

電力系統保護・制御システムの技術動向

Trends of Power System Protection and Control Technology

電力系統の保護・制御システムにマイクロプロセッサを中心とするデジタル技術が使われ始めたのは、約10年前である。現在では、デジタル形の装置が従来のアナログ形装置に代わって、この分野システムで主流の座を占めるに至っている。その最大の理由は、システムの性能、機能の大幅向上に寄与したこと、同時期に進展し拡充した光伝送を含む通信技術の恩恵をタイムリーに享受できたことなどにある。

このような動きのほかに、変電所の保護・制御機能を統合化し総合的なメリットを得ようとする動向も活発化しており、すでに実運用に入っているシステムも出ている。

日立製作所はこのような動向の兆しをタイムリーにとらえ、高度化した各種デジタル保護継電装置、制御装置および光LANを用い、統合化した変電所の全デジタル保護制御システムを開発・製品化した。

久保隆生* *Takao Kubo*
佐野和汪* *Yoshihiro Sano*
岩谷二三夫* *Fumio Iwatani*
滝口 裕* *Hiroshi Takiguchi*

1 緒 言

ライフスタイルが豊かさを求める社会に変わりつつあるわが国では、クリーンで安全、取り扱いが容易など、エネルギーとしての優れた特徴を持つ電力への依存度がますます大きくなるものと予想される。このため、電力のよりいっそうの安定供給が望まれている。

巨大で、かつ広がり続ける電力系統の中で、その神経系統の役割を担う保護・制御システムの分野では、このような供給信頼度確保という社会的使命を帯びた要請を果たすため、この10年間、それまでのアナログ形の形態からマイクロプロセッサを中心としたデジタル化による性能、信頼度面の改善を図ることに重点が置かれてきた^{1),2)}。

デジタル保護継電装置を例にとると、昭和63年度末の時点で10電力会社の設備合計が3,502装置あり、系統保護継電装置全設置数に占める割合は約15%となっている²⁾。その後もデジタル形の保護・制御装置の設置数は増加の一途をたどる情勢にある。この期間の通信技術の発展にも著しいものがあり、マイクロ波回線のデジタル化や光伝送路の拡充が、保護・制御装置の高度化と信頼性向上に大きく貢献している³⁾。

一方、システムの拡大・増加の状況のもとで、運転・保守性の向上、建設工期の短縮、設置スペース削減への要請も強く、これらの点を抜本的に解決することを目指した変電所の保護・制御システムを統合化しようとする動きもしだいに活

発化しつつある。すでに現時点でも、このようなねらいで平成2年東京電力株式会社で初適用され、その後、同仕様に準じた光LANを適用したシステムが、二つの電力会社で実運用もしくは現地調整中である^{3),4)}。

ここでは、以上のような動向の中で、最近日立製作所が開発納入した保護・制御分野の主要技術と適用製品例について述べる。

2 デジタル保護継電装置

2.1 送電線保護リレー

重負荷送電線、多端子系統、ケーブル系統の増大などによる系統保護上のニーズと、情報伝送技術の進歩が相まって実用化し、導入されてきたPCM (Pulse Code Modulation) デジタル電流差動継電装置は、約10年に及ぶ実用実績から、すでに他の送電線リレーをしのぎ、わが国の基幹系送電線の主保護リレー(図1参照)として揺るぎない地位を築いている。主に経済性面の制約から超高圧以上の系統に限定される傾向にあったこの装置は、最も簡潔で事故区間検出性能が優れていることから、近年のデジタル伝送路の拡大、OPGW(光ファイバ複合架空地線)の普及などの恩恵もあって、154 kVおよび低位系統へも適用の広がりをみせつつある。

ここでは、保護対象端子数増大への対応性、信号端局装置

* 日立製作所 国分工場

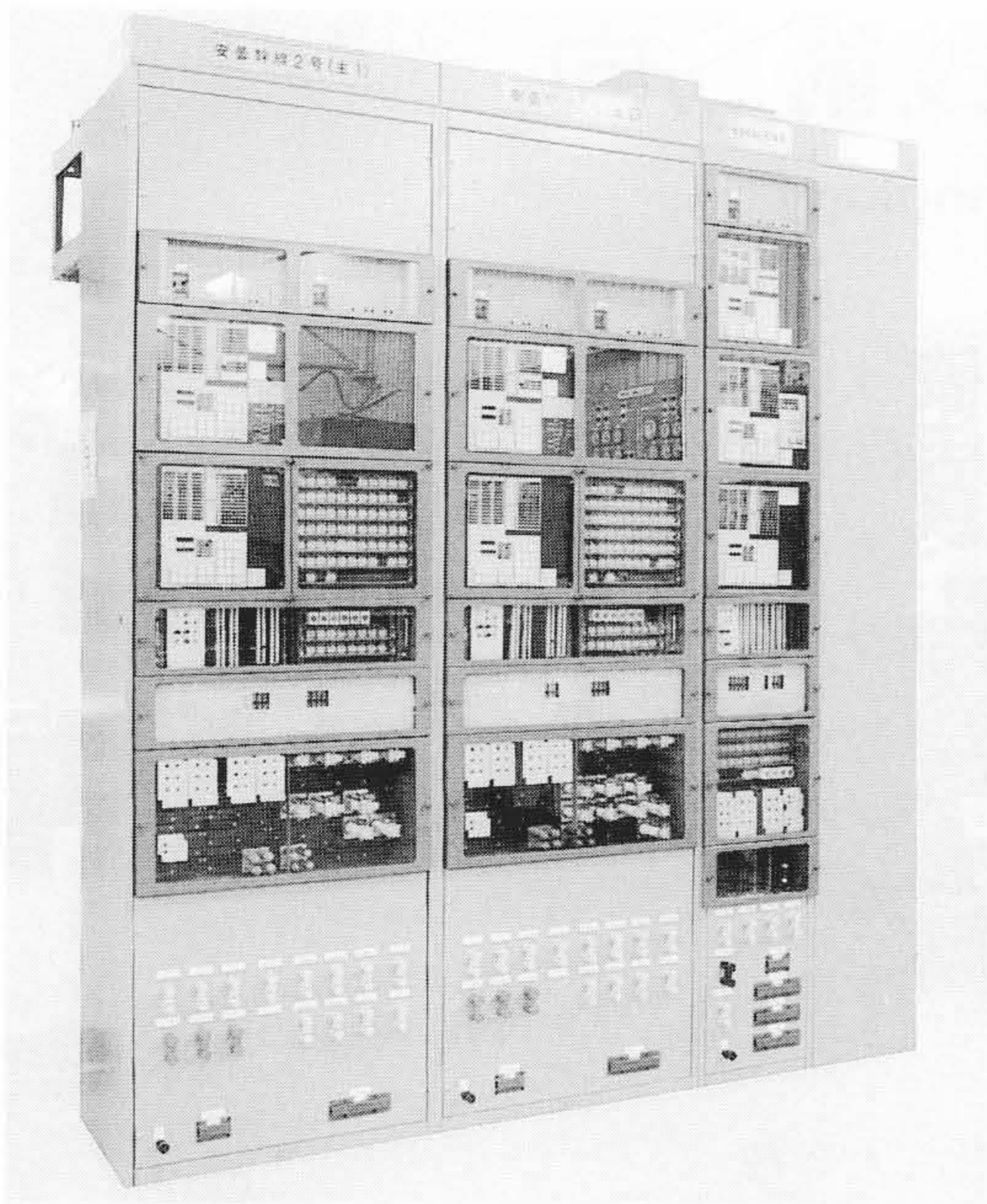
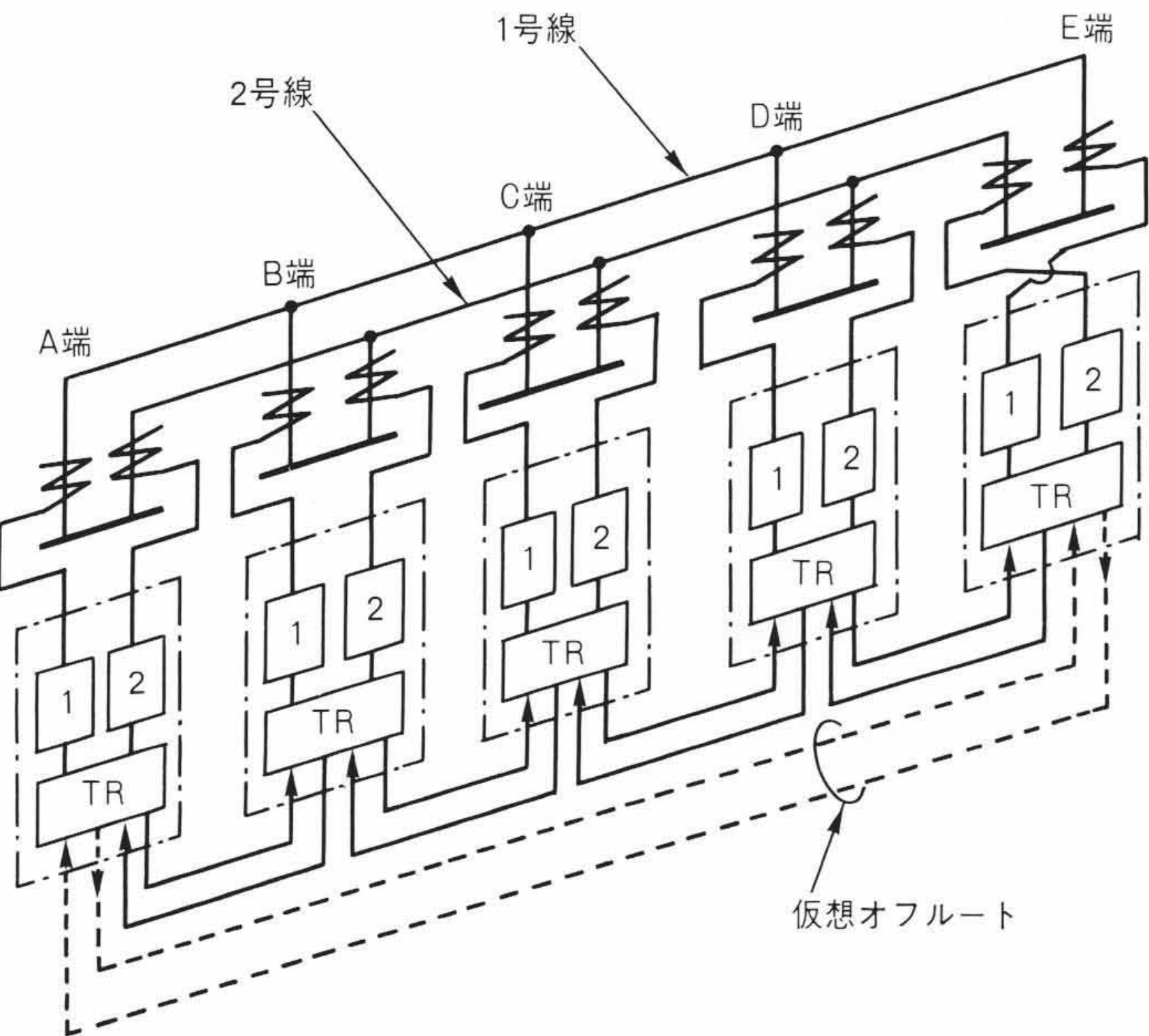


