

電力系統シミュレータ

Electric Power System Simulator

梅津 照裕*
Teruhiro Umezu

三田 勝茂**
Katsushige Mita

中野 修一**
Shūichi Nakano

要 旨

電力中央研究所 技術研究所 電力系統シミュレータは、制御用計算機 HITAC-7250 を中心とした電力系統のオンライン計算機制御実証研究用シミュレータで、電力中央研究所と日立製作所との共同研究により開発したもので世界でも例のない装置である。

本文では、シミュレータシステム全体の構成、ソフトウェアなどについて述べている。

1. 緒 言

最近、電力系統の総合自動化が進められてきているが、系統が複雑化してきたため、人為的な操作ではその限界に達している状況であり、昭和40年のニューヨーク大停電事故などの経験もあって電子計算機による系統操作を系統運用にとりいれて大幅に信頼度の向上を図ろうという考え方が一般的になりつつある。

すでに有効電力の制御 (ELD) および電圧無効電力制御 (VQC) については電子計算機による自動化が一部実施されているが、総合的な給電自動化の完成には信頼度向上の見地から、より進んだ形の自動制御システムが要求されている。しかし、このような電力系統の総合運用自動化装置を開発するに当たっては、実系統で直接実証することは困難である。とくに事故時の運用操作などの系統自動操作方式の研究はほとんど不可能に近い。このため、実系統に代わってこれらの実証研究が可能な模擬装置の開発が望まれていた。電力系統シミュレータはこの目的に沿って、電力中央研究所と日立製作所の共同研究により開発したもので、世界でも例のない大規模な研究設備である。本設備の構想についてはすでに発表⁽¹⁾⁽²⁾されているが、本文ではこの構想にもとづいて製作した設備の概要と、本設備により開発したオンライン制御用の電圧無効電力制御方式 (VQC)、事故後系統操作方式 (SEO: Power System Emergency Operation) などについて述べる。

2. シミュレータの構成と機器の概要

2.1 構 成

図1に電力系統シミュレータの構成を示す。大別すると電力系統の性能を模擬した模擬装置と、人間の頭脳のように電力系統の運用操作を決定する機能をもった論理判断指令装置、これら両者を結びつける結合装置ならびにシステム全体を監視する中央監視盤からなっている。模擬装置は、交流模擬送電線と動的交流計算盤からなっているが、前者は電力系統の過渡的特性を、後者は電力系統のダイナミック特性をより実際に近い形で模擬したものである。将来は図1に点線で示すように、直流模擬送電線、アナログ計算機、情報伝送模擬装置 (今回は小規模試作装置を製作)、状態表示盤などと結合することも考慮されている。

図2はシミュレータ室の全景である。ここには論理判断指令装置、結合装置、動的交流計算盤、中央監視盤が設置されており、中央監視盤からの操作でシステム全体の制御ができるようになっている。

