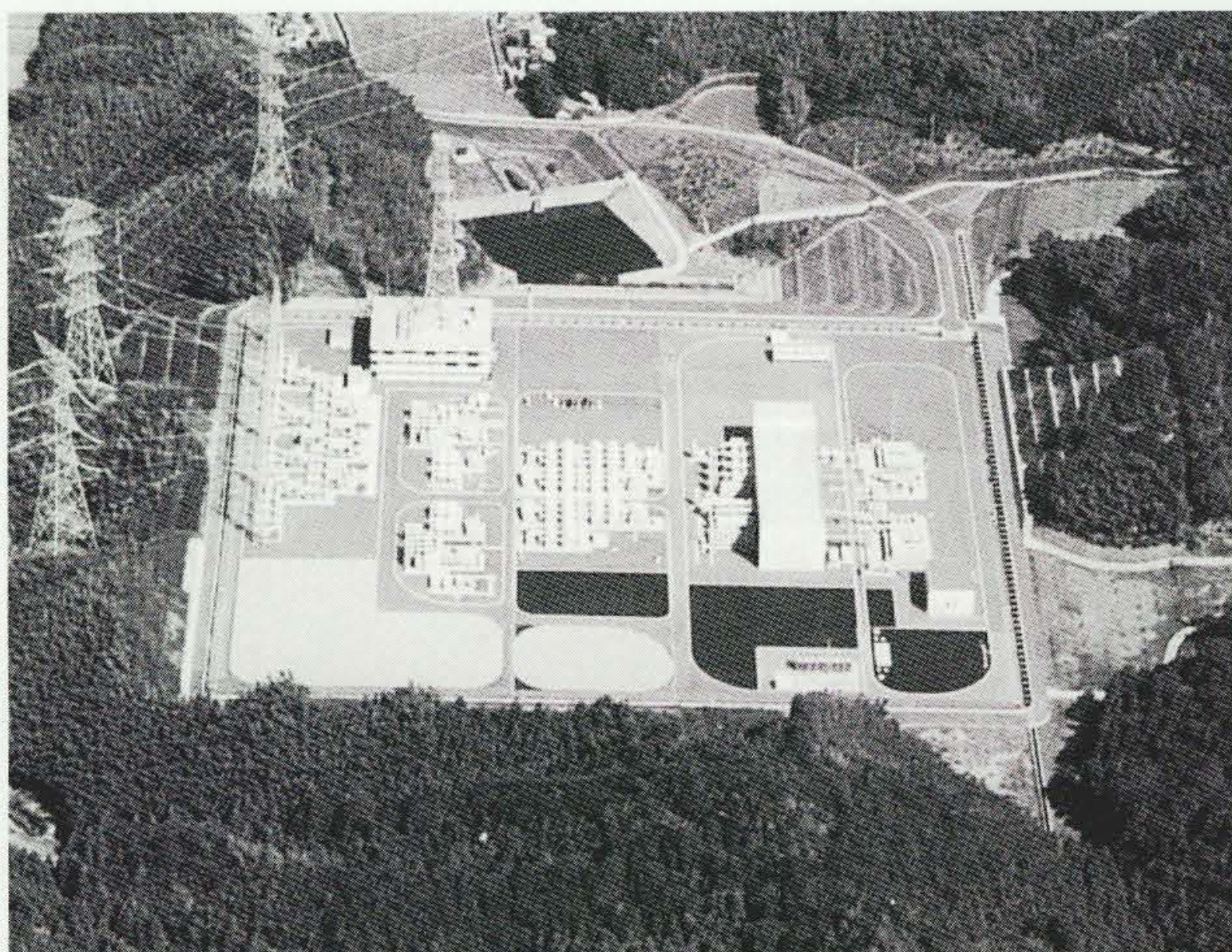


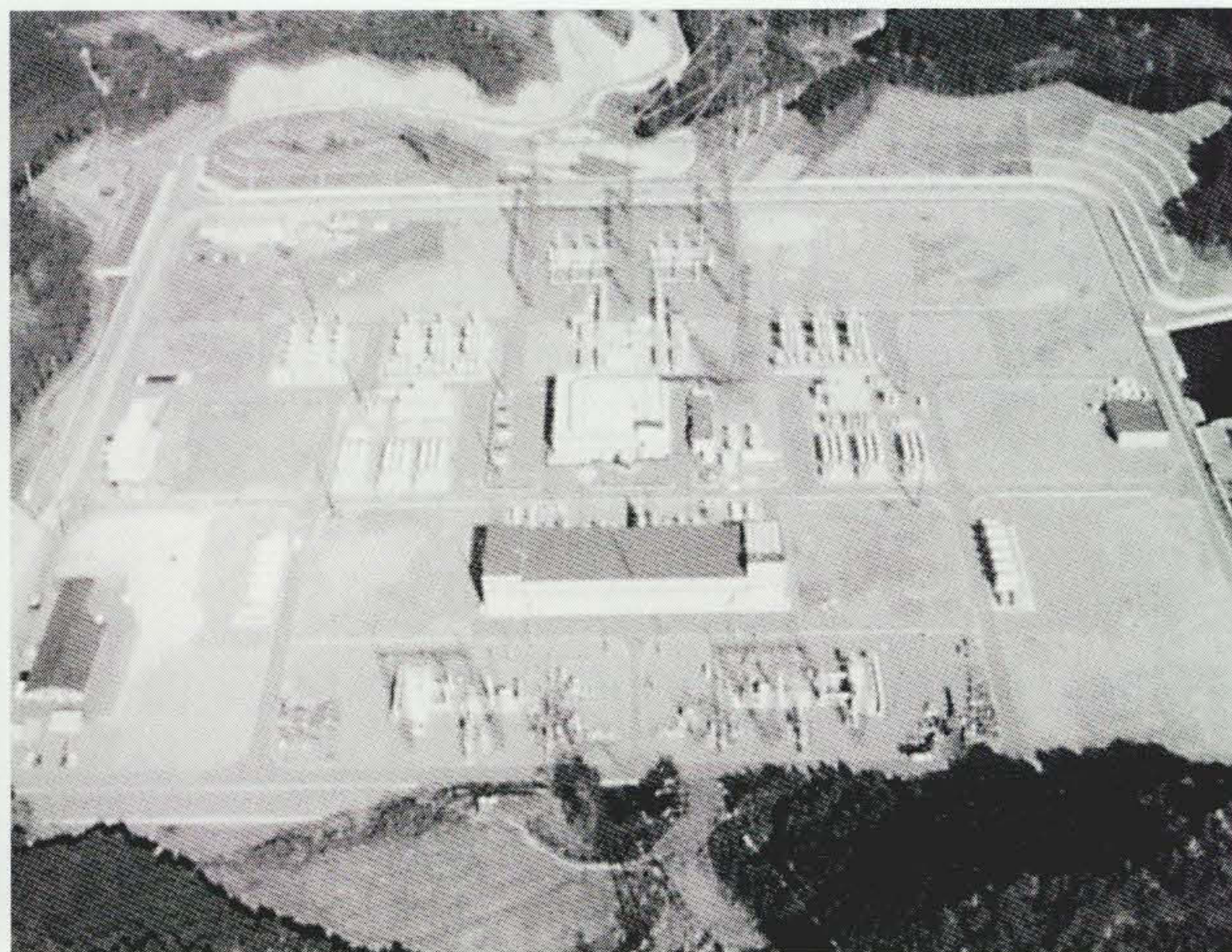
運用開始となった1,400 MW紀伊水道直流連系設備

1,400 MW Kii-Channel High-Voltage DC System

中尾浩之	<i>Hiroyuki Nakao</i>	宮田博昭	<i>Hiroaki Miyata</i>
廣瀬昌弘	<i>Masahiro Hirose</i>	門脇 慎	<i>Makoto Kadowaki</i>
境 武久	<i>Takehisa Sakai</i>	大森隆宏	<i>Takahiro Ômori</i>
川村直輝	<i>Naoki Kawamura</i>	渡邊明彦	<i>Akihiko Watanabe</i>



(a) 阿南変換所



(b) 紀北変換所

紀伊水道直流連系設備の両端に位置する阿南変換所(a)と紀北変換所(b)

四国側の阿南変換所は、徳島県阿南市の橘湾火力発電所近傍の海岸から約1.6 km内陸部に、関西側の紀北変換所は、海岸から約30 km内陸部の和歌山県かつらぎ町にそれぞれ位置する。これら二つの変換所の間は、約50 kmの海底ケーブルと約50 kmの架空線、計100 kmの直流送電線で接続されている。

直流送電(異周波数連系や直流送電線を持たない非同期連系を含む。)は、送電線距離による安定性の制約がないこと、潮流調整が容易であること、海底ケーブル送電の場合にケーブル充放電の補償が不要であることなどの理由から世界各国で多く適用されており、1プロジェクト当たり3,000 MWを超えるものも存在する。

わが国では、50/60 Hz異周波数連系や北海道一本州間の海底ケーブル送電、電力会社間の非同期連系に適用されており、2000年初めの時点では1設備当たり300~600 MW、総計1,800 MWが運用されている。これに加えて、2000年6月には、わが国で最大・世界最大級の2,800 MW直流送電設備となる紀伊水道直流連系設備の1,400 MW第1期分が運用開始となった。

