

基幹送電用直流送電制御保護技術の開発

Development of HVDC Control and Protection Systems for Bulk Power Transmission

電源の遠隔立地のため、長距離大容量送電技術の確立が求められている。直流送電技術のうち、とくに基幹系統用として用いるための技術としては、制御システムの開発が必要であった。そのため、今回基幹送電系へ直流送電を適用するための制御保護技術として、周波数検出による原子力出力追従制御、系統事故時の高速再起動、多端子送電時の高速潮流反転制御技術などの開発を行ない、更に、マイクロコンピュータを使用した三重化制御装置を試作して、シミュレータによる機能検証を行なった。

その結果、原子力発電所の各種制御系との協調性も確認され、更に、多端子制御システムについても2端子系と同等の性能が得られることが分かった。

堀内 進* *Susumu Horiuchi*
河合忠雄** *Tadao Kawai*
小西博雄*** *Hiroo Konishi*
真鳥岩男*** *Iwao Matori*
中尾俊彦**** *Toshihiko Nakao*

1 緒 言

昭和45年にサイリスタバルブが実用化されて以来、従来の水銀バルブに比べて交直変換器の信頼度が大幅に改善されたため、直流送電システムの建設が世界各地で促進された。一方、我が国でも、昭和52年東京電力株式会社新信濃周波数変換所¹⁾、昭和54年電源開発株式会社北海道・本州間直流連系設備²⁾が相次いで運開し、運転実績を積み重ねている。しかし、国内では直流送電はもっぱら系統間連系装置として緊急時の電力応援、系統間の経済融通などに使われている。そのため将来、遠隔地電源からの長距離大容量送電、系統安定度対策など基幹送電系に直流送電を適用するためには、新たな制御保護技術の開発が必要とされていた。

このような情勢に対処するため、東京電力株式会社と日立製作所は、昭和55年から長距離大容量基幹送電に用いる制御保護システムの共同開発を進め、原子力発電所との協調制御技術、系統拡張への対応が容易な多端子制御技術、及びデジタル化などによる高信頼度化システム技術、を中心に次期直流送電制御保護システムの確立を図った。

その成果として、今回、実用規模の制御保護装置を製作するとともに、直流送電シミュレータ、原子力プラントシミュレータなどを使用して機能検証試験を実施し、その性能を確認した。本論文では、まず直流送電制御保護システムの構成を紹介し、更に今回開発した各種制御方式・装置³⁾及びその試験結果について述べる。

2 制御保護技術の開発課題

2.1 開発の歴史

日立製作所では、昭和40年からサイリスタ式直流送電変換所機器の開発に着手したが、同時に制御保護システム開発用の直流送電シミュレータを設置し、各種技術開発を行ってきた。図1に現在までの制御保護技術の開発の経緯を示す。昭和40年代前半の基礎検討期に基本的な直流送電制御保護技術を確立し、ハードウェア的にもアナログICを用いた演算回路をいち早く実用化した。そしてそれを昭和45年に運開した財団法人機械振興協会納め125kV、300Aサイリスタ変換装置⁴⁾に適用して装置の小形化、高信頼度化を実現した。その後、系統間連系システムに対し数々の特徴をもつ我が国独自

の定力率制御方式⁵⁾や、安定運転に欠かせないパルス間隔が一定なパルス移相制御方式⁶⁾を開発し、新信濃周波数変換設備及び北本直流連系設備へ適用して実用化段階に入った。次に、財団法人電力中央研究所納め多端子直流送電シミュレータなどの開発を通じて多端子制御技術⁷⁾、弱小交流系への適用技術の確立を図ってきた。

更に昭和55年からは、東京電力株式会社との共同研究によって基幹送電用制御保護技術の開発に着手し、原子力発電所との協調制御方式、多端子制御の機能向上、マイクロコンピュータ適用による三重系デジタル制御システムの開発を行ってきた。またこの間、財団法人電力中央研究所納め大規模交直連系系統シミュレータ装置⁸⁾を製作し、長距離大容量直流送電の現象解析の容易化を図った。

2.2 基幹送電実現のための技術課題

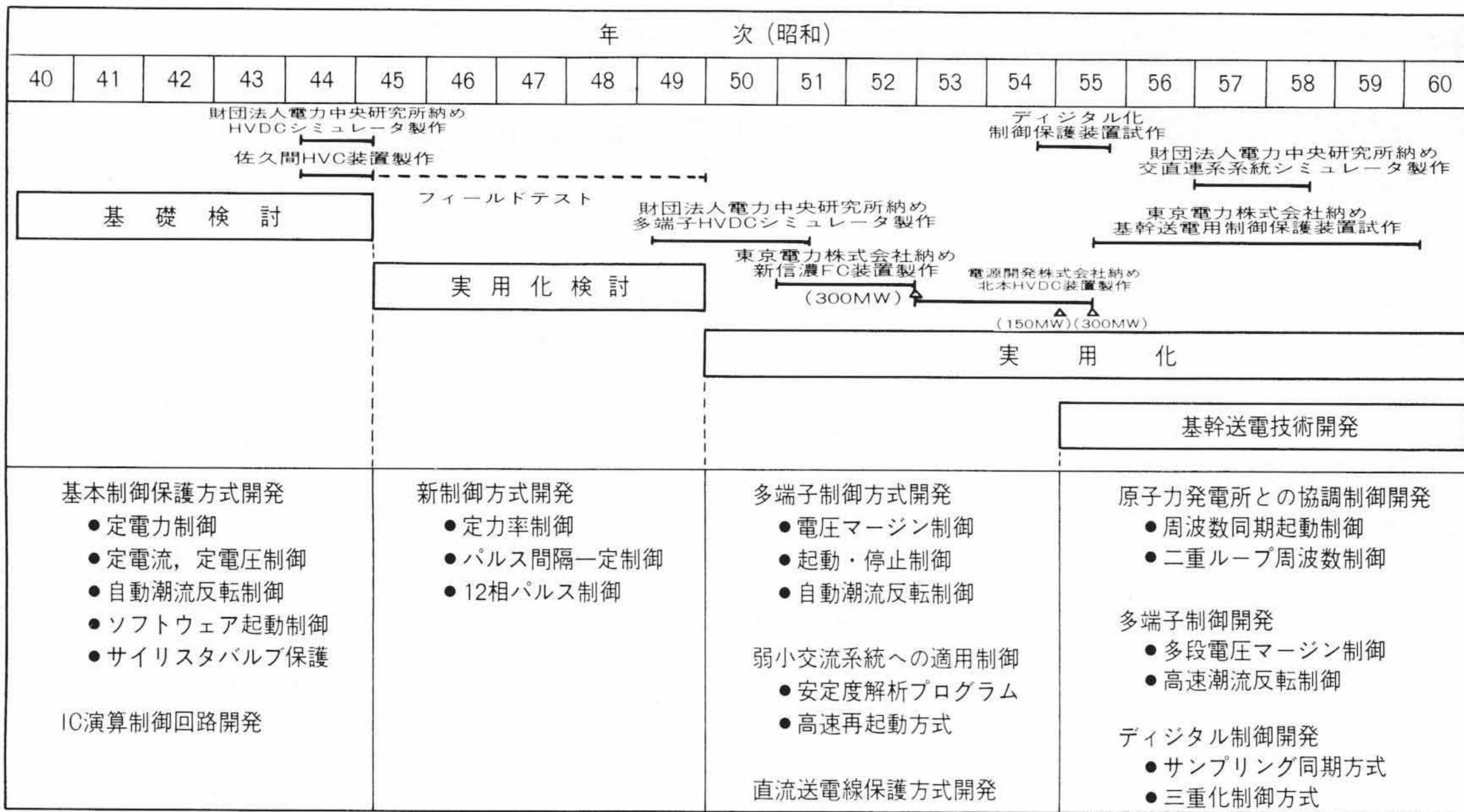
基本的な直流送電システムの制御保護技術は、我が国では昭和55年の北本直流連系の完成によりほぼ確立されたと言える。しかし、直流送電の特徴を十分発揮するためには連系する交流系統、発電所などと協調のとれた制御保護システムを開発し、適用する必要がある。

我が国では、将来の電力需要の増大に対応しUHV送電特別委員会などで検討を進めているように、原子力発電所を電源基地とした送電容量10GW級、送電距離800km程度の長距離大容量送電の必要性が高まっている。そのため、制御保護上の課題は図2に示すように大きく三つに分類される。

第一の課題は、電源が原子力発電所となることから、不必要なスクラムを防止するための協調制御方式の開発である。一般に原子力発電所と系統との協調制御を行なう際には、負荷となる直流送電系で周波数維持制御を行なうほうが有利で、発電所のタービン蒸気圧力制御系にじょう乱を与えないような制御システムとする必要がある。