このシミュレータは研究項目に応じて論理判断指令装置と交流模擬送電線、または動的交流計算盤を結合し、オンライン計算制御の

* 電力中央研究所 工学博士

** 日立製作所 国分工場

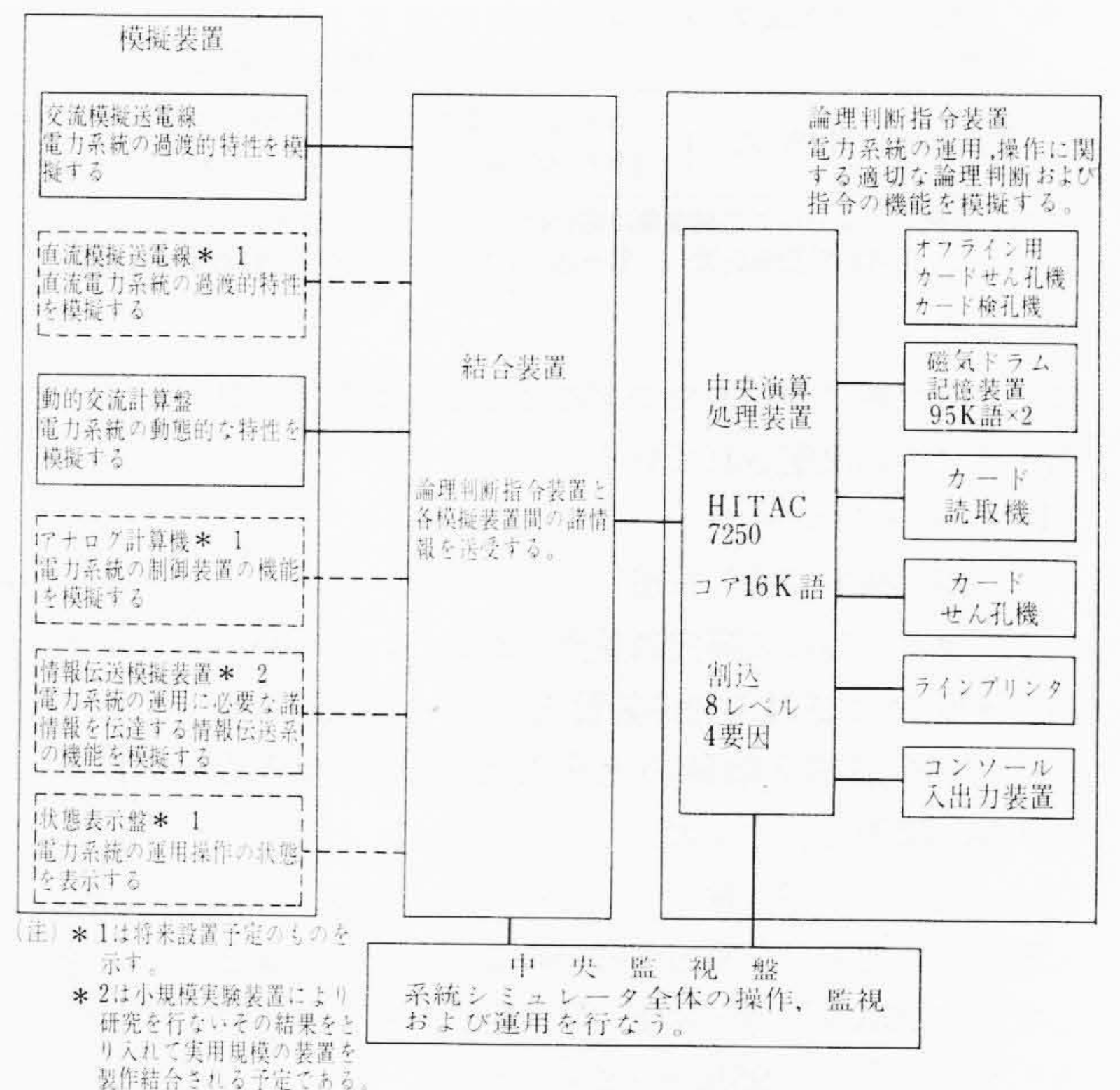


図1 電力系統シミュレータの構成

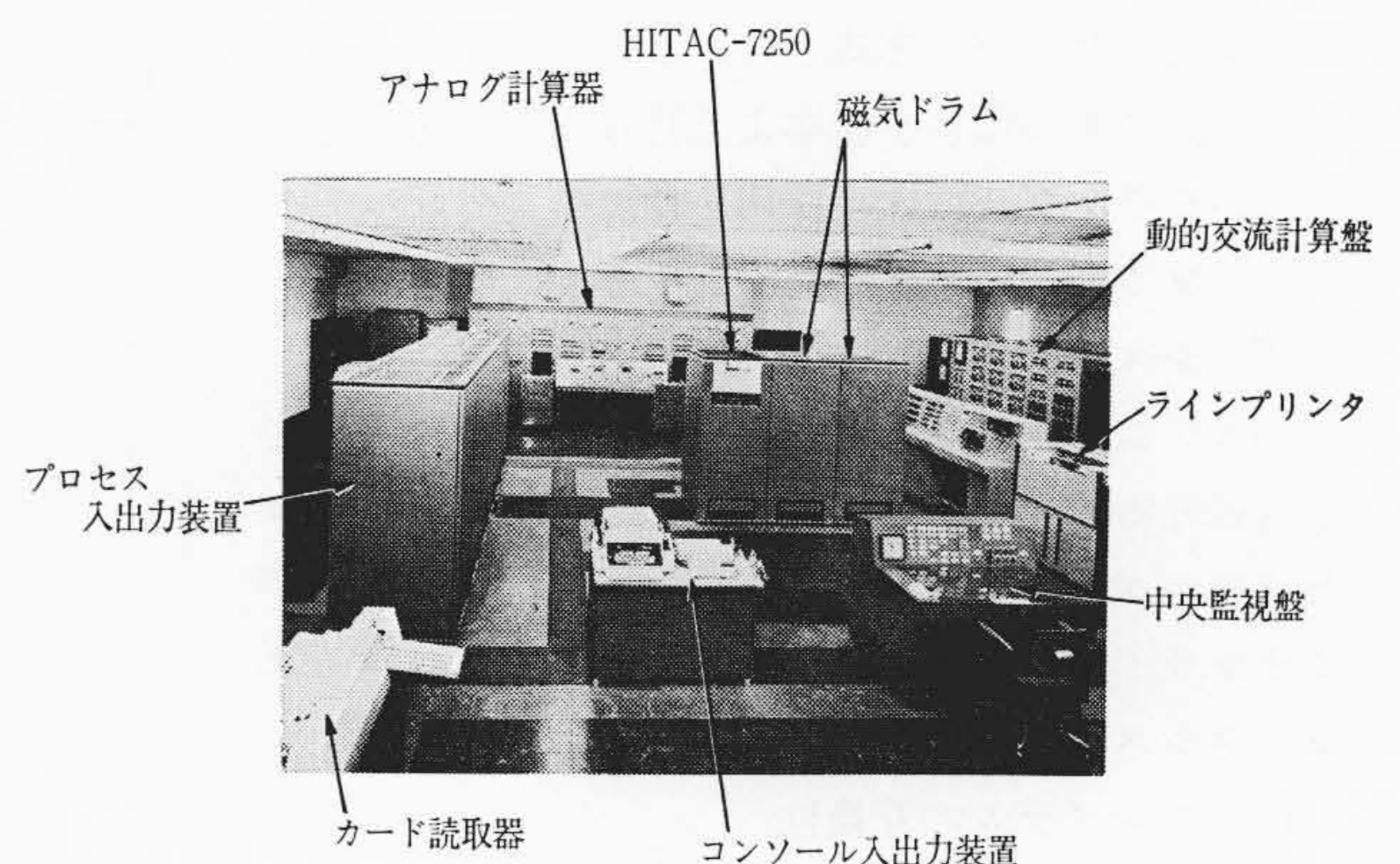


図2 シミュレータ室の全景

実証を行なうことが目的であるが、論理判断指令装置単独でオフラインの技術計算を行なうこともできる。研究項目とこれを実施する場合の機器構成は表1のとおりである。

2.2 機器概要

2.2.1 論理判断指令装置

論理判断指令装置は図1に示すように制御用計算機 HITAC-7250 を中心として磁気ドラム、カード読取機、カードせん孔機、ラインプリンタ、コンソール入出力装置、オフラインカードせん孔、検孔機などから構成された。この構成はハードウェアならび

研究項目		オンライン オフライン の別	計 算 内 容	系統シミュレータ使用時の構成		
大 項 目	中 項 目			①	①+④	①+⑤
(1) 運 用 計 画	(a) 長期運用計画	オフライン	ELD計算が主体 信頼度、経済性、諸制約を含む論理計算 予測計画、併列台数、ELD、潮流チェックなどの計算 潮流計算を主体とした最適化計算	○		
	(b) 火力の定期点検計画			○		
	(c) 翌日の発電計画			○	○	
	(d) 翌日の電圧無効電力計画			○	○	
(2) 系 統 制 御	(a) AFCとEDCの協調制御	オンライン	最適制御方式の選定		○	
	(b) 電圧無効電力制御				○	○
	(c) ループ系潮流制御				○	○
(3) 系 統 操 作	(a) 定常時自動操作 (b) 事故時自動操作	オンライン	予測計算、簡易ELD計算、簡易潮流計算など 各種継電器動作後の供給障害軽減対策の計算 (系統分離、負荷制限、自動復旧など)		○	○
(4) 記録と状態監視	(a) 系統状態表示盤の試作	オンライン				
(5) 運用評価		オフライン	発電統計、運用実績の処理、実用実績の評価など			
