

パワーエレクトロニクスを支える デバイスの進化と実装・回路・製品適用技術の発展

Evolution of Devices Supporting Power Electronics and Expansion of Technologies for Mounting, Circuits, and Application to Products

餅川 宏

■ MOCHIKAWA Hiroshi

今後更なる導入が進むと考えられる太陽光発電 (PV) システムなどの再生可能エネルギーを用いた発電では、発電量が天候によって時々刻々変動する。このため、広い出力範囲で効率の高い発電システムが必要である。また、再生可能エネルギーは広い地域に分散配置して発電されるため、需要地まで電力を送るためには効率の高い送電システムも望まれる。更に、需要量と供給量の差を吸収するエネルギー貯蔵システムも必要になる。一方、貴重なエネルギーをむだなく使用するために、より一段と省エネを進めることも重要である。これらを実現するためには、高度なパワーエレクトロニクス技術が不可欠である。

東芝は、電力を創る、送る、ためる、使う、という各場面において、エネルギーをむだなく運用するために、最先端のパワーエレクトロニクス技術を開発し続け、スマートコミュニティの構築を進めている。

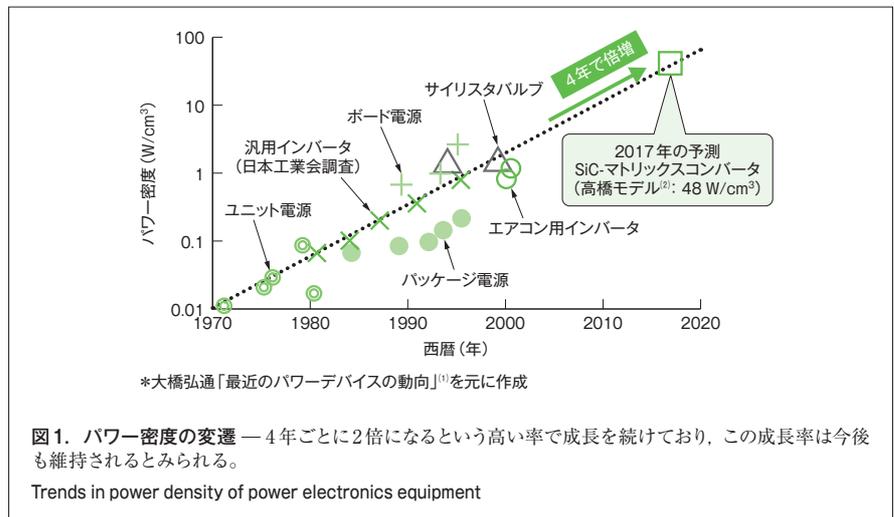
With the ongoing introduction of renewable energy systems including photovoltaic power generation systems, whose output tends to vary according to the weather conditions, power generation systems with high efficiency over a wide output range are required. Power transmission systems must also offer high efficiency, in order to minimize energy losses while transmitting electricity from widely distributed power systems to distant power-consuming areas. Furthermore, there is a growing need for energy storage systems to balance supply and demand. On the other hand, to avoid wastage of precious energy, it is also important to make greater efforts to enhance energy conservation.

To fulfill these diverse requirements, Toshiba has been continuously engaged in the development of state-of-the-art power electronics technologies for optimal efficiency of electricity operation in each process from electricity generation through to transmission, storage, and consumption, aimed at the construction of smart communities.

パワー密度の向上

パワーエレクトロニクス装置の性能は、パワー密度という指標で評価される場合が多い。パワー密度は、“装置の出力/装置の体積”で定義され、装置が小型になるほど大きくなる。パワーエレクトロニクス装置のパワー密度の推移を図1に示す。1970年以降、4年間で2倍になる割合で成長が継続している。これは、装置の出力が同じ場合には、装置の体積が4年ごとに半減していることに相当し、半導体メモリにおけるムーアの法則^(注1)に迫る高い成長率であることを示している。再生可能エネルギーを用いた発電の導入加速や、スマートコミュニティの普及促進、電気自動車 (EV) の普及、二酸化炭素 (CO₂) 排出

