの微小変動量 ΔX に対する安定性を問題とし
 ている。

したがって、定態安定度解析は通常図2-2-4のように曲
 線を直線で近似した（線形近似）線形状態微分方程式 $\dot{\Delta X} = A \Delta X$
 が用いられる。この A を特性行列という。

一般に、定態安定度を解析する手法は時間領域での解析
 手法と周波数領域での解析手法に大きく分けることができ
 る。この他にも微分方程式そのものは用いないが、潮流計
 算によって得られる相差角 δ によって判別する方法や、電
 力ヤコビアンから得られる $\partial P / \partial \delta$ を用いて定態領域の
 安定性を判別する簡便な方法もあるが、これらは一応の目
 安として特定の系統の経験則をベースとした大まかな判断
 に用いられるに過ぎない。

これら解析手法の分類を図2-2-5に示す。

時間領域の解法のうち、数値積分法については後で詳し
 く説明するので、ここではその論理にはふれず定態安定度
 面からの位置付けを概観しておく。

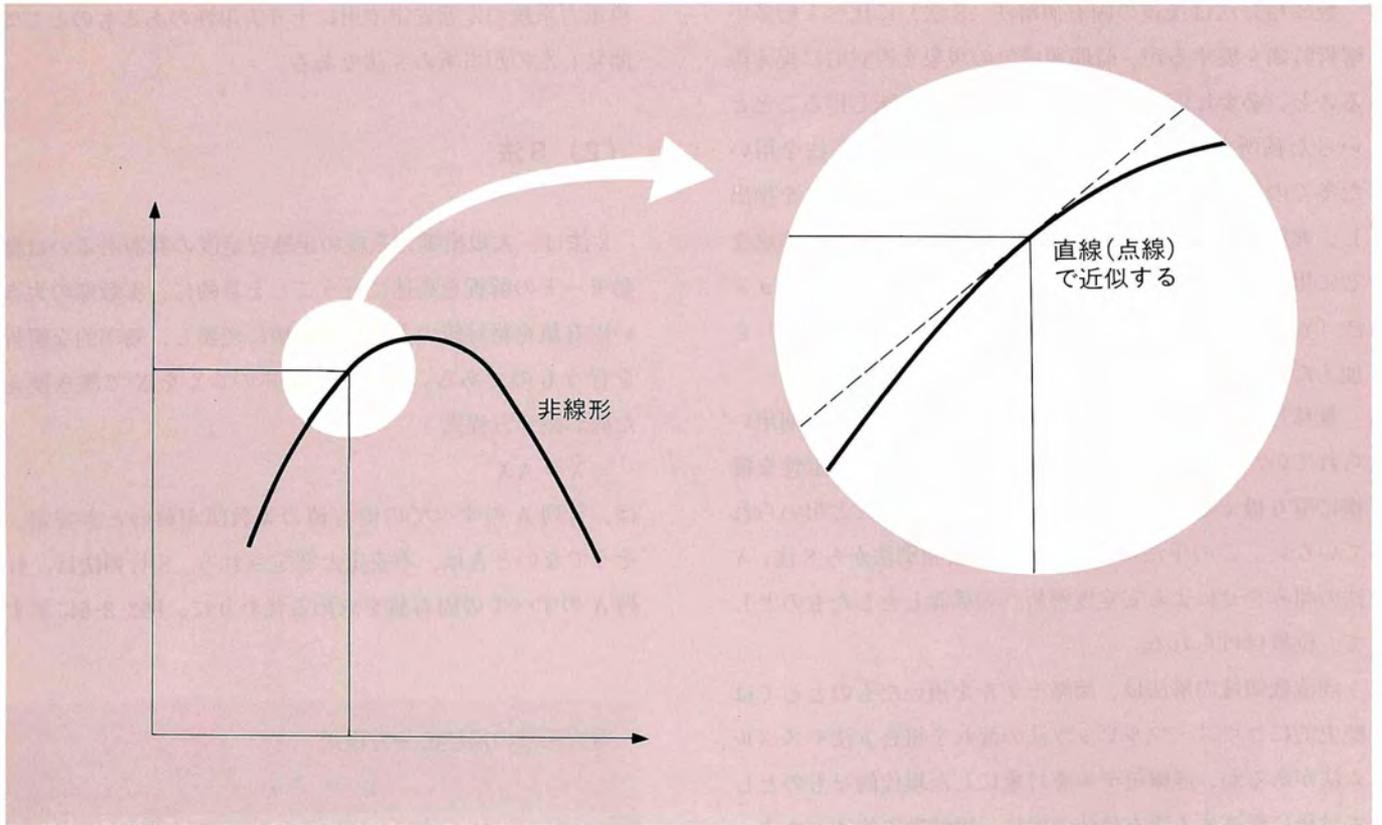


図2-2-4 非線形特性の線形近似

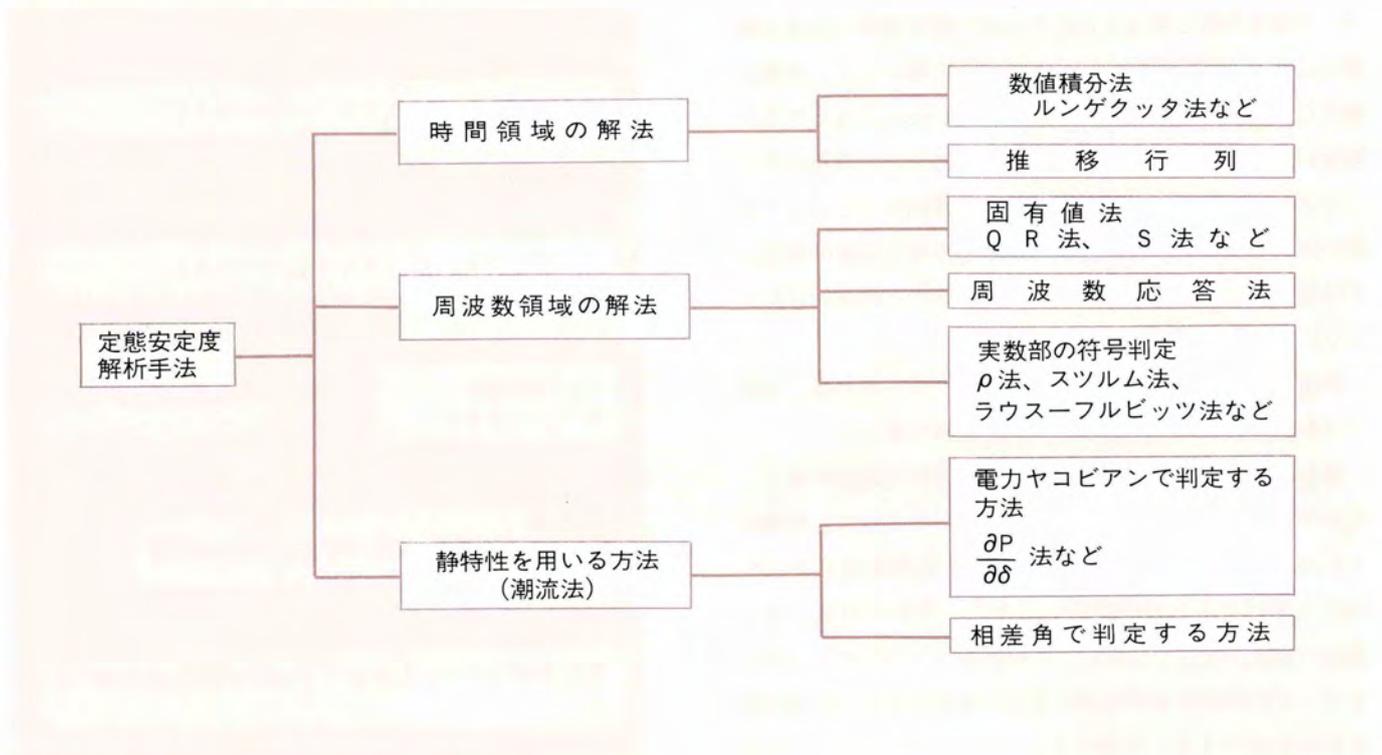


図2-2-5 定態安定度解析手法の分類

数値積分法は後述の固有値解法（S法）に比べ1桁多い解析時間を要するが、時間領域での現象を視覚的に捉え得ること、必要に応じて非線形性の効果を加味し得ることといった長所がある。したがって、この手法はS法を用いた多くのケーススタディーに対し、典型的なケースを抽出し、非線形性の効果のチェックや現象説明用の図面作成などに用いるのが得策である。具体的にはシミュレーション法（Y法）に比較的微小な外乱（線路1回線解放など）を加えた形で解析が行われる。

推移行列法はそのアルゴリズムの簡潔さから一時期用いられていたが、本来時間領域の解析の利点が非線形性を縦横に取り扱える点にあることから現在はほとんど用いられていない。この手法は古典的な安定度判別法からS法、Y法の組み合わせによる安定度解析への橋渡しをしたものとして、位置付けられる。

周波数領域の解法は、簡略モデルを用いたものとしては歴史的にラウス・フルビッツ法の流れを組むρ法やスツルム法があるが、詳細モデルを対象にした現代的なものとしては後に詳述する固有値法他に、周波数応答法がある。この方法も、大規模な電力系統の特性行列に対し、そのスパース性を活用し得るものであるが、解析効率の改善が困難なこと、不安定要因の因果関係が捉え難いこと、対策立案のための感度解析が試行錯誤的なプロセスにならざるを得ないことなど、S法と比較すると見劣りのする点が多い、この方法は、制御理論におけるボード線図やナイキスト線図の流れをくむもので、基本的に大規模電力系統の解析よりは特定の制御系の設計などに向けたものと位置付けられよう。

現在、最も信頼性があり広く用いられているのは、行列の固有値そのものを直接求める固有値法である。

固有値解析を行う汎用的な手法としてはQR法があり、汎用プログラムとしては、第1章で述べたように、米国のアルゴンヌ研究所が各国に呼びかけて共同開発したEIS-PACと呼ばれるものがある。しかし、解析の対象とする系統の規模が大きくなると、この汎用ソフトでは、所要メモリーや計算時間が非常識に大きなものとなり（計算時間は系統規模の3乗に比例する）、スーパーコンピュータを用いても実用性の面から難点がある。この点を解決し、大規

模電力系統の定態安定度用に十分実用性のあるものとして開発したのが当所のS法である。

(2) S法

S法は、大規模電力系統の定態安定度の判別あるいは振動モードの解析を高速に行うことを目的に、実数部の大きい固有値を絶対値の大きい固有値に変換し、効率的な解析を行うものである。すなわち前述の ΔX を X で置き換えた線形微分方程式

$$\dot{X} = AX$$

は、行列 A のすべての固有値の実数部が負のとき安定、そうでないときは、不安定と判定される。S行列法は、行列 A のすべての固有値を求める代わりに、図2-2-6に示す



図2-2-6 S法の原理

行列の変換を行い、行列 S の絶対値の大きい固有値だけを高速に計算する方法である。

系統の安定性は、行列 S の絶対値最大の固有値 λ_{smax} の絶対値が、1 より大きいとき不安定と判定される。

行列の絶対値最大の固有値あるいは絶対値の大きい複数個の固有値は、ベキ乗法やランチョス法によって効率的に求めることができる。この理由は、ベキ乗法やランチョス法ではベクトルに行列を掛ける演算が主要な部分となっており、行列のスパース性や構造性を最大限に利用することができるからである。

ランチョス法は複数個の固有値を同時に求めることができ高速演算に適しているが、まるめ誤差に弱いため、数値計算上の安定性に欠け、実用化が困難であった。そこで、次のような改良を行い高精度化・高速化を図ることとした。

- (1) 単一のベクトル演算であったものを複数個のベクトルすなわち行列の演算に拡張し精度を格段に向上させた。
- (2) 求めた固有値のうち精度が不足しているものについてだけ繰返しランチョス法を適用する反復法を導入した。
- (3) 行列演算そのものの高速化を図った。

FACOM M-380を用いた時の計算時間は発電機数178、ノード数947、ブランチ数1091の大規模系統で約26秒であった。ちなみに、この系統で潮流計算に要した時間は約4秒であり、その6～7倍の時間で定常安定度の詳細解析ができるということは画期的なことであった。

2-2-4 固有値の感度解析

ここでは、「PSS 定数最適化設計」と「定常安定度の予防制御」の2つをとりあげ、図2-2-7に示す固有値感度解析の応用の考え方と有用性を簡単に説明する。

(1) PSS 定数最適化設計

発電機励磁系の安定化制御システム (PSS) は発電機の加速中にはその電氣的出力を増大させ、減速中には出力を減少させるよう励磁系を制御して、発電機の加減速振動を抑えるものである。この装置は比較的安価であることから

近年、電力系統の安定度を向上させるための技術として積極的に導入されるようになり、その制御性能もより高いものが要求されるようになっている。

PSS は従来、設置される発電機それ自身の安定度向上を主眼に一機無限大系統モデルを用いて設計が行われてきた。しかし近年の電力各社間の連系線強化にともない系統全体としての安定度への影響を評価することも必要になりつつあり、このために大規模系統を対象とした PSS 設置箇所の選定問題および PSS 定数の最適設計問題の重要性が高まっている。

① PSS 設置箇所の選定

多数の発電機のどの励磁系にPSSを設置するのが効果的かという問題は重要である。ここで示す方法は固有値感度を用いることにより大規模系統におけるPSSによる安定度向上効果を簡略に評価し、効果的な設置箇所を選定するものである。発電機jの回転数偏差 $\Delta\omega_j$ をAVRのPSS端子に直接入力したときの固有値の変化率 $\Delta\lambda$ を用いて

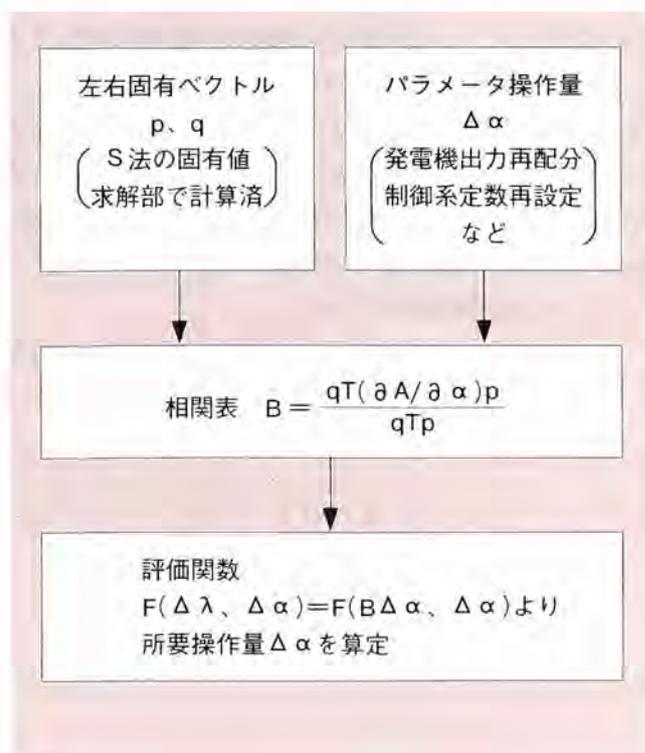


図2-2-7 固有値の感度解析

計算し、この絶対値の大きさで着目動揺モードに対する各機PSSの安定度向上効果を概略評価することができる。

② PSS定数最適化設計

S法によれば、多機系統の相互干渉を考慮に入れた制御系の設計が、従来のような試行錯誤過程に依らず簡単に実現できる。すなわち、設計パラメータとして、発電機jのPSSの時定数(T_j)やゲイン(G_j)をとることによりこれらパラメータの微小変化に対する固有値 λ_i の変化率 $\partial \lambda_i / \partial T_j$ や $\partial \lambda_i / \partial G_j$ を計算する。そして系統の安定性を示す評価関数として、固有値の実数部が大きいほど大きい値をとるような関数(現在のS法プログラムでは指数関数を用いている)を定め、これを最大傾斜法によって最小化する。この計算過程に上記固有値感度を用いることにより、全系の安定度向上を考慮したPSS定数の設計が効率的に行える。

(2) 定態安定度の予防制御

電力供給コストの低減に対する社会的要請は一段と強くなってきており、より高度な経済運用の必要性が増してきている。これに対しては、特に経済運用上の大きな制約となっている安定度の評価をよりきめ細かく行うことが有効と考えられる。すなわち、現在固定的に定められている安定度制約に対し、時々刻々変化していく電力系統の状態に応じて適正な信頼度水準を維持しつつ供給コストが最小となるような系統運用が考えられる。

ここでは予防制御を「予測需給断面に対する定態安定度

解析や定態安定度の面からみた想定事故解析(事故後断面に対する固有値解析)を行い、大停電発生の危険性(定態的な不安定性)があれば、事前にそのような状態から安定状態に引き戻すために制御を行う。」と定義する。

固有値感度を用いた定態安定度の予防制御論理は概略以下のとおりである。

① 定態安定度余裕

パラメータとして発電機jの出力 P_{Gj} をとり各発電機出力の微小変化に対する固有値 λ_i の変化率 $\partial \lambda_i / \partial P_{Gj}$ を計算する。次に、固有値 λ_i をこの変化率で割ることにより系統が不安定とならないような発電機jの出力指定値の増減変化可能量を予測し、この値を各発電機の定格出力で割った値により各発電機の定態安定度余裕を評価することができる。

② 予防制御

予測需給断面や想定事故に対し系統が不安定となると判断されるときは、何らかの方法でこれを安定化する必要がある。ここでは発電機の負荷配分の調整によりこれを達成する場合について考える。具体的には発電コストあるいは出力指定値変更量の総和を最小化目的関数とし、上記定態安定度余裕を制約条件とする線形計画問題を解くことによって、安定化に最も効果的な発電機出力配分変更案を求めるものである。このように安定度制約をきめ細かく扱うことによって、経済運用の枠が大きく拡大されることになる。

2-3シミュレーション法 ——時々刻々の動きを追跡する方法——

2-3-1 シミュレーションの必要性

電力系統の安定度解析でシミュレーションが必要となるのは電力系統に比較的大きな動揺が想定される場合であり、その基本的な目的は各種想定外乱に対する安定・不安定の評価あるいは不安定（停電）が懸念される場合の有効な対策の検討等である。

電力系統解析で通常対象とする外乱の多くは、送電鉄塔などへの雷撃による地絡事故である。雷は、統計上電力系統事故の大半を占めている。これに対し送電線の倒壊あるいは変電設備の損壊といった、いわゆる設備の損傷事故の可能性は極めて小さい。

雷撃防止の研究も鋭意進められているが、まだしばらくは雷による事故の頻度が最も高いものであろう。雷によるショックは電力系統の運用状態のほか、雷撃を受ける地点や地絡に至る相数、回線数によって大きく影響される。基幹送電線の複数回線が地絡するような場合には思わぬ大停電に波及する恐れがある。

こうした現象を把握するためには、一時実際の電力系統で人為的に事故を発生させることも考えられた。事実、昭和30年頃までは人工故障試験が何度か行われていた。しかし、今ではこのような実験が難しい社会的環境にある。高度に情報化されたわが国では、電子計算機やオフィス事務機器など付加価値の高い電気機器の割合が増えており、瞬時の電圧低下でも機能が停止するものが少なくない。こうした影響を考えるだけでも主要設備を対象とした人工故障試験はほとんど不可能となっている。他方、シミュレーション技術は格段に進歩してきており、系統構成要素のモデル化を正確に行えば、的確な現象把握やさらにはより幅の広い検討が行える。

電力系統に事故が発生した場合の系統の周波数、電力潮流、電圧などの動揺現象の安定性は過渡安定度と呼ばれる。

例えば電力系統に3相地絡事故が生じると、事故前にその地点を通過していた電力エネルギーの流れが突発的に止まる。このことは、事故点近傍の発電機群がそれまでに発生していた電力エネルギーの輸送経路を突然に失うことを意味する。しかし、蒸気タービンや水車から供給される入力エネルギーは電力の変化に速やかに追従することはできず、この入出力エネルギーの不均衡により発電機の回転数が急激に上昇（周波数が上昇）する。これを放置すれば発電機の同期運転状態が崩れ数秒内にトリップとなる。失われた発電電力が更なる外乱となり、他の発電所の連鎖的な停止を招き、大停電ともなり得る。こうした一連の現象へ対応するには、長めに見ても数秒程度の裕度しか無い。このため、想定事故に対する安定度制御面の対応は事前に十分考慮しておく必要がある。

電力の安定供給にとって、安定度の維持は必須条件と考えられている。このため、系統の拡充計画時あるいは至近年や週間の運用計画などにおいて安定度解析は最も重要な検討項目のひとつとなっている。そして、想定する事故毎に電力系統の動揺現象が安定に推移するかどうかを判断するには、シミュレーションに頼るしかない。

わが国の設備拡充計画に当たっては、1回線3相地絡事故に対して、系統が安定に保たれることを基本条件としている。安定度シミュレーションは、新設あるいは増強すべき送変電設備ルートや電圧階級などを決定付ける重要な解析ツールとなる。

運用計画では、事故による社会的影響の大きい主要送電ルートについてはより過酷な事故想定も採用される。こうした過酷な事故の場合、停電の完全な防止よりはその範囲

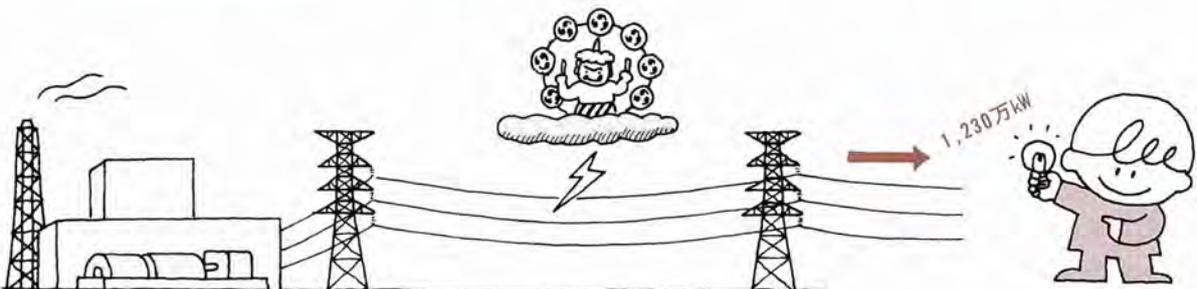
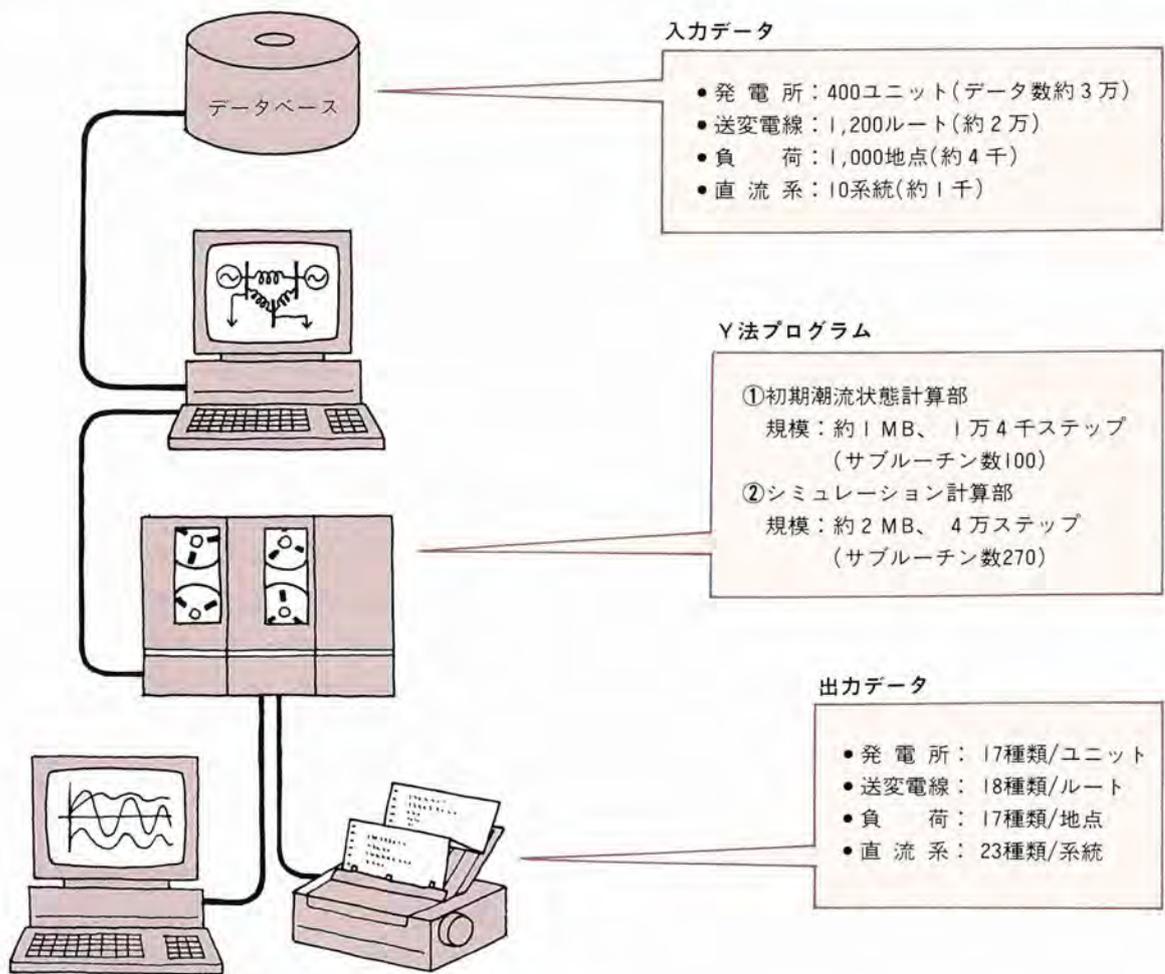
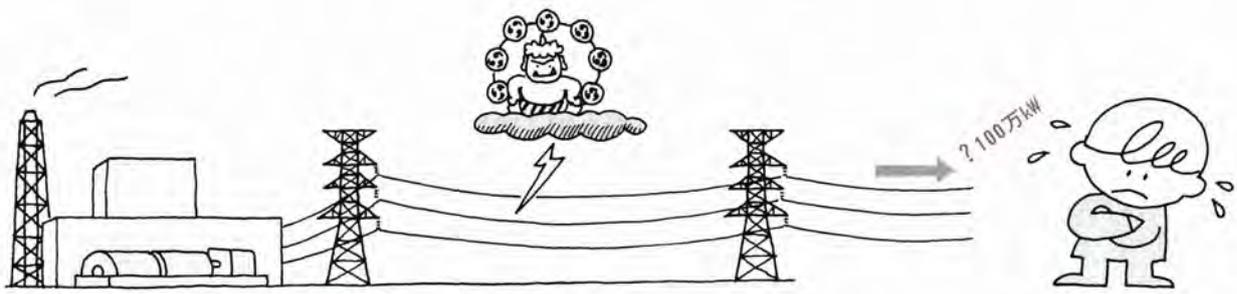