図1 500 kV送電線用デジタル電流差動保護継電装置 左側から、1系主保護リレー装置、2系主保護リレー装置および後備保護リレー装置を示す。



注：略語説明 1 (1号線リレー), 2 (2号線リレー), TR (伝送ユニット)

図2 2回線一括形高抵抗接地系統送電線用デジタル電流差動継電装置のシステム構成 2回線・5端子系統へ適用した場合を示す。伝送路は点線で示す仮想オフルートを持つループ状で、ループバック制御機能を持っている。伝送速度は1.544 Mビット/sである。

の省略化をねらいに、1.544 Mビット/sの伝送速度を用いて実用化した2回線一括形高抵抗接地系統用デジタル電流差動継電装置の概要を述べる⁵⁾。

(1) システムの構成と仕様

5端子系統へ適用するときの本装置を用いたシステム構成

表1 高抵抗接地系統送電線用デジタル電流差動継電装置のシステム仕様 各端子のリレー装置に、サンプリング同期制御機能を具備している。通信系とのリンクは、光信号および電気信号双方の仕様に対応できる。

項目		内容
保護方式	継電方式	短絡 各相電流差動継電方式 地絡 零相電流差動継電方式
	判定方式	各端子リレー判定方式
	適用端子数	最大5端子×2回線(2回線一括)
	再閉路方式	優先遮断高速再閉路方式
信号伝送方式	伝送速度	1.544 Mビット/s(デジタル一次群相当)
	サンプリング同期制御	リレー側自動同期(720 Hzサンプリング)
	伝送路制御機能	ループバック自動ルーティング
	多重化方式	時分割多重タイムスロット方式
	入出力信号形態	光 1.3 μm光CMI信号 電気 バイポーラAMI信号 (CCITT G703シリーズ勧告)

注：略語説明 CMI(Coded Mark Inversion)
AMI(Alternate Mark Inversion)
CCITT(国際電信電話諮問委員会)

を図2に示す。各端子で収集した2回線分の電流データを、1ルートの光伝送路で送受信するための伝送ユニットを装置内部に具備し、デジタル一次群に相当する伝送速度1.544 Mビット/sの信号で全端子の電流データの伝送を行う。

システムの仕様を表1に示す。

(2) 装置の構成

1端局分の装置外観を図3に示す。送電線2回線につき主保護1面、後備保護1面とし、デジタルリレーユニットは回線ごとに分離した。また、伝送ユニットは主保護2回線分に1台とし、片回線リレー電源を断としても、残りの回線には影響を及ぼさないように構成している。

(3) ループバック制御およびサンプリング同期制御

システム全体の伝送路が正常な場合は、前掲図2の点線で示す特定区間の伝送路をオープン(仮想オフルート)とし、データ伝送には使用しない。これに対し、万一伝送不可能な区間が生じたときにはその区間をオープンに切り換え、それまで仮想オフルートとなっていた正常時のオープン区間を閉じるように自動的に制御し、リレー運用を継続できるようにした点に特長がある。

電流データを各端子で同時刻でサンプリングするためのサンプリング同期制御は、伝送路片端のリレーを親局、その他の全端子を子局とし、親局が送信する基準信号に全子局のサンプリング時刻を合わせる方法で行っている。

2.2 母線保護リレー

ここでは、デジタル母線保護継電装置の最近での性能改善例を述べる。

(1) 変流器磁気飽和対策⁶⁾

母線保護リレーでは、外部至近端事故時に最も過酷な流出端の電流信号を入力する変流器の、磁気飽和の影響による誤

動作を防止することが技術的なポイントである。この点の性能も、デジタル演算処理ならではの長所を生かした新しいアルゴリズムの開発、適用によって大幅に改善されている。

すなわち、母線の内部事故時と外部事故時とでは、差電流の波形の一部に、図4に示すような差異が現れることに着目

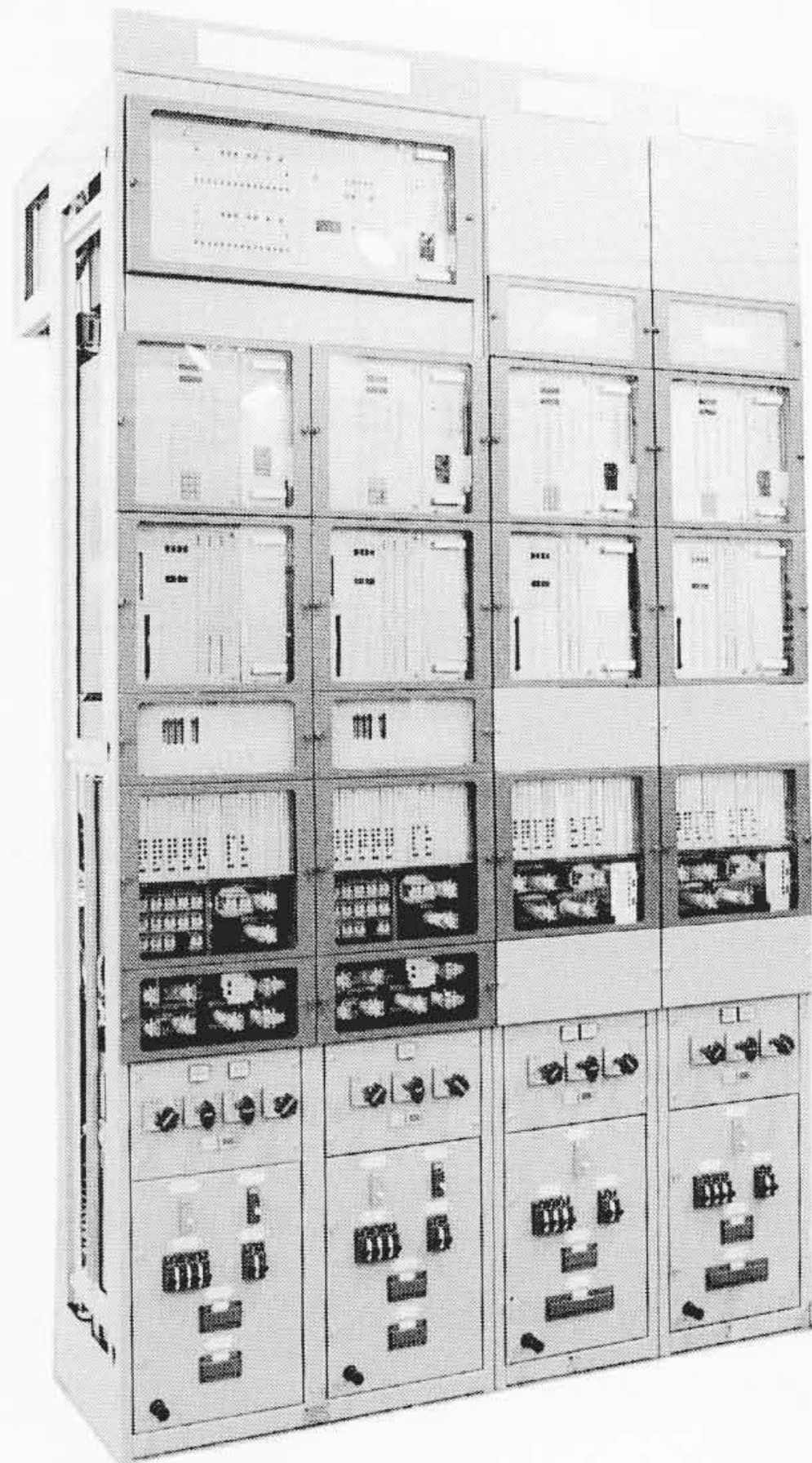


図3 ループバック制御機能を持つデジタル電流差動保護継電装置の外観 送電線2回線につき主保護1面(左)、後備保護1面(右)で構成している。主保護装置の最上段が伝送ユニットである。