第二の課題は、将来の系統拡張への対応を容易にすることである。従来直流送電は、2端子送電を基本としており、多端子送電は通信システムへの依存度の増加、制御の複雑化などの理由で運用面で制約が多いとされていた。そのため、これらの問題点を解決する安定な多端子制御技術の確立が必要である。

* 東京電力株式会社技術開発研究所 ** 日立製作所国分工場 *** 日立製作所日立研究所 **** 日立製作所日立工場



注：略語説明

HVDC(High Voltage Direct Current), HVC(High Voltage Converter), FC(Frequency Converter)

図1 日立製作所直流送電制御保護技術開発の経緯 昭和40年に開発を開始し、昭和55年の電源開発株式会社北本直流連系設備の運用で基本技術の開発は終了した。その後多端子制御などの開発を踏まえ、昭和55年から基幹送電用制御保護技術の開発に着手した。

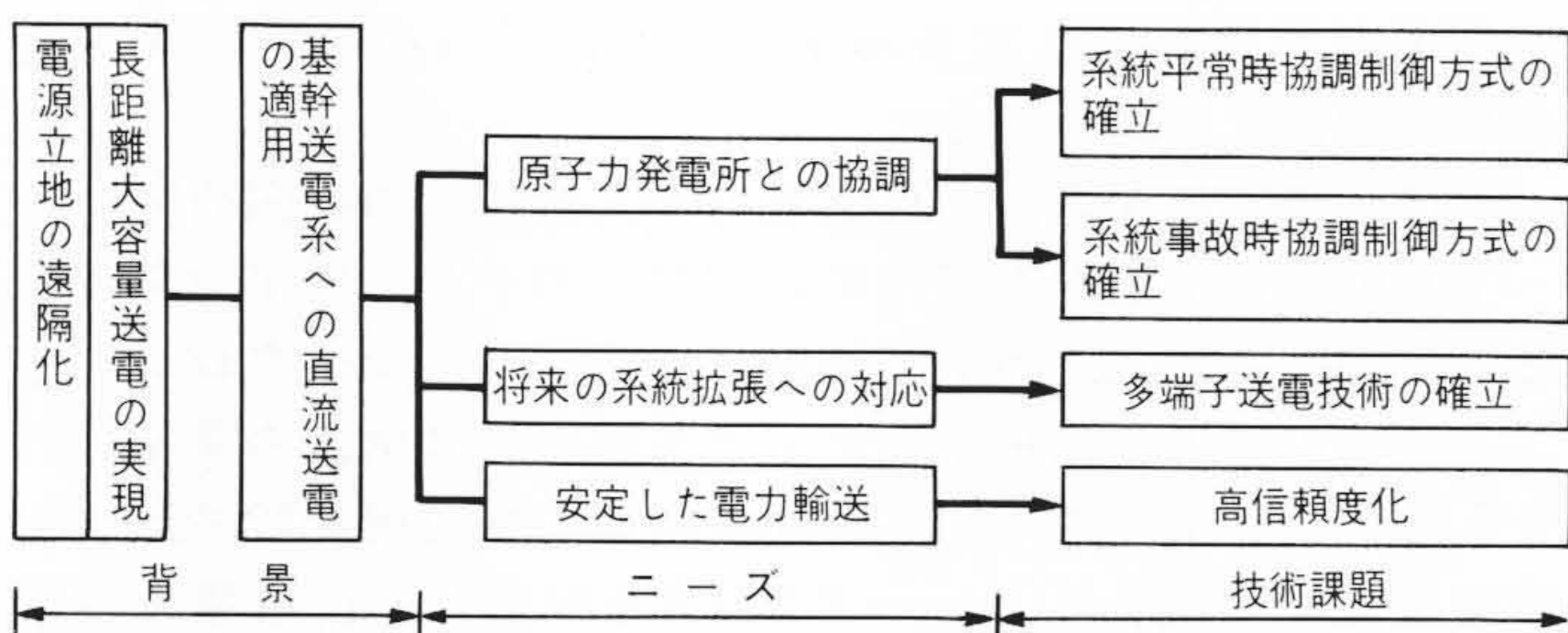


図2 基幹送電実現のための技術課題 長距離大容量送電を行なうためには、原子力発電所との協調、多端子制御技術の確立及び高信頼度制御保護システムの開発、が課題となった。

第三の課題は、安定な大容量送電を行なう場合の装置故障によるシステム停止の防止と保守点検の容易化である。

3 制御保護システムの構成

3.1 基本構成

直流送電は、電力を送り出す順変換所と受け口となる逆変換所が一对となって運用され、順、逆変換所の指定は制御系により自由に設定し電力潮流の反転を行なう。図3に、長距離送電での制御保護システムの基本構成を示す。このシステムは、一般にシステム全体を監視制御する親変換所と、親変換所の指令によって運転制御される子変換所から構成される。直流系を運転するために必要な交流系統側の情報(周波数、潮流状態など)は、親変換所にいったん集約され、そこで最適運転電力の計算、起動・停止の判定を行なって両端の制御装置に指令を与える。したがって、通常の運転操作は親変換所で行なわれる。そのため長距離大容量送電の場合、親変換所は電源側に設置し、原子力発電所との協調制御を行なうので、信号伝送依存度の低い安定した制御が可能となる。

3.2 変換器制御装置の階層構成

更に、具体的な変換器制御装置の構成を図4に示す。直流送電システムは一般に経済性、信頼性、損失低減などの理由で正極と負極を一对とした双極構成が基本となる。制御装置は、各ブリッジに対応したバルブ群制御装置を底辺とした階層構

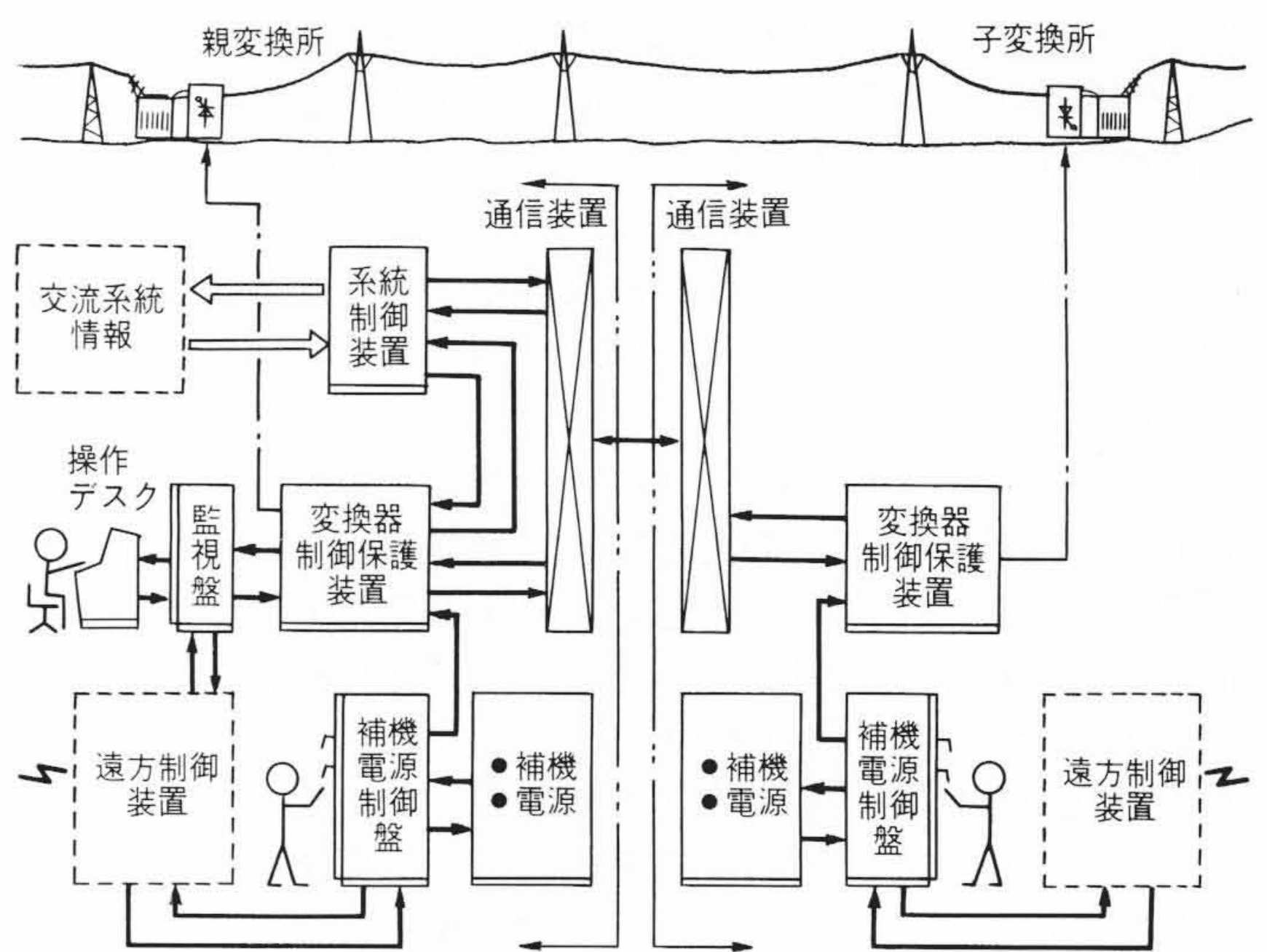


図3 直流送電制御システムの基本構成 直流送電は、親変換所と子変換所の一対で構成され、通常は親変換所でシステム全体の監視制御を行なう。

造をもつ。相手端変換所の装置は通信系を介して極単位にインタフェースをもち、極ごとに独立して運転される。これら極制御装置は系統制御装置により統括制御されるとともに、各々単独でも運転可能な構成となっている。

