

電力系統におけるパワーエレクトロニクスの応用

Power Electronics Application to Utilities

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複雑化してきており、安定化施策がとられている。

一方、電力の制御機能を持つ静止電力変換技術は、主要部品であるパワーデバイスのたゆまぬ技術進歩に支えられてその応用分野を広げてきた。電力分野での最近のパワーエレクトロニクス応用システムとして、(1) 系統電圧安定化用の“SVC”，(2) 系統周波数調整容量増強用の「可変速揚水発電システム」，(3) 大容量の電力用インバータの開発状況を紹介する。

これらパワーエレクトロニクス応用システムは、既存の交流系統の現象と協調を取り、無効電力や有効電力を高速制御することによって系統安定化に効果があることが分かった。

村岡泰夫* Yasuo Muraoka

田中主税** Chikara Tanaka

中村知治*** Tomoharu Nakamura

1 緒 言

電力分野でのパワーエレクトロニクスの応用システムの主なものを表1に示す。大別すると、送変電部門での直流送電（連系）用及び無効電力補償用大容量・高電圧サイリスタ変換装置、並びに発電部門での可変速揚水発電システム、あるいは将来を指向した各種新・省エネルギー用大容量自励式インバータシステムなどがある。

日立製作所での電力会社向けパワーエレクトロニクスの適用例を図1に示す。1970年代から各種の応用システムが開発されてきている。主な電力用パワーエレクトロニクス応用システムの開発経緯、動向を以下に述べる。

電力用パワーエレクトロニクスの大きな推進役となったのは直流送電であると言えよう。1970年代に入りそれまで水銀整流器を使用していた交直変換器に高電圧・大容量サイリスタバルブを採用し、一段と運転信頼度を向上させた。この変換装置は、電力系統に直接接続され各種の過電圧・過電流にさらされるため、サイリスタ素子の高電圧・大容量化とともに変換装置としての素子の直並列接続技術、スナバ回路技術、ゲート制御保護技術、絶縁・冷却技術などパワーエレクトロニクス応用システムとして必要とされる高度な技術が確立された^{1),2)}。そして1972年、長距離送電用や非同期連系用として直流送電変換装置は、320 MW イールリバー（カナダ）非同期連系が運転開始されて以来、約15年間に世界で39箇所（約26 GW）もの多数のシステムが運転に入り、更に多くの建設中や計画中のシステムが控えている。

1970年代後半から電力系統の電圧安定化に寄与するSVC（Static Var Compensator：静止形無効電力補償装置）が、主として海外の長距離送電線を結ぶ変電所の調相設備として普及してきている。国内の電力系統でも単なる電圧変動の抑制

表1 主な電力用パワーエレクトロニクス応用システム 電力の広い分野で適用が拡大しつつある。

分 類	用 途	変換装置の特徴	基本構成
送 変 電	直流送電 非同期連系 (B-T-B, FC) SVC	高電圧・大容量 大容量	他励式順逆変換器 他励式順逆変換器
			交流サイリスタスイッチ
発 電	可変速水車駆動 揚水発電所始動 同期発電機励磁装置	変速(周波数)運転 発電機始動時運転 発電機AVR制御	サイクロコンバータ 他励式順逆変換器 他励式順変換器
新・省エ ネルギー	太陽光発電 燃料電池 電池電力貯蔵、超 電導エネルギー貯蔵	系統連系用インバータ	自励式変換器
		系統連系用インバータ	自励式変換器

注：略語説明 SVC(静止形無効電力補償装置)
AVR(自動電圧制御回路)

用だけでなく中間調相機効果(定態及び過渡安定度の改善)までをねらった適用計画が活発化している。

発電分野に目を向けると、各種発電機の励磁装置や揚水発電機の始動装置がある。1980年以降に計画された揚水発電所では始動装置として、サイリスタ始動方式が広く適用されている。また最近、系統運用の効率化や系統安定化に効果が期待される「可変速揚水発電システム」が開発、実用化されつつある。可変速揚水発電システムは、1987年世界に先駆けて関西電力株式会社と日立製作所の共同開発によって関西電力株式会社成出發電所(以下、成出發電所と言う。)の1号機22 MVA実証プラントとして取りまとめられ、長期フィールド試験を推進している。今後の実用化が期待されるシステム

