

電力系統連系・安定化技術

Recent Technology for Power System Interconnection and Stabilization

電力系統は広範囲・大容量化に伴い大規模・複雑化してきており、かつ需要の増大、負荷特性の変化と相まって、電力系統連系・安定化に対する要望が高まってきた。これに伴い、系統連系・安定化設備を構成する機器・装置にもより高い信頼性・高機能が要求される。一方、最近のパワーエレクトロニクス、デジタル制御技術、オプトエレクトロニクスなどの技術進歩には目覚ましいものがあり、系統連系・安定化設備の中心機器である電力変換器、制御・保護装置などに適用されている。

中村知治* Tomoharu Nakamura

森悦紀* Etsunori Mori

粥川滋広** Shigehiro Kayukawa

柏崎博** Hiroshi Kashiwazaki

1 緒言

電力系統は電源設備の大容量偏在化や送電設備の長距離重潮流化など、大規模かつ複雑化してきている。一方、産業構造や生活環境の高度化により、エネルギーの電力への依存度が増大する傾向は今後とも高まるものと予想されており、電力の供給が「量」とともに「質」が重視される時代への変化に伴い、電力の供給安定化に対する要望はますます高まってくるものと考えられる。

このように、最近の需給状況や電力を取り巻く環境はきわめて厳しいものがあり、電力会社間連系強化電力の広域運用拡大による需給の平準化、無効電力制御による電力系統の電圧安定化などの施策が増強されつつある。

系統連系設備としては、サイリスタ技術を適用した周波数変換設備による異周波連系や、直流連系設備による非同期連系があり、また電圧安定化設備としては従来の進相コンデンサ、リアクトルに代わる無効電力制御設備であるSVC(Static Var Compensator: 静止形無効電力補償装置)や最新の技術を適用して復活しつつある同期調相機、自励式変換器を用いて遅れから進みまで連続的に無効電力の制御が可能な自励式SVCなどがある。

日立製作所での系統連系・安定化設備の主な実績例を表1に示す。1970年代に入り、それまで水銀整流器を用いていた電力変換器に高電圧・大容量サイリスタバルブが採用されるようになり、1980年代には光サイリスタを用いた水冷式光サイリスタバルブが開発されるとともに、デジタル多重化制御・保護装置、直流用ギャップレス酸化亜鉛避雷器などが開発された。1980年代後半から、大容量・高電圧水冷光サイリ

スタバルブの開発に伴い、大容量SVCが電力系統の電圧安定化用として採用されるようになった。平成年度に入り電力系統のますます厳しい状況を反映して、周波数変換、直流連系による系統連系設備、SVCや同期調相機による系統電圧安定化設備の計画が次々に具体化され、建設に入っている。今後新しい計画が続いて立案・具体化されていく気運にあり、これに合わせて機器・装置の技術開発をたゆみなく進めていく必要がある。

本稿では、サイリスタバルブ、制御・保護装置、同期調相機および直流光PT(直流光応用計器用変圧器)などの新技術について述べる。

2 電力系統連系・安定化分野の新技術

電力系統連系・安定化の分野でも、最近のパワーエレクトロニクス技術、オプトエレクトロニクス技術、デジタル制御技術の急速な進歩を反映して新技術の適用が進められている。

特に、サイリスタバルブと呼ばれる大容量サイリスタ変換器での光サイリスタの適用、制御・保護装置での高機能デジタル多重化、直流光PTなどに加えて、最新の超速応励磁装置やサイリスタ変換器を用いた静止形始動装置を適用した同期調相機がその特長を見直され、電圧安定化設備として再登場し、新設される状況となってきた。

2.1 サイリスタバルブ

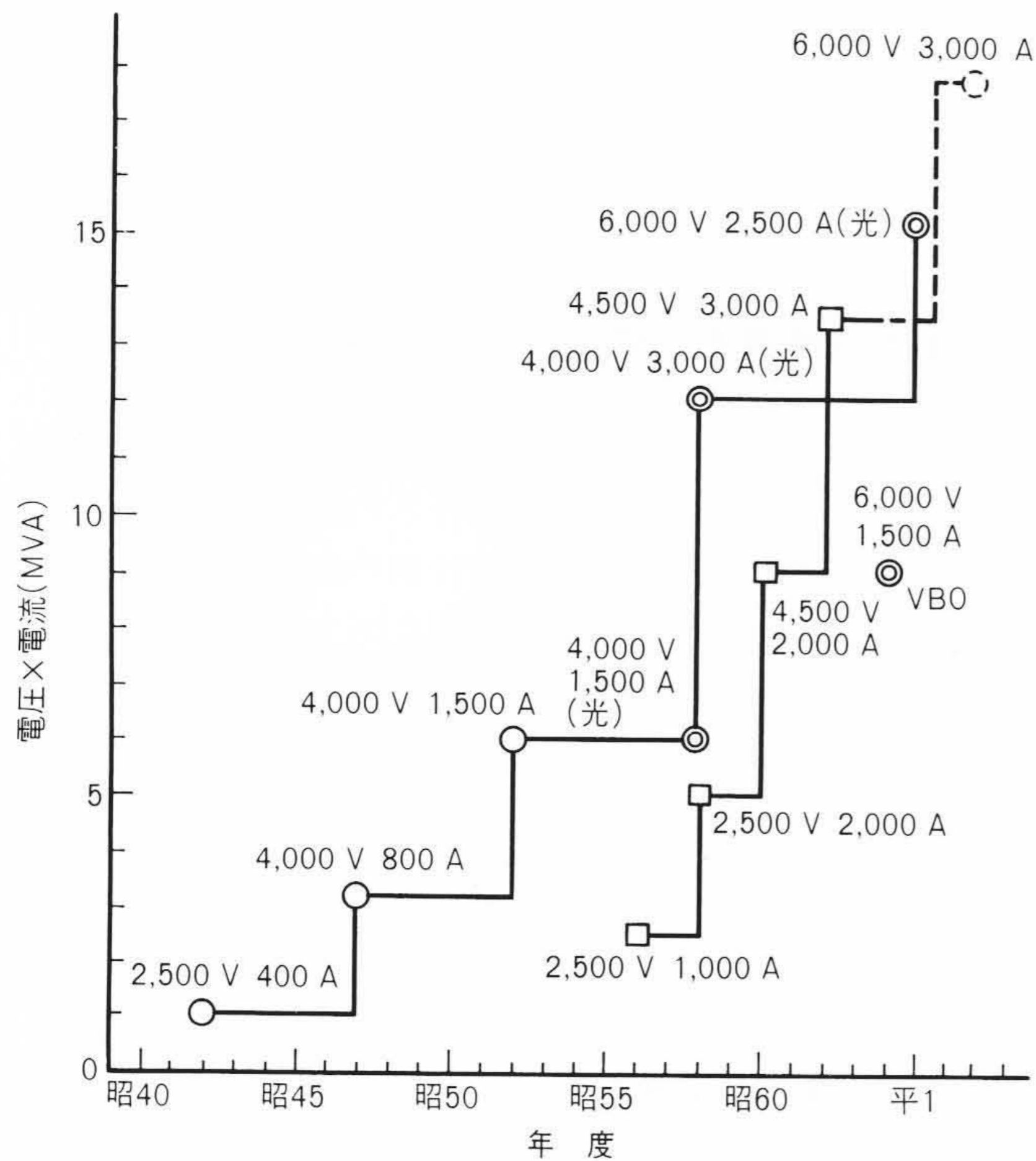
周波数変換・直流連系設備、SVCの中心機器である高電圧・大容量サイリスタバルブの技術開発の最大のねらいは高信頼

* 日立製作所 国分工場 ** 日立製作所 日立工場

表1 系統連系・安定化設備技術の進歩 日立製作所の主な系統連系・安定化設備の実績と適用技術を示す。

項目	昭和												平成									
	45												60	63	1	5						
プロジェクト	125 kV 37.5 MW 機械振興協会 佐久間HVC 60 Hz設備 (実証器)				125 kV 300 MW 東京電力 株式会社 新信濃FC 60 Hz設備				250 kV 300 MW 電源開発 株式会社 北海道-本州 連系函館C/S				32MVA SCV 電源開発 株式会社 函館C/S		100MVA 50MVA SVC 東京電力 株式会社		200MVA 同期調相機 三式 東京電力 株式会社		125 kV 300 MW 東京電力 株式会社 新信濃FC		250 kV 300 MW 電源開発 株式会社 北海道- 本州連系	
サイリスタ バルブ	125 kV 300 A 風冷バルブ 佐久間HVC				125 kV 1,200 A 油浸バルブ 新信濃FC				250 kV 1,200 A 風冷バルブ 北海道-本州連系				125 kV 1,800 A 水冷光バルブ 電源開発 株式会社 佐久間FC		12 kV 890 A 水冷光 バルブ (SVC)		20 kV 1,667 A 水冷光 バルブ (SVC)		125 kV 2,400 A 水冷光 バルブ		250 kV 1,200 A 水冷光 バルブ	
制御装置	125 kV HVDC用 制御装置 アナログ 佐久間HVC				125 kV HVDC用 制御装置 アナログ				250 kV HVDC用 制御装置 アナログ				UHVDC用 制御装置 デジタル 三重系 (工場試験)		SVC用 制御装置 デジタル 二重系		SVC用 制御装置 デジタル 二重系					
関連機器	125 kV/37.5MW HVDC用 変圧器ほか				125 kV/300MW HVDC用 変圧器ほか				125 kV/300MW HVDC用 変圧器ほか				125 kVDC用 ギャップレス ZLA 佐久間FC		125 kVDC用 重責務 ギャップレス ZLA (工場試験)		125 kVDC用 直流光PT					

注：略語説明 HVC (High Voltage Converter), SVC (Static Var Compensator), FC (Frequency Converter), PT (Potential Transformer), HVDC (High Voltage DC), C/S (Converter Station), UHVDC (Ultra HVDC), ZLA (Zinc Oxide Lightning Arrester)



度化にあるが、それと合わせて小形化、高効率化の要求に対応する開発も進めている。最近の成果としては、大容量水冷式光サイリスタバルブの実用化、順過電圧自己保護機能付きVBO (Voltage Break-over Free) フリー光サイリスタバルブの開発がある。また、自己消弧形サイリスタを用いた自励式変換器の大容量化が進められており、自励式SVCや弱小交流系統への連系など、自励式変換器の特長を生かした電力用途への適用開発が進められている。

(1) 光サイリスタバルブ

サイリスタとGTO (Gate Turn-Offサイリスタ)の大容量化の推移を図1に示す。サイリスタバルブは大容量光サイリスタの適用により、図2に示すように従来の電気サイリスタバルブに比べ、電気部品数の大幅な低減による高信頼度化が期待できる。

昭和58年に4 kV, 1.5 kA光サイリスタを適用した水冷式光バルブ(図3)が世界に先駆けてフィールド試験に供された後、平成元年に100 MVAおよび50 MVAのSVC用サイリスタバルブ(図4)として実用化された。

