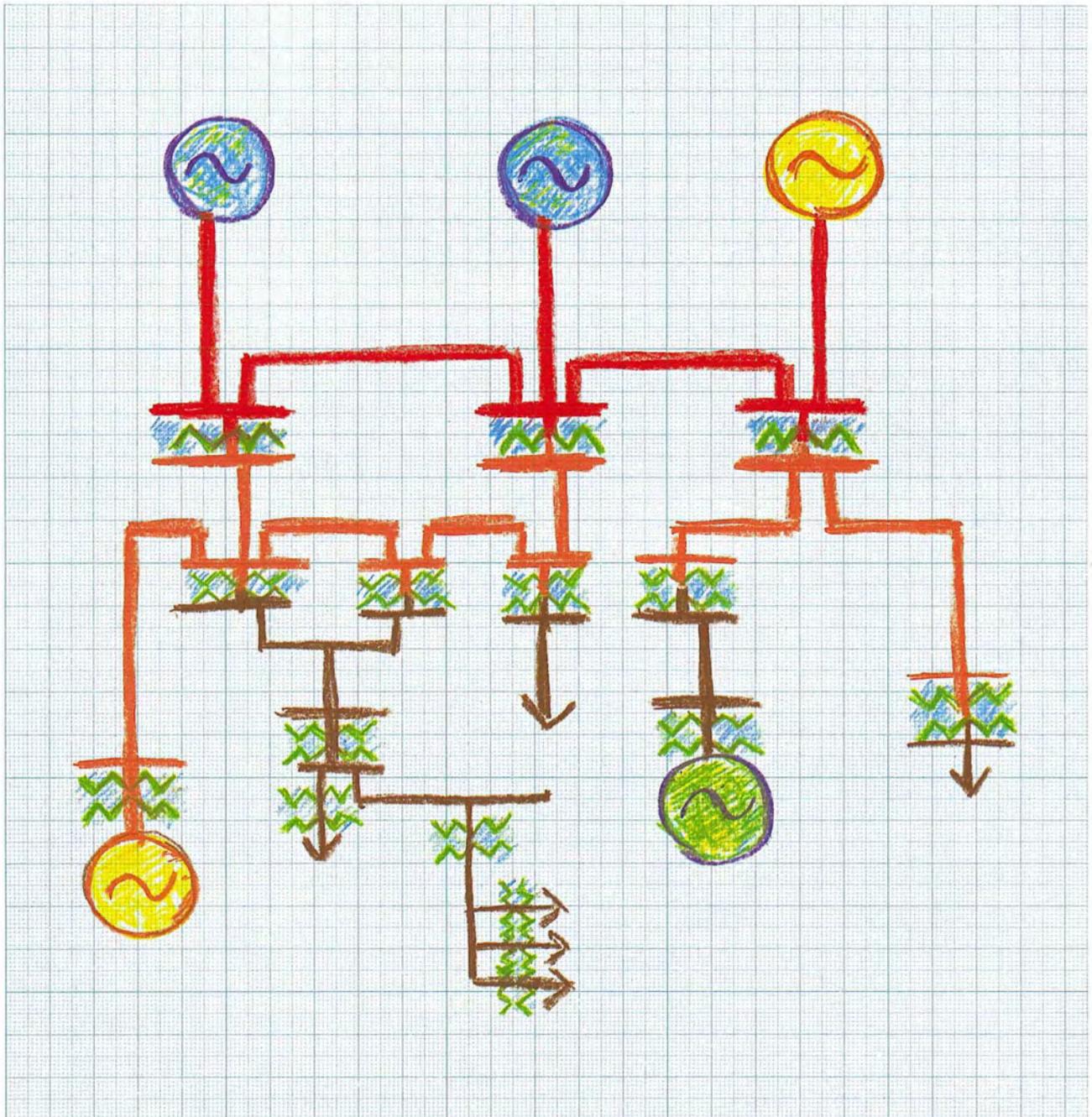


# DENKEN REVIEW

## 電研レビュー

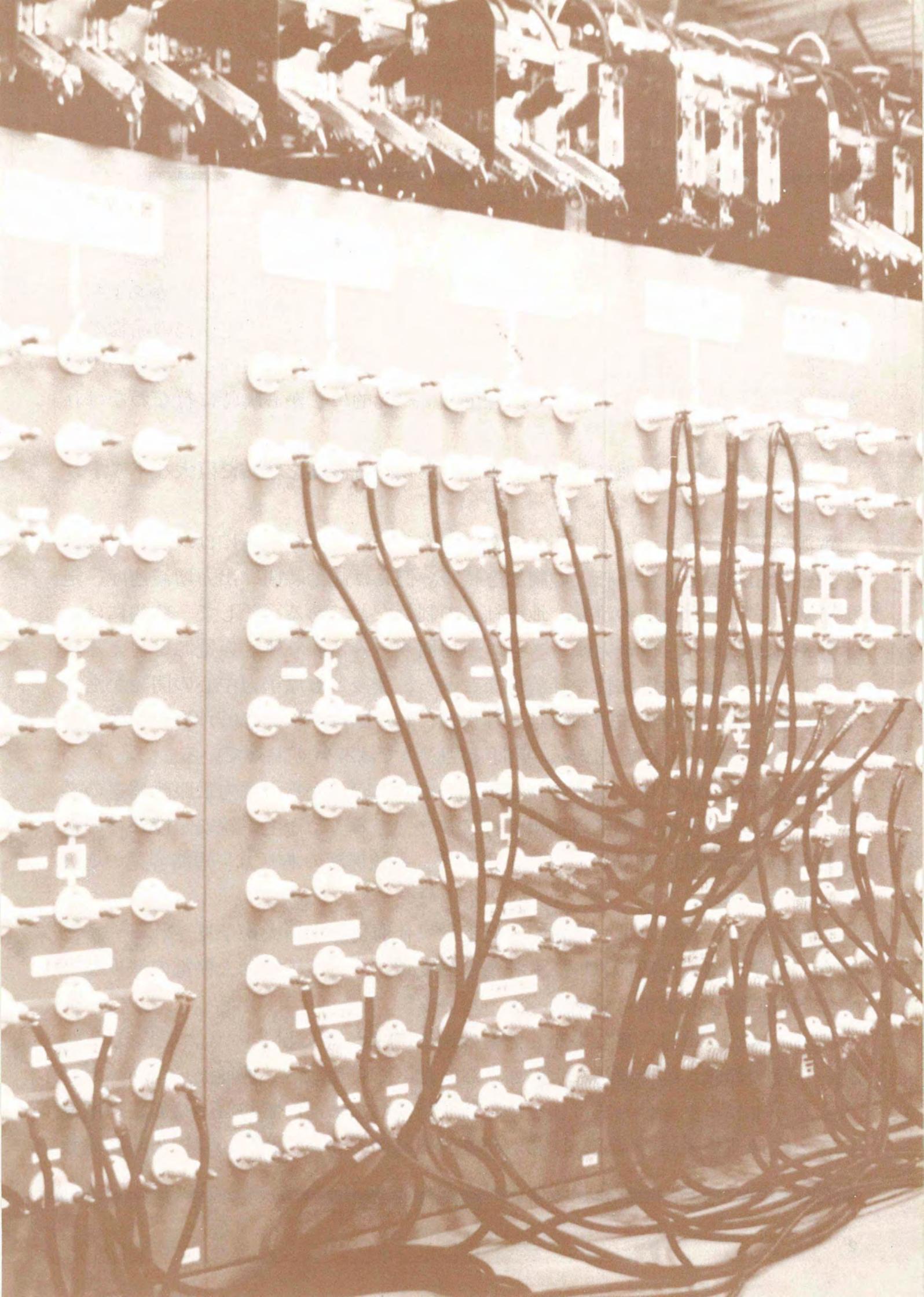
原子力主流時代に対応した電力システムの高度運用



**電研レビュー 第13号 ● 目次**  
**原子力主流時代に対応した電力システムの高度運用**

巻頭言	四国電力株式会社 常務取締役 富田 盛夫	2
はじめに	電力研究所長 上之蘭 博	5
<b>第1章 最適な電源構成と運用</b>		
1-1 ● 概要		8
1-2 ● 原子力の増大と電源の多様化から見た電源の最適構成		9
1-3 ● 原子力主流時代の電源の運用		14
<b>第2章 一層の効率化をめざす系統運用技術</b>		
2-1 ● 概要		31
2-2 ● 信頼性と経済性を両立させる系統運用技術		32
<b>第3章 系統事故予防に必要な解析技術</b>		
3-1 ● 概要		41
3-2 ● 系統の解析技術とその応用		43
3-3 ● 原子力・火力発電プラント、負荷設備等の 高精度シミュレーション技術		51
おわりに	電力研究所 システム部 情報伝送研究室長 河合 洋	63
関連する主な研究報告書等		64

交流・直流電力システムシミュレーター（発電ユニット部分）→  
実規模の電力システムと同等の電気的特性を持ち、大電力送電システムの事故予防に必要な発電所の安定化方式などの研究開発に活用しています。



## 電力システムの高度運用をめざして

電力システムの合理的運用——それは今から100年

前、初めて電気事業が誕生した時からの最重要課題の1つである。他の品物のように貯蔵保管が出来ない電気は、時々刻々に変化する需要に追随して、その円滑な供給のため、生産から販売までの運用を、一元的にしかも瞬時に行なわなければならない。

電力システムは、各地に散在する電源や送変配電設備を結んだ巨大なネットワークである。

電源としては水力、火力、原子力などが有るが、夫々の設備にはユニット容量や効率の相違とともに運転上の制約を持つ。例えば起動時間、出力増減速度、定検日数、トラブル復旧の難易、地域社会の制約などである。そして一般的には、水力や火力に比べて原子力はシステム運用面からみる限り難しい電源と言える。しかし、燃料確保の確実性や経済性などから、今後とも原子力中心の開発が進むことになろう。ちなみに昭和61年1月現在、わが国は32機2,450万kWの原子力を持ち、全設備に対しkWで16%、年間発生kWhでは27%を占めている。

輸送設備については、電源の大容量化地点の遠隔化から大電力長距離輸送の必要が生じ、次第に高い電圧の採用が行なわれている。しかも系統安定度からの送電可能限度の制約、無効電力の過不足対策、系統保護のあり方、短絡容量の増大など問題も多い。

一方、需要については、負荷率の低下や昼夜間格差の増大が予見される。また社会、産業、個人生活においても利用の高度化から、電圧変動や停電の減少など電気の質に対する要求は益々強くなっている。

電力システムは言うまでもなく需要の増加に伴い拡大していく。更に安定供給、予備力節減、経済運用などの面から、地区から地域へ、地域から全国へと広大なネットワークを作りあげ、広域運営を指向して来た。昭和34年超高圧送電線による広域連係系統の完成、昭和37年本州四国間の連係、昭和40年佐久間周波数

---

変換設備による50・60Hz系の連係、昭和54年本州北海道間の連係、昭和55年500kV西地域連係線の完成など連係の強化を図っている。

しかし、システムの巨大化は良い面のみではない。何処かで事故などのじょう乱が発生した場合、その影響が極めて広範囲かつ長時間に及ぶ可能性がある。この事は過去諸外国で発生した幾つかの大停電事故から見ても明らかである。



以上のような電力システムの運用業務には、需給調整、系統制御、緊急時の操作のように即時の処置が必要なものと、これをバックアップする為、作業計画や貯水池運用のようにあらかじめ予測や計画を策定するものがある。この何れを遂行するに当たっても、先にのべた諸問題への対策とともに、運用の巧拙がコストに直接影響すること、また社会環境に対する影響にも十分な留意が必要である。

私は過去30年間系統運用の仕事に携わっているが、始めの頃は運用のための情報収集や指令は電話が中心であった。その後コンピューターをはじめとする技術の進歩とともに、これをいち早くとり入れ、自動化機械化を進めて来た。現在わが国各社の供給信頼度や効率性は、他国に比べて劣っているわけではない。しかし、原子力を中心とする大規模電源の開発と系統拡充に対処し、あわせて需要家の期待に応えた供給責任を果たすためには、今後とも運用のための改良改善に努める必要がある。

半導体、電子、情報通信、メカトロニクスなどの先端技術も駆使しながら、各設備個々のシステムとの有機的結合による総合自動化の高度化にむかって、ハード面ソフト面を含めての研究開発を強く期待するものである。

四国電力株式会社 常務取締役

**富田 盛夫**

〔電力中央研究所 参与〕

電研・電力システム運用研究の歩み（昭和31年～60年）

昭和 (西暦)	電力中央研究所	所 外
3 1 (1956)	直流模擬送電装置設置	
3 2 (1957)	交流計算盤装置設置 アナログコンピュータ設置	
3 3 (1958)	交流模擬送電線設備設置 電力システムの安定度などの解析手法の研究開始	電気事業広域運営方式発足
3 5 (1960)		中地域における275kV超高压連系実現
3 6 (1961)	両サイクル連系問題委員会設置 (37年6月終了)	
3 7 (1962)	送電機能研究委員会設置	姫路岡山線 (中・西地域超高压連系220kV) 竣工
3 9 (1964)	アナログコンピュータ更新	
4 0 (1965)	電気計算機による電圧と無効電力の制御基礎理論を開発 (オンライン制御の基礎)	佐久間周波数変換所運開 (電源開発)
4 3 (1968)	動的交流計算盤設置 基礎研究用電力システムシミュレータ装置開発設置	中央電力協議会広域運営の新展開発表
4 7 (1972)	電力システムからみた原子力発電所の運用制御の研究開始 直流送電システム異常電圧シミュレータ設置	
4 8 (1973)	電力システムの動的詳細デジタルシミュレーション手法の開発開始 (Y法)	初の500kV送電開始 (東京電力、房総線)
5 0 (1975)	電力システム解析用データファイルシステムの研究開始 直流多端子集中制御装置設置	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
5 2 (1977)	電力システムの負荷特性の研究開始	新信濃周波数変換所運開 (東京電力)
5 3 (1978)	大容量火力プラントの簡易シミュレーション手法の研究開始	
5 4 (1979)	超電導発電機の日立との協同研究開始	北海道・本州直流幹線 (125kV) 運開
5 5 (1980)	新しい定態安定度解析手法の研究開始 (S法)	
5 6 (1981)	システム解析データファイルシステム設置	
5 7 (1982)	デジタルリレー総合解析装置設置 交・直流電力システムシミュレータ設置	
5 8 (1983)	電力システム解析技術研修コースの開始 系統保護リレー耐電波性能実験設備設置	
5 9 (1984)	高度情報化技術を適用した電力システム運用の研究開始 EPRI との電力システム解析ワークショップ開催	
6 0 (1985)		東京電力の原子力発電設備世界一 (910万kW)

# はじめに

電力研究所長 上之藪 博

## 原子力主流時代に対応した電力システムの高度運用

エネルギーセキュリティとコストダウンの観点から、今後の安定成長時代においては、原子力発電の比率がますます増大し、2000年には全電源設備の30%に迫るものと想定されている。当然のことながら、こうした原子力主流時代を迎えるに当たって、そのメリットを十分に活かすために、原子力発電技術の性能向上などハードウェア技術はもちろんのこと、大容量電源を含む電力システム運用の効率化・安定化などソフトウェア技術やシステム技術についても、その確実な検証が必要とされる。

このような時代のニーズを背景として、当所ではつぎのような認識のもとで電力システムの運用高度化に関する研究に取り組んでいる。

1. 電力システムの運用技術は、電源計画にも直接反映されるべきものであり、とくに近年両者は極めて密接な関係を有するようになってきている。すなわち、原子力発電所と火力・揚水発電所との協調のあり方をはじめ、系統運用面から見た各種電源の運転特性の評価は、将来に亘る最適電源構成の検討に不可欠なものとなっている。このため、長いリードタイムを要する電源計画と低迷する需要実態とのずれを吸収しつつ最も効率的な系統運用を図る技術が非常に重要となっている。
2. コンピュータやロボットなどますます高度化する需要家への適切な電力品質の維持を図りつつ、需要状況に即して常に安定した電力を供給するため、オンラインで系

統を監視、制御し、経済性と信頼性のバランスをとりながら、周波数や電圧を適正に維持する高度な制御技術が今後ますます必要となる。

3. 大容量電源の偏在と長距離大電力輸送に特徴づけられる今後の電力システムにおいて、



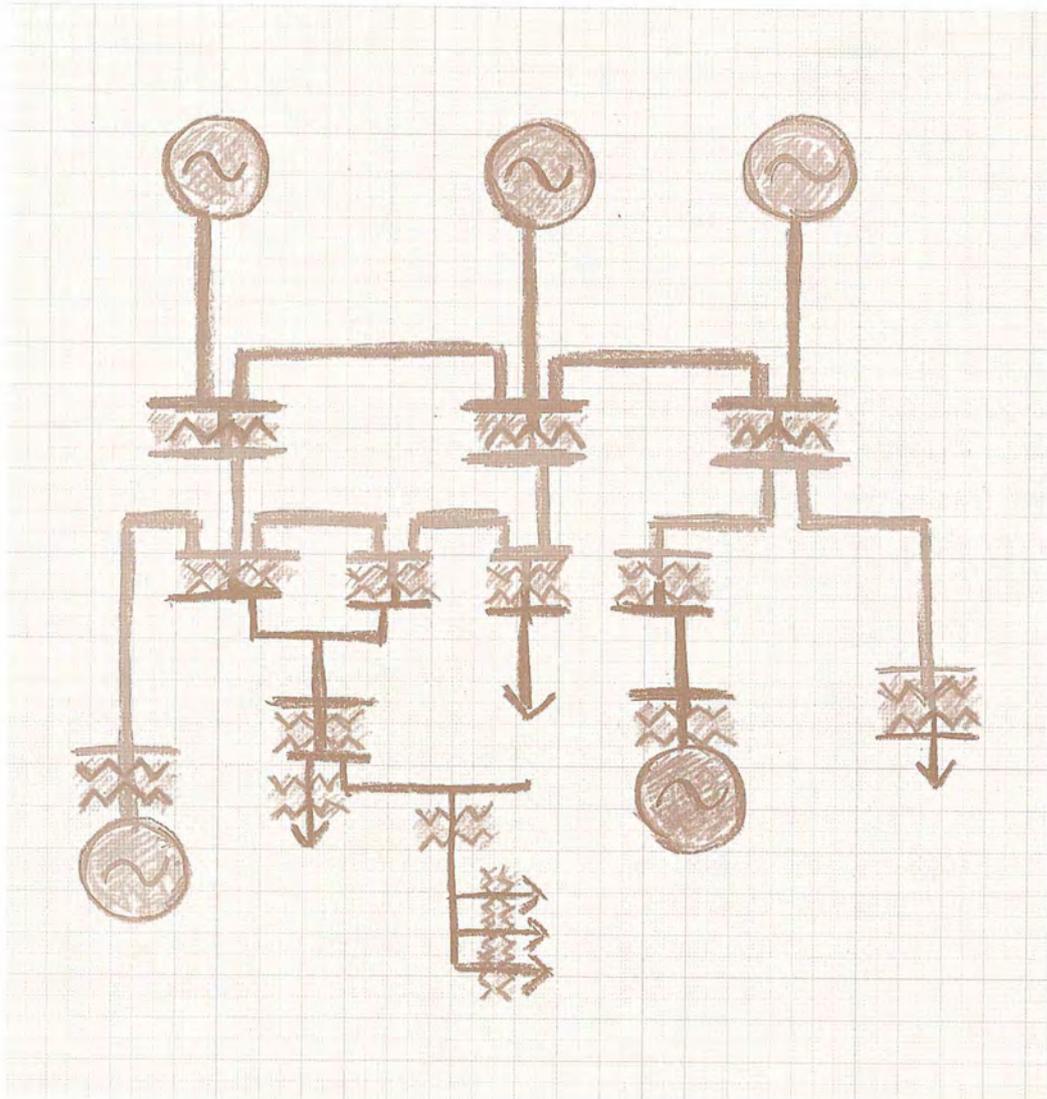
系統事故の予防や拡大防止に必要となる解析技術の重要性が増大してきている。このため、種々の解析手法の開発、改良をはじめ、所要データやプログラムの管理システムの開発を進めるとともに、原子力・火力プラントの熱的・機械的応動を取り入れた、系統のより詳細なシミュレーションのモデルの開発が必要である。

当所は、原子力主流時代に対応した電力システムの高度運用に関し、上記の面から見た研究をこれまで積極的に実施してきた。

今後はさらに先端情報技術などを導入した、電力システム運用の総合自動化を目指し、必要な基本ソフトウェアの開発を進めるとともに、次世代コンピュータや情報ネットワーク、高度マンマシンインターフェースなど、新しいハードウェアの活用方法に関するシステム技術について、鋭意研究を展開していく予定である。

第1章 最適な電源構成と運用 ● 目次  
編集担当●電力研究所 システム部長 高橋 一弘

1-1	概 要	高橋 一弘	8
1-2	原子力の増大と電源の多様化から見た電源の最適構成		9
1-2-1	線形計画法による最適化モデル	システム部 電力系統研究室 七原 俊也	
1-2-2	シミュレーション・モデル	七原 俊也	
1-3	原子力主流時代の電源の運用		14
1-3-1	原子力発電所と火力・揚水発電所との協調による設備利用率の向上	電力系統研究室 磯田 八郎	
1-3-2	系統運用面からみた原子力発電所の出力抑制運転	磯田 八郎	
1-3-3	原子力・火力発電ユニットの定期補修計画手法	七原 俊也	
1-3-4	発電所群の経済的な週間運用計画	磯田 八郎	



第 1 章

# 最適な電源構成と運用

# 1-1 概要

原子力発電は、脱石油化のリーディング・ヒッターとして積極的に開発が進められており、たとえば電気事業審議会需給部会中間報告（昭和58年度）では、その容量は昭和70年度末に4800MW（構成比23%）、昭和75年度末に6200MW（同27%）程度まで増加するものと展望している。このような原子力主流時代を迎えるに当たって、電気事業の電源計画・運用も新たな問題に直面しようとしている。

まず電源開発面では、原子力が従来通り最も主導的な役割を果たすべきことは当然であるが、火力、水力など他の電源もそれぞれ固有の得失を有しているため、それらをいかに適切に組み合わせて開発するかが重要な課題となる。すなわち、将来のエネルギー需給の不確実性を十分考慮した上で、エネルギー・セキュリティと経済性の両面から、安定成長下におけるベスト・ミックスを可能な限り追求してゆく必要がある。

具体的には、電源計画の検討に際して、将来のエネルギー情勢に関わる種々のシナリオを想定し、それらのどれに対してもまんべんなく供給の安定性が確保でき、しかも経済性も損なわれることのない開発案を選択することが不可欠となっている。

一方、電源運用の立場からは、原子力は火力に比べ建設費が割高で燃料費が安いという、いったん建設した以上、できるだけベース電源として高利用率で運転することが基本となる。しかし、将来は原子力やLNG火力など運用に制約の多いいわゆる硬直化電源の比率が増大することが予想されるため、経済性を確保しつつ日間、週間、年間の需給変動に対して、いかに柔軟に対応させていくかが課題となる。

たとえば、原子力比率が増大した場合、電源の日間運用では、深夜余剰吸収のための揚水式水力の運転の増加、火力のDSS（日間起動停止 Daily Start and Stop）の増大、原子力の負荷追従運転の導入などの問題がこれまで以上に

顕在化してくる。

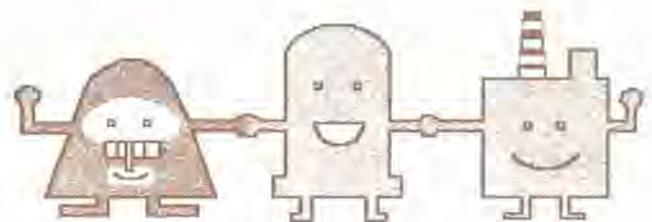
このように原子力主流時代の電源運用では、たとえば日間のピーク時よりはむしろ深夜軽負荷時における需給運用に焦点を当てるなどきめの細かい検討が不可欠となってくる。

当所ではこのような状況を鑑み、電源計画・運用のための各種の手法の開発を行ってきた。

本章ではそれらの成果の紹介として、まず1-2節では電源計画に関するいくつかの手法を示す。当所では、電源計画手法としてのマクロ的な方向性を探索するための線形計画法による最適化モデルと、やや詳細に将来の需給上の問題を抽出することに適した、シミュレーション・モデルとの両面から見た、アプローチ手法を開発し、これらを有機的に組み合わせて、実際の課題に処することを基本としている。

ついで、1-3節では電源運用のための各種の手法と主要な検討結果を示す。ここではまず、原子力発電所が増大した場合における原子力の設備利用率の変化と負荷追従運転の必要性に関するマクロ的な検討結果について記述する。

また同節では、よりきめ細かな需給運用のための手法として、定期補修計画の算定方法について当所が新しく機械化した手法、および、電力会社の実務で考慮されている制約条件を可能な限り織り込んだ、原子力、火力、揚水式水力などの発電所群の週間運用計画手法について紹介する。●



# 1-2 原子力の増大と電源の 多様化から見た電源の最適構成

原子力、石炭火力に代表されるベース電源と、石油火力、揚水式水力などピーク電源をいかに組合わせて開発するかは、電力系統の計画における重要な問題のひとつである。

ことに近年は、需要の伸び、燃料調達などの変動に柔軟に対応可能で、かつエネルギーセキュリティ的にもすぐれた電源計画が必要とされている。一方、需給運用の面では、原子力やLNG火力などの運用に制約の多いいわゆる硬直化電源が増大することは、深夜余剰の増大などの問題を引き起こそうとしている。

このため、電源計画の策定にあたって

は、これらの要因を的確に分析・把握する必要がある。

当所では、このような要請に対処するため、線形計画法ならびにシミュレーション手法を用いた電源計画解析手法を開発している。

## 1-2-1 線形計画法による最適化モデル

本モデルは、図1-2-1に示す想定需要、既設電源の設備容量、電源建設費、燃料単価、燃料入手量などの入力データのもとで、線形計画法を用いた年間の経費（固定費

+可変費）から見て最もすぐれた電源運用と電源開発を探索するものである。本モデルでは、下記の条件などを考慮し、最適化を行なっている。

- ・最大電力バランス（最大負荷時に供給力が十分である条件）
- ・深夜最低負荷時需給バランス（深夜余剰を生じない条件）
- ・電源開発可能量の上下限
- ・補修停止（年間運用計画に必要な補修停止の織り込み）
- ・各時間帯での経済負荷配分
- ・電源の最大出力、最低出力
- ・揚水池容量

図 1-2-1 電源計画最適化モデルの概要

### (1) 需要データ

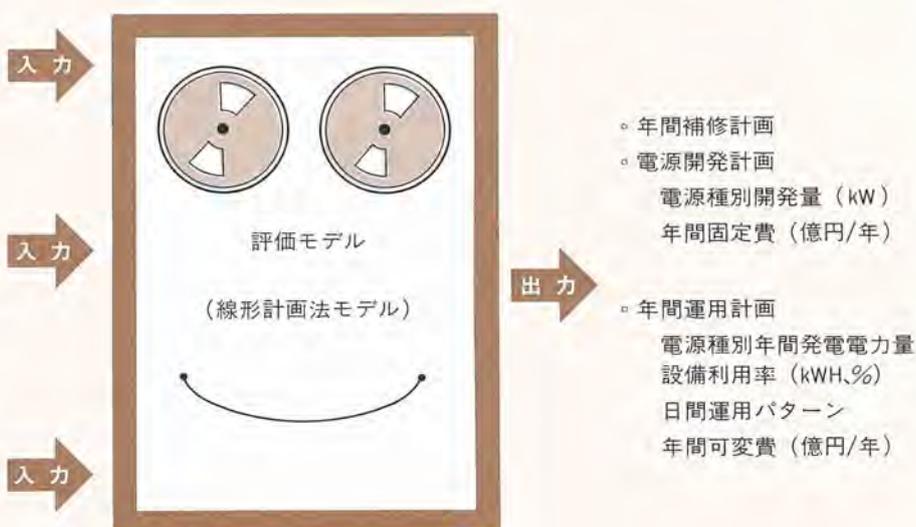
- 至近年の実績をもとに作成（年負荷率60%）
- 年間需要の表現  
代表月：12ヶ月を3ヶ月毎の4代表月に集約

### (2) 電源データ

- 初期設備量
- 建設単価
- 燃料単価
- 年経費率（%/年）
- 電源種別：原子力、石炭、LNG、石油、揚水式水力、一般水力

### (3) 運用データ

- 供給予備率
- 運転予備率
- 年間補修日数
- 電源の最低負荷制約
- 電源の週末停止可能比
- 揚水効率



## 最適化モデルによれば電源構成上の揚水式水力の 構成比は10～20%程度が適切である。

・燃料消費量の上下限

以下に本手法を用いて解析した例を示す。

図1-2-2(a)に揚水式水力の構成比と発電原価の関係を示す。同図によれば、揚水比率が増えるに従い可変費は増大し、一方揚水比率の増大に伴いある限度までは固定費は低下する。<sup>(\*)</sup> この場合、これら両者のバランスする点より、最適揚水比率は14%程度となる。この最適構成比は、前提とする諸元の変化に伴い変化する。

図1-2-2(b)には、負荷率、原子力比率、

燃料価格に関する前提条件が変化した場合の最適揚水比率の変化を示す。また揚水式水力の建設単価をパラメータとした場合の各種電源の最適比率を図1-2-3に示す。

同図によれば、揚水式水力の建設単価が15万円/kW程度以下では最適揚水比率はほぼ一定であるが、25万円/kW以上となると揚水式水力の新設はなくなる。

これらの結果を総合すると、電源構成上の揚水式水力の構成比は10～20%程度であることが適切であることが明らかとなる。

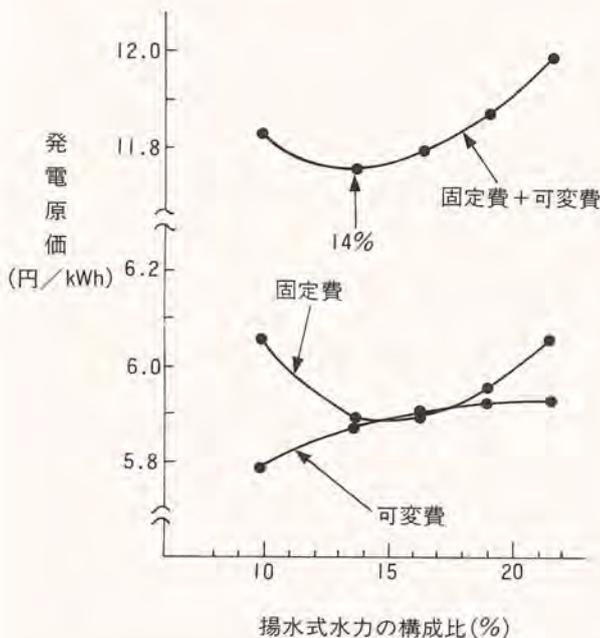
なお線形計画法を用いて解くことのでき

る問題の規模には実用上制限があるため、本モデルでの各要素のモデリングは必然的に簡略的なものとならざるを得ない。たとえば発電ユニットを個別に扱うようなことはできないので、ユニットを個別に扱わないと検討できない課題、火力並解列に関連する検討などは、後述するシミュレーション手法によらざるをえない。