4 原子力発電所との協調制御

4.1 送電電力の制御方式

原子力発電所では、目下のところ基底負荷運転を行ない、周波数調整のための運転は行っていない。そのため交流系統と直接連系される場合、系統全体の周波数維持は水力発電所、火力発電所の出力を調整して行なわれている。しかし、原子力発電所の出力をすべて直流系で送電する場合、その送電電力値は発電機タービンの蒸気圧力制御系と十分協調をとる必要がある。図5に今回開発した直流送電電力制御系の概略構成を示す。本方式は、発電所と直流系の各制御システムの独立性を維持しながら、かつ信頼度の高い制御を行なうた

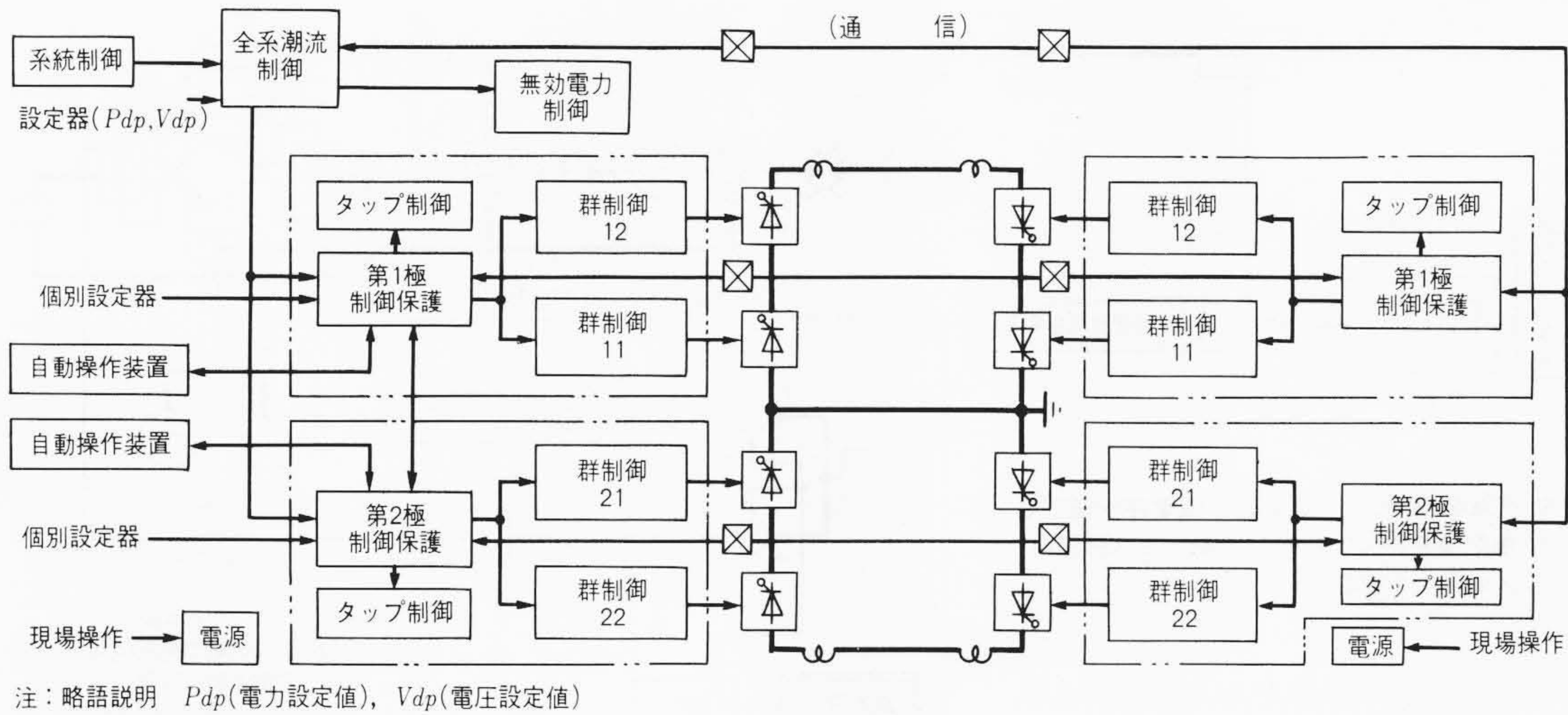


図4 変換器制御装置の階層構成 制御装置はバルブ群制御装置を底辺に、系統制御装置を頂点とした階層構造をもつ。

注：略語説明 Pdp(電力設定値), Vdp(電圧設定値)

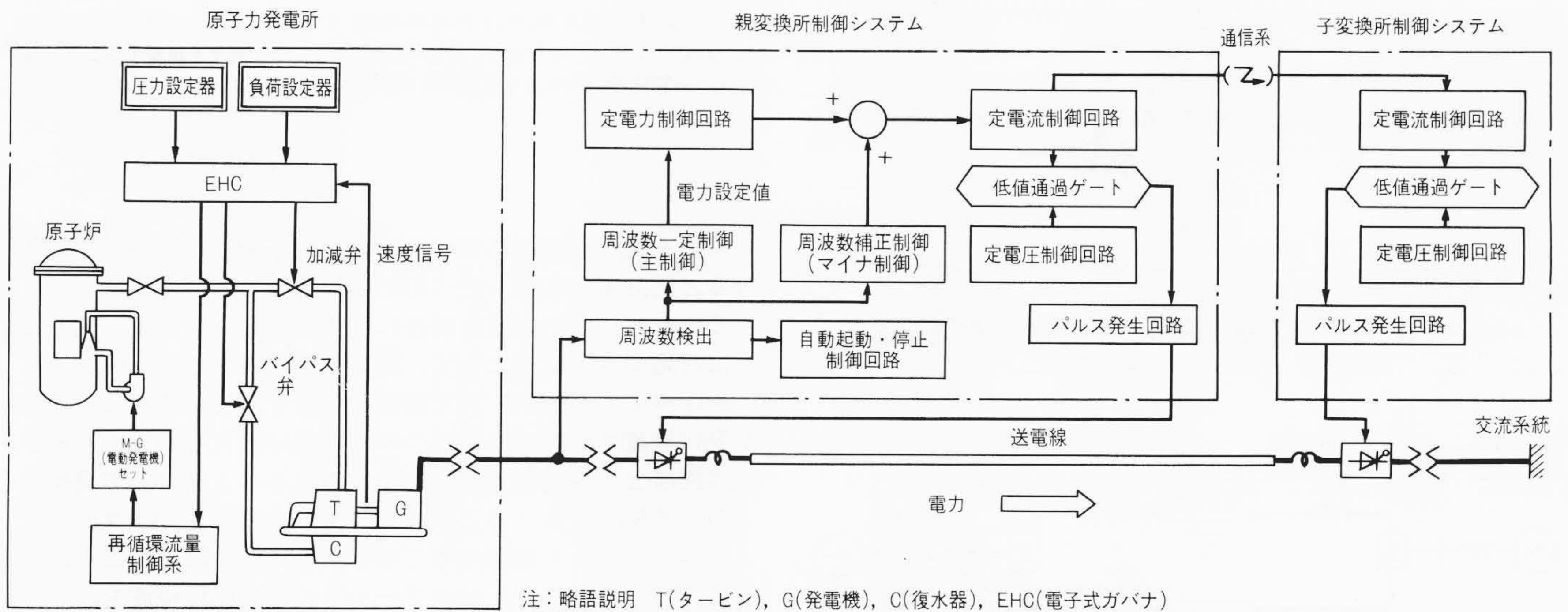


図5 発電所との協調制御システム 原子力発電所は、負荷設定に応じた圧力制御を行ない、直流変換所は、周波数検出による負荷制御を行なうことによって協調を図る。

め、周波数検出を主体とした方式である。すなわち、発電所出力の設定は従来と同様負荷設定器で行ない、タービン蒸気圧力を制御する。一方、直流送電制御系では、発電機出力周波数を検出して、常に定格値となるように送電電力を制御する。この周波数制御系は、積分制御を主体とした主制御と、比例制御を主体としたマイナ制御の二重ループ構成で、0.1秒以下の高速応答と±0.02Hz以内の高精度制御を実現し、また信頼度的にもマイナ制御を極単位に分散独立させて、冗長性のあるシステムとなっている。