日立製作所は、わが国の多数の直流送電設備に主要機器であるサイリスタバルブや変換用変圧器、制御装置などの納入実績を持っている。紀伊水道直流連系設備では、大容量化、新たな制御機能、基幹送電ゆえの高信頼性確保といった課題に対してさまざまな技術開発を行うとともに、監視制御装置の納入などにより、運転業務に対する操作性の向上を図っている。

1 はじめに

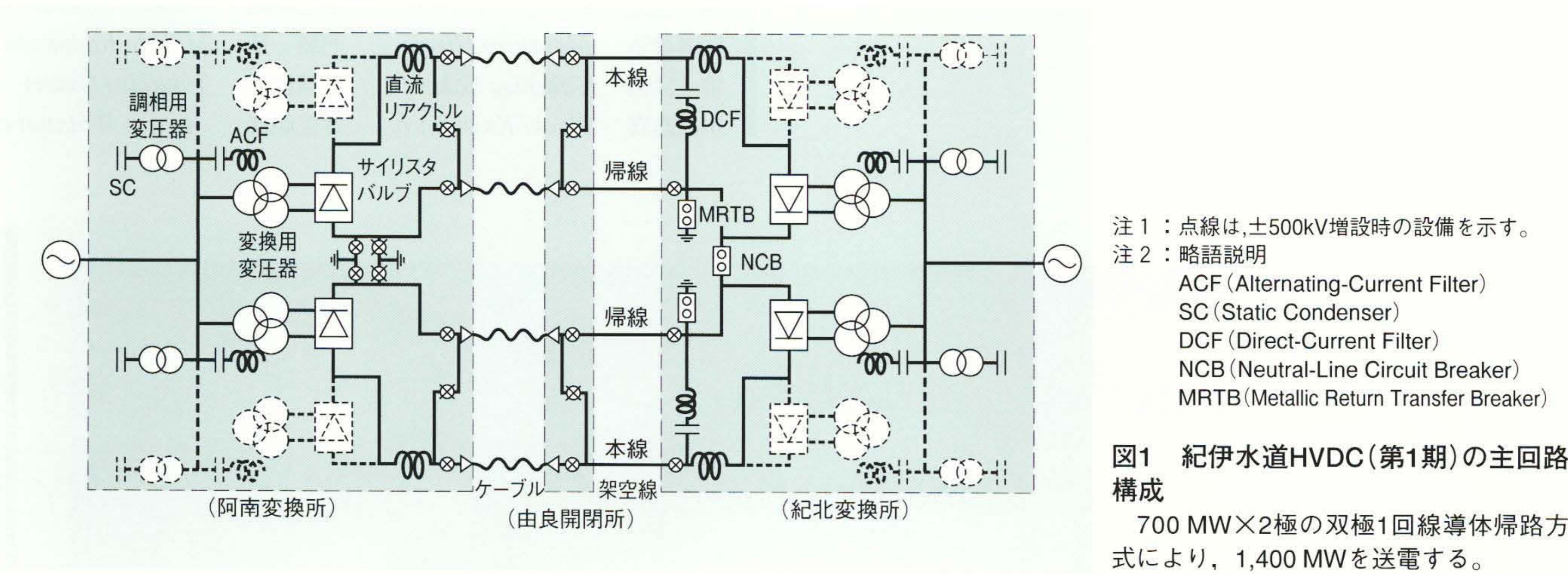
関西電力株式会社、四国電力株式会社および電源開発株式会社が共同で建設を進めていた紀伊水道直流連系設備(以下、紀伊水道HVDCと言う。)が2000年6月に運用を開始した。日立製作所は、この設備の主要機器であるサイリスタバルブ、変換用変圧器、系統制御・変換器制御装置、監視制御システムなどを開発し、阿南変換所と紀北変換所に納入した。

ここでは、紀伊水道HVDCのシステムと、そこで使わ

れている新技術について述べる。

2 システム計画

紀伊水道HVDCは、四国の阿南変換所から紀伊半島の由良開閉所を経由して紀北変換所に至る全長約100 km(ケーブル約50 km、架空線約50 km)のルートで直流送電で連系し、橘湾石炭火力発電所(総出力2,800 MW)の発生電力の一部を送電する直流送電設備である。世界でも有数の高電圧大容量ケーブル直流送電を行うこの設備では、2000年6月に1,400 MW(DC±250 kV, 2,800 A)の



第1期分が運転を開始した。この設備の主回路構成を図1に示す。

この設備の変換所の主要機器仕様を表1に示す。日立製作所は、両端の阿南変換所・紀北変換所の第2極の大容量サイリスタバルブや大容量変換用変圧器などの主要機器、制御装置、および紀北変換所の監視制御システムを担当し、数々の新技術を開発して適用した。