し、この差を演算で識別させ、母線外部事故での誤動作を確実に防止するようにしている。この方式は、過渡特性指定なしの変流器が用いられているケースへ適用しても効果がある。現在、日立製作所が納入している66 kVから500 kVまでのデジタル母線保護継電装置はこのタイプである。

(2) 変流器二次電流切換処理

二重母線の保護に用いる分割保護リレーの、母線断路器の操作に連動した変流器二次切換は、従来、断路器の開閉条件によってリレー入力回路を接点回路で切り換える構成としていた。デジタル母線保護継電装置では、リレー入力と断路器条件とを分離して取り込み、マイクロプロセッサのソフトウェア処理でリレー入力を切り換える方式とすることにより、入力回路構成をシンプルにするとともに、無接点化による信頼度向上を実現した。

(3) 多回線母線の保護⁷⁾

母線には多数の送電線などが接続されるので入力電流量が多いこと、前述の変流器磁気飽和対策アルゴリズムの処理などマイクロプロセッサの演算負担が大きくなる。このため、10回線以上の母線へ適用する場合は、図5に示すようにアナログ入力処理部、断路器条件取込み回路、トリップ回路を10回線ごとにまとめた入力装置盤とすることにより、この課題を克服した。保護対象回線数と装置構成の例を表2に示す。また、20回線を対象として納入した高抵抗接地系デジタル母線保護継電装置の外観を図6に示す。

2.3 変圧器保護リレー⁸⁾

最近の変圧器保護リレーでの顕著な改善は、その過負荷保護特性にみられる。

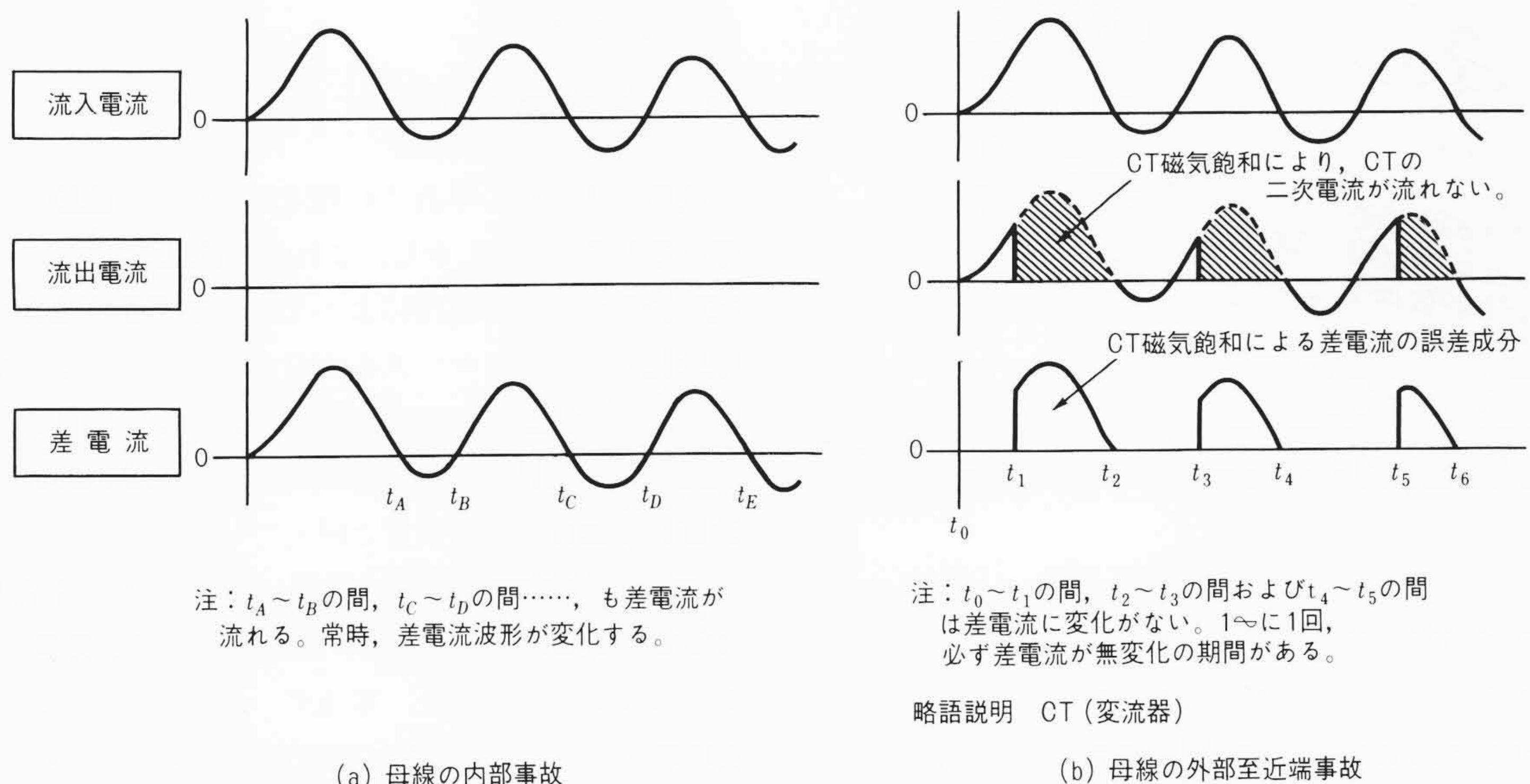


図4 母線保護リレーの変流器磁気飽和対策の原理 母線の内部事故時と外部事故とでは、上から3番目の差電流波形に差異が現れる。この差を演算で識別し、外部事故での誤動作を確実に防止できるようにした。

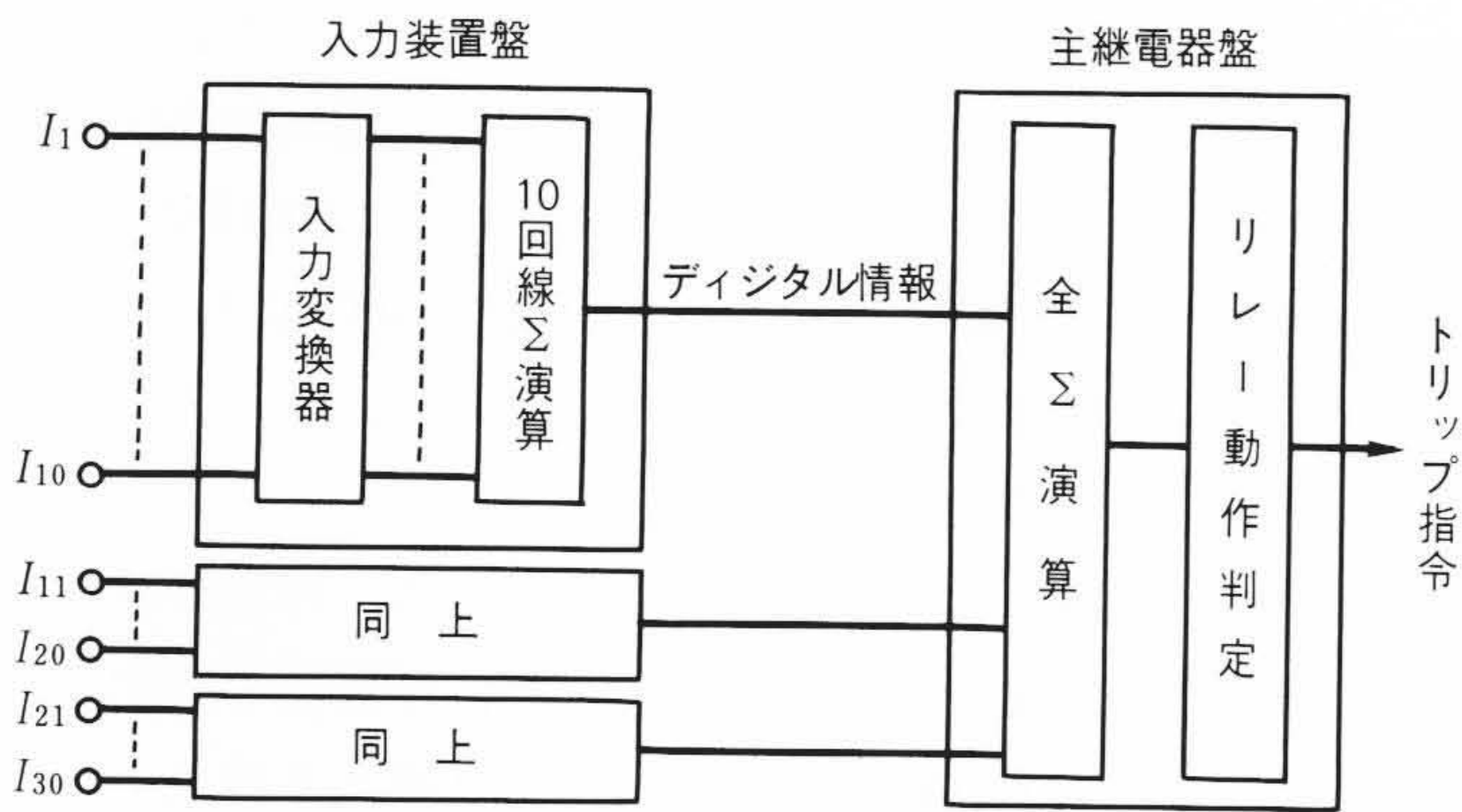


図5 デジタル形多回線母線保護継電装置のブロック構成 アナログ入力処理部、断路器条件取込み回路などを10回線ごとにまとめた入力装置盤としている。主継電器盤は1面である。