* 日立製作所電力事業部 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所国分工場

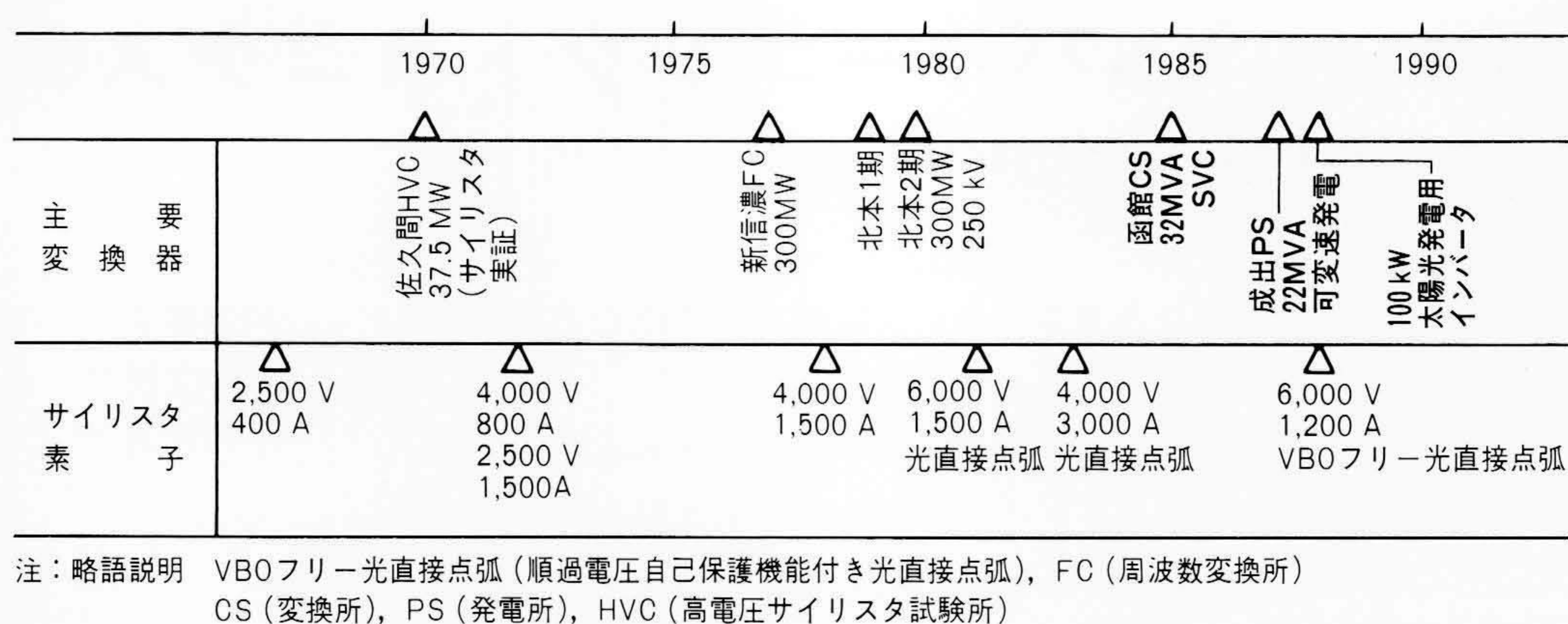


図1 電力分野における主なパワーエレクトロニクス適用実績 1970年代から既に実用段階に入り，ますます各種の適用システムが生まれようとしている。

である。

ここでは最近の電力用パワーエレクトロニクス応用システムとして，(1) SVC，(2) 可変速揚水発電システム，(3) 電力用インバータを紹介する。

2 SVC

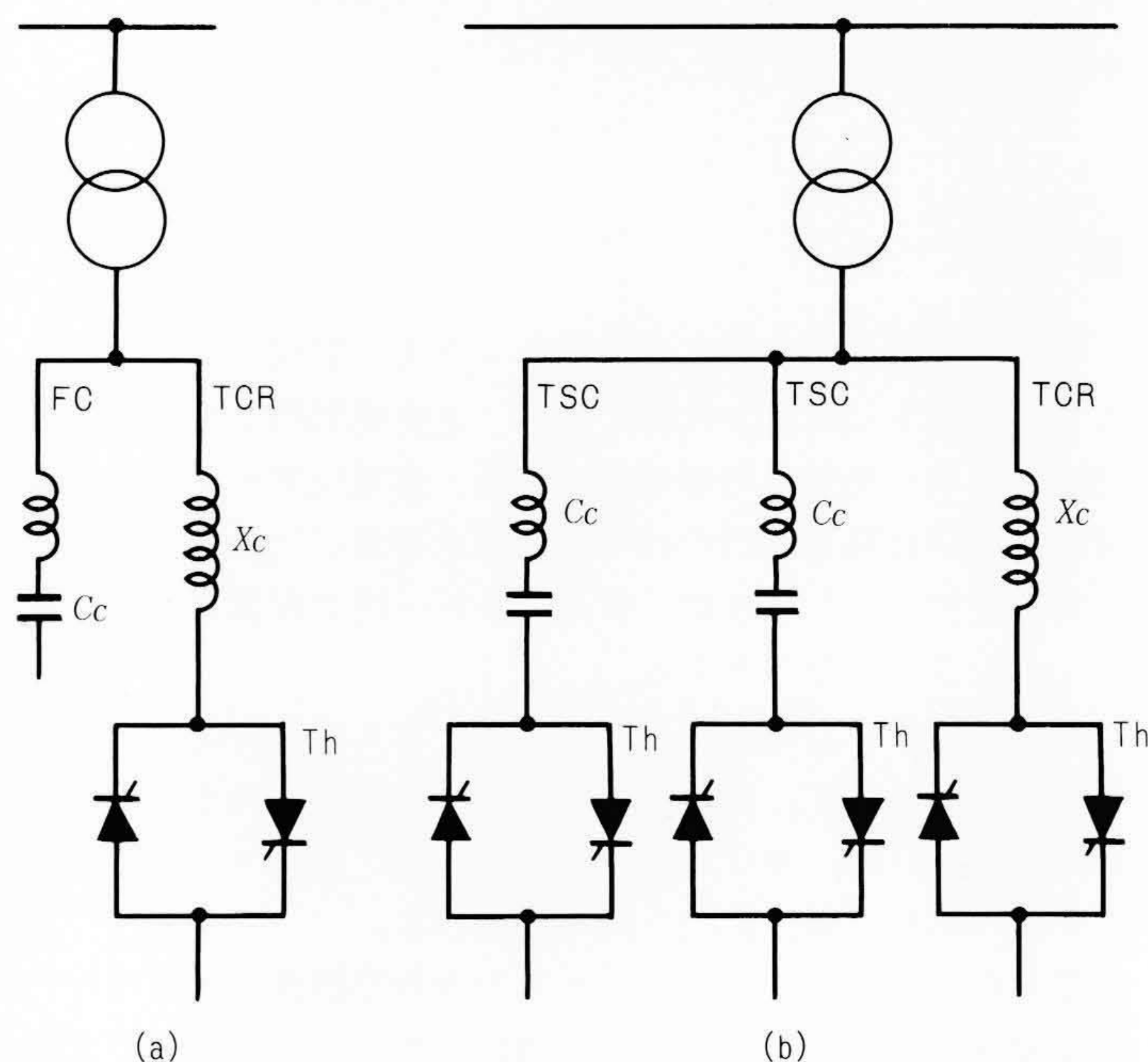
電気の質を評価する重要な指標の一つである電圧変動の抑制や，電力系統の安定運用のための無効電力の適正な供給は，系統運用上の重要な課題である。そのため，従来から変電所の変圧器のタップ切換えや電力用コンデンサ，分路リアクトルのバンク開閉制御などで無効電力の調整制御を行ってきた。しかし，基幹送電系統の長距離・大容量化や，負荷機器の多様化・高機能化に伴う負荷特性の変化によって，従来の手段での電圧維持や無効電力制御は困難になりつつある。その解決策の一つとして，高速かつ連続的に電圧や無効電力の制御が可能なSVCが注目を集めている。

電源開発株式会社と日立製作所では，昭和58年から電力系統に適用するSVCの研究を開始し，特に電圧，無効電力変動要因を持つHVDC（直流送電）変換所の電圧変動抑制を目的としたSVCを開発した^{3),4)}。ここでは，この設備の概要と運転実績を紹介する。

2.1 SVCの構成と動作原理

SVCには，可飽和リアクトルや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⁵⁾，制御性能，経済性の面から図2に示すようなリアクトルやコンデンサをサイリスタバルブで制御するいわゆる TCR（Thyristor Controlled Reactor）+TSC（Thyristor Switched Capacitor）方式や TCR+FC（Fixed Capacitor）方式が一般に採用されている。すなわち，進相無効電力を補償するコンデンサと，遅相無効電力を補償するリアクトルを組み合わせ，これらに流れる電流をサイリスタで制御することで，系統に供給する無効電力を高速かつ連続的に制御することができる。

次に，電圧制御を行う場合のSVCの特性について説明する。送電線のインピーダンスはほとんどリアクタンスとみなせるので，図3(a)のような系統を考えた場合，負荷が大きく増せば，送電線のインピーダンス X_L で生じる電圧降下が増大し，

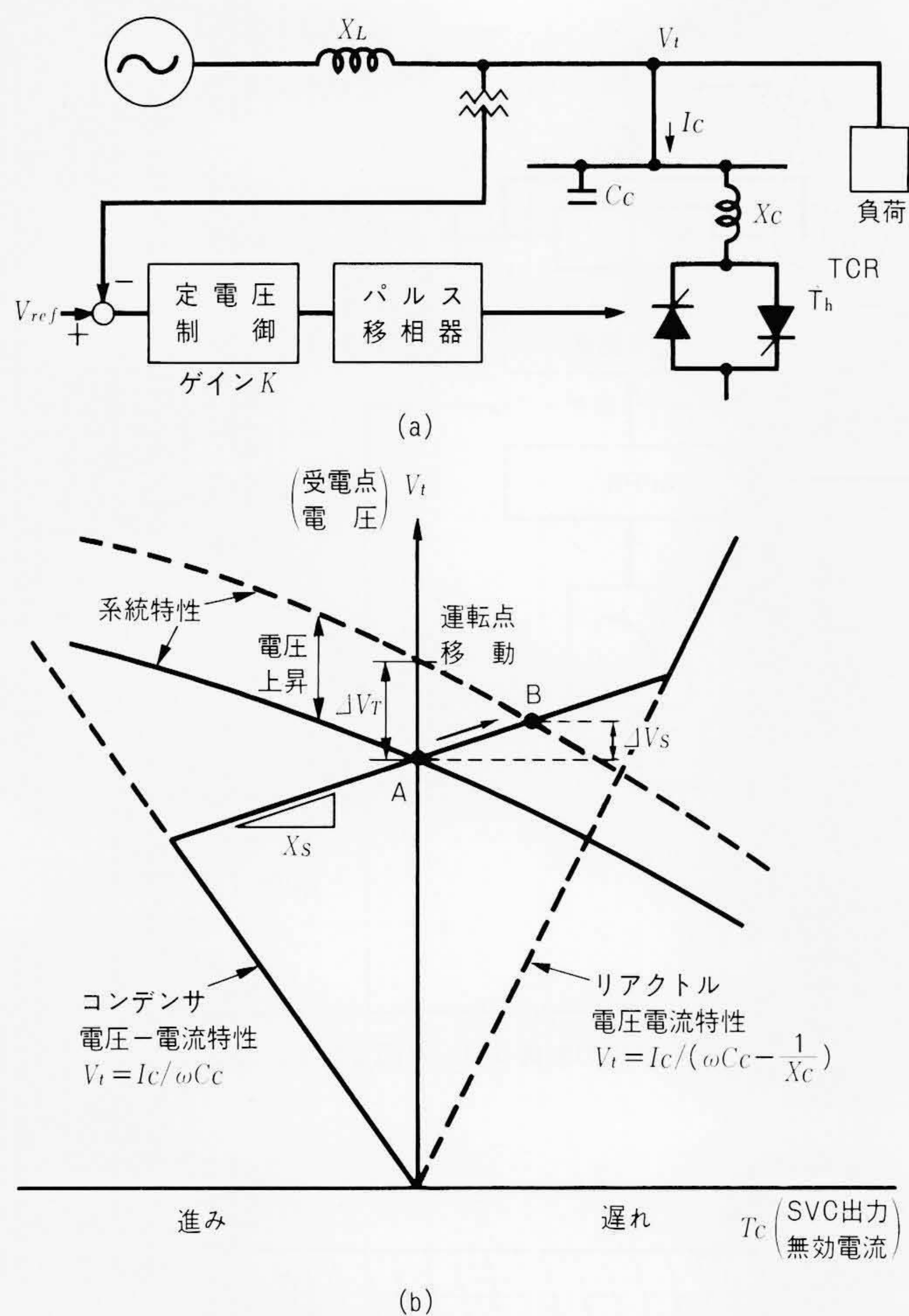


注：略語説明 FC（Fixed Capacitor），TCR（Thyristor Controlled Reactor），TSC（Thyristor Switched Capacitor）， C_c （コンデンサ容量）， X_c （リアクトルインピーダンス），Th（サイリスタ）

図2 SVCの基本構成 SVCには，固定コンデンサとTCRを組み合わせたもの，TSCとTCRを組み合わせたものがある。

受電点電圧 V_t が低下する。そこで，リアクトル電流を減少させSVCによる遅相無効電力の補償を減ずることによって， V_t の低下を抑制することができる。逆に負荷が軽くなり， V_t が上昇した場合には，リアクトル電流を増加させSVCの遅相無効電力補償量を増せばよい。

制御系を含めたSVCの静特性を図3(b)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 $X_s (= \frac{1}{K}$ ：スロープリアクタンス)の特性となる。一方，系統のインピーダンス特性は，同図(b)の系統特性で示したように表せる。定常状態での運転点が同図中のA点であるときに，負荷変動などによって ΔV_t （SVCなし時の電圧変動）が生じると，運転点はB点に移動し，電圧変動は ΔV_s （SVCあり時の電



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3 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。

圧変動)に抑制される。電圧変動の抑制率は、制御系のゲイン K が大きいほど、また系統のインピーダンス X_L が大きいほど大きくなる。したがって、SVCの設計に当たっては系統の特性を十分考慮する必要がある。