しかしシミュレーション手法では、燃料入手、電源開発などに係わる各種の制約を考慮し、前提条件の変動を考慮し、望ましい電源構成を求めるためには、多大な労力を要する。

図 1-2-2 揚水開発と経済性

(a) 揚水比率と発電原価



(b) 最適揚水比率の感度解析

パラメータの変化	揚水式最適構成比の変動	単位パラメータ変化に対する貯蔵設備最適構成比の変動
需要年負荷率 60→55%	14→18%	$\frac{0.8\%}{\text{負荷率}1\%}$
原子力構成比 30→40%	14→14%	$\frac{0\%}{\text{構成比}1\%}$
石油系燃料価格 現状→20%減 現状→20%増	14→12% 14→18%	$\frac{0.8\%}{\text{価格}5\%}$

(注) 主要な前提条件

- ・年負荷率 60%
- ・原子力比率 30%
- ・電源建設費：原子力27、石炭火力20、LNG火力17、石油火力13、揚水式水力12[万円/kW]
- ・燃料単価：原子力3.0、石炭火力7.5、LNG火力13.5、石油火力16.0[円/kWh]

したがって本モデルは、燃料入手、電源開発などに関する各種の制約を織り込み、本例題に示す揚水式水力の開発量の検討のように、前提条件を種々変化させながらマクロ的な電源構成の将来像を描くのに適した手法といえる。

(\*) ただし揚水式水力の開発量が多大である時は固定費が増大するが、これは揚水源資を確保するために他の電源の開発も必要となるためである。



### 1-2-2 シミュレーション・モデル

シミュレーション・モデルは上記のように電源計画、運用に関し、ある程度詳細な検討を行うためのものである。

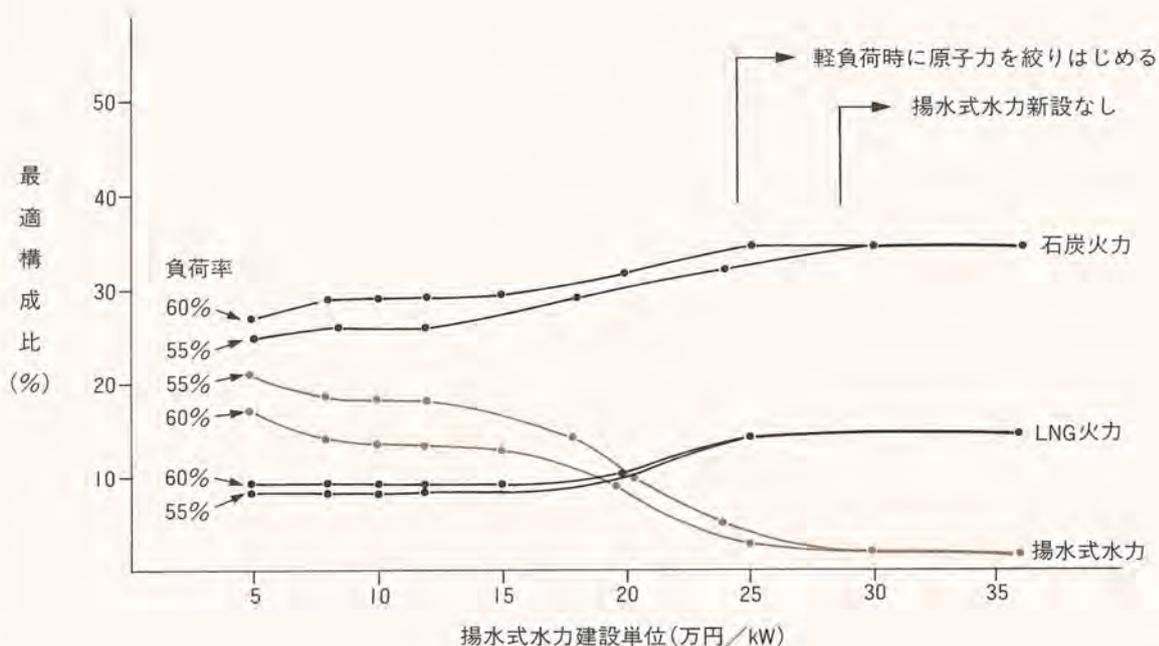
このプログラムは長期（10年程度）にわたる電源の運用、および需給の状況を模擬し、所要経費ならびに供給信頼度等に係わる諸量を算定する機能を有している。本シミュレーション・モデルと上記の最適化モデルの概要を表1-2-1に対照して示す。

本シミュレーション・モデルでは、最大限365日の負荷曲線に対し、原子力、火力、揚水式水力のユニット別の負荷配分を行っている。またこの際、火力の燃料費特性なども考慮している。本モデルの主たる内容は下記の通りである。

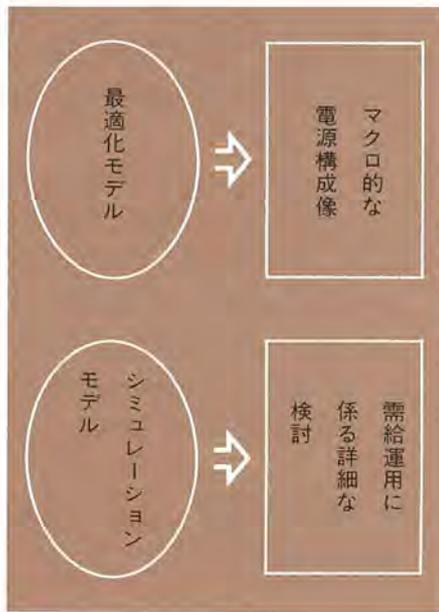
1. 10年程度の電源計画を対象として電源運開時期および定期補修計画がプログラム内部で自動的に（内生的に）定められるようになっている。
2. 電源運用をどの程度まで模擬するかはシミュレーションの精度を大きく左右するが、ここでは火力の日間起動停止の可能性、原子力の負荷追従（負荷抑制）運転の必要性などの要因を考慮している。
3. LNG火力などある期間内の燃料消費量に制約のあるユニットも扱うことができる。
4. 見込み不足日数などの信頼度指標を計算することができる。

最適化モデルの出力をもとに本モデルを用いて、検討を行った例を図1-2-4に示す。

図 1-2-3 揚水式水力の建設単価と最適電源構成



(注)特に指定したものを除いては、前条件は図1-2-2と同じ



同図の左側では、需要想定誤差、エネルギー・セキュリティなどの要因を考慮し、線形計画法モデルを用い電源構成のマクロ的な像を描いている。右側では、その結果に対しシミュレーションモデルにより石油火力のDSS化の影響について検討し、この場合DSSを行った方が経済的となっている。

なお、最適化モデルでは、負荷曲線は3種類の季節、各季節に対し2種類の日パターン、各日パターンは4時間帯からなっているものとしているが、一方、シミュレーションモデルでは365日、1日24時間帯からなるものとしている。

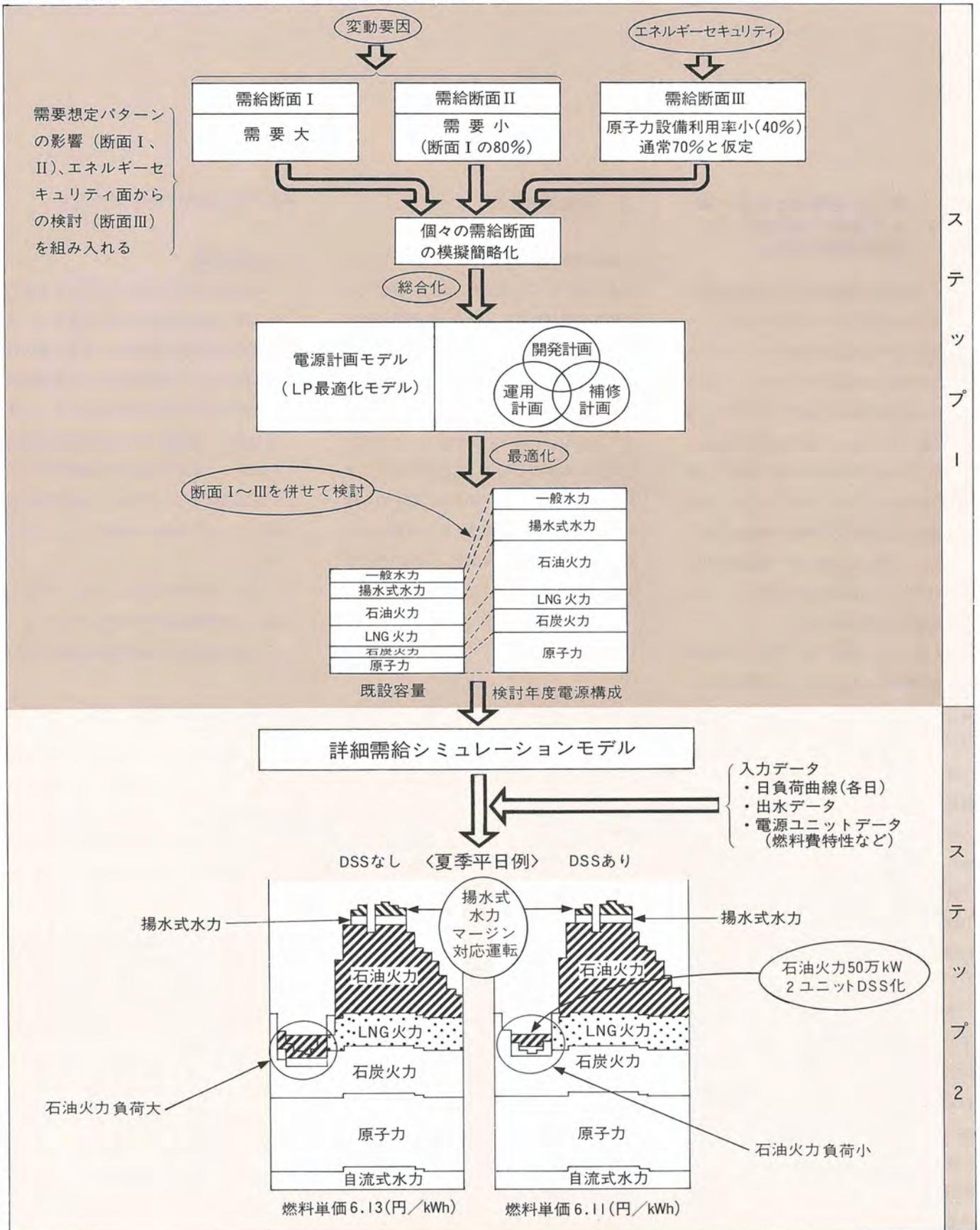
上述より明らかなように、シミュレーションモデルは各種の制約条件のもとでマクロ的な像を得るなどの作業には適さないが、最適化モデルに比べ負荷曲線、需給運用が詳細であるため、火力、揚水式水力ユニット毎の設備利用率など運用形態を明らかとすることができる。このため、たとえば深夜軽負荷時の火力運用、揚水運用など将来の需給運用上の問題点を検討するのに適している。

このように、実際の電源計画の検討にあたっては、両モデルの得失に留意しつつ、これらモデルを組合わせて利用して行くことが適切である。

表 1-2-1 線形計画法最適化法とシミュレーション手法の比較

		線形計画法最適化	詳細シミュレーション
需給運用の模擬	負荷曲線の模擬	12～6本/年の日負荷曲線	～365本/年の日負荷曲線
	揚水式水力	マージン対応、余剰対応、経済対応で運転	
	電源の模擬	電源種別ごとにまとめて模擬	ユニットごと
	補修停止の模擬	電源種別ごとに考慮	ユニットごとに考慮
	一般水力	予め差し引き済み	暦日単位の変動考慮
	原子力	負荷追従運転考慮可能	
	LNG火力	利用率を指定可能	
電源構成最適化機能		有り(線形計画法)	なし(パターン比較のみ)
感度解析機能		線形計画法の機能を利用可 多数需給断面を同時検討可	条件を変化させ再計算
経費の計算方法		ある年度の経費のみ対象	累積経費で計算可能
長所		・燃料消費上の制約など各種の制約を考慮し、最適値を把握可能	・熱効率特性など詳細な運用要因を考慮
欠点		・需給上の問題の把握は困難、最適値のみ求める	・計算の労力、入力データの量が多大
用途		・各種電源開発パターンの経済性比較 ・長期的な電源構成の検討、需給上の要因に変動を仮定した解析	・火力DSS化の影響、原子力負荷追従の必要性、電源硬直化の影響など需給運用に係わる問題の分析 ・各種電源開発パターンの詳細比較

図 1-2-4 最適化手法とシミュレーション手法を組合せた検討の一例



# 1-3 原子力主流時代の電源の運用

## 1-3-1 原子力発電所と火力・揚水発電所との協調による設備利用率の向上

原子力発電は発電原価に占める燃料費の割合が火力発電に比べてかなり小さく、かつ、数年分の燃料装荷が行われているため、電力需要の基底部分を分担し、可能な限り高い設備利用率を維持するように、運転するのが全体として最も経済的である。

ただし、電力需要は時々刻々変化し、特に1日のうちで大きく変化するため、総発電設備に占める原子力発電の構成比が高くなると、必ずしも定格出力で連続運転することができず、設備利用率は低下し、それだけ経済性は損なわれる。

したがって、年間を通して原子力発電所の設備が利用される程度（設備利用率）は、全体の経済性を測る大きな指標のひとつとなっている。

原子力発電の設備利用率は火力発電所の最低負荷制約、揚水式水力の構成比率によっても変化する。また、原子力発電所自身からみて、そのために最大どれだけ出力を下げて運転する必要があるかという量（出力抑制量）についても、検討しておかなければならない。

当所では、上に述べた各要因によって原子力発電所や火力、揚水式水力の設備利用率がどのように変化するかを、定量的に解析するプログラムを開発している。以下に本プログラムを用いた試算結果から、今後の原子力主流時代における、各電源の設備利用率と原子力発電所の出力抑制量を検討する。

## I. 計算手順

電源構成（kW）比率、予備率、電力需要を所与として、原子力、火力、揚水式水力の年設備利用率と、原子力発電所の出力抑制量を計算する。

負荷分担に当たっては燃料費の安い順、すなわち、一般水力、原子力、石炭火力、LNG火力、石油火力の順にベース負荷から分担するものとした。また深夜の軽負荷時における需要が、一般水力と原子力の供給能力を上回るときには、その余剰電力を揚水式水力発電所で揚水し、昼間の重負荷時に発電するものとした。

計算手順を図1-3-1に示す。

## II. 試算条件

各電源の設備利用率、ならびに原子力発電所の出力抑制量は負荷曲線に大きく依存する。

しかしながら、負荷曲線が今後どのように変化するかは予測は難しいので、ここでは、9電力会社中年負荷率が最も高いA社（約70%）、最も低いB社（56%）、A社とB社のほぼ中間にある9社計（約60%）の3つの負荷曲線を用いた（図1-3-2(a)、(b)、(c)に日間での発受電端最大、最小電力を示す。なお、需要が大幅に減少する正月、ゴールデンウィーク、盆は本試算から除外した。）。

また、各発電設備の供給能力としては表1-3-1に示すものを用いた。

## III. 試算結果

主たる試算結果を要約すれば次の通りで

ある（図1-3-3に結果の1例を示す）。

### 1. 設備利用率

(1) 年負荷率が低い場合（9社計とB社）は、原子力発電構成比率が20%まで、原子力発電の設備利用率として最大限の70%が得られる（設備利用率の上限値は設備の計画停止と計画外停止率によって決定するが、本試算では両者の合計を30%と仮定し、原子力発電所の設備利用率の上限は70%とした。なお、定検日数の短縮化によって今後この値はもっと大きくなる）。

しかし年負荷率が高くなると（A社）、原子力発電構成比率が30%まで高くなっても、最大限の原子力利用が可能になる。

(2) 将来、原子力の構成比率が40%程度になると原子力の設備利用率は低下せざるを得ず、年負荷率が低く、揚水式水力がない場合、設備利用率は上限よりも6%落ちる。

ただし、揚水式水力の構成比率が10%ならば、原子力の設備利用率は、上限よりも1%程度の低下にとどめることができる。

(3) 原子力の構成比率が30%～60%のときは、揚水式水力の構成比率を0%から10%に高めることによって、原子力の設備利用率を数パーセント向上させることができる。ただし、揚水式水力の構成比率を10%以上にしても、原子力の年設備利用率を向上させる効果はきわめて小さい。

## 2. 原子力発電所の出力抑制量

(1) 揚水式水力がない場合、原子力発電はその構成比率が20%（年負荷率56%）～30%（同70%の場合）から出力抑制運転が必要となる。

(2) 揚水式水力の構成比率が10%ならば、原子力構成比率が35%～40%まで出力抑制運転を必要としない（年負荷率60%）。

(3) 原子力発電の構成比率が40%を超えると、揚水式水力の構成比率にかかわらず、原子力発電所の出力抑制運転が必要となる（年負荷率60%）。

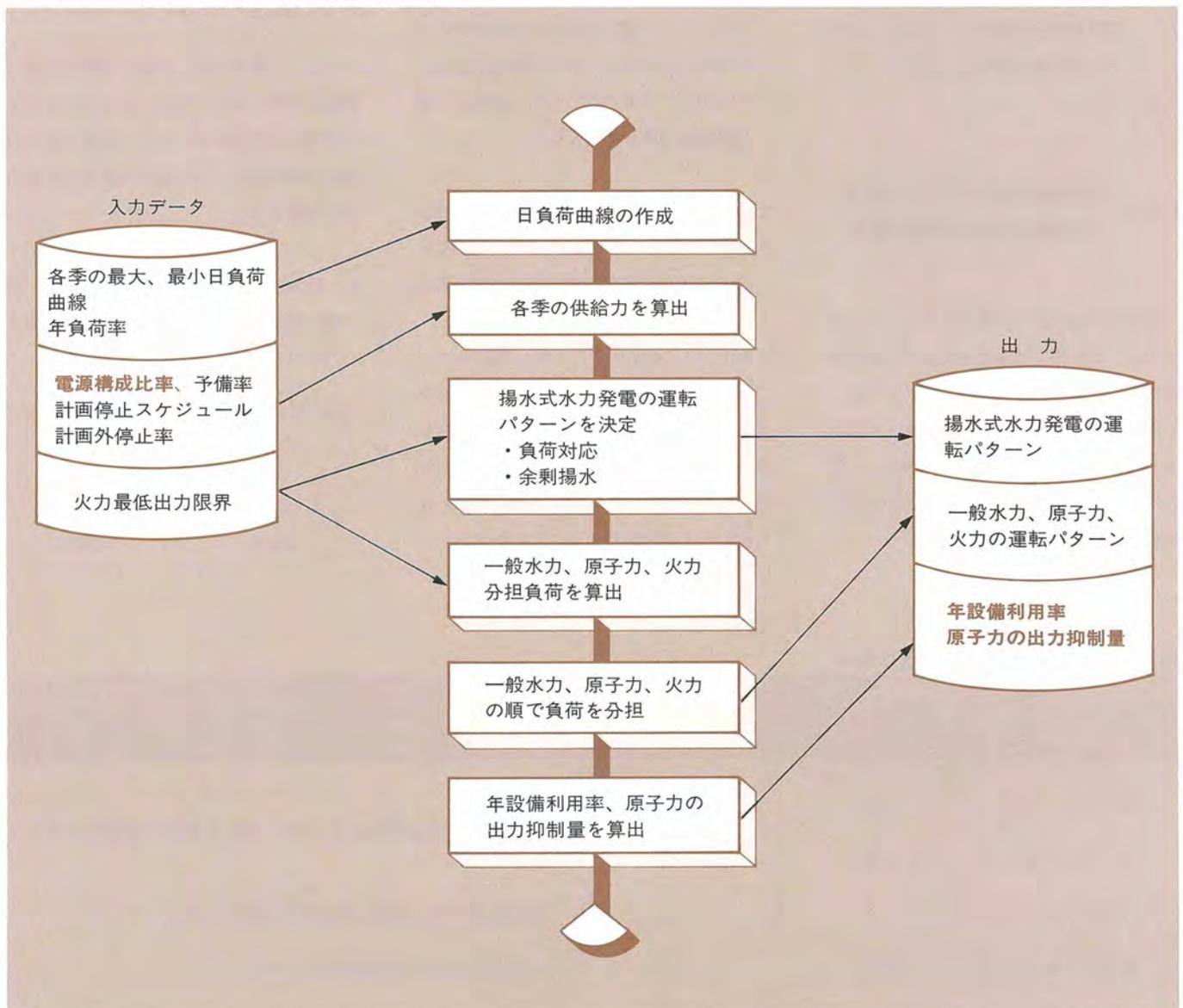
## 3. 揚水式水力発電所の運転要因

揚水式水力の設備利用率は、原子力の構成比率が30%までは2%以下にしか達せ

ず、これは、すべてピーク負荷に対応する揚水発電（負荷対応）によるものである。

しかし、原子力の構成比率が増大するに伴って、軽負荷時に余剰電力が出てくるので、揚水発電は余剰電力に対応（余剰対応）して用いられ、たとえば原子力構成比率40%、揚水式水力の構成比率10%のとき、揚水式水力の設備利用率は3.5%（年負荷率70%）、9.9%（同56%）となる。

図 1-3-1 設備利用率と原子力の出力抑制量の算出



**原子力構成比が40%の場合でも  
原子力に数%の周波数調整能力があれば  
深夜にも定格出力近傍での運転が可能となる。**

**4. 原子力の定期補修スケジュールによる影響**

上に示した結果は、原子力発電所の定期補修を、年間ピーク需要の発生する夏季を避けて行う場合である。

もし定期補修を年間均等に行えば、原子力の構成比率が30%以上の場合、原子力の出力抑制量は10%程度緩和され、原子力の設備利用率も若干向上する。

この理由は、原子力比率が夏季でも変わらない（夏季補修を実施する）ために、夏季の原子力出力抑制量を少なくできることによる。

**1-3-2 系統運用面からみた原子力発電所の出力抑制運転**

原子力発電の比率が増大していくと、原子力は、現在のような定格出力の一定運転を行なうことができなくなる。ここでは、原子力発電のKW構成比率が30%、40%と増大したときの、火力、揚水式水力、ならびに原子力発電の、運転パターンの変化の検討結果を示す。

**I. 原子力構成比率30%の場合**

1. 原子力発電のKW構成比率が30%で、揚水式水力がない場合には、火力のDSS化が大幅に実施されていても、原子力の出力を深夜に抑制する必要がある。

しかし、原子力発電設備に定格の±数%の周波数調整能力があれば、原子力は、平日深夜に系統周波数を維持するための周波数調整運転を必要とするが、ほぼ定格出力近傍での運転が可能となる。

ただし、日曜日の深夜には需要がさらに小さくなるので、原子力発電は深夜に20%程度の出力抑制とこれに重畳した周波数調整運転が必要となる。

2. 揚水式水力のKW構成比率が10%の場合、火力のDSS化比率が40%以上ならば原子力の周波数調整運転は不要である。

図1-3-4に運転パターンの1例を示す。この例では石炭火力を焚増して揚水するとともに、石炭火力で深夜の周波数調整を分担する。石油火力はもっぱら運転予備力の見合いで併列される。週末には石油、LNG火力とも終日停止することになる。

**III. 原子力構成比率40%の場合**

1. 揚水式水力設備がない場合には、原子力は平日深夜に、かなりの出力を抑制しなければならない。この値は、火力のDSS化比率によって、おおよそ次のように変わる。

火力のDSS化比率	原子力の出力抑制量
0%	70%
50%	50%
100%	35%

また、日曜日には、昼間でも数%の出力抑制が必要となる。なお、原子力に±数%の周波数調整能力があれば、深夜の原子力の出力抑制量は、上に述べた値よりも10%程度軽減する。

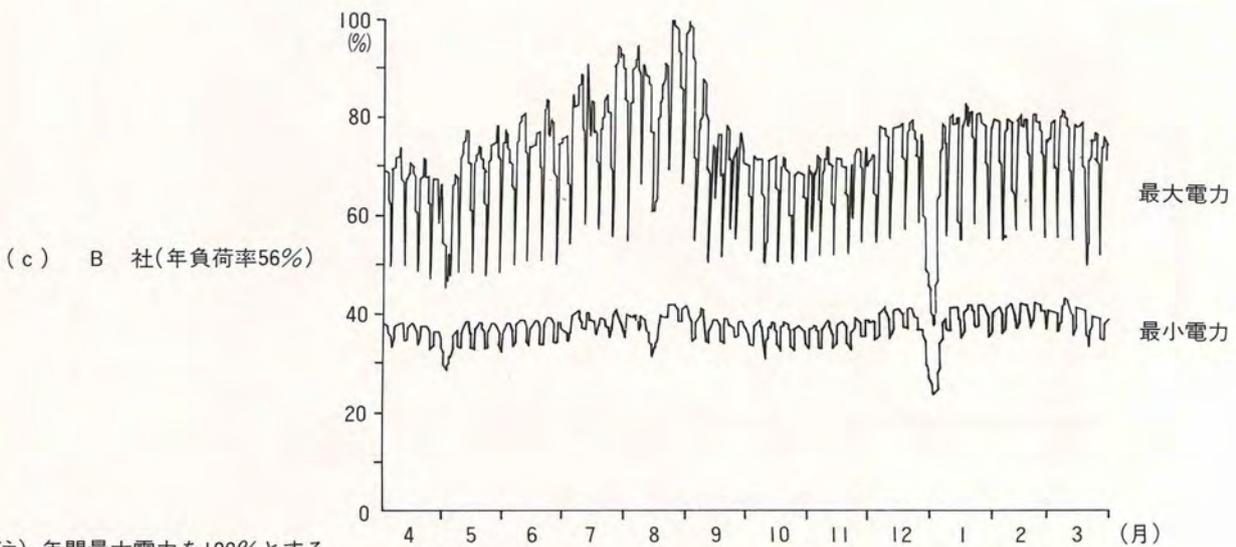
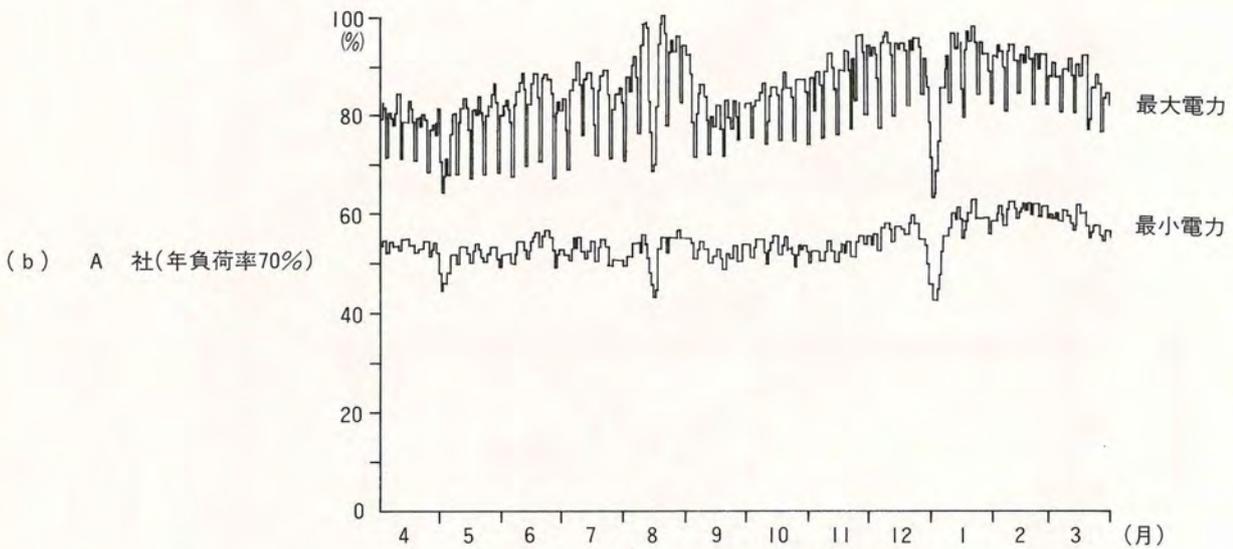
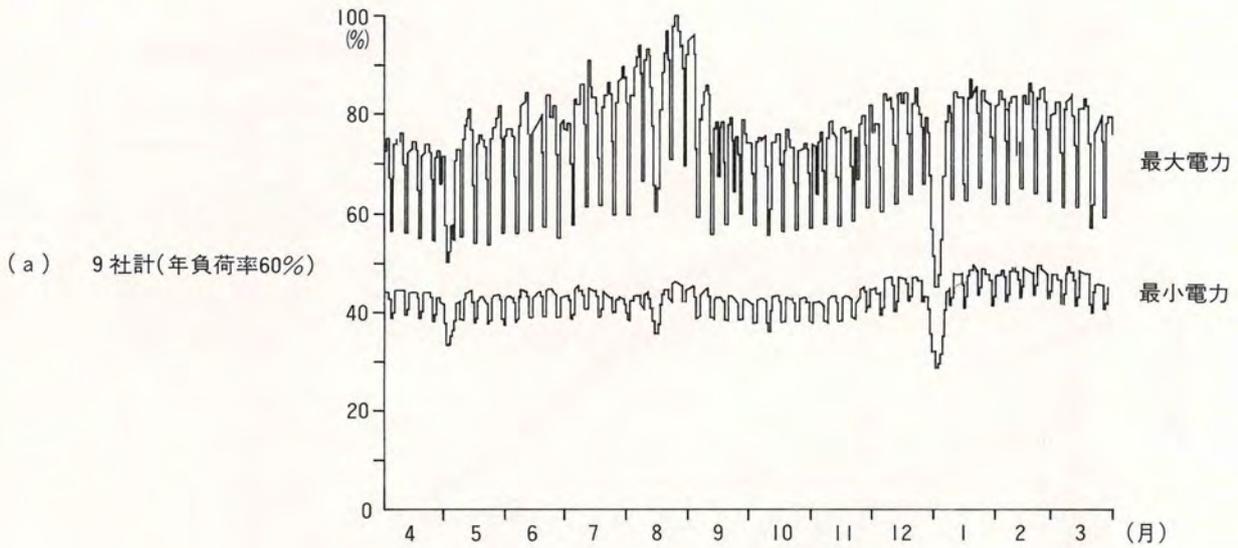
2. 10%の揚水式水力があるときには、深夜に揚水運転を行なうことにより、原子力の出力抑制量は、次のようになる。

火力のDSS化比率	原子力の深夜出力抑制量
0%	33%
50%	20%
100%	数%

表 1-3-1 各種電源の供給力(計算条件)

電源種別	計画停止率	計画外停止率	備 項
原子力	5%	25.0%	} 計画停止は夏季(7、8、9月)を除く期間で均等とする
火力	2%	16.5%	
一般水力	—	—	設備容量の50%出力で年間一定運転とする
揚水式水力	0%	0%	発電能力と揚水能力を同一とする

