

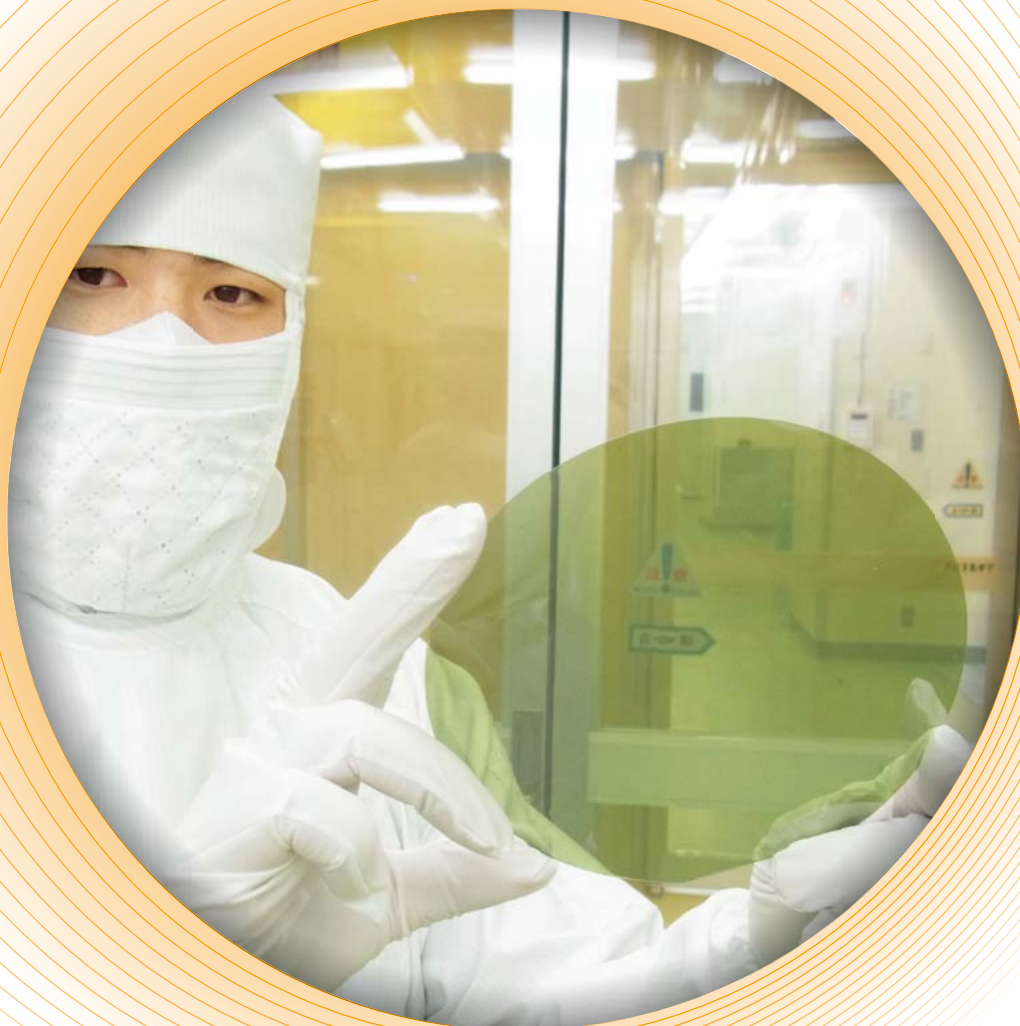
富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2013
Vol.86 No.

4

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体



特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

低炭素社会の実現に向けて、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの普及と、そのエネルギーを効率的に利用するパワーエレクトロニクス技術に対する世の中の期待は非常に高まっています。この期待に応えるため、富士電機では、環境、エネルギー、自動車、産業機械、社会インフラ、家電製品など多くの分野に向けて、エネルギー変換効率が高く、低ノイズで使いやすいパワー半導体製品を開発しています。

本特集では、パワーエレクトロニクス技術のキーデバイスであるパワー半導体について、最新の技術および製品を紹介します。

表紙写真

SiC ウェーハ基板



目次

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

〔特集に寄せて〕 小型・高速・高効率への果てしなき挑戦 岩崎 誠	233 (3)
-------------------------------------	---------

〔現状と展望〕 パワー半導体の現状と展望 高橋 良和 ・ 藤平 龍彦 ・ 宝泉 徹	234 (4)
--	---------

1,700V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール 小林 邦雄 ・ 北村 祥司 ・ 安達 和哉	240 (10)
--	----------

超小型・高信頼性 All-SiC モジュール 仲野 逸人 ・ 日向 裕一朗 ・ 堀尾 真史	244 (14)
--	----------

175℃連続動作を保証する IGBT モジュールのパッケージ技術 百瀬 文彦 ・ 齊藤 隆 ・ 西村 芳孝	249 (19)
--	----------

3レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュール 陳 土爽清 ・ 小川 省吾 ・ 磯 亜紀良	253 (23)
---	----------

ハイブリッド自動車用 IPM のパッケージ技術 郷原 広道 ・ 荒井 裕久 ・ 両角 朗	258 (28)
---	----------

TIM プリペースト IGBT モジュール 磯 亜紀良 ・ 吉渡 新一	263 (33)
--	----------

第2世代 LLC 電流共振制御 IC 「FA6A00N シリーズ」 陳 建 ・ 山田谷 政幸 ・ 城山 博伸	267 (37)
---	----------

ワンチップ リニア制御用 IPS 「F5106H」 中川 翔 ・ 大江 崇智 ・ 岩本 基光	273 (43)
---	----------

解 説

3レベル電力変換方式	277 (47)
------------	----------

新製品紹介論文

富士電機のトッランナーモータ ープレミアム効率モータ「MLU・MLK シリーズ」	278 (48)
---	----------

ストライカ引外し式限流ヒューズ付高圧交流負荷開閉器 (LBS)	281 (51)
---------------------------------	----------

ディスクリット RB-IGBT 「FGW85N60RB」	284 (54)
------------------------------	----------

略 語	287 (57)
-----	----------

Contents

Power Semiconductors Contributing in Energy Management

[Preface] Challenges Toward Small Size, Fast Response, High Efficiency, and Beyond	233 (3)
IWASAKI Makoto	

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook	234 (4)
TAKAHASHI Yoshikazu FUJIHIRA Tatsuhiko HOSEN Toru	

1,700 V Withstand Voltage SiC Hybrid Module	240 (10)
KOBAYASHI Kunio KITAMURA Shoji ADACHI Kazuya	

Ultra-Compact, High-Reliability All-SiC Module	244 (14)
NAKANO Hayato HINATA Yuichiro HORIO Masafumi	

New Assembly Technologies for $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ Continuous Operation Guaranty of IGBT Module	249 (19)
MOMOSE Fumihiko SAITO Takashi NISHIMURA Yoshitaka	

High-Power IGBT Modules for 3-Level Power Converters	253 (23)
CHEN Shuangching OGAWA Syogo ISO Akira	

Packaging Technology of IPMs for Hybrid Vehicles	258 (28)
GOHARA Hiromichi ARAI Hirohisa MOROZUMI Akira	

IGBT Modules with Pre-Applied TIM	263 (33)
ISO Akira YOSHIWATARI Shinichi	

2nd Generation LLC Current Resonant Control IC, "FA6A00N Series"	267 (37)
CHEN Jian YAMADAYA Masayuki SHIROYAMA Hironobu	

One-Chip Linear Control IPS, "F5106H"	273 (43)
NAKAGAWA Sho OE Takatoshi IWAMOTO Motomitsu	

Supplemental Explanation

3-Level Power Converters	277 (47)
---------------------------------	----------

New Products

Top Runner Motor of Fuji Electric –Premium Efficiency Motor "MLU and MLK Series"	278 (48)
High-Voltage Air Load Break Switch (LBS)	281 (51)
Discrete RB-IGBT "FGW85N60RB"	284 (54)

Abbreviations	287 (57)
----------------------	----------

特集に寄せて

小型・高速・高効率への果てしなき挑戦

Challenges Toward Small Size, Fast Response, High Efficiency, and Beyond

岩崎 誠 IWASAKI Makoto

名古屋工業大学大学院工学研究科教授
工学博士



折しも 2013 年には電気学会が創立 125 周年を迎え、さまざまな行事や出版とともに、学会誌（例えば電気学会誌 2013 年 10 月号）ではパワーエレクトロニクス（パワエレ）、モータ、輸送・搬送機器といった本特集に関連する応用技術や製品開発に関して、各専門家が歴史を振り返り、現在のトレンド、そして将来展望を紹介している。そんな中、筆者はメカトロニクスを専門とする門外漢ではあるが、パワーデバイスに期待するアプリケーションと要素技術について、パワエレ応用の機械制御への展望も併せ、特集に寄せて概観したい。

(1) パワーデバイスが拓（ひら）く応用技術への期待

電力コンディショナやインバータなどの各種電力変換装置、さまざまなモータ、そして多種多様な産業機械や輸送機器に切望される共通事項は、間違いなく“小型”“高速”“高効率”であり、それらは未来永劫（えいごう）追求され続けるであろう。SiC（炭化けい素）や GaN（窒化ガリウム）といったワイドバンドギャップ半導体による次世代パワーデバイスは、低損失かつ高速で動作する特長を存分に生かしてパワエレ機器の高性能化を拓き、幅広い応用領域で期待に応えることができる。そこで、さまざまなアプリケーションに対してどのような利点をもたらすのか、次世代デバイスの特徴とともに具体的に見てみよう。

(2) アプリケーションの技術動向

電力変換装置には、装置自身の小型・軽量化、高効率化、高周波化とともに、インバータなどの変換器としてモータや機械システムの高速度化や高応答化への寄与が期待される。小型・軽量の指標として変換器のパワー密度（W/cm³）がよく用いられるが、SiC トランジスタを適用した装置では数十 W/cm³ を実現している。さらに、高効率かつ高温の動作が可能となるため、装置の熱設計や冷却方式での優位性、ファンレスによる静音性などにも期待が高まる。そして、高周波動作と逆回復特性の特長を生かした双方向スイッチを使えば、高速充電器や電力コンディショナなどのパワー回路で、格段の特性改善が進展するであろう。

EV（Electric Vehicle）や HEV（Hybrid Electric Vehicle）をはじめ、自動車や鉄道などの輸送機器の主機に使用され

るモータには、圧倒的に小型・軽量化、高速回転化が求められる。それはアクチュエータとしての高効率化や高出力密度化につながり、回生エネルギーの高回収率や機械システムのメンテナンス低減化にも寄与する。その実現には、変換器のスイッチング損失の低減やスイッチング周波数の向上が鍵となり、後述する電磁雑音の対策との合わせ技が必須である。一方、磁石レスを実現する SR（Switched Reluctance）モータや、故障耐性に優れた多相モータなど、構造自体に特徴を持つモータの適用も進んでいる。その場合、多くの交流モータに供する三相汎用インバータモジュールをそのまま使用できないため、さまざまなモータに適用可能で自由度が高くかつ低価格な変換器モジュールも望まれよう。

さらに、モータの小型化や高速回転化、そして変換器のスイッチング周波数の向上は、ドライブする機械システムの制御性能のブレイクスルーにも直接つながる。すなわち、制御サンプリング時間のさらなる短縮や、モータトルクの応答帯域の格段の伸張により、従前を凌駕（りょうが）する高速高精度な速度制御や位置決めなどが実現される。

(3) アプリケーションが要望する回路技術

それでは、次世代パワーデバイスならではの利点である、高速スイッチング、高周波動作、高温動作を実現するパワー回路技術・実装技術にはどのようなものが要望されるだろうか？ 真っ先に解決しなければならないことは、高速スイッチングに伴うサージ電圧や電磁雑音の抑制であろう。その対策として、パワー回路の配線距離短縮、スイッチング素子のドライブ回路やラインバイパスコンデンサの配置工夫など、実装技術の改善が挙げられる。さらに、パワー回路で使用する各種リアクトルで高周波動作に伴い上昇する損失を低減すべく、リアクトルコア材の適切な選択も必要であろう。一方、単体では接合温度 400℃ 以上でも動作する SiC デバイスも、はんだやパッケージングに対する温度制約によって、その高温動作性能をフルに発揮できていない。したがって、これらの回路実装技術の今後の進展が、高機能で差別化可能な製品創出のイノベーションを生むことであろう。

パワー半導体の現状と展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

高橋 良和 TAKAHASHI Yoshikazu

藤平 龍彦 FUJIHIRA Tatsuhiko

宝泉 徹 HOSEN Toru

① まえがき

富士電機は、地球社会の良き企業市民として、地域、顧客、パートナーとの信頼関係を深め、誠実にその使命を果たすことを経営の基本理念としている。創業から90年の長い歴史の中で培った技術や経験を基に、電気・熱エネルギー技術の革新を追求し、エネルギーを最も効率的に利用できる、付加価値の高い、環境にやさしい製品づくりに取り組んでいる。

安全・安心で持続可能な社会を実現するために、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの普及と、そのエネルギーを効率的に利用するパワーエレクトロニクス（パワエレ）技術に対する世の中の期待は非常に大きい。これらのニーズが高まる中、富士電機では、エネルギー変換効率が高く低ノイズの、地球環境にやさしいパワー半導体製品を開発している。これらの製品は、環境、エネルギー、自動車、産業機械、社会インフラ、家電製品などの分野に広く適用され、世の中に貢献している。

本稿では、パワエレ技術のキーデバイスとしてのパワー半導体について、Si（シリコン）デバイスやSiC（炭化けい素）デバイス^{(*)1}を搭載したパワーモジュール^{(*)2}、パワーディスクリート^{(*)3}、パワーIC^{(*)4}を中心に、最新の製品およびその要素技術の現状と展望を述べる。

② パワーモジュール

図1に、パワーモジュール製品の応用例を示す。大容量市場では、次世代のパワー半導体として期待が大きいSiCのSBD^{(*)5}（Schottky Barrier Diode）とSiのIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）とを組み合わせたSiCハイブリッドモジュール、およびAll-SiCモジュールを開発した。また、3レベル変換器用IGBTモジュールの開発も進めている。中容量市場では、ハイブリッド自動車（HEV）や電気自動車（EV）向けのインテリジェントパワーモジュール

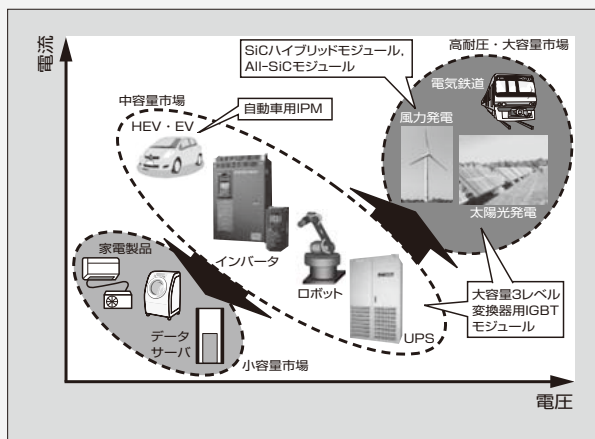


図1 開発したパワーモジュール製品の応用例

(*1) SiC デバイス

ワイドバンドギャップ半導体の一つであるSiC（炭化けい素）を用いた半導体デバイスである。現在主流のSiデバイスと比較して、高耐圧、低損失、高熱伝導、高耐熱といった優れた特徴を併せ持つ。

(*2) パワーモジュール

ダイオードやトランジスタといったパワー素子を複数搭載したパワー半導体の一つである。構成する回路により、一つのモジュールの中の素子（通常はIGBT+逆並列接続FWD）の数に応じて、1in1、2in1、6in1などと呼ばれる。パワー素子を制御する駆動回路も搭載したものは、インテリジェントパワーモジュール（IPM）と呼ばれる。

(*3) パワーディスクリート

パワー素子のIGBTやMOSFETを1素子、またはそれに逆並列にダイオードが挿入された1in1と呼ばれる回路から構成されるパワー半導体である。形状は、汎用的にピンレイアウトが決まっており、TO-220やTO-3Pなどがある。小容量タイプのPC電源、無停電電源装置、液晶ディスプレイおよび小型モータの制御回路などに使われている。

(*4) パワー IC

パワー素子と制御・保護回路を一つの半導体チップ上に集積した高耐圧ICである。パワーエレクトロニクスシステムの小型化や低消費電力化が可能となり、産業、車載、民生の各用途に応じて数十Vクラスから1,200Vクラスまでの製品が開発されている。

(*5) SBD

Schottky Barrier Diodeの略である。金属と半導体との接合によって生じるショットキー障壁を利用したダイオードである。その優れた電気特性のため、SiCショットキーバリアダイオードのFWDへの適用検討が始まっている。多数キャリアと少数キャリアを利用したPiN（P-intrinsic-N）ダイオードと比較し、多数キャリアのみで動作するSBDは、逆回復スピードが速く、逆回復損失も小さい。反面、逆バイアス印加時の漏れ電流が大きいという問題がある。

(^{(*)6}) (IPM : Intelligent Power Module) と TIM (Thermal Interface Material) プリペースト IGBT モジュールを開発した。そして、これらの製品開発を支える要素技術として、高温動作保証および直接水冷のためのパッケージ技術についても力を注いでいる。

2.1 SiCハイブリッドモジュール

インバータの高効率化に向け、パワー半導体の低損失への要求が強い。代表的なパワー半導体である IGBT モジュールは、これまで Si の IGBT チップおよび FWD (Free Wheeling Diode) チップを用いてきた。^{(*)7} しかし、Si デバイスの性能は、物性に基づく理論的限界に近づきつつあり、耐熱性と高破壊電界耐量を持った SiC デバイスが、適用装置の高効率化や小型化を実現するものとして有望視されている。富士電機では、これまでに 600 V 耐圧と 1,200 V 耐圧の SiC-SBD の開発を完了し、これらの SiC-SBD と Si-IGBT とを組み合わせて搭載した SiC ハイブリッドモジュールを製品化してきた。⁽¹⁾

現在、1,700 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールの開発を推進している。このモジュールは、Si モジュールと同じ M277 パッケージを採用し、FWD に独立行政法人産業技術総合研究所と共同で開発した SiC-SBD チップを、IGBT に「V シリーズ」IGBT チップを適用した。このモジュールにおいて、順方向電圧と漏れ電流は Si モジュールと同等であり、かつスイッチング損失は大きく低減することを確認した。また、インバータでの発生損失は、Si モジュールに比べて 4 kHz 駆動において 26% 低減し、高周波動作では

