

電力系統保護用デジタルシミュレータ

Digital Simulator for Protective Relay of Electric Power System

電力系統での保護・制御技術は、系統の巨大化、複雑化に伴って一段と高度化していき傾向にあり、このため、デジタル技術を導入した情報精度の向上、データの多目的利用、制御用計算機による装置の標準化など、新しい形のシステム構成になるものと考えられる。このようなデジタル式制御装置の開発に当たり、性能をリアルタイムで検討できるシミュレータを開発した。本シミュレータは500kV変電所5箇所を含む広範囲の主幹系統送電網の模擬、及び伝送路の雑音の影響を模擬できる機能を備え、操作性もワンタッチでできる特徴をもっている。保護用に開発したマイクロコンピュータとの組合せ試験により、デジタル式制御装置の性能の評価、検証に十分威力を発揮できることを確認した。

山越幸成* Yamakoshi Yukinari
 三木義照** Miki Yoshiteru
 牧野淳一** Makino Junichi
 佐々木宏** Sasaki Hiroshi
 奥田健三*** Okuda Kenzo
 瀬尾一夫**** Seo Kazuo

1 緒言

最近、電力系統の各種制御にプロセスコンピュータを導入する機運が世界的に高まっており^{1),2)}、コンピュータ化される系統保護装置、系統安定化制御装置、系統自動操作装置などに対する性能を総合的に検証する設備として、かねてより従来のアナログ式の保護装置を対象にした模擬送電線に代わり、デジタルコンピュータと結合できる電力系統シミュレータの出現が望まれていた。この要請に応ずるための研究設備として、系統の電圧、電流情報をすべてデジタル化し、コンピュータとの接続、及び自動操作の可能な新しい形の電力系統シミュレータの開発を行ない、昭和50年4月に稼動を開始した。この間、保護用マイクロコンピュータの開発、光伝送路の組合せによる機能検証を行なってきた^{3)~6)}。

本稿では、本シミュレータの規模、検証手法としての位置づけ及び性能検証例について述べる。

2 装置の構成概要

図1に本シミュレータのブロック構成を、図2にその外観を示す。本シミュレータは500kV変電所5箇所を含む広範囲の主幹送電線網を模擬できるとともに、系統の全計測点には、電圧、電流のアナログ波形をデジタル信号に変換できる変成器を設置し、これらのデジタル信号は高速のデータバスを介して保護・制御用マイクロコンピュータ群と接続している。

また、しゃ断器の開閉サージや、雷サージ及びフェージングなどの影響を間接的に模擬する等価雑音挿入試験装置を備

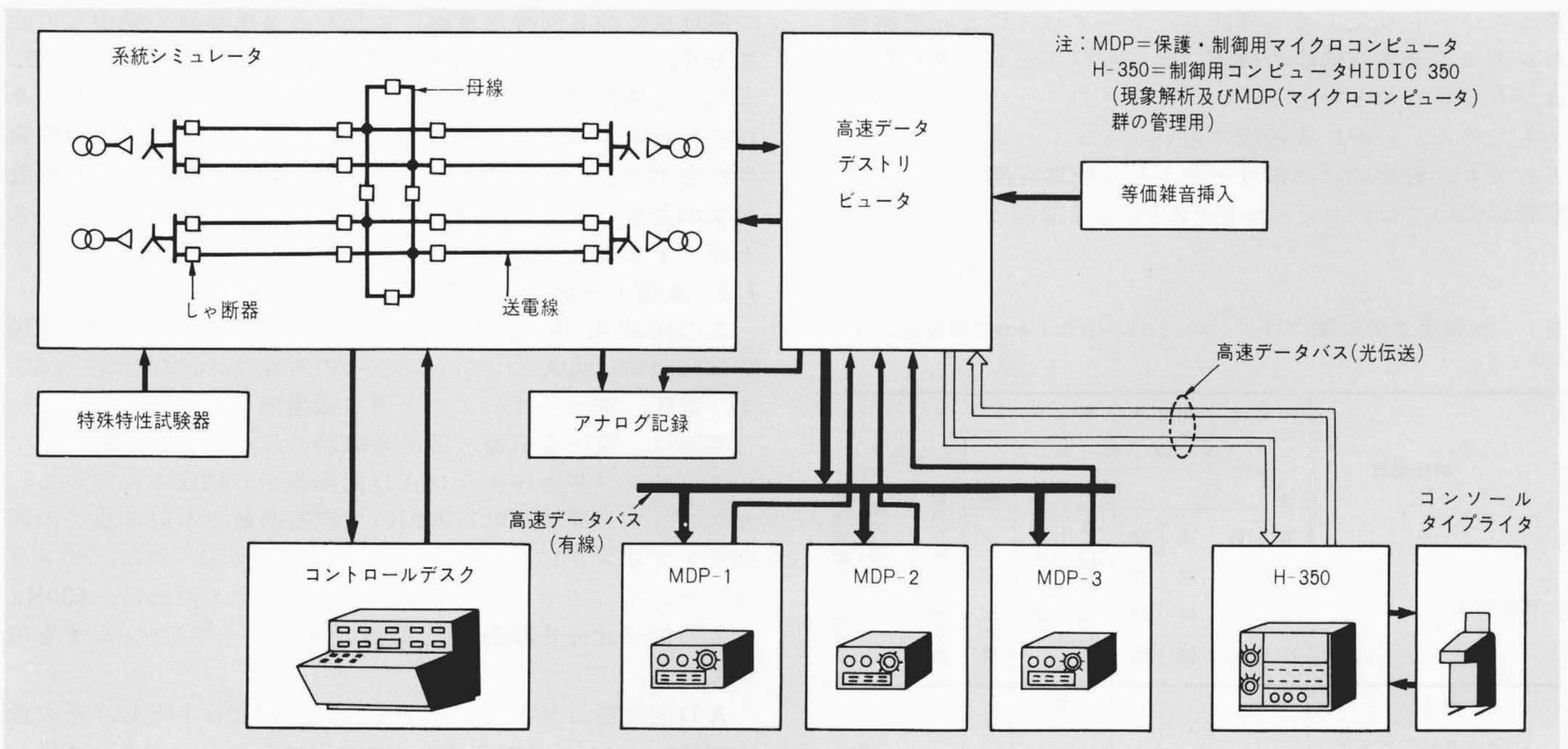


図1 電力系統シミュレータのブロック構成図 系統シミュレータと保護用マイクロコンピュータは、全系同期サンプリング式デジタルデータによって結合されている。

* 東京電力株式会社技術開発研究所 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所日立研究所 工学博士 **** 日立製作所大みか工場

