

SiCパワーモジュールの開発と 応用分野の拡大

安藤正之*
西田信也*

Development and Expansion of Application Fields for SiC Power Module

Masayuki Ando, Nobuya Nishida

要 旨

エネルギーの高度な利用が求められる中、パワー半導体モジュール(以下“パワーモジュール”という。)は、家電製品から産業、電鉄に至るまで広い分野で使用されて注目を集めている。特に、SiC(Silicon Carbide)は更なる低損失・小型化を実現する次世代デバイスとして期待されている。

三菱電機では、SiC-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)とSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)のSiCデバイス、及びこれらを搭載したSiCパワーモジュールの開発を進めるとともに⁽¹⁾、パワーエレクトロニクス機器への応用開発を行うなど、実用化も進めてきた。

当社のSiCデバイス及びSiCパワーモジュールの開発は、1994年から約10年間の要素技術の研究開発を経て、2006年1月に電流10A級のSiCデバイスを用いたインバータで世

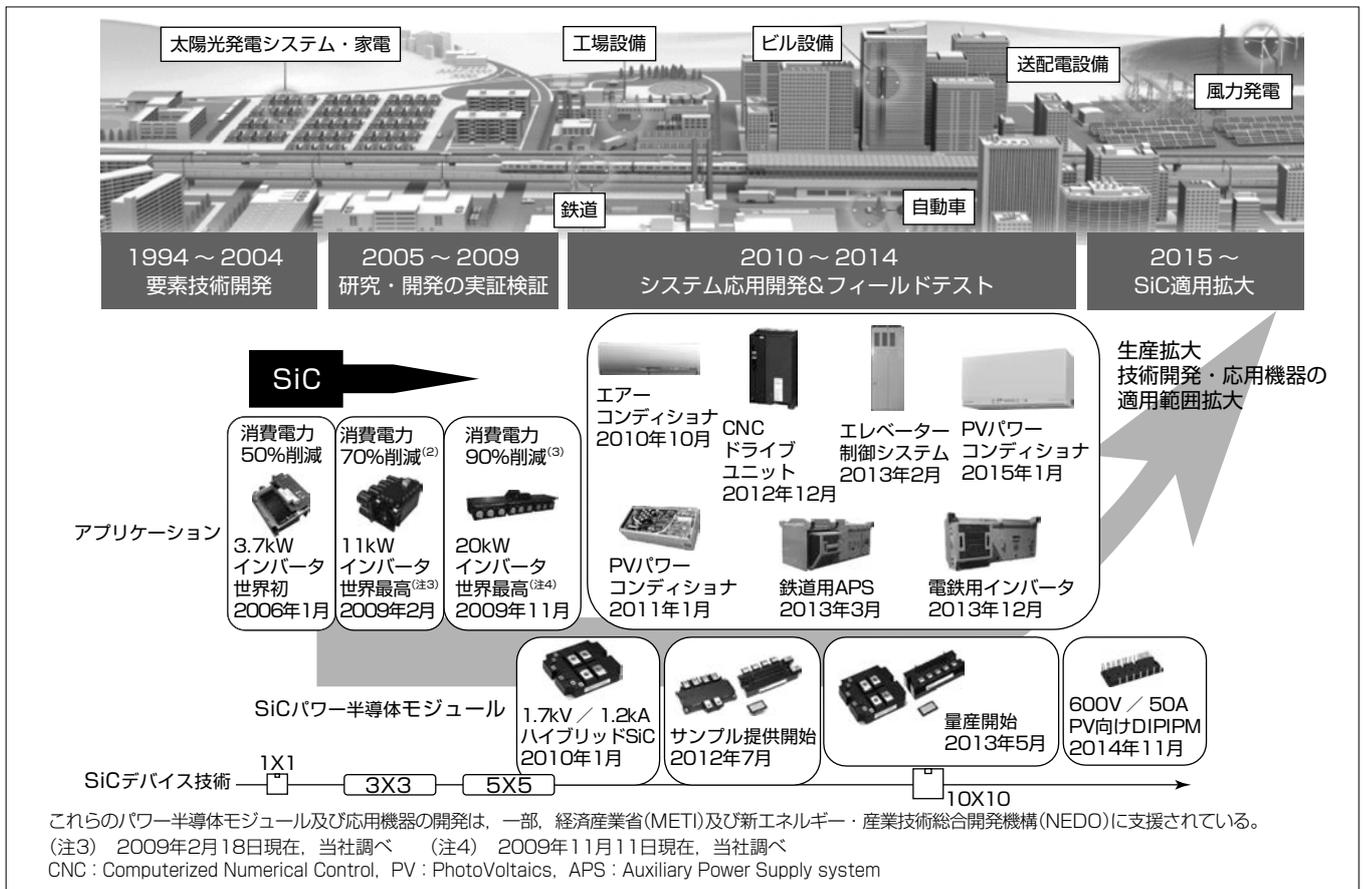
界で初めて^(注1) 3.7kW定格の三相モータの駆動に成功したことを皮切りに、2009年には11kW、20kWインバータで電力損失を大幅に低減できることを示した。

