特集論文

高周波用ハイブリッドSiCモジュール

宮崎裕二*

Hybrid SiC Module for High Frequency Application

Yuji Miyazaki

要　旨

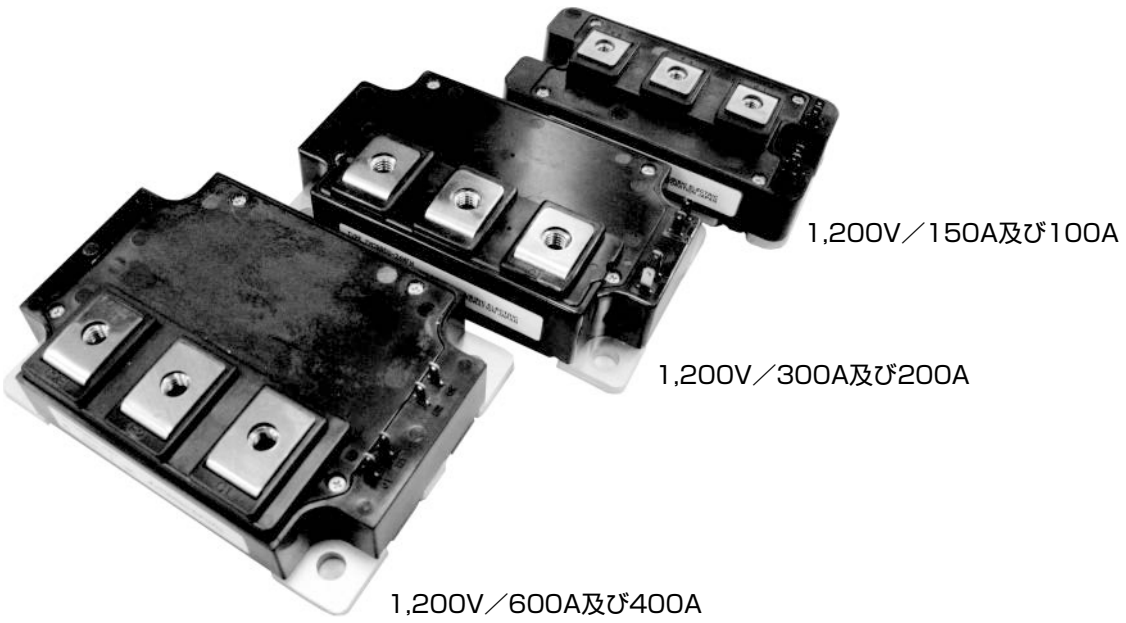
省エネルギーが単なる経済性の問題ではなく，地球規模の環境保護と結びつけて人々に意識され始めるようになって久しい。三菱電機はモータ駆動用のインバータや電源等に幅広く使用されるパワー半導体デバイスの分野で省エネルギー性能を追求した製品を提供してきた。IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)は幅広いニーズに応えることのできる汎用性の高いパワーデバイスである。現在，当社はIGBTの最新形態であるCSTBT(Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor)の製品開発を行い，多くの応用分野で高いシェアを持っている。その一方で，新しい半導体材料を用いたパワーデバイスの開発を進め，市場への投入を果たしてきた。従来のSi(Silicon)に比べ優れた材料特性を持つSiC(Silicon Carbide)は，今後の更なる展開が期待できる半導体材料である。

本稿では，電源システムなどに用いられる，高周波スイッチング動作に最適なパワーモジュールの開発について述べる。次のような特長によって，ターゲット市場の要求にベストフィットした製品となっている。

(1)　Si-IGBTの従来技術と，SiC-SBD(Schottky Barrier Diode)の組合せによるハイブリッド構成とした。

(2)　ソフトスイッチング技術との親和性を確保した。

(3)　従来品“NFHシリーズ”との外形互換性を持たせ，かつSiCデバイスの高速スイッチングに対応した低インダクタンスパッケージを採用した。



高周波用ハイブリッドSiCモジュール

既存の技術と先進的なSiCデバイス技術を組み合わせることによって，高周波スイッチング用パワーモジュールとして優れたパフォーマンスを実現した。太陽光発電用パワーコンディショナ，無停電電源（UPS），医療機器用電源等への適用でメリットが大きい。