2.2 32 MVA SVCの概要

次に、今回開発した直流送電変換所用32 MVA SVCの概要を紹介する。外観を図4に示す。

直流送電用変換器の運転は、その動作原理上大きな遅相無効電力を発生する。直流送電用変換器の安定運転のためには、適切な無効電力補償による交流電圧の維持が重要な課題である。今回開発したSVCは、この直流送電変換所の交流電圧維持を目的としたもので、昭和60年11月から電源開発株式会社北海道・本州連系函館変換所でフィールドテストを継続中である。

このSVCの仕様を表2に示す。今回の設備は既設の調相設備と並列に設置することによって、TCR+FCの構成となっている。連続定格容量は32 MVAであるが、特に直流送電用変換器の緊急停止時などに生じる数サイクルの過渡的な過電圧に対する抑制能力を持たせるため、短時間(0.2 s)200%の過負荷

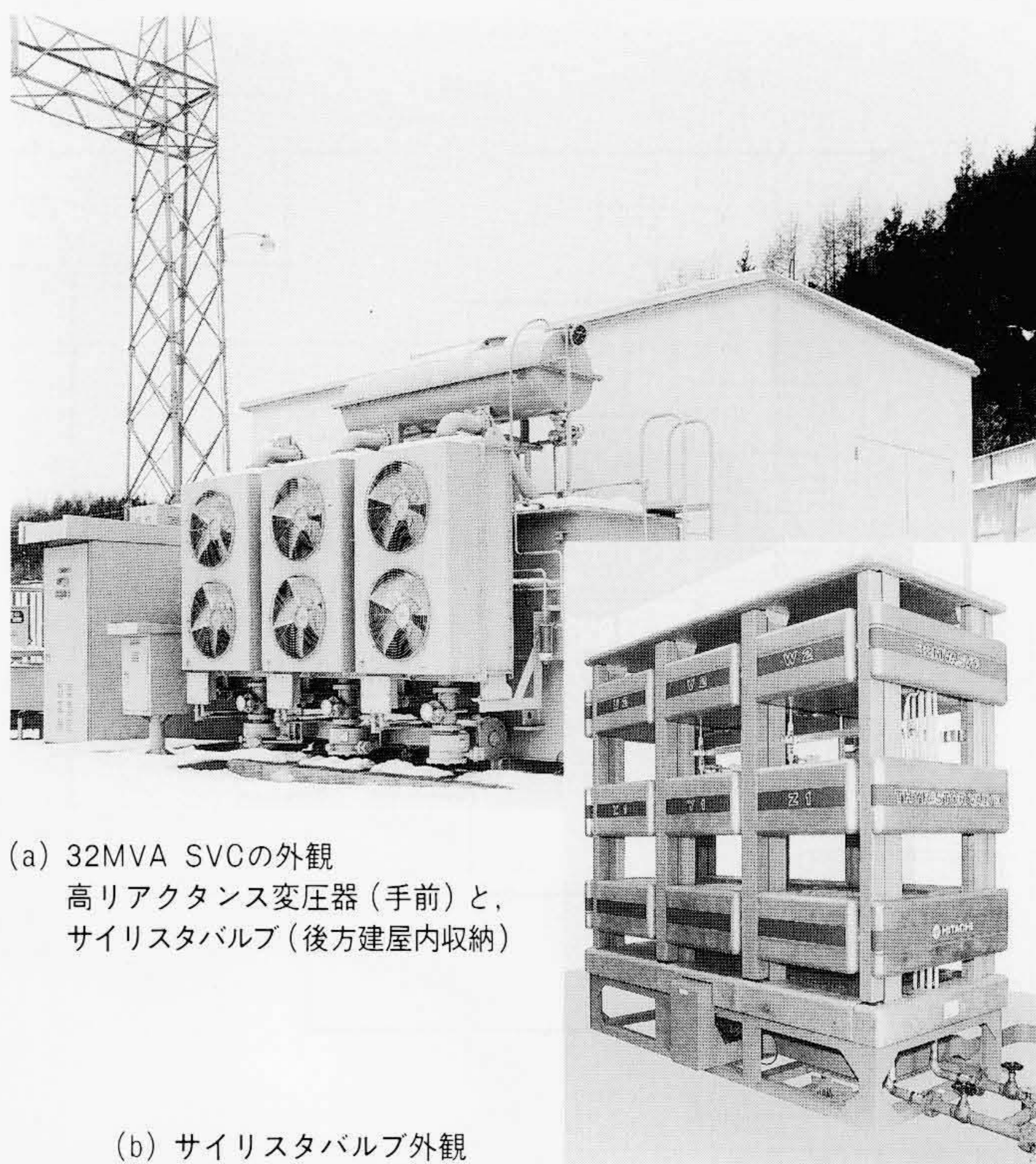


図4 サイリスタバルブ外観(屋内設置) 水冷、光直接点弧方式の採用によって高信頼度化、コンパクト化を実現している。

表2 SVC設備仕様 短時間の過電圧抑制能力強化のため、200% 0.2 sの過負荷耐量を持たせている。

項目	仕様
定格容量	32 MVA
回路電圧	22 kV, 50 Hz
定格電流	890 A
定格	100% 連続, 200% 0.2 s
応答速度	1 サイクル

耐量を持たせた設計としている。またこの設備では、リアクトルを設置する代わりに降圧変圧器に50%の高いリアクタンスを持たせ、リアクトル機能を兼用させて経済設計を行っている。このような方式を特にTCT (Thyristor Controlled Transformer) 方式と呼ぶこともある。

このSVCの特徴は、水冷式光直接点弧サイリスタバルブの採用によるコンパクト化、高信頼度化と、二重化全デジタル制御装置による各種の高機能制御である。次に、この2点について紹介する。

2.2.1 サイリスタバルブ

使用している素子は定格1,500 A, 4,000 Vの光直接点弧サイリスタで、これを12個直列接続して1アームを構成している。光直接点弧方式を採用することで、従来、点弧パルスの増幅回路に必要であった高圧部の部品が不要となり、部品数が約15%に削減されたため、よりいっそうの高信頼度化が実現されている。容積も従来比60%程度に縮小され、コンパクト化が図られている。また、冷却方式には大容量化に対応で

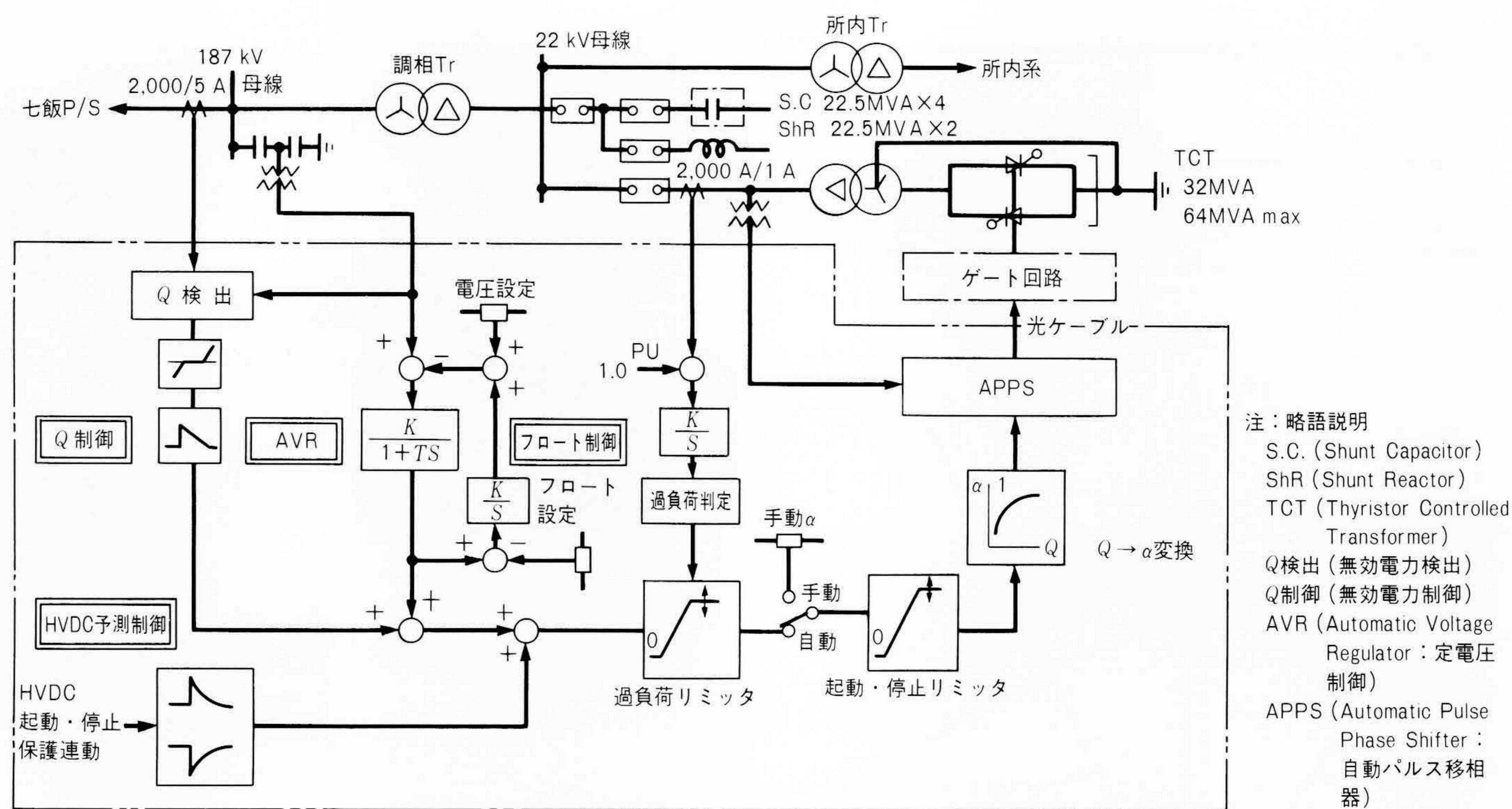


図5 SVC制御ブロック図 電源開発株式会社函館変換所でフィールドテスト中の32 MVA SVCの制御ブロック図を示す。

きるように、冷却効率の優れた水冷方式を採用した。

2.2.2 制御装置

制御装置は、16ビットマイクロプロセッサを使用しDDC (Direct Digital Control：直接デジタル制御)を行い、系統の変化に応じた高度な制御が実現できるようになっている。また、系統に同期した電気角30度(1.67 ms)ごとの高速演算処理を行うことにより、電圧の瞬時値検出とデジタルフィルタリング処理を行い、高速・高精度の電圧検出を可能にしている。今回の設備では、受電点の電圧を検出してSVCの出力を制御する定電圧制御を中心にし、直流送電用変換器の起動・停止時に生じる急激な電圧変動に即応するため、変換器の起動・停止信号で予測的にSVCの出力を制御する予測制御などの直流送電変換所に固有の制御機能も持たせている。今回の制御装置の制御ブロック図を図5に示す。