4.2 系統事故時の制御

従来直流送電は、系統事故が発生し変換所母線電圧が規定値以下になると、いったん運転を停止し、電圧が正常に回復したあと再起動していた。そのため、交流送電系に比べて系統事故発生時の波及による送電中断時間が長いことが大きな欠点とされていた。特に原子力発電所では、このような送電中断が原子炉スクラムの原因となり、直流送電適用上の大きな問題であった。

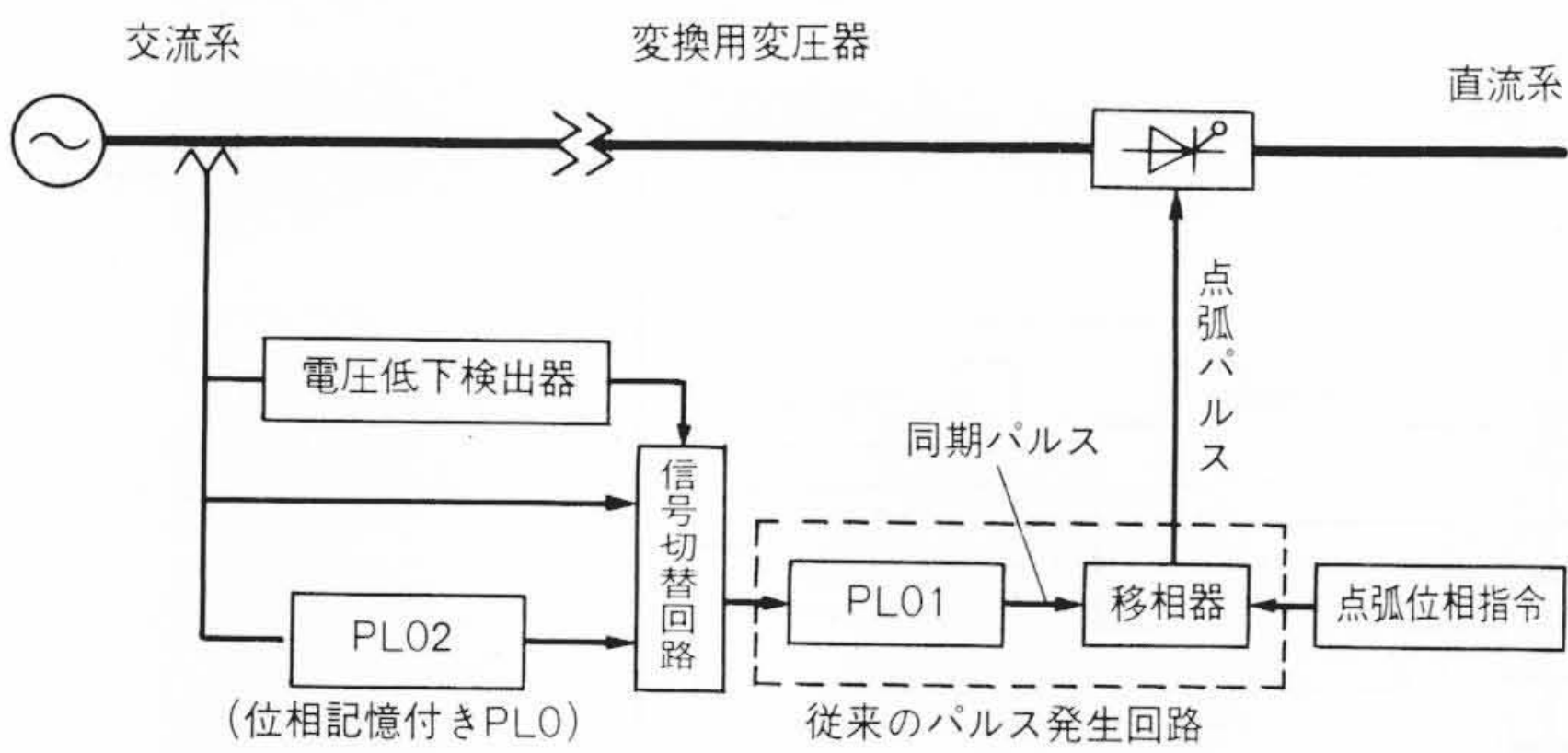
この系統事故時停止の大きな要因は、サイリスタバルブの点弧パルス発生のための同期電源が確保できないことにある。そのため、図6に示す位相記憶回路付きのAPPS(自動パルス移相器)を開発⁹⁾し、更に事故回復時の転流失敗及び過渡動揺を防止するための位相制御を行なうことによって、短時

間の電圧低下であればそのまま運転継続し、電圧回復とともに送電が行なえる高速再起動方式を実現した。

図7にシミュレータによる3線地絡試験の結果を示す。電圧低下が約70msで回復したのち、約100msで事故前の送電レベルに達している。またその後、周波数制御により送電電力が増加しタービンの減速を図っている。このように電源からの単独送電の場合、直流送電では負荷側との脱調問題がないので発電機との協調だけを考えれば安定な送電を継続することができる。

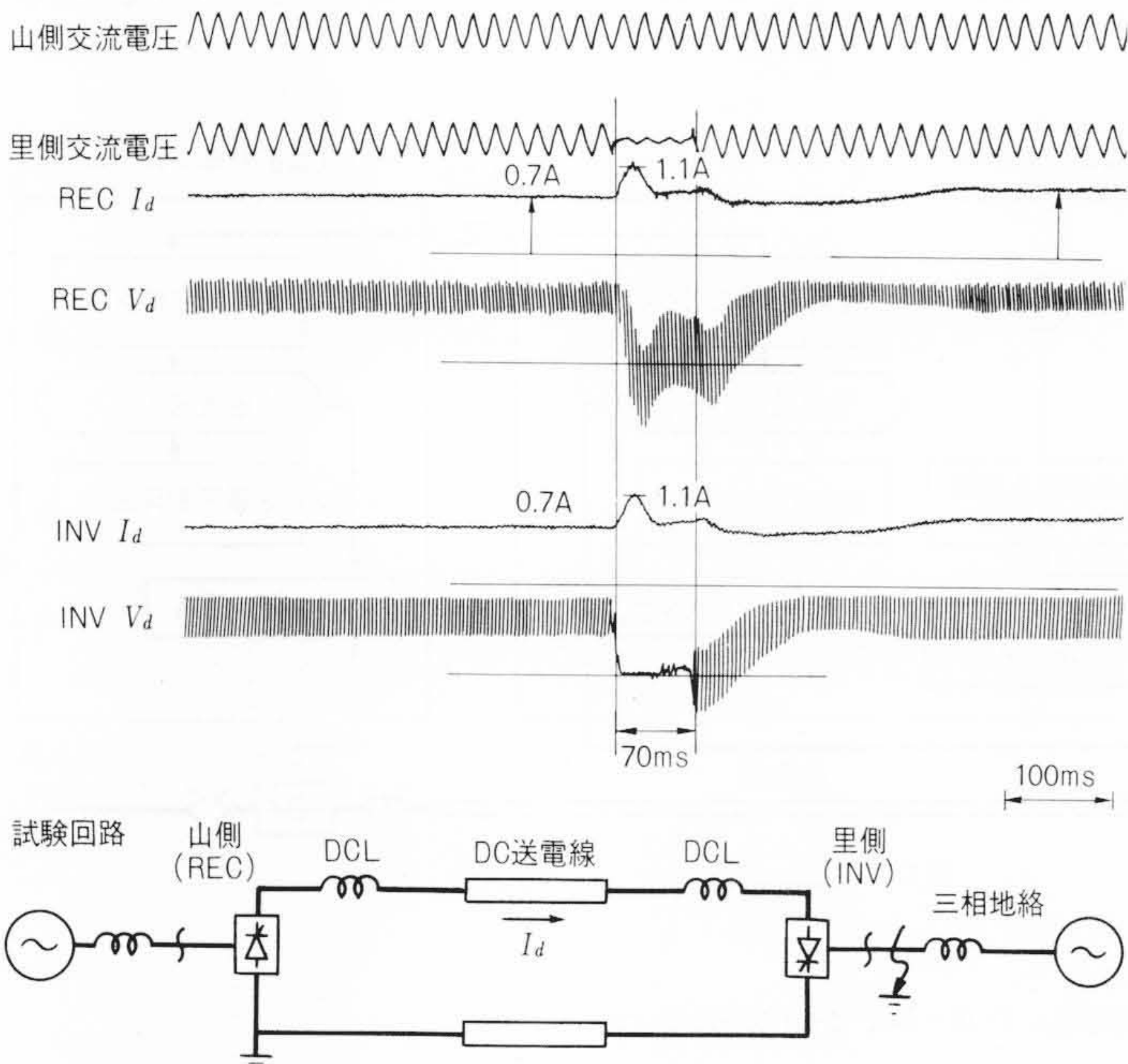
5 系統拡張への対応

将来の系統構成の多様化に対応するためには、多端子送電技術の確立はぜひとも必要である。多端子送電系の基本制御方式としては既に世界各国で数多くの方式が提案されており、東京電力株式会社と日立製作所は今回の開発の過程で通信系への依存度を低くした多段電圧マージン制御方式を開発し、基本機能の検証を終えた。しかし、多端子送電を行なう場合、潮流方向が常に一方向の場合は問題ないが、1箇所だけの潮流を短時間内に反転して系統間の潮流バランスを取る必要がある場合、従来は極性切換スイッチを設け、いったん変換器運転を停止してから変換器接続極性を切り換え、その後再起動する必要があった。この方式では潮流反転に0.5~1秒