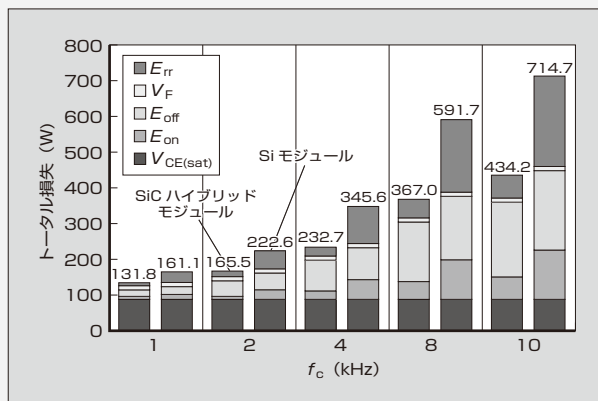


図2 インバータの発生損失

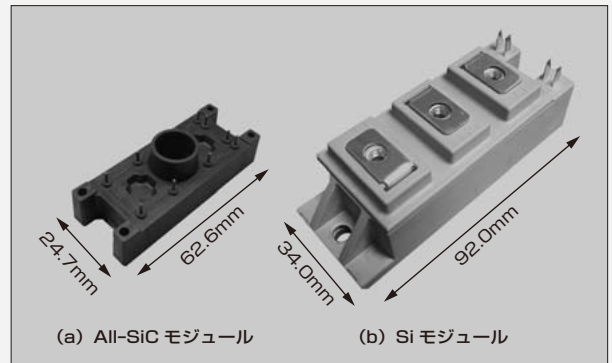


図3 All-SiCモジュールとSiモジュール

さらに優位であることを確認した (図2) (240 ページ “1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール” 参照)。

2.2 超小型・高信頼性All-SiCモジュール

富士電機では、SiC デバイスが持つ性能を最大限に発揮できるように All-SiC モジュールの開発を進めている。⁽²⁾

All-SiC モジュールは、パワーチップの接続に銅ピンを用いており、ワイヤボンディングレス構造である。図3に、開発を進めている 1,200 V/100 A 定格の All-SiC モジュールと、同じ定格である従来の Si モジュールの外観を示す。All-SiC モジュールのフットプリントサイズは、従来に比べて 50% 以上小型化し、モジュールインダクタンスを 75% 低減させた。これにより、All-SiC モジュールの特性を最大限に引き出すことができ、特に高周波動作において低損失・小型化のメリットが大きい。この All-SiC モジュールを太陽光発電向けパワーコンディショナ (PCS) に適用し、効率 99% を達成している (244 ページ “超小型・高信頼性 All-SiC モジュール” 参照)。

2.3 175℃連続動作保証IGBTモジュールのパッケージ技術

汎用インバータは、その適用範囲が拡大しており、省エネルギー化と小型化の市場要求が強い。この要求に応え、中核部品である IGBT モジュールのさらなる小型化、高パワー密度化を実現するために、動作温度の上限を現行の 150℃ から 175℃ にさらに引き上げると、パワーサイクル寿命は約 30 ~ 50% 低下する。175℃ 連続動作を保証するために、従来の最大接合温

(^{(*)6}) TIM

Thermal Interface Material の略である。パワーモジュールなどで発生した熱を効率良くヒートシンクに伝えるため、IGBT モジュールとヒートシンクの間に見える隙間を埋める材料である。グリスやコンパウンド、放熱シート、グラファイトなどがあり、使用環境に合わせて適切な材料を選択する。

(^{(*)7}) FWD

Free Wheeling Diode の略である。還流ダイオードともいう。インバータなどの電力変換回路において、IGBT と並列に接続され、IGBT をオフした際にインダクタンスに蓄えられたエネルギーを電源側へ還流させる役割を担うデバイスである。Si デバイスでは、PiN ダイオードが主流である。多数キャリアと少数

キャリアの双方を用いたバイポーラタイプであるため、順方向電流通流時の電圧降下を小さくできるが、その分、逆回復損失が大きくなる。

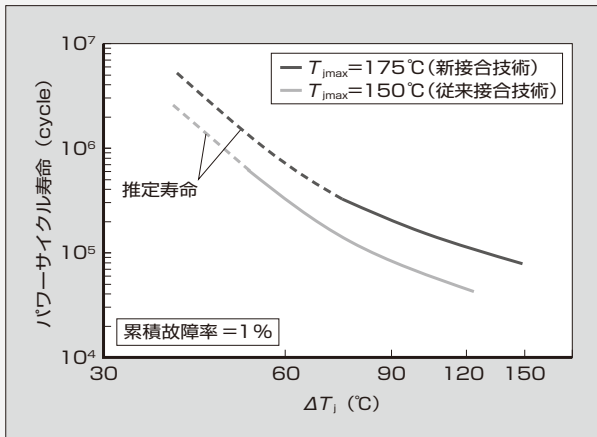


図4 パワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$) 結果

度 $T_{jmax}=150^{\circ}\text{C}$ と同等以上のパワーサイクル寿命を持つ高信頼性パッケージの技術を開発した。

高温環境における組織変化を抑制し、強度低下を防ぐために、従来のアルミニウムワイヤに代わり高耐熱性を持つ新アルミニウムワイヤを開発した。また、チップと絶縁基板間のはんだは、従来の Sn-Ag はんだに代わって高温で高強度を持つ新しいはんだ合金を開発した。さらに、チップの表面電極に発生する応力を低減し、アルミニウムよりも Si に近い線膨張係数を持つ Ni をアルミニウム電極上に成膜した構造を開発した。

これら三つの新技術を適用することにより、 175°C 連続動作を可能にし、従来よりも高寿命の IGBT モジュールを開発した (図4)。これらの技術は、現行の製造プロセスをそのまま使用できるため、容易に 175°C 連続動作を保証する製品の量産が可能である。IGBT モジュールのさらなる高パワー密度化により、汎用インバータの最大出力を向上させることが期待できる (249 ページ “ 175°C 連続動作を保証する IGBT モジュールのパッケージ技術” 参照)。

2.4 3レベル電力変換器用大容量IGBTモジュール

電力エネルギーの効率的な利用を可能にするパワエレ技術は、発電時の CO_2 排出量の抑制や再生可能エネルギーの有効活用につながる。富士電機では、大容量変換装置用に 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールを開発している。

UPS や太陽光発電 (メガソーラー) を大容量にするためには、複数の小・中容量 IGBT モジュールを並



図5 3レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュール

列に接続して使用することが多い。しかし、IGBT モジュールの並列使用は、モジュール間や、モジュールと主回路間の配線インダクタンスによる高いサージ電圧の発生などの課題がある。また、冷却フィンの面積が大きくなる傾向もある。これらの課題を解決するため、大容量 IGBT モジュールが市場から期待されている。

3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールは、AT-NPC (Advanced T-type Neutral-Point-Clamped⁽⁴⁾) 方式の回路とサーミスタをワンパッケージ化したものである。富士電機は、AT-NPC 方式で $1,200\text{V}/900\text{A}$ の V シリーズチップと RB-IGBT⁽⁵⁾ チップを使用した大容量 IGBT モジュールを開発した (図5)。また、電磁相互誘導作用を利用して、IGBT モジュールの内部インダクタンスを最大で 30nH 、最小で 18nH に抑えた。さらにワンパッケージ化により、IGBT モジュールの実装面積が省スペースで、冷却フィンの面積が小さくなり装置の小型化が期待できる (253 ページ “3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュール” 参照)。

2.5 ハイブリッド自動車用IPMのパッケージ技術

自動車業界では、電力を動力源とした HEV や EV の開発と普及が加速している。このような環境下において富士電機は、2012 年 12 月に HEV 用 IPM の量産を開始した (図6)。

本 IPM は、二つのモータを制御するインバータ部と昇降圧コンバータ部を内蔵し、HEV に必要とされる高出力をコンパクトかつ軽量で実現するものである。

従来の IPM は、インバータ部や昇降圧コンバータ部がおのおの機能別にモジュールを構成し、搭載され

(*8) 3 レベル電力変換

電源やインバータをはじめとする電力変換装置の電力損失を大幅に低減させた、新しいマルチレベル変換回路の一つである。詳細は、277 ページ解説 1 “3 レベル電力変換方式” を参照。

(*9) RB-IGBT

Reverse-Blocking Insulating Gate Bipolar Transistor の略である。逆阻止 IGBT ともいう。逆方向 (エミッタ-コレクタ間) の耐圧を持った IGBT である。通常の IGBT 素子は逆印加方向の耐圧を持たないため、

ダイオードを挿入する必要があるが、RB-IGBT は順方向と同じレベルの耐圧を持っているため、ダイオードが不要になる。

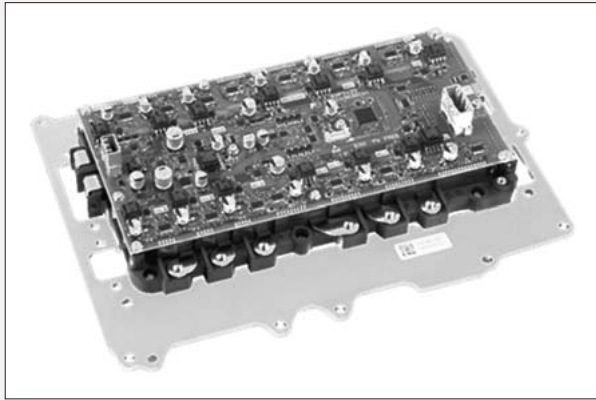


図6 HEV用IPM

ることが一般的であった。本IPMは、この三つの機能とコントローラを統合したオールインワン・パッケージを実現したことで、富士電機の従来製品に対して、体積を30%削減し、質量を60%削減した。

集積密度の向上と軽量化を両立するため、熱効率の高いアルミニウムヒートシンクによる直接水冷構造を採用した。熱膨張率の大きいアルミニウムと絶縁基板のはんだ接合を可能とする高強度はんだ技術および放熱設計技術の二つの新技術を開発した。また、ドライブ回路は、IGBTの保護機能に加えて、高精度昇降圧制御機能や高精度チップ温度通信機能を備えている。

本IPMは、高出力HEV車の業界最高の燃費効率達成に貢献している(258ページ“ハイブリッド自動車用IPMのパッケージ技術”参照)。

2.6 TIMプリペーストIGBTモジュール

IGBTモジュールは、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー、自動車、産業機械、社会インフラなど、幅広い分野で適用されている。適用に当たっては、動作の際に発熱するため、適用機器のサーマルマネジメントが重要な課題となる⁽⁶⁾。

一般的に、空冷や水冷方式の冷却フィンとIGBTモジュールの間に、熱伝達用のサーマルグリースを塗って取り付ける。富士電機では、あらかじめIGBTモジュールにサーマルグリースを塗布したTIMプリペーストIGBTモジュールを開発した。

今回採用したTIMはフェイズチェンジタイプであり、TIMが固化した状態で輸送できるとともに、使用する際には温度が上昇することで液化し、均一にぬれ広がるという特徴がある。また、フェイズチェンジタイプTIMの熱伝達率は従来のサーマルグリースの3倍以上あり、熱抵抗も従来の1/3に低減できること

を確認した(263ページ“TIMプリペーストIGBTモジュール”参照)。

③ パワーディスクリート・パワーIC

3.1 第2世代LLC電流共振制御IC

富士電機はこれまでに、高耐圧IC用プロセスでブリッジ回路を直接駆動するドライバICと制御ICとを一体化し、独自の制御方式によるLLC電流共振制御IC「FA5760N」を製品化した⁽⁷⁾。これにより、高効率・低ノイズ・低待機電力かつ小型の電源システムを構成できる。今回は、その特徴を継承しながら、さらなる低待機電力化、保護機能の充実、より低いシステムコスト、かつ設計自由度の高いLLC電流共振電源を実現する第2世代LLC電流共振制御IC「FA6A00Nシリーズ」を開発した(図7)。

低損失バースト制御の最適化を行い、無効領域と変換効率が低い領域を削減し、待機電力をFA5760Nに比べて約20%削減した。さらに、補助巻線電圧を高精度に検出することにより、専用の過負荷保護回路が無くとも高精度の過負荷保護機能を構築することができ、電源の部品点数を30点以上削減することを可能にした。また、過電流保護回路の検出遅延時間を外付け部品で調整できるようにし、電源の設計自由度を高めた(267ページ“第2世代LLC電流共振制御IC「FA6A00Nシリーズ」”参照)。

3.2 ワンチップ リニア制御用IPS

近年、自動車電装分野では、広い室内空間を確保するため、ECU(Electronic Control Unit)には小型化、高性能化が求められている。

富士電機では、トランスミッション、エンジン、ブレーキなどに用いられる自動車電装システム向けにIPS(Intelligent Power Switch)製品の開発を行ってきた。IPSはECUの回路部品数や実装面積の低減を可能とし、ECUの小型化に貢献している。

また、排出ガス低減や燃費向上のために、油圧を電流値に応じてリニアに変更できるリニアソレノイドバルブを用いたリニア制御では、負荷であるリニアソレノイドに流れる電流を高精度に検出する必要がある。

今回、高精度電流検出アンプを搭載したワンチップリニア制御用IPS「F5106H」を開発した。これにより、システムのさらなる小型化、高精度なりニア制御が可能となった(273ページ“ワンチップリニア制御用IPS「F5106H」”参照)。

(*10)IPS

Intelligent Power Switchの略である。駆動・保護・状態出力などの制御回路を同一チップ内に搭載したパ

ワー半導体である。用途に応じてハイサイドタイプとローサイドタイプがある。主にオン抵抗の違いで系列化しており、許容損失ごとにパッケージを変えている。

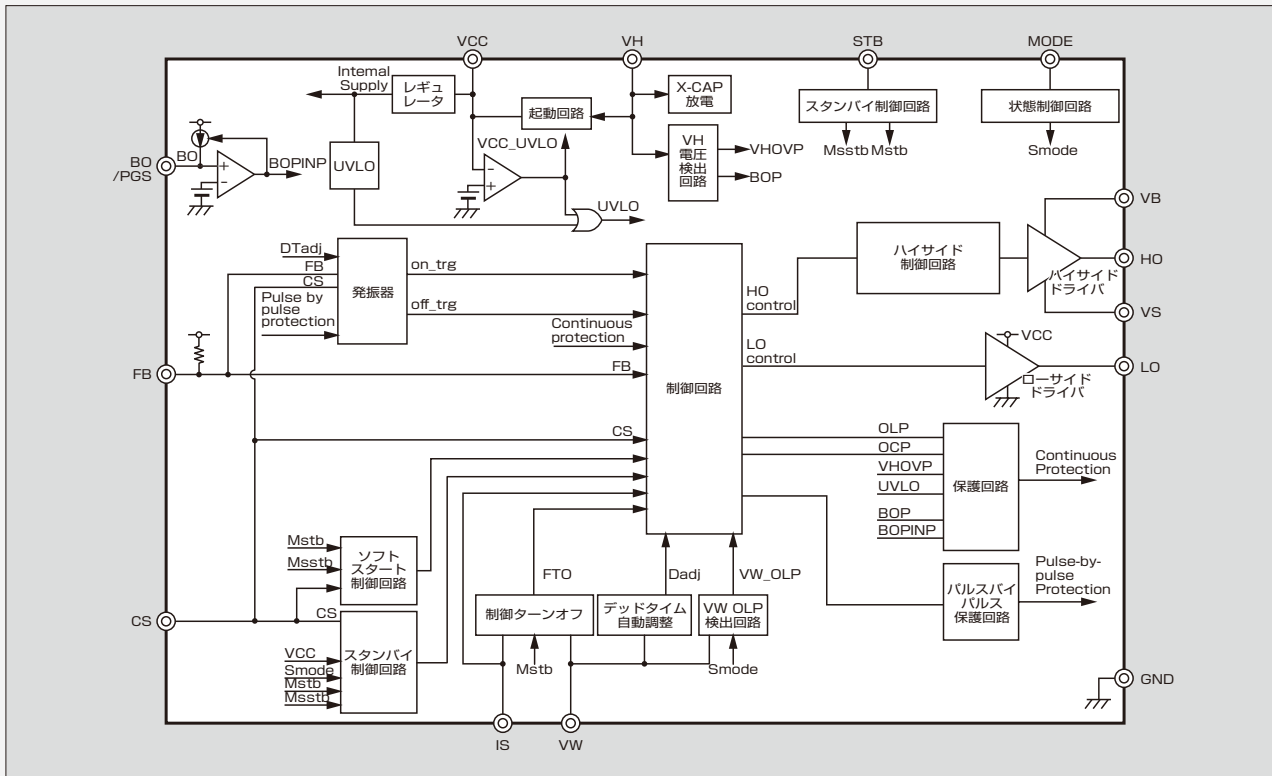


図7 「FA6A00N シリーズ」のブロック図

4 あとがき

本稿では、パワー半導体の最新の主要製品とそれを支える技術について述べた。今後、Si や SiC を用いたデバイスでは、回路技術と結びついた IPM 化や高温動作に対応した技術開発が進むものと思われる。

富士電機はこれまで、IGBT をはじめ、SiC モジュール、パワーディスクレットおよびパワー IC などのパワー半導体を開発し、パワーエレクトロニクス技術の革新を担ってきた。これが、高性能化・小型化・高集積化・高信頼性を加速させ、再生可能エネルギーの普及や省エネルギー技術の発展に貢献してきた。これからも、地球環境にやさしいパワー半導体製品を開発し、持続可能な社会の実現を目指していく。

参考文献

- (1) 中沢将剛ほか. Si-IGBT・SiC-SBDハイブリッドモジュール. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.331-335.
- (2) 梨子田典弘ほか. All-SiCモジュール技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.403-407.
- (3) Morozumi, A. et al. Direct Liquid Cooling Module with High Reliability Solder Joining Technology for Automotive Applications, Proceedings of the 25th ISPSD & ICs, Kanazawa. May 26-30, 2013.
- (4) Komatsu, K. et al. "New IGBT Modules for

Advanced Neutral-Point-Clamped 3-Level Power Converters". IPEC'10 proceedings. 2010, p.523-527.

- (5) Wakimoto, H. et al. "600 V Reverse Blocking IGBTs with Low On-state Voltage". IPCIM '11 Europe, Proceedings. 2011, p.317-322.
- (6) Fumihiko, M. Thermal management of IGBT module systems, PCIM Asia'.
- (7) 陳建. PFC及び待機用コンバータ無しで広入力電圧範囲に対応したLLC共振コンバータ. 第27回スイッチング電源技術シンポジウム. 2012, D2-2.
- (8) 鷹坂浩志ほか. 車載用第4世代 IPS 「F5100シリーズ」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.440-444.



