

電力系統解析における最近の動向

Recent Trends of Power System Analysis

後藤益雄* Masuo Gotô
河合忠雄** Tadao Kawai

計算機を用いた電力系統の解析システムでは、使いやすさの観点から、データ入出力の容易さ、計算の高速化及びプログラムの汎用化に対する要求が強い。

ここではこのような背景のもとに開発した、グラフィックディスプレイ端末から計算機と対話的にデータを入出力できる対話形系統解析システム、及び専用プロセッサによる高速計算手法について述べる。また最近、広く利用されるようになった汎用過渡現象解析プログラムEMTPによる解析例を紹介し、その有用性を示す。

1 緒言

電力系統の解析は、現在ではそのほとんどがデジタル計算機によって行なわれている。計算機を用いて解析を行なう場合、解析手法などの技術のほかに、実際に解析作業を実行するとき、ユーザーにとってはいかに手軽に使用できて、いかに早く結果が得られるかということが重要な課題となってきた。このような背景のもとに、入出力データの取扱いが容易な対話形解析システム、ミニコンピュータに高速演算用プロセッサを付加した専用解析システムや解析プログラムの汎用化などに大きな進展が見られる。

本稿では最近日立製作所で開発した対話形系統解析システム、及び高速演算プロセッサによる電力系統動特性計算の高速化について述べる。また最近、汎用プログラムとして広く用いられるようになった過渡現象解析プログラムEMTP (Electro-Magnetic Transients Program) の系統解析への適用例を紹介する。

2 対話形系統解析システム

計算機を用いて電力系統の潮流解析や動特性解析を行なう場合、入出力データの取扱いをいかに容易に行なえるということが、解析作業の能率の点から非常に重要な要因となる。特に系統構成データなどについては、CRT(ディスプレイ)上に表示された系統図を見ながら対話的にデータの入出力を行なうことが可能となれば、リスト形式による入出力に比較して格段に使いやすいものとなる。以下、このような目的のために開発した対話形系統解析システムの概要について述べる。

2.1 システム構成

図1にシステム構成を示す。ユーザーが計算機と対話を行なう端末はタブレットに設定されたコマンドメニューの受付処理やディスプレイ上の表示画面の拡大、縮小、移動などを端末側で処理する機能をもっており、ホストコンピュータの負担軽減と応答の速応性を図っている。

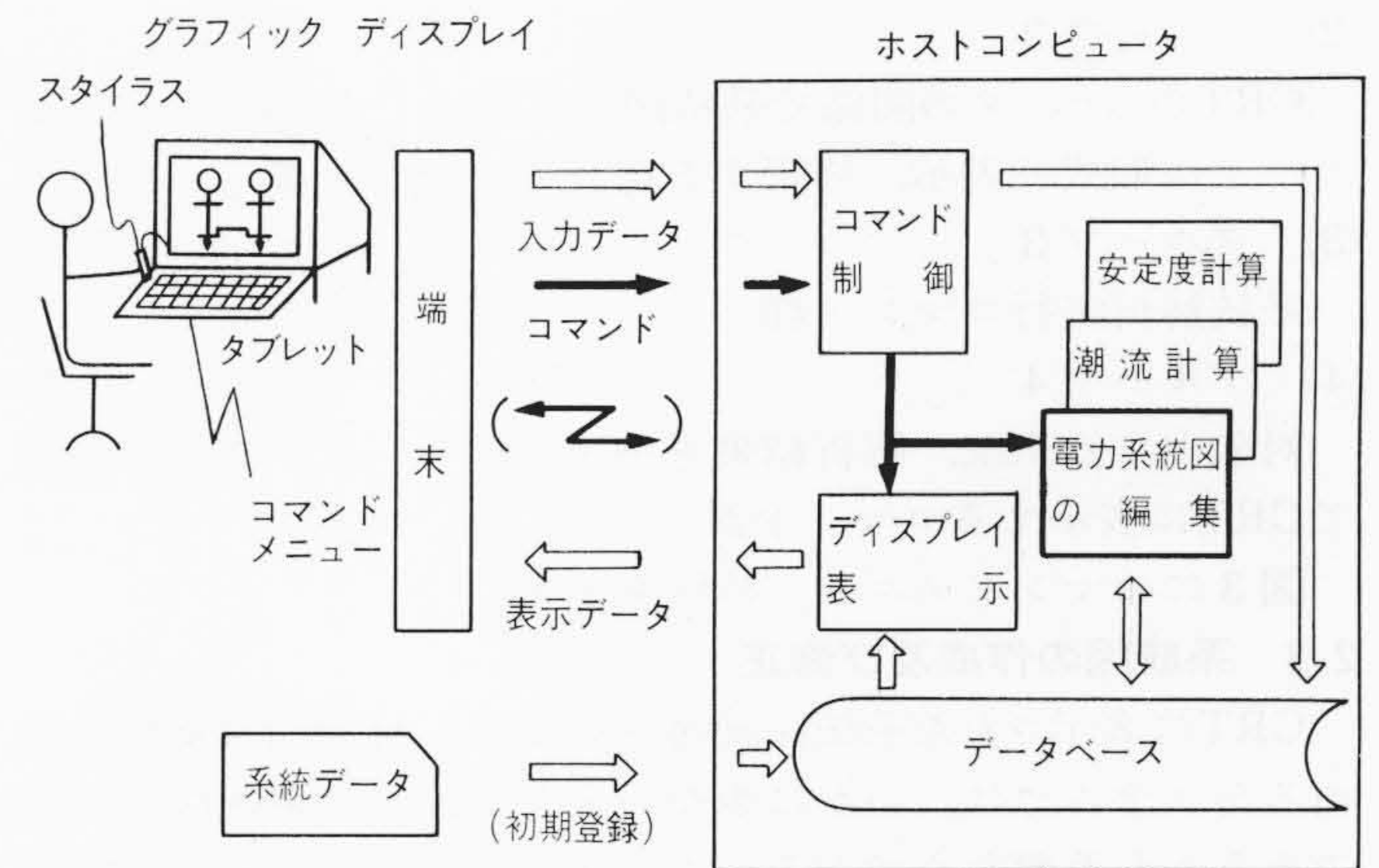
ソフトウェアは図1に示すように、ユーザーが選択したコマンドの処理を行なうコマンド制御、CRT表示制御、電力系統図の編集及び系統解析(潮流計算、動特性計算など)の各プログラムから構成されている。

システム開発に当たっては、初心者でも容易に使えるように特に以下の点に留意した。

(1) 対話性能の向上

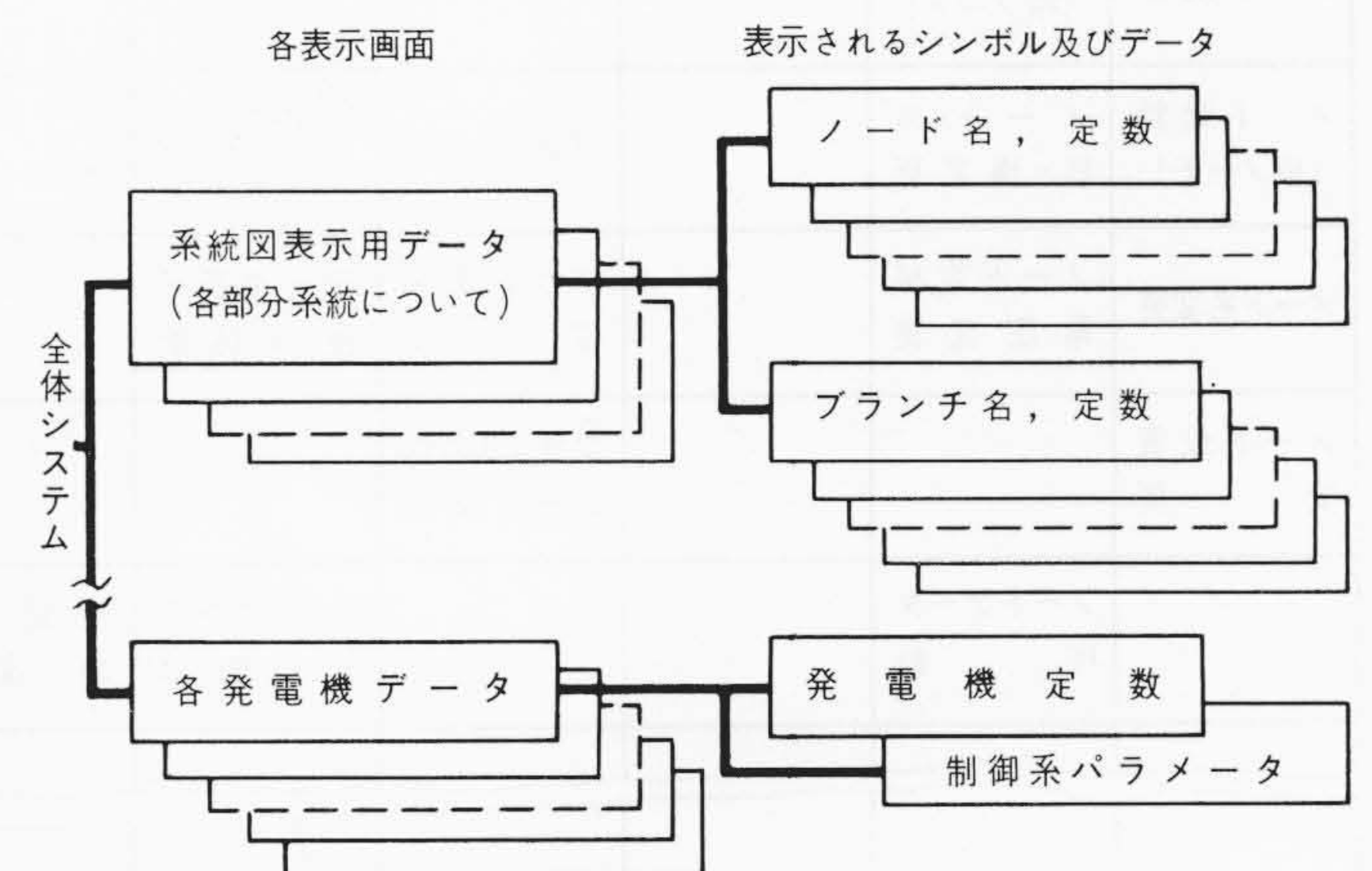
CRT上に表示される入出力データ(計算条件や計算結果)が

ユーザーにとってなじみやすいものになっていること、すなわち単なる数値データのリストではなく、系統図や潮流図、グラフ、ブロック図、テーブルなどで表示されるように考慮している。このため図2に示すように、各表示画面に対応した形でデータベースを構成している。



