

並列駆動に適したパワーモジュール

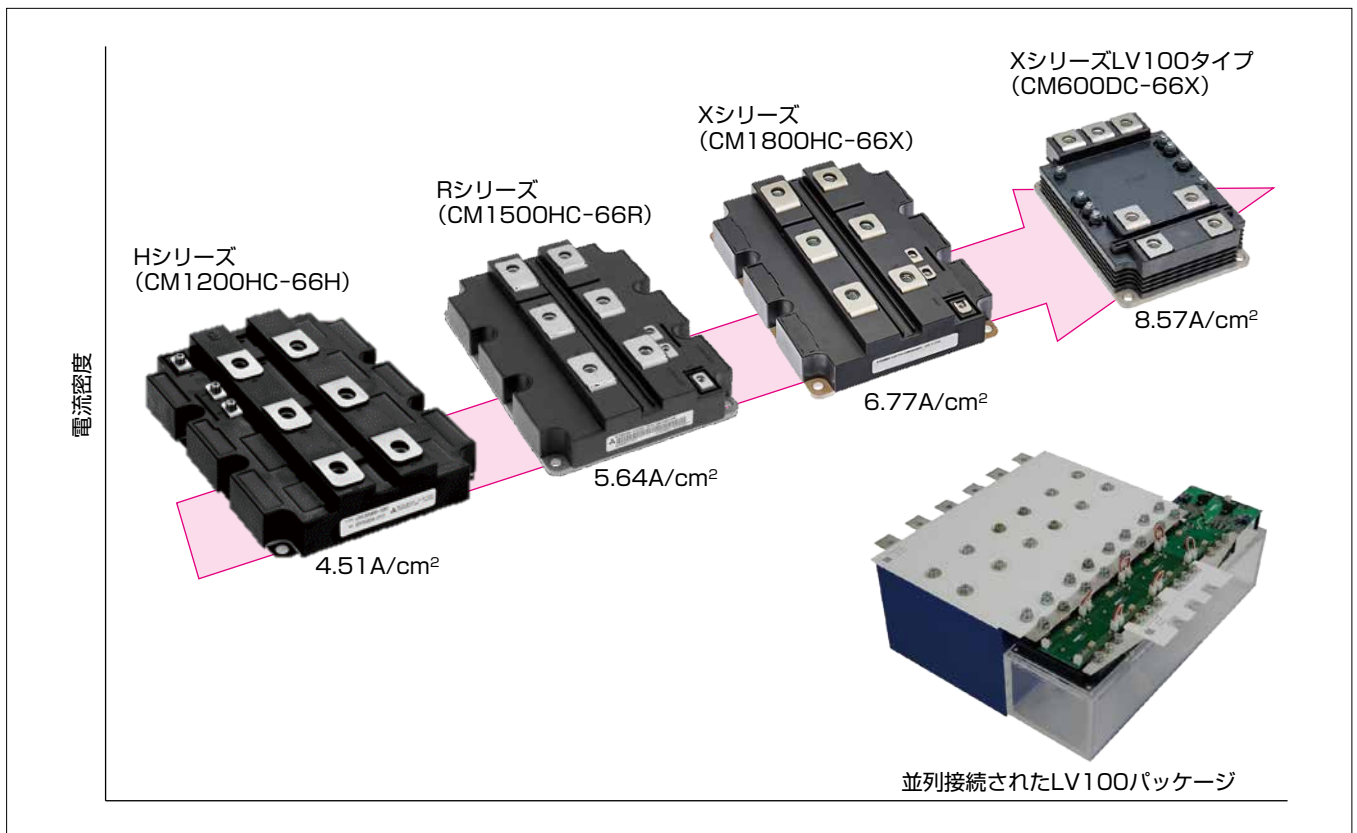
Power Module for Parallel Operation

要 旨

三菱電機はSi(シリコン)チップを搭載するHVIGBT(High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールとして業界最大の電流密度(注1)となるHVIGBTモジュール“XシリーズLV100タイプ”を開発した。LV100タイプはインバータの標準化, スケーラビリティ(コアとなるLV100タイプ製品を並列駆動することによって各アプリケーションに必要な電流定格を形成する), モジュールラビリティを基本コンセプトとして開発された世界標準パッケージであり, パワーモジュールの並列駆動に必要な要求を満足するように設計されている。また, 当社ではLV100タイプ

