

SiCデバイスを活用したパワーエレクトロニクス機器の省エネルギー技術

大井健史*

Energy Saving Technologies of Power Electronics Applications Using SiC Devices

Takeshi Oi

要旨

パワーエレクトロニクスの重要な役割の1つが省エネルギーへの貢献である。VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータの実用化に伴い、パワーエレクトロニクス機器(以下“パワエレ機器”という。)は飛躍的に普及拡大した。パワーデバイスはその性能進化によって、パワエレ機器の発展を支えてきた。

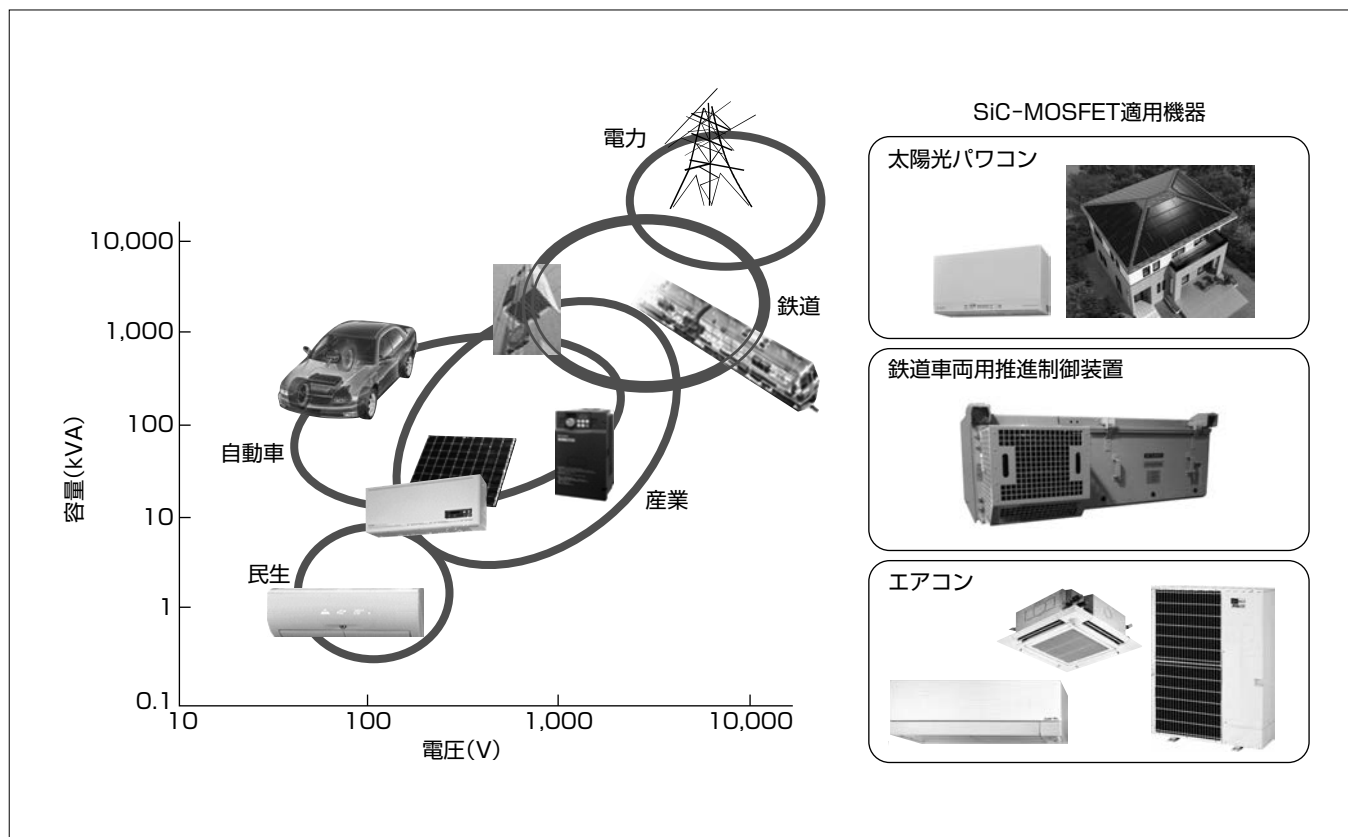
SiC(シリコンカーバイド)デバイスは、Si(シリコン)デバイスの限界をはるかに超えた性能を実現でき、これまで省エネルギーに貢献してきたパワーエレクトロニクスを更に進化させるキーデバイスとして期待されている。