制御装置の高信頼度化を図るため、装置は二重系の構成としている。また、デジタル処理装置の特徴を生かし、きめ細かな自己診断や合理性チェックを行い、保守の省力化や故障時の迅速な処置などを可能にしている。

2.3 運転実績

この設備は昭和60年11月から実運転に入り、以来2万時間以上順調に運転を継続している。ここでは、今までに得られた運転中のデータの一部について紹介する。

北海道・本州直流連系設備では、両端(北海道及び本州)の交流系の周波数の変動に応じて、変換電力を制御するAFC (Automatic Frequency Control)運転を行っている。図6は、そのときの変換所受電点の電圧と無効電力の変動の記録である。SVCの運転によって電圧変動が3.3%から1.8%へ、また無効電力変動が40 MVarから18 MVarへとそれぞれ変動量が

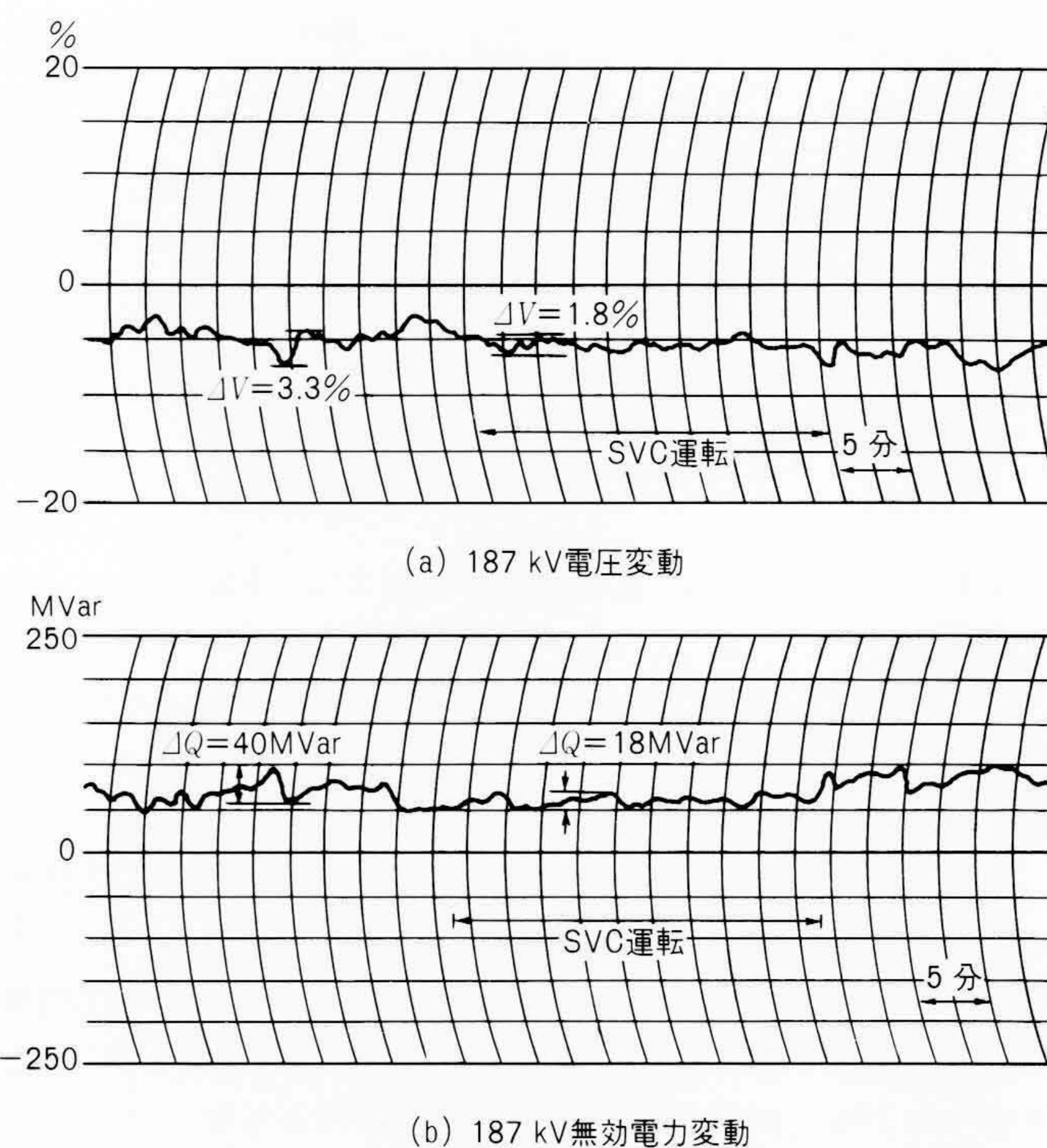


図6 運転データの一例 SVCの運転によって電圧変動、無効電力変動を1/2程度に抑制している。

抑制されていることが分かる。

以上、北海道・本州直流連系函館変換所でフィールド試験中の32 MVA SVCの概要を中心にSVCシステムの紹介を行った。SVCの優れた高速制御性を生かした広範囲での適用が期待される。

3 可変速揚水発電電動機用励磁装置

電力系統での原子力発電の比率が増加するのに伴い、夜間電力の調整能力が不足しつつあり、これに対して、揚水発電ユニットに従来行われなかった揚水運転時の電力調整能力を持たすことが要望されている。この目的達成のため、揚水運転中に回転速度を変えることによって、電力調整が可能な可変速揚水発電システムの適用が各方面で注目されている。

3.1 可変速発電システムの概要

可変速揚水発電システムの構成を、従来機と比較して図7に示す。従来機では励磁装置にサイリスタ変換器を用いて直流励磁を行っていたが、可変速機ではサイクロコンバータによる周波数変換装置を用いて60ヘルツを数ヘルツに変換し、交流励磁を行っている。このことから、従来は回転子の機械的速度が系統周波数に同期する必要があったが、可変速機ではサイクロコンバータの出力周波数の調整によって回転子の機械的速度を変化させることが可能となった。

速度を変化させて運転できるので、揚水運転時には速度を変えることによる入力調整が可能であること(揚水AFC)、発電運転時には負荷に応じて常に最適な速度で運転できるため効率が向上するという効果が期待できる。

3.2 可変速発電実証プラント

このような特徴を持つ可変速発電システムを、現在、関西電力株式会社と共同で開発中であり、昭和62年6月、世界に先駆けて22 MVA実証プラント(成発電所1号機)の実系統試験を開始した。

システムの基本仕様を表3に、また工場試験中の全景を図8に示す。サイクロコンバータの容量は可変速範囲により決まるが、発電電動機のおよそ20%程度の容量を必要とする。シ