に搭載するチップについても並列駆動に適したチップ開発を実施しており, 本稿では, ゲート駆動条件によって電流バランスの補正が行えるIGBTではなく, 駆動条件等での補正が不可能なダイオード側に焦点を当てる。並列駆動でダイオードに必要な条件として, ロバスト性, 低損失, 順方向特性が正の温度係数を持つことなどがある。この要件を満足するため, 高耐圧・大電流密度・並列駆動に適したRFC(Relaxed Field of Cathode)ダイオードを開発し, LV100タイプとの組合せによって並列駆動に適したパワーモジュールの開発を行った。

(注1) 2017年5月11日現在, 当社調べ



LV100タイプを採用したHVIGBTモジュール

Hシリーズから始まった当社のHVIGBTは市場ニーズに応え, 高電流密度化を推進している。HVIGBTモジュールXシリーズLV100タイプでは業界最大の電流密度となる8.57A/cm²を達成した。同時に, LV100タイプでは並列動作に適した電極配置を採用するとともに, ダイオードチップにRFC構造を採用し, 並列動作に必要なとされる高いロバスト性, 高サージ電流耐量, 低損失を達成して製品のモジュールラビリティとスケーラビリティを実現した。

1. ま え が き

パワーモジュールに搭載されるIGBTとFWD(Free Wheeling Diode)の進歩はパワーエレクトロニクスの開発に不可欠である。また、様々な構成・定格容量の応用製品に対応するためには、モジュールのコンセプト、ターゲット仕様に適したチップの開発が必要になる。LV100タイプの基本コンセプトの一つであるスケーラビリティを満足するためには、モジュール内の電流分担の均一化が重要な要素の一つに挙げられる。これに対して、IGBT側の動特性はゲート電圧などによってコントロールすることが可能である一方、ダイオード側はこのような機能が存在しないことから、当社はLV100タイプの並列駆動に適したダイオードとして次の特性を持つRFCダイオードを開発した。

- (1) 高RRSOA(Reverse Recovery Safe Operating Area)
- (2) 高サージ電流耐量
- (3) 低損失
- (4) 並列接続の容易性(スケーラビリティとモジュールラビリティの実現)

スケーラビリティの実現のためにモジュールの並列駆動が必須となる。一方で並列駆動でのモジュール数が増加するほどモジュールの設計は難しくなる。この課題に対応するためモジュールの電力密度の増加を検討し、同時に電流密度の増加によって引き起こされる問題への対応として、ダイオードチップのロバスト性と性能の改善を行った。

2章ではRFCダイオードの技術的進歩とロバスト性について、3章ではRFCダイオードを使用したモジュールの並列駆動評価結果を述べる。4章ではLV100タイプを使用した製品のスケーラビリティについて述べる。

2. RFCダイオードチップの性能

2.1 RFCダイオードチップの構造

図1にRFCダイオードチップの構造断面図を示す。有効領域カソード側のp/n繰り返しパターンを最適化することで、スナップオフ現象を抑制しつつ、並列駆動に有利な正の順方向電圧降下(V_F)温度特性を実現した。また、終端領域カソード側のp層とアノード端バラスト構造、終端構造にLNFLR(Linearly-Narrowed Field Limiting Ring)⁽²⁾とSCC構造(Surface Charge Control)⁽³⁾を採用し、高RRSOAと低熱抵抗を両立させた。このダイオードをLV100パッケージに搭載し、定格電流600A、最大定格電圧3,300VとしたHVIGBTモジュールXシリーズLV100タイプ“CM600DC-66X(フットプリント:140×

100(mm))”は従来品である定格電流1,200A、最大定格電圧3,300VのHVIGBTモジュール“CM1200HC-66H(フットプリント:140×190(mm))”に対し、1.9倍の電流密度(4.51A/cm²から8.57A/cm²)を達成した。

2.2 逆回復損失耐量

並列駆動時にモジュール間で発生する電流アンバランスを考慮すると、ダイオードのRRSOAの確保が一層重要である。図2に最大リカバリ条件での電流・電圧波形を示す。RFCダイオード搭載のHVIGBTモジュール(CM600DC-66X)は、従来品(CM1200HC-66H)比1.9倍の高電流密度化に加えて、最大動作温度を125℃から150℃に、最大DC-Link電圧を2,200Vから2,400Vに高めているにも関わらず、逆回復損失(P_{rr})は5.1MWと従来品と同等のRRSOA耐量を示し、十分なロバスト性を持っている。