表2 デジタル形多回線母線保護継電装置の所要盤面数 対象回線数に応じて、盤面数を増やすことで回線数増に対応できる。

保護対象回線数	装置構成	面数
10回線+1ブスタイ	主継電器盤+入力装置盤	2面
20回線+1ブスタイ	主継電器盤+入力装置盤×2	3面
30回線+1ブスタイ	主継電器盤+入力装置盤×3	4面

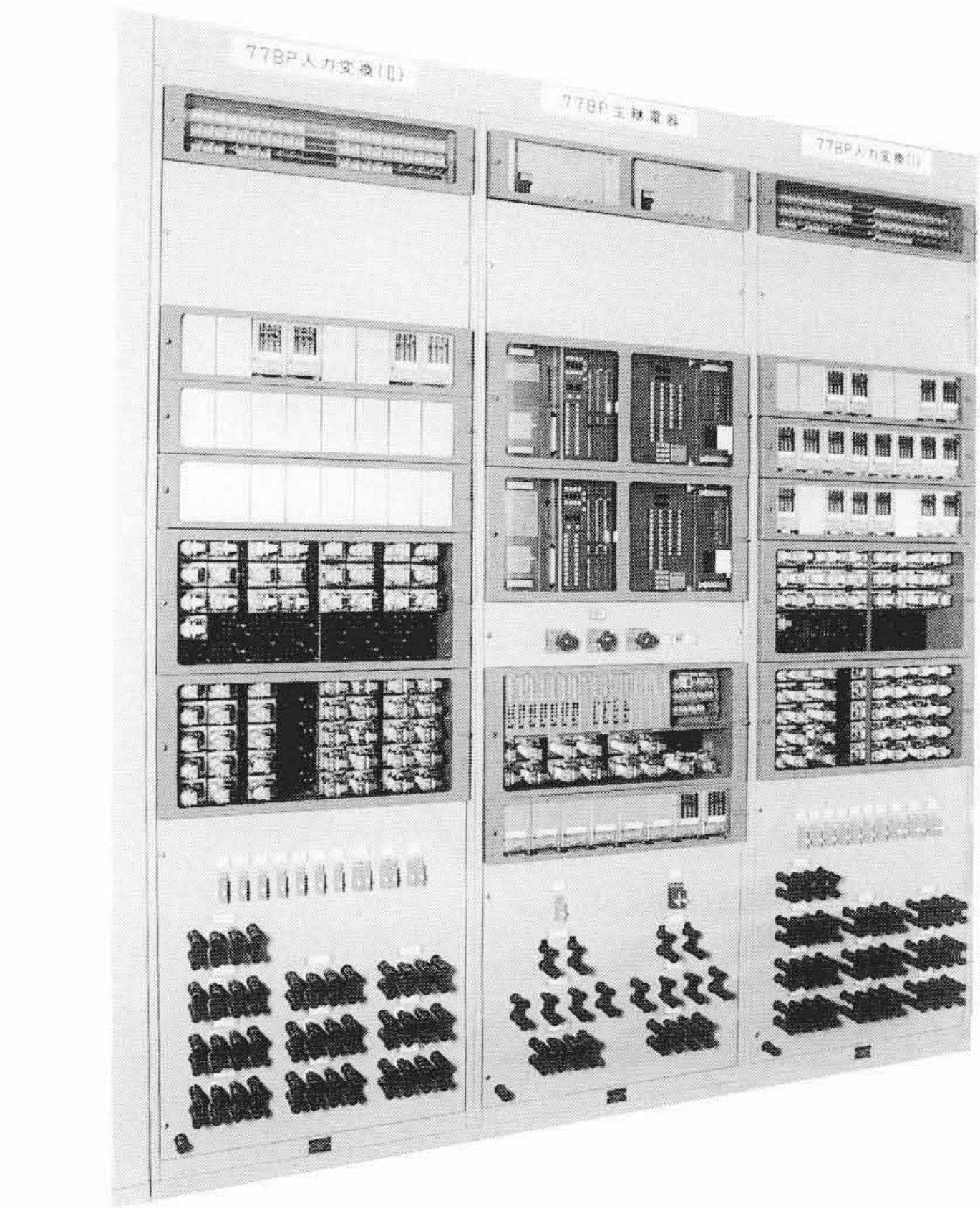
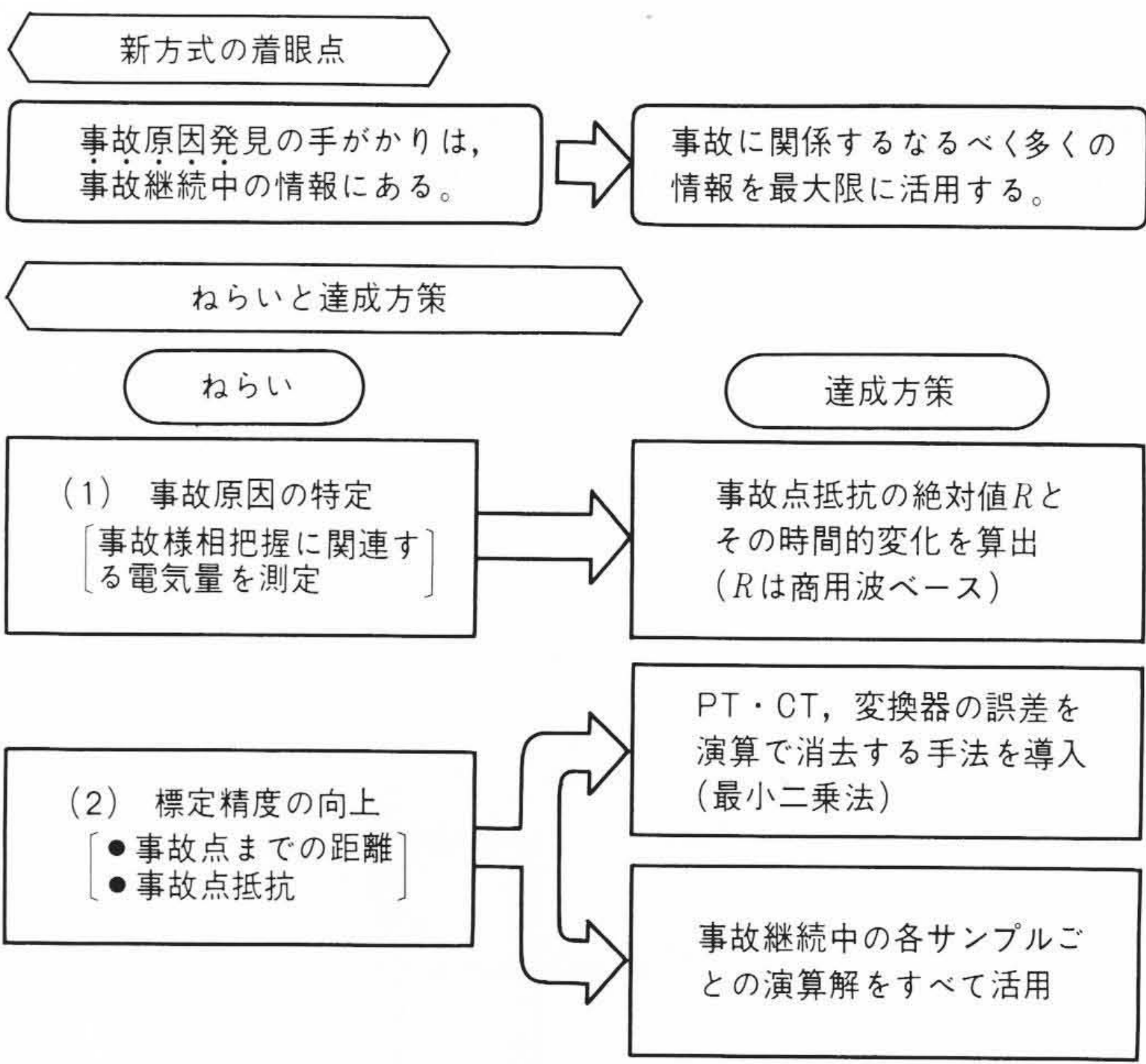


