キーワード

パワーエレクトロニクス, 電力系統, HVDC, BTB, FACTS, FC, 電力貯蔵, 電力品質改善機器, 分散電源

正 員 玉 井 伸 三

三菱電機(株)

正 員 山 本 肇

(株)東 芝

1. はじめに

半導体電力変換技術は、パワーデバイス、制御理論、高速な制御演算プロセッサの技術進展に伴い、ますます適用範囲を拡大している。特にパワーデバイスの大容量化は、大容量機器の多い電力系統分野において、装置がコンパクトになるとともに産業用途に適用してきた電力変換技術を電力分野に適用する流れを作っている。本解説は、電力システムに適用される半導体電力変換技術について高圧電力変換技術と低圧電力変換技術に分けて概説する。

2. 高圧電力変換技術

電力系統への高圧電力変換技術の適用として、設備の効率運用・供給予備力の節減のために系統間連系の周波数変換所、BTB (Back-To-Back)、海底ケーブルや長距離直流送電が導入されてきた。また、交流送電の電圧変動抑制、安定度向上を目的とする、FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 機器の導入が増えてきている。表1に最近の代表的な導入例をまとめた。本節では、それらの適用技術について述べる。

<2. 1> 周波数変換所 (FC)、BTB、直流送電

我が国の電源系統は、50Hz、60Hz が共存するため、1965年佐久間に300MWの周波数変換器(FC)が設置されたのをはじめとして、新信濃600MW、東清水300MWが導入されている。また、海底ケーブル送電や交流ループ系統回避のために南福光300MWBTB、北海道本州300MW直流送電が建設され、系統間連系が強化されている。2000年には、我が国で最大容量(1400MW)の紀伊水道直流送電(表1)が運転を開始した。この直流送電設備は種々の新技術を取入れており、世界最大容量の8kV、3.6kA 光直接点弧サイリスタを開発⁽¹⁾し、DC±250kV送電において1パルプ当たりの直列素子数40個と、これまでの6kV素子を適用した場合と比べて70%に数を低減するとともに、系統事故時の交流電圧低下時にも運転継続制御して事故による送電電力変動を低減するなど、信頼度の高い送電システムを構築している⁽²⁾。

電力用途の高圧電力変換回路分野ではサイリスタが使用されることが多かったが、主に産業用に使用されていた自己消弧形のGTO変換器が1990年代前半より適用され、後述するFACTS機器へ導入された。1998年には資源エネルギー庁の補助による電力系統連系強化プロジェクトの中で新信濃自励式BTB⁽³⁾(表1)が試験された。サイリスタ変換器は無効電力や高調波が多く発生し、その処理のためのフィルタが多く必要である。自励式変換器はスイッチング周波数を上げたり、変換器を多重接続したりして正弦波に近い波形を出力し、フィルタが不要か軽微なもので良く、機器の小型化が可能である。

新信濃で試験されたBTB変換器は直流3端子構造をとり、大容量素子直列接続技術、直列接続された素子へのゲート駆動電力供給回路の簡素化技術、スナバ回路のエネルギーを主回路に回生して効率を向上する技術、系統事故時に運転を継続して電力供給の信頼性を向上する技術などが研究、試験され、大きな成果を上げた。

海外においては、1954年スウェーデンのGotlandで世界初の直流送電(水銀整流器)が開始され、世界最大容量のDC±600kV、3150MWのイタイプ(ブラジル)をはじめ、50以上の設備が稼働中である。これらは主にサイリスタを使用した設備であるが、小容量のDC送電、周波数変換において自励式変換器が導入され始めている。

1997年にスウェーデンのHellsjonとGrangesberg間で3MW、DC±10kVの自励式直流送電(HVDC Light)⁽⁴⁾が建設された。1999年にはGotland島の風力発電電力を都市部へ送電する50MW自励式直流送電⁽⁵⁾(表1)が稼働を開始した。圧接型IGBTの直列接続により、DC160kVの65MVA自励式インバータをトランスなどによる多重変換器構成を取らずに実現している。高調波低減のため、スイッチング周波数は2kHzと高く取り、系統側にフィルタを置く。パルプは数台のコンテナに分割収納され、標準ユニット化を進めている。