*パワーデバイス製作所

1. まえがき

パワーエレクトロニクス機器へのパワーデバイスの適用範囲は広いが，おおまかにモータ駆動用途と電源用途に大別される。電源用途のうち主なものとしては，太陽光発電用パワーコンディショナ，無停電電源(UPS)，X線CT(Computed Tomography)／MRI(Magnetic Resonance Imaging)等の医療機器用電源，溶接機，誘導加熱機，レーザ加工機等がある。これらの電源システムでは，高調波の抑制を目的とした交流リアクトルやフィルタ回路，電力変換を目的とした出力トランス，また昇圧回路を構成する直流リアクトルを併用することが多い。このようなリアクトル部品は一般に体積と質量が大きいため，システムの多くの部分が占有され，また大容量になるほど顕著となっているのが現状である。このことが，パワーエレクトロニクス機器及び周辺システムの更なる小型・軽量化及び低コスト化を阻む要因の一つとなっている。

2. スイッチングの高周波化

2.1 市場におけるメリット

パワーエレクトロニクス機器設計の立場からすると，パワーデバイスのスイッチング周波数を大きくすることは，単に周波数を可聴域外に設定すること以上の重要な意味合いを持っている。すなわち，スイッチング周波数を大きくすることで，磁気飽和の問題を軽減することができ，又はより小さいインダクタンス値の部品を選定できることから，リアクトル部品をより小型化することができる。これによって機器の小型化，低コスト化はもちろんのこと，外付けリアクトル部品の機器への内蔵やフィルタの高性能化等，新しい付加価値を与えることも可能となる。

2.2 パワーモジュールの対応

しかしながら通常の場合，パワーデバイスにとってスイッチング周波数を大きくすることは，オン・オフの切り替わり時に過渡的に発生するスイッチング損失が増加するため，発熱や効率の低下につながる。したがって，インバータやサーボアンプ等のモータ駆動に一般的に用いられる導通損失重視型のパワーデバイスを適用した場合，スイッチング損失が支配的となり，高周波化への対応に無理が生じる。このため当社は，第五世代IGBT(CSTBT)を最適化することによって高周波スイッチングに対応したIGBTモジュールNFHシリーズを2004年から提供してきており[(1)]，太陽光発電用パワーコンディショナ，UPS，医療機器用電源等の高周波スイッチングを行う応用機器で多くの実績を積んでいる。

3. ハイブリッドSiCモジュールの開発

3.1 SiCデバイス

SiCは，パワーデバイスで従来のSiに代わる新しい半導体材料である。絶縁破壊電界強度がSiに比べておよそ一桁高いという特長を生かし，Siデバイスでは実現不可能であった高耐圧のユニポーラデバイスを実現できる。当社はSiC材料を用いたパワーデバイスとしてSiC-MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)とSiC-SBDの開発を行い，実用化してきた。SiC-MOSFET及びSiC-SBDのパワーエレクトロニクス機器への適用で，モータ駆動用のインバータや電源等，様々な用途で電力損失の大幅な低減が可能になる。特に，スイッチング損失が非常に小さいというユニポーラデバイスの特長から，高周波用のデバイスとして一層優れたパフォーマンスが期待できる。**図1**はターンオンスイッチング時の電流波形を，Si-PiN(P-intrinsic-N)ダイオードとSiC-SBDで比較したものである。PN接合を備えたバイポーラデバイスであるSi-PiNダイオードでは，導通時に蓄積された少数キャリア(ホール)がスイッチング時に印加された電界によって排出されるため，スパイク状の過渡的な電流(リカバリー電流)が存在し，スイッチング損失増加の一要因となっている。一方SiC-SBDではユニポーラ動作であるためリカバリー電流は存在せず，デバイスに寄生する静電容量の充電電流だけとなるため，スイッチング損失は極めて小さい。

3.2 モジュール設計

高周波用IGBTモジュールNFHシリーズの後継となる高周波用ハイブリッドSiCモジュールを開発した。電源機器システムの更なる高周波化に対応するため，ダイオード部分にはSiC-SBDを搭載した。一方，スイッチ部分については応用機器の動作上，全損失に対する導通損失の占める割合が比較的小さいことから，導通損失低減を狙ったSiC-MOSFETを使用する意味合いは薄い。コストとの両立性を重視しNFHシリーズで実績のあるSi-IGBTを採用した。ライフタイムコントロール技術の適用によってターンオフ損失と飽和電圧特性を制御し，高周波用IGBTデバイスとして最適化を行っている。

