特集論文

6世代IGBTモジュール“NXシリーズ”

西山建人*
宮崎裕二*
中西英俊*

6th Generation IGBT Module "NX series"

Taketo Nishiyama, Yuji Miyazaki, Hidetoshi Nakanishi

要　旨

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールは，産業分野でインバータ，モータ制御などに広く使用されている。また，医療機器や溶接機，瞬時停電対策用バックアップ電源であるUPS(Uninterruptible Power Supply)で使用されるなど，応用機器の分野はますます拡大している。さらに近年では，太陽光や風力をはじめとする自然エネルギーを利用した発電の電力変換用インバータとしてIGBTモジュールの需要が増加しており，今後ますますIGBTモジュールの果たす役割は大きくなると予想される。

三菱電機では，低損失を特徴とする5世代IGBTであるCSTBT(キャリア蓄積効果を利用した当社オリジナルIGBT)を搭載したIGBTモジュールを市場へ供給し，様々な分野で高いシェアを獲得してきた。しかし，用途の多様化に伴い，単に低損失というだけでなく，低ノイズ，高温での動作保証など，更なる性能向上の要求が増してきている。このような背景から，今回5世代IGBTより更に次の点で性能を向上させた6世代IGBT及びFWDi(Free Wheeling Diode)を搭載した“6世代NXシリーズ”を開発した。

(1)　損失の低減(当社5世代IGBT比)