(注1) G. Mooreが1965年に提唱した、「半導体の集積密度は18~24か月ごとに2倍になる」という、経験に基づいた法則。



量のいっそうの削減、などの社会情勢の変化に伴い、これまでと同様の高い成長率が今後も継続すると考えられる。

このような高い成長率を支えているのは、装置の損失低減や、冷却性能の向上、耐熱温度の向上、高密度実装など、複合技術の集大成であり、東芝は、これら

パワーエレクトロニクス装置のパワー密度向上に関する技術開発を続けている。

パワーデバイスの進化

パワーエレクトロニクス装置の損失低減にもっとも寄与するのが、パワーデバ

イスの性能である。

パワーデバイスの性能を向上させるため当社が取り組んできた、主な技術について以下に述べる。

■ IEGT

現在、パワーエレクトロニクス装置には、IGBT（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）が、多用されている。当社は、IGBTのオン電圧を低減する独自のデバイス構造を開発し、IEGT（Injection Enhanced Gate Transistor）と命名し、実用化している^{(3), (4)}。他のパワーデバイスが、GTO（Gate Turn-Off Thyristor）のように円形ウェーハ構造なのに対し、IEGTは数十枚の四角いIEGTチップを円形のケースに収納した構造となっている⁽⁵⁾。

IEGTは、微細化を一段と進めることで、更に性能改善できることが理論的に解明されている⁽⁶⁾。耐圧2 kV以上のデバイスでは、シリコン（Si）半導体でも、炭化ケイ素（SiC）FET（電界効果トランジスタ）のオン抵抗よりも低くできる可能性がある。

■ SJ-MOSFET

SJ-MOSFET（スーパージャンクション構造の金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ）は、近年急速に性能改善が進んでいる素子である。最近のSJ-MOSFETの損失低減に密接に関係する特性オン抵抗は、年率10%ずつ低減されるという非常に速い改善を続けており、間もなく、耐圧600 Vの製品で、 $10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の大台を切ると見られる⁽⁷⁾。これは、半導体メモリと同様、プロセスの微細化を進めた成果である。特性オン抵抗の低減は、同じオン抵抗と比較するとチップ面積が減りコストが低下することになり、コストの低減は需要の増大につながる。需要がいったん増大し始めると、パワーデバイスでも、ムーアの法則のように、改善サイクルが年々進んでいく可能性がある。今後、PV用のパワーコンディショナ（PCS）や省エネ

機器などへのSJ-MOSFETの適用がいつそう進んでいくと見られる。

■ SiC素子とGaN素子

Siパワーデバイスに対して素子内の電界を1桁高くできるので、耐圧が同じなら素子の厚さを1/10にできる。更に、この結果、導通抵抗を理論的に1/300にできるとされており、次世代素子として期待されている。

SiCパワーデバイスのうちSBD（ショットキーバリアダイオード）は、現在、製品化され、適用が進んでいる⁽⁸⁾。これは、スイッチング素子と組み合わせて使用した際に、スイッチング素子のターンオン時に発生する損失（逆回復損失とターンオン損失）を大幅に低減できる効果によるものであり、組み合わせる相手のスイッチング素子は、Si製のIGBTやSJ-MOSFETでも、その効果を発揮できる。更に、Si製のSBDの耐圧が200 V程度までであるのに対し、SiC製のSBDは3 kV程度の高耐圧まで優れた特性を発揮できる。当社は、Si製のIGBTとSiC製のSBDを組み合わせた場合の損失特性について詳細に検証しており、従来から言われているようにターンオン時の損失が低減するだけでなく、SiC製のSBDでは順回復電圧がないためにターンオフ時の損失も低減することを明らかにした⁽⁹⁾。

一方、SiC製のスイッチング素子、特に現在注目されているMOSFETは、製品へ適用されるようになってきたが、全面的なパワーエレクトロニクス機器への採用には至っていない。これは、原材料であるSiCウェーハの結晶品質が、Siウェーハの高い品質レベルまで到達していないことが大きな要因とされている。SiC製のMOSFETは、チャンネル部のキャリア移動度が期待される値に対して不十分のため、オン抵抗が原理的な想定値に対して大きく劣っている。また、ゲート酸化膜についても、量産製品に必要なレベルの信頼性を確保するため、改善努力が続けられている段階である。

高効率を優先する機器などから徐々に導入が進むと考えられるが、これらの事情により全てのSi製パワーデバイスをSiCに置き換えるには、今しばらく時間が掛かると見られる。