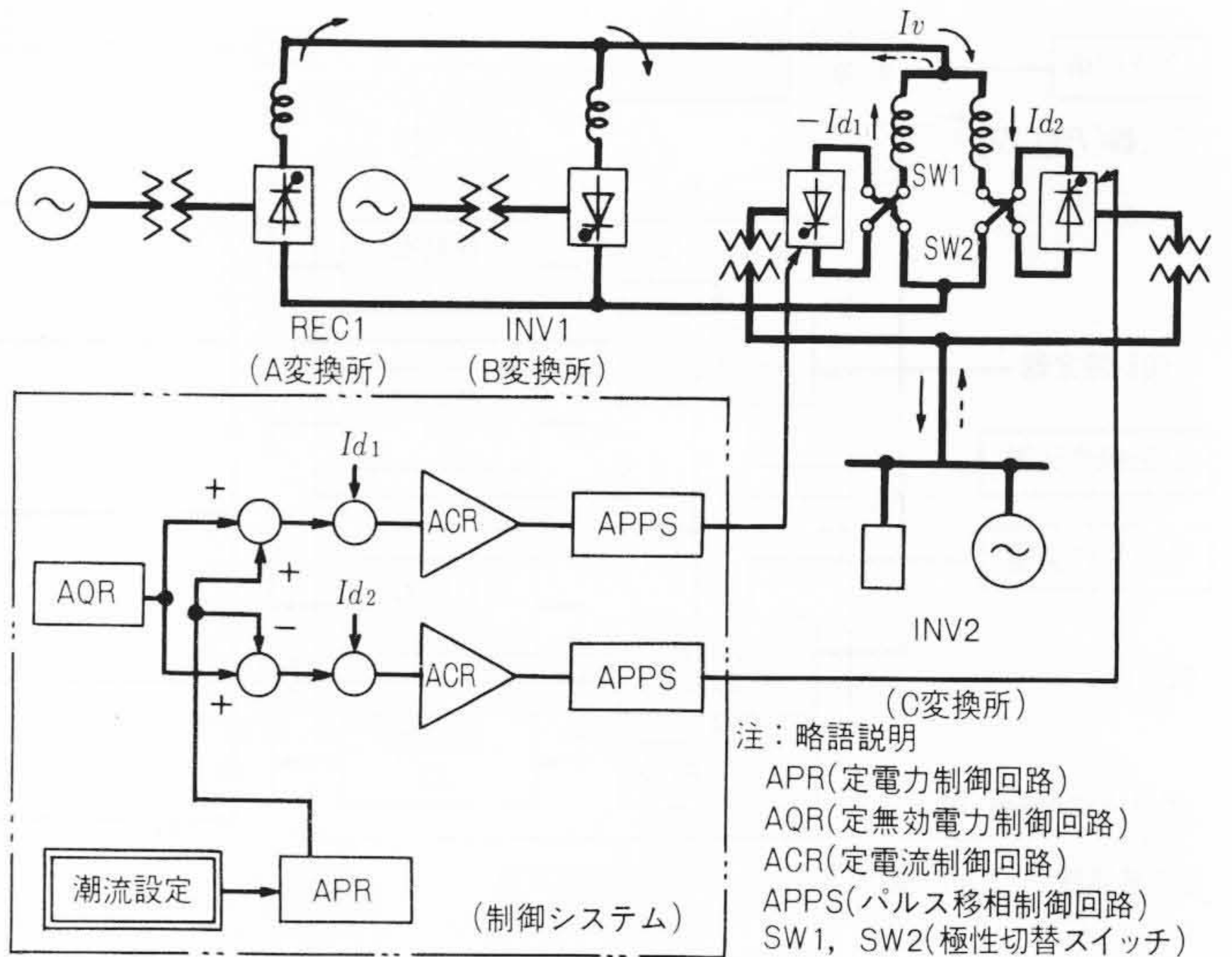
注：略語説明 PLO(Phase Locked Oscillator)

図6 新しい点弧パルス発生装置の構成 変換所母線電圧が低下しても位相制御が行なえるように、位相記憶回路付きAPPS(自動パルス移相器)を開発し、系統事故中でも点弧パルスの発生を可能とした。



注：略語説明 I_d (直流電流), V_d (直流電圧)

図7 里側交流系の3線地絡時のシミュレータ試験結果 電圧回復と同時に直流電圧が発生し、100ms後には事故発生前の送電電力を確保している。

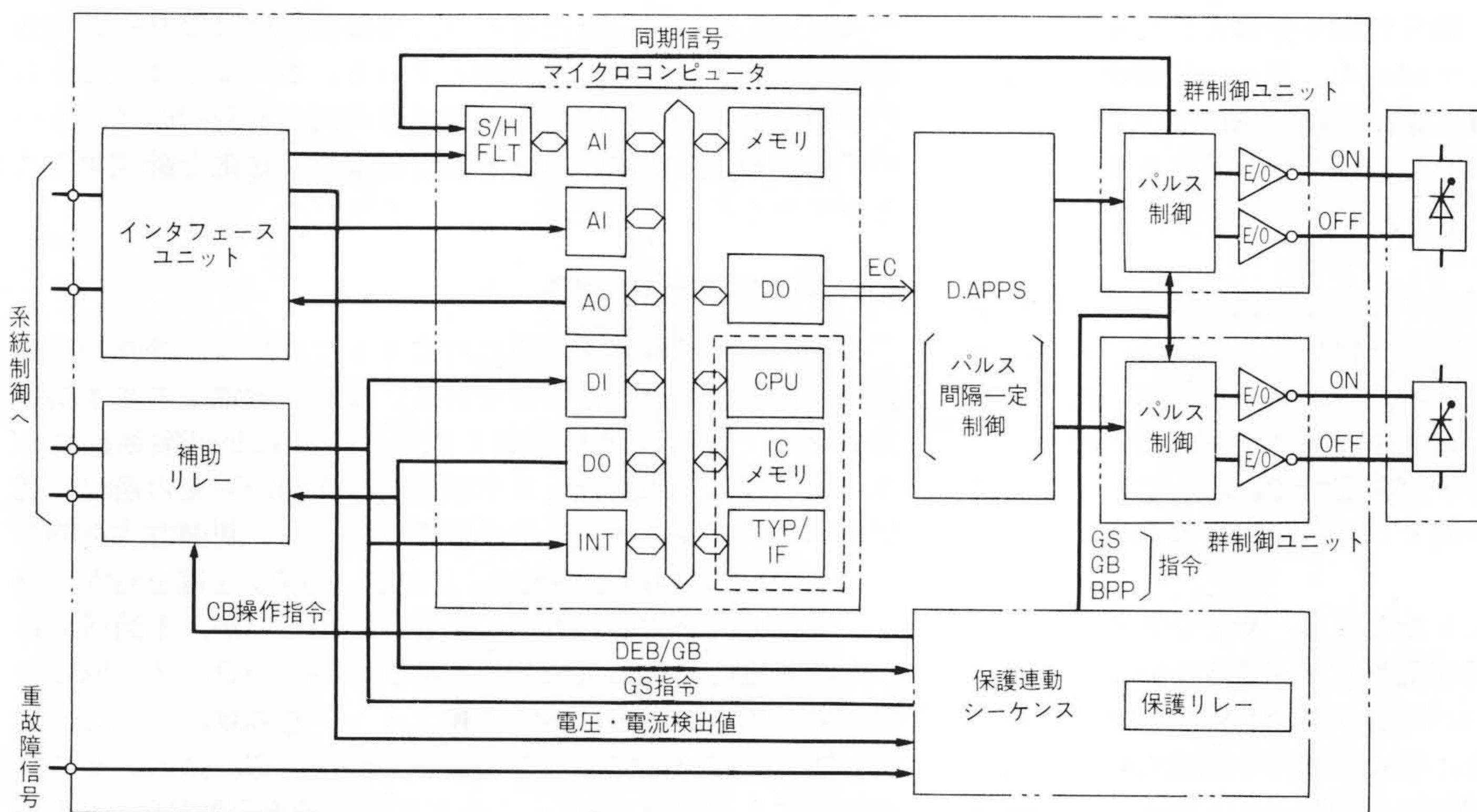


注：略語説明
 APR(定電力制御回路)
 AQR(定無効電力制御回路)
 ACR(定電流制御回路)
 APPS(パルス移相制御回路)
 SW1, SW2(極性切替スイッチ)

