最近の電気鉄道地上設備用パワーエレクトロニクス装置

山本　光俊（やまもと　みつとし）　大宮司　充（だいぐうじ　みつる）　鈴木　明夫（すずき　あきお）

1　まえがき

近年，電気鉄道分野において，き電電力の品質向上・維持を目的として，パワーエレクトロニクス技術を利用した製品の適用が広がっている。

富士電機の電気鉄道地上設備用パワーエレクトロニクス装置としては，従来から新幹線用無効電力補償装置，直流回生インバータなどを製品化し，納入実績をあげている。

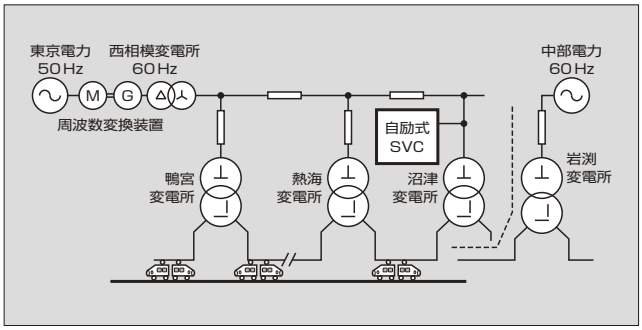
今回，より高度な技術を適用したパワーエレクトロニクス製品として，東海旅客鉄道株式会社（JR 東海）沼津変電所向け自励式無効電力補償装置（自励式 SVC）と首都圏新都市鉄道株式会社秋葉原変電所向け PWM（Pulse Width Modulation）変換装置を相次いで開発，納入したのでその技術的な内容について紹介する。

2　JR 東海沼津変電所向け自励式 SVC

2.1　目　的

東海道新幹線は 60 Hz の三相交流をスコット結線変圧器により M 座，T 座の単相交流に変換して，電車線に電力を供給している（**図 1**）。このため，50 Hz 地区では，専用の周波数変換所を設置して 60 Hz を作り出して供給している。この末端では片座供給となるために，列車走行時には三相不平衡による逆相電流が発生し，電圧不平衡，電圧低下の要因となっていた。沼津変電所に，この逆相電流に起因した電圧不平衡の補償を主な目的として，60 MVA の自励式 SVC を導入し，2003 年から運転している。

図 1　新幹線の電力系統構成



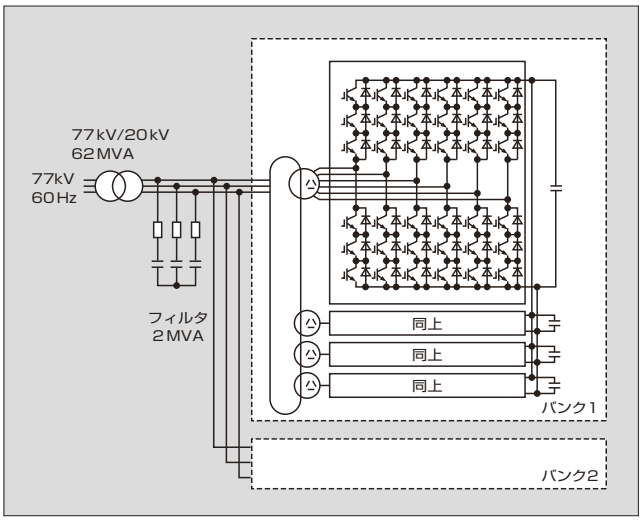
2.2　自励式 SVC のシステム構成

自励式 SVC の仕様を**表 1**，構成を**図 2** に示す。この自

表 1　自励式SVCの仕様

項　目		仕　様
系　統　電　圧		三相，77 kV，60 Hz
システム容量		進相62 MVA～遅相58 MVA
インバータ	容　量	30 MVA×2バンク
	構　成	単相インバータ×三相×4多重
	PWM方式	12パルス（擬似台形波，三角波変調）
	冷　却	純水水冷
多重変圧器	容　量	30 MVA×2バンク
	構　成	20 kV/1,920 V（Y/オープン△）
降圧変圧器	容　量	62 MVA
	構　成	77 kV/20 kV（△/Y）
高調波フィルタ	容　量	2 MVA

図 2　自励式 SVC の構成



山本　光俊

電気鉄道用変電・制御システムの技術企画業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社産業・交通システム本部交通・特機統括部交通技術部グループマネージャー。電気学会会員。

