

# 大電力パワーデバイスを適用した電力変換技術

## Power Conversion Technology Applying High-Power Semiconductors

松本 寿彰

田井 裕通

四戸 孝

■ MATSUMOTO Toshiaki

■ TAI Hiromichi

■ SHINOHE Takashi

大電力パワーデバイスを適用した電力変換技術は、電力分野、産業分野、鉄道交通分野などの社会インフラを支えるパワーエレクトロニクス装置の重要な技術となっている。これらの装置は社会的に影響が大きいため、安定性と耐久性が要求され、また、近年の省エネルギーの必要性から高効率化がますます重要となる。

東芝は、コア技術であるパワーデバイスや主回路制御・保護、冷却、実装、シミュレーション技術、電動機・電源への応用などについて研究・開発を行い、電源系統向けに高い信頼性を、プラントや鉄道向けに小型・軽量化を可能にするなど、顧客ニーズに応じた各種パワーエレクトロニクス製品を提供してきた。今後も、高性能で品質の高い魅力ある製品を提供していく。

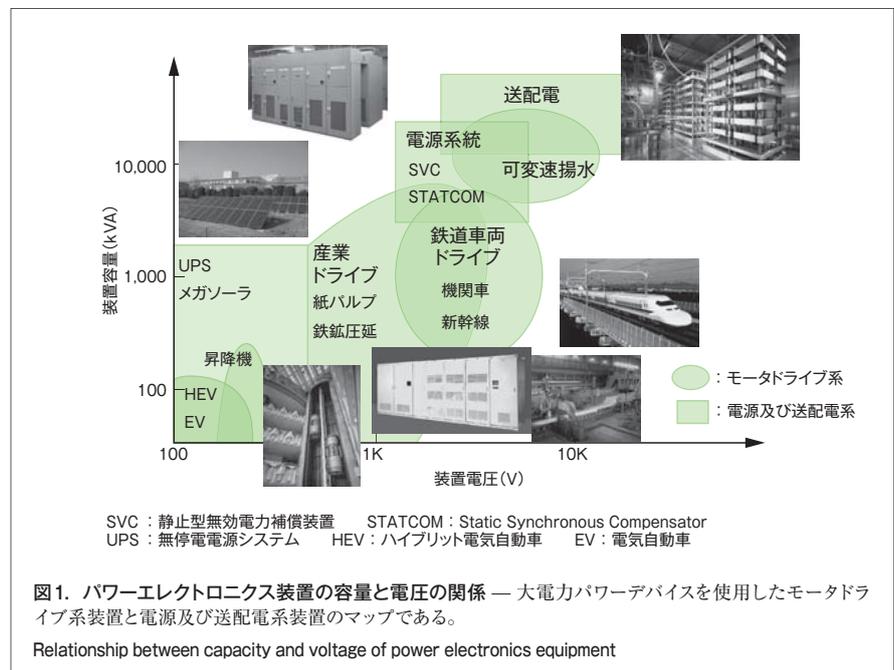
Power conversion technology applying high-power semiconductors has now become an important technology that supports various social infrastructures including power systems, industrial systems, and railway systems. Due to its vital role in society, such power electronics equipment must provide high stability and high durability. Moreover, high efficiency is increasingly demanded due to the rising need for energy conservation in recent years.

Toshiba has been conducting research and development of core technologies in this field, including power devices, control circuits, cooling systems, mounting methods, simulation techniques, and techniques for the application of motors and power systems. We have achieved a power supply system with high stability, as well as miniaturization of an industrial plant system and a railway system. We will continue to supply various power electronics products offering high performance and high quality to meet the needs of customers.

### パワーエレクトロニクス技術の進展

大きなエネルギーを電力の形で効率的に活用する場合、電流が流れることで失われるジュール熱を最小にするように電圧を高めて使用することが多い。電力変換などのために電力用半導体を用いたパワーエレクトロニクス装置は、様々な用途に対して、多種多様な装置電圧と装置定格がある(図1)。市場や分野によって機能が多様化し、一方、どの製品も省エネルギー、高効率化、及び性能向上が求められ、電動機など関係する装置と連携した全システムの信頼性、稼働率向上、リードタイム短縮などの要求が強い。また、電力や交通のような公共性の高い社会インフラでは、特に安定性と耐久性が重視される。加えて、近年、銅や鉄材料の高騰を受け、小型・軽量化の要求が高まっている。

これらのパワーエレクトロニクス装置は、装置容量と装置電圧に応じて大電力パワーデバイスと様々な電力変換技



術を駆使して実現されている。送配電向けではサイリスタを用いて数百MWという巨大な容量の変換器を構成し、また、新幹線や機関車などの鉄道車両ドライブ、及び紙パルプや鉄鋼圧延プラントな

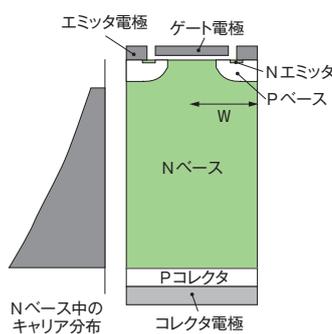
どの産業ドライブでは、東芝が提案したIE効果(Injection Enhancement Effect: 注入促進効果)([囲み記事参照](#))を適用した低損失な大容量IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor)