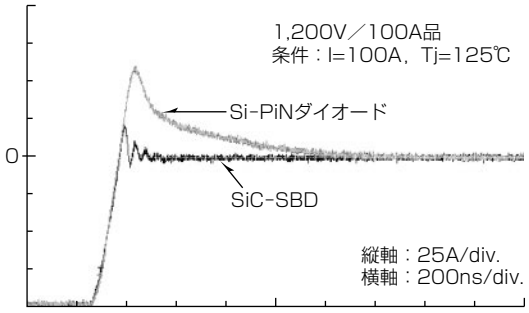


図1．ターンオンスイッチング時の電流波形比較

製品ラインアップは，市場要求の高い定格電圧1,200V，定格電流100～600Aとした（**表1**）。またパッケージ形状（**図2**）については，従来のNFHシリーズと完全に互換性を持たせた結果，従来品からの置き換え使用が可能である。また，IGBTの特性は従来品と同等であるため，置き換えに当たっては駆動回路の見直しも不要である。

3.3　発生損失の低減とスイッチングの高周波化

素子定格1,200V／100Aのパワーモジュールを動作させたときの発生損失（1/2モジュールあたり）の内訳を**図3**に示す。一般的な電源システムへの応用を想定し，正弦波出力電流30A（実効値），スイッチング周波数は30kHzとした。ハイブリッドSiCモジュールを使用することで，主にダイオードスイッチング損失を大幅に低減した。この動作条件で，従来品（NFHシリーズ）に比べ，パワーデバイスにおける損失を40%近く削減することが可能である。これはパワーエレクトロニクス機器全体の電力変換効率の向上に貢献するのに十分な量である。その一方で，損失低減をスイッチングの高周波化に充てることも可能である。**図4**は，スイッチング周波数と発生損失の関係を比較したものである。周波数以外の動作条件は**図3**と同じとした。これによると，パワーモジュールの発生損失が同等という前提で，ハイブリッドSiCモジュールのスイッチング周波数を従来品（NFHシリーズ）のおよそ2倍まで大きくすることができる。

3.4　ソフトスイッチング技術との親和性

パワーエレクトロニクスの分野では，高周波化によるスイッチング損失増加の問題を軽減する回路的手段としてソフトスイッチング技術が導入されている。代表的なものにZVS（Zero-Voltage Switching）があり，LC共振現象を利用することでスイッチング時の電流・電圧の交差を避け，パワーデバイスにおけるスイッチング損失を大幅に改善することができる[(2)]。しかしながら，従来品ではトランジスタにおけるスイッチング損失を劇的に低減できても，Si-PiNダイオードにおけるリカバリー電流のため，ダイオードスイッチング損失低減に限界があった。**図5**に示す発生損失内訳は，医療X線CT用電源などに一般的に用いられる電流共振型インバータの動作を模擬したシミュレーション結果である。**図6**に示す動作で，負荷の共振周波数を50kHz，正弦波出力電流のピーク値をモジュール電流定格の60%としてある。Siを用いた従来品（NFHシリーズ）で

表1．製品ラインアップ

形名	電圧定格	電流定格	回路	パッケージ
CMH100DY-24NFH	1,200V	100A	2 in 1	A
CMH150DY-24NFH		150A		
CMH200DU-24NFH		200A		B
CMH300DU-24NFH		300A		
CMH400DU-24NFH		400A		C
CMH600DU-24NFH		600A		