(6) 系統構成と信頼度の 協調	(a) 大事故対策との関連	オフライン	総合的な計算で各種計算プログラムが含まれる。 安定度計算、潮流計算が含まれる。	○	○	
	(b) 供給支障対策との関連			○	○	
(7) 情報伝送方式	(a) 自動操作と高速符号伝送	オフライン	伝送方式、符号変換			○
	(b) 信頼性向上対策	オンライン	符号誤りのチェック方式			○

(注) 系統シミュレータの構成欄の略称はつぎのとおりである。

①：論理判断指令装置 ①+④：論理判断指令装置と動的交流計算盤との結合使用 ①+⑤：論理判断指令装置と模擬送電線との結合使用

にソフトウェアの両面でつぎのような基本条件を具備するように決定されている。

(1) ハードウェア
(i) 制御用計算機の採用

オンライン制御の研究に重点をおいているため、演算速度および外部記憶装置とのデータ転送速度も速く、外部割込機能の充実した制御用計算機HITAC-7250を採用した。

(ii) 記憶容量

表1の研究項目を実施するのに必要な記憶容量としてコア16K語(将来32K語に増設)外部記憶容量として磁気ドラム95K語×2とした。

(iii) プログラム入出力処理

研究用であるので、ひん繁なプログラムの修正、改良に便利なカード方式とし、またプログラムリストや計算結果の印字を能率よく行なうため印字速度の速いラインプリンタを採用した。

(2) ソフトウェア

(i) システムプログラム

システムプログラムは、オンライン制御用として割込処理機能とプロセス入出力機能の充実したプロセスモニタシステム(PMS)オフライン計算ならびにオンラインプログラム作成用としてノンプロセスモニタシステム(NPMS)をもたせた。

(ii) プログラムの互換性

主要他機種との間でプログラムの互換性があるよう考慮した。

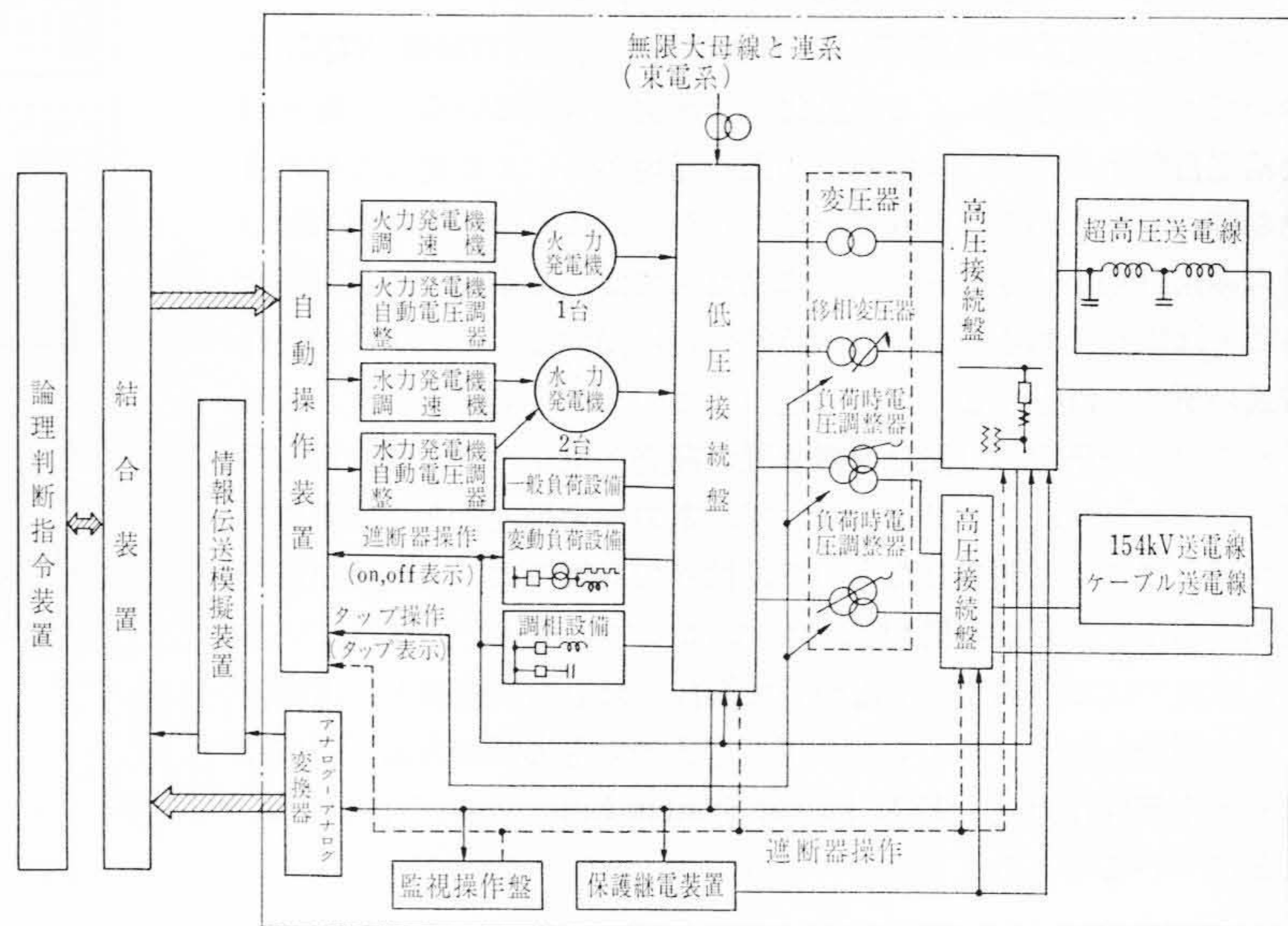
(iii) フォートラン

フォートランは複素数演算も可能である。
実系統用の自動給電計算機システムでは、一度プログラムを開発し、運転にはいれば、それほどひん繁に修正されないゆえ、カードせん孔機は不要で、オフラインのカードせん孔、検孔機も事務用計算機と共用できる。その反面、日常運転記録用として数台のロギング・タイプライタが必要になる。