注: ⇄ (データの流れ) → (コマンドの流れ)

図1 システム構成図 グラフィック端末からタブレットとスタイラスを用いて、計算機と対話的に系統解析を行なう。



注: 全体システムは、最大九つの部分系統に分割される。

図2 データベースの構成 各種データをCRT表示画面に対応して階層的に構成する。

* 日立製作所日立研究所 工学博士 ** 日立製作所国分工場

(2) 入力データの合理性確認とデータの一元管理

入力データに対し合理性確認ができるように、すべてのデータを一元管理し、複数画面で共通にデータを扱う場合でもそれらのデータは互いに矛盾のないように処理されるようにしている。

(3) 誤操作に対する保護

本システムでは、次項で述べる各コマンドは、それに対応する画面が表示されているときだけ有効であるよう構成している。例えば、線路定数の修正はCRTに表示された系統図上の該当するブランチ近傍に表示されているデータ区域をスタイルラスで指定し、希望するデータを入力すれば、変更後のデータが表示されデータベースの内容も変更される。これらの作業はすべてCRTに表示されるガイダンスに基づいてだけ可能であり、誤操作によるデータの喪失などを防止している。

2.2 コマンド体系

端末のタブレットに設けたコマンドは約50種類である。これらはその機能から以下に示すように、四つのグループに分けることができる。

(1) グループ1

ノード、ブランチなど系統構成データの入力、修正に関するコマンド群

(2) グループ2

CRTのスペースの関係で系統図上に表示できないデータを、テーブル形式で表示、修正する場合のコマンド群

(3) グループ3

系統解析実行コマンド群

(4) グループ4

対象とする系統、解析結果を系統図やトレンドグラフの形でCRTに表示するコマンド群

図3にコマンドメニューの例を示す。

2.3 系統図の作成及び修正

CRTに表示された系統図画面を見ながら対話的に解析を進めるシステムでは、いかに少ない入力データで系統図を表示できるかが重要な点である。本システムでは、ノードの座標

(画面を縦、横方向にそれぞれ18、24に分割した座標)を与えるだけで、更に詳細な表示データは、すべてノードとブランチの接続関係などから自動的に作成するようになっている。

系統図を対話的に組み立てる場合、系統図の修正作業の連続となるので、この修正に要する計算機の処理時間を短縮することが重要である。本システムでは、系統図画面を修正する場合、修正データを最少とするようにしている。一例を示すと次のとおりである。図4で、ブランチB4が追加される場合を考える。ブランチB4が追加されると、ノードN3に接続しているブランチB3は端子P1から端子P2へ変更されねばならない。しかし、ノードN5での端子P3は修正する必要がない。修正を要するノード、ブランチはN3、N4及びB3、B4である。ノードN1、N2、N5やブランチB1、B2などは全く修正の必要

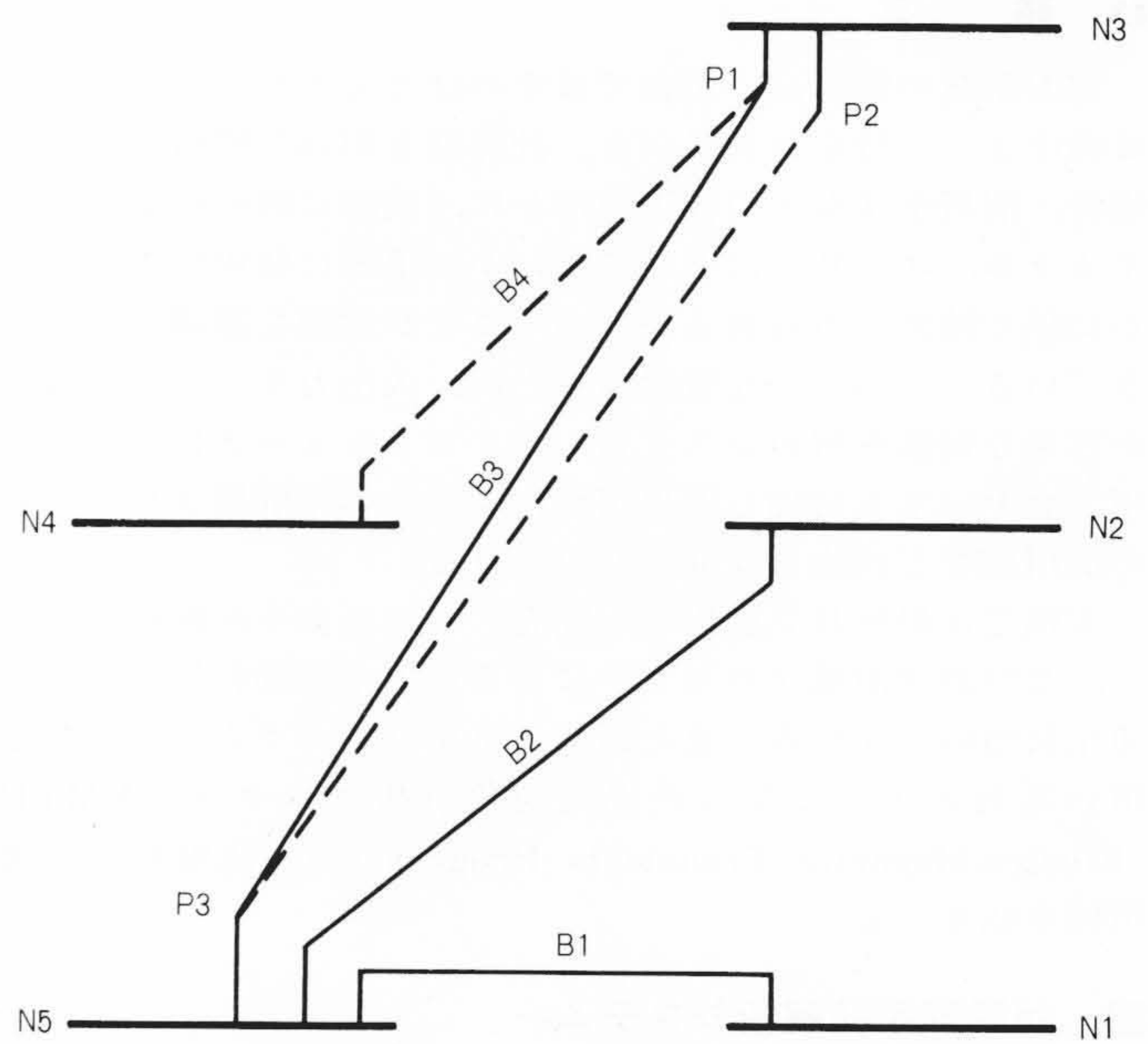


図4 系統構成変更の例 ブランチB4の追加時に必要な系統図変更箇所はブランチB4、B3だけである。

(グループ1)

| | | | | | |
|-----------------|-----------------|--|-----------------|--------------------------|----------------|
| ノード削除 | ノード登録 (横ノード) | | ブランチ削除 | | |
| ノード登録 (縦ノード) | ノードの 縦-横変更 | | ブランチ登録 | インピー ダンス (L, R, C) | ブランチの オン・オフ |
| ノード名変更 | ノード定格 電圧変更 | | ブランチ名 変更 | データ表示 位置移動 | |
| ノード位置 変更 | | | ブランチ片側 ノード変更 | | |
| | ノードデータ 移動 | | | 交差ブランチ 断続表示 | 断続表示 の復旧 |

(グループ3)

| | |
|------------------------|--|
| 過渡安定度 計算 | |
| 潮流計算 | |
| 系統の結合チェック (計算系統の抽出) | |
| 抽出計算系統のリセット | |

| | | | |
|-------------------------------|------------|--------------|---------------|
| 全系仕様 (ノード数 ブランチ数 など) | テーブルのデータ修正 | | ノード条件 |
| | 発電機 データ | TRなどの データ | 系統変更 シーケンス |

(グループ2)

| | | | |
|------------|---------------------|-----|-----|
| 全体系統 構成 | 部分系統 構成 | | |
| | 部分系統 インピー ダンス | 潮流図 | グラフ |

(グループ4)