図1-3-2 日間の発受電端最大・最小電力



(注) 年間最大電力を100%とする

図 1-3-3 電源種別年利用率と原子力発電所の出力抑制量

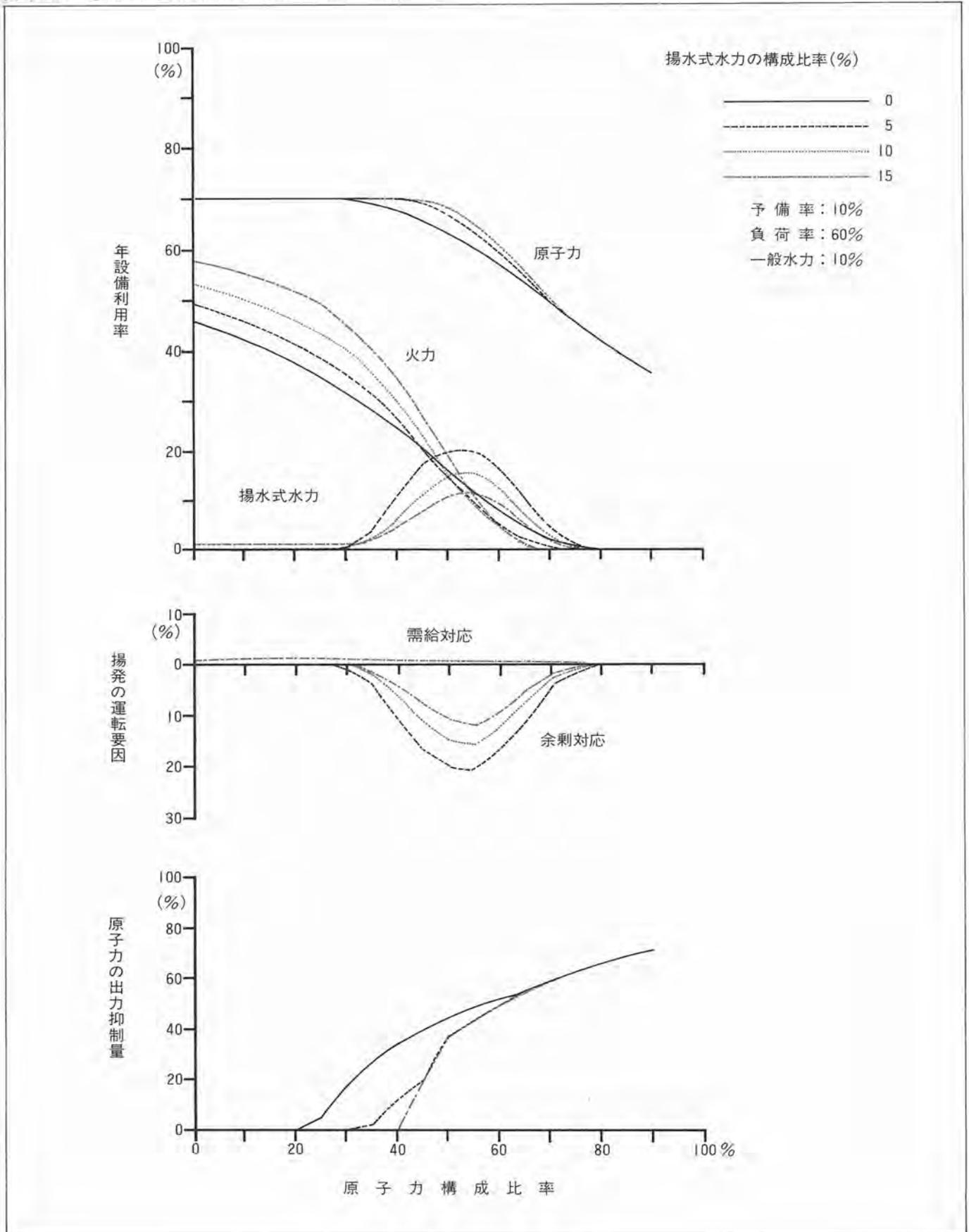


図 1-3-4 原子力構成比率30%での運転パターン例

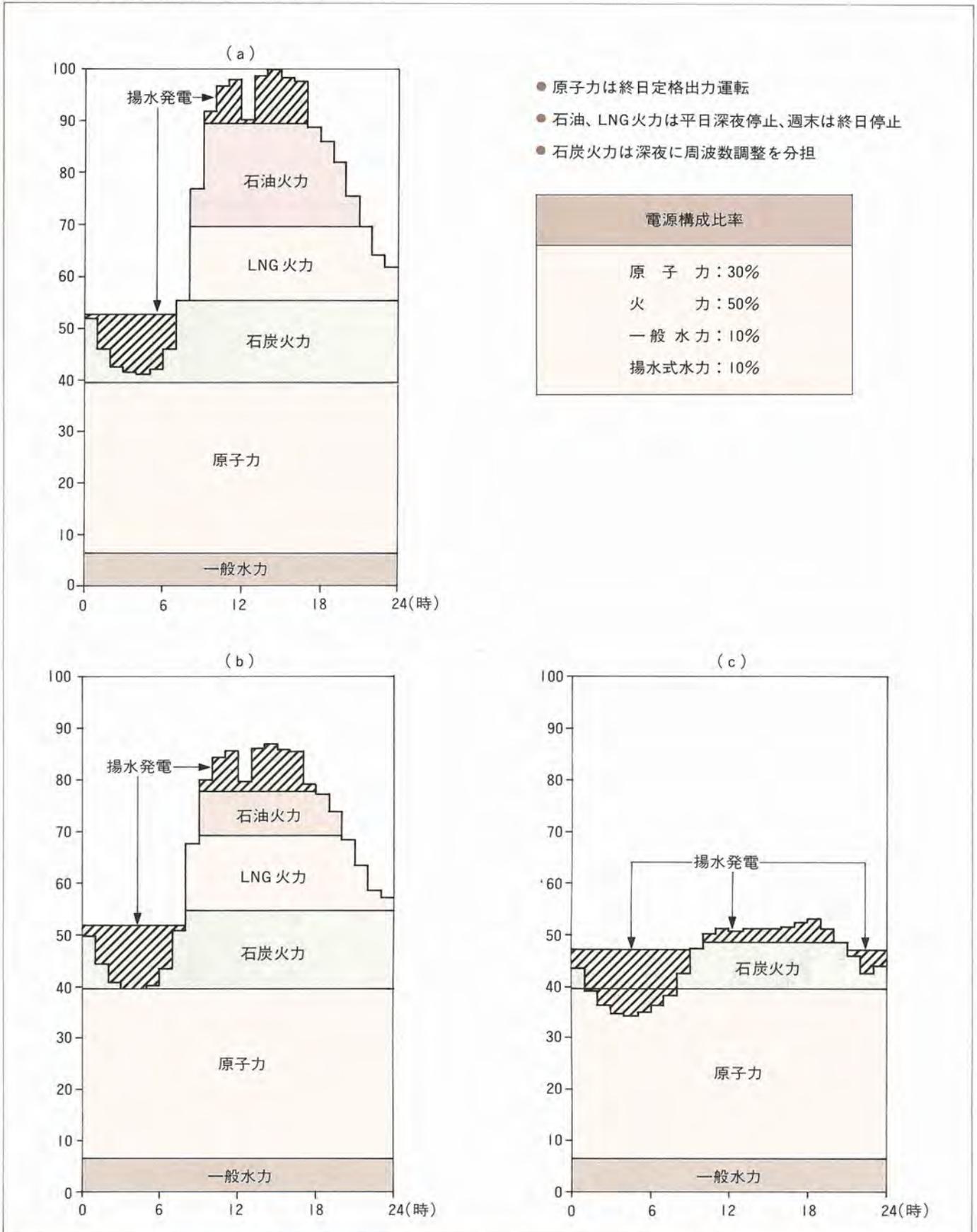
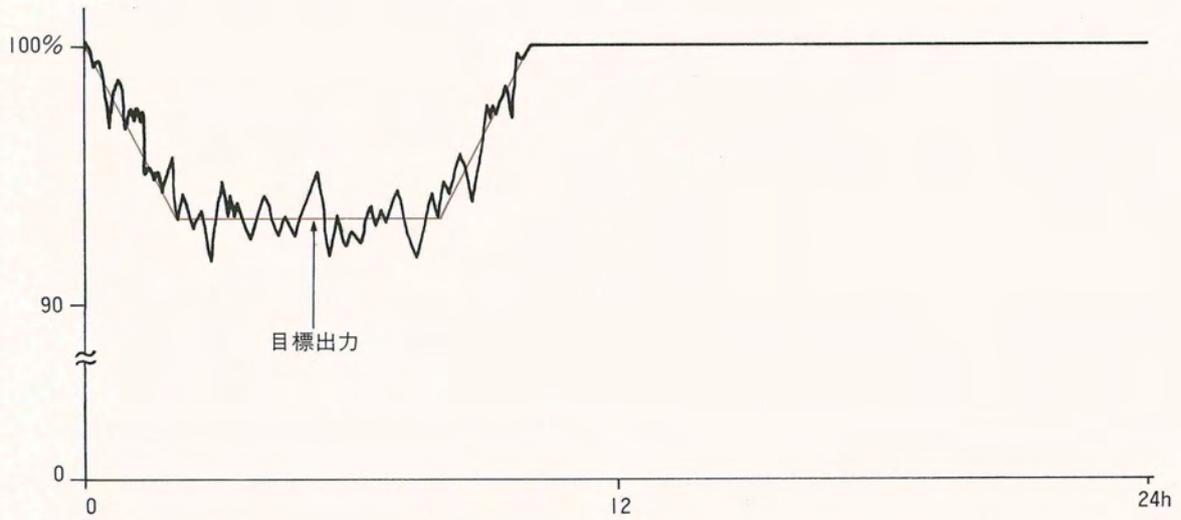
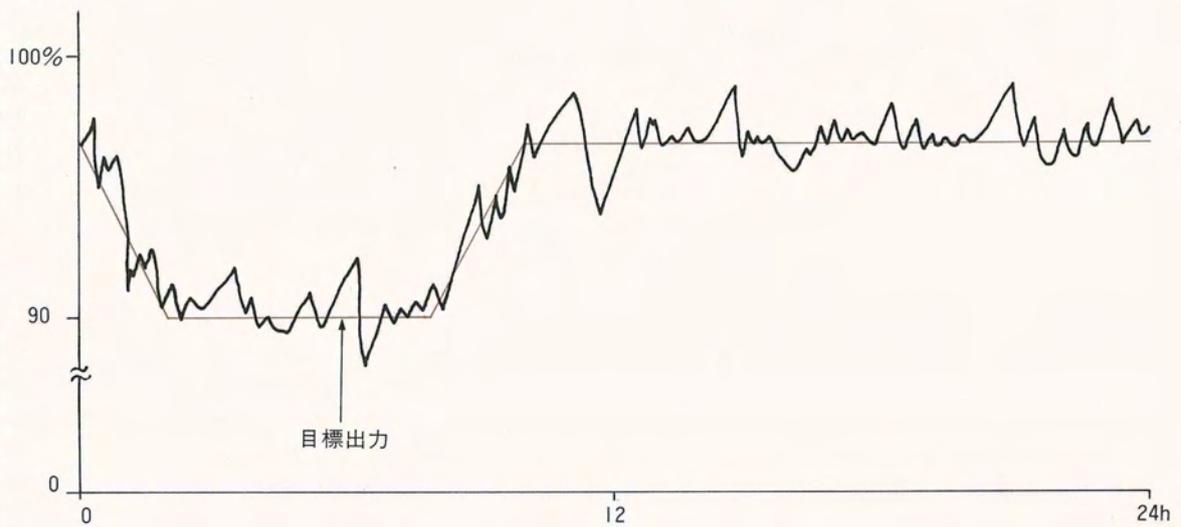


図 1-3-5 原子力構成比率40%での原子力の運転パターン例(原子力に±数%の周波数調整幅がある場合)

(a) 平日



(b) 週末



3. 一方、10%の揚水式水力の他に原子力に±数パーセントの周波数調整能力があれば、原子力は深夜にも定格出力の近傍での運転が可能となる。このときの原子力の運転パターンは、図1-3-5のようになる。

### 1-3-3 原子力・火力発電ユニットの定期補修計画手法

原子力・火力発電機器は、法規上1年に1回点検・補修作業を行なうことが義務づけられており、その停止期間は2～4ヶ月にもおよぶため、需給運用は補修計画によって大きな影響を受ける。

このため、需給計画および電源計画の策定に際しては、種々の制約条件やその影響

度を考慮した、綿密な補修計画の検討が不可欠となっている。

従来、補修計画は試行錯誤的に行われてきたが、労力がきわめて多大であるため、これを計算機で自動的に処理しうる新しい解析手法の開発が望まれていた。

補修計画は、図1-3-6に示すように供給力と需要のすきまに補修停止を行い、予備力を可能な限り均一にするという問題であり、この問題は数学的には組み合わせ最適化問題として定式化される。

当所ではこの問題の求解のために、組み合わせを最適化問題の代表的な解法である分枝限定法を用いた新しい補修計画手法(図1-3-7参照)を開発した。本手法は同図に示すように、データ入力、準備計算等

を行なう準備計算部、本手法の中核部である分枝限定部と分枝数制限部、および結果の微調整を行なう出力調整部とから構成されている。

しかし分枝限定法はいわば解法の指針を与えるだけのものであり、実際のアルゴリズムまで規定するものではない。このため分枝限定部には種々の工夫を織り込んでいる。

その処理の概要は各ユニットの補修時期を順次固定した補修計画案を作成し、それらの案の適否を定量的に評価し、案の取捨選択を行なうという手順からなっている。分枝限定部では計画案が多数とならないように様々な配慮を組み込んでいるが、それでも実際には分枝案数が天文学的な個数となることが多い。このような事態に対処す

図 1-3-6 補修計画問題

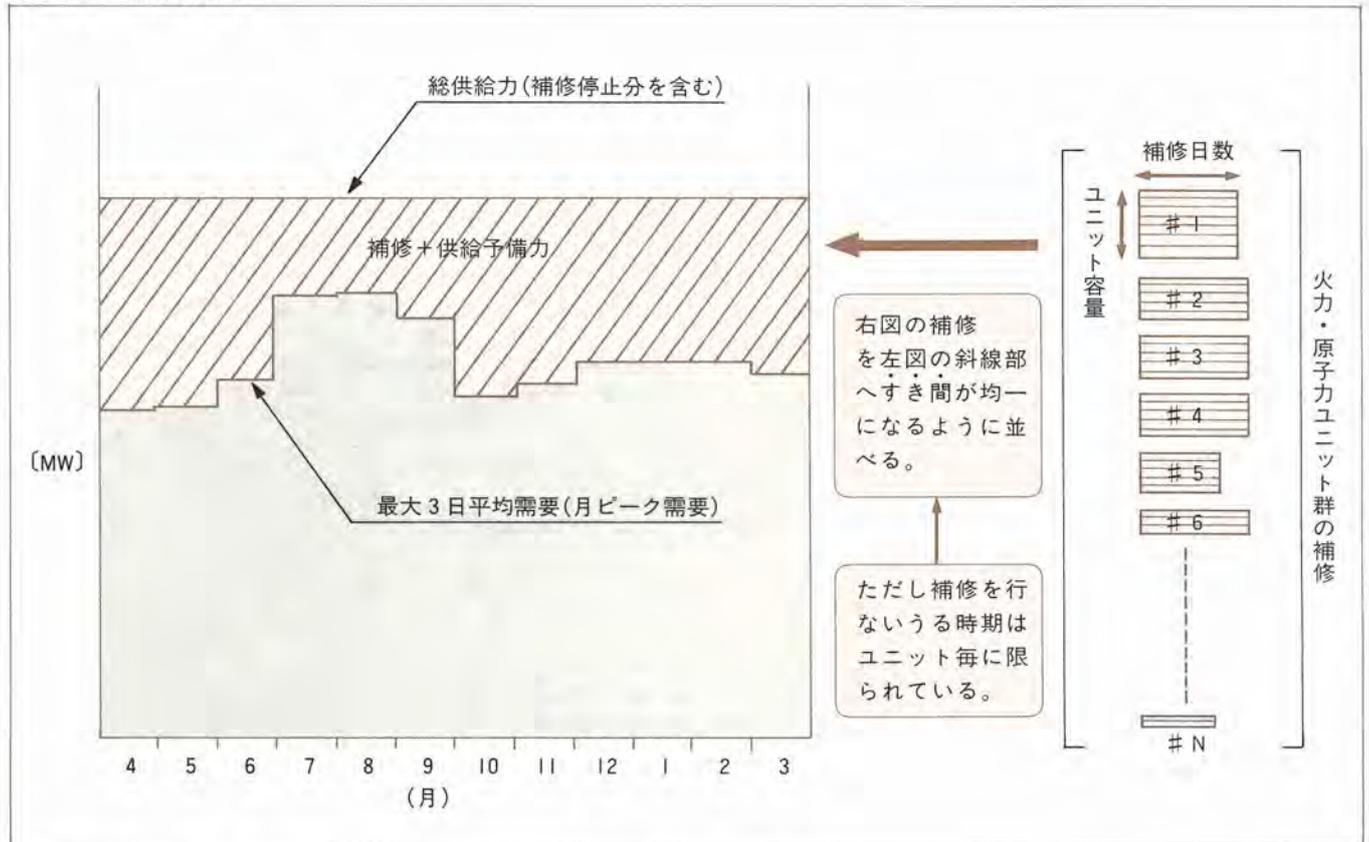
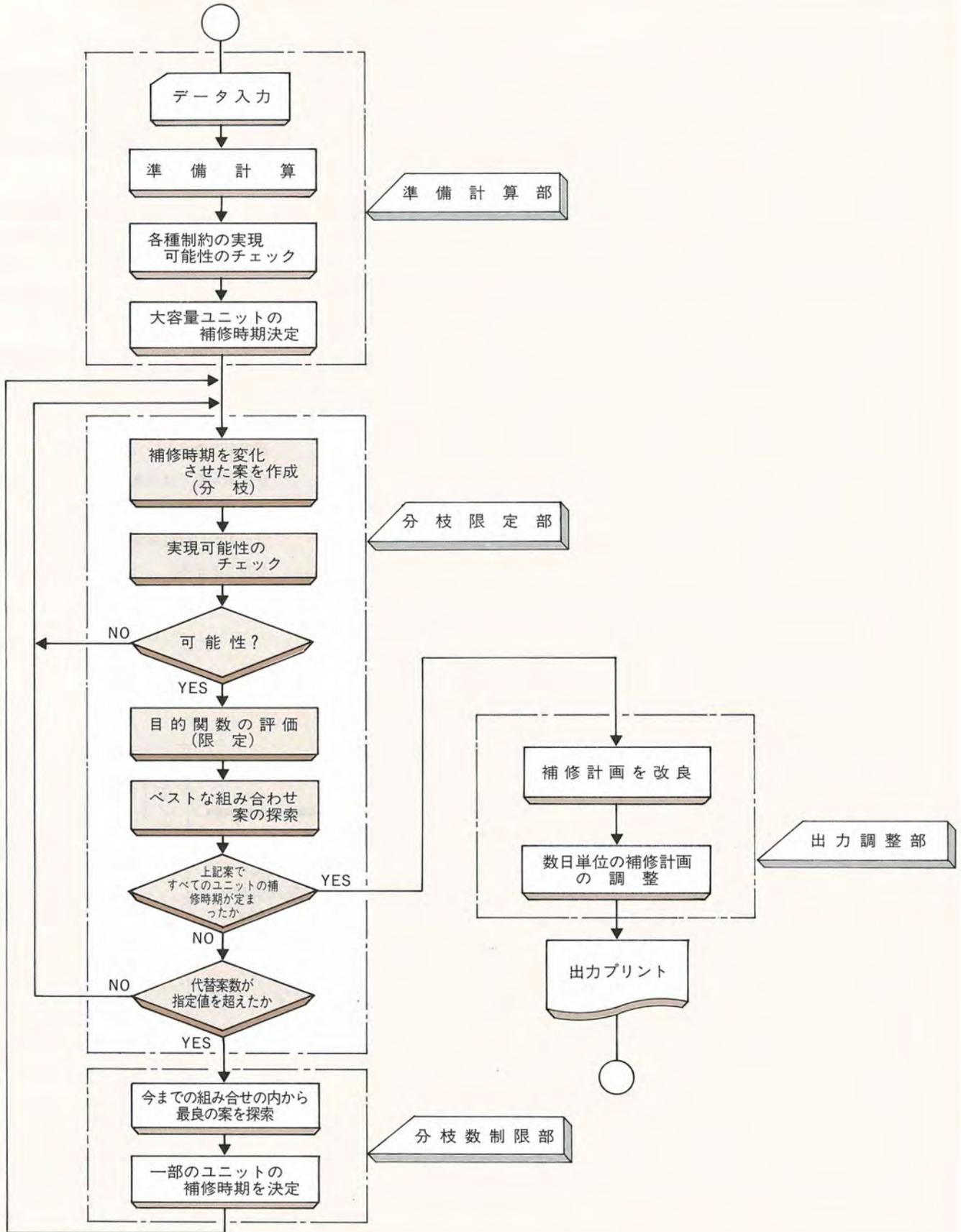


図 1-3-7 開発した補修計画手法の概略フロー



## 週間需給計画システムを電力会社と共同開発し 中央給電指令所の業務の合理化に寄与している。

るために分枝数制限部が設けられている。  
開発した手法の主な特長は下記の通りである。

1. 年間の供給予備率を可能な限り高く維持することなどを目的として、定期補修計画を定めている。その際、定期補修計画に関する制約条件として下記のもの considering している。

- (1)ボイラ、タービンの補修間隔に関する法規上の制約
- (2)発電所内での同時補修台数の上限
- (3)潮流ネックに起因する制約条件
- (4)その他先験的な制約条件

2. 従来電力会社で定期補修の決定にあたっては、制約条件を簡略化したり、あるいは試行錯誤的にその立案・決定を行っていたが、本手法によれば考えられる限りの制約を考慮した上で、体系的に補修計画を決定することができる。またその際、各社固有の事情を考慮することも可能である。

3. 定期補修計画に関わる各種の制約条件を活用するなどの方法によって、分枝限定法における分枝数を減少させた。またそれでも分枝数が増大する場合には、下記のような対策を講じている。

- (1)分枝に先立ち大容量ユニットの補修時期を決定した。これは実運用では、大容量ユニットの補修が需給バランス上ゆりのある期間に限られる点に着目したものである。
- (2)分枝数がある上限値を超えたら、いったん分枝を打ち切り、それらの分枝案の内からもっともすぐれた案を選び、それをもとに再び分枝を開始するものとした。

表1-3-2に本手法を発電機台数26台のシ

ステムに適用した試算例を示す。同表によれば、すべての発電ユニットの定期補修（図中に実線で示されている）は、法規上の制約より定まる補修可能期間（表中に点線で示されている）内にあてはめられ、一方供給予備率は夏季ピーク時に8%以上であり、余裕をもった需給運用が可能となっている。

また本例題程度の系統に対し、計算時間はFACOM M-200級の計算機を用いた場合に約10秒であり、計算速度も十分に実用に供しうるものである。このように本手法によれば、従来数日の労力を要していた補修計画策定作業の効率化が期待される。

### 1-3-4 発電所群の経済的な週間運用計画

原子力発電設備の構成比率が増大するにつれて、火力発電所は、従来のベース、ミドル電源からミドル、ピーク電源へと移行してきている。このため平日においても、すでに一部火力発電機の深夜停止が必要となり、週末にいたっては多数の発電機を停止すると共に揚水発電機の揚水運転によりこの余剰電力を吸収することが多い。吸収した余剰電力は揚水発電機の発電運転で重負荷時に用いるが、この配分を適切にしないと大きな経済的損失を招く。

このように最近の需給運用では、火力機の起動停止と揚水発電機の運転の役割が以前にも増して大きくなっているのが特徴である。このため、日間の需給計画だけでなく、週間まで範囲を広げた計画の重要性が増大している。

ここでは、当所と電力会社が共同開発した、週間需給計画システムの概要を紹介する。

開発した週間需給計画計算システムは、電力の週間需要予測に始まり、適正予備力を考慮した火力発電機運転台数の計画、供給力不足あるいは余剰発生時の揚水池運用計画、および環境規制などを考慮した火力発電機負荷配分計画を週間にわたって立案するものである。

本システムは中央給電指令所における自動給電システムの一部を構成しており、計画の立案はCRT画面を仲介とするマン・マシン対話方式で実行される。以下に本システムのプログラム構成（図1-3-8）と、各プログラムの概要を示す。

#### 1. 日付設定プログラム

週間需給計画計算を実施するにあたり、計画期間を設定する。計画期間は月曜日から始まり、日曜日に終る1週間を基本とするが、ゴールデンウィーク、盆、年末年始などの特殊な場合を考慮して、最大15日間を対象とすることができる。計画計算の時間刻みは1時間単位（1日24時間帯）である。

#### 2. 週間需要の予測プログラム

まず、計画期間の各日最大需要の推移を気温の推移、曜日の特殊性、大口負荷の予定などから予測する。予測は至近の実績を分析したデータに基づく。

こうして計画期間各日の最大需要が得られると、これを各日につき、24時間帯に展開する。これにはあらかじめ用意しておいた標準の日負荷パターンを用いる。

#### 3. 水系計算プログラム

CRTより貯水池の放流予定、各ダムの渓流予想値を入力し、水系ごとに各水力発電所の発電電力日量をグロスに把握する。

これを自流水分、調整池式分、および貯

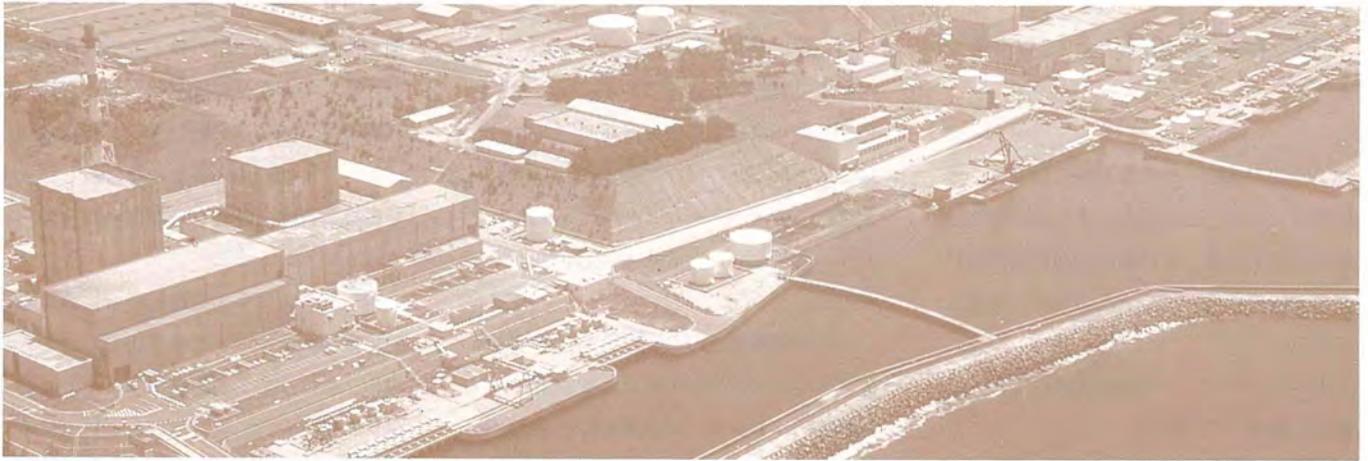
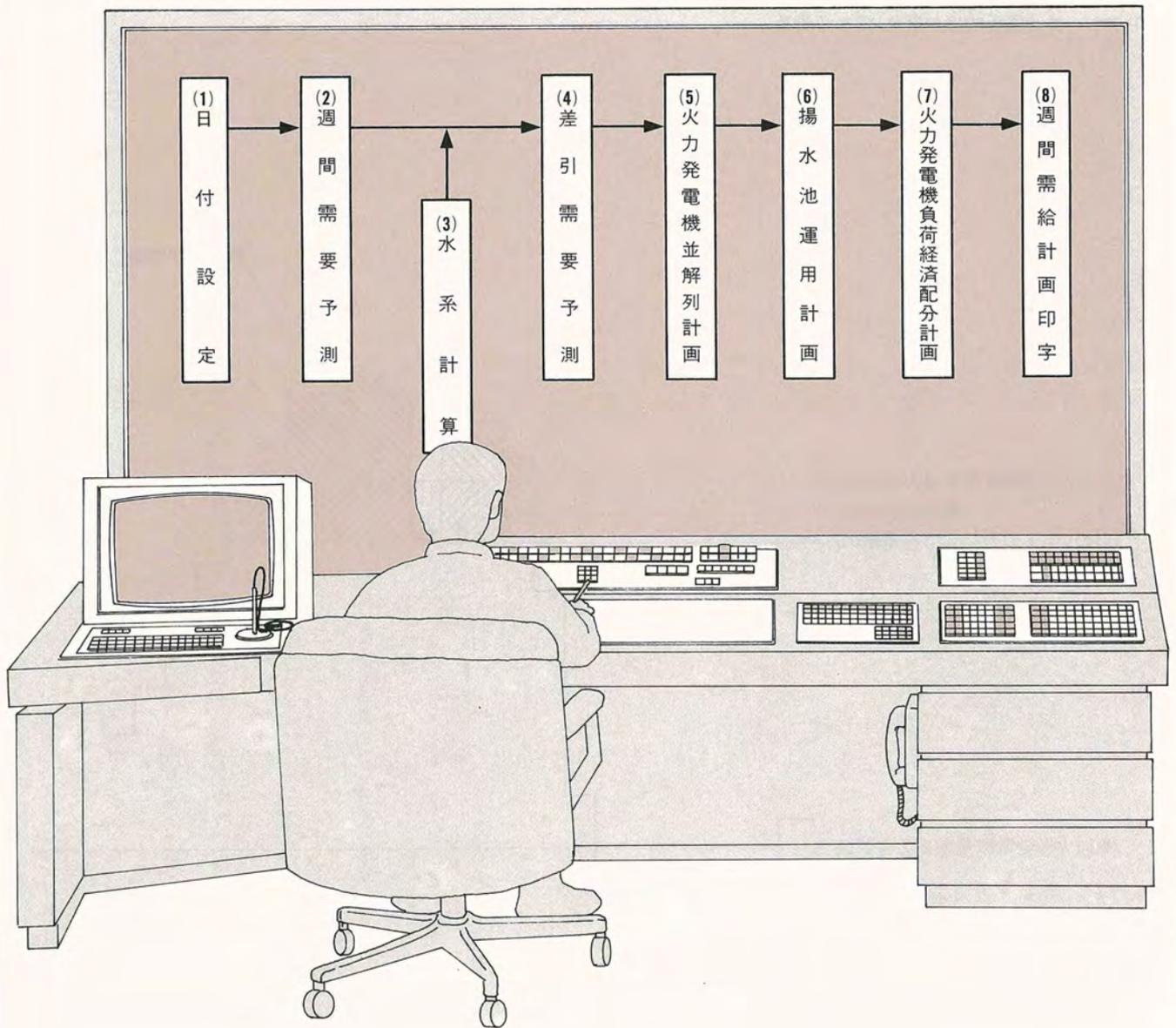


表 1-3-2 補修計画プログラムの試算結果

No.	設備出力 (MW)	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
1	1,000	—	—										
2	1,000							—	—	—	—	—	—
3	600						—	—	—	—	—		
4	600	—	—	—									
5	500		—	—	—								
6	500								—	—	—	—	
7	500			—	—	—	—						
8	500										—	—	—
9	500	—	—	—									
10	600					—	—	—	—	—			
11	350								—	—	—	—	
12	350	—	—	—									
13	350					—	—	—	—	—			
14	350												—
15	350	—	—										
16	350		—	—	—	—							
17	350									—	—	—	—
18	350							—	—	—	—	—	
19	156		—	—	—	—							
20	156						—	—	—	—	—	—	
21	156									—	—	—	—
22	156					—	—	—	—	—	—	—	
23	156							—	—	—	—	—	
24	156	—	—	—									
25	125		—	—	—	—							
26	125										—	—	—
供給予備率(%)		22.1	14.7	14.9	8.6	8.6	22.8	24.6	14.5	9.0	11.7	12.0	10.5

(注) ----- は法規上の制約より定まる定期補修実施可能期間を、————— は計算の結果得られる定期補修期間を表わす。

図 1-3-8 週間需給計画計算システムのプログラム構成



水池式分に分類し、自流式分については24時間帯に展開する。調整池式分と貯水池式分については、総需要の高い時間帯に優先的に最高出力で割付け、残りの電力量を各時間帯の総需要に比例して配分する。