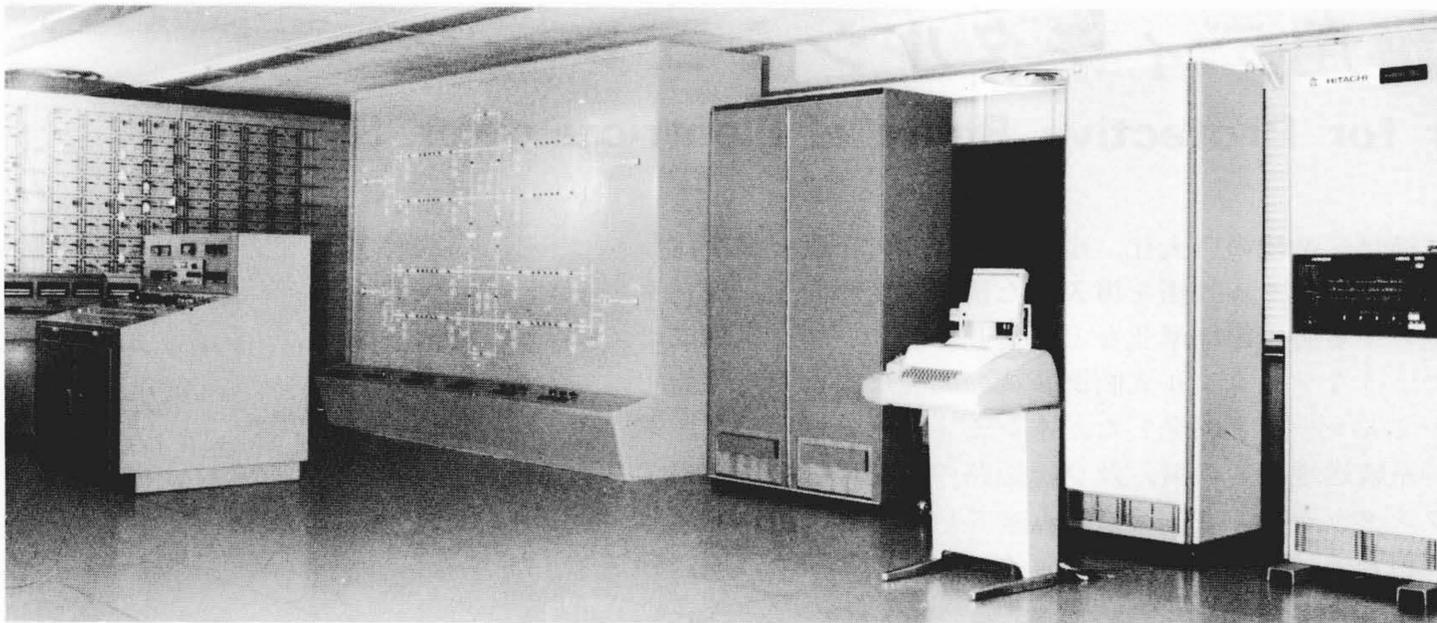


図2 電力系統シミュレータの外観 試験条件を容易に設定できるように、系統シミュレータ盤の照光表示、コントロールデスク及び高速データディストリビュータを配置した。

え、新規に開発する計算機化された保護・制御装置の性能の検証、及び耐雑音性の評価、検討も実施することができる。模擬する各種現象の発生、制御及び動作内容の分析についても徹底した操作の簡素化を図り、複数の装置の制御をワンタッチでできるようにオペレータの負担を軽減することを重点に設計した。また、コントロールデスクでの計測もすべてデジタル方式にして精度の向上を図っているのが特徴である。

3 性能検証手法としての位置づけ

本シミュレータを、計算機化した保護装置の機能検証に用いた場合の位置づけをまとめて表1に示す。同表に示すように、保護機能の基本的な演算手法及び保護機能単位の特性については、オフラインシミュレーションでもある程度検証が可能であるが、各々の保護機能の動作の関連性、例えば動作・復帰時間の協調、複雑な系統事故に対する応動状況などを総合的に検証するには、本シミュレータが効果的である。特に、装置のハードウェアの処理能力、データバスによって結合したシステム全体の機能の検証には、本シミュレータがなくてはならないものといえる。

もちろん、いかに実系統に近いシミュレーションができたとしても、最終的には雷サージ、しゃ断器開閉サージなどの影響については、フィールドテストによる確認が必要である。

表1 検証手法の位置づけ 本シミュレータによる検証可能項目を明らかにした。

検証項目 検証方法	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	保護機能					システム				
	演算手法	性能				ハードの処理能力	耐ノイズ性	MDP群の管理手法	データ伝送 (構内光伝送含)	関連装置との結合
静特性		過渡特性	総合特性	異常現象への対応						
1 オフラインシミュレーション	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-
2 オンラインシミュレーション(系統シミュレータ)	-	-	-	○	△	○	△	○	○	○
3 フィールドテスト(実系統)	-	-	-	-	○	-	○	-	-	-