図8 高速潮流反転システムの構成 サイリスタバルブを逆並列に接続したC変換所は、各サイリスタバルブを流れる直流電流を調整することによって、送電電力、系統からの消費無効電力を制御できる。

の時間を要し、直流送電の高速応答性を損ない、多端子系となると緊急電力応援などへの対応が困難であった。

そのため、このような場合にも従来の2端子送電と同じように対応できる方式として、図8に示す高速潮流反転システムを開発した。同図中で、C変換所ではサイリスタバルブが逆並列に接続されており、二つの変換器に流れる電流の差分が他変換所との融通電力に等しくなる。このようにして見掛け上の電流極性を変えることでC変換所の融通電力はサイリスタバルブのゲート制御だけで零から任意の値に選ぶことができる。更に、二つのサイリスタバルブの間に循環電流を流し、この値を調整することによって系統からの消費無効電力を同時に制御することもできる。なお、逆並列接続した二つの変換器は、上記の高速なゲート操作による潮流反転後、極性切替スイッチにより反転側の変換器と同じ方向に並列接続しなると、2台分の設備容量まで潮流を流せる。



注：略語説明
 GS(ゲートシフト)
 GB(ゲートブロック)
 DEB(デブロック)
 E/O(電気-光変換)
 S/H(サンプルホルダ)
 FLT(フィルタ)
 INT(割込カード)
 TYP/IF(タイピュータインタフェース)
 EC(制御角指令信号)
 AI(アナログ入力)
 AO(アナログ出力)
 DI(デジタル入力)
 DO(デジタル出力)
 D.APPS(デジタル式自動パルス移相器)

図9 デジタル化制御装置の回路ブロック図 パルス位相演算、起動・停止シーケンスなど、保護部とインタフェース部を除き完全にデジタル化されている。

6 デジタル技術の適用

マイクロコンピュータ技術の発達によって高速・高精度演算が可能となった。そのため、直流送電制御装置の系統拡張、多重化など装置の高機能化への容易性と自己診断、標準化による信頼性、保守性の向上を図るためデジタル化を図った。

6.1 デジタル化装置の構成

装置は階層別に独立したマイクロコンピュータを適用した分散システムとした。特に、極単位に設置される変換器制御装置は、サイリスタバルブの点弧位相演算を行なうため演算周期を1ms程度とする必要があり、専用の高速演算マイクロコンピュータを開発して適用した。図9に変換器制御装置の回路ブロックを示す。本装置の特徴の一つは、演算周期を12相の点弧パルスに同期化させ、直流電流などの主回路リップ

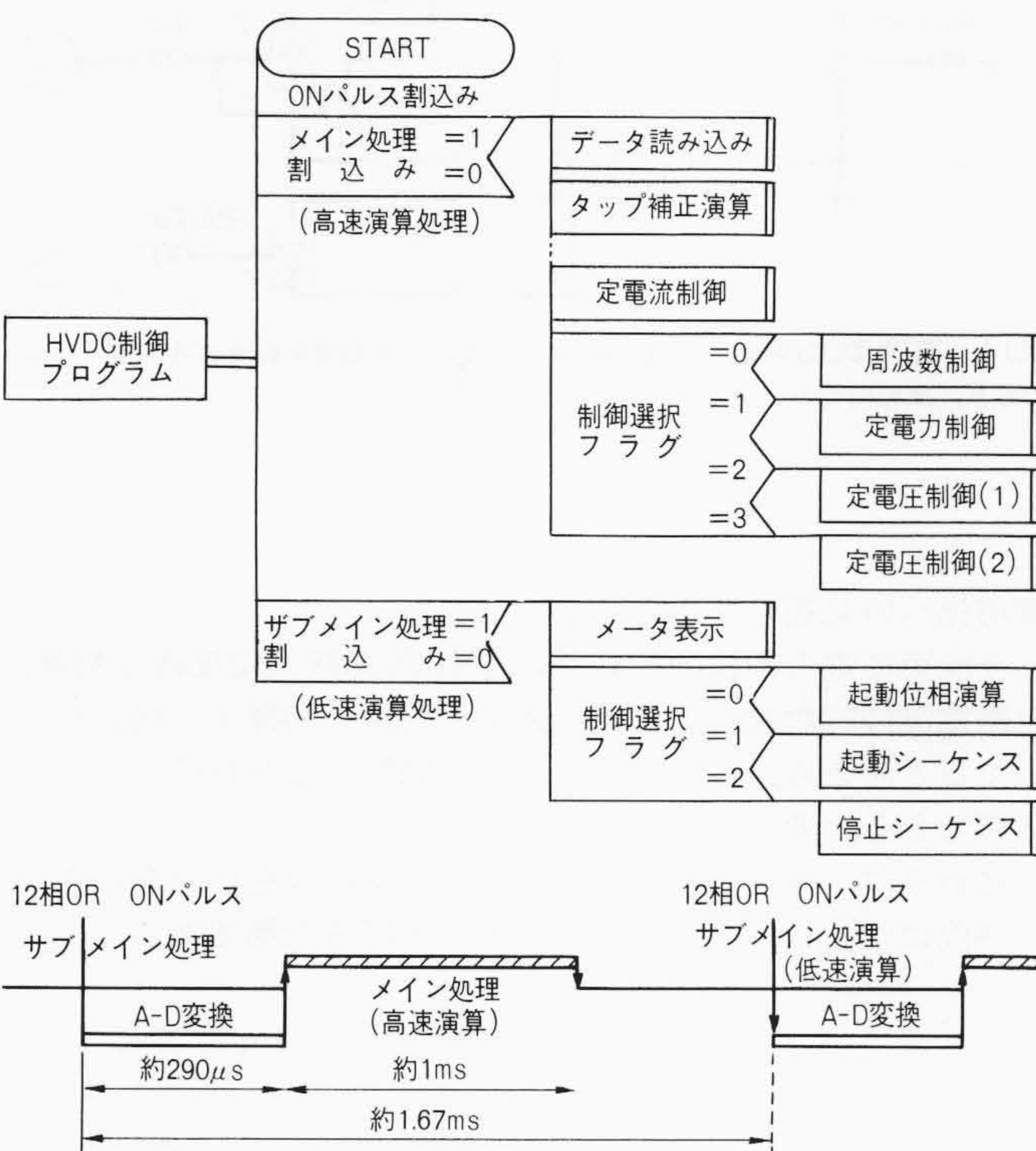


図10 ソフトウェアの基本構成 約1msの高速演算を実行するためタスク分割を行ない、制御機能により演算周期を調整している。

ルの影響を自動的に排除するとともに、多重化時の装置間の信号リンケージを容易にしていることにある。

6.2 ソフトウェア構成

図10に本装置のソフトウェアの基本構成を示す。演算の高速化を実現するために各制御機能をサブルーチン化し、毎サンプルに演算実行が必要な高速制御と、数サンプルに1回の演算でも十分特性の得られる制御に分割し、タスク分割処理を行なった。

7 システム試験

7.1 制御装置の試作

以上説明した開発成果の検証のために、1極分の実用規模の装置を製作し、シミュレータ試験を実施した。図11に三重化構成の変換器制御装置の外観と、16ビットマイクロコンピ