2.2.2 交流模擬送電線

交流模擬送電線は発電機、同期調相機などの回転機器、送電線、

表2 交流模擬送電線の構成



設 備	内 容	設 備	内 容
線 路	架空 { 275 kV 模擬 600 km * 154 kV 模擬 250 km	負荷設備	60 kW 2台* 22.5 kW, 10 kW*, 7.5 kW 各1台*
	ケーブル 57 km		変動負荷発生装置 2台
発 電 機	水力 { 22.5 kVA 1台 30 kVA 1台	保 護 継電装置	直接接地系用(トランジスタ形) 4端局* 抵抗接地系用(トランジスタ形) 6端局* 系統分離用 4端局*
	火力 45 kVA 1台		自動電圧調整器用 3組*
			調速機用 3組*
変 圧 器	送電用 3台	自 動 操作装置	負荷時電圧調整器用 2組*
	受電用 3台 負荷時電圧位相調整器付 1台* (移相変圧器)		負荷時電圧位相調整器用 1組*
調相設備	電力用 { 24 kVA 1台 コンデンサ 3 kVA 6台*	計 測 変換装置	遮断器操作 14組*
	リアクトル { 24 kVA 2台 6 kVA 1台 6 kVA 6台*		電力用 12組*
同期調相機	18 kVA 1台		無効電力用 12組*
			電圧用 10組*
			電流用 13組*
			電圧位相角用 4組*

(注) * 印は今回新設分

変圧器など電力系統を構成する諸単位を、実系統にきわめて近い特性で模擬した装置である。電力中央研究所には従来から154kV架空送電線250km模擬用線路(使用電圧3.3kV)、ケーブル57km模擬用線路、発電機、変圧器などの設備一式があったが、今

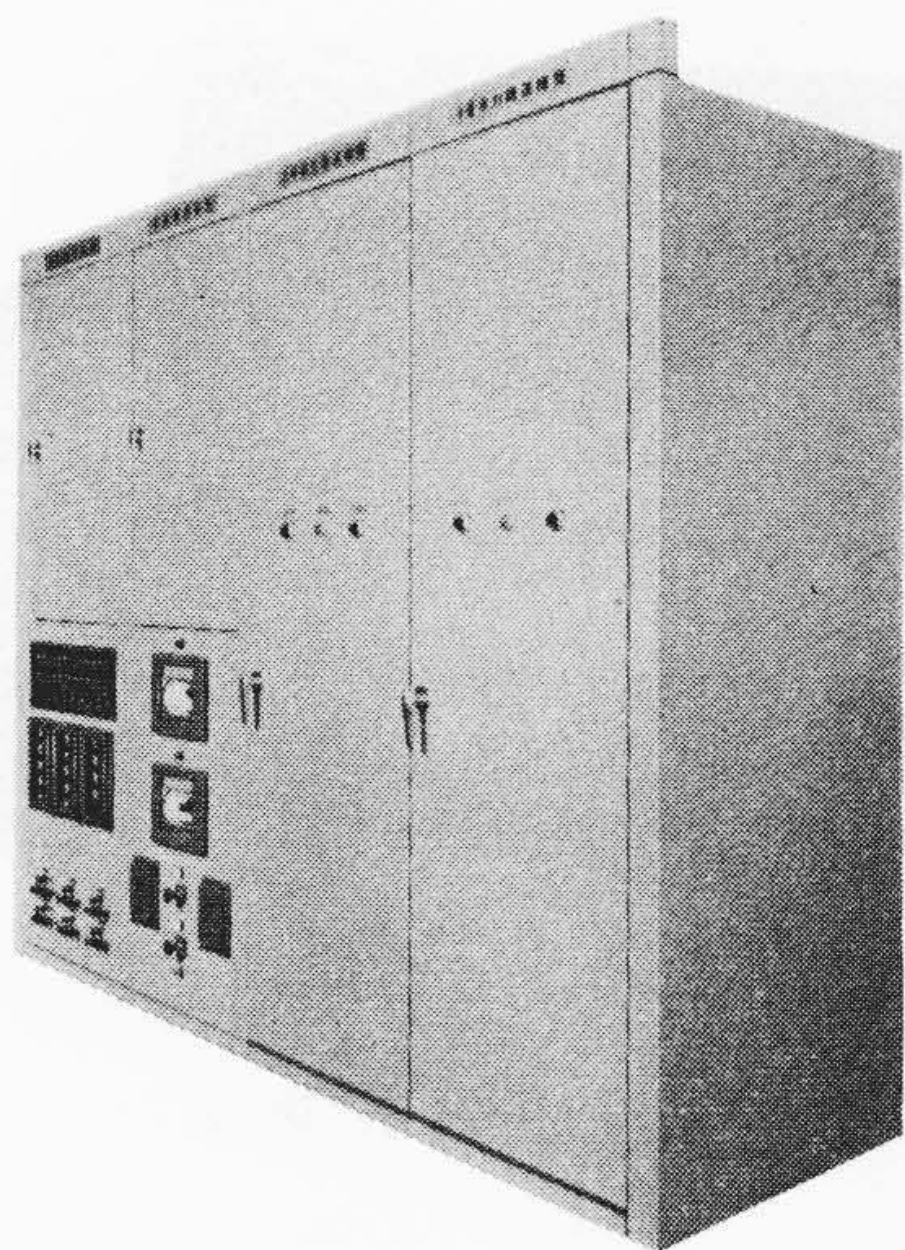


図3 変動負荷発生装置および調速機

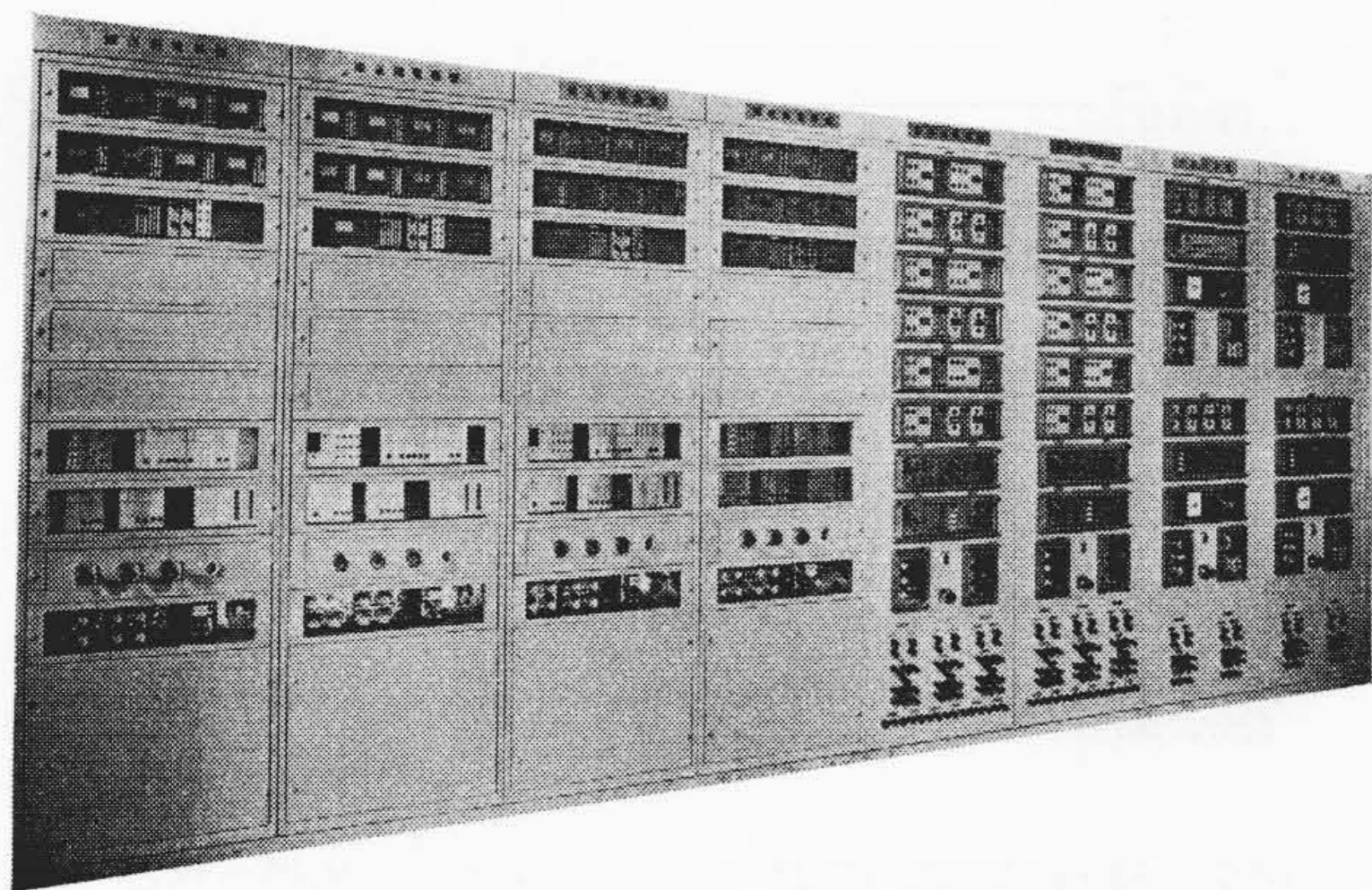


図4 保護継電装置

回新たに 275 kV 超高压送電線模擬用線路，その他既設設備自動化のための関連設備を増設補強した。表 2 は本設備の構成を示したものである。* 印が今回の増設分を示す。概要は下記のとおりである。