窒化ガリウム（GaN）デバイスは、ウェーハコストを低減するため、低コストなSiウェーハ上に、薄いGaN層を形成し、主電流を薄いGaN層に沿って平面方向に流す横型構造のパワーデバイスが開発されており、量産直前の段階に来ている。しかし、動作中に抵抗が増大する現象など、信頼性の課題がある。これらは、GaN層の結晶品質とデバイス内の電界集中に密接に関係しているとされており、結晶品質のレベル向上と電界集中を緩和するようなデバイス構造の改善などが進められている。

デバイスの冷却と実装技術

前章で述べたように、パワーデバイスを進化させる研究開発が続けられている。しかし、パワーデバイスの性能が改善されるだけでは不十分である。単純な試算を用いてそれを説明する。

同じチップ面積でオン抵抗が1/2に改善された画期的なデバイスが開発された場合を想定する。このデバイスに改善前の2倍の電流を流しても、導通時の電圧降下は改善前と同じである。もし、改善前には2チップを並列に装置に組み込んでいたとすると、新デバイスでは1チップだけで同じ電流を流せることになる。一見、問題なさそうであるが、実は、導通損失によるチップでの発熱は $R \cdot I^2$ （ R : 抵抗, I : 電流）となるため、 R が1/2になっても、 I が2倍であるため、チップの発熱量は2倍になってしまう。また、チップの電流密度が2倍になっているため、チップ配線の通電容量も倍増させる必要が生じる。

このことから、チップに集中する熱を効率よく拡散させる技術が重要であることがわかる。また、小さいチップに損失なく電流を運ぶ配線技術も必要にな

る。このように、デバイスの性能向上を十分に生かすには、デバイスの冷却と実装技術も同時に進化させる必要があり、車の両輪のように発展させていかなければならない。

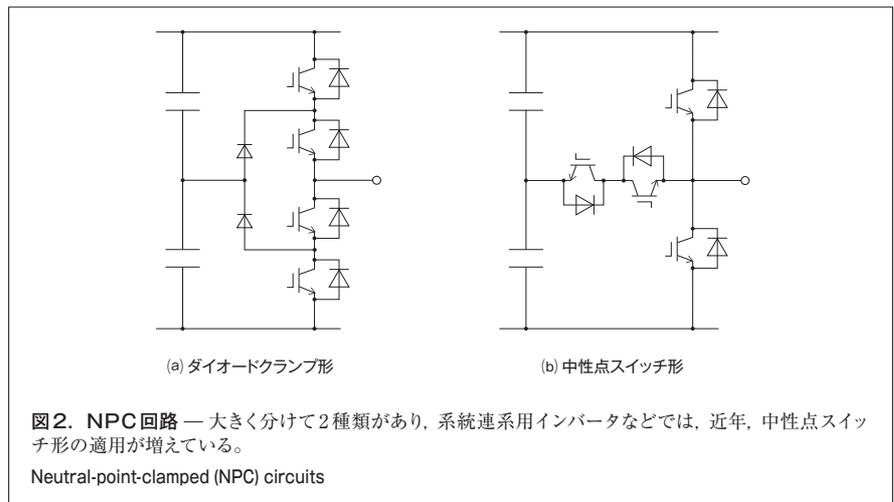
当社は、IGBTのモジュール内部でチップを両面冷却する実装構造を実用化し、熱抵抗を従来比で60%低減させ、体積を従来比で1/2にしたIGBTモジュールを開発した。これをハイブリッド自動車(HEV)用のインバータに適用して、加速時及び定常運転時ともに優れた放熱特性と高い信頼性を持つことを実証した(この特集のp.37-40参照)。

回路技術の発展

■NPC回路

PV用のPCSなどの系統連系装置では、インバータの出力波形であるPWM(Pulse Width Modulation)波を、高調波によるひずみが少ない正弦波状の電圧に整形して出力する必要がある。このため出力段に正弦波化フィルタを設けているが、機器の高効率・小型化するためには、この正弦波化フィルタが、障害になっている。こうした課題に対し、インバータのスイッチング周波数を高めて対応することが考えられるが、スイッチング周波数を高めるとスイッチング損失が増大するという新たな問題が生じる。インバータのスイッチング損失を低減するには、短時間でスイッチング動作を完了する必要があり、この結果インバータのスイッチングに伴う電圧や電流の変化が急激になり、かつ、スイッチング頻度が増大するため、電磁ノイズが増大してしまうという課題がある。これに対して当社は、電磁ノイズを抑制する回路技術を開発して効果を発揮している⁽⁹⁾。