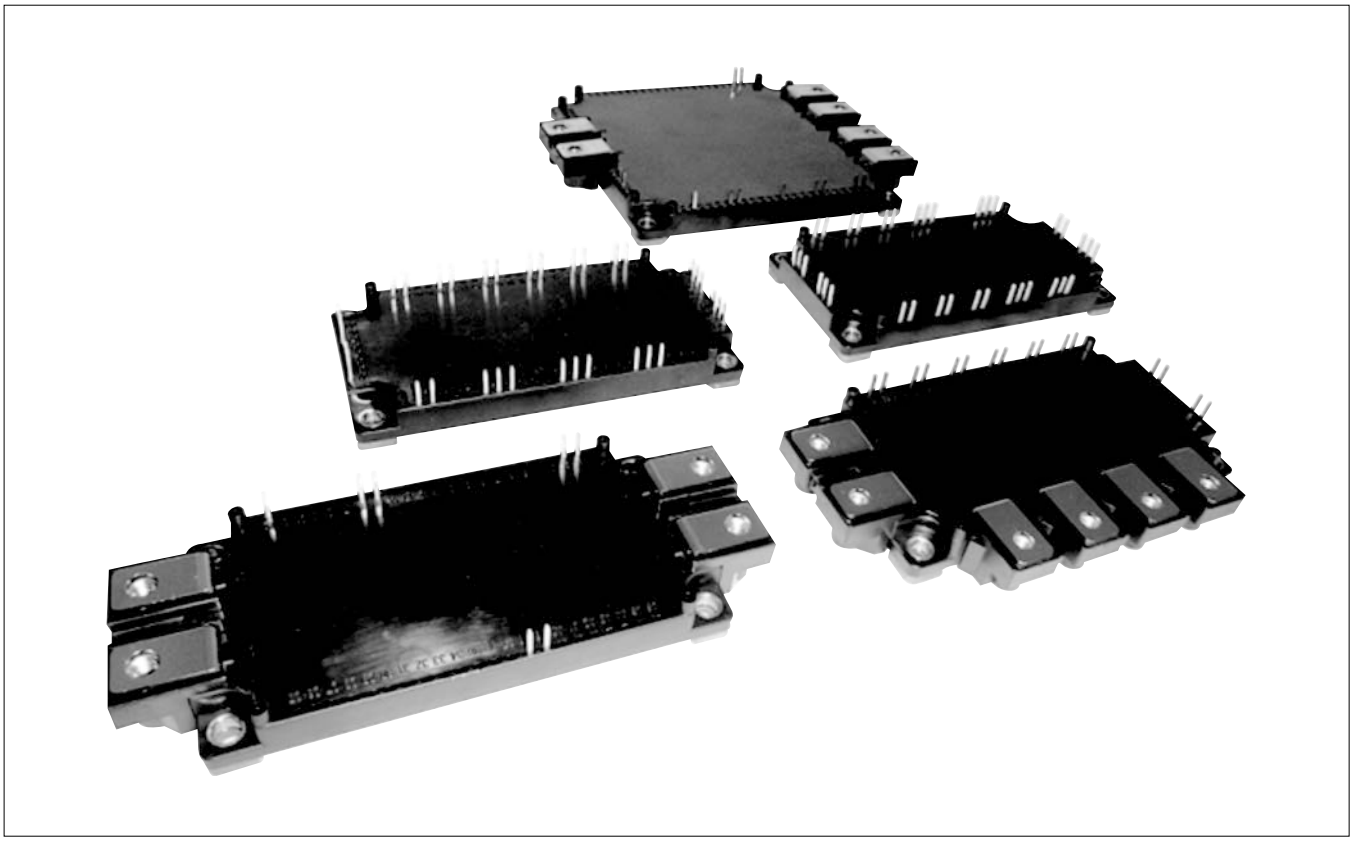
(2)　使いやすさの追及

①放射ノイズの低減

②ゲート容量の低減

③発振抑制ゲート抵抗の温度依存性の低減

(3)　高温での動作保証



6世代NXシリーズの外観(2in1，6in1，7in1，CIB)

写真はCSTBTをベースにした6世代IGBT及びFWDiを搭載したIGBTモジュールである。
2in1タイプ(1,200V／150～450A)：手前左，7in1タイプ(1,200V／75～150A)：手前右，6in1タイプ(1,200V／75～150A)：中央左，CIB(Converter Inverter Brake)タイプ(1,200V／35～100A)：中央右，2in1タイプ(1,200V／600～1,000A)：奥

　*パワーデバイス製作所

1. まえがき

IGBTモジュールは，応用機器に合わせて最適な回路構成・電力容量，外形を提供することが必要である。5世代NXシリーズでは，ケース，ピン端子など共通の部品と5世代IGBTとを用いて，様々な回路構成を実現してきた。今回，5世代IGBTより更に性能を向上した6世代IGBTとFWDiを搭載した“6世代NXシリーズ”を開発した。回路構成は2in1，6in1，7in1，CIBとし，定格電圧は1,200V，定格電流は35～1,000Aとし，幅広い市場の要求にこたえられるラインアップとした(2010年4月時点の予定ラインアップ)。本稿では，開発した製品の特長について述べる。

2. 開発製品の特長

この開発製品は，市場からの要望を反映し，損失の低減だけでなく，ノイズ低減など使いやすさの向上と高温での動作保証を実現した。

2.1 損失の低減

IGBTモジュールで発生する損失は，一般的にスイッチング損失と定常損失に分類される。さらにスイッチング損失はターンオフ損失(E_{off})，ターンオン損失(E_{on})及びFWDiのリカバリー損失(E_{rr})に分類される。6世代NXシリーズはそれぞれの損失低減を行った。

2.1.1 IGBTチップの改善

IGBTで発生するE_{off}と定常損失のもとになる$V_{CE(sat)}$には，トレードオフの関係がある。E_{off}はターンオフ時にN^-層に残っているキャリアの量が少ないほど低減できるが，$V_{CE(sat)}$はキャリアが少ないほど大きくなり定常損失を増加させる。このトレードオフを改善するため，6世代IGBTはキャリアの注入効率を抑制することで残留キャリア濃度を最適化し，E_{off}の増加を抑えた。一方，少ないキャリアを有効に利用し$V_{CE(sat)}$を低減するため，キャリアの存在エリアのN^-層の厚みを薄くするとともに，微細加工によってセルピッチを縮小しチャネル密度を増加させた。さらにCS(Carrier Stored)層の最適化と，PCM(Plugging Cell Merged)技術を用いてエミッタ近傍のキャリア濃度を上げることで，$V_{CE(sat)}$の低減を可能とした。これらの最新技術を導入することで6世代IGBTはトレードオフの改善を達成し，5世代IGBTと比べて，例えば**図1**のE_{off}＝15mJ/pulseの条件で$V_{CE(sat)}$を約23%改善した。