大宮司　充

パワーエレクトロニクス製品の開発，設計に従事。現在，株式会社日本 AE パワーシステムズ変圧器事業部変換装置部アシスタントマネージャ。

鈴木　明夫

パワーエレクトロニクス製品の開発に従事。現在，富士電機アドバンストテクノロジー株式会社エレクトロニクス技術研究所。電気学会会員。

励式SVCシステムは62MVAの降圧変圧器，2MVAの高調波フィルタ，および±30MVA×2バンクの自励式SVCで構成している。各バンクはIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）を3直列接続した2レベル単相インバータ3台で三相1多重インバータを構成し，この三相1多重インバータ4台を多重変圧器で直列多重化することにより30MVAのインバータを実現している。**図3**にインバータ盤の外観を示す。

2.3　IGBT直列接続技術

IGBT3直列接続モジュールの回路構成を**図4**に示す。IGBTモジュールには直列接続された素子間の電圧分担不平衡を均一化するため，素子と並列に小容量のRCスナバと，素子のコレクターゲート間に電圧クランプ素子を取り付けている。上下アーム一括のRCDクランプスナバは主回路配線インダクタンスによる跳ね上がりを抑制するために設けている。

また，ゲート駆動回路（GDU）の電源は，分圧抵抗を用いて主回路から非絶縁で電力を供給する自己給電方式としている。これらの技術を適用することにより，従来のGTO（Gate Turn Off）サイリスタ式自励式SVCに対して大幅な小型化を実現している。

2.4　制御技術

図5に自励式SVCの制御ブロック図を示す。自励式SVCは受電点電流から*dq*変換により逆相電流と，正相無効電流を抽出している。抽出した電流を自励式SVCの補償電流指令として，系統に逆位相で注入することにより逆相電力補償，無効電力補償を行う。また，自励式SVCが負荷突入時などに系統に流れる直流分を補償しようとすると多重変圧器が偏磁するため，デジタルフィルタにより電流検出から直流分を除去して補償電流指令を生成している。

2.5　試験結果

自励式SVCは工場試験での電圧発生，電流通流試験を行ったのち，現地フィールドで100％負荷通流試験などを行い，目標性能を満足することを確認している。電圧発生，電流通流試験に加えて，現地にて実負荷状態での運転・補償性能を確認後，実運用に入っている。主な試験内容と結果を**表2**に示す。

図3　自励式SVCインバータ盤の外観

3　つくばエクスプレス秋葉原変電所向けPWM変換装置

3.1　目　的

2005年8月24日に開業したつくばエクスプレスは，秋葉原と茨城県つくば市とを最短45分で結ぶ線路である。このルートの延長には地磁気観測所が近接しており，直流電化方式を採用している秋葉原－守谷間のレールから漏えいする大地帰路電流が，地磁気観測に与える影響を可能な限り小さくする必要があった。

この大地帰路電流は路線沿線に設けた変電所間の電圧差により発生するため，それぞれの変電所の出力電圧を一定に制御できるPWM変換装置を採用してレール漏えい電流を抑制することとなり，富士電機は，秋葉原変電所にPWM変換設備一式を納入した。

3.2　全体構成

PWM変換装置の仕様を**表3**，主回路構成を**図6**，インバータ盤の外観を**図7**に示す。PWM変換装置は，スイッチングデバイスとしてIGBTを採用した電力変換装置と多重変圧器により構成している。