当社は、高周波スイッチングに適した、小型で高いノイズ抑制性能を持つEMI(Electromagnetic Interference)フィルタ回路を開発した。このフィルタは、入力側、出力側ともに相間コンデンサを設置してそれぞれの中性点を接続



することで、コモンモードノイズ(接地線などを通して大地へ流れる電流によって発生するノイズ)を大幅に低減できる効果がある(この特集のp.20-23参照)。

一方、インバータの出力電圧自体を階段化することで正弦波化フィルタの高効率・小型化を実現する技術として、マルチレベルインバータがある。マルチレベルインバータは、素子数が増大して回路が複雑化するという一面があるが、もっとも単純なマルチレベル回路である3レベル回路の効果を考えると、2レベル回路でスイッチング周波数を4倍にすることと等価である。しかも、電圧ステップ幅が1/2なので、電磁ノイズも半減できる。3レベル回路の代表例として、従来から提案されているNPC(Neutral Point Clamped)回路を図2に示す。

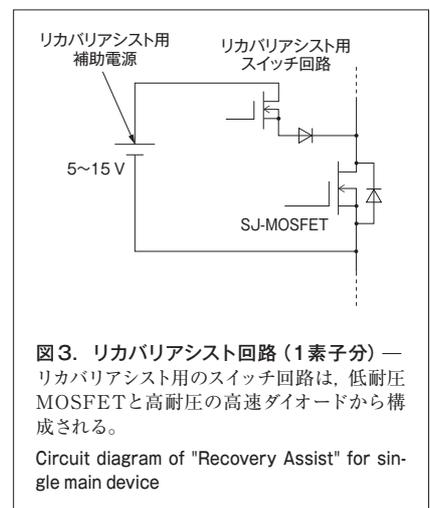
現在提案されているNPC回路は、図2(a)のダイオードクランプ形と(b)の中性点スイッチ形の2種類に大別できる。(a)の方式は、上下をつなぐ素子を、それぞれ2個直列に接続して構成し、印加される電圧を2個の素子で分担するため、素子の耐圧を低くでき、素子利用率の高い方式であるが、反面、素子2個分の電圧降下が生じ導通損失が大きくなる。一方、(b)の方式は、上下をつなぐ素子を2個直列に接続せずに1個の素子で構成するため、(a)の方式に比べて2倍の素子耐圧が必要になるが、素子1個分の電圧降下で済むため、導通損失が小

さくなる。当社は、NPC方式として、1970年代後半に世界に先駆けて研究開発を行い、(a)方式及び(b)方式の原型となる回路を提案している⁽¹¹⁾。近年、系統連系用インバータなどでは、(b)方式の製品適用が特に盛んであり、当社の先見性の実証されている。

■リカバリアシスト回路とA-SRB回路

SJ-MOSFET内部に形成される寄生ダイオードの逆回復が遅いことが原因で生じるスイッチング損失を、外部回路により解決する回路技術がリカバリアシスト回路である⁽¹²⁾。リカバリアシスト回路の例を図3に示す。

当社は、2003年に、家庭用ルームエアコン GDRシリーズのコンプレッサ駆動用インバータにリカバリアシスト回路



を初めて適用し、その後、現在までに約60万台を出荷している。リカバリアシスト回路は、還流ダイオードの逆回復が遅い高耐压のIEGTやIGBTでも効果が実証されている¹³⁾。この場合には、回路中に高耐压で高速なダイオードが必要になるが、それにはSiCダイオードが適している。このSiCダイオードは、ごく短時間だけしか通電しないので、電流容量の小さいもので済む。当社は、SJ-MOSFETの課題であったターンオン損失についても、解決策を見だし、革新的な回路技術であるA-SRB (Advanced-Synchronous Reverse Blocking) 方式を開発した¹⁰⁾(**囲み記事参照**)。