注：○印=検証可能 △印=大部分検証可能

4 構成要素の内容

4.1 系統シミュレータ

系統シミュレータは、広範囲の主幹系統を対象にした模擬送電線網であり、中央の電気所を二重母線4ブスタイ方式の母線構成とし、可変電源端電気所4箇所を設け、各々の電気所は中央の電気所とそれぞれ平行2回線三相交流送電線によって接続し、最大巨長は各線路とも200km相当まで設定できるようになっている。系統の電圧、電流の模擬は、実系統の $\frac{1}{10,000}$ とし、定格線間電圧50V(実系統500kV相当)、定格電流0.4A(実系統4kA相当)にしてある。

4.2 コントロールデスク

コントロールデスクでは、系統構成の操作、各電気所の電圧、電流とその相差角の計測及び制御が行なえるもので、いずれもデジタル的な機能を持ち、オペレータの操作の簡素化を図っている。特に系統事故の模擬については、時間差をもつ異地点での2回線送電線にまたがる多重事故の発生も可能であり、その発生時間間隔は、1ミリ秒単位で最大1秒まで、また、発生位相角は1度単位の分解能で0~180度の範囲にそれぞれ設定することができる。コントロールデスクの現象発生指令ボタンを押すことにより、記録装置の起動、系統事故現象の発生~終了~記録装置の停止に至る一連のシーケンスを終了するようになっている。

4.3 高速データディストリビュータ

この要素は、電圧、電流情報のデジタル変換器、同期伝送制御回路から構成されているが、その内容について次に述べる。

(1) 電圧、電流情報のデジタル変換器

本器は、電圧変成器、電流変成器のほか、帯域制限用フィルタ、サンプルホールド及びAD変換器から構成されている。サンプリング周波数は1,200Hzで模擬系統の全計測点での同期サンプリングにしている。帯域制限用フィルタは、サンプリングによって生ずる折返し誤差を極限するために、550Hzで入力信号成分を30dB以上減衰できるローパスフィルタを用いている。

AD変換器はサインビットを含めて12ビットとし、その最大変換レベルは時定数0.3秒までの過渡直流分の重畳を考慮してある。符号形式は2の補数コードを採用した。

(2) 同期伝送制御回路

この回路は、自電気所のデジタル信号化した電圧、電流の情報、及びしゃ断器の開閉情報データを収集し、これらを図3に示す伝送フォーマットにより自電気所情報用高速デー

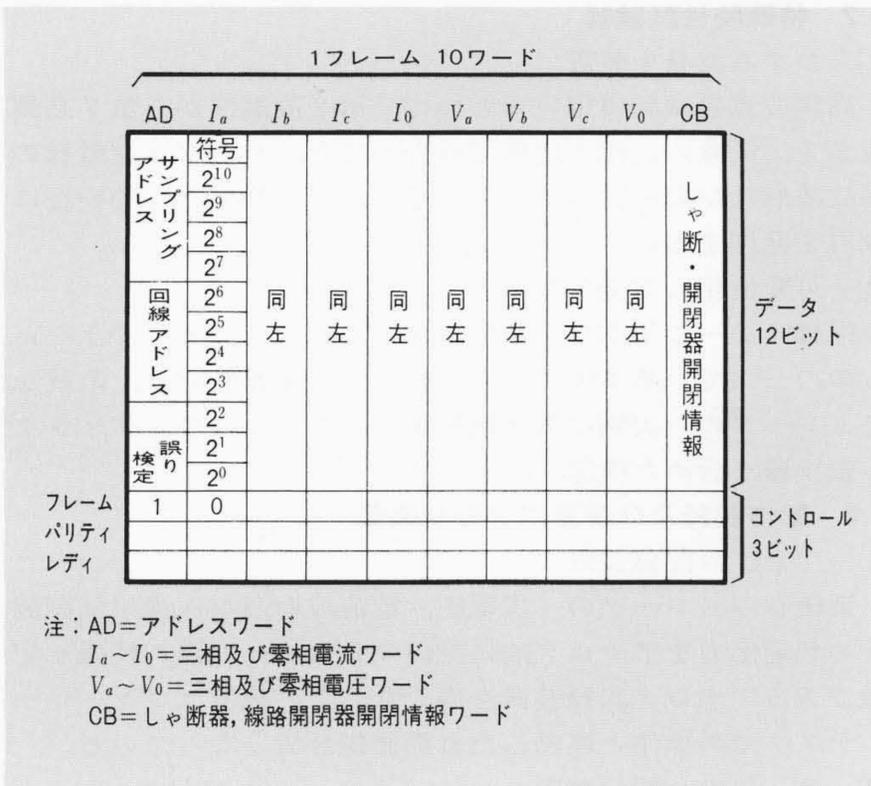


図3 データ伝送フォーマット 電圧，電流情報は，数値11ビット，サイン1ビットの割当て，各端子同期サンプリングにより，サンプリングアドレスを付加してある。

タバスへ送出する。信号フレームは，同図に示すように三相1回線当たり10ワード直列，15ビット並列伝送の構成になっている。また，隣接電気所の情報も同様のフォーマットで，隣接電気所情報用高速データバスへ送出する機能を備えている。

4.4 高速データバス

高速データバスは，保護・制御装置の機能をもっているマイクロコンピュータ(以下，MDPと略す)群，及び演算内容の現象解析，並びにMDP群の管理用コンピュータHIDIC 350(以下，H-350と略す)に対するデータ伝送路である。伝送回線は，当初すべて金属線通信ケーブルを使用したが，約1年前から上記管理用コンピュータについては光ファイバによる光伝送方式を採用している。