2010年10月には、世界初^(注2)となるSiCパワーモジュール搭載エアコンを発売して、2011年1月には太陽光パワーコンディショナ、2013年2月にはエレベーターでのSiCパワーモジュールの効果実証に成功した。また、鉄道車両においても、2013年3月に補助電源装置、同年12月に車両用インバータ装置を製品化した。

SiCパワーモジュールの一般向け提供も2012年7月から開始して⁽⁶⁾、随時、ラインアップ拡充を進めてきた。

(注1) 2006年1月現在、当社調べ

(注2) 2010年8月24日現在、当社調べ



当社SiC製品の開発

当社SiC製品の開発では、1994年から約10年間の要素技術の研究開発を経て、2005～2009年には各種容量帯のインバータで効果を実証した。2010年以降は各分野で製品化を実現し、現在も、生産拡大に向けた技術開発・応用機器の適用範囲の拡大が進む。

*パワーデバイス製作所

1. ま え が き

エネルギーの高度な利用が必要不可欠となる中でパワーエレクトロニクスの発展・普及が著しく、キーパーツであるパワーモジュールは、家電製品から産業、電鉄に至るまで広い分野で使用され、注目を集めている。

半導体材料としては、Si(Silicon)が用いられているが、近年、新材料として絶縁破壊電界強度が高い等の特長を持つSiCが実用段階に入ってきた。

当社でも、SiC-MOSFETとSiC-SBDのデバイス開発を進め、これらを搭載したSiCパワーモジュールを製品化して、エアコン、太陽光発電用パワーコンディショナ、エレベーター、電鉄など、各種システムへの適用を実現している。

本稿では、SiCパワーモジュールの種類と特長、現状のラインアップを示し、各種システムへの適用事例について述べる。

2. SiCパワーモジュールの種類と特長

2.1 SiCパワーモジュールの種類

一般的に、パワーモジュールは、通電制御を行うスイッチングデバイスとスイッチングのターンオフに伴ってエネルギーを還流するダイオードデバイスとを対にして、1パッケージ化したものである。したがって、SiCをどのデバイスに適用するかでSiCパワーモジュールの種類が異なる。

当社では、ダイオードデバイスだけにSiCを適用したものをハイブリッドSiCパワーモジュール、還流ダイオードだけでなくスイッチングデバイスにもSiCを適用したものをフルSiCパワーモジュールと称している。また、Siパワーモジュールでのラインアップと同様に、スイッチングデバイスの能力を最大限に活用するための保護を持つ駆動制御回路をSiCパワーモジュールに内蔵したSiC-IPM(Intelligent Power Module)やトランスファーモールドタイプのSiC-DIIPMもラインアップする(表1)。