また，PWM変換装置は二重系としており，万が一1台のPWM変換装置に故障が発生した場合でも，短時間で予備系に切り替えて運転を継続できるように配慮している。

図4　自励式SVCインバータユニットの回路図

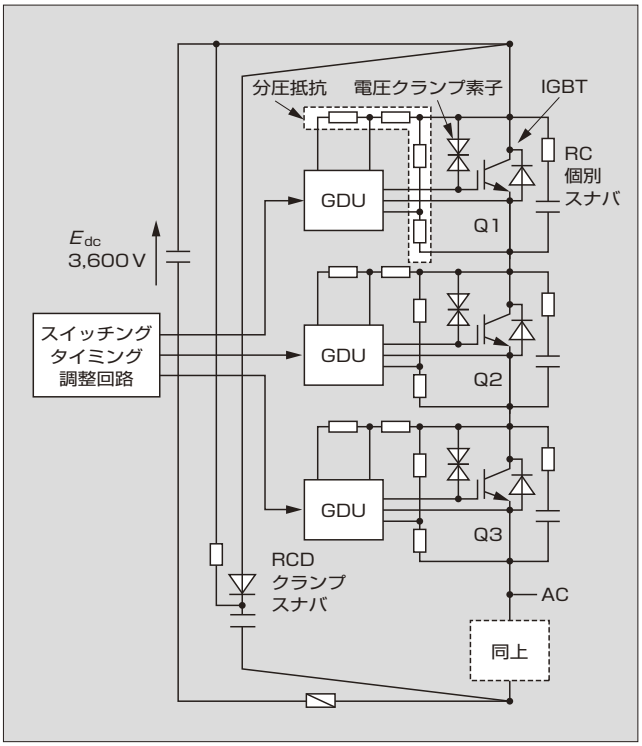


図5　自励式 SVC の制御ブロック図

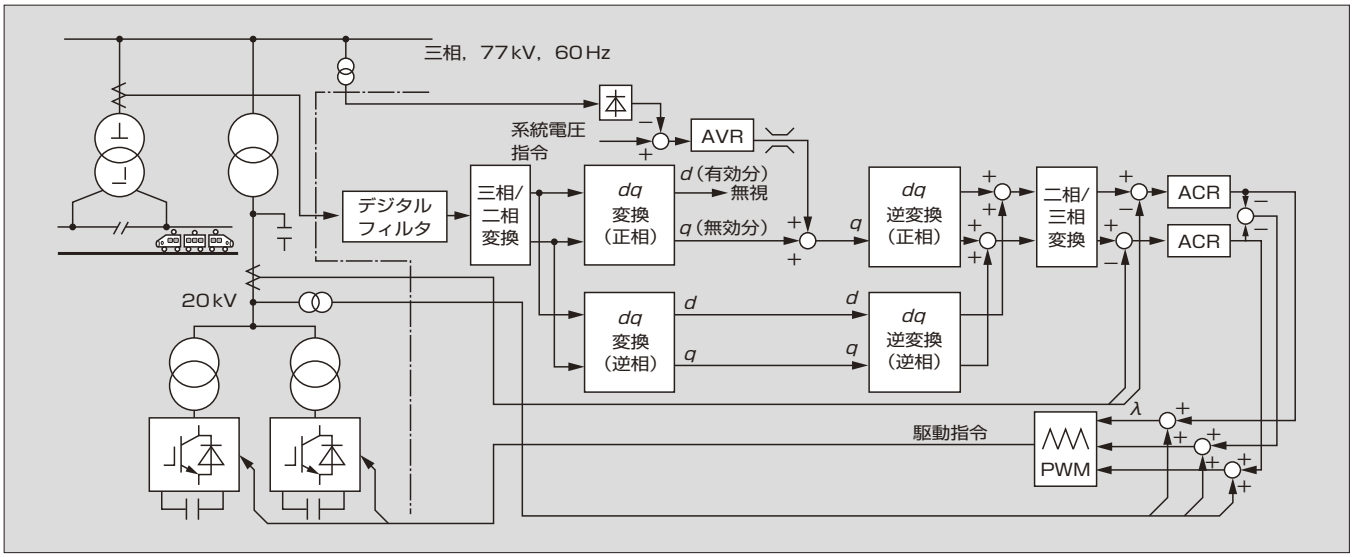


表2　自励式SVCの試験項目

試験項目	目標性能	評価結果
総合高調波	2%以下	1.5%以下
無効電力補償精度	±5%以下	±4%以下
実負荷試験	無効電力補償精度 ±5%以下	±4%以下
	突流などで停止なきこと	異常なし

表3　PWM変換装置の仕様

項目		仕様
定格容量		3,000kW S種（100%：連続，200%：2時間，300%：1分間）
定格直流電圧		1,500V±0.5%（定常）
受電電圧		三相，22kV，50Hz
インバータ	容量	力行：3,000kW，回生：2,100kW（S種）
	構成	三相インバータ×6多重
	PWM方式	9パルス（450Hz）
	冷却	強制風冷方式
多重変圧器	容量	3,124kVA（S種）
	構成	22kV/6×850V