図2-3-1 何故シミュレーションが必要か

を狭めることが重要なポイントであり、事故発生直後に一部の発電機を自動的に切り離す（電制）とか、あるいは負荷の一部を一時的にしゃ断（負制）するなどの事故波及防止対策が効果的とされる。安定度シミュレーションは、効果的な事故波及防止システムの仕様選定にも欠かせない。

この他に安定度シミュレーションは、事故により電力設備を流れる過大な電流がしゃ断器のしゃ断能力範囲内であるかどうかの検討、事故を検出する保護リレーの整定の検討、送電線電流が近傍の通信線に及ぼす電磁誘導障害の検討など幅広い用途にも用いられる。

このように、安定度シミュレーションは電力システムを合理的に計画し、高信頼度な系統運用を行うために欠かせない基本項目であり、電力各社では一日に平均して数回～数十回程度の頻度で用いられている。

2-3-2 シミュレーションの特徴

電力システムの過渡的な動揺の検討のためには、通常外乱が発生した後のおおよそ10～20秒程度のシミュレーションが必要とされる。シミュレーションの対象は、前章で述べたように発電プラントの蒸気系や原子炉系の動特性から負荷の電圧・周波数依存特性までを含む、広範な要素モデルから成るが、それぞれは系統安定度という観点からシミュレーションに求められる精度を満たすため、必要にして十分な構造としている。

シミュレーションは、様々なモデルの結合から成る連立微分方程式を対象に、計算処理に適した数値積分法を用いて時系列的に解くことである。その特徴は、第一に対象が数多くの性能の異なる発電プラントや送変電ネットワークの複雑な組合せから成るという点であり、しかも、それぞれの状態の振る舞いは非線形な特性を示す場合が多い。

たとえば、原子力プラントの場合、原子炉、タービン、発電機およびこれらを協調して制御する機能などを模擬するためには、1プラントあたりその変数(X)は少なくとも100次元程度は必要である。また、送変電網のエネルギーの流れを表す変数(Y)の大きさについては、対象とする電力システムの規模、すなわちノード（発電所の接続母線、変

電所の両端母線、送電線の開閉所母線など系統を構成する設備の結合点の呼称）の多さによるが、実用面からは1,000～1,500程度は必要である。

これらの変数(XとY)は、それぞれ独立に変化するものではない。現象的に言えば、これらは発電プラントなり負荷が電力系統と接続する点での電圧・電流変数を介して相互に関わり合っている。この電圧・電流条件により送変電網を流れる電力が定まる。また、系統事故が各々の発電プラントに与える影響の度合いは系統事故地点と発電プラントとの電氣的遠近あるいは事故の厳しさ等に依存する。これらの事故は、送変電網数式モデルの変更として表現される。

安定度シミュレーションの第二の特徴は、10数秒間以上のシミュレーションにわたって十分な解析精度を保証する必要があるということである。個々のモデリングが正確であるとともに、これらを解く方法が適切であることが望ましい。シミュレーションでは、数式モデルを適当な時間間隔で継いでいくことにより計算を進めるという方法（数値積分法）が用いられる。Y法プログラムで採用している数値積分法は、積分計算そのものが安定して継続でき十分な精度が保てること、また積分計算のための余分な計算メモリーが少なくプログラム機能の拡張が容易なこと、などの諸点から4次のルンゲクッタ法を採用している。電力システムの安定度に関わる特性の中にはほとんど瞬時ともいえる程の高速なものも有りシミュレーションに用いる積分時間の刻み幅も十ミリ秒程度の細かい時間間隔（計算を一時間ステップ進める間の状態変化に対する解析誤差が 10^{-8} 以下）を採っている。

たとえば10秒間の解析を行うためには最低限1,000回（10秒/0.01秒）の積分計算が必要となる。実際には負荷の電圧依存特性などの理由から、ひとつの時間断面の計算で繰り返し計算を要するため、単純積分の数倍程度の計算量が費やされる。こうした計算を数千の変数を持つ数式モデルに対して行う訳である。安定度シミュレーションに要する計算労力が如何に莫大なものかが推察されよう。

このため、当研究所が開発したY法プログラムには種々の工夫が凝らされている。数式モデルは計算上、行列の形式で扱われるが、その非零要素の占める割合が数%と極め

て小さいという特徴を活かし、計算機メモリーと計算時間の双方の面で徹底した効率化を図っている。たとえば、変数の数が1,000個の場合、普通に解くには行列だけで $1000^2 = 100$ 万個ものメモリーが必要となるが、この方法を採用すればわずか数千のメモリーで済む。これに伴い、計算する上での行列要素もそのままの2次元表示でなく、非零要素のみから成るコンパクトな1次元配列で取り扱われる。

さらに、前述の Y の次元は送変電網の電圧・電流が3

相バランスした計算を前提としたものであるため、アンバランスとなる外乱条件に対しては送変電網の変数 Y の2倍の大きさの新たな変数と行列要素を加える必要がある。これにより全体のモデルはさらに大きくなるが、変数増大による計算負担ができるだけ抑えられるような計算手順（対称座標法：電氣的に相関のある各相の電圧・電流を、相関の無い3つの異なる変数に座標変換して計算の簡素化を図る方法）を採用し、効率的な解析を可能としている。

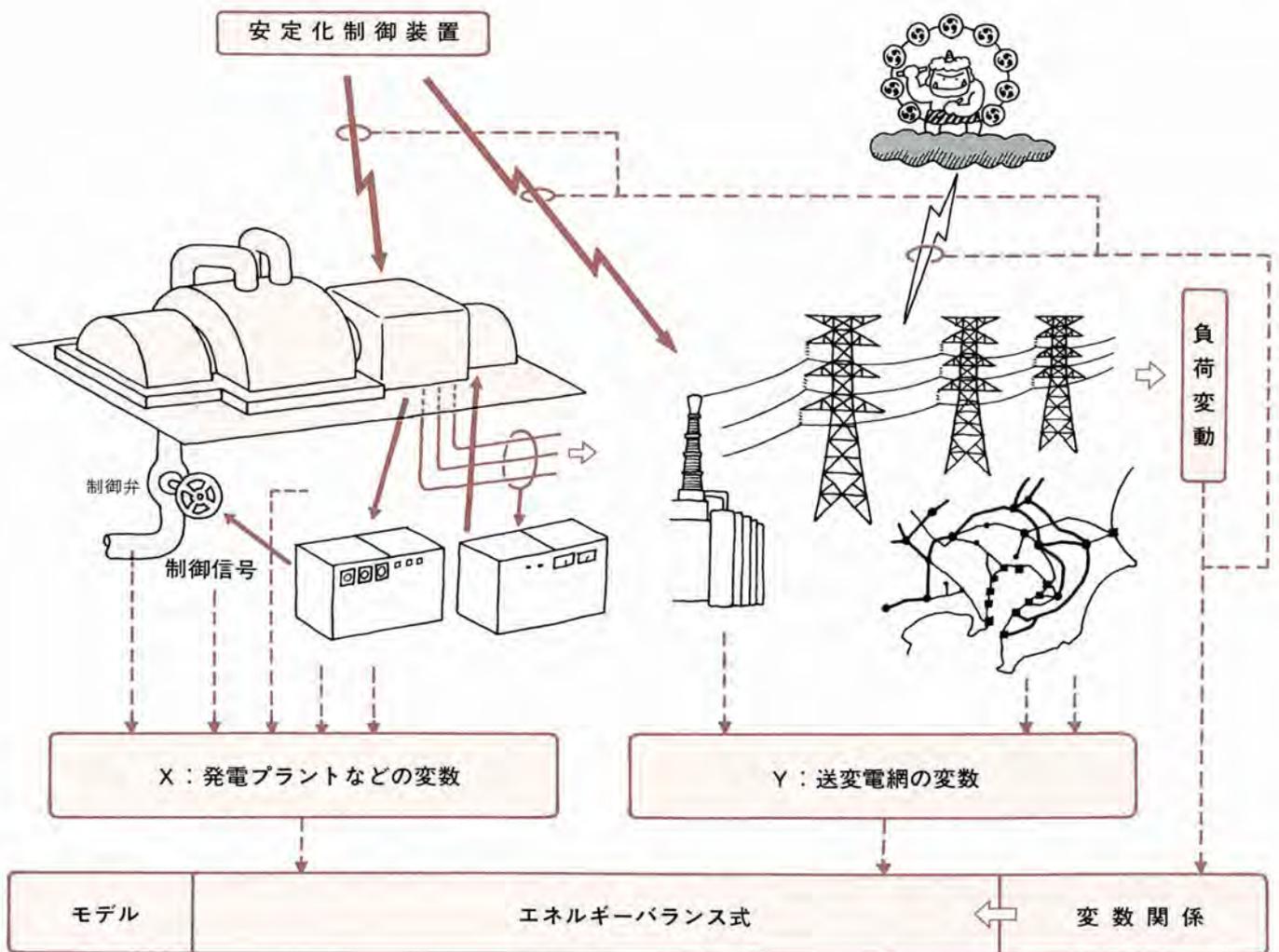


図2-3-2 電力系統の数式モデル

2-4 ユーザのための支援機能

大規模電力システムの安定度を高精度で解析するためには、必要な精度を有するデータの作成とその維持・管理および解析目的に適した加工処理などが重要である。とくに、入力時のミスを防ぐことができるように使いやすく、分りやすく、また入力ミス等によって生じたデータの誤りを発見し易くする支援システムは重要である。

開発した支援システムは図1-3-1のように7つのプログラムによって構成されている。

- 年度更新等データの変更を行うプログラム
 - ①データ変更プログラム
- データの誤り等を発見するプログラム

- ②データ基本チェックプログラム
- ③潮流チェックプログラム
- ④発電機および制御系の特性チェックプログラム
- データの規模を圧縮するプログラム
 - ⑤系統縮約プログラム
- 隣接系統のデータを取込むプログラム
 - ⑥データ結合プログラム
- シミュレーション解析や固有値解析等のプログラムに合うようにデータを加工するプログラム
 - ⑦解析データ作成プログラム

これらのプログラムの実行は、利用者が図2-4-1のようにCRT画面から、必要な処理やデータを選択して指令できるシステムとなっている。大まかな流れは以下のようになる。

- i) 最初に新規データの更新を行う。
- ii) 更新した各データの誤りチェックを行い、データに誤りがあれば修正する。
- iii) 必要に応じてデータの縮小（系統縮約）を行う。
- iv) 隣接系統がある時はその系統とのデータ結合を行う。
- v) シミュレーション解析や固有値解析を行うためのデータを作成する。

以下にこれらのプログラムの概要を説明する。

①データ変更プログラム

データ変更プログラムの実行の概要を図2-4-2に示す。既にチェック済のデータに、CRTより新規のデータを加え、項目別に整理する。

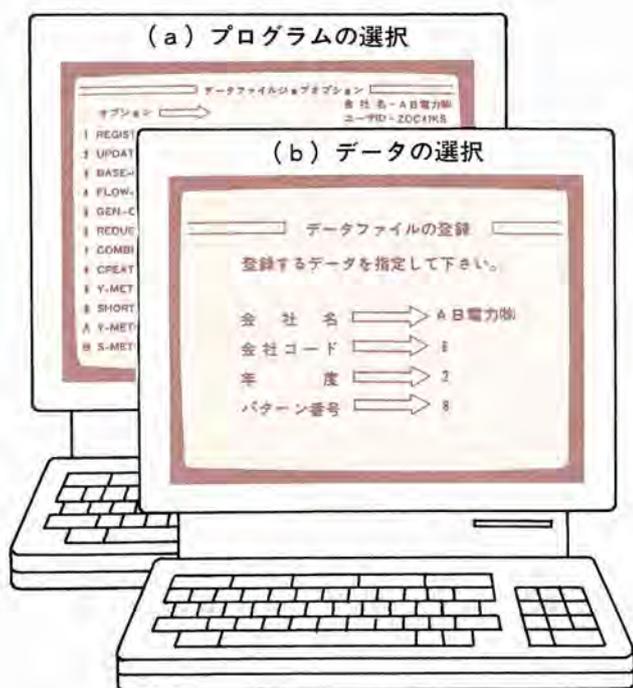


図2-4-1 ユーザ支援システムの画面入力例

②データ基本チェックプログラム

データ基本チェックプログラムの実行の概要を図2-4-3に示す。以下のような項目について、データの基本的な大小チェック等を行う。

- i) 各機器固有のデータが常識的な範囲内にあるかどうかのチェック（発電機の定数チェック等）
- ii) 簡単な演算によるデータ範囲のチェック（送電線電圧階級と距離による送電線インピーダンスのチェック等）

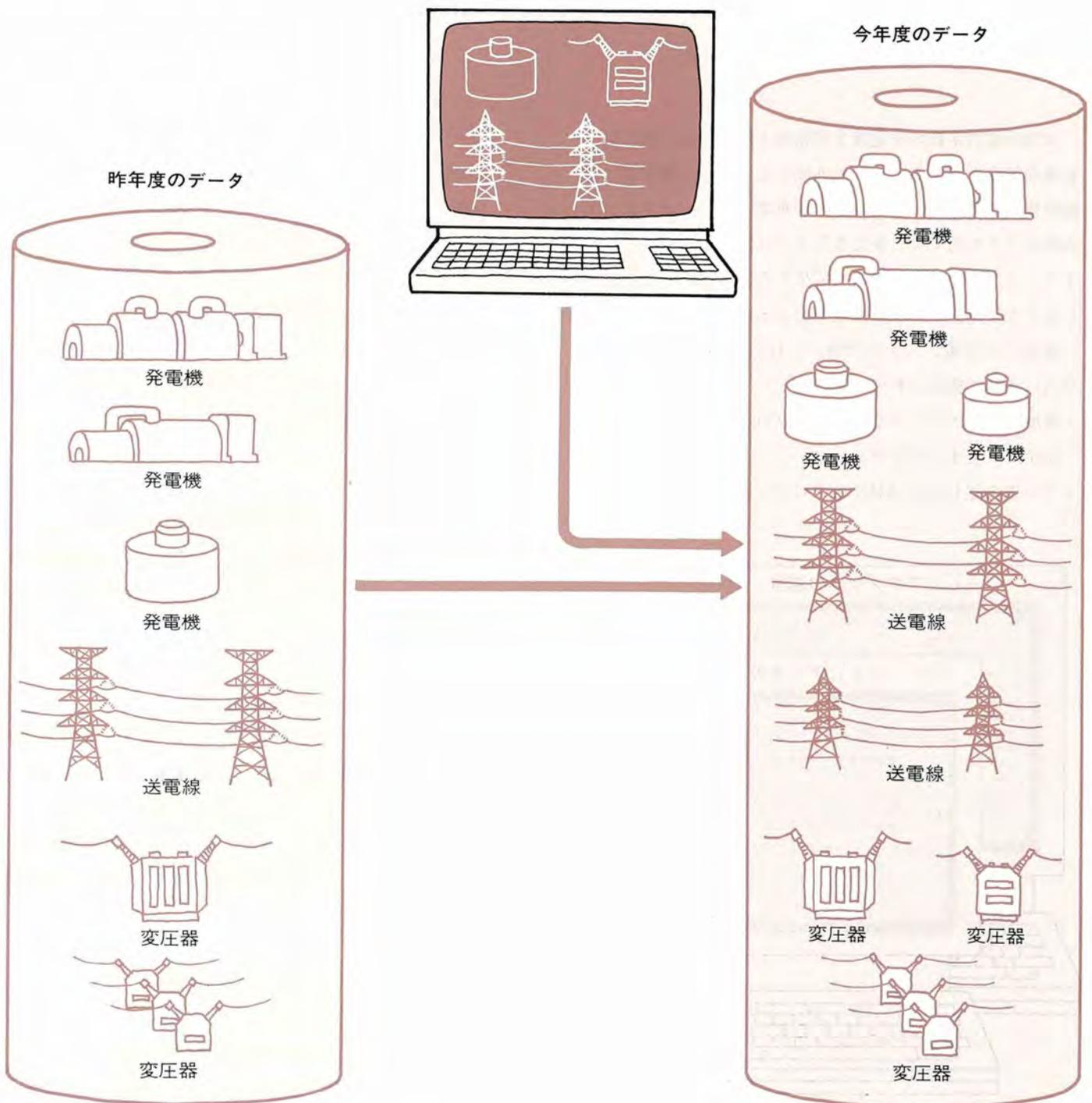


図2-4-2 データ変更プログラム

iii) 複数のデータ間の大小関係や比率のチェック（発電機や送電線の抵抗分とリアクタンス分のチェック等）

③潮流チェックプログラム

潮流チェックプログラムの実行の概要を図2-4-4に示す。入力データによる潮流計算を行い、以下のような潮流上問題となる点をチェックする。

- i) 母線電圧の過不足
- ii) 線路の過負荷
- iii) 発電機の無効電力の過不足

iv) 変圧器タップ調整時のタップの過不足

④発電機および制御系の特性チェックプログラム

概要を図2-4-5に示す。各発電機・AVR・GOVの特性を以下のようなシミュレーションを行い定数の誤りをチェックする。

- i) 発電機本体に関しては、3相突発短絡のシミュレーションを行い定数のチェックを行う。
- ii) AVRに関しては、ボード線図の表示や、ステップ応

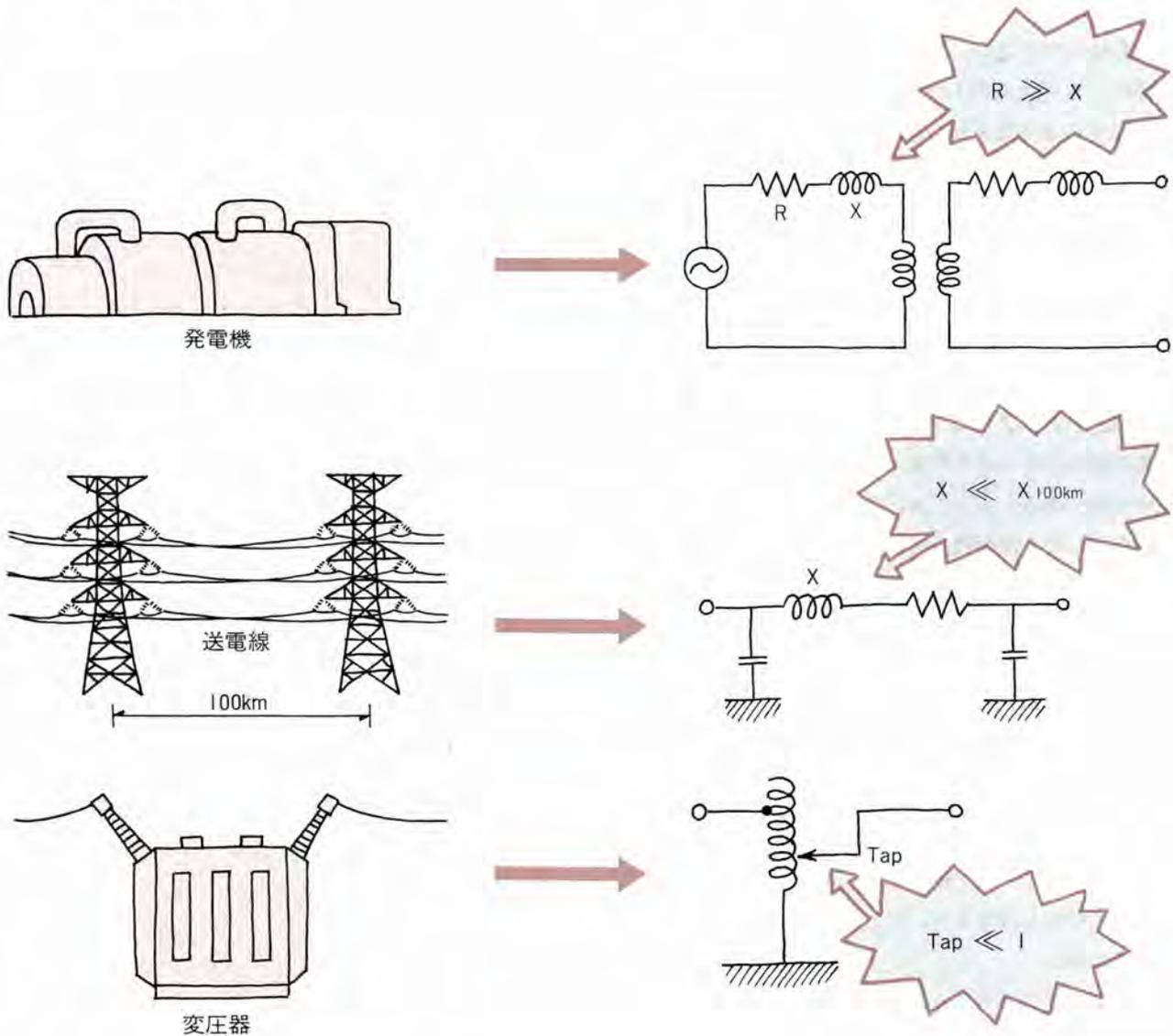


図2-4-3 データ基本チェックプログラム

答の単体シミュレーションを行い、定数のチェックを行う。

- iii) ガバナも同様に、ボード線図の表示や、負荷しゃ断時の単体シミュレーションを行い、定数のチェックを行う。

⑤系統縮約プログラム

大規模系統をそのまま解析すると、多大な労力と時間を要する。従って、動揺の小さい遠方系統や動揺がたかかも1台の発電機のような部分系統に対しては、その系統を等価な1台の発電機に置き換え（系統縮約）て解析を効率化する機能を持たせている。

系統縮約プログラムの実行の概要を図2-4-6に示す。系統縮約は以下のような系統に関して、同図 (a) (b) に示すような放射状系統やループ系統の一部の縮約が行えるようになっている。

- i) 発電機だけの系統
- ii) 負荷だけの系統
- iii) 発電機と負荷が混在する系統

⑥データ結合プログラム

大規模系統の全データの作成・チェックを短時間で行うことは不可能である。また、メンテナンスを行う場合にもデータを分割した方が便利な場合もある。そこで、データをいくつかに分けて管理する方法がとられる。その場合にはこれらのデータ群を結合するプログラムが必要となる。

データ結合プログラムの実行の概要は図1-3-1に示すとおりである。本プログラムは最大10個の系統を1度に結合することができる。

⑦解析データ作成プログラム

膨大な数の設備データや運用条件、またその時々解析目的に柔軟に対応し得るよう、できるだけ生の形で管理・保存されている。

解析データ作成プログラムは、この各種系統原データの中から特定の解析に必要なデータを選択して、解析手法に合った形に変換するプログラムである。これにより、解析プログラムの有効な活用体制が整えられる。

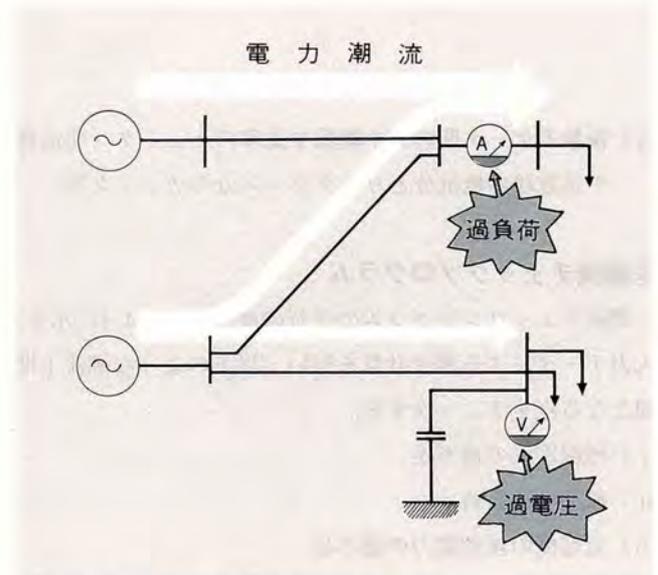


図2-4-4 潮流チェックプログラム

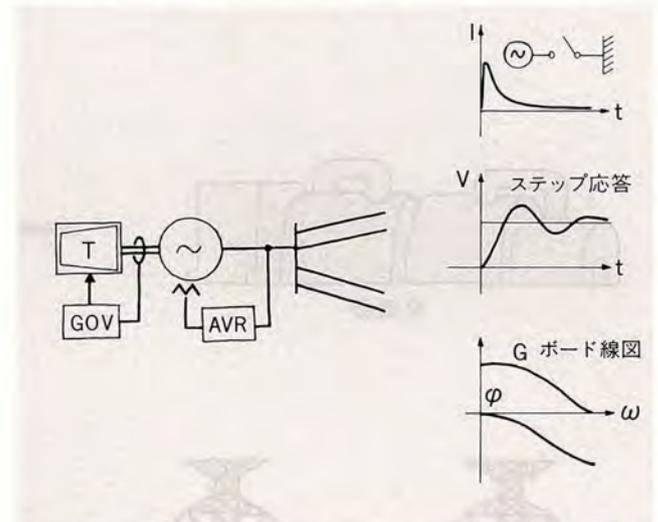


図2-4-5 発電機チェックプログラム

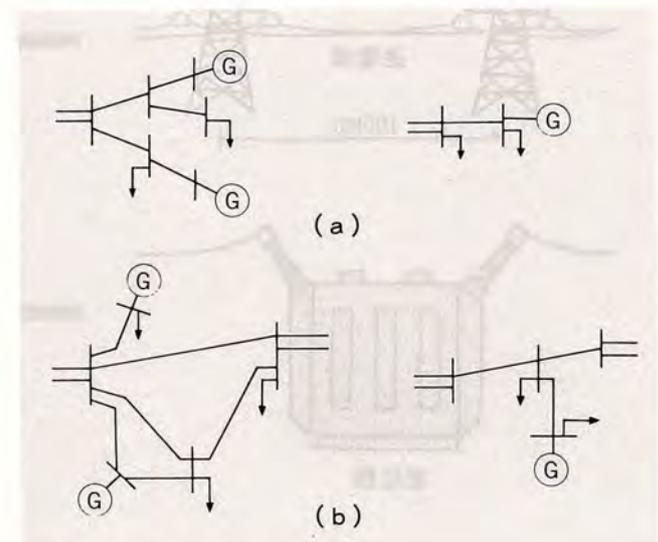


図2-4-6 系統縮約プログラム

第 5 章

開発したシステムの
実システムへの適用例

第3章 開発したシステムの実システムへの適用例 ● 目次

狛江研究所 電力システム部 系統制御研究室長 谷口 治人
狛江研究所 電力システム部 系統制御研究室 主査研究員 浅田 実
狛江研究所 電力システム部 系統計画研究室長 内田 直之
狛江研究所 電力システム部 系統計画研究室 主査研究員 高崎 昌洋
狛江研究所 電力システム部 系統計画研究室 研究担当 吉村 健司
企画部 研究計画課 主任研究員 田中 和幸