## IGBTの高耐圧化を可能にしたIE効果

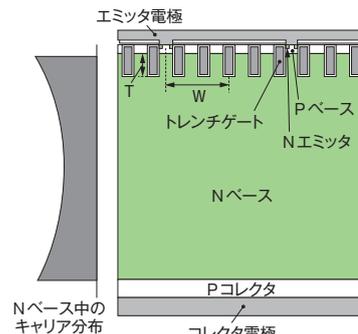
プレーナゲートを持つIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)の断面構造とNベース中のキャリア分布を図aに示す。キャリアはエミッタ側に近づくにつれて減少するため、高耐圧化するとキャリアの少ない領域が厚くなるので電圧降下が増大するという問題があった。

図bはトレンチゲートを持つIEGTの断面とキャリア分布である。トレンチ部のエミッタ電極への接触部分を間引いてハーフセル長(W)を長くしている。このためNベースのキャリアが、エミッタ電極へ抜ける抵抗が高くなり、キャリアの抜けが抑制されてキャリアの蓄積が起きる。トレンチ深さ(T)を長くすることも抵抗を高める効果がある。

当社は、このようにエミッタ側へのキャ



図a IGBTのチップ断面構造とキャリア分布



図b IEGTのチップ断面構造とキャリア分布

リアの抜けを抑制し、結果としてキャリアが注入蓄積されたようにすることをIE効果として提案した。IE効果を生かし特性の改善構造を適用したIGBTをIEGTと呼んでいる。

図aのプレーナ型でも図中のWを長くすることで、トレンチ型より効果は弱まるが

同様にIE効果が得られる。これら以外の方法として、Pベース直下のNベース領域の濃度を高めることでキャリアを蓄積する方法もある。

1993年の提案から既に15年を経て、IE効果は高耐圧、低耐圧を問わずIGBTの特性改善に広く利用されるようになってい

が用いられている。これらの代表的なパワーエレクトロニクス装置に要求される機能と特徴を表1に示す。

このように様々な機能を持つパワーエレクトロニクス装置は、装置容量と装置電圧に応じて、パワーデバイス、主回路、制御などのコア技術が適用される。ここでは、大容量化技術における課題と東芝の取組みについて述べる。

### パワーデバイスと大容量化

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) は1980年代に実用化されて以来、トレンチゲート化、IE効果の適用、薄ウェーハパンチスルー構造化、高遮断耐量の実現など、年々性能改善が進み、制御の容易性とあいまって高耐圧パワーデバイスの主役となってきている。現在、耐圧6.5 kVクラスまでの大電力IGBTがパワーエレクトロニクス装置に使われるようになっており、装置の小

型化と高効率化が実現されてきた。

一方、次世代パワーデバイスとしてSiC(炭化ケイ素)、GaN(窒化ガリウム)などのワイドバンドギャップ半導体が注目されている。高耐圧領域でのデバイス開発が進んでいるのはSiCで、耐圧10~20 kVの超高耐圧領域に至るまで数多くの報告がなされている。1チップ当たりの電流容量も100 Aを超えるものがいくつか報告されるようになってきており、数百kVA級のインバータ実証が行われるようになってきた。GaNについて

表1. 代表的なパワーエレクトロニクス装置の機能と特徴

Functions and features of power electronics equipment

項目	電源系統	プラント向け	機関車	新幹線	新エネルギー
装置	自励式無効電力補償装置 (STATCOM)	鉄鋼圧延用モータドライブ	大出力モータ駆動用鉄道車両ドライブ	分散型鉄道車両ドライブ	メガソーラー用パワーコンディショナ
機能	系統の安定性向上 電源品質の向上	生産性の向上 圧延品質の向上	大出力車輪空転抑制	大出力	発電量の最大化
特徴	高信頼性	高効率, 小型	高効率, 小型, 高信頼性	高効率, 小型・軽量, 高信頼性, 低騒音	高効率, メンテナンスフリー
主回路	2レベル変換器	2レベル変換器 3レベル変換器	2レベル変換器 3レベル変換器	3レベル変換器	2レベル変換器
システム構成	多重化	多重化	パワー素子の並列接続	パワー素子の並列接続	並列多重化
制御	PWM制御	PWM制御	PWM制御	PWM制御	PWM制御

PWM: Pulse Width Modulation

は高耐圧領域を意識した研究が端緒についたばかりであり、縦型デバイス用 GaN 基板成長技術の進展と合わせて今後の展開が注目される。

SiC ダイオードは、耐圧 3~4 kV 程度を境にして、低耐圧側では SBD (Schottky Barrier Diode) や JBS (Junction Barrier Controlled Schottky Diode)、高耐圧側では PiN ダイオード (p-intrinsic-n Diode) が用いられる。材料特性がストレートに発揮できる SBD では、SiC の材料限界に近い特性が得られるようになってきている (図 2)。当社独自構造の Super-SBD<sup>(注1)</sup> では、耐圧 2,700V、特性オン抵抗 2.57 mΩcm<sup>2</sup> と SiC 材料限界に迫る世界最高<sup>(注2)</sup> の低損失特性を実証している<sup>(1)</sup>。

