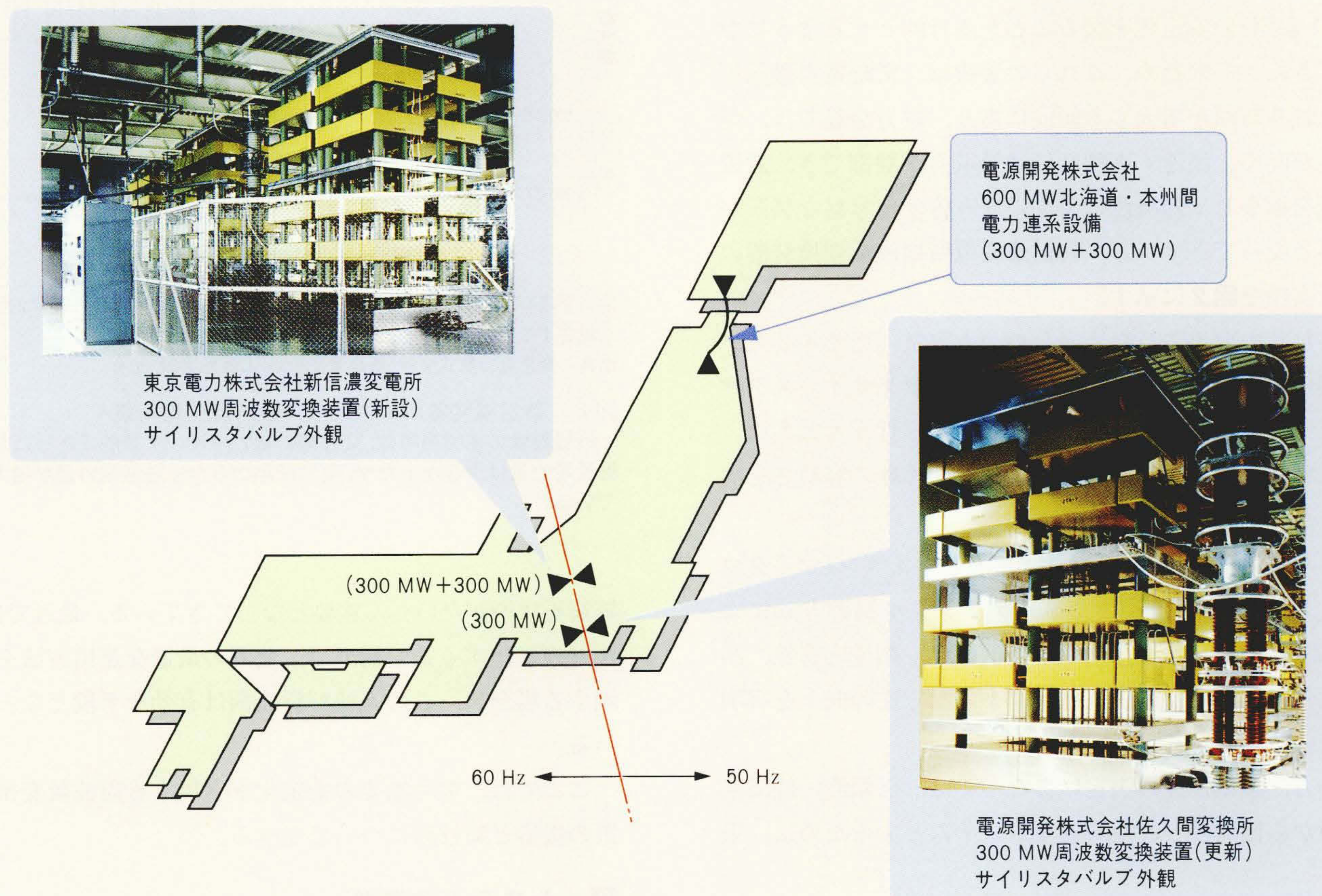


電力需給の安定化を実現する高信頼性周波数変換装置

High-Reliability Frequency Converting Equipment Applied to Power System Interconnection

堤 博文* Hirofumi Tsutsumi 石田俊彦** Toshihiko Ishida
座間正一* Shōichi Zama 佐藤雅一*** Masaichi Satō



東京電力株式会社新信濃変電所(新設)と電源開発株式会社佐久間変換所(更新)の300 MW周波数変換装置
パワーエレクトロニクスの新技術を適用した装置を開発し、安定な電力供給に寄与している。

わが国の電力需要は堅調に増加しており、大都市圏への負荷の集中、電源の遠隔化・偏在化が進むことから、電力需給の地域間不均衡が拡大する傾向にある。また、電力需給不均衡時での電力会社間相互の電力融通能力を拡大し、緊急時の応援による供給信頼度の向上や、通常での経済運用に活用するため、パワーエレクトロニクス技術を用い直流で系統間連系を行う周波数変換装置や同一周波数間非同期連系

を行うBTB(Back to Back)の適用強化が図られるようになってきた。

最近の周波数変換装置やBTBでは常時の電力融通運転を目的とし、より信頼性が高く、保守管理が容易な装置が要求されるようになってきており、これらは、高電圧・大容量サイリスタや高速デジタル制御などの目覚ましいパワーエレクトロニクス技術の進歩によって可能になってきた。