図3 コマンドメニュー
タブレット上に配置したコマ
ンドで、これをスタイルラスで選択
することによりユーザーは計算
機と対話する。

がない。本システムではこの例の場合、修正が必要なN3, N4, B3, B4だけを取り出して、系統図を修正するようにして処理時間の短縮を図り、マンマシン性の向上を図っている。

2.4 操作手順と試算例

図5に、本システムを用いて解析を行なっている概観を示す。操作手順の概略フローを図6に示す。まず系統データをチェックし、修正が必要な場合は修正する。ユーザーは任意の時点で系統構成データや計算条件を表示、チェック、修正することができる。次に、ノードの拘束条件を与えて潮流計算を行なう。潮流計算結果は潮流図で表示される(図7)。条件を変更して、再度潮流計算をすることも、あるいはこれを初期値として動特性計算を行なうこともできる。動特性計算の結果としては指定した発電機の位相角(図8)、電圧、電流、電力や指定したノードの電圧、及び指定したブランチの潮流

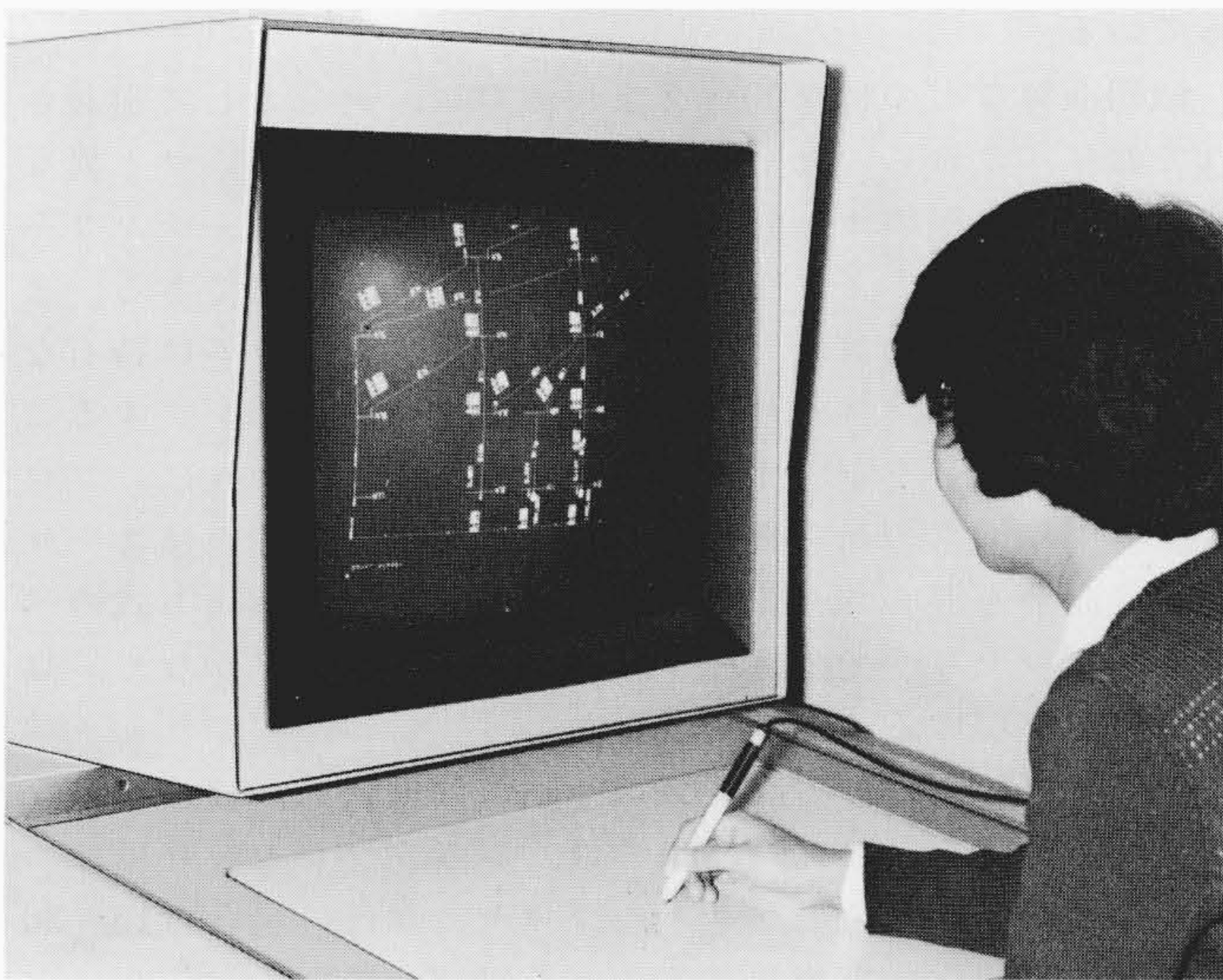


図5 グラフィックディスプレイ端末の概観 グラフィックディスプレイを見ながら、スタイラスとタブレットにより計算機と対話的に解析を行なう。

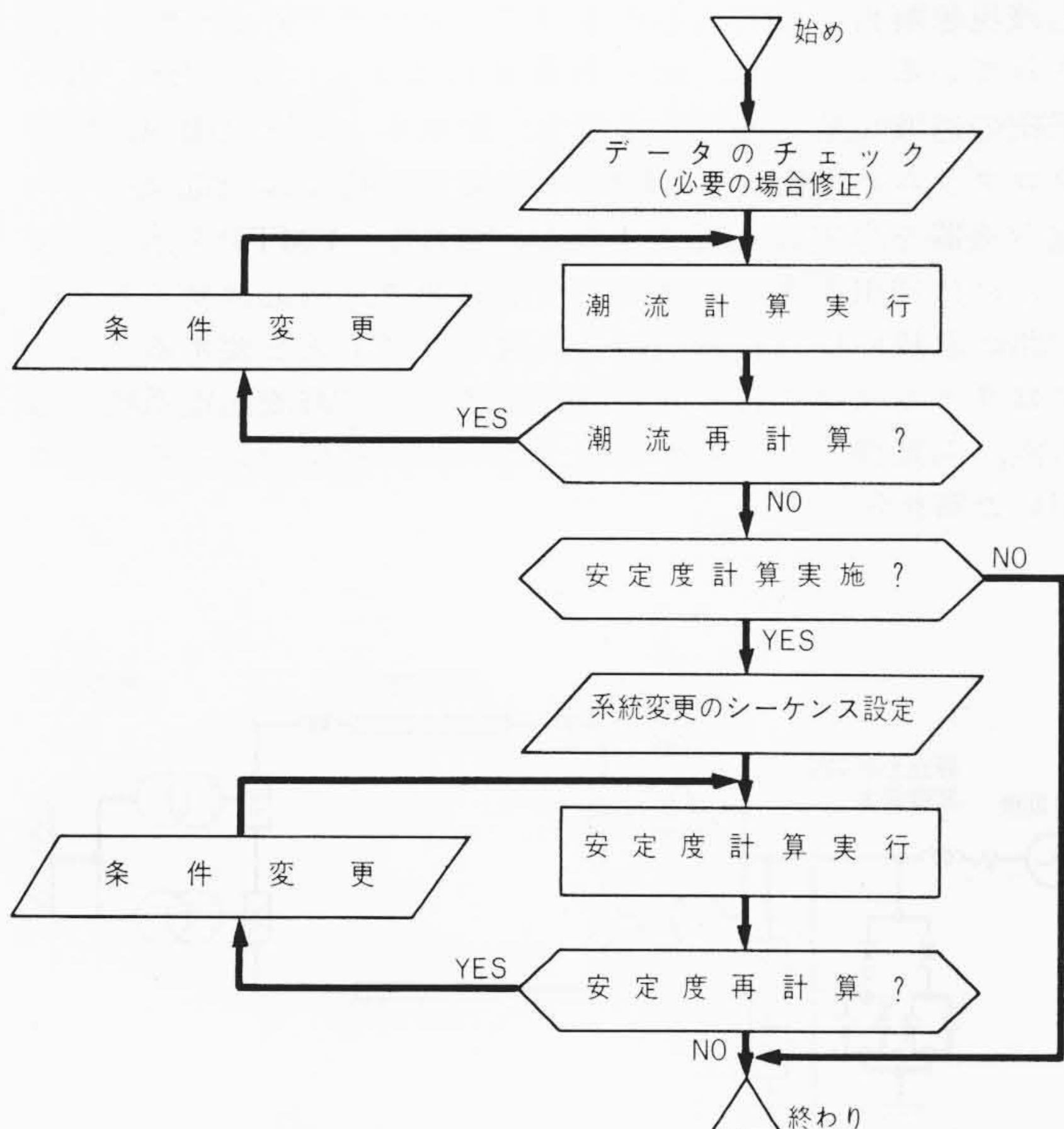


図6 操作手順 データや計算条件を対話的に修正し、目的の計算結果を得る。

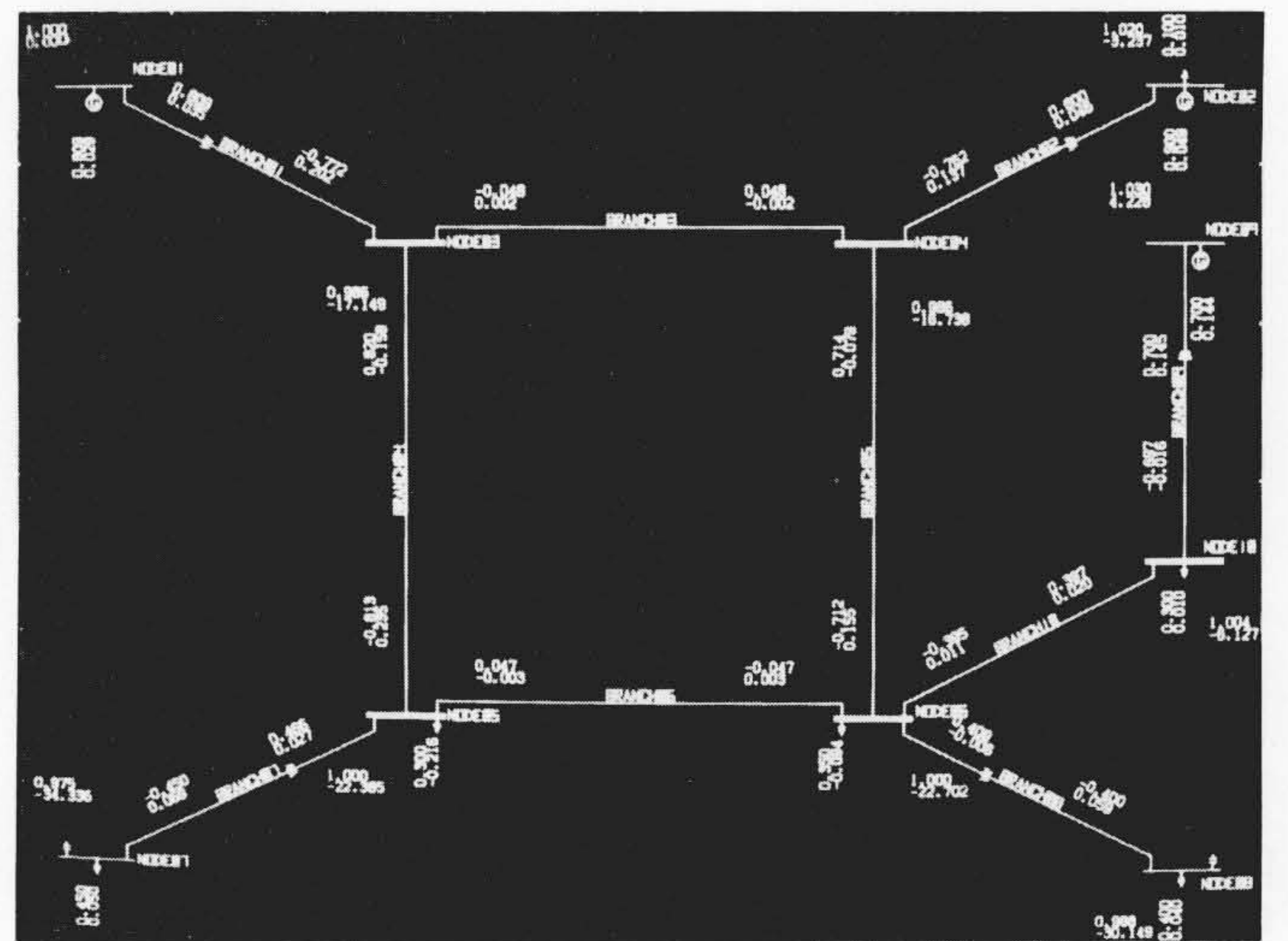


図7 潮流計算結果 潮流計算の結果は、CRT上に潮流図として表示される。

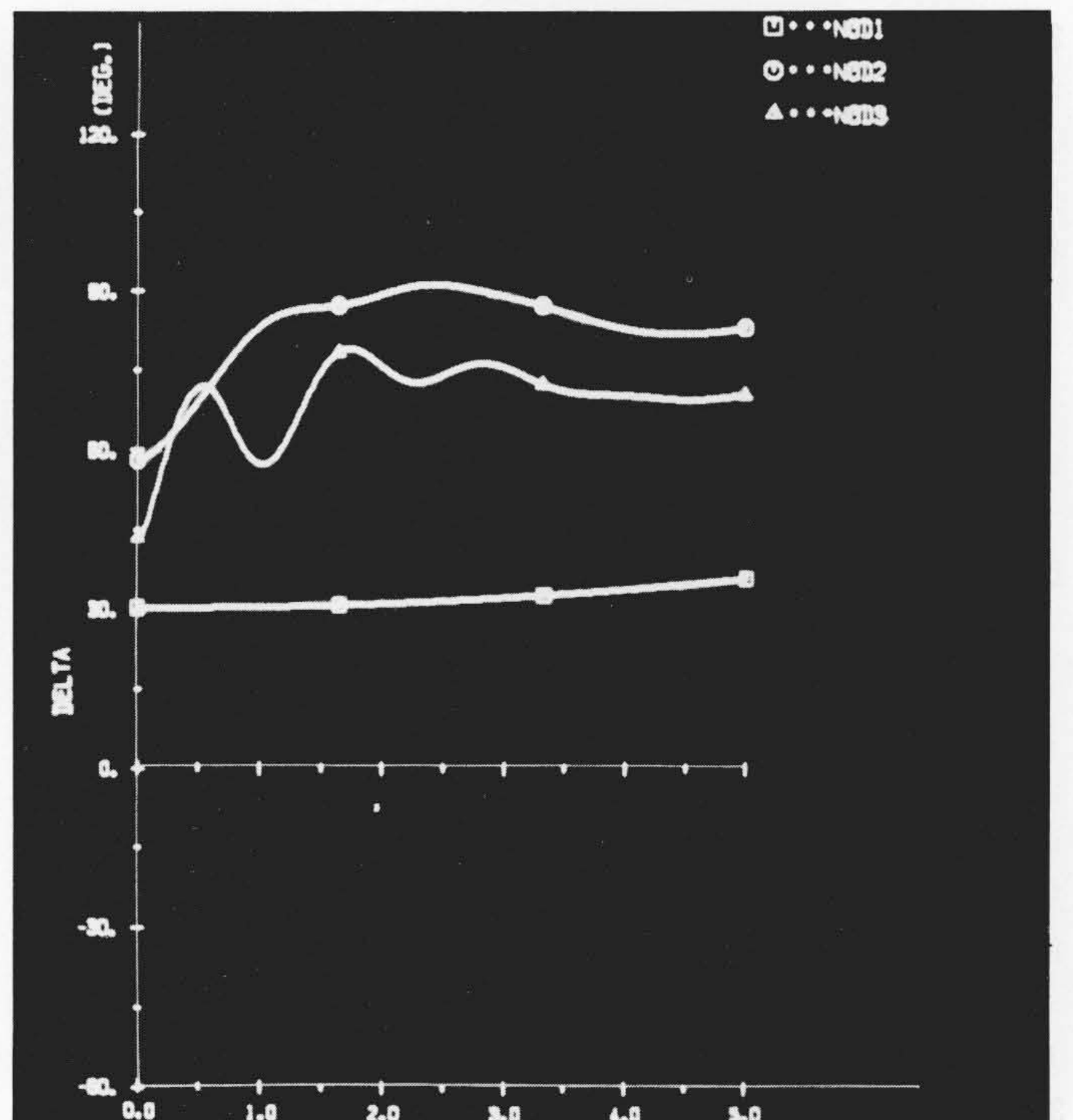


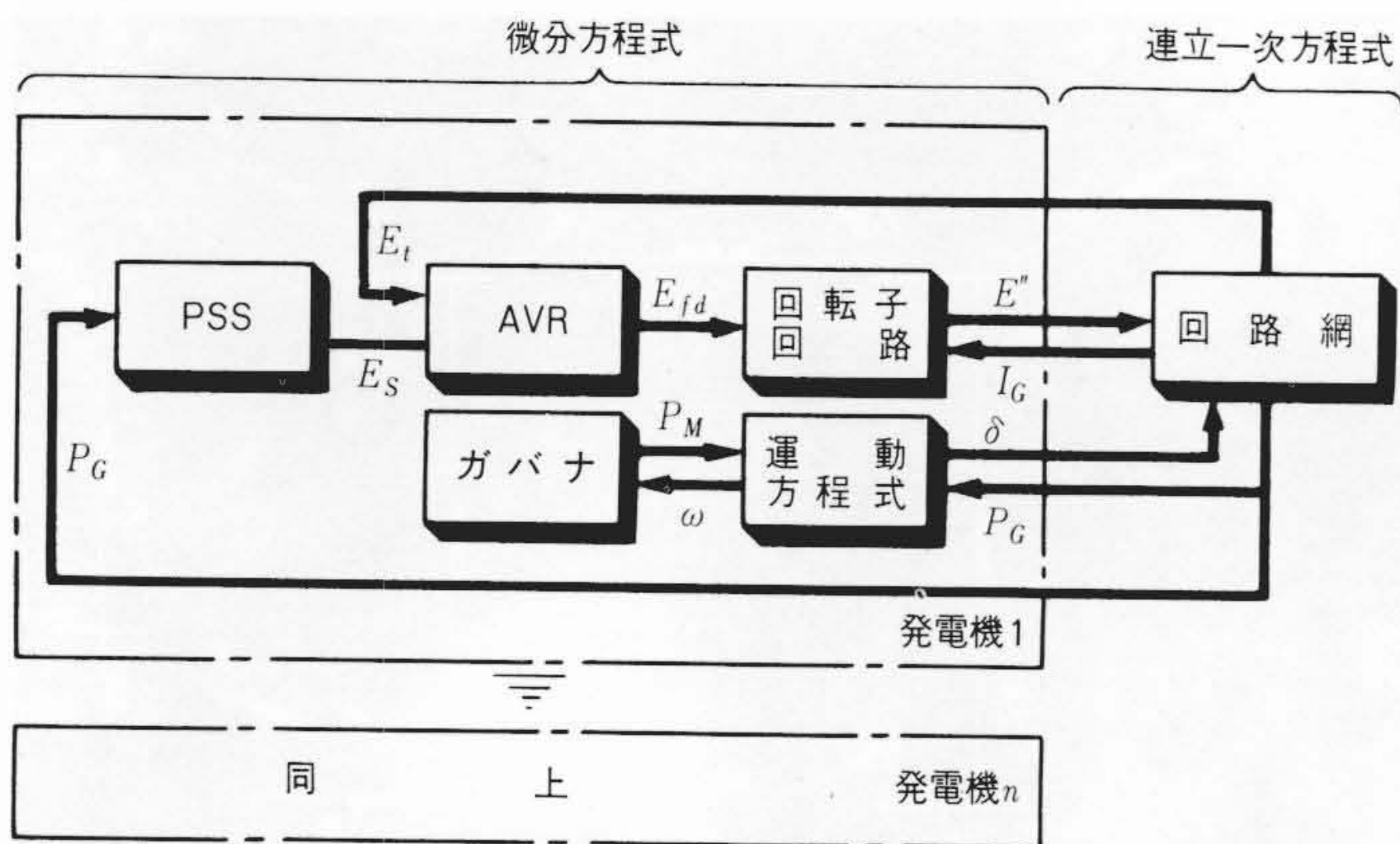
図8 位相角変動曲線 動特性解析の結果は、CRTにトレンドグラフとして表示される。