周波数変換器への適用としては、1996年に鉄道の単相系統と商用系統間の連系設備としてドイツのBremenに100MW自励式FCが設置された^(6,7)(表1)。GTOサイリスタを改良したGCTサイリスタ(IGCT)を採用し、素子直列時のスナバ容量を低減し、損失低減されている。インバータは12台を多重変圧器で接続し、交流電圧の高調波を低減している。

Power Conversion Technology Applications for Power System.
By Shinzo Tamai, Member (Mitsubishi Electric Corp.), & Hajime Yamamoto, Member (Toshiba Corp.).

表 1 最近の高圧電力変換技術の適用例
Table 1 Recent application of high voltage power converter

	名称 稼働年 用途	回路構成	容量 接続系統	電力変換方式	素子定格 直列数 DC 電圧	特徴
DC 送電	紀伊水道 2000年 海底ケーブルDC 送電		1400MW 60Hz 3相 AC 500kV DC ±250kV ケーブル50km+ 架空線50km	他励式 12パル位相制御	光直接点弧 サイリスタ 8kV/3.6kA 40直列 DC125kV	大容量素子適 用で部品点数減、コ ンパ外高信頼、系統 事故時運転継続制 御。将来±500kVに 増設予定。
	GOTLAND (Sweden) HVDC-light 1999年 地中ケーブル送電		50MW/65MVA 50Hz 3相 AC 80kV DC ±80kV ケーブル70km	自励式 3相電圧型 2-Level 2kHz PWM	圧接形IGBT 2.5kV 電流未記載 n直列 DC 160kV	IGBT直列接続に よる変換器トランス 入。ゲート電力主回路 給電。変換器コンテ ナ収納。軽量DCケー ブル近接埋設により漏 洩磁束小。
BTB (FC)	新信濃 BTB, FC 1998~1999年 300MW直流連系 プロトタイプ		37.5MW/53MVA 60Hz側 275kV 3相 50Hz側 66kV 3相	自励式 3相電圧型 2-Level 9Pulse PWM 4段トランス多重 3相電圧型 2-Level 9Pulse PWM 4段トランス多重	GTOサリタ 6kV/6kA 4直列 DC 10.6kV	ゲート電力主回路 給電、スイッチング回 生、系統事故時運 転継続制御、自励 式多端子制御等新 技術適用。
	FC Bremen 1996年 Karlsruhe 1999年 (Germany) 鉄道/電力間 連系		100MW 50Hz側 112kV 3相 16.7/3Hz側 121kV 単相	他励式/自励式 12パル位相制御 単相電圧型 2-Level 3-Pulse PWM 12段トランス多重	50Hz側 サリタ 16.7Hz側 GCTサリタ 4.5kV/3kA 6直列 DC 10kV	GCT サリタ適用 6 直列接続。スイッチ 回路小型化。
	犬山STATCOM 1991年 電圧制御 ダンピング制御		±80MVar 60Hz 154kV 3相	自励式 3相単相電圧型 2-Level 1-Pulse PWM 8段トランス多重	GTOサリタ 4.5kV/3kA 3直列 DC 4.15kV	世界初系統用自 励式変換器。移相 巻線付き 8 段多重 変圧器を適用。
F A C T S	新信濃STATCOM 1992年 電圧制御 ダンピング制御 技術開発		±50MVar 50Hz 66kV 3相	自励式 3相電圧型 2-Level 2or3Pulse PWM 4段トランス多重	GTOサリタ 4.5kV/3kA 3x4直列 DC 16.0 kV 6kV/2.5kA 2x4直列 DC 16.8 kV	2 台制作。4.5kV または 6kV の素子 を使用し、直列 数、DC 電圧が異なる。
	Sullivan (USA) STATCOM 1996 年 電圧制御		±100MVar 60Hz 161kV 3相	自励式 3相電圧型 2-Level 1Pulse PAM 8段リアクトル多重	GTOサリタ 4.5kV/4kA 5直列 可変DC電圧 7.6kV max	8 台のインバータの 多重に中間タップ付 きリアクトル回路を使用。
	Inez (USA) UPFC 1998 年 電圧制御 潮流制御		2x ±160MVar 60Hz 138kV 3相	自励式 3相電圧型 3-Level 並列側 1Pulse PAM 直列側 1Pulse PWM 4段リアクトル多重x2	GTOサリタ 4.5kV/4kA 9x8直列 可変DC電圧 24 kV max	世界初 UPFC。 3 レベルインバータ採用。
	East Claydon (UK) STATCOM 建設中 電圧制御		±75MVar 50Hz 400kV 3相	自励式 3x単相電圧型カスケード 1Pulse PAM 16段フェーズ回路多重	GTOサリタ 4.5kV/4kA 1直列 可変DC電圧 2 kV max	単相インバータをカ スケード接続したフェ ーズ回路を採用。変換器 トランスレスで AC15.1kV へ接続。+127MVar TSC と併用。