3-1	大規模連系系統における長周期動揺の安定化対策	45
3-2	長距離大電力送電の安定度向上対策	52
3-3	重大事故時の事故波及防止対策	56
3-4	事故復旧時の制限条件の検討への適用	62

本解析システムは、系統構成や需給条件を変えた様々な条件下で、電気事業の実務における日常的解析作業に使用されてきている。その適用例は、当所がこれまで直接関与してきたもののみを眺めても70件程の依頼研究を受けており、送電網の拡充計画の検討や直流系導入効果の評価など設備計画に係わるもの、工事などによる系統構成変更に伴う対策や系統事故時の原子力・火力発電所の運転方式の立案など系統運用に係わるもの、また官庁試験や現場試験のための事前検討やそれに伴う試験条件の設定など現場作業に係わるものなど多岐にわたる。

ここでは、本解析システムを全面的に適用した具体的な適用例として、将来の中西地域社間融通に伴い懸念されている長周期電力動揺の安定化対策を検討した内容の概要をはじめ、いくつかの典型的な例を示すことにする。

3-1 大規模連系系統における長周期動揺の安定化対策

ここでは、本解析システムを全面的に適用した具体的な適用例として、将来の中西地域社間融通において懸念されている長周期電力動揺の安定化対策を検討した内容の概要を示す。この検討は当所と中・西地域各社（中部、北陸、関西、中国、四国、九州、電発）が昭和62年から平成元年にわたり共同で実施したものである。

3-1-1 対象系統と検討課題

中西連系系統は、日本の中部以西に電力を供給している60Hz系全体であり、電力会社7社で構成され、相互に社間連系され電力融通を行っている。図3-1-1上部にその概略図を示す。東地域の50Hz系統とは周波数変換所を介して接続されており、地域間融通は行われるが、電力動揺の伝搬はここで切り離される。したがって中西地域における電力動揺はこの周波数変換所以西の現象として特定される。

中西連系系統の骨組みは500kV 2回線送電線であり、その系統構成は典型的な長距離串型系統となっている。このような系統では減衰の遅い、いわゆる長周期動揺が発生し易く、連系運用とくに広域融通に対する大きな制限要因となることが多い。

このような問題に対する対処の仕方としては、先ず現象の物理的本質を明らかにし、対策の基本的方向性を見出すことが肝要である。しかる後、より具体的な対策の立案、詳細シミュレーションによる確認、さらに種々の不確定要因に対するロバスト性の持たせ方の検討などを行うのが得策である。以下の検討例もこのような流れに沿ったものである。

ここでの検討は、最も経済的と考えられるPSSによる安定化に主眼を置いた。従来のPSS設計の考え方は、ローカルに見た発電機の安定度の向上が主目的で、系統全体の安定度の向上といった見地からPSSを設計するということはほとんど無かった。今回のPSSの考え方は、発電機固有の安定度に留まらず、系統全体の安定度を積極的に向上させようというものである。この場合どの発電機にこのようなPSSを設置し、どのように全系から見た最適化をすれば良いかが中心課題となる。またPSSの次に経済的と考えられ、長周期電力動揺を電圧面から副次的に抑制する可能性を持つSVCの効果についても合わせて簡単な分析を行っている。



解析データ設定作業



図3-1-1 約200機の発電機から成る中西詳細モデル系統

3-1-2 対象系統のモデル化

この問題を検討するために、先ず解析の対象とするモデル系統を作成した。作成に当たっては、検討する現象が中西地域全体にわたるものであることから、各社を容量見合いで均等に扱うこととした。これに本解析システムの能力と実務面での解析効率の点から、小水力発電機群から成る系統や下位系統など枝葉の部分の部分を圧縮したり、同一発電所内の同一仕様・同一運転状態の複数発電機を等価1機表現するなどを行い、検討目的にあったものとして図3-1-1下部に示すモデルを作成した。ただし、運用状態により、各社系統のモデルの規模は若干変化する。このモデル系統をここでは中西詳細モデル系統と呼ぶことにする。このモデ

ル系統の作成に当たり、必要な解析データの加工処理に前述の支援システムが駆使された。想定した系統構成と需給断面は、需要最大時（ピーク断面）と最小時（ナイト断面）、および電力融通量をパラメータとして合計9断面を作成した。

さて、前述した現象の物理的解釈や対策の基本的方向付けを行う段階では、定量的な厳密性よりは定性的な理解の容易さを優先させた方が効率的である。そこで中西全系大で見た主要な動揺成分を保持しつつ、このモデル系統を簡略化することを考える。このため作成したモデルが図3-1-2左上部の中西簡略モデル系統である。このモデルでは合計200機近い発電機を16グループに分け、単一発電機扱いとしていること、送電網も基幹部に着目した縮約をし

ていることなどから、特定の発電機の動きや個別の対策の評価などを直接定量的に求めることはできないが、グループ毎に見た特徴や対策の基本的な評価が概括的に与えられる。長距離串型系統はまた「魚の骨型系統 - fishbone system」とも呼ばれる。この簡略モデル系統はまさに魚の背骨に着目し、小骨部分は思い切って簡略化（縮約）しているが、このような大幅な簡略化過程でも中西連系系統に内在する動揺成分（以下モードと呼ぶ）のうち主要なものは保持されており、支援システムの縮約機能が大きな力を発揮する。

3-1-3 簡略系統による検討

簡略モデル系統における各発電機の定数や容量、出力などは、支援システムの縮約機能で算定されたものを用いている。しかし、各発電機の制御系については、その影響を単純に捉え得るように同一のものを使用している。また、

PSS も同一のタイプとし定数は各発電機毎に設計したものをを用いた。

(1) 基本的な動揺形態

まず、対象系統の基本的な動揺形態を知るため、PSS が無い場合の動揺形態を求めた。図3-1-2下部にこの系統で発生する電力動揺のうち減衰の遅い2つの固有振動の動揺形態（モード）を示す。これは、S法解析で得られた固有ベクトル（実部、虚部）から各発電機の出力変化に対応したものを選び（出力変化そのもののモード分析は固有値解析上能率が悪いため、出力変力に最も敏感に追従する発電機の加速・減速分、すなわちすべり変化を選定している）、系統の左端から順にプロットしたものである。また横軸は連系線（背骨部分の線路）のインピーダンス、すなわち各地点間の電氣的距離に比例させている。

この串型系統には多数の固有振動が存在するが、その中でも上記の2つの振動は周期が1秒以上の特にゆっくりと

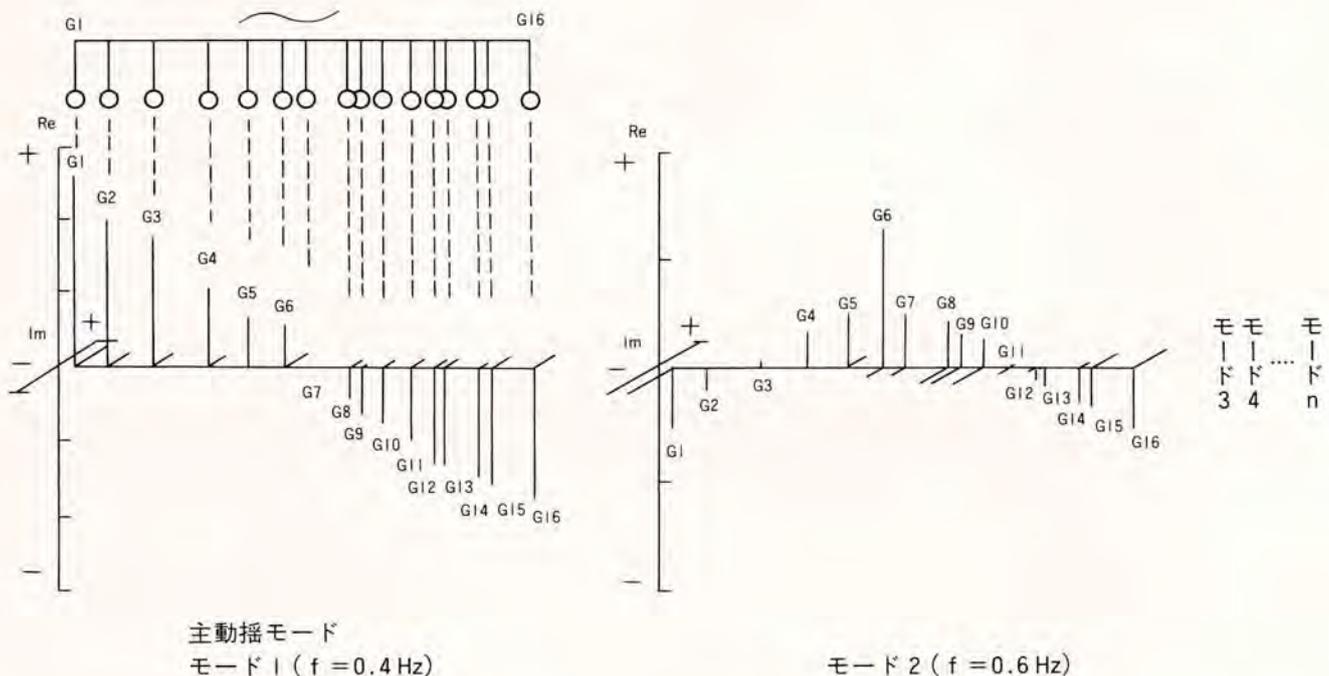


図3-1-2 中西間略モデル系統の電力動揺形態(固有ベクトル)

した動揺である。各動揺の周期の長い順にモード番号を付けると、動揺周波数 $f=0.4\text{Hz}$ のモード1（以下、主動揺モードと呼ぶ）は系統の中心部を節として2つの発電機群に分かれて振動する串型系統を代表するモードである。また、 $f=0.6\text{Hz}$ のモード2では中央の発電機が両端の発電機に対して逆位相で振動している。このように、モード n は概ね n 個の節で $(n+1)$ 個の発電機群に分かれて振動している。そして主振動モードに比べ、 n が大きくなるほど特定の発電機とそれ以外の発電機群との間で振動する傾向が強くなっている。これらの各動揺は系統の両端を開放端とする定在波のようなものを形成している。

つぎに AVR の影響を簡便に捉えるため、全系一律にその時定数とゲインを変えた時の各モードの変化を調べたところ、各モードとも時定数とゲインの双方に対して、ある値でダンピング（減衰）が最悪となることが示された。時

定数に対する検討の一例を図3-1-3に示す。一般に動揺周波数が低いモードほど時定数が長いところにこのような最悪点を生ずる傾向がある。この現象は系統固有の振動と励磁制御系の相互作用（共振）によるものと考えられる。またこれらの検討から、串型系統の長周期動揺は、通常の電源線で高速 AVR が負制動を生じ易いのと異なり、逆に低速の AVR がより不安定になることが特徴的に示された。

さらに連系線の回線数や潮流が変化した場合でも、ダンピングは特定の回線数、潮流で最悪となる。すなわち、AVR によっては連系線の回線数を増やしても、潮流を軽くしても、逆にダンピングが悪くなる場合がある。この傾向も系統固有の振動と励磁系の相互作用（共振）によるものであり、送電線の回線数や潮流がある特定の値の時に共振状態が最も強くなるために生ずる現象であると考えられる。

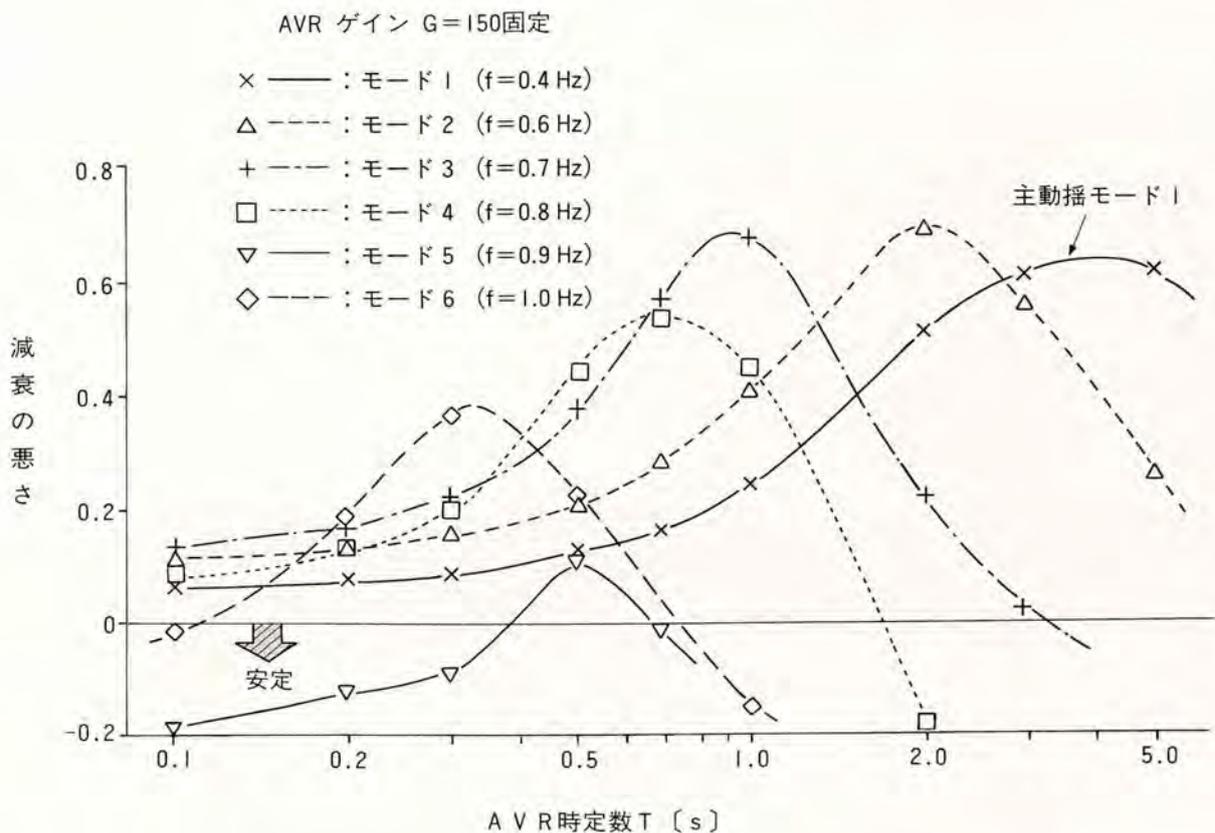


図3-1-3 AVR時定数に対する各動揺モードのダンピングの変化

(2) 安定化対策

前述のように、大規模な系統の全域にわたって発生する長周期動揺を安定化させるためには、① PSS を含む各発電機の励磁制御系の協調をとること、②背骨に当たる連系線の適切な箇所に SVC を設置し動揺の伝搬や反射を抑えること、③同じく連系線の適切な地点を直流で分割し動揺の伝搬を遮断すること、④さらには背骨に当たる500kV 連系線を2ルート化して全系の電氣的距離を半減し長周期動揺成分を消滅させてしまうこと、などが考えられる。その対策のコストは後者になるほど高くなるが、技術的検討の難しさは前者になるほど大きい。ここでは、コスト的に最も有利と考えられる発電機の励磁制御系の協調による対策を主としてとりあげた。もっとも、励磁系的高速化(サイリスタ励磁への取替え)が必要となる機数がかなりの数にのぼると考えられる時には、SVCによる安定化もコスト的に競合する可能性が出てくる。そこでSVCによる対策についても合わせて簡単に検討することとした。

① PSS による安定化効果

S法に具備されているPSSの自動最適化論理を用い、次の主要な結論を得た。

- 主動揺モードに対する安定化効果はAVRが高速であるほど大きい。AVRが低速の場合には、各動揺モードの相互作用が現れ易いため、PSSによる効果は十分には得られない。
- 16機全ての発電機に超高速AVRとPSSを設置し、これらのPSSの定数を一括して最適化した結果、顕著な効果が得られた。
- 以上はひとつの基本潮流断面に対して最適化されたPSS定数であるが、連系線の回線数や潮流の増減に対しても幅広い安定性が確保されていることを確かめた。

これらのことから、実系統においても主要な発電機により高速なAVRを用いたPSSを設置すれば、融通電力の大幅な向上が期待されることが示された。これらの検討結果は、並行してシミュレーションによっても確認された。こ

れはS法で無視している種々の非線形性の影響をチェックしたものである。

② SVC による安定化効果

SVCモデルは簡単のため、スローブリアクタンス1%の静特性表現として模擬した。S法を用いた主動揺モードに対する固有ベクトル分析をベースに、以下の主要な結論が得られた。

- 主動揺モードに対する500kV発電所(16箇所)の母線電圧の動揺状況(固有ベクトル)を見ると、東側の変電所群と西側の変電所群が互いに逆位相で振動しており、しかも西へ行く程その振幅が大きくなっている。したがって、電圧動揺を抑えることにより主動揺モードを安定化させるためには、西側の方にSVCを設置するのが有効と予想される。
- そこで西の端の500kV変電所にSVCを設置してその効果を調べた結果、ほぼ十分な安定化が図られることが示された。また、設置点を東にずらしてゆくと、西端から2番目の地点までは同程度の効果が見られるが、それより東へ移すと急激に効果が減少して行くことが確かめられた。
- 西端500kV変電所にSVCを設置し、西端発電機の一部にPSSを設置(西端発電機を容量比8:1の2つに分け小容量の方の発電機にPSSを設置)し、両者の相乗効果を調べたところ、PSSの電力動揺抑制効果とSVCの電圧動揺抑制効果の協調を取ることにより、さらに顕著な安定化効果の見られることが示された。

3-1-4 詳細系統による検討

前節の基礎的検討で、将来の中西系統に懸念される長周期不安定動揺がPSSのにより回避し得る可能性が示された。これをより確実なものにするためには、実系統に近いモデル系統を用い、PSS最適化対象発電機の選択や、これらのPSSがローカルな動揺に与える影響などを具体的に検討しなければならない。これらについて、ここでは図3-1-1に示した詳細モデル系統を用いて、想定される種々

の運用状況を対象とした検討を実施した。

(1) 固有値解析による PSS の最適化

まず、対象系統の発電機（200機弱）から PSS を最適化する候補発電機（複数）を選定し、その中から 1 台を選び最適化したもの、2 台を選び一括最適化したもの、3 台一括最適化したもの、6 台を選び 3 台ごと別々に一括最適化したもの、6 台一括最適化したものなどの安定化効果を比較検討した。また、最適化条件として採用した需給断面はピーク断面であり、社間融通電力としてはベースとなる「小」のケースと、かなり大きめにとった「極大」のケースの 2 通りである。さらに、安定化効果を検討した需給断面はピークおよびナイト断面であり、社間融通電力をパラメータとしている。

これらの最適化断面の選定は、安定性の裕度をどの程度に設定するか、また PSS の定数を何年ごとに見直すかなど、実運用面での判断に俟つ部分も多く、一概には定め難い。ここでは、仮に定めた運用断面に対して安定性を維持すべきことを目標に検討を進めることとする。

① 最適化候補発電機の選定

今、対象としている詳細モデルには 200 機近くにはほぼる発電機があるため、PSS 最適化の効果をひとつひとつ検討することはその計算量、労力とも膨大なものとなる。そこで、その選定を簡便に行う方法として以下に述べる簡易 PSS による評価を行った。

簡易 PSS による評価とは、発電機の回転数偏差 $\Delta \omega$ を AVR の PSS 端子に直接入力するものとし、この入力の有無により安定化対象の固有値 λ の変化量 $\Delta \lambda$ を計算し、この値により PSS 設置の効果を評価するものである。以下では、固有値 λ の変化量 $\Delta \lambda$ を「簡易 PSS 感度」と呼ぶこととし、その絶対値が大きいほど、すなわち簡易 PSS が安定側に効こうが不安定側に効こうがその相関が強いものは PSS 設置効果が高いと判定する。

この方法により、中西詳細モデル系統の全発電機を対象に、簡易 PSS 感度の上位のものから順次 PSS 最適化候補発電機として選定することとした。

② PSS の最適化

選定した発電機から 1 台を選び、先ずベースとなるピーク需要断面において、その PSS 定数の最適化を行った。その結果は、融通電力を次第に増加して行くとき長周期動揺が不安定となったり、ローカルモードでの振動が発生したりした。そこで、融通電力を大幅に増加した厳しいピーク断面に初めから着目した最適化も検討した。

また、定期補修時などの運用面での融通性から発電機の系統安定化責務を分散させるため、最適化を同時に行う台数を複数にした検討も実施した。さらに需給断面が極端に異なるナイト断面での安定性も合わせて検討した。

これらの検討結果の一部を図 3-1-4 に示した。これにより、定態安定度の面にのみ着目すれば、融通電力送電側の端に位置する D 発電機 1 台の PSS 最適化がポイントであり、他は過渡安定度や運用面を考慮したバックアップ的な意味合いの強い位置付けとなっていることが示された。

(2) シミュレーションによる効果の確認

前述の S 法による PSS の最適化は、電力系統の有する非線形特性や想定し得る種々の系統事故の影響を考慮に入れていないので、これらの要因を加味した PSS の安定化効果を確認するため、Y 法シミュレーション解析を実施した。想定した系統事故は、融通電力受電側の大容量発電機 4 機脱落や融通電力通過幹線での 1 回線 3 相地絡 - 4 サイクル後 3 相開放（3 LG - 3 LO）など、かなり厳しいと考えられるものである。

ちなみに、シミュレーションによって得られた動揺波形の一例を図 3-1-4 に示す。PSS を最適化していない場合（同図上）と 6 台一括で最適化した場合（同図下）の電源脱落事故に対する動揺の安定性が顕著に比較し得る。

これらの結果は S 法を用いたものとほぼ同様となっているが、新たな改善策も見出された。たとえば、クロスコンパウンド機の入力として、個別の発電機出力ではなく一括した出力とする必要があることなど、である。

以上のごとく、これらのシミュレーション解析により、PSS 最適化の効果が検証され、D 発電機のみでも安定化が可能なこと、また複数発電機の同時最適化により、安定化

の度合や運用の融通性が高まることなどが確認された。

3-1-5 考察と実務への反映

PSSの最適化により、将来の中西連系線系統の安定性を高め、融通可能電力を大幅に増大し得ることが、固有値解析、シミュレーション解析によって明らかになった。しかし、実系統で実際にPSSの定数最適化を実施するためには、さらに多くの実務上の細かい検討が必要となる。

一例として、送電線路の工事などによりローカルな系統構成が色々と変化することを考えると、全系運用のためにPSSが最適化された発電機単体の仕上り特性が本来の制御責務の許容範囲を逸脱してはならない。これを簡便にチェックする方法として、当該発電機を仮想線路を介して無得大母線に接続し、その同期化力係数と制動係数の周波数特性を分析することが行われる。本解析システムに具備されている支援システムの諸機能はこのような検討にも大きな助けとなっている。

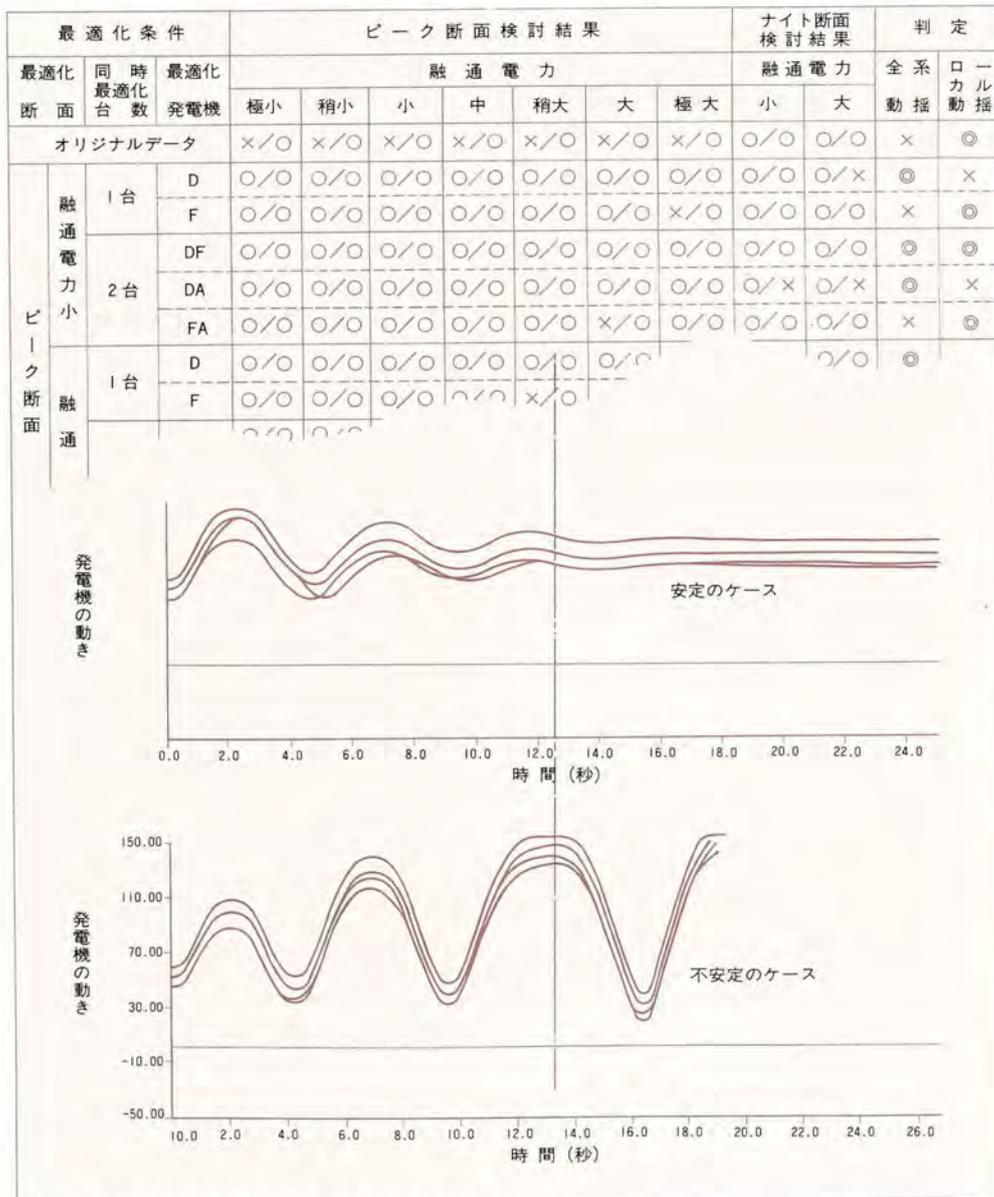


図3-1-4 固有値解析によるPSSの最適化

3-2 長距離大電力送電の安定度向上対策

近年、新規の電源立地候補地点は限定されてきており、これに伴って電源開発は遠隔化・大型化してきている。また、送電線ルートの確保も困難化してきていることから、必然的に長距離大電力送電の安定化がますます重要となってきた。