* 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

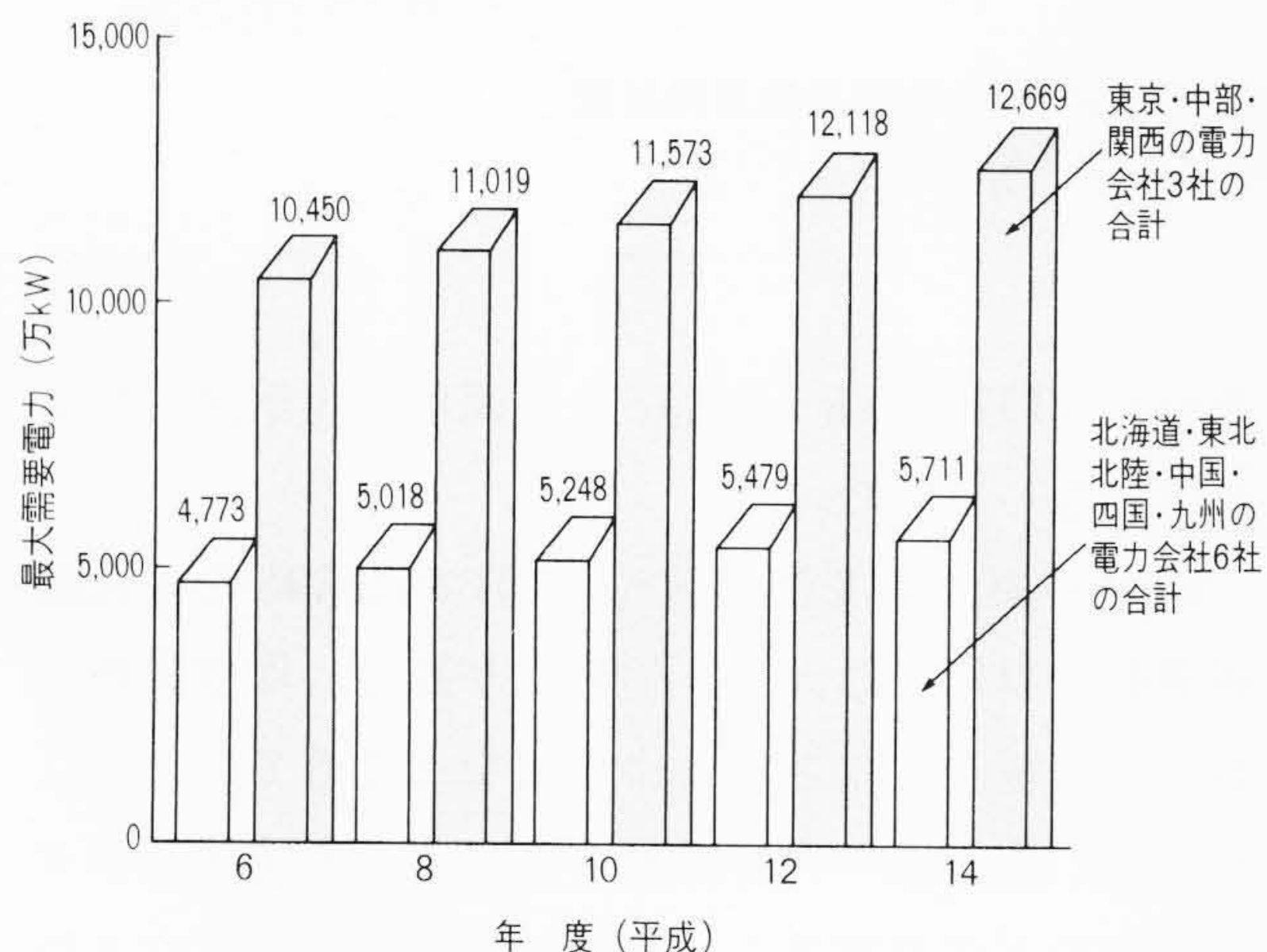
1 はじめに

1977年に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。)に建設された周波数変換装置は、50 Hz系統と60 Hz系統との広域連系を図り、緊急時の電力融通を主目的としていたが、最近の周波数変換装置では、電力会社間相互の電力融通能力の拡大による電力需給(図1参照)の安定化を図ることを主目的とするようになってきた。そのため、これらの装置は、常時電力融通運転される時間が増大する傾向にあり、電力会社では、信頼性が高く、高速・高精度に融通電力が制御でき、設置面積を縮小して経済性に優れ、保守管理が容易な装置が必要となってきた。新信濃変電所周波数変換装置の運転実績を図2に示す。

これらの要求にこたえるため、大容量の光サイリスタを用いた空気絶縁水冷式4アーム積層形光サイリスタバルブを開発し、大幅な部品点数の削減を行うとともに、高信頼化、省スペース化、および保守管理の容易さを実現した。

また、制御・保護装置では32ビットマイコン(マイクロコンピュータ)を使用した直接デジタル制御方式による二重化システムを採用し、高信頼化、高速応答性、高精度化、および自動監視機能による保守性の向上を実現した。

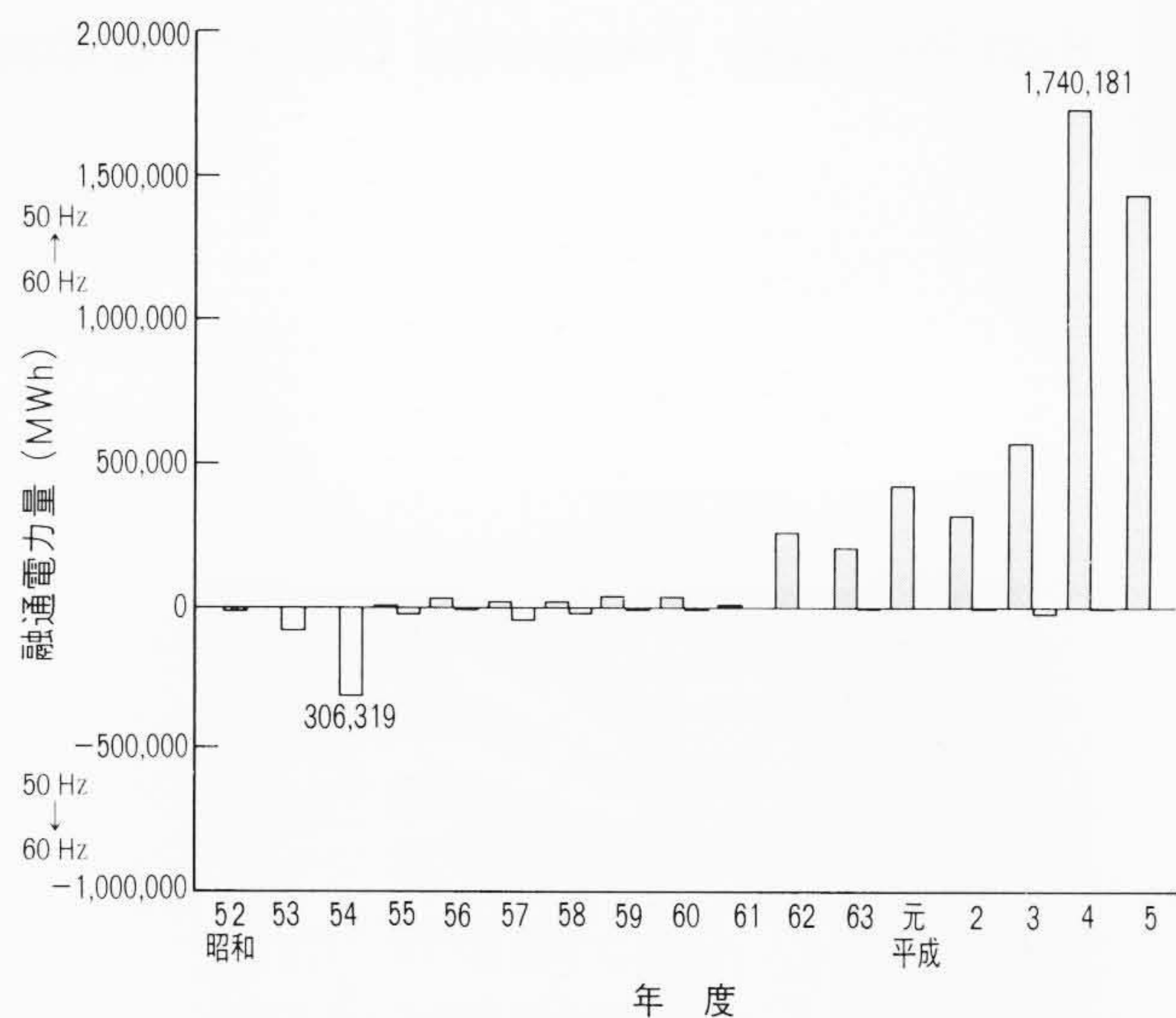
一方、機器仕様の決定にあたっては、信頼性・経済性の面から協調のとれた最適なシステムとするために、系