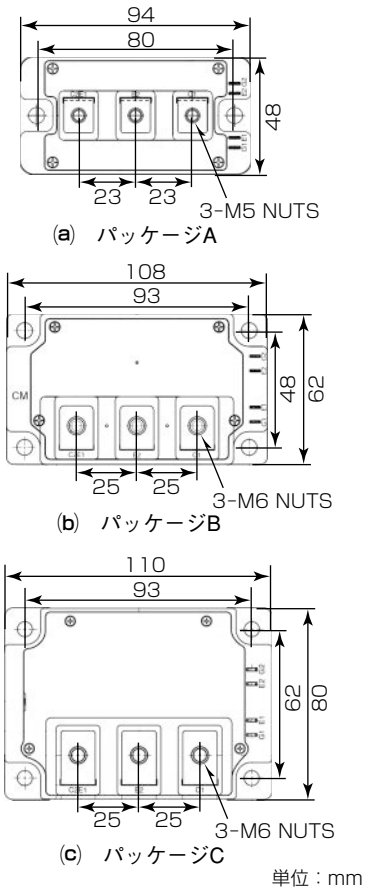


図2．パッケージ形状

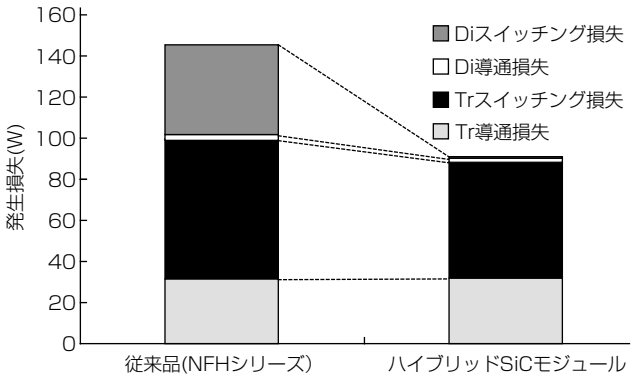


図3．発生損失の内訳（30kHz）

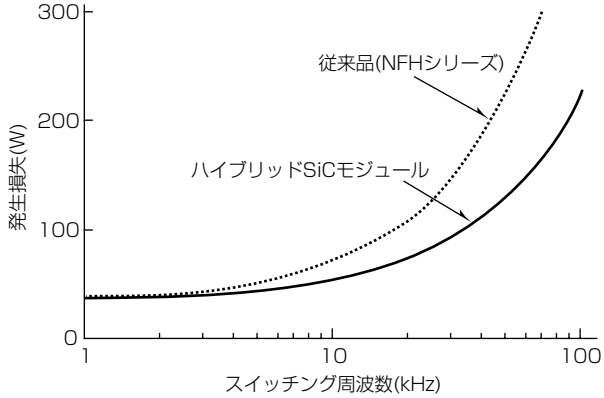


図4．スイッチング周波数と発生損失の関係

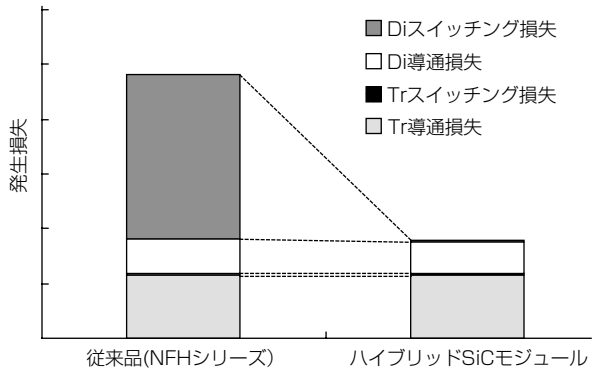


図5．発生損失の内訳(電流共振型インバータ)