<2. 2> FACTS

交流系統の電圧変動や電力動揺を抑制し、交流送電の安定性を向上させるために導入する電力変換器をFACTS機器と呼んでおり、系統の要請により様々な機器が提案、実用されている。

SVC (Static Var Compensator) はリアクトルやコンデンサをサイリスタを用いて制御して交流系統に流れる無効電力を調整するものであり、TSC (Thyristor Switched Capacitor) や TCR (Thyristor Controlled Reactor) がある。TSC は図 1(a) に示すようにコンデンサをサイリスタスイッチでオンオフするもので、進み無効電力を段階的に制御できる。TCR は図 1(b) に示すようにリアクトルに流れる電流を連続可変制御して、並列に接続されたコンデンサとで進みから遅れまで無効電力を連続制御する。

図 1 SVC の構成

Fig. 1 SVC (Static Var Compensator)

図 2 STATCOM の構成

Fig. 2 STATCOM (Static Synchronous Compensator)

自励式変換器による SVC を STATCOM (Static Synchronous Compensator) という。系統に変圧器を介して接続された自励式変換器は出力交流電圧を変えることにより遅れから進みまでの無効電力を連続的に制御可能で、SVC と比べてコンパクトになるメリットがある。図 2 に STATCOM の基本構成を示す。単純な電圧型インバータであるが、実際には変換器容量と自励式変換器の発生する高調波低減のため、単位変換器を変圧器やリアクトルで多重接続して構成する。表 1 に犬山⁽⁸⁾、新信濃^(9,10)、Sullivan⁽¹¹⁾ (米国) における STATCOM の回路構成、特徴を示す。自励式変換器において課題となるのは、損失、高調波である。犬山では 1 パルス PWM 制御を用いて素子のスイッチング損失を最小限に抑えている。高調波低減のために移相巻線付き変圧器による 8

段多重構成としている。Sullivan においては PAM 制御とリアクトルによる 8 段多重構成を採用している。新信濃は DC 16kV または 16.8kV の変換器を単位として、2 または 3 パルス PWM とトランスによる 4 段多重構成を採用している。

変換器の多重化のための変圧器やリアクトルを使わず、直接に高圧で高調波の少ない電圧を得ようとしているのが East Claydon⁽¹²⁾ (英国) にて建設中の STATCOM (表 1) で、単相インバータをカスケード接続したチェーン構成を取る。出力電圧は接続されるインバータ数に応じてマルチレベルになり、正弦波に近い電圧を出力する。16 台チェーン構成の単相インバータをデルタ接続し、15.1kV の交流を直接得ている。

系統に直列に接続する FACTS 機器も実用されている。TCR と同様の回路を系統に直列に入れた TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor、図 3) や表 1 に示した UPFC^(13,14) (Unified Power Flow Controller) である。UPFC は並列インバータ (STATCOM と同様) と直列インバータを直流リンクでつないだもので、直列インピーダンスが制御可能で系統の電力潮流を調整することができる。米国の Inez 変電所で世界で初めて導入された。

図 3 TCSC の構成

Fig. 3 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

3. 低圧電力変換技術

電力系統における電力変換技術の適用は、直流送電、周波数変換など超高压送電系統を中心に進んできた。電力自由化、再生可能エネルギー利用の進展と共に、配電系統など、より電圧階級の低い系統に対してもパワーエレクトロニクス機器の適用が広がりつつある。本節では、電力系統応用における低圧電力変換技術として、電力貯蔵、電力品質改善、分散電源への応用について述べる。