ここでは、これまでに実用化あるいは開発が進められている各種の系統安定化対策に関し、これらを組み合わせて採用し最も効果的なものとするための定量的検討例を紹介する。

3-2-1 ケース I

1,300MW を、長距離送電線（500kV 系統で400km、275kV 系で130km、220kV 系では80km の電氣的距離に相当する）で送電する場合の安定送電対策を求めた。採用した安定化対策は次の通りである。

- ① E X C（励磁系の改善：最大励磁電圧すなわちシーリング電圧を4.3PU から6.0PU へ引上げる）
- ② S V C（静止型無効電力補償装置：2-1節(7)項参照）の設置
- ③ S D R（制動抵抗：2-1節(7)項参照）の設置
- ④ E V A（Early Valve Actuation：重大事故を検出してガバナにより弁を急速に閉じてタービン出力を過渡的に低下させ過渡安定度を向上させる方式）

これらの概要を、図3-2-1に示す。また、対象とする系統の外乱条件と検討項目は、次の通りである。

- ① 1 回線開放時の電圧変動と安定度
 - ② 発電所出口至近端での 1 回線 3 相地絡事故（4 サイクルシャ断）時の過渡安定度
- なお、受電側系統の条件は、需要が最大となる場合と比較的小さい場合の2断面について実施した。

(1) 1 回線開放時の電圧変動と安定度

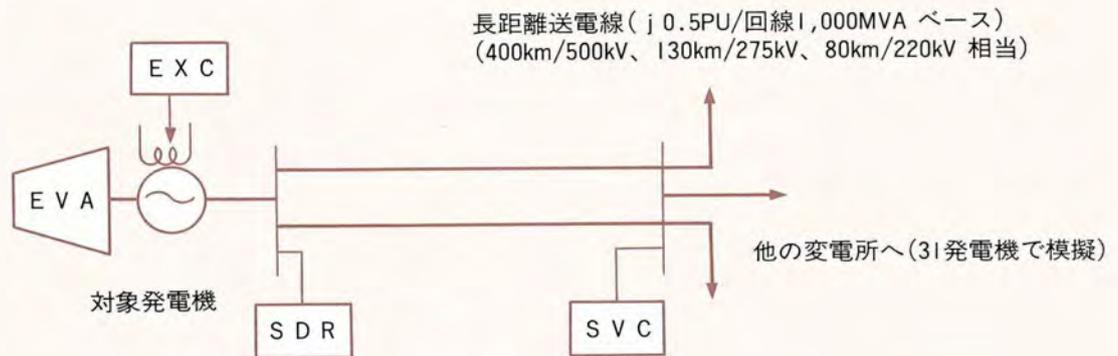
1 回線開放は、通常の運用操作としてもよく行われるため、この時の安定度と受電端の変電所での電圧変動に着目した。

Y 法によるシミュレーション解析結果の概要は次の通りである。

- ① 安定度を維持するだけでよければ、シーリング電圧を 4.6PU に引き上げるだけでよい。
- ② 1 回線開放操作は通常時操作と考えられるため、受電側変電所の電圧変動は小さいほど望ましい。この電圧変動を 3% 以下とするためには、シーリング電圧を 6.0PU とし、さらに 200MVA の SVC を必要とする。また、電圧変動を 5% まで許容すれば SVC 容量は 150MVA で十分である。

(2) 3 相地絡事故時の過渡安定度

この事故に対して、EXC、SVC、SDR、EVA などを組み合わせて採用し、安定度が維持できる範囲をシミュレーションによって求めた結果、図3-2-2に示すように以下の



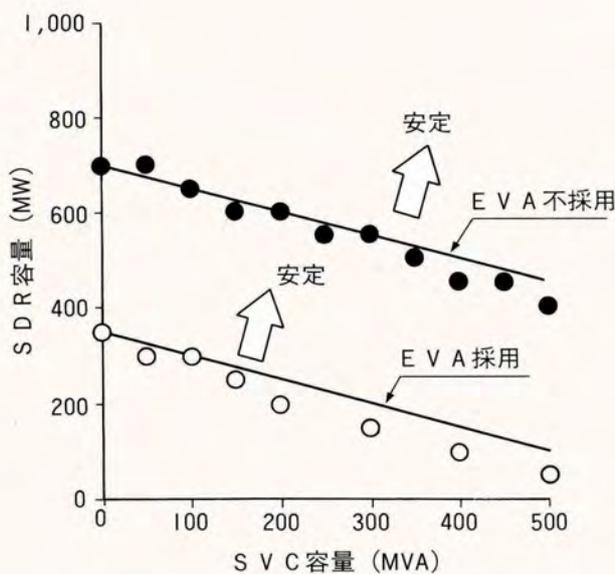
E X C : (励磁系の改善 : シーリング電圧を4.3 P U から6.0 P U へ引上げる)

S V C : (静止型無効電力補償装置 : 2.1 節 (7) 項参照) の設置

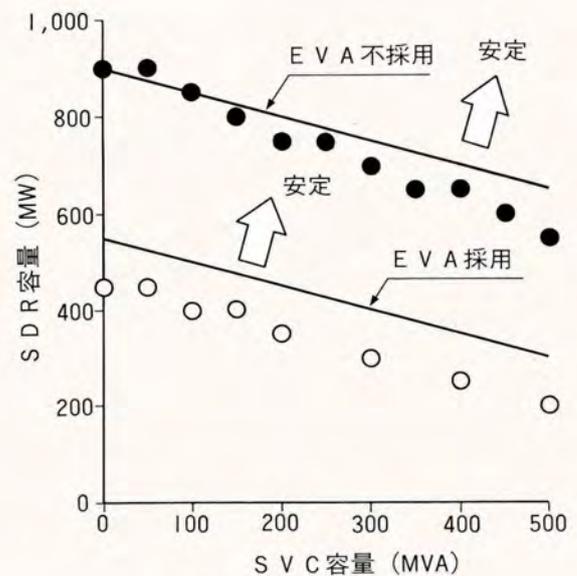
S D R : (制動抵抗 : 2.1 節 (7) 項参照) の設置

E V A : (Early Valve Actuation : 重大事故を検出してガバナにより弁を急速に閉じてタービン出力を過渡的に低下させ過渡安定度を向上させる方式) の採用

図3-2-1 対象とした長距離送電系統と安定化対策



(1) 励磁系シーリング6.0 P U



(2) 励磁系シーリング4.3 P U

—— : 簡略式で求めた安定限界

●、○ : それぞれの安定限界 (S D R 容量がこれより50 M W 小さいと脱調となる)

図3-2-2 各種安定化対策と安定限界電力の関係 (ケース I)

簡略式で表現される組合せの対策を採用すればよいことが明らかとなった。

$$2 \times [EXC] + [SDR] + 0.5 \times [SVC] + 3.5 \times [EVA] \geq 9.0$$

ここで、[EXC]、[EVA]の値は、
1(採用)、0(不採用)とおく。

[SDR]と[SVC]は100MVAに対する容量比率とする。

この式から明らかとなる事項は、次の通りである。

- ①各対策の係数が大きいほど、過渡安定度向上効果が大きい。
- ②容量比率のみで見ればSVCはSDRの半分の効果である。
これにはSVCの通常運用時の電圧維持効果を期待してSVCを受電側に設置したことも影響している。安定度の向上のみを目的とする場合は、SVCは通常送電端に設置した方が効果は大きい(3-2-2項参照)。

3-2-2 ケースⅡ

4,800MW (1,200MW × 4台)を、500kV、250kmの送電線で安定に送電するのに必要な対策として、図3-2-3に示すような種々の安定化対策について検討した。

安定化対策の種類が多いため、直列コンデンサ(SRC: Series Condenser)の補償効果を基準にとって各安定化対策の効果を定量的に検討した。このケースでも1回線開放や受電側潮流などの影響、あるいは安定化装置のパラメータについても広範な検討を実施しているが、ここでは、電源側での1回線3相地絡事故に対する基本的検討例を紹介する。

まず、超速応励磁方式の4台全機への採用を前提として、必要なSRC補償量を求めた結果が、表3-2-1である。これより、以下の概略的關係が把握される。

- ①P S D (Power Source Disconnecton、発電機1台の電源制限): SRC補償量の30%分の安定度向上効果
- ②H C B (High-speed Circuit Breaker、高速度しゃ断器

の採用): SRC補償量の20%分の安定度向上効果

- ③S W S (Switching Station、中間開閉所の増設): SRC補償量の10%分の安定度向上効果

SRC補償量の10%分の効果を基準として表して、以下の關係式が成り立てば、安定に送電できることとなる。表3-2-1には、安定となる限界での次式の右辺の値も記載している。

$$3 \times [PSD] + 2 \times [HCB] + [SWS] + [SRC] \geq 8$$

ここで、[PSD] = 1(採用)、0(不採用)

[HCB] = 1(採用)、0(不採用)

[SWS] = 1(1ヶ所)、2(2ヶ所)

[SRC] = 補償量(%) / 10 (1~4)

次に、PSS付き超速応励磁系の採用の効果をみると、同様に表3-2-2の結果が得られた。これから、超速応励磁系の採用(EXC)はSRC補償量の10%分の安定度向上効果に対応することが分る。

同様に、制動抵抗(SDR)とSVCの効果をおおまかに求めると、おおむね次の關係が成立した。

700MW制動抵抗の採用(SDR): SRC補償量の10%分の安定度向上効果

800MVAのSVCの採用(SVC): SRC補償量の20%分の安定度向上効果

これらの關係も含めて、安定度の維持条件を表すと次式になる。

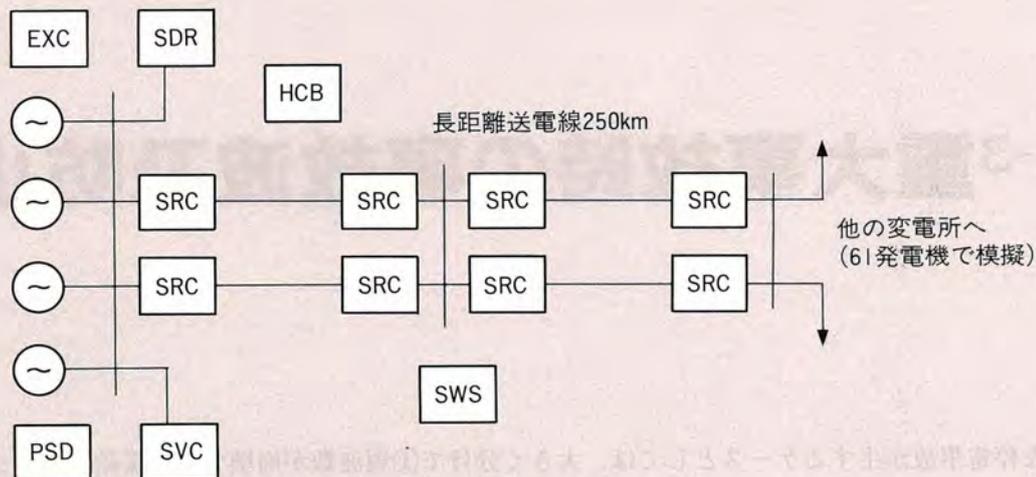
$$3 \times [PSD] + 2 \times [HCB] + [SWS] + [SRC] + [EXC] + [SDR] + 2 \times [SVC] \geq 8$$

ここで、

[PSS] = 0(シーリング電圧4PUの励磁系)、
1(シーリング電圧7PUのPSS付超速応励磁系)

[SDR] = 0(SDRの不採用)、1(700MWのSDRの採用)

[SVC] = 0(SVCの不採用)、1(800MVAのSVCの採用)



安定度向上対策	模擬・制御方法
高速度しゃ断(HCB)	標準：4サイクルしゃ断、高速：3サイクルしゃ断
超速応励磁(EXC)	P入力型PSS付超速応励磁(シーリング7PU)
電源制限(PSD)	1,200MW1台、事故発生後7サイクルでしゃ断
直列コンデンサ(SRC)	回線別両端設置、均等補償 放電ギャップにより事故発生と同時に短絡、事故除去後3サイクルで再挿入
中間開閉所(SWS)	送電距離を均等に分割、1ないし2ヶ所
制動抵抗(SDR)	事故発生後9サイクルで投入
静止型無効電力補償装置(SVC)	リアクトル電流を制限

図3-2-3 検討系統と安定度向上対策

表3-2-1 安定度向上対策の効果
(PSS付超速応励磁系の採用を前提)

PSD	HCB	SWS	SRC補償量 (%)		E
			不安定	安定限界	
(3)	(2)	(1)			
0	1	1	30	40	8.0
		2	20	30	8.0
1	0	1	20	25	7.5
		2	10	15	7.5
	1	1		10	8.0
		2		0	8.0

注) ()内はSRC補償量10%に対する安定化効果の倍数

E：本文の式の安定限界時のEの値
その他は本文参照

表3-2-2 安定度向上対策の効果

PSD	HCB	SWS	PSS	SRC補償量 (%)		E
				不安定	安定限界	
(3)	(2)	(1)	(1)			
1	1	1	0	15	20	8.0
			1		10	8.0
		2	0	0	5	7.5
			1		0	8.0

3-2-3 考察

安定度対策の効果がほぼ一次の関係式で表現される理由は、対象とした系統が安定度を扱う際の最も基本となる一機無限大系統に近いと考えられる。実際、ケースIについては、等面積法といわれる簡便な手法によっても検討した結果、シミュレーション法と同様の傾向が得られた。

3-3 重大事故時の事故波及防止対策

大規模な停電事故が生ずるケースとしては、大きく分けて①周波数が崩壊する（需給のバランスが大きく崩れる）、②電圧が崩壊する（需要地への輸送能力が大幅に不足する）、の2種類のパターンが考えられる。このうち、②のケースは、近接電源が乏しい高密度大需要地域で稀に発生するもので、一般的な大規模停電事故の対策は主に①のケースを対象としている。

基幹系統の送電網においては、送電線の1回線事故や1母線の事故などのような単一の事故ではこのような事態に至らないように、電力系統の計画や運用面で考慮されている。しかし、極めてまれではあるが、幾つかの事故が重なって生じる（多重事故）場合、あるいはリレーや制御装置などの誤動作や不動作などが事故と重なった場合には、このような事態に発展する場合が考えられる。

わが国の系統構成は、基幹系統であっても放射状の運用が多く、条件の厳しい2回線事故（再開路が不可能な事故、たとえば同相の2線しか残らないような場合）では、系統が分断される。また、ループ系統（送電ルートが2経路以上あるような系統構成）であっても、このような厳しい事故の場合には、他の経路への潮流が増加して安定度が維持できなくなったり、送電可能な電力以上の電力が流れたりして、分断に至る場合もある。

このように、系統が分断（系統分離）されると、発電（供給）と負荷（需要）がアンバランスとなり、周波数が大きく変動して系統が崩壊する可能性が増す。本節では、この系統分離時の周波数対策についての新しい方式を、安定度総合解析システムを用いて検討した例を示す。

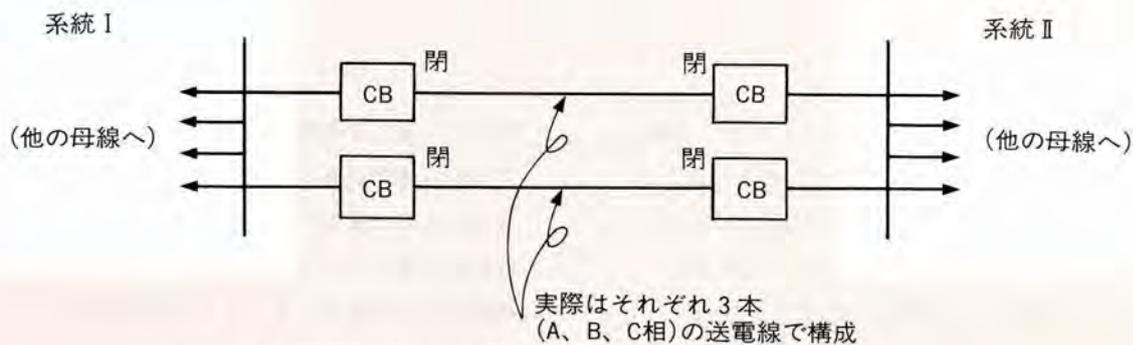
3-3-1 重大事故時の周波数対策

通常運転時には、各地域の系統が同一周波数で電氣的に連系されて運用され、自動周波数調整機能により、定格周波数からの変動は非常に小さく安定に維持されている。しかし、基幹送電線などにルート事故などが発生すると、それぞれの自動周波数調整機能が著しく低下し系統が分断される（系統分離、図3-3-1参照）。

この場合、切り離される送電線に事故前に流れていた電力（潮流）が、分断された系統の大きさに対して小さければ、それぞれの系統での発電と消費（負荷）のアンバランスの比率は小さいため、周波数の変動も小さい。

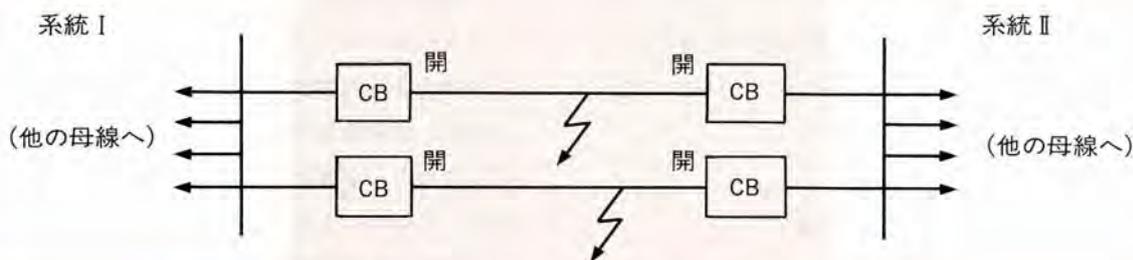
一方、分断系統（単独系統）において、発電と負荷のアンバランスが大きいと、周波数の変動は大きくなる。すなわち、発電より負荷が大きければ周波数は低下していき、逆に発電が大きければ周波数は上昇する。このような場合はできるだけ早く系統を連系し、事故前の形に戻すことが望ましい。

とくに、周波数低下が大きければ、負荷はもちろん、発電用の機器にも悪影響を及ぼす。この影響は比較的短時間、すなわち、1～10秒程度で現れてくる。周波数の低下を抑制するためには、発電電力を増加させることが基本であるが、時間的に間に合わないので、揚水運転をしている発電所を系統から切り離したり、やむをえない場合には最低限の負荷を遮断（負荷制限）したりして、大規模停電に至らせな



CB：しゃ断器（4組ともに閉の状態）

(i) 通常運用系統(系統 I、IIともに同一の周波数で同期が保たれて運転)



2回線事故(重大事故)→4組のしゃ断器ともに閉から開の状態に変化

(ii) 系統分離(系統 I、IIは電氣的に分離され、周波数も異なる)

図3-3-1 系統分離の概要

いような制御が行われる。このような状態が万一予想される箇所には、自動的にこれらの制御を実施する装置が設けられている。

周波数が上昇する場合には、発電力を低下させることが基本である。時間的、量的にこれが不足する場合には、発電機を系統から切り離して（電源制限）、周波数の安定化を実施する。放置しておくとも周波数の過大な上昇によって発電機が徐々に系統から分離し、逆に周波数の低下により、単独系統の全体が停電にいたることもある。

3-3-2 対策上の問題点

系統が切り離された場合の周波数安定化対策としては、切り離される送電線に流れていた電力に応じて電源制限、負荷制限を行う考え方が一般に採用されている。しかし、近年、下記の要因でその成功率は、低下傾向にある。

① 落雷事故中の極めて短時間の電圧低下による負荷脱落量の増大；計算機等の精密機器の増加によって、電圧低

下が小さく、またその時間が極めて短時間（主保護動作と同程度：0.1秒以下）であっても、そのショックによって脱落する負荷が増えてきている。（負荷脱落）

② 効率向上に依る大容量ユニットの周波数条件の変化；高効率の火力貫流プラントや原子力プラントは、従来のドラムタイプの火力プラントや水力機に比べ、周波数変動に対し鋭敏に反応し、プラント側の保護要因によるトリップの可能性が高くなってきている。

③ 電源ユニットの大容量と中小ユニットの稼働率の低下；高効率大容量化電源ユニットが増え、中小ユニットの運用停止が多くなり、電源制限指令に対する対象発電機の適正な組み合わせが困難となってきている。

とくに①の負荷脱落特性は、負荷の個々の特性や、電圧変動の大きさ、その継続時間など多くの不確定要因を含んでいる。ここでは、これまでの調査結果の一例を図3-3-2に示す。

図に見られるように、負荷脱落特性にはかなりのバラツキがあるが、これを同図に示されるような折れ線で近似する。この近似を用いて、A幹線の分離系統側変電所至近端

ならびに遠方端での3相地絡事故(3LG)時の、分離系統全体での負荷脱落量を算定すれば表3-3-1のようになる。このように、同じ幹線の事故であっても事故の地点によって負荷脱落の推定量は10%から2.5%程度まで変化する。

これらの要因を考慮できる制御方式の確立を目的として、既に開発済みの火力、原子力プラントの動特性を含めた解析手法(Y法)を用いて検討した例を以下に示す。

対象とした系統例は、将来系統モデルであり、分離後単独系統となる系統内の全電源出力は1,520万kW(原子力発電機3台、火力発電機22台、水力発電機14台で模擬)、負荷は1,260万kW、分離前のA幹線の潮流は250万kWである。

(1) 事前情報に基づく一括指令方式

この方式は、事故中の電圧低下量のある代表的な変電所で計測して、前節のような推定式から負荷脱落量を算定し、周波数安定化制御を一回の論理判断ですませる方式である。固定論理を基にした制御であることから迅速な対応が可能となるが、電圧低下量を極めて短時間で計測する必要があること、負荷脱落量にバラツキがあることからその推定に確実性がないこと、並びに電源制限対象機の制約等による制御誤差を考慮できないことが欠点となる。

(2) 事後情報を用いる補正制御方式

一括指令方式以外には、第一段制御を分離点の事前潮流から算定して迅速に制御した後、なんらかの方法で制御誤差を推測して補正制御を行う方式がある。火力プラント単独で検討した結果によれば、この補正制御方式では、第一段での制御誤差がある程度あったとしても、1秒前後に補正制御を行うことによって安定運転が可能となるので、高精度短時間で負荷脱落量を推定するという極めて難しい条件が緩和される。

とくに、補正制御方式の内、周波数・電圧併用補正方式は、一括指令方式と同様に、事故中の電圧低下量を計測して、負荷脱落量を推定し、補正制御を行う方式である。この方式では、補正制御を行うまで比較的時間があるので、

電圧低下量の計測が確実になること、電圧計測点を複数にできる可能性があることから、負荷脱落量の推定は一括指令方式よりは確実になる。しかし、一括指令方式と同様に、負荷脱落量のバラツキと、電源制限対象機の制約等による制御誤差を考慮できないことが欠点となる。

(3) 新しい補正制御方式

この補正方式は、負荷脱落量そのものを推定する方式というよりは、すべての不確定要因を含めた需給アンバランス量で定まる周波数から制御量を決定する方式である。このため、負荷脱落のみでは無く、電源制限対象機の制約なども含めた、全体としての制御誤差に対する補正制御が可能となるので、より確実な制御効果が期待できる。

周波数から制御誤差を推定する方法としては、周波数上昇最大値から推定する方式が適当である。この周波数上昇最大値を推定する方式としては、2時点の周波数から周波数上昇最大値を推定する方式、ある時点までの周波数の最大値を周波数上昇最大値とする方式がある。この両方式の得失については、後述のシミュレーションによる検討によって明らかとなる。

(4) その他の補正方式

他方式として、事故後の発電機プラント出力の合計と負荷の合計により、制御誤差の推定を行う方式があるが、この方式では発電プラントの出力の瞬間的計測が困難なこと、代表発電機のみでの計測では制御誤差を推定できないため、多数の通信回線が必要となることから現状ではまだ非現実的と言わざるを得ない。

3-3-3 シミュレーションとまとめ

前述の各制御方式の効果を、実際の系統の将来系統モデルを用いて検討した。表3-3-1に示すように、分離系統変電所至近端での3LG事故時の負荷脱落量は約10%であるが、実際の負荷脱落量の不確定部分と、電源制限対象機の

