

産業用第7世代IGBTモジュール 高速スイッチング仕様“THシリーズ”

川畑 聡*
Satoshi Kawabata
村岡宏記*
Hiroki Muraoka

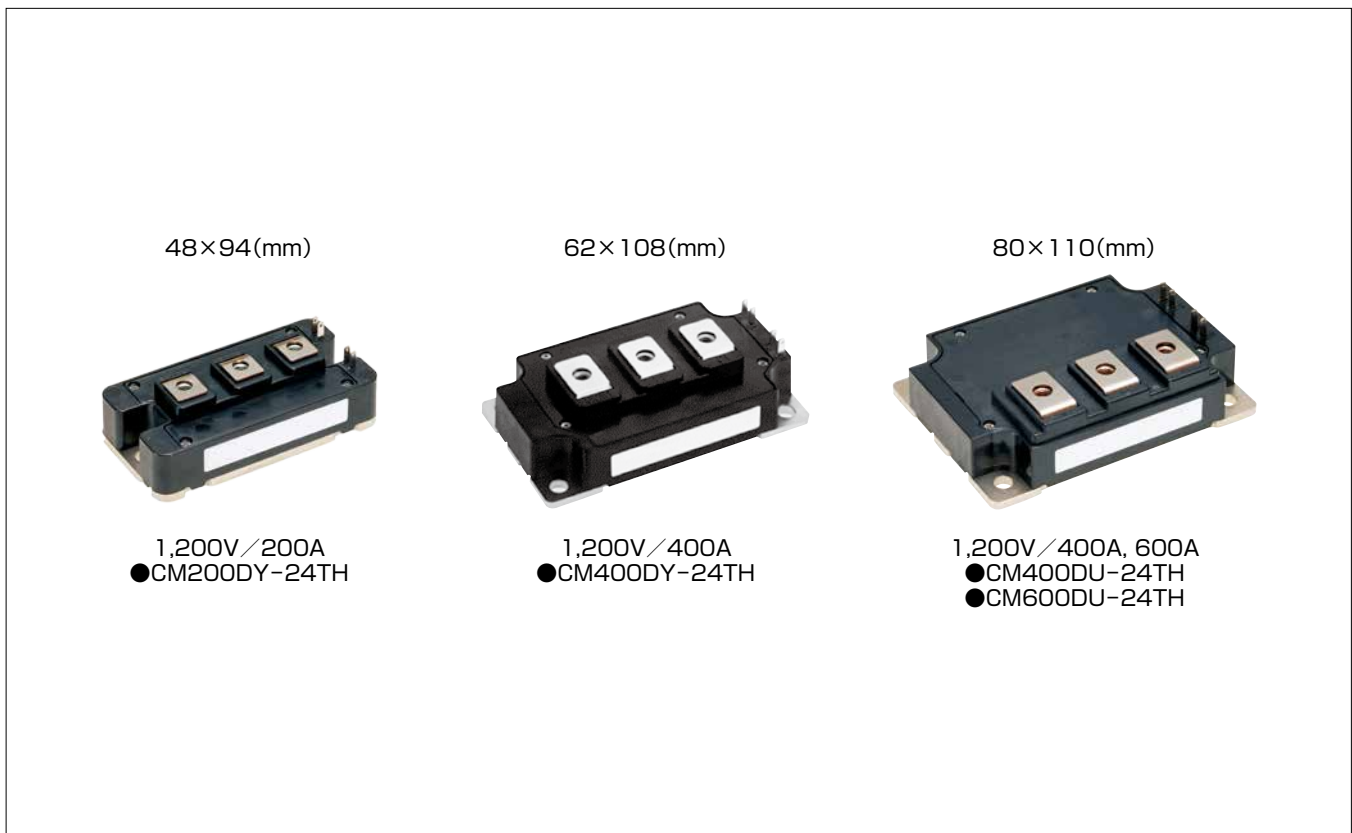
"TH Series" : 7th Generation IGBT Modules for High-frequency Switching
in Industrial Applications

要 旨

近年、太陽光発電や風力発電などに代表される自然エネルギーから電気を作る創エネルギーは、世界的環境の影響もあって増加傾向にある。また環境への影響には、電気を作る創エネルギーと同時に電力の消費量を削減することが重要であり、機器の省エネルギーも強く望まれる。機器の省エネルギーには、電力変換のキーパーツの一つであるパワーデバイスの低損失化が大きく寄与するが、それらが使用される条件は多岐にわたる。特に産業用では汎用インバータ、太陽光発電装置、風力発電装置、無停電電源装置、誘導加熱装置、医療用電源装置、溶接機など様々な機器にパワーデバイスが使用されており、多岐にわたるアプリケーションの使用条件を一つの仕様のパワーデバイスでまかなうことは、機器の高効率化や省エネルギー効果の観点