高橋 良和

パワー半導体の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センター長。工学博士。電気学会会員、応用物理学会会員、エレクトロニクス実装学会会員、日本デザイン学会会員。



藤平 龍彦

電子デバイスの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部長兼技術開発本部電子デバイス研究所長。工学博士。電気学会会員，応用物理学会会員，日本金属学会会員，IEEE 会員。



宝泉 徹

パワー半導体の開発，事業企画に従事。現在，富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部長。電気学会会員。



1,700V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール

1,700 V Withstand Voltage SiC Hybrid Module

小林 邦雄 KOBAYASHI Kunio

北村 祥司 KITAMURA Shoji

安達 和哉 ADACHI Kazuya

Si デバイスに替わり、耐熱性と高破壊電界耐量を持った SiC デバイスが、装置の高効率化や小型化を実現するものとして有望視されている。富士電機では、高効率インバータ（690 V 系）向けに 1,700 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールの開発を推進している。FWD には、独立行政法人産業技術総合研究所と共同で開発した SiC-SBD チップを適用し、IGBT には、富士電機製「V シリーズ」IGBT チップを適用した。漏れ電流特性やスイッチング特性を改善することにより、300 A 品において、従来の Si モジュールに比べて発生損失を約 26% 低減できることを確認した。

In place of Si devices, silicon carbide devices (SiC devices) featuring heat resistance and high breakdown field tolerance are raising expectations for efficiency improvement and miniaturization of equipment. Fuji Electric is moving ahead with the development of a 1,700 V withstand voltage SiC hybrid module for high-efficiency inverters (690 V series). A SiC-SBD chip jointly developed with the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology has been applied to a freewheeling diode (FWD), and a Fuji Electric's "V-Series" IGBT chip has been applied to an insulated gate bipolar transistor (IGBT). By improving leakage current and switching characteristics, the module has been verified to be capable of reducing generated loss by approximately 26% in a 300A product compared to the conventional Si modules.

1 まえがき

地球温暖化を防止するために、これまで以上に CO₂ などの温室効果ガスの削減が迫られている。温室効果ガスを削減する手段の一つとして、パワーエレクトロニクス機器の省エネルギー化がある。その中で重要なアイテムがインバータの高効率化であり、インバータを構成するパワーデバイス、回路、制御などの技術革新が必要となる。特に、インバータの主要な素子であるパワーデバイスでは、低損失の要求が強い。代表的なパワーデバイスである IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、今までシリコン (Si) の IGBT チップと FWD (Free Wheeling Diode) チップを用いてきた。しかし、Si デバイスの性能は、物性に基づく理論的限界に近づきつつある。そこで、耐熱性と高破壊電界耐量を持った SiC デバイスが、装置の高効率化や小型化を実現するものとして有望視されている。

本稿では、SiC デバイスを用いた 1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュールについて述べる。

2 製品の構成

富士電機では、これまで 200 V 系用の 600 V 耐圧 SiC-SBD (Schottky Barrier Diode)、ならびに 440 V 系の 1,200 V 耐圧 SiC-SBD の開発を完了し、これらの SiC-SBD と Si-IGBT とを組み合わせて搭載した SiC ハイブリッドモジュールを製品化している。高耐圧の FWD として従来使用していた Si-PIN ダイオードに比べ、SiC-SBD は低抵抗かつスイッチング特性に優れている。このため、SiC ハイブリッドモジュールは、従来の Si-IGBT モジュールに比べて発生損失を約 26% 低減できる。

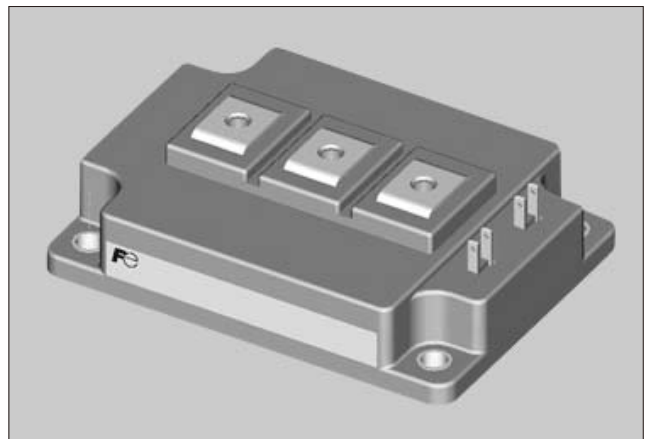


図1 M277パッケージ

現在、690 V 入力インバータ向けに 1,700 V 耐圧の SiC ハイブリッドモジュールの開発を推進している。SiC ハイブリッドモジュールは、従来の Si モジュールから容易に置き換えてできるように、Si モジュールと同じ M277 パッケージ (図 1) を採用した。FWD には、独立行政法人産業技術総合研究所と共同で開発して、富士電機で量産立ち上げを行った SiC-SBD チップを適用し、IGBT には、富士電機製で最新の第 6 世代「V シリーズ」IGBT チップを適用した。

3 特性

3.1 FWD の順方向特性

図 2 に SiC ハイブリッドモジュールと Si モジュールの FWD の順方向特性を、図 3 に温度依存性を示す。ジャンクション温度が 150°C で定格電流 300 A のときの SiC ハイブリッドモジュールの順方向電圧 V_F は、Si モジュールの

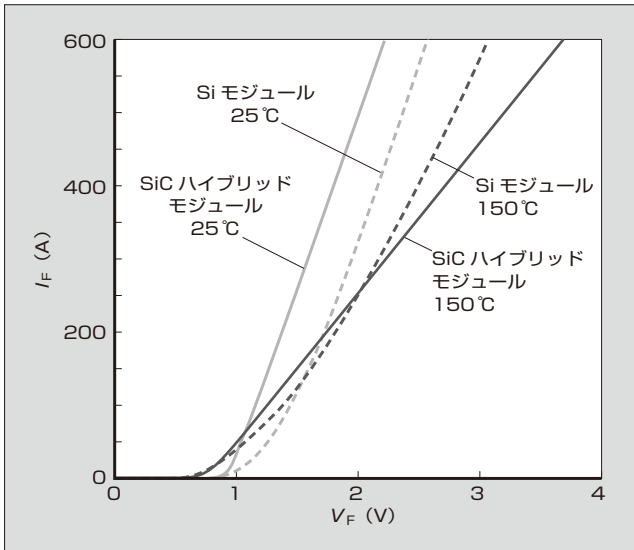


図2 FWDの順方向特性

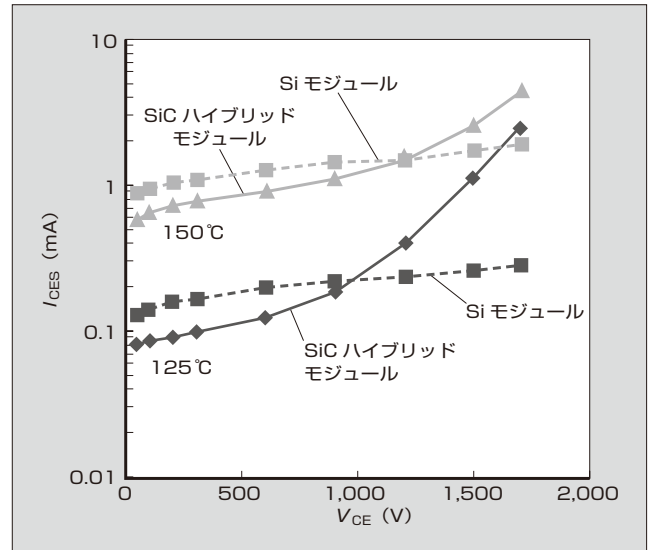


図4 漏れ電流温度依存性

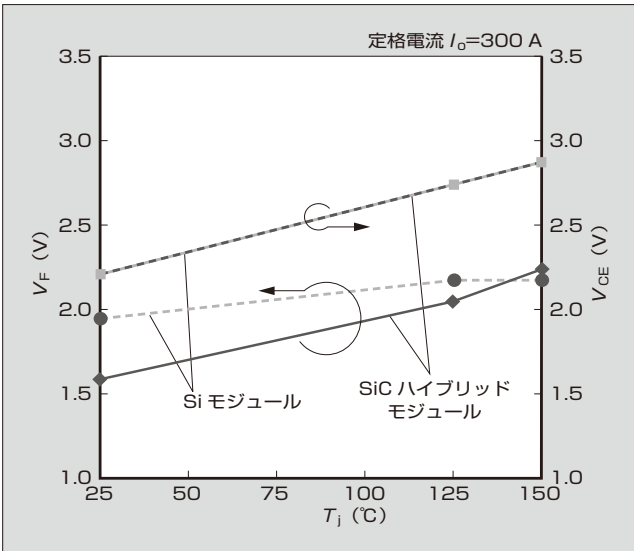


図3 FWDの温度依存性

V_F と同等である。SiC ハイブリッドモジュールは、強い正の温度特性を持っているので、多並列接続使用した場合でも電流アンバランスは発生しにくい。

3.2 漏れ電流特性

図4にSiCハイブリッドモジュールとSiモジュールの漏れ電流温度依存性を示す。125°Cの定格電圧(1,700V)印加におけるSiCハイブリッドモジュールの漏れ電流 I_{CES} は、Siモジュールの漏れ電流に対し10倍程度大きいのが、150°CではSiモジュールに対し2倍程度の値を示す。また定格電圧印加におけるSiCハイブリッドモジュールの漏れ電流値は、Siモジュールの漏れ電流と比べ125°Cと150°Cの差が小さい。このように、SiC-SBDの漏れ電流温度依存性は、Si-FWDに比べて小さい。これは、SiCのバンドギャップがSiの約3倍と広く、SiC-SBDはSi-FWDに比べて高電界で動作することにより、SiC-SBDの漏れ電流成分はトンネル電流が支配的になり、温度の影響を受け

にくいからである。したがって、SiCハイブリッドモジュールは、Vシリーズと同様に高温動作が可能である。

3.3 スイッチング特性

(1) 逆回復損失特性

図5に、SiCハイブリッドモジュールとSiモジュールの逆回復損失特性を示す。SiCハイブリッドモジュールは逆回復ピーク電流がほとんどない。これはSiC-SBDがユニポーラデバイスであるため、少数キャリアの注入が起きないことに起因する。300A品の逆回復損失はSiモジュールと比べて約83%低い。

(2) ターンオン損失特性

図6に、SiCハイブリッドモジュールとSiモジュールのターンオン損失特性を示す。SiC-SBDの逆回復ピーク電流は対向アーム側のIGBTターンオン電流に影響し、ターンオン損失の低減につながる。300A品のターンオン損失は、Siモジュールと比べて約40%低い。

(3) ターンオフ損失特性

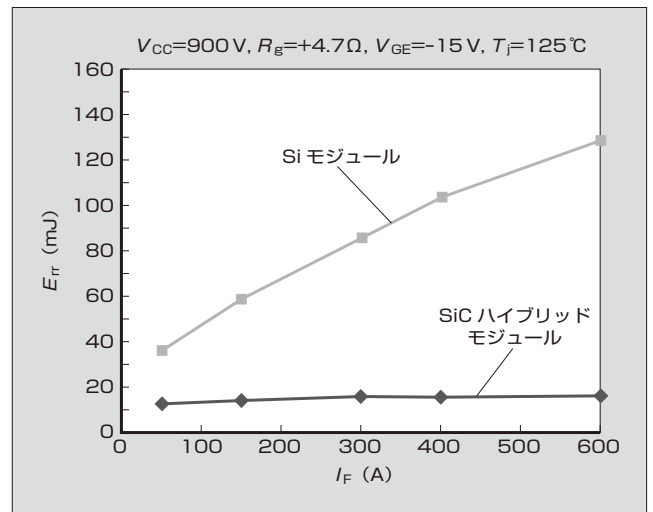


図5 逆回復損失特性

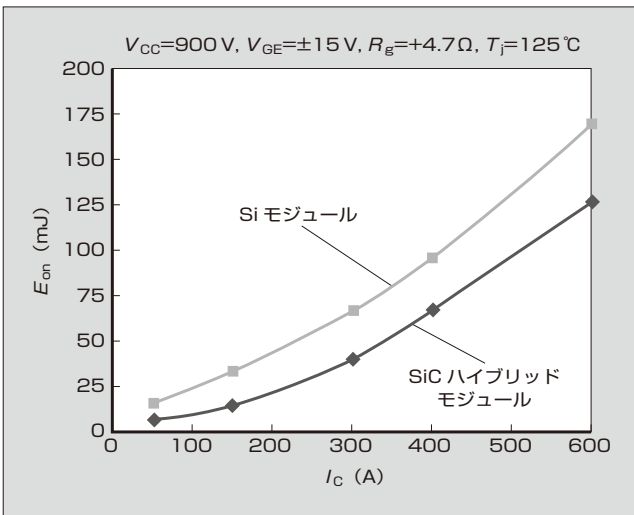


図6 ターンオン損失特性

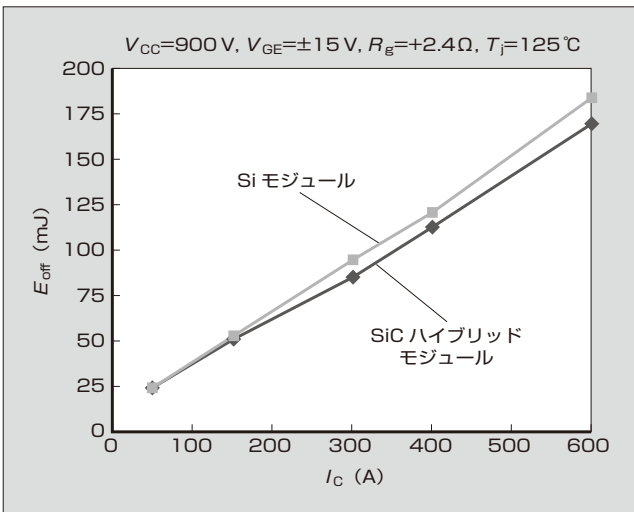


図7 ターンオフ損失特性

図7に、SiCハイブリッドモジュールとSiモジュールのターンオフ損失特性を示す。SiCハイブリッドモジュールのターンオフ時のサージピーク電圧は、式(1)で表すことができる。IGBTの素子特性と主回路のインダクタンスが同等であれば、ダイオードの過渡オン電圧の差がサージ電圧の差となる。SiC-SBDはSi-FWDと比較してドリフト層が非常に低抵抗であるため、過渡オン電圧が低減される。したがって、ターンオフ時のサージ電圧が低く抑えられ、ターンオフ損失も低い。

$$V_{sp} = V_{cc} + L_s \frac{dI_c}{dt} + V_{fr} \dots \dots \dots (1)$$

- V_{sp} : サージピーク電圧
- V_{cc} : 印加電圧
- L_s : 主回路インダクタンス
- I_c : コレクタ電流
- V_{fr} : 過渡オン電圧

3.4 インバータ発生損失

図8に、SiCハイブリッドモジュールとSiモジュール

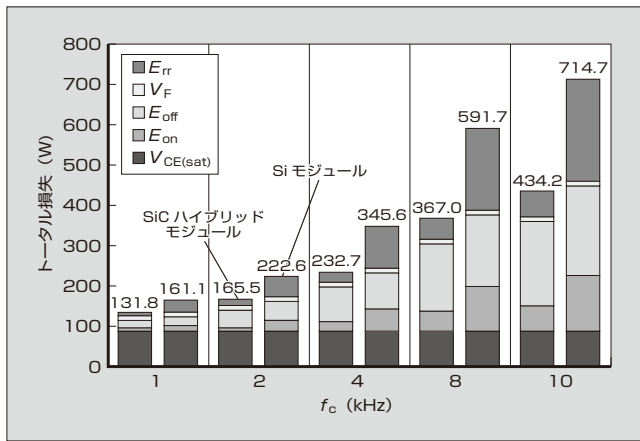


図8 インバータ発生損失

のインバータ発生損失を示す。キャリア周波数 f_c が2kHzのとき、SiCハイブリッドモジュールの総損失は、Siモジュールに比べて約26%低い。また、キャリア周波数が高くなったとき、SiCハイブリッドモジュールの損失増加率はSiモジュールより抑制されるため、高周波動作に有利である。

4 あとがき

SiCハイブリッドモジュールは、独立行政法人産業技術総合研究所と共同で開発したSiC-SBDと、富士電機の最新Si-IGBTである第6世代「Vシリーズ」を適用したものである。本製品はデバイス自身の大幅な損失低減により、インバータの高効率化に大きく貢献できる。今後、SiCチップ適用製品の拡大と系列化を進め、省エネルギーに貢献していく所存である。

SiC-SBDチップの開発にご協力いただいた独立行政法人産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センターの関係各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) 木下明将ほか。“高温での V_T を特徴とした600V/1,200VクラスSiC-SBD”。つくば市。2010-10-21。応用物理学会SiC及び関連ワイドギャップ半導体研究会第19回講演。
- (2) 中沢将剛ほか。Si-IGBT・SiC-SBDハイブリッドモジュール。富士時報。2011, vol.84, no.5, p.331-335。



小林 邦雄

IGBTモジュールの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部産業モジュール技術部。



北村 祥司

半導体デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部。



安達 和哉

感光体の開発，有機 EL の開発および IGBT モジュールのパッケージ設計に従事。現在，富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所パワーエレ技術開発センター応用技術開発部。



超小型・高信頼性 All-SiC モジュール

Ultra-Compact, High-Reliability All-SiC Module

仲野 逸人 NAKANO Hayato

日向 裕一郎 HINATA Yuichiro

堀尾 真史 HORIO Masafumi

SiC デバイスは、高耐圧、低損失、高周波動作および高温動作を実現する優れたデバイス特性を持っている。富士電機の All-SiC モジュールは、半導体素子接合と樹脂封止構造が特徴である。従来製品と比較して、フットプリントは 50% 小型化し、インダクタンスは 75% 低減し、スイッチング損失は約 35% 低減した。また、大容量化においてモジュールを 4 台並列接続した場合でも、スイッチングが可能であることを実証した。パワーサイクルだけでなく高温高湿の状態においても従来製品以上の信頼性を確認した。

SiC devices have excellent characteristics that realize high blocking voltage, low power dissipation, high-frequency operation and high-temperature operation. Fuji Electric's all-SiC modules feature direct bonding layout for semiconductors and a plastic molding structure. Compared with the conventional product, All-SiC modules have achieved a reduction of 50% in footprint, 75% in inductance and approximately 35% in switching loss. Moreover, for using high power drives, switching was demonstrated to be available even if four modules are connected in parallel. All-SiC modules were verified to have higher reliability in high temperature and humidity, in addition to power cycling, than the conventional products.

