

再生可能エネルギーの有効活用に役立つ スマートグリッド用 STATCOM

Static Synchronous Compensator for Effective Use of Renewable Energies in Smart Grids

葛巻 淳彦

餅川 宏

村尾 武

■ KUZUMAKI Atsuhiko

■ MOCHIKAWA Hiroshi

■ MURAO Takeru

近年、環境問題の観点から太陽光発電 (PV) などの再生可能エネルギーを用いた分散電源の配電システムへの導入が進んでいる。しかし、配電システムに大量に導入された場合、系統電圧が上昇し規定の電圧から逸脱するおそれがある。

東芝は、系統末端での電圧上昇を適正レベルに抑えることができるスマートグリッド用 静止型無効電力補償装置 (STATCOM: Static Synchronous Compensator) を開発した。STATCOMに採用するパワー半導体には、低損失で高速スイッチングが可能な炭化ケイ素 (SiC) デバイスを適用することで、当社従来方式に比べて外形寸法を約 1/2 に小型化するとともに、運転損失を約 1/4 に低減した。これにより、PV などの再生可能エネルギーを有効に活用することができる。

In response to growing concern over environmental issues, grid-connected distributed power systems using renewable energy sources such as photovoltaic (PV) power generation have been increasingly installed in recent years. With the expansion of renewable energy penetration to grids, however, the grid voltage might deviate from the stipulated voltage.

Toshiba has developed a new static synchronous compensator (STATCOM) that makes it possible to maintain the grid voltage within the proper voltage level. The newly developed STATCOM is about half the overall size and achieves one-quarter the power loss compared with conventional products by using silicon carbide (SiC) devices with low loss and high-speed switching characteristics.

1 まえがき

地球環境問題への対応やエネルギー資源の観点から、わが国では、2020年までに太陽光発電 (PV) を2,800万kW導入することが政策目標として掲げられている。この目標どおりにPVが大量に導入されると、配電システムに電力が逆流した場合に、系統電圧が上昇し規定の電圧から逸脱する場合がある。

これらの問題に対する解決策として、高速かつ連続的に無効電力を制御する静止型無効電力補償装置 (STATCOM) の導入が検討されている⁽¹⁾。

既存のSTATCOMは配電システムとの連系にトランスを必要とするため、柱上設置が可能になる程度まで小型化することが困難であった。STATCOMの小型化が実現できれば、次に示すようなメリットがある。

- (1) スペースが有効利用できる。
- (2) 線路の引回しが不要である。
- (3) 工事が容易である。

東芝は、STATCOMの小型化のために、採用するパワー半導体に低損失で高速スイッチングが可能な炭化ケイ素 (SiC) デバイスを適用した⁽²⁾。更に回路構成を工夫することで、小型・低損失化を実現し実用化のめどを得た。