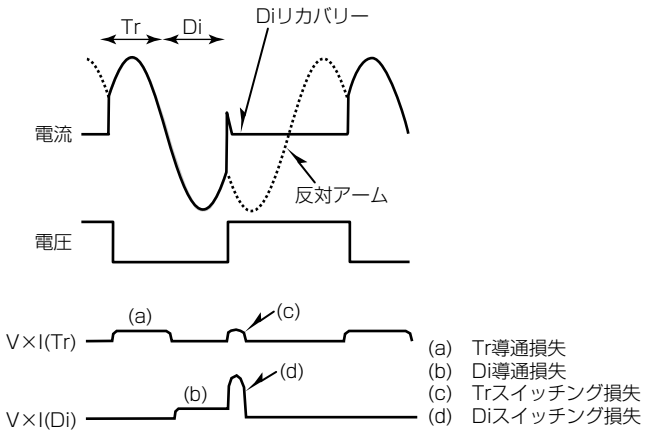
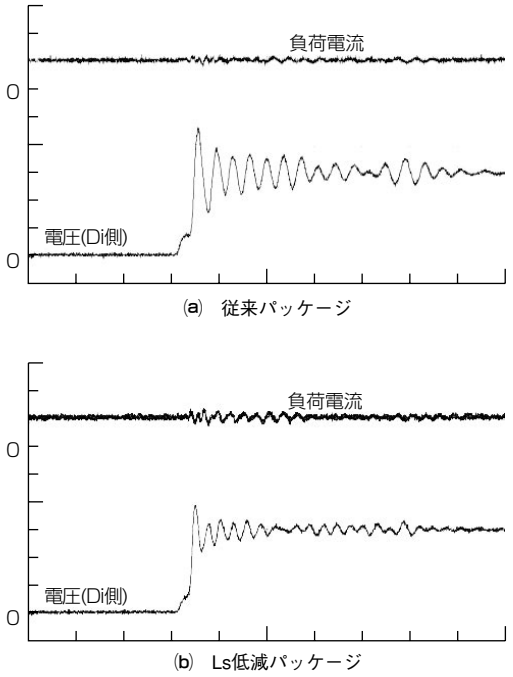


図6．電流共振型インバータの動作

は，モジュールの全損失に対してダイオードのスイッチング損失の占める割合が非常に大きい。それに対し，ハイブリッドSiCモジュールはリカバリー電流が存在せず，ダイオードスイッチング損失をほぼゼロとすることができる。つまりモジュールでの損失はほぼ導通損失だけとなり，高周波化による損失悪化がほとんどなくなる。このことから，高周波化を目的として採用されているソフトスイッチング技術との組合せでも，効果は極めて大きい。

3.5 パッケージインダクタンスの低減

パワーモジュールでは，スイッチング時の高い電流変化率di/dtと回路の寄生インダクタンスLsによるスパイク状のサージ電圧や，デバイスの寄生容量とLsに起因した振動波形が発生する。スイッチングスピードが速い高周波用パワーモジュールで，この現象はより顕著となり，過電圧や誤動作等を引き起こす場合がある。高周波用パワーモジュールに必要な高速スイッチング性能を維持したままこれらを軽減するためには，パッケージ内の寄生インダクタンスを低減することが望ましい。高周波用ハイブリッドSiCモジュールでは一部品種で，パッケージ内の電極配線の引き回しを最小化することによってパッケージ内のLsを30%以上低減した。ハイブリッドSiCモジュールのチップ組合せ(Si-IGBT及びSiC-SBD)を，従来パッケージ及びLs低減パッケージの両方に搭載した場合のターンオン



1,200V／100A品　測定条件：Ic=100A(ターンオン)，Vcc=600V
負荷電流(100A/div)，電圧(200V/div)，時間(100ns/div)

図7．インダクタンスの低減による効果

スイッチング時の波形比較を**図7**に示す。SiC-SBD側の電圧に現れるサージピーク電圧と，継続的な振動波形が大幅に改善された。SiCデバイスの高速スイッチングに相応したパッケージに仕上がっている。

4. む す び

高周波用ハイブリッドSiCモジュールは電源機器への適用をターゲットとしたパワーモジュールである。既存のSiデバイスと先進的なSiCデバイス技術及びパッケージの低インダクタンス設計を組み合わせることによって，従来の高周波モジュール(NFHシリーズ)とは一線を画す性能を得ることに成功した。周波数30kHzの動作で，パワーデバイスにおける損失は約40%低減し，電力変換効率の向上に貢献する。また，高周波領域での低損失性能を生かし，スイッチング周波数を従来品のおよそ2倍にすることが可能である。リアクトル部品を更に小型化することが可能となり，機器の小型・軽量化，低コスト化に貢献する。今後も多様化するユーザーからのニーズを反映した，付加価値の高い製品開発を行っていく。

参 考 文 献

(1) 田畑光晴，ほか：低駆動電力新トレンチIGBTモジュール“NFシリーズ”，三菱電機技報，**77**，No.9，563～566（2003）
(2) 宮崎裕二，ほか：高周波用IGBTモジュール“NFMシリーズ”，三菱電機技報，**80**，No.6，411～414（2006）