リカバリアシスト回路は、スイッチングごとに主電流を流す必要があり、補助電源から電力を注入する必要がある。このため、スイッチング周波数が比較的

高い系統連系のような用途では、前述したA-SRB方式が有利である。一方、スイッチング周波数が比較的低いモータドライブのような用途では、リカバリアシスト方式のほうが有利である場合もあり、今後の発展と応用が期待される。

■MMC回路

長距離の送電が必要な場合、商用周波数(50 Hz又は60 Hz)のままの交流送電であると、長距離送電線のインダクタンスによる電圧低下が大きく、また、交流電流の表皮効果により、電線の表面だけの通電となり、大容量送電時に不利になる。これを解決するためには、高圧直流送電(HVDC: High Voltage Direct Current Transmission)が適している。HVDCでは、交流系統との接続点に、交流から直流へ、又は直流か

ら交流へ変換する電力変換器が必要になる。この電力変換器は、送電電力全ての電力変換を行うために、非常に大容量となる。従来は、高圧大電流のサイリスタ素子を使った他励式電力変換器を適用するのが一般的であったが、近年、高調波フィルタや調相器が不要な自励式電力変換器にも注目が集まっている。自励式電力変換器は、交流電圧がまったくない状態でも動作できるので、例えば、受電側の交流系統が停電している場合でも送電が可能であり、停電からの起動も可能という特長を持つ。

当社は、自励式HVDCに適した回路方式として、**図4**に示すMMC (Modular-Multilevel Converter) に注目している。MMC回路は、コンデンサとハーフブリッジ回路で構成された単位モジュールを複数個直列に接続して構成され、

SJ-MOSFETの出力静電容量と予備電圧印加による出力静電容量低減効果

SJ-MOSFETには、端子間に印加される電圧が低いときには出力静電容量が、非常に大きいという特性がある。この原因は、デバイス構造に密接に関係する。SJ-MOSFETでは、高耐压特性を実現するために、P型層とN型層が折り重なる構造でドリフト層を構成している。

ターンオフ直後には、P型層とN型層の境界領域に空乏層が発生するが、空乏層は出力静電容量を生じる。SJ-MOSFETではP型層とN型層が折り重なっているために空乏層も広い領域に沿って発生し、端子

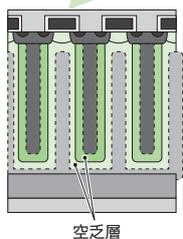
電圧が低い状態では空乏層が薄くなるため、空乏層による出力静電容量は非常に大きな値になる(**図A, B**)。この状態に対向素子をターンオンさせると、この大きな出力静電容量を充電するように短絡的に電流が流れる。

この現象は、対向素子がターンオンした直後に発生するため、対向素子の端子にはほぼ主電圧が印加されることになり、大きなターンオン損失が発生する。

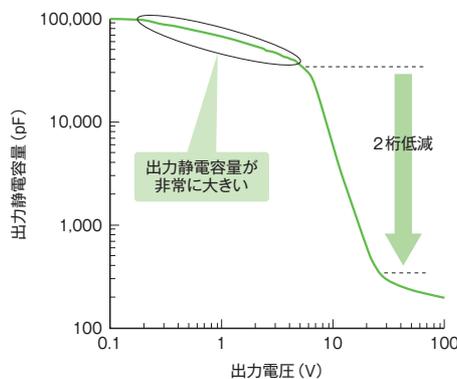
この課題を解決するために当社が開発した回路方式が“A-SRB”である(**図C**)。

A-SRBでは、SJ-MOSFETがオフしたと同時に逆阻止FETもオフさせ、その後、予備電圧印加回路を動作させて、20~30Vの電圧をSJ-MOSFETに印加する。これにより、ゲートオフ中(逆阻止期間中)にSJ-MOSFETの端子間に電圧を印加することになり、SJ-MOSFET内部のドリフト層全域が瞬時に空乏層化され、出力静電容量は2桁程度低減される。この結果、出力静電容量を充電する電流も減少し、対向素子をターンオンさせることで生じる大きなターンオン損失が解消する。