などがグラフで表示される。これらの結果は必要に応じてハードコピーをとることができる。

本システムでは系統図を9画面に分割して表示でき、200ノード程度の系統まで取り扱うことができる。

3 電力系統動特性解析における高速計算

動特性解析は、系の特性根を求める固有値法と系の時間的変動を直接計算する方法に大別される。前者では微小変動時の現象を対象とするので、非線形性は無視されるが、系の固有振動周波数やその減衰定数など、系の固有の特性が解明できるという特長をもっている。一方後者では、微小変動から大外乱まで、系の非線形性も忠実に表現して解析できるという特長があり、両者は解析の用途に応じて使い分けられている。電力系統の場合、遮断器などが入、切動作を伴う制御・保護装置が多いことや大外乱時の現象を扱うことが多



注：略語説明 AVR(自動電圧調整装置), PSS(系統安定化装置)

図9 動特性計算の構成 電力系統の動特性は、発電機やその制御系を表わす微分方程式と回路網の関係を表わす連立一次方程式によって計算される。

いので、後者の解析手法が広く用いられている。ここでは後者について、その高速計算法の概要を述べる。

3.1 動特性計算の概要

電力系統の動特性計算は、回路網の電圧・電流の関係を表わす回路網方程式(キルヒホッフの法則を表わす連立一次方程式)と発電機や制御装置などの動的振舞いを表現する微分方程式から成っており、それぞれ次式で示される¹⁾。

$$Y E = I \dots\dots\dots(1)$$

$$\dot{X} = A X + B U \dots\dots\dots(2)$$

ここに Y, E, I は、ノードアドミッタンス行列、ノード電圧、ノード注入電流、また X, U, A, B は状態変数、入力信号、制御系を表わす定数行列である。これらの関係は、図9に示すブロック図で表わすことができる。同図に示すように、各状態量を相互に結合しながら(1), (2)式を解くことにより電力系統全体の動的な振舞いを計算することができる。この計算は(1), (2)式から分かるように、行列とベクトルとの演算が中心であり、計算速度の向上を図るにはこのベクトル演算を高速化することが効果的である。この場合、 Y などは零要素が大部分を占めるスパースな行列であるため、LU分解法などを適用して解く¹⁾。したがって、ベクトル演算に専用プロセッサを用いて高速化を図る場合にはスパース行列に適した方式が必要となる。

3.2 スパース演算用ベクトルプロセッサ

アドミッタンス行列 Y に関するスパース行列演算を解析した結果、演算の約80%をアドレス演算が占めていることが分かった。このことは、単にフローティング演算能力を強化しただけでは、スパース演算の高速化が実現できないことを意味する。

このため規則的な行列演算を得意とする、いわゆるスーパー

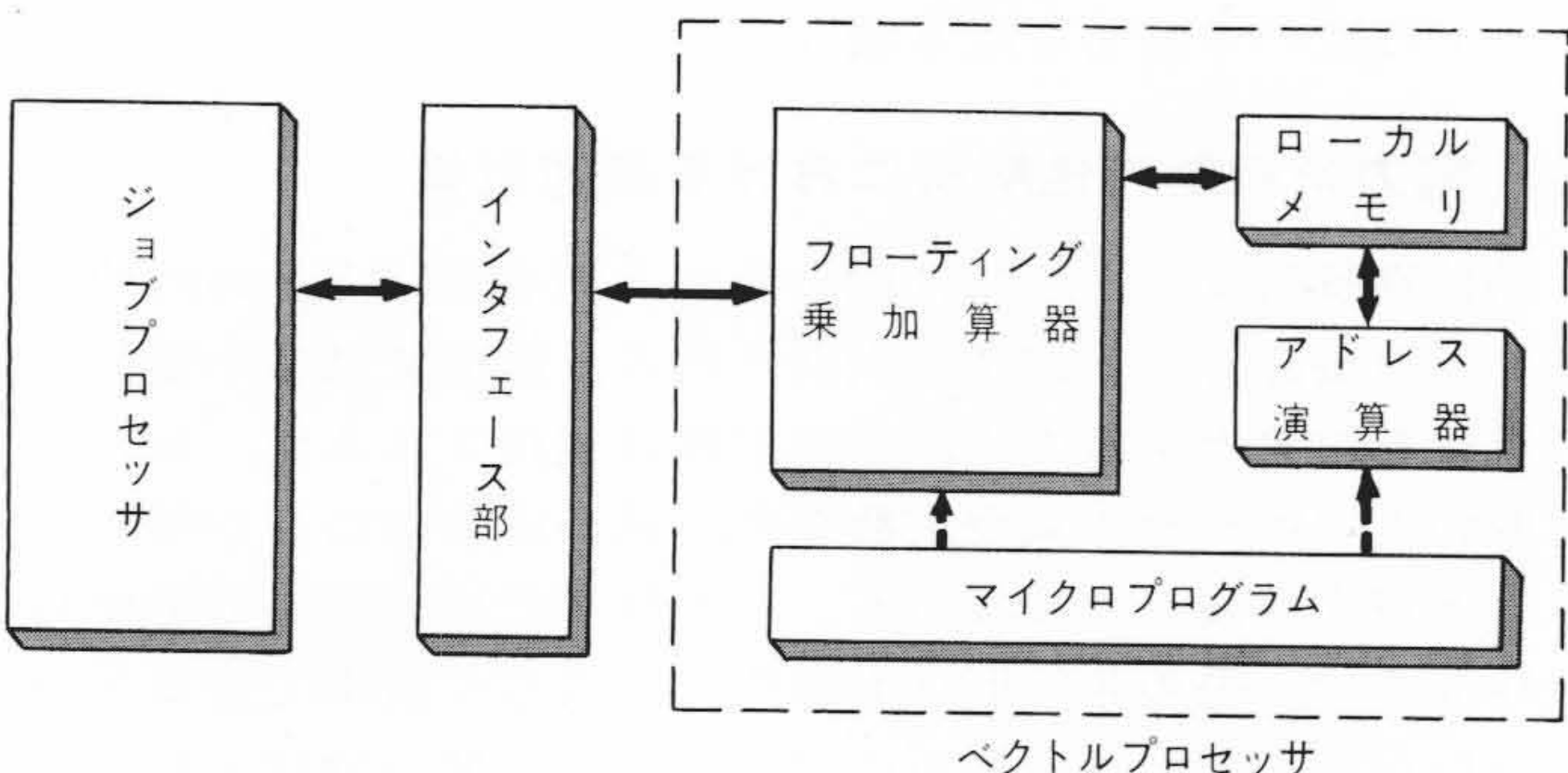


図10 内蔵形ベクトルプロセッサの構成 インデックスとデータを同時にアクセスし、スパース演算の高速化を図る。

コンピュータは、電力系統の分野には不向きといわれている²⁾。またミニコンピュータに外付けする方式のベクトルプロセッサでは、ホストコンピュータとのデータ転送が隘路となり、ベクトルプロセッサの性能を十分に発揮できない場合のあることが指摘されている。ここではこれらの課題を解決するために、日立製作所で開発した内蔵形ベクトルプロセッサについて述べる。図10にその構成を示す。ベクトルプロセッサは浮動小数点乗・加算器、データを保持するための二組みの大容量ローカルメモリ、メモリアドレスの計算を行なうアドレス演算ユニット、及びユーザーの複雑なマイクロプログラミングを可能とする大容量マイクロプログラムメモリから成り、インタフェース部を介してジョブプロセッサに接続している。このシステムではインデックスとデータを同時にアクセス可能とする二組みのローカルメモリ、及びインデックス演算能力を強化したアドレス演算器によりスパース演算の高速化を図っている。