また、SiC 基板の高品質化によって SBD の歩留りは大幅に改善されてきており、100 A/チップ以上の大電流チップの報告もいくつか見られるようになってきた。Si-IGBT との組合せによるハイブリッドペア構成での低損失化、高周

波化、小型化、及び低 EMI (Electromagnetic Interference) 化の研究が盛んに行われており、一部では商用化への動きが始まっている。更に高耐圧を指向した PiN 構造では、実用化の大きな障害となっていたオン電圧劣化 (通電状態で結晶欠陥が増殖してオン電圧が増大する不良モード) の問題は対策のめどが立ってきており、今後の実用化が期待される。

高耐圧大容量変換器への適用効果の一例として、現行の新幹線をベースに電動機駆動用主変換器のダイオードを耐圧 3.3 kV の SiC ダイオードに置き換えた場合の損失低減効果を試算した。その結果、力行、回生ともに 30% の損失低減が見込まれることがわかった。

高耐圧 SiC スwitchングデバイスの開発も活発で、パワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) や JFET (Junction Field-Effect Transistor)、バイポーラトランジスタ、GTO (Gate Turn-off Thyristor)、

IGBT など各種パワーデバイス構造の試作結果が報告されている。国内では主に耐圧 1,200 V クラスの MOSFET の研究・開発が活発に行われており、一部でサンプルが入手できるようになってきた。しかし、数十 A 以上の大電流チップで MOS ゲート絶縁膜の信頼性を確保するためには、ゲート酸化膜形成プロセスの開発<sup>(2)</sup> だけでなく、SiC エピタキシャル基板の転位密度を更に低減する必要がある。

SiC パワーデバイスの適用効果は低損失化と小型化の二つに大別される。低損失化の観点からは、上述した新幹線での試算のようにダイオードの置換えで 30%、スイッチングデバイスまで置換えると更に倍以上の損失低減が見込まれる。小型化は、パワーデバイスの低損失化による冷却部品の小型化と、高周波化による受動部品の小型化により実現することができる。その結果として、パワーデバイス自体は割高であっても、システム全体としては小型でかつ安価になり、普及が加速されるという視点が重要である。

## 電力変換器の主回路と大容量化

電力変換器において、主回路技術はパワーデバイスに次いで大容量化に大きな影響を与える。主回路技術としては、回路構成に関する技術と、パワーデバイスの制御に関する技術の二つが重要である。ここでは主回路の構成技術について述べる。

### ■マルチレベル変換器技術

基本的な主回路構成として 2 レベルインバータがあり、交流出力電圧 +V と -V の二つの電圧レベルの間でスイッチングする。これに対し、直流電源を二つ以上に分割し、分割された各レベルを出力電圧とすることで出力のレベル数を 2 レベルから 3 レベル以上に増大させたのがマルチレベル変換器である。マルチレベル電圧型変換器は出力の電圧レベル数

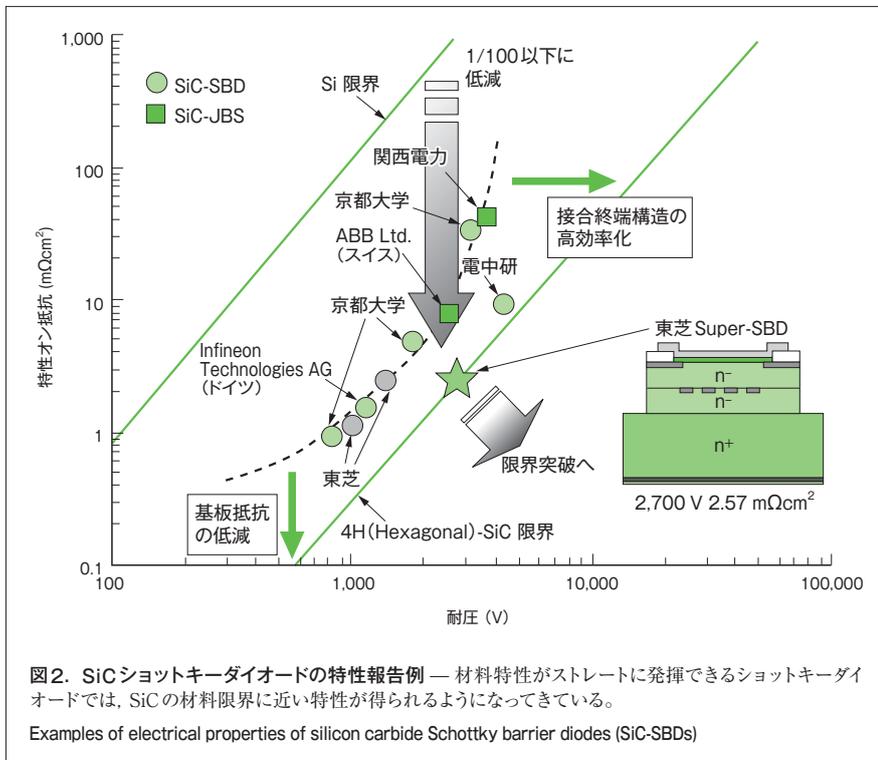


図 2. SiC ショットキーダイオードの特性報告例 — 材料特性がストレートに発揮できるショットキーダイオードでは、SiC の材料限界に近い特性が得られるようになってきている。  
Examples of electrical properties of silicon carbide Schottky barrier diodes (SiC-SBDs)