1 まえがき

パワーエレクトロニクス分野においてパワーモジュールは、高効率の電力変換技術として中核的な役割を担っている。近年注目を浴びている太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー分野をはじめ、ハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の車載分野など、さまざまな分野で使用されている。

しかしながら、現在のパワー半導体の主力である Si デバイスは性能の限界に近づきつつあることから、SiC (炭化けい素)、GaN (窒化ガリウム) などのワイドバンドギャップ半導体の製品開発が活発に行われている⁽¹⁾。中でも SiC デバイスは、高耐圧、低損失、高周波動作および高温動作を実現する優れたデバイス物性を持っている。

本稿では、SiC デバイスの SiC-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) と SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) を搭載した All-SiC モジュールについて述べる。

2 All-SiC モジュールの特徴

All-SiC モジュール向けに開発した新構造と、Si モジュール用の従来構造における断面の比較を図 1 に示す。新構造では、半導体素子 (パワーチップ) の表面接合においてパワー基板によって接続を行い、AMB 基板^(注)に厚銅基板を使用することで放熱性能を向上している。構成材の線膨張係数を最適化し、モジュール内部の発生応力を低減した樹脂封止構造とすることで高信頼性を達成している。図

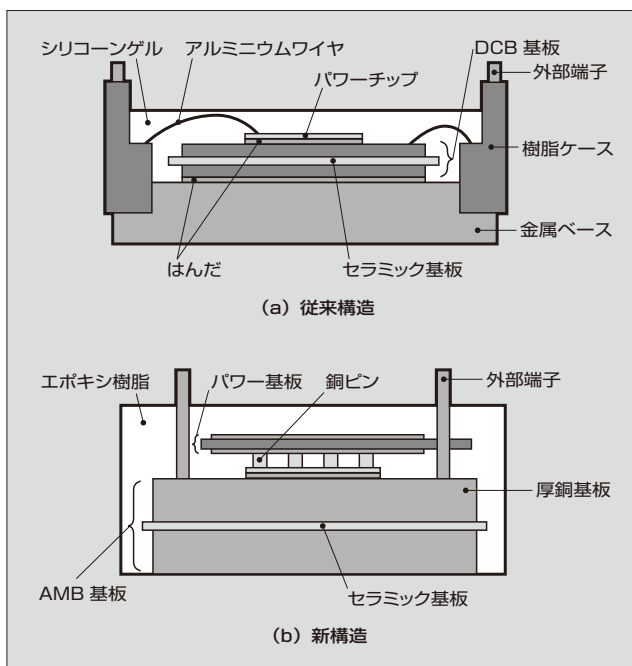


図 1 従来構造と新構造の断面図

2 に、1,200 V/100 A 定格の All-SiC モジュールと、それと同定格の Si モジュールの外観を示す。表 1 に、両者についてフットプリントサイズとインダクタンスを比較し、新構造による低減効果を示す。All-SiC モジュールは Si モジュールに比べてフットプリントサイズが 50% 小型化し、インダクタンスが 75% 低減した。All-SiC モジュールに適用した新構造により、SiC デバイスの特徴を最大限引き出すことができる。

〈注〉AMB 基板:セラミック基板に厚銅基板を AMB (Active Metal Brazing) 法で接合した放熱用絶縁基板である。

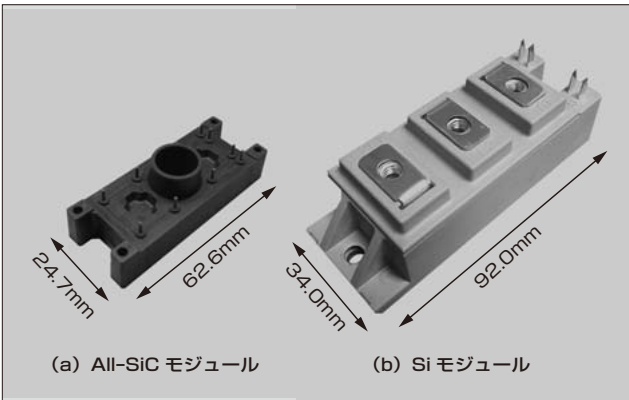


図2 All-SiC モジュールと Si モジュール

表1 All-SiC モジュールの Si モジュールに対する比較

パッケージ構造特性	低減率 (従来構造と新構造の比較)
フットプリント	50%
PN間インダクタンス	75%
ゲートインダクタンス	75%

③ All-SiC モジュール搭載の太陽光 PCS

3.1 All-SiC モジュール搭載の効果

開発を進めている All-SiC モジュールは、超小型であるだけでなく高速スイッチングといった特徴がある。All-SiC モジュールによって回路を高周波化すると付随するリアクトルなどの周波数特性を持つ部品のサイズを小さくできることから、システム全体として小型化のメリットがある。太陽光発電向けパワーコンディショナ (太陽光 PCS) においても、これらの特長を生かすことで小型化を実現している。

特に高周波動作の場合、All-SiC モジュールは発生損失が小さく、従来の Si モジュールのように並列数を増やす必要がない。図 3 に Si デバイスと SiC デバイスの発生損失のスイッチング周波数依存性を示す。同じ構造の 2 in 1

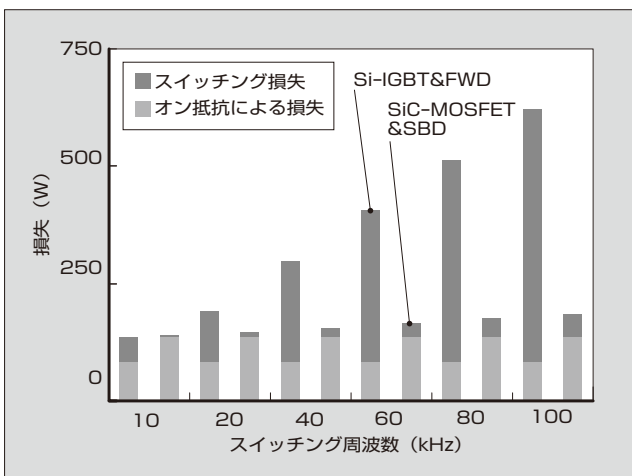


図3 Si デバイスと SiC デバイスの発生損失のスイッチング周波数依存性

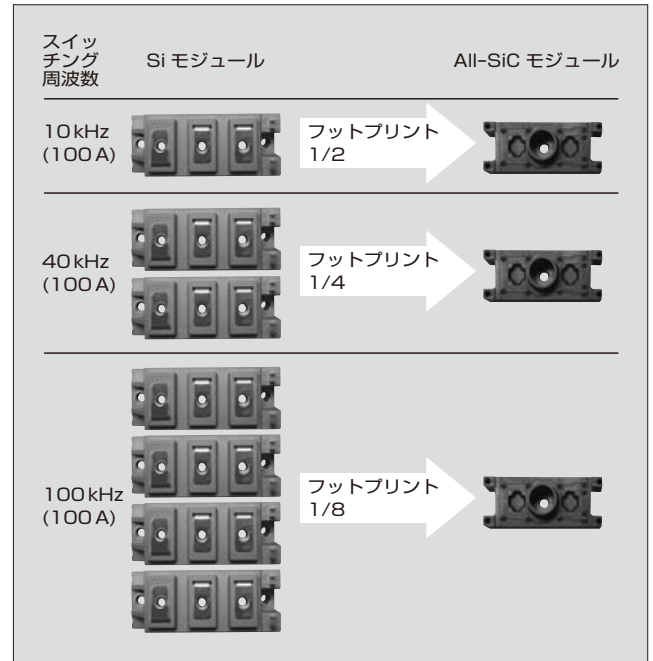


図4 高周波用途における All-SiC モジュールの効果

モジュールに、Si デバイスと SiC デバイスをそれぞれ搭載した場合の発生損失について、スイッチング周波数ごとに試算した結果である。Si デバイスで構成されたモジュールは、スイッチング周波数が上昇するとスイッチング損失が増加する。一方、SiC デバイスで構成されたモジュールは、スイッチング周波数が上昇してもスイッチング損失の増加が少ないので、トータル損失が低い。

図 4 に、高周波用途における All-SiC モジュールの効果を示す。発生損失を同等とした場合の Si モジュールおよび All-SiC モジュールのそれぞれの数を比較したものである。例えば、スイッチング周波数 10 kHz では Si モジュールと All-SiC モジュールは同程度の損失である。この場合、All-SiC モジュールのフットプリントは Si モジュールの 1/2 である。スイッチング周波数が 40 kHz の場合、Si モジュールの損失は、All-SiC の 2 倍であるため Si モジュール 2 個と All-SiC モジュール 1 個がほぼ同等の損失になり、フットプリントが 1/4 になる。スイッチング周波数 100 kHz の場合は、効果はさらに大きくなり、フットプリントは 1/8 になる。

3.2 スイッチング評価

従来構造のモジュールに All-SiC モジュールと同一のデバイスを搭載し、従来構造と新構造におけるスイッチング特性の比較を行った。スイッチング特性の評価条件は、 V_{ds} が 600 V、 I_d が 100 A、 V_g が +15/-5 V、 R_g が 6.8 Ω 、 T_j が 200 $^{\circ}\text{C}$ である。

図 5 に、従来構造と新構造のターンオフ時に発生するサージ電圧の温度依存性を示す。新構造は、従来構造よりもサージ電圧が約 50 V 低減した。どちらの構造も SiC デバイスを搭載しているため、室温と 200 $^{\circ}\text{C}$ でのサージ電圧の差は 10 V 程度と非常に小さい。

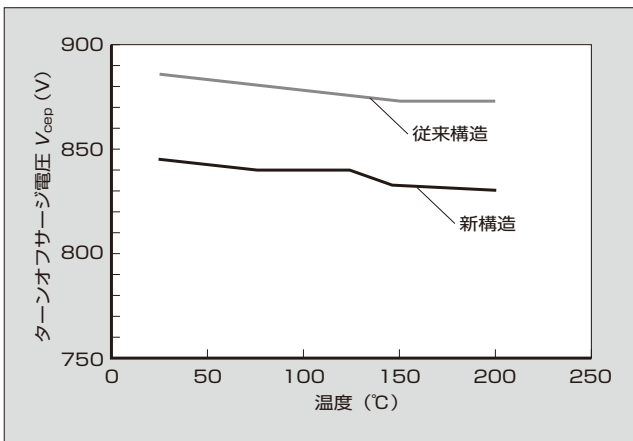


図5 ターンオフ時のサージ電圧の温度依存性

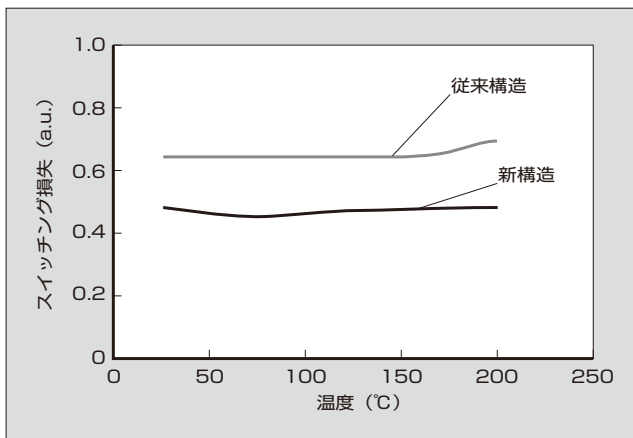


図6 スイッチング損失の温度依存性

また、図6に従来構造と新構造のスイッチング損失の温度依存性を示す。スイッチング損失は、ターンオン損失、ターンオフ損失および逆回復損失の合計である。評価条件は、ターンオフ時のサージ電圧の評価と同じである。どちらの構造もSiCデバイスを搭載しているため、温度依存性が小さい。新構造のスイッチング損失は低インダクタンス性の効果により、従来構造よりも約35%低くなった。

3.3 連続動作

All-SiCモジュールを太陽光PCSのインバータ部に組み込んだ。図7にインバータ部の回路構成を示す。従来の2レベル制御よりもシステムの小型化や高効率化ができる3レベル制御を採用し、中間素子には周波数が20kHzの双方向スイッチング素子を適用している。図8に示すとおり、太陽光PCSの効率は最大で約99%を達成した。太陽光PCS効率とは、ソーラーパネルで発電された電力を所望の電圧に変換する際の効率である。また、モジュールサイズが小さくなったことから、太陽光PCSの筐体(きょうたい)体積を従来の約75%に小型化することができた。

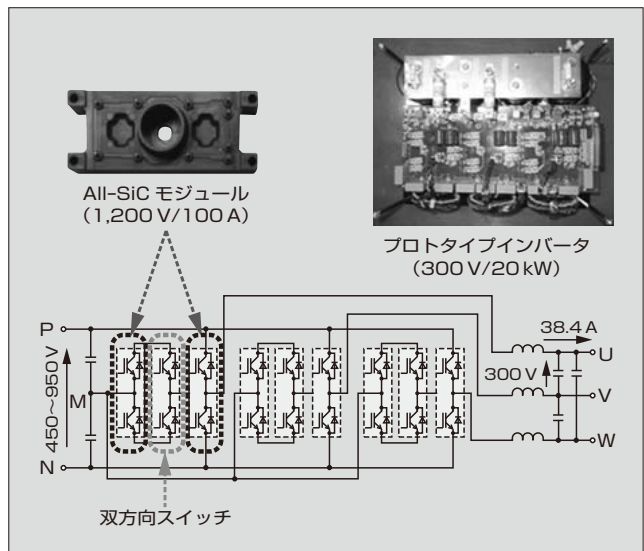


図7 太陽光PCSのインバータ部の回路構成

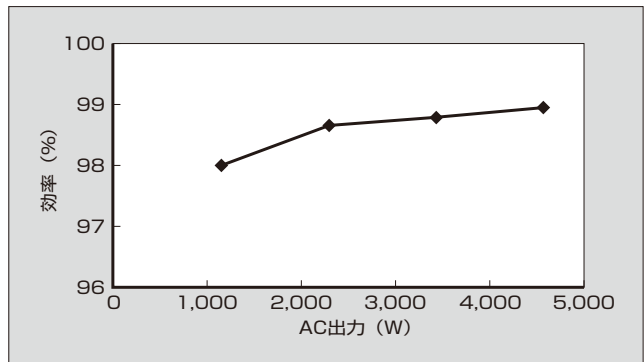


図8 太陽光PCSの効率

4 All-SiCモジュールの大容量化

All-SiCモジュールの今後の製品戦略として、大容量化が挙げられる。チップサイズを大きくすることで大容量化が図れるが、SiC基板の欠陥密度が依然高く、チップ面積を大きくすると歩留りが低下するという問題がある。そこで、チップを大型化せずにチップを並列に接続することで1モジュール当たりの出力を上げている。いっそうの大容量化を行うためには、チップを並列に接続したモジュールをさらに並列に接続する。その際、モジュールを接続するブスバーなども考慮して低インダクタンスにする設計が重要である。

モジュールを並列に接続し大容量化した場合のスイッチング評価を実施した。All-SiCモジュールは1,200V/100Aモジュールを4台並列に接続することにより、1,200V/400Aモジュールを構成している。評価条件は、 V_{ds} が600V、 I_a が400A、 V_g が+15/-5V、 R_g が9.7Ωである。大容量モジュールでは、出力が大きいためターンオフサージ電圧が容易に素子耐圧を超え、破壊してしまうという問題がある。開発を進めている大容量モジュールでは、All-SiCモジュールが持つ低インダクタンス性を損な

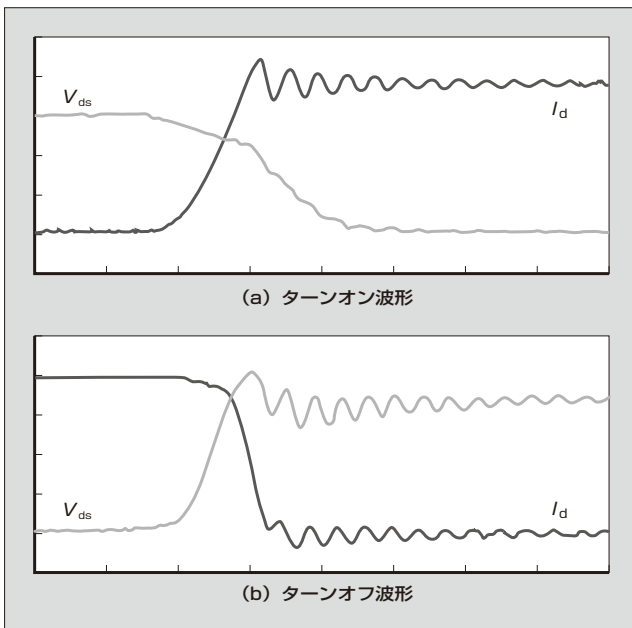


図9 大容量モジュールのスイッチング波形

わないようにブスバーでモジュールを並列に接続することで、この問題を解決している。図9に大容量モジュールのスイッチング波形を示す。ターンオン波形とターンオフ波形において、発振や過大サージ電圧などといった不具合は認められない。All-SiC モジュールを4台並列に接続した場合でも、スイッチングが可能であることを実証した。

5 All-SiC モジュールの信頼性

All-SiC モジュールにおいてパワーサイクル試験やヒートサイクル試験、高温高湿逆バイアス試験などを行い、従来のSiモジュール製品以上の信頼性があることを確認した。

パワーサイクル試験では、 T_{jmax} が 200°C ($\Delta T_j=175^{\circ}\text{C}$) の場合、新構造は従来構造より10倍以上の⁽³⁾パワーサイクル耐量があることが分かった。

次に、高温高湿逆バイアス試験について述べる。新構造は樹脂でモールドしている構造であり、高湿環境下において樹脂が水分を吸収し、モジュール内部へ侵入する。この結果、耐圧・ゲート構造の故障が懸念されるため、高温高湿環境における信頼性の確認が不可欠である。

図10に高温高湿逆バイアス試験結果(漏れ電流)を示す。温度 85°C 、相対湿度 85% の高温高湿環境下において逆バイアス電圧 960V およびゲート電圧 V_g に 0V を印加し、累積 $3,000$ 時間まで継続した信頼性試験の結果である。 $3,000$ 時間とは、高温高湿環境負荷試験において、富士電機の基準の3倍まで確認したものである。任意時間においてサンプル ($N=5$) を取り出し、逆バイアス電圧 V_{ds} に $1,200\text{V}$ を印加したときの漏れ電流 I_{DSS} を評価し、特性異常の有無を確認している。 $3,000$ 時間という長時間にわたって逆バイアスを印加した状態で高温高湿環境に放置しても、漏れ電流の増大は確認されず初期値と同等であるこ