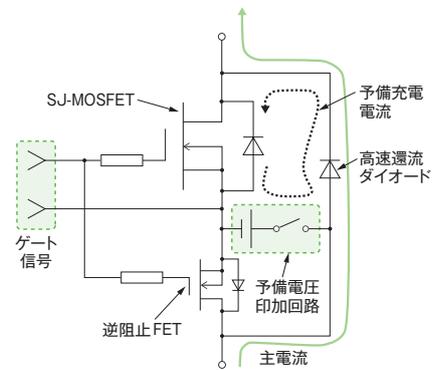
オフ状態でも、印加電圧が低いときには、空乏層の面積が広く、大きな出力静電容量を持つ



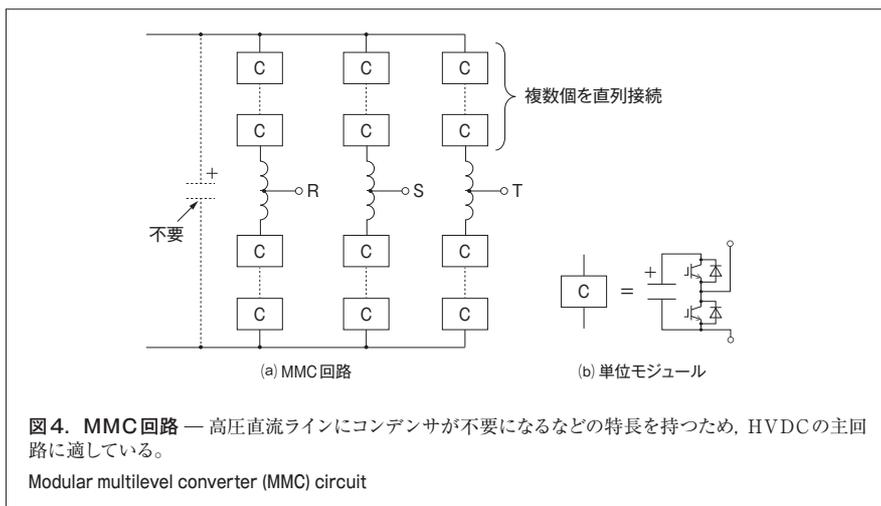
図A. SJ-MOSFETのターンオフ直後の空乏層



図B. SJ-MOSFETの出力静電容量特性例



図C. A-SRB回路



各単位モジュールから、①コンデンサ電圧を出力する、②ゼロ電圧を出力する、の2状態を切り替えて、合成電圧波形を階段状にできる。スイッチング時の電圧の処理が各単位モジュール内で完結するため、スナバ回路などを用いずに、シンプルで高信頼な電力変換回路を実現できる。また、MMC回路では、高圧直流ラインにコンデンサを設置する必要がなく、超高耐圧のコンデンサバンクが不要になるというHVDCシステムに適した特長を持つ。

当社は、MMC回路を自励式HVDCに適用することを目指して、研究開発を続けている。今回、MMCの基本原理を応用して、独自の3巻線トランスMMCを開発した。これにより、従来のMMCで必要だった受動素子を削減し、設置面積とコストを低減させたうえで高調波に対する対策が不要な交直変換器を実現した(同p.16-19参照)。

パワーエレクトロニクス応用機器への適用に向けた技術

■二次電池を用いた蓄電システム

当社は、リチウムイオン電池を改良した二次電池SCiB™を開発し、実用化している。SCiB™は、急速充放電に優れた特性を持ち、他のリチウムイオン電池に比べ、安全性が高く、充放電寿命も長く、低温での動作が安定しているな

ど、優れた特性を持つ。これらの特長により、既にHEVなど移動型機器に適用されている。また、最近では、充放電寿命が長いことと、低温での動作が可能という特長を生かして、定置型機器^④や、停電時のバックアップ電源装置^⑤への採用も始まっている。

二次電池は、充電率(SOC: State of Charge)により、端子電圧が変化する。また、電池の内部抵抗による電圧降下も生じるため、充電中や放電中には電圧が変化する。二次電池を有効に使うためには、これら電池状態によって変化する電圧を必要かつ適切な電圧に変換する必要がある。この電圧変換のためのパワーエレクトロニクス機器には、高効率性能が求められる。従来の一般的な機器の場合、低出力動作時の効率が低いために、低出力動作の頻度が高い運用を行った際、電力を二次電池へ充電し、その後電力を取り出したときに、充電電力のほぼ1/2が損失となってしまうような事例もありうる。これは、パワーエレクトロニクス機器の効率が、低電力で動作するときに低くなることが主な原因である。当社は、二次電池を用いたシステムにおいて特に重要視される低出力領域でも高効率性能を発揮できる機器の開発に注力している。