図4は光伝送装置の概念図を示したものであるが，今回は

伝送信号をMDPの機能検証に必要なデータだけを選択して伝送する方式を取り，自電気所，隣接電気所のデータをすべてビット直列にし，これにデータ誤り制御用に巡回符号検定(CRCと略す)ビットを付加できるようにした。データの伝送速度は，MDP群用有線バスでは自電気所のデータを480kワード/秒で，隣接電気所のデータについては，1,200Hzのタイミングでサンプリングしたデータを加算平均したのち，240kワード/秒にしている。また，光伝送路では自電気所，隣接電気所のデータとも600Hzのサンプリングに加算平均したのち，480kビット/秒にしている。

4.5 マイクロコンピュータ

本シミュレータには各種保護・制御装置の機能を果たす目的で3台のマイクロコンピュータMDP-1，MDP-2及びMDP-3を備えている。これらのMDPは，開発時期及び使用目的に応じてそれぞれ異なったワンチップCPU(中央処理装置)を中心に構成している。MDPの試作に当たっては演算処理機能の向上策として，リレーの定数整定，演算回数の多い乗算回路，メモリ素子の選別(不揮発性メモリの適用範囲の限定)などにより演算ユニットを専用ハードウェア化したものもある。

表2 保護リレー用マイクロコンピュータの性能 試作機3機種についての性能比較を示した。最新形MDP-3は，距離リレー約20要素の演算が可能である。

項目	機種	MDP-2		MDP-3		
		MDP-1	モー	リアクタンス	モー	リアクタンス
適用保護要素	電流差動		モー	リアクタンス	モー	リアクタンス
データ入力間隔(ms)	3.33	1.67	1.67	1.67	1.67	
演算ステップ	340	90	88	85	81	
演算処理時間(μs)	1,300	497	487	82	80	
メモリ容量ROM	2k語 (1語=8+パリティ)	2k語 (1語=16+パリティ)		2k語 (1語=16+パリティ)		
最大保護機能収容容量(要素)	2	3		20		

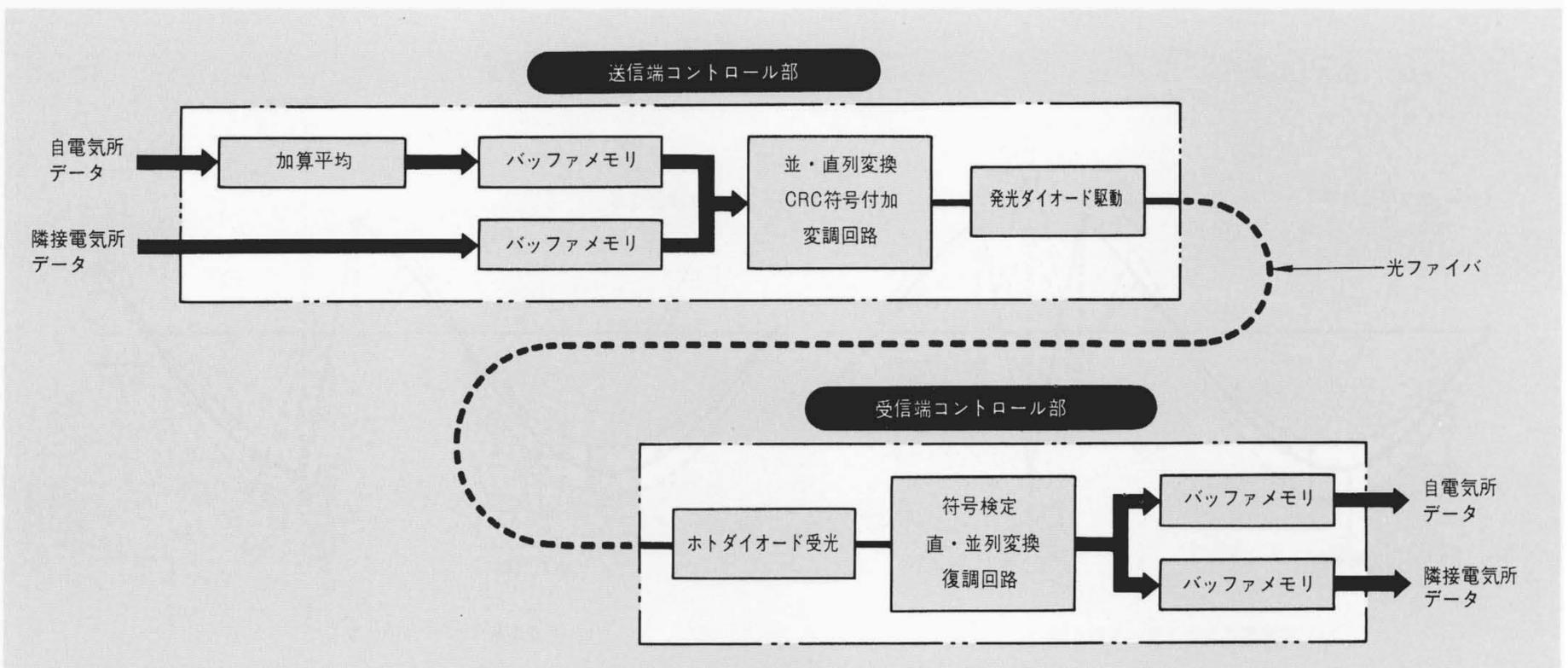


図4 光伝送装置の概要 自電気所及び隣接電気所のデータを，発光ダイオード，光ファイバ及びホトダイオード受光の構成によりビット直列伝送としている。

表2に試作したMDP3機種についての演算性能を示す。MDP-3は最新の試作機で、データ構造だけが汎用化されたものであり、保護リレーに適用する目的で8種類、47基本命令語を独自に開発し、処理スピードの向上を図ったもので、他のMDPに比べて1桁近く改善することができた。