図6 デジタル形多回線母線保護継電装置の盤構成 20回線を対象の装置を示す。両サイドが入力装置盤で、中央が主継電器盤である。

変圧器の寿命は発熱によって決まる。その支配的要因は巻線温度であることから、変圧器に流れる負荷電流を用いて巻線の温度上昇を予測演算し、許容限界温度上昇値と比較する方法をとっている。この予測演算手法の採用により、従来方式の欠点であった(1) 比較的余裕のある過負荷での過剰遮断、



注：略語説明 PT (電圧変成器), CT (電流変成器)
図7 事故様相特定装置のねらいとその達成方策 事故に関係するなるべく多くの情報を最大限に活用し、事故原因の推定と標定精度の大幅改善を果たすようにしている。

および(2) 過電流リレー検出レベル限界付近での動作、復帰の繰り返しによる過負荷解消不能などをなくし、負荷変動に追従した適正な過負荷保護が可能となった。このメリットは、電力供給のサービス向上につながるものと考える。

このように過負荷保護性能の大幅向上を達成しながらも、主保護リレーユニットで演算処理できること、および従来入力変換盤で行っていた比率差動リレーの電流整合を、ソフトウェア処理で自動化したことから、デジタル形変圧器保護継電装置は、従来装置に比べ盤面数で50%以下にコンパクト化が図られている。

3 故障点標定装置

従来、送電線の事故点の標定には種々の故障点標定装置が導入されてきた。しかし、これらの装置は通常1～3 kmの標定誤差を生じ故障様相によっては標定不能の場合もあり、故障発見に手間どるケースも少なくない。このような背景から事故点標定ばかりでなく、事故原因を推定できる新しい形の故障点標定装置を北陸電力株式会社と共同で開発した⁹⁾。この装置を事故様相特定装置と呼んでいる。

この事故様相特定装置の発想、ねらいとその達成方策を図7に示す。従来のインピーダンス形故障点標定装置とは異なり、(1) 送電線両端の電圧、電流データを取り込み、かつ演算手法に最小二乗法を適用して標定精度を300 m以内と飛躍的に改善した。(2) 従来装置では、その影響をいかに避けるかに努力が払わ

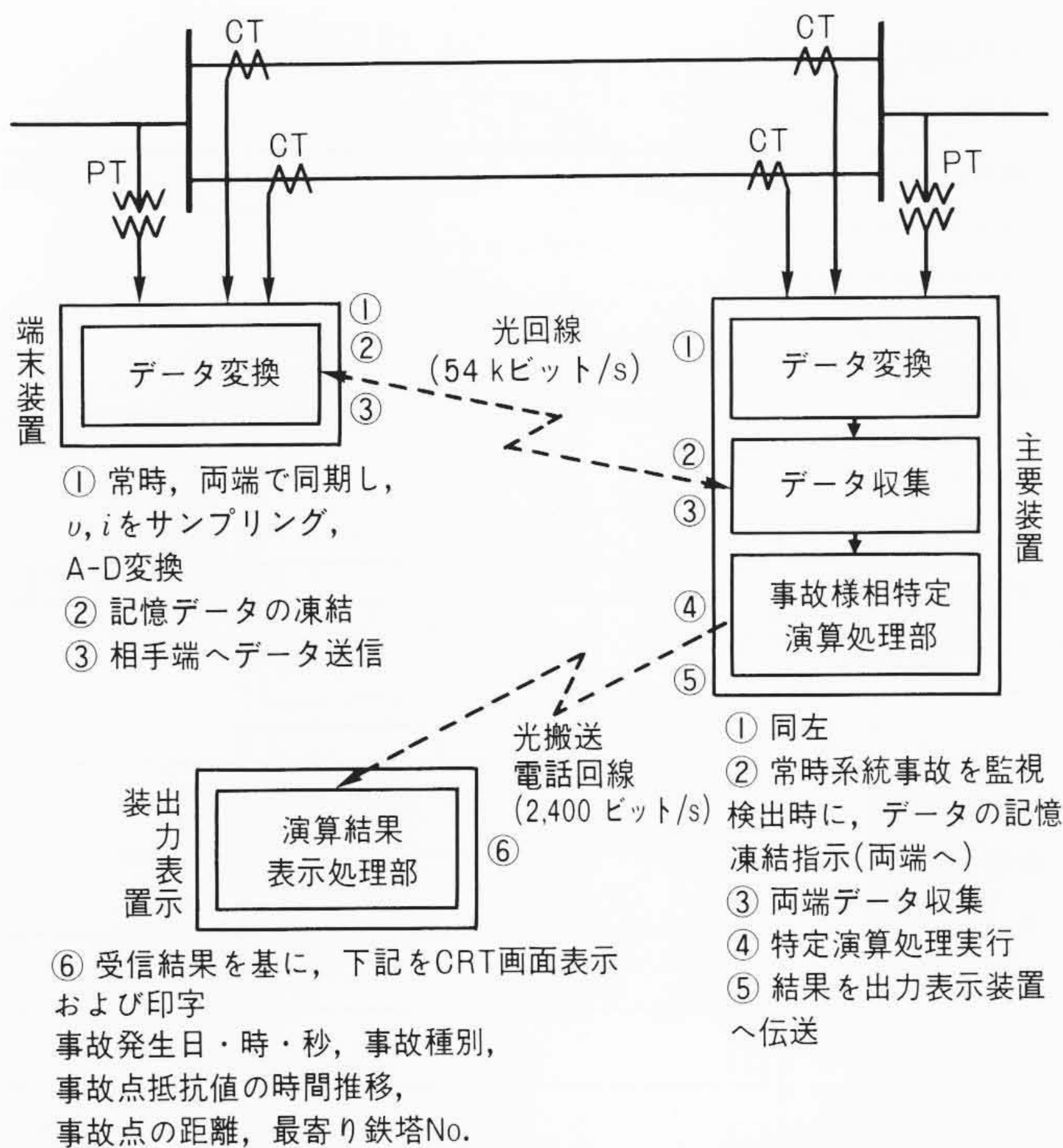


図8 事故様相特定装置のシステム構成および動作 送電線の両端情報を一方端(主要装置側)へ収集し、「キルヒホッフの法則」による電圧方程式を各サンプリングごとにたて、連立化して解く。