(1) 模擬送電線増設設備

一式—275 kV 超高压模擬送電線路

275 kV 超高压並行 2 回線送電線 600 km 相当分は模擬可能 (500 kV 架空送電線も模擬可能) なもので 20 km 単位 L 形等価回路で構成している。

2 組—変動負荷発生装置

負荷の値をプログラム設定によりランダムに変更し，実系統の負荷変動を模擬するものである。図 3 はその外観である。

一式—保護継電装置

交流模擬送電線上で発生した事故はまず保護継電装置で検出除去し，その後の事故波及防止操作などを論理判断指令装置が行なう。保護継電装置は，図 4 に示すように実系統と同じ規模のものであるが装置は全トランジスタ化した保護リレーおよび論理回路よりなり超高压直接接地は 1 Hz 遮断の高性能のものである。

超高压直接接地系用：距離方向比較搬送継電方式

抵抗接地系用：短絡距離継電方式，地絡電力方向継電方式

系統分離用：同期はずれ検出方式，周波数降下検出方式

一式—調相設備

電力用コンデンサ 3 kVA 6 台，リアクトル 6 kVA 6 台から構成されている。

2 台—水力発電機調速機

発電機の色度および出力調整を行なうもので論理判断指令装置

表 3 動的交流計算盤の構成

単位機器名	単位数	機能および規定
(1) 主 発 振 器	1	水晶発振器使用 (3980 Hz)
(2) 発 電 機 単 位	18	電力，無効電力および電圧自動調整可能
(3) 負 荷 単 位	30	自動調整器付，系統周波数効果の加味が可能， なお負荷単位用オートトランスは変圧器単位としても使用可能
(4) 小 線 路 単 位	64	
(5) 大 線 路 単 位	8	
(6) π 形 線 路 単 位	20	
(7) 小 容 量 単 位	36	
(8) 大 容 量 単 位	18	
(9) 直 列 容 量 単 位	6	
(10) 調 相 容 量 単 位	10	自動電圧調整器付，容量の自動調整可能
(11) 変 圧 器 単 位	18	
(12) 自動変圧器単位	12	タップ自動切換装置付
(13) 移相変圧器単位	2	タップ自動切換装置付
(14) 回路開閉スイッチ	120	自動開閉装置付 (論理判断指令装置からの自動開閉可能なスイッチは 30)
(15) 記 録 計	3	レコーダ 1 個は 6 要素で電力，位相角周波数変化の記録が可能
(16) ジ ャ ッ ク 盤	一式	
(17) 主 計 測 机	一式	電圧，電力，無効電力，電流，位相角要素用メータ 発電機および負荷の運転基準電圧，電力無効電力の設定 機器線路の自動開閉操作シーケンスの設定等
(18) 電 源	一式	

からの自動操作指令により出力や速度の調整が可能である。

(2) 自動化関連装置

一式—計測変換装置

交流模擬送電線のアナログ情報 (模擬系統上の電力，無効電力，電圧，電流など) を交流から直流に変え，結合装置を経て論理判断指令装置に読込むための変換装置である。

一式—自動操作装置

論理判断指令装置から結合装置を経て交流模擬送電線へ送られる信号をうけ交流模擬送電線諸機器 (CB, GOV, AVR, LRC など) を自動操作するものである。

2.2.3 動的交流計算盤

動的交流計算盤は電力系統を実際に近い規模で模擬して電力潮流や故障時の問題を研究するための装置であるが，本シミュレータ用のものは次にのべるような自動操作方式である。

(1) 論理判断指令装置から結合装置を通じて，発電機，調相設備，負荷時電圧調整器，遮断器などを自動操作する。

(2) 論理判断指令装置から結合装置を介して計測呼出信号を出しモデル系統上の各点を選択して計測アナログ情報を入力する。また調相設備，負荷時電圧調整器，遮断器などの情報はデジタル入力として読込むことができる。

(3) 実際の電力系統をより適確に模擬するよう発電機のダンピング効果や，負荷の周波数特性を加味することができる。

(4) 論理判断指令装置と結合して長時間使用しても装置の安定度や信頼度が低下しないように全トランジスタ化してある。

表 3 は動的交流計算盤の構成を示したものである。この装置は電力中央研究所から横河電機製作所に発注，製作された。

2.2.4 結合装置 (P/I)

結合装置は，論理判断指令装置と動的交流計算盤，交流模擬送

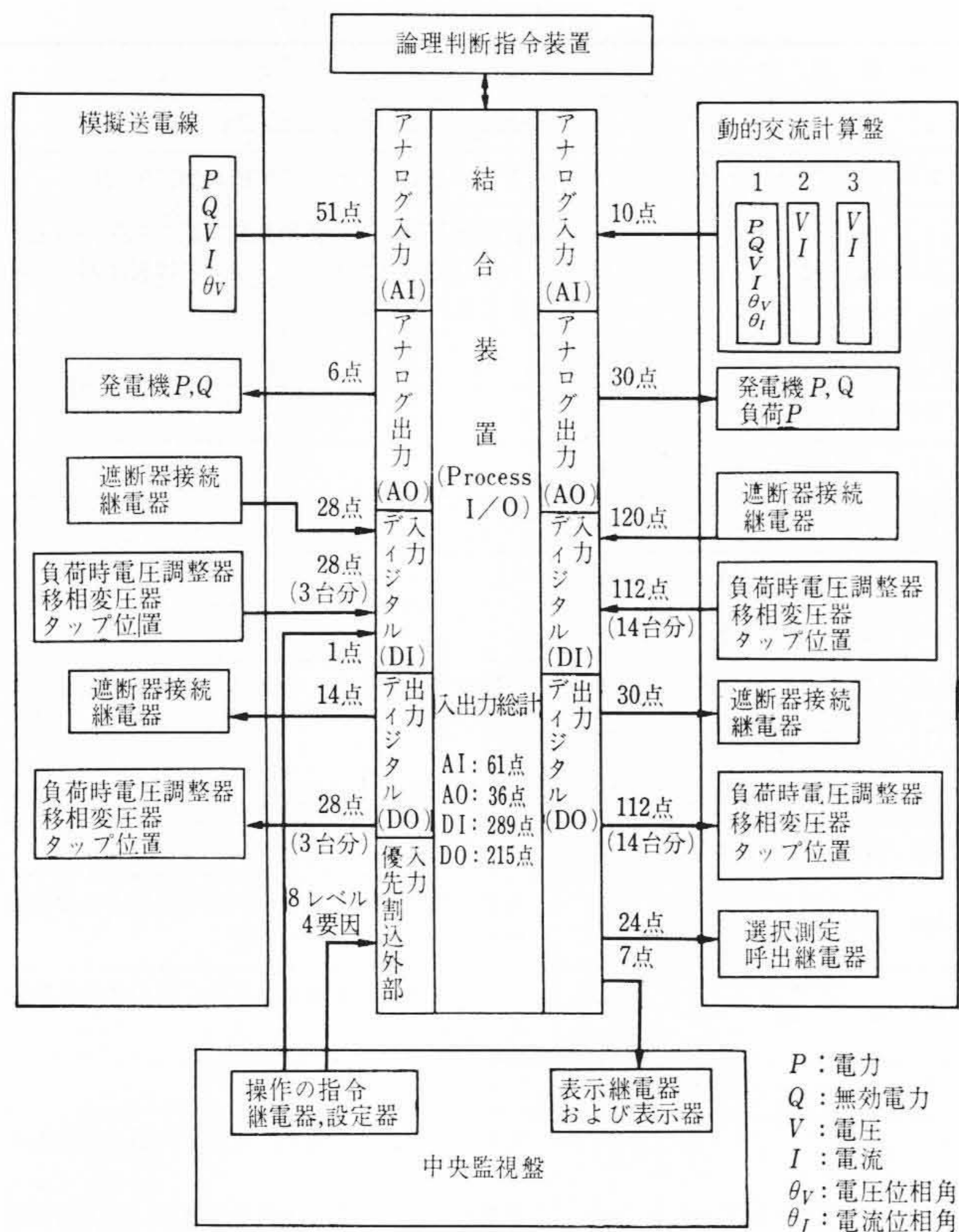


図5 結合装置の構成

電線の間に立って、両者の情報、信号を結合するための装置で、模擬電力システムに対してはアナログ入力(AI)、アナログ出力(AO)、デジタル入力(DI)、デジタル出力(DO)の四つの情報を送受し、論理判断指令装置に対しては30kバイト/秒(1バイトは8ビット)の転送速度で情報を送受するものである。図5は結合装置の構成を示したものでおまな仕様は次のとおりである。

(イ) アナログ入力

入力 DC $\pm 5V$, 走査速度 最高 5,000 点/秒
AD 速度 50 μs /点

(ロ) アナログ出力

出力 DC 0~20 mA, 送出速度 最高 2,500 点/秒
DA 速度 100 μs /点

(ハ) デジタル入力

入力 リレー接点 走査速度 最高 5,000 点/秒

(ニ) デジタル出力

出力 半導体接点出力 送出速度 最高 2,500 $\times$ 16 点/秒

2.2.5 中央監視盤

中央監視盤は中央集中監視方式によって系統シミュレータ全体の保守、運用、監視、操作を行なうもので、図6は外観であるがつぎのようなオペレーション、メンテナンスの機能をもたせている。