例えば、距離リレーとして、モーリレー、リアクタンスリレーをそれぞれ約20台分の処理能力をもっている。MDP-3は構造面でも高密度実装形とし、演算回路を1枚のプラグインカード(305mm×420mm)に搭載してある。

4.6 等価雑音挿入試験装置

実系統で、雷サージ、しゃ断器開閉時のサージ、あるいはマイクロ回線異常時などによって、結果的に生ずるデータ誤りを模擬的に挿入するための装置である。

データ誤りの模擬は、任意のワードの任意の1ビット誤りをはじめ、マイクロ波回線の瞬断やフェージングなどを想定したバースト誤りの発生も可能である。したがって、供試機となる各種の保護・制御装置の誤りデータ発生時の応動、及びデータ誤り制御方式の検証、評価を容易に行なうことができる。

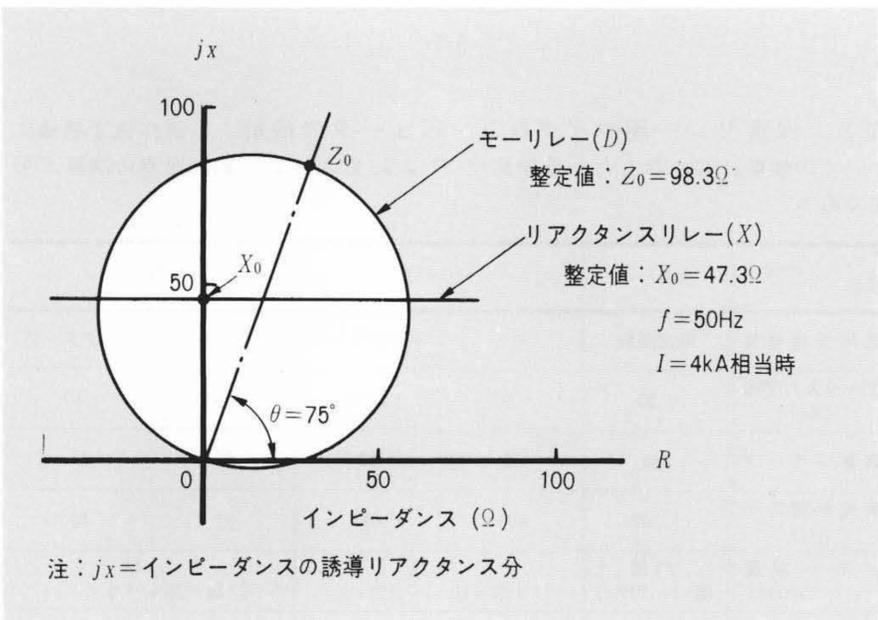


図5 マイクロコンピュータによる距離リレーの特性 距離リレーは、1,200Hzのサンプリングデータを600Hzサンプリングに加算平均して用いた。

4.7 特殊特性試験器

(1) ひずみ波発生装置

高調波重畳試験に用いるもので、第2高調波から第7高調波まで、任意の位相と比率で重畳ができ、ケーブル送電線の事故波形及び変圧器の励磁突入電流波形の模擬と応動検証に威力を発揮する。

(2) 可変位相入力発生装置

保護リレーの基本特性を検証するのに欠くことのできないものの一つで、基本波の可変位相入力発生器であり、システムシミュレータの一次側に直接接続することによって、デジタル変換器を含めた機能の検証ができる。

4.8 動作記録及び演算内容分析装置

(1) アナログ記録装置

システムシミュレータの一次電圧、電流波形及び保護・制御装置の判定出力をアナログ的に記録するため、24点の情報を記録できるアナログ記録装置を備えた。この装置はコントロールデスクでの操作と連動した自動記録装置となっている。

(2) デジタル記録装置

デジタル量に変換後の演算過程での各部の応動を解析するために、デジタル記録装置として制御用コンピュータH-350とタイプライタを連動して用いている。H-350はMDPと全く同じ内容の演算プログラムを実行することによって、MDPの動作内容を間接的に記録できる。

(3) スペクトルアナライザ

電圧、電流の波形ひずみの解析及びデータ伝送系の波形解析の精度向上を図るために、スペクトルアナライザを付属させた。本装置は30MHz、80dBまでの分解能をもっている。