さらに、6 kV, 2.5 kA光サイリスタが開発され、現在実証試験中であるが、この大容量光サイリスタは、平成4年運開予定の東京電力株式会社新信濃変電所(以下、新信濃変電所と言う。)300 MW周波数変換設備に適用される予定である。

注：略語説明など GTO (Gate Turn-Offサイリスタ),
 ○(●)：サイリスタ(光サイリスタ), □：GTO (電流定格は可制御電流値)
 図1 日立電力用素子の大容量推移 '80年代に入って、光サイリスタ、大容量GTOが開発されてからの素子の高電圧・大容量化が急速に進められている。

	電気サイリスタバルブ	光サイリスタバルブ
点弧方式		
モジュール構成例		
部品数	約500	約50

注：略語説明 AL (アノードリアクトル), THY (サイリスタ), C, R (コンデンサ, 抵抗器)

図2 点弧方式によるバルブ比較 光サイリスタバルブでは、従来の電気サイリスタバルブに比べて主回路の高電位部に必要であったパルス増幅器や電源が不要となる。

(2) VBOフリー光サイリスタバルブ

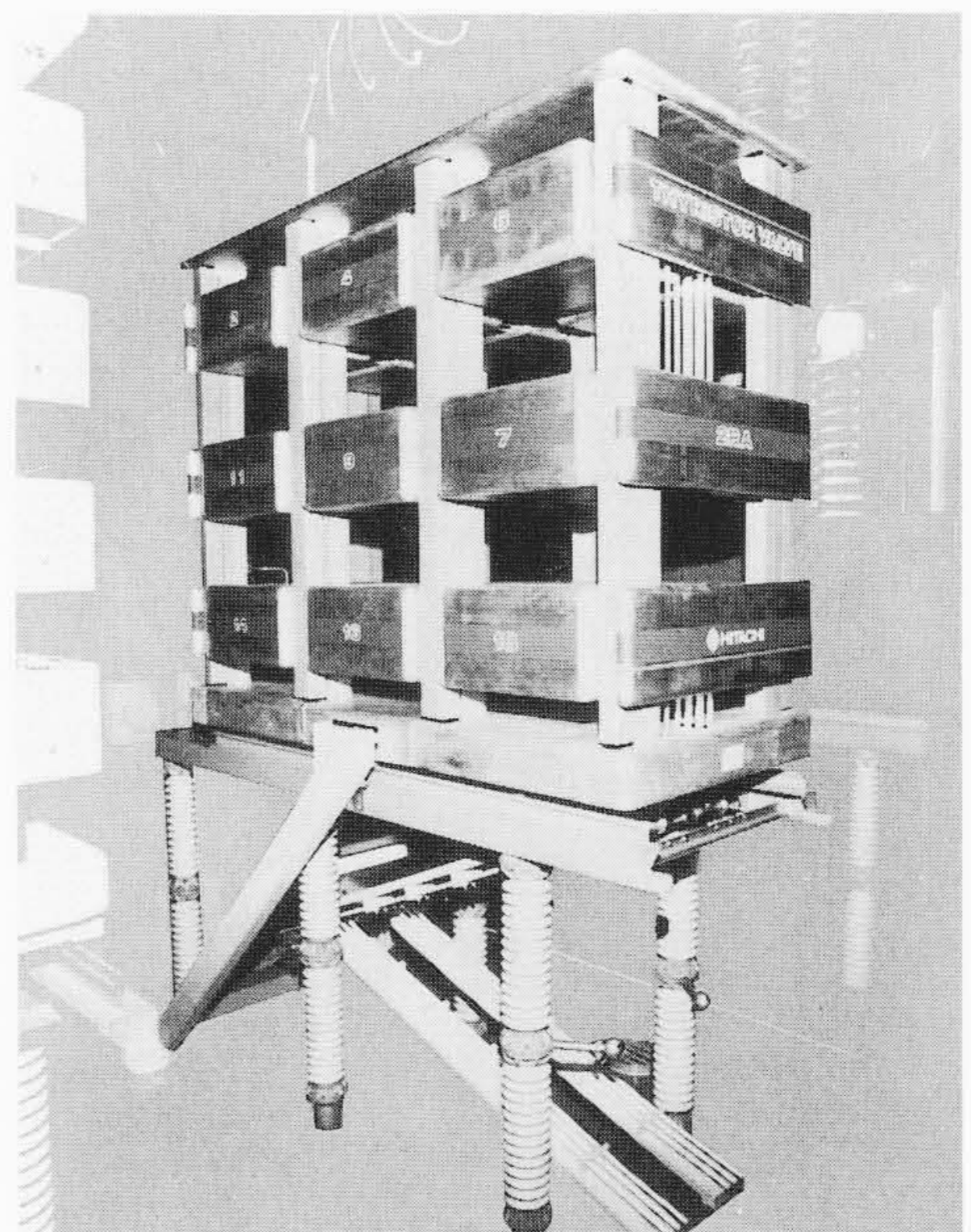
VBOフリー光サイリスタは、順過電圧に対する自己保護機能を内蔵したサイリスタであり、サイリスタ直列数の低減による高信頼度化、小形化が期待される技術である。平成2年3月に6kV、1.5kA級VBOフリー光サイリスタを適用したSVC用サイリスタバルブが実証試験に入った(図5)。

2.2 同期調相機

電力系統の電圧や無効電力の調整設備として、現在は主に電力用コンデンサが用いられているが、界磁を調整することにより、同様の機能を果たすことが可能な同期調相機が以前から用いられてきた。近年、経済性や保守性の点で優れている電力用コンデンサの発達により、同期調相機が使用される例が少なくなっていたが、ごく最近になり再び同期調相機の持つ優れた機能が見直されてきている。

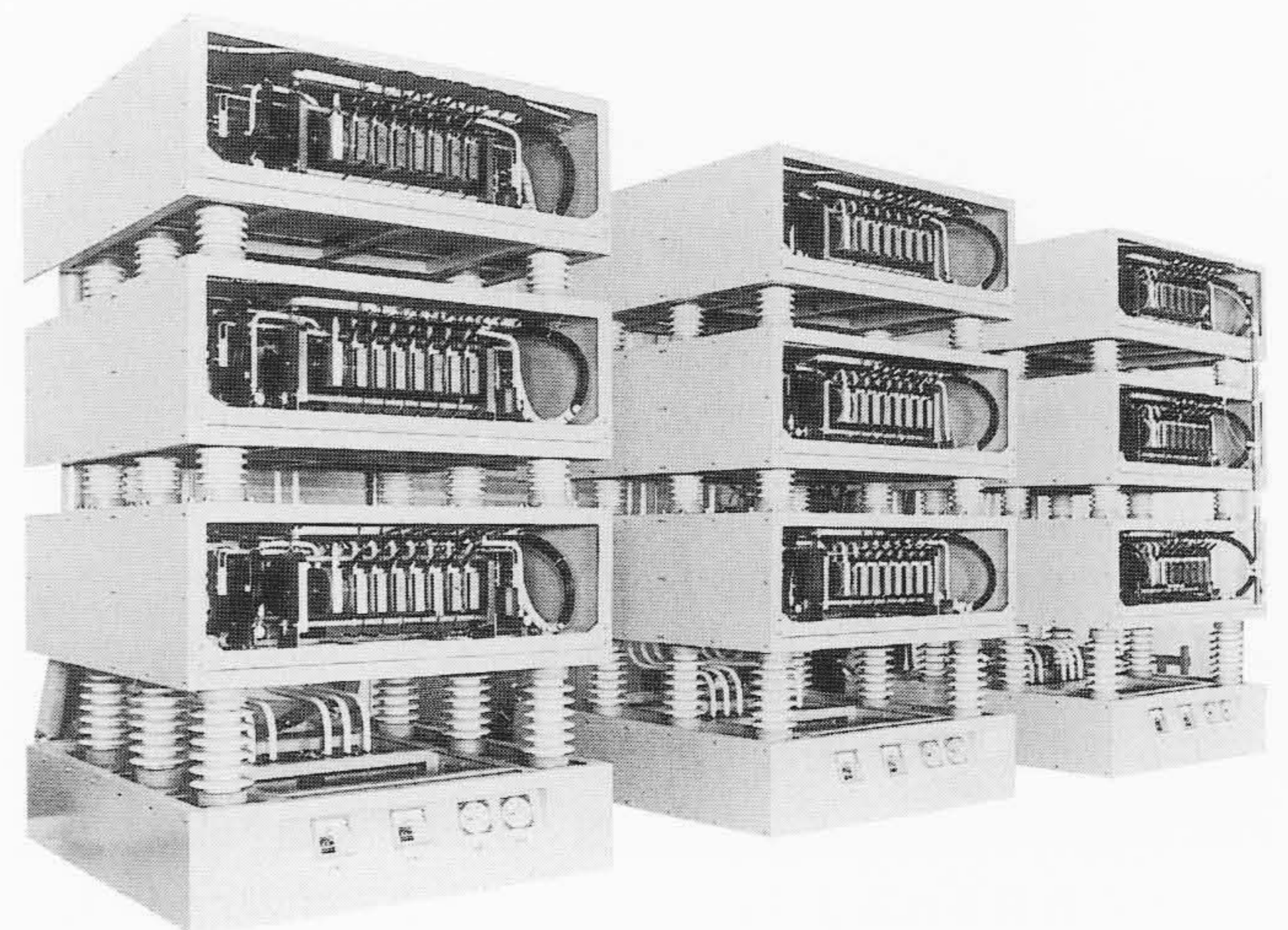
同期調相機の特長は以下の諸点にある。

- (1) 界磁の調整により、進相領域から遅相領域まで連続的に広範囲な無効電力補償が可能である。
- (2) 電力用コンデンサは、系統電圧低下に伴い供給無効電力が減少するのに対し、内部起電力を持つ同期調相機は系統電圧低下時にも所定の無効電力を維持することができ、また過渡的な電圧変動に対する抑制機能を持つ。



注：容量 225 MW (実系統試験時150 MW)
 直流電圧 125 kV
 直流電流 1,800 A (実系統試験時1,200 A)
 サイリスタ 4,000 V, 1,500 A 光サイリスタ
 102直列×1並列・アーム