なお、水力出力曲線は次の4.の差引需要予測プログラムのCRT画面から入力することもできる。また、あらかじめ決められ

た水力出力曲線を用いる場合には、このプログラムは迂回される。

#### 4. 差引需要予測プログラム

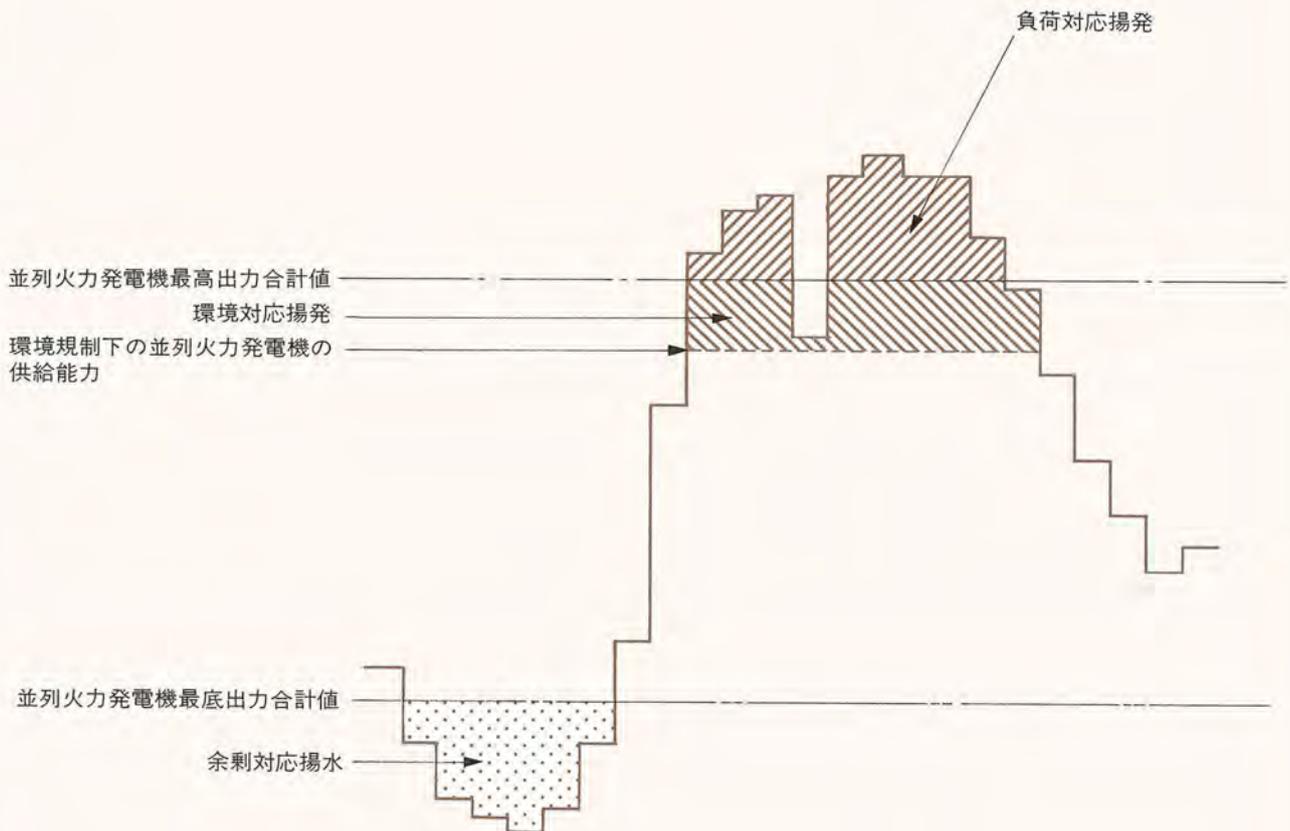
あらかじめ発電計画の決まっている原子力、他社受電電力、融通電力などの供給力曲線をCRT画面から入力しディスクに書込む。次に2.で得た総需要曲線から3.で求

めた水力出力曲線と、ここで入力した供給力曲線を差引いて、火力と揚水で分担すべき需要曲線（差引需要曲線）を算出する。

#### 5. 火力発電機の並解列計画プログラム

差引需要曲線を得ると、次に各日各時間帯の並列火力発電機を定める。方法は基本的には優先順位法である。火力発電機をべ

図 1-3-9 差引需要曲線と揚発・揚水必要量



ース用からピーク用までは発電単価の順にならべておき、需要見合でベース用から系統に並入していく。

この際、需要増加時点では火力機の並列条件を、また需要減少時点では火力機の解列条件を考慮する。火力機並入台数の限度は、総需要に対する予備力の点から定める。

計画期間の各日各時間帯の並列火力発電機が定まると、火力で分担できる供給能力が定まり、この能力を超える差引需要は揚水発電機の発電運転でまかなわねばならなくなる。これを“負荷対応揚発必要量（負荷対応揚発）”と呼ぶ。

また深夜などで並列火力発電機の最低出力の合計値が差引需要を上まわる場合には、この供給力の余剰を揚水発電機の揚水運転で吸収しなければならない。これを

“余剰揚水必要量”（余剰対応揚水）と呼ぶ。

更に環境規制により火力の発電を抑制しなければならない場合には、その分を揚水発電機の発電運転で補う必要がある。これを“環境対応揚発必要量”（環境対応揚発）と呼ぶ。

火力発電機の並解列計画プログラムは、これら3つの必要量を計算して、次の揚水池運用計画プログラムに引継ぐ。図1-3-9に3つの必要量の関係を示す。また、揚水発電機の発電運転を「揚発」、揚水運転を「揚水」と呼ぶことがある。

#### 6. 揚水池の運用計画プログラム

前述の3つの要請を満たすには、実際には、複数の揚水池を駆使する。この揚水池の運用計画プログラムは、各揚水池の運用条件を考慮しながらこれを達成する。運用

条件とは池の最高水位、維持目標水位などである。

これら運用条件を満足させるためには、一般に3つの必要量（負荷対応揚発、余剰対応揚水、環境対応揚発）よりも多くの揚発・揚水を行なわねばならない。この余分の揚発・揚水を“追加揚発”“追加揚水”と呼ぶことにする。

揚水池の運用計画プログラムでは、この追加分が極力少なくて済むような運用計画を探索する。

#### 7. 火力発電機の負荷配分計画プログラム

4.の差引需要曲線から6.で得られた揚水発電機の出力曲線を差引いた残りが、火力発電機で分担する需要曲線である。

本プログラムではこれを経済負荷配分の考えに基づいて火力発電機間に配分する。但し、火力発電所には環境規制により発電電力日量の上限が設られているので、これを遵守し、かつ最経済的な負荷配分を行なうよう配慮する。

#### 8. 週間需給計画の印字プログラム

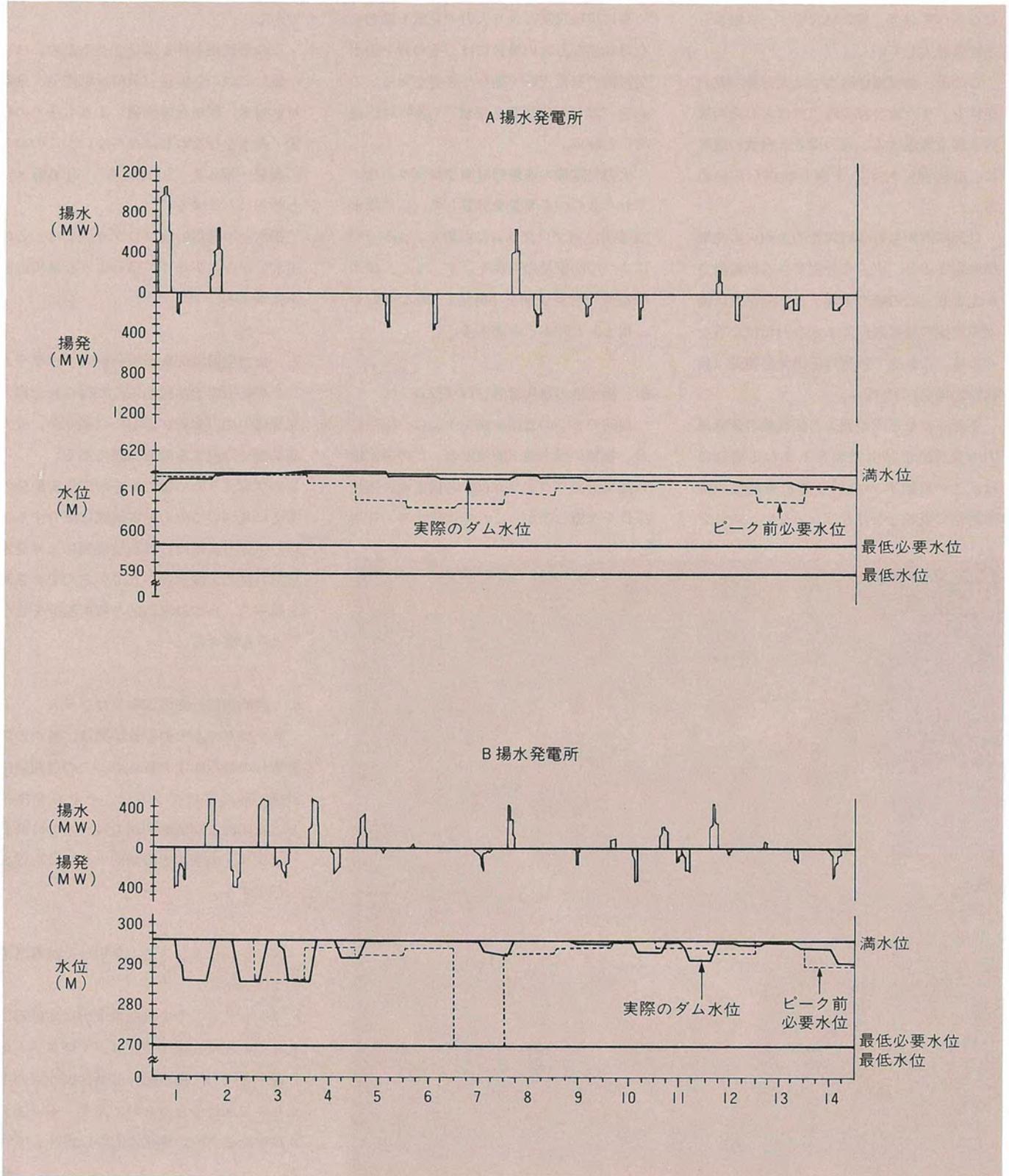
各プログラムでの計算結果は、各々の計算実行の都度印字されるが、この週間需給計画の印字プログラムは、それらを集約し、日間および計画期間の最大需要時断面バランスと最低需要時断面バランスを表し印字する。

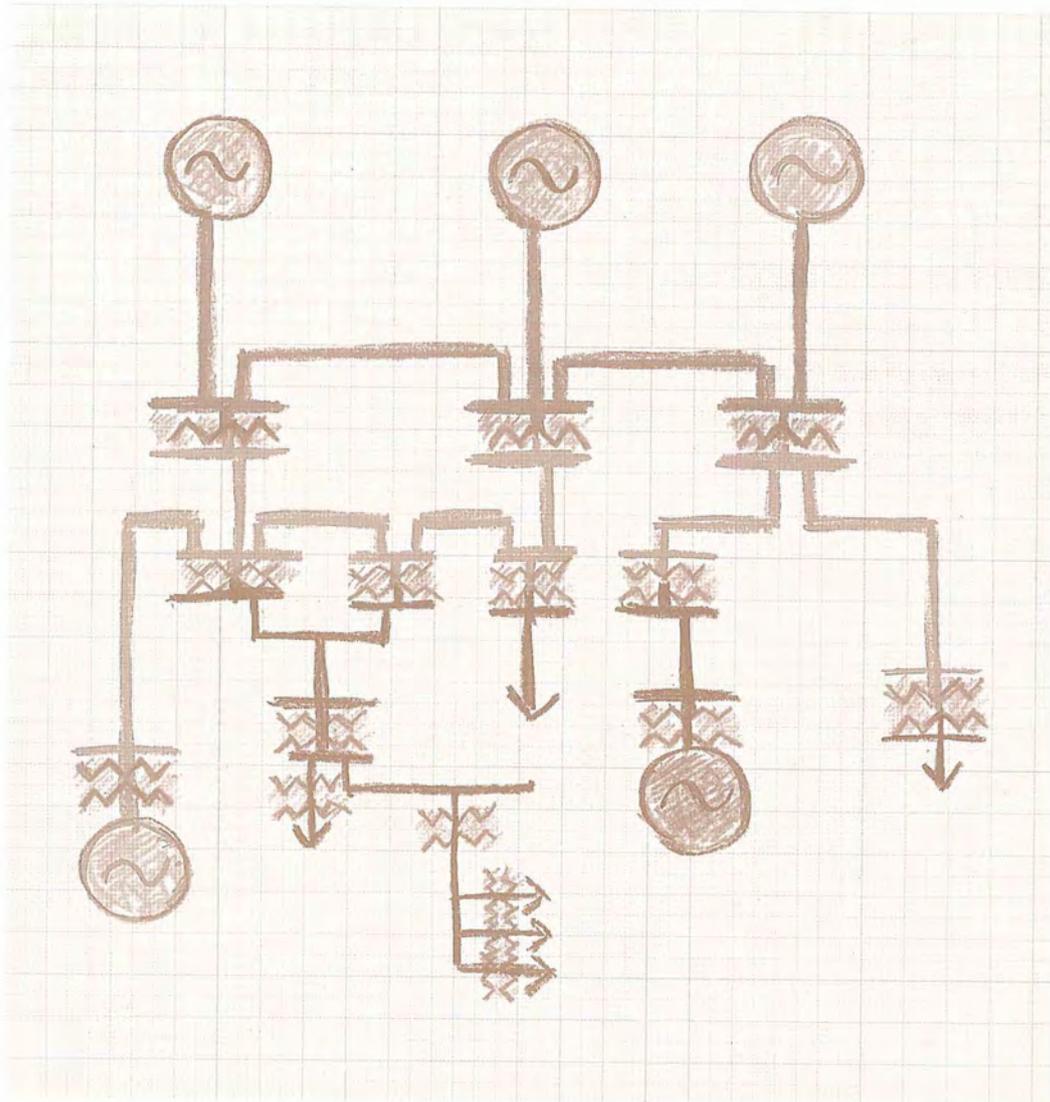
図1-3-10に本システムを用いた試算結果の1例を示す。

本システムの中央給電指令所におけるこれまでの運用実績によれば、プログラムが作成する火力・揚水配分計画は実運用の点からみて満足できるものであり、本システムは中給業務の合理化に大いに寄与している。



図 1-3-10 試算結果の 1 例(揚水発電所運転計画)





第 2 章

一層の効率化をめざす  
系統運用技術

第2章 一層の効率化をめざす系統運用技術 ● 目次  
編集担当●電力研究所 システム部長 高橋 一弘

2-1 概要	システム部 電力系統研究室長 長尾 待士	31
2-2 信頼性と経済性を両立させる系統運用技術		32
2-2-1 オンライン電力潮流制御	電力系統研究室 磯田 八郎	
2-2-2 発電所群の最適負荷配分のためのオンライン需給制御	磯田 八郎	
2-2-3 電圧・無効電力制御による送電損失の低減	電力系統研究室 吉村 健司	

## 2-1 概要

# 要

電力系統の運用は、全系の周波数と各地点の電圧を規定値に保ちつつ、刻々変化する需要に応じて電力を安定にかつ効率よく供給することを目指すものである。このためには、各発電ユニットの起動停止や出力・力率調整、調相設備の運用や各種輸送設備の切換操作などを全系的な観点から合理的に行う必要がある。

他方、原子力主流時代の特徴として、硬直性の強い大容量電源の偏在とこれに伴う電力輸送上の制約が挙げられるが、これを系統運用面から見れば、限られた融通性の中で一定の信頼度レベルを維持しつつ最も効率的な運用を図ることにより、原子力発電の持つ高い経済性をフルに活用することが主眼となる。

これを十分な実用性を備えた形で実現するためには、種々の制約の評価や予測機能を駆使したきめ細かい運用技術の開発改良が極めて重要となる。

ここでは、これらの運用技術のうち、以下に関して当所が最近実施した研究の成果を紹介する。

1. 予想外の需要変動や気象条件の急変などに対応するオンライン電力潮流制御
2. 発電所群の最適負荷配分をより確実にするオンライン需給制御
3. 需要予測を用いた効果的な電圧・無効電力制御

オンライン電力潮流制御は、送電線や連系変圧器の過負荷や運用範囲からの逸脱を監視し、常に潮流を許容値内に納めるよう各発電機出力を制御するものである。

発電機出力の振替えを行うに当たっては、それによる経済損失を最小限に抑える論理を採用している。また系統に移相変圧器が存在する場合は、送電損失を最小とする設定値を算定、表示することにより、運用者が需要変動の動

向と睨み合わせて適正タップを選定する際の便宜をはかっている。これらの成果は、一部電力会社で実用化されている。

オンライン需給制御は、前日作成の需給運用計画をベースとして、これに当日の実績による修正を行いながら、最も経済的な負荷配分となるよう、各発電機出力を制御するものであるが、従来の制御方式では朝の負荷立上りや昼休み前後の負荷急変に対しては一部手動調整に頼らざるを得なかった。

当所が新たに開発した論理は、これらをすべて自動的に行うもので、単なる運用業務の省力化に留まらず、燃料費の節減にも大きな貢献をなし得ることが実証されている。これらの成果は電力会社で既に実用に供されている。

また、電圧・無効電力制御は主要水力・火力電源の無効電力や超高圧変電所の変圧器タップおよび調相設備を制御して、主要地点の電圧の維持、無効電力制御による送電損失の軽減を図るもので、現在多くの電力会社で、275KV以上の基幹系統を対象に、総合的なオンライン制御が実施されている。

当所では、この制御方式の新たな展開として、需要予測と需給運用計画を取り込み、変圧器タップ動作や調相設備投入遮断の回数抑制および2次系の電圧・無効電力制御への影響評価などを加味したきめ細かい制御の基本論理を開発し、実用化を図っている。

今後、これらの系統運用技術には、なお一層の綿密性と融通性が求められようが、このためには各種技術が個別的に発展するだけでなく、相互の関連や人間の介在する判断などを効率的に取り込んだ総合的なシステムの開発が必要となる。

## 2-2 信頼性と経済性を両立させる 系統運用技術

### 2-2-1 オンライン電力潮流制御

電力系統を経済的かつ高信頼度に維持して運用するには、種々の制約条件を満足し目的に合致した電力設備の運用が必要となる。

現在、我が国の電力会社において使用されている経済運用計算法では信頼度制約を充分に考慮することができない。

このため、電力系統の運用者は常に電力系統を監視し、電力輸送設備の熱容量や、安定度限界から課せられる潮流制限を違反していないかを監視し、必要に応じて発電機負荷の振り替えを手動で行っている。

しかしながら、電力設備は補修等のために変則的な運用を行うことが多く、経験豊富な運用者にとっても経済性と高信頼性を両立させる電力設備の運用は難しく、中給の業務において大きなウエイトを占めている。

ここで述べるオンライン電力潮流制御は通常の経済運用によって電力系統を運転している時に事前に決められた運用限界を超えたり、あるいは雷雲の発生によって特定送電線の電力潮流を減少させたい場合に、経済損失を最小限にとどめながら発電機出力の振り替えを自動的に行なうものである。

発電機出力の振り替えを行なう時には次の制限を考慮している。

制約条件：

1. 各火力発電機の出力は発電機の応答速

度などによって決まる運転範囲を超えないこと。

2. 送電線や変圧器を流れる潮流はそれらの熱容量による制限潮流を超えないこと。
3. 特定の複数送電線の潮流合計は制限値(安定度限界などによって決められた値)を超えないこと。

これらの制限を満たしながら次の2つの目的関数のうちのいずれか一方を満足する様に発電機出力の振り替えを行なう。

目的関数：

1. 系統内火力発電所の総燃料費を最小にする発電機出力を求める。
2. あらかじめ指定した発電機の運転目標出力からの偏差の2乗和を最小にする発電機出力を求める。

ここでは、当所が開発した、電力会社で稼働中のシステムの概要を述べる。処理フローは図2-2-1に示す様にPhase I からPhase IV迄の4つに分割されており、このうちPhase IIIまでが発電機出力による有効電力潮流の制御を行ない、Phase IVは系統の送電損失を減少させるために、移相変圧器の適正タップを計算するものである。以下に各Phaseの処理概要を示す。

〔Phase I〕ここでは制約条件1.のみを考慮して、目的関数1.ないし2.に合致した発電機出力を求める。

目的関数が1.の場合には、よく知られている系統の電力損失を無視した時の火力発

電機間の経済負荷配分問題であり、等増分燃料費則を適用して解くことができる。目的関数が2.の場合にも、同様の方法によって解くことができる。

以上のようにして定めた発電機出力をもとに、潮流計算を行い、この結果が制約条件2.、3.を満足していれば、それが求める発電機出力である。

〔Phase II〕Phase Iで定めた発電機出力では、潮流監視点の制限値を違反する場合がある。Phase IIでは上記の違反量を解消する発電機出力を求める。本問題は線形制約式のもとで、2次の目的関数を最小にする問題となるので、ここでは2次計画法を適用して解いている。

〔Phase III〕Phase IIにより、制約条件1.~3.を満足する発電機出力、すなわち実行可能解が求められたので、ここでは目的関数1.あるいは2.のいずれか一方に合致する発電機出力を求める。

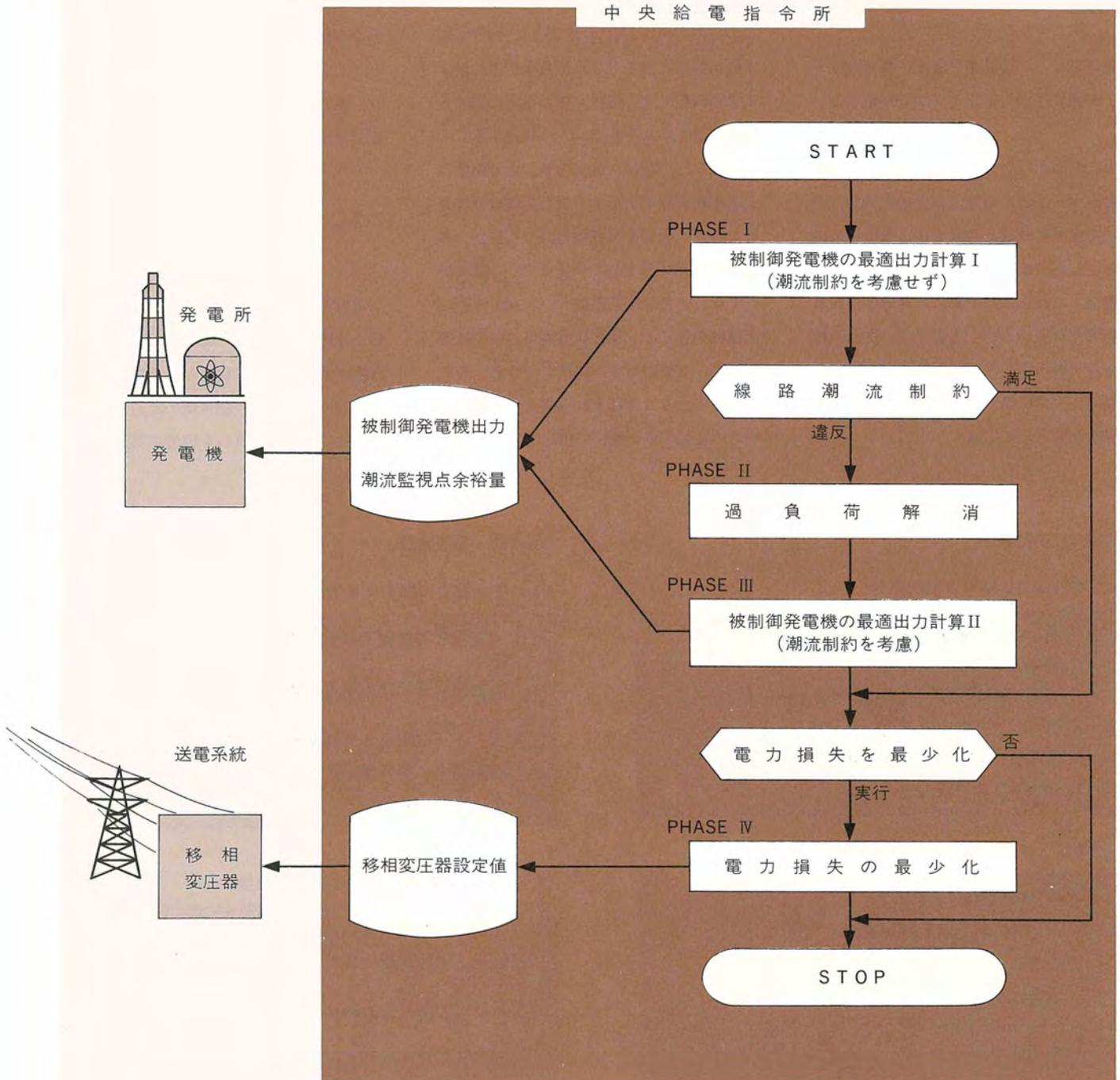
なお、Phase IIで違反量を零にできない場合には、その違反量は与えられた条件下で実現しうる最小のものであるから、当該潮流監視点の潮流制限値を緩和し、見かけ上実行可能解が得られたものとして、目的に合致した発電機出力を求める。

なお、制限値を緩和した場合には、その旨をCRTに表示し、運用者に警告する。

〔Phase IV〕対象とした系統には移相変圧器が設置されており、これに対して次のような取扱いを行なっている。

移相変圧器の設定値は、発電機出力のよ

図 2-2-1 オンライン電力潮流制御システムの構成



## 電力系統の一層の信頼性と経済性の向上を図るために 有効電力と電圧、無効電力を同時に 制御する理論の開発を進めている。

うに頻繁に変化させることはできないので、本システムでは Phase III で求めた発電機出力に対して、上記の移相変圧器を調整し、系統の送電損失を最小にする設定値を計算し、CRT に表示することになっている。

運用者は、この結果と将来の負荷動向から、移相変圧器の適正タップを決定する。

上に述べたシステムは、有効電力の制御に力点がおかれている。実系統では、この他に電圧や無効電力潮流も適正な値に制御することが望まれる。

現在、これらは有効電力の制御とは独立に制御されているが、当所では、電力系統のなお一層の信頼性と経済性の向上を図るために、次の様な、両者を同時に制御し得る理論を開発している。

電力系統の運用上に課せられる種々の制約条件は、有効電力と強い関連のあるグループと、電圧・無効電力と強い関連のあるグループに分けられる点に注目して、表2-2-1 の様に分類整理する。同様に目的関数についても表2-2-2 に示すように分類する。実際の適用に当たっては、有効電力に関する目的関数(a)と、電圧・無効電力に関する目的関数(b)からそれぞれ1つ指定する。

開発した方法は、従来のP、Q分割法による潮流計算手法とよく似た手順の計算を行なって、所望の発電機出力や変圧器、各種調相設備の設定値を決定する。(潮流計算では、スイング発電機といわれる一台の発電機を除くと、他の発電機出力や変圧器等のタップ値が計算前に指定されているのに対して、ここではそれらの大多数のものがその運転できる範囲で指定され、目的に

合致するようにそれらの値を計算する)。

この方法は、いわゆる最適潮流計算手法と呼ばれるものに属し、系統構成がループ状あるいはグリッド状の場合に特にその能力を発揮する。現在我が国の基幹系統はいわゆる放射状であるが、系統構成の複雑化とともに運用制限も厳しくなる傾向にあり、本手法は今後の運用計画や制御において重要な技術と考えられる。

### 2-2-2 発電所群の最適負荷配分のためのオンライン需給制御

電力系統における有効電力制御は、時々刻々変化する負荷に対応して、周波数と連系線潮流を規定値に保つとともに、経済的な配分になるよう各発電機の出力を調整することである。これらを円滑に実施する装

表2-2-1 制約条件

#### (a) 有効電力に関する制約条件

①	有効電力の需給平衡制約
②	発電機の有効電力出力制約
③	送電線や変圧器の通過有効電力制約
④	ブロックでの有効電力の需給平衡制約
⑤	異なる母線間での位相差制約
⑥	移動変圧器の調整量制約

#### (b) 電圧・無効電力に関する制約条件

①	無効電力の需給平衡制約
②	発電機の無効電力出力制約
③	発電機の送端電圧制約
④	送電線や変圧器の通過無効電力制約
⑤	ブロックでの無効電力の需給平衡制約
⑥	系統電圧制約
⑦	電圧調整用変圧器の調整量制約
⑧	調相設備の調整量制約

表2-2-2 目的関数

#### (a) 有効電力に関する目的関数

①	系統内火力発電所の燃料費を最小にする
②	系統内の有効電力潮流による電力損失を最小にする
③	前もって指定された発電機有効電力出力、送電線有効電力潮流、移相変圧器設定値からの重み付2乗和を最小にする

#### (b) 電圧・無効電力に関する目的関数

①	前もって指定された系統内ノード電圧からの偏差の重み付2乗和を最小にする
②	系統内の無効電力潮流による電力損失を最小にする
③	前もって指定された発電機送端電圧、送電線無効電力潮流、調相設備、変圧器設定値からの偏差の重み付2乗和を最小にする

置として、LFC (Load Frequency Control) やELD (Economic Load Dispatching) 装置がある。

図2-2-2は、現在使用されている周波数・有効電力制御システム構成の一例を示す。これらの装置は、電力会社の中央給電指令所にあるコンピュータがその中核をなしている。