(注 1) Super-SBD  
ドリフト層中央に浮遊 P 型層を埋め込んだフローティングジャンクション構造の SBD。  
(注 2) 2008 年 8 月現在、当社調べ。

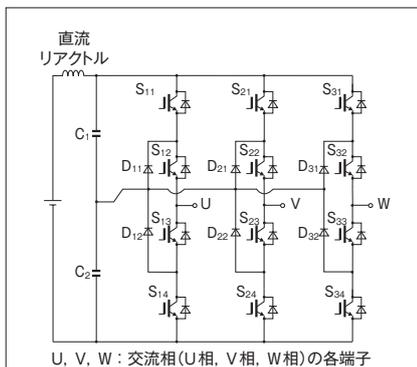


図3. NPCインバータの主回路構成 — 2レベルインバータに対して、3レベル(NPC)インバータでは、主回路用品は2倍必要になり、更に中性点クランプダイオードが必要になるが、出力電圧と容量は2倍になり、等価スイッチング周波数も2倍になる。

Configuration of neutral-point-clamped (NPC) inverter circuit

を増大させることによって、同一のスイッチング周波数で高調波を低減させることが可能になる。同一の定格電圧のパワーデバイスを用いるならば、レベル数を増やせばそれだけ変換器の出力電圧は増大する。ただし、直流電源を分割する必要があるため、レベル数が多くなるほど主回路構成が複雑化していく。

マルチレベル変換器では、NPC (Neutral-Point-Clamped) 方式<sup>3)</sup>とも呼ばれる3レベル変換器が多用されている。3レベル変換器(図3)は2レベル変換器に対して、パワーデバイス(S<sub>11</sub>~S<sub>34</sub>)の数が2倍、加えて中性点クランプダイオード(D<sub>11</sub>~D<sub>32</sub>)が必要になるが、同一電圧定格のパワーデバイスを用いながら出力電圧は2倍に増大する。そして3レベル変換器の出力電圧の高調波レベルは、2倍のスイッチング周波数で動作する2レベル変換器と同等となる。

### ■多直列技術

IGBTの定格電圧は現在6.5 kVまでのものが入手できる。これを用いても変換器の電圧は、2レベル変換器で直流3 kV、3レベル変換器にしても直流6 kVが最大となる。電力系統向け無効電力補償装置(STATCOM: Static Synchronous Compensator)のような高圧で大電

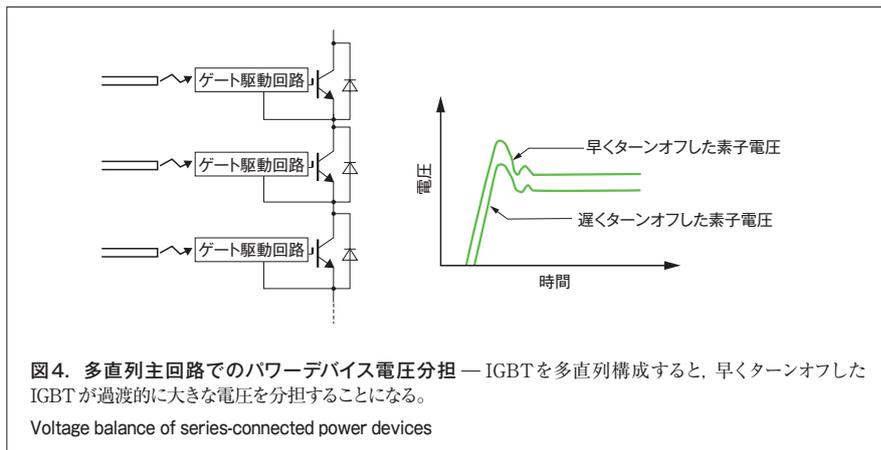


図4. 多直列主回路でのパワーデバイス電圧分担 — IGBTを多直列構成すると、早くターンオフしたIGBTが過渡的に大きな電圧を分担することになる。

Voltage balance of series-connected power devices

力の変換器が望まれる用途では、変換器出力電圧を向上させる必要がある。そのため技術が、多数のパワーデバイスを直列構成で用いる多直列技術である。他励式変換器ではサイリスタを多直列で用いる技術は実用段階にあり、多くの高圧直流送電用変換器で用いられている。一方、多直列構成を採用する自励式変換器では、パワーデバイスの過渡的な電圧分担のばらつきが問題となる(図4)。