<3. 1> 電力貯蔵への応用 電力を大容量の電池に貯蔵することで、電力ピークをシフトし、負荷平準化を目指したシステムとして、電池電力貯蔵システム (BESS: Battery Energy Storage System) がある。電池としては、ナトリウム硫黄電池 (NaS 電池)、レドックスフロー電池など各種電池の適用が検討されている⁽¹⁵⁾。直流電力として貯蔵された電力を交流電力に変換し、交流系統と連系するために、交直変換装置が必要となる。図 4 は、東京電力 (株) 大仁変電所に設置された 2 MW NaS 電池電力貯蔵システム用交直変換装置の構成を示している。3.3kV - 1200A の高圧 IGBT を使い、スイッチング周波数 1kHz の PWM 制御 IGBT 変換器 4 台を相間リアクトルにより多重化している。このシステムを 3 台設置し、6 MW 級 NaS 電池電力貯蔵システムとして、実用化に向けた試験が行われている⁽¹⁶⁾。

負荷平準化を目的とした連系運転機能に、自立運転機能を加えて、非常用電源装置としても動作できるようにしたNaS電池電力貯蔵システム⁽¹⁷⁾や、太陽電池とNaS電池を併用したシステム⁽¹⁸⁾も開発されている。

電力貯蔵の手段に超電導コイルを用いた超電導電力貯蔵システム(SMES: Super Magnetic Energy Storage System)がある⁽¹⁹⁾。SMESにおいても、超電導コイルに直流電力として貯蔵された電力と電力系統の交流電力を相互に変換すると共に、系統安定化などを目的に有効電力と無効電力を独立制御するために電力変換装置が用いられる。

SMES用電力変換装置は、電流形変換器方式とチョッパ+電圧形変換器方式に大別される。超電導コイルは電流源特性を持つので、電流形変換器を用いることで主回路構成を簡素化できる。図5は電流形変換器として、スナバエネルギー回生形電流形変換器⁽²⁰⁾を適用した場合の構成を示している。スナバエネルギーがスイッチング動作に伴い、自動的に主回路に回生されるので、スナバエネルギー損失を理論的には零にできる方式である。

電圧形変換器を用いる方式は、超電導コイルの直流電流をチョッパで直流コンデンサに蓄え、電圧形変換器で交流系統と連系する。いずれの方式でも、待機時に低損失でエネルギーを保持するために超電導コイルを短絡するスイッチと、クエンチ現象が発生した際に、コイルのエネルギーを放出して装置を保護するのに直流遮断器と保護抵抗器が必要である。

図4 2MW NaS電池電力貯蔵システム電力変換器
Fig.4 2MW power converter for NaS battery energy storage system

図5 スナバエネルギー回生形SMES用電力変換器
Fig.5 Snubber loss free current source inverter for SMES

<3.2> 電力品質改善機器への応用 商用系統への落雷や機器事故に伴う停電や瞬時電圧低下に対する対策や高調波対策など、パワーエレクトロニクス機器を活用して商用系統の電力品質を高め、需要化に要望に応じて多様な品質の電力を供給する概念がCustom Powerとして提唱されている⁽²¹⁾。電力品質を改善して、Custom Power構想を実現する各種パワーエレクトロニクス機器について述べる。

系統電圧補償やフリッカ抑制をを目的とした電力品質改善機器として、D-STATCOM(Distribution Static Compensator)がある。GTOを用いた自励式無効電力補償装置としてすでに実用化されている。TCR(Thyristor Controlled Reactor)などの他励式無効電力補償装置に比べて、大容量交流フィルタが不要で、より高速制御が可能であることが特徴である。今後は、IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)など電圧駆動形素子を適用した、よりコンパクトな装置が実用化されると考えられる。