ところで、系統容量の増大とともに負荷の変動周期2～3分程度までの変動分は減

少する傾向にあるが、周期2～3分から10～20分程度の変動分を従来のようにLFCで吸収することは困難な状況にある。

これは、ベース負荷を分担する原子力発電の電源構成に占める割合の増大や、水力発電の電源構成に占める割合の減少などによる。

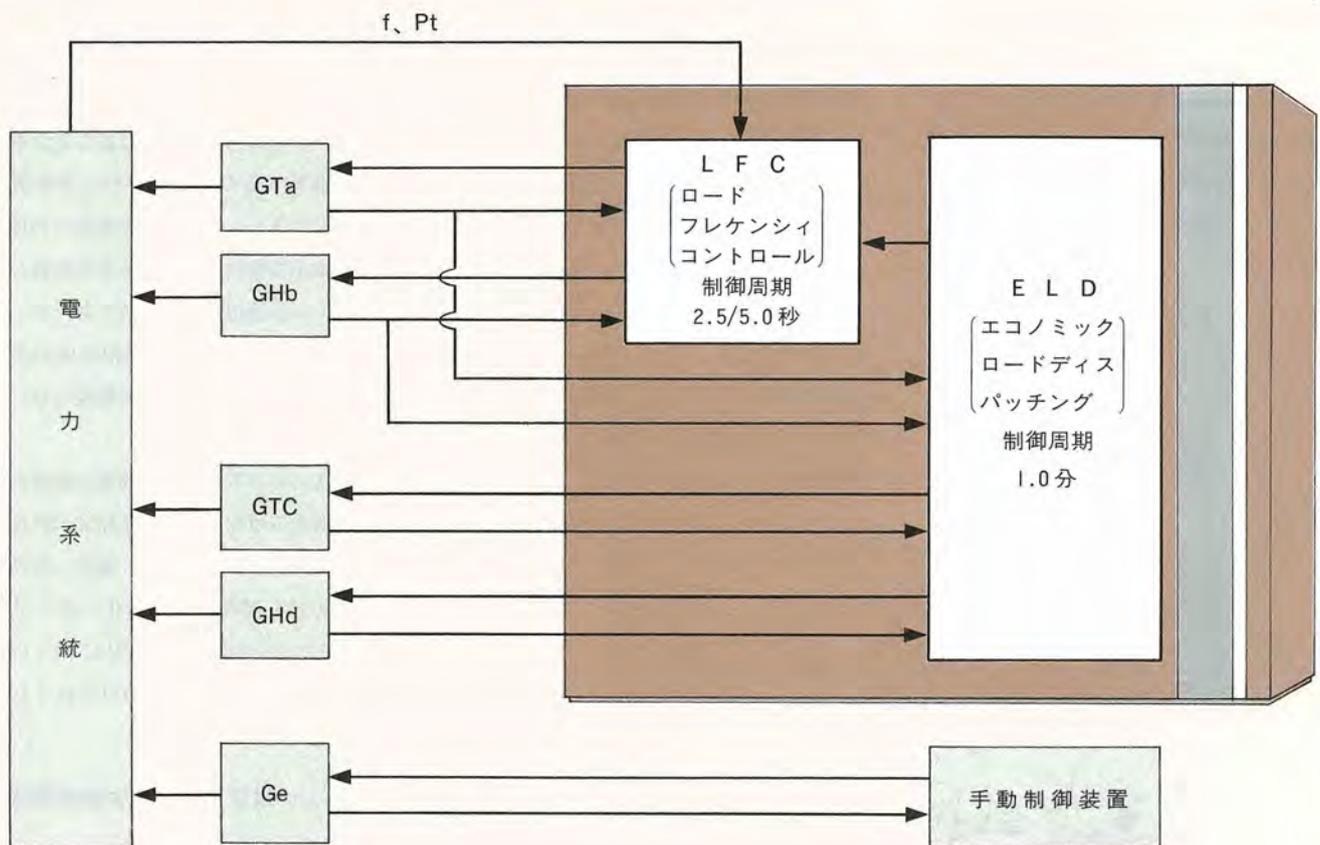
そのため、今後は従来のLFCで対応してきた短い周期の負荷変動に対してもその一部をELDにより対応する必要がある。

このように火力発電機の負荷配分は今後

の有効電力制御上、ますます重要な位置を占める。

現行の火力発電機は、ELDの制御周期と同じ1分～数分先の需要予測値に対して、各発電機の増分燃料費が等しくなる様に負荷配分し運転されている。しかしながら、この方法では、例えば需要増加時間帯には増分燃料費の安い発電機で可能な限り需要の増加分を吸収していき、継続して需要が増大する場合には、増分燃料費の安い発電機が上限出力に到ったあとで、増分燃

図 2-2-2 周波数・有効電力制御システムの構成例



- GTa、GTC：火力（汽力）発電機
- GHb、GHd：水力発電機
- Ge：火力（汽力）、水力及び原子力発電所
- f：周波数
- Pt：連系線潮流

料費の高い発電機の出力増加を行う。

このため、朝の負荷増加時のように、3時間程度間にピーク負荷の50%近くも連続して増加する場合や、昼休み前後のように、10~20分間にピーク負荷の10%程度の負荷変化が発生する場合には、発電機出力を需要の変化に追従させることは困難で、このような時間帯には一部手動調整を並用しているのが現状である。

当所ではこの点を解決し、急激な需要の変動にも充分対応でき、しかも系統全体として、経済的で信頼性の高い運用ができる自動運転システムの新しい理論を開発した。

これは、各発電機の効率や性能などを総合的に判断するとともに、さらに3時間程度先までの需要予測値を用いて何時の時点で、どの発電機をどの位の出力で運転するかを、時々刻々きめていくものである。

ここでは、本理論にもとづいて電力会社で実用化されたシステムを紹介する。このシステムでは、3時間先迄の需要予測値を用いている。火力機の分担出力は需要予測値から水力と原子力発電所の出力を差引いて決定される。



火力発電間の出力分担は、各発電機の運転スケジュール、プラントの応答特性、ボイラー給水ポンプやバーナーの起動所用時間を考慮して次のように行われる。

1. 対象火力発電機の3時間先の予想出力を計算し(等増分燃料費則によって求める)、これと現在出力を用いて3時間先までの運転可能領域を求める(図2-2-3、(a)参照)
2. プラントの応答性能を考慮しながら、3時間先に向けて負荷配分する。この結果を同図(b)の太線で示す。
3. 2. からボイラー給水ポンプやバーナーの起動・停止時期が決まり、これを考慮した運転可能領域が同図(c)の様に求まる。
4. この運転可能領域を用いて、再度逆に3時間先から現在に向けて負荷配分を行い、所望の発電機出力を求める。

このシステムでは3時間先までの運転予備力を常に監視しているので、電力系統を高い信頼度に維持することが可能である。

また、火力発電所の熱効率向上により0.5%程度の燃料の節約ができた。

これは従来の方法では、負荷の急変時間

帯には手動遠隔運転が主体であり、運転中の予備力を多く確保する傾向のため効率の低い発電機を高負荷で運転し、その分、効率の高い発電機の負荷を減少させていたが自動運転により、この負荷急変時の需給調整が円滑に行われ、効率運転が可能になったためである。

併せて自動運転が達成されたために、需給調整業務が約50%削減された。

## 2-2-3 電圧・無効電力制御による送電損失の低減

### I. 電圧・無効電力制御

電圧・無効電力制御は、良質な電力を需要家に供給するために行われる系統制御のひとつである。一般に、主要地点の母線電圧と連系線無効電力潮流を常時監視し、これらを許容運用幅内に維持するため、発電機の電圧や無効電力、調相設備の並列、LRT(負荷時タップ切換変圧器)のタップを制御する。

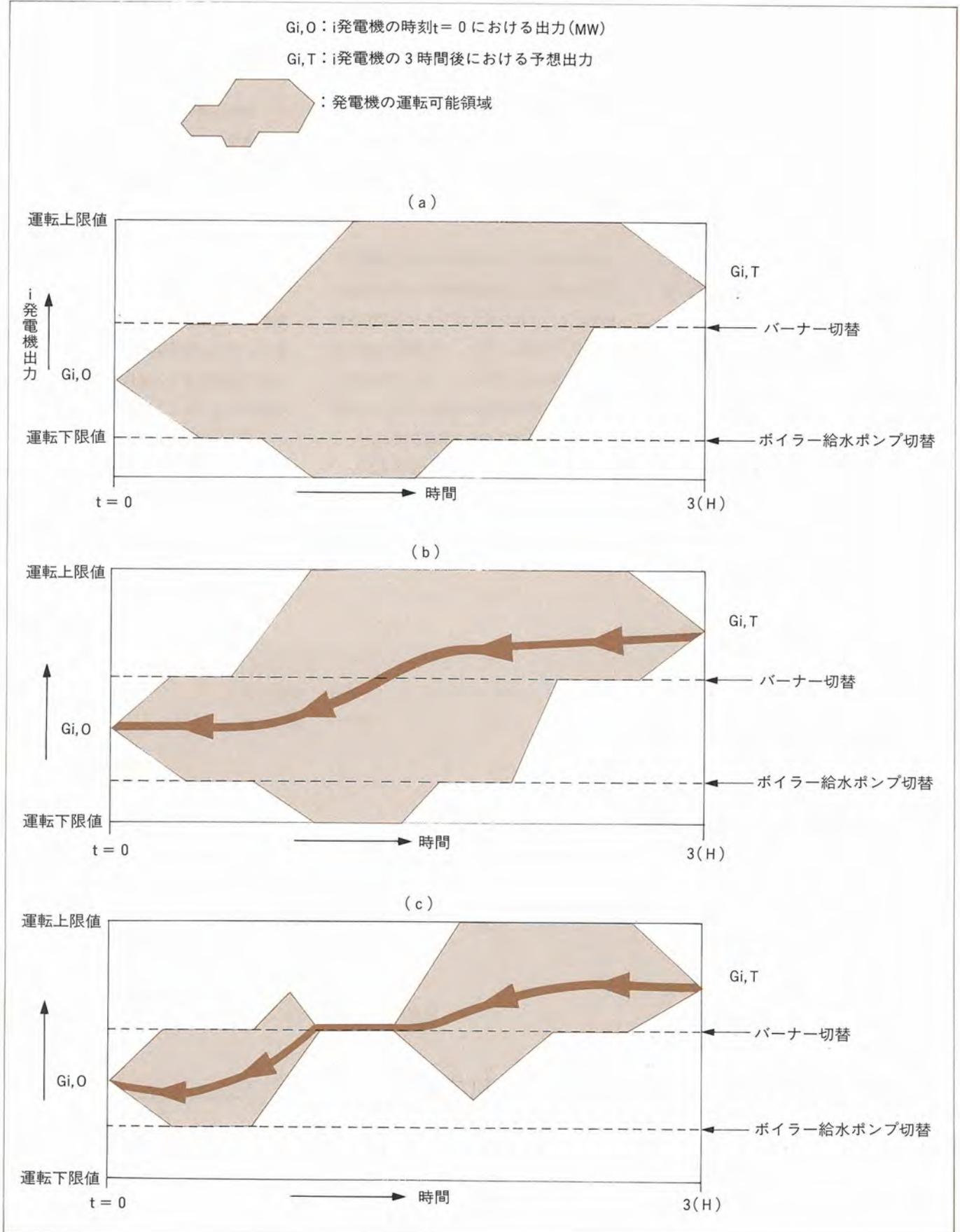
わが国における電圧・無効電力制御の自動化に関する研究、開発は昭和30年代後半に始まり、当所においては、電圧・無効電力制御方式を開発し、実用化に供して来た。現在では約半数の電力会社において275Kvの系統を対象に総合制御が実施されている。

### II. 新しい電圧・無効電力制御理論

近年、送電線の長距離化に伴って次のような問題が新たに生じて来ている。

1. 監視地点における電圧および無効電力の許容運用幅からの逸脱を、遠方の電圧調整機器で制御するため、その中間に位

図 2-2-3 運転パターン決定手順



置する負荷地点の電圧が変動しやすい。

- 従来の制御方式によれば、制御効果最大機器として常に同一の機器が選択されるケースが多く、機器単体としての動作回数が増加する傾向にある。

当所では上記の問題を解決するため、電力会社と共同で従来方式の見直し、さらに新しいオンライン電圧・無効電力制御方式の開発を進めた。

すなわち、従来方式では、電圧および無効電力の瞬時値だけを監視し、もし許容運用幅を逸脱しているものがあれば、許容運用幅内に納めるように制御しており、このため電圧調整機器の動作回数が多くなる欠点があった。

そこで新しく提案する方式は、従来のように瞬間、瞬間の制御ではなく、ある期間(10分程度)の無効電力の変化を見越した電圧調整機器の運用を行うものである。

計算手順は、ある期間内の電圧監視点の電圧を計算し、許容運用幅からの逸脱量の和をとり、これを最も減少させる電圧調整機器を1つ選ぶ。次に、この機器の操作を考慮した電圧を計算する。そして許容運用幅からの新たな逸脱量の和をとり、この値の減少に最も効果のある機器を選ぶ。

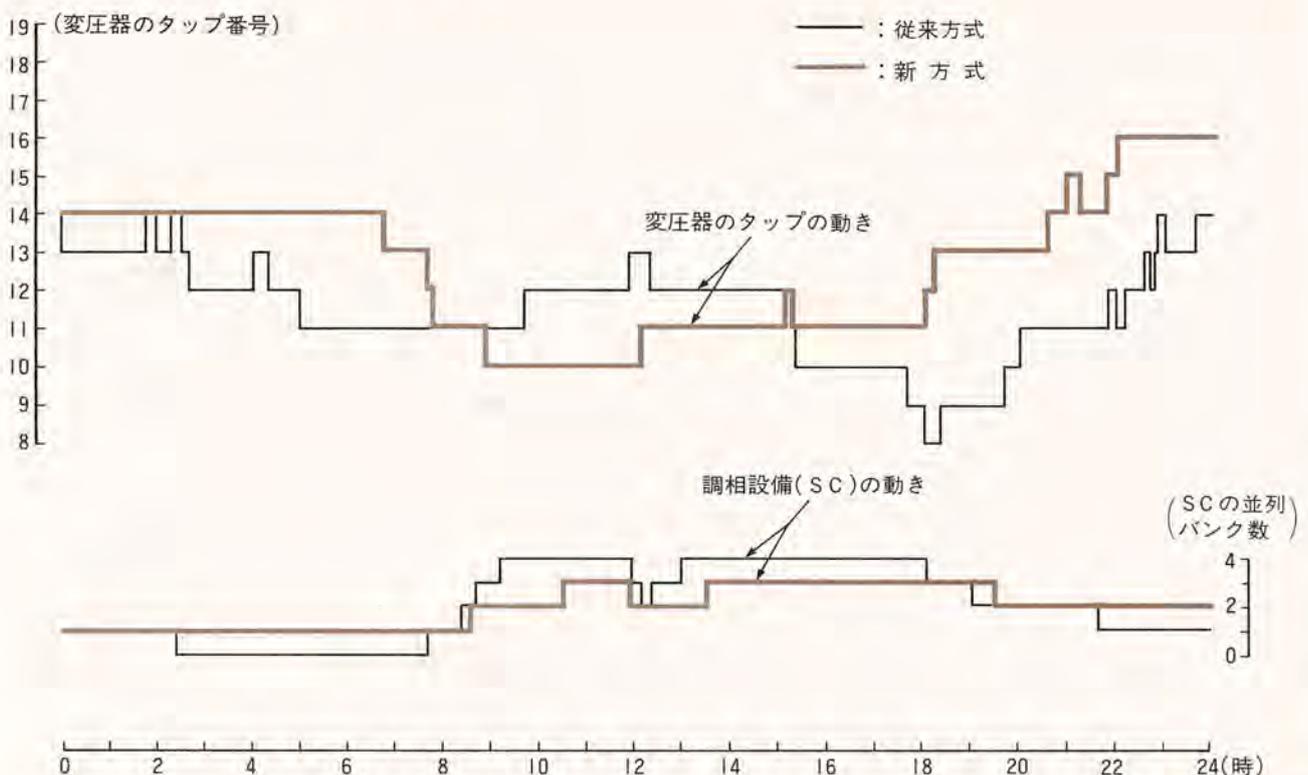
この作業をある期間内での逸脱量がなくなるまで繰り返す。なお、操作される機器の選定に当たっては、現行の運用形態を考慮して次の事項を加味している。

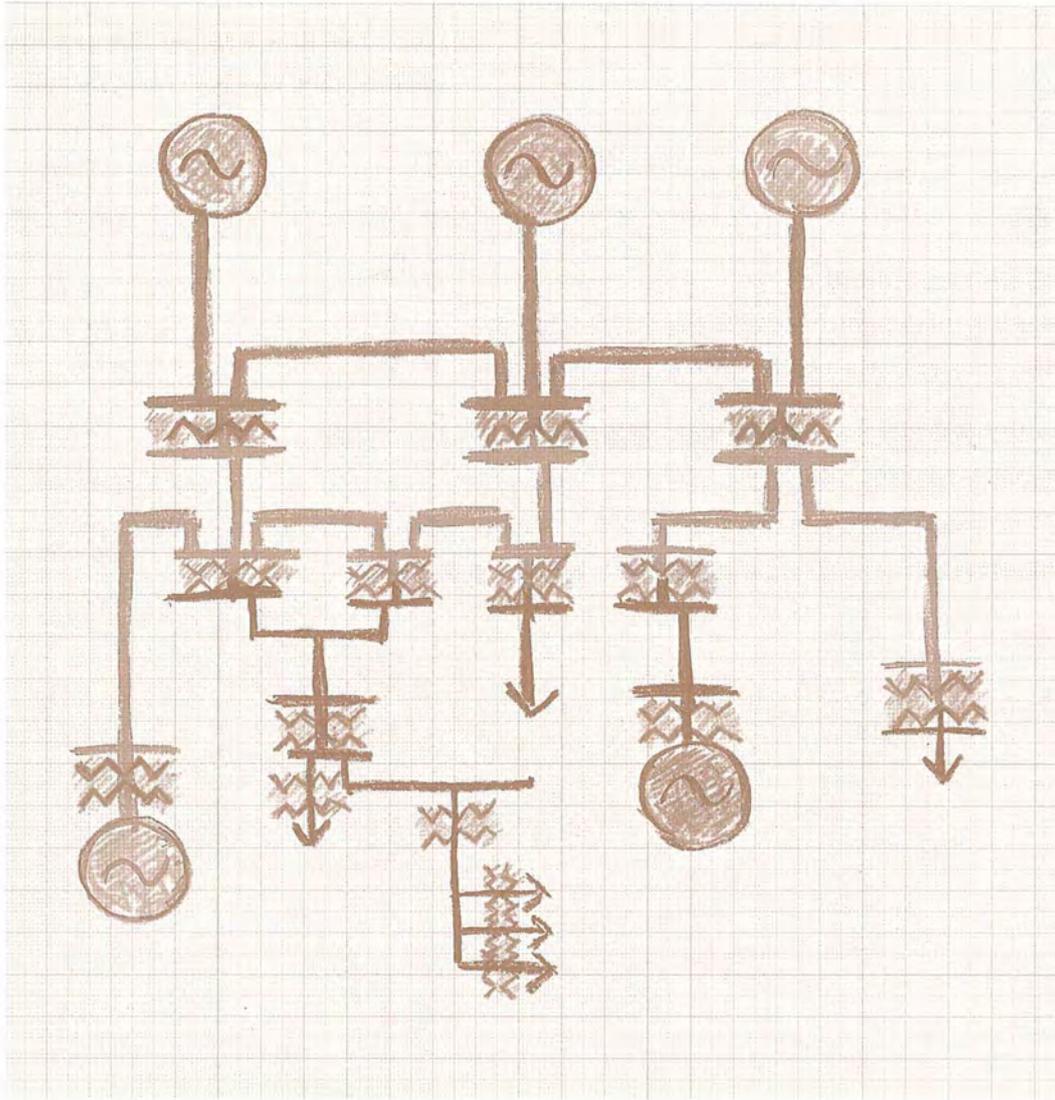
1. 調相設備の並解列禁止時間帯の設定
2. 調相設備の10分間異方向操作の禁止
3. LRTの3分間連続動作の禁止

さらにこの電圧調整機器の選択作業には送電損失の低減化についても考慮しており、提案する方式は電圧調整機器の動作回数および送電損失の低減化にとって有効である。また昼休み前後の負荷急変時間帯でも電圧調整機器を迅速に対応でき、不必要な動作をなくすることができる。

7機40母線モデル系統における試算結果を図2-2-4に示す。このモデルでの結果から、提案する方式によれば、従来方式より少ない操作回数で良好な制御の行えることがわかる。

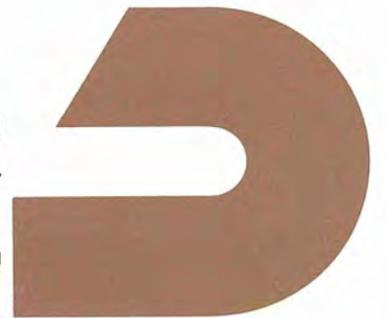
図 2-2-4 モデル系統による試算結果の1例





第  章

# 系統事故予防に必要な 解析技術



第3章 系統事故予防に必要な解析技術 ● 目 次  
編集担当●電力研究所 システム部長 高橋 一弘

3-1 概 要	システム部 系統制御研究室長 植田 清隆	41
3-2 系統の解析技術とその応用		43
3-2-1 大規模系統の計画運用のための効率的な解析システム	系統制御研究室 浅田 実	
3-2-2 オンライン系統安定化制御のための高速固有値解析法	電力系統研究室 内田 直之	
3-3 原子力・火力発電プラント、負荷設備等の高精度シミュレーション技術		51
3-3-1 系統の重大事故対策に用いる新しいモデル	系統制御研究室 谷口 治人	
3-3-2 原子力の高信頼度運転を確保する原子カプラントのシミュレーション	系統制御研究室 市川 建美	
3-3-3 電力系統特性解析の高度化に必要な発電機・制御系・負荷モデル	谷口治人、浅田 実	

## 3-1 概要

わが国の電力系統は大規模化の傾向にあるが、近年は、これに加えて電源形態および需要形態の多様化、各種の系統安定化制御装置の設置による複雑化などの傾向もみられる。このような電力系統において高い信頼度の運用を維持するには、送電線への落雷などに起因する系統故障に対して十分な対策を施しておくことが大切であり、その系統技術面での方策として適切な系統運用制御方式、事故波及防

止方式などの検討が重要となる。

これらの検討には、想定する故障が実際の電力系統に発生した場合の電力系統の挙動を精度良くシミュレーションする、電力系統の動特性解析技術が基本となる。

当所では、こうした要請に応じて従来より各種の系統解析技術を研究、開発し、電気事業に提供してきている。本章では、このような系統解析技術の機能向上を目的として、当所が近年開発した以下の解析技術について紹介する。

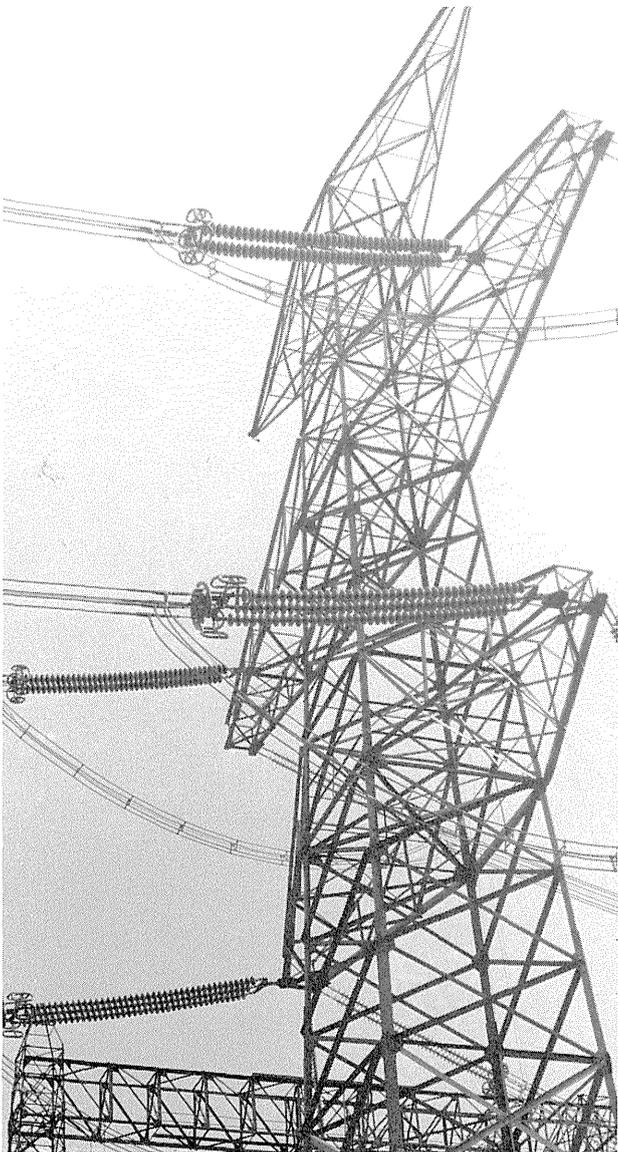
### I. 大規模系統の効率的な系統解析システム

電力系統は大規模かつ複雑であるため、電力系統の特性解析にあたっては、構成要素となる各種設備の特性や相互のつながりを表す極めてぼう大な量のデータを用意する必要がある。また、需要の増大などに対処してその構成、運用状態が変化するため、たえずこれらのデータを更新する必要もある。

当所が開発した系統解析システムは、このような大規模な解析データの更新やチェックを容易に行い、かつ、潮流計算、短絡容量計算、安定度計算などの系統解析計算を一貫して効率良く実行できるシステムである。

### II. 定態安定度解析のための高速固有値解析法

当所は、制御系の安定性解析などに一般に用いられている固有値計算法を改良し、高速化、高精度化した高速固有値解析法（S法）を開発し、電力系統の定態安定度解析の手法として、広く電力各社の活用に使っている。この手法は、電力系統故障後の定態安定度解析や安定化制御装置の定数最適化などへの適用のほか、オンライン系統安定化制御に使用し、たとえば常時の系統状態に対して安定度余裕を適正に維持する予防制御や定態安定度の制約を考慮した経済負荷配分制御（ELD）などを可能とする。



### Ⅲ. 発電プラントの新しいモデル

大規模かつ複雑な電力系統において重大な停電事故の発生を防止する対策などの検討には系統の構成要素の特性を正確に把握した系統解析が必要である。

とくに構成要素のうちでは最も複雑であり、かつ、系統の動的なふるまいに最も大きな影響を与える発電プラントの特性については、これをできる限り詳細にモデル化することが重要である。

このため当所は、火力発電について、従来考慮されていなかったボイラーの圧力変動特性や、詳細なプラント制御系の動作を考慮して解析する火力発電プラントモデルを開発した。また水力発電については、水圧鉄管内の水の挙動やポンプ水車の非線形特性を考慮した揚水発電プラントモデルを開発した。

### Ⅳ. 原子力プラントのシミュレーション

原子力発電のもつ経済性を活かし安定した電力供給を確保するためには、原子力を含む電力系統の運用において、系統故障に対する安定性をできる限り維持することが重要

である。

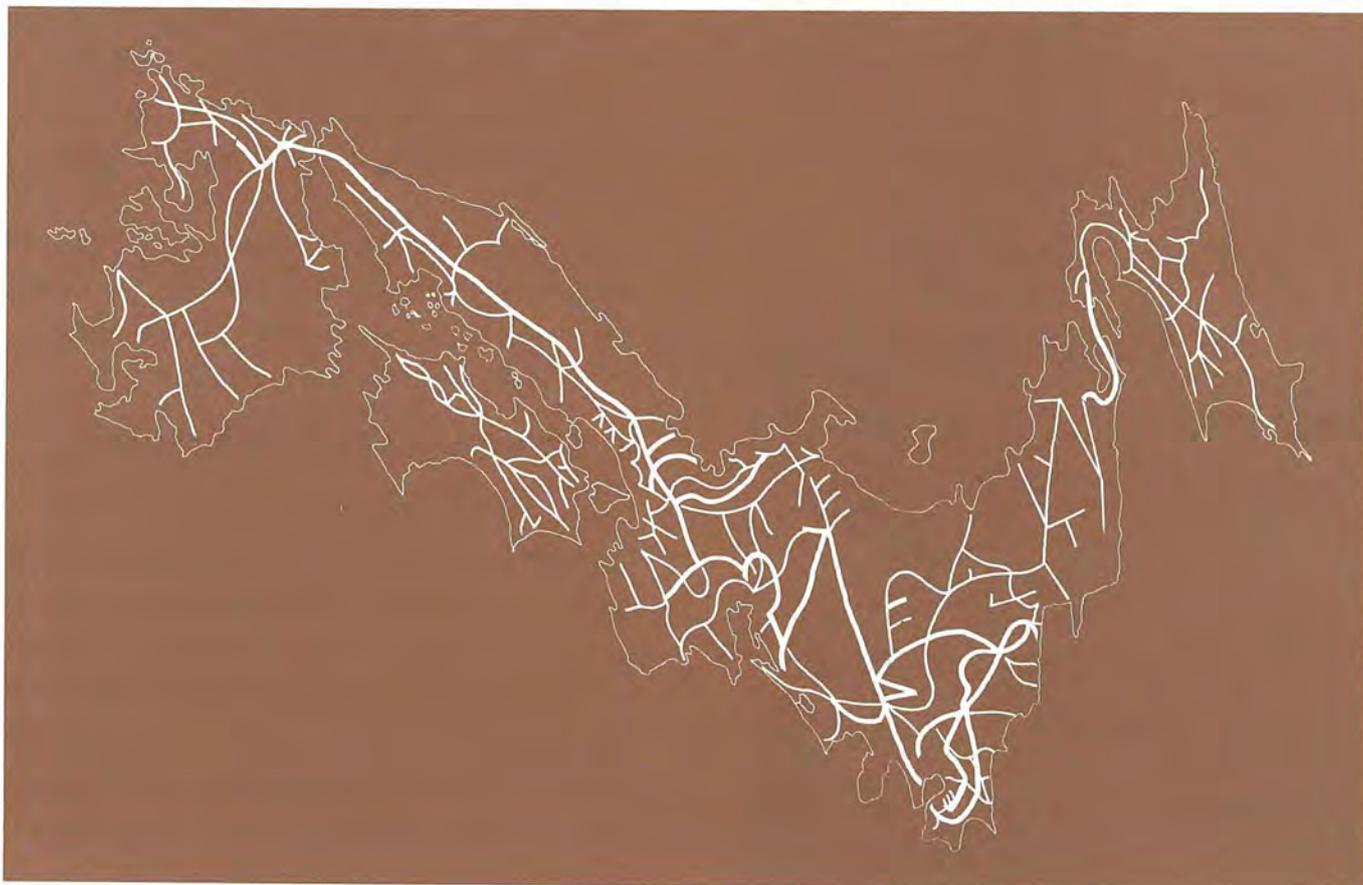
これに必要な系統の安定運用制御の対策検討には、原子力発電プラントの応動を考慮した電力系統の動特性解析手法が必要である。

当所が開発した原子力プラントの動特性シミュレーション手法は、原子炉を含むプラント全体の動特性を制御・保護系の動作を考慮して解析するものであり、従来の電力系統の動特性解析手法に組み込んで、原子力を含む電力系統の動特性を効率よく解析しうるものである。

### Ⅴ. 発電機・制御系、負荷モデル

電力系統の動特性を精度良く解析するうえで最も基本的かつ重要となるのは発電機モデルである。とくに励磁系の動作は電力系統の安定性維持に大きく影響するため、大擾乱から微小擾乱まで扱うことのできる励磁系モデルを各種の励磁系タイプについてとりまとめている。

一方、需要家の負荷特性を表す負荷モデルについても、高精度の電力系統動特性の解析に重要であるため、より詳細な負荷モデルの開発をすすめている。 ●



## 3-2 系統の解析技術とその応用

### 3-2-1 大規模系統の計画運用のための効率的な解析システム

電力系統の大規模化、複雑化に伴い、系統特性を的確に把握し、安定した電力供給方式を検討するには、高精度の解析手法とこれに適した正確なデータの収集が必要である。

とくに超高压基幹系統の連系により、電力各社間の電氣的距離は近くなり、実系統の現象解析を行うには連系した会社で統一のとれた正確なデータが必要となっている。

また電力系統解析プログラムの精度は、膨大な入力定数により大きく左右される。さらに収集したデータを用いて各種の系統解析作業を効率良く行うことが重要である。

このため、データ収集・管理システムと

系統解析プログラムとの結合をはかり、図3-2-1に構成を示す系統解析システムを開発し、電力各社へ導入し、将来の系統計画や運用の検討のために役立てている。

#### I. データ収集

系統解析に必要なデータとして、本システムで収集しているデータの種別ごとの内容の概略と、取扱い可能な規模を表3-2-1に示す。

各々のデータは、設備固有のものとして固定な設備データと、運用条件によって可変な運用データとに分類できる。

#### II. データ管理

系統解析システムで収集するデータの精度維持とファイル管理は、図3-2-1のデータ収集・管理部のプログラムで行っている。

#### 1. データ格納プログラム

多量の原データの読み込みおよび格納を効率的に行うプログラムである。このときに基本的な記入ミス、たとえばデータ記入位置の誤りや同一データの重複読み込みのチェックやデータ種別の不足を警告する機能をもっている。