から見れば、その効果は限定的になると考えられる。機器には、それぞれ適した使用条件があり、その条件に適したパワーデバイスを使用することで、機器の効果を最大限に発揮できるとともに、省エネルギー効果も同時に達成可能になる。

今回、アプリケーションで使用条件に特に明確な差が見られるスイッチング周波数に注目し、高速スイッチングの使用条件で低損失化を可能にした。当社最新世代チップである産業用第7世代IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)チップをチューニングすることで高速スイッチングが要求される医療用電源装置や溶接機などの機器へ、高効率化とともに省エネルギー効果に最大限に貢献することが期待できるIGBTモジュール“THシリーズ”を開発した。



産業用第7世代IGBTモジュール高速スイッチング仕様“THシリーズ”パッケージ

産業用第7世代IGBTモジュール高速スイッチング仕様THシリーズの定格及びパッケージサイズと外観を示す。

1. ま え が き

エネルギーなどの資源を効率的に有効活用できるパワーエレクトロニクスの役割は、昨今の環境に関する取組みやそれを取り巻く社会的背景から、より一層その重要度を増している。本稿では、既に量産している三菱最新産業用第7世代IGBTチップを高速スイッチング仕様にチューニングしたIGBTモジュールTHシリーズの開発について述べる。THシリーズを採用することによって、高速スイッチング($f_c = 20\text{kHz}$ 以上)が求められる機器の効率改善に大きく貢献できるものと考えられる。産業用機器では、パワーデバイスが使用されるスイッチング周波数は様々である(図1)。

2. THシリーズの特長

2.1 第7世代IGBTチップ技術

三菱電機の第7世代IGBTチップは、第5世代IGBTチップから採用している電荷蓄積層(CS層)を備えた“CSTBT”構造を同様に採用した。第6世代では、第5世代に比べてトレンチゲートを狭ピッチ化し、キャリア蓄積効果を更に高めており、第7世代では極薄ウェーハ化、MOS(Metal Oxide Semiconductor)構造及び裏面構造の改良によって高性能を実現している。今回THシリーズのチップでは、第7世代IGBTチップのトレードオフをチューニングすることによって、スイッチング周波数 $f_c = 20\text{kHz}$ 以上で使用される機器の高効率化に貢献する。

2.1.1 THシリーズの特性

IGBTは飽和電圧(V_{CEsat})とターンオフ損失(E_{off})との間にトレードオフの相関があり、IGBTの特性を表す指標としてしばしば用いられる。産業用第7世代IGBT“Tシリーズ”の飽和電圧の狙い目は、 $V_{CEsat} = 1.55\text{V}$ (@ $I_C =$ 定格電流, $T_{vj} = 25^\circ\text{C}$)であるが、同構造や同電流密度の場合、スイッチング損失を低減させると飽和電圧が増加してしまう(図2)。高周波スイッチングで使用される機器では、飽和電圧で発生する定常損失よりも、スイッチング損失の占める割合が大きくなるために、多少飽和電圧を犠牲にしてもスイッチング損失を低減させることで、機器の高効率化に大きく貢献が期待できる。ただし、飽和電圧とスイッチング損失のトレードオフでトータル損失が改善できる効果には限界があり、THシリーズでは、飽和電圧 V_{CEsat} を様々な機器の使用条件を考慮して、 4.35V (@ $I_C =$ 定格電流, $T_{vj} = 25^\circ\text{C}$)に設定した(図3)。

トレードオフのチューニングに際しては、ライフタイムキラーの照射によって実現しているが、背反事項として破壊耐量の低下を招く。このため破壊耐量や飽和電圧を犠牲にしてもスイッチング損失の低減が重要視される機器にだけ使用が可能になる。

ターンオフに関しては、先に述べたとおりライフタイムキラーによるトレードオフの狙い目変更によって飽和電圧との損失の調整を行うことで、機器の高効率化に貢献ができるが、IGBTのスイッチング損失はターンオフ損失だけでなくターンオン損失も存在する。ターンオンは、 $V_{GE(th)}$ との相関があり、 $V_{GE(th)}$ を下げることでターンオン損失は