一般に高耐圧IGBTのターンオフ時間は数 $\mu$ s程度でターンオフ時のコレクタエミッタ間電圧(V<sub>ce</sub>)の上昇率dV<sub>ce</sub>/dtは数kV/ $\mu$ sであるから、ターンオフ時間のわずかなばらつきが大きな分担電圧の差となってしまう。そのため、自励式変換器の多直列化では、過渡的な電圧分担の改善が必要となる。従来はパワーデバイスの過渡的な電圧分担はスナバの付加によって解決していたが、当社ではアクティブゲート駆動技術によるアプローチを行っている(“パワーデバイスの制御と大容量化”の章参照)。従来、各パワーデバイス個別に必要なだったスナバはこうした技術によってスナバレス化しつつある。

### ■多並列技術

パワーデバイスの多並列化による変換器電流容量の増大はこれまでも用いられてきた技術である。多並列化では、パワーデバイス間の電流バランスをとる

要素技術が必要となってくる。電流バランスを支配するのは、静的にはパワーデバイスのオン電圧(V<sub>ce(sat)</sub>:コレクタエミッタ間飽和電圧)であり、このオン電圧の選定によって管理できる。過渡的な電流バランスを支配するのは、主にパワーデバイスを接続するブスバー(配線用部品)のインダクタンスであり、このインダクタンスを合わせる必要がある。ことに最近の電力変換器では、ターンオフ時のサージ電圧を低減するために、ブスバーのインダクタンスを小さくする密着ブスバーなどを採用する例が多いが、こうした低インダクタンス化が進むにつれて、インダクタンスを合わせることはより困難になってくる。当社は設計段階において、ブスバーのインダクタンスを解析し、回路解析で電流バランスに問題が生じないことを確認している(“動作解析と大容量化”の章参照)。

### ■多重変換器

マルチレベル変換器が変圧器を用いないのに対して、変圧器やリアクトルを用いることを前提として出力を多レベル化するのが多重変換器である。以前からよく用いられる技術で特に大容量の変換器を構成する際に有用だが、変圧器システム全体のサイズや重量が大きくなるために、近年はトランスレス化や単機容量の増大に開発の焦点が向くことが多い。

## パワーデバイスの制御と大容量化

ここでは、パワーデバイスの制御を大容量化という観点から取り上げる。前述のとおり、大容量化の一つの手段としてパワーデバイスを多直列で使う手法があり、そのためにはパワーデバイスの過渡的な電圧バランスの制御が重要である。この問題に対して、当社ではアクティブゲート駆動技術によるアプローチを行っている<sup>(4), (5)</sup>。アクティブゲート駆動技術は、パワーデバイスの電圧を監視し、ターンオフ時の過渡的なサージ電圧をゲートに対するフィードバック制御によって一定の電圧以下に抑える技術である(図5)。

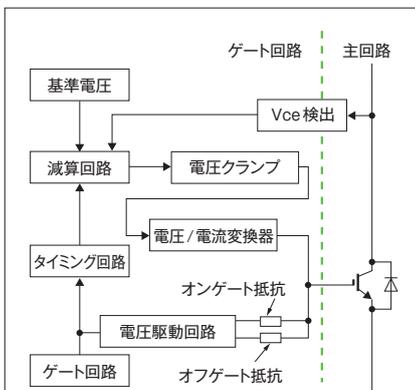


図5. アクティブゲート制御回路構成 — IGBTのVceを検出して基準値と比較し、電圧/電流変換器に入力して電流出力をゲート端子に接続する。ターンオフ時にVceが基準値を超えると、Vceに比例した電流がゲート端子に流入してスイッチングを遅らせ、Vceをある一定の値以下に抑える。

Configuration of active gate control circuit

アクティブゲート駆動を適用することで、スナバなどの主回路用品を削減しながら、パワーデバイスに印加される電圧を制御によって抑えることが可能になる。スナバの削減はパワーデバイスのスイッチング損失の増大となるが、ブスターのインダクタンスを低減する実装技術を適用することによって、損失の増大を抑えることができる。

このように、回路構成面では多直列、制御技術の面ではアクティブゲート駆動技術の二つの技術を組み合わせることによって、多直列自励式変換器の実現

が可能になる。

## インバータ制御と電動機の大容量化

GTOやIGBTなどの自己消弧型パワーデバイスの高速・大容量化と高速演算処理が可能な高性能マイコンの登場により電力変換技術が飛躍的に向上している。

当社は、これまでにパワーエレクトロニクス専用32ビット高性能プロセッサPP7 (PPⅦ: Power Electronics Processor for Various Inverter Control Integration)を開発し、使用してきた。インバータ装置を制御するパワーエレクトロニクスロジック回路を内蔵し、エレベーター、電車、産業用モータドライブなど多くの装置に搭載して、制御の高度化と高速化を実現してきた。近年、より高速・高性能化した、またより多くの用途に適用可能とした新しいパワーエレク