積和演算などの標準的ベクトル演算は、命令として定義されており、これらの命令は外付形ベクトルプロセッサと異なり、データ転送のオーバーヘッド、あるいはサブルーチンコールに伴うオーバーヘッドなしに命令レベルでリンクできる。またスパース行列演算などのように、応用プログラムに特有な演算については、ユーザーがマイクロプログラミングすることによって命令を定義することができる。このように、プログラム中に通常命令と標準ベクトル命令、あるいはユーザー定義命令を混在させることによって、従来の外付方式のベクトルプロセッサでのデータ転送のオーバーヘッドがなく、高速演算を実現することができる。

スパースLU分解、あるいはスパース前進代入、後進代入などで性能評価を行なった結果では、ジョブプロセッサ単独の場合に比較し、内蔵形ベクトルプロセッサ付の場合は15~30倍程度の高速化が実現できることを確認している。

4 EMTPによる過渡現象解析

BPA(米国ボンネビル電力庁)で開発されたEMTPは、汎用過渡現象解析を目的としたもので、プログラムが一般に公開されていることから、広く利用されるようになった³⁾。電力系統の過渡現象を解析する場合、従来からある汎用回路解析プログラムと比較して、EMTPの最大の特長は発電機などの電力機器を忠実に表現できることである。EMTPを活用していくには使用上多くのノウハウが必要で、例えばサイリスタ回路の取扱いには付属回路の表現などに工夫を要する。ここではサイリスタを含む回路の代表例として直流送電系統の解析例、同期機に関する解析例、ユニバーサルマシンモデルを用いた解析例を示す。