#### 2. データチェックプログラム

データの物理的妥当性やデータ間の相互矛盾についてチェックするプログラムである。データの物理的妥当性は、発電機・制御定数や送電線インピーダンスなどについて、プログラム内に設定した上下限値の範囲内か否かをチェックしている。

データ間の相互矛盾のチェックは、たとえば発電機インピーダンスの大小関係や、送電線の両端の母線や負荷の接続母線が存在するか否かなどをチェックする機能である。

また、基準母線から分離している母線を検出し表示する系統分離チェック機能もある。

#### 3. 潮流チェックプログラム

ファイル内の系統データについて、潮流計算を通してチェックするプログラムである。

ここでは、ファイルの潮流条件データを用いて潮流計算を行い、得られた解について、母線電圧や発電機有効・無効電力出力の上下限制約値の逸脱、ブランチ潮流の過負荷、発電機接続母線間の電圧相差角の異常をチェックする機能をもっている。



図 3-2-1 系統解析システムの構成

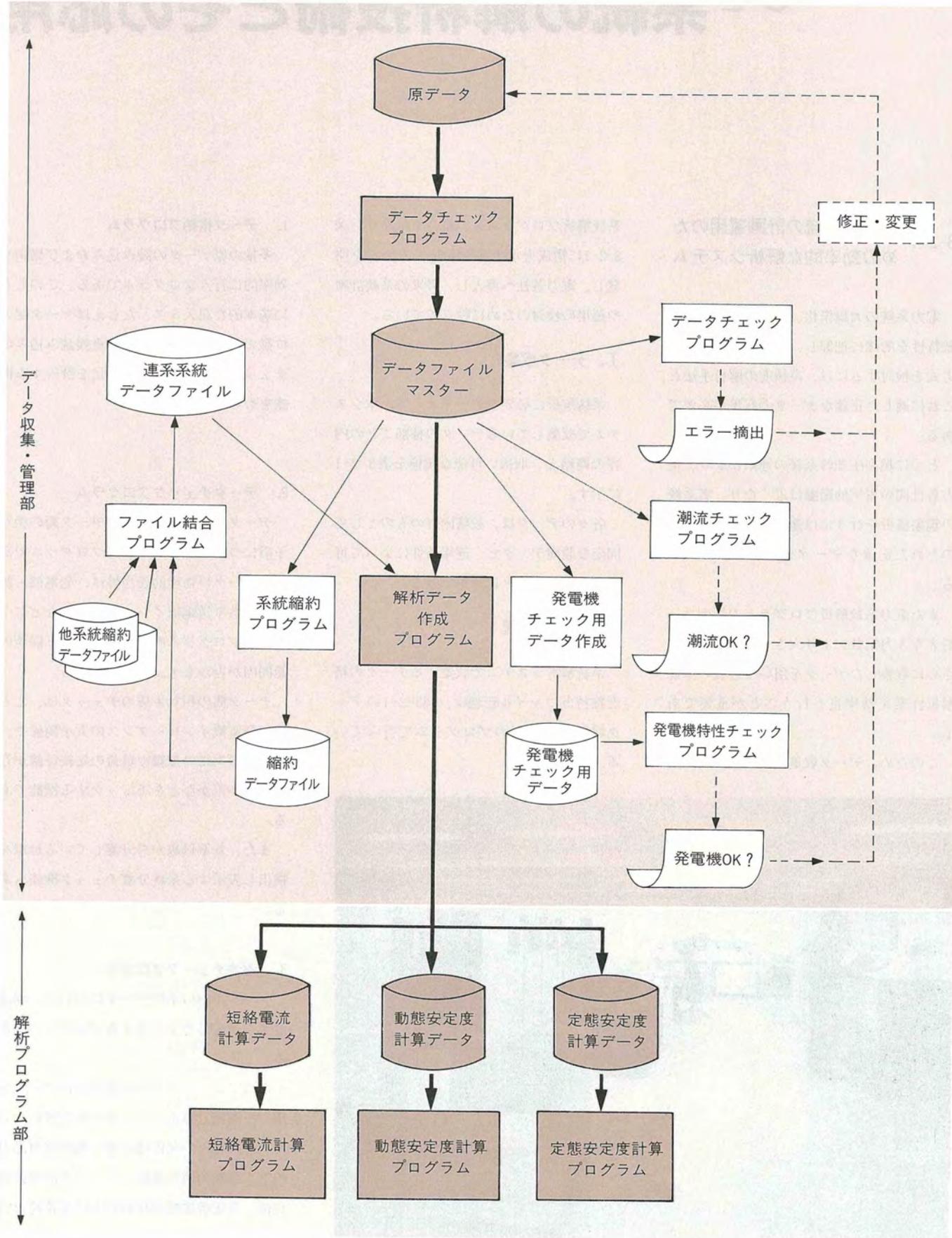


表 3-2-1 収集しているデータ

データ種別		内容	
システム格納可能最大数			
設備データ	発電機	同期機 500機 誘導機 200機 定格仕様、発電機種別 発電機制御系形式 発電機定数、空隙磁束飽和 運転限界、運用条件 誘導発電機データ	
	発電機制御系	各制御系 50種 500機分 AVR(自動電圧調節装置)形式および定数 PSS(系統安定化装置)形式および定数 ガバナー(調速機)形式および定数	
	送電線	600本 電圧階級と種類、亘長 正相・零相・回線相互インピーダンス 並列共架回線	
	変圧器	600台 1次・2次・3次定格容量 形式、タップ数と上下限 インピーダンス、中性点 飽和特性	
	直流設備	10地点 定格仕様、タップ数と上下限 直流線路、交流フィルター 分路リアクトル、コンデンサー 調相制御、直流制御 動作シーケンス	
	調相設備	200台 SC(静止型調相設備(コンデンサー))および ShR(静止型調相設備(リアクトル))容量 接続母線番号	
	負荷	500地点 有効電力および無効電力 指定電圧、接続母線番号	
	母線	1,200点 公称電圧、母線種別	
	運用データ		系統構成 潮流条件 (発電機運用データ) (負荷運用データ)

#### 4. 発電機特性チェックプログラム

系統解析データの中で、発電機や制御系(励磁系およびガバナ系)の定数は、安定度解析に大きな影響を与えるものであるが、これらのモデルが複雑化、詳細化しているために特性が不明確なまま使用されていることがある。

このため、このプログラムは、発電機、励磁系、ガバナ系の一般的な基本特性を簡易に解析し、特性チェックを行うプログラムである。

発電機は、無負荷3相突発短絡特性と負荷遮断特性を算出しチェックしている。励磁系は、発電機モデルと結合して、無負荷インディシャル応答と無負荷周波数応答を算出し、チェックしている。またガバナ系は、発電機モデルと結合して、定格出力時および2/4出力時の負荷遮断特性を算出し、チェックしている。

#### 5. 系統縮約プログラム

収集したデータによる大規模系統をそのまま計算することは、ぼう大な時間と費用と労力を必要とする。

このため、解析精度をできる限り低下せずに系統を簡略化するプログラムである。このプログラムは、縮約系統と非縮約系統が1地点のみで結合する放射状系統と、2地点で結合するループ系統のいずれも計算でき、かつ新しく縮約系統のデータファイルを作成する機能をもっている。

#### 6. ファイル結合プログラム

個別に作成したデータファイル(マスターあるいは縮約ファイル)を連系点で結合し、連系系統データファイル(結合ファイル)を作成するプログラムである。

## S行列法を改良しオンライン系統安定化制御に 使用できる見通しを得た。

### Ⅲ. 系統解析

#### 1. 解析データ作成プログラム

データ収集・管理部で作成したデータファイル（マスター、縮約あるいは結合ファイル）の形式は、系統解析プログラムの入力データ形式とは一致しない。

このため、データファイルのデータから解析プログラムに必要なデータを抽出し、入力データ形式に変換する必要がある。これを解析データ作成プログラムが行っており、データ収集・管理部と解析プログラム部とを結びつけている重要な部分である。

#### 2. 短絡電流計算プログラム

短絡電流計算データを対象に、各母線における3相地絡時の短絡容量（電流）を算出するプログラムである。これは、各種の運用系統に対し、適当な発電機インピーダンス（ $X'd$ 、 $X'd'$ 、 $X''d$ のいずれか）を選択し、各母線の接続線路ごとの流入電流と故障電流を計算することができる。

#### 3. 動態安定度計算プログラム

動態安定度計算データを対象に、電力系統に発生する多様な故障を想定し、このときの発電機や負荷の動揺を模擬することにより動態安定度を算出するプログラムである。

このプログラムは系統計画・運用の検討に広く利用されており、各地域で行われた系統試験の結果と比較して解析精度を検証している。このプログラムは、多重故障を含めた不平衡系統解析、制動巻線数の異なる4種類の発電機モデル、発電機制御系の多種類のモデルの標準化（AVR：10種類、PSS：3種類、ガバナ：13種類）、負荷モデルの関数表現と誘導機表現、系統安定化装置の標準化（直列コンデンサ、静止型中

間調相設備、制動抵抗）、直流送電設備解析など多くの解析機能をもっている。

#### 4. 定態安定度計算プログラム

3-2-2で詳細に記す。

### Ⅳ. システムの運用・操作

系統解析システムは、データ収集・管理用の7個のプログラムと系統解析用の3個のプログラムとが密接に関連して構成されている。また、収集データは、系統構成や潮流断面ごとに100個程度のファイルに格納されている。

このシステムの運用・操作は、できるだけ簡易な方法をとっており、計算機端末装置（CRT）上のメニュー画面で、プログラムやデータを選択・指示することにより、各種の計算が可能である。これによりデータの修正・変更や新規作成が簡便になり、系統解析データを作成する際の労力を大幅に軽減できる。

本システムは、統一された精度のデータを任意に選択・結合して解析できることから、電力系統の計画・運用を検討する際に多に活用されている。



### Ⅴ. システムの適用

系統解析システムに収集したデータと解析プログラムにより、大容量発電機の負荷しや断時の系統動揺現象を計算した結果の一例を図3-2-2に示す。

いずれの結果も実測値とほぼ一致したことから、データとプログラムの精度が確かめられた。

#### 3-2-2 オンライン系統安定化制御 のための高速固有値解析法

電力系統の安定化を図るには次の3つの対策を考慮しておく必要がある。

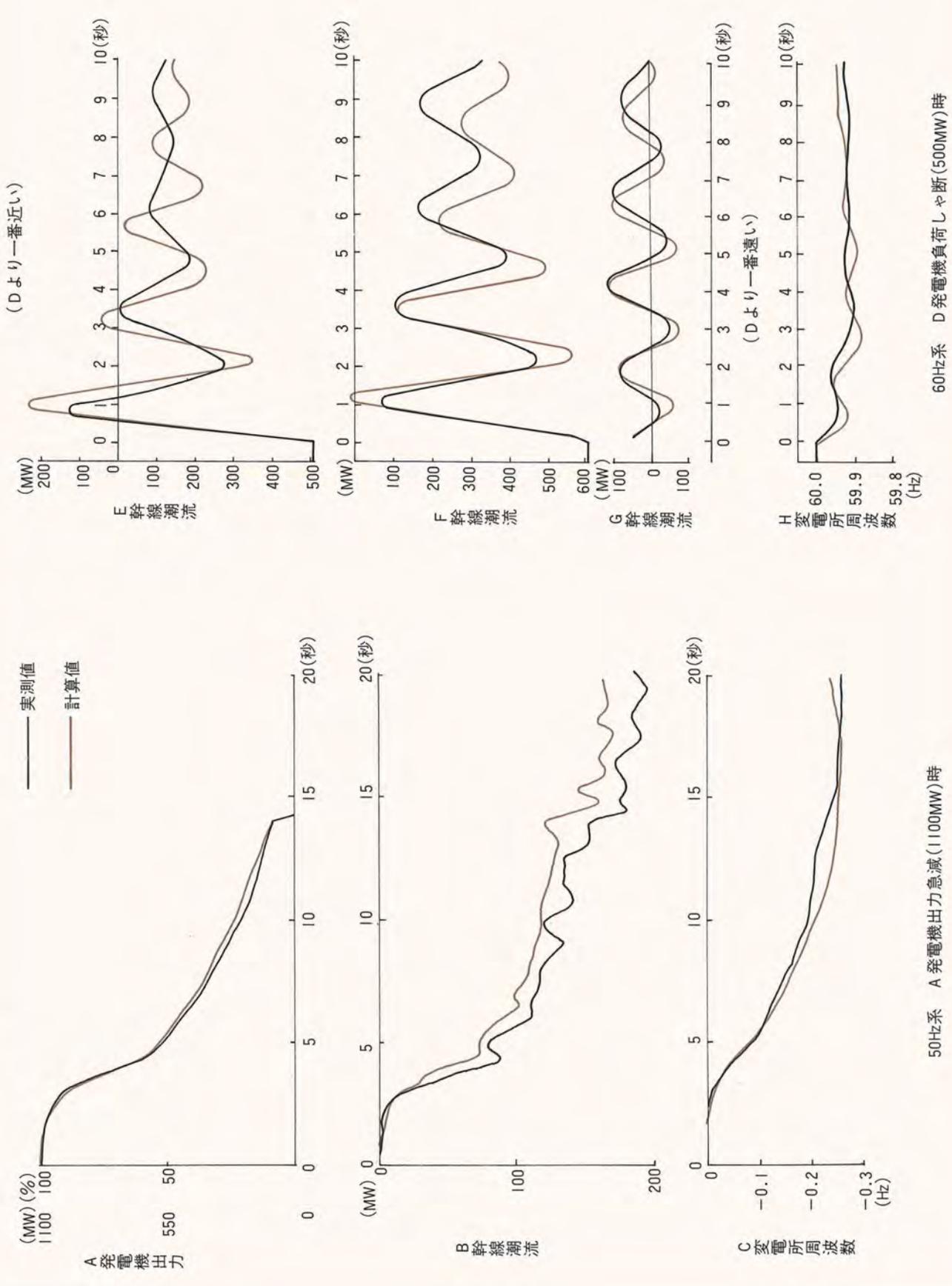
1. PSS（系統安定化のための補助励磁装置）などの安定化装置
2. 常時運用における安定度監視と予防制御
3. 事故時における事故波及防止対策

いずれも、現状においてはオフラインによって安定度解析を行い対策が実施されている。

しかしながら、時々刻々変化していく系統の状態に対応して必要十分な信頼度水準を維持し、さらにその制約内で最も経済的となるよう系統の運用を維持するには、高速高精度なオンライン安定度解析による系統安定化制御の実現が強く望まれている。

当所では、これまで開発実用化し、広く電力会社で活用されてきた、固有値解析手法のひとつS行列法（S法）をさらに改良しほぼオンライン安定化制御に使用しうるとの見通しを得た。この手法が適用できるのは主として上記の1.と2.の定態安定度対策である。1.の面では安定化制御装置のパラメータを系統運用状態に適応してオンラインで最適調整することが可能となる。2.

図3-2-2 システムによる系統解析例



の面では、数分から数十分先の系統状態における定態安定度の予測計算に基づき予防制御を行い、さらに系統の安定運転を保つ制約内で最も経済的な発電機出力配分（ELD）をオンラインで計算することが可能となる。

本節においては、これらオンライン安定化制御の中核論理となるS法およびその応用による故障除去後の定態安定度判別手法と安定化対策の最適化手法について概要を述べる。

.....  
 (※)

電力系統に外乱（事故や負荷の急変）が加わると発電機の回転速度や送電線の電力に振動が生じるが通常はこの振動は減衰し元の平衡状態に復帰する（過渡安定度も定態安定度も安定）。もし、外乱が大きすぎると過渡的な不安定となるが、これとは別に、送電電力が大きすぎるなど、一定の運用限界を越えるとどんなに小さな外乱に対してもこれによって生じる振動が減衰せず元の平衡状態に戻れなくなってしまう（定態安定度の不安定）。これは、外乱とは関係なく系統に内在する固有の共振振動成分が減衰性のものから発散性のものへと変化したことによる不安定現象である。数学的には微小変動に対する系統の動特性を線形微分方程式

$$\dot{x} = A x \quad (1)$$

で表したときの右辺の行列Aの固有値（複素数）が系統に内在する共振の（複素）振動数を表わし、その実数部分が正のとき発散性、負のとき減衰性であることに対応する。

## I. S法の高速・高精度化

S法は、行列の変換によって行列の固有値のうち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、効率的な固有値解析を行う計算手法であり、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為に開発した手法である。すなわち線形微分方程式

$$\dot{x} = A x \quad (1)$$

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、次式

$$S = (A + h I)(A - h I)^{-1} \quad (2)$$

（ただし、hは正の実数）

による行列の変換を行い、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。

行列Aの固有値λとこれに対応する行列Sの固有値λsは次式の関係にある。

$$\lambda s = (\lambda + h) / (\lambda - h) \quad (3)$$

したがって、(1)式の安定性は、行列Sの絶対値最大の固有値λsmax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、演算に有利な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。

とくに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るため高速演算に適している。しかしながら、まるめ誤差に弱く、数値計算上の安定性に欠けるため、実用化が困難であった。そこで、次のような改良を行い高速化・高精度化を図ることにより、オンライン安定化制御への利用が可能となってきている。

(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) 行列演算そのもの的高速化を図った。
- (3) 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。

以上のような改良により、計算時間は後に示す77機系統で約18秒（当所FACOM・M-200による）となっている。

## II. 故障除去後の定態安定度判別手法

送電線の開放や電源の脱落などの外乱発生により電力系統が不安定となる場合は、大別して、

1. 故障によるショックが大きすぎて短時間で安定領域から飛び出してしまう場合
  2. 故障除去後長時間たっても動揺が収斂せず、最終的に脱調に至る場合
- がある。いずれの現象も現在シミュレーションで解析されているが、後者はかなり長時間の解析を要している。しかしながら、この現象は擾乱発生後の定態安定度の問題と考えられるので、安定な場合に収斂するであろう運転状態を想定しておき、その運転状態に対して定態安定度解析を行うことにより、簡便かつ高精度の安定判別が可能である。

新しい論理の構成は図3-2-3に示すように、大きく分けて2つのステップから成っている。

### ステップ1 故障除去後の潮流計算

- (1) 電力系統の静特性表現  
 発電機特性、ガバナー、AVRおよび負荷の電圧・周波数特性を代数式表現し、送電回路網と直接結合する。
- (2) 故障除去条件の指定  
 故障除去によって解放される線路やトリ

ップする発電機を指定する。再閉路成功の場合は本手法の適用は不要となる。

(3) 新しい平衡点の算定

有効電力の mismatch は各発電機ガバナーが、また無効電力の mismatch は電圧変動を介して各発電機 AVR が吸収する。また、収斂計算過程で電力方程式は用いない。送電回路網はできるだけアドミタンス表示のまま残すこととする。このため、基本方程式の線形近似として得られる mismatch 修正用ヤコビアン行列の線形有効範囲が大きく拡大される。このことは、発電機特性、負荷特性を結合したことから相俟って解の収斂性を著しく改善する。

ステップ2 故障除去後の定態安定度解析

(1) 動特性の再附加

発電機の慣性、磁束の時定数、ガバナー、AVRの遅れなどの動的要素を微分方程式として附加する。

(2) 新しい平衡点廻りでの線形表示

動的なシステムモデル（シミュレーションに用いるものと同じもの）をステップ1で算定した新しい平衡点の廻りで線形表示する。この際、送電網のスパス性が最大限に保持されるよう留意して所要記憶容量の増加を抑える。

(3) 固有値解析（S法）

線形表示された特性方程式をS行列変換し、改良ランチョス法で必要個数の固有値、固有ベクトルを算定する。

Ⅲ. 安定化制御の最適化手法

システムが不安定あるいは不安定に近い状態となることが予想されるとき、いかなる対策をとるべきかという問題に迅速に解答を出すための一つの有力な手法として固有値感度解析法がある。

いま、システムの操作しうるパラメータ（発

図3-2-3 予防制御方式の概念と新しい論理の位値付け

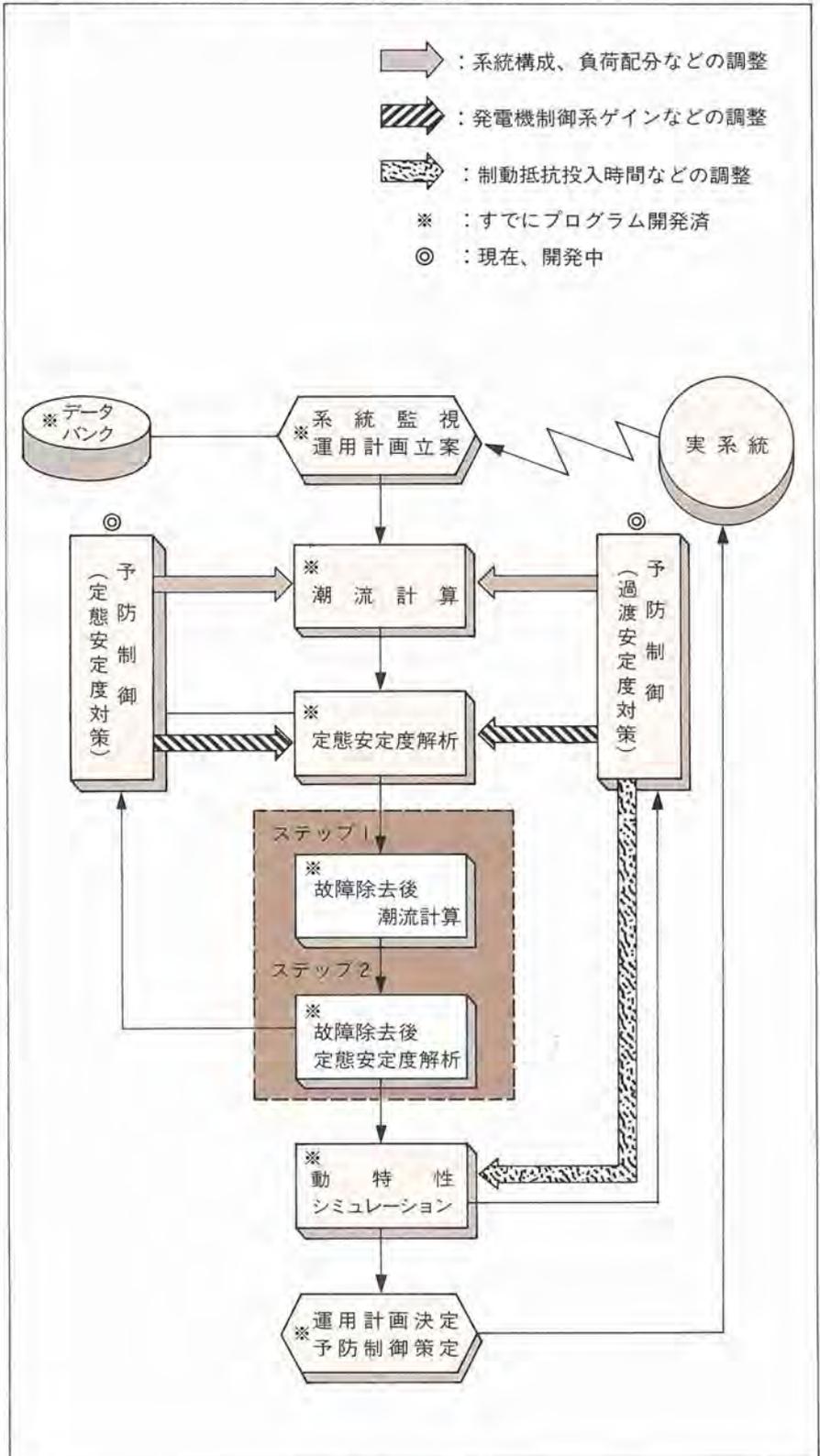
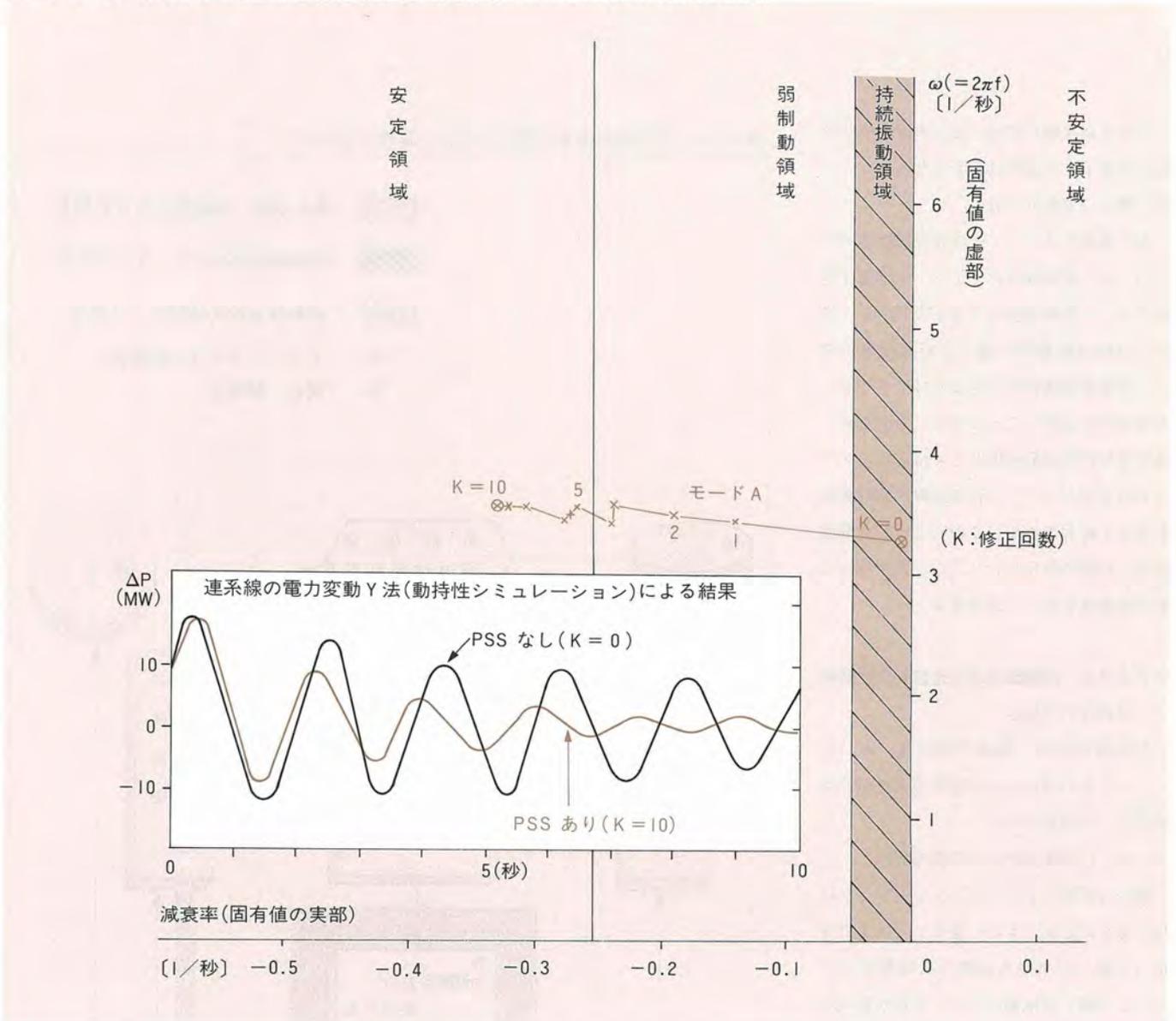


図 3-2-4 PSS(系統安定化補助励磁制御装置)定数最適化による固有値の変化(77機系)



電機出力、調相設備、制御系の定数などを  $\alpha$  とすると右左固有ベクトル  $P$ 、 $q$  により  $\alpha$  を少しだけ ( $\Delta\alpha$ ) 変化させたときの固有値  $\lambda$  の変化  $\Delta\lambda$  は次式によって求めることができる。

$$\Delta\lambda \frac{q^T \Delta A P}{q^T P} = \frac{q^T (\sigma A / \sigma \alpha) P}{q^T P} \Delta\alpha$$

この計算に要する時間は固有値解析に要する時間と比較して無視できる程短かく、オンライン安定化制御などに最も適した手法であるといえる。

この手法を多機電力系統の PSS のパラメータの最適設計に適用した。図3-2-4は

77機系の解析例であるが、あらかじめ、各発電機の軸系ダンピングを変化させたときの固有値の変化率、と人為的に発電機すべりを直接 AVR の PSS 入力端子に入力したときの固有値の変化率を計算し、これによって PSS 設置による安定度向上効果を簡便に予測している。

この例では、3個の電力動揺モードに対し発電機 G1 と G5 は固有値の変化率が共に大きく、このユニットに PSS を設置すれば全系の安定度向上効果が大きいと予測できる。

そこで例題系統の G1 と G5 に PSS を

設置し、これら PSS のゲイン  $G$  と進み遅れ回路の時定数を同時に最適化している。

原系統で、持続振動領域あるいは、弱制動領域にあった2個の固有値が、最適設計の PSS によって、十分安定な領域に移動したことがわかる。この効果を確認するため、電力系統動特性解析プログラム (Y法) によるシミュレーション結果を図の枠内に示した。

なお、最適化に要した計算時間は繰り返し回数約10回 (実用上は2~3回でも十分である) で約3分 (FACOM M-200) であった。

# 3-3 原子力・火力発電プラント 負荷設備等の高精度 シミュレーション技術

## 3-3-1 系統の重大事故対策に用い る発電プラントの新しいモ デル

### I. 新しいモデル開発の必要性

高度に技術文明が発達した我が国では、これからも電力への依存はますます増大していくことを考えると、電力系統の事故によって大規模、長時間の停電は絶対に起こしてはならない。

電力系統の事故は雷などの自然現象に由来するものが多いため、事故をすべて無くすることは不可能である。しかし、これによる需要家への影響をできるだけ少なくし、事故の拡大による大規模な停電をさけることが重要である。

このような事故の拡大を防止するためには、個々の系統構成要素、その中でも特に発電プラントの特性を十分に考慮してその対策を決定する必要がある。

発電プラントの中では、系統事故時の原子力機の安定運転性能が非常に重要となるが、火力機、揚水機についてもこれらが周波数調整機能を持ち、またその出力応答性が速いため、これらの動作特性も重要なものとなる。

特に、近年の欧米での重大事故では、安定度崩壊や送電線過負荷による電源脱落や系統分離によって、電源と負荷のアンバランス量が大きくなり、その結果、大幅な系統周波数変動を引き起こし、電源が次々と脱落して事故が拡大していったことを考えると、火力機や揚水機の動特性把握の重要

性が明らかである。

最近の大容量火力プラントでは、応答性や経済性の追及に伴って、制御方式にも種々の方式が採用されているため、従来から使用されているモデルでは十分に表現できなくなっている。

また、揚水機についても、高揚程、高落差のものが建設され、その水圧鉄管内の水の挙動やポンプ水車の非線形特性も考慮する必要がでてきている。

### II. 新しい火力プラントモデル

#### 1. ガバナーモデル

電力系統からの事故等による擾乱（電圧、電流、周波数等）に対し、その大きさにかかわらず応動するのは発電機や励磁系の電氣的機器であるが、最近の大容量機では蒸気の制御を行うガバナーであっても、擾乱の大きさによってはほとんど瞬時に応動する。

これは、主として負荷遮断時等の過速度防止のために備わっているガバナーの緊急時制御機構が動作するためである。この緊急時制御機構は、その制御を迅速に行うため、発電機電流や発電機電気出力あるいは回転数変動の変化率等を入力情報として、インターセプト弁（ICV, Intercept Valve）や加減弁（CV, Control Valve）を急速に閉鎖する機構である。