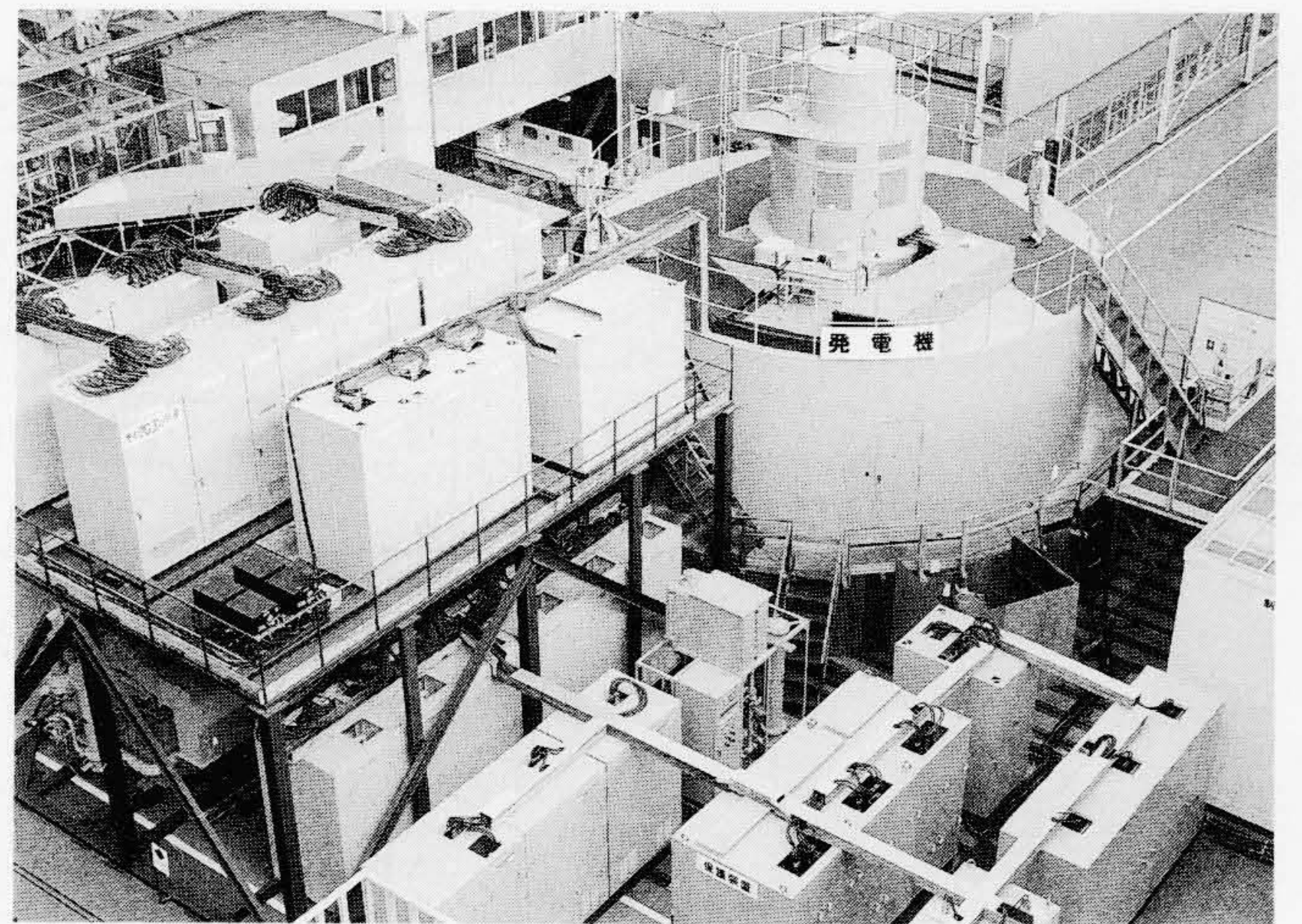
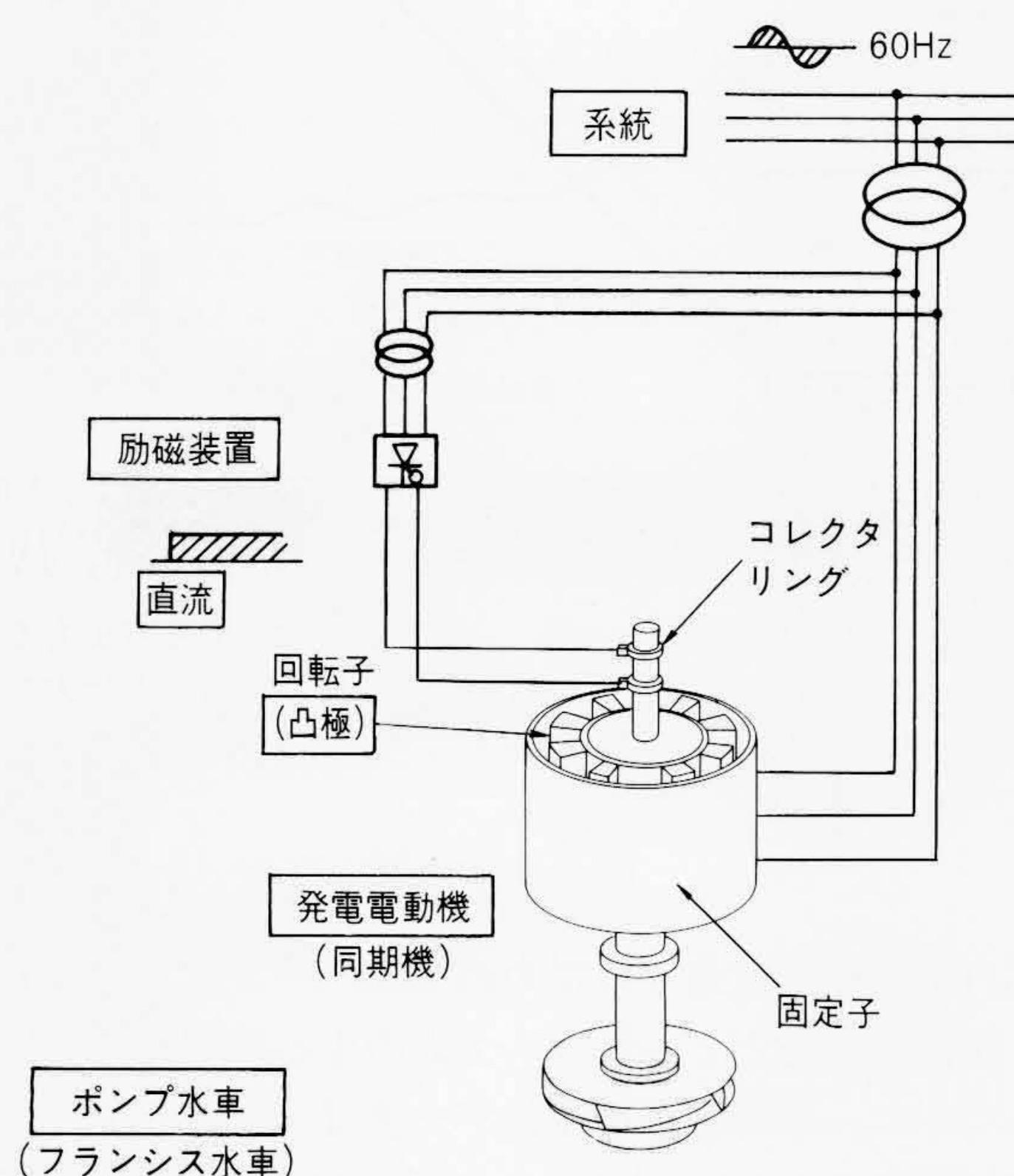


図8 22 MVA実証プラント工場試験全景 工場組合せ試験の全景を示す。

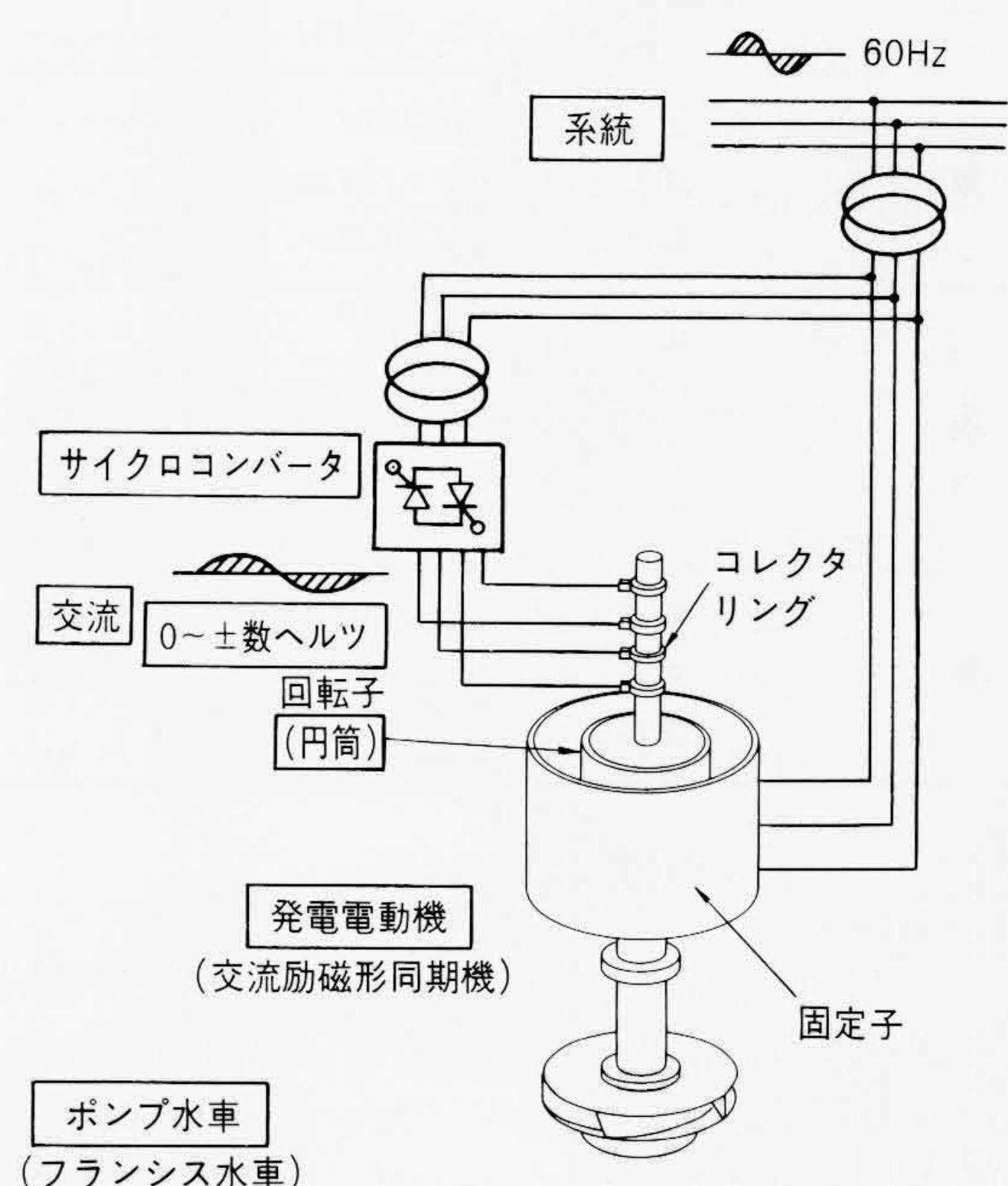
ステムの回路構成を図9に、また現地試験での出力上昇試験の一例を図10に示す。同図から励磁周波数を変化させることによって、回転速度が変化していることが分かる。