トロニクスプロセッサPP7EX<sup>(6)</sup>(表2)を開発した。

PP7EXでは、プロセスや基本命令の実行時間を変更し、新しい命令や高速大容量のプログラムメモリ(RAM)を実装して、3倍の処理能力を実現し複雑で高度な制御を可能にした。また、24本のゲート信号出力を設けることで、種々のインバータ装置に対し複数台一括制御を可能にした。例えば、NPCコンバータとNPCインバータを制御できるなど幅広いパワーエレクトロニクス機種に対応できる。また、ソフトウェア処理能力の向上により複雑で高度な制御を可能とし、パワーエレクトロニクス製品の更なる高性能化を目指している。

当社が開発している制御技術の一つとして瞬時電流形PWM(iPWM: Current Controlled Pulse Width Modulation)制御<sup>(7)</sup>がある。iPWM制御は電流の瞬時値比較によりPWMパルスを直接生成することを特徴とし、定

表2. PP7とPP7EXの相違点

Differences between PP7 and PP7EX power electronics processors

項目	PP7	PP7EX
プロセス	0.6μm	0.25μm
パッケージ	240ピン 30×30 mm	240ピン 30×30 mm
実行時間(基本命令)	3クロック(45 ns)	1クロック(20 ns)
内部RAM	2 kW (32ビット)	12 kW (32ビット)
演算レジスタ	16ビット×256	16ビット×256 16ビット×16×8バンク
新しい命令		ベクトルの大きさ $r = \sqrt{d^2 + q^2}$ ベクトルの角度 $\theta = \tan^{-1} \frac{q}{d}$ トルク軸 磁束軸 回転座標系
PWMゲート信号出力数	16	24

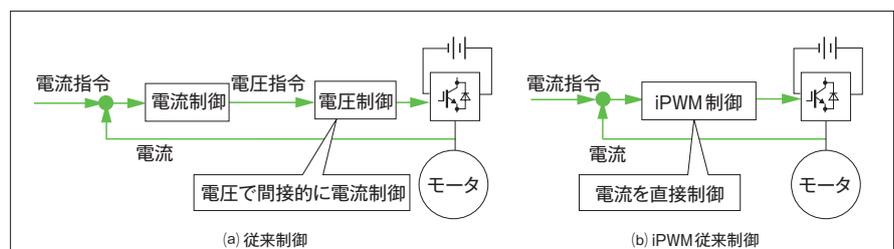


図6. PWM制御とiPWM制御の違い — 従来PWM制御は電圧指令を経由して間接的に電流を制御するが、iPWM制御は電流を指令値と比較して直接制御するため、電流応答が速い。

Difference between conventional pulse width modulation (PWM) control and current-controlled PWM (iPWM)

常時は一定間隔のパルス出力を行い、指令値が急変した場合はパルスを急変させ、電流を高速に指令値に追従させることが可能である(図6)。PP7EX内にiPWM制御のハードウェア回路を搭載することで、iPWMの高速追従性を実現するインバータ製品の実用化に向けた開発を加速している。

適用先の一つとして期待されているのが鉄道車両用主変換装置のドライブ制御である。iPWM制御では電流リップル波形を直接制御するので、応答性が優れ、変換装置のスイッチング周波数を最小限に抑えてパワーデバイスの発生損失を低減できる。

また、ほかの適用例として、大容量電動機(図7)のドライブ制御がある。電

動機を大容量化するために、巻線の多重化が用いられるが、多重巻線モータは巻線間の磁気結合による干渉が発生する。このため、多重巻線電動機をインバータで駆動する場合、非干渉制御が必要になるが、iPWM制御を適用すれば、非干渉のための特別な制御の追加なしに干渉の抑制が可能なのが解析から得られている。