(イ) 系統シミュレータの起動、停止操作

(ロ) システム各部の動作確認

(ハ) システム各部の結合状態の変更とその確認

(ニ) システム故障に対する故障範囲(ブロック)表示

本装置は必要最小限の情報だけを厳選し、システム内のグループ別の代表情報を指示する考え方をとりいれて製作されている。

3. アプリケーション・プログラム

3.1 アプリケーション・プログラムの概要

アプリケーション・プログラムは今後も共同研究の形で開発されていくが、今回系統シミュレータシステム全体の総合動作試験のた

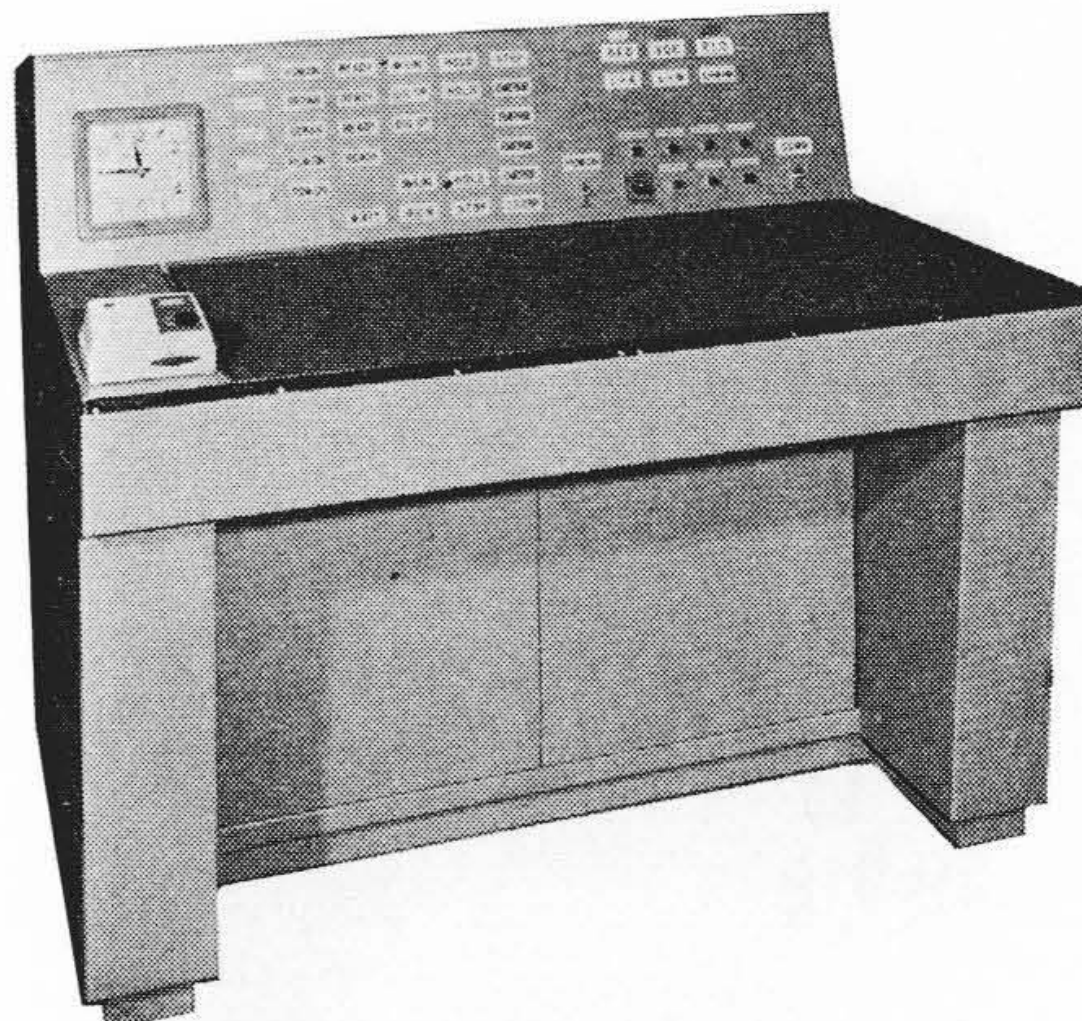


図6 中央監視盤

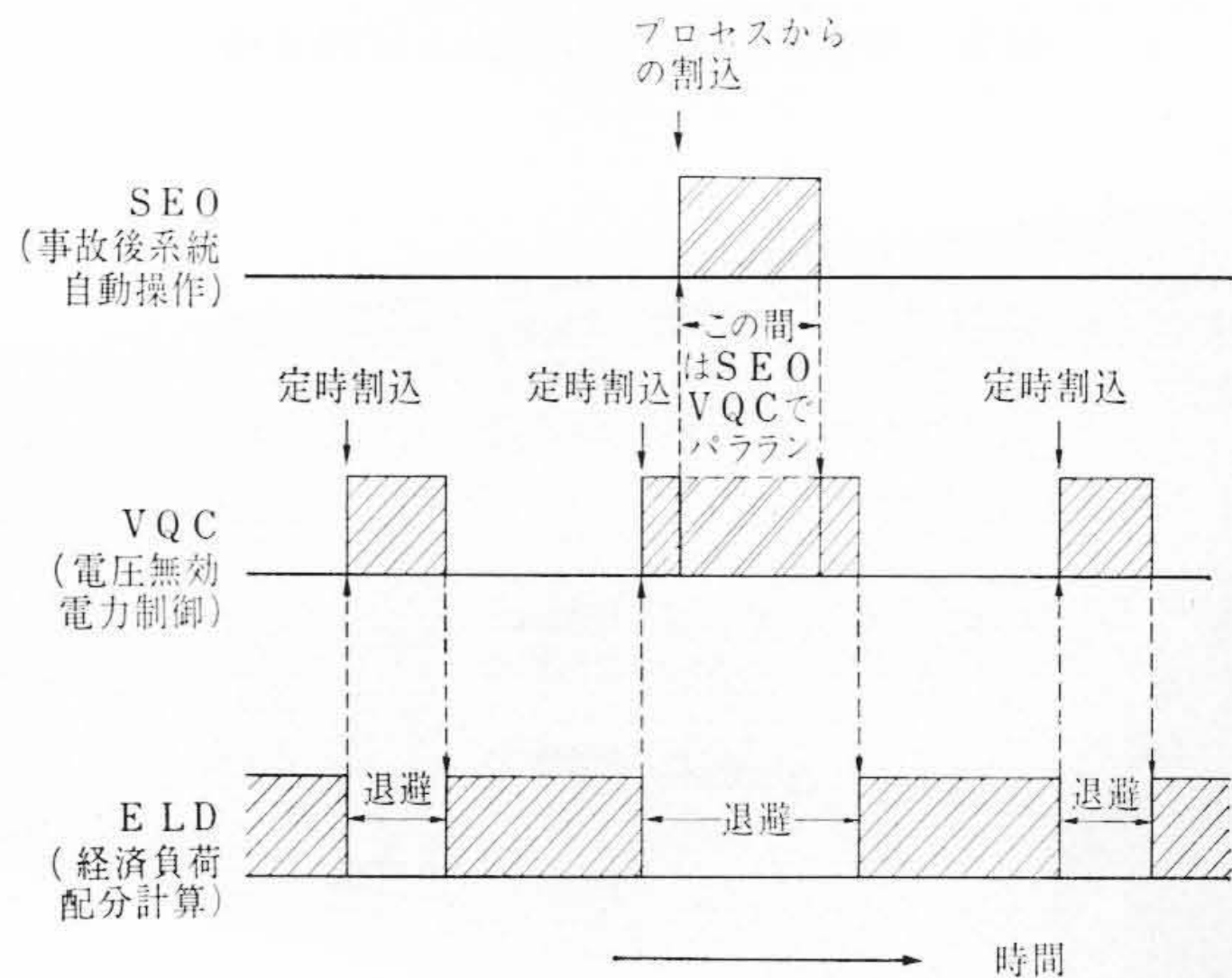


図7 SEO, VQC, ELD の割り込みによる処理の移行

め、SEO, VQC, ELD のオンラインプログラムを作成した(ELD⁽⁵⁾はオフライン計算)。

これらは、電力中央研究所で開発した計算方式を実システムに適用するための実証研究用オンラインプログラムとして開発したものである。

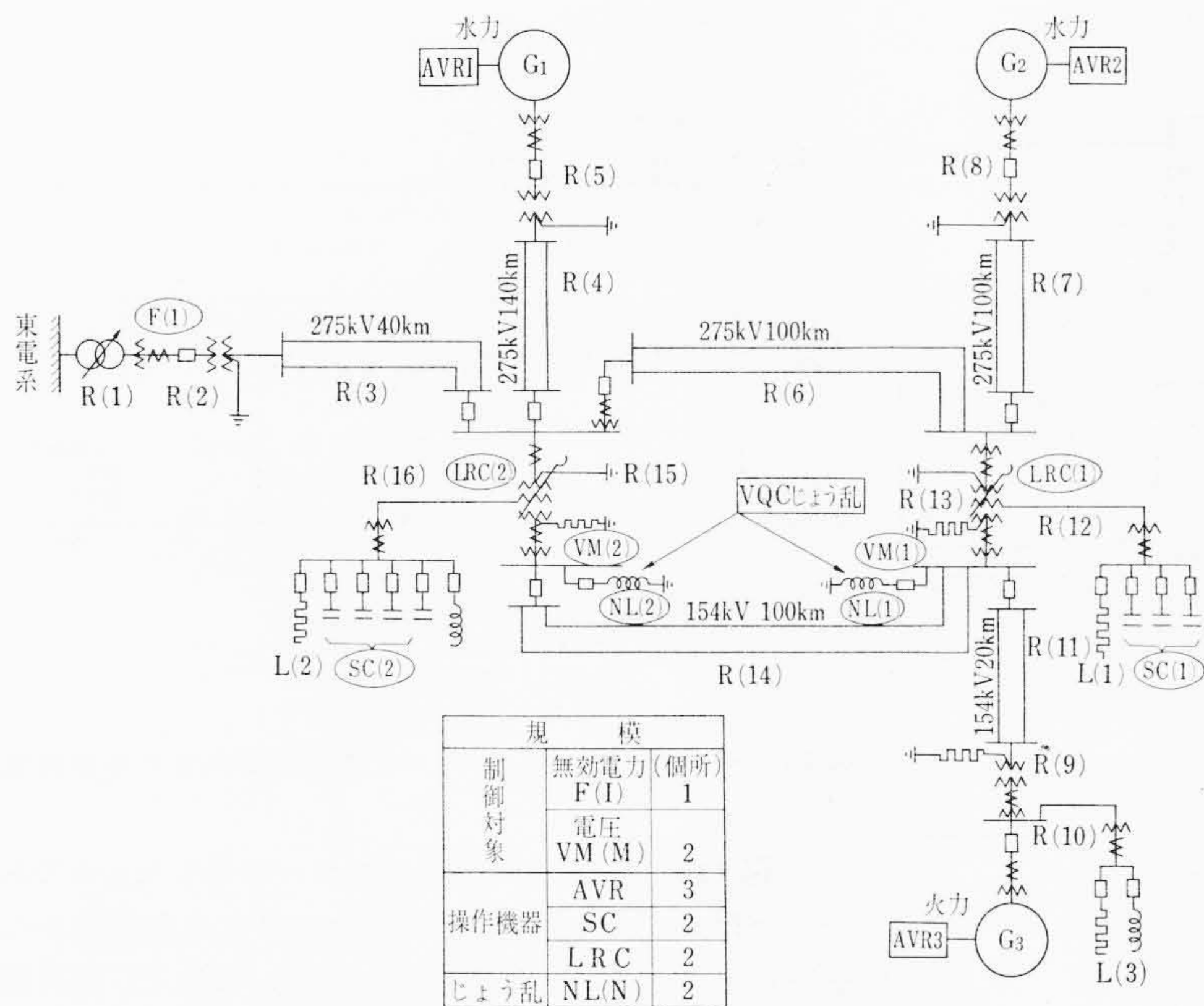
これらのプログラム作成にあたっては、自動給電システムで要求される割り込みによる優先処理を実行するようにした。すなわち図7に示すように計算機のあいている任意の時間にELDを実行し、この途中で定時割り込みをうければELDよりも順位が一つ上のVQCを実行し、VQC計算中にさらにプロセスからの割り込みをうけると優先順位のいちばん高いSEOの計算制御に移行する。この場合、SEOとVQCの間では多重処理が行なわれ、SEOまたはVQC実行中はELDはドラムに退避する。

このほか今回のプログラムで考慮した点は次のとおりである。

- (1) SEO, VQC プログラムは動的交流計算盤、交流模擬送電線いずれのモデル系統とも結合できるものとした。
- (2) 上記の実証研究用プログラムを中央監視盤からの操作によって実行するため、共通の運用操作プログラムを作成した。またプログラム間の情報受渡しを行なうためコア常駐テーブルを設けた。

3.2 電圧無効電力制御(VQC)

VQCは電力系統の主要地点の電圧および無効電力を一定の整定範囲内に確保し、同時にこの範囲内で無効電力潮流を適正化して送電電力損失を減少させるもので、有効電力制御に続く自動化問題として最近注目されている。制御方式としては模擬電力系統(図8に一例を示す)から電圧や無効電力などの系統状態を結合装置のAI, DIを通して読取り、このデータをもとにして論理判断指令装置の



(論理判断指令装置と交流模擬送電線とを結合して試験)

図8 電圧無効電力制御実証用模擬電力系統

中でプログラムにより VQC の計算を行ない、得られた結果を再び結合装置の AO, DO を介して AVR, SC, LRC などへ指令し、模擬電力系統上で所望の電圧、無効電力特性をうるものである。計算対象規模は表 4 のとおりで実系統をじゅうぶん模擬できるものである。

(1) 計 算 方 式

計算方式には判定関数を使用する方法を用いた⁽³⁾。この方法は [A] 電圧および無効電力の整定条件を満足する解を求めたあとで [B] 目的関数を満足するための計算、すなわち送電損失減少のための計算を行なう方法で、[A] の計算で

$$\text{判定関数 } E \left\{ E = \sum \left(\frac{\text{制御対象量} - \text{制御目標値}}{\text{許容偏差}} \right)^2 \right\}$$

を減少することにより制御対象量を目標値に近づけている。

(2) 概 略 フ ロ ー

VQC プログラムは実運用を考慮し図 9 に示すタイムスケジュールで実行するようにした。電圧、無効電力のじょう乱は定時割込による計算制御の前に毎回プログラムで発生するようにしてある。

図 10 は VQC プログラムの概略フローである。プログラム上特に考慮した点としては VQC 計算結果によってプロセス入出力装置を介し、AVR, SC, LRC などに操作指令 (AO, DO) を出したのち、一定時間をおいて再度系統状態を入力 (AI, DI) し、操作結果の確認をするようにしている。

この場合、操作機器が指令どおりになっていないものがあれば、機器の故障とみなしメッセージで故障機器名と番号を印字し、以後の制御を中止する。また制御対象の電圧、無効電力が整定範囲

表 4 電圧無効電力制御対象規模

系 統 要 素		規 模 (個所)
制 御 対 象	無 効 電 力	4
	電 圧	20
送 電 損 失 計 算 対 象 の 送 電 線		64
操 作 機 器	A V R	10
	S C	15
	L R C	14