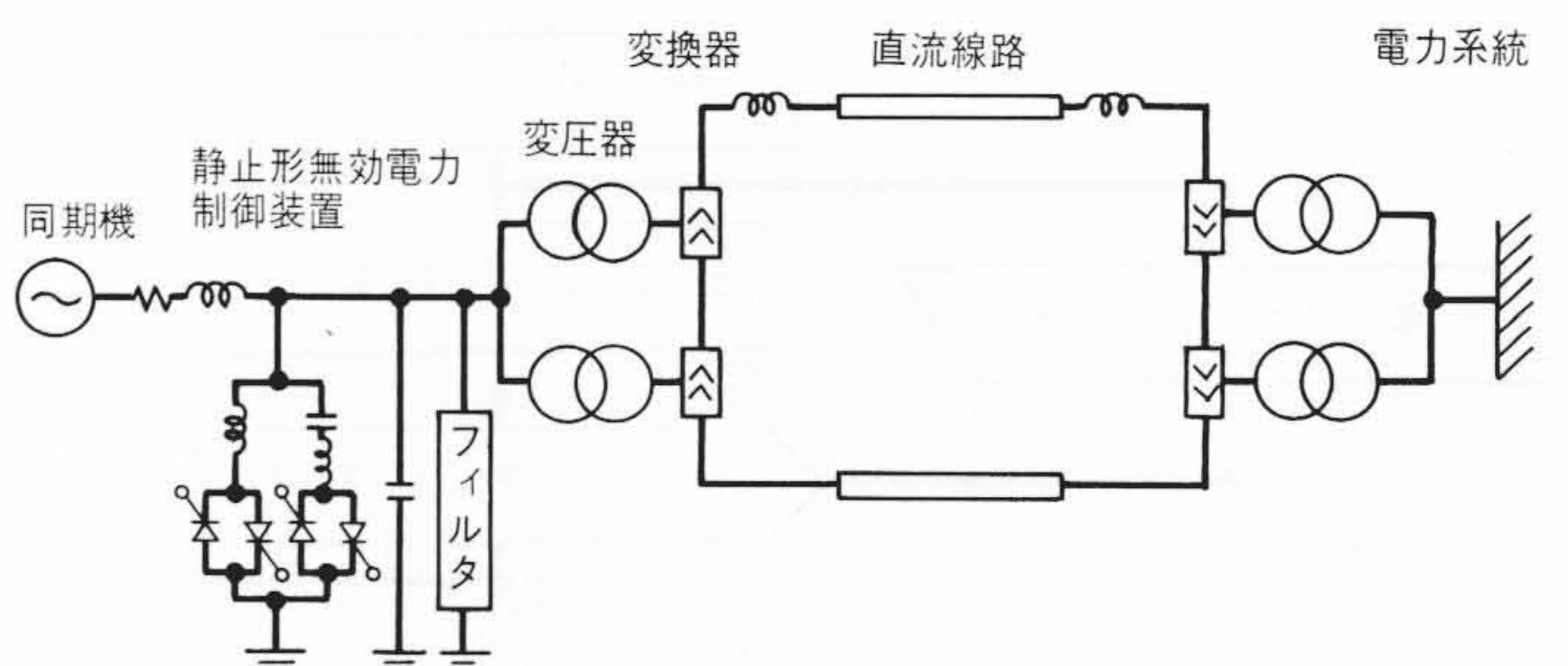


図11 直流送電モデル系統図 直流送電制御と静止形無効電力制御装置との協調制御を、EMTPにより解析する。

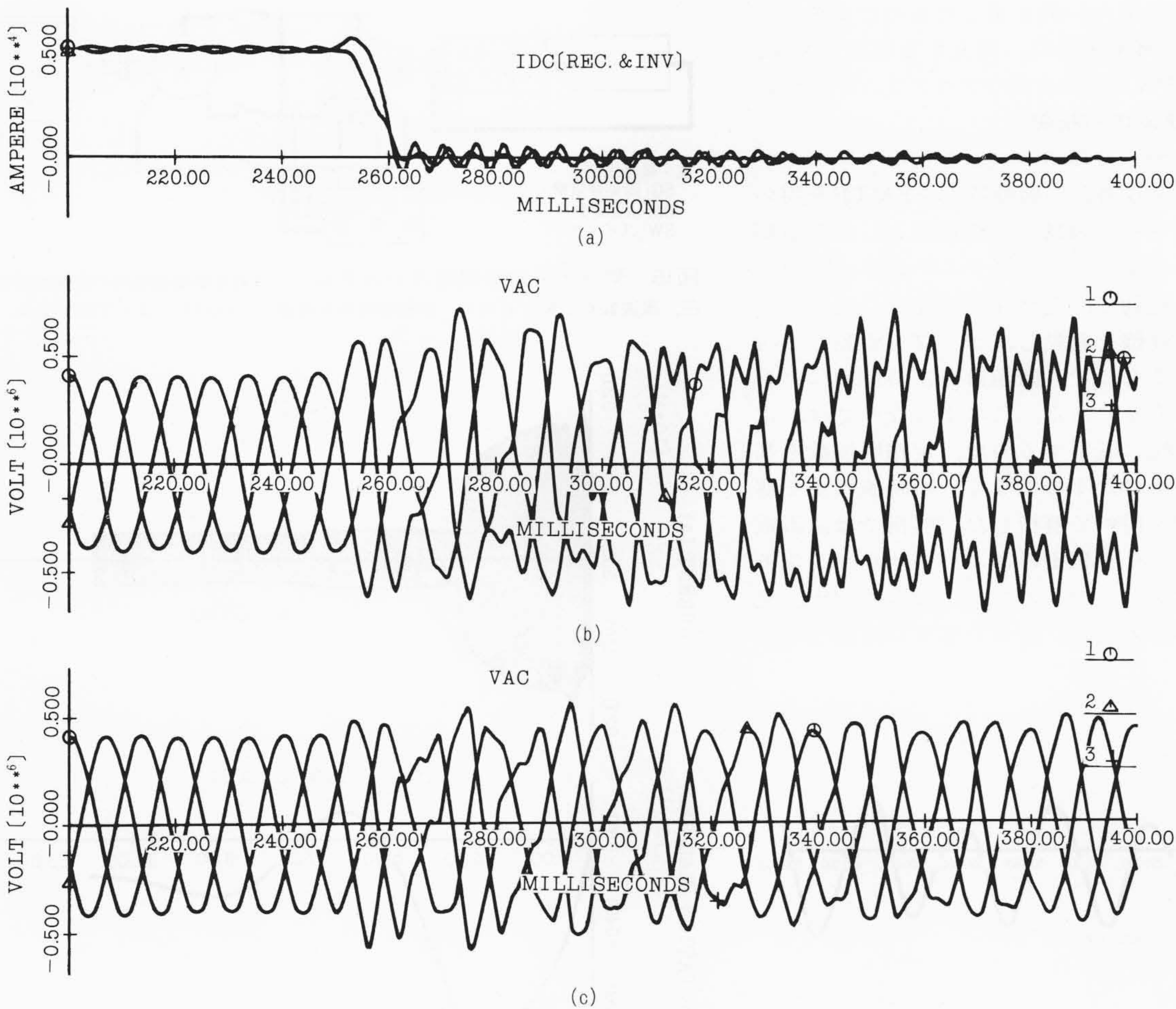


図12 EMTTPによる計算結果 静止形無効電力調整装置の制御により、交流電圧の上昇が抑制される。

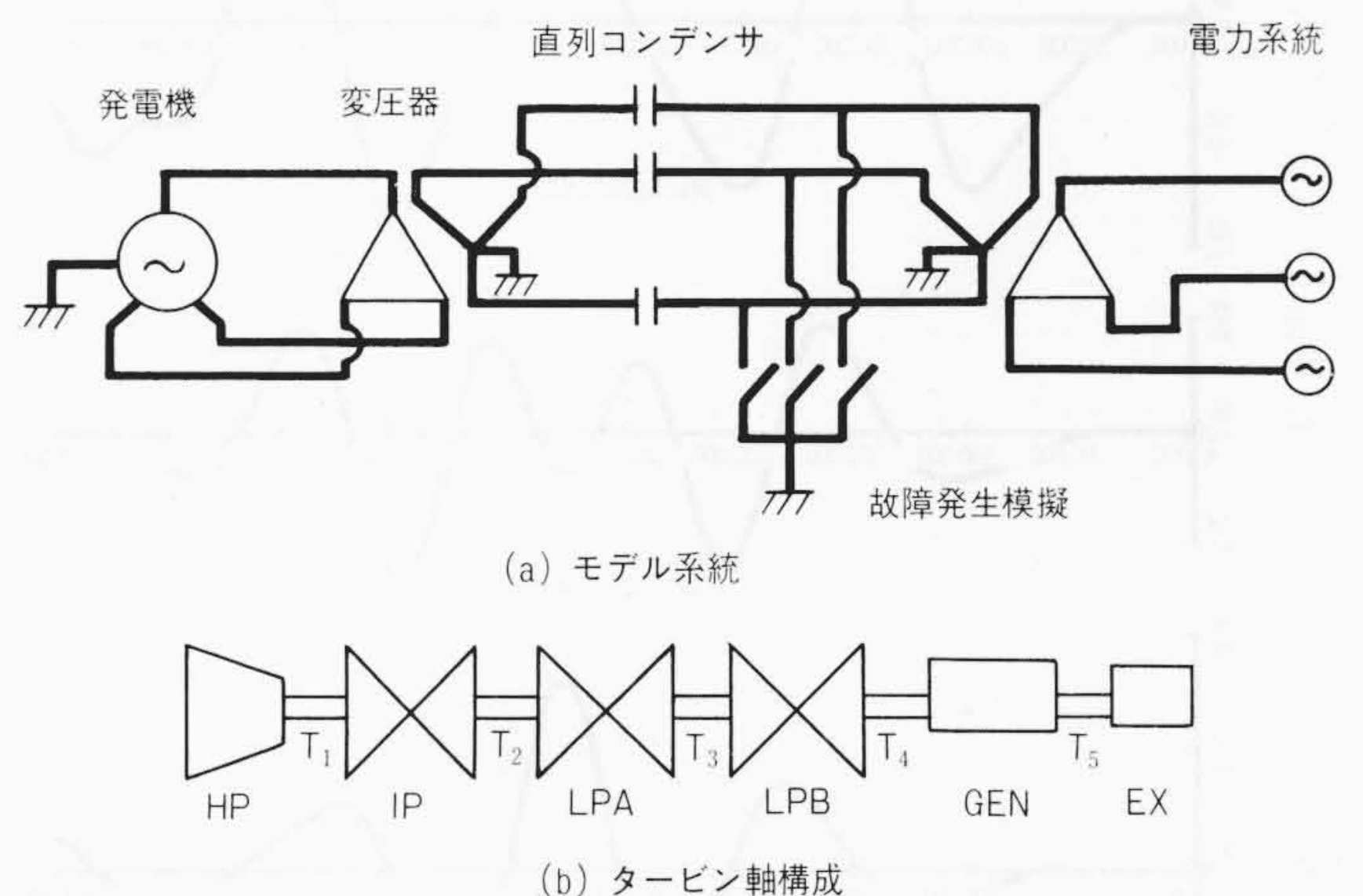
4.1 直流送電システムの解析例

直流送電システムでは、変換器動作のため交流側の電圧がひずむが、このような波形ひずみの影響まで含めた解析には瞬時値計算が必要であり、EMTTPが適している。図11は直流送電システムの一部を示したものである。一般に直流系を急停止すると送電側交流電圧が急激に上昇し、変換器用変圧器を飽和させるなどの問題を生じる。これに対してサイリスタ制御によるSVC(Static Var Compensater：無効電力制御装置)により電圧上昇を抑制することが可能である。図12は図11に示す直流系を急停止したときの過渡現象をEMTTPで計算した結果を示したものである。図12(a)に直流線路の電流を示す。同図(b)はSVCのリアクトル制御用サイリスタの点弧制御角を135度に固定したときの交流電圧波形を示し、同図(c)は同上点弧制御角を直流送電停止とともに90度に制御し、リアクトルに最大電流を流したときの交流電圧波形を示す。このようにSVCを制御することによって、電圧上昇を抑制できることが分かる。

4.2 タービン発電機の軸ねじりトルクの解析例

タービン発電機の軸系は、図13(b)に示すように高压段や低压段などの幾つかのタービン部分と発電機や励磁機などから構成されている。これらの回転体に加わる回転力あるいは制動力にアンバランスを生じると、軸系の剛性に応じた周波数特性をもつねじり振動が発生する。また、系統事故時には発電機ロータにステップ状のトルクのほか、基本周波及び2倍周波の脈動トルクが印加されることがあるため、軸系は軸のねじり固有振動周波数が、基本周波及び2倍周波を避けるように設計される。しかし、同図(a)に示すような直列コンデンサ補償系統では、回路に基本周波成分以外の回路のLC共振

電流が存在し、このために生じる脈動トルクによって軸ねじり振動が発生し、電気系と機械系の共振現象発生の可能性がある。このような現象をSSR現象(Subsynchronous Resonance)と呼んでいる。SSR現象の解析では基本周波成分以外の成分を計算する必要があり、瞬時値計算を行なうEMTTPが適している。図14は図13(a)に示すモデル系統で、線路故障を模擬して発電機に外乱を印加したときの軸ねじりトルクを



注：略語説明
 HP(高压タービン) LPB(低压タービン)
 IP(中圧タービン) GEN(発電機)
 LPA(低压タービン) EX(励磁機)

図13 直列コンデンサ補償系におけるSSR現象解析 直列コンデンサと線路の共振電流による発電機脈動トルクと、軸系のねじり振動の挙動を解析する。

EMTPによって計算した結果の一例を示したものである。

また、軸ねじりトルクは再閉路時に、増大する現象もあり、このような解析でもEMTPは非常に有用なプログラムと言える。

4.3 炉心冷却電源システムの解析例

原子力発電所での緊急炉心冷却ポンプを非常用ディーゼル発電機によって緊急起動する場合の始動特性をEMTPを用いて解析した例について述べる。図15に解析対象とした緊急炉心冷却用電源システムを示す。電源システムの動作は緊急時にディーゼルエンジンを起動し、定格速度に達した後、スイッチを投入して、誘導電動機を起動し、ポンプを駆動して冷却水を炉心にスプレーするもので、課題は所定時間内にポンプの起動が完了できるか否かにある。このような系では、電動機起動時に周波数が大幅に低下するので、定格周波数を基準にした実効値による解析では十分でなく、瞬時値による解析が必要であり、EMTPを用いて解析した。解析では誘導電動機は二重かご形としこれをEMTPのユニバーサルマシンモデルで表現した。その他ディーゼルエンジンにはガバナ、発電機には自動電圧調整器を考慮し、全系を忠実に模擬した。