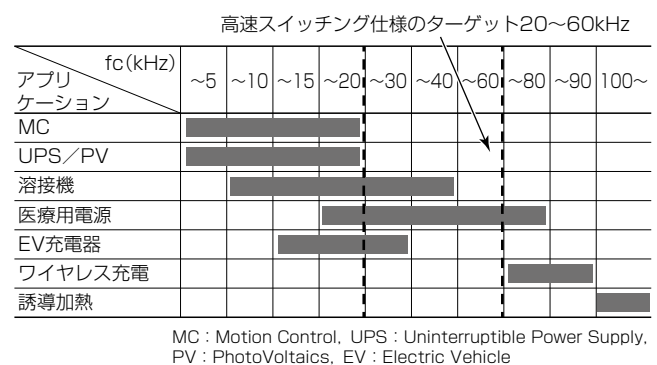


図1. 主な産業用機器の使用スイッチング周波数

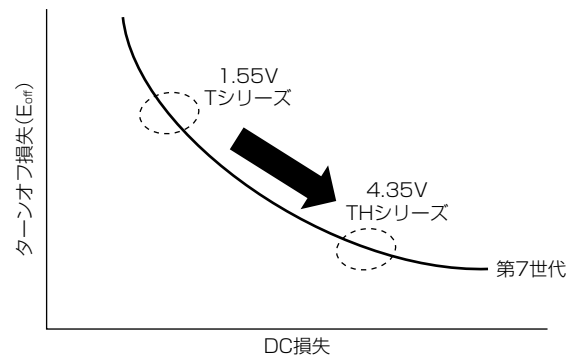


図2. IGBTのトレードオフ

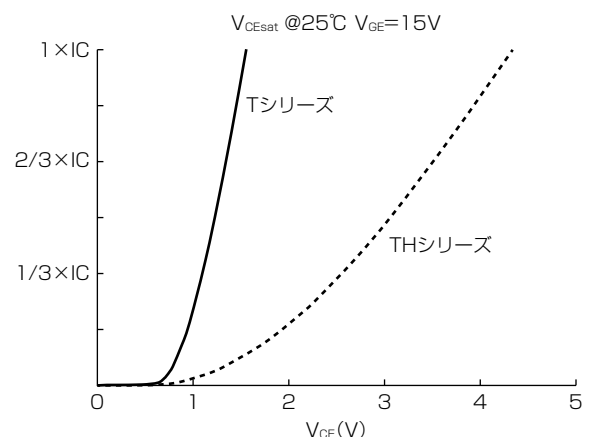


図3. TシリーズとTHシリーズのDC特性

低減可能である。ただし、高周波でスイッチングする機器はノイズによる影響が大きくなることも考えられて、単に $V_{GE(th)}$ を下げることはノイズによる誤動作や、素子破壊も考慮して、Tシリーズから変更なしにチップの寄生容量や内蔵 r_g の最適化を行うことで対応した。

また高速スイッチング仕様にはIGBTだけでなく、モジュール内に構成されているFWD(Free Wheeling Diode)についてもチューニングを行うことで損失低減へ貢献が期待できる。ダイオードはIGBTのターンオフと同様に飽和電圧 V_F とスイッチング損失 E_{rr} にトレードオフの相関が存在するため、同様に狙い目を変更した。

このようにTHシリーズでは、Tシリーズをベースにチップの狙い目を変更してスイッチング損失を低減させている。図4にTシリーズとTHシリーズのスイッチング波形比較を示す。

ここで、産業用第7世代IGBTモジュールTシリーズとTHシリーズとの主な特性比較を表1に示す。

2.1.2 高速スイッチング仕様をもたらす機器への貢献

実際の機器にはどの程度の貢献が期待できるか、第7世代TシリーズとTHシリーズで損失シミュレーションを実施し、比較した結果を図5に示す。高速スイッチング仕様がターゲットにしている機器はスイッチング周波数が20kHz以上であるため、ここでは30kHzで算出した。Tシリーズで多くを占めているスイッチング損失がTHシリーズで大幅に減少していることが分かる。スイッチング損失を低減させた相反事項として飽和電圧DC損失が上昇しているが、IGBTトータルでは低減できている(図5)。

スイッチング周波数が増加してもDC損失は変わらないため、スイッチング損失の占める割合が大きいTシリーズは高周波動作ではTHシリーズに比べて一層損失を増加させることが考えられる(図6)。