5 本シミュレータによる保護リレーの動作検証例

本シミュレータを用いて、計算機化された高速度保護リレーの性能についての検証、及びシミュレータ自体の機能についての評価、検討を行なった。

5.1 供試リレー

マイクロコンピュータMDP-1には、実系統換算で検出感度が2kAの比率差動特性をもつ差電流リレーを、MDP-2に

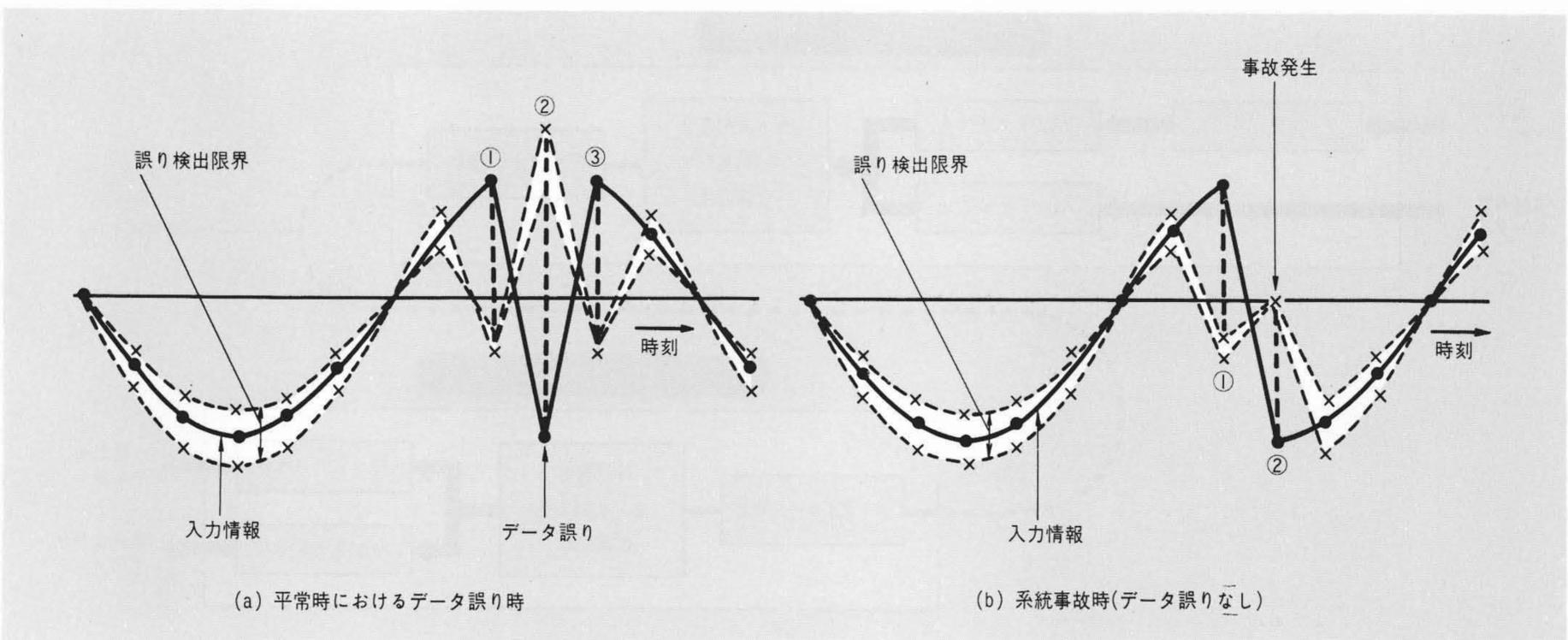


図6 データ誤り検出方式 1サンプルのデータ誤り検出方式として、連続3サンプルのデータを照合する3点符号照合方式を開発した。

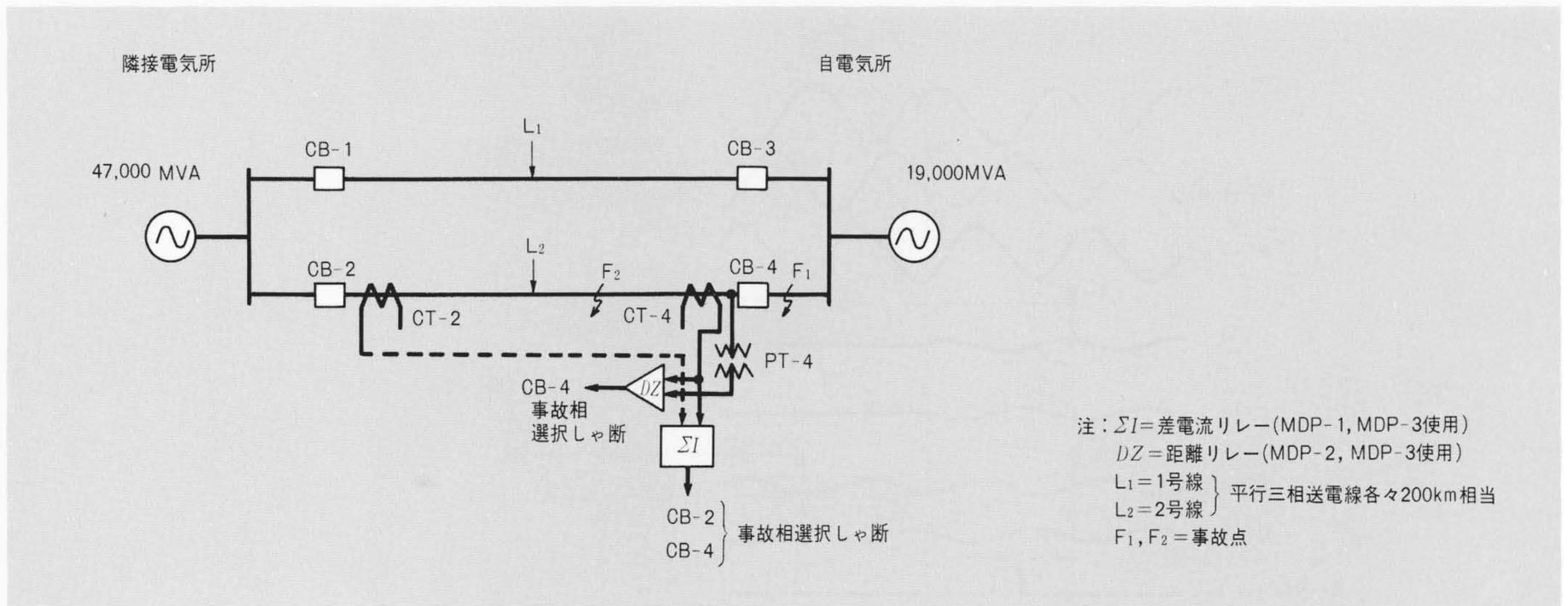


図7 試験系統 本シミュレータ全システム機能の確認、及び保護用マイクロコンピュータの性能評価のための試験系統で、1端局分について示した。他端局も同様である。

は図5に示す特性の距離リレーとして、モーリレーとリアクタンスリレーの2要素を、更にMDP-3については上記のすべてのリレーと保護・制御装置用に開発した⁸⁾図6に示すデータ誤り検出方式(3点符号照合方式と称することにする)をそれぞれ演算できるプログラムを備えた。また、H-350には上記の各々のMDPの演算内容の解析、及び光伝送機能の確認のため、光伝送によるデータ伝送と、各MDPと全く同じ保護リレーの演算プログラムを備えた。