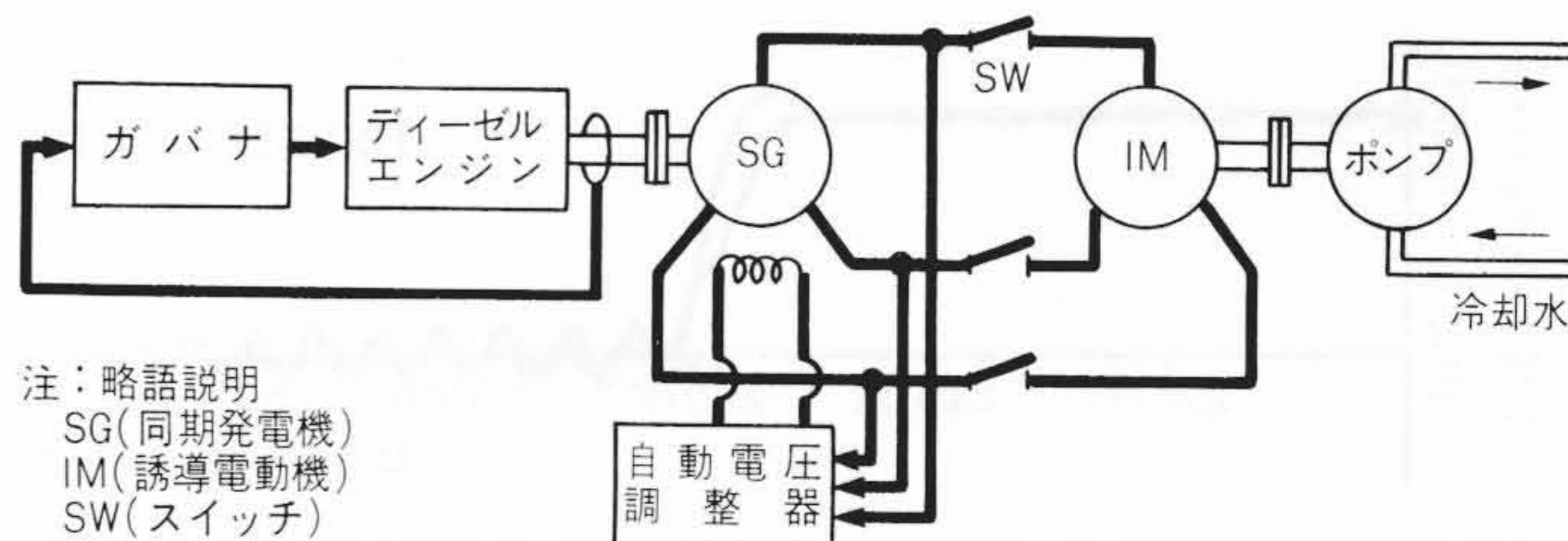


図15 緊急炉心冷却用電源システム 誘導電動機起動時に発電機の電圧、周波数が変動するので、各種制御系を考慮してEMTPによって解析する。

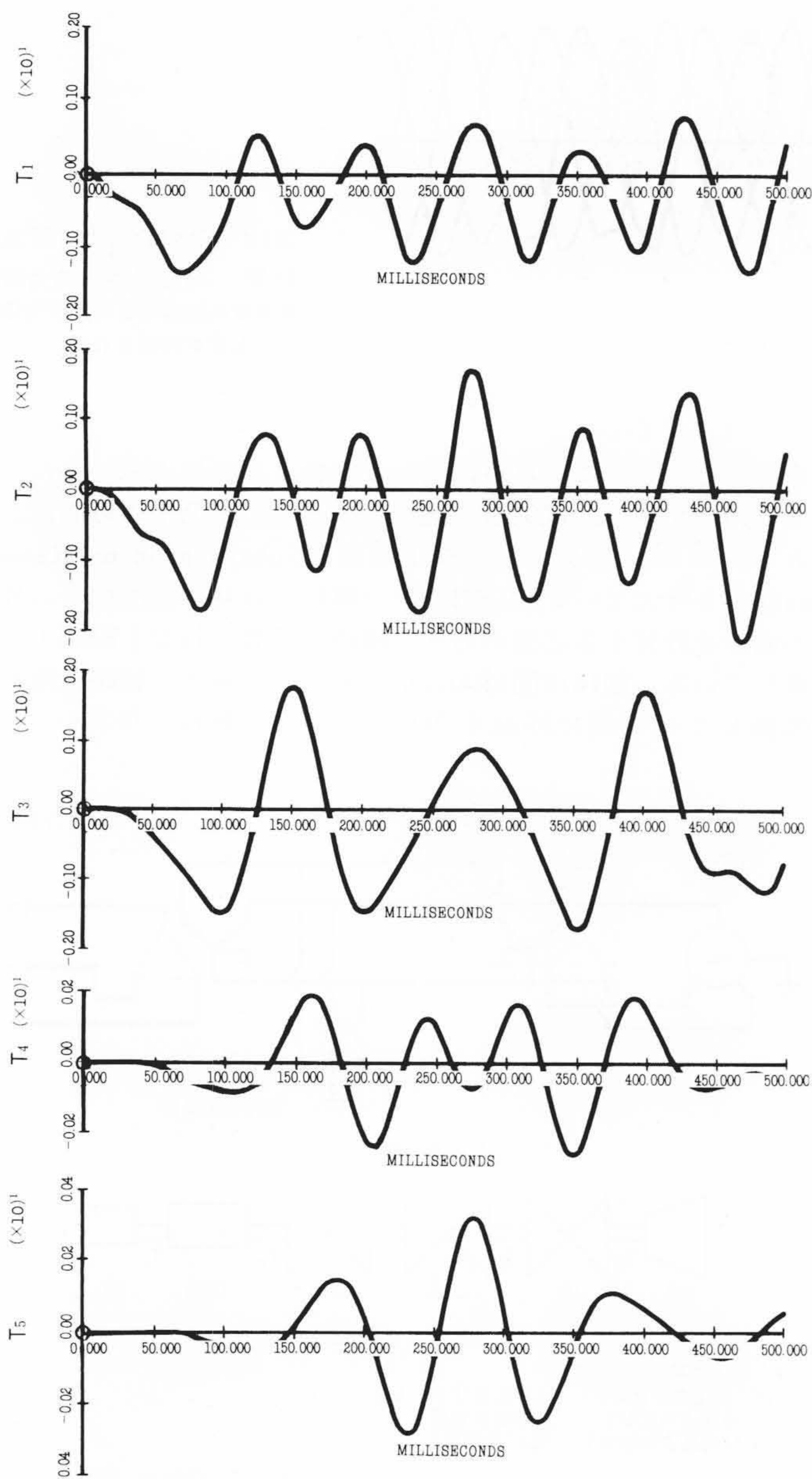


図14 軸ねじりトルクの計算例 軸ねじりトルクの最大値や振動の減衰状況などが解析できる。

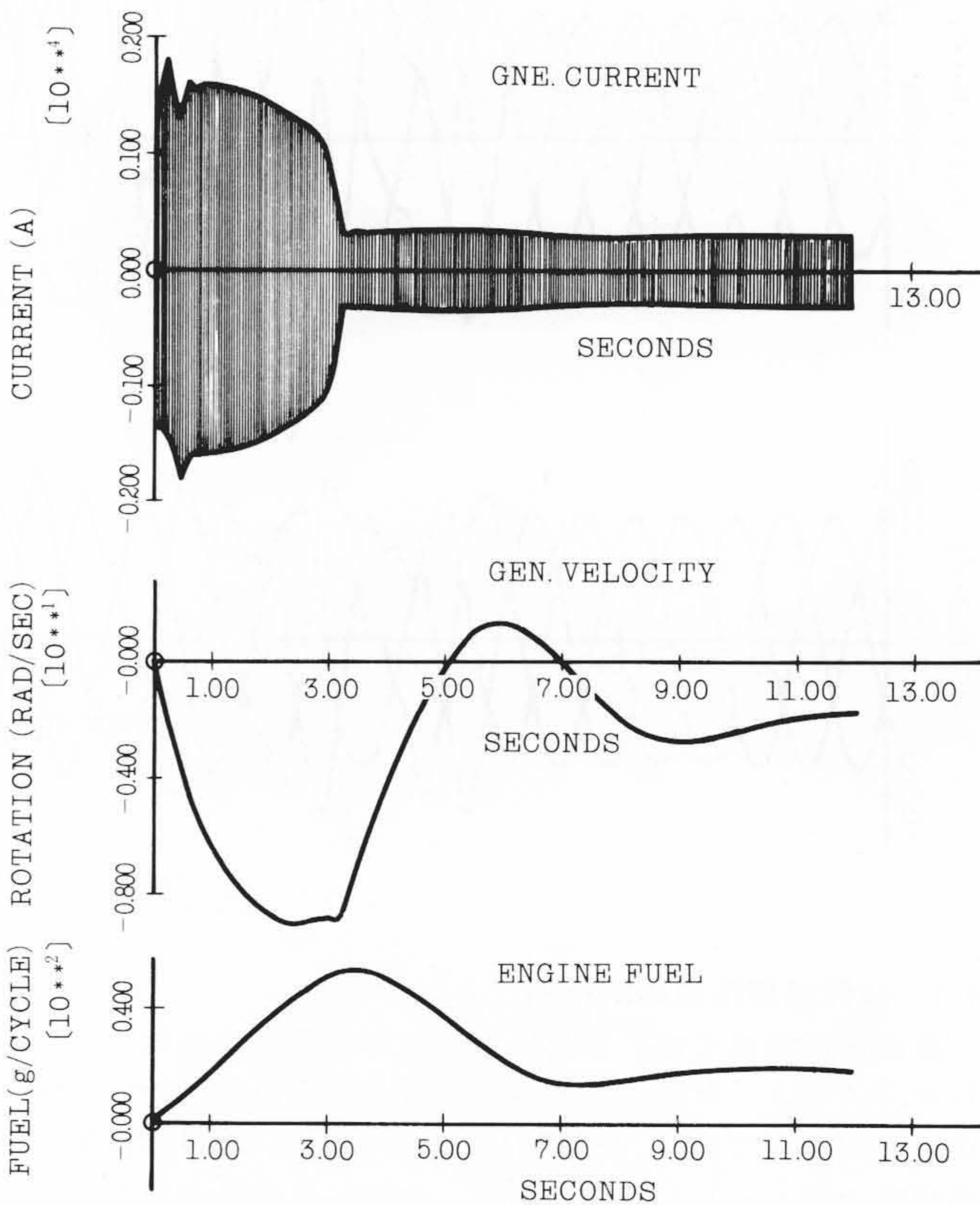


図16 起動時の過渡現象 ガバナなどの各種制御系を含めた総合シミュレーションが可能である。このような解析により機器定数や制御系定数を決定できる。

スイッチ投入後の過渡現象を計算した結果を図16に示す。このような解析により起動時間を満足できる機械定数、制御系定数などを決定することが可能となる。

5 結 言

電力システムの解析に関し、最近のトピックスとして、取扱いやすさの観点からグラフィックディスプレイを用いた対話形システム解析システムの概要を、高速演算の観点から専用プロセッサを用いた高速計算の概要を述べた。また、高精度で計算できる汎用過渡現象解析プログラムEMTPの解析例を紹介し、その有用性を示した。今後ともシステム解析の精度、速度、取扱いやすさの向上を追求していきたい。

参考文献

- 1) 後藤, 外: 負荷の動特性を考慮した電力システムの動的過渡安定度解析手法, 電気学会論文誌B (昭52-11)
- 2) Session E1: Vector and Parallel Processors, Proc. 1979 PICA Conf. IEEE pp. 315~350
- 3) 雨谷: 汎用過渡現象解析プログラムEMTP, 電気学会雑誌, 102巻, 6号(昭57-6)