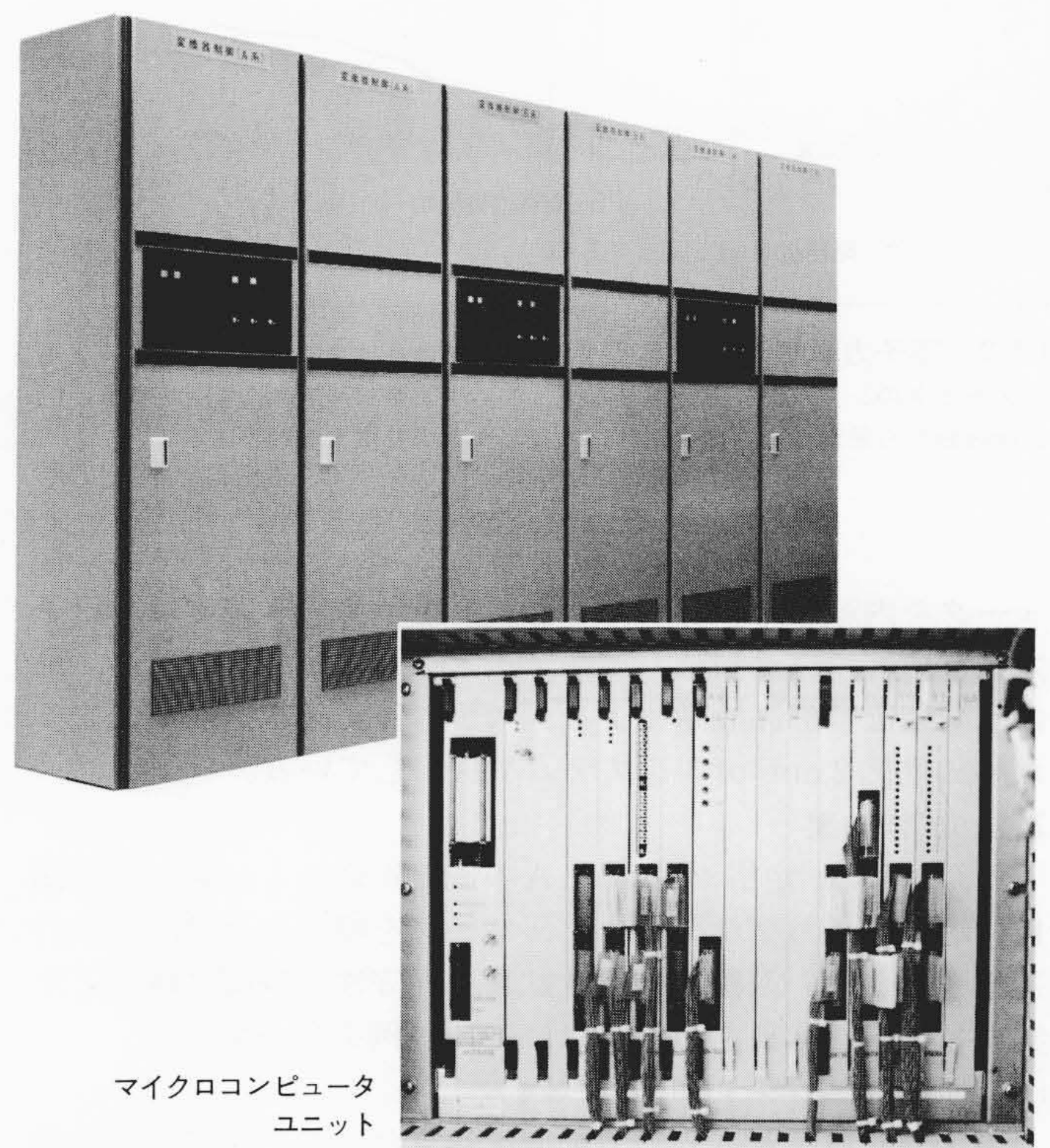


図11 三重化デジタル装置の外観 本装置は、原子力との協調制御、多端子制御機能を内蔵し、16ビットマイクロコンピュータで点弧位相を1サイクルに12回演算している。