2.1.2 FWDiの改善

FWDiには立ち上がりが急峻(きゅうしゅん)な電圧をダイオードに印加したときに，オフ状態に戻る前にリカバリー損失(E_{rr})が発生する。キャリアの寿命を制御するライフタイムコントロールによって逆回復時間を短縮でき，E_{rr}を小さくすることができるが，順方向電圧(V_F)が上がるため，定常損失が大きくなる。FWDiの損失を小さくするには，このトレードオフを改善する必要がある。今回開発したFWDiは，ライフタイムコントロール，チップ厚の最適化，さらにベース濃度の最適化によって，従来品よりE_{rr}とV_Fのトレードオフを改善した(**図2**)。従来品と比べてE_{rr}＝8mJ/pulseの条件でV_Fを0.33V改善した。

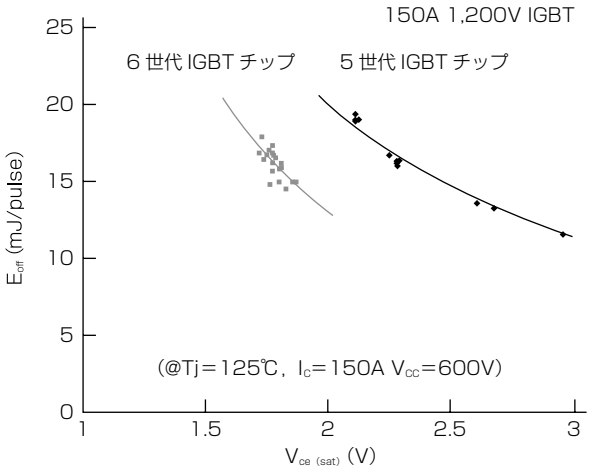


図1．E_{off}–$V_{CE(sat)}$トレードオフ 特性

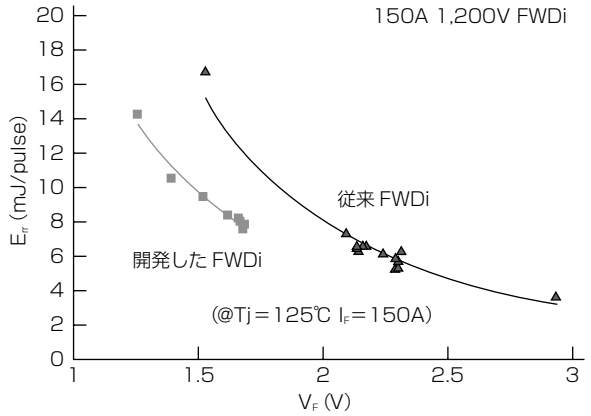


図2．E_{rr}–V_Fトレードオフ特性

この技術によって6世代IGBTとFWDiの特性改善をすることで，PWM(Pulse Width Modulation)インバータ動作における損失の低減に成功した。ターンオン時にコレクタ-エミッタ電圧(V_{CE})のdv/dtが7.5kV/μsとなるようにゲート抵抗をそれぞれ調整した条件で，PWMインバータ動作を想定した損失シミュレーションによって，従来のNXシリーズと6世代NXシリーズの損失を比較した。その結果，6世代NXシリーズは従来のNXシリーズに比べて，トータル発生損失を約24%低減できることを確認した(**図3**)。

2.2 使いやすさ

2.2.1 EMIノイズの低減

IGBTモジュールは，高電圧・大電流を高速スイッチングすることから，EMI(Electro Magnetic Interference)ノイズの発生源となることがある。IGBTモジュールを搭載した応用機器の分野が広がるにつれ，事務所向けでは無

線などに影響を与えないこと，工場内の装置ではネットワークで接続された装置に誤動作を起こさせないことなど，他の周辺装置に影響を与えないことが必要となる。そのため低損失に加え低ノイズの要求が高まっている。