れた事故点抵抗を積極的に算出し、絶対値と時間的变化から事故原因を推定した。

以上の二つの点に特徴がある。本装置のシステム構成と動作の概要を図8に示す。

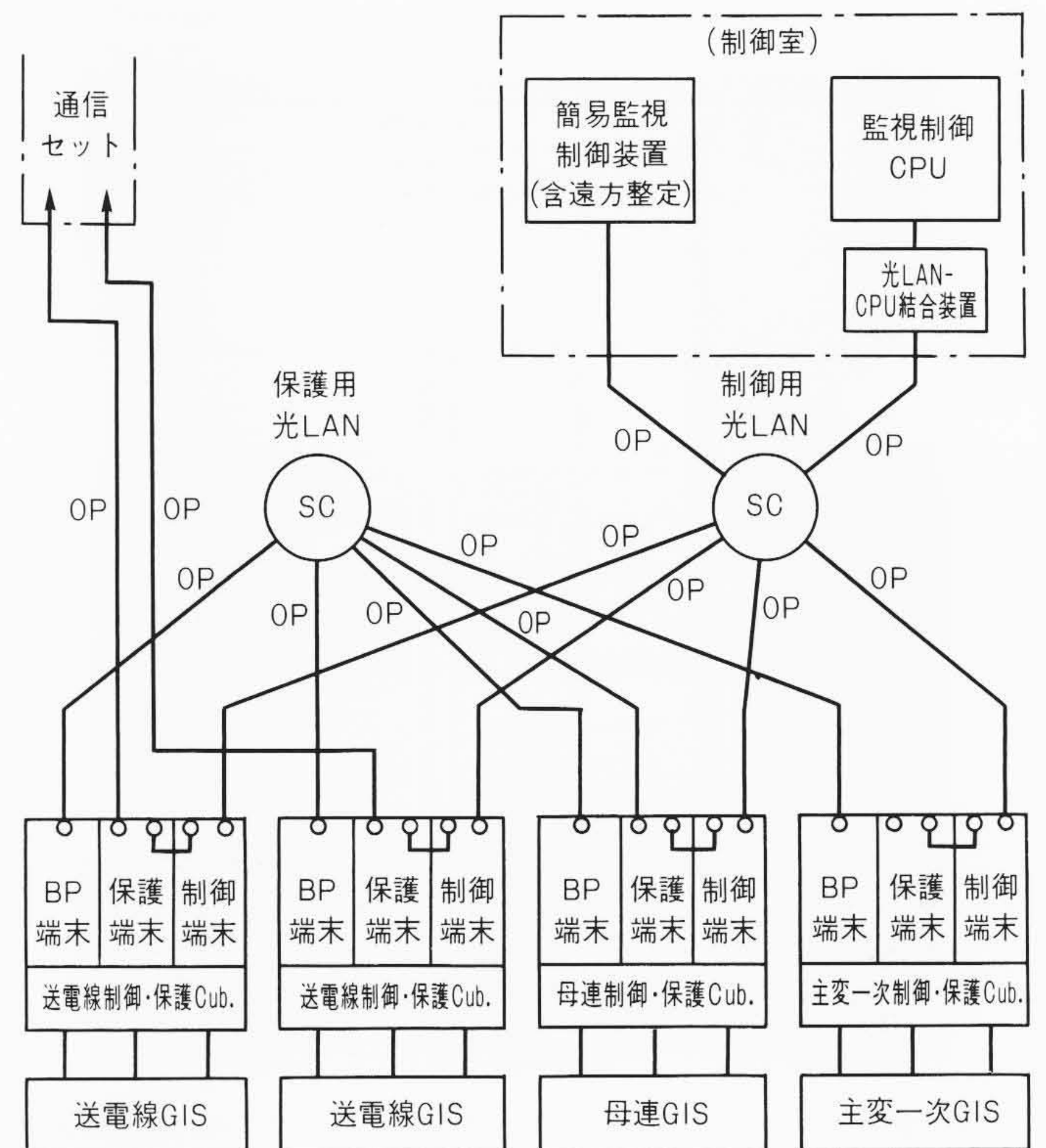
本装置の適用によって事故復旧の迅速化、事故巡視の省力化などの効果が期待される。

4 光LANを用いた変電所統合化保護・制御システム

電力系統の保護・制御システムは、昭和55年ごろから進められてきたデジタル化によって、性能・機能両面できわめて大きな飛躍を遂げた。しかし、社会生活、産業活動の電気への依存度の増大に伴う電力安定供給への要望の高まりは、電力流通機構の中枢を担う基幹変電所の保護・制御システムへの要求をますます高度のものとしている。この要求に対し、従来のシステム構成の単なる延長による対応では、装置数の増加・機器と諸装置とを結ぶ制御ケーブルの輻輳(ふくそう)化・建設工期の長期化・運転保守の複雑化など種々の問題を生じる懸念がある。

従来システムの長所は踏襲しながら、上述の問題点を抜本的に解決する対応策として、光LANを適用した変電所統合化全デジタル保護・制御システムを開発し実用化した。

ここでは、すでに実用に供されている二つのシステムの概要について述べる。



注：略語説明
CPU(コンピュータ)、GIS(ガス絶縁)、SC(光スターカップラ)、Cub.(屋外キュービクル)、OP(光ファイバケーブル)、BP(母線保護リレー)

図9 屋外分散形全デジタル保護・制御システムの構成 世界で初めて東京電力株式会社新坂戸変電所に適用された。平成2年5月から実運用に入っている。

4.1 屋外分散形全デジタル保護・制御システム^{4), 10), 11)}

平成2年5月、東京電力株式会社新坂戸変電所(275 kV/66 kVの超高压変電所、将来は500 kV変電所に昇圧予定)で、光LANを応用した屋外分散形全デジタル保護・制御システムが世界で初めて実運用に入った。このシステムは、東京電力株式会社と株式会社東芝、三菱電機株式会社および日立製作所が共同開発したもので上記重電3社で分担して製作し、納入したものである。

(1) システム構成

システム構成を図9に示すが、そのポイントは次のとおりである。

- 装置単位を機能別に分離独立させ、装置間は光伝送で結合することを基本とした。
- 保護・制御装置ともに送電線・母線・変圧器など機能ごとに端末装置としてまとめ、それらを互いにバス形の光LAN(光スターカップラ使用)で結合した。保護・制御はそれぞれ独立の光LANを持つ。
- 端末装置は、屋外の一次機器近傍に分散配置する。このため、耐候性・耐環境性施策を講じた図10に示す屋外キュービクルに端末装置を収容している。
- 端末装置は制御用と保護用に大別されるが、いずれも