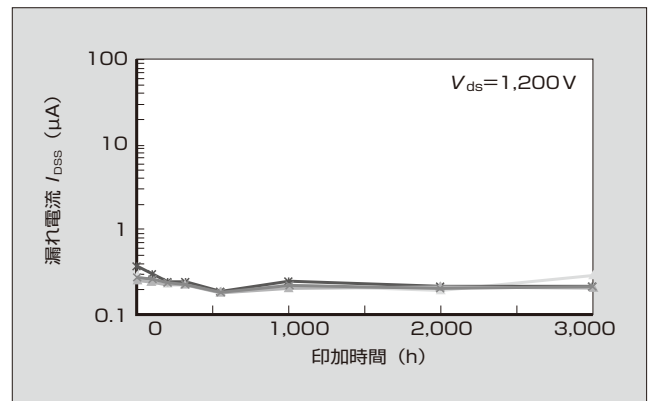


図10 高温高湿逆バイアス試験結果(漏れ電流)

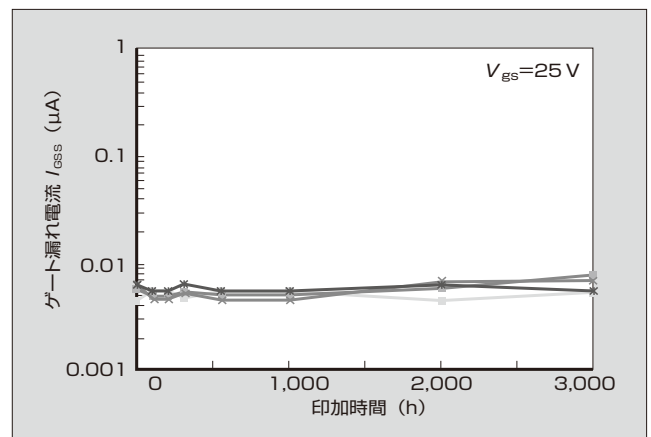


図11 高温高湿逆バイアス試験結果(ゲート漏れ電流)

とが分かる。

同様の信頼性試験におけるゲート漏れ電流 I_{GSS} の推移を図11に示す。 I_{GSS} の評価条件は、 V_{gs} が $+25\text{V}$ 印加時のゲート漏れ電流である。 I_{GSS} の評価においても顕著な増加が見られず安定していることから、高温高湿環境におけるゲート構造の劣化も認められない。結果として、All-SiCモジュールに適用される樹脂または内部構造は、高湿下において従来製品と同等以上の十分な信頼性を持っているといえる。

6 あとがき

高耐圧、低損失、高周波動作および高温動作を実現するSiCデバイスの特徴を最大限発揮させ、高信頼性を備えたAll-SiCモジュールの開発を進めている。このAll-SiCモジュールを適用することにより太陽光発電向けパワーコンディショナの小型化・高効率化が可能となる。特に高周波動作において、小型化の特徴を発揮できる。今後も、大容量化などを通じて他のアプリケーションへの適用範囲を広げ、SiCデバイスの性能を最大限に活用することでパワーエレクトロニクス技術の発展に貢献する所存である。

参考文献

- (1) Prof. B. Jayant Baliga. "The Role of Power Semiconductor

Devices in Creating a Sustainable Society”. Plenary Session
APEC 2013.

- (2) 松本康ほか. SiCデバイス搭載のパワーエレクトロニクス機器. 富士時報. 2012, vol.85, no.3, p.255-259.
- (3) 梨子田典弘ほか. SiCパワーモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.403-407.



仲野 逸人

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。



日向 裕一郎

パワー半導体デバイス用パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。



堀尾 真史

パワー半導体パッケージング構造の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。電気学会会員。



175℃連続動作を保証する IGBT モジュールのパッケージ技術

New Assembly Technologies for $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ Continuous Operation Guaranty of IGBT Module

百瀬 文彦 MOMOSE Fumihiko

齊藤 隆 SAITO Takashi

西村 芳孝 NISHIMURA Yoshitaka

インバータの小型化とコストダウンの要求に応えるため、IGBT モジュールには従来に増して高パワー密度化が求められている。富士電機は、アルミニウムワイヤ、はんだおよび表面電極保護膜を新たに開発して、IGBT モジュールの連続動作温度を従来の 150℃ から 175℃ へ向上させることで高パワー密度化を実現した。パワーサイクル寿命は、全ての温度領域で従来に比べ 2 倍以上を達成した。これにより汎用インバータの最大出力を約 20% 向上させることが期待できる。

In order to meet the needs for miniaturization and cost reduction of inverters, IGBT modules are required to offer higher power density than ever. Fuji Electric has developed a new aluminum wire, solder alloy and surface electrode protection layer to improve the continuous operating temperature of an IGBT module from the conventional 150°C to 175°C, thereby realizing higher power density. A power cycle life-time has been more than doubled compared with the conventional products in all temperature ranges, and thus 20% improvement of inverter maximum output can be expected.

1 まえがき

省エネルギー（省エネ）に大きく寄与することから、産業分野で汎用インバータの普及と需要が拡大している。汎用インバータにおいては省エネ化と小型化だけでなく、システム開発も含めたトータルコストダウンが市場要求として強い⁽¹⁾。

富士電機は、これらの市場要求に応えるため、汎用インバータに搭載される IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの主要構成要素である IGBT チップの損失改善と小型化を進めてきた。IGBT モジュール「V シリーズ」は、「U シリーズ」から動作温度を 25℃ 上昇させ、150℃ での連続動作を保証することで IGBT モジュールの高パワー密度化を行い、インバータシステム全体の小型化およびコストダウンに大きく貢献してきた。図 1 に、定格 (1,200 V/50 A) における IGBT モジュールのチップ面積のトレンドを示す。IGBT チップの損失改善は限界に近づいており、IGBT モジュールのさらなる小型化、高パワー密度化を実現するために、動作温度の上限を

さらに引き上げる検討を行った。動作温度の上限を従来の 150℃ から 175℃ に上げた場合、試算上では汎用インバータ出力は約 20% の向上が可能である。本稿では、175℃ 連続動作で高信頼性を実現する IGBT モジュールのパッケージ技術について述べる。

2 175℃連続動作を保証するための技術的課題

175℃ での連続動作を保証する上で、パワーサイクル寿命は重要な要素の一つである。最高使用温度が従来の 150℃ から 25℃ 上昇するため、構成材料にかかる熱応力が従来よりも増大する。同時に、運転、停止による温度変化も大きくなり、従来よりも高い熱疲労に対する耐性を保証する必要がある。

最高使用温度 T_{jmax} を固定した場合で、累積故障率が 1% における従来モジュールのパワーサイクル寿命を図 2 に示す。 T_{jmax} を 150℃ から 175℃ に上げると、寿命は約 30 ~

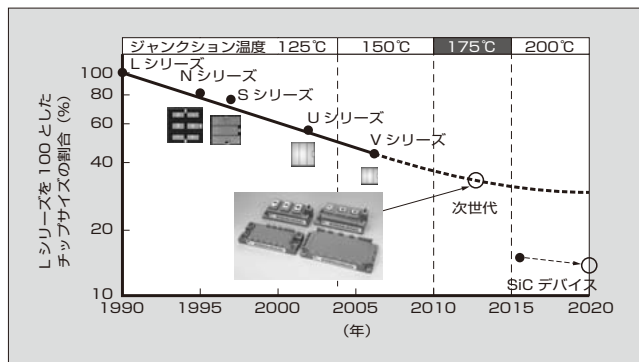


図 1 IGBT チップ面積のトレンド (1,200 V/50 A)

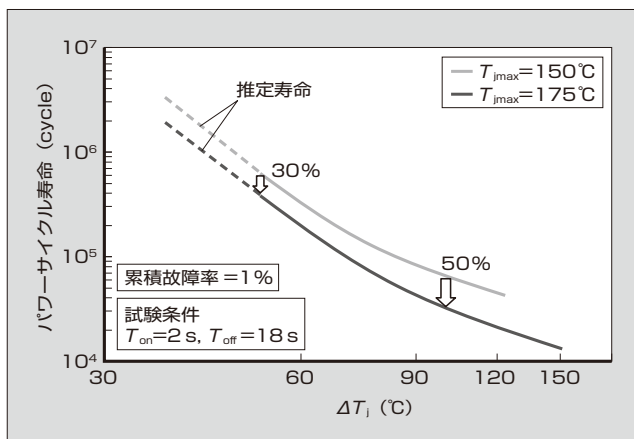


図 2 従来構造におけるパワーサイクル寿命

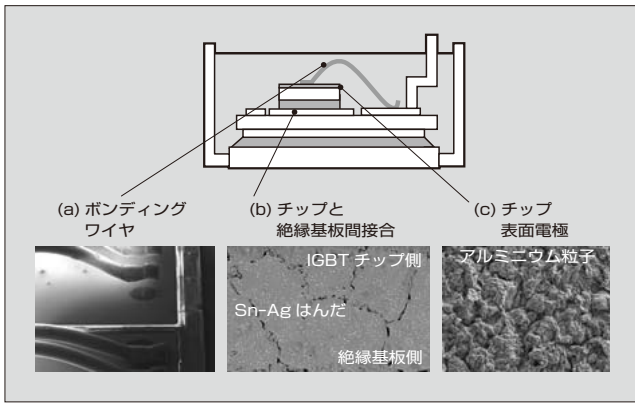


図3 パワーサイクル試験後 ($T_{\text{max}}=175^\circ\text{C}$) の破壊箇所

50% 低下してしまう。そのため、最高使用温度を 175°C に上げて、従来の 150°C と同等のパワーサイクル寿命を確保する高信頼性パッケージを実現することが必要不可欠となる。

一般的にパワーサイクル試験における IGBT モジュールの破壊は、温度変化によって線膨張係数の異なる構成材料間に繰返し応力が発生し、これによって起こる疲労破壊であると考えられている^{(2),(3)}。 175°C 連続動作時では、この繰返し応力に加えて、 25°C 上昇分の構成材料における金属組織の変化の影響を考慮しなくてはならない。考慮すべき構成材料には、はんだとアルミニウムがある。これらの観点から、 175°C 連続動作時のパワーサイクル試験における破壊箇所について観察を行った。

図3にパワーサイクル試験後 ($T_{\text{max}}=175^\circ\text{C}$) の破壊箇所を示す。主な破壊機構としては次の三つがある。

(a) ボンディングワイヤ

アルミニウムワイヤと Si チップとの線膨張係数差によって発生するせん断応力により、アルミニウムワイヤの母材中にクラックが進行し、最終的にアルミニウムワイヤが剥離する。

(b) チップと絶縁基板間接合

チップと絶縁基板間のはんだの金属組織の変化と熱疲労によってはんだ接合部にクラックが進行する。

(c) チップ表面電極

チップ表面電極におけるアルミニウムの結晶粒の粗大化と、Si との線膨張係数差によりクラックが発生する。

175°C 連続動作を確保するためには、これら三つの破壊機構における材料寿命をそれぞれ改善する必要がある。

③ 高信頼性を達成する新接合技術

3.1 新アルミニウムワイヤ

図4にパワーサイクル試験 ($T_{\text{max}}=175^\circ\text{C}$, $\Delta T_j=75^\circ\text{C}$) 後のアルミニウムワイヤ接合部の断面を示す。アルミニウムワイヤ接合部は、アルミニウムワイヤの母材中にクラックが進行したことで、破壊に至っている。このことから、アルミニウムワイヤの母材強度が寿命を支配していると推測できる。

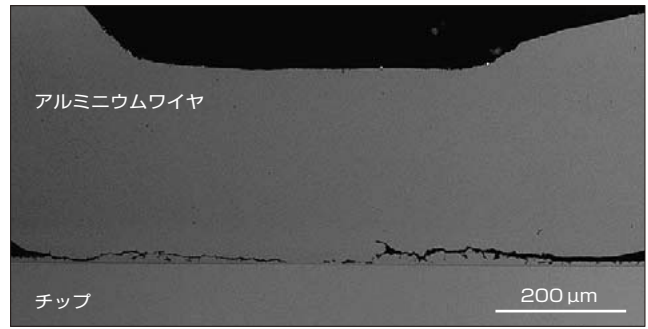


図4 パワーサイクル試験後のワイヤ断面

T_{max} が 175°C のパワーサイクル試験では、アルミニウムの再結晶温度領域内であるため、アルミニウムワイヤの結晶粒は成長して粗大化すると考えられる。

金属の結晶粒径と強度の関係は、次に示す Hall-Petch 式で表される⁽⁴⁾。

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \dots\dots\dots (1)$$

σ_y : 降伏応力
 d : 金属の平均粒径

σ_0, k : 材料によって決まる定数

Hall-Petch 式は、金属結晶粒の成長は強度を低下させることを示している。そこで、富士電機では 175°C よりも高い再結晶温度を持つ新アルミニウムワイヤを開発した。図5に、パワーサイクル試験 ($T_{\text{max}}=175^\circ\text{C}$) 前後のアルミニウムワイヤの断面を示す。EBSD (Electron Back Scatter Diffraction) により断面を観察したものである。従来のアルミニウムワイヤの結晶粒はパワーサイクル試験後に成長が認められたが、新アルミニウムワイヤの結晶粒は変化していない。つまり、パワーサイクル試験でアルミニウムワイヤの母材の強度低下が起こっていないと推定できる。

3.2 新はんだ

175°C 連続動作においては、熱および熱応力によるチップ-基板間のはんだ接合部の劣化が加速される懸念がある⁽⁵⁾。そこで、微細組織の考察に基づき、高温環境に対するはん

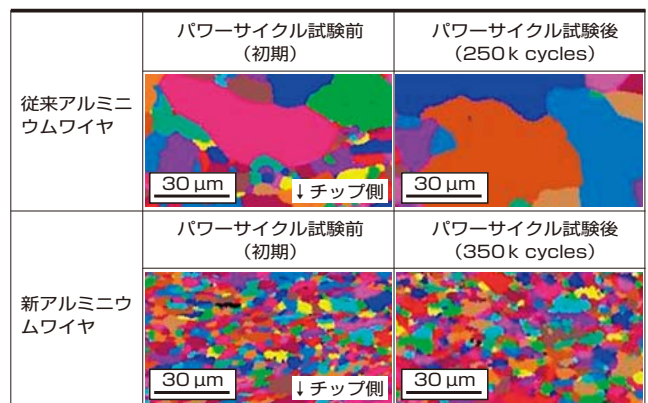


図5 パワーサイクル試験 ($T_{\text{max}}=175^\circ\text{C}$) 前後のアルミニウムワイヤの断面

だ材の強化を検討した。

金属を添加元素により強化する方法として、析出強化型と固溶強化型が挙げられる。⁽⁶⁾ 図 6 に、熱時効前後のはんだ組織の模式図を示す。各強化方法における金属の微細な組織変化を示している。析出強化型の例としては、Sn-Ag はんだが挙げられる。Sn-Ag はんだでは、 Ag_3Sn の微細な金属間化合物が Sn 粒界に析出し、粒界を強化することでクラックの進行を防いでいる。しかし高温下においては、Sn 粒の粗大化および Ag_3Sn の凝集により粒界クラックが発生する。一方、Sn に Sb や In を固溶限度内で添加したはんだは固溶強化型となる。Sb や In などの元素は Sn 粒内に固溶し、高温下での Sn 粒粗大化を抑制する。

図 7 に高温放置試験後のはんだの引張強度の変化を示す。150℃および175℃で1,000時間放置した後に、Sn-Ag はんだは初期に比べて強度が大きく低下するのに対し、Sn-Sb はんだは初期強度を維持している。また、これらのはんだがパワーサイクル寿命に与える効果を比較するため、Sn-Ag はんだおよび Sn-Sb はんだを用いたサンプルでパワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175℃$) を実施した。Sn-Sb はんだは、Sn-Ag はんだに比べてパワーサイクル寿命が向上することを確認した。さらに、Sb を固溶限度以上に添加すると、溶け残った Sb が SnSb 合金として析

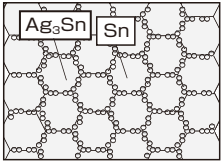
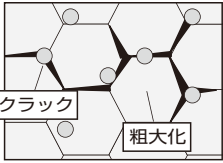
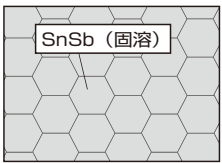
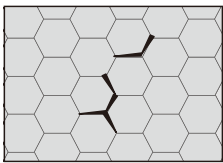
	初期 (熱時効前)	信頼性試験後 (熱時効後)
析出強化型		
固溶強化型		

図 6 熱時効前後のはんだ組織の模式図

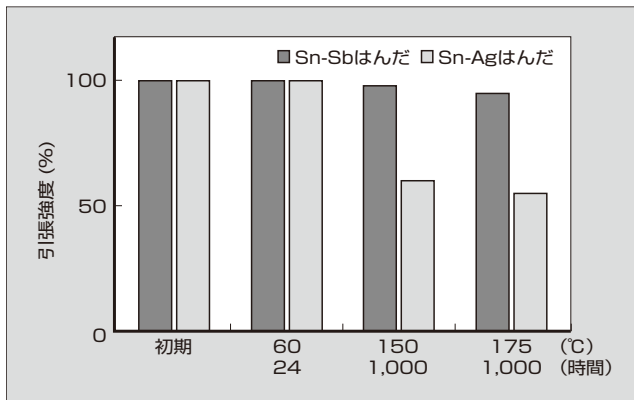


図 7 高温放置試験後のはんだ引張強度の変化

〈注〉時効：時間の経過に伴い金属の性質（例えば、硬さなど）が変化する現象をいう。

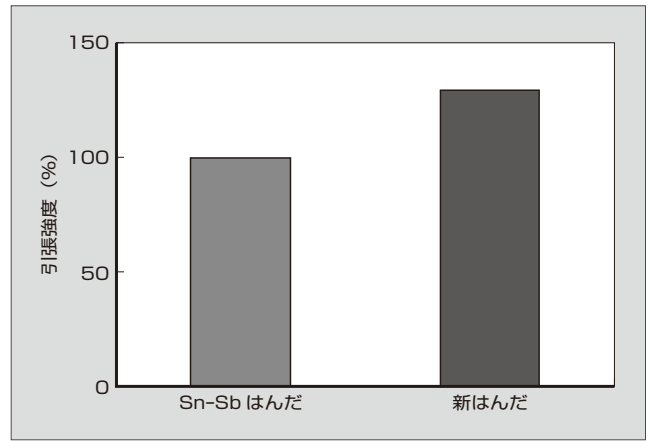


図 8 Sn-Sb はんだと新はんだの引張強度

出し、固溶強化と析出強化を兼ね備えたはんだとなる。⁽⁷⁾

この性質を生かして、富士電機では次世代 IGBT モジュールの量産化に向け、Sn-Sb に新元素を加えた固溶強化と析出強化を兼ね備えた新はんだを開発した。図 8 に Sn-Sb はんだと新はんだの引張強度を比較した結果を示す。新はんだは Sn-Sb はんだよりも高い引張強度を持ち、新はんだを用いたパワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175℃$) でのパワーサイクル寿命は Sn-Sb はんだに対し高寿命となることを確認した。