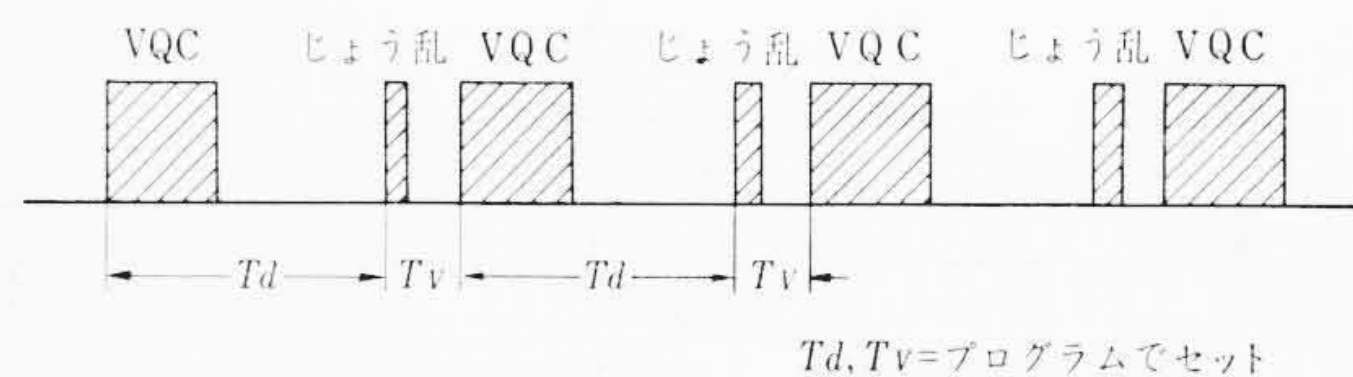


図9 電圧、無効電力制御のタイムスケジュール

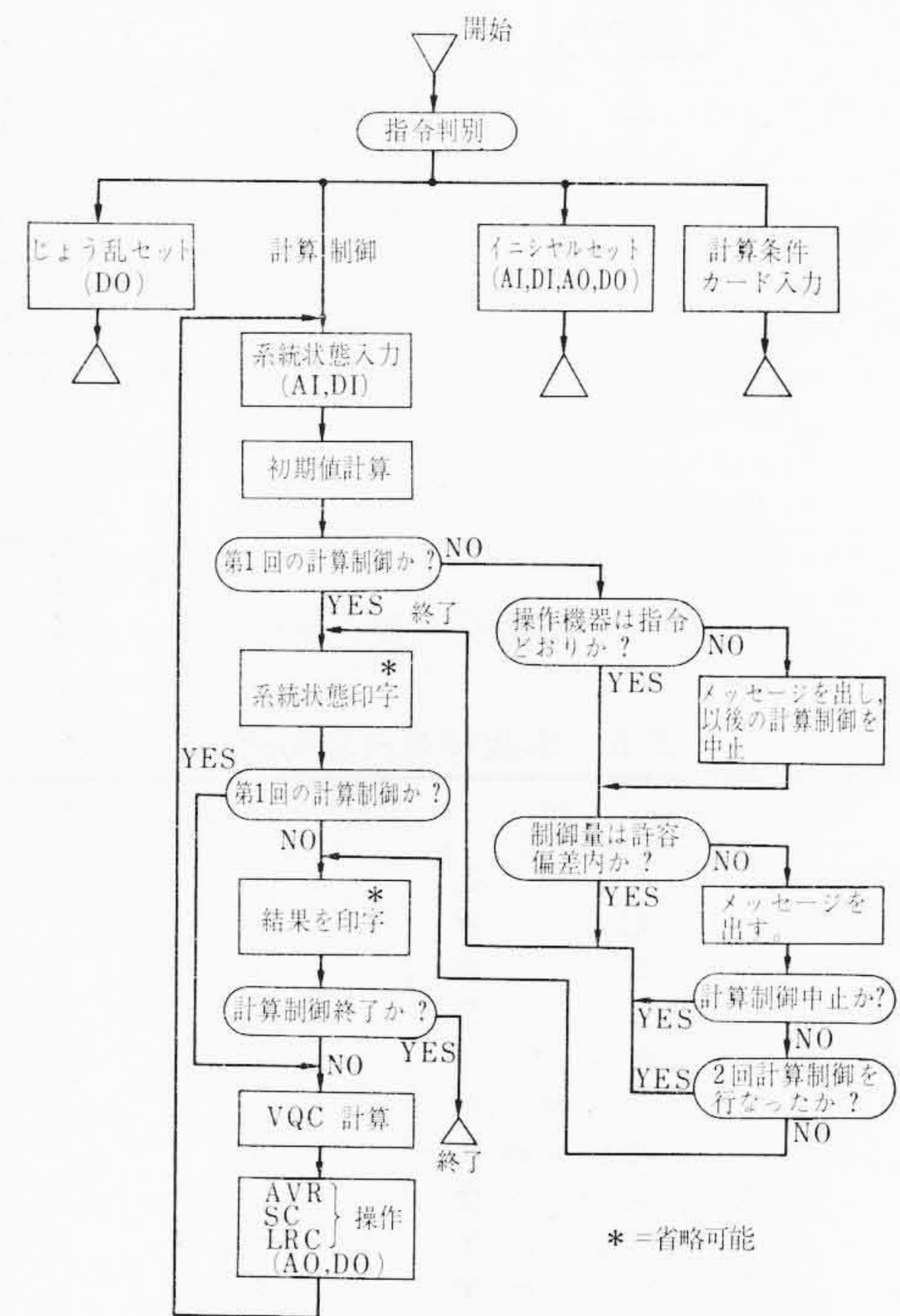
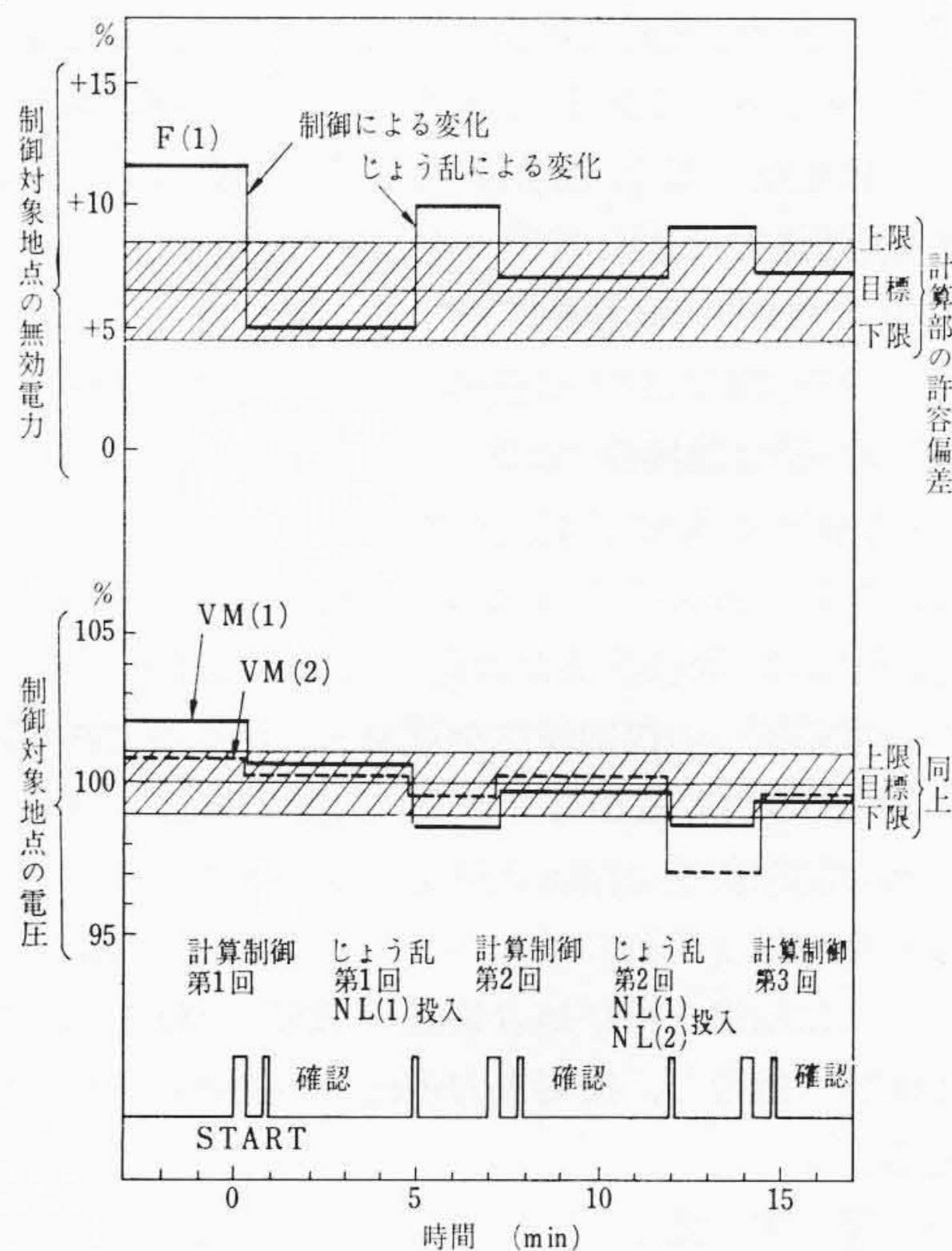


図10 電圧無効電力制御プログラムの概略フロー



(論理判断指令装置と交流模擬送電線とを結合して試験)

図11 電圧無効電力制御試験における制御対象量の変化

にはっていないものがあるれば、メッセージでその地点の記号と番号を印字し計算制御を引き続きもう一度繰り返すようにしている。なお、確認時の制御対象許容偏差はハードウェアの誤差を考慮し、計算で用いた許容偏差にある係数を乗じ、許容幅を広げるようにしてある。本プログラムの語数は70K 語(うちデータエリ