出典：「平成6年度電力施設計画」(通商産業省資源エネルギー庁)から

図1 長期最大需要電力予想(各年度の8月での予想)

各年度の最大需要月(8月)での電力消費量を比較すると、大都市圏の電力消費量はその他の地域の倍以上の需要があることがわかる。



注：平成4年5月に2号FC運開、平成5年度の融通電力量は平成6年2月現在までの量を示す。

出典：東京電力株式会社「新信濃変電所FC運転実績」から

図2 新信濃変電所周波数変換装置運転実績

既設設備の運開当時は、緊急時の電力融通が主目的であったため融通電力量は少なかったが、昭和62年ごろから融通電力量が増大している。

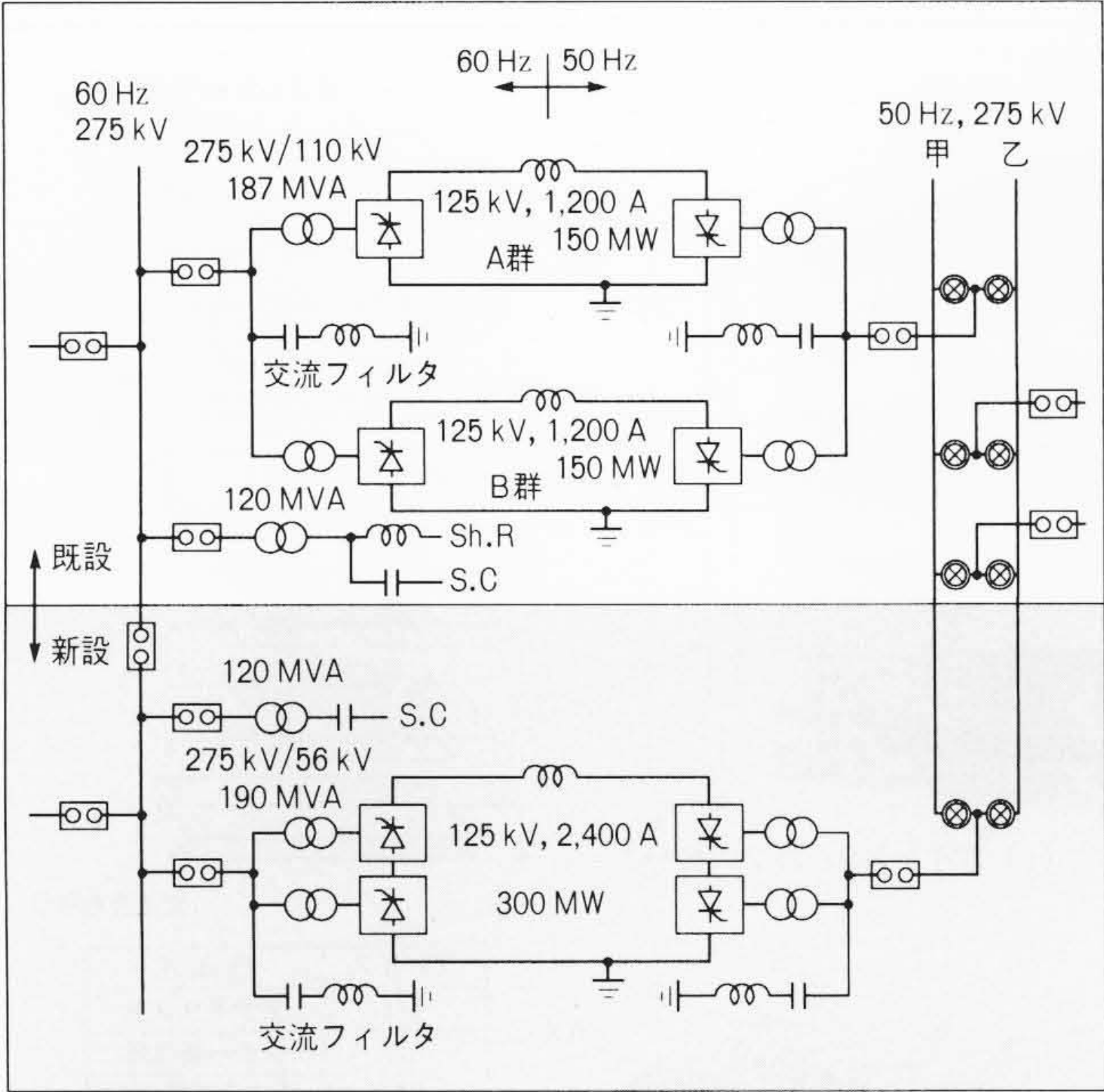
統解析技術がたいへん重要となってきた。最近では、年々複雑化する系統構成で、装置の最適な運用方法を計画する場合に、この系統解析技術は有効な手段となっている。

