

## 次世代大容量IGBTモジュール “New-MPDシリーズ”

田畠光晴\*

Next Generation Large Current IGBT Module "New-MPD Series"

Mitsuharu Tabata

### 要 旨

近年、風力発電の急速な設置拡大によって、1,000A級のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールの需要が増加している。市場での並列接続数の低減に対応するため、産業用IGBTモジュールの電流容量拡大版として、2素子入りの1,800A／1,700V, 2,500A／1,200Vを開発した。直流・交流変換回路として通常使用される電圧型インバータブリッジ回路を採用する製品群に広く適用可能である。

モジュール内外の直流母線の低インダクタンス化を追求し、内部インダクタンスは約5nHと小さく設計し、主端子配置は外部配線のインダクタンスを低減しやすいよう配慮した。これらによって、大電流回路の配線構成が容易となる。大電流装置で用いられるアクティブクランプ回路からの要請によって、各素子に専用のコレクタセンス端子を準備した。

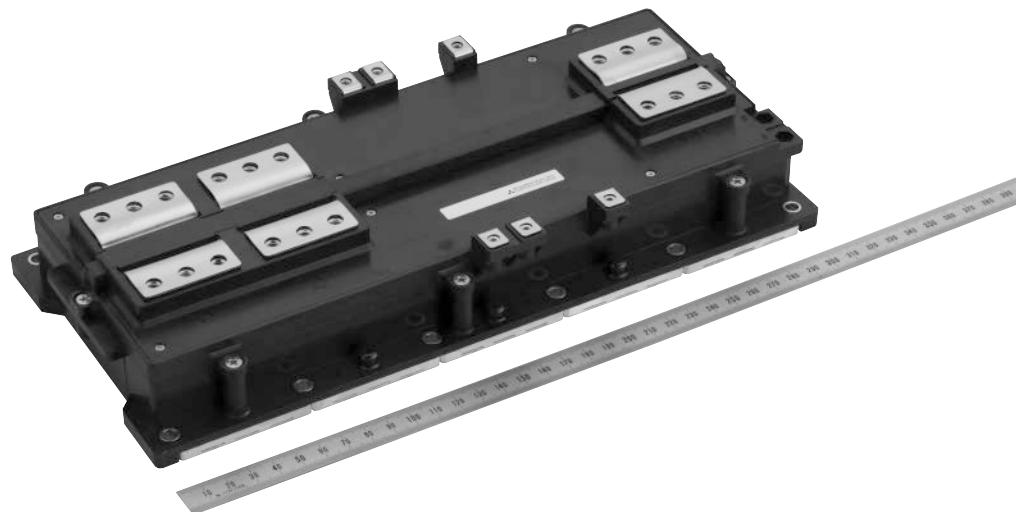
対象となる大電力装置では水冷(液冷)が一般的であり、このモジュールでは水冷にも適するように配慮した。チッ

プの間隔を広く取り水冷冷却器の高い放熱能力を生かせるようにするとともに、直線的な水冷パイプが干渉なくチップ直下に配置できるように工夫した。

また、ベース板を銅からアルミに変更し、軽量化、サーマルサイクル耐量向上を実現した。熱伝導阻害要因のはんだ層を1層減らすことによって、銅からアルミへの変更による熱伝導率低下を相殺し、全体としての熱抵抗を同等とした。

大容量化に伴うベース板面積の増加に対し、フィン、モジュール双方への平坦(へいたん)度要求を軽減するため、従来のIPM(Intelligent Power Module)製品で実績のある分割ベース板構造を採用した。