半導体工場など高い電力品質を要求するプラントでは、瞬時電圧低下が生産ラインに多大な影響を及ぼす。瞬時電圧低下を補償する装置としてDVR(Dynamic Voltage Restorer)がある。DVRの構成を図6に示す。各相に単相ブリッジ構成の自励式インバータが直列トランスを介して接続されている。電圧低下を補償するために、有効電力も出力されるため、直流側には、整流器および大容量コンデンサバンクを備えている。常時は直列トランスが短絡され、待機損失を最小化する。海外では、IGCTを用いた4MVAのDVRが報告されている⁽²²⁾。国内でもIGBTを用いた30kVAから400kVAのDVRが実用化されている。

アクティブフィルタは、インバータにより系統の高調波をキャンセルすることで、高調波を低減する装置である。系統に並列に接続される並列形アクティブフィルタと直列トランスを介して系統に接続される直列形アクテ

図6 DVRの構成
Fig.6 Dynamic voltage restorer

図7 アクティブフィルタの基本構成
Fig.7 Basic configurations of active filter

ティブフィルタに大別される。並列形アクティブフィルタは高調波電流を検出して、逆位相の電流をインバータから注入する方式である。一方、直列形アクティブフィルタは、高調波電圧と逆相の電圧を発生して、高調波電圧を補償する方式である。現在は、並列形アクティブフィルタが主流であるが、並列形と直列形を組み合わせた方式なども検討されている。

UPS (Un-interruptible Power System) は商用交流を変換器で一旦直流に変換しインバータで逆変換することで負荷に無停電で電力を供給する電源システムで、コンピュータなどの重要負荷に広く用いられている。一方、SPS (Stand-by Power System) は、常時はサイリスタスイッチを介して商用系統から負荷に給電し、瞬低が発生した際は、高速にサイリスタスイッチをオフし、インバータを介して、バッテリーから負荷に電力を給電する。コンパクトで常時の損失が少ないのが特徴である。

商用系統に事故が発生した際に、商用系統を高速に切り離すことで、自家発電設備への事故の波及を防ぐ装置として、サイリスタクリップ、サイリスタリミッタがある。サイリスタクリップはサイリスタを逆並列接続した半導体スイッチであり、サイリスタリミッタはさらにリアクトルを直列接続したものである⁽²³⁾。

図8 瞬時電圧低下に対するサイリスタリミッタの効果
Fig.8 Effect of thyristor limiter against voltage sag

2系統の商用系統にそれぞれサイリスタスイッチを介して接続し、受電中の系統に異常が発生した際は、サイリスタスイッチで高速に遮断、他の健全な商用系統を接続することで、無瞬断系統切り替えを可能とするSSTS (Solid-State Transfer Switch) がある。1 (msec)で動作する高速メカニカルスイッチとサイリスタスイッチを用いた15 kV定格のSSTSが報告されている⁽²⁴⁾。

柔軟な系統構成の変更と多品質電力供給を可能にする次世代の配電系統システムとしてFRIENDS (Flexible, Reliable, and Intelligent Electrical Energy Delivery System) が提案されている⁽²⁵⁾。FRIENDS 構想では、電力改質センター (QCC: Quality Control Center) により多品質電力を生成、供給を行う。QCCは、図9に示すように系統切り替え、負荷遮断用の静止形開閉器や分散電源や電力貯蔵装置などから構成される。QCCを構成する具体的な機器としては、直流部にSMESを組み合わせたシステム⁽²⁶⁾や、各相独立制御して、相毎に品質の異なる電力供給を実現する三相四線式交流方式⁽²⁷⁾が提案されている。

図9 FRIENDSの概念と電力改質センター
Fig.9 General concept of FRIENDS and QCC

<3. 3> 分散電源への応用 分散電源として、近年、増加している風力発電にも、電力変換技術が必要である。とくに同期発電機を用いた可変速回転制御方式では、IGBTを用いたインバータ・コンバータを用いた方式が適用されている。インバータにより発電機を可変速制御することで、効率を向上させると共に、出力の変動を抑えた風力発電システムを実現できる。また、コンバータ側で無効電力制御を行うことで、電圧変動を抑制することも可能である⁽²⁸⁾。