ここでは、電力需要の安定化を実現する周波数変換装置の機器と新技術について述べる。

2 システムの概要

1977年に、新信濃変電所に高電圧・大容量の油浸サイリスタバルブを、また1979年に電源開発株式会社北海道・本州間連系函館変換所(以下、北海道・本州間連系函館変換所と言う。)に高電圧・大容量の風冷サイリスタバルブを開発し実用化した。1980年代には水冷式光サイリスタバルブを開発するとともに、デジタル多重化制御・保護装置などを開発した。1980年代後半から、大容量・高電圧水冷光サイリスタバルブを開発し、新信濃変電所の新設や北海道・本州間連系函館変換所の増設および電源開発株式会社佐久間変換所(以下、佐久間変換所と言う。)の更新に適用した。

周波数変換装置とは、交流電力を順変換器で直流電力に変換し、さらに逆変換器によって交流電力に変換し、異周波数の交流系統間(50 Hz系統と60 Hz系統間)で電力を融通するものである。中部電力株式会社南福光連系



注：略語説明 Sh.R (分路リアクトル), S.C (並列コンデンサ)

図3 新信濃変電所周波数変換装置の主回路構成
日立製作所は、既設・新設ともに、60 Hz側の機器を納入している。

所にわが国で初めて採用される予定のBTBとは、装置構成が周波数変換装置とほぼ変わらず、同一周波数の交流系統間を間に直流を介して非同期で連系し、電力を融通する設備である。

新信濃変電所周波数変換装置の主回路構成を図3に示す。既設のサイリスタ変換器に対し、新設では高電圧・大容量サイリスタの採用により、サイリスタバルブに4アーム積層形サイリスタバルブを採用してコンパクトな構成とし、既設に比べて約1/4の省スペース化を図っている。装置は、サイリスタバルブ、変換用変圧器、直流リアクトル、酸化亜鉛避雷器、計器用変成器、制御・保護装置などで構成している。

これらの構成機器の中で、サイリスタバルブおよび制御・保護装置で今回適用された新技術について以下に述べる。

3 サイリスタバルブ

周波数変換所の中心機器である電力変換用整流装置としては、高信頼化、省スペース化、保守管理の容易さを追求して、電気点弧式油浸サイリスタバルブから空気絶縁による光間接点弧式風冷サイリスタバルブへ、そして最新の光直接点弧式水冷サイリスタバルブへと開発を進めてきた。

新信濃変電所および佐久間変換所に最近設置されたサ

表1 新信濃変電所周波数変換装置の仕様比較表
6 kV, 2,500 A光直接点弧サイリスタの採用により、既設に比べてサイリスタ数およびその周辺回路部品点数の大幅な削減を可能とした。

項 目		新 設	既 設
変 換 電 力		300 MW	
直 流 電 圧		125 kV (62.5 kV×2段カスケード接続)	
直 流 電 流		2,400 A	1,200 A×2
交 流 入 力 電 圧		56 kV (Δ) + 56 kV (人)	110 kV
サイリスタ バルブ	適用サイリスタ	光直接点弧サイリスタ 6 kV, 2,500 A	電気点弧サイリスタ 4 kV, 800 A
	サイリスタ構成	(28直列×1並列)/アーム ×12アーム	(120直列×2並列)/アーム ×6アーム×2回路
	絶 縁 方 式	空気絶縁式	油浸絶縁式
	冷 却 方 式	水冷式(純水循環)	油冷式
	バルブ構造	4アーム積層構造	1アーム/1タンク式

イリスタバルブは、定格電圧6 kV、定格電流2,500 Aの大容量光サイリスタを用いた125 kV, 300 MWの変換装置である。新信濃変電所の周波数変換装置での既設と新設の仕様比較表を表1に示す。

3.1 サイリスタバルブの構造

変換装置主回路は、直流電圧62.5 kV、直流電流2,400 Aの3相全波整流回路を2段直列にした12相変換装置である。1アームはサイリスタ7個を直列接続したサイリスタモジュール4モジュールで構成しており、これを4アームで一組分のバルブを形成し、このバルブ三組分で変換器を構成している。構造的には1アーム分の4モジュールが空気絶縁によって長方形の平面内に配置され、各アームはFRP(Fiberglass Reinforced Plastics：ガラス繊維強化プラスチック)の絶縁支柱による気中絶縁で4段に積層されている。4アーム積層形サイリスタバルブの構造を図4に示す。FRP柱による気中絶縁構造とすることにより、外部から簡単にサイリスタモジュールを目視することが可能になり、保守点検が非常に容易な構造となっている。モジュールは引き出し構造であるため、詳細点検などの際にはモジュールごとバルブから引き出して地上で作業を行うことも可能である。これらにより、保守点検時間の短縮が可能となった。

3.2 大容量光直接点弧サイリスタの適用

6 kV, 2,500 Aの高電圧・大容量のサイリスタを適用することにより、サイリスタの直並列接続数を低減し、その周辺回路の部品点数削減とあわせて高信頼化および省スペース化を図った。特に、光直接点弧のサイリスタとすることで、電気点弧サイリスタモジュール上に必要であった高電圧部のゲート回路を不要とし、大幅な信頼