HVDC(High Voltage Direct Current)の特徴である高速制御性を生かした交流系統とのシステムの協調制御機能として、表2に示すものを開発、適用した。

交流系事故時の運転継続は、交流系統事故による転流失敗を極限まで低減させて安定に運転継続するものであ

る。従来の制御では、交流電圧低下時には変換器の転流失敗を回避するために、変換器をいったん停止して一定時間後に再起動していた。これに対して、変換器の余裕角を検出するロジック、高調波の定量的検出、交流電圧変化の高速検出などの各種制御方式を開発することにより、交流電圧低下時にも変換器の運転を継続する制御方式を実現した(図2参照)。これにより、従来の制御では厳しくなる安定度の問題や無効電力変化による過電圧の問題などについて、交流送電と同等の送電信頼度を実現することができ、運用開始後も何回かの雷事故時で有効に機能している。

電力動揺抑制制御(Power Modulation)は、交流系事

表1 変換所の主要機器仕様(第1期分)

直流側の機器は第2期のDC500 Vへの昇圧に対応したものである。

機 器	阿南変換所	紀北変換所
サイリスタバルブ	DC250 kV, 700 MW (125%過負荷付き)×2極	DC250 kV, 700 MW (125%過負荷付き)×2極
変換用変圧器	500/110/110 kV, 872 MVA×2極	500/110/110 kV, 872 MVA×2極
調相用変圧器	500/60/66 kV, 285 MVA×2極	500/71 kV, 450 MVA×2極
電力用コンデンサ	66 kV, 120 MVA×4群	77 kV, 120 MVA×6群
交流フィルタ	500 kV, 270 MVA (5次, 7次, 13次, 高次)	500 kV, 270 MVA (5次, 7次, 13次, 高次)
直流機器	DC500 kV直流リアクトル DC GIS	DC500 kV直流リアクトル MRTB, NCB
交流開閉機器	500 kVフルGIS	500 kV気中+GIS

注：略語説明
DC GIS (Direct-Current Gas-Insulated Switchgear)

表2 紀伊水道HVDCのシステムの特徴と主要制御機能

従来の設備と比べて大容量となったことに加えて、新たな制御機能を備えている。

システムの特徴	目的	対応する制御機能
大容量基幹送電システム	・送電信頼度向上	・交流系事故時の運転継続 ・事故時電力リカバリー ・緊急時過負荷運転
60 Hz系交直並列送電	・過渡安定度向上 ・分断時緊急制御	・電力動揺抑制制御(PM) ・緊急周波数制御(EPPS, EFC)
発電機単独運転時送電	・発電機との協調制御	・発電機周波数制御(EPPS, EFC) ・軸ねじれ抑制制御(SSDC) ・高調波・過電圧抑制制御
柔軟な運用	・高信頼度 ・操作・保守性向上	・冗長系システム ・運用個所切替運転

注：略語説明
PM(Power Modulation)
EPPS(Emergency Power Presetter)
EFC(Emergency Frequency Control)
SSDC(Supplemental Subsynchronous Damping Controller)

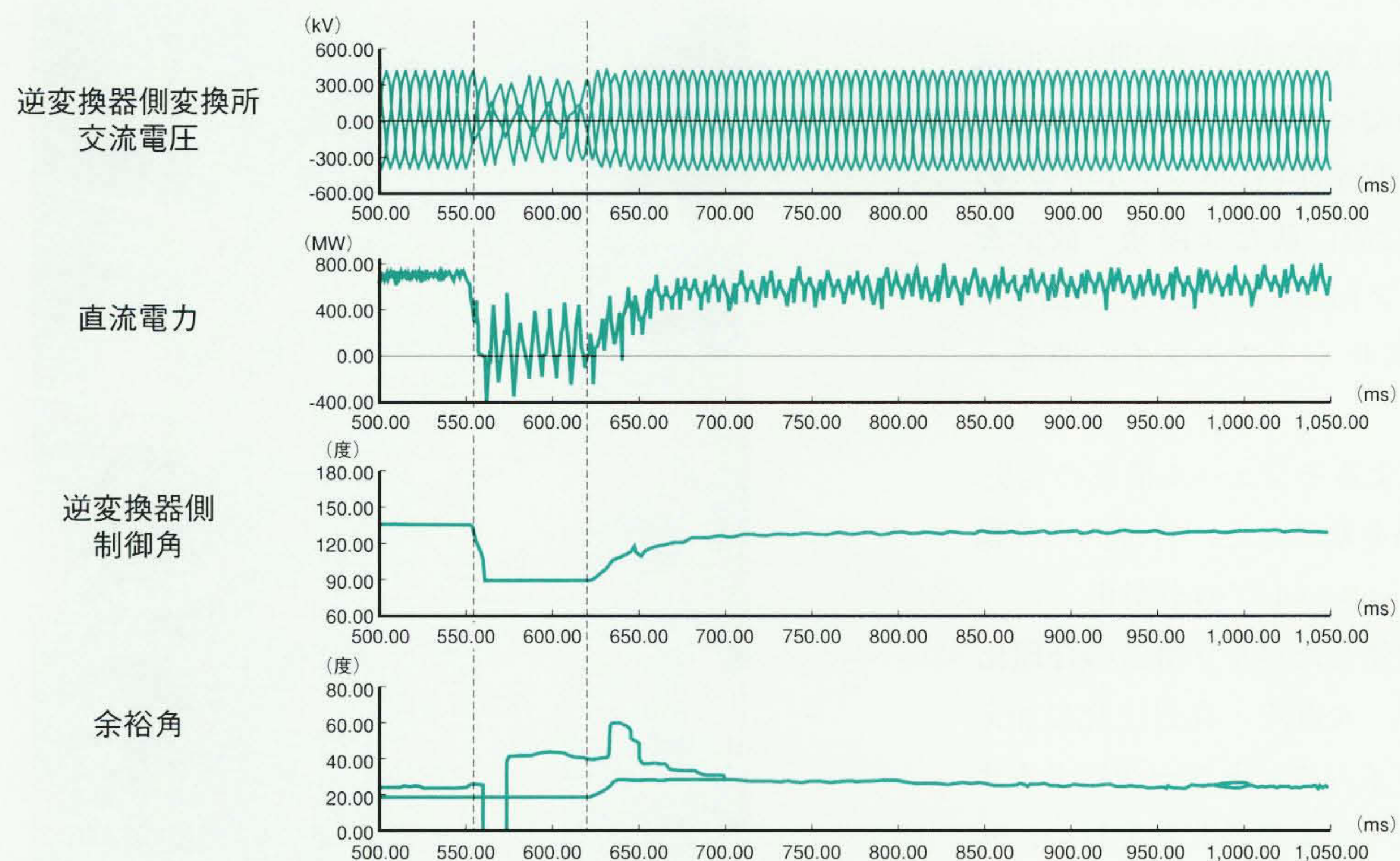


図2 運転継続のシミュレーション例
逆変換器交流系事故(1線地絡)によって系統電圧が低下しているが、事故回復後は転流失敗がなく、速やかに電力が回復している。

故などによる電力動揺をHVDCの制御で安定させる技術である(図3参照)。この制御では、変換所の周波数から電力動揺成分を抽出して適切に直流電力を変調する制御方式を採用した。系統連系試験でも確認試験を実施して