今後、共通部材を使用した小筐体(きょうたい)の1,500A／1,200V, 1,100A／1,700V製品をシリーズ展開予定である。



### “CM1800DY-34S(1,800A／1,700V)”, “CM2500DY-24S(2,500A／1,200V)”の外観

最大サイズは310×142×51 (mm)。内蔵回路はIGBT : 2, ダイオード : 2によって、2素子入りハーブリッジ回路を構成している。

## 1. まえがき

従来風力発電は、発電設備としての能力よりもむしろシンボル的理由によって設置されることが多かったが、発電効率向上などによって発電設備としての魅力が増加するに従い、急速に設置量が増大し、その新規設置量は30GW/年近くに至っており、欧、米、中国などで主力発電形態の一つへ成長しようとしている。風力発電には風車の大型化によって発電コストが低下する性質があり、普及と大型化が同時に行われてきたが、基本的には分散発電であり、水力発電や原子力発電のように一点集中の大型設備とはなり難い。このメガワット級の発電装置を多数使用するという形態が牽引(けんいん)力となり、発電電力を系統電力波形に整形変換するインバータ回路に使用される1,000A級の電力半導体の需要が伸びてきた。この市場に対し、量産性の優れる、より低電流の電力半導体製品からのステップアップ展開として、1,800A/1,700V(2素子入り)をはじめとする“New-MPD(Mega Power Dual)シリーズ”を商品化した。

## 2. 製品展開

大小二つのパッケージについて、1,700V耐圧と1,200V耐圧の計4機種(表1)を展開する計画であり、開発の中心として1,800A/1,700V定格を先行開発した。現行製品であるMPDシリーズは、定格1,000A/1,700V又は1,400A/1,200Vが最大であり、風力発電にはこれらの製品が並列接続して使用されていたが、風車の主力需要が2~4MWとなり需要数も増加し、並列接続の煩雑さ軽減のため、より大容量の素子を求める声が強くなった。この要求に対応するため、今回電流容量を拡大した製品を開発した。この製品は2素子入り製品として三菱電機では最大となる。同じ筐体で2,500A/1,200Vも開発する。

また、今後共通部材を使用した展開製品として、1,500A/1,200V、1,100A/1,700Vを開発予定である。

## 3. 製品の特徴

### 3.1 端子配置は現行MPDシリーズのコンセプトを継承

この製品が対象として想定する応用製品は、直流・交流変換回路として通常使用される電圧型インバータブリッジ回路を採用する製品群である。このインバータブリッジ回路では、大電流応用では、還流経路である直流母線で特に低いインダクタンスが要求されるが、この部分を構成する

外部配線のインダクタンスを低減しやすい端子配列として、P、N端子<sup>(注1)</sup>を筐体の1辺付近に集中させている(図1のP、N端子)。また、交流出力端子(図1のAC端子)を対辺に配置し、中央に駆動回路基板を設置するスペースを持っている。この配置は従来機種であるMPDシリーズで好評を得たため、今回の製品群でもこのコンセプトを踏襲した。

### 3.2 大小筐体の信号端子の位置関係を共通化

今後開発予定の小パッケージの信号端子の位置関係を、図2のように共通とする予定であり、大小の駆動回路を共通基板で設計できる。共通基板としない場合にも、駆動基板のレイアウト設計の思想がある程度共通化できることによって、基板設計の省力化に貢献すると考えている。

### 3.3 多層ラミネート電極による低インダクタンス

大電流を高速スイッチングするには、直流母線のインダクタンスの低減が重要となる。モジュール内部についても、直流母線インダクタンスに影響するP、N間のインダクタンスを低減するため、モジュール内部配線の直流母線部分(P、N電極)4層を含む6層ラミネート電極とした(図3)。