ここでは、当社が開発したSiCデバイスを適用したスマートグリッド用 STATCOM実証試験器の特長と評価結果について述べる。

2 スマートグリッドにおけるSTATCOMの機能

PVが大量に導入される以前の系統電圧は、配電用変電所から遠方になると、適正電圧範囲内で、徐々に低下する (図1(a))。

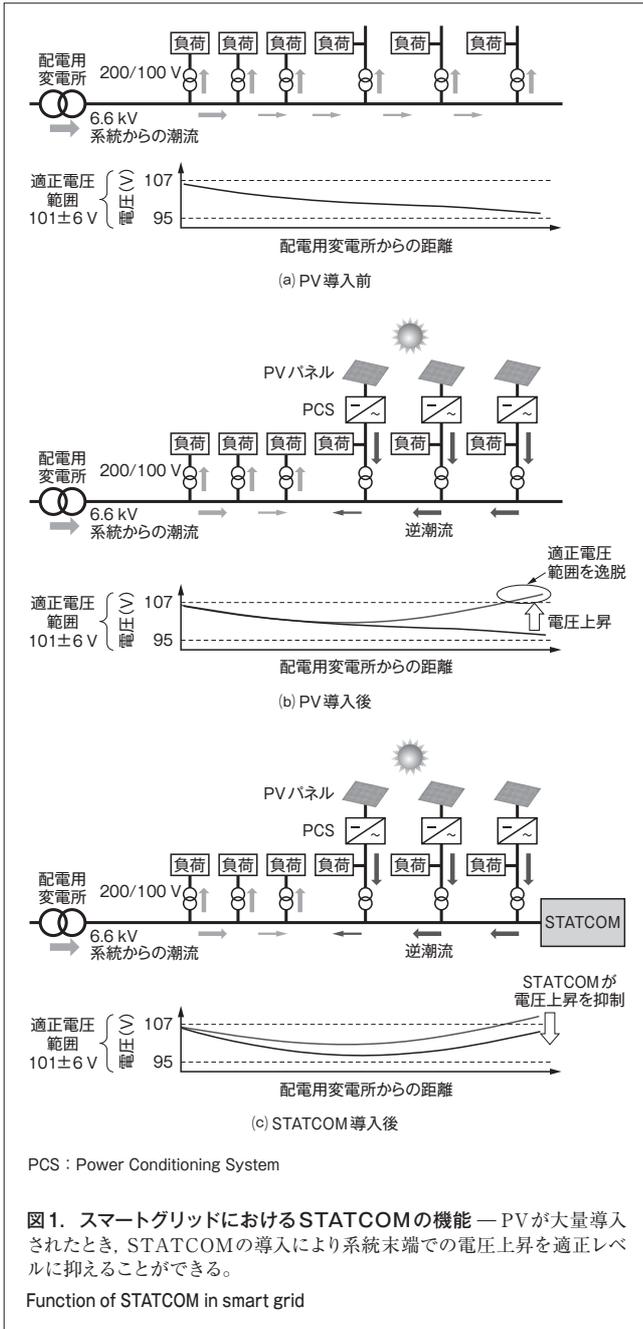
再生可能エネルギー大量導入時の余剰電力問題の一つとして、家庭に設置されたPV設備の発電量が家庭の電力消費量を上回ったときに、余剰電力が配電システムを上流へ向かって流れる逆潮流の発生がある。逆潮流が発生すると、配電システムの末端で系統電圧が想定以上に上昇してしまう場合がある (図1(b))。

この上昇した系統電圧を下げるために、PVは出力を抑制する。したがって、発電可能な再生可能エネルギーの一部を放棄することになり、むだが生じる。また家庭では、PVによる売電ができないという問題も生じる。

このような配電システムにSTATCOMを導入すれば、PVの出力を抑制することなく、系統末端での電圧上昇を適正レベルに抑えることができる (図1(c))。STATCOM導入により、PVなどの再生可能エネルギーを有効に活用することができるようになる。

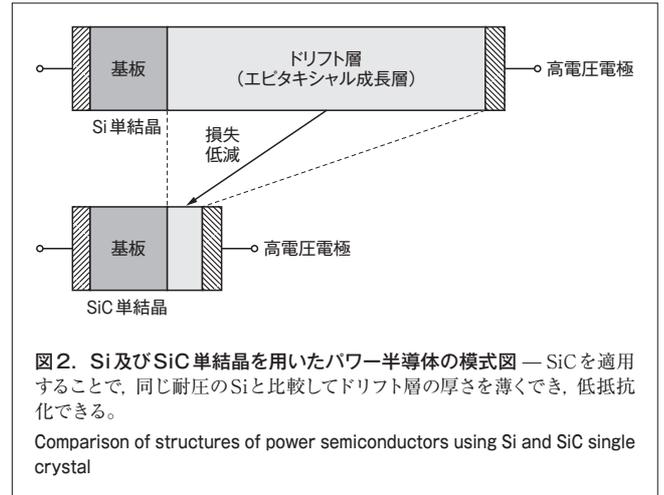
3 STATCOMに適用したSiCデバイスの特長

STATCOMを構成する主要部品の一つであるパワー半導体には、SiCデバイスを適用した。SiCデバイスの特長は、従



来のシリコン (Si) デバイスに比べて電力損失が小さく、高周波動作が可能なことである。

SiC単結晶は、絶縁破壊電界強度 (E_c) がSi単結晶と比べ約10倍大きいという優れた物性を持つことから、図2に示すように、SiC単結晶をデバイスに適用することで、より薄いドリフト層 (エピタキシャル成長層) で高い耐圧のデバイスが得られる。また、このときのドリフト層のドーピング濃度は E_c の2乗に比例して高くすることが可能であり、Siの約100倍の高濃度にできる。この薄くて高濃度のドリフト層の電気抵抗は、理論的にはSiと比較して約1/300になることから、デバイスのオン抵抗を大幅に低減できる。