図3 電源開発株式会社佐久間変電所周波数変換所の水冷光サイリスタバルブ 佐久間変電所周波数変換所の水銀バルブの1相と置き換えて実証試験を実施した。

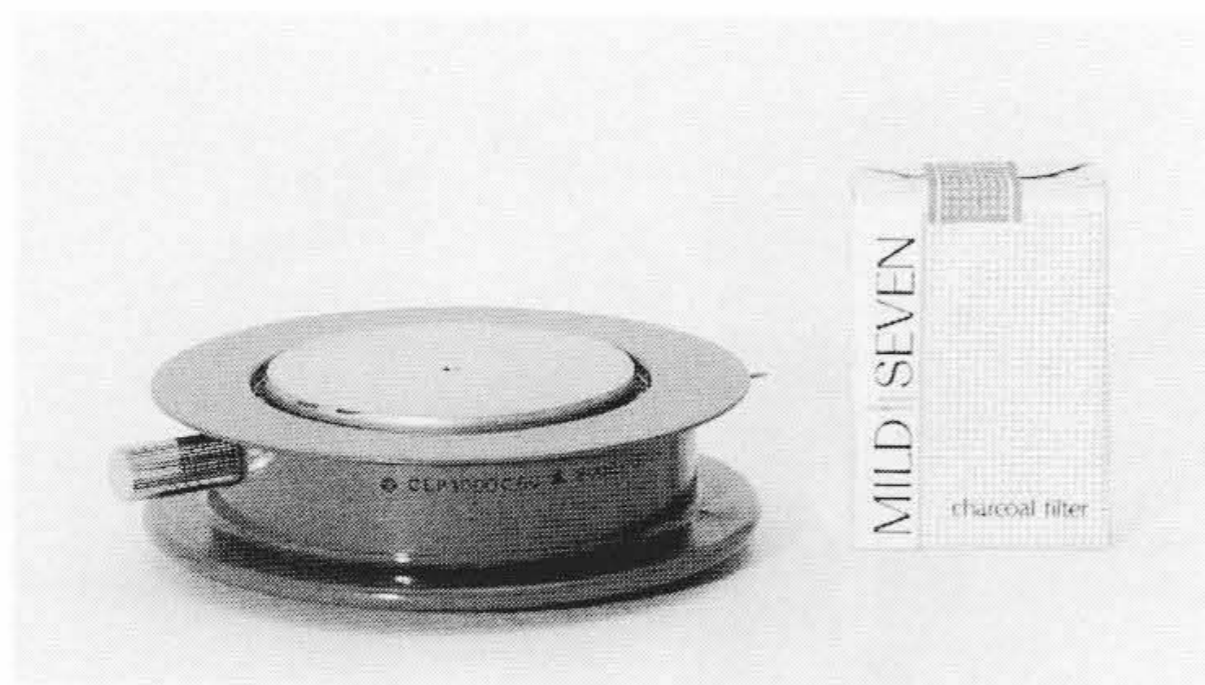


注：容量 100 MVA
 交流電圧 20 kV
 交流電流 1,667 A
 結線 △結線
 サイリスタ 4,000 V, 1,500 A 光サイリスタ
 21直列×逆並列/相×3相

図4 東京電力株式会社新富士変電所のSVC用水冷光サイリスタバルブ 7直列×逆並列構成のモジュールを3段直列接続して、1相分を構成している。

- (3) 過負荷や不平衡負荷に対する耐量が大きく、高調波の発生がない。

これまで30 MVA程度以上の比較的容量の大きな同期調相機は、横軸形の水素冷却方式が採用されるのが一般的であった。



6,000 V, 1,500 A VBOフリー光サイリスタ

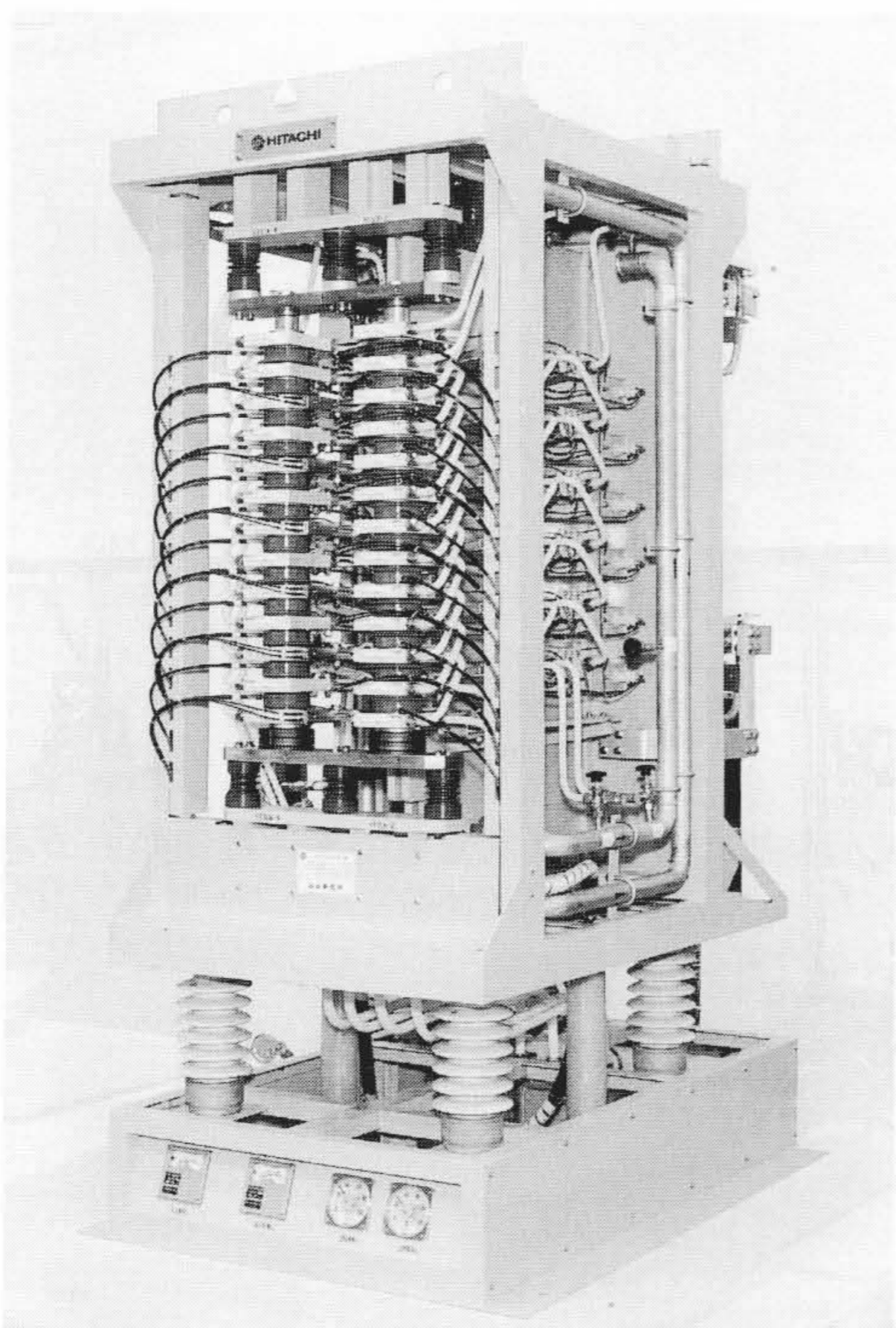


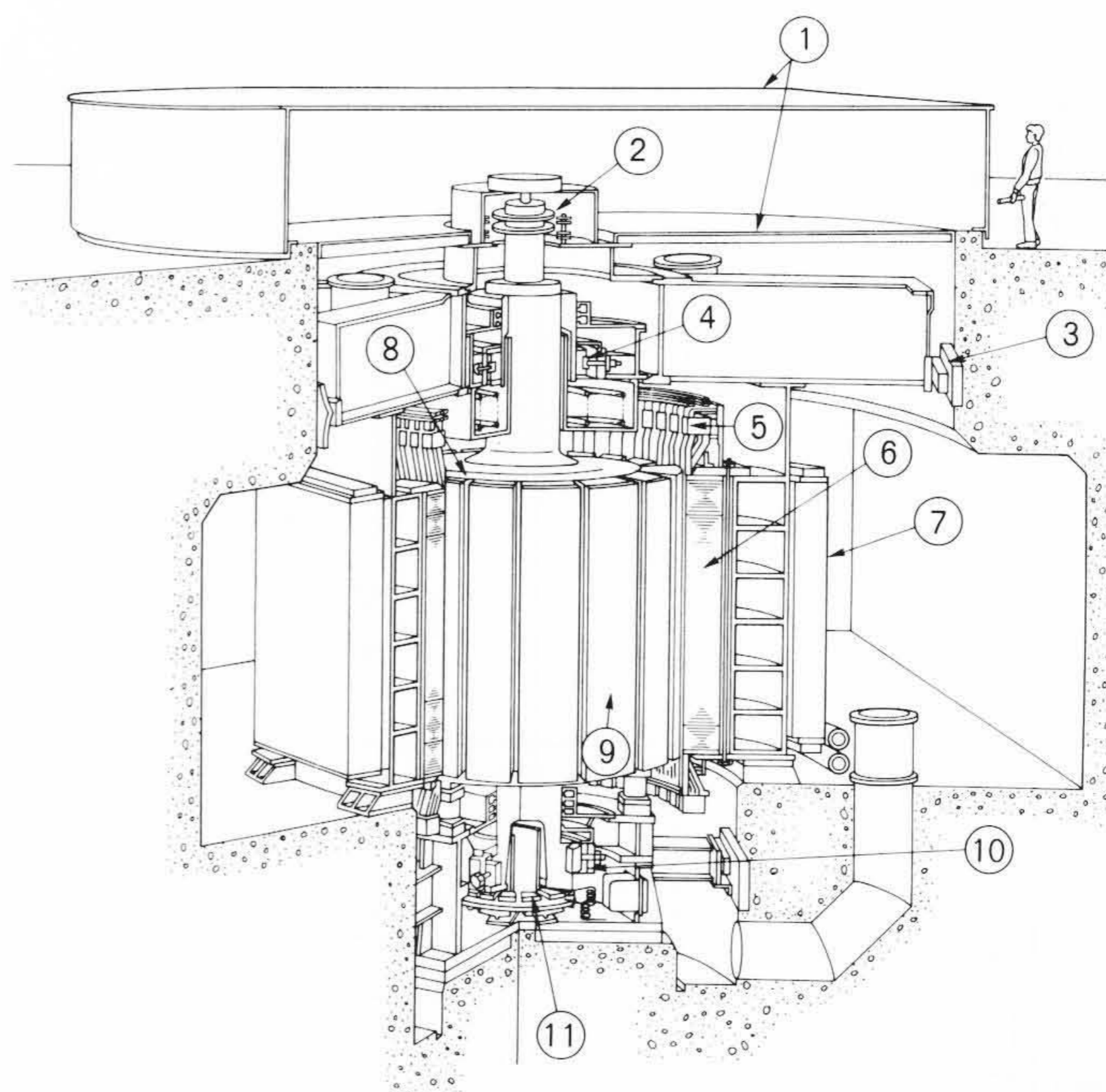
図5 VBOフリー水冷光サイリスタバルブ〔100 MVA(3相) SVC用 1相分〕 6,000 V, 1,500 A級VBOフリー光サイリスタを適用し、12直列×逆並列構成のSVC用サイリスタバルブを示す。

しかし、水車発電機の技術を用いた立て軸の同期調相機が、輸送条件を考慮した分割輸送ができること、空気を冷却媒体とするため保守面の簡素化が図れること、および地下ピット内に設置することによって低振動・低騒音運転が可能なことなどから注目されるようになった。立て軸同期調相機を採用した調相設備の例を図6に示す。

2.3 制御・保護装置

電力システムの運用の高度化に伴い、制御・保護装置にはよりいっそうの高機能・高精度・高信頼性が期待されるようになってきた。これらの期待にこたえるために、最新のエレクトロニクス技術を駆使した制御・保護システムを開発した。