燃料電池としては、リン酸形燃料電池が商用化のレベルに達しており、コージェネレーションシステムとして多数用いられている。従来は、燃料電池電圧をチョッパ回路で一定電圧に保つ電力変換方式が用いられてきたが、600 A-800 Vの大電流IGBTを用いることで、燃料電池の直流出力電圧を直接交流に変換する方式が実用化されている⁽²⁹⁾。回路構成がシンプルであり、効率、信頼性に優れたシステムとなっている。電気自動車、家庭用小型電源への適用が期待される固体高分子形燃料電池については、現状、燃料電池本体に開発の中心があるが、電力変換器としても、よりコンパクトで高効率な電力変換を実現する技術が必要になる。

需要家密着型の小型分散電源として注目されているマイクロガスタービンも、高速永久磁石発電機の出力する高周波交流電力を商用周波数に変換するための電力変換器が不可欠である。図10はその構成の一例である。

図10 マイクロガスタービンの電力変換器
Fig.10 Power converter of micro gas turbine

発電機の定格回転数 9600rpm に相当する 1.6 kHz の交流出力をコンバータにより直流に変換し、インバータにより 50Hz/60Hz の交流に変換するシステムである。起動時は、変換器側から給電して発電機をモータとして所定の速度まで加速する。日本のように燃料ガスの圧力が低い場合は、ガス燃料圧縮機への給電も必要となる。マイクロガスタービン単独で負荷に電力を供給する自立運転モードでは、急峻な負荷変動に対応するために、直流にバッテリーが接続された構成となる。

再生可能エネルギーの中でも、太陽光発電インバータは、公的な支援もあり、普及が進んでいる。小型・軽量化、低コスト化のニーズから、住宅用ではトランスレス方式が主流となっている。今後は、業務用システム等でも、トランスレス方式が増加すると予想される。トランスレス方式の場合、直流側に昇圧チョップを設け十分な直流電圧を確保すると共に、系統への直流分流出防止、EMI 対策等が重要となる⁽³⁰⁾。

4. おわりに

電力系統応用における電力変換技術を、高圧電力変換技術、低圧電力変換技術に分けて概説した。電力自由化や再生可能エネルギー利用の進展に伴い、多様化する電力ニーズに答えていくためには、電力変換技術の果たすべき役割は大きい。パワーデバイス技術、主回路技術、制御技術が三位一体となった電力変換器技術の一層の発展を期待する。
(平成 12 年 12 月 25 日受付)