これにより、耐圧1.2 kV級のSiデバイスのIGBT (絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ) やPiN (P-intrinsic-N) ダイオードなどのSiバイポーラデバイスを、MOSFET (金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ) や、JFET (接合型電界効果トランジスタ)、SBD (ショットキーバリアダイオード) など高速のSiCユニポーラデバイスに置き換えることができる⁽³⁾。

一方、Siと同じドリフト層の厚さにすると、約10倍の高耐圧が実現できるため、IGBTや、GTO (Gate Turn-off Thyristor)、PiNダイオード構造のSiCバイポーラデバイスなどで、Siでは到達しえない耐圧10 kV超の超高耐圧デバイスも実現できる⁽⁴⁾。

その他にも、高温動作ができることや銅並みの高い熱伝導度であることから、デバイスの冷却装置を小型化することができる。

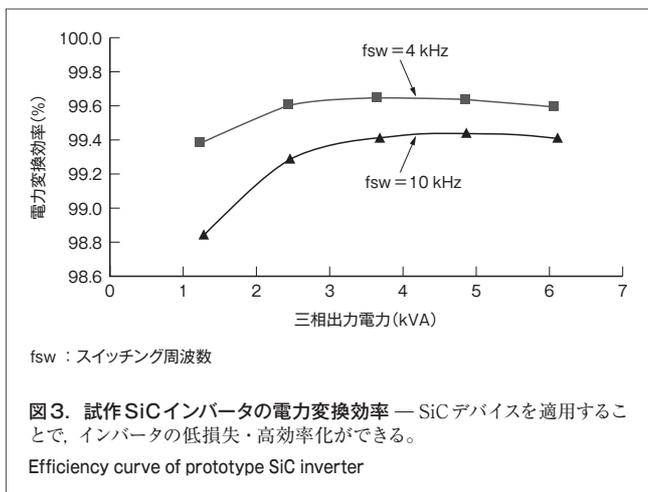
このようなSiCデバイスの低損失、高速、高耐圧、及び高温動作という特性は、インバータのパワー密度 (インバータ出力/インバータ体積) を向上させるうえで非常に有効である。

4 SiCデバイスを適用したインバータの実証

STATCOMを開発する前に、SiC-FETを適用した6 kVA三相PWM (Pulse Width Modulation) インバータ (以下、SiCインバータと略記) を試作し、直流から交流への電力変換効率を評価することで、その性能を明らかにした。

試作SiCインバータに適用したパワー半導体は、耐圧1.2 kV、オン抵抗63 mΩのSiC-FETである。試作SiCインバータの電力変換効率をパワーメータで計測した。その結果を図3に示す。最大出力6 kVA、スイッチング周波数4 kHzの条件で、電力変換効率99.6%⁽⁵⁾を達成した。また、スイッチング周波数10 kHzの条件でも電力変換効率99.4%以上となった。