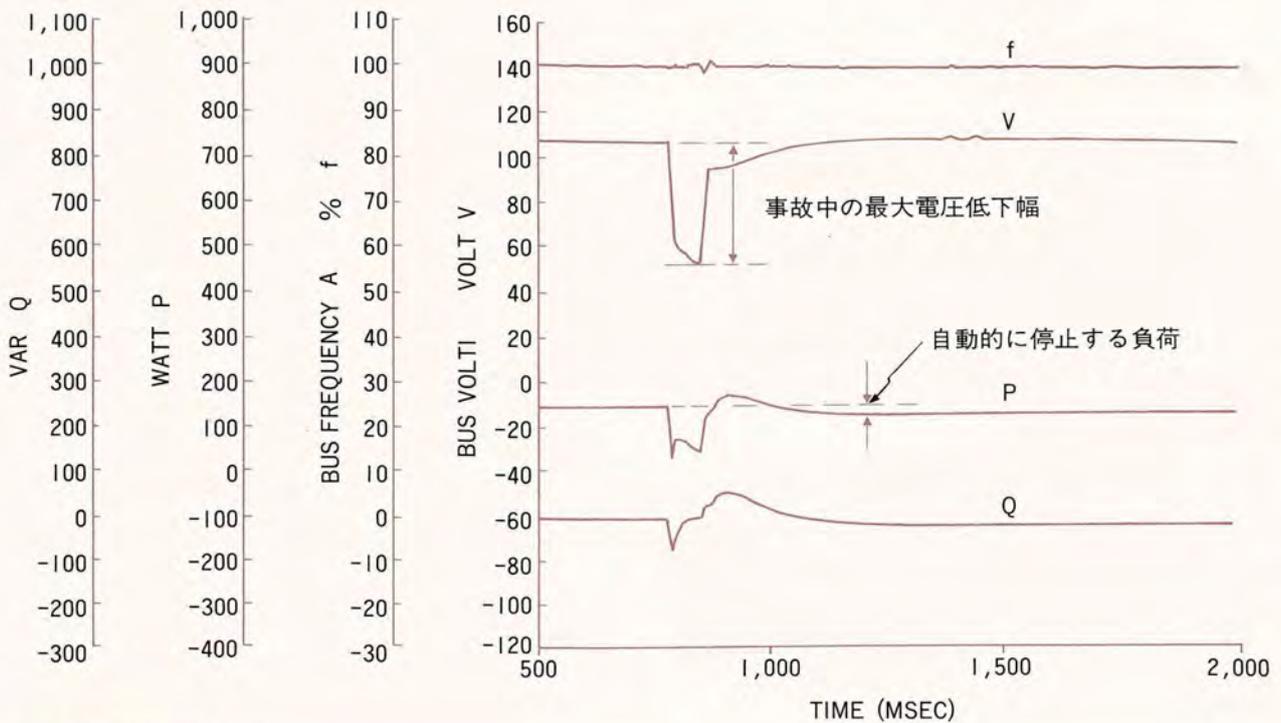
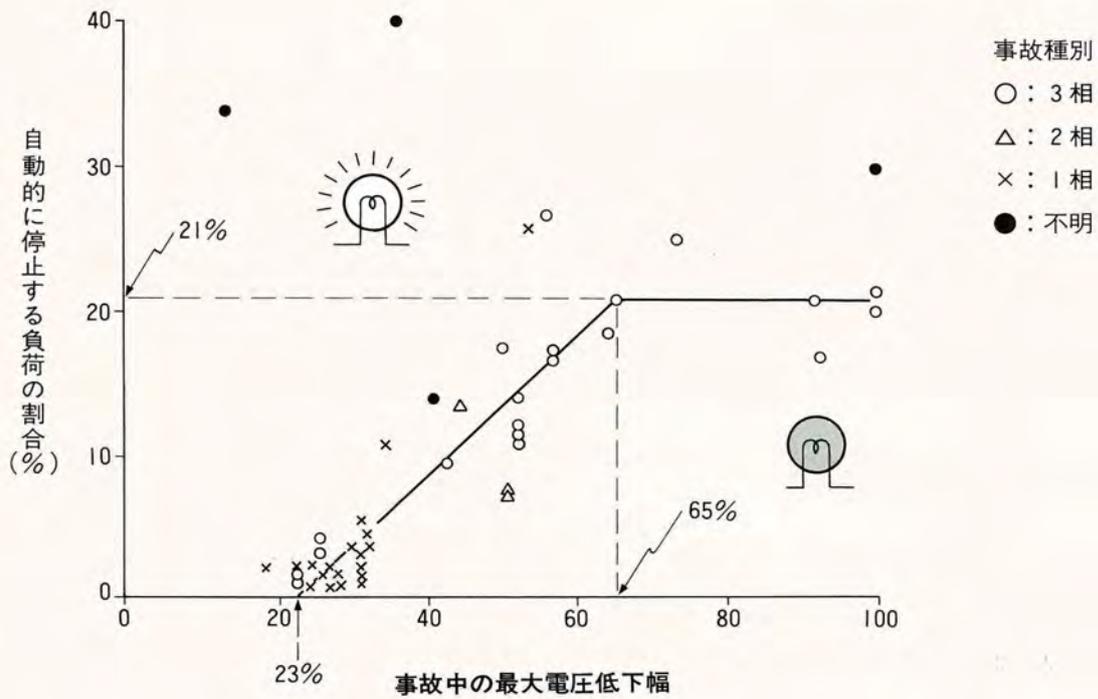


図3-3-2 負荷脱落特性の例

制約による制御誤差も負荷脱落量で表し、負荷脱落量の検討範囲を0～40%とした。また、電源側の不確定要因としては、ICVの動作、不動作を考慮した（注：ICV：インターセプト弁。火力機や原子力機において再熱蒸気流量を制御する弁であり、通常は全開で運転される。周波数上昇が大きかったり、その上昇率が大きいとこれが動作する。

ICVが動作するとタービン出力の変化が加減弁のみの制御時よりも大きくなる。

また、制御目標としては、①プラントがトリップしないこと、②周波数低下がUFRリレーによる負荷制限設定値に至らないこと、③整定周波数が±0.5Hz以内におさまること、の3点を考慮した。

表3-3-1 A幹線事故による負荷脱落推定量

()内は低下市

A幹線での事故地点		分離系側至近端	分離系の遠方端
分離系側変電所の電圧最低値	500kV母線	0(100)%	46(55)%
	275kV母線	50(50)%	73(27)%
負荷脱落量		126万kW	32万kW
脱落率		10.0%	2.5%

(1) 第一段制御誤差と周波数最大値

第一段制御後の周波数最大値と需給アンバランス量(=制御誤差、電源過剰量で示す)の関係を、図3-3-3に示す。その係数はICV動作に関わらず、ほぼ一定で0.65Hz/10%となっている。

(2) 制御誤差の推定精度

補正方式Aでは推定補正量を大きめに見積もっており、推定補正量(第一段階制御後に需給バランスをとるために必要となる補正量の推定値)の見積り誤差は、最大11%程度である。逆に、補正方式Bでは推定補正量を小さく見積もることとなり、その時の最大見積り誤差は18%程度となる。この方式では、周波数の計測時間を長くすると、若干推定精度が向上することがある。

ただし、この推定誤差は、第一段制御がなされた後のアンバランス量に対するものであることから、全体の系統の大きさに対しては小さなものになる。たとえば、第一段制御での負荷脱落等も含めた制御誤差が20%、補正制御での誤差も20%であったとしても、全体から見た誤差は4%にしかない。

解析例を図3-3-4に示す。第一段制御のみでは制御誤差のため、周波数の過大な上昇により火力発電所がトリップするが、前述の新しい補正制御方式を用いると安定に運転を継続できることが示されている。

これらの検討により、以下の結論が得られた。

- ① 負荷脱落を考慮しない従来方式の制御では、負荷脱落や電源制限対象機の制約によっては、周波数上昇によってプラントがトリップにいたることがある。

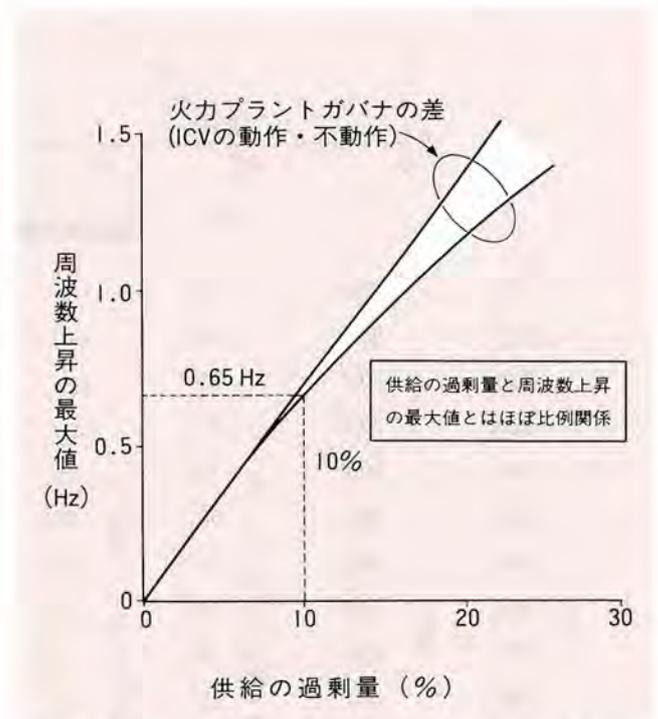


図3-3-3 供給の過剰量と周波数上昇の最大値との関係(実系統のシミュレーション結果)

- ② 一方、負荷脱落を見込んだ事前設定型の一括制御方式では、見込み誤差を、補正する制御が必要である。
- ③ しかし、補正制御を考慮する場合にも、分離点の事前潮流の適切な計測と等量の制御を目的とした第一段制御は必要である。
- ④ この第一段制御での制御量が不足した場合の、補正制御方式としては、2時点の周波数から周波数最大値を推定する方式を推奨する。
- ⑤ 補正制御を効果的に行うためには、第一段制御後の電源過剰量は少なくとも20%程度以下にする必要がある。これらの結論に基づく新しい緊急時周波数制御方式が実系統で既に採用されている。

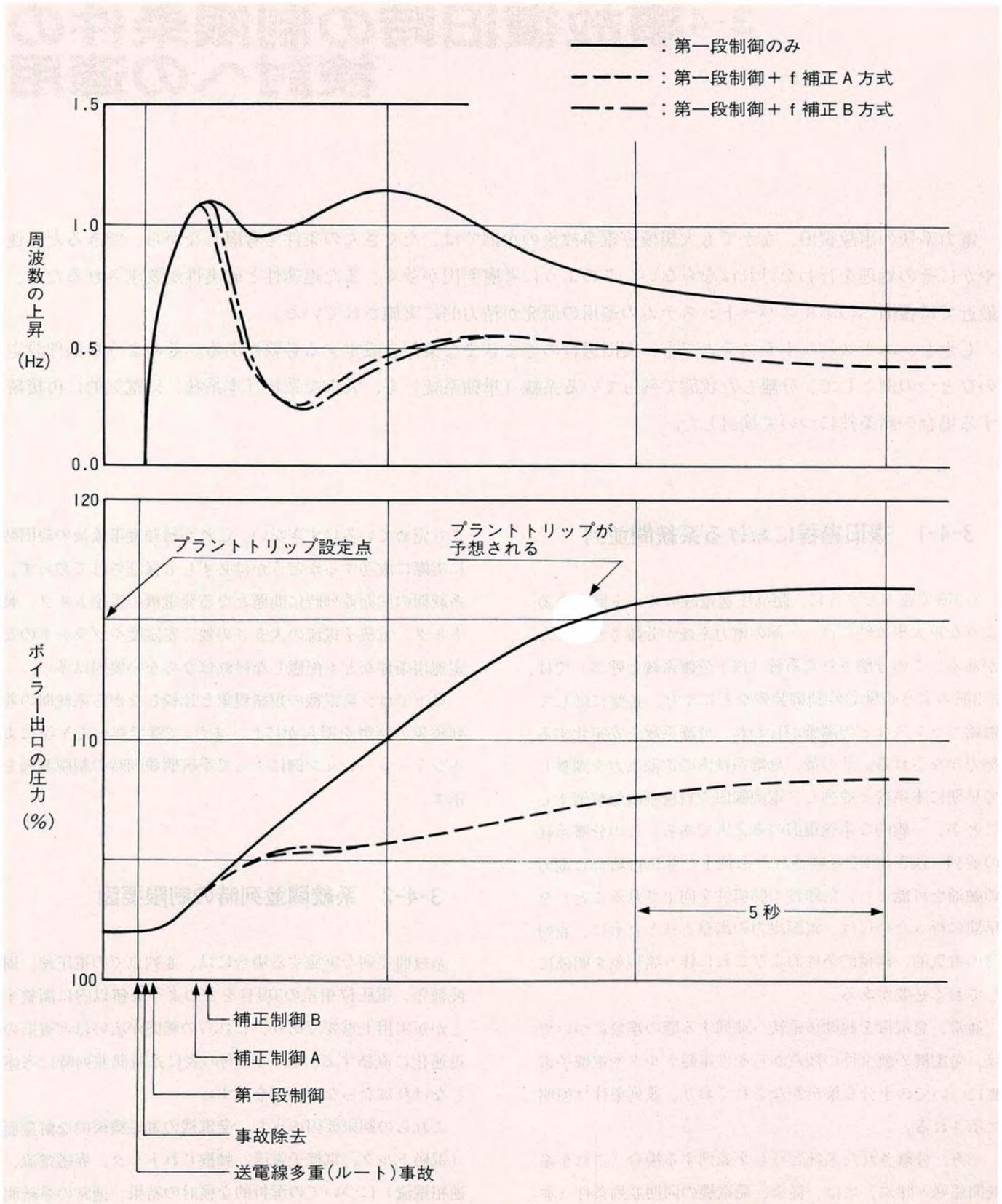


図3-3-4 推奨する方式(f補正方式)の効果の確認(シミュレーション解析の例)

3-4 事故復旧時の制限条件の検討への適用

電力系統の事故復旧、なかでも大規模停電事故後の復旧では、たくさんの条件を考慮しながら、できるだけ速やかにその処理を行わなければならない。このように考慮要因が多く、また迅速性と確実性が要求されるため、最近では復旧へのエキスパートシステムの適用の研究が精力的に実施されている。

しかし、エキスパートシステムでも、復旧過程のさまざまな条件を設定する必要がある。そのような条件設定のひとつの例として、分離した状態で残っている系統（単独系統）を、大きな系統（本系統）に電氣的に再接続する場合の諸条件について検討した。

3-4-1 復旧過程における系統間並列

3-3節で述べたように、超高圧送電線のルート断となるような重大事故時には、一部の電力系統が分離されることがある。この分離された系統（以下分離系統と呼ぶ）では、3-3節のような緊急時制御装置などにより、必要に応じて需給バランスなどの調整が行われ、分離系統を安定化する努力がなされる。その後、分離系統内の電源出力を調整して早期に本系統と並列し、電源制限や負荷制限を解消することが、一般的な系統復旧の考え方である。この分離系統の並列（図3-3-1で分離された系統ⅠとⅡを再結合し電力の融通を可能とし、信頼性や経済性を向上されること）を早期に行うためには、電源出力の調整方法とともに、並列時の電氣的、機械的条件およびこれに伴う諸現象を明確にしておく必要がある。

通常、発電機を起動後系統へ並列する際の現象については、発電機の健全性の観点からその電磁トルクや電機子電流についての十分な解析がなされており、並列条件は簡明に示される。

一方、分離された系統どうしを並列する場合（これを系統間並列と呼ぶ）には、従来、発電機の同期並列条件（並列点での電圧位相差、周波数差、電圧差）を参考に経験に

より定めているにすぎない。これが稀頻度事故後の復旧時に実際に成功するかどうかは必ずしも保証されておらず、系統間の同期並列時に問題となる発電機の電磁トルク、軸トルク、電機子電流の大きさの他、安定度やプラントの安定運用条件なども配慮しなければならない要因は多い。

以下では、発電機の短絡現象と比較しながら系統間の並列現象の特徴を明らかにし、また、2章で述べたY法によるシミュレーション例によって系統間並列時の制限要因を示す。

3-4-2 系統間並列時の制限要因

系統間並列を実施する場合には、並列点での電圧差、周波数差、電圧位相差の3項目をどのような値以内に調整するかが実用上重要であり、これらの範囲が広いほど復旧の迅速化に直結する。図3-4-1内の表に系統間並列時に考慮しなければならない要因を示す。

これらの制限要因のうち、発電機の電磁機械的な耐量面（電磁トルク、電機子電流、軸振じれトルク、界磁電流、逆相電流）についての解析的な検討の結果、通常系統間並列時の位相差条件（ ± 30 度以内）、電圧差条件（ $\pm 10\%$

以内)では、これらの諸量はいずれも発電機の耐量を定めている3相突発短絡時の最大値よりも小さく、特に考慮する必要がないことが明らかとなった。

従って、系統間並列時の解析には電力系統の安定度やプラント運用の安定性が、重要な考慮要因となるので、本解析システムにはこれらの要因を加味した多機系統の系統間並列現象の解析を取り扱えるシミュレーション機能を備えた。

3-4-3 系統間並列用シミュレーション機能の検証と適用例

開発したシミュレーション機能は、電気的な現象に関しては非常に詳細にモデル化したプログラム(ただし、取り

扱える系統は非常に単純な系統のみである)と比較し、その誤差が実用上問題ないことを確認した。さらに、当所の交・直流電力系統シミュレータを使用して、本機能の有効性を検証した。

交・直流電力系統シミュレータでの試験系統の例、ならびに、電氣的並列可能範囲の試験結果とY法での解析結果の比較の一例を図3-4-2に示す。広い範囲に渡って、試験結果と良く合致している。

電気回路現象については系統間並列現象シミュレーション機能の妥当性が検証されたので、これに既開発の火力プラントやBWRプラントモデルを組み込み、実系統を想定した多機系統での系統間並列のシミュレーションを実施し、並列時の制限要因を検討した。

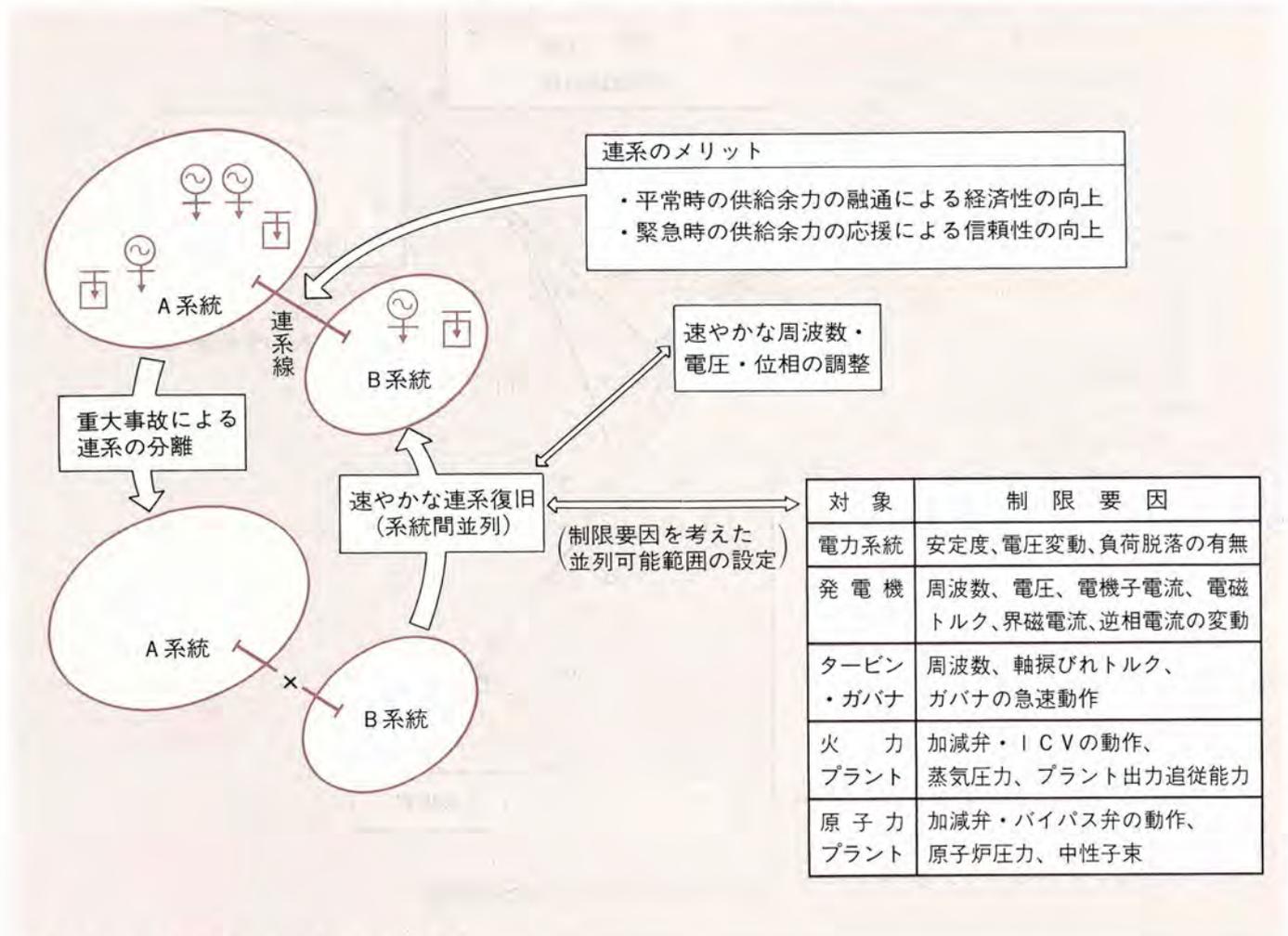
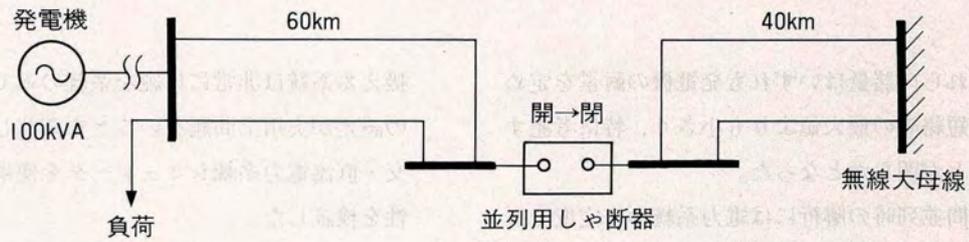
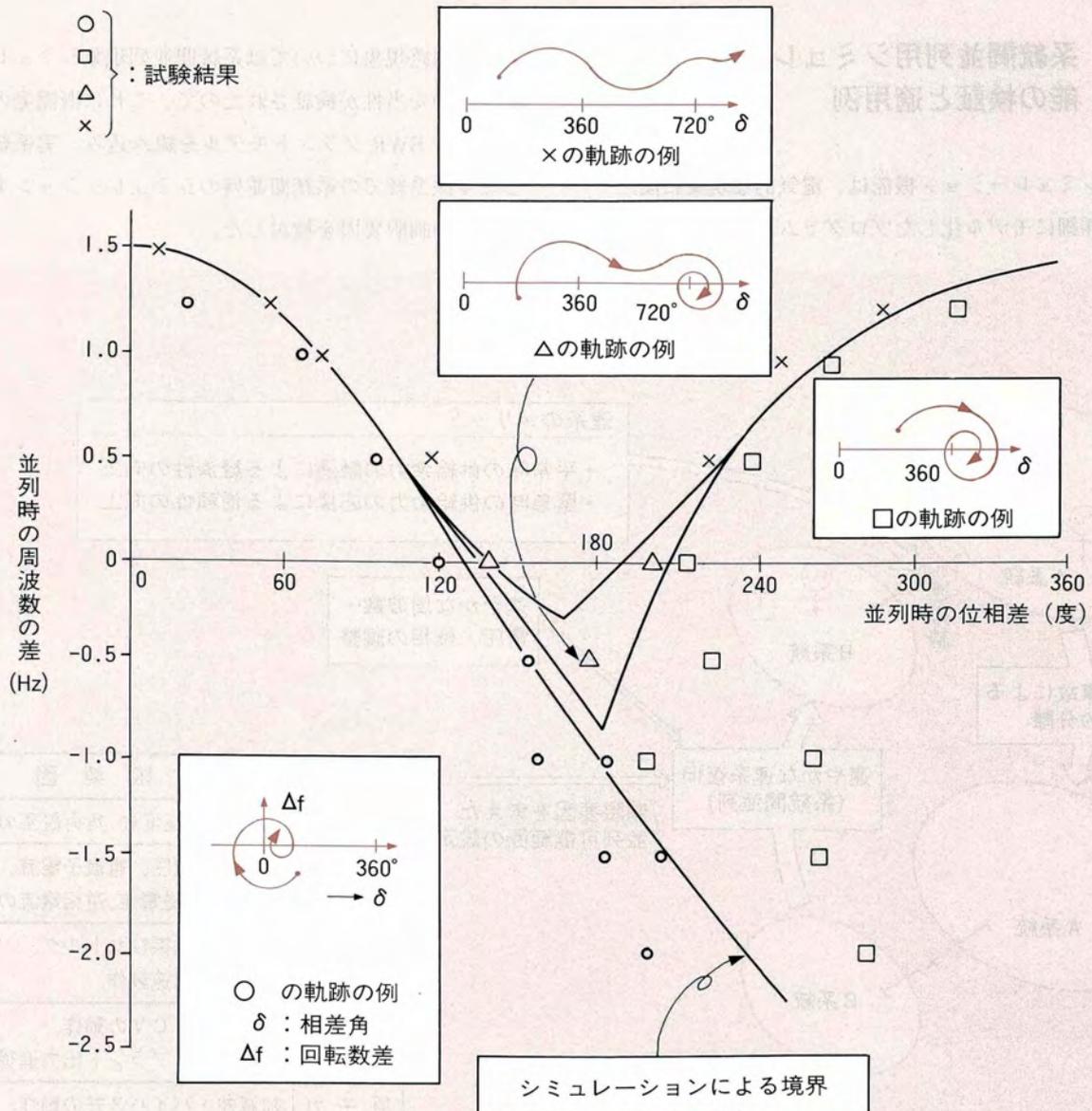


図3-4-1 系統間並列の必要性と制限要因

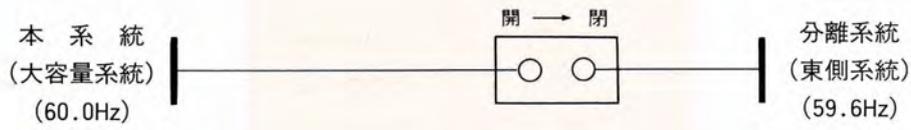


(i) シミュレータの試験系統

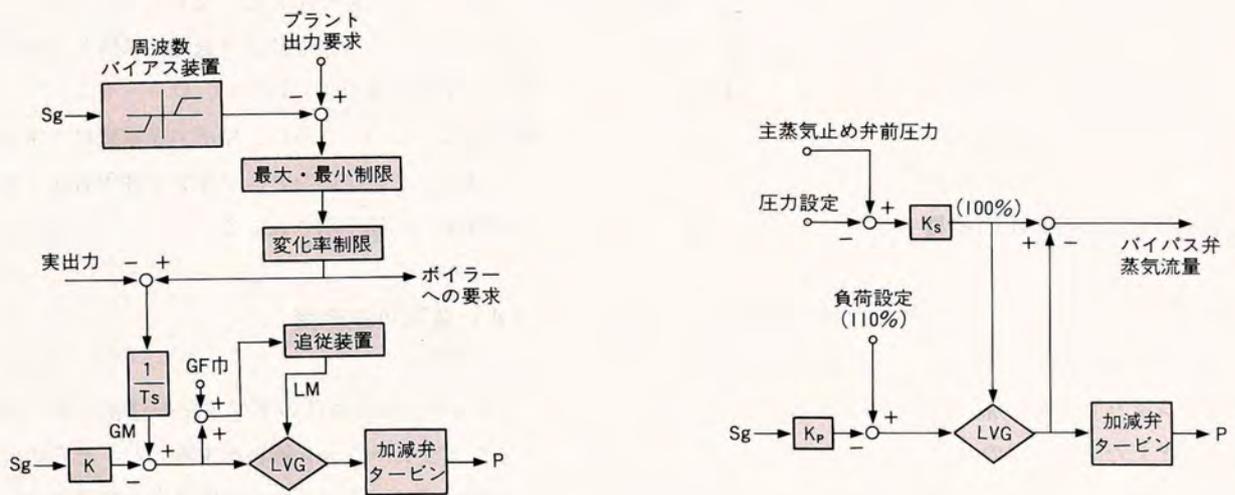


(ii) シミュレーションとの比較

図3-4-2 開発した系統間並列用Y法 (シミュレーション法)の検証



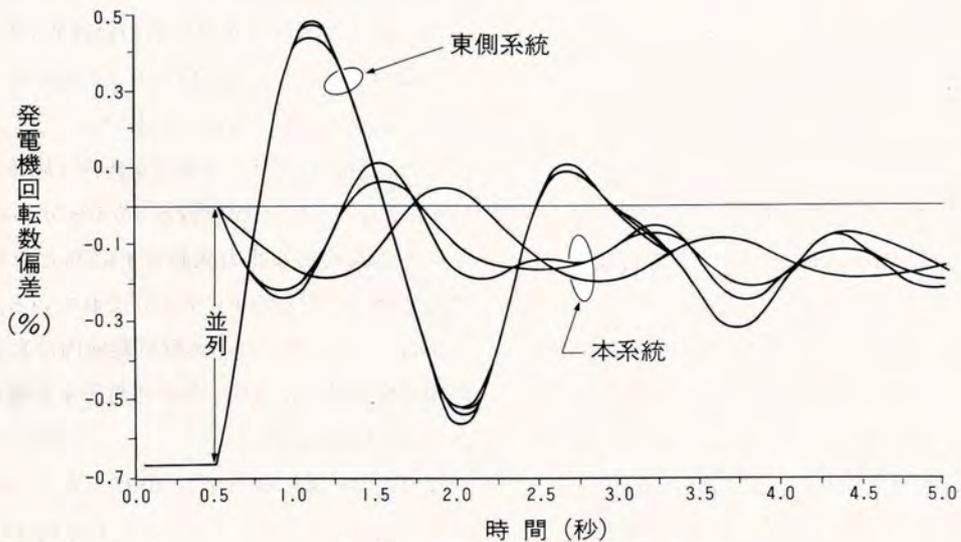
(i) 系統間並列の概要



(a) ガバナフリー運転時火力ガバナ内設定値と出力

(b) BWRプラントの出力とバイパス弁流量

(ii) 火力と原子カプラントの初期設定の考え方



(iii) シミュレーション解析波形例

図3-4-3 実系統を想定した系統間並列シミュレーション解析例

(1) 解析システムの概要

図3-4-3に解析システムの概要を示す。本系統と、26機の発電機を含む東側部分系統との系統間並列現象をシミュレーション解析した。東側系統の周波数は、本系統から分離後、適当な需給バランス制御により60.6、60.4、59.7、59.6、59.4Hzで落ち着いているとし、その周波数に見合った発電機出力を図3-4-3(ii)に示すモデルなどから算定し、初期値とした。また、本系統の周波数についても、定格の60Hzとともに、変動を考慮して、60.1と59.9Hzとしたシミュレーションも実施した。