文献

- (1) 長谷川泰三・山地幸司・色川宏之・竹田正俊・榑木博一：「6 インチ光直接点弧サイリスタを適用した高性能サイリスタバルブの開発」, 電学論 B, 117, No.7, 1997
- (2) S.Tamai, H.Naitoh, F. Ishiguro, et. al.: "Fast and Predictive HVDC Extinction Angle Control", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, NO. 3, August, 1997
- (3) T. Nakajima, K. Sakamoto, H. Suzuki, et. al.: "Field Testing of 53MVA Three-Terminal DC Link between Power Systems Using GTO Converters", Proc. Of IPEC-Tokyo, 2000
- (4) G. Asplund, K. Eriksson, K. Svensson, "HVDC Light - DC transmission based on voltage sourced converters", ABB Review, Vol. 1, 1998
- (5) U. Axelsson, A. Holm, C. Liljegren, K. Eriksson, L. Weimers, "Gotland HVDC Light Transmission - World's First Commercial Small Scale DC Transmission", Proc. Of CIRED Conference in Nice, France, May, 1999
- (6) R. Boeck, O. Gaupp, P. Dahler, et. al.: "Bremen's 100-MW Static Frequency Link", ABB Review, Vol. 9, 1996
- (7) P. Steimer, H. Gruning, J. Werninger, P. Dahler, et. al.: "Series Connection of GTO Thyristors for High-Power Static Frequency Converters", ABB Review, Vol. 5, 1995
- (8) S. Mori, K. Matsuno, T. Hasegawa, S. Ohnishi, M. Takeda, M. Seto, S. Murakami, F. Ishiguro, "Development of A Large Static Var Generator using Self-Commutated Inverters for Improving Power System Stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, NO. 1, February, 1993
- (9) 鈴木健一・矢島正士・野原幹也・上田茂太：「50MVA 自励式 SVC の制御方式」, 電学論 B, 117 巻 7 号, 1997
- (10) 常盤幸生・市川文俊・色川彰一・北原忠幸：「電力系統用自励式 SVC の開発」, 電学論 B, 113 巻 2 号, 1993
- (11) C. Shauder, M. Gernhardt, E. Stacey T. Cease, A. Edris, "Development of a ± 100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, NO. 3, July, 1995
- (12) R. Knight, D. Young, D. Trainer, "Relocatable GTO-Based Static Var Compensator for NGC Substations", CIGRE 1998, 14-106, 1998
- (13) T. Moore, "Power Precision with UPFC", EPRI Journal, Nov./Dec., 1998
- (14) A. Edris, et al.: "Controlling the Flow of Real and Reactive Power", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 11, No. 1, 1998
- (15) 児玉悦治・田中晃司：「電力貯蔵用電池」, 電学誌, 119, No.7, 1999, 424~427
- (16) 佐藤賢・牧光一・中畑幸一他：「大仁変電所 NAS 電池電力貯蔵システム用交直変換装置の運転特性評価」, H12 電気学会 B 部門全大, No.658, 2000
- (17) 大島正明・加藤光朗・兵頭守他：「250kW 級 NAS 電池電力貯蔵システム用 PCS」, H12 電気学会 B 部門全大, No.645, 2000
- (18) 成底勇人・兼島安洋・廣瀬俊一・荻沢仁：「PV 電池を直流接続した Na-S 電池電力貯蔵システム用交直変換装置の制御方式」, H12 電気学会 B 部門全大, No.664, 2000
- (19) 座間正一・堤和哉：「SMES の最新技術動向」, H11 電気学会 D 部門全大, S.7-5, 1999
- (20) H.Naitoh・H.Nishikawa et.al.: "A Snubber Loss Free Current Source Converter for High Power Use", CIGRE Symposium 1995 Tokyo, 510-03, 1995
- (21) J. Douglas: "Custom power: optimizing distribution services", EPRI Journal, May/June, 1996
- (22) Arun Arora・Kevin Chan et.al.: "Innovative system solutions for power quality enhancement", ABB Review 3/1999
- (23) 吉野輝夫・伊藤克郎・芦崎祐介：「高品質電源システムのためのパワーエレクトロニクス装置」, H12 電気学会 D 部門全大, pp45, 2000
- (24) M.Takeda, H.Yamamoto, et. al.: "Development of a novel hybrid switch device and application to a solid-state transfer switch", IEEE/PES Winter Meetings, 1999
- (25) 奈良宏一・長谷川淳：「新しい柔軟な電気エネルギー流通システム」, 電学論 B, 117, No.1, 1997
- (26) 佐々木孝志・原亮一・北裕幸他：「FRIENDS における電力改質センターの内部構成の検討 - SMES による自然エネルギー電源との協調運用制御手法 -」, H12 電気学会 B 部門全大, No.312, 2000
- (27) 林祐輔・伊瀬敏史・辻毅一郎：「インバータの各相独立制御と三相四線式交流による品質別電力供給システム - 停電補償の実験結果 -」, H12 電気学会 B 部門全大, No.313, 2000
- (28) 玉井伸三・川村光弘・伊藤大介他：「永久発電機を用いた可変風力発電システム」, H11 電気学会 D 部門全大, 250, 1999
- (29) 渡邊政人・大島洋：「燃料電池用電力変換装置の動向」, H11 電気学会 D 部門全大, S7-4, 1999
- (30) 坂田末男：「太陽光発電装置(PV)の最新技術動向」, H11 電気学会 D 部門全大, S7-2, 1999

玉井伸三 (正員)

1981 年 3 月東京工業大学電気電子工学科卒業。1983 年同大学院修士課程修了。同年 4 月三菱電機㈱入社。同社産業システム研究所にて、インバータによる誘導電動機制御、電力系統用パワーエレクトロニクス機器の開発に従事。1989 年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。

山本 肇 (正員)

1985 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。1987 年同大学院修士課程修了。同年 4 月(株)東芝入社。同社電力・産業システム技術開発センターにて、パワーエレクトロニクス応用システムの研究開発に従事。IEEE 会員。