SiCデバイスを活用して省エネルギーを実現する方法として、パワエレ機器そのものの損失を低減し、電力変換効率を向上させる方法と、パワエレ機器を含むシステム全

体の損失を低減して省エネルギーを実現する方法がある。前者の代表例として、太陽光発電用パワーコンディショナ(以下“太陽光パワコン”という。), 後者の代表例として、鉄道車両用推進制御装置が挙げられる。三菱電機は住宅用太陽光パワコンにSiCを適用し、業界最高(注1)の98%の電力変換効率を達成した。鉄道車両用推進制御装置では、SiCを適用することによって、主回路システムの主要な消費電力損失である、空気ブレーキとモータ損失を大幅に低減し、主回路システム全体として、従来比約40%の省エネルギー効果を実証した。

今後もSiCデバイスの更なる普及拡大に向けた開発を進めていく。

(注1) 2014年7月24日現在、当社調べ



当社でのSiC適用パワーエレクトロニクス機器

パワーエレクトロニクスは民生から産業、自動車、鉄道、電力までの広範な分野での省エネルギーに貢献している。当社は、2010年からSiC適用機器を市場投入し、その省エネルギー性を実証してきた。太陽光パワコン、鉄道車両用推進制御装置、エアコンは省エネルギー要求が強く、既にSiC-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)を適用した機器を製品化している。今後もSiC適用機器の普及拡大に向けた開発を進める。

1. ま え が き

1950年代のサイリスタの発明によって、パワーエレクトロニクスが始まったと言われている。バイポーラパワートランジスタやGTO(Gate Turn-Off)サイリスタなどの自己消弧型デバイスの発明に伴い、VVVFインバータが実用化されると、パワエレ機器は飛躍的に普及拡大した。パワーエレクトロニクスの性能指標であるパワー密度(単位体積当たりの変換器出力)は、30年間で2桁進化したと言われている。

パワーエレクトロニクスは省エネルギーのキー技術の1つであり、地球環境問題が重要視される中、更なる進化が期待されている。

パワーデバイスはその性能進化によって、パワーエレクトロニクス機器の発展を支えてきた。現在、低耐圧領域ではMOSFET、600V以上の高耐圧領域では、主にIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)が使用されている。

SiCはバンドギャップがSiの約3倍、絶縁破壊電界強度が約10倍という、パワーデバイスとして優れた特性を持つ半導体材料であり、Siの次のパワーデバイスとして期待されている。

当社は、1990年代にSiCデバイスの開発に着手し、2010年から、SiCダイオード適用製品の市場投入を開始した。最初の製品はルームエアコン“霧ヶ峰”である。SiC-MOSFETを適用した最初の製品は直流1,500V架線向けの鉄道車両用VVVFインバータであり、2014年に鉄道車両に搭載されて走行試験を実施し、その後営業運転に投入されている。その後、フルSiC適用太陽光パワコン、フルSiC-DIIPM(Dual-In-line Package Intelligent Power Module)^①適用パッケージエアコン及びルームエアコンを市場投入している。

SiCデバイスは、Siデバイスの限界をはるかに超えた性能を実現することができ、これまで省エネルギーに貢献してきたパワーエレクトロニクスを更に進化させるキーデバイスとして期待されている。

SiCデバイスを活用して省エネルギーを実現する方法として、パワエレ機器そのものの損失を低減し、電力変換効率を向上させる方法と、パワエレ機器を含むシステム全体の損失を低減して省エネルギーを実現する方法がある。前者の代表例として太陽光パワコンが挙げられる。太陽光パワコンは、パワーデバイスの性能改善、高効率電力変換回路方式の開発などによって、高効率化を実現してきた。後者の代表例として、鉄道車両用推進制御装置が挙げられる。後述するように、鉄道車両駆動システムでは、パワエレ機器だけの高効率化ではなく、システム損失の中で主要な損失源を特定し、パワーエレクトロニクスの技術を活用して、それらの損失を低減することが重要である。

2. SiCデバイスの特長

パワエレ機器はパワーデバイスがオンとオフ状態を切り替えることによって電力変換を行う。パワーデバイスは、オン状態とスイッチング時に損失が発生する。パワーデバイスはオフ期間中の高電圧を維持しなければならず、耐圧維持層が設けられている。耐圧維持層は耐圧が高くなるほど、不純物濃度が低くかつ厚くなり、MOSFETのようなユニポーラデバイスでは、オン電圧の主成分となる。

IGBTはバイポーラデバイスであり、オン状態では耐圧維持層にホールが注入され、キャリア濃度が数桁上昇する(伝導度変調)。この特性によって、高耐圧であっても低オン電圧が得られる。現在定格電圧6.5kVまで製品化されている。