3.3 表面電極の新保護膜

従来、Si チップの表面電極は純アルミニウムまたは Si や Cuなどを添加したアルミニウム合金が用いられる。パワーサイクル試験におけるチップの表面電極は、チップの発熱によるアルミニウム結晶粒の粗大化および Si チップとの線膨張係数差により、チップ表面電極に応力が加わり、アルミニウムワイヤ接合部以外の、表面電極内にクラックが進展する⁽⁸⁾。この現象を防ぐために、チップの表面電極に発生する応力を低減し、アルミニウムよりも Si に近い線膨張係数を持つ Ni をアルミニウム電極上に成膜した構造を開発した。図 9 に、パワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175℃$) 後のアルミニウムワイヤボンディングをしていない表面のチップ表面電極の観察結果を示す。Ni をアルミニウム電極表面に成膜し、保護膜とすることで劣化を抑制することが可能である。

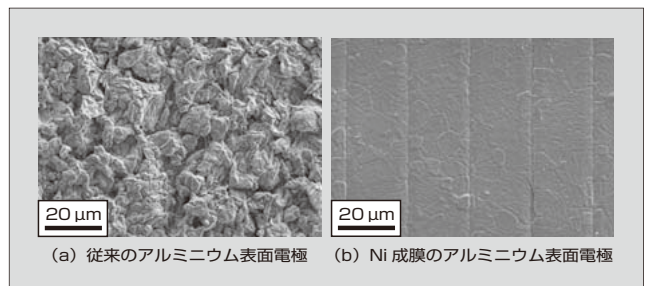
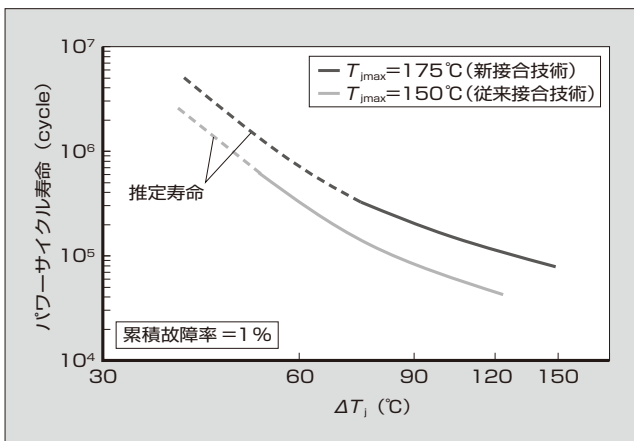


図 9 パワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175℃$) 後の表面電極

図10 パワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$) 結果

4 新接合技術適用の効果

3章で述べた三つの新接合技術を適用したサンプルを製作し、パワーサイクル試験を実施した。

図10にパワーサイクル試験 ($T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$) 結果を示す。新接合技術を適用したパワーサイクル寿命 ($T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$) は、目標とした従来接合技術によるパワーサイクル寿命 ($T_{jmax}=150^{\circ}\text{C}$) を大きく上回り、全ての温度領域で2倍以上の寿命を達成した。

5 あとがき

175℃連続動作で高信頼性を達成する IGBT モジュールのパッケージ技術について述べた。高耐熱性を持つ新アルミニウムワイヤ、高温で高強度を持つ新はんだ合金、ならびに高温で高強度を持ち Si とアルミニウムワイヤ間の熱応力が低い新表面電極保護膜の三つの新接合技術により、175℃連続動作を保証し、かつ従来よりも高寿命の IGBT モジュールを開発した。

これらの技術は現状の富士電機のプロセスをそのまま使用できるため、175℃連続動作を保証する製品の量産が容易に可能である。さらなる高パワー密度化により汎用インバータの最大出力を向上させることが期待できる。今後も、175℃連続動作を保証する IGBT モジュールの開発、系列化を進め、産業機器の高効率化、省エネルギー化に貢献し

ていく所存である。

参考文献

- (1) 酒井利明ほか. 汎用インバータとサーボシステムの最新技術. 富士時報. 2009, vol.82, no.2, p.133-139.
- (2) Morozumi, A. et al. 'Reliability of power cycling for IGBT power semiconductor modules' Proceedings IEEE, 36th Industry Applications Conference vol.3, p.1912-1918, 2001.
- (3) 山口浩二ほか. 車載用半導体製品の品質・信頼性の作り込み. 富士時報. 2011, vol.84, no.2, p.127-131.
- (4) N. J. Petch, J. Iron Steel Inst., 174, Part I. 1953, p.25-28.
- (5) 日本金属学会編. 金属便覧 改訂4版. 丸善株式会社. 1982, p.511.
- (6) 西川精一. 金属工学入門. アグネ技術センター. 1985, p.225-232.
- (7) Morozumi, A. et al. Direct Liquid Cooling Module with High Reliability Solder Joining Technology for Automotive Applications, Proceedings of the 25th ISPSD & ICs, Kanazawa, May 26-30, 2013.
- (8) Ikeda, Y. et al. 'A study of the bonding wire reliability on the chip surface electrode in IGBT' Proceedings of The 22nd International Symposium on ISPSD, Hiroshima 2010.



百瀬 文彦

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。日本機械学会会員。



齊藤 隆

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。表面処理技術協会会員。



西村 芳孝

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部マネージャー。工学博士。日本材料学会会員、エレクトロニクス実装学会会員。



3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュール

High-Power IGBT Modules for 3-Level Power Converters

陳 士爽清 CHEN Shuangqing

小川 省吾 OGAWA Syogo

磯 亜紀良 ISO Akira

近年、再生可能エネルギーが注目され、特に太陽光発電や風力発電の市場が急速に伸びている。これらの分野では大容量電力変換装置を実現するため、複数の小・中容量 IGBT モジュールを並列に接続して使用することが多いが、配線インダクタンスによる高いサージ電圧の発生などの課題がある。富士電機は、素子を 1 パッケージ化した 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールを開発している。モジュール内部の主端子ブスバーをラミネート構造とし、内部インダクタンスの低減を達成している。これにより、電力変換効率の向上と装置の小型化が期待できる。

Recently, renewable energy has been attracting attention and, photovoltaic and wind power generation markets are growing rapidly in particular. In these fields, low- and medium-power IGBT modules are often connected in parallel to realize high power converters; but this will cause high surge voltage due to wiring inductance. Fuji Electric is developing one package for high-power IGBT modules for 3-level power converters. Improvement for power conversion efficiency and miniaturization of equipment can be expected. It has also realized a laminated structure for the main terminal bus bar to reduced internal inductance.

1 まえがき

近年、温暖化防止やエネルギー資源の有効活用のため、再生可能エネルギーがますます重要となってきた。温室効果ガス (CO₂) の発生を抑えつつ電力を供給する太陽光発電や風力発電の市場が急速に伸びている。電力エネルギーの効率的な利用を可能にするパワーエレクトロニクス技術は、発電時の CO₂ 排出量の抑制や再生可能エネルギーの利用拡大につながる。

富士電機は、太陽光発電や風力発電などの大容量電力変換装置用に 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールを開発している。本稿では、その特徴と特性について述べる。

2 3 レベル電力変換方式

電力エネルギーの変換には 2 レベル電力変換方式が多く使われているが、これよりも変換効率を上げる方法として 3 レベル電力変換方式^(注1)がある。この方式は、中性点を持つことで、2 レベル電力変換方式の半分の電圧でスイッチングすることにより、出力側の高調波の低減、発生損失の低減、装置の小型化などのメリットがある。3 レベル電力変換方式には 2 種類あり、スイッチング素子が直列につながっている NPC (Neutral-Point-Clamped⁽¹⁾) 方式と、中間双方向スイッチングを使用する AT (Advanced T-type)⁽²⁾-NPC 方式とがある。

富士電機は、太陽光発電用機器や無停電電源装置 (UPS: Uninterruptible Power Supplies) に適用するため、3 レベルモジュールの開発に力に注いでいる。これまで、

小・中容量の AT-NPC IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュール^{(2)~(4)}をラインアップし、機器の高効率化に貢献してきた。

太陽光発電 (メガソーラー) や UPS を大容量にするためには、複数の小・中容量 IGBT モジュールを並列に接続して使用することが多い。しかし、IGBT モジュールの並列使用はモジュール間や、モジュールと主回路間の配線インダクタンスによる高いサージ電圧の発生などの課題がある。また、IGBT モジュールの並列使用で、冷却フィン面積が大きくなる傾向もある。このような課題を解決するため、大容量 IGBT モジュールが市場から期待されている。

3 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールの特徴と電気特性

3.1 特徴

3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールは、AT-NPC 方式または NPC 方式の変換回路とサーミスタを 1



図1 3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュール

〈注1〉 3 レベル電力変換方式: 277 ページ「解説1」参照

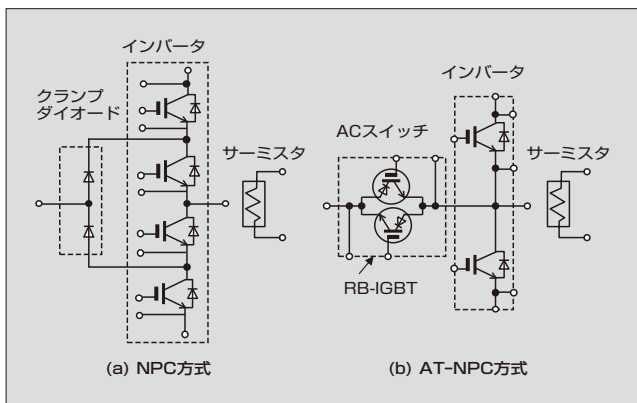


図2 IGBTモジュールの等価回路

パッケージ化した大容量 IGBT モジュールである。図1に IGBT モジュールの外観を、図2に等価回路を示す。

スイッチング素子の最大定格は AT-NPC 方式で 1,200 V/900 A、NPC 方式で 1,200 V/600 A であり、「V シリーズ」チップと RB (Reverse Blocking) -IGBT チップを使用している。また、電磁相互誘導作用を利用し、IGBT モジュールの内部インダクタンスを低く抑えている。

小・中容量の IGBT モジュールを並列接続で使用する場合に比べて、この IGBT モジュールは次のメリットがある。

- (a) 1パッケージ化により、内部インダクタンスが小さくなる。
- (b) IGBT モジュールの実装面積が省スペースで、冷却フィンの面積が小さくなるので、装置の小型化が期待できる。

IGBT モジュールは、AT-NPC 方式と NPC 方式が同じ外観になるように開発を進めている。AT-NPC 方式の IGBT モジュールは、インバータ部の耐圧が2レベルと同様で、かつ電流を通過する素子数が NPC 方式より少ないので、導通損失が抑えられる。一方、NPC 方式の IGBT モジュールのスイッチング素子は直列につながれているので、素子の耐圧が2レベルの半分になり、高圧分野に向いている。それぞれの IGBT モジュールに共通した特徴を次に示す。

- (a) スwitching電圧が2レベル電力変換回路の場合の半分になるので、変換器のスイッチング損失が低減できる。
- (b) スwitching波形が階段状になるので、2レベル電力変換回路に比べて高調波の低減ができ、フィルタが小さくなるため装置の小型化が可能である。

3.2 IGBT モジュールの電気特性

3レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールの概要を表1に示す。DC バス電圧 1,000 V 向けの AT-NPC 方式の IGBT モジュールには3種類の定格電流がある。一方、DC バス電圧 1,500 V 向けに NPC 方式の IGBT モジュールの開発も進めている。

使用しているチップの特徴を次に示す。

- (1) AT-NPC 方式の IGBT モジュールのインバータ部と

表1 IGBTモジュールの概要

方式	型式	パッケージ寸法	定格電圧	定格電流
AT-NPC	4MBI450VB-120R1-50	L250×W89×H38(mm)	インバータ部 1,200 V ACスイッチ部 900 V	450 A
	4MBI650VB-120R1-50	L250×W89×H38(mm)	インバータ部 1,200 V ACスイッチ部 900 V	650 A
NPC	4MBI900VB-120R1-50	L250×W89×H38(mm)	インバータ部 1,200 V ACスイッチ部 900 V	900 A
	4MBI600VC-120-50	L250×W89×H38(mm)	1,200 V	600 A

NPC 方式の IGBT モジュール

最新の「V シリーズ」IGBT および FWD (Free Wheeling Diode) チップを採用している。

- (a) フィールドストップ (FS) 構造とトレンチゲート構造の最適化によりオン電圧 $V_{CE(sat)}$ とスイッチング損失を低減している。
 - (b) ゲート抵抗 R_g によりターンオン di/dt の制御性を向上している。
- (2) AT-NPC 方式の IGBT モジュールの AC スwitch部
- 富士電機独自の逆耐圧を備えた分離層を持つ RB-IGBT⁽⁶⁾を採用し、双方向スイッチングを可能にした。
 - (a) 逆耐圧性能を持つため、逆並列に RB-IGBT を接続することで双方向スイッチングが可能である。
 - (b) ゲートにしきい値以上の順電圧を印加し、FWD として逆回復動作が可能である。

図3に IGBT チップと RB-IGBT チップの断面構造を示す。RB-IGBT の断面構造は、スクライプ領域においてダイシング面を覆うような深い p^+ 分離層を形成することによって、逆バイアス印加時に空乏層がダイシング面に達す

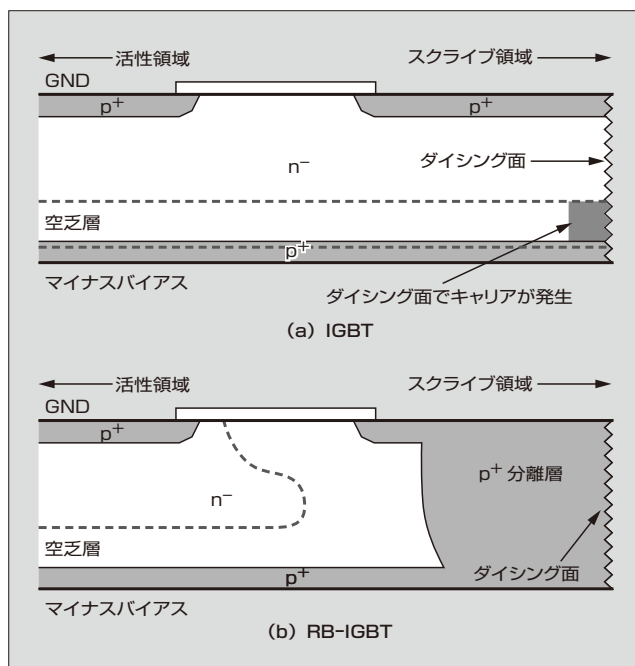


図3 IGBTチップとRB-IGBTチップの断面構造

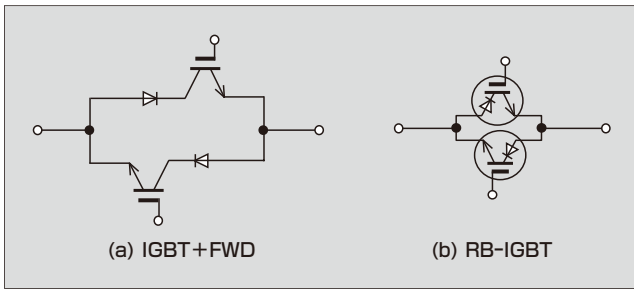


図4 双方向スイッチの構成

るのを阻止することで、逆方向耐圧を確保している。

図4に双方向スイッチの構成を示す。双方向スイッチはRB-IGBT以外にIGBT+FWDの方法もある。しかし、通常のIGBTは逆バイアスが印加された際に電圧を支えるpn接合がダイシング面に接しているため、逆印加するとダイシングによって生じた高密度結晶欠陥により大量のキャリアが発生し耐圧が確保できないので、ダイオードを直列に接続する必要がある。したがって、オン電圧が増加するという問題がある。これに対して、RB-IGBTは逆方向耐圧を持つ構造のため、オン電圧がIGBT+FWDより少ない。オン電圧が少なくなると定常損失が少なくなる。

太陽光発電分野では、DCバス電圧1,000Vが主流になりつつある。3レベル電力変換方式によるインバータでDCバス電圧1,000Vの場合、500Vでスイッチングするので、AT-NPC方式の600V耐圧の中間素子では過電圧の可能性はある。一方、中間素子の耐圧を1,200Vまでに上げると、IGBTモジュールの定格電流が下がり、定常損失も増える。

そこで、富士電機は太陽光発電分野においてDCバス電圧1,000V向けに900V RB-IGBTを開発している。図5に、IGBTモジュールの定格電流が450Aの900V RB-IGBTと1,200V IGBT+FWDのチップ出力特性を示す。900V RB-IGBTのオン電圧は、1,200V IGBT+FWDより30%低減する。

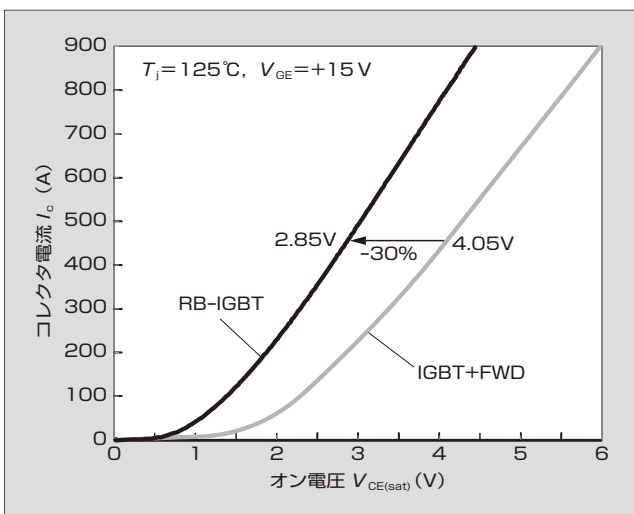


図5 900V RB-IGBTと1,200V IGBT+FWDのチップ出力特性

3.3 スイッチング波形

富士電機のAT-NPC方式のIGBTモジュールには二つのスイッチングモードがある。IGBTがスイッチングしてRB-IGBTが逆回復するAモードと、RB-IGBTがスイッチングしてFWDが逆回復するBモードである。