制御・保護装置の心臓部に相当するマイクロコンピュータユニットの構成を図7に示す。データ入力部、演算制御部、シーケンスロジック制御部および表示制御部に機能分割され、おのおのに専用CPUを持つマルチCPUシステムを構成している。同図のシステムコントロールは、これら各CPU間のデータの授受などの全体をまとめる機能を持ったものである。マ



項番	名称	項番	名称	項番	名称
①	上部カバー	⑤	固定子コイル	⑨	回転子磁極
②	コレクタリング	⑥	固定子鉄心	⑩	下部案内軸受
③	防振ステー	⑦	空気冷却器	⑪	スラスト軸受
④	上部案内軸受	⑧	回転子リム		—

図6 同期調相機の構造 東京電力株式会社新富士変電所および新信濃変電所向け立て軸同期調相機の構造を示す。

ルチCPUシステムの採用により、いっそう高度な機能に柔軟に対応することが可能となった。このシステムの第二の特徴は、数値演算部に32ビットフローティング演算対応のCPUを採用していることである。このために、従来にはない高精度を実現している。特に入力部は、3 kHzという超高速サンプリングと、高速演算CPUによるデジタルフィルタ処理により、アナログ入力フィルタを排し、温度変化や経年変化に対しきわめて安定で、高精度なデータ検出を実現した。

高信頼度化を実現するために、二重系などの冗長システムに対応できるようにしている。冗長系を構成した場合には、光シリアル伝送で系列間のデータの交換を行い、システム全体での信頼性の向上と、安定性の維持を図っている。

2.4 直流光PT

直流光PTは直流連系設備の制御・保護に用いられる直流電圧検出器として不可欠であるが、今回、耐サージ・ノイズ性、高性能・小形化など優れた特徴を持つ、ポッケルス効果を利用した直流光PTを開発したのでその概要を述べる。

(1) 直流光PTの仕様とシステム構成

今回開発した直流光PTのシステム構成を図8に、また仕様およびフィールド試験状況を図9に示す。電圧検出部は、抵抗分圧器、チョッパ回路およびポッケルス素子から成っており、電荷移動現象を抑制したチョッピング電圧を素子に印加している²⁾。

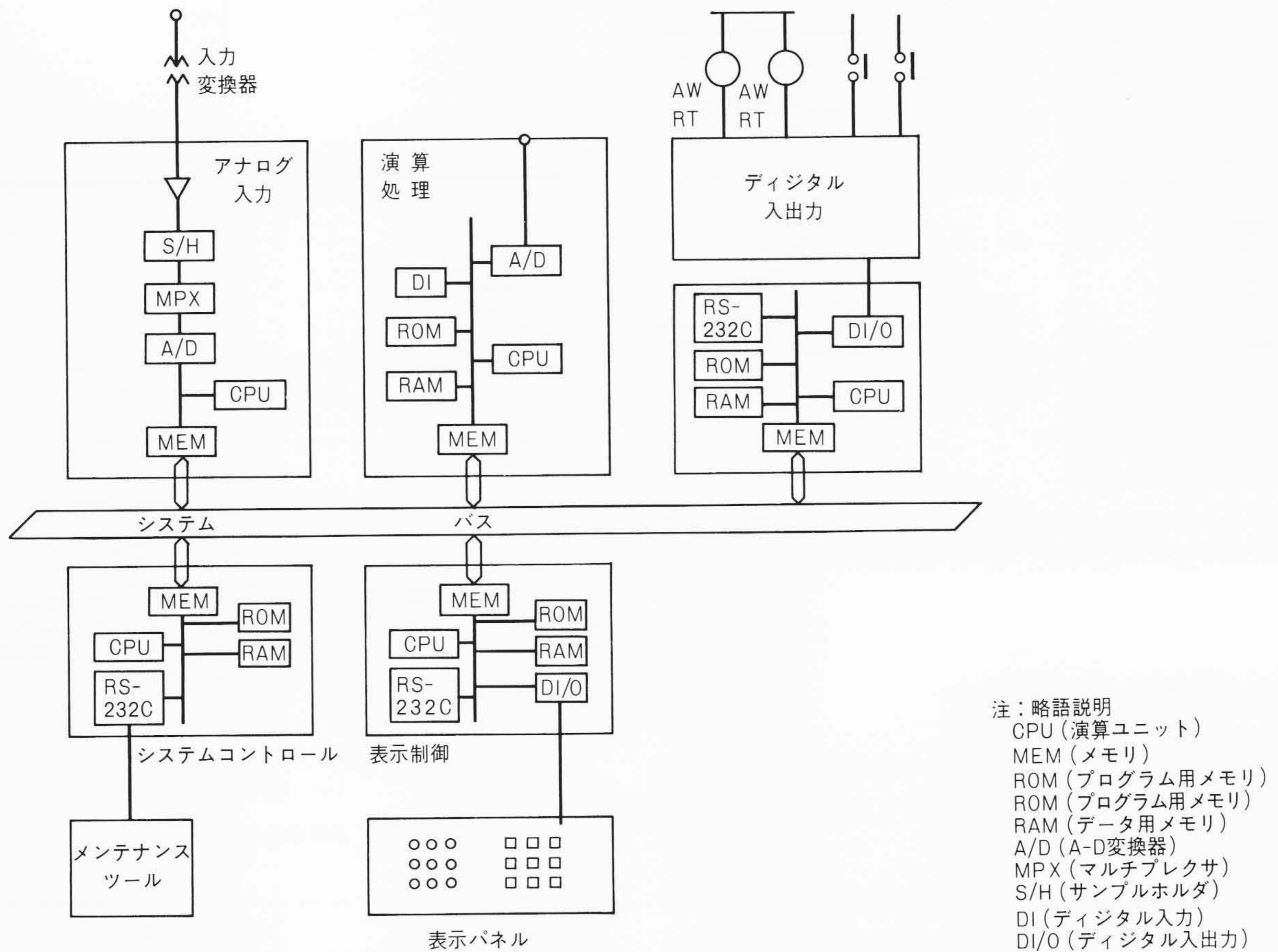
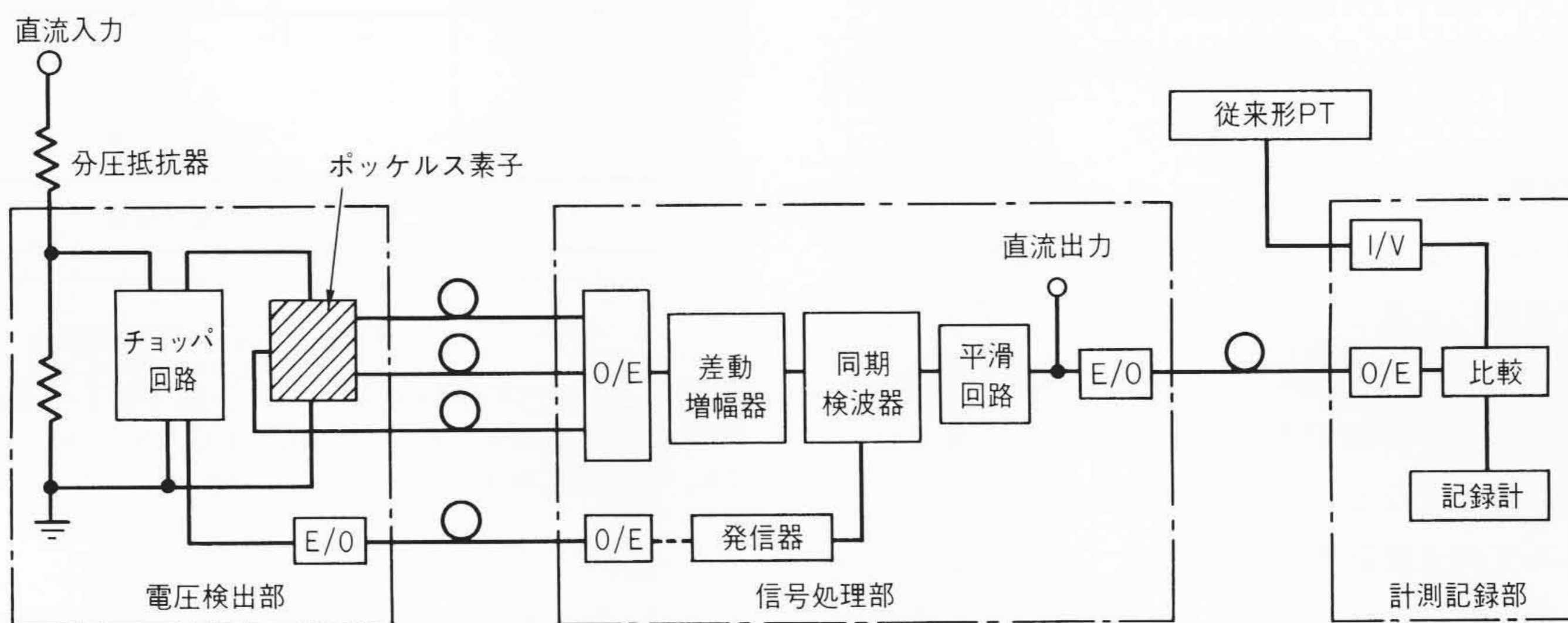


図7 制御・保護用マイクロコンピュータユニット 機能分散のマルチCPU方式で、高度なニーズにも柔軟に対応する。入力は3kHzサンプリング、演算は32ビットフローティング処理を実現した。



注：略語説明 E/O (電気-光変換), O/E (光-電気変換), I/V (電流-電圧変換)