5.2 試験系統

試験系統の構成は、コントロールデスクで操作することによって種々に変更するが、図7には後述する試験結果の説明(オシログラム)に関連する部分を中心に1端局分を抜粋して示してある。

5.3 試験結果

(1) 系統事故時の応動試験結果

図8には進展事故時のリレーの応動例を示す。同図で、事

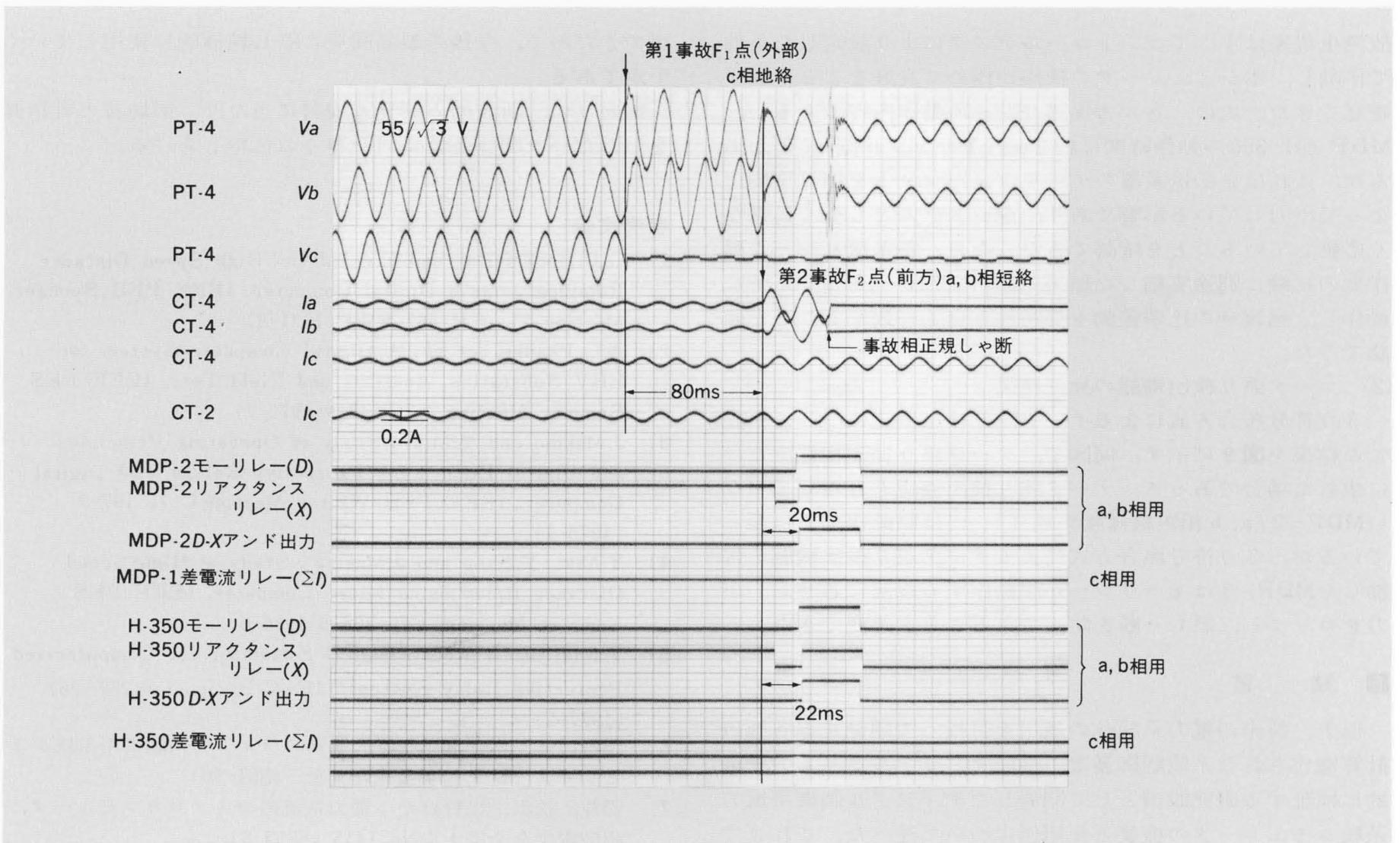


図8 進展事故時の応動例 進展事故に対して、差電流リレーの正規不動作、距離リレーの動作例として代表相だけの出力を示してある。いずれも正しい応動をしていることが確認できる。