試作SiCインバータは低損失かつ高効率であることを実証した。これらの結果を、STATCOM実証試験器の開発へ適用していく。



5 SiCデバイスを適用したSTATCOMの開発

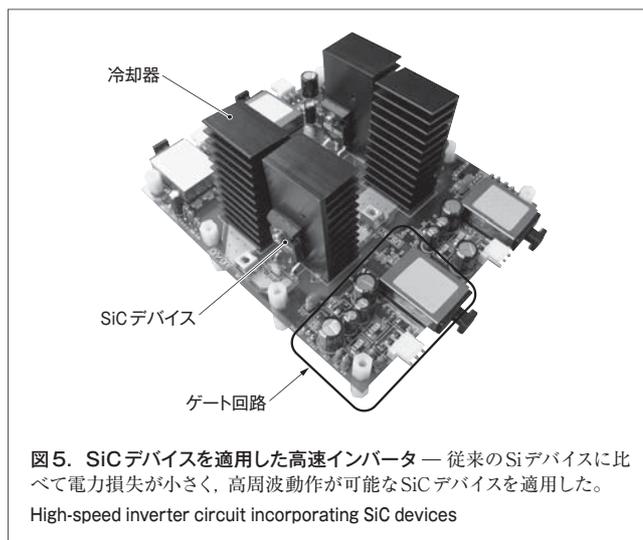
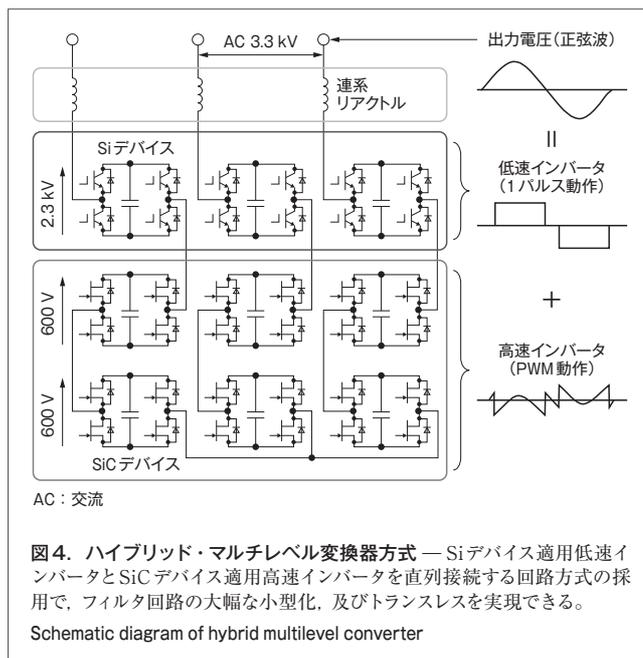
従来のSTATCOMは、配電システムとの連系に大型のトランスとフィルタ回路が必要であった。そのため、STATCOM全体の体積と質量が大きく、小型化が望まれていた。小型かつ低損失のスマートグリッド用 STATCOMを開発するにあたり、SiCデバイスを適用することで、トランスをなくすとともに、フィルタ回路を大幅に小型化し、柱上設置が可能になる体積を目標とした。

SiCデバイスを適用するSTATCOMの最適な回路方式として、低速インバータと高速インバータを直列接続した複数電圧カスケード変換器⁶⁾による当社独自のハイブリッド・マルチレベル変換器方式を考案した。ハイブリッド変換器とは、SiCデバイスとSiデバイスを組み合わせた変換器のことであり、マルチレベル変換器とは、単相インバータを、複数個直列にして構成する変換器のことである。ハイブリッド・マルチレベル変換器方式の回路構成と動作原理を図4に示す。

耐圧4.5 kVの従来のSiデバイスをを用いた低速インバータは、1パルス動作で基本波周波数の矩形(くけい)波を出力する。1サイクルに1回しかスイッチングしないためスイッチング損失が少ないというメリットがある。

耐圧1.2 kVのSiCデバイスをを用いた高速インバータは、高速でスイッチングしても損失が少ないSiCデバイスの特長を生かし、高周波PWM制御によって、最終出力として望ましい正弦波と、低速インバータの矩形波との差分を出力する。この2種類のインバータを直列に接続すると、基本波の正弦波電圧を出力することができる。

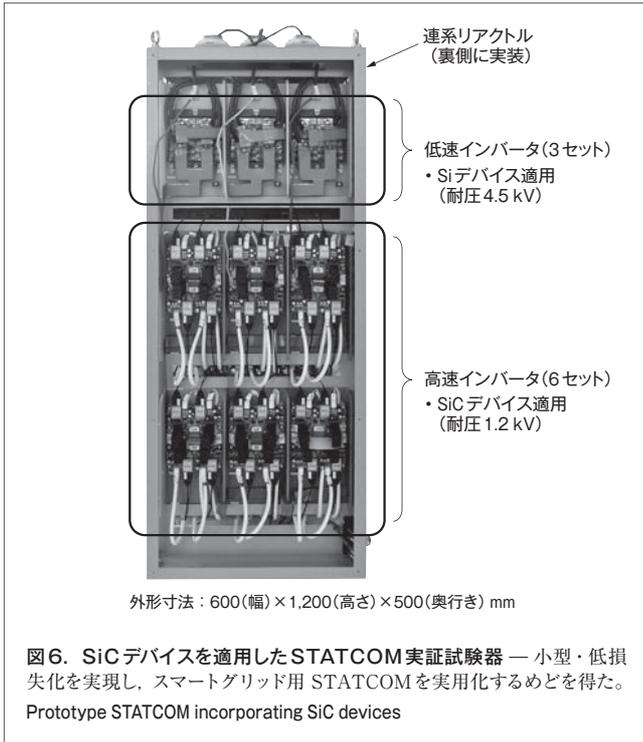
SiCデバイスを適用した高速インバータの外観を図5に示す。高速インバータの構成は、単相ブリッジ一つ分の主回路とゲート回路から成り、これを一つのモジュールとした。低損失のSiCデバイスを高速インバータに適用することで、冷却用ファンを不要にした。