図8 直流光PTのシステム構成 直流光PTのシステムは、大別して電圧検出部と信号処理部で構成され、これらは光ファイバで接続されている。

信号処理部は、電圧検出部から光出力信号をO/E(光-電気)変換し、演算、増幅、検波を行い直流電圧を出力する構成である。

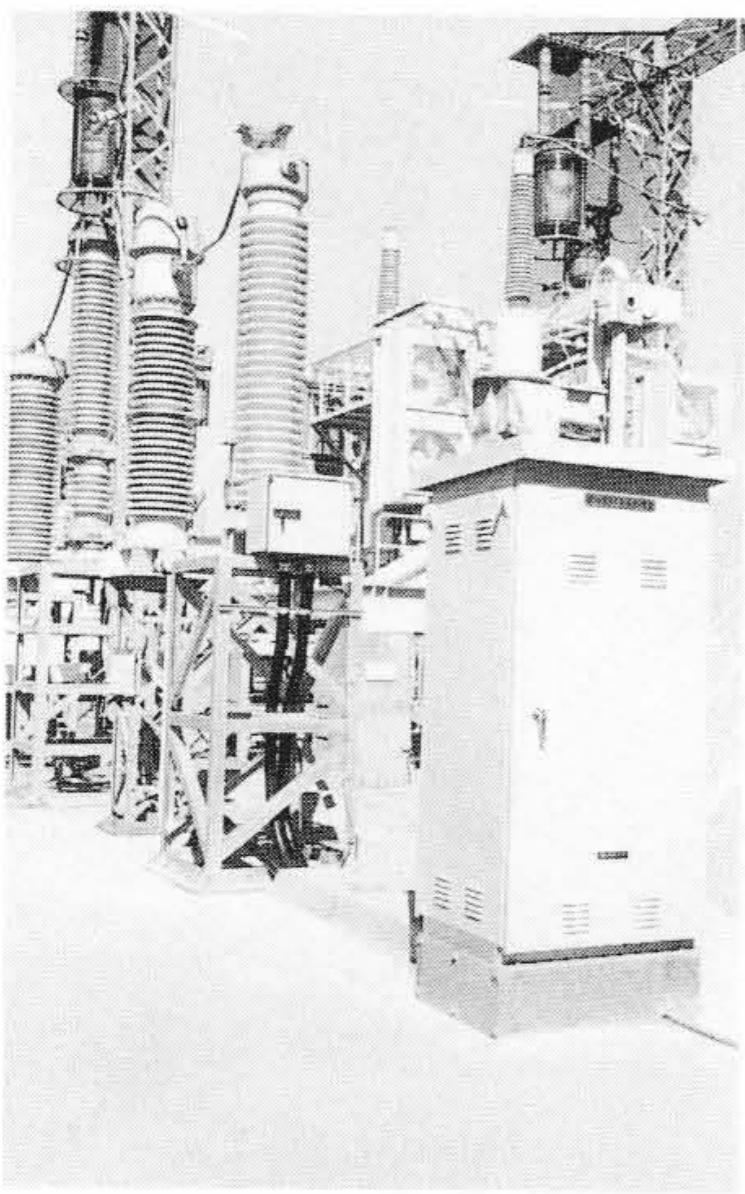
(2) 性能検証結果

前記システム構成の直流光PTを試作し工場内で各種性能試験を実施した結果、満足できる性能が得られたので、新信濃変電所周波数変換設備直流125 kV回路で平成2年5月から約

1年間フィールド試験を実施している。

入力電圧として+187.5~-187.5 V(定格入力電圧: ±125 V)の変化に対する直線性と比誤差特性の測定結果を図10(a)に示す。良好な特性が得られていることがわかる。

±100%, ±70%電圧印加時、温度特性測定結果を図10(b)に示す。-20~+60℃の温度変化でも、出力の変動率は±1%以内に収まっている。



直流光PTの仕様

方 式	がいし形抵抗分圧式
定格一次電圧	±125 kV
定格二次電圧	±30 V
確 度 階 級	JEC-1201 IP級相当
温 度 特 性	-20~+60℃±1%
耐 電 圧	Imp 400 kV
	AC 230 kV
	DC ±225 kV
センサ材質	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂

注：光PTの精度は、JEC-1201 IP級相当を目標としている。

図9 フィールド試験中の直流光PT装置 直流光PTの抵抗分圧器は、がい管内部に抵抗体を設置し、絶縁油を封入した油浸絶縁方式としている。

3 電力系統連系・安定化設備

最近の電力需要の急増に対し、系統の広域運用による発電予備率の有効利用や、重潮流系統に対する潮流制御などが関心を集めている。これらのニーズに対し、サイリスタ技術を応用したFC(Frequency Converter：周波数変換設備)による異周波連系や、BTB(Back to Back：直流連系設備)による非同期連系、さらには潮流制御などの適用が検討されている。

一方、電圧安定度の向上を目的とした無効電力制御も、ますます重要になってきており、SVCや同期調相設備など従来の調相用コンデンサ以外の方式が関心を集めている。

ここでは直流連系設備と、各種無効電力制御設備についてその概要を述べる。

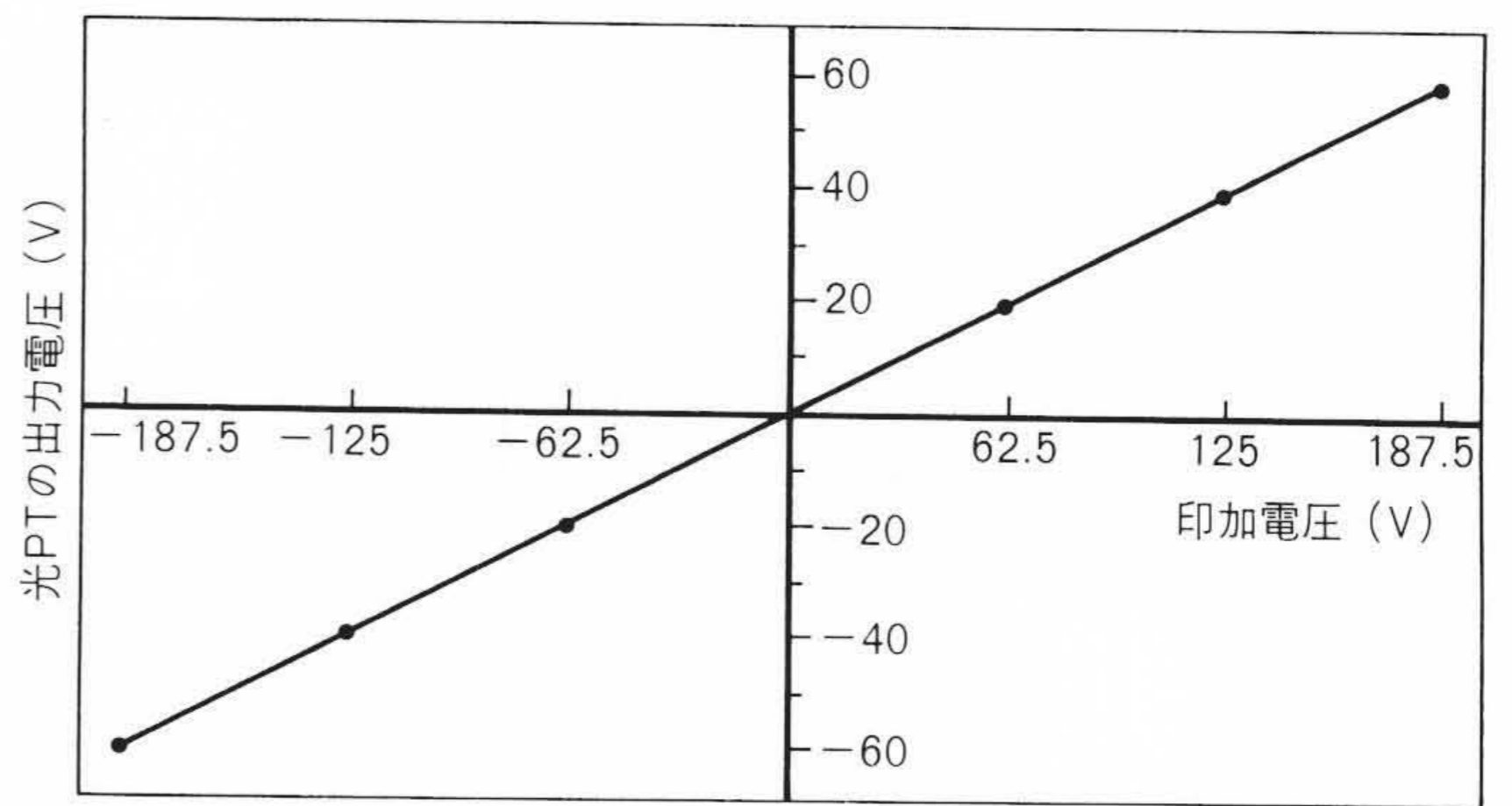
3.1 直流連系設備

直流連系設備とは、図11に示すように、交流電力をサイリスタブリッジで直流に変換し、さらにサイリスタブリッジによって交流に逆変換するもので、一つの交流系統から他の交流系統へ電力を融通する設備である。したがって、異周波連系や非同期連系が可能となる。また、系統間の潮流の大きさの制御をサイリスタの点弧制御で行うため、任意にかつ高速にできるという特徴がある。したがって、短絡容量も抑制できる。このように、非常に多くの利点を持っていることから、交流では直接連系できないようなところに適用することで大きな効果が期待できる。

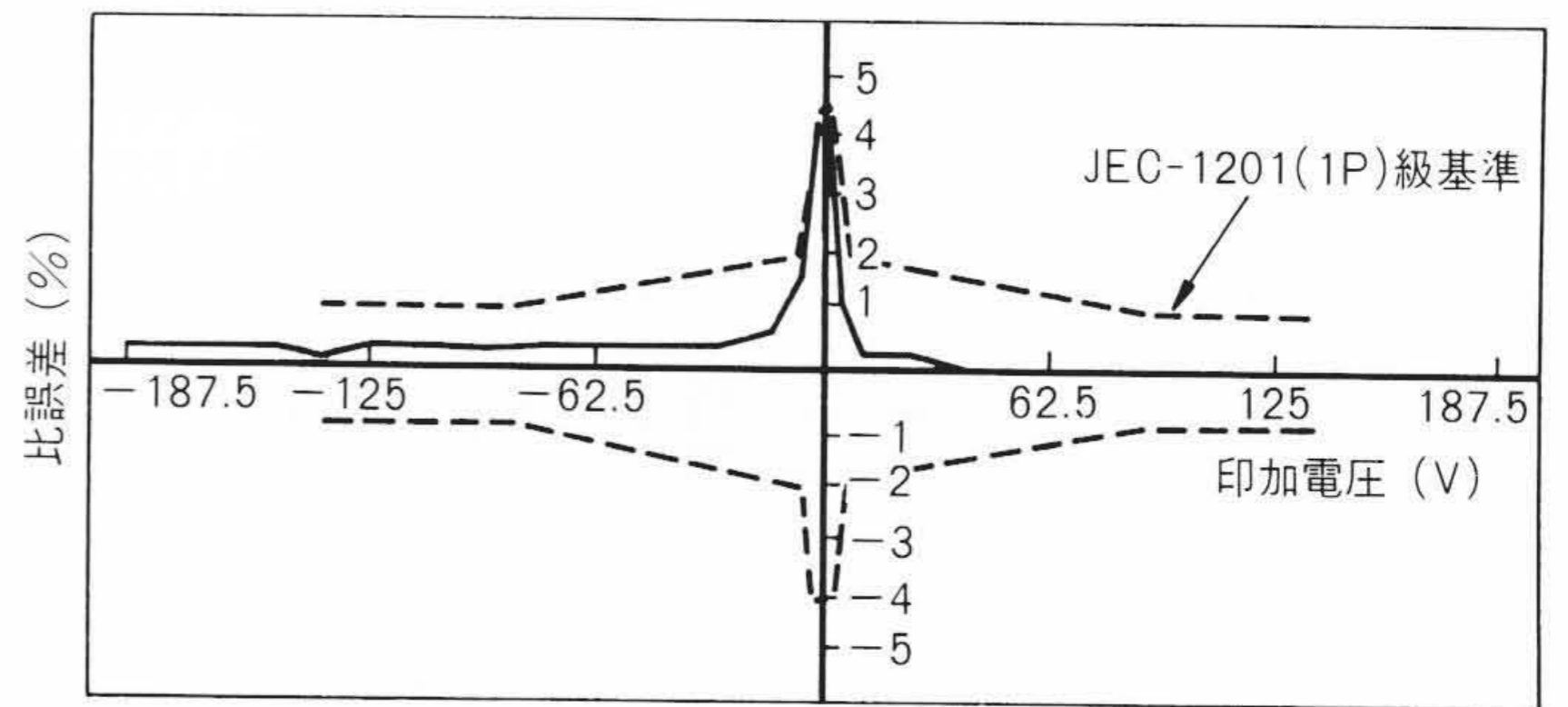
図12は新信濃変電所周波数変換設備を示す。昭和52年12月の営業運転開始以来14年間の長期運転実績を持っている。