IGBTのようなバイポーラデバイスは、オフ時に、オン時に蓄積されたキャリアを全て吐き出さなければならず、大きなターンオフ損失が発生する。IGBTのオン電圧とターンオフ損失はトレードオフの関係にある。

SiCはSiに比べ絶縁破壊電界強度が10倍であるため、耐圧維持層を高濃度化し、かつ薄くできる。このため、高耐圧領域でも、Si-IGBTと同等のオン電圧をスイッチング損失の小さいMOSFETで実現できる。現在、定格電圧3.3kVのSiC-MOSFET^②が実用化されている。

MOSFETの有利な点は、スイッチング損失だけでなく、出力特性(主電流-主電圧特性)にもある。MOSFETの出力特性は、原点を通る抵抗特性を示すのに対し、IGBTの出力特性は、ダイオードと同様に一定電圧(Siでは0.8V程度)を超えた電圧以上で電流が流れ始める特性を示す。定格電流でのオン電圧が同じ、MOSFETとIGBTを比較すると、定格電流以下のオン電圧はMOSFETの方が低い。インバータのように交流を扱うパワエレ機器や、エアコンや太陽光パワコンのように、定格出力だけでなく軽負荷時の効率が重要なパワエレ機器では、MOSFETの方が有利である。

3. SiC適用太陽光パワコン

太陽光パワコンは、太陽電池の直流電圧出力を正弦波交流電力に変換する装置である。変動する太陽電池の出力電圧を調整するDC/DC変換回路(チョッパ)、直流電圧を交流に変換するDC/AC変換回路(インバータ)、インバータ出力を正弦波出力に変換するフィルタからなる構成が基本である。太陽光パワコンは電力変換効率が重要視される装置の1つであり、そのためには、チョッパ、インバータ及びフィルタの損失低減が必要である。

図1に住宅用太陽光パワコンで基本的な構成である、2レベルPWM(Pulse Width Modulation)インバータ方式を示す。2レベルPWMインバータ方式では、出力電圧は図のようにパルス電圧波形となる。この電圧はフィルタで正弦波出力に変換される。

図2に当社独自の方式である、階調制御方式の構成を示す。階調制御方式インバータでは、電圧の異なるインバータを直列に接続することで、より正弦波に近い電圧を出力できる。このため、フィルタ損失の大幅な低減が可能である。この方式を適用することで、住宅用太陽パワコンとして、当時業界トップの97.5%の電力変換効率が得られている。この効率は、後述するSiC適用太陽光パワコンが出現するまで、トップの位置を維持していた。