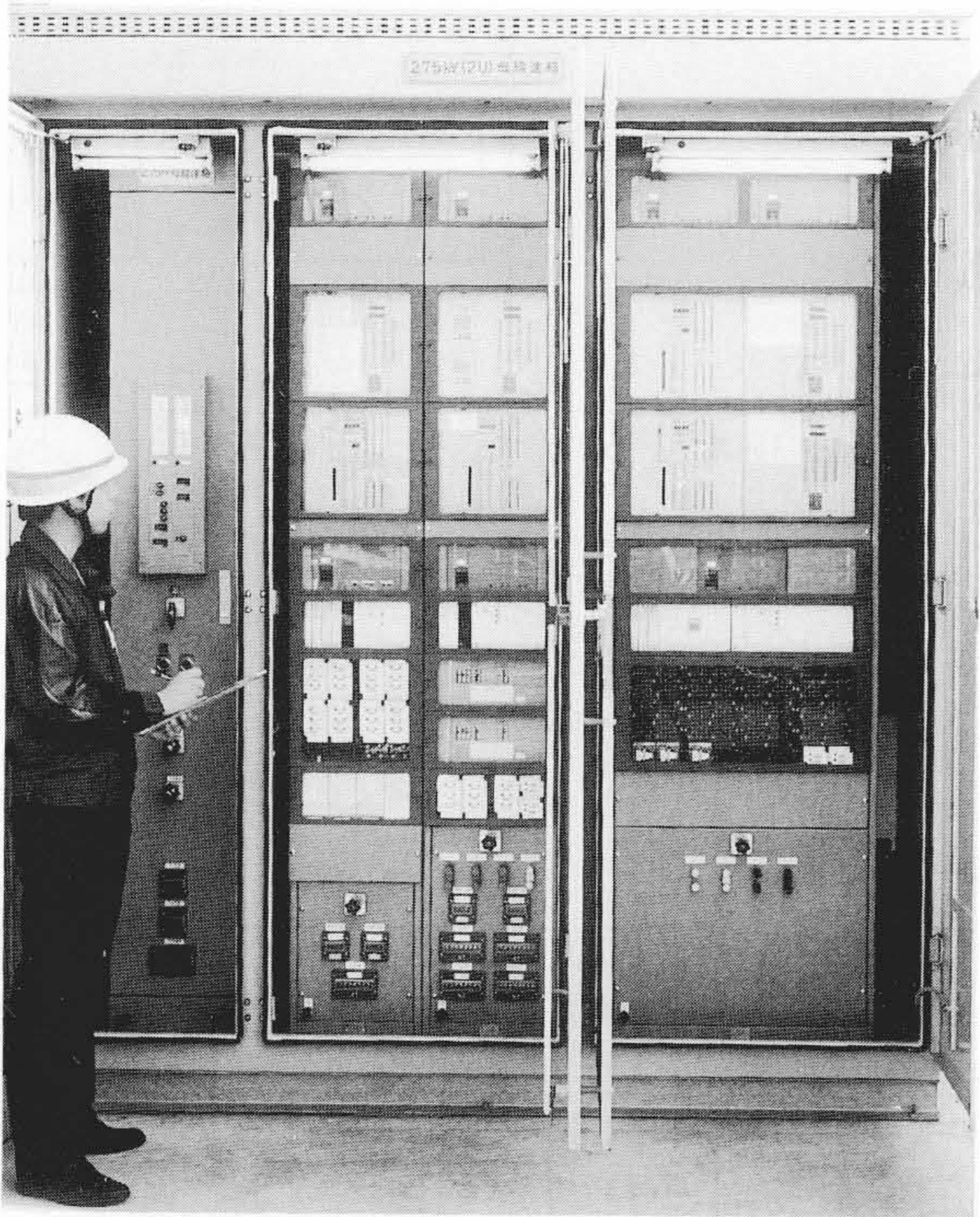


図10 屋外キュービクルの例 外扉を開き、収納された保護用および制御用の端末装置の正面パネルの状況を示す。

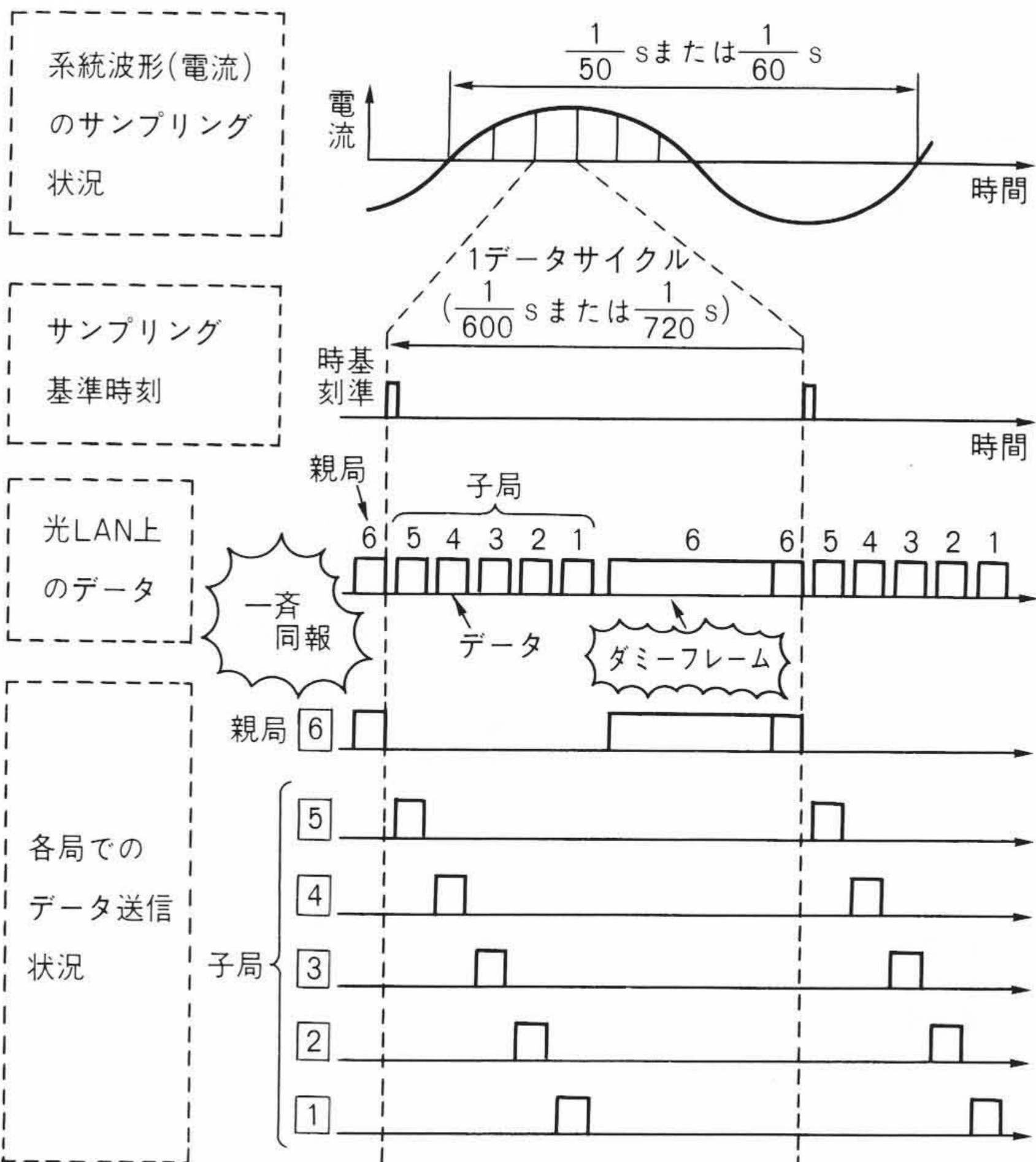


図11 ダミーフレーム長制御による伝送周期の一定化 端末数が異なっても、親局がダミーフレーム長を常にコントロールし、伝送周期(1データサイクル)を一定長に保つようにしている。

- (i) データ収集ユニット, (ii) 演算ユニット, (iii) 操作指令ユニットおよび(iv) 光伝送制御ユニットの四つのユニットで構成している。
- (e) 監視制御用コンピュータとは、制御室で光LAN-CPU結合装置を介して接続される。
- (f) 信頼度および保守運用面から、すべての装置は完全2系列構成を基本とする。今回は1号機のため、1系は屋外分散形、2系が従来形の2系列システムとしている。

(2) 構内光LAN

新システムでは、異メーカー製の端末装置などを結合する必要のあることから、国際規格であるトークンパッシングバス方式(IEEE802.4)に準拠の、保護・制御システム用光LANを前記4社で開発し適用した。開発技術の要点は次の3点である。

- (a) IEEE802.4では、物理層の伝送媒体に同軸ケーブルを標準としているが、これを光化するため、光スターカップラの適用、光送信器、光受信器仕様の標準化、ハードウェア開発などを行った。
- (b) 本来、トークンパッシングバス方式ではLANに接続される端末装置数の変化などにより、システムの伝送周期(1データサイクル長)が異なるが、図11に示すように、代表となる装置(同図中の親局)にダミーフレーム長を高精度に制御する機能を付与し、常に伝送周期がサンプリング周期と等しくなるようにした。

表3 光LANの基本仕様 発光素子はLED(発光ダイオード)、受光素子はAPD(アバランシェフォトダイオード)で構成できる。

項目	仕様
最大端局間距離	2 km(端局～光スターカップラ間1 km)
伝送路媒体	光ファイバケーブル
伝送路トポロジー	光スターカップラによるバス形
伝送制御方式	IEEE802.4トークンバス方式
伝送速度	10 Mビット/s

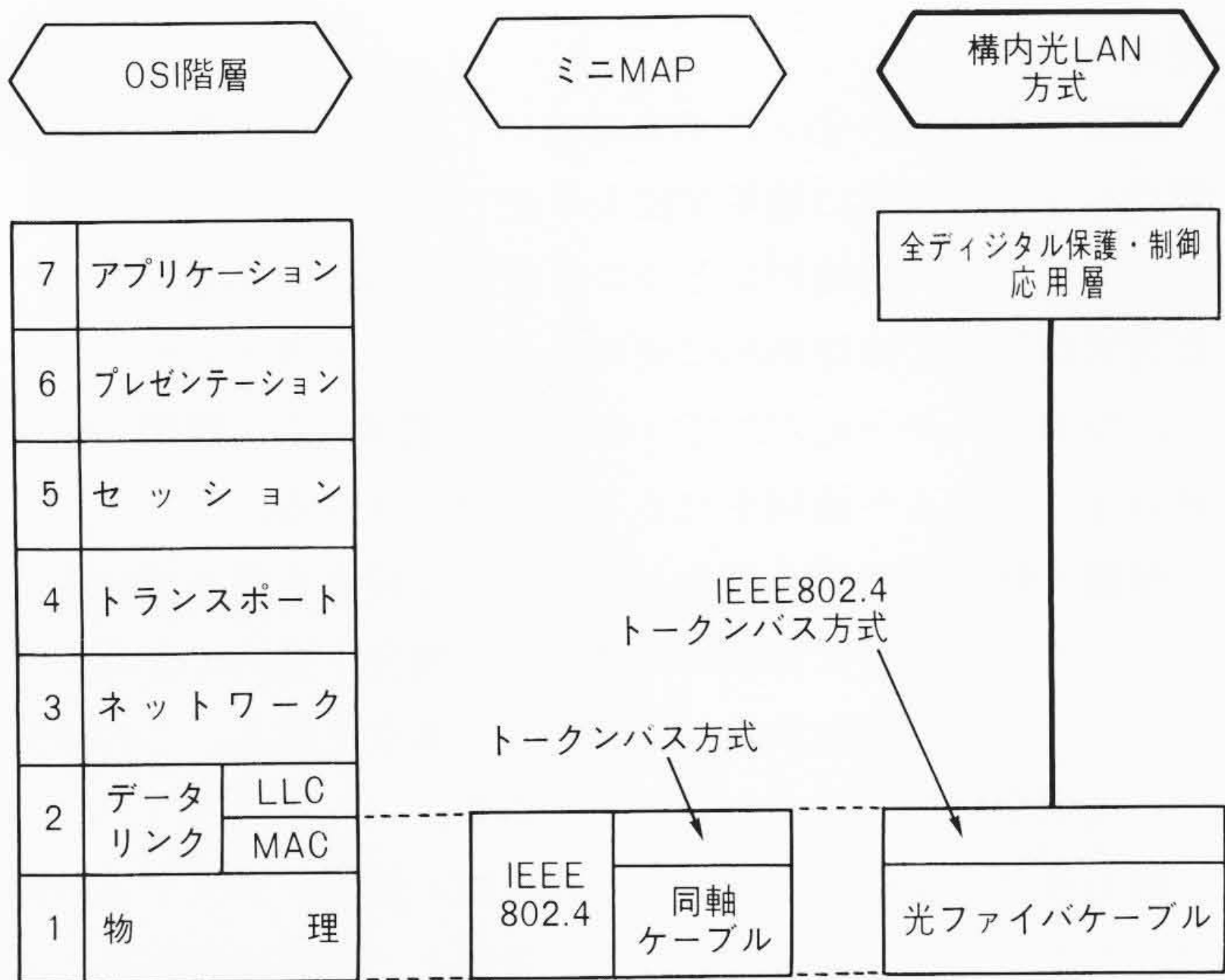
- (c) 全端末装置のサンプリング時刻を同期化させるため、親局の一斉同報タイミングで、その時刻を調整できるようにした。

構内光LANの基本仕様を表3に、またこの構内光LANのOSI(開放形システム間相互接続)階層での位置づけを図12に示す。

(3) 屋外分散形保護リレーシステム

(a) リモート整定

送電線保護リレー装置および母線保護リレー装置とも、リレー方式は従来のパネル形と同一方式としたが、屋外に分散設置することから、保護・制御インタフェース(54 kビット/s光リンク)を通じ、当該制御端末および制御用光LAN経由で制御室の遠方整定装置からリモート整定ができるようにした。



注：略語説明
OSI (開放形システム間相互接続),
LLC (論理リンク制御), MAC (媒体アクセス制御)
MAP [米国General Motors社が提唱する工業用LANの伝送制御手順規約 (OSIに準拠)]

図12 開発適用した光LANのOSI階層における位置づけ ミニMAP 相当の階層をカバーしている。物理層は光ファイバケーブルである。

(b) 光LAN

母線保護リレー装置は、各回線に設けた端末装置から保護用光LANを介し送られてくる電流情報を受信し、電流差動演算を行い、内部事故検出時にトリップ信号を、光LAN経由で各端末装置へ伝送する。信頼度確保の面から、一括用と分割用母線保護リレー装置とは、ハード的に独立した演算ユニット、光伝送制御ユニットで構成した。