おり、実系統で適切に電力動揺が抑制されることが実証されている。
このほかにも、紀伊水道HVDCにはさまざまな新技術が適用されている。これらは、長期間にわたる綿密なシステム設計と解析技術などによって実現したものである。

3 サイリスタバルブ

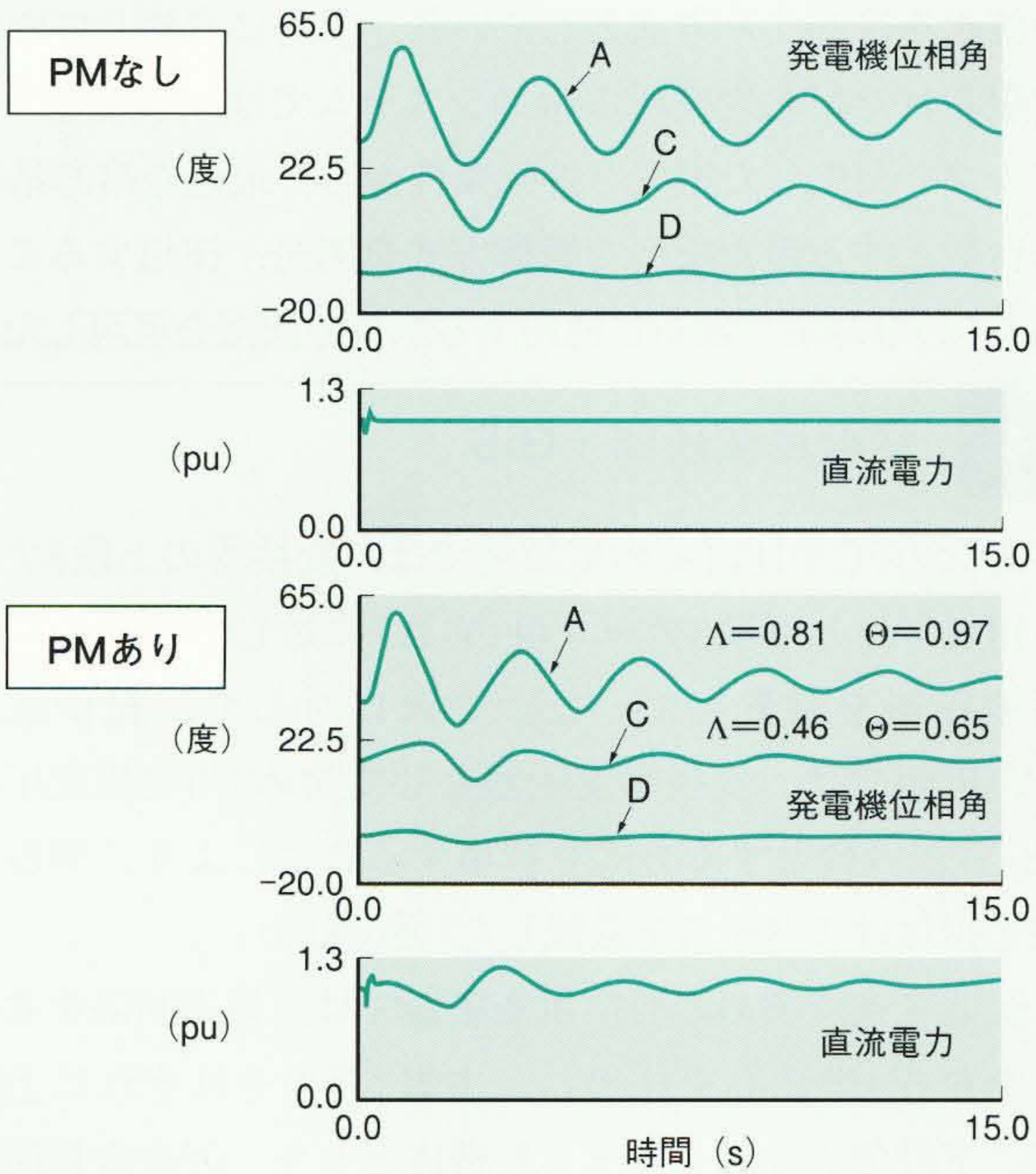
直流送電システムの変換所の中心的な存在となる機器が、サイリスタバルブ(交直変換装置)である。紀伊水道HVDCのサイリスタバルブでは、わが国のFC(Frequency Conversion)やHVDC, BTB(Back to Back：非同期連系)設備で実績がある光直接点弧サイリスタ素子を使用した空気絶縁純水冷却方式を採用した(表3参照)。

この設備以前の光直接点弧サイリスタバルブとして

表3 紀伊水道HVDCにおけるサイリスタバルブ(第1期)の主要仕様

光直接点弧サイリスタ素子を使用した空気絶縁純水冷却方式を採用している。

容 量	700 MW
直流電圧・電流	250 kV 2,800 A (過負荷3,500 A-30 min)
使用素子	8 kV 3,500 A光直接点弧サイリスタ素子
絶縁方式	空気絶縁
冷却方式	純水循環冷却
構 造	4アーム積層
外形寸法	5.2×3.8×9.5(m)



注：略語説明 Pu (Per-unit)

図3 電力動揺抑制制御のシミュレーション例
60 Hz系統で3線地絡-開放故障が発生したときの系統内A, C, およびD発電機の動揺状況を示す。直流電力制御によって動揺が抑制されている。動揺抑制評価指数 Λ と Θ は、小さいほど抑制効果が大きい。

は、6 kV素子を使用した300 MWのものがあげられる。500 kV-2,800 MW (1極当たり1,400 MW, 第2期)の直流送電システムを構成するにあたっては、サイリスタバルブの低損失化と据付け面積・収納建屋(バルブホール)の縮小化を図る必要があったため、新たな開発・設計を行った(図4参照)。開発のポイントは以下のとおりである。

- (1) 8 kV-3,500 A光直接点弧サイリスタ素子の開発・適用
- (2) サイリスタ素子数低減によるモジュール構成の変更
- (3) 従来実績・試験評価結果を基にした、合理的な絶縁設計基準の適用によるモジュールバルブの小型化
- (4) 高度な耐震解析技術を駆使したバルブ構造の合理化

サイリスタ素子については、大電流・高耐圧化に加えて、キャリアの局部ライフタイムコントロールによるオン電圧-逆回復電荷量のトレードオフの改善を行い、サイリスタバルブの低損失化を図った。