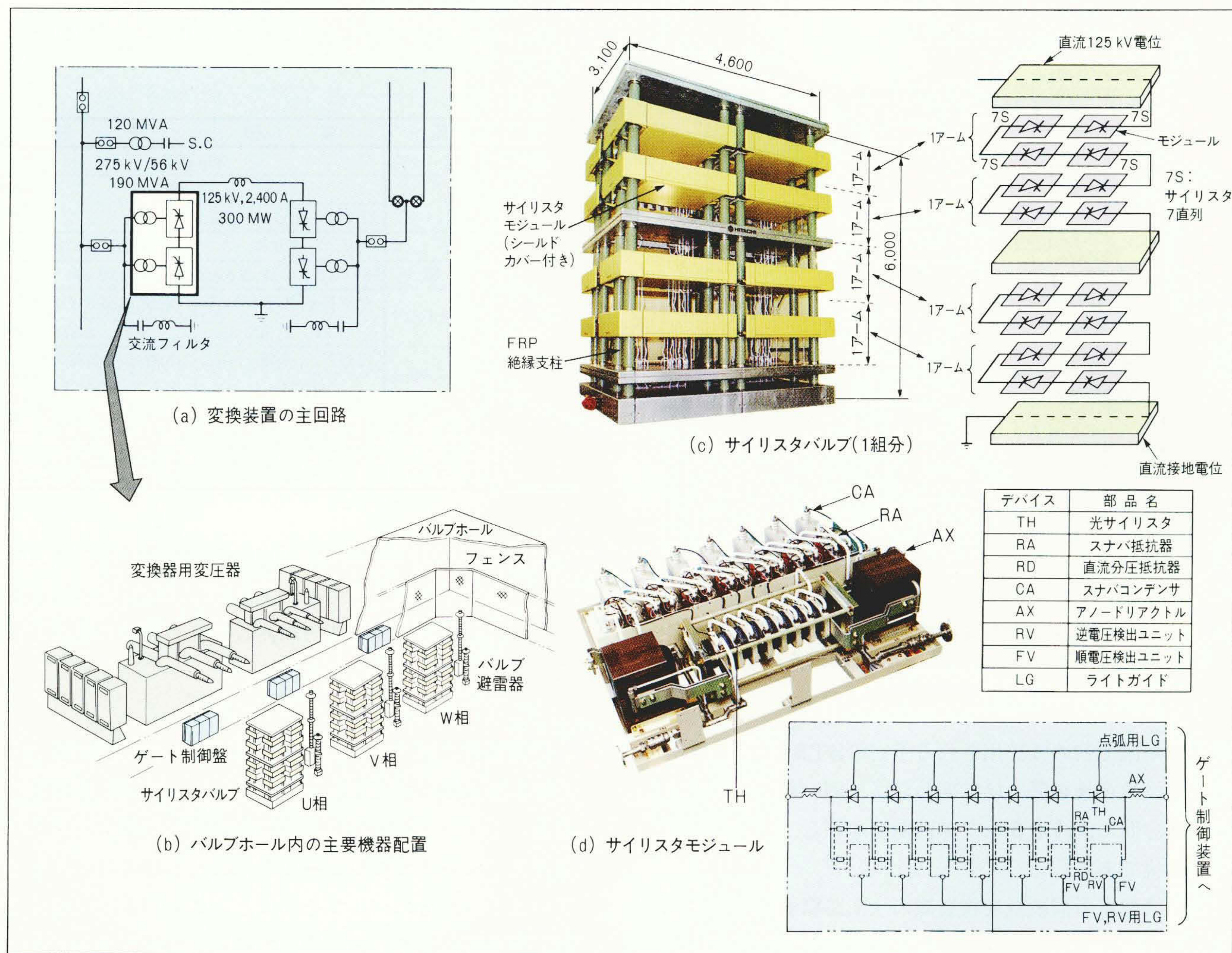


図4 4アーム積層形サイリスタバルブの構造

(C)に示すサイリスタバルブ3組で60 Hz側変換器を構成している。サイリスタバルブは、温度・湿度管理された専用建屋に設置されている。

性向上を達成した。サイリスタモジュール^{※)}の回路図を図4(d)に示す。

光直接点弧サイリスタではサイリスタ点弧用のLED(発光ダイオード)光源からの光をLG(ライトガイド)を通してサイリスタのシリコンペレット上に導き、その光エネルギーでサイリスタを直接駆動する。このため、光源からの光エネルギーをいかに効率よくサイリスタの受光部に伝送するか、またサイリスタ素子の点弧感度を他の主要な素子特性を犠牲にすることなくいかに高いものにできるか、が重要な課題となる。