2.2 SiCパワーモジュールの特長

2.2.1 抵抗値の低減による低損失化・小型化

Si-MOSFETとSiC-MOSFETの縦構造イメージを図1に示す。絶縁破壊電界強度に着目すると、Siは0.3MV/cmであるのに対して、SiCでは3MV/cmと、Siより約10倍高い。このため、SiCではスイッチングデバイスを形成する際に電気抵抗の主要因となるドリフト層をSiの10分の1に薄くすることができ、ドレイン電極-ソース間の抵抗値が大幅に低減されて電力損失を大幅に低減できる。

また、電力損失、すなわち発熱量が減ることで、パワーモジュールの応用で必要不可欠な冷却器を小型化できるメリットもあり、自動車や産業用途など適用機器の小型・軽

量化が可能となる。

したがって、SiCパワーモジュールを適用することで、システムの低損失化、小型化の点で優位である。

2.2.2 ワイドバンドギャップによる高温動作の安定

SiCの特長として、バンドギャップ幅が広いことも挙げられる。半導体デバイスでは、電子がバンドギャップを超えて遷移することでスイッチング動作を行うが、光や熱によってもバンドギャップ幅以上のエネルギーが与えられるケースがある。例えば、高温時にリーク電流が増加するが、これは熱エネルギーによってバンドギャップを超える電子の遷移が発生するためである。

バンドギャップを比較すると、Siは1.1eVであるのに対して、SiCは3.3eVであり、Siより約3倍大きい(図2)。したがって、Siでは温度が高くなるとリーク電流が増加し、さらには正常動作できないケースもあるが、SiCでは高温時

表1. SiCパワーモジュールのラインアップ

形態	電圧(V)	電流(A)	SiCタイプ	回路構成	形名
DIIPM	600	20	フルSiC	2in1(PFC)	PSF20L91A6-A
		20	ハイブリッドSiC	2in1(PFC)	PSH20L91A6-A
		50	ハイブリッドSiC	4in1	PSH50YA2A6
IPM	600	200	ハイブリッドSiC	6in1	PMH200CS1D060
		75	フルSiC	6in1	PMF75CL1A120
		75	ハイブリッドSiC	6in1	PMH75CL1A120
SiC パワー モジュール	1,200	400	フルSiC	4in1	FMF400BX-24A
		800	フルSiC	2in1	FMF800DX-24A
		1,200	フルSiC	2in1	FMF1200DX1-24A
		100	ハイブリッドSiC	2in1	CMH100DY-24NFH
		150	ハイブリッドSiC	2in1	CMH150DY-24NFH
		200	ハイブリッドSiC	2in1	CMH200DU-24NFH
		300	ハイブリッドSiC	2in1	CMH300DU-24NFH
		400	ハイブリッドSiC	2in1	CMH400DU-24NFH
		600	ハイブリッドSiC	2in1	CMH600DU-24NFH
		1,700	1,200	ハイブリッドSiC	2in1