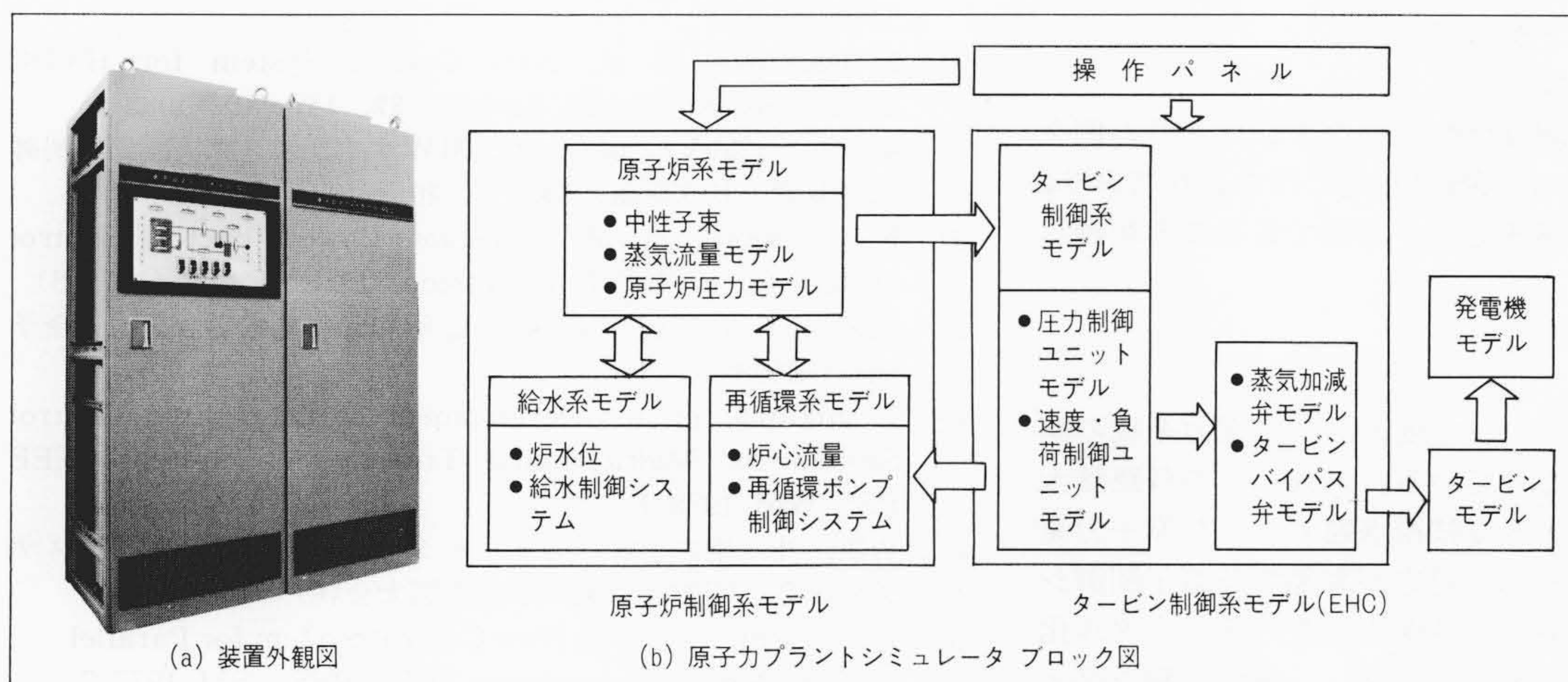


図12 原子力プラントシミュレータ 原子炉、蒸気圧力制御及びタービン系を模擬し、直流系との協調性の検証を行なう。

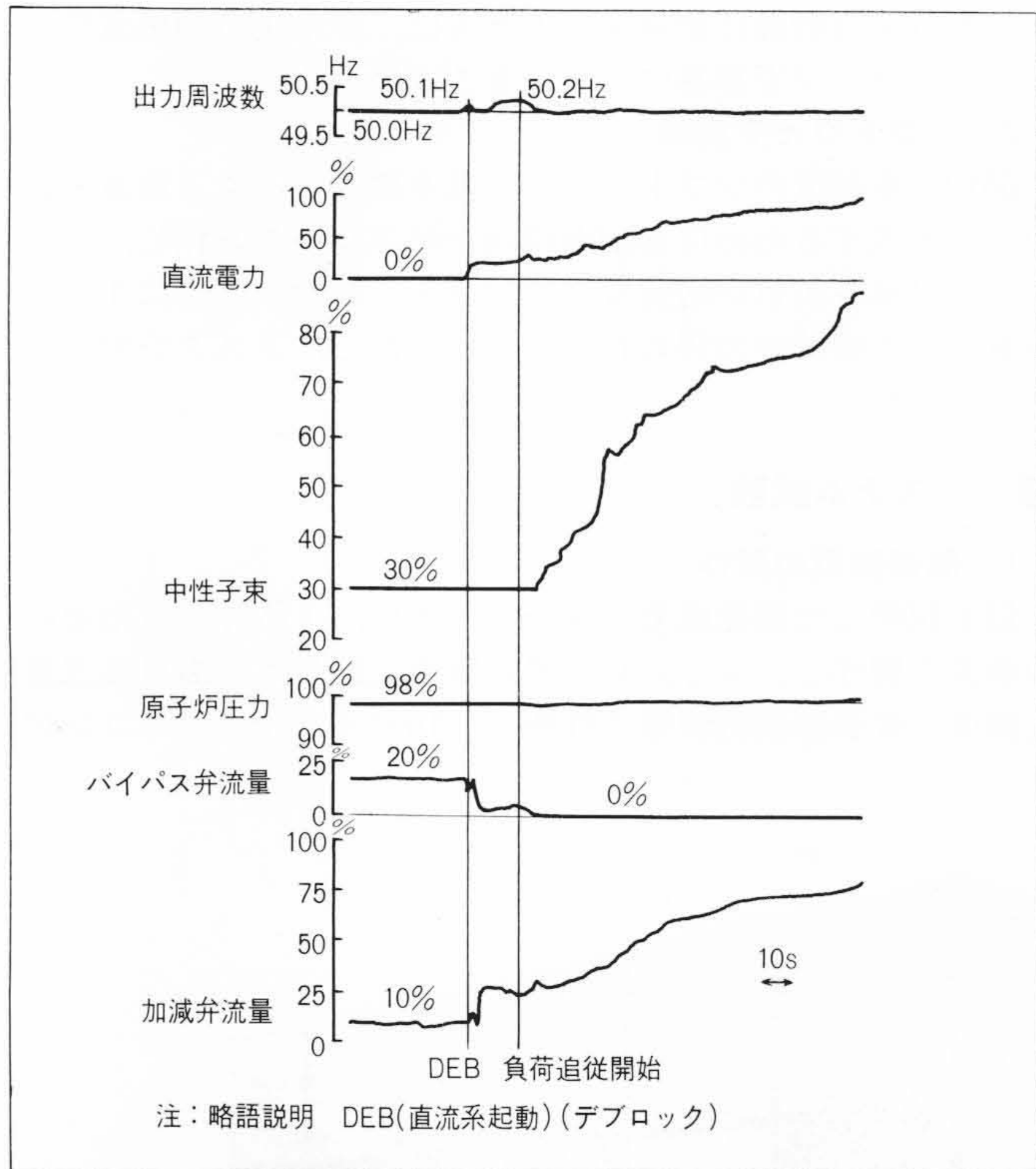


図13 原子力単独送電時の初起動 所内単独運転から負荷運転へと移行するときのシミュレーション結果を示す。直流系は周波数の変化を検出して、自動起動から発電機出力追従運転に入ってゆき、安定的な起動ができる。

ュータを内蔵した演算制御ユニットを示す。本装置は、原子力発電所との協調制御、多端子送電制御の機能を内蔵し、更に制御装置の部品故障によるシステム停止確率を最小化するため三重化 2 out of 3 システムを採用している。

7.2 試験結果

検証試験は、定格±100V, 1Aの直流送電シミュレータに図12に示す原子力プラントシミュレータを組み合わせ、通常の運転制御試験、系統事故想定試験、保守性の確認試験などを実施し良好な結果を得た。次にその一例を紹介する。

(1) 原子力プラント初起動試験

原子力発電所からの出力を直流送電だけで送電する単独送電時の初起動のオシログラムを図13に示す。蒸気バイパスの状態から負荷設定を上げると加減弁流量が増加し、出力周波数が50.1Hzに達すると直流系が自動起動する。更に加減弁流量が増加すると周波数検出による負荷追従運転を開始し、原子炉出力に応じて直流送電電力制御を行なうことにより、負荷上昇を安定に行なえることが確認された。

(2) 多端子高速潮流反転試験

多端子系統の1端局高速潮流反転試験のオシログラム例を図14に示す。潮流反転は100ms以内に安定に行なわれており、従来の2端子送電系以上の高速応答が可能であることが確認できた。

8 結 言

直流送電は既存の交流系統の安定度の向上、電力系統の高効率運用に効果的な技術となっている。今回、この長距離大容量送電を実現するための大きな技術課題であった原子力発電所との協調制御、系統拡張への対応が容易な多端子制御システムと、更に安定的な電力輸送を確保するためデジタル化技術を主体とした高信頼度化装置を開発し、検証試験を終え

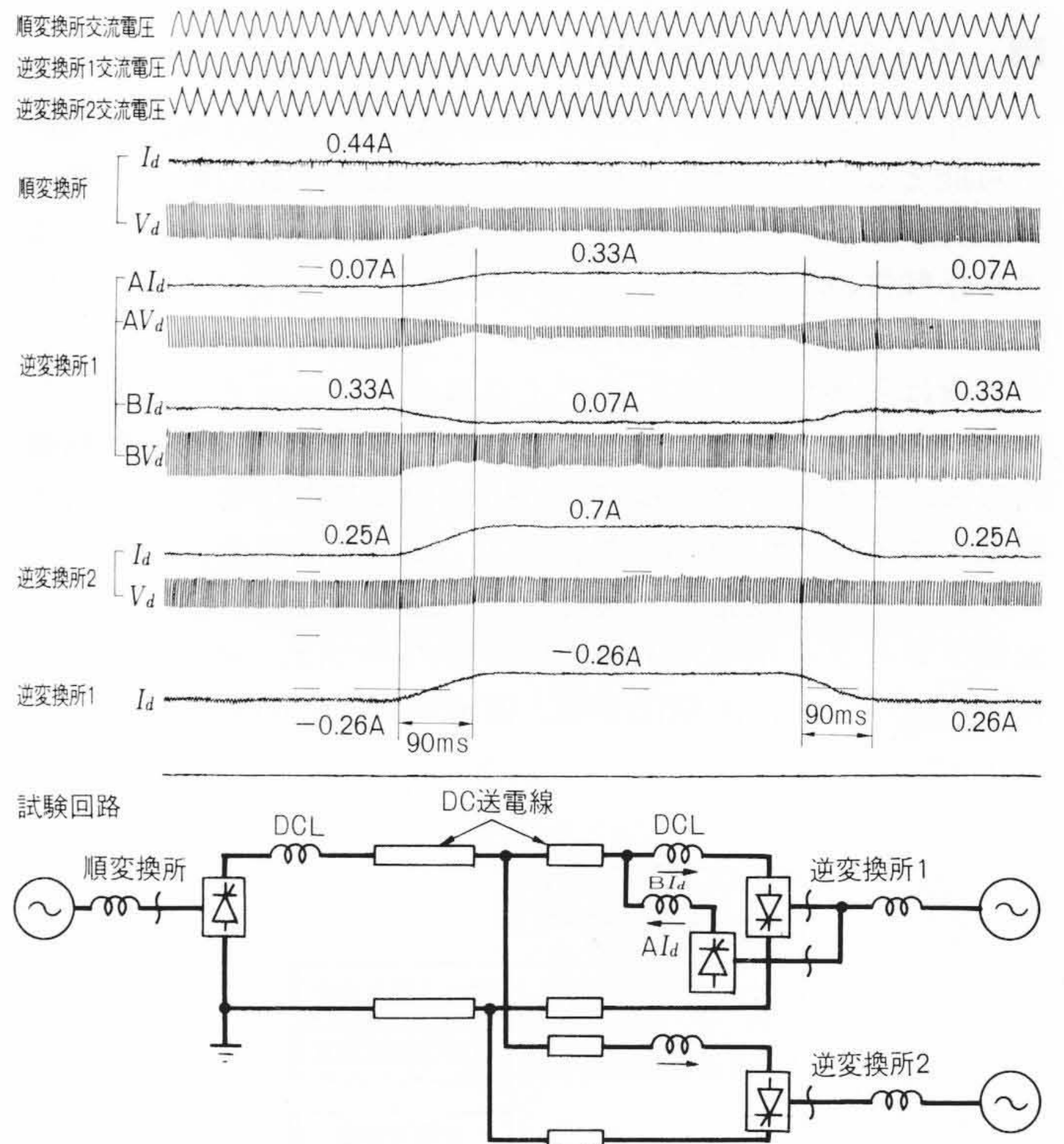


図14 高速潮流反転 直流多端子系での高速潮流反転時のオシログラムであり、反転時間は100ms以内となっている。

実用化への見通しを得ることができた。

今後更に電力系統の拡充が進む中で、系統安定度向上対策、短絡電流抑制対策などに直流送電が効果を発揮する場合が出てくると考えられる。この面でも今回開発した技術は有効に活用できると考える。

終わりに、今回の技術開発に当たり御指導をいただいた関係各位に対して、心から御礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 奥原, 外: 東京電力株式会社新信濃周波数変換設備用制御保護装置, 日立評論, 61, 2, 99~102(昭54-2)
- 2) 竹之内, 外: 電源開発株式会社北海道・本州間電力連系計画の概要と函館変換所用変換設備, 日立評論, 61, 2, 103~110(昭54-2)
- 3) M. Ishikawa, et al.: New Control System for HVDC Transmission, Hitachi Review, 32, 147~152(1983-3)
- 4) 森, 外: 125kV, 300A, 37.5MWサイリスタ変換装置用制御保護装置, 日立評論, 53, 4, 401~405(昭46-4)
- 5) F. Nishimura, et al.: Constant Power Factor Control System for HVDC Transmission, IEEE PAS95(1976-6)
- 6) 渡部, 外: 直流送電の制御方式, 昭和50年電気学会全国大会予稿集(昭50年)
- 7) I. Ishikawa, et al.: Development of Centralized Control System for Multiterminal Transmission System, IEEE PES. WM(1978-1)
- 8) 吉田, 外: 電力系統シミュレータの直流送電制御保護システムの開発, 昭和58年電気学会全国大会(昭58年)
- 9) H. Konishi, et al.: A New Control System for Parallel AC-DC Power Transmission, IEEE PES. SM(1977-7)