サイリスタ素子を高耐圧化したことによってアーム当たりの使用素子数を低減することができるので、モジュール構成を見直して、従来の同一電圧(250 kV)のサイリスタバルブよりもアーム当たりのモジュール数を低減させて6台とした。これにより、サイリスタバルブのモジュール段数を従来の8段から6段に低減させることができた。サイリスタバルブの構造設計に当たっては、耐震解析とモデル試験を実施した。これらを通じて段間フレームの設置が耐震に対して有効であることが確認できたため、この構造を採用した。これらにより、従来と比べてバルブ高さ比87%、容量体積比約50%の低減をそれぞれ実現することができた(図5参照)。

サイリスタバルブの冷却には閉ループ循環純水を使用

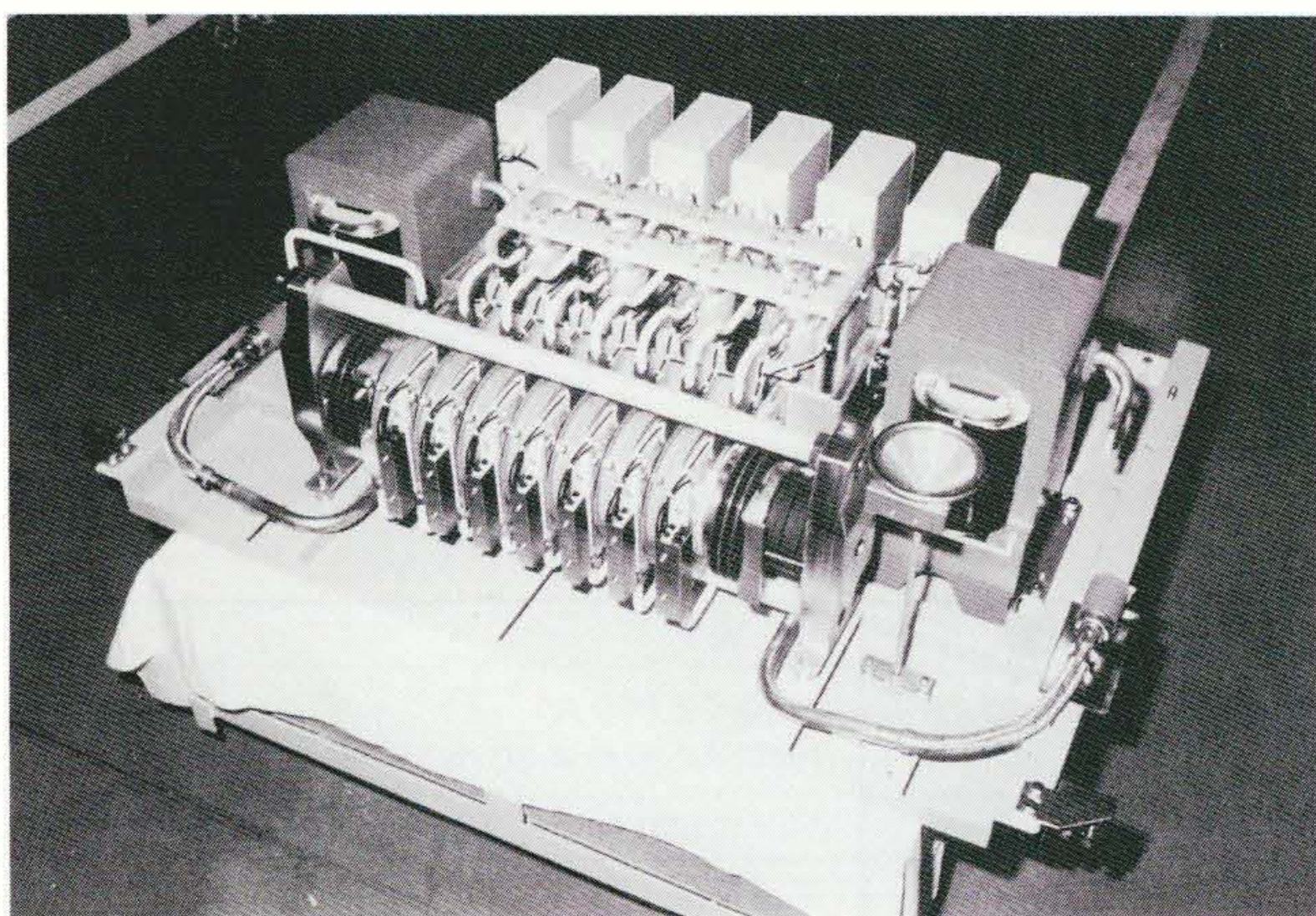


図4 サイリスタバルブのモジュール

8 kV-3,500 A光直接点弧サイリスタ素子の使用により、コンパクト化を図った。

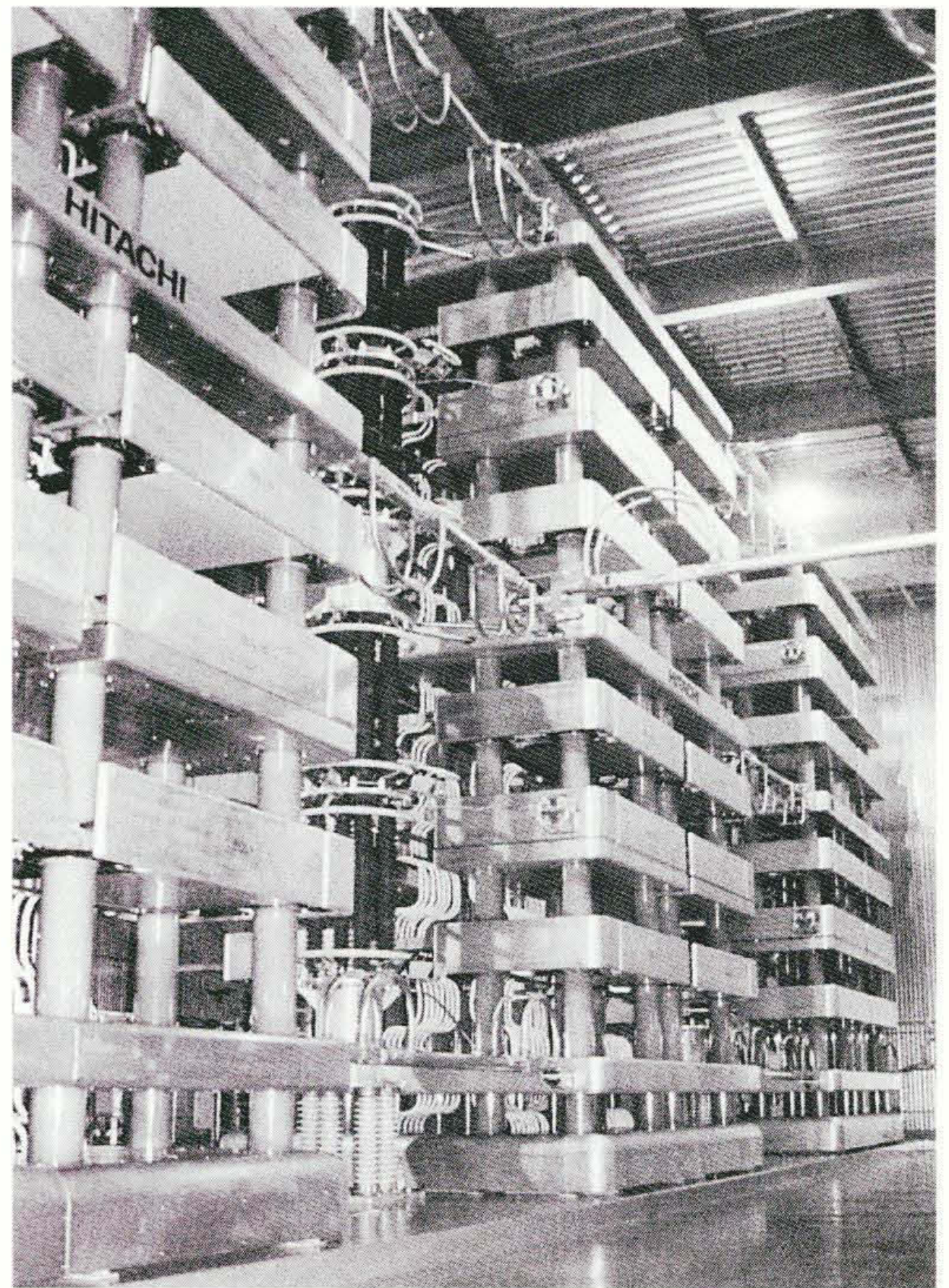


図5 700 MWサイリスタバルブ

8 kV-3,500 A光直接点弧サイリスタ素子の採用により、従来と比べて容量当たりの体積を約50%に低減した。