PFC : Power Factor Correction

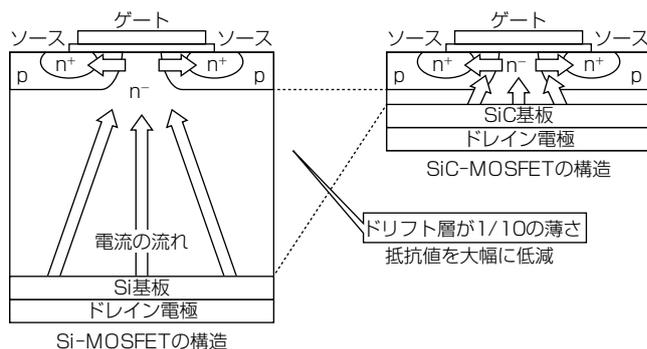


図1. SiC-MOSFETの縦構造

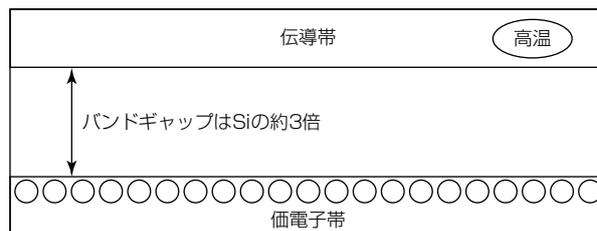


図2. SiCバンドギャップのイメージ

にもリーク電流の増加が少なく安定した高温動作が得られる。

2.2.3 高耐圧SBD実現による低損失化

先に述べたとおり、SiCは高い絶縁破壊電界強度とワイドバンドギャップという特長を持つ。このため、Siでは実現し得なかったショットキーバリアダイオード(SBD)の高耐圧化を実現できる。

SBDは、金属と半導体との接合によって生じるショットキー障壁を利用したダイオードであり、蓄積キャリアがなく高速スイッチング動作が可能というメリットがある反面、Siでは耐圧が低く高温時のリーク電流が大きいことがデメリットである。

これに対して、SiCをSBDへ適用することで、高耐圧・高温環境下でも高速スイッチング動作を可能として、低損失化を実現する。

SiC-SBDを搭載したハイブリッドSiCパワーモジュールの代表波形を図3に示す。Siパワーモジュールはターンオンスイッチング動作に伴って電流がオーバーシュートしているのに対して、ハイブリッドSiCパワーモジュールは短時間で安定状態に収束しており、スイッチング損失の抑制に寄与する。

図4は、Siパワーモジュール(Si-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)+ダイオード)の損失を100とした時の、代表的な条件でのSiCパワーモジュールの損失低減効果を示している。

損失を大別するとスイッチング損失と導通損失がある

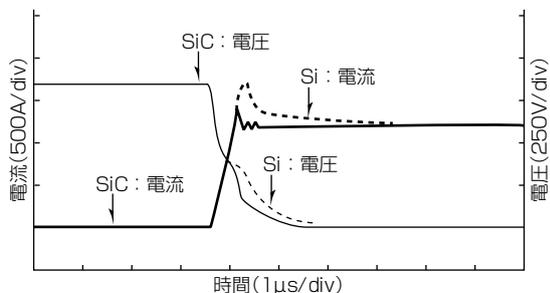


図3. ハイブリッドSiCパワーモジュールの代表波形

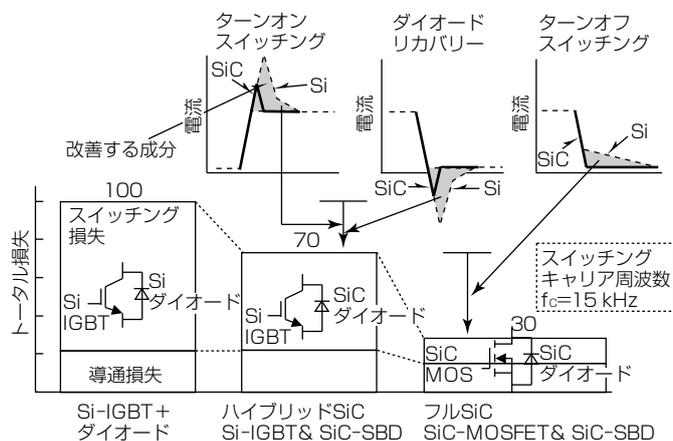


図4. SiCパワーモジュールの損失低減効果

が、ハイブリッドSiCでは先に述べたようにダイオードでのスイッチング損失低減効果が得られ、トータル損失を従来比70%に抑制可能である。さらに、フルSiCでは、ダイオードだけではなくスイッチングデバイスのスイッチング損失(ターンオン・オフ)及び導通損失の低減効果も得られ、トータル損失をSi製品の30%まで抑制可能である。