3.3　PWM 変換装置の主回路技術

変換装置は三相変換器6多重構成とし，1多重は IGBT を3個並列接続した上下アーム1相分のユニット3台で構成している。

単位インバータユニットの回路構成を**図8**に，外観を**図9**に，変換装置の仕様を**表4**に示す。以下にユニットの特長を述べる。

(1)　IGBT のスナバレス3並列接続

今回開発したユニットは，IGBT を3並列接続して単位インバータの大容量化を図ることと，素子過電圧保護のためのスナバ回路を省略することにより，変換装置の小型化を実現した。

図6　PWM 変換装置の主回路構成

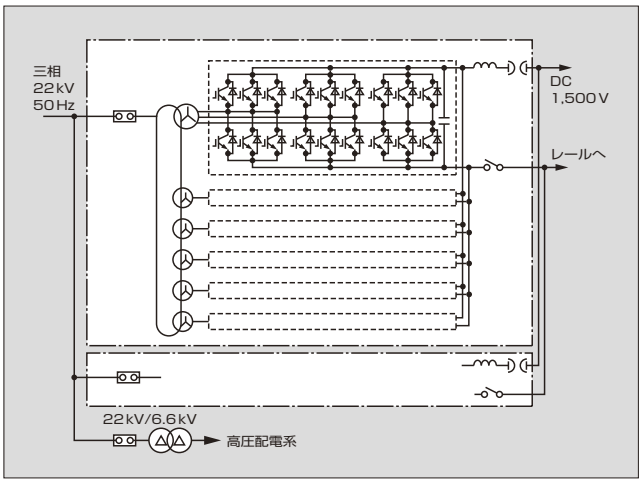


図7　PWM 変換装置インバータ盤の外観

IGBT を並列接続する場合，相互の電流分担の均等化が課題となる。今回，この課題を解決するために IGBT3 並列間の特性をバランスさせることに加え，部品配置や主回路およびゲート接続の配線長を考慮している。また，

IGBT の特性は温度によっても変化するため，IGBT のケース温度がバランスするよう冷却にも配慮し，並列接続を実現した。

主回路配線技術として，IGBT や直流コンデンサなどの部品配置を適正化するとともに，対向する導体と絶縁物が一体となったラミネートタイプのバーを適用し，低インダクタンス構造としている。この低インダクタンス構造とゲート駆動条件の最適化により，IGBT をスナバレスで使用することが可能となった。

また，直流コンデンサは，モールドタイプとすることにより，軽量化，安全性の向上を図った。

(2)　短絡保護

今回使用したユニットでは，万一，ユニット内で短絡故障が発生した場合，IGBT のゲート駆動回路において短絡電流を検知し，IGBT 自身でソフト遮断を行い，短絡電流を抑制する保護方式を採用している。ゲート駆動回路では，この短絡保護を行うと同時に，制御装置へ異常状態を伝送し，変換装置システムを安全に停止させている。

また，ヒューズによる保護を併用することで，短絡保護回路が動作しない場合でも安全に停止するように信頼性の向上を図っている。

(3)　ユニット構造

図 8　PWM 変換装置インバータユニットの回路図

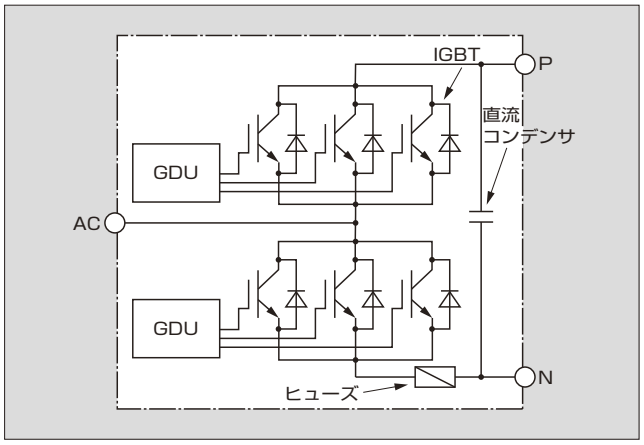
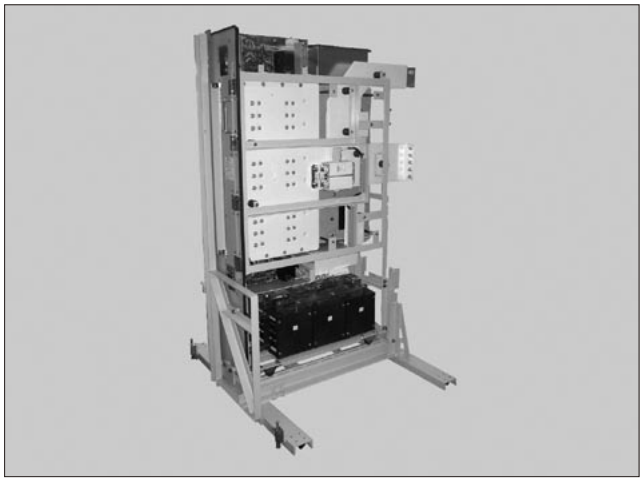