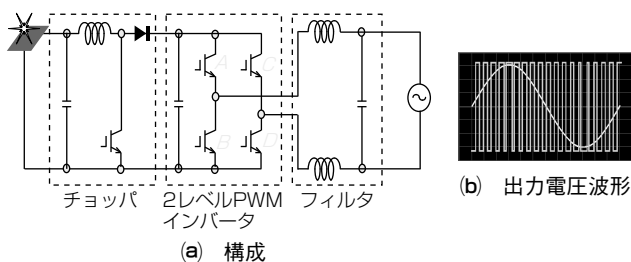


図1. 2レベルPWMインバータ方式

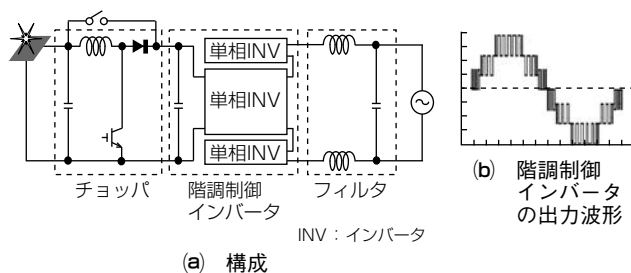


図2. 階調制御方式インバータ方式

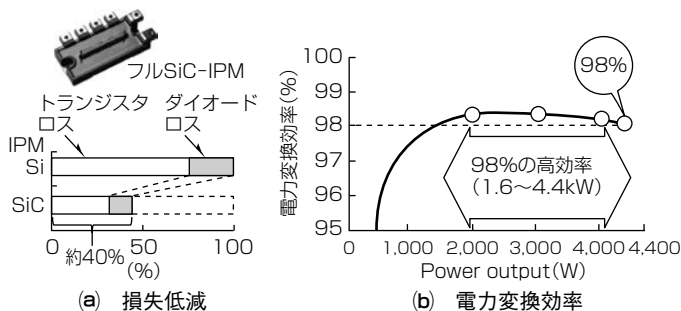


図3. フルSiC-IPM適用によるパワーデバイスの損失低減とSiC適用パワコンの電力変換効率

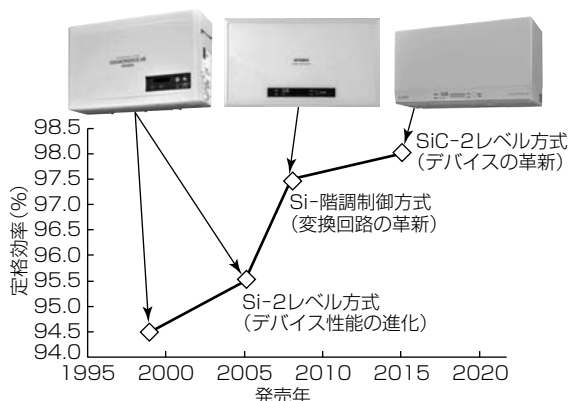


図4. 当社製住宅用太陽光パワコンの効率改善の推移

当社は、フルSiC-IPM(Intelligent Power Module)を開発し、太陽光パワコンに適用した。IPMはトランジスタのゲート駆動や短絡等の保護機能を内蔵するパワーモジュールである。IPMには、チョップ回路と2レベルインバータ回路が内蔵されている。図3に示すように、パワーデバイスの損失がSiに比べて、約60%低減でき、業界最高の98%の効率(定格出力時)を実現した。

図4に当社製住宅用太陽光パワコンの効率改善の推移を示す。Siデバイスの性能の進化や変換回路の革新によって、電力変換効率を改善してきたが、2015年にSiCデバイスを適用することで、Siデバイスの限界を超えた変換効率が実現できている。

4. SiC適用の鉄道車両用推進制御装置

鉄道車両用推進制御装置は、運転台からの指令に基づき、架線の電力を交流電力に変換し、主電動機(モータ)を制御する装置である。加速時には架線からの電力を変換してモータに供給する(力行動作)。減速時には、車両の運動エネルギーを変換して架線側に供給する(回生動作)。回生されたエネルギーは、他の鉄道車両や、駅舎補助電源装置を介して駅舎の空調やエレベーターなどに供給される。

図5に鉄道車両システムの主回路消費電力分析結果の例を示す。インバータ損失は全体の2%であり、SiC適用によってインバータ損失を半減したとしても、全体としての省エネルギー効果が小さいことが分かる。そこで、SiCの性能を活用して、消費電力の主要成分である。モータ損失と空気ブレーキ損失を低減することを検討した。

まず、モータ損失低減方法について検討した。基本周波数に対して、スイッチング周波数が十分高くない場合、高調波成分が大きくなって、大きな損失が発生する。従来の制御方式では、Siデバイスのスイッチング損失が大きいため、スイッチング周波数が制限されていた。このため、モータ電流の高調波成分が多く、高調波損失が大きかった(図6)。SiCデバイスはスイッチング性能が優れており、高周波スイッチングによるモータ損失低減が可能である。図に示すように高周波スイッチングによって、高調波の少ない、モータ電流が得られている。