3. SiCパワーモジュールの応用

3.1 エアコンへの適用事例

2010年10月、世界初となるSiCパワーモジュール搭載エアコン“霧ヶ峰ムーブアイ”を発売した⁽⁴⁾。

エアコンの圧縮機を駆動するインバータにハイブリッドSiCパワーモジュールを適用して、前年度モデルに比べて約60%のスイッチング損失低減効果を確認した。冷房定格能力が3.6kWの機種で、期間消費電力量は前年度モデル1,183kWhから1,110kWhへ約6%の低減を実現した。

ハイブリッドSiCパワーモジュール搭載機種と従来機種とのスイッチング波形の比較を図5に示す。2.2.3項で述べたように、スイッチング時の電流オーバーシュートを抑制してスイッチング損失低減を実現した。

3.2 太陽光発電用パワーコンディショナへの適用事例

2011年1月に、フルSiCパワーモジュールを当社製太陽光発電用パワーコンディショナ単相200V/5kW機種(昇圧回路+インバータ)へ適用して、低損失化を実証した(図6)。

SiCの高速動作特性によるスイッチング損失の低減と、高耐圧特性を活用した導通損失の低減で、従来機種に比べて5kW定格出力時の損失を半減して、電力変換効率を2ポイント以上向上させて電力変換効率98.0%という結果を得た(図7)⁽⁵⁾。

3.3 エレベーターへの適用事例

2013年2月、業界で初めて^(注5)フルSiCパワーモジュールを搭載した高速エレベーターを開発して、電力損失を約65%低減して、装置の体積及び設置面積を約40%削減した⁽⁷⁾。

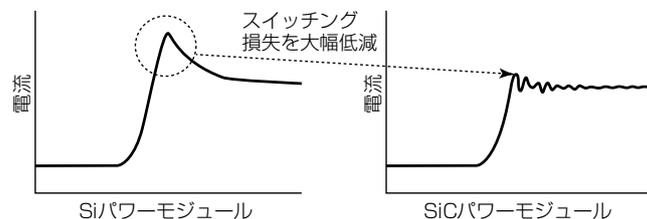


図5. パワーモジュール搭載エアコンのスイッチング波形の比較



図6. SiCパワーモジュール搭載パワーコンディショナ

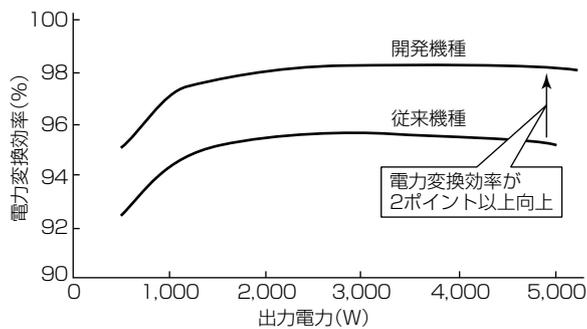


図7. パワーコンディショナ電力変換効率比較

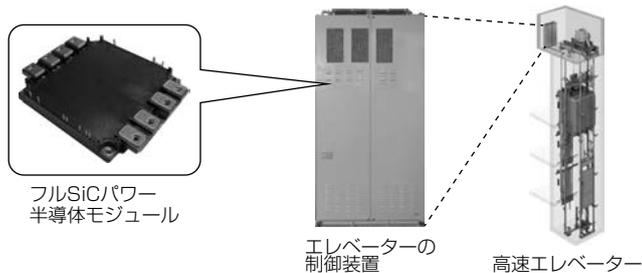


図8. SiCパワーモジュール搭載高速エレベーターの制御装置

図8は高速エレベーターのイメージである。高速エレベーターでは、人や荷物を乗せるかご室を上下に動かす巻上機の制御装置をエレベーターの最上部の機械室に設置しているが、機械室のレイアウト自由度を向上させるため、制御装置の小型化が求められている。しかし、今までは巻上機のモーターを駆動するパワーモジュールの発熱が大きく、それに応じた放熱機構が必要なため、制御装置の小型化が困難であった。

今回、世界最大クラスのフルSiCパワーモジュールを開発して高速エレベーターの制御装置に適用することで、電力損失を大幅に低減でき、併せて、放熱機構の小型化を実現して制御装置・機械室の小型化に寄与した。