(2) プラントモデルの概要

8機の火力貫流プラントについては、既に開発されている、蒸気系、プラント出力圧力制御系、電流検出型のロードセンシングリレーを附加した詳細ガバナモデルを考慮したモデルとした。その他の火力・水力機については、ガバナのみを詳細に考慮した。また、主要な定数としては、特に断わらない限り、図3-4-3(ii)に示す周波数バイアスの不感帯は0.2Hz、ガバナと周波数バイアスの調定率は5%とし、変化率制限は無視した。

3機のBWRプラントモデルについても、既に開発されているBWRプラント簡略モデルとした。これは、比較的短時間に収束する周波数の変動を外乱として、これに対する中性子束の変動を精度良く、また効率良く解析することを目的に開発されたものであり、これにMHCとEHCのバイパス弁制御や、加速度リレー、PLVR（パワーロードアンドバランスリレー）を含む詳細ガバナモデルを附加したモデルである。

(3) 解析結果例

本系統周波数60.0Hz、東側単独系統周波数が59.6Hzで、位相差が-30度の系統間並列のシミュレーション結果例を図3-4-3(iii)に示す。

同図は、本系統と東側系統の発電機の回転数偏差を示したものであり、並列前には各々の周波数は異なっているが、

その後両系統の周波数は速やかに合致していく。その過程を細かく見ると東側系統の回転数は本系統の並列前回転数である60.0Hz（回転数偏差0%）よりも大きくオーバーシュートし、それ以降は動揺を繰り返しながら本系統周波数と一致していく。

ここには示さなかったがこれらの回転数変動によって、タービン出力トルク、加減弁開度、インターセプト弁リフト(ICV)なども動作する。なお、このケースでは、ICVはダッシュポット動作により過渡的に閉じ方向に向かっていくが全閉には至っていない、ロードセンシングリレーは動作していない、さらに、原子力発電機はいずれもトリップには至っていないなど、プラント運用者から見ると極めて興味深い応動が示されている。

(4) 並列可能範囲

3-4-3の(1)項の条件の下で電圧の位相差を±30度以内としたシミュレーション解析を実施した。その結果、この解析範囲内では、並列後の安定度は全く問題無く、発電機の耐量面からも、電磁トルクと電機子電流の最大値ならびにその振れ巾ともに1.5PU以下であり問題無い。しかし、電圧変動は一部では過渡的に90%より低下する可能性があるが、一般的な負荷脱落開始電圧の80%には余裕がある。

火力プラントの主蒸気圧力の過渡的上昇は5%以内であり一般的なトリップ設定値15%より充分小さく、かつロードセンシングリレーも動作しない。

また、前節のプラント側設定条件（周波数バイアス不感帯0.2Hzなど）での周波数差±0.4Hzからの並列では、プラントの最終的な出力変動は±6.7%となり、プラントの出力変動追従能力の中に充分含まれている。

BWRプラントでは、本解析範囲内においては、並列後の周波数変動による原子炉の中性子束変動は小さく、この面からの問題はない。

ただし、一部の条件下でMHC方式のプラントの加速度リレー動作によってスクラムする可能性はある。一方、EHC方式では、解析範囲内ではPLURが動作せず安定に並列される。これらの解析により、プラントの諸条件を考慮した系統復旧時の条件が極めて具体的に明示される。

第 4 章

新技術の導入効果の検討例

第4章 新技術の導入効果の検討例 ● 目 次

狛江研究所 電力システム部 調査役 小川 哲次
狛江研究所 電力システム部 系統制御研究室長 谷口 治人
狛江研究所 電力システム部 系統制御研究室 主査研究員 浅田 実
狛江研究所 電力システム部 系統制御研究室 研究担当 北内 義弘
狛江研究所 電力システム部 系統計画研究室 主査研究員 竹中 清

4-1 新しい制御技術の検討	69
4-2 超電導発電機の導入効果の評価	76

電源が遠距離・大容量化する中で電力系統の安定度向上対策は、ますます重要であり、これまでも種々の方式が検討・開発・実用化されている。この中でも、発電機そのものを安定化する技術や発電機制御系の高性能・高信頼度化は最も基本的なものである。

本章では、安定度総合解析システムがもつ機能の一適用例として、まず、現代制御理論を用いた発電機制御方式および揚水発電所に適用される可変速度の発電電動機システムについて、検証した例を述べる。つぎに近年話題となっている超電導発電機の解析モデルの開発と安定度総合解析システムへの組み込み、これが電力系統に導入された場合の安定度向上効果などを解析した結果について述べる。

4-1 新しい制御技術の検討

ここでは、デジタル技術の急速な発展を背景に、現代制御理論を適用した新しい発電機制御方式（多変数、適応形、最適制御）の一例と、揚水発電所に適用される可変速度の発電電動機システムについて紹介する。

4-1-1 新しい発電機制御方式への適用

ここで紹介する新しい発電機制御方式は、TAGEC (Total Adaptive Generation Controller) と称されている方式である。この方式は、関西電力と富士電機でそのプロトタイプが開発され、基本性能の確認が行われてきた。実用段階への移行に当たって当所も加わり、実システムを想定した種々の条件下でその適用性を検証した。具体的には当所の交・直流電力システムシミュレータを用いた基本動作に関する実験や Y 法を用いた応用動作に関する検討によって、その評価・改良を実施したものである。

(1) TAGEC の概要

TAGEC の概要を従来の発電機制御系と比較して図 4-1-1 に示す。この方式は、従来の励磁制御部とガバナ部分を、現代制御理論を適用した制御方式に置き換えたものである。その際、水力発電用にガバナ部分をすべて置き換える TAGEC I 形と、火力発電用に従来のガバナはそのままとし、TAGEC からは補助信号のみを加える TAGEC II 形とがあるが、ここでは、後者について紹介する。

この方式は、図 4-1-2 の操作量演算ブロック図に示すように、従来の励磁制御系やガバナへの入力 (V_{tk} : 発電機電圧、 P_{ek} : 発電機電気出力、 ω_k : 回転数) の他に、さ

らに 5 種類の入力 (Φ_{fdk} : 界磁鎖交磁束、 δ_k : 相角、 T_{mhpk} : 高圧タービン出力、 T_{mlpk} : 中低圧タービン出力、 V_{gk} : ガバナ出力) を加え、励磁系ならびにガバナへ補助信号を与える多変数入力・多変数出力の制御系となっている。

また、各入出力間の基本的関係を定めるゲインは、発電機が一機無限大系統に接続されているという想定の下で、時々刻々最適化されている (最適制御ゲイン演算)。その際、この算定に用いられる一部の発電機定数 (X_q) は発電機の運転状態に対応した値が用いられる。また、等価的な線路の長さも、推定した値で使うこともできるようになっている (系統パラメータ同定)。

(2) シミュレーション手法の開発

TAGEC の機能と安定度向上効果の基本的検証は交・直流電力システムシミュレータで行うことができるが、実際の電力システムをシミュレータですべて表現することは不可能なので、シミュレーションモデルを作成し、Y 法に組み込んだ。

これには、図 4-1-1 に示される TAGEC の機能のすべて、すなわち、系統パラメータ同定部 (適応化ループ (I))、最適ゲイン演算部 (適応化ループ (II))、操作量演算ブロック部 (LQ I 制御ループ) を含み、さらに計測系のモデル化ならびにプログラム化を行った。なお、発電機や励

磁機部、あるいはガバナやタービン部分、あるいはその他の従来形制御の発電機や系統などについては、すでに開発されているモデル（2-1節参照）が結合される。

系統パラメータ同定部は、発電機から等価無限大母線までのリアクタンスを推定する部分でありその結果は最適制御ゲイン演算を行う適応化ループ（Ⅱ）に引き継がれる。この推定には等価無限大母線電圧の大きさを一定と仮定してEKF（Extended Kalman Filter）法を適用して求められる。

最適制御ゲイン演算部は、次項の操作量演算ブロック部で使用する係数行列を算定する部分である。この最適化のための発電機と系統のモデルは、発電機としてDQ軸のダンパと電機子抵抗を無視したパークモデル、系統として一機無限大系統が用いられる。これを、線形化、離散時間化して、積分制御形のLQI制御を仮定し、次の評価関数Jの値を最小化するようにリカッチ方程式を解く。

$$J = \sum \{ (Q_v(V_{tk} - V_s)^2 + Q_p(P_{ek} - P_s)^2 + R_e(\Delta U_{ek})^2 + R_g(\Delta U_{eg})^2) \}$$

ここで、 Q_v 、 Q_p ：電圧変動、電力変動制御に対する重み係数

R_e 、 R_g ：励磁系、ガバナへの操作量に対する重み係数

V_{tk} 、 P_{ek} ：k時点での発電機電圧、発電機電気出力

V_s 、 P_s ：発電機電圧、発電機電気出力の設定値

ΔU_{ek} 、 ΔU_{eg} ：(k-1)時点からk時点までの励磁系、ガバナ操作量の変化分

操作量演算ブロック部は最適ゲイン演算部で決定された係数行列Kと、計測入力から、離散積分形制御で励磁系とガバナへの制御信号を与える部分である。なお、最適制御ゲイン演算部でのモデルでは、 δ は無限大母線電圧から発電機内部までの相差角として定義されるが、その計測は実際には困難であることから、実際は発電機端子電圧と発電機内部までの相差角を用いている。さらに、 T_{mhpk} （高圧タービン出力）、 T_{mlpk} （中低圧タービン出力）、 V_{gk} （ガバナ出力）についても計測の困難さから、

TAGEC内に別にガバナ・タービンモデルを構成して推定を行い、その出力を用いている。

操作量演算ブロック部に使用される入力データには、計測・演算処理の過程で遅れ要素や伝達遅れが存在し、これが制御性能に影響を与える場合があるので、計測系やデジタル処理系の遅れもシミュレーションで考慮出来るようにした。

また、図4-1-1にも示されているように、TAGECは離散時間制御であり、その制御間隔は短いものでも20m秒となっていることから、他の従来方式のモデル（連続時間モデル）との結合方法についてもシミュレーションでは十分考慮した。

（3）開発したシミュレーション手法の検証

シミュレーション手法は、当所の交・直流電力系統シミュレータ試験と対比され、その有効性が検証された。一例を図4-1-2に示す。TAGEC使用時に若干周期の短い振動がみられるが、限界となる出力や、限界を決める周期の長い成分については良く合致していることが明らかである。

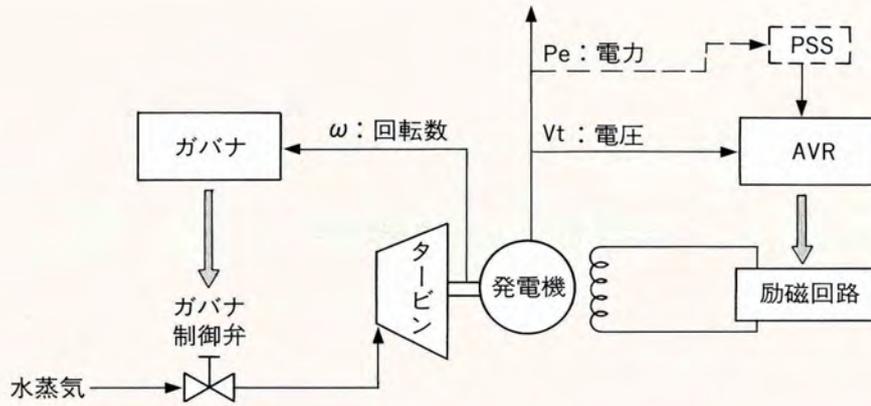
なお、同図からも従来形制御方式であるPSSに比べて、TAGECに安定度向上効果があることも実証された。

4-1-2 可変速揚水発電システム

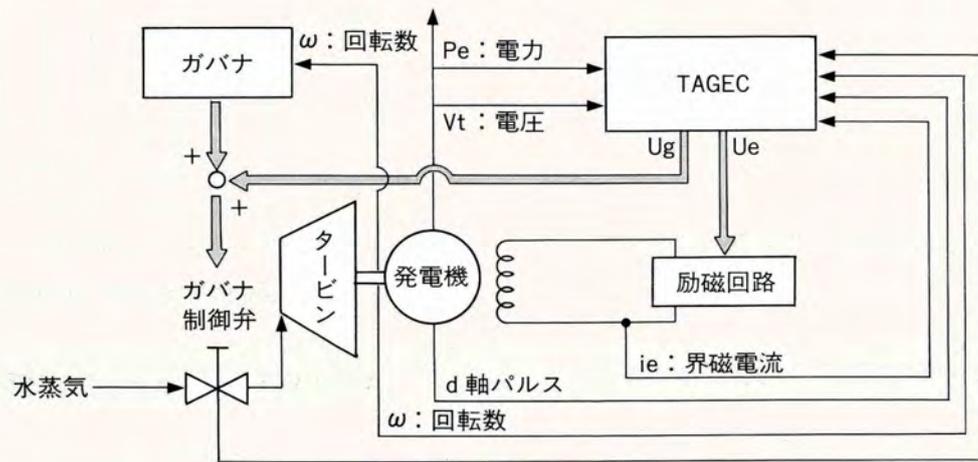
（1）可変速揚水発電システムの概要

可変速揚水発電システム（以後可変速機ともいう）は、図4-1-3に示すように、揚水発電所の発電電動機の回転子の励磁にサイクロコンバータなどの可変周波数の電源を用いたもので、これによって、固定子（系統）の周波数とは異なった速度で回転させることのできるシステムである。

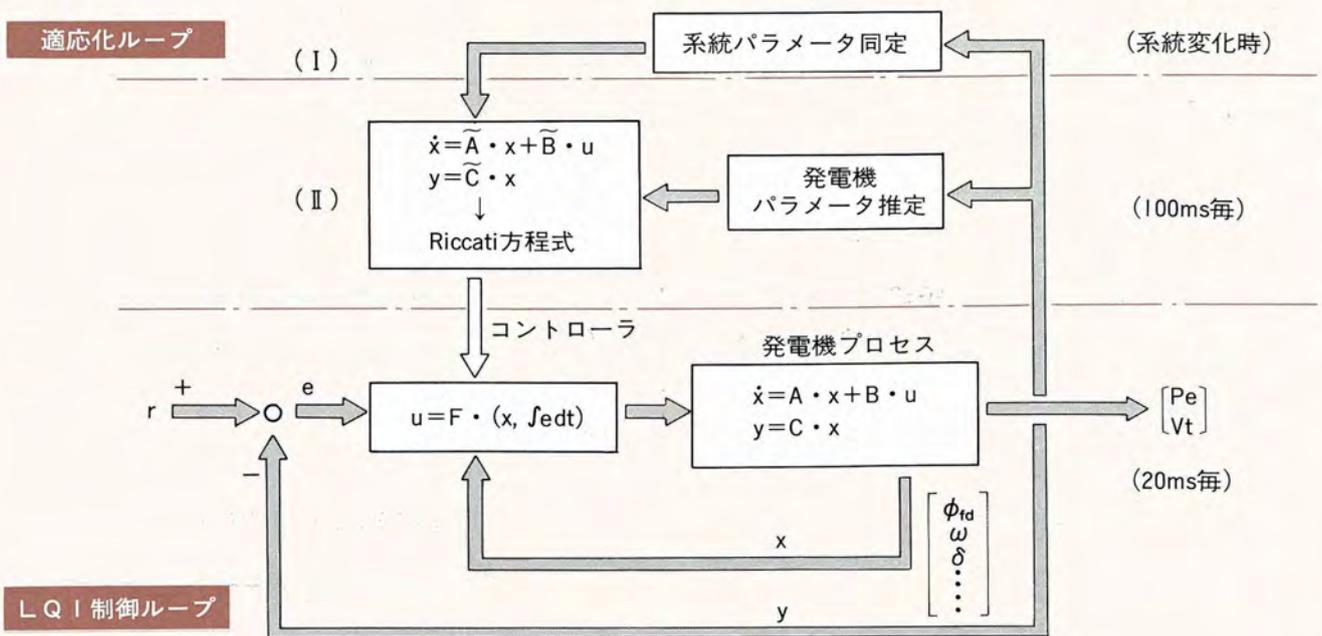
従来の揚水発電では、直流励磁の同期機を用いているので回転子は系統の周波数と同期した回転しかできない。これに対し、可変速揚水発電システムでは、回転子の回転数を制御できるので、揚水運転時にAFC（自動周波数制御）やガバナフリー（周波数の変化でガバナにより発電電動機



(i) 従来制御方式



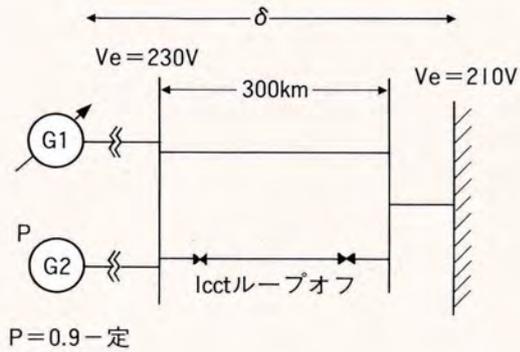
(ii) TAGEC II方式



(iii) TAGECの適応、最適化構成

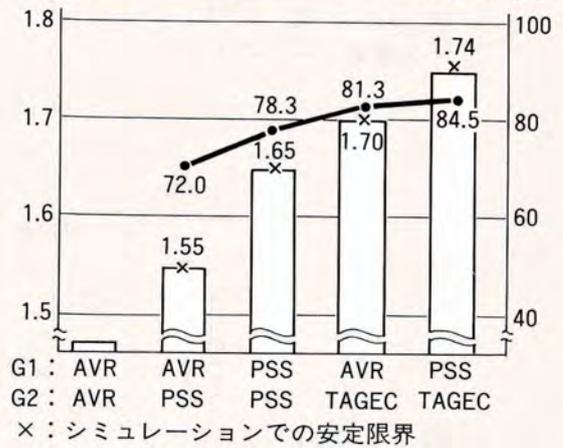
図4-1-1 TAGECの概要

安定限界シミュレータ試験結果



(a) 試験系統(1回線開放試験)

合計出力 (PU)



(b) 安定限界送電電力の試験結果

G 2 有効電力シミュレータ試験応答波形

G 2 有効電力シミュレーション応答波形

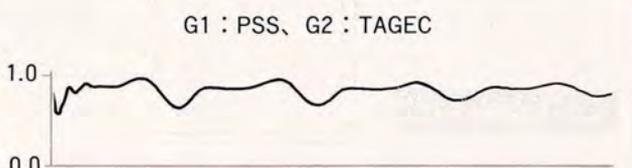
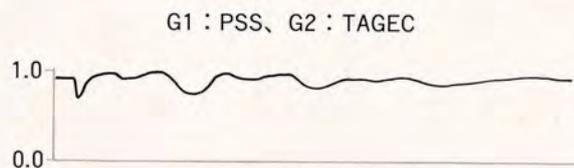
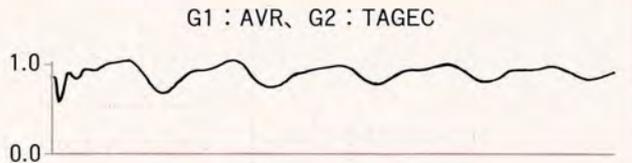
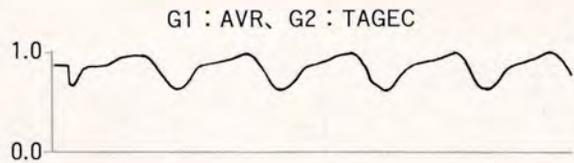
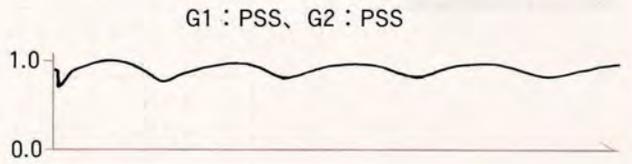
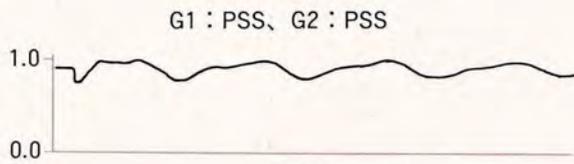
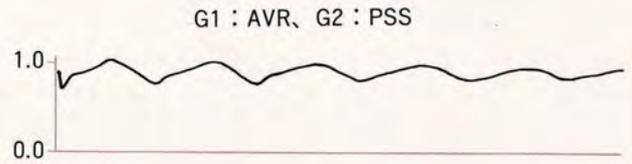
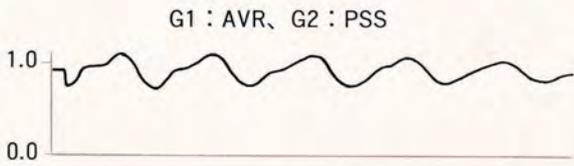
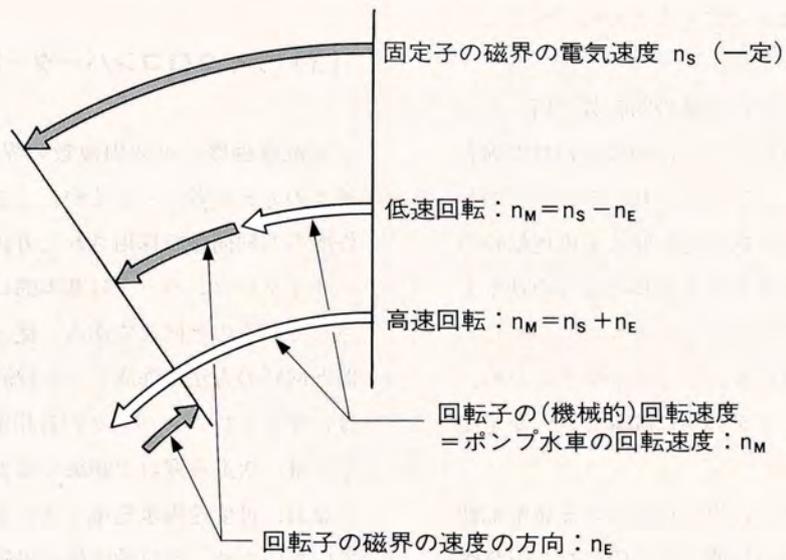
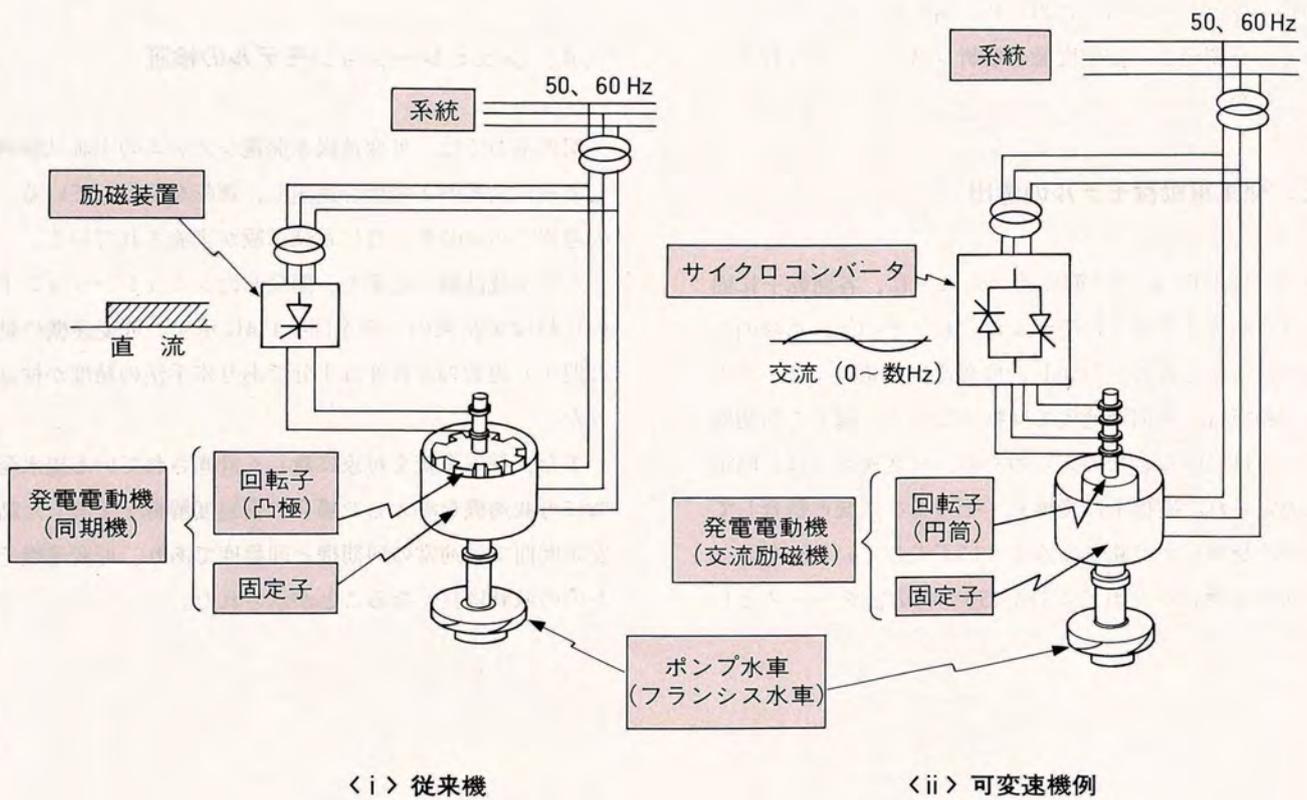