従来のガバナーモデルは、加減弁とタービンの動作を簡易に表現しているのみであり、これら緊急時制御機構動作はまったく無視されている。このため、電力系統からの軽微な擾乱に対しては、従来のガバナー

モデルでも充分であるが、発電所近傍での事故あるいは急激な周波数変動を伴う事故の場合には、緊急時制御機構の動作もモデル化したガバナーモデルを用いる必要がある。

また、この緊急時制御機構を電力系統の安定化に積極的に活用することも考えられており、EVA (Early Valve Actuation) とよばれる。これは、電力系統事故を早期に検出して緊急時動作機構を動作させ、プラント出力を急速にしばらくで電力系統の安定度を向上させようとするものである。

この検討を行う場合にも、詳細なガバナーのモデル化と後述するプラントへの影響を考慮する必要がある。さらに、通常用いられる安定化装置（たとえば、発電機PSS）等との協調をはかるためにも電力系統と一体になった検討が重要となる。

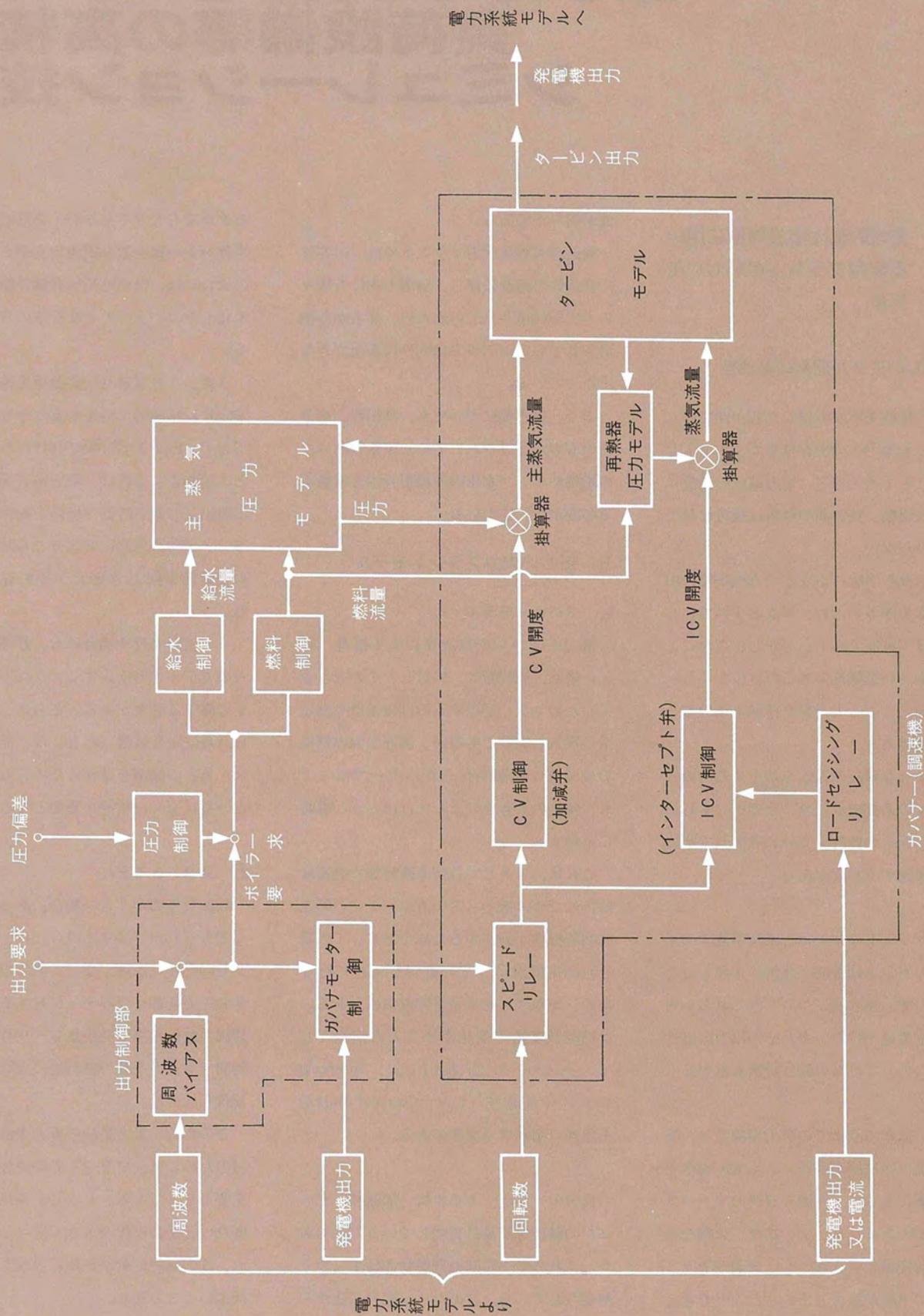
#### 2. プラントモデル

周波数変動が大きい場合、あるいは小さくてもそれが持続する場合には、火力プラントの応答性が速くなっているため、その蒸気圧力変動やガバナーに対するプラント制御系動作が擾乱発生後5～10秒程度の短時間でも電力系統の動特性に大きな影響を及ぼし始める。

このため、電力系統の重大事故対策の検討のためには、プラントの動特性の考慮が重要となってくる。しかし、擾乱後1分程度たつと手動操作が大きく関与してくるため、この間の応動が正確に表現されていればよいこととなる。

このように、電力系統からの種々の擾乱

図 3-3-1 火カプラントモデル概要



に対して1分間程度までのプラント動特性を表現するために必要となるモデルの範囲は、図3-3-1に示されるように、プラントとしては、蒸気圧力、蒸気流量、タービン出力モデル、プラント制御系としては、ガバナー出力、蒸気圧力、給水流量、燃料流量制御系までとなり、応答の遅い蒸気温度とその制御系は除外される。

しかし、さらに長時間の解析、たとえばプラントの起動停止、負荷追従運転などの検討を行うためには、温度に関する項目についてもモデル化する必要があるが、これは電力系統と結合した解析を行わないでも検討可能であり、また解析モデルそのものも膨大となるため、現状では、そこまでも考慮したモデルは電力系統の重大事故対策検討としては使用されない。

一方、火力プラントの制御系には、その応答性を改善するため種々の改良が施されまたいろいろな形式があるが、周波数変動に対する応答特性の差異で大別すると、主として大容量機に採用されているA P C、D E B方式と、中・小容量機のボイラー追従方式（ドラムボイラータイプ）がある。

周波数低下に対する各タイプの代表的な応答例を図3-3-2に示す。

### Ⅲ. 揚水プラントモデル

大容量の揚水発電所が建設されるにつれ、特に深夜軽負荷時の揚水発電所の動特性は、電力系統の安定性にとって重要なものとなっている。また、高揚程、高落差となるにつれ水圧鉄管長が長くなり、水撃作用による水圧脈動周期も延びて、通常の系統動揺周期である1秒程度を超えることが多くなった。

水圧脈動周期が系統動揺周期より大きい

場合には、従来の剛体理論による水路系モデルでは電力系統の振動に対する制動力を正確に表現することは不可能となるため、水の圧縮性と管路の弾性を考慮した弾性理論による取り扱いが必要となる。

また、ポンプ水車モデルに対しても、従来は完全なポンプ水車を仮定して線形で取り扱われていたが、実機のポンプ水車の非線形性は大きく、この非線形特性が上記の電力系統の制動や、周波数変動時の出力（入力）特性に大きく影響する。このため、系統の重大事故時、あるいは事故の拡大を防止するための対策を検討する場合には、水路系の弾性理論による取り扱いやポンプ水車の非線形特性を考慮した検討が必要である。

## 原子力の高信頼度運転を確保する原子力プラントのシミュレーション

### Ⅰ. 原子力プラントのシミュレーションの必要性

わが国の原子力発電は、脱石油化などを目的として積極的に開発がすすめられており、すでに設備容量比で約16%（60年9月末）、発電電力量比で約24%（59年度）を占めるに至っている。このように原子力はわが国の主要な電源であり、いろいろな観点から、その高信頼度運転のための努力が続けられている。

そのひとつに、送電線への落雷などによる電力系統故障に対する原子力を含む電力系統の安定運用の維持がある。

電力系統故障時に、いかに電力系統の安定運用を確保するかについての諸対策を検討するには、実際の電力系統の挙動を模擬する計算プログラムが重要な手段となる。

近年、原子力の比重が高まるとともに、このような電力系統の挙動解析に原子炉も含めた発電所全体の応動を正確に考慮することが不可欠となってきた。

これには、従来から活用されている電力系統動特性解析プログラムに原子力発電所の原子炉、タービンなどの応動を解析するプログラムを結合した総合的な解析プログラムが必要となる。

実際に電力系統故障時の電力系統の安定運用の検討にあたっては、種々の運用条件、故障条件を想定した多ケースの解析を行う必要があり、解析プログラムの解析効率が重要である。

したがって、電力系統解析プログラムに結合する原子力プラント解析プログラムは、全体としての解析効率を大きく低下させないものでなければならない。

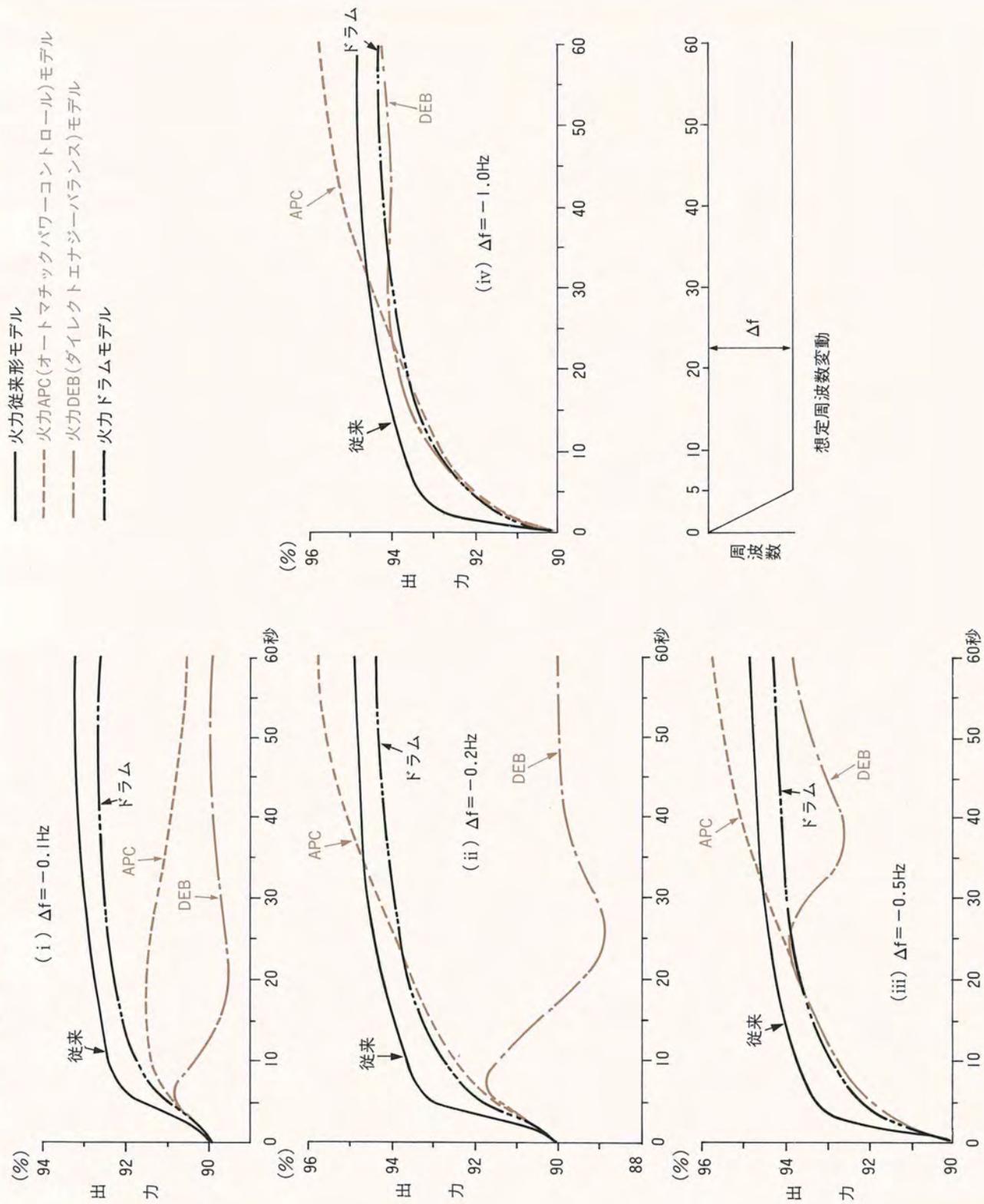
### Ⅱ. 開発した原子力プラント応動解析プログラムの特徴

当所では、わが国で数多く運転あるいは建設されている沸騰水型軽水炉（BWR）発電所および加圧水型軽水炉（PWR）発電所を対象として、図3-3-3に示すように、従来の電力系統解析プログラムに結合して原子力電源の応動を考慮した、プラント応動解析プログラムの開発をすすめてきた。

本プログラムはつぎのような特徴を有している。

1. BWR、PWRのいずれのプラントも、タービン制御方式（MHC：機械油圧式、EHC：電気油圧式）、タービン・バイパス弁容量によりいくつかの種類があるが、すべてを解析対象としている。
2. 電力系統からの外乱に対するプラント応動に影響を与える機器および制御・保護系の動特性に注目してプラントをモデ

図3-3-2 各種プラントの周波数低下時出力変動



ル化している。

電力系統の故障によって生ずる周波数変動が大幅な場合、原子力プラントではタービンに流入する蒸気流量を調整する加減弁、インタセプト弁、余剰な蒸気を復水器に放出するバイパス弁が急速に開

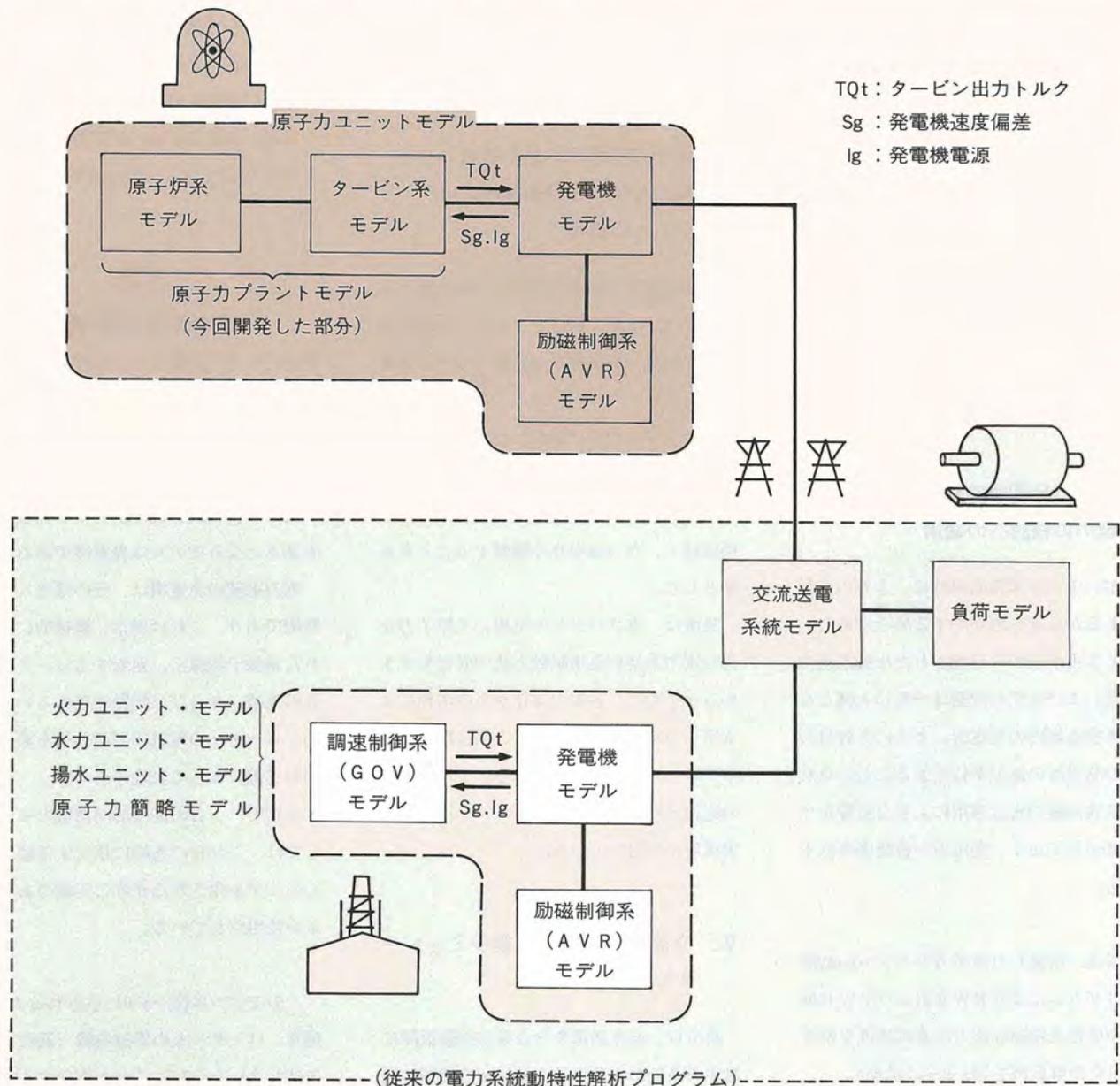
閉する。また、原子炉の冷却材を循環させる電動ポンプの回転数変動も生ずる。

このような場合のプラント各部の温度、流量、圧力、中性子束の変動を精度良く解析するには、上に述べた各種の蒸気制御弁の非線形動作、冷却材の循環流

量の変動などを正確に模擬する必要がある。本プログラムでは、これらの点に留意して開発したモデルを用いている。

3. 電力系統故障時の原子力プラントの応動を解析するうえで、重要となる時間領域は故障発生後から概ね30秒間である。

図 3-3-3 原子力プラントの応動を考慮した電力系統動特性解析プログラムの構成



## 原子力プラント応動解析プログラムと 電力系統動特性解析プログラムを結合することにより 原子力電源を考慮した効率の良い系統の解析が可能となった。

このため、応動時定数が長く、この時間領域ではプラント応動に影響を与えない復水・給水加熱系などの補機系統はモデル化しない。また、電力系統故障に対しては動作しない非常用炉心冷却系（ECCS）などの非常用設備も除外した。

- プログラムの解析精度は、実機の試運転における過渡応答記録およびすでに実用性が検証されている詳細なプラント動特性解析プログラムの解析結果との対比により検証した。
- 電力系統解析プログラムと結合して数多くの原子力電源を含む大規模電力系統の動特性を効率良く解析するのに適した規模のプログラムである。

たとえば、6機の原子力ユニットを含む約100機の系統を対象とした解析の場合、電力系統解析プログラムに本原子力プラント応動解析プログラムを結合したことによる計算時間の増加は15%程度である。

### Ⅲ. 原子力発電所の単独系統運転能力の検討への適用

落雷による送電線故障時に、きわめて稀ではあるが系統分断が生ずる場合がある。このとき主系統から分離された単独系統の周波数および電圧の変動は一般に大幅となる。単独系統内の発電所、とくに大容量の原子力発電所の運転が停止することとなれば、単独系統の安定運用に大きな影響を与えるばかりでなく、発電所の稼働率を低下させる。

当所は、開発した原子力プラント応動解析プログラムによりBWRおよびPWR原子力の単独系統運転能力の基本特性を解析した（応動解析例を図3-3-4に示す）。

その結果、原子力発電所の単独系運転能

力はプラントの種別によって異なるが、所内単独運転が可能なプラントについて言えば、単独系統移行後の発電機の出力が中間負荷領域に減少する場合にはプラントの安定運転の継続が困難となる可能性のあることが明らかとなった。

さらに当所では、単独系運転能力の向上に電力系統および原子力発電所で必要となる対策についても検討している。これらの成果は、各電力会社の系統運用の検討の参考に供されている。

### Ⅳ. 原子力電源の応動を考慮した電力系統の動特性解析プログラムへの適用

従来の電力系統動特性解析プログラムにおいては、電源の特性をタービンおよび発電機の電気・機械的な動特性までしか考慮していない。

このプログラムに開発した原子力プラント応動解析プログラムを結合することにより、原子力電源を含む電力系統の動特性を精度良く、かつ効率良く解析することを可能とした。

当所は、本プログラムを用いて原子力を含む電力系統の運用制御方式の研究をすすめるとともに、各電力会社からの依頼による原子力電源を考慮した電力系統解析にこのプログラムを活用している。また、一部の電力会社では、本プログラムを導入し、実運用に使用している。

### Ⅴ. 交流・直流電力系統シミュレータへの適用

当所は、直流送電を含む電力系統故障に対する系統および原子力発電所の制御・保護方式の開発のため交流・直流電力系統シ

ミュレータを設置した。

本シミュレータの模擬原子力発電ユニットは、ハードウェア模擬のタービン発電機部とソフトウェア模擬のプラント部から成るが、原子力プラント応動解析プログラムはプラント部に組み込まれ、プラント動特性のオンライン・リアルタイム・シミュレーションを実現している。

この系統シミュレータは、現在、原子力発電所からの直流単独送電の研究、たとえば、直流送電系統故障時の原子力を含む直流系統の挙動解析、原子力プラントの応動を考慮した直流系統の制御方式の開発などに活用されている（試験例を図3-3-5に示す）。

### 電力系統特性解析の高度化 3-3-3 に必要な発電機・制御系・ 負荷モデル

#### I. 発電機モデル

電力系統の動特性を解析する場合に、最も基本となるモデルは発電機である。

電力系統の発電機は、そのほとんどが同期機であり、これは通常、機械的に固定された電機子巻線と、回転するローター上の界磁巻線、ならびに制動巻線あるいは等価的にローターの電氣的制動効果を表す等価制動巻線によって表現される。

現在では、この従来形同期機のモデルとしては、これらの巻線に鎖交する磁束を中心にモデル化された充分に実績のあるモデルが使用されている。

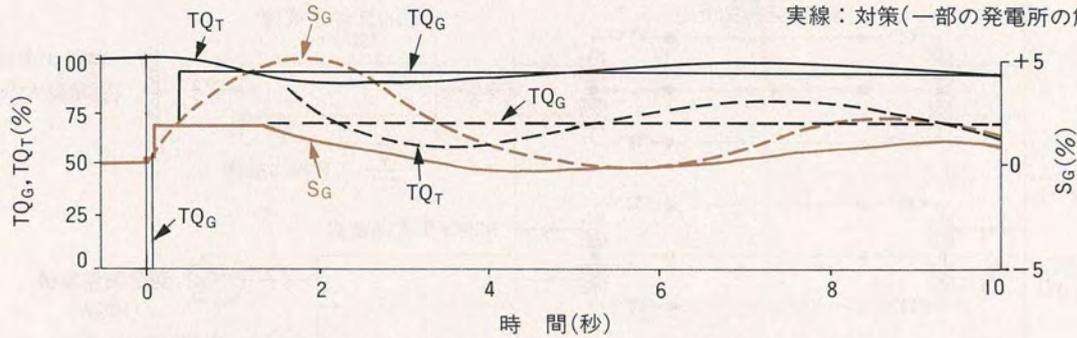
このモデルは図3-3-6に示されるように、通常、ローター上の界磁巻線（通常D軸とよばれる）ならびにこれと直交する軸（Q軸）がローターに固定されている座標系で

図3-3-4 単独系統運転時の原子カプラントの応動解析例

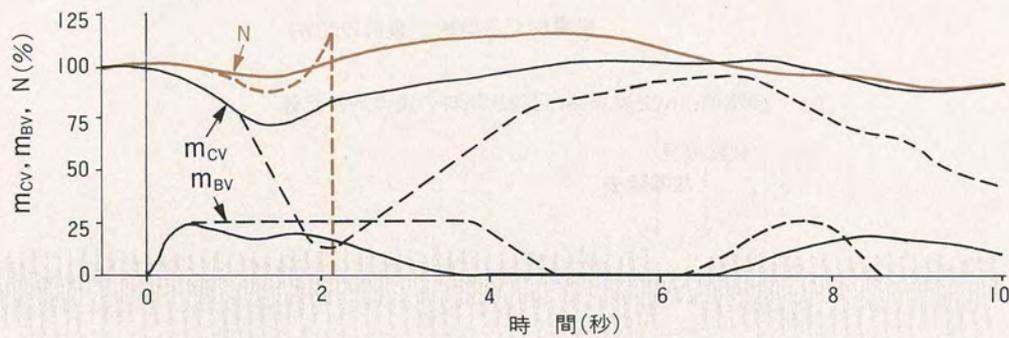
(1) BWRプラント (部分容量バイパス弁)

破線：対策なし

実線：対策(一部の発電所の解例)あり

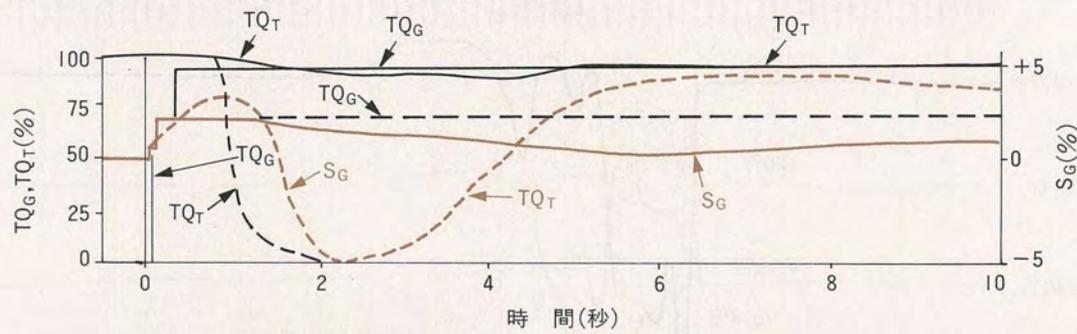


(1-a) 発電機出力 $TG$ 、タービン出力 $TT$ 、発電機速度偏差 $SG$

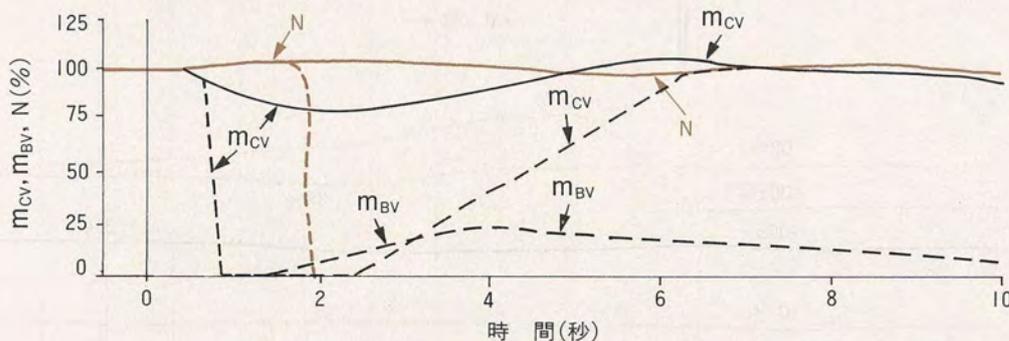


(1-b) 加減弁蒸気流量 $m_{CV}$ 、バイパス弁蒸気流量 $m_{BV}$ 、原子炉中性子束 $N$

(2) PWRプラント



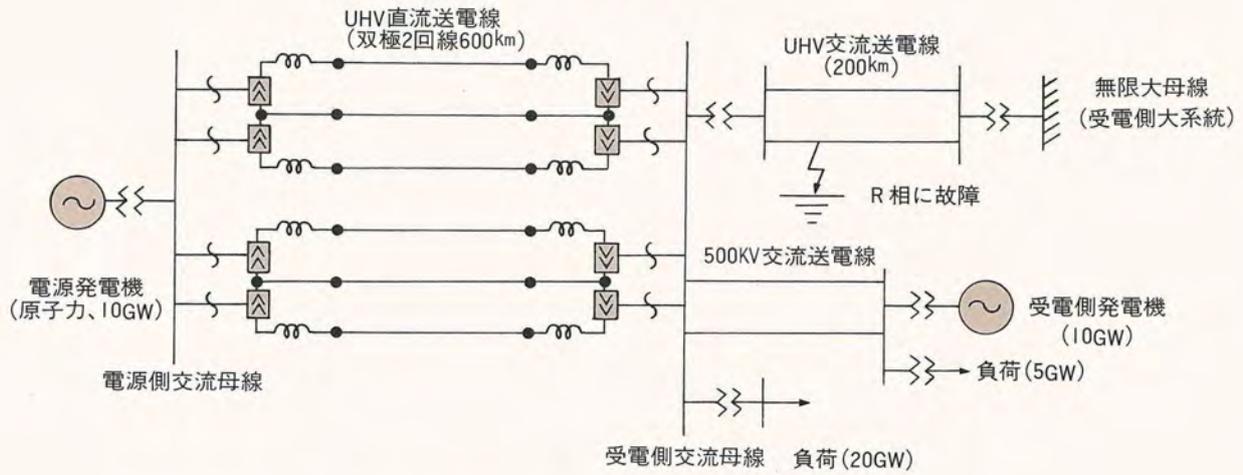
(2-a) 発電機出力 $TG$ 、タービン出力 $TT$ 、発電機速度偏差 $SG$



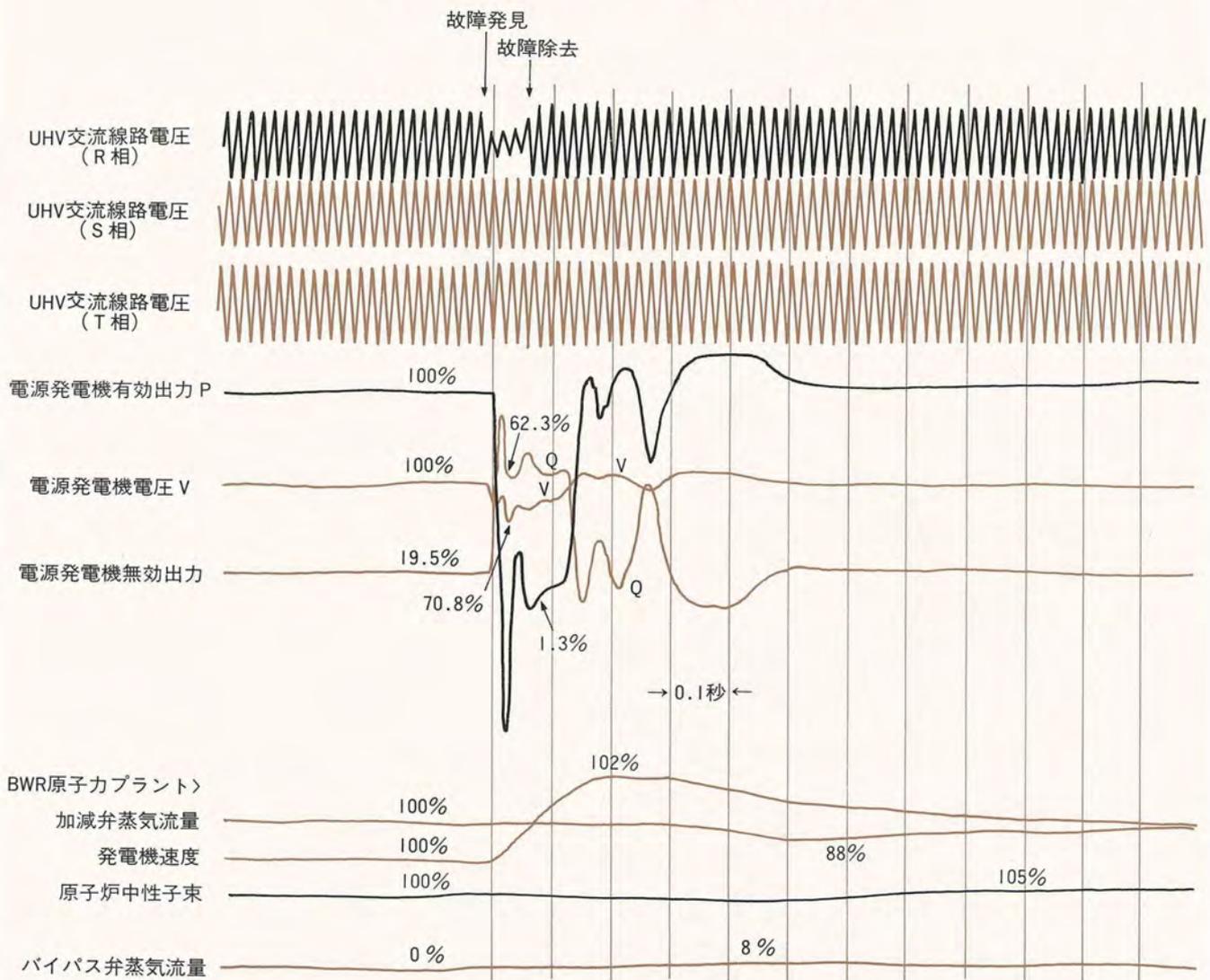
(2-b) 加減弁蒸気流量 $m_{CV}$ 、バイパス弁蒸気流量 $m_{BV}$ 、原子炉中性子束 $N$