3.3 サイクロコンバータの大容量化

300 MW級の実用機では、可変速発電機の大容量化とともに、70 MVA程度の大容量サイクロコンバータが必要になる。300 MW級の試算ではサイクロコンバータ仕様は表4に示ようになる。使用するサイリスタは現在開発されている最大容量の4 kV, 3,000 A素子であり、この素子を複数個直・並列接続して1アームを構成する。大容量化の技術的問題は、直列接続する場合の素子間の電圧分担や並列接続間の電流分担あるいは冷却方法などであるが、これらの技術は直流送電用サイリ



(a) 従来機



(b) 可変速機

図7 交流励磁可変速揚水発電システムの構成図 従来の直流励磁に対して、サイクロコンバータを使用して低周波の交流で励磁する。

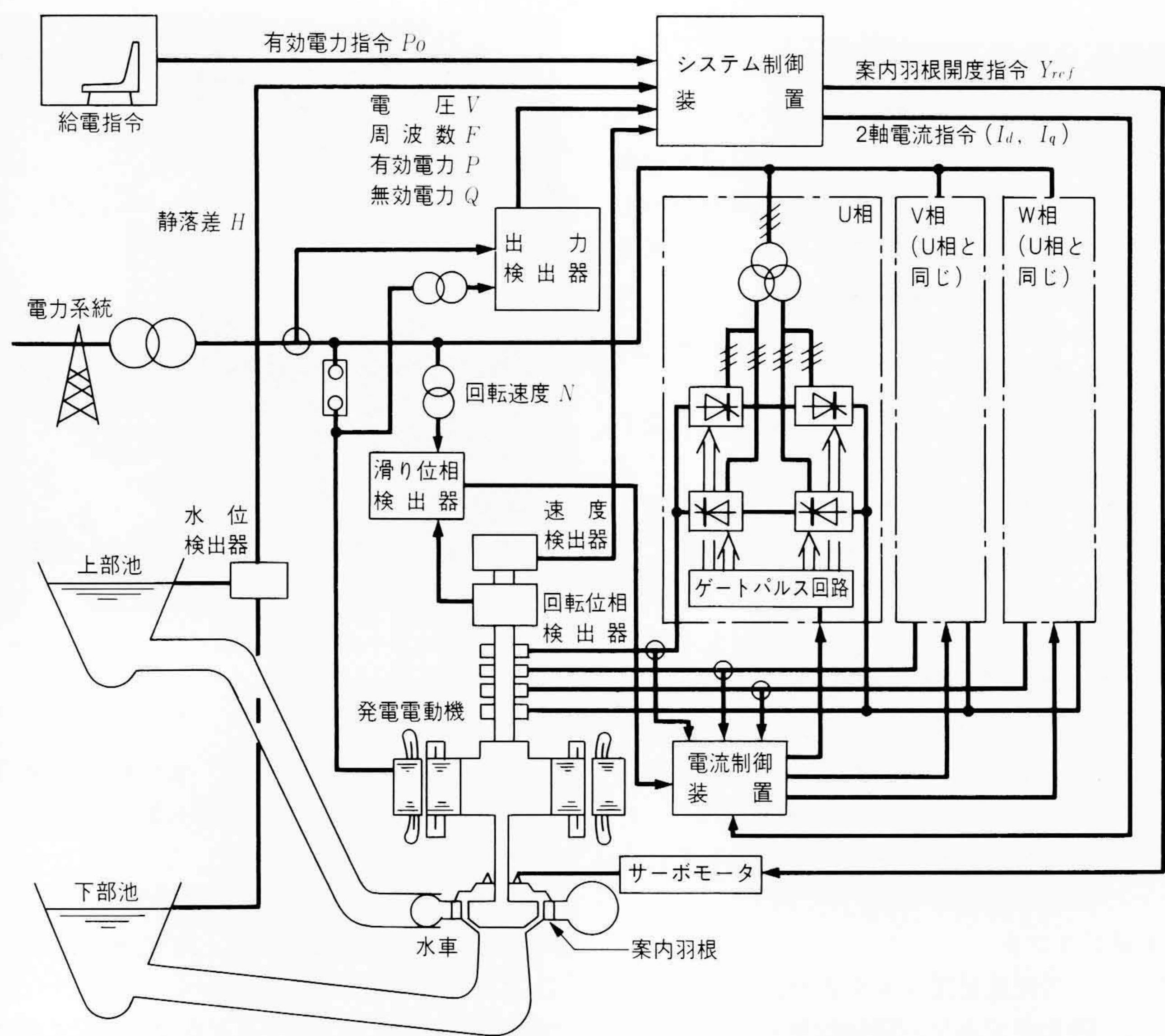


図9 システム構成図 可変速機は夜間は揚水時のAFC(自動周波数制御)運転，昼間は発電時の高効率運転が可能である。

表3 成出発電所1号機の主要諸元 サイクロコンバータの出力周波数を可変することにより，水車の回転速度を190～210 min⁻¹まで可変できる。

項目	諸元
システム	出力：17.5 MW 力率：95% (遅れ)
水車	出力：18.5 MW 回転速度：190～210 min ⁻¹ 静落差 (定格)：53.6 m
発電機	容量：22 MVA 極数：36 電圧：11 kV 周波数：60 Hz
励磁装置	容量：3.83 MVA 方式：サイクロコンバータ アーム数：72

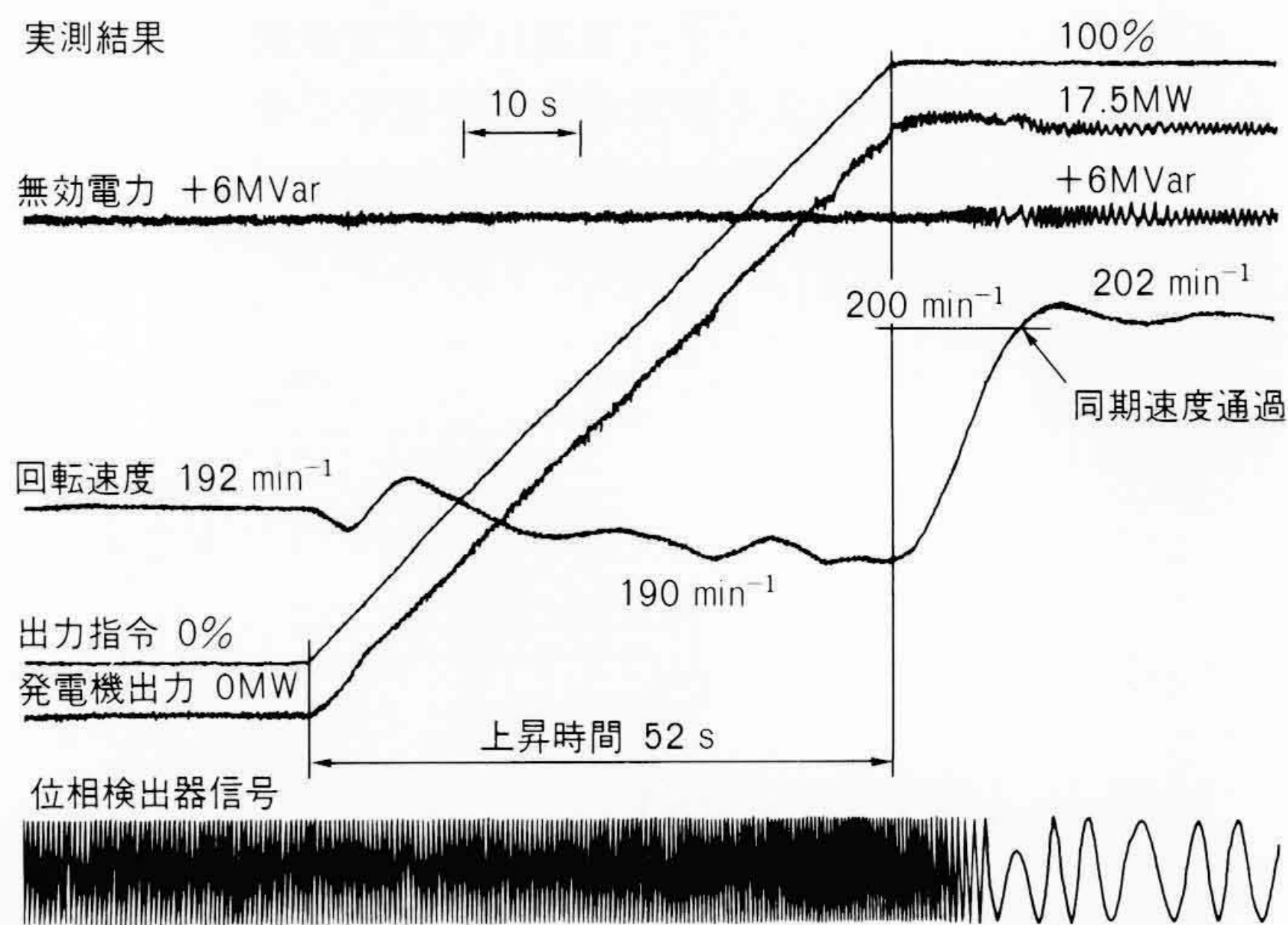


図10 実証試験結果の一例 実証試験で，発電機出力を0 MWから，17.5 MWに出力上昇させた場合。回転速度は，落差と出力指令値から最適な速度に調整される。

スタ変換器などで既に基礎技術が確立されており，70 MVA級のサイクロコンバータの製作は技術的に充分可能である。

4 システム連系用インバータ

システム連系用インバータは，太陽光発電，燃料電池，超電導エネルギー貯蔵(SMES)及び電池電力貯蔵などの直流電源と

電力システムとを連系するためのインバータとして，新エネルギー技術の開発とともにシステムの中心機器として開発が行われてきた。システム連系用インバータは一般に高効率，低ひずみ率が要求されるとともに，システムに応じた各種の制御方式，主回路構成が必要である。日立製作所では，それぞれのシステムに応じたシステム連系用インバータを開発している。以下に，