図4-1-2 交・直流電力系統シミュレータでの限界送電電力試験結果とシミュレーションの比較



(i) 回転子の回転速度の制御



(ii) 可変速機と従来機の比較

図4-1-3 可変速揚水発電システムの概要

の入力を制御する) 運転が可能となる。これは、揚水運転時のポンプの特性が、回転数が変化すると大幅に変化して入力が変わるためである。

また、従来は一般に発電時と揚水時の回転数が同一となるため、ポンプ水車の効率設計としては同期回転数が両者の最適回転数の中間にくるように設計されてきた。しかし、可変速揚水発電システムでは、揚水運転時と発電運転時の回転数を変えられるため、揚水発電所全体としての効率を向上できる。

さらに、励磁の位相を容易に変えることができるため、発電電動機の電気出力(入力)を容易に制御でき、安定度の向上も期待される。

この可変速揚水発電システムに用いられている発電電動機は、従来の水力用同期機が凸極機であるのに対し円筒機となり、またその設計概念も異なったものとなっている。また、制御系も先の TAGEC と同様、励磁制御と機械系の制御が一体化している。このため、新しくシミュレーションモデルを開発し、安定度総合解析システムで取り扱えるようにした。

(2) 発電電動機モデルの導出

通常同期機は、2-1節に述べたように、各回転子に固定された座標系をもとにモデル化され、その後、系統の共通座標に変換される。しかし、可変速揚水発電システムの発電電動機は、非同期速度で回転するため、通常同期機モデルでは対応できない。このため、可変速機では、固定子に固定された座標系に変換し、そのまま系統と結合して大規模系統解析が可能となるように工夫している。なお、これらの変換はいずれも2-1節で述べた方法をベースとし

たものである。

(3) サイクロコンバータ・制御系モデル

発電電動機に可変周波数の界磁電流を供給するには、種々の方式が考えられるが、ここでは、関西電力と日立製作所の共同開発で採用された方式をモデル化した。

サイクロコンバータは基本的には交直変換器が6台接続されているのと同じである。従ってそのモデルも交直変換器と同様の方法で作成し(2-1節参照)、制御モデルとしては、サイクロコンバータの各相電流を、比例積分(PI)もしくは一次進み遅れで制御する方式とした。

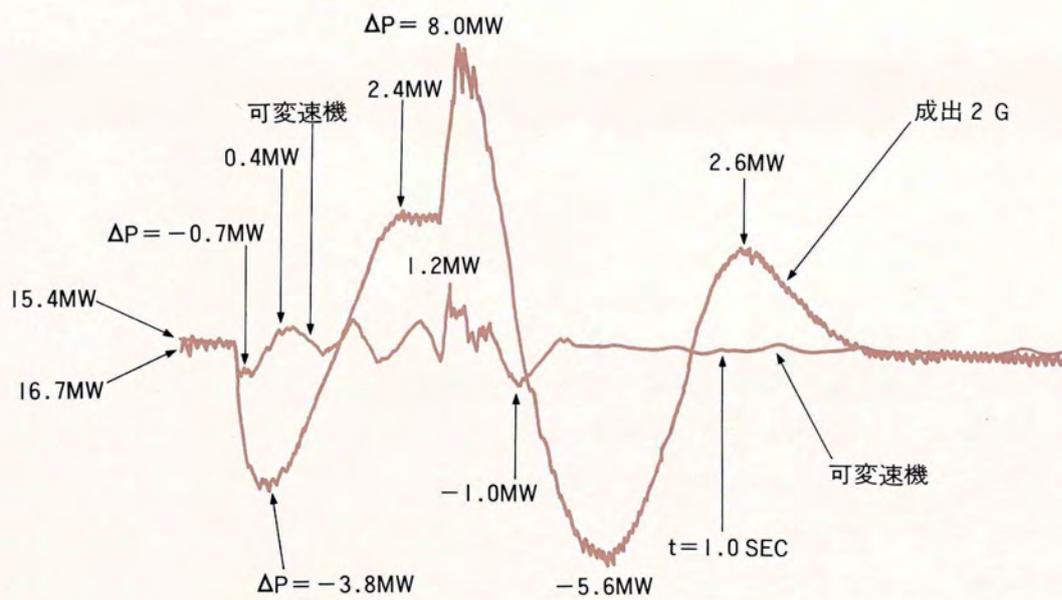
なお、可変速揚水発電システムの制御方式はまだ固まっていないため、電流設定値や界磁電圧の制御系モデルは、2-1節に示した組み込みブロック論理で構築する方式とし自由度をもたせている。

(4) シミュレーションモデルの検証

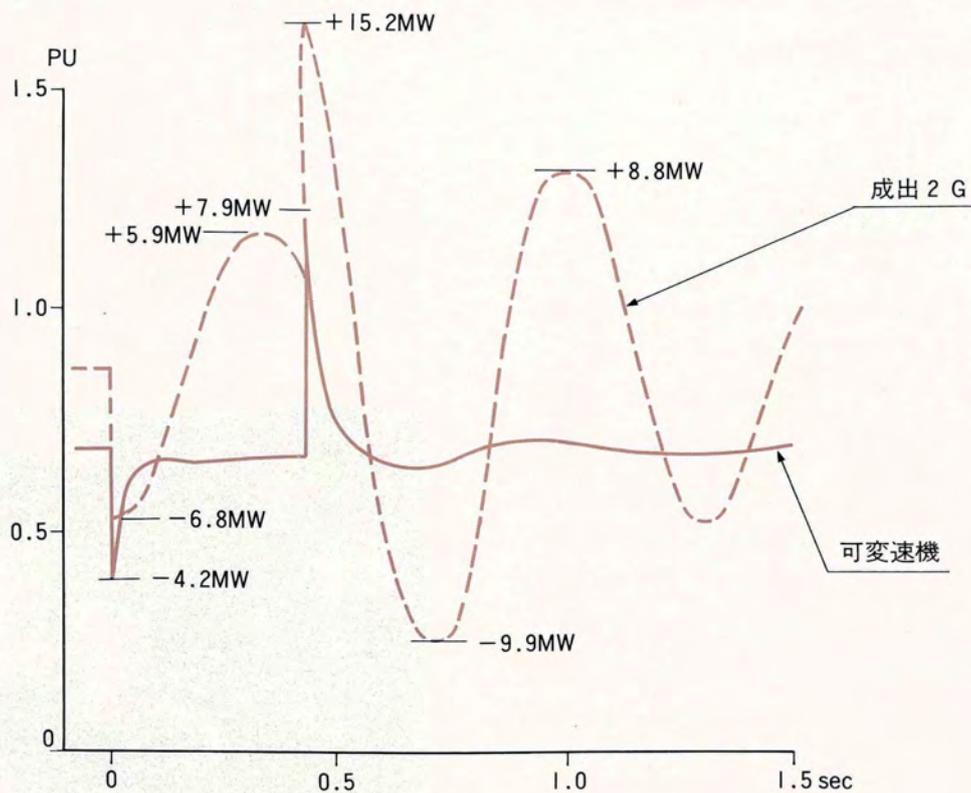
関西電力では、可変速揚水発電システムの実証試験機として成出発電所1号機を選定し、運転を開始している。その過程で昭和62年7月に系統試験が実施されている。

この系統試験の結果と、開発したシミュレーション手法の比較検証結果の一例を図4-1-4に示す。可変速機の動揺に関する両者の合致度は十分であり本手法の精度が検証された。

また、将来系統を対象に新しく計画されている揚水発電所に可変速機を導入した場合の安定度解析を実施した結果、安定度面では通常同期機と同程度であり、可変速機そのものの減衰は良くなることが示された。



(i) 系統試験による実側結果



(ii) シミュレーション結果

図4-1-4 試験結果とシミュレーション比較(単相欠相試験)

4-2 超電導発電機の導入効果の評価

当所は昭和53年頃より超電導発電機の研究に着手し、昭和58年には日立製作所と共同で50MVAの試験発電機（図4-2-1）を試作するとともに、系統への導入効果について種々の検討を実施してきた。また中央電力協議会に設けられた研究委員会に参加するとともに、昭和60年度からスタートした通産省工業技術院の主催する超電導発電機に関するフィージビリティスタディーに参加し、主として発電機定数や励磁系定数の検討および電力系統への導入効果の解析を行った。さらに米国電力研究所（EPRI）とも情報交換を行うなど、超電導発電機の実用化の可能性について鋭意研究を実施中である。

昭和63年度から通産省工業技術院の大型研究プロジェクトの1つとして、超電導発電機の7万kW級モデル機の開発を中心とする研究が8年間の計画でスタートした。当所はトータルシステム分野で新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からこの研究を受諾し、超電導発電関連機器・材料技術研究組合（Super GM）の一員として検討を実施中である。

4-2-1 超電導発電機とは

超電導発電機は構造上から2つのタイプに分けられる。1つはロータに巻かれている界磁巻線に超電導線材を用いる超電導発電機であり、他は界磁巻線のみでなく、固定子に巻かれている電機子巻線にも超電導線材を用いる全超電導発電機である。現在開発中の超電導発電機は前者のタイプであり、回転するロータの内部に回転軸の中心部を通して液体ヘリウム（約 -269°C ）を注入し、界磁巻線を構成するNbTi（ニオブチタン）の超電導線材を冷却するものである。ロータ内部は液体ヘリウムで冷却されることから断熱できる構造とする必要があり、そのためロータ内に真空断熱層や輻射シールドなどが設けられ、複雑な多層円筒構造となっている。超電導発電機の構造を図4-2-2に示す。

超電導線材は現用の線材に比べて電流密度が高くとれるので、同一サイズの界磁巻線で大電流を流すことができる。このため現在用いられている発電機（現用機）に比べて

1.5倍程度の強力な磁界が発生する。これによって同じサイズの発電機ならば2倍程度の出力が得られる。逆に同一出力では、ロータの直径、軸の長さを小さくすることがで

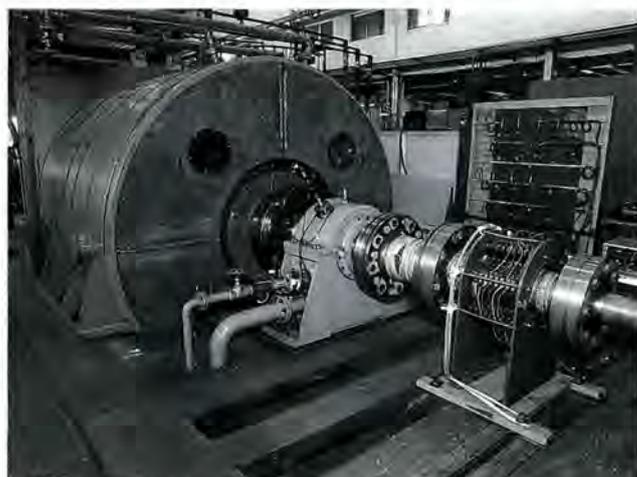


図4-2-1 日立製作所と共同開発した5万kVAの超電導発電機

き、現用機に比べて重量で約50%、サイズで約60%小型化することができる。また界磁の抵抗損が零になることや小型化によって機械損が減少することにより発電機損失は現用機の約4割に減少し、その結果発電効率は約0.5~0.7%改善される。

超電導発電機はロータの磁界が強力であることから、固定子側の電機子巻線に電流が流れても、それによってエアギャップの磁界へ影響する程度は現用機に比べて大幅に減少する。すなわちこの効果を同期リアクタンス (X_d) で表した場合、この X_d の値は現用機の1.7~2.0p.u.に対して、0.3~0.5p.u.と約1/5に減少する。また過渡リアクタンス $X'd$ の値も現用の原子力機の0.3~0.4p.u.から0.2~0.3p.u.へと小さくなる。このため超電導発電機を電力系統に導入すると、定常時、事故時とも電力系統の安定度が大幅に向上する。

4-2-2 超電導発電機解析用モデルの開発

超電導発電機は現用の発電機とは異なり、常温のダンパの他にさらにその内側に低温のダンパを設けることにより、電機子巻線側からの各種の変動磁界が界磁巻線に侵入して超電導状態を壊さないように保護している。また常温のダンパは3層構造となることも多い。従って、はじめに述べたようにロータは複雑な多層円筒構造となっており、現用機のモデルの表現では不十分であるので、この特性を表す新しい発電機解析用のモデルが必要である。このため、多層構造の各層毎に等価な巻線があるとして解析する発電機モデルを新たに開発し、安定度総合解析システムに導入した。

ここでは安定度総合解析システムを用いて得られた超電導発電機の導入効果について述べることにする。

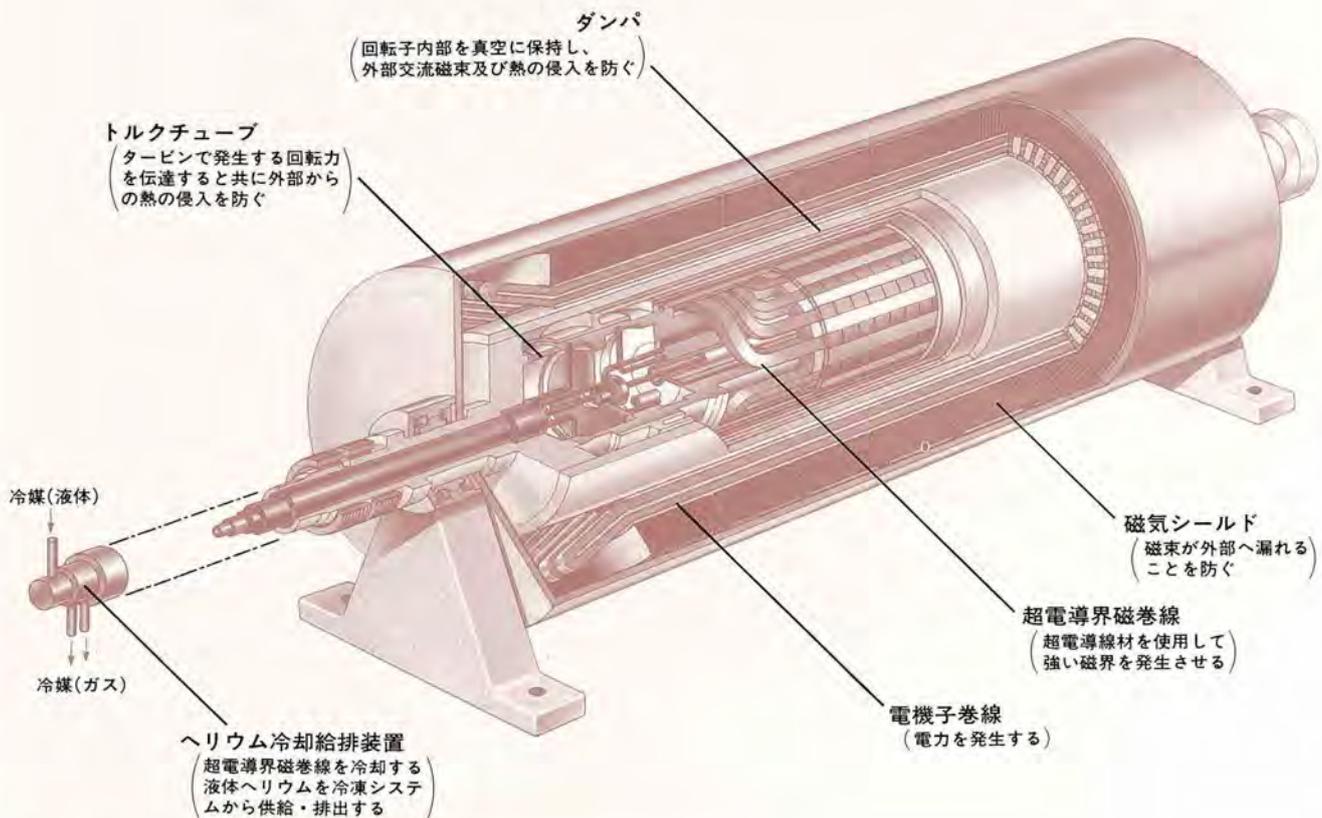


図4-2-2 超電導発電機の構造図

4-2-3 系統安定度の向上効果

超電導発電機が電力系統へ導入された場合、系統制御面で得られる最も大きな効果は安定度の向上である。超電導発電機は先に述べたように同期リアクタンス X_d の値が現用機の $1/5$ と小さく、このため定態的な状態において安定に電力を送ることのできる能力（定態安定度）は極めて大きい。また過渡時におけるリアクタンス $X'd$ の値も現用機より $20\sim 30\%$ 小さく、このため事故等の過渡時に系統が崩壊することなく安定に送ることのできる限界送電電力

（過渡安定度）も現用機に比べて $20\sim 30\%$ 増大する。

一例として電気の消費地である大都市より 200km 離れた発電所から電力を送る場合、超電導発電機と現用機とで過渡時の限界送電電力にどれだけの差があるかを見る。発電機は界磁電圧を調整することによって、電機子巻線に誘起する電圧を高めて安定度を向上させることができ、その調整速度（励磁速応度）が速いほど安定度向上効果が大きい。この励磁速応度をパラメータとしてユニット容量 100 万 kW の火力発電機の限界送電電力を求めた結果を図 4-2-3 に示す。

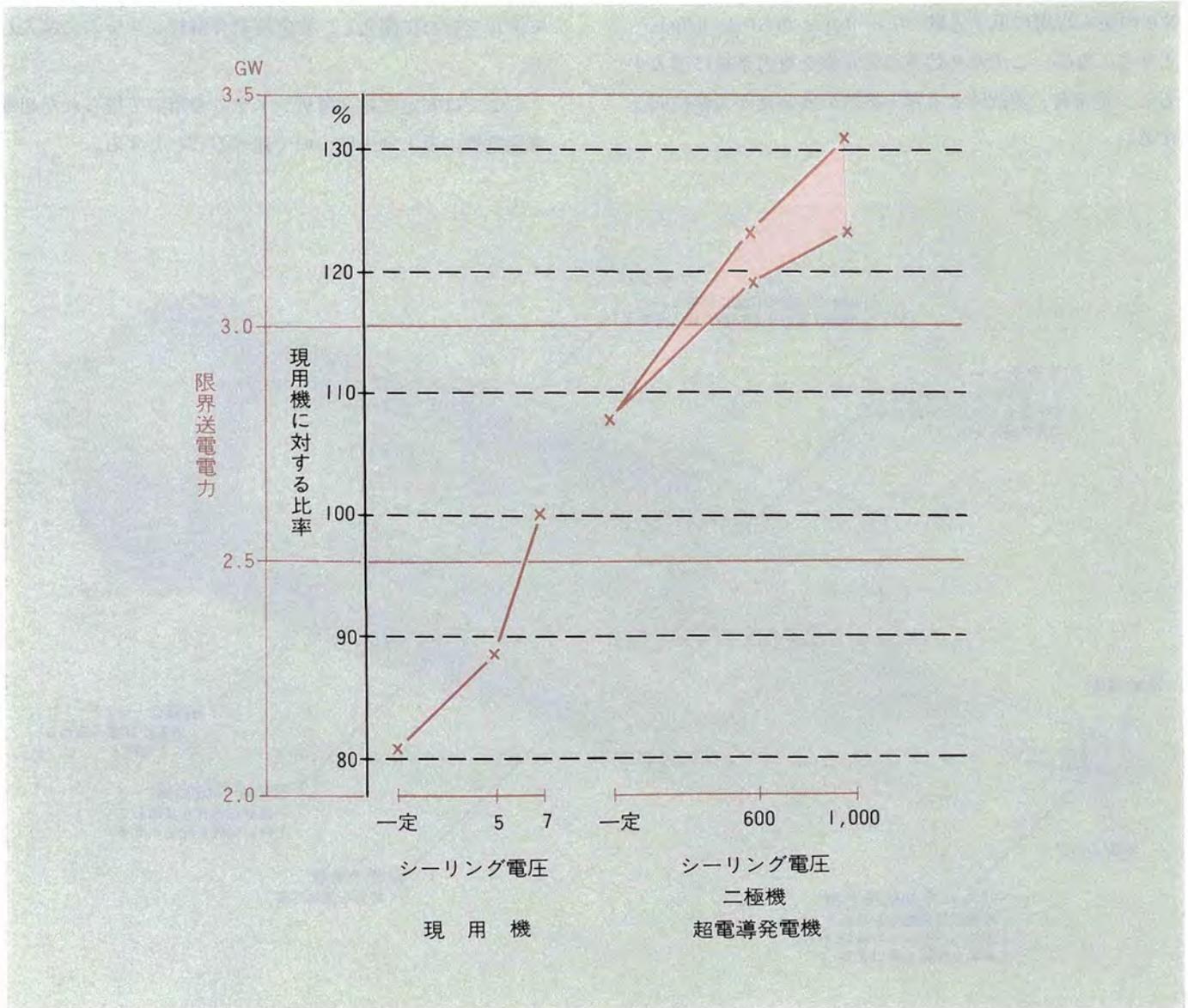


図4-2-3 超電導発電機の限界送電電力(送電路離200km)

この結果、励磁速度が高く限界送電電力の最も大きい現用機を比較の基準とした場合、超電導発電機は、励磁を変化させない場合でも現用機の約1.1倍、励磁を速く変化させた場合には約1.3倍の限界送電電力の向上が見られる。さらに送電距離を300kmとした場合は、この倍率はそれぞれ1.2倍、1.4倍と大きくなり、発電所が遠隔地にあるほど超電導発電機の安定度向上効果が増大する。

超電導発電機を導入する場合、既設の現用発電機を順次リプレースするシナリオが一般的と考えられる。この場合、1つの電源地点において超電導発電機の導入割合が増えると限界送電電力はどのように増大するかについて検討を行った。その結果の一例を図4-2-4に示す。この結果、超電導発電機の導入初期においては限界送電電力は大幅に向上するが、電源地点の発電機が50%以上超電導発電機にリプレースされると次第に飽和傾向を示すことが明らかとなった。

以上に見てきたように、超電導発電機は安定度の向上効果があるが、現用機で実用化されている各種の安定度対策と比較してどの程度の効果があるかを見たのが図4-2-5である。これは500kVの送電線（巨長200km）での1つの例であるが、超電導発電機の安定度向上効果（限界送電電力2.5GW）は、直列コンデンサで30%補償、制動抵抗で約30万～40万kW、静止型無効電力補償装置で約70万～80万kVA、タービン高速バルブ制御付発電機の容量で約70万～80万kWに相当する効果があると考えられる。中間開閉所の導入効果は限界送電電力でみて3.0GW程度と、超電導発電機より大きいとされる。これは、むしろ長距離送電線の場合に超電導発電機と組み合わせてその相乗効果を期待する形態が良いと考えられる。以上の結果から、超電導発電機が現用機並みのコストで製造できるとすれば、各種の安定度向上対策費が節減できることとなり、そのメリットは大きいと思われる。