(注1) 外部の直流母線と接続される端子で、モジュールの端子名でのC1、E2に相当する。

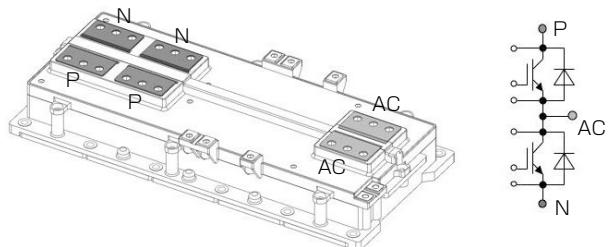


図1. 端子配置

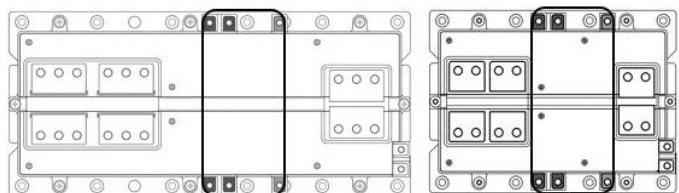


図2. 信号端子配置

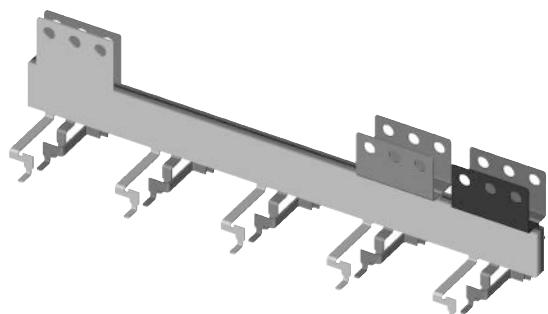


図3. ラミネート電極

表1. 製品展開

	900A	1,000A	1,100A	1,400A	1,500A	1,800A	2,500A
1,700V		○	◎			◎	
1,200V	○			○	○		○

○: MPD ◎: New-MPD

これによって“CM1800DY-34S”では同電流定格で実用上要求のある10nHを大幅に下回る5.25nHを達成した。実験レベルでは、外部回路を含めた直流母線インダクタンス全体として10nH以下を得ており、この状態では例えば図4の波形に見られるように、1,800Aの高速遮断でのサージ電圧を200V程度に抑制できる。

一方、スイッチング損失については、直流母線インダクタンスの最小化が最適とは限らないことが知られている。効率(低損失)を優先する場合には、直流母線インダクタンスが少し大きい方がソフトスイッチング気味となりスイッチング損失が低下するので好ましく、実際の装置設計で直流母線インダクタンスは調整対象である。しかし、インダクタンスの増加は外部回路で実現できるが、減少は外部回路では実現できないため、内部インダクタンスが小さい方が全体としての直流母線インダクタンスの調整範囲を広く取れる。この製品はモジュール内部の直流母線インダクタンスを小さく設計したため、高速性優先にも、効率優先にも対応できる適用自由度の高いパッケージとなっている。

### 3.4 水冷への対応

扱う電流が大きくなるに従い素子の総熱損失量も増加するため、より効率の良い冷却手段が必要となる。冷却能力の高い冷却器として一般に水冷(液冷)やヒートパイプが用いられており、今回開発した製品でもこれらの冷却手段が用いられる想定している。これらの冷却器では内部にパイプが設置されており、パイプ近傍の放熱効率が他の部分よりも高いため、発熱源であるチップの直下にパイプが配置されることが望ましい。このような配置関係をモジュール外部で実現するためには、モジュール内部の各チップの配列をつなぐ直線と、モジュールの取付けねじ位置とが干渉しないようにモジュールを設計しておく方が良い。このモジュールではこの点を考慮してチップ配置と取付けねじ位置を設計した。図5でパイプが上下方向に配置される場合に、上下2チップを結ぶ垂直線上に取付け穴がないように配置した。

一方、水冷(液冷)やヒートパイプを使用した放熱フィンでは、冷却器の冷却面の単位面積当たりの放熱能力が空冷

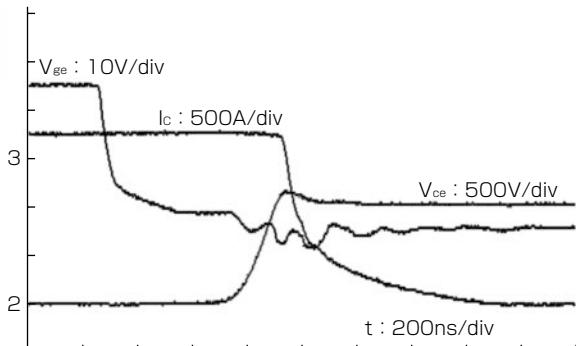


図4. ターンオフ波形例

の場合の数十倍に増加するため、ベース板による面方向の熱拡散が減少し、モジュール内部の放熱構造が同一であってもモジュールの熱抵抗が増加する。このような冷却状況では、熱源近傍の冷却経路が支配的となり、複数の熱源が近接したときの干渉の影響が顕著となる。大電流定格のIGBTモジュールは、モジュール内部で多数のチップを並列接続して大きな電流定格を実現しているが、水冷の高い冷却能力を放熱システム全体として生かすには、モジュール内部の並列チップが分散され、間隔が広い方が都合が良い。この製品群ではチップ同士の中央間距離を30mm程度と広く取ることによって、外部の水冷放熱器の放熱能力をより良く生かせるようにした。