図3-3-5 交流・直流電力系統シミュレータを用いた試験例

(a) 試験系統



(b) 受電側UHV交流線路1回線故障時の過渡応答記録



表され、その一般的な等価モデルは図3-3-7のように表される。このモデルでは、発電機そのものの構造、解析対象発電機の重要性等によって、同図の制動巻線回路は複数になったり、無視されたモデルが使用されることがある。

なお、電機子回路の表現は、通常の電力系統の動特性解析では、系統の線路や変圧

器と同様インピーダンス表現がとられるが、解析の目的によっては電機子も微分方程式で表される場合もある。

## II. 発電機制御系

発電機の制御系として電力系統動特性解析に重要となるのは、電気的な制御系とし

ては励磁系があり、機械的には调速制御系がある。

励磁系は、同期発電機が同期を保って運転するためには必要不可欠なものであるが、現在ではその応答性の高さを利用して発電機そのものの安定化も行えるようになっている (PSS、Power System Stabilizer)。

図 3-3-6 同期発電機概念図

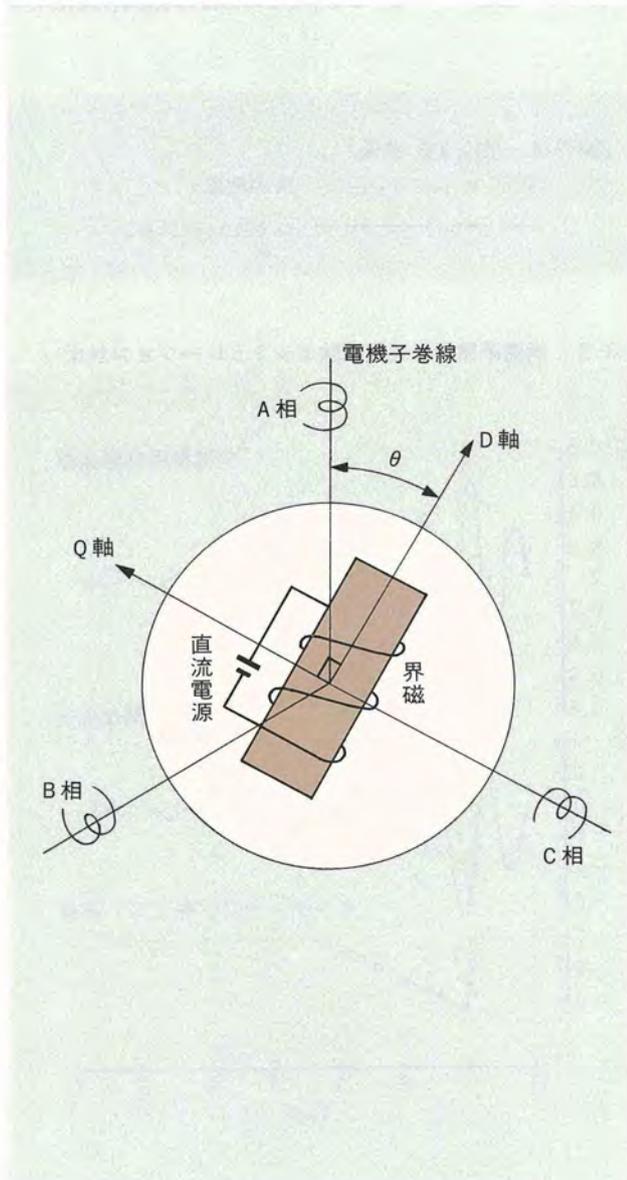
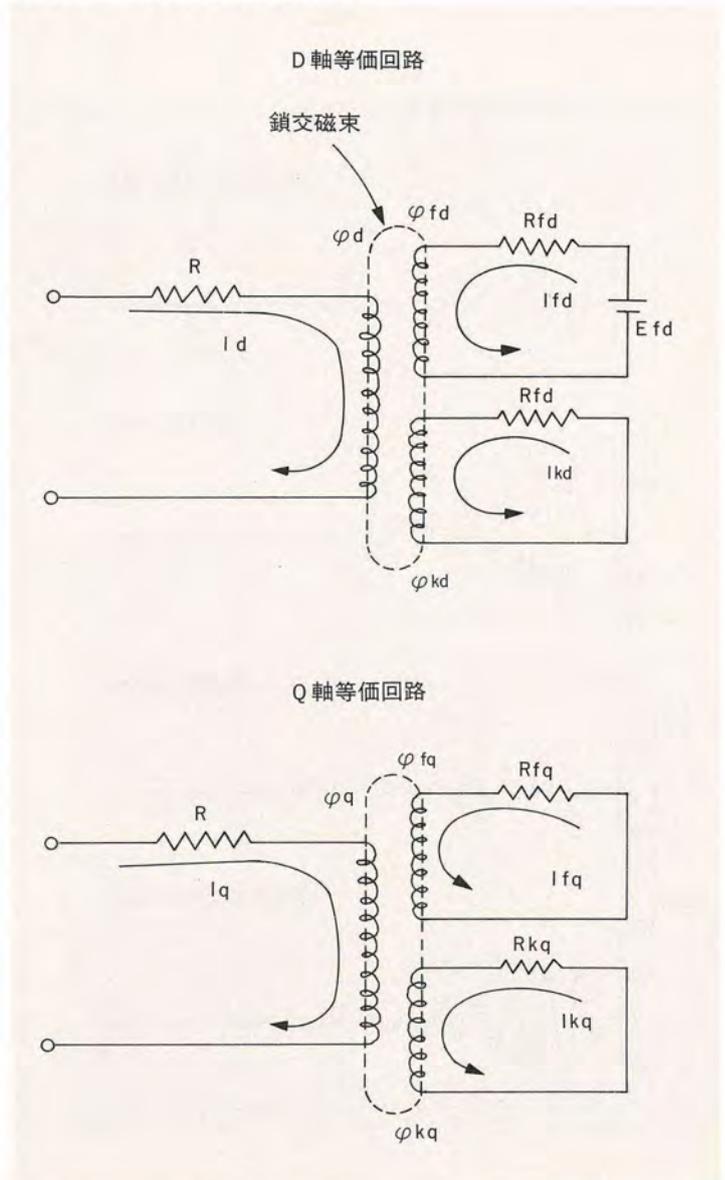


図 3-3-7 同期発電機の等価回路



このように、励磁系は電力系統からの擾乱に対して非常に鋭敏に応答し、系統の安定運転上重要な役割を担っているため、このモデル化ならびにその定数、特性は非常に重要なものとなり、大擾乱から微小擾乱まで幅広い解析が可能な詳細なモデルが開発され用いられている。

また、検討対象系統より遠方の発電機の励磁系などに対しては、詳細モデルを標準モデルへ変換し、系統解析効率を向上するテクニックも開発されている。

調速制御系のモデルについては、各プラントモデルの開発過程で詳細なモデル化が行われている。

これらのモデルは実際の電力系統での試験結果とも対比され、モデルと定数の検証が行われている。実系統試験結果との比較例を、図3-3-8~9に示す。

### Ⅲ. 負荷モデル

電力系統の動特性解析の精度向上をはかる上で、負荷特性の重要性は古くから指摘

されているが、その種類が工場のモータ、家庭の電灯、ビルの空調など非常に広範囲にわたること、需要家へ与える影響への配慮から実系統での特性測定が大きな制約を受けていることなどから、その実態は依然として不明な点が多い。

負荷は従来の解析では変電所単位で一括して表現しており、表現方法は母線の電圧と周波数の関数で近似したり、負荷の中で大きな比率をしめる誘導電動機の動特性を

図 3-3-8 発電機と励磁系諸量の実機試験とシミュレーション対比

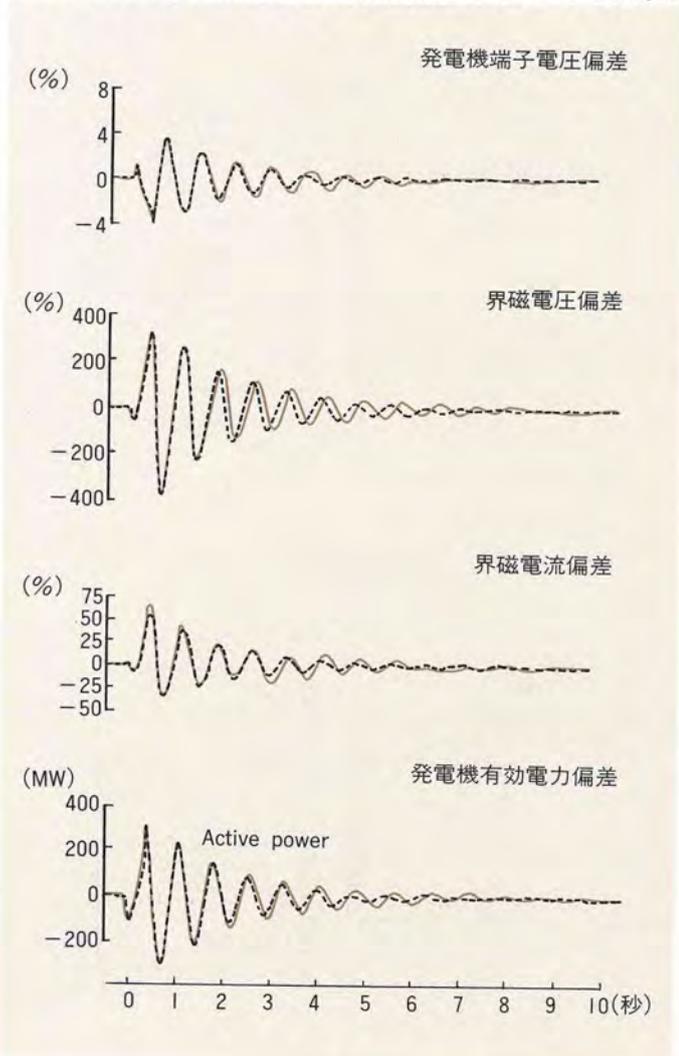
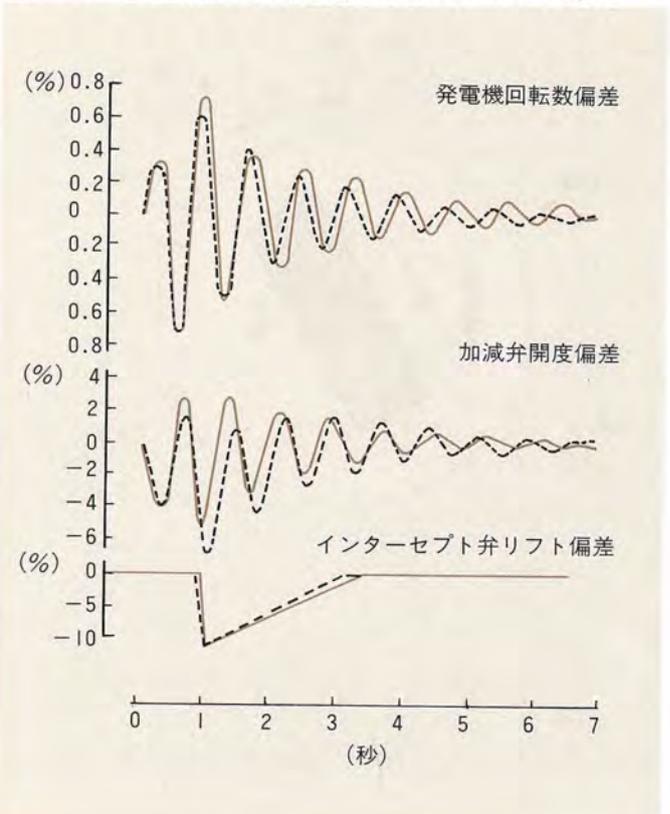


図3-3-8 図3-3-9 共通

—— 実測結果  
 - - - シミュレーション

図3-3-9 調速系諸量の実機試験とシミュレーション対比



発電機と同様に微分方程式で扱っている。

近年、計算機の普及など負荷構成の変化から、系統故障による瞬時電圧低下が需要家へ大きな影響を与えるようになり、この実態を把握することが、需要家への影響を軽減するとともに、重大事故を未然に防止するための系統安定化システムの電源や負荷の制限量を設定する上で、重要となっている。

これに対し、デジタル型高精度無人記録

方式の信頼性が増したことにより、襲雷などによる系統故障時の負荷応答を自動監視し、その特性を把握することが試みられている。

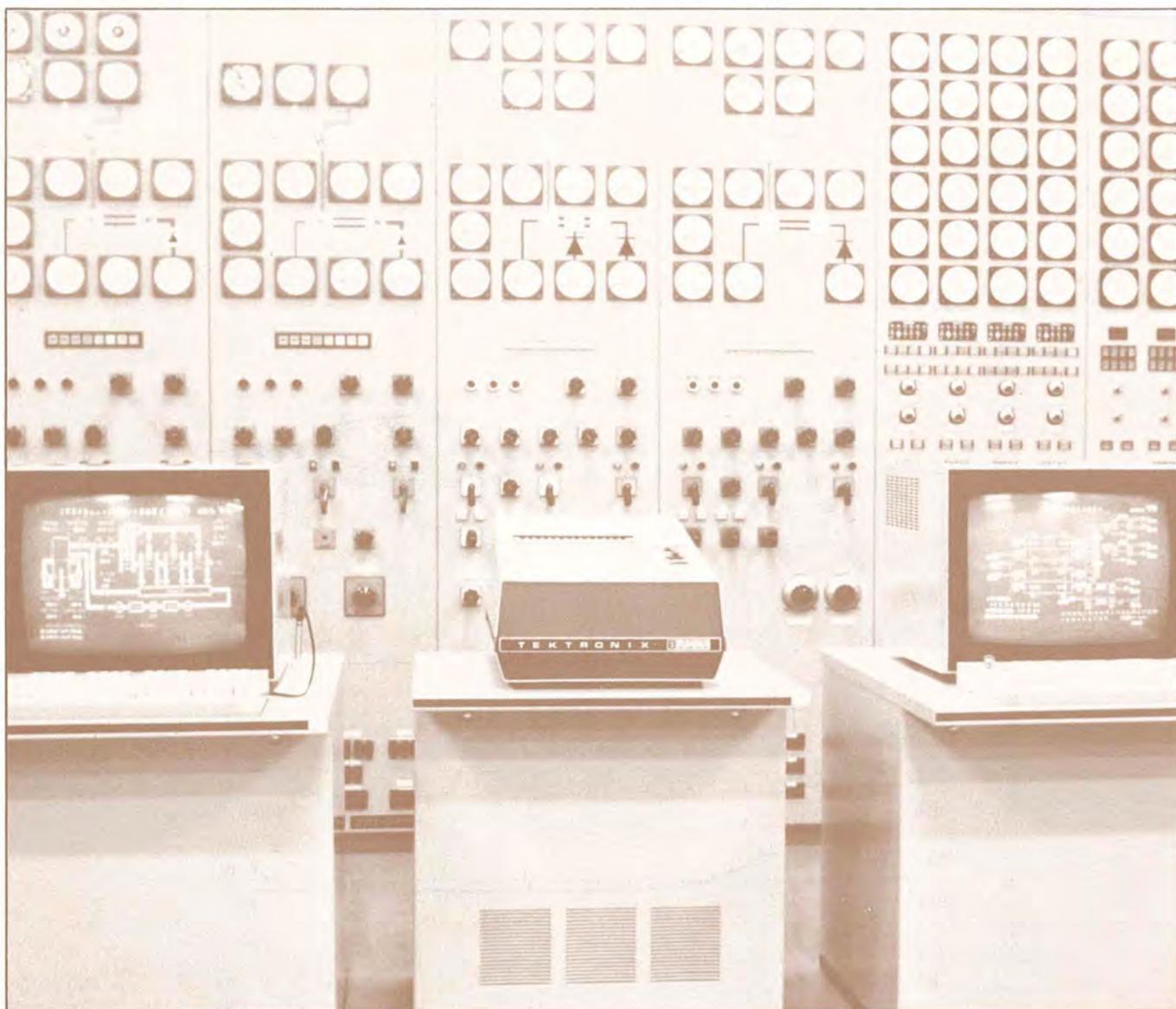
当所では系統故障時の瞬時電圧・電流を自動記録し、負荷特性の分析を試みている。図3-3-10に自動記録の概要と観測した波形と負荷の応答の例を示す。

分析の結果、実系統の負荷は、従来一般に用いられていた母線電圧の関数だけでは

表現しきれないこと、故障により電圧が一時的に低下する場合などには負荷脱落があることが明らかとなった。

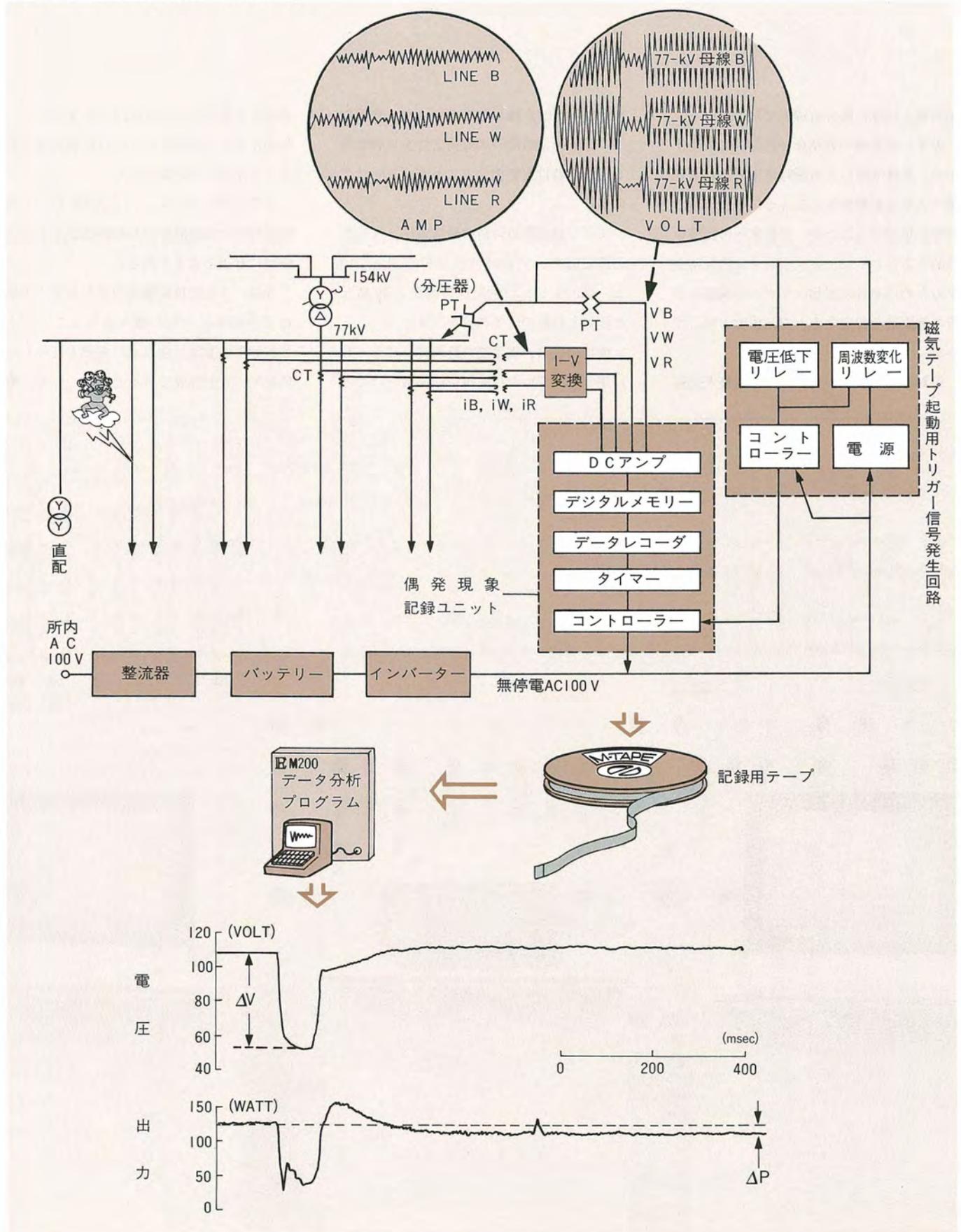
このようなデータは、系統故障時の負荷脱落特性や系統解析用負荷動特性モデルの解明に有用と考えられる。

今後、さらに負荷構成の異なる多くの地点での実測データを積み重ねることにより、従来の表現方法以上に実態を反映した負荷モデルが作成できると考えている。●



交流・直流電力系統シミュレータ

図 3-3-10 自動記録の概要と負荷応答例



# お わ り に

電力研究所 システム部 情報伝送研究室長 河合 洋一

## 将来に向けての構想

### ——高度情報化技術を活用した系統運用——

我が国では、低経済成長の長期化が予想され、今後電力需要の大幅な増加が望めない反面、経済・社会の高度情報化の進展に伴い、電力に対する質的要求が一層厳しくなりつつある。

このような状況の中で将来にわたって安定な電力供給を確保するためには、電力設備の有効な運用について新展開を図る必要がある。

このためには技術的基盤として光センサ技術、超LSI技術、光ファイバ通信技術、ベクトルプロセッサなど高速計算技術およびデジタル制御通信技術があり、またソフトウェアの面からはLANなど計算機ネットワーク技術、ディスプレイ技術、エキスパートシステムなど知識工学がある。

このような技術を総称して高度情報化技術と呼ぶことにすれば、今後は、こうした新しい技術シーズについて、その進展を常にフォローし、今後の電力系統の高度運用に反映して行くことが重要となる。

当所では、我が国における給電システムの自動制御技術の変遷と現状を調査分析し、これに基づき高度情報化技術を活用した将来の電力系統総合自動化システムの方向性として、次のように考えている。

1. 経済性の追及、信頼性の確保、電力品質の維持など多目的の制御を指向し、とりわけ信頼性の確保のための機能を充実させること。
2. 制御形態は中枢機能を極力分散化させた自律分散型として、システムの信頼性、拡張性の向上に対処すること。
3. このための情報処理システムと情報伝送ネットワークの基本構成を確立すること。

この基本的な考え方を実現するため、オンライン信頼度制御を主体とした協調的制御論理、個別電気所における自主制御論理、情報処理ネットワーク等に関する開発研究を進めている。

これらの研究によって、制御用コンピュータと情報処理システムが一体となって有機的に働き、運用者はコンピュータや通信網を意識することなく、高度に利用できる将来の総合自動化システムの構築に貢献出来ると信じる。 ●

## 関連する主な研究報告書 (電力研究所 研究報告)

- 1-2
1. 「電源計画手法の開発——長期計画シミュレーションプログラムの開発」 研究報告：18044 (1981.7)
- 1-3
2. 「電源構成における電力貯蔵設備の役割の評価」 研究報告：183028 (1983.12)
  3. 「需給運用を考慮した電源計画手法」 研究報告：184007 (1984.11)
  4. 「原子力発電の増大に伴う各電源設備利用率の変化」 研究報告：183017 (1982.11)
  5. 「火力・原子力発電ユニットの定期補修計画手法——分枝限定法による論理の開発」 研究報告：182018 (1982.11)
  6. 「週間需給計画システム その1 火力機並列の計画」 依頼報告：179527 (1980.4)
  7. 「週間需給計画システム その2 揚水池運用の計画」 依頼報告：179544 (1980.4)
  8. 「週間需給計画システム その3 火力機負荷配分の計画」 依頼報告：180507 (1980.11)
  9. 「週間需給計画 その4 火力・揚水配分の総合計算の実証」 依頼報告：180519 (1981.2)
- 2-2
10. 「東北電力におけるオンライン系統信頼度制御システム」 依頼報告：182516 (1982.11)
  11. 「運用制約を考慮した有効・無効電力の最適配分法」 研究報告：180042 (1981.8)
  12. 「長時間需要予測値を用いたオンライン需給平衡制御方式の開発」 研究報告：179045 (1980.5)
  13. 「需給変動の時間推移を考慮したVQC論理」 依頼報告：184522 (1985.4)
- 3-2
14. 「電力系統の動特性解析のための多重故障計算」 研究報告：184019 (1984.9)
  15. 「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)
  16. 「電力系統の安定度解析手法の高度化——解析プログラムの機能の拡充と検証——」 研究報告：180064 (1982.5)
  17. 「系統計画における安定度評価のための多重故障計算手法」 研究報告：182044 (1983.6)
  18. 「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)
  19. 「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)
  20. 「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)
  21. 「予防制御のための定態安定度判別手法」 研究報告：184032 (1985.4)
- 3-3
22. 「タービン高速制御による安定度向上策——火力ガバナー系のシミュレーションとその動特性——」 研究報告：177055 (1978.7)
  23. 「タービン高速制御による安定度向上」 研究報告：181050 (1982.6)
  24. 「渥美火力発電所安定度対策装置の性能実証試験——安定度解析プログラムによる解析精度の検証——」 依頼報告：182503 (1981.8)
  25. 「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)
  26. 「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)
  27. 「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)
  28. 「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)
  29. 「系統分断時の原子力発電所の単独系統運転能力」 研究報告：184039 (1985.6)
  30. 「原子力・直流単独系統の運用制御保護方式——個別周波数制御方式の検討——」 研究報告：182061 (1983.8)
  31. 「交流・直流電力系統シミュレータの開発 (その1) —主なる機能と設備の特徴—」 調査報告：182032 (1983.5)
  32. 「交流・直流電力系統シミュレータの開発 (その3) —原子力模擬同期発電機の製作と基本特性—」 研究報告：182035 (1983.6)
  33. 「交流・直流電力系統シミュレータの開発 (その6) —原子力発電ユニットの運転制御システムの開発—」 研究報告：183022 (1984.2)
  34. 「交流・直流電力系統シミュレータの開発 (その8) —原子力発電ユニットのリアルタイム用プラント動特性シミュレーション・モデル—」 研究報告：183021 (1984.3)
  35. 「原子力発電所からの直流単独送電 (その3) —直流線路故障に対するBWR原子力プラントの安定性—」 研究報告：183037 (1984.4)
  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原子力プラントのスクラム防止対策—」 研究報告：183041 (1984.3)
  37. 「原子力発電所からの直流単独送電 (その5) —PWR原子力プラントの安定運転性の検討—」 研究報告：184024 (1985.5)
  38. 「複数発電ユニットの励磁系の協調制御 (その1) —励磁系の簡略化法—」 研究報告：182036 (1983.6)
  39. 「複数発電ユニットの励磁系の協調制御——一括制御方式と安定度向上効果——」 研究報告：183046 (1984.8)

本部／経済研究所 東京都千代田区大手町1-6-1 ☎(03)201-6601 ☎100  
我孫子事業所 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

柏江事業所 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

電研レビュー第13号「原子力主流時代に対応した電力システムの高度運用」をお届けします。

本号では「巻頭言」を四国電力株式会社常務取締役 富田 盛夫様にお願ひしました。

一層厳しくなる需要家の電気の質に対する要望に応えるとともに、経済的な原子力電源の特長を最大限に活かすためには、先端技術を駆使した、系統運用総合自動化に向けての研究開発が必要との、30年間の経験に基いた貴重なご寄稿をいただき、誠にありがとうございました。

### ●新入職員は新人類？●

桜の咲くころとなり、いよいよ新入社員が社会にでて活躍をはじめました。

新聞や雑誌などによれば、彼らは「新人類」と呼ばれています。

- 新人類の特徴としては、
- ・マイコンなどのエレクトロニクスに強い。
  - ・感性を行動の基準にしており、嫌いなことには見向きもしない。
  - ・ファッションや遊びが生活の中心であり、それに関する情報に敏感である。
  - ・同世代同士でも話が通じないといわれるくらい、個性化・多様化が進んでいる。

などが挙げられています。

また、日本リクルートセンターの調査によれば、新入社員の約8割がマイホーム派であり、勤務時間後については、約6割が「趣味（読書、スポーツ）」の充実に充てる回答するなど、これまでのサラリーマン像とは異っています。

これに対して経営者は当然のことながら、「研鑽を重ねプロに」なることや、「賃金以上を稼ぐ」ことを期待しております。

この新人類も組織の中でもまれ、鍛えられ、やがて社会の中堅となって、わが国の産業や経済のあり方に影響を与えていくこととなります。

### ●新人類と電気●

それでは、新人類は電気に対して、どのような態度を示すでしょうか。

子供のころから、テレビゲームや、シンセサイザーなどの電子楽器に囲まれて育った彼らは、ごく自然な形で多機能電話や家庭用のコンピューターなどを使いこなしていくと思われれます。

また、マイコンが組み込まれた各種の電化製品を自在にプログラムして、快適な生活空間を維持していくことでしょう。

当所の行った年代別の電気に対するイメージ調査でも、新人類にあたる20歳代では、電気を活用して、豊かで便利な生活をおくりたいという希望が強く表れております。

このことは、電気事業も需要家の要望に

応じた、多様なサービスを考えることがますます重要となってくることを意味するものです。

例えば、需要家を対象とした、情報・通信サービスなどを行えば、情報に敏感な彼らにとって大きな魅力と写ることでしょう。

### ●新人類に期待●

今後、送配電網は、需要の分散化、自家用電源の連結、光ファイバーやデジタル技術を活用した通信機能の付加などにより、ますます複雑化していくこととされます。

基本的には、電力、電圧、周波数、位相差角などを制御する系統運用ですが、高信頼度と経済性を両立させるためには、これまで以上に、これらの操作を精密に、かつ瞬時に行うことが必要となってきます。

このためには、生物が自分の身体の不具合を察知して、体温や代謝などを調節するように、系統自体が自律的に反応することが要求されます。

その手段として、現在、考えられているのが、人工知能（AI）の系統運用への導入です。

新しい感性と生まれながらにコンピューターを友達とする新人類が、この方面で先達の技術遺産を正しく継承し、かつそれを乗り越えて、系統運用技術の新天地を拓くことを強く期待します。

R