このように、iPWM制御の適用により大容量電動機駆動と高性能化が期待されている。

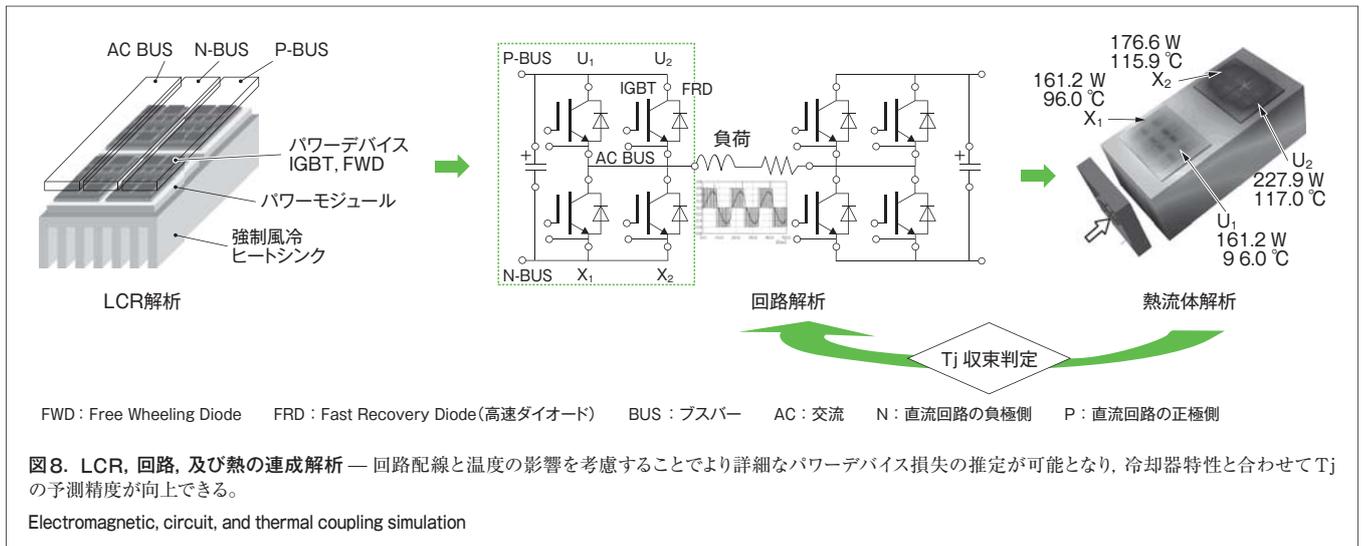
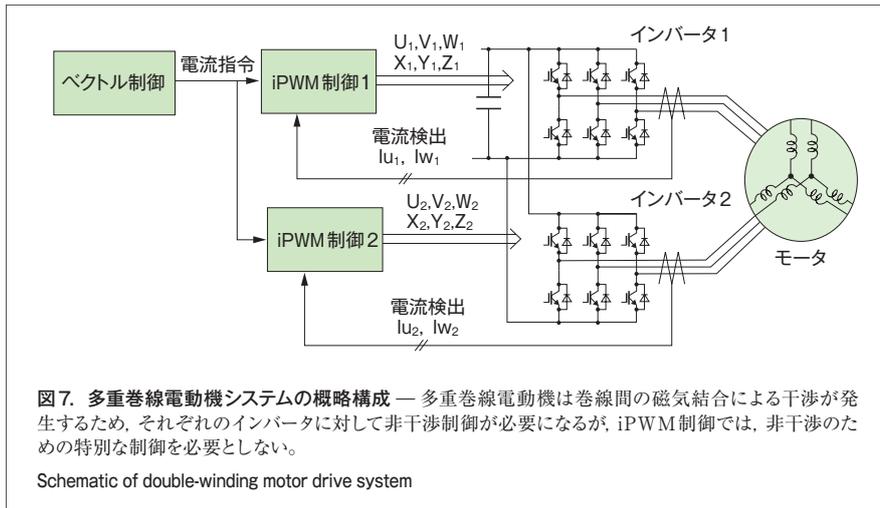
### 動作解析と大容量化

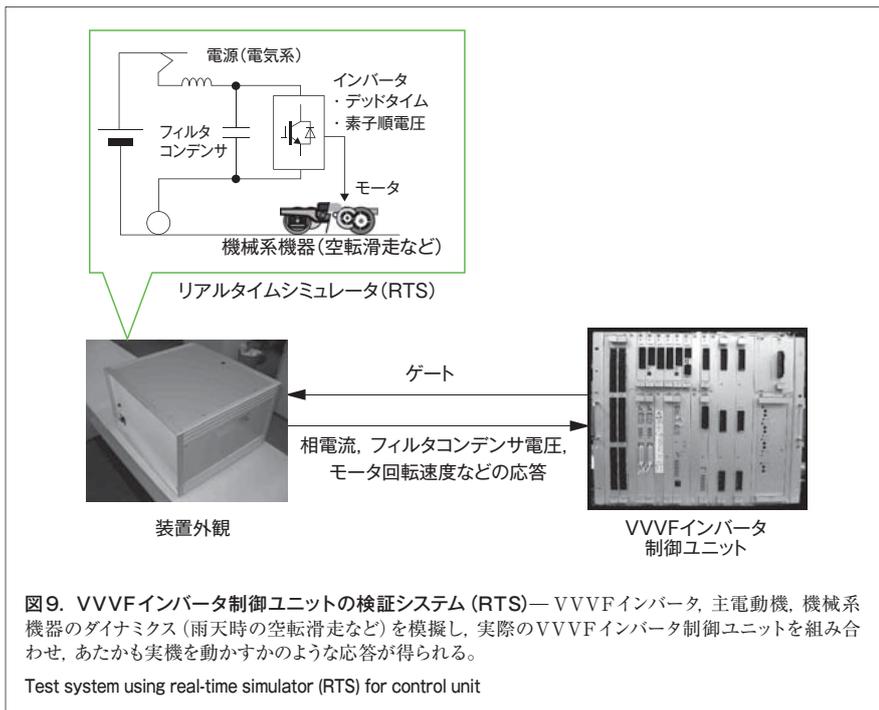
パワーエレクトロニクス製品の設計では、電磁界や、熱、応力、電気回路、制

御ダイナミクスなど、多岐にわたる検討が必要になり、加えて、大容量電力変換装置の開発でも最適設計と安定な製品性能が求められる。また、市場へのタイムリーな製品投入のためには開発期間の短縮が必須となる。このような製品設計プロセスでは各種のシミュレーションを行い、設計の事前検証と最適化を行って大容量変換装置の多品種少量生産に取り組んでいる。