### 3.5 6世代チップ採用による低損失

6世代チップでは、トレードオフを最大で20%改善し、インバータブリッジ回路全体として5~10%の損失低減が可能となる(当社比、一般的なインバータ動作にて)。また、新しいダイオードはソフトリカバリー特性とし、特に従来の1,700V耐圧製品で問題となっていたリカバリー時のリングを抑制する設計としている(図6)。

これらのチップ特性によって、特にスイッチング周波数が2~4kHzの応用で、低ノイズ、低損失を享受可能である。また、パッケージ、チップともにより高速なスイッチングにも対応できるように設計しており、従来のこのクラスの電流定格のIGBTモジュールでは困難であった10kHz以上のスイッチングも可能である。

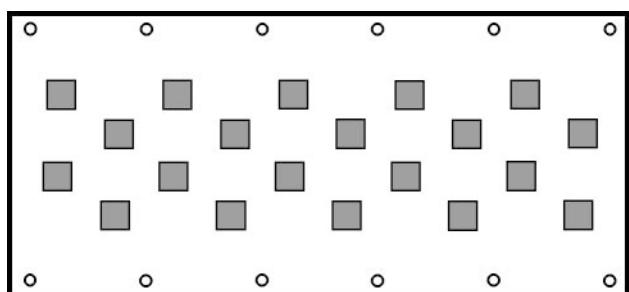


図5. チップ配置

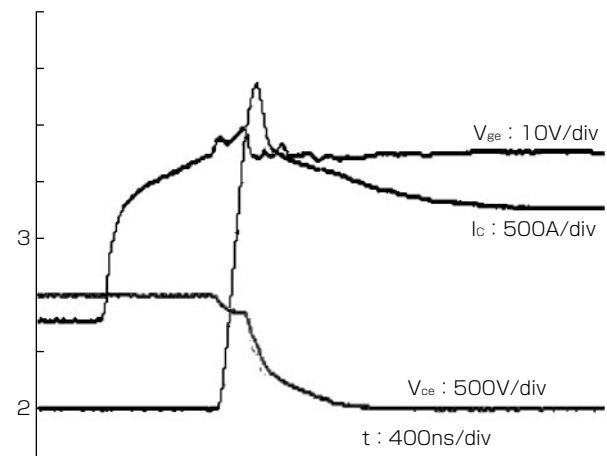


図6. ターンオン波形例

### 3.6 アルミベース板採用による軽量化

電力半導体モジュールは、内部にセラミックを使用しているため衝撃に弱く、組み付け時に壊れもの扱いが必要となるが、モジュールが大型化すると質量の増加によって扱いが困難となる。大型化による質量増を抑制するため、従来の銅ベース板をアルミに変更することによって、総質量を約2/3(従来と同様に銅ベース板を使用した場合の予測質量との比較)とした。合わせて持ち運び用に短辺に側面突起を設けており、取付け作業などを容易にしている。

一方、水冷ではフィンの熱容量に対し冷却能力が上がるため、冷却時定数が小さくなり、冷却速度が上がり電力変化に対するケース温度(チップ直下のベース板温度、 $T_c$ )の追従性が良くなる。結果として $T_c$ の振れが頻繁となり、モジュール部材の金属疲労を促進させる。従来のモジュール構造で $T_c$ 変化に対する金属疲労寿命のボトルネックは基板(セラミック)下のはんだであった。基板下のはんだは線膨張係数の大きく異なる層の接合部に使用されるため、温度変化の繰り返しによって金属疲労を起こしてクラックを生じ、このクラックの成長によって最終的に熱伝導を妨げるようになり、製品の寿命が短くなる。また、はんだは他の熱伝導部構造素材である、銅、アルミ、AIN(基板の素材)などと比較して、熱を通し難い素材であるため、放熱の阻害要因もある。これに対し、今回採用したアルミベース板は基板とアルミを直接接合しており、はんだより金属疲労寿命の長いアルミによって、サーマルサイクル寿命が向上する。また、はんだ層をなくすことによって、ベース板を銅からアルミへ変更したことによる熱伝導率低下を相殺し、総合的な熱抵抗を従来の銅ベースと同等にできた。