九州電力株式会社と共同で開発し、昭和62年6月に試験運転を開始した100 kW級離島用太陽光発電システムとそのインバータについて紹介する。

4.1 離島用太陽光発電システム

(1) システム構成

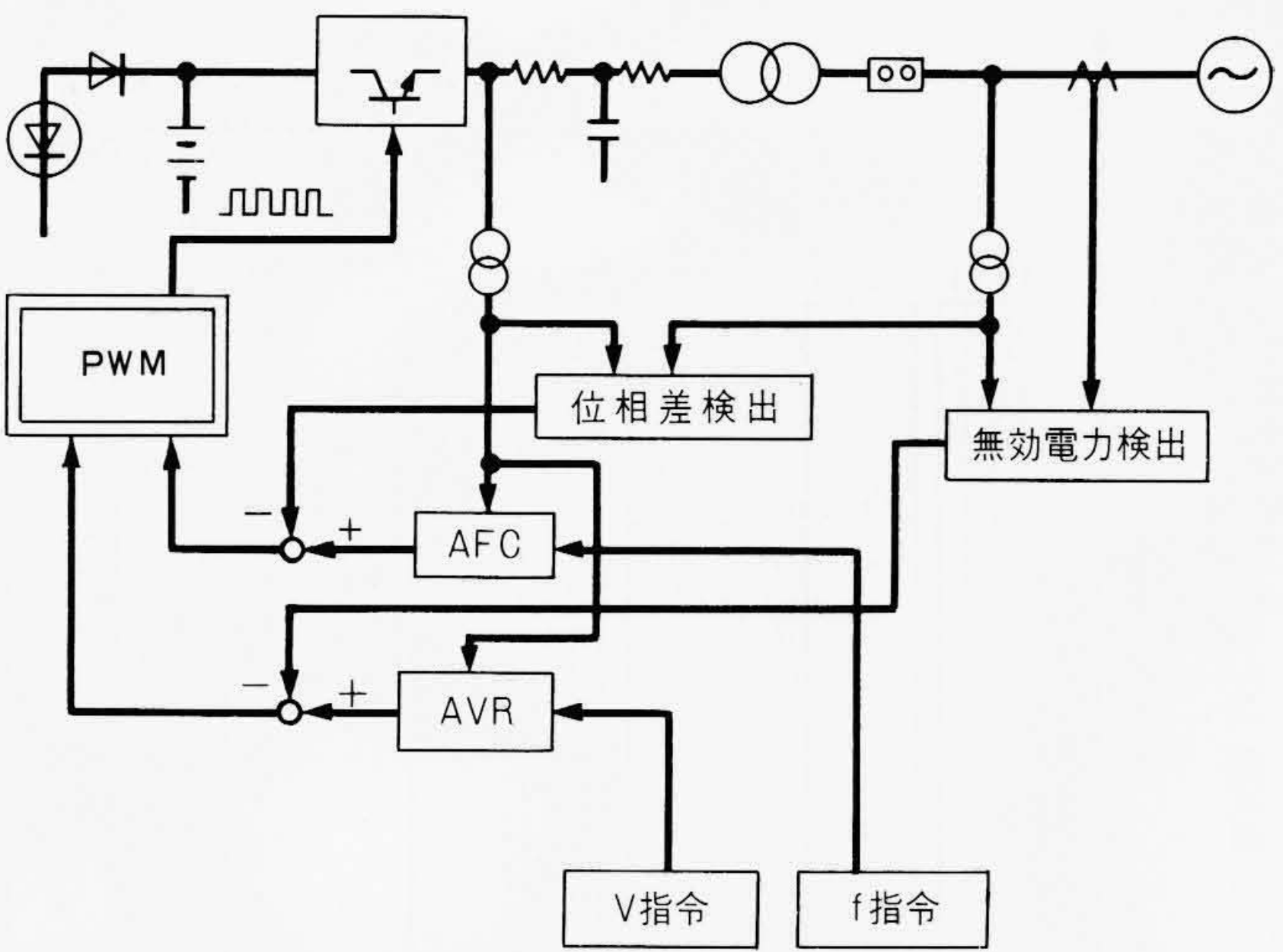
システム構成を図11に示す。太陽電池は25 kW×4系列で構成され、それぞれに蓄電池とインバータを備えている。また本システムは、ディーゼル発電機とのハイブリッド構成となっており、離島の既設電源であるディーゼル発電機と太陽光インバータとの並列運転試験を可能としている。更に、システム制御装置からの指令により、負荷容量、日射量、蓄電池残存量に応じて台数制御やそれぞれの出力配分制御が可能である。

(2) 太陽光インバータ

インバータの仕様を表5に示す。インバータの運転方式は独立運転を主体としており、システム制御装置からの指令によって有効電力、無効電力を設定できるようにインバータは位相制御、電圧制御を行っている。インバータどうしの並列運転あるいはディーゼル発電機との並列運転で、有効電力と無効電力のバランスをよくするために、インバータは図12に

表4 300 MW級可変速機のサイクロコンバータ仕様 現在開発されている最大容量の4 kV、3,000 Aサイリスタを1アーム当たり4直列・3並列で使用する。

No.	項 目	仕 様
1	方 式	72相非循環方式
2	容 量	72 MVA
3	出 力 線 間 電 圧	5.2 kV
4	出 力 電 流	8 kA
5	サイリスタ素子定格	4 kV、3,000 A



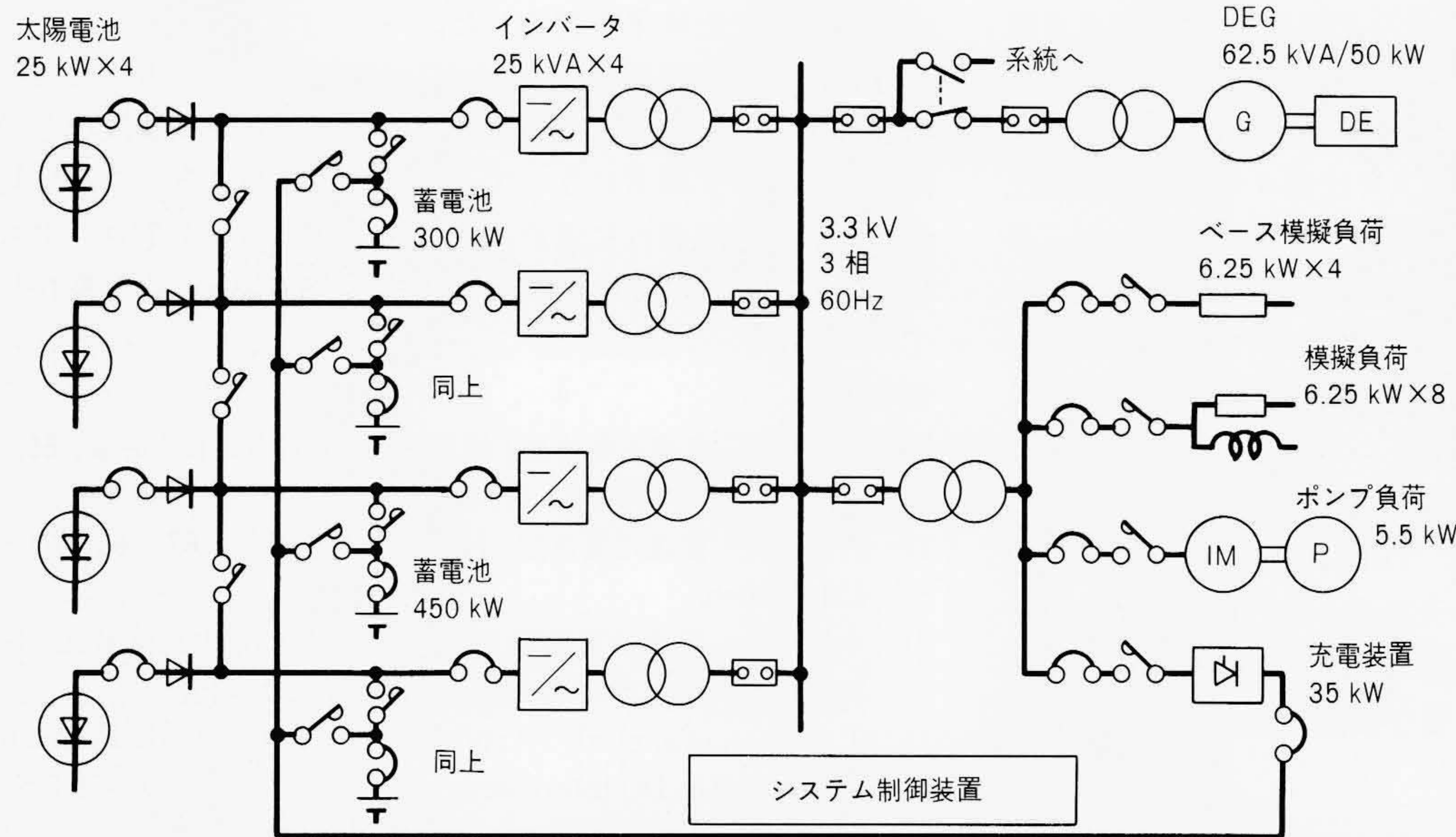
注：略語説明 AFC (自動周波数制御回路)