2.3 サージ電流耐量

電鉄用途などのHVIGBTモジュールのダイオードには高いサージ電流耐量(I^2t 耐量)が要求される。CM600DC-66Xを用いて I^2t 耐量を評価した結果、 P_{rr} と同様に高い電流密度にも関わらず、従来品と同等のサージ電流で破壊のないことを確認した。

2.4 順方向電圧とリカバリ損失のトレードオフ特性

RFCダイオード搭載のHVIGBTモジュール(CM600DC-66X)と従来品(CM1200HC-66H)の順方向電圧(V_F)とリカバリ損失(E_{rr})のトレードオフ特性の比較を図3に示す。デバイス構造を最適化したRFCダイオードは、従来品と比較して33%以上の V_F 改善をもたらした。

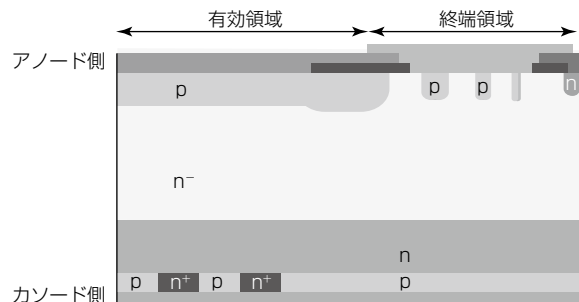


図1. RFCダイオードチップの構造断面図

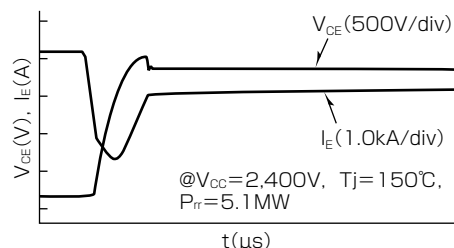


図2. RRSOAの評価結果

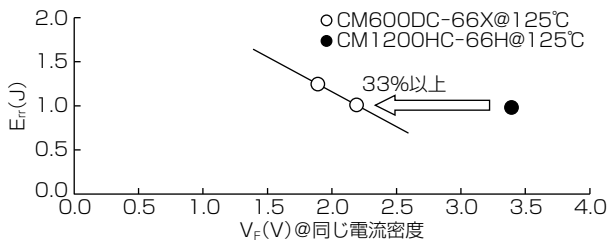


図3. V_F - E_{rr} トレードオフ特性の比較

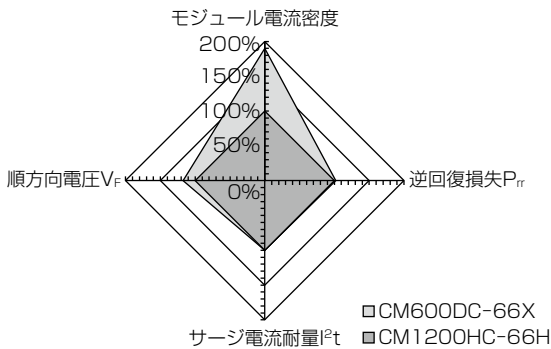


図4. RFC適用製品と従来品の性能比較

図4では、RFCダイオード搭載のCM600DC-66XとCM1200HC-66Hをモジュール電流密度、逆回復損失、サージ電流耐量、順方向電圧の四つの指標で比較した。CM600DC-66Xのモジュール電流密度は従来品の1.9倍であるにもかかわらず、逆回復損失とサージ電流耐量を損なうことなく順方向電圧(V_F)が改善していることが分かる。先に述べたとおり、RFCダイオードの選定に際してはモジュールの並列駆動における自己電流バランスのため、ダイオードには正の V_F 温度特性が必要とされる。CM600DC-66Xで使用されるRFCダイオードは広範囲の電流範囲にわたって正の温度特性を示すため、その点でも並列駆動に適している。

3. 3.3kV HVIGBT 並列駆動の評価結果

並列駆動の評価にはダイオード順方向特性のそろった2台のCM600DC-66Xを使用した。図5はリカバリー評価結果(定格電圧、定格電流条件)を示している。モジュールA、モジュールBの電流、 P_{rr} 波形はいずれも良く一致しており、その差異は P_{rr} で $\pm 3.2\%$ となっている。

図6のRRSOA評価結果(電圧2,400V、定格電流の2倍)でもモジュールAとBの各波形が良く一致し、バランスの取れた動作であることを示している。RRSOAでの重要なパラメータとされる P_{rr} の差はわずか $\pm 1.4\%$ である。