応用機器から発生するEMIノイズの一要因に，IGBTモジュールのスイッチング動作時のdv/dtがある。**図4**に示すように，ターンオン時のdv/dtとE_{on}はトレードオフの関係にあるが，6世代IGBTはCS層及びPCMの最適化によってコレクターゲート間の容量を低減することで，このトレードオフを改善した。

図5にターンオン時のゲート電圧(V_{GE})及びコレクターエミッタ電圧(V_{CE})の波形を示す。EMIノイズはV_{CE}波形の立ち下がり始めの部分(**図5①**)の傾きに影響される。この部分が急峻であればノイズが大きくなると考えられている。一方，E_{on}はV_{CE}波形のテール部(**図5②**)に依存していることから，この部分を減らすことによってE_{on}を低減することが可能になる。

テール部はゲートのミラー時間と連動しており，テール部を小さくするためには，このミラー時間を短縮する必要がある。ミラー時間はコレクターゲート間容量に比例するため，コレクターゲート間容量を小さくすればテール部が小さくなりE_{on}を低減することができる。6世代IGBTでは，PCMの最適化によってコレクターゲート間容量を5世代IGBTと比較して1/2以下に低減した。その結果，dv/dt(**図5①**)を上げることなく損失を低減することが可能となり，dv/dt-E_{on}トレードオフの改善ができた。

ノイズ低減効果を実証したデータを**図6**に示す。5世代IGBTを搭載したNXシリーズと6世代IGBTを搭載したNXシリーズのEMIノイズを比較した結果(E_{on}同等)，装置に影響を与えることの多い40MHz付近のノイズレベルが約5dB低下していることが分かる。

2.2.2 ゲート電荷の低減

IGBTは電圧駆動素子であり，スイッチングするためにはゲート容量への充放電が必要となる。6世代IGBTでは，PCMの最適化によってゲート容量を小さくしている。このため，ゲートの充放電に必要な電荷量(Q_g)は，**図7**に示すとおり5世代IGBTに比べ約40%低い。