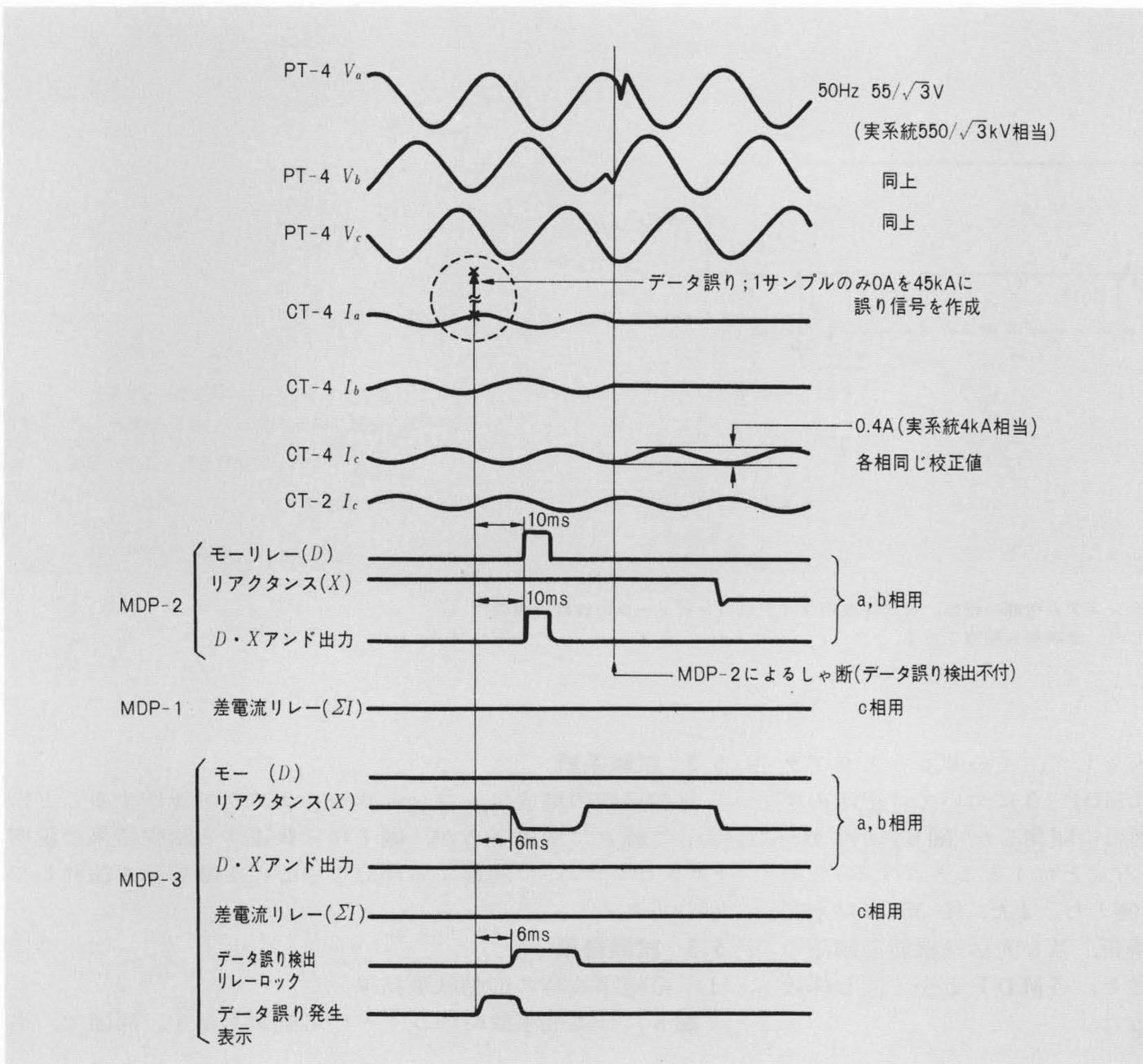


図9 データ誤り時の応動
データ誤り検出機能を付加しなかったMDPと、付加したMDPとの動作の比較検討を行ない、データ誤り制御方式の有用性を示した。

故障発生現象はすべてコントロールデスクにより設定した条件で作動し、本シミュレータの操作が極めて良好なことをまず確認できた。次に、各々の保護リレーの動作内容であるが、MDPとH-350の動作時間に約2ms(1サンプル間)の差があるが、これは光伝送装置のデータフォーマットを加算平均によって出力している影響であり、全システムとも全く異常なく応動していることを確認できた。なお、差電流リレーの動作側の試験は別途実施した結果、動作時間10~16msで正常に動作し、過渡時の比率差動も静特性と良く一致することを確認できた。

(2) データ誤り検出機能の検証結果

3点符号照合方式によるデータ誤り検出機能について検証した結果を図9に示す。同図で、データ誤りはa相電流だけに生じた場合であって、データ誤り検出機能をもたせていないMDP-2(a, b相短絡保護距離リレー)は誤動作するに至っているが、3点符号照合方式によるデータ誤り検出機能を付加したMDP-3はモーリレーが誤動作する以前に各リレー出力をロックし、誤しゃ断を防止できることを確認できた。

6 結 言

以上、将来の電力システムへの適用を目指して開発する各種の計算機化されたシステム制御装置の性能を、リアルタイムで総合的に検証する研究設備として開発したデジタル制御用電力システムシミュレータの概要と使用例について述べた。これまでに進んだ種々の制御装置の性能検証を通じて、本シミュレータが電力システムのデジタル制御用として有用であることが確

認できたので、今後の製品開発に際し積極的に使用していく予定である。

終わりに、新技術の開発、検討に当たり、御助言と御指導をいただいた関係各位に対し厚くお礼申しあげる。

参考文献

- 1) G.D.Rockefeller and E.A.Udren : High-Speed Distance Relaying using a Digital Computer. IEEE PES Summer Meeting 71, TP 567-PWR(1971-8)
- 2) A.G.Phadke, et al : A Digital Computer System for EHV Substation. Analysis and Field Test. IEEE PES Summer Meeting F75 543-9(1975-7)
- 3) J.Makino and Y.Miki : Study of Operating Principles and Digital Filters for Protective Relays with Digital Computer. IEEE PES Winter Meeting C-75 197-7 (1975-1)
- 4) Y.Miki, Y.Sano and J.Makino : Study of High-Speed Distance Relay using Micro-Computer. IEEE PES Summer Meeting, F76 408-5(1976-5)
- 5) Y.Miki and T.Koda : Digital Simulator for Computerized Protective Relay Systems. IFAC Symposium 257~261 (1977-2)
- 6) 国府田, 三木, 瀬尾 : 電力システムのデジタル制御用システムシミュレータ, 電気四学会連合大会 (昭51-10)
- 7) 安井, 松沢, 佐野ほか : 電力システム用マイクロコンピュータ, 昭52電学会全国大会No. 1415 (昭52-8)
- 8) 落合, 松田ほか : デジタル保護方式における誤りデータ制御法, 昭51電学会全国大会No. 916 (昭51-4)