また東芝エレベータ(株)は、SCiB™を用いた蓄電システムを開発してエレベーターへ適用した。平常時には、回生時

に発生する電力を蓄えて力行時に放出することで、省エネルギーを実現して約25%の節電効果を得た。また停電が発生したときには、蓄電電力を瞬時に放出することで非常停止時の衝撃を緩和し、一定の速度まで減速した後に最寄り階へ安全に着床する機能を実現した(この特集のp.24-27参照)。

■モータ駆動技術

従来、モータ駆動用のインバータなどでは、定格出力時に十分な冷却性能を得ることを重要視しており、中間出力や低出力状態での効率が低下してしまう設計が一般的である。しかし、電力需要の大半がモータ駆動で消費されるとのデータもあり、電力消費を低減してCO₂排出量の削減を進めるためには、中間出力や低出力での効率の低下を無視できない状況になっている。インバータによる交流モータの可変速駆動の省エネ効果は、出力が小さいときに効果を発揮する。このため、中間出力や低出力でのインバータの効率が悪いと、省エネ効果を損なうおそれがある。今後の省エネ規制の動きにも関連し、これまでの定格出力での効率だけではなく、広い範囲での高効率性能が求められる。

当社は、鉄道車両用ドライブシステムとして、省エネ性や環境性の向上を目指して永久磁石同期電動機(PMSM)ドライブシステムを開発してきた。インバータ装置では、信頼性向上とともに小型・軽量化を進めた4in1インバータ装置を開発し、従来の誘導電動機ドライブシステムと同等の寸法と質量を実現した。更なる省エネの実現に向けて、低損失SiCデバイスを応用したインバータ装置や高効率制御法を開発し、実証試験を行っている(同p.28-32参照)。

■大電力化技術

世界的に再生可能エネルギーの導入拡大が期待されており、特にPV市場は国内外ともに急速な拡大傾向にある。

東芝グループは市場のニーズに応じて、国内向けとして従来から提供している単機容量100～500 kWのPCSに加え、メガソーラーシステム用に更に大容量化した750 kW機及び665 kW PCSを開発した。また、北米向けには従来から提供している500 kW PCSに加え、ルーフトップ用に新たに100 kWの屋外用PCSを開発した(同p.8-11参照)。

一方、水力発電用として、当社は1990年に世界で初めて^(注2)可変速揚水発電システムを実用化した。パワーエレクトロニクス技術の進歩に伴い、高電圧で大容量のサイクロコンバータが製作可能になり、実現したシステムである。その後、可変速揚水発電用にNPC方式や分圧リアクトル方式などの電圧形変換装置を開発してきた。また、再生可能エネルギーの出力変動対策に寄与するための揚水時入力調整機能や高速応答機能、及び水力資源の有効利用に寄与するための高効率運転や、運転範囲の拡大など、パワーエレクトロニクス技術を活用した開発を進めている(同p.12-15参照)。

■無線電力伝送技術

プラグインハイブリッド車(PHEV)やEVは、現在は、プラグ接続による充電が必要である。1回の充電でEV走行できる距離を増加させるため、数百kgもの大型の二次電池を搭載するケースが多い。二次電池の質量増加に伴って走行抵抗が増大し、また加速性能や登坂力を確保するために駆動系の出力を増大させなければならず、これらが更に駆動モータや構造体などの質量を増加させてしまうという悪循環を生じている。車載二次電池の質量を減らすことができれば、車体が軽くなり、前記の悪循環は解消される。しかしこのためには、高頻度な充電作業を簡便化することが不可欠である。

当社は、充電作業を画期的に簡便化する技術として無線電力伝送に注目して

おり、研究開発に取り組んでいる。車の底部にコイルを実装して、地上コイルとの間で非接触で電力の送電を行うもので、乗用車を改造した試作機で7 kWの電力の伝送を実現した。また充電効率も、システム効率89%とプラグ接続の充電効率に迫る高効率充電を実現した。