高速インバータのPWM制御によって、ひずみの少ない出力波形を得ることができる。また、高耐圧デバイスである低速インバータを直列に接続することで、系統電圧を直接出力することができる。

これらの効果により、従来STATCOMに必要な電源高調波抑制用のフィルタ回路を大幅に小型化することができ、トランスなしで配電システムへの接続が可能となった。その結果、スマートグリッド用 STATCOMは、設置場所を選ばないコンパクトな構造で、電柱上にも設置できる外形寸法を実現することが可能になった。

SiCデバイスを適用したSTATCOM実証試験器の外観を図6に示す。外形寸法は、600(幅)×1,200(高さ)×500(奥行き)mmと、当社従来方式に比べ約1/2に小型化し、更に運



転損失は約1/4に低損失化した。

これまで述べたようにSiCデバイスを適用することで、小型・低損失化したスマートグリッド用 STATCOMを実用化するめどを得た。今回開発したSTATCOM実証試験器は、当社の府中事業所内の系統電圧に合わせて3.3 kV仕様で設計している。一般的な配電系電圧である6.6 kV仕様への対応は、低速インバータをもう1段追加することによって、容易に実現することができる。

6 あとがき

スマートグリッド用 STATCOMの開発において当社は、低損失なSiCデバイスの適用と当社独自のハイブリッド・マルチレベル変換器方式によって、小型・低損失化を実現し実用化のめどを得た。

今後は製品化に向けた開発を進め、再生可能エネルギーの有効活用のために期待されているスマートグリッド用 STATCOMを配電系統に適用していく。

謝 辞

この開発は、(財)電力中央研究所との共同研究をもとに当社が行ったものである。ご協力いただいた、システム技術研究所 需要家システム領域の関係各位に感謝の意を表します。

文 献

- (1) 川崎章司 他. LRTとの制御分担を考慮したSVCの協調型電圧制御法およびSVCの定格容量と制御パラメータの決定手法. 電気学会論文誌B. **130**, 11, 2010, p.963-971.
- (2) 菊間俊明 他. SiCデバイスを適用した配電系統用STATCOMの最適回路構成. 電力中央研究所 研究報告書. **R09010**, 7, 2010, 26p.
- (3) 河野洋志 他. 高温で動作する低損失の1.2 kV級SiC縦型パワーMOSFET. 東芝レビュー. **65**, 1, 2010, p.23-26.
- (4) 高尾和人 他. SiC-PiNダイオードとSi-IEGTのハイブリッドベアによる高周波駆動大電力変換装置. 東芝レビュー. **66**, 5, 2011, p.34-37.
- (5) 葛巻淳彦 他. “ノーマリオフ型SiC-JFETを適用したPWMインバータの性能実証”. 平成22年電気学会産業応用部門大会. 1-59, 東京, 2010-08, 電気学会. p.I-381-I-382.
- (6) 佐野憲一朗 他. 直流電源が不要な複数電圧カスケード変換器による6.6kVトランスレスSTATCOM. 電力中央研究所 研究報告書. **R10014**, 5, 2011.



葛巻 淳彦 KUZUMAKI Atsuhiko

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワエレシステム開発部主務。パワーエレクトロニクス技術の研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



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 電機電池応用・パワエレシステム開発部主幹。パワーエレクトロニクス技術の研究・開発に従事。電気学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center



村尾 武 MURAO Takeru

社会インフラシステム社 電力流通システム事業部 パワーエレクトロニクス事業推進担当参事。電力系統用パワーエレクトロニクス装置のエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。Transmission & Distribution Systems Div.