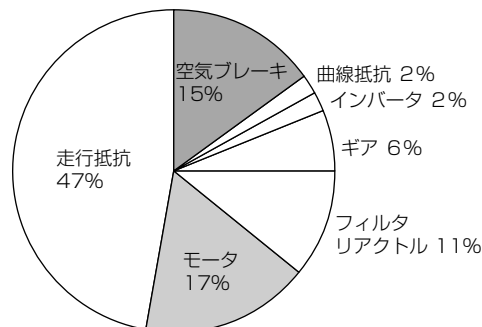


図5. 主回路消費電力分析結果

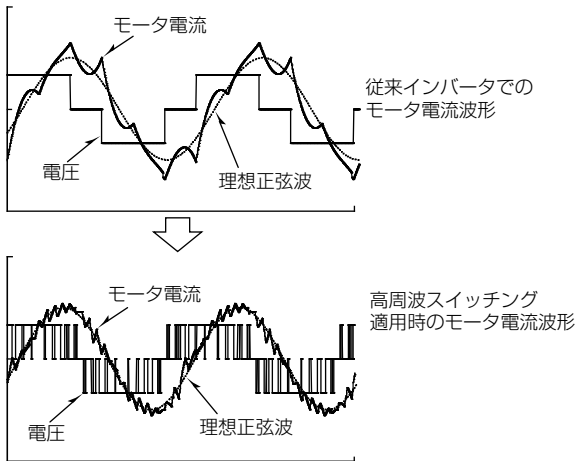


図6. 高周波スイッチングによるモータ損失低減

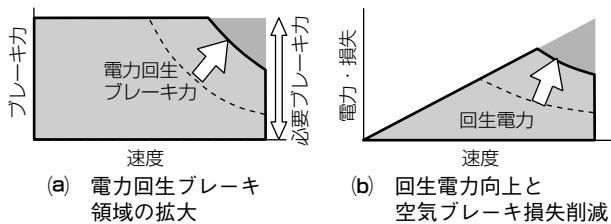


図7. 空気ブレーキ損失低減

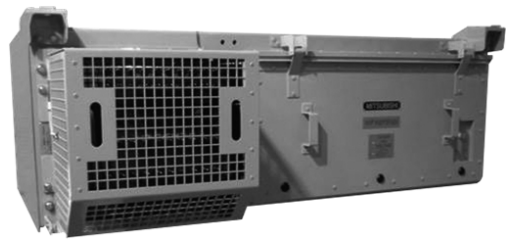
次に、空気ブレーキによる発生損失の低減を検討した。従来、高速域ではブレーキ力が低下するため、空気ブレーキが使用されていた。空気ブレーキでは、車両の運動エネルギーは熱に変換され損失となる。電力回生ブレーキ領域を高速域に拡大することで、空気ブレーキによる損失を低減できる(図7)。しかし、停動トルクを拡大するためには、モータ電流を増加させる必要があり、インバータ損失が増大する。SiCデバイスの低損失性能を活用することで、インバータ損失の増大を抑え、回生ブレーキ領域を拡大することができる。

まず、2011年にSiCダイオードとSi-IGBTを搭載する1.7kVパワーモジュールを適用した直流600/750V架線対応の鉄道車両用インバータを製品化し、現在地下鉄などで営業運転中である。続いて、3.3kV SiC-MOSFETを適用した直流1,500V架線対応の鉄道車両用インバータを製品化した(図8)。

2014年の走行試験を経て営業運転に投入され、約4か月間の省エネルギー効果の検証の結果、主回路システム全体として従来比約40%の省エネルギー効果を実証した。

2015年には新幹線用のSiC適用主変換装置を開発し、新幹線車両に搭載されて、走行試験を実施中である。

図9に示すように、鉄道分野では、地下鉄から新幹線までSiCデバイスの適用が進み。鉄道車両システムの省エネルギーに貢献している。



| | |
|-------|-----------------------------------|
| 入力電圧 | 直流1,500V |
| 主回路方式 | 2レベル方式電圧型PWMインバータ (電力回生ブレーキ付き) |
| 制御方式 | 180kW級モータ×4台並列制御 |
| 冷却方式 | 走行風自冷方式 |

PWM : Pulse Width Modulation

図8. 直流1,500V架線対応SiC適用鉄道車両用インバータ

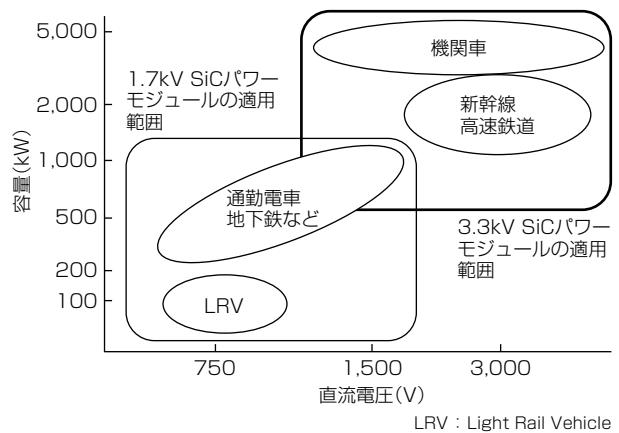


図9. 鉄道分野でのSiCデバイスの展開

5. むすび

SiCデバイスは、長い開発期間を経て、パワーエレクトロニクス機器の省エネルギーのキーデバイスとして実用化を開始した。今後は自動車や、電力機器などの高耐圧機器の領域を含め、パワーエレクトロニクスの全領域に普及拡大し、地球規模での省エネルギーに貢献していく。そのためには、SiCデバイスとその応用機器の一層の高性能化、高耐圧化、高信頼化及び低価格化に向けた開発が必須である。

本稿で述べた開発の一部は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の委託を受けて実施した。

参考文献

- (1) 古橋壯之, ほか: 超小型DIPIPM用SiC-MOSFET, 三菱電機技報, 91, No.7, 377~380 (2017)
- (2) 濱田憲治, ほか: 鉄道車両用フルSiC適用インバータを実現する3.3kV耐圧SiC-MOSFETの低抵抗化技術, 三菱電機技報, 91, No.7, 373~376 (2017)