(注5) 2013年2月26日現在、当社調べ

4. むすび

各種パワーエレクトロニクス機器の大幅な電力損失の低減や小型化が強く求められており、そのキーパーツであるパワーモジュールの高性能化への期待も強まっている。

これに応えるために開発・拡充しているSiCパワーモジュールについて、その種類と特長及びラインアップを示し、実用化事例について述べた。

特長は、高い絶縁破壊電界強度に伴うドリフト層の薄厚化及び抵抗値の低減、ワイドバンドギャップによる高温時リーク電流の低減、高耐圧SBD実現によるダイオードでのスイッチング損失の低減であり、SiCパワーモジュールを用いることで低損失化・小型化の点で優位である。

各種パワーエレクトロニクス機器の動作周波数と出力容量の分布を図9に示す。また、パワーモジュールのすみ分けについても併せて示している。高度なエネルギー利用が

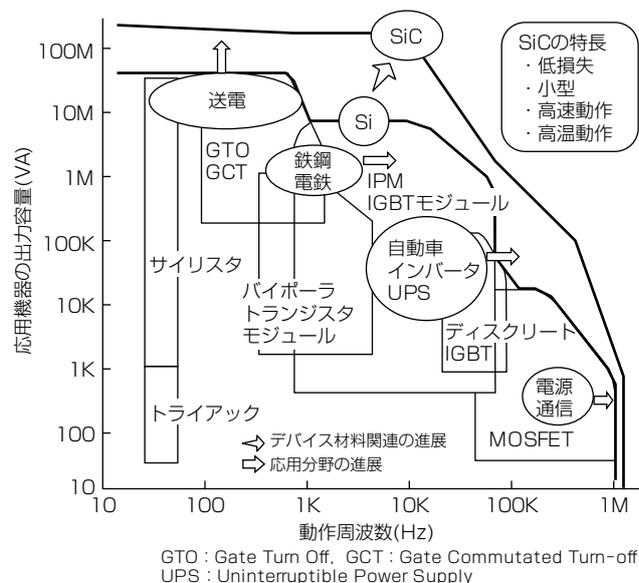


図9. パワー半導体モジュール応用の現状と将来の可能性

求められる中、各分野で動作周波数も出力容量も拡大していく傾向にある。一方で、機器の低損失化・小型化の要望は強まっており、幅広い分野でSiCパワーモジュールの適用が拡大していくと考えられる。

今後、SiCパワーモジュールの持続的な革新・普及に向けて、デバイス技術・パッケージ技術・信頼性技術などの包括的なソリューション開発を進めて、SiCの特長である低損失・小型・高速動作・高温動作を最大限に引き出すSiCパワーモジュールの開発を推進してSiCパワーモジュールの応用分野の拡大・普及を図り、更なる低炭素社会の実現に貢献していく。

参考文献

- (1) 中田修平, ほか: SiCパワーデバイス技術とその応用, 三菱電機技報, 84, No.4, 215~218(2010)
- (2) 三菱電機ニュースリリース: 11kWのSiCインバーターで、世界最高値となる電力損失約70%低減を実証, 2009年2月18日
- (3) 三菱電機ニュースリリース: SiCインバーターで、世界最高値となる電力損失90%低減を実証, 2009年11月11日
- (4) 三菱電機ニュースリリース: 2011年度三菱ルームエアコン「霧ヶ峰ムーブアイ」発売のお知らせ, 2010年8月24日
- (5) 三菱電機ニュースリリース: SiCを用いたパワーコンディショナで国内業界最高の電力変換効率98.0%を実証, 2011年1月20日
- (6) 三菱電機ニュースリリース: 「SiCパワー半導体モジュール」サンプル提供開始のお知らせ, 2012年7月9日
- (7) 三菱電機ニュースリリース: SiC適用エレベーター制御装置の開発のお知らせ, 2013年2月26日