スイッチング周波数が高い場合には、ハイブリッドSiC(シリコンカーバイド)モジュールやフルSiCモジュールの

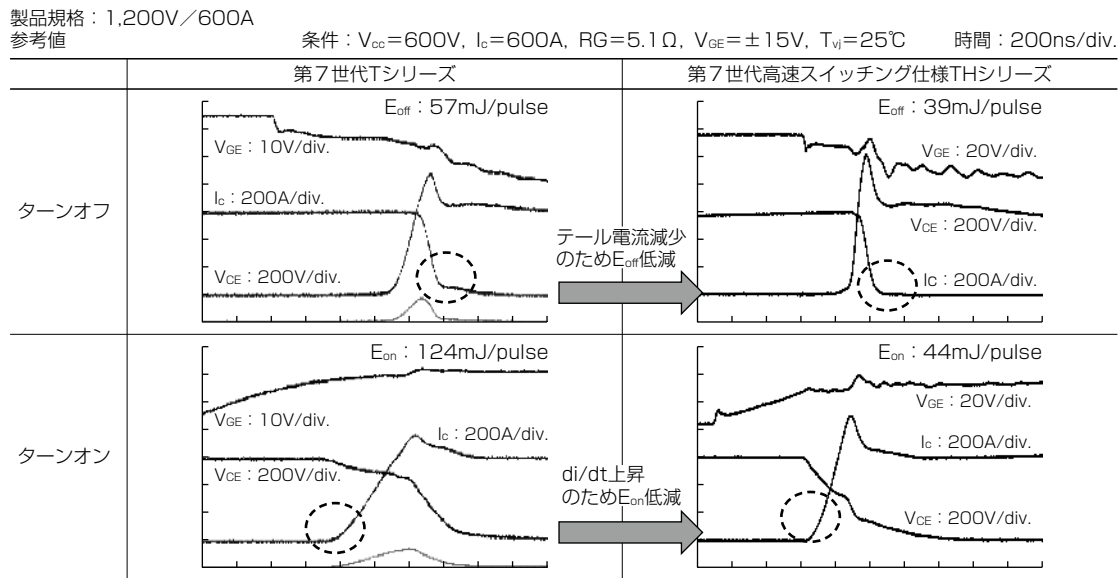


図4. スwitching波形比較

表1. 主な特性比較(1,200V/600A)

項目	第7世代Tシリーズ	第7世代高速スイッチング仕様THシリーズ (短絡保証なし)
形名	CM600DY-24T	CM600DU-24TH
V_{isol}	AC4.0kV	AC4.0kV
T_{vjmax}	175°C	175°C
QG	3,700nC	1,500nC
$V_{GE(th)}$ (typ)	6.00V	6.00V
V_{CEsat} (typ)	1.55V	4.35V
V_{BC} (typ)	1.65V	2.35V
E_{off} (typ)	64mJ/pulse	35mJ/pulse
V_{CCmax}	850V	850V