3.2 SVC

SVCについては、可飽和リアクトルや次節で述べる自励式インバータを用いたものなども一部発表されているが、制御性能や経済性の面から、現時点ではTCR(Thyristor Controlled Reactor)と呼ばれる、リアクトル電流をサイリスタで制御する

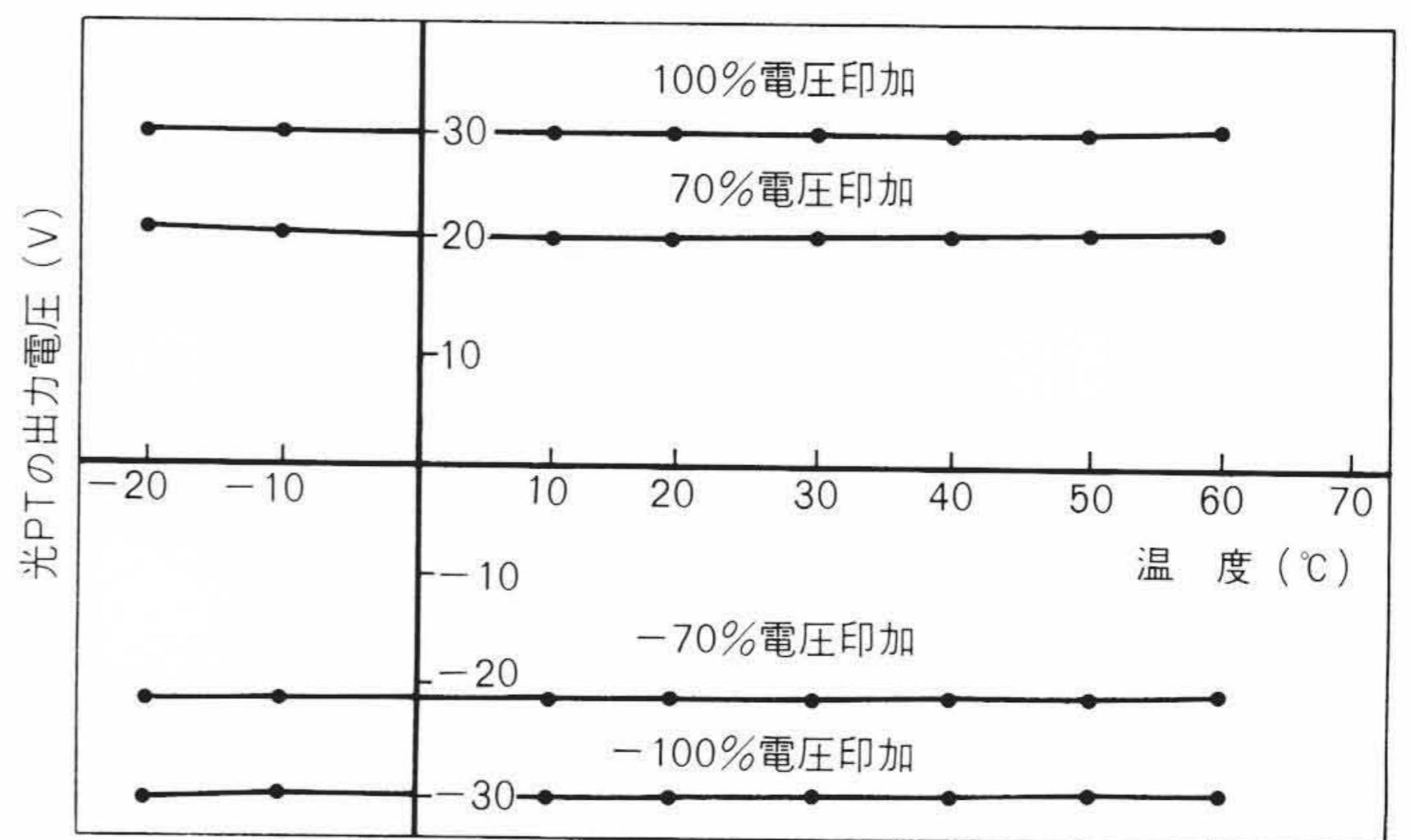


(i) 入出力電圧の直線性



(ii) 比誤差特性

(a) 比誤差特性試験結果



(b) 温度変化による出力変動特性

図10 直流光PTの試験結果 (a) 入出力電圧の直線性および比誤差特性とも良好な結果が得られている。また、(b) -20~+60℃の温度変化でも、出力の変動率は±1%以内に収まっている。

方式が一般に採用されている。TCRは遅相無効電力の供給しできないことから、通常固定コンデンサと組み合わせた回路構成としている。このコンデンサは、必要に応じてTCRの発生する高調波を吸収するためのフィルタ構成とすることもあ

SVCの静特性の例を図13に示す。リアクトルの電流が制御できる範囲内では、制御系のゲイン K で決まる傾き $X_s (=1/K$ スロープリアクタンスと呼ぶ。)の電流-電圧特性を持つ。一方、系統のインピーダンス特性は、同図の系統特性のように表される。負荷変動などにより系統電圧が上昇すると、SVCの運転点はAからBに移り、系統に遅れ無効電力を供給する。この

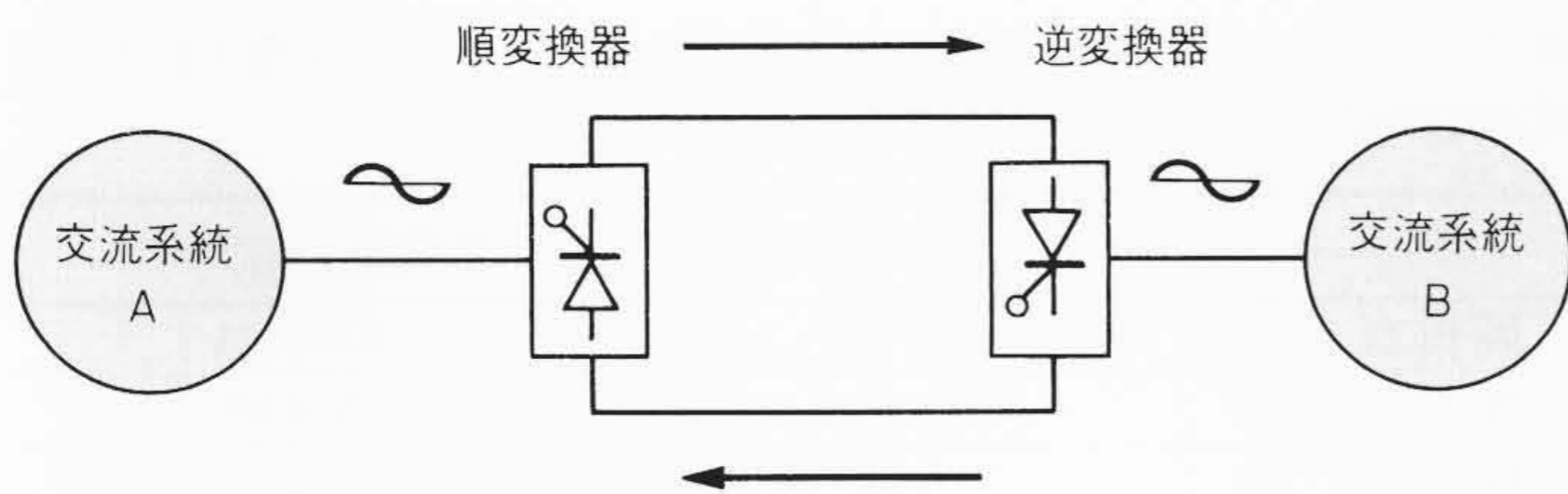


図11 直流連系設備の基本構成 交流系統Aに接続された順変換器で交流電力を直流電力に変換し、それを逆変換器で再び交流電力に変換して交流系統Bに供給する。

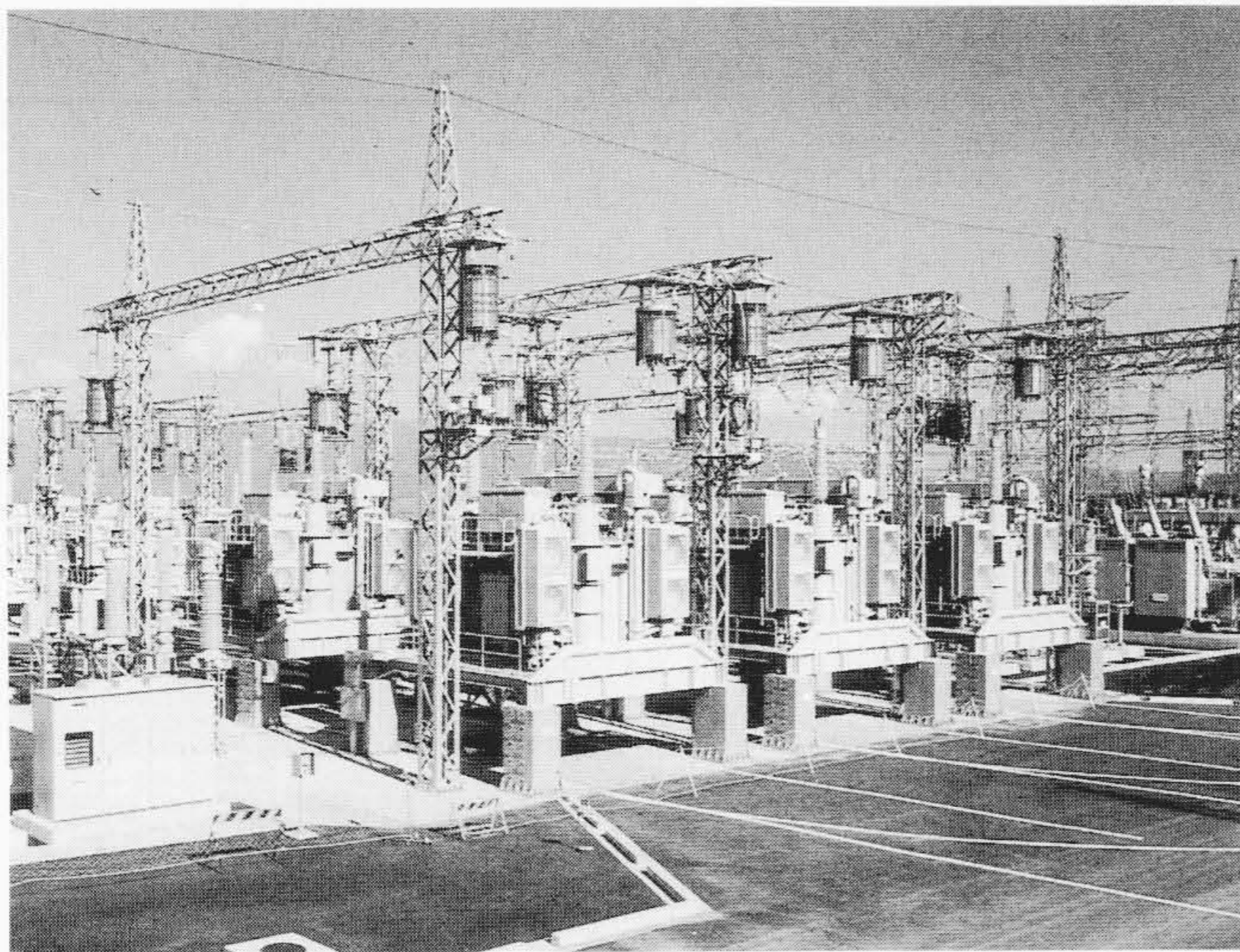


図12 東京電力株式会社新信濃変電所周波数変換設備(既設) 300 MWの容量を持つこの設備は、50 Hz/60 Hz間の異周波連系を行うもので、1977年12月以来14年以上の運転実績を持つ。