一方点弧用LEDでは、ドーム形に加工したLEDチップ

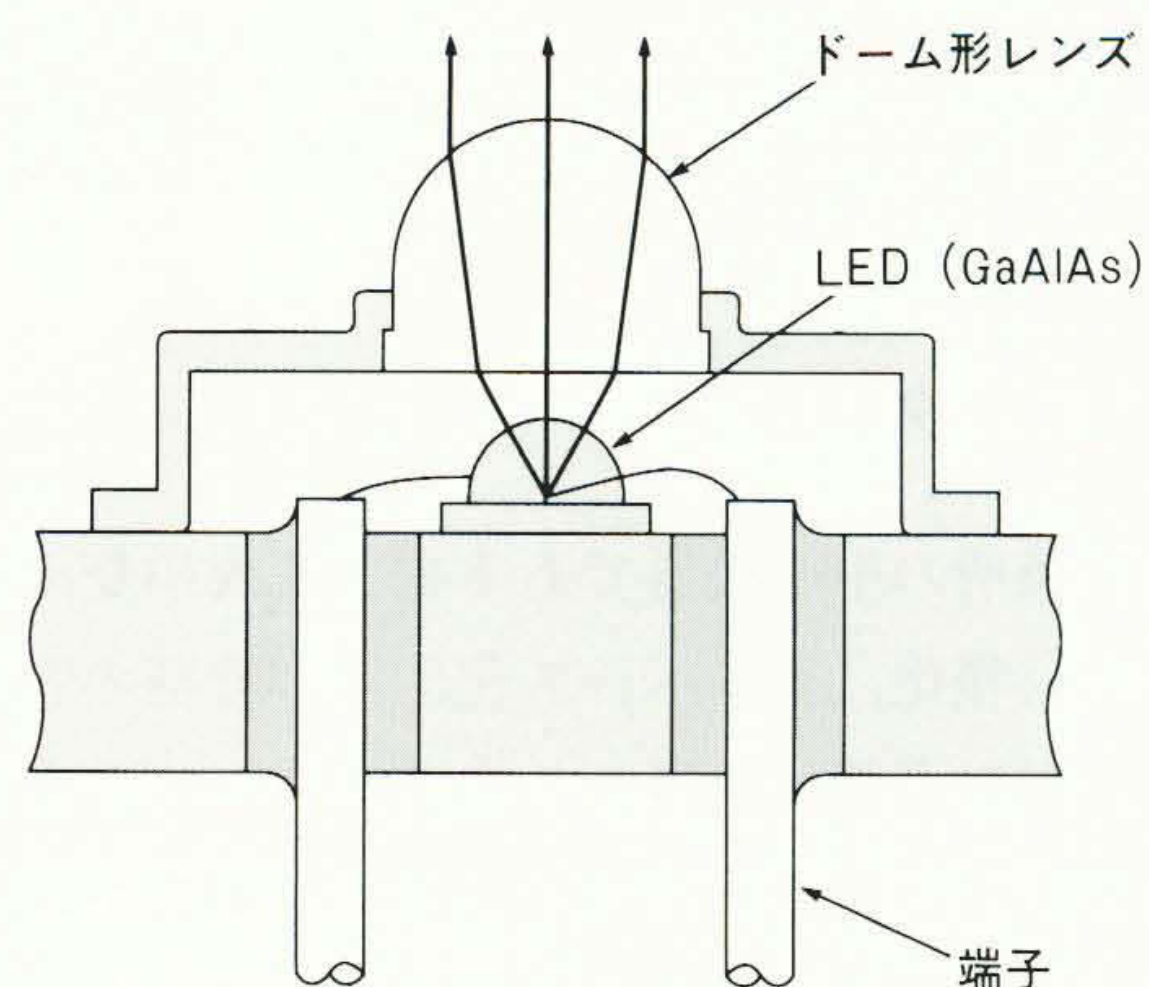


図5 点弧用LEDの構造

ドーム形に加工したLEDとドーム形レンズを組み合わせ、光の指向性を向上させている。

※) サイリスタモジュールとは、サイリスタバルブの機能を持つ最小単位を言う。

とドーム形レンズを組み合わせて光出力の指向性を高めLGとの結合効率を高効率化することにより、サイリスタ受光部までの光伝送効率を高めている(図5参照)。

3.3 今後のバルブの展開

新信濃周波数変換所新設サイリスタバルブで採用したFRP柱による気中絶縁のバルブ構造は高い保守性を備えており、その後製作した北海道・本州間連系設備用サイリスタバルブ、および佐久間周波数変換所サイリスタバルブにも踏襲している。また、今後さらに高電圧・大容量化が進むサイリスタバルブでもその基本構造となるものと考えられる。

4 制御方式

4.1 変換器制御装置の概要

最近の周波数変換設備での変換器の制御は、電力需要の増大に伴い、長期間の運転継続、緊急時の高速な起動・停止制御の必要性が高まり、制御系の高速性が要求されている。

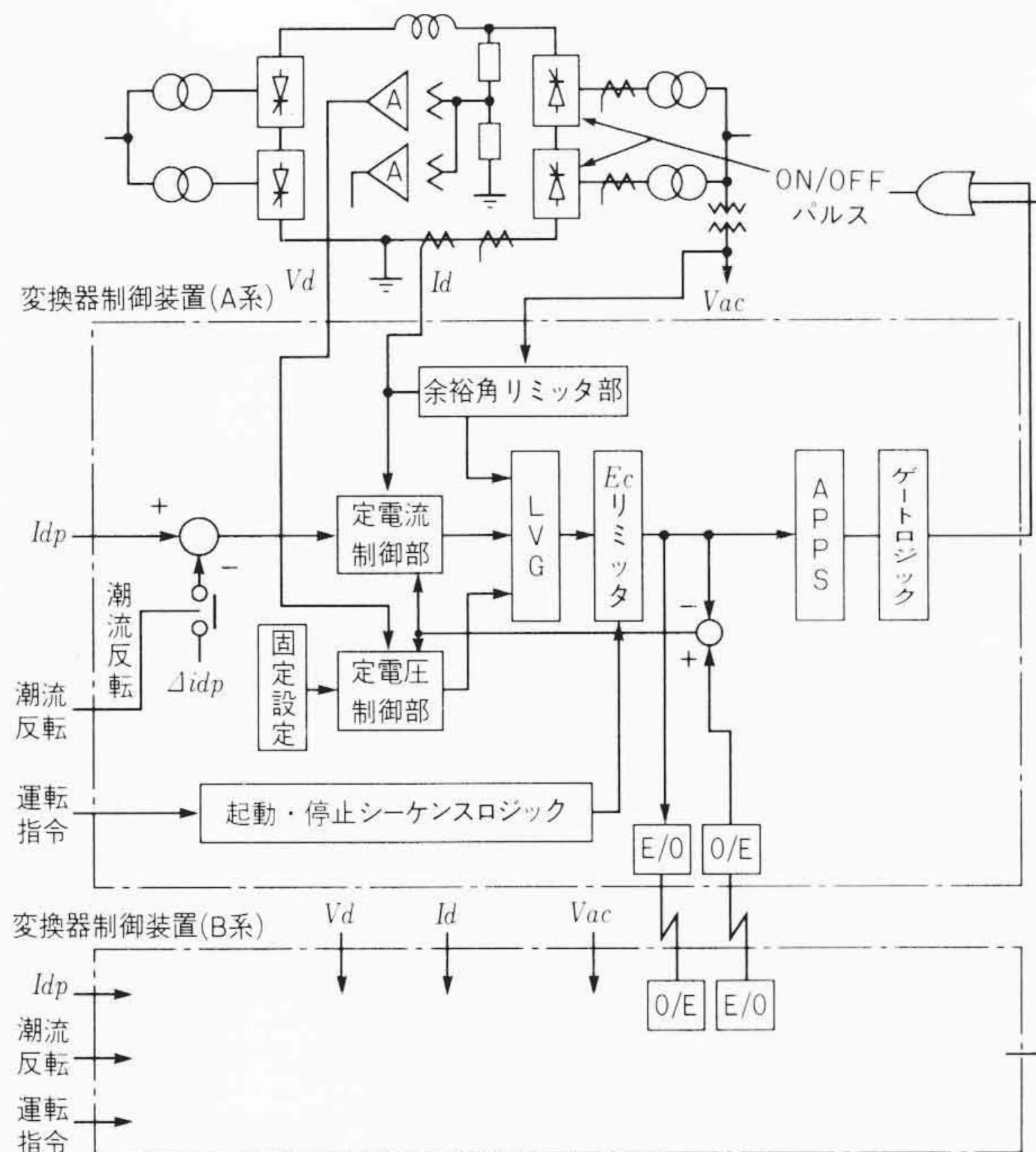
平成2年度以降に製作した変換器制御装置(12相制御装置)は、高性能32ビットマイコンを使用し、直流電流・電圧制御の高速応答、および高安定性を実現した。また、制御系は多重化構成の直接デジタル制御を採用し、高信頼化・高機能化に大きく貢献している。