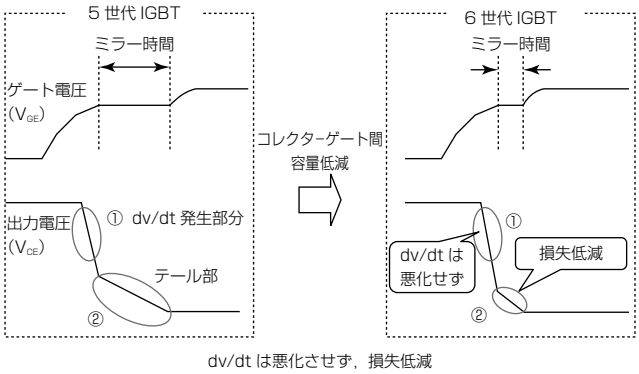


図5．ターンオン波形

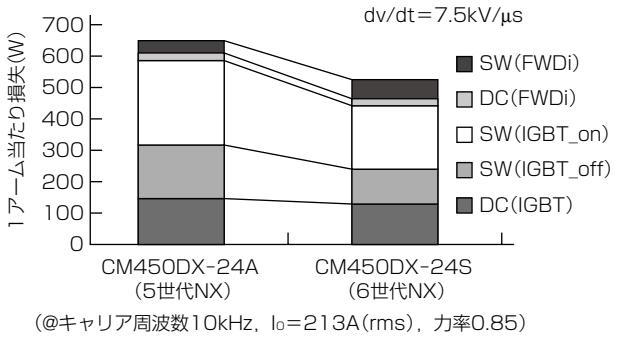


図3．インバータ動作時の損失

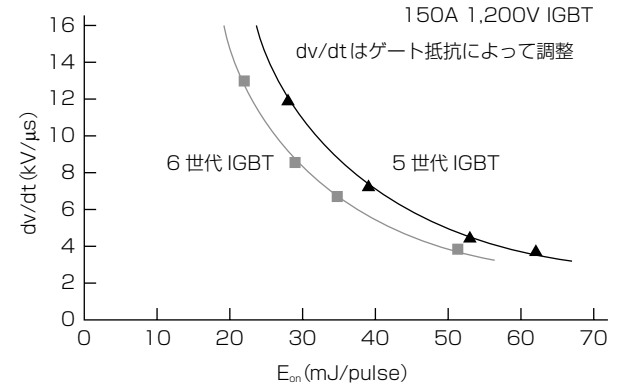


図4．dv/dt-E_{on}トレードオフ特性

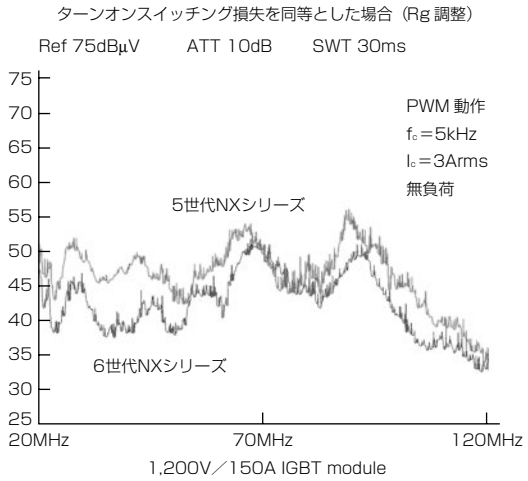


図6．EMIノイズ

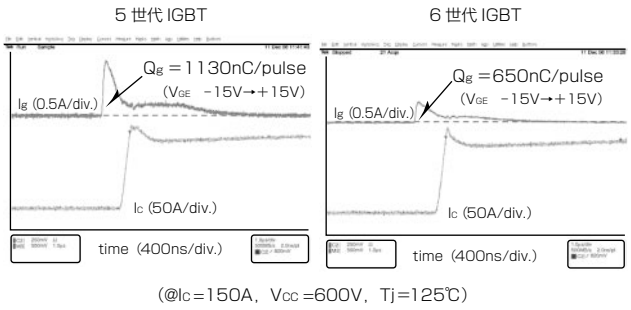


図7．ターンオン時のゲート電流

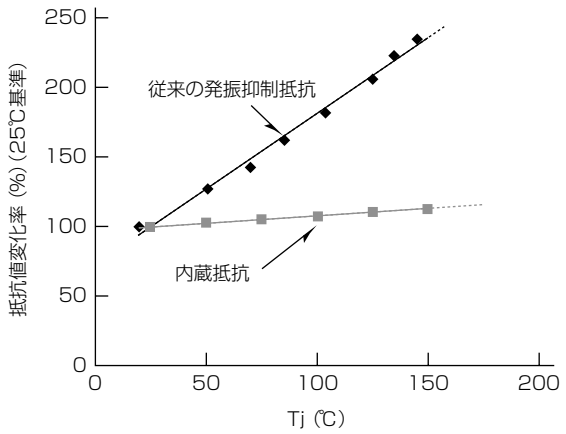
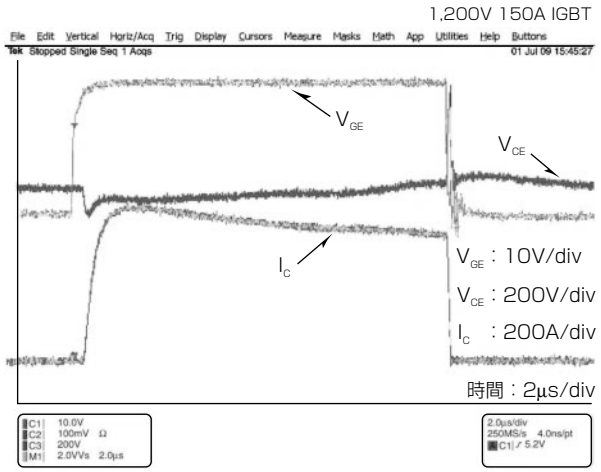