しており、熱交換器を介して屋外に設置した冷却塔でこの純水を冷却する方式としている。山地に立地して水源が限られた紀北変換所の冷却システムでは、サイリスタバルブで発生した損失と外気条件から、最適な冷却塔運転台数とする新たな冷却制御方式を開発、採用することにより、冷却塔で散布に使用する水量の低減を実現した。

4 変換用変圧器・GIS

既設のFCやHVDCの変換所では、変換器の上段6アーム用(Y-Y)と下段6アーム用(Y-Δ)に対して個別の変換用変圧器を設置していた。これに対して、紀伊水道HVDC用では、変換用変圧器として初めて3巻線変圧器(Y-Y-Δ)1台とする方式を採用することにより、機器寸法と据付けスペースを低減した(図6参照)。

紀北変換所納めの変換用変圧器では、輸送制限を考慮した单相4脚鉄心を採用し、主脚2脚のそれぞれに上段側、下段側の巻線を巻き込む構成とした。阿南変換所納めの変換用変圧器では、輸送質量の制限を考慮した单相センタコア鉄心を採用し、上段側巻線と下段側巻線を別タンクに収納する構成とした。

変換用変圧器実機の製作に先立って実施した技術課題についての検討の中では、直流絶縁検証用のプロトモデ

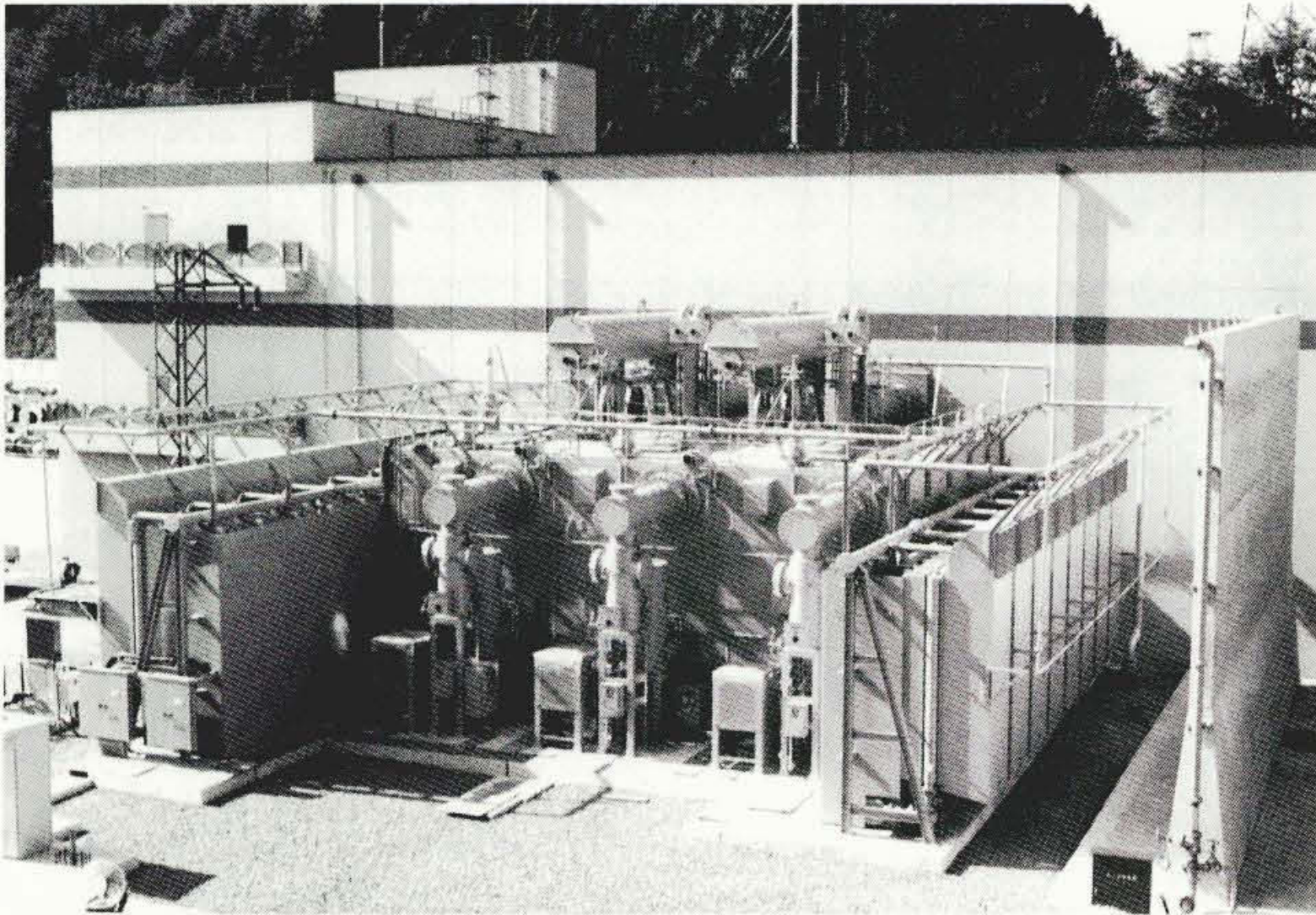


図6 872 MVA変換用変圧器(紀北変換所)