図 9　PWM 変換装置用インバータスタックの外観



ユニットは，引出し可能となるようにキャスタを取り付け，盤体から引き出す際に，昇降リフタを不要とし，ユニット交換や保守・点検時の作業性・安全性を向上させた。

また，ユニットを薄型形状とし，部品を平面状に配置して，部品へのアクセスを容易にし，保守・点検作業を容易に行えるようにした。

(4)　冷　却

ユニット冷却は，強制風冷方式を採用した。

前述したように，IGBT のケース温度がバランスするよう，個々の IGBT 用ヒートシンクへの冷却風量をバランスさせる構造としている。また，冷却風の流路を冷却が必要な箇所に限定することにより，じんあいがユニット内や盤内に拡散することなく，清掃を容易に行えるよう配慮した。

冷却ファンは，3 ユニットで 1 台取り付けることにより，使用個数を減らし，交換や保守・点検作業を簡素化した。

3. 4　制御技術

PWM 変換装置の制御装置には，全体制御用の 64 ビット RISC（Reduced Instruction Set Computer）プロセッサと，変換器制御用の 32 ビット DSP（Digital Signal Processor）の 2 種類の浮動小数点プロセッサを採用している。これらのプロセッサは，並列演算を行い，高速・高精度制御を実現している。また，自己診断機能やアナログ信号・ゲートパルスのトレースバック機能を備え，信頼性の向上と故障解析の迅速化を図っている。

図10に PWM 変換装置の制御ブロック図を示す。

(1)　直流出力定電圧制御

直流出力電圧指令（力行時：1,500 V，回生時：1,530 V）と直流出力電圧検出の偏差をなくすように定電圧制御（AVR）を行い，この AVR の出力と直流出力電流検出を加算した値を，PWM 変換装置の有効電流指令としている。AVR は，約 100 μm 周期での高速演算を行うことにより，微小な直流出力電圧変動に対する追従を可能にしている。また，あらかじめ直流出力電圧検出器の特性を測定し，検出器のオフセットや検出誤差を自動的に補正することにより，直流出力電圧検出精度 ± 0.5 % 以下を実現している。

(2)　過負荷制限制御

上記のように生成した有効電流指令を，力行時 300 %・回生時 210 % の過負荷制限を行い，負荷が過大となった場合においても過負荷容量内での安定した運転を実現している。

表 4　PWM変換装置インバータユニットの仕様

項　目	仕　様
定格出力電圧	1,500 V
適 用 素 子	モジュール型IGBT3.3 kV　1.2 kA
素 子 構 成	1S3P2A
スイッチング	450 Hz
点 消 弧 信 号	光絶縁方式
冷 却 方 式	強制風冷