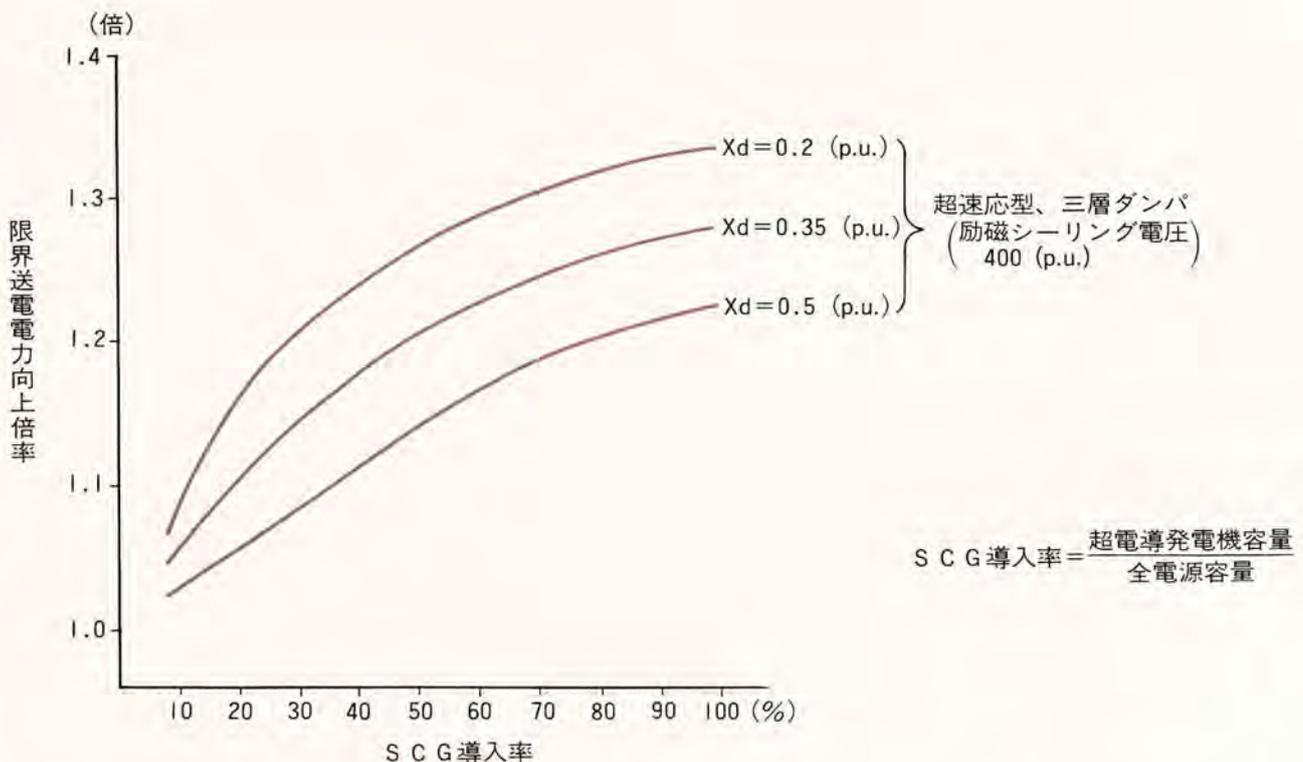


図4-2-4 超電導発電機の導入量と限界送電電力向上効果

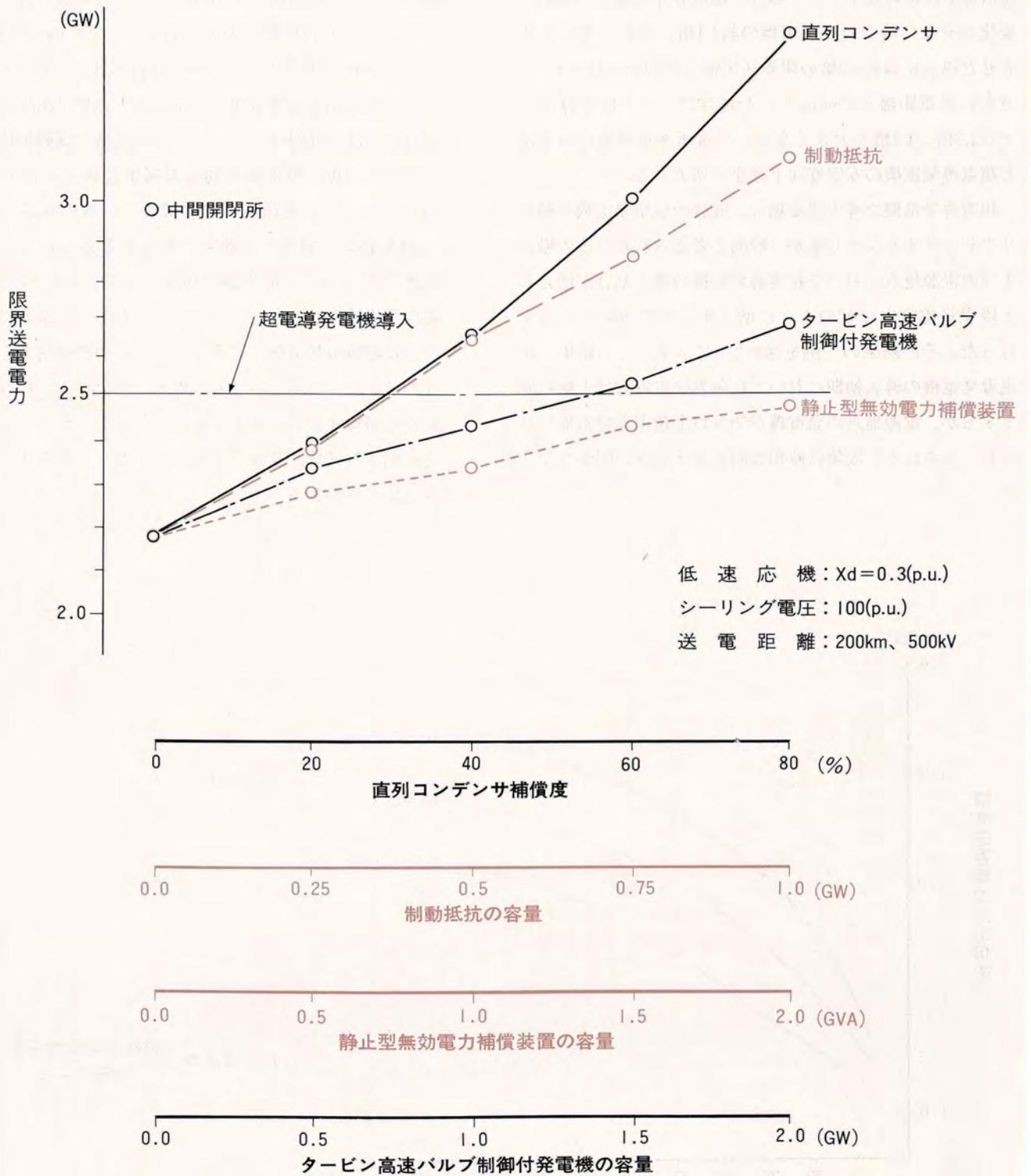


図4-2-5 各種安定度向上対策を適用した場合の超電導発電機の限界送電電力

4-2-4 系統電圧の維持効果

超電導発電機の電機子巻線を支えるコアは、強い磁界による磁気飽和を避け、損失を減らすため鉄心を使用していない。このため発電機が電力系統から無効電力を吸収した場合の鉄心端部の過熱の問題が無いので、図4-2-6に示すように超電導発電機の進相運転領域が拡大する。この結果夜間の軽負荷時における電圧維持能力が増大するとともに、軽負荷時に使用するリアクトルの設置量を節減することができる。その節減量は系統構成にもよるが、おおよそ発電機定格出力 (kVA) の約20~40%の無効電力になると試算される。

また、超電導発電機は同期リアクタンス X_d の値が現用機の1/5程度と小さいため、電力系統からの要求により無効電力出力が大幅に変化しても、端子電圧の変動は極めて小さく、励磁制御が無くとも系統電圧の維持効果は大きい。さらに重負荷時に発電機の界磁電流が上限値となり端子電圧を一定に維持できなくなって系統電圧が大幅に低下するいわゆる電圧不安定時においても、 X_d の値が小さいため電圧低下の速度を緩やかにする効果があり、電力用コンデンサ投入などの時間的余裕が得られるというメリットがある。

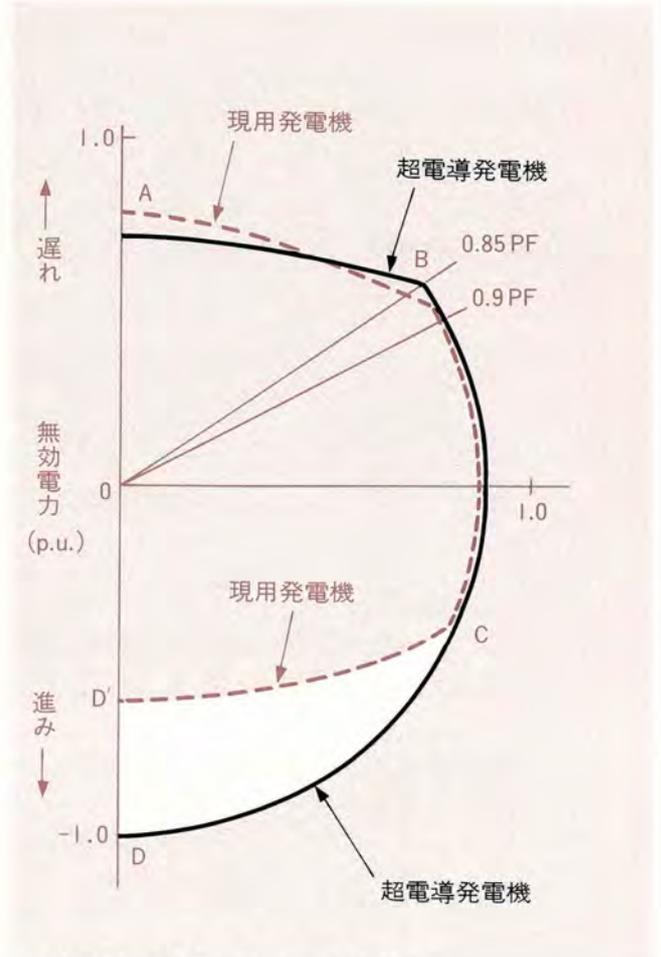
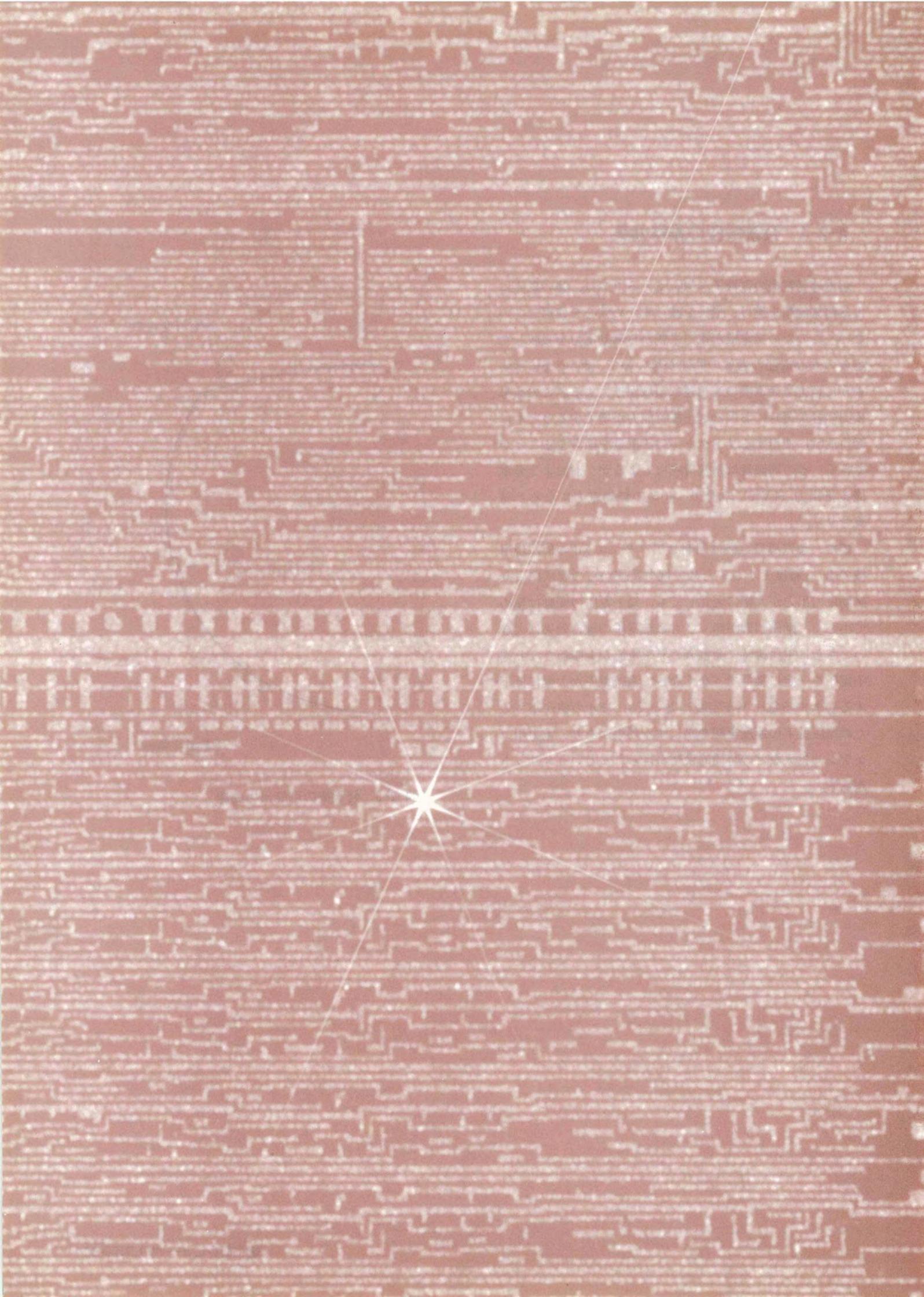


図4-2-6 発電機の可能出力曲線



第 5 章

今後の展望

5

5-1 今後どのような分野に利用されてゆくか?85
 5-2 どのような要素を新たに開発してゆくべきか?86



図5-1 系統安定度解析システムの今後の展望

系統安定度解析のツールとしては、今までさまざまなものが開発されているが、大別して、電力系統シュミレータなどのアナログ形と、各種デジタル計算機プログラムによるデジタル形がある。ここでは後者を対象とし、やや夢のような事柄も含めて、ニーズからシーズまで中広くその周辺の今後の課題を展望してみる。

図5-1は、今回開発した系統安定度解析システムの今後を概観するものとして、関連の項目をひとつの樹木に表現してみたものである。地上から上は解析システムの応用面あるいはニーズを示しており、地下は解析システムの実現に必要なハードウェアとソフトウェア、すなわちシーズを示している。また、木を支える支木は解析システムの実用をよりスムーズにするための支援事項を示している。

5-1 今後どのような分野に 利用されてゆくのか？

現在、系統安定度解析システムは、電力各社で設備計画における各種系統安定度対策の検討、安定度面から見た運用スケジュールのチェック、あるいは頻度は少ないが、系統大事故発生時の事後分析など、主としてオフライン用に利用されている。

将来は、これら計画立案に加え、以下に示すようにオンライン用としても活用されるほか、オフラインとしてもさまざまな新しい用途が考えられよう。

(1) オンライン用としての用途

大規模システムの重大事故を防止する、いわゆるセキュリティ運用が今後重要な事項のひとつとなることが予想されることから、つぎの2つがクローズアップされてこよう。

- ①系統監視………平常時から系統が危険状態にならないように監視する、いわゆる系統監視への利用。これについては、現在、送電線の過負荷など、静的特性からみたレベルの監視は、一部で実現しているが、今後は動的電圧安定性を含む系統安定度をとり込んだ監視システムも必要視されてこよう。
- ②緊急制御………実際に事故が発生した時、それが次々と波及してゆかないように、迅速に発電機やしゃ断器を制御する、いわゆる緊急制御への利用。これについては、今後さらに制御を確実化するために自律分散方式など、高度なロジックをとり込んだ制御論理が要求されよう。

これらを実現するためには、現在の解析システムの安定度プログラムを用途に合わせ一層高速演算化し、リアルタイム化すること、および自律分散制御など、将来の新しい制御方式に適した安定度プログラムへの改良が求められよう。

(2) オフライン用としての用途

電力解析技術は、他の電力技術と同じように、成熟技術として今後ますますブラックボックス化してしまい、解析の前提や理論的枠組さらには解析結果の物理的解釈について理解を得ることが困難となるおそれが出てくる。そのため、現在オフライン用として利用されている計画立案分野から、さらに以下のような分野へ利用範囲を拡大していく必要がある。

- ①計画決定者との意志疎通………技術者によって検討されたいくつかの計画案を decision maker（事務部門）に説明する際のツールとして、今後の解析システムを役立てていくよう機能の充実を図る必要がある。
- ②技術者の養成………オペレータの教育・訓練などのために、現在訓練用シュミレータが電力各社活用されているが、系統安定度の修得のための機能は未だ完全とはいえない。今後この目的のための機能の充実が要求されよう。

これらを実現するために、現在の解析システムにさらに入力設定と出力表示に一段と工夫をこらしたマンマシンインターフェイスの高度化が期待される。

*EWS：Engineering Work Station，計算機の多機能端末を更に進め、種々の処理機能を持たせたもの。

5-2 どのような要素を新たに開発してゆくべきか？

前記のニーズに対して、今後の課題として考えられる開発要素は、ソフトウェア、ハードウェアなどに分けて、以下のようなものがあると考えられる。

(1) ソフトウェア

①解析技術………現在ほぼ完成の域に達していると思われるが、さらに演算の高速化を図るために

- 並列演算処理化の検討（マルチプロセッサなどハード面との進歩に合わせた新しいパラレル演算論理の導入）
- いくつかの経験則の論理化（たとえば、Y法においては、シミュレーション時間のキザミ巾の可変性、S法においては、ランチョス法初期ベクトルの修正、など）
- S法とY法との結合（両プログラムを有機的に組み合わせ、実務の目的がスムーズに実現できる統合プログラムの可能性の検討）

②モデリング………既開発のモデルについては、今後ともモデルの改良が図られ、また、SMESなど新しい装置については引続きモデルの開発が進められようが、このほかに

- 系統等価縮約手法の確立（遠方系統など解析の主対象でない系統を目的に応じて等価的に簡略化する技法の確立。古くから試みられてきた重要な課題だが、なかなか決定的なものが見出されていない）
- モデルの標準化と簡略化（制御系、負荷、等価縮約系統など各種モデルについて、いくつかの標準化された簡略モデルを、利用目的に合わせて提供できる方式の開発）

③知識ベース………今後は、エキスパートシステムをとり入れた対話形式で初心者にも使える支援システムの開発が必要となろう。

- 入力データの自動設定（間違いデータの検出精度の向上およびある程度の自動修正、解析目的に応じた適当なレベルのモデル（簡略モデル）やパラメータの設定）

- 系統安定度の評価（系統安定度の自動判定方法や対策立案のためのヒントの網羅的提供）
- 知識ベースの構築（解析システムをより有効に活用するための知識ベースの体系化とその獲得技術の確立）

(2) 支援技術

ソフトウェアという解析システムの中核となる技術のほかに、つぎのような支援技術も必要となる。

①ハードウェア………今後はコンピュータの性能をはじめマンマシンインターフェイスなどのハードウェアの面で一層の進歩が予測され、その活用が期待される。

- 系統動特性表示盤の開発（電力系統のダイナミックなふるまいを画面に動画として表示するシステムの開発、系統安定度をひとつのイメージとして抽象化するソフトウェア面でのセンスも必要）
- TPOに則した各種対話式解析装置の開発（液晶など大型画面を用いたEWS^{*}あるいはポータブル型の解析システムの開発、入出力装置を通じて自由に会話型式でやりとりのできる解析システムの開発）

②そのほかの周辺技術………このほか以下のような関連技術が重要である。

- 開発・管理への支援（現在のようにプログラムの修正や追加がまちまちであると、大規模のソフト開発に一般にみられるように、ツギハギでバラックのようなプログラムと化してしまうおそれがある。研究開発／実務運用の2つにプログラムを区別しておくことが必要）
- プログラム・データの標準化と認知（プログラムやデータ機器制御系モデル、テスト系統モデルなどを標準化するだけでなく、それを公式の学術機関などを通してわが国として統一的なものに位置づけるとともに、それらを一元的に管理しておくことが必要）

お わ り に

狛江研究所 副所長 鈴木 治朗

電力系統の安定度解析は、今や大規模連系系統のような極めて巨大で複雑なシステムを対象とするようになってきた。モデルがカバーすべき範囲も制御システムの高度化に伴って著しく広範になってきた。安定度解析の精度向上など解析技術の研究は、常に進歩発展をつづける対象モデルの巨大さ複雑さとの終わりなき戦いと言うことができよう。

当所の大規模系統の安定度解析手法の研究を振り返ってみると、シミュレーションによるものは1970年代前半に、固有値解法によるものはそれより数年後に、それぞれプロトタイプの解析ソフトを開発した。これらの基本論理そのものは現在と大差はないものの、初期段階においては解析可能な系統規模、解析時間、精度、および解析ソフトの使いやすさなど実用性の面から見ると不十分なところが多かった。幸いなことに、これらの解析ソフトは、プロトタイプながらわが国の電力会社の実務に速やかに活用されるようになり、これに伴い種々の改良に対するコメントを頂いてきた。今日、これらの解析ソフトがわが国の電力会社の日常業務に定着するに至った背景には、このような数多くの電気事業の実務にたずさわる方々からの適切なフィードバックのあったことを忘れてはならないと思っている。

今後も、より高度な制御機能の付加や新技術の導入など電力系統の進歩、発展に合わせ、これらの解析ソフトを成長させていかなければならない。また一方で、より容易に利用して頂くために計算機のハード機能の進歩を睨みながら、人間とのインターフェイスなどで種々の改良を図って行くことが重要であろう。これらの課題の処理に当たっては、これからも開発者と利用者との密接な連携が肝要である。電気事業の関係の方々に、引き続きこの解析システムを活用して戴き、忌憚なきご意見をお寄せ下さることをお願いするとともに、それに基づいて今後も本解析システムの一層の改良に腐心したいと考えている。

デジタル計算機を手段とした安定度解析技術の研究は既に20年以上の歴史を有する。当所ではこれまで諸先輩から多くの技術を受け継ぎ、また次世代にも多くを渡していきたいと思う。そうした流れの中で、ひとつの節目として、本レビューが位置付けられていることをご理解頂ければ幸せである。

関連する主な研究報告書等

2

1. 「大規模電力系統の安定度総合解析システムの開発」総合報告T14(1990.4)2章～5章
2. 「安定度解析のための発電機・制御系の基本特性」研究報告：180011(1980.11)
3. 「安定度解析用潮流断面作成論理の開発」研究報告：180075(1982.5)
4. 「電力系統の不均衡故障時の過度安定送電限界」研究報告：T87075(1988.7)
5. 「電力系統の動特性解析計算の高速化—新しい発電機の解析法と励磁系の等価モデルの開発—」研究報告：T88030(1989.1)
6. 「系統故障自動監視記録による負荷の電圧特性分析」研究報告：T88533(1989.5)
7. 「ポンプ水車を含む水路系過渡現象の簡易解析法」研究報告：182059(1983.6)
8. 「電力系統長時間動特性解析のための火力貫流プラントモデルの開発」研究報告：183047(1984.5)
9. 「周波数変動時の火力プラント出力応動特性」研究報告：184034(1985.4)
10. 「軽水炉発電プラントの単独系統運転特性解析手法の開発」研究報告：183054(1985.3)
11. 「電力系統長時間動特性解析のためのPWRプラント応動解析手法—1次冷却材ポンプモデルの開発—」研究報告：T86063(1987.8)
12. 「電力系統長時間動特性解析のためのPWRプラントモデル」研究報告：T87114(1988.7)
13. 「電力系統の運用のための改良型BWRプラントモデル」研究報告：T87095(1988.9)
14. 「SVCによる定態安定度向上策—解析プログラムの開発とモデル系統に対する基礎的検討—」研究報告：T88090(1989.5)
15. 「モード解析による系統縮約手法(その1)—基本論理の開発—」研究報告：180065(1981.10)
16. 「動態安定度解析のための系統縮約論理」研究報告：181051(1982.7)
17. 「大規模電力系統の動的定態安定度解析手法—S行列法—」研究報告：179068(1980.10)
18. 「大規模電力系統の動揺モード解析手法の開発と実証」研究報告：182004(1982.9)
19. 「予防制御のための定態安定度判別手法」研究報告：184032(1985.4)
20. 「電力系統の安定運用のための予防制御論理—オンライン化のための基本解析プログラム—」研究報告：185032(1986.8)
21. 「直流多端子系の動特性解析手法の開発(その1)—直流線路分岐式(集中容量表現)の場合—」研究報告：179042(1980.8)
22. 「交直連系系統の定態安定度—固有値法による直流系統の電源発電機への影響—」研究報告：180034(1981.4)
23. 「交流系統不平衡故障に対する直流系統の応動特性とその安定化制御(その1)」研究報告：185028(1986.7)
24. 「系統計画データファイルのための潮流チェックプログラムの開発」研究報告：180058(1981.7)

3

25. 「大規模電力系統の安定度総合解析システムの開発」総合報告T14(1990.4)6章
26. 「タービン高速制御による安定度向上」研究報告：181050(1981.12)
27. 「オンライン外部系統推定による脱調予測論理の開発」研究報告：T87061(1988.7)
28. 「系統間並列現象の解析—解析手法の開発と基本現象の解明—」研究報告：T86047(1987.3)
29. 「系統間並列現象の解析(その3)—2機無限大系統における交・直流電力系統シミュレータ実験—」研究報告：T87100(1988.11)
30. 「電力系統の定態安定度向上対策(その1)—PSSの設置箇所選定と定数最適化論理—」研究報告：183040(1984.6)
31. 「電力系統の定態安定度向上対策(その2)—固有値感度による予防制御の基本論理—」研究報告：T86039(1987.2)
32. 「定態安定度限界近傍における動揺現象」研究報告：185010(1985.11)
33. 「長距離串形系統の不安定動揺現象とその対策—励磁制御系の影響とPSSによる安定化効果—」研究報告：T88001(1988.8)
34. 「系統分断時の原子カプラントの単独系統運転能力」研究報告：184039(1985.6)
35. 「静止型無効電力補償装置による直流系の運転特性向上効果」研究報告：181017(1981.12)
36. 「原子力発電所からの直流単独送電(その4)—直流系統の協調制御によるBWR原子カプラントのスクラム防止対策—」研究報告：183041(1984.3)
37. 「原子力発電所から直流単独送電(その5)—PWR原子カプラントの安定運転性の検討—」研究報告：184024(1985.5)
38. 「直流送電における受電側交流系統の安定性と電圧安定化方策」研究報告：184046(1985.8)

4

39. 「大規模電力系統の安定度総合解析システムの開発」総合報告T14(1990.4)2章
40. 「超電導発電機による電力系統の安定度向上効果」研究報告：T87001(1987.9)
41. 「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の安定化—解析モデルの開発と試験結果の検証—」研究報告：185005(1985.6)

電中研レビュー NO.25

●平成2年10月19日発行

●編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部
東京都千代田区大手町1-6-1[大手町ビル7階]☎100
☎03 (201) 6601(代表)
●印刷・株式会社 電友社

本 部／経済研究所

東京都千代田区大手町1-6-1 ☎(03)201-6601 ☎100

我孫子研究所 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎(0471)82-1181 ☎270-11

赤城試験センター 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎(0272)83-2721 ☎371-02

柏江研究所／原子力情報センター／ヒューマンファクター研究センター

東京都柏江市岩戸北2-11-1 ☎(03)480-2111 ☎201

横須賀研究所 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎(0468)56-2121 ☎240-01

UHV塩原実験場 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎(0287)35-2048 ☎329-28

編集後記

電中研レビュー第25号「電力系統の高度安定運用に向けて—安定度総合解析システムの開発とその適用」をお届けいたします。

本号では「巻頭言」を関西電力株式会社取締役副社長成松啓二様にお願ひしました。ご多忙中にもかかわらず快くご寄稿いただき、心からお礼申し上げます。

当所には、昔から「地震、かみなり、安定度」という言葉があります。これは、単に電力供給の信頼性維持の立場から見て恐ろしいものと言うだけでなく、研究面から見た難しさをも指しています。

とくに、「安定度」の問題は、地震やかみなりのように体で感じたり目や耳で知覚することが出来ず、まるで幽霊のように知らぬ間にやって来て多数の発電機の並列運転状態を壊すのですから、電力系統の運用者にとって実に気味の悪いものです。

今般お届けするレビューは、この問題に対する適切な予測、評価、対策の立案などを行うための解析システムの開発と、これが電気事業大での討議を経てわが国全ての電力会社共通のツールとなった背景、およびその適用例のいくつかをご紹介します。

なるべく平易な説明となるよう努力したつもりですが、現象そのものが難解で十分なご理解が得られるかどうか自信はありません。忌憚ないご批判を賜り、今後研究開発の参考とさせて頂ければ幸いです。

IR

電 中 研 レ ビ ュ ー No. 25
正 誤 表

訂 正 箇 所	誤	正
20頁 執筆者欄 上から2行目	システム部	電力システム部
44頁 執筆者欄 下から2行目	研究担当	担当研究員
68頁 執筆者欄 下から2行目	研究担当	担当研究員