図6と図7にプロトタイプIGBTモジュール(4MBI650VB-120R1-50)を用いて測定したスイッチング波形を示す。図6は、 V_{CC} が500V、 I_C が650A、 $R_{g(IGBT)}$ が+3.3/-0.56Ω、 T_j が125°CにおけるAモードのスイッチング波形であり、スイッチング損失はターンオンで21.7mJ、ターンオフで85.4mJ、逆回復時で76.4mJである。いずれも良好な波形を示している。

図7は、 V_{CC} が500V、 I_C が650A、 $R_{g(RB-IGBT)}$ が+3.3/-20Ω、 T_j が125°CにおけるBモードのスイッチング波形であり、スイッチング損失はターンオンで31.6mJ、ターンオフで136.8mJ、逆回復時で35.3mJである。いずれも良好

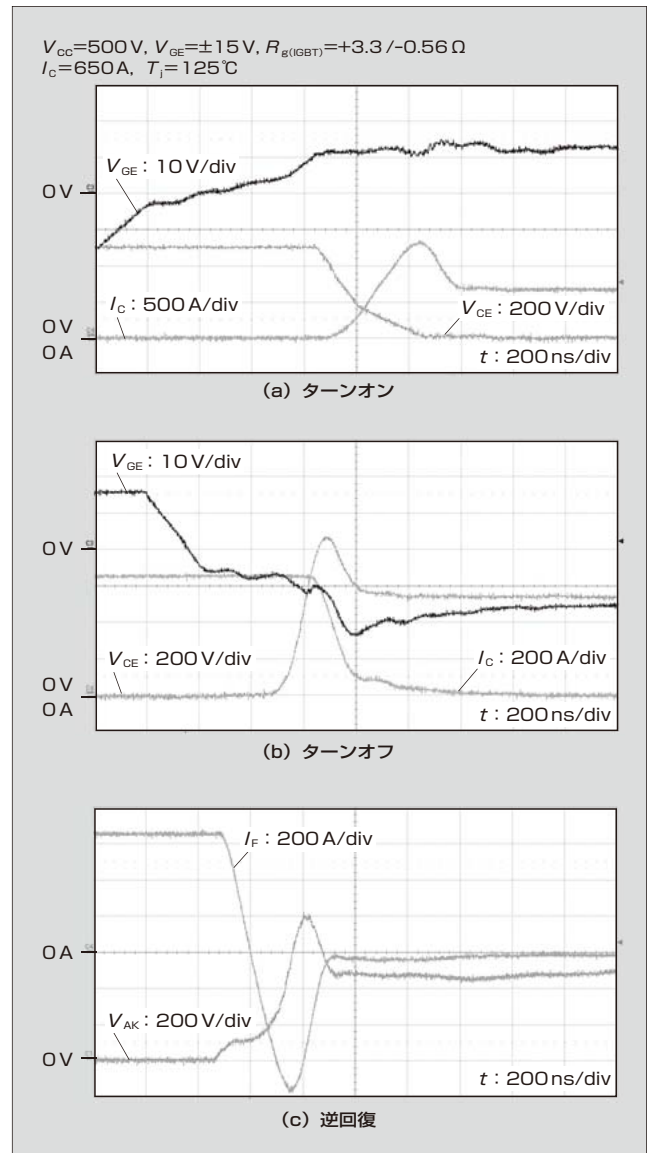


図6 プロトタイプIGBTモジュールのAモードのスイッチング波形

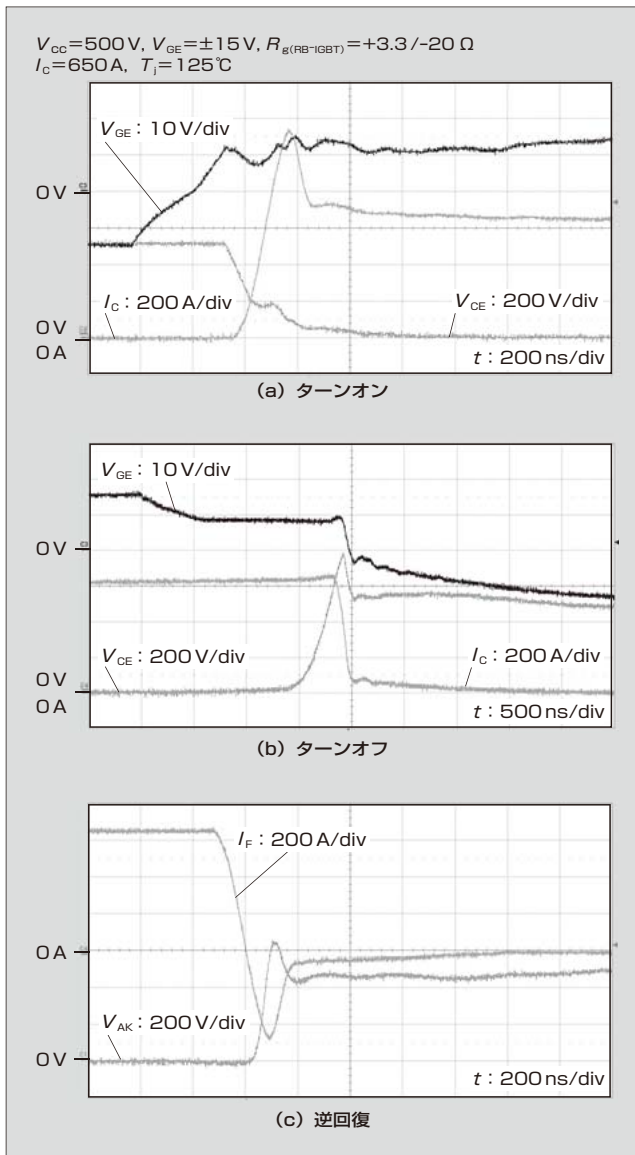


図7 プロトタイプ IGBT モジュールの B モードのスイッチング波形

な波形を示している。

3.4 パッケージ構造

パッケージ構造の特徴を次に示す。

(1) 主端子 P, M, N 配列

サージ電圧を低減するためのスナバコンデンサを配置しやすい配列 (P-M 間, M-N 間) である。

(2) 環境対策

鉛フリーはんだ材を適用し、RoHS 指令^(注2)に適合している。

(3) 高耐圧パッケージ

入力 AC690V に対応したパッケージ構造であり、絶縁耐圧 V_{iso} 保証は AC 4kV/min が可能である。

(4) 超音波接合

本 IGBT モジュールは、超音波接合法による銅端子と銅

<注2> RoHS 指令：電気・電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限についての EU (欧州連合) の指令

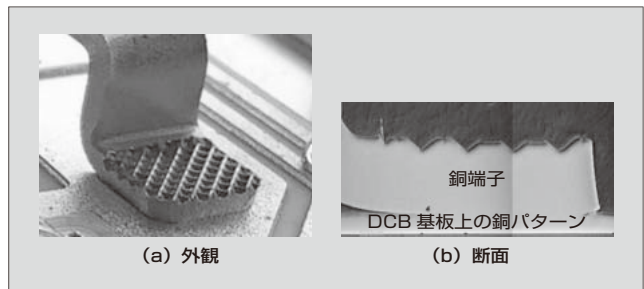


図8 DCB 基板と銅端子の超音波接合

回路パターン¹⁾の直接接合を実施している。これは接合面の熱膨張係数差がないので、高い信頼性を達成することができる。従来のはんだ接合では、温度サイクル試験 (試験条件: -40 から $+150^\circ C$ の繰り返し) で 300 サイクル後、初期に比べて約 50% 引張強度が低下する。これに対して、超音波接合では、引張強度の低下がほとんどみられない。図8に、DCB (Direct Copper Bonding) 基板と銅端子の超音波接合の外観と断面を示す。

(5) 低インダクタンス

P-M 間, M-N 間を並列に配置し、電磁相互誘導作用によって低インダクタンスを実現した。既存の M403 パッケージに対してモジュールの大きさは約 2.36 倍大きくなるが、内部インダクタンスは最大 30nH, 最小 18nH である。電流が流れる経路によっても異なるが、M403 パッケージの 33nH に対して低減を達成している。

4 あとがき

本稿では、富士電機が開発している 3レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュールについて述べた。本 IGBT モジュールは、大容量、低インダクタンス、高信頼性、低損失の特徴を持ち、新エネルギー分野への応用が期待できる。

今後も、さらなるニーズに応えられるように半導体技術およびパッケージ技術のレベルを高め、太陽光発電用機器や UPS などの高効率化に貢献する製品開発を行っていく所存である。

参考文献

(1) Nabae, A. et al. "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter". IEEE Trans. on industrial applications. 1981, vol.1 A-17, no.5, p.518-523.

(2) Komatsu, K. et al. "New IGBT Modules for Advanced Neutral-Point-Clamped 3-Level Power Converters". IPEC '10 proceedings, 2010, p.523-527.

(3) 小松康佑ほか. アドバンストNPC 回路用IGBT モジュール. 富士時報. 2010, vol.83, no.6, p.362-365.

(4) 小松康佑ほか. アドバンストNPC 回路用IGBT モジュールの系列化. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.299-303.

(5) Yatsu, M. et al. "A Study of High Efficiency UPS Using Advances Three-level Topology". PCIM'10 Europe, Proceedings. 2010, p.550-555.

- (6) Wakimoto, H. et al. "600 V Reverse Blocking IGBTs with Low On-state Voltage". PCIM'11 Europe. Proceedings, 2011, p.317-322.



陳 士爽清

IGBT モジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部産業モジュール技術部。



小川 省吾

IGBT モジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部産業モジュール技術部チームリーダー。



磯 亜紀良

IGBT モジュールの構造開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部産業モジュール技術部チームリーダー。

特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体



ハイブリッド自動車用 IPM のパッケージ技術

Packaging Technology of IPMs for Hybrid Vehicles

郷原 広道 GOHARA Hiromichi

荒井 裕久 ARAI Hirohisa

両角 朗 MOROZUMI Akira

ハイブリッド自動車の電力を制御するインテリジェントパワーモジュール (IPM : Intelligent Power Module) は、燃費効率と快適性の要求から小型・軽量化を図る必要がある。富士電機は、この要求に応えるため、二つのインバータと昇降圧コンバータを統合した大容量のハイブリッド自動車用 IPM を開発した。パッケージ技術である放熱設計技術と高強度はんだ技術により、モジュールとアルミニウムヒートシンクを一体化した直接水冷構造を実現した。本製品は、従来の間接冷却構造に比べて製品の体積 30%、質量で 60% の削減と、車両に要求される高信頼性を達成し、量産を開始した。

Intelligent power modules (IPMs) control the power of hybrid vehicles. IPMs are needed to be downsized and lightweight due to the request for fuel efficiency and comfort. To achieve these requirements, Fuji Electric has developed a high-capacity IPM for hybrid vehicle integrated buck-boost converter and two inverters. This time, we have developed cooling design technology and high-strength solder technology, which realize a direct liquid cooling module with an integrated aluminum heat sink. This product has achieved a product volume reduction of 30% and mass reduction of 60% compared with the conventional indirect cooling structures and high reliability required for vehicles. The mass production of the product has already begun.

1 まえがき

地球温暖化防止や資源の有効利用が世界各国共通の取組みとして重要性を増している。自動車業界では、電力を動力源としたハイブリッド自動車 (HEV) や電気自動車 (EV) の開発と普及が加速している。このような状況において富士電機は、2012 年 12 月に HEV 用インテリジェントパワーモジュール (IPM : Intelligent Power Module) の量産を開始した。本製品は、二つのモータを制御するインバータ部と昇降圧コンバータ部を内蔵し、HEV に必要とされる高出力をコンパクトかつ軽量で実現するものである。低損失な第 6 世代 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), FWD (Free Wheeling Diode) を用い、放熱効率の高い直接水冷構造とし、ヒートシンクには軽量のアルミニウムを適用した。さらに、IGBT の保護機能に加えて、高精度昇降圧制御機能や高精度チップ温度通信機能を備えている。

本稿では、製品の概要と、二つの新パッケージ技術について述べる。一つは、直接水冷構造での放熱設計技術であり、もう一つは、熱膨張率の大きいアルミニウムと絶縁基板のはんだ接合を可能とする高強度はんだ技術である。

2 製品の概要

開発した IPM の外観を図 1 に、回路構成を図 2 に示す。従来の IPM では、インバータ部 (PDU : Power Drive Unit) や昇降圧コンバータ部 (VCU : Voltage Control Unit) がおのおの機能別にモジュールを構成し、搭載されることが一般的であった。本製品は、二つのインバータ部と昇降圧コンバータ、およびコントローラ (ゲートドライバ) を統合したオールインワン・パッケージであり、高出

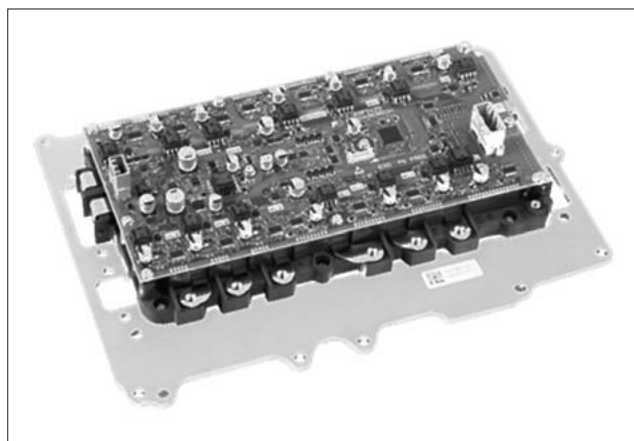


図 1 HEV 用 IPM

力を小型かつ軽量で実現している。

2.1 構造上の特徴

構造上の主な特徴を次に示す。

- (a) 1,200 V/500 A 14 in 1 IPM
- (b) サイズ : L340×W233×H70 (mm) (従来品体積比 30% 減)
- (c) 質量 : 3.6 kg (従来品質量比 60% 減)
- (d) アルミニウム直接水冷構造による高放熱化
- (e) 低損失第 6 世代 IGBT, FWD 搭載

モジュール上にゲートドライブ基板を配置し、2.2 節に示す高機能を実現している。

2.2 機能面の特徴

機能面の主な特徴を次に示す。

- (a) 低圧バッテリーからの各電源生成
IGBT ドライブ電源を含めた 18 出力の絶縁電源を搭

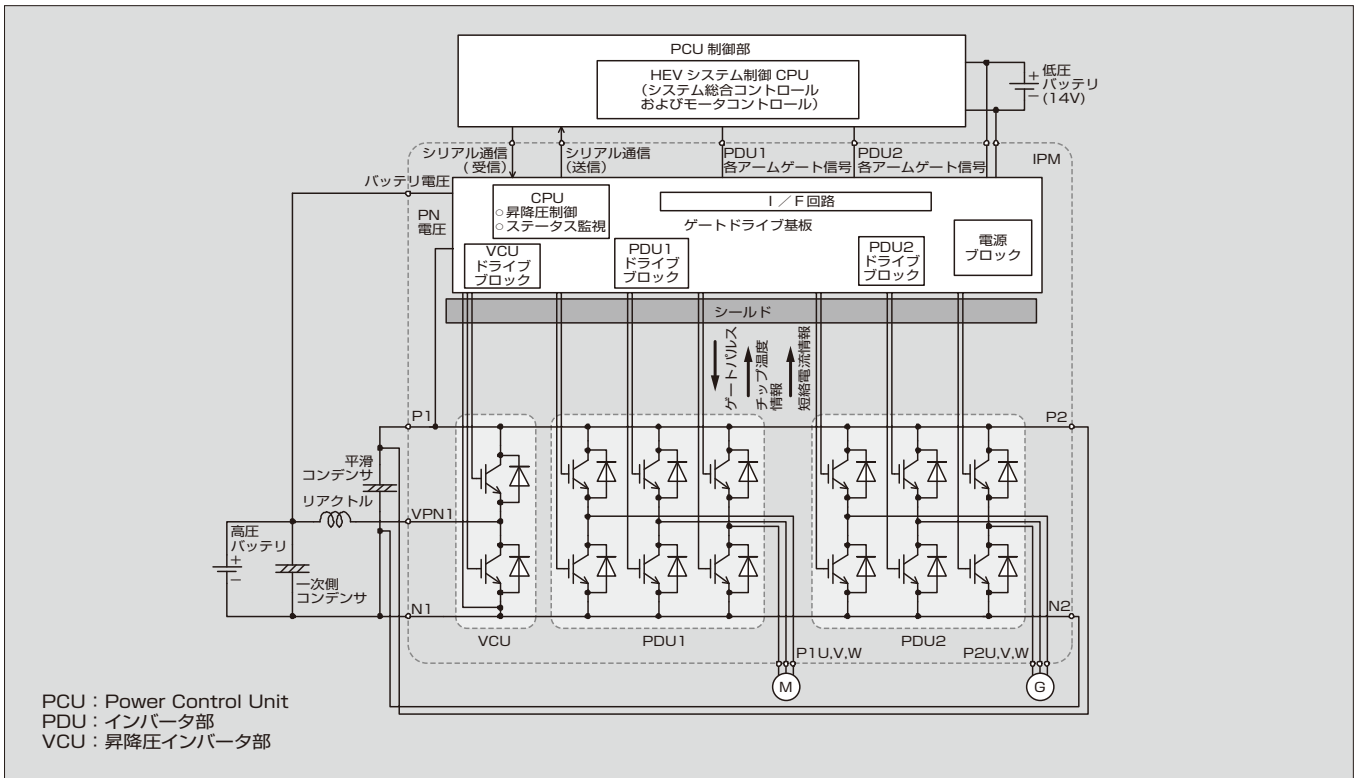


図 2 IPM の回路構成

載している。

- (b) 短絡・過熱・電源電圧低下時の保護機能内蔵
- (c) 高精度 IGBT チップ温度通信

- (d) 搭載 CPU による動作状態の収集とシリアル通信

IPM 動作状態情報・IGBT ドライブ回路からのアラーム情報により、上位と連携して異常状態に対処する。

- (e) 高圧バッテリー高精度電圧計測による昇降圧制御

搭載 CPU により、上位からの指令を受けて高圧バッテリー電圧および PN 電圧を監視し、定電圧制御を行う。電圧計測は、CPU 補正を行うことで高精度を実現している。