変換用変圧器は、従来システムの「2巻線形×2台」を「3巻線形×1台」とすることにより、コンパクト化を図った。

ルを製作して1年間の長期課電試験を行い、絶縁性能の検証を実施した。

実機の設計に当たっては、上記の検証結果から絶縁物の抵抗率特性を考慮した直流電界解析によって変圧器巻線内の各部電界を詳細に検討するとともに、直流偏磁による鉄損、騒音の増加や高調波電流による負荷損の増加といった変換用変圧器特有の問題についても十分検討を行い、信頼性の高い変圧器を製作した。

これら以外の主な主回路機器としては、阿南変換所に500 kV GISを納入した。阿南変換所は、橘湾火力発電所の発生電力を四国電力側系統と関西電力側系統に配分する基幹系統の開閉所としての機能を持っている。阿南変

換所のGISでは、縦形一点切り遮断器を採用することにより、据付け面積を縮小した。

5 監視制御、運転制御、制御・保護システム

交直変換所の制御・保護システムは、直流運転性能や交流系統との協調制御の有効活用化を左右する重要な役割を担っている。紀伊水道HVDCの制御システムは、以下のシステムで構成している(図7参照)。

- (1) 運転操作や状態監視を行う監視制御システム
- (2) 起動停止制御や電力設定値の配分制御、交流系統安定化制御などを行う運転制御システム
- (3) サイリスタバルブの点弧角位相制御を行う変換器制御・保護システム

このうち日立製作所は、紀北変換所の監視制御システム、運転制御システム、および阿南変換所・紀北変換所の2極変換器制御・保護システムの製作を担当した。

(1) 監視制御システム

監視制御システムでは、運転業務の支援装置として、高速波形観測故障分析装置の設置によって監視制御システムと連係して事故時の系統現象の解析を可能としたほか、通常運用中のデータについても、リアルタイムでの表示・監視により、操作支援機能を充実させた(図8参照)。

また、紀北変換所にはリアルタイム デジタル シミュレータを設置し、操作支援や過渡現象解析に活用している。

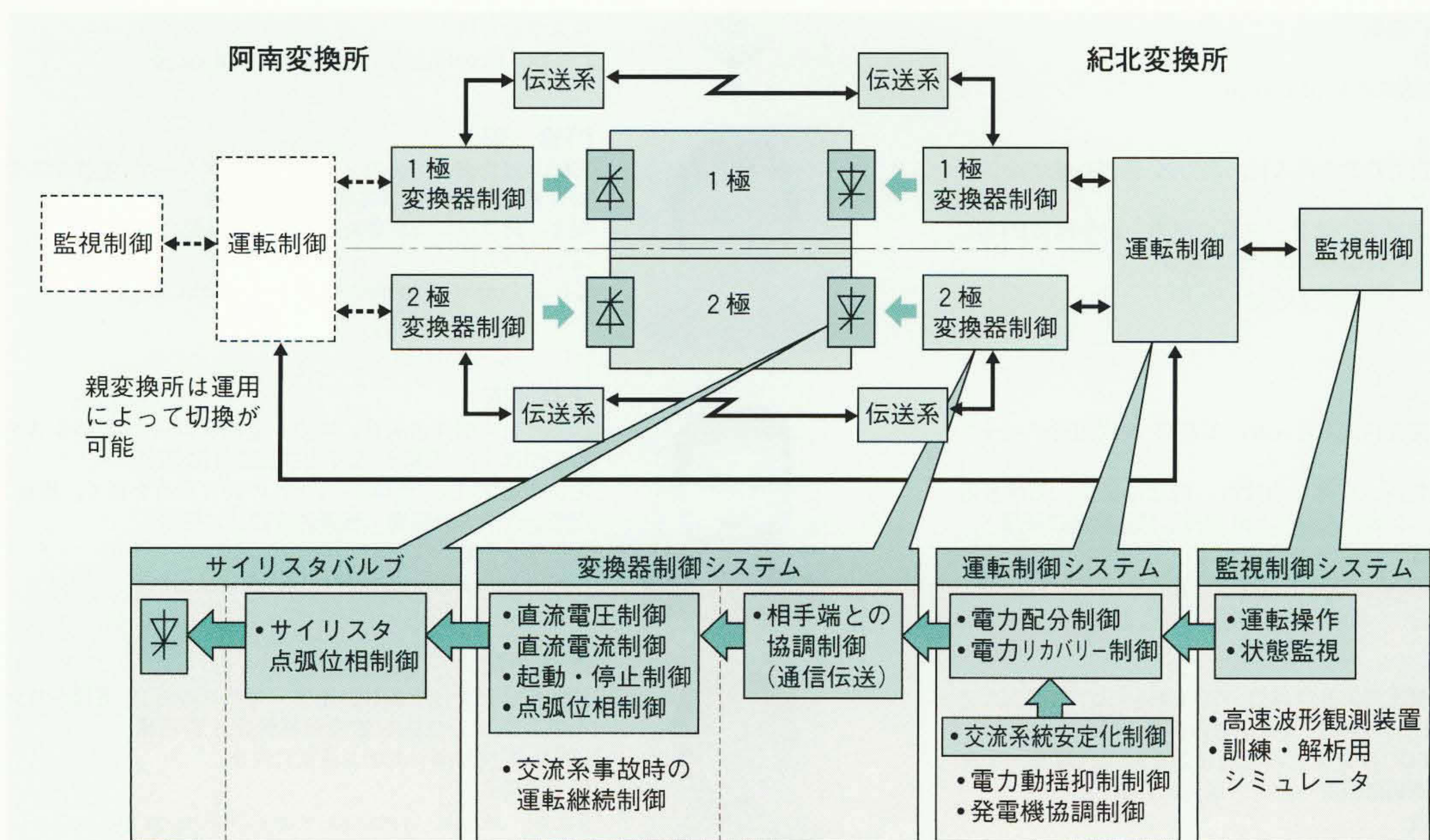


図7 紀伊水道HVDCの制御システムの構成
システム全体を制御する運転制御システムを双方の変換所に配置し、親子切替が可能な構成とすることにより、システム信頼性を向上させている。