### 3.7 主端子の接触抵抗を低減

直流母線は外部配線も含めて低いインダクタンスとすることが要求されるため、大電流の装置の外部配線では比較的薄い銅板によるラミネートバスバーが利用されることが一般的であるが、モジュールの端子との接触面積が小さいと電流が集中し発熱が増加する。これを軽減するため、従来機種MPDでは各端子板のねじ穴数を複数としたが、この製品でもこの方式を踏襲し、従来どおりの十分な接触面積を確保した。

### 3.8 素子ごとにコレクタセンス端子を持つ

この製品を搭載する装置には定格電流を超える大電流が流れるような異常動作が不可避に想定されるものがあり、このような場合、異常電流を検出し電流を遮断しシステムを停止する機能を備えるが、定常時と同じ速度で電流を遮断すると他の破壊を引き起こす可能性がある。しかし特に大電流装置では安全に電流を遮断する条件が狭く、精度良く制御するため、コレクタ電圧をリアルタイムで測定し適度な遮断速度に調整する“アクティブクランプ”<sup>(注2)</sup>という

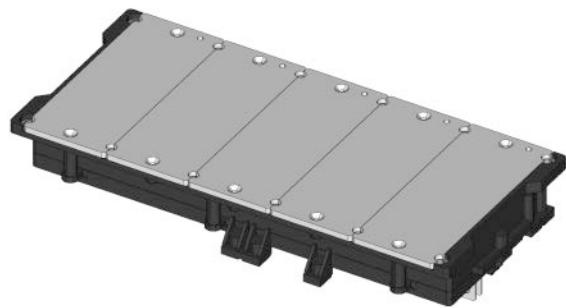


図7. ベース板面側の外観

機能を持ったドライバが採用されることが多い。このような方式のドライバ基板が構成しやすいよう、コレクタ電圧センス専用端子をP, N各々に設置した。

(注2) 同名のスイッチング電源におけるトランスコアをリセットする手法(部分共振の一種)とは無関係。

### 3.9 分割ベース板

電力容量の増加に伴い、放熱面であるベース板面積も広くする必要があるが、一般的にベース板面積が広くなるとモジュール側、フィン側とともに平坦度を確保することが困難になる。この問題への対策として、この製品では従来のIPM製品で実績のある分割ベース板構造を採用した(図7)。なお、分割ベース板構造ではモジュール取付け時に分割部が柔軟に動くため、応力が樹脂ケースに掛かりケース高さに制約が生じるが、この製品ではケースを上下に2分割して制約を回避した。

一方、パワー半導体チップのスクリーニングには大電流の通電が要求される内容があるが、ワイヤボンドなどによる配線を行う前のウェーハやチップ状態では通電電流に限界があり、大電流のモジュールでは、これまでモジュール完成後に試験をする必要があった。しかし電流定格が大きくなるに従い、この試験には大掛かりな試験装置が必要となり、また一つのチップの不良によってモジュール全体が不良となるので使用チップ数が増えると不良率が増加するなど、量産性に障害が発生する。今回、分割ベース板構造を採用したことでワイヤボンド後の状態が個片化したため、ベース板1枚の状態でスクリーニング試験することによって、これらの問題を解決した。

## 4. む す び

この製品は風力発電拡大による需要増によって商品化が可能となったもので、ターゲットとした風力発電に適した選択であることはもちろんあるが、この製品の商品化が新たな大電流スイッチング応用機器需要発生の契機となることを期待している。

なおこの製品は執筆時点で開発中であり、試作品を基にしている。量産製品とは内容が異なる場合がある。