4.2 制御機能の向上

変換器制御多重化構成の直接デジタル制御ブロックを図6に示す。主機能としては、一般にデジタル保護リレーで採用されている自動監視を具備し、制御機能としては、ACR(Automatic Current Regulator: 定電流制御)、AVR(Automatic Voltage Regulator: 定電圧制御)、余裕角リミッタ制御を高速サンプリングの繰返し演算で実施している。特に定電流制御部では、変換器の起動時の直流電流オーバシュートの抑制、および直流系統事故時の過電流から変換器を迅速に保護するため、高速サンプリング(電気角 18° 、60 Hz系統で $833\mu\text{s}$)の制御演算を行っている。また、制御系の多重化により、お互いの制御出力量をやり取りし、フィードバック制御を実施することで、既設装置に比べてより安定した制御が可能となった。

4.3 FC, BTBの今後の展開

電力連系設備の重要性が増しているなかで、供給信頼度向上のため、変換器の運転継続が現在検討されている。従来は、交流系統故障時には運転をいったん停止し、故障除去後に再起動していた(遮断器を開放またはサイリ



注：略語説明

I_{dp} (直流電流指令値), V_d (直流電圧), I_d (直流電流), V_{ac} (交流電圧)
APPS (自動パルス移相器), E_c (制御角), ΔI_{dp} (直流電流指令値偏差)
LVG (低値優先), E/O (電気-光変換), O/E (光-電気変換)

図6 変換器制御多重化構成の例(二重系の例)

信頼性を要求される制御角(E_c)の信号は、光信号として他系と高速にやり取りしている。

スタへの点弧信号を停止後、故障除去後に遮断器投入またはサイリスタへの点弧信号開始)が、故障中でも運転を継続(電力融通を継続)し、故障除去とともに高速再起動(故障前の電力融通量を融通)する制御方式は、高信頼度の電力融通システムの構築に大きく貢献するものと考えられる。

5 系統連系試験

5.1 システム検討と系統解析

周波数変換設備はその特殊性から、設備の基本仕様の決定や運用方法の検討にあたり、系統解析が必要不可欠なものとなっている。

一般に、周波数変換設備では無効電力補償のために多量の電力用コンデンサが設置される。このため、系統条件によっては系統故障など変換器停止時に過電圧が発生する場合がある。また、緊急の起動、停止、潮流反転など、有効電力や無効電力の急激な変化により、電圧変動が生じることもある。したがって、系統解析を十分に行い、その数値を定量的に把握しておき、必要に応じて設備対策を行ったり、機器の仕様に反映させることが重要

である。

5.2 系統連系試験

周波数変換装置は、工場で機器の機能検証や調整を十分に行った後、現地で実系統に連系し最終的な総合試験を実施する。この系統連系試験は大別して以下の2種類の目的を持っている。

一つは、設置した設備が正しく機能し、安定に運転できるかどうか確認を行う試験で、変換器や調相設備の制御・保護動作を含め設備全体としての機能検証試験である。

もう一つは、解析に基づいて実施した過電圧対策、電圧変動対策、安定運転対策など、実施した設備対策の効果を検証する試験であり、系統と深くかかわる試験である。

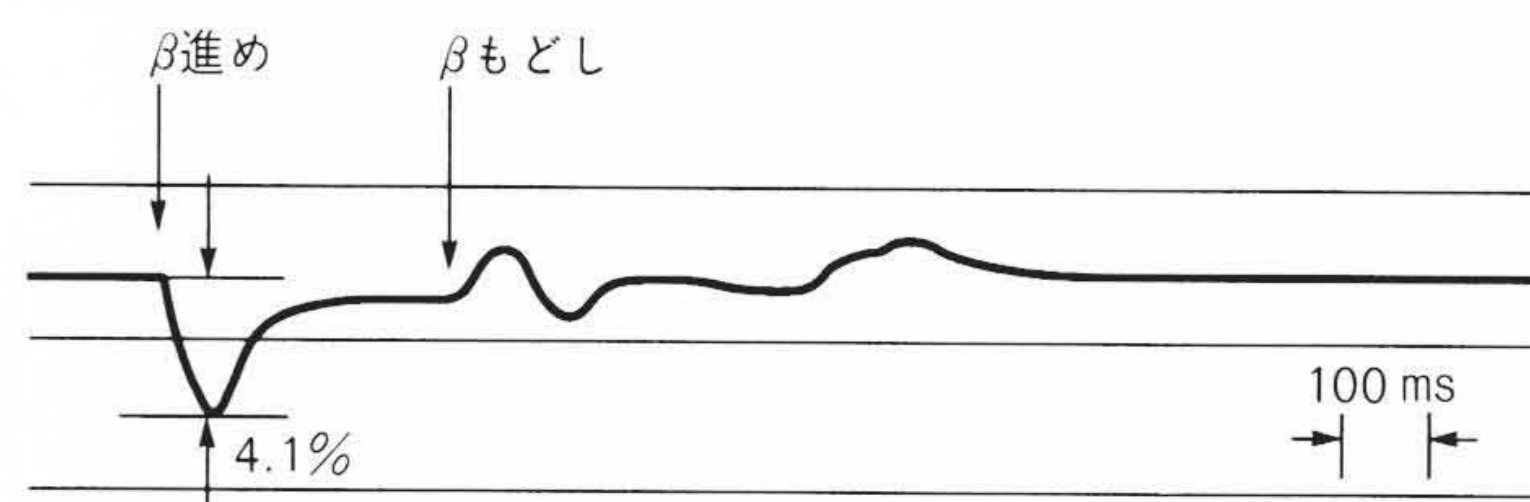
通常、変換設備は経済性の面から常時の系統での必要な設備対策を行っており、特殊な系統条件(送電線の1回線停止、調相設備の停止など)では運用に制約がかけられることもある。この場合も運用上、運転可能な容量をできるだけ健全時に近づけることが望ましく、この運転限界を把握しておく必要がある。