これらの結果は、順方向特性をそろえて並列駆動させたモジュールは、定格スイッチング条件だけでなくRRSOAについても十分に一致することを示している。

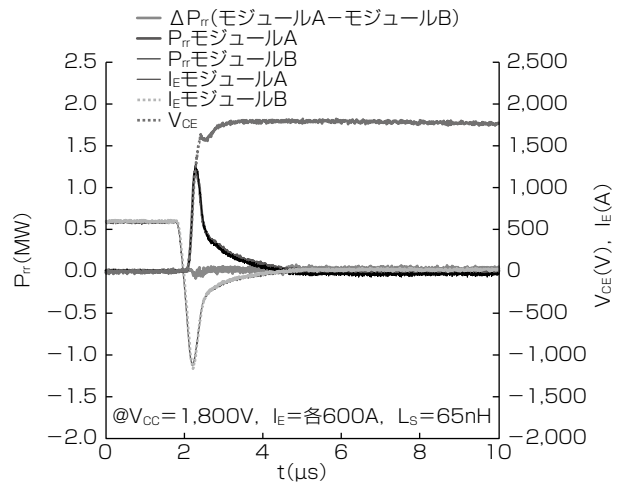


図5. リカバリー評価結果

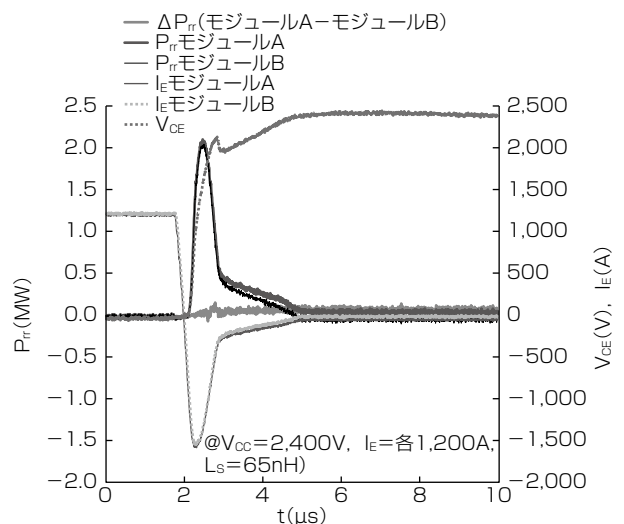


図6. RRSOA評価結果

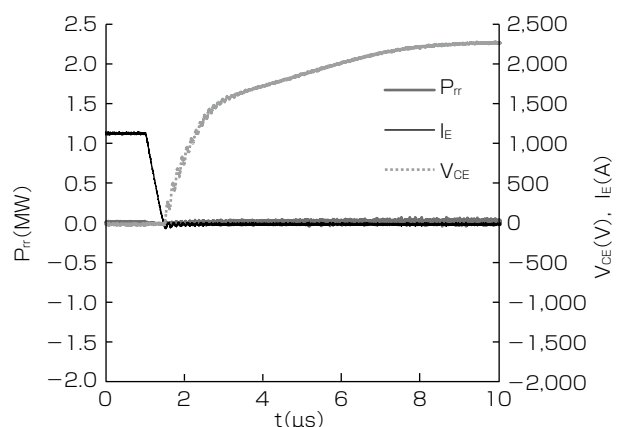


図7. RRSOA評価結果(CMH600DC-66X)

Si-pinダイオードの場合は先に述べたとおり、並列動作で P_{rr} に配慮が必要なのに対して、ハイブリッドSiC(Si IGBTとSiC SBD(Schottky Barrier Diode)の組合せ)モジュールの場合は P_{rr} が非常に小さく、 P_{rr} の差異に注意を払う必要がない。図7に当社が開発したLV100タイプを

用いたハイブリッドSiC(シリコンカーバイド)モジュールである“CMH600DC-66X”のRRSOA波形を示す。P_{rr}はCM600DC-66Xに比べて非常に小さいことが分かる。

4. 並列駆動での電流の分担

一般的に並列駆動によって得られる電流はディレーティングを考慮する必要がある。このディレーティングはダイオードの順方向電圧特性の差異によって引き起こされる電流アンバランスによって必要とされる。この章ではRFCダイオードの順方向特性の差異によって発生する電流アンバランスについて述べる。