ように、電圧状態に応じて適正な無効電力供給を行うよう設計される。100 MVA SVCの外観を図14に示す。

3.3 自励式SVC

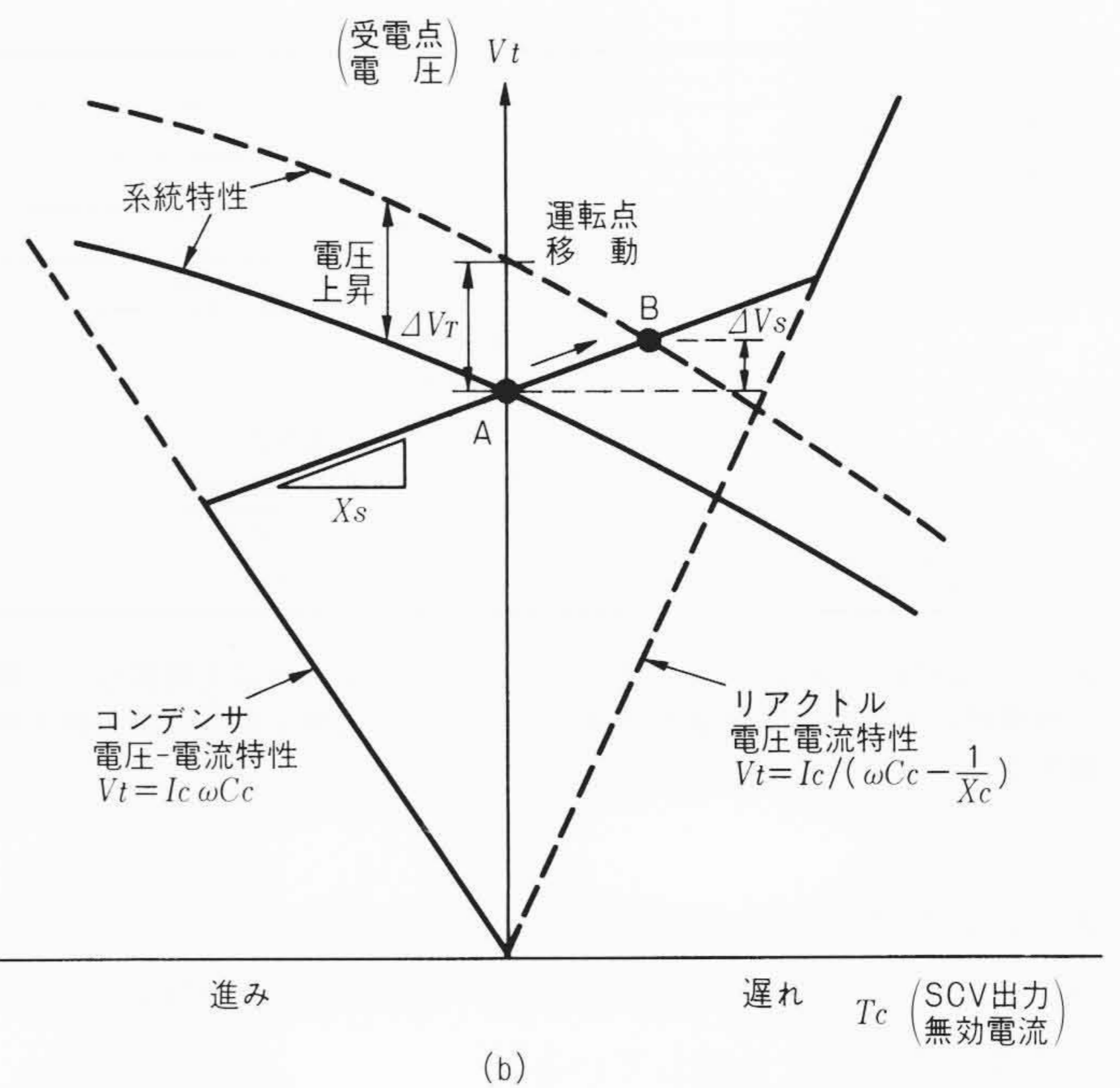
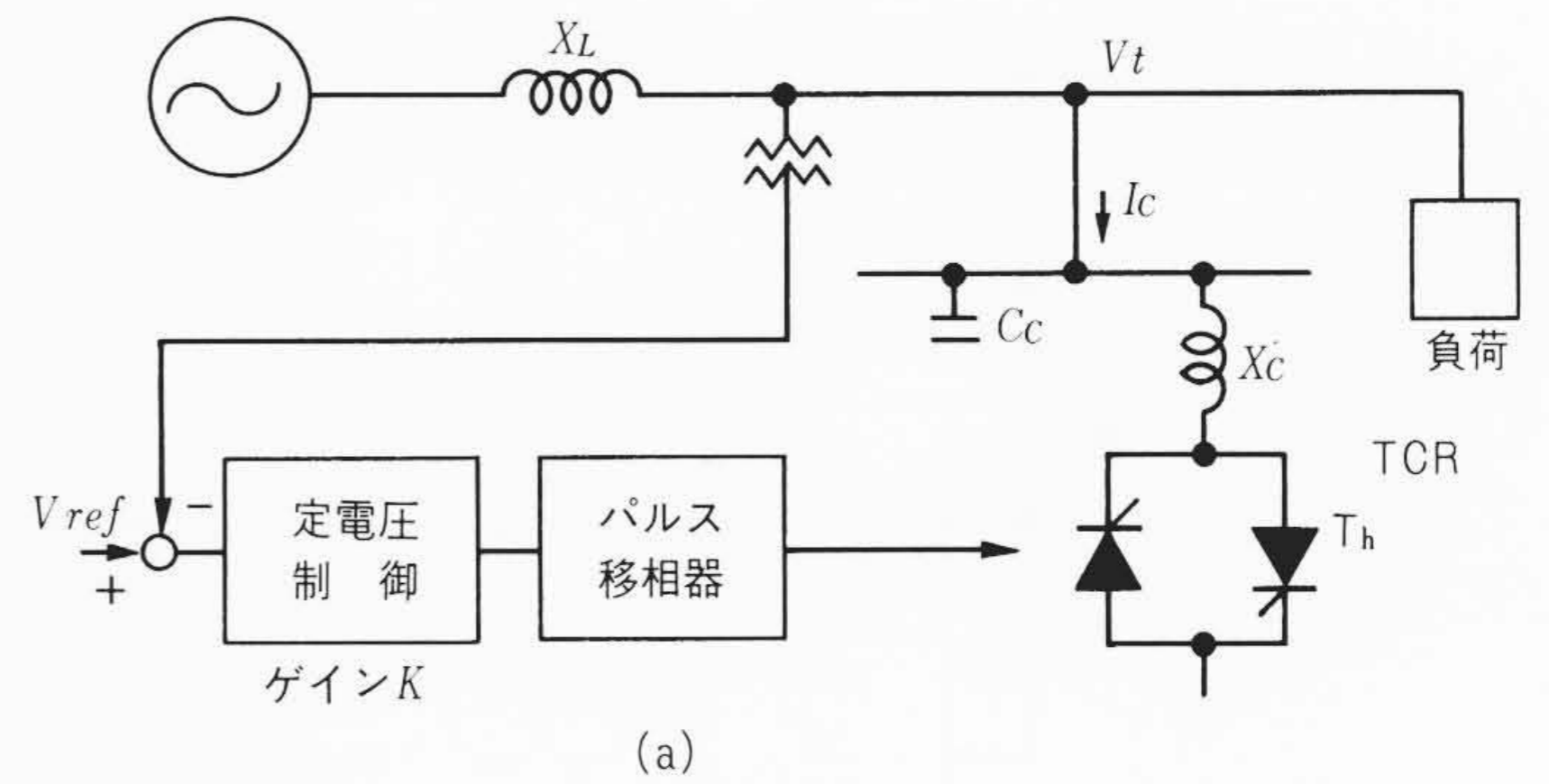
現在、電力系統の変換器としてはサイリスタによる他励式変換器が使用されているが、変換器容量が系統の短絡容量によって制限を受けたり、系統電圧低下時の運転範囲が著しく制限されるなど、交流系統の状況によって制約を受けやすいという短所がある。また、発生高調波が大きく、フィルタ設備が大きくなる。

これに対して、自己消弧形素子であるGTOの大容量化や、直列接続技術の進歩により、大容量の自励式変換器を構成できるようになった。

自励式変換器は、電圧の振幅と位相を任意に制御することができるため、従来のSVCのように進相用コンデンサや遅相用リアクトルを用いることなく、コンデンサ(進み)動作モードからリアクトル(遅れ)動作モードまで、電圧の振幅を変えるだけで連続的に制御可能である。

また、無効電力だけでなく、電圧位相を変えることで有効電力の制御も可能であり、将来的には自励式HVDCへの適用拡大も検討されている。

現在、図15に示す50 MVAの自励式SVC実証器を製作中で



注：略語説明 V_t (受電点電圧), I_c (SVC出力電流), V_{ref} (制御目標電圧), ΔV_t (SVCなし時の電圧変動), ΔV_s (SVCあり時の電圧変動)