このような限界試験は、系統に与える影響が大きいことから、実際の試験では限界以下で試験を行い、同様の条件で行った解析の結果と照合して、解析で求めた限界値の正しさを確認することが多い。

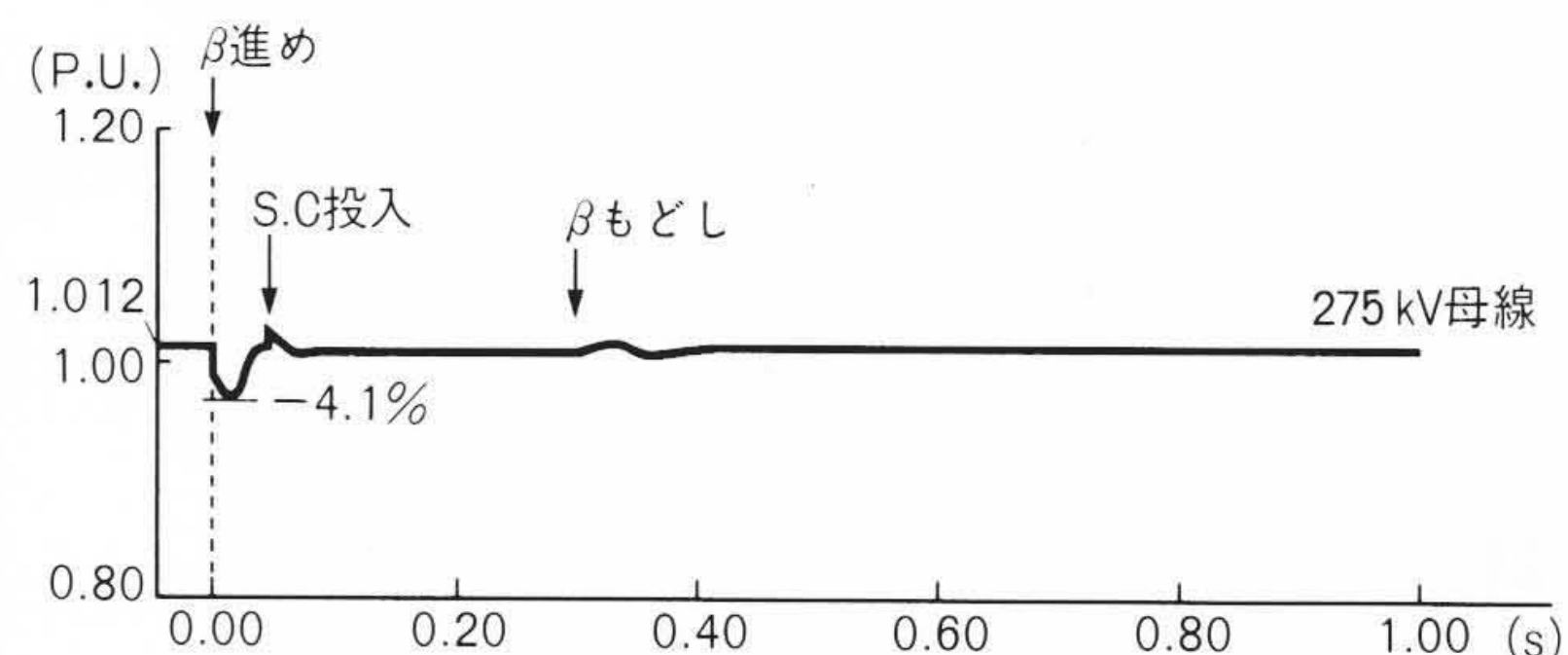
5.3 系統連系試験の実際例

新信濃変電所に納入した周波数変換設備での系統連系試験の結果、および事前に行った解析結果の一例を以下に示す。

β 進め制御時の60 Hz側系統275 kV母線電圧の波形を図7に示す。 β 進め制御は変換器の転流失敗防止のためにサイリスタバルブに位相進めしたパルスを出力する制御であり、変圧器や電力用コンデンサの投入時、交流電圧の波形ひずみ検出時など、通常に行われる制御である。系統連系試験時の波形を同図(a)に、日立製作所が開発した実行値ベース交直連系安定度解析プログラムTSAP(Transient Stability Analysis Program)で解析した解析波形を同図(b)に示す。 β 進め制御は変換器の力率が悪くなるため系統の電圧が低下するが、その電圧変動値は試験と解析でよく一致している。



(a) 系統連系試験時の実測波形



(b) 解析波形

図7 β 進め制御時の275 kV電圧波形例(実効値)

β 進め制御を行うと、変換器の力率が悪くなるため、系統電圧が低下する。

5.4 系統解析精度の向上

上記は一例であるが、現在の解析では技術の高度化によって制御方式などが実機に近く模擬できるため、系統や機器、制御を詳細に模擬することにより、精度の高い解析結果が得られるようになっている。

また、このように連系試験の結果との照合実績を積み重ねることにより、ますます解析精度の高精度化が図られてきている。

このため、現在、系統解析は設備計画時の有効かつ必要不可欠な検討手段になっている。

6 おわりに

高度情報化社会の発達に伴い、今後電力安定供給のニーズはますます高まってくる。電力会社では、広域運用拡大による電力の経済運用を考えるようになってきており、すでにいくつかの周波数変換装置やBTBの設置が計画されている。

これらの状況のもと、さらに装置の信頼性・保守性・経済性を追求し、調和のとれた最適なシステムを提案していく考えである。

参考文献

- 1) 安田, 外: 東京電力株式会社新信濃変電所周波数変換設備の概要, 日立評論, 61, 2, 81~86(昭54-2)
- 2) 中村, 外: 電力系統連系・安定化技術, 日立評論, 73, 6, 579~586(平3-6)