図12 独立運転制御ブロック図 インバータどうし及びディーゼル発電機との並列運転時の有効電力、無効電力のバランスをよくするために、位相差と無効電力をフィードバックして垂下特性を持たせている。

表5 インバータの仕様 独立運転時には、他のインバータやディーゼル発電機との並列運転が可能である。

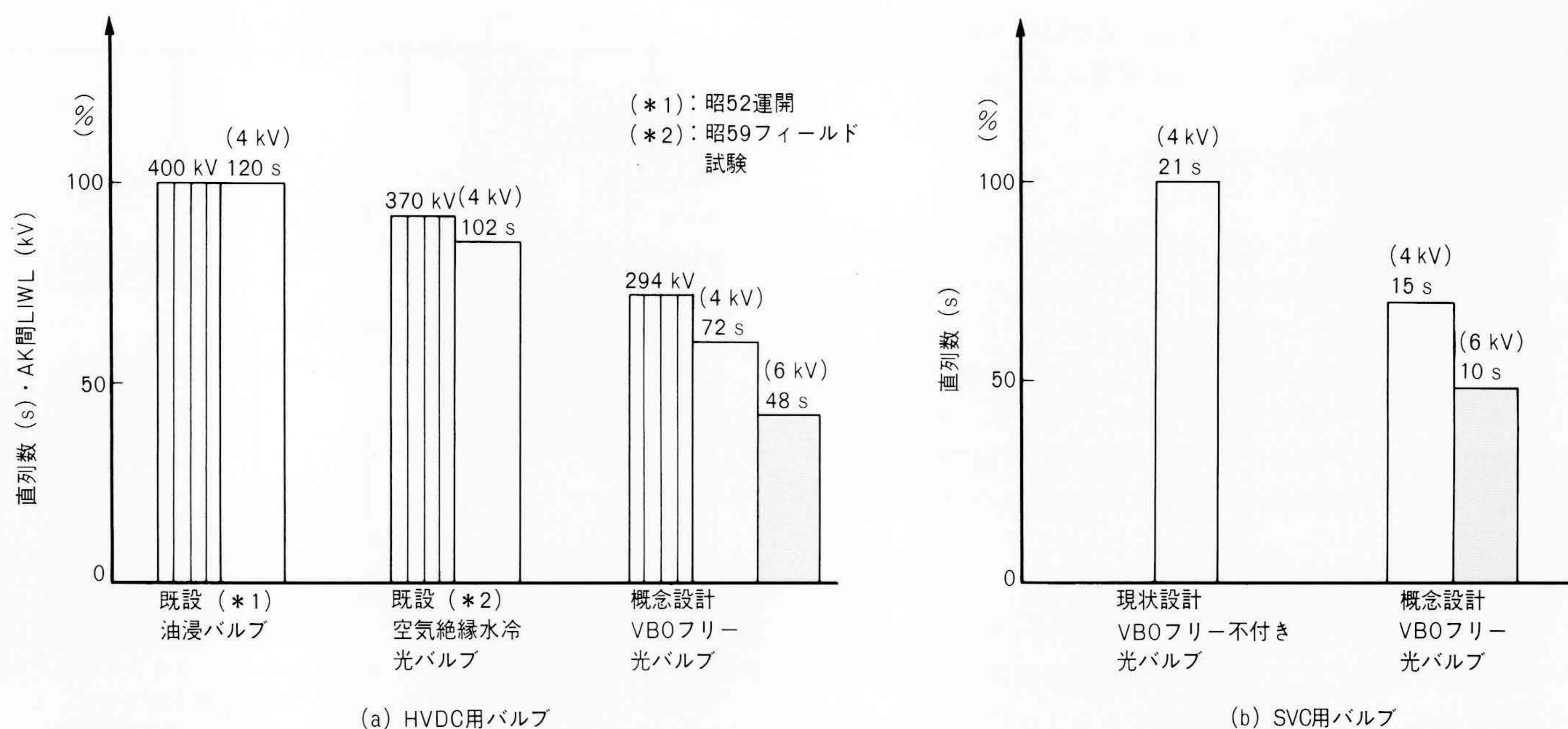
項 目	仕 様
容 量	25 kVA、力率0.8
出力電圧	3.3 kV、3相、60 Hz
方 式	電圧形自励式
運転方式	独立運転(他のINV、DEGとの並列運転含む。) 連系運転(系統との系列、蓄電池 あり・なし)
制御方式	PWM

注：略語説明 INV(インバータ)
DEG(ディーゼル発電機)
PWM(Pulse Width Modulation)



注：略語説明
IM (誘導電動機)
P (ポンプ)
G (発電機)

図11 離島用太陽光発電システム構成図 太陽電池は25 kW×4系列で構成され、並列構成の切替えや自由度の高い試験を可能としている。



注：略語説明 AK間（バルブ陽極・陰極間）、LIWL（雷インパルス耐電圧レベル）、HVDC（直流送電）

図13 VBOフリー光サイリスタバルブ直列素子数の低減 HVDC用バルブの場合には、バルブAK間避雷器の保護レベルの低減と相まって、SVC用バルブは構成上、またそれぞれ素子の耐圧6kV化によって大幅な低減が実現できる。

示すような制御ブロックを持っており、有効電力についてはf指令に対して位相差をフィードバックして垂下特性を持たせており、無効電力についてはV指令に対して無効電力をフィードバックして垂下特性を持たせている。また、システム制御装置では母線の周波数と電圧を監視しており、60 Hz、3,300 Vからのずれに対して補正した指令値をインバータとディーゼル発電機に出力して、周波数と電圧を安定化している。実測データでは負荷変動に対して、周波数の変動を60 Hz±0.25 Hz、電圧変動を3,300 V±100 V程度に抑えることができた。

5 将来展望

日立製作所は昭和63年春、世界に先駆けて6 kV、1.2 kA「順過電圧自己保護機能付き（VBOフリーと呼称）光サイリスタ素子」を開発した。従来はバルブ避雷器によって決まる保護レベルに、直列接続素子間の不平衡率分の裕度をみた素子数をとっていた。VBOフリー光サイリスタは個々の素子に過電圧印加時に自動点弧することによって自己保護できるため、裕度が切り詰められる。経済性及び信頼性の面で格段の進歩が期待される技術であり、実用化研究を推進中である。適用効果を図13に示す。従来方式に比べ素子の高電圧化（4→6 kV）とあいまって素子数は半減する場合もあることが分かる。

また、大容量自励式インバータについては、最近の高速自己消弧形素子であるGTO（Gate Turn-Off）サイリスタやSI（Static Induction）サイリスタの大容量・高性能化とあいまって、自励式インバータの持つアクティブな機能を生かし電力システムの安定供給、品質確保上重要な役割を果たす時期が到来するものと期待される。

6 結 言

電力システムでのパワーエレクトロニクス応用システムとして、最近のトピックスである(1) 系統電圧安定化用SVC、(2) 系統周波数調整容量増強用「可変速揚水発電システム」、(3) 大容量電力用インバータについて概要を紹介した。

SVCは、系統電圧を安定化するために無効電力を、可変速揚水発電は、系統周波数調整をするために有効電力を、また、大容量電力用インバータは、有効電力及び無効電力を連系系統に協調して高速制御できることが示された。

また将来展望として、最近日立製作所が開発したVBOフリー光サイリスタの今後の高電圧・大容量変換器への適用性について検討した結果を説明した。

今後、家庭用電器品を含めパワーデバイスを応用した負荷機器はますます増加して、系統特性への影響や高調波などの問題もますます顕著になってくるものと思われる。これに対応して、高速制御性に優れる電力用パワーエレクトロニクス応用システムの実用化が、解決策の一つになるものと期待してやまない。

参考文献

- 1) 村岡，外：直流送電技術と機器の高信頼度化，日立評論，**65**，5，351～356(昭58-5)
- 2) 村岡，外：直流送電技術(小特集)，日立評論，**67**，6，421～454(昭60-6)
- 3) 中村，外：直流送電用32 MVA静止形無効電力補償装置の開発(その1)及び(その2)，電気学会全国大会(昭61)
- 4) T.Nakamura, et al.: Application of Static VAR Compensator for AC/DC Interconnected Power System, CIGRE SC 14/32 International Symposium, Oct. 1987
- 5) 伊藤，外：SVCの開発について，電気評論(1980-4)