図13 SVCの静特性 系統特性とSVC静特性の交点で、SVCの運転点が決まる。

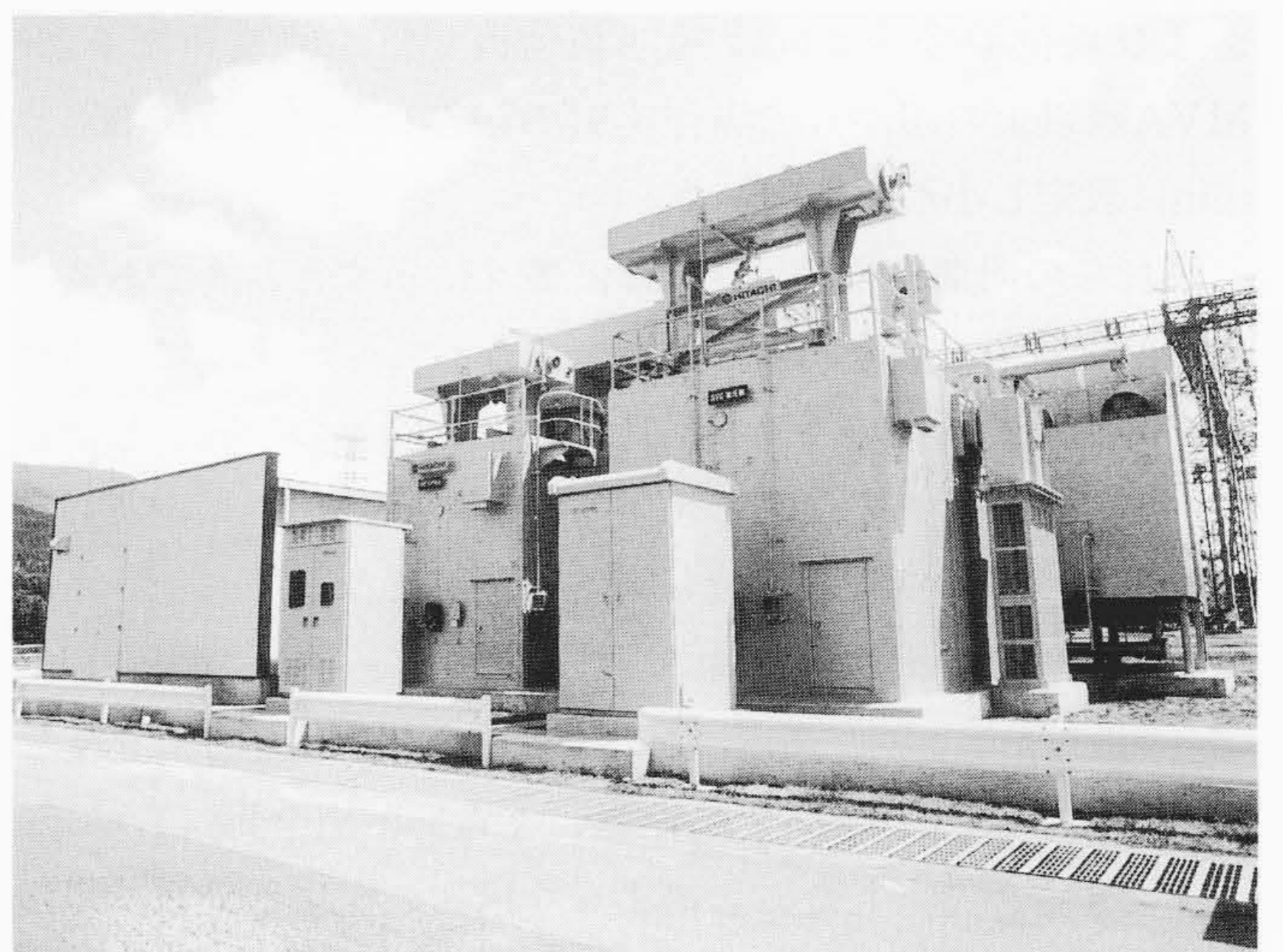
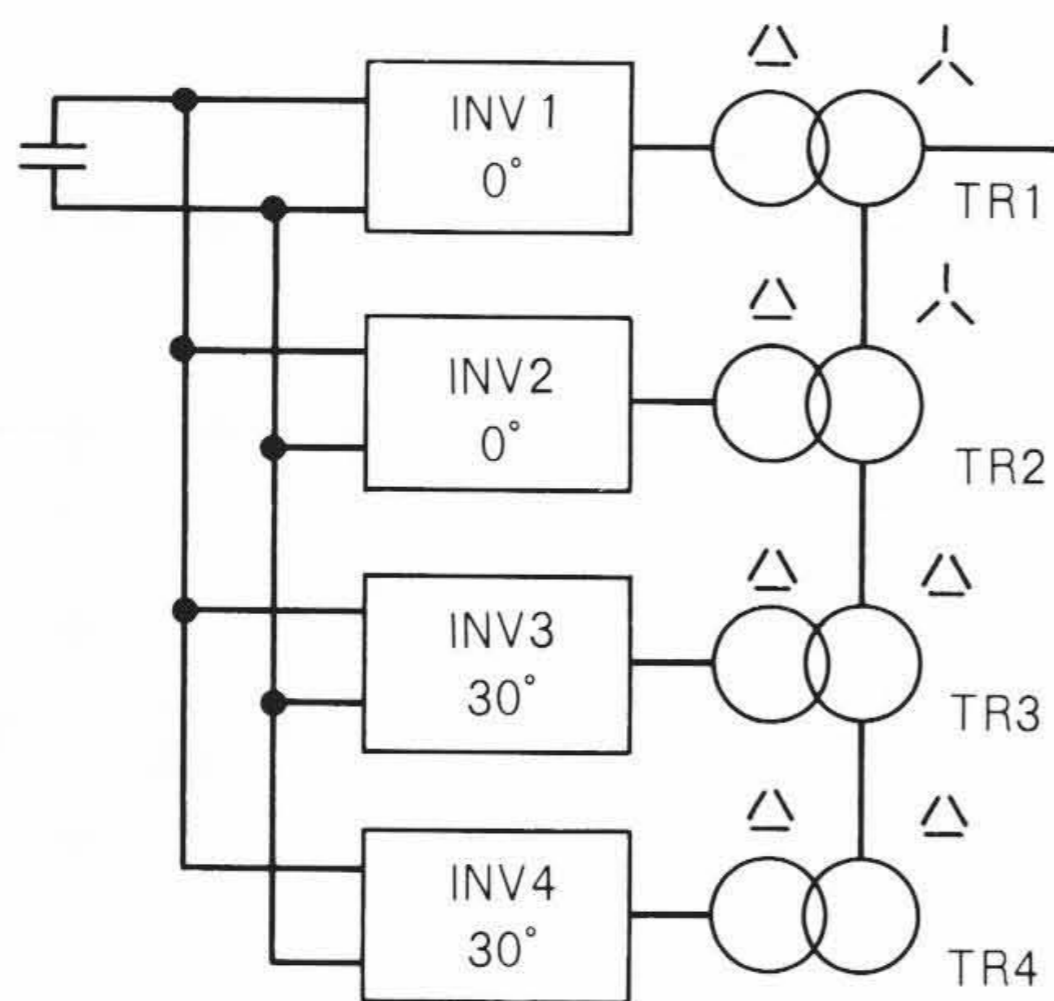


図14 東京電力株式会社新富士変電所の100 MVA SVC 100 MVA SVCはサイリスタバルブ、制御・保護装置を収納したバルブ建屋、交流リアクトル、SVC用変圧器から構成されている。



項目	仕様
定格容量	50 MVA
無効電力補償範囲	進相50～遅相50 MVA
連系点定格電圧	66 kV
定格周波数	50 Hz
直流電圧	16 kV
素子構成	4.5 kV, 3 kA GTO 12 ^S ×1 ^P ×6 ^A ×4 ^B
制御方式	パルス幅変調方式 (キャリア周波数150 Hz)
冷却方式	純水循環冷却方式
絶縁方式	空気絶縁方式

図15 50 MVA自励式SVCの概要 パルス幅変調方式を採用した二重12相接続により発生高調波を低減している。交流電圧の振幅と位相を制御することで進相から遅相まで連続的に制御可能である。

あり、新信濃変電所で実証試験に入る予定である。この実証器ではパルス幅変調制御を採用し、変圧器の多重接続と合わせて発生高調波を低減している。

3.4 同期調相機

立て軸同期調相機は、従来多くの実績を持つ水車発電機の技術に基づいているが、水車発電機と異なりポンプ水車側からの制約がないため、回転速度は高く設定するほど機器の小形化、軽量化が可能となる。東京電力株式会社新富士変電所および新信濃変電所向け同期調相機では、回転速度を200 MVA級以上の同期機で製作実績の最高レベルである600 r/minに設定し小形化を図った。

これらの同期調相機の仕様は、表2に示すとおりである。本機は変電所という水力発電所と異なった立地環境にあるため、計画時から次のような構造上、据付け上の配慮をした。

- (1) 屋外設置であるため、地下ピットに収納し、二重防音構造の上部カバーを採用し低騒音化を図った。
- (2) 制振効果の大きい金属ばね防振ステーを上下に配置した。
- (3) 600 r/minという高速に対応するため、回転子リムを4分割の塊状リム(マッシュリム)とし、くら形磁極を2列Tテールで支持する構造とした。このような構造の採用により、現地据付けスペース、工程およびクレーン容量を低減でき、据付けの高効率化、高信頼性が図れる。
- (4) 冷却水確保が難しいため、密閉形冷却塔による循環冷却

表2 同期調相機の仕様 東京電力株式会社新富士変電所および新信濃変電所向け立て軸同期調相機の仕様を示す。

項目	新富士変電所向け	新信濃変電所向け
調相機容量	200 MVA	200 MVA
端子電圧	11.0 kV	15.4 kV
極数	10	12
回転速度	600 r/min	600 r/min
周波数	50 Hz	60 Hz
形式	突極立て軸	突極立て軸
冷却方式	全閉水冷熱交換器形	全閉水冷熱交換器形
通風方式	強制ブロワ	強制ブロワ
設置方式	屋外、ピット式	屋外、ピット式
遅相容量	70 MVA以上	80 MVA以上

水方式を採用し、必要冷却水量を低減した。

(5) 2層式スラスト軸受を回転子下部に配置することにより、軸受の小形化、低損失化を図った。また、内蔵式油冷却器の採用により、補機の簡素化を図った。

同期調相機の始動方式は、揚水発電電動機に適用されるものと同様のサイリスタ始動であるが、同期調相機は始動時の加速エネルギーが小さいため、昇圧変圧器を用いて始動装置の小形化を図っている。制動方式は停止時間短縮のため電気ブレーキと機械ブレーキの併用とし、円滑な運用ができるように配慮している。

4 結 言

電力系統連系・安定化技術として周波数変換を含む直流連系設備、SVCおよび同期調相機について述べた。

これらの設備は今後も電力の広域運用拡大、系統安定化の要求に伴ってますますその重要性が高まってくると思われる。

今後も、系統連系・安定化設備に対する新しい計画の具体化が進むものと予想され、その重要性を十分に認識し、さらに高信頼度、運転性能の向上を進めていく考えである。

終わりに、これらの技術開発に多大なご援助とご指導をいただいた東京電力株式会社、電源開発株式会社およびその他の関係各位に対し心からお礼申し上げるしだいである。

参考文献

- 1) 堀内, ほか: VBOフリー光サイリスタバルブの開発, 平成2年電気学会全国大会, No.472
- 2) 柏崎, ほか: 光直接点弧サイリスタバルブの開発, 日立評論, 67, 6, 427~432(昭60-6)
- 3) M. Kanoi, et al.: IEEE Transactions on Power Delivery, No.1, January(1986)
- 4) 大橋, ほか: 平成2年電気学会全国大会, No.836