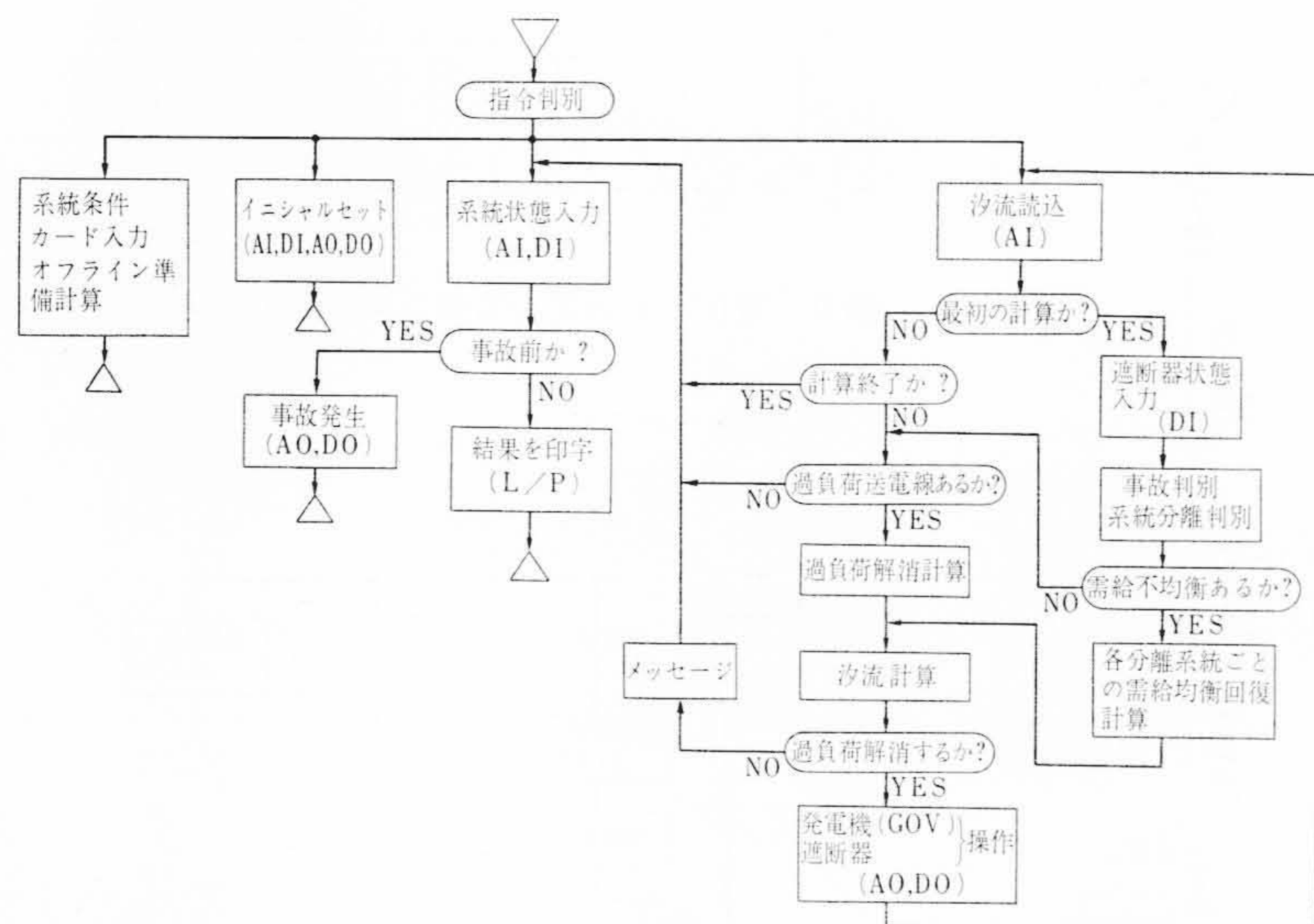


図12 事故後系統自動操作プログラムの概略フロー

表5 事故後系統自動操作対象規模

系 統	動的交流計算盤	模 擬 送 電 線
ノード総数	46	46
送電線	55	55
発電機	23	3
負荷	16	2
発電機+負荷	24	5
分離系統数	5	0
トリップ遮断器台数	5	5
事故発電機台数	3	3
系統分離対策	1	0
過負荷解消対策	2	2

ヤ38.5K語)である。

(3) 電圧、無効電力制御試験

図8の対象系統を模擬送電線で構成させて試験を行なった一例は図11に示すとおりである。じょう乱によって許容偏差からはずれた制御対象地点の電圧、無効電力は、計算制御によっていずれも許容範囲(無効電力 $\pm 2\%$ 、電圧 $\pm 1\%$)に戻されている。この試験では、操作してから30秒後に結果の確認を行なうようにしてある。1回の計算制御における正味の計算時間は約4秒であった。

3.3 事故後系統自動操作(SEO)

SEOは電力系統に事故が発生してからそれが復旧するまでの過程において、故障除去を行なった後の供給障害の軽減操作(供給支障軽減、過負荷解消、周波数または電圧などの異常変化防止など)とこれに続く正常系統への復旧操作を対象としたものである。制御方式としては、模擬電力系統からプロセス入出力装置のAI、DIを通じて、遮断器の開閉状態や潮流状態を読み取り、これらのデータをもとにして論理判断指令装置の中でプログラムによりSEOの計算を行ない、えられた結果を再び結合装置のAO、DOを通じて系統のGOVや遮断器へ指令し、模擬電力系統で事故後の復旧操作を行なうものである。

(1) 計算方式

計算方式は、事故前と事故後の遮断器の開閉状態によって事故状態を判別し、送電線の過負荷解消計算を行なうもので⁽⁴⁾、対象規模は表5に示すとおりである。

(2) 概略フロー

VQCまたはELD実行中にあらかじめセットした時間を経過してモデル系統上にプログラムで事故が発生した場合(事故後の系統を構成)、その後の割込指令によって事故後の計算操作を行なうようにした。

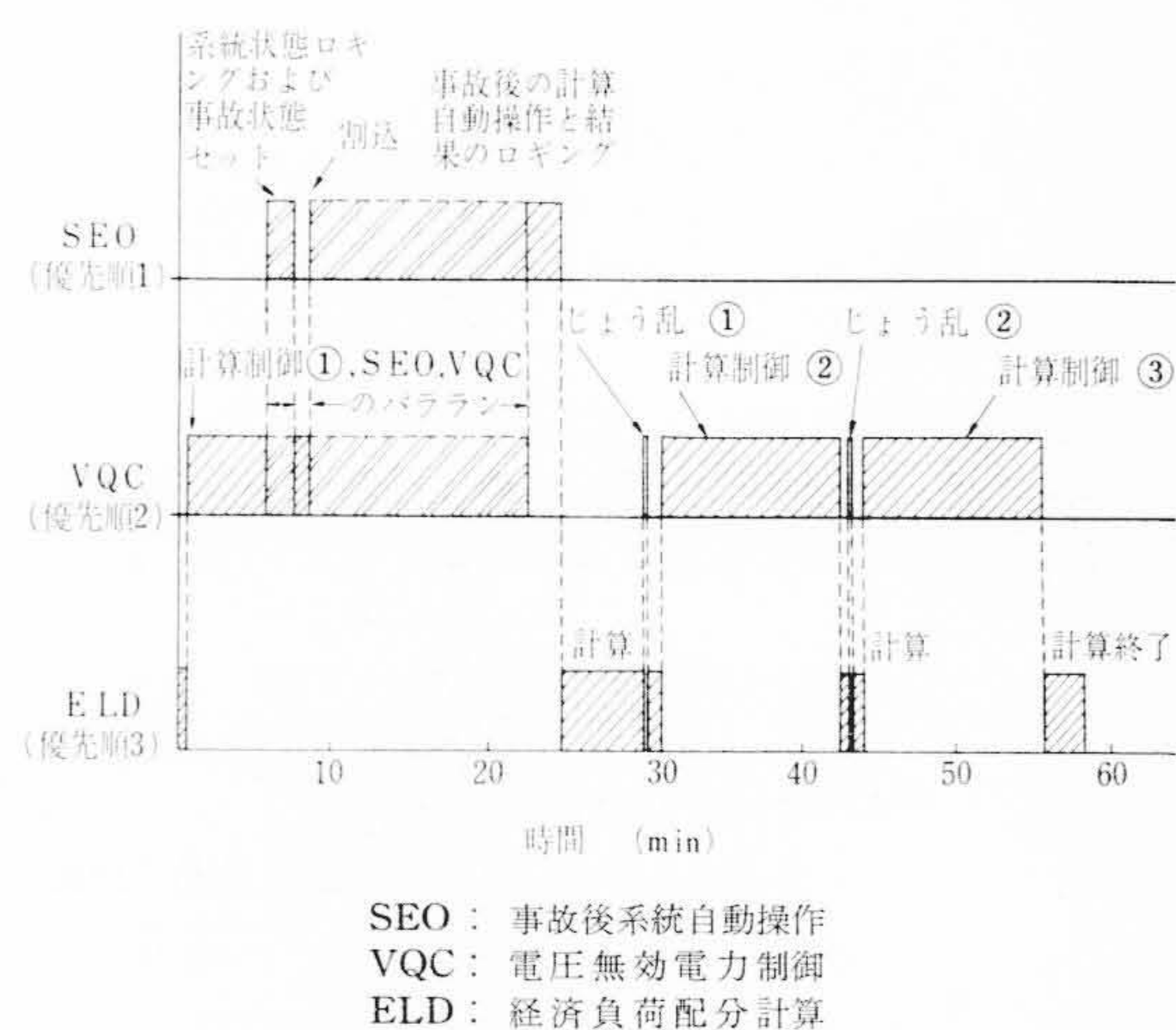


図13 SEO、VQC、ELDのコア分割制御による多重処理

図12はプログラムの概略フローを示したものである。SEOの計算結果によってプロセス入出力装置から指令し操作したのちは、再度潮流状態を入力(AI)し、過負荷が解消していない場合はもう一度計算操作をくり返すようにしている。本プログラムの語数は46K語(うちデータエリアは12K語)である。

3.4 多重処理

図13に示すように、ELD計算中にVQCの割込みがはいり、さらにVQC実行中にSEOの割込みがはいった場合について、コア分割制御によるELDの退避回復、SEO、VQC間の制御の移行、I/O多重処理などを確認した。SEO、VQCは動的交流計算盤上で発電機18機系の模擬系統を構成し論理判断指令装置と組み合わせて試験した。VQC、SEOの実行時間の中には選択呼出計測、ロギング、計算過程および結果の印字などシミュレータ特有の計算ならびに動作がふくまれているので実運用における時間よりも長くなっている。正味の計算時間は、VQCは18機系で、1分前後、SEOは計算内容にもよるが約3分であった。

4. 結 言

以上、電力中央研究所納電力系統シミュレータの制御システムおよび新たに開発したソフトウェアについてのべた。最近、各電力会社でも本格的な自動給電システムが実施されようとしており、今後、本電力系統シミュレータによる実証研究の成果が各方面に適用され大きな効果をあげることが期待される。

なお、今後も引き続き共同研究を行ない、各種制御方式の開発実証を行なう予定である。また、ハードウェアの面では図1に示すように、直流送電の諸問題を研究するため直流模擬送電線と結合したり、幅広い研究を行なうためアナログ計算機や情報伝送模擬装置および新しい考え方にたった状態表示盤などとも結合し、電力系統シミュレータをより充実したものにしていく計画である。

最後に、本装置の完成まで終始ご指導とご協力をいただいた関係者各位に心からお礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 自動給電研究委員会：基礎研究用系統シミュレータの仕様に関する調査研究：技研報告No.66081(昭41)
- (2) 上之園、梅津、若林：世界に先がける大規模な電力系統シミュレータ：オーム(昭42-1)
- (3) 尾出、西山：電力系統における電圧無効電力制御に関する基礎研究：技研報告No.65065(昭40)
- (4) 鈴木、尾出：事故後自動操作理論に関する研究：技研報告66032(昭41)
- (5) 鈴木、辻：水火力系統における負荷予想誤差配分に関する基礎的研究：技研資料(昭41)