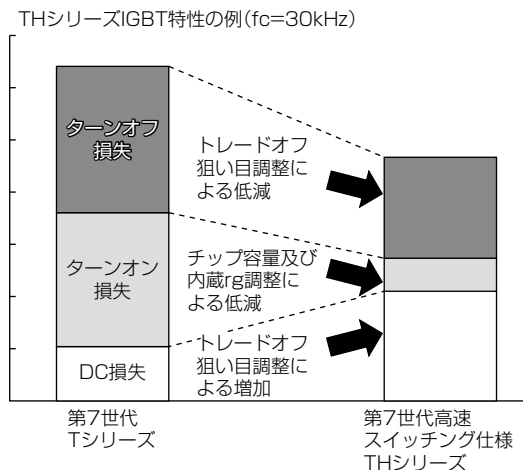


図5. IGBTの損失低減

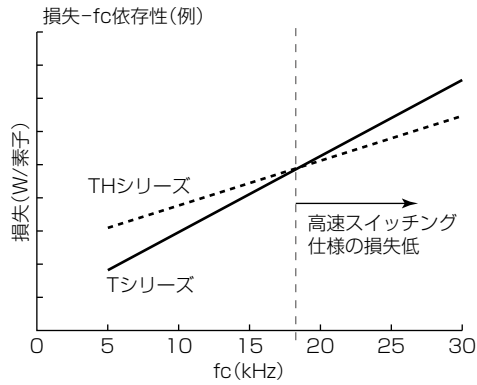


図6. 1素子当たりの損失-fc依存

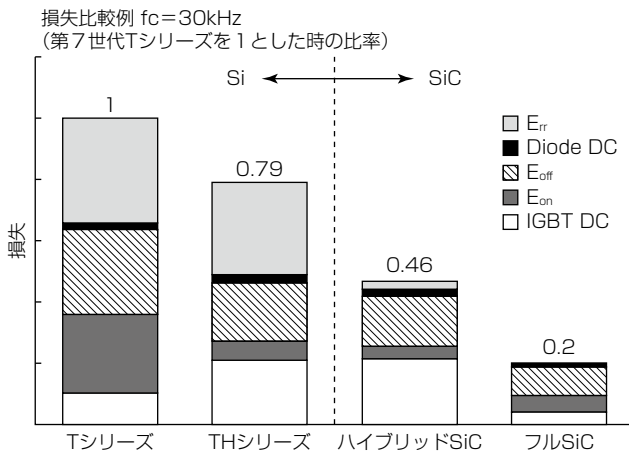


図7. パワーモジュールの損失比較

選択肢もある。一例であるが、第7世代TシリーズとTHシリーズの損失比較を示す(図7)。このようにTHシリーズはSiC製品には及ばないがSi(シリコン)製品では高速仕様に適した製品であり、ユーザーサイドの選択肢の一つとしてラインアップを実現した。

2.2 パッケージ技術

THシリーズでは、産業用第7世代Tシリーズstdタイプで適用したTMS(Thick Metal Substrate)技術は採用せず、旧世代(第6世代stdタイプまで)で適用しているセラミック基板と銅ベース構造を採用した。当社が展開しているハイブリッドSiCとの互換性や、高速スイッチングによる損失が非常に大きくなることでの放熱性、熱容量の確保などを重視した(図8)。

2.3 製品ラインアップ

製品ラインアップとしては、1,200V/200A, 400A, 600Aとした(全て2in1)(表2)。1,200V/400Aについてはパッケージを2種類準備した。小型化をメインに機器を設計する場合と、高負荷で発熱が大きくなるような設計をする場合、現状使用しているパッケージとの互換性も考慮して、置き換えも見据えた形にした。

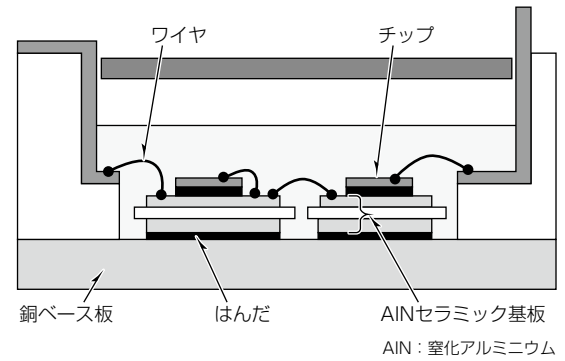


図8. THシリーズの内部構造

表2. THシリーズのラインアップ

V _{CBS} (V)	結線	パッケージ (mm)	I _c (A)		
			200	400	600
1,200		48×94 	CM200DY-24TH	-	-
		62×108 	-	CM400DY-24TH	-
		80×110 	-	CM400DU-24TH	CM600DU-24TH

3. むすび

産業用第7世代IGBTモジュール高速スイッチング仕様THシリーズについて述べた。機器の高効率化には、使用されるパワーデバイスの低損失化が非常に重要になるが、産業用機器はアプリケーションが多数存在し、使用条件も多岐にわたる。全ての機器の高効率化に貢献できるパワーデバイスの一つの仕様でまかなうことには限界があり、機器の使用条件によってパワーデバイスの特性を最適化することが、機器の性能を最大限に発揮するために重要な項目になる。近年、機器の性能向上に向けては、損失低減効果が大きく期待できるWBG(Wide Band Gap)デバイスも選択可能であるが、特性改善が限界に近づいているSiデバイスでもIGBTの特性をチューニングすることで、使用される機器への貢献の余地は残るものと考えられる。今後も多岐にわたる機器の使用条件や回路構成に対応するため商品の開発を進めていく。

参考文献

- 上馬場 龍, ほか: 産業用第7世代パワーチップ技術, 三菱電機技報, 90, No.5, 287~290 (2016)
- 宮澤雅臣, ほか: 産業用第7世代IGBTモジュール“Tシリーズ”, 三菱電機技報, 90, No.5, 295~298 (2016)