無線電力伝送は、85 kHzという高周波を発生させる必要があり、SiCのパワーデバイスなどの高速で低損失な新型パワーデバイスの適用が拡大すると期待される(同p.33-36参照)。

今後の展望

パワーエレクトロニクスは、最小単位としてマイクロオーダーの微細なパワーデバイスセルの集合によって大電力を扱う。このため、パワーデバイスがもっとも重要かつ基本のキーコンポーネントである。更に今後は、パワーデバイスの進化は急激に進むと見られる。当社は、キーコンポーネントとしてのパワーデバイスの革新と、それを支える回路技術や冷却技術を相乗させることで、今後も、画期的な高性能装置を実現していく。

一方、回路技術の面では、小さい単位の単純な構成のほうが、回路の浮遊インダクタンスや浮遊静電容量が減り、性能向上が図りやすい面がある。今後は、パワーデバイスの性能革新に呼応するように回路技術も小規模な個々の単位回路に知能や通信を組み込んだ形とし、それらを自律的に連携及び連動させる方向に進むと考えられる。

当社は、スマートコミュニティの実現に向け、電力を創る、送る、ための、使う、という各場面において、エネルギーをむだなく運用できる最先端のパワーエレクトロニクス技術を、今後も提供し続けていく。

文 献

- (1) 大橋弘通. 最新のパワーデバイスの動向. 電気学会誌. 122, 3, 2002, p.168-171.
- (2) 高橋 勲. 近未来の電力変換器. 平成13年電気学会全国大会. 4-167, 2001, p.1471-1472.

- (3) 家坂 進 他. パワーエレクトロニクス用大容量 IEGT. 東芝レビュー. 55, 7, 2000, p.7-10.
- (4) 松本寿彰 他. 大電力パワーデバイスを用いた電力変換技術. 東芝レビュー. 63, 11, 2008, p.2-8.
- (5) 西谷和展 他. 高耐圧大電流 IEGT. 東芝レビュー. 63, 11, 2008, p.9-14.
- (6) Nakagawa, A. "Theoretical Investigation of Silicon Limit Characteristics of IGBT". Proceeding of the 18th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). Naples, Italy, 2006-06, IEEE, 2006, p.5-8.
- (7) Ono, S. et al. "DTMOS-IV: RDS(ON) innovation by deep-trench filling superjunction technology". Proceeding of PCIM Europe 2012 Conference. Nuremberg, Germany, 2012-05, p.128-131.
- (8) 東芝. "SiCを採用したショットキバリアダイオードのラインアップ拡大について". 東芝ホームページ. <http://www.semicon.toshiba.co.jp/profile/news/newsrelease/diode/topics_130919_j_1.html>, (参照2014-03-19).
- (9) 松下晃久 他. "SiC-SBDによるターンオフ損失低減効果". 平成20年電気学会全国大会講演論文集4. 福岡, 2008-03, 電気学会, 2008, p.274-275.
- (10) 餅川 宏 他. 住宅向け太陽光発電用パワーコンディショナに適した高効率インバータ回路方式. 東芝レビュー. 67, 1, 2012, p.26-29.
- (11) 東京芝浦電気. 難波江章. インバータ装置. 公開特許公報. 特願昭55-23040. 1980-02-26 出願.
- (12) 餅川 宏 他. 小型・低損失インバータを実現する新回路技術. 東芝レビュー. 61, 11, 2006, p.32-35.
- (13) 瀧本和靖 他. "リカバリアシスト方式の高電圧インバータへの適用". 平成22年電気学会全国大会講演論文集4. 東京, 2012-03, 電気学会, 2012, p.267.
- (14) 東芝; 東芝ライテック. "定置式家庭用蓄電システム「エネゲーン」の発売について". 東芝ホームページ. <http://www.toshiba.co.jp/about/press/2012_09/pr_jl001.htm>, (参照2014-03-19).
- (15) 東芝エレベータ. "停電時継続運転機能「トスムープNEO」の発売について". 東芝エレベータホームページ. <<http://www.toshiba-elevator.co.jp/elv/newsrelease/2013/neo.html>>, (参照2014-03-19).



餅川 宏
MOCHIKAWA Hiroshi

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター技監。パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center

(注2) 1990年12月時点, 当社調べ。