図 10　PWM 変換装置の制御ブロック図

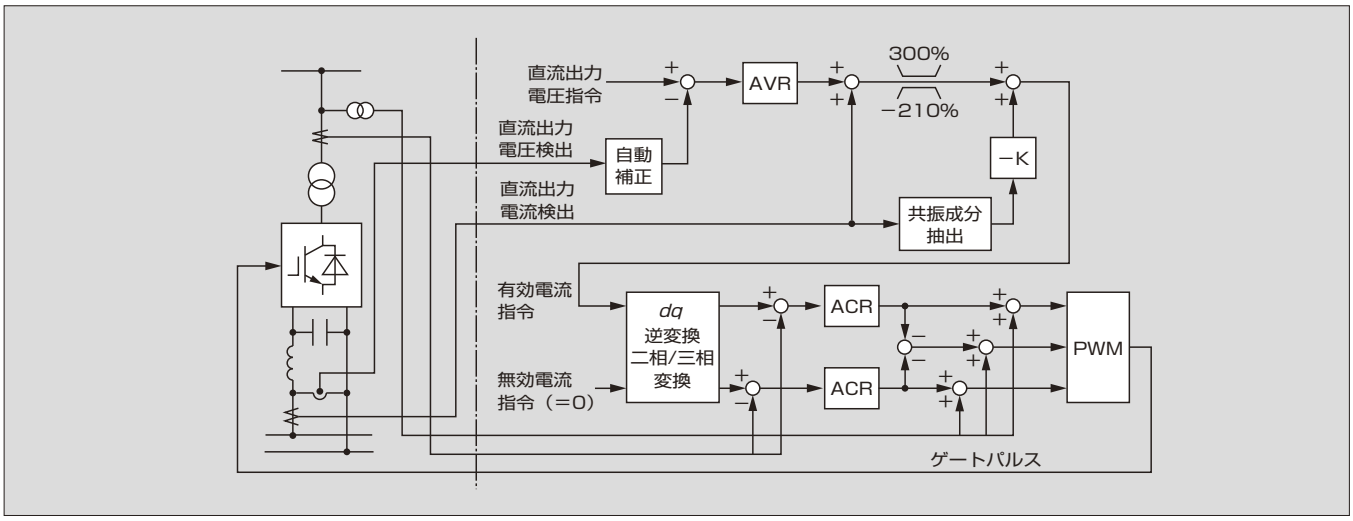
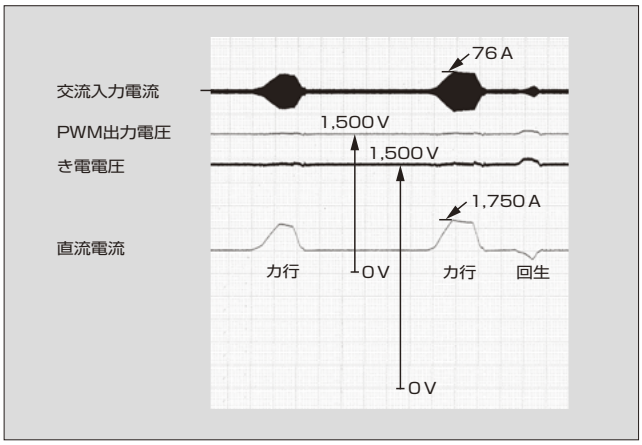


図 11　PWM 変換装置の実負荷試験結果



(3)　共振抑制制御

車両や隣接変電所の PWM 変換装置との共振を抑制する必要がある。そのため，直流出力電流検出から共振電流分だけを抽出し，抽出した共振電流分と逆極性の電流指令を有効電流指令に加算することにより，共振抑制を行っている。

(4)　力率 1 制御

有効電流指令と無効電流指令を交流の電流指令に変換して，約 100 μs 周期での高速な電流制御（ACR）を行うことにより，力行・回生時とも力率 1 運転を実現している。また，PWM パルス数として 9 パルス，6 多重構成とすることにより，発生高調波の低減も実現し，フィルタレスで高調波規制値をクリアしている。

3. 5　フィールド試験結果

PWM 変換装置の直流電圧の制御性能を評価するために実施した実負荷試験結果を**図11**に示す。車両力行時には直流電圧を 1,500 V に，車両回生時には 1,530 V に制御する仕様に対して，直流電流の変動によらず，力行，回生の各モードで直流電圧が仕様どおりに制御していることを確認した。

4　あとがき

電気鉄道地上設備用パワーエレクトロニクス装置としてスイッチングデバイスに IGBT を適用した自励式 SVC と PWM 変換装置について，システム構成，主回路技術，制御技術などの特長およびフィールド試験結果について紹介した。電力の高信頼性，高安全性の要求に応えるため，パワーエレクトロニクス技術を利用した高性能な電力変換装置の適用拡大が期待されており，新しい電力変換装置の開発などを推進していく所存である。

最後に，自励式 SVC および PWM 変換装置の開発・運用にあたり，ご指導・ご協力をいただいた関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

(1)　Takahashi, Y. et al. The Power Pack IGBTs（High Power Flat-Packaged IGBTs）. IPEC Tokyo. 2000, p.269-274.

(2)　鈴木明夫ほか．大容量 SVC 用平形 IGBT 直列スタックの開発．電気学会産業応用部門全国大会．2001.

(3)　丸山宏二ほか．IGBT 直列接続時の電圧クランプ回路の検討．平成 11 年電気学会全国大会．no.1008, 1999.

(4)　Fujii, K. et al. Self-commutated Flicker Compensator applying Flat-packaged IGBT. EPE-PEMC2002.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。