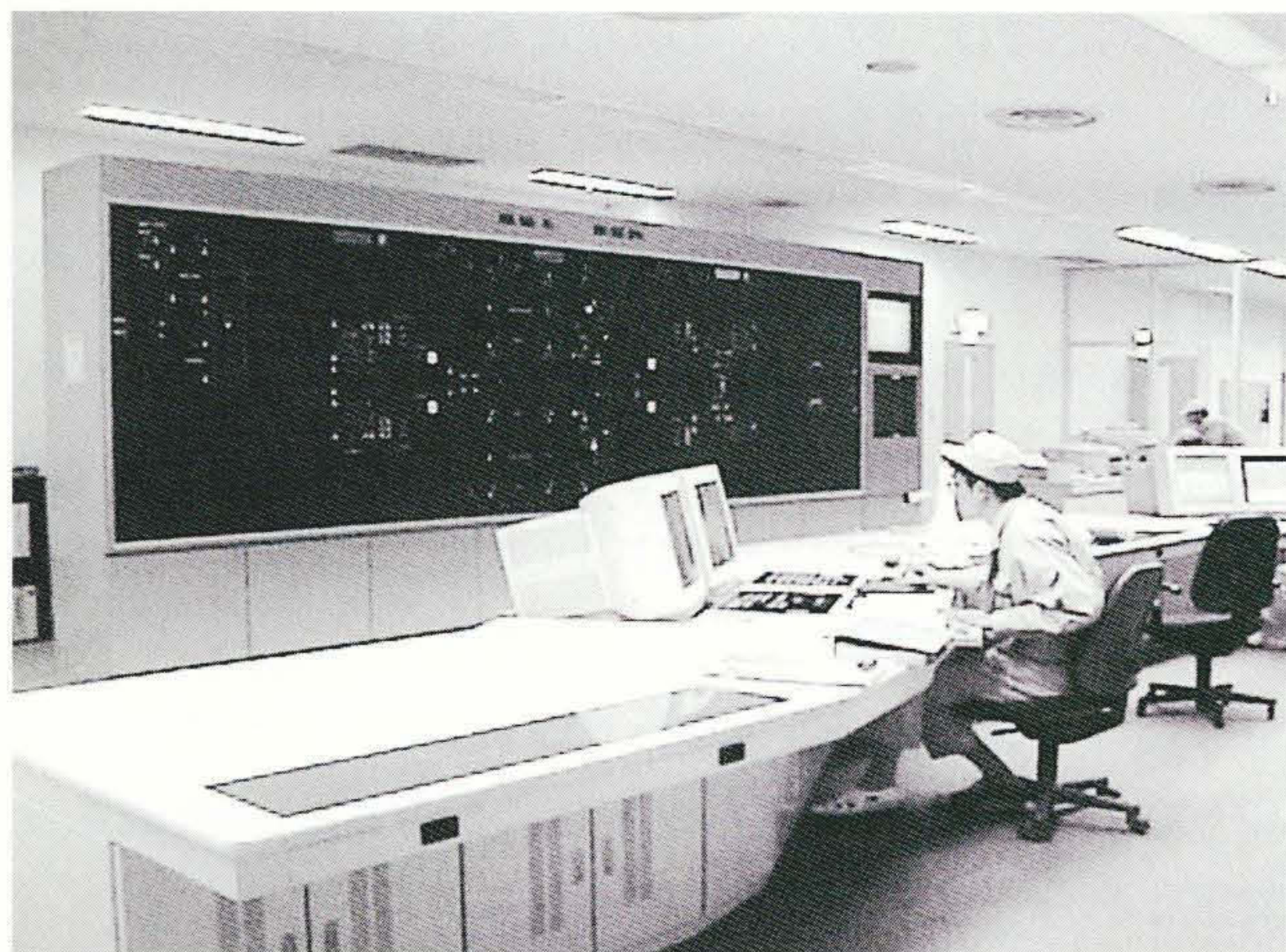


図8 紀北変換所の監視制御システム系統監視盤

監視制御システムと連系した波形観測装置を設けることにより、操作支援機能を充実させた。

(2) 運転制御システム

運転制御システムの機能は、「系統制御機能」と「運転制御機能」に大別できる。

系統制御機能は、交流系統事故発生時にHVDCの高速応答性を活用することによって系統の安定化制御を実施するものであり、周波数一定制御や2章で述べた電力動

揺抑制制御などを行う。

運転制御機能は、起動・停止操作や、1極・2極への電力設定値配分制御・電力リミッタ機能に加えて、直流系事故時の電力リカバリー制御や緊急時過負荷運転制御などの直流運転電力を設定する機能を持っている。

(3) 変換器制御・保護システム

変換器制御は、運転制御系からの電力設定値に従った直流電力での運転のために、サイリスタバルブに出力する点弧パルスの出力位相を制御する機能である。2章で述べた運転継続制御のニーズなどがあることから、紀伊水道HVDCでは、高速サンプリング・高精度演算が可能な日立製作所のSH-3マイコンの採用などにより、演算性能の向上を図った。

6 おわりに

ここでは、2000年6月に運用を開始した紀伊水道直流連系設備と、そこで採用した新技術について述べた。

今後は、この設備で培った技術を有効に活用するとともに、装置の信頼性・保守性・経済性をさらに追求し、調和のとれた最適なシステムの構築に積極的に取り組んでいく考えである。

執筆者紹介



中尾浩之

1974年関西電力株式会社入社、和歌山電力所 紀北変換所所属
主として基幹系変電所の新技術開発、設計、工事管理業務に従事。紀伊水道HVDCでは、システム設計と直流機器開発業務に従事
電気学会会員
E-mail: k558857 @ kepco. co. jp



廣瀬昌弘

1985年四国電力株式会社入社、電力部 橋湾系統プロジェクトチーム 所属
主として変電設備の設計・工事に従事。紀伊水道HVDCでは、主として機器の設計業務に従事
E-mail: hirose12293 @ yonden. co. jp



境 武久

1973年電源開発株式会社入社、工務部 変電技術グループ 所属
主として変電所、変換所の設計、建設に従事。紀伊水道HVDCでは、システム設計と直流機器開発業務に従事
電気学会会員
E-mail: takehisa_sakai @ epdc. co. jp



川村直輝

1989年日立製作所入社、電力・電機グループ 電機システム事業部 国分生産本部 受変制御設計部 所属
紀伊水道HVDCのシステム設計業務を経て、現在、受変電設備の監視制御装置の設計・開発に従事
電気学会会員
E-mail: naoki_kawamura @ pis. hitachi. co. jp



宮田博昭

1994年日立製作所入社、電力・電機グループ 電機システム事業部 日立生産本部 パワーエレクトロニクス部 所属
紀伊水道HVDCのサイリスタバルブの設計業務を経て、現在、電力系統連系用変換装置の設計に従事
電気学会会員
E-mail: hiroaki_miyata @ pis. hitachi. co. jp



門脇 慎

1993年日立製作所入社、電力・電機グループ 電機システム事業部 国分生産本部 変圧器部 所属
現在、超高圧・大容量変圧器の設計業務に従事
電気学会会員
E-mail: makoto_kadowaki @ pis. hitachi. co. jp



大森隆宏

1993年日立製作所入社、電力・電機グループ 電機システム事業部 国分生産本部 受変制御設計部 所属
紀伊水道HVDCの制御システムの設計業務を経て、現在、変電システムの制御・保護装置設計に従事
電気学会会員
E-mail: takahiro_oomori @ pis. hitachi. co. jp



渡邊明彦

1992年日立製作所入社、電力・電機グループ 電機システム事業部 国分生産本部 受変制御設計部 所属
現在、監視制御システム設計に従事
電気学会会員
E-mail: akihiko_watanabe @ pis. hitachi. co. jp