図 8．発振抑制抵抗の温度依存性



(@V_{CC}=800V，VGE=+15V/−15V，Tj=150℃)

図 9．短絡耐量SCSOA

したがって，ゲート駆動回路の設計で，駆動電力が小さくなることでコストの低減が可能になる。

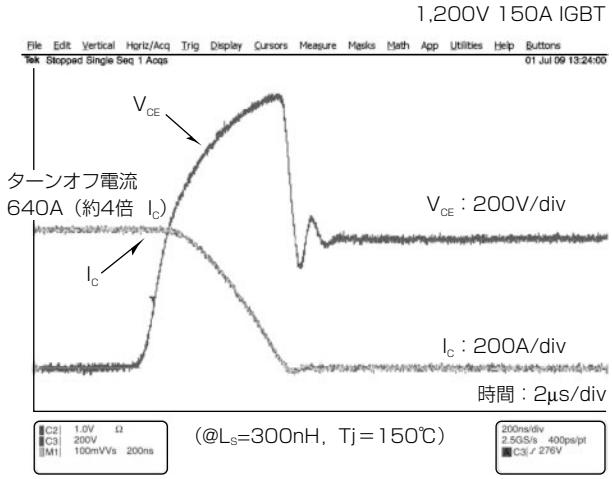
2.2.3　発振抑制ゲート抵抗の内蔵

IGBTモジュールはチップを並列に接続し，電流容量を増加させる場合がある。このときには，各チップ間で発振しないようにするために，チップごとのゲートに発振抑制抵抗を接続する。6世代IGBTは従来の5世代IGBTに対して温度依存性の小さい発振抑制抵抗をチップに内蔵することによって，温度変化に対するスイッチングスピードなどの特性変動をより小さくすることができた。**図 8** に，従来の抵抗と内蔵抵抗の温度依存性について示す。

2.3　高温での動作保証

近年，IGBTモジュールを搭載する機器も多様化しており，使用条件拡大を目的としてIGBTモジュール動作保証温度の高温化要求が増加する傾向にある。

6世代IGBTは，構造の最適化を行うことで高温時のリーク電流を抑制し，熱暴走しにくい設計とした。これによって，動作時のジャンクション温度(Tj)の最大許容値を，従来よりも25℃高くした温度条件でも安定した動作と破壊耐量が確保できた。まず，短絡耐量(Short Circuit Safe Operating Area：SCSOA)は，Tj＝150℃で10μs以上非破壊遮断可能である(**図 9**)。また逆バイアス安全動作領域(Reverse Bias Safe Operation Area：RBSOA)は，Tj＝150℃でコレクターエミッタ間の跳ね上がり電圧を1,200V(最大定格)発生させた状態で，定格の2倍以上の電流が遮断可能であり，遮断後の発振等も見られない良好な短絡波形(**図10**)が確認できた。



(@L_S=300nH，Tj＝150℃)

図10．逆バイアス安全動作領域：RBSOA

表 1．6世代NXシリーズ ラインアップ

型名	電圧定格(V)	定格電流(A)	回路
CM35MXA-24S	1,200	35	CIB
CM50MXA-24S		50	
CM75MXA-24S		75	
CM100MXA-24S		100	
CM75RX-24S		75	7in1
CM100RX-24S		100	
CM150RX-24S		150	
CM75TX-24S		75	6in1
CM100TX-24S		100	
CM150TX-24S		150	
CM150DX-24S		150	2in1
CM200DX-24S		200	
CM300DX-24S		300	
CM450DX-24S		450	
CM600DXL-24S		600	
CM1000DXL-24S		1,000	

6世代NXシリーズ(**表 1**)は温度マージンも確保できることから，更に使いやすいモジュールになり得ると考える。

3. む　す　び

今回開発した6世代NXシリーズは，低損失，低ノイズ，高温時での動作保証を可能とする製品化を実現し，市場の期待にこたえる製品となっている。

参 考 文 献

(1)　松本　学：新世代IGBTモジュール“NXシリーズ”，三菱電機技報，**81**，No.5，337～342（2007）