(4) 監視制御システムと分散形制御端末装置

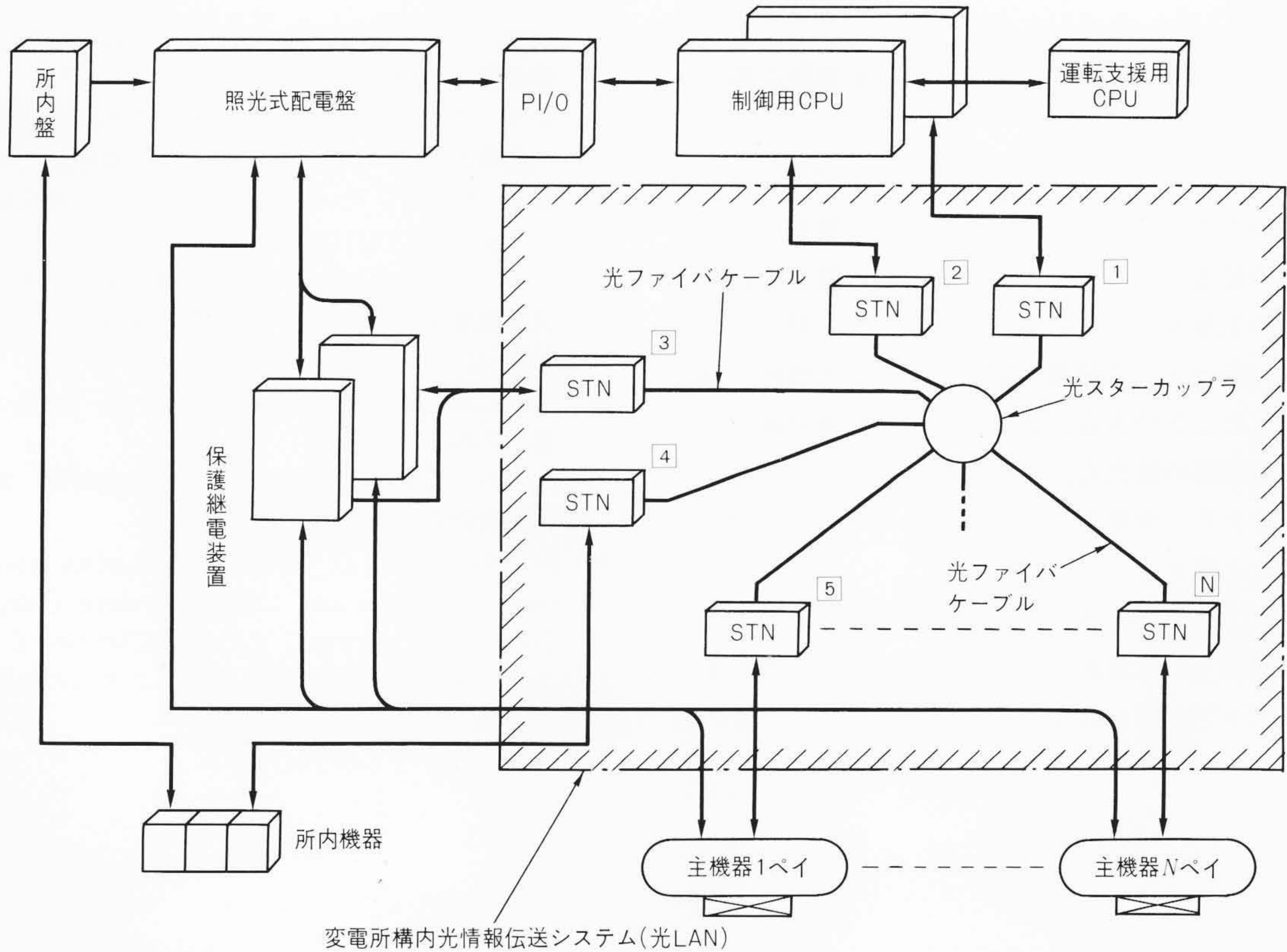
屋外分散形監視制御システムの構成要素は、前掲図9に示すとおりである。各構成要素のうち、光LAN-CPU結合装置および分散形制御端末装置以外の諸装置の機能は、従来システムの場合と基本的には変わりはないので、ここでの記述は省略する。

(a) 光LAN-CPU結合装置

この装置の役割は、光LAN上の伝送フォーマットとCPU入出力フォーマットの相互変換を行い、両者をインタフェースすることが主体である。

(b) 制御端末装置

光LAN応用の分散形制御システムの基本となるもので、当該の送電線、母線、変圧器ごとに独立に設置される。各



注：略語説明 STN-1 (CPU端局装置), STN-2 (CPU端局装置), STN-3 (リレー端局装置), STN-4 (所内端局装置)
STN-5 (1ペイ端局装置), STN-N (Nペイ端局装置)

図13 光LANを用いた高機能監視制御システム 光LAN, 制御用CPUを主体に構成した新しい監視制御システムと、メタリックケーブルによる従来形照光式配電盤を用いたシステムの2系列構成となっている。

電気量の計測，同期検定，機器操作，自動オシログラフデータ記憶，保護リレーの使用・ロックなどの機能を持っている。

4.2 高機能監視制御システム

電力系統の大規模化・複雑化に伴い事故様相も複雑化し，影響も広範囲に及ぶようになっており，運転員には迅速・的確な判断が求められている。こうした要請にこたえて，知識工学を応用した運転支援システムを導入し，これに用いる詳細情報を含む変電所監視制御用データ収集に構内光情報伝送システム(光LAN)を用いた高機能監視制御システムを，関西電力株式会社東近江開閉所に納入し，平成3年2月から運用が開始されている。

このシステムは，図13に示すように光LANと制御用CPUを主体に構成した新しい監視制御システムと，メタリックケーブルによる従来形照光式配電盤の監視制御系を，ハイブリッド構成で2系列化して運用される。また，運転員の知的判断の一部を制御用CPUと接続されるAI推論用CPUで推論させることによって，運転員の負担を軽減し，ヒューマンエラーの防止を図るとともに，個々の運転員が持つノウハウを体系化して知識の伝承を可能とするなどの特長を持っている。

このシステムに用いる光LANの基本仕様は，屋外分散形保護制御システムで開発した光LANに準拠した。

5 結 言

以上，電力系統の保護・制御システムの技術動向と製品適用例について述べた。

この分野にマイクロプロセッサを中心とするデジタル技術が使われ始めたのは約10年前にすぎないが，現在では従来のアナログ形の装置に代わり，デジタル形の装置が保護・制御システムの主流を占めるに至っている。その最大の要因は，デジタル化によって保護・制御システムの性能・機能が大幅に向上したことである。また，マイクロ波回線のデジタル化や光伝送路の拡充も，この分野のシステムの高度化と信頼性向上に大きく貢献し，デジタル化の流れに側面から拍車をかけたと言えよう。

このようなデジタル化の一大潮流は，今後もそのときどきに台頭する保護上の諸課題に，的確に対処できる道を開くようブラッシュアップが図られながら，継続されていくものと

考えられる。

保護・制御統合化システムについては，基幹系統の新設変電所を中心に着実に適用が拡大されていくであろう。その際，システムのキー技術のひとつである光LANは，本論文で述べた方式が国内では標準的に使用されていくと考えられる。また，将来導入が予定されているUHV変電所にも，保護・制御統合化システムが適用されるものと推定される。

保護・制御システムはきわめて重要な使命を担っているので，これまでも常に信頼性に留意した開発を進めてきた。今後とも，電力の安定供給という視点に重点を置き，この分野の技術開発に努力していく考えである。

終わりに，本稿で述べた多くの技術・装置・システムの開発にあたっては，各電力会社のご理解とご指導に負うところが大きく，ここに関係各位に対し深謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 小特集：最近の電力系統保護リレーシステムの動向，電気学会誌，105巻，11号(昭60-12)
- 2) 特集：デジタル制御・保護，電気評論，75巻，4号(平2-4)
- 3) 渡辺，外：光伝送を利用した電力系統・保護制御技術の現状と将来見通し，平成3年電気学会全国大会 シンポジウム(S.16)
- 4) 大浦，外：変電所保護・制御システムへの光LAN応用，電気学会誌，109巻，10号(平1-10)
- 5) 山下，外：高抵抗接地系統用デジタル電流差動キャリアリレー装置の開発，平成3年電気学会全国大会，No.1410(平3-4)
- 6) 大浦，外：デジタル母線保護リレー方式，昭和62年電気学会全国大会，No.1337(昭62-4)
- 7) 山下，外：高抵抗接地系母線保護用デジタル形多回線母線保護継電装置の開発，平成3年電気学会全国大会，No.1386(平3-4)
- 8) 滝口，外：制御・保護装置のソフトウェア技術の動向，電気評論，75巻，4号(平2-4)
- 9) 辻，外：送電線の事故様相特定装置の開発，電気学会電力技術研究会資料，PE-90-94(平2-7)
- 10) M. Suzuki, et al.: Development of an Integrated Substation Protection and Control System Using Fiber-Optic Local Area Network, CIGRE SC34(1987-6)
- 11) 久保，外：電力系統制御・保護システムの技術動向，日立評論，70，8，863～870(昭63-8)