本製品は、高出力 HEV の業界最高の燃費効率達成^{〔注 1〕}に貢献している。

3 直接水冷構造の特徴

3.1 アルミニウムヒートシンクによる直接水冷構造

図 3 に IPM のパワーモジュール部の断面構造を示す。

図 3 (a)は、一般的な冷却方式である間接冷却構造である。この構造は、放熱性を重視してベースプレートに銅が使用される。しかし、ベースプレートとヒートシンクの熱的な接合は、熱伝導率が $1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ と低いサーマルグリースを用いていたため、熱抵抗上昇の原因となっていた。このため、周囲温度が高い自動車のエンジンルームの環境では、放熱性能が不足していた。また、銅の比重は大きく、パワーモジュール部の質量の増大につながり、搭載車の燃

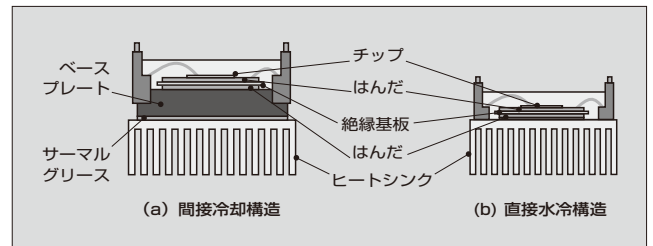


図 3 パワーモジュール部の断面構造

費向上の妨げの一因になっていた。

図 3 (b)は、アルミニウムヒートシンクを用いた直接水冷構造である。この構造は、絶縁基板とアルミニウムヒートシンクをはんだで接合することで、ベースプレートと熱伝導グリースを省き、熱抵抗を 30% 低減した。さらに、ヒートシンクにアルミニウムを適用することで、従来の銅製ヒートシンクの構造と比較して質量は 1/3 になり、車載用冷却水 (LLC) に対する耐食性も確保している。

3.2 アルミニウムヒートシンク採用の技術課題

本製品は、オールインワン・パッケージであり、高集積化によって生じる各 IGBT の熱干渉を防ぐためには、放熱性能の向上が必要である。表 1 に絶縁基板とヒートシンク材料の基礎物性値を示す。アルミニウムは銅に対して熱膨張係数が大きく、1.5 倍になる。このため、アルミニウムヒートシンクと絶縁基板を接合するはんだには、従来以上の応力がかかるため、いっそうの高強度化が必要であった。軽量のアルミニウムヒートシンクを用いた直接水冷構造を実現するための課題は、次の二つである。

〔注 1〕 2013 年 1 月現在、クラス別燃費トップである。

表1 絶縁基板とヒートシンク材料の基礎物性値

	熱伝導率 [W/(m・K)]	熱膨張係数 (ppm/K)	密度 ×10 ⁻⁶ (kg/mm ³)
窒化けい素	90	3.4	3.3
窒化アルミニウム	170	4.6	3.3
銅	393	16.5	9.0
アルミニウム	170	23.5	2.7

- (a) アルミニウムヒートシンクの放熱性能向上
- (b) 熱膨張係数が異なる材料のはんだ付と寿命の確保
これらの課題を解決するため、放熱設計技術の向上と高強度はんだの開発を行った。

4 アルミニウム直接水冷構造の放熱設計技術

4.1 IGBT チップ温度と冷却水温度の関係

水冷構造では、IGBT と FWD の発熱はモジュール部材とヒートシンクを通し、冷却水から放出される。図4に、IGBT チップ温度と冷却水温度の関係を示す。

IGBT チップ温度は冷却水の温度に強く依存し、流量変化に対する影響は小さい。つまり、ヒートシンクを流れる冷却水の流速を上げるよりも冷却水の温度を下げる方が、IGBT チップ温度の低下、すなわち熱抵抗の低減に有効であることが分かる。

4.2 流路設計

IGBT チップ下の冷却水温度が放熱性能に影響することが判明したため、冷却水温度を考慮した流路設計を行った。

図5にヒートシンクと流路構成の例を示す。タイプAは冷却水が冷却部に対して長手方向に流れる構成である。一方、タイプBは短手方向に流れる構成であり、冷却水の流れに対して配置できる素子数はタイプAと比べて少ない。素子数が少ないほど冷却水の温度上昇は小さい。

素子温度をより低下させることができる構成はタイプBであり、このことは、熱流体解析結果とも一致している。タイプBのように冷却部の幅を広げると、冷却体の圧力損失の抑えることができる。冷却部の流速が偏りやすいが、

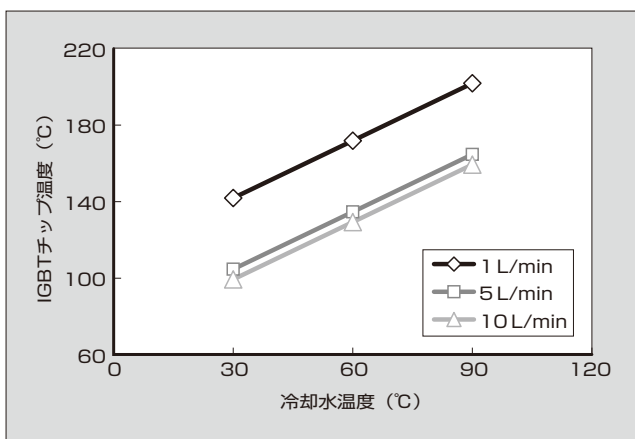


図4 IGBT チップ温度と冷却水温度の関係

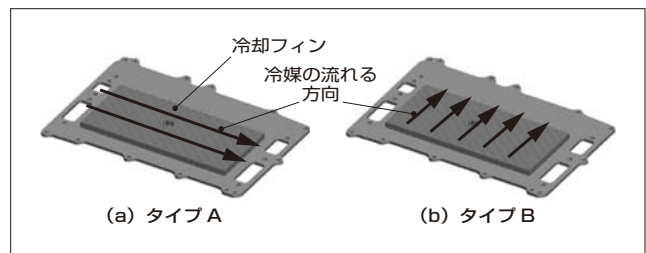


図5 ヒートシンクと流路構成の例

冷却構造の最適化を行ってこれを防いだ。

4.3 流速分布の最適化

放熱性能を改善するためには、冷却水の温度を低く保つだけでなく、流速を高めることで冷却フィンの熱交換性能を向上させることが重要である。本製品は、三つの機能を統合したモジュールであり、機能ごとに最大発熱条件が異なる。そこで、各 IGBT の発熱分布に合わせた冷却水の最適分配を行うことにより、放熱性能の向上を目指した。

図6に、ヒートシンク部を流れる冷却水の流速分布イメージを示す。フィン間を流れる流速を矢印で示している。図6(a)に示す改善前は、入口から遠くなるにつれて通水抵抗が低下し、流速が増加する。また、本製品は PDU2 と VCU に対して PDU1 の発熱密度が高い。発熱密度が高い箇所の冷却水の流速を上げることが必要である。冷却部の流速分布を調整するため、図6(b)に示すように流路内に適宜抵抗体を設けることで、発熱密度に合った流速分布に制御することができた⁽¹⁾。

図7に、最適化前後における IGBT チップ温度の比較を示す。流速分布を最適化することで、各素子の温度を平均化し、素子の目標許容温度以下にすることができた⁽²⁾。

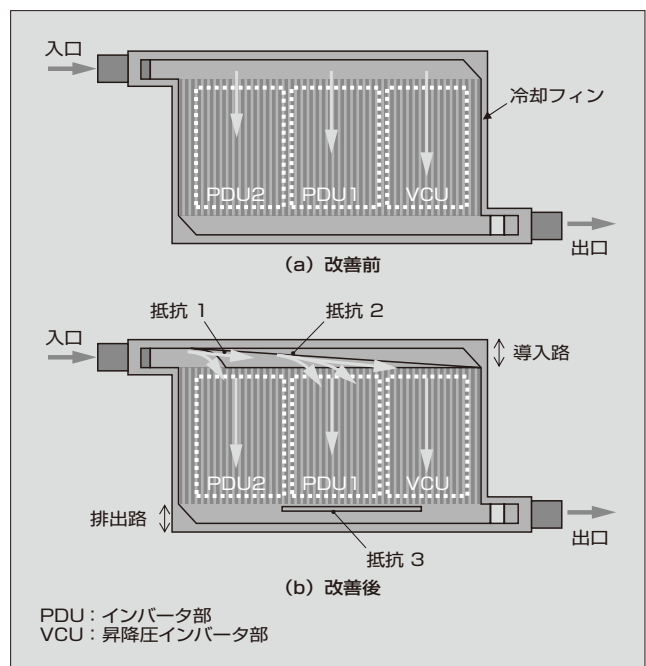


図6 冷却水の流速分布イメージ

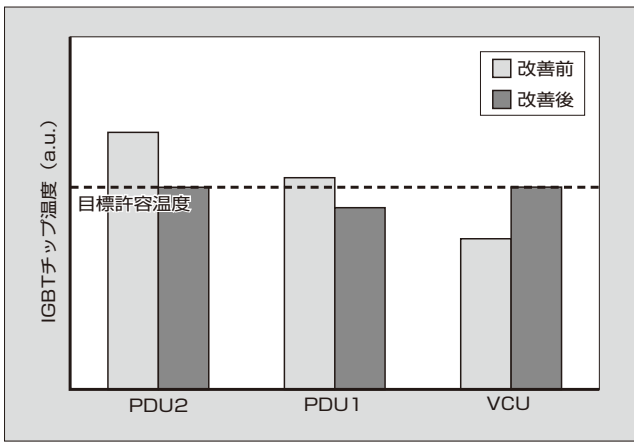


図7 最適化前後のIGBT チップ温度

5 高強度・高信頼性はんだ

ヒートシンク材料を構成するアルミニウムの熱膨張係数は銅の約 1.4 倍の 23.5 ppm/K となり、はんだ接合部にかかる応力は増大する。そこで、車載製品で求められる寿命を確保し、絶縁基板とアルミニウムヒートシンクのはんだ接合を可能にする高強度はんだを開発した。

5.1 開発コンセプト

図 8 に、信頼性試験後のはんだ組織の模式図を示す。金属の強化メカニズムとして、固溶強化および析出強化の高温下での微細組織の変化を示している。従来は単独の強化機構を利用したはんだを適用してきたが、さらなる高信頼化に対応するため、二つの強化機構を兼ね備えた高強度はんだの開発を進めた。

開発に当たり、はんだの母材には一般的に用いられている Sn (すず) を選択し、第 2 元素には機械的特性と耐熱性の向上に有効な材料として実績のある Sb (アンチモン) を選択した。Sn に対する Sb の添加量が、固溶限界以下の添加量では固溶強化の効果が現れることが期待できる。さらに、Sb 添加量を固溶限界以上に増やした場合には、固溶しきれない SnSb 系化合物が析出する。Sb の固溶強化と析出強化の二つの強化が同時に発現することで、粒界

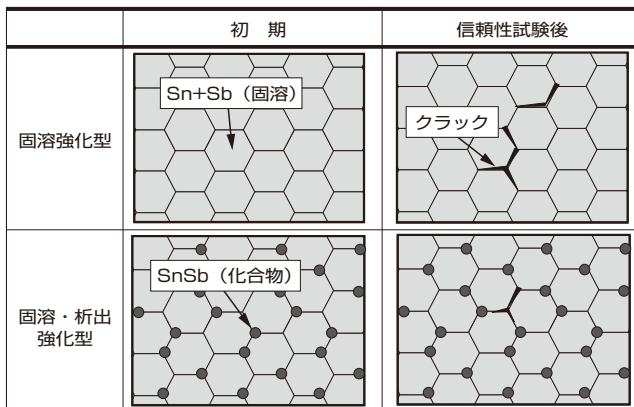


図8 信頼性試験後のはんだ組織の模式図

クラックの抑制が期待できる^{(4), (5)}。この考えに基づき、Sb 添加量ははんだ材料特性に及ぼす影響について検証を行った。

5.2 Sb 添加量のはんだの強度に与える影響

5.1 節で述べた開発コンセプトを実証するため、Sb 添加量の異なるタイプ 1 とタイプ 2 の 2 種類の Sn-Sb はんだについて、強度評価を実施した。タイプ 1 は Sb 添加量を Sn に対する固溶限界以下に調整し、タイプ 2 は Sb 添加量を固溶限界以上に調整した。

図 9 に、タイプ 1 とタイプ 2 のはんだを用いた引張試験の結果を示す。試験は JIS に準拠した試験片を各組成に鋳込成形により成形し室温条件で実施した。この結果から、Sb の添加量を固溶限界以上としたタイプ 2 は、タイプ 1 の 1.5 倍以上の強度があり、析出強化によって高強度化が実現できることを確認した。

次に、タイプ 2 のはんだの耐熱性を評価するため、実際の動作環境を模擬して高温時効後の強度変化を調査した。図 10 に、初期強度に対する高温保存後の引張強度を示す。本調査では、代表的な析出強化型のはんだである Sn-Ag はんだを比較対象とした。

タイプ 2 のはんだは、150℃、175℃ともに 1,000 時間経過後も初期強度を維持している。一方、Sn-Ag はんだ

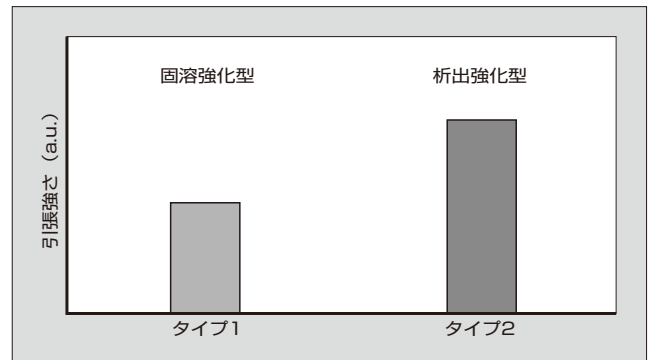


図9 Sn-Sb はんだ引張強度比較

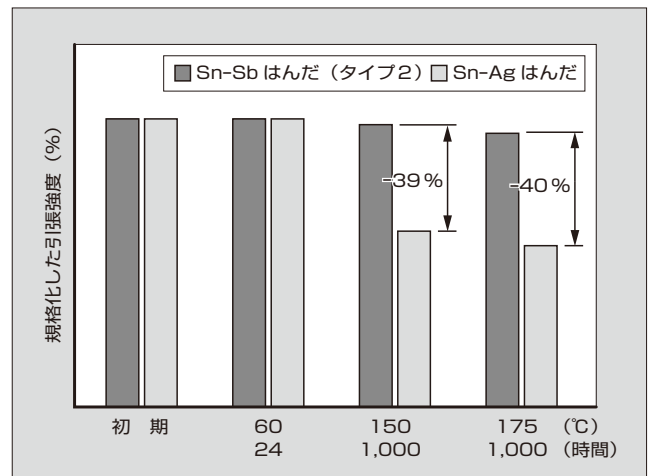


図10 高温保存試験後の引張強度

〈注2〉 時効：時間の経過に伴い金属の性質（例えば、硬さなど）が変化する現象をいう。

では、高温環境下での強度が Sn-Sb はんだ（タイプ 2）に対して約 40% 低下した。

この結果から、固溶強化と析出強化を組み合わせることで、高温動作下でも優れた強度を持ち耐熱性を満足することを確認した。

次にタイプ 2 の Sn-Sb はんだについて信頼性評価を実施した。

5.3 Sn-Sb はんだの信頼性評価

はんだを用いて絶縁基板をアルミニウム板に接合した試料を作製し、温度サイクル寿命評価を実施した。温度サイクルは $-40 \sim +105^{\circ}\text{C}$ の条件で試験を行い、クラック長さは超音波探傷装置（SAT）を用いて撮像し、測定した。

Sn-Sb はんだと Sn-Ag はんだの比較結果として、図 11 に温度サイクル試験において 2,000 サイクル経過後のはんだ接合部の SAT 像を、図 12 に温度サイクル試験における各はんだのクラック長さ増加量を示す。

SAT 像は、クラックが進展している領域を白色で示しており、Sn-Sb はんだを用いた試料はクラック進展が軽微である。一方、Sn-Ag はんだはクラック進展が顕著である。この結果から、Sn-Sb はんだは Sn-Ag はんだよりも耐久性が高いことを確認した。

これらの結果から、開発した Sn-Sb はんだは、熱膨張係数差の大きい絶縁基板とアルミニウムヒートシンクの接

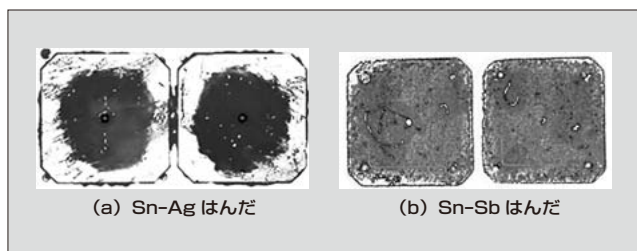


図 11 温度サイクル試験後のはんだ接合部の SAT 像

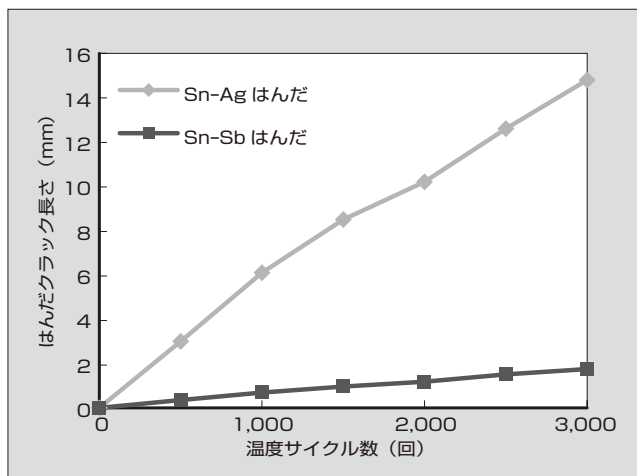


図 12 温度サイクル試験におけるクラック長さ増加量

合でも高い信頼性を確保できることを明らかにした。

6 あとがき

本稿では、ハイブリッド自動車用インテリジェントパワーモジュール（IPM）の概要と、二