例えば、電力変換装置の主幹部品であるIGBTなどのパワーデバイスは、配線構造の電磁気的寄生要素(ストレイインダクタンスや容量)と主回路によって、その動作特性と損失が変化する。これらの特性は、冷却による温度分布の違いにより更に影響を受け、IGBTのスイッチング波形の違いとなり、電流のアンバランスとなって現れる。温度の影響を考慮することでより詳細なパワーデバイスの損失の推定が可能となり、冷却器特性と合わせて、接合部温度( $T_j$ )の予測精度も向上できる。このようにシミュレーションによる解析は装置構造の最適化に寄与している<sup>(8)</sup>(図8)。電気と熱だけでなく電磁気と応力ひずみなど、連成解析は解析が長時間となることが多く、設計方針の策定では、解析規模を縮小して試行回数を増やし構想の絞込みに役だっている。

一方、大容量変換装置では、高信頼





性と多品種少量生産であることからその機能検証試験の制約が大きく, 検証効率の向上が求められている。そこで, 鉄道車両ドライブ装置では, 検証用リアルタイムシミュレータ (RTS) の開発・適用が始まっている。このシミュレータは, VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) インバータや主電動機などの動特性を計算機にて模擬した装置で, 鉄道車両ドライブ装置の制御ユニットを組み合わせることで, あたかも実機を動かすかのような応答を得るものである。

近年では, 演算精度向上のため, 高速演算処理が可能なFPGA (Field Programmable Gate Array) を用いることで, 一部の機能を高速で演算できるようになり, 当社も更なる精度向上と高速応答を目指したRTSを開発した<sup>(9)</sup> (図9)。大容量変換器では現地での最終検証が必要となることが多いが, このようなシミュレータにより工場での装置調整精度を上げることで, 現地での検証期間の短縮が期待される。

## 次世代に向けて

次世代のパワーデバイスとして期待されるSiCの実用化が見え始め, また, 高速なプロセッサの出現とその活用や, 新たな発想による主回路トポロジーと制御の組合せなど, パワーエレクトロニクス装置に必要な要素技術は, ここで述べたようにとどまることなく進歩, 発展している。電力変換を伴うシステムには必ずパワーエレクトロニクス技術が駆使されており, 当社環境ビジョンで大きなテーマである製品使用時の消費エネルギー削減の観点からも, 今後も社会インフラを支えるパワーエレクトロニクス機器の開発に注力していく。

## 文献

- (1) Ota, C., et al. Simulation, Fabrication, and Characterization of 4H-SiC Floating Junction Schottky Barrier Diodes (Super-SBDs). Materials Science Forum. 556 - 557, 2007, p.881 - 884.
- (2) 鈴木拓馬, ほか. 高チャネル移動度と高信頼性を両立したSiC-MOSFET. 東芝レビュー. 63, 10, 2008, p.39 - 43.

- (3) Nabae, A., et al. A New Neutra-Point-Clamped PWM Inverter. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, IA-17, 5, 1981, p.518 - 523.
- (4) Tai, H., et al. "Active Peak Voltage Clamping of FWD Turn-off". IPEC-Niigata 2005.Niigata, 2005-04, IEEJ. p.2162 - 2167.
- (5) Tai, H., et al. "Switching Loss Evaluation of Active Gate Controlled IGBT". EPE-PEMC 2004, Riga, Latvia, 2004-09, EPE. A22161. (CD-ROM).
- (6) 西川浩行, ほか. "新パワエレクトロニクスPP7EX". 平成17年電気学会全国大会講演論文集 第4分冊. 徳島, 2005-03, 電気学会. p.107.
- (7) 塩崎裕一, ほか. "瞬時電流制御型PWMを用いた多重巻線電動機制御". 平成20年電気学会全国大会講演論文集 第4分冊. 福岡, 2008-03, 電気学会. p.218.
- (8) 小谷和也, ほか. "パワエ装置における電気一熱の解析システム". 平成17年電気学会全国大会講演論文集 第4分冊. 徳島, 2005-03, 電気学会. p.19 - 20.
- (9) 結城和明, ほか. "鉄道車両ドライブ向けリアルタイムシミュレータの開発". 平成20年電気学会全国大会講演論文集 第5分冊. 福岡, 2008-03, 電気学会. p.143 - 144.



松本 寿彰  
MATSUMOTO Toshiaki

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター  
産業・自動車技術開発部グループ長。パワーエレクトロニクスの研究・開発に従事。電気学会, 日本機械学会会員。  
Power and Industrial System Research and Development Center



田井 裕通  
TAI Hiromichi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター  
産業・自動車技術開発部主査。パワーエレクトロニクスの研究・開発に従事。  
Power and Industrial System Research and Development Center



四戸 孝  
SHINOHE Takashi

研究開発センター 電子デバイスラボラトリー研究主幹。Si 縦型パワー半導体素子, SiC パワー半導体素子の研究・開発に従事。電気学会, 応用物理学会会員。  
Electron Devices Lab.