図8は2台のCM600DC-66Xのダイオード順方向特性を示しており、2台のモジュールは定格電流(600A)で順方向電圧が約100mV異なることが確認できる。この差は2台のモジュールが並列駆動される際の電流アンバランスを引き起こす。したがって、電流アンバランスを抑えるためにはダイオード順方向特性のそろった製品の選定が必要とされる。並列駆動時にモジュール間で発生する電流アンバランスは図9のように、並列モジュール数、及び ΔV_F の二つのパラメータによって電流アンバランス率が変化する。

図10では、図9で確認した電流アンバランス率を用いて、製品ごとに並列モジュール数と合計の出力電流値を示す。この図はコンバータやインバータが必要とする出力電流値に対し、必要な並列モジュール数を示しており、Si IGBT適用品種である“CM450DC-66X (CM600DC-66Xの低電流定格品であり、定格電流は450A)”, CM600DC-66X, 及びハイブリッドSiC製品であるCMH600DC-66Xについて示している。この確認から、CM600DC-66Xを使用すると、CM450DC-66Xを使用する場合に比べてより多くの出力電流が得られることが分かる。例えば、図10に示すように1,500Aの出力電流が必要な場合、CM450DC-66Xでは4台が必要となるのに対し、CM600DC-66Xでは3台で実現が可能である。この試算によるとシステム設計者はCM600DC-66Xを用いることによってより高いシステム電流をターゲットにすることが可能になる。又は同じシステム電流とし、使用する並列モジュール数を減らすことが可能になる。

さらにCMH600DC-66Xでは定格電流がCM600DC-66Xと同じ600Aであるにも関わらず、SiC-SBDの特性によって並列駆動時の合計出力電流はCM600DC-66Xよりも高くなる。図10に示すように出力電流2,200Aが必要な場合、CM450DC-66Xで6台が必要なのに対してCMH600DC-66Xでは4台で実現が可能である。

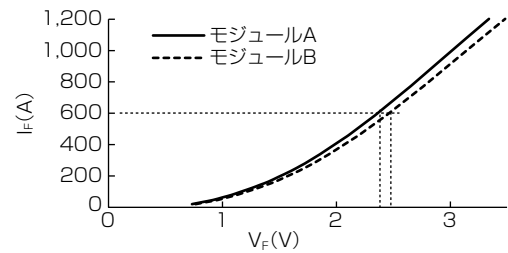


図8. ダイオード順方向特性の差異(ΔV_F)による電流アンバランスの例(CM600DC-66X)

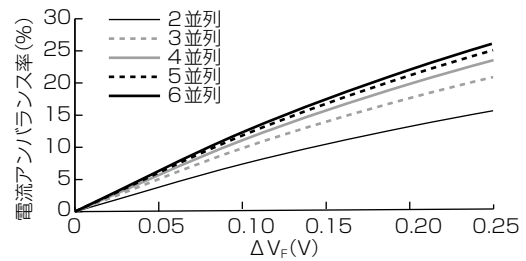


図9. 並列モジュール数と電流アンバランス率(CM600DC-66X)

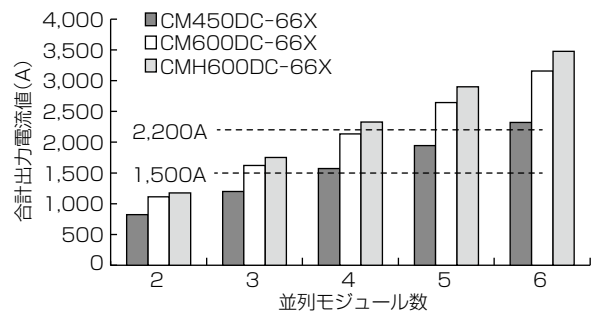


図10. 合計出力電流値と並列モジュール数の関係(電流アンバランス考慮あり)

5. む す び

HVIGBTモジュールXシリーズLV100タイプに対して並列駆動に適したRFCダイオードを搭載することで、並列動作に適した製品を開発した。当社は今後もLV100タイプ製品の開発を通じて、よりフレキシブルなシステム開発の実現を進めるとともに、HVIGBTを始めとするパワーモジュールによって低炭素化社会の実現と豊かな生活の両立に貢献する。

参考文献

- (1) Tsuda, R., et al.: LV100 High Voltage Dual Package in Paralleling Operation, PCIM Europe 2018-International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 1~6 (2018)
- (2) Chen, Z., et al.: ISPSD' 13, 37~40 (2013)
- (3) Honda, S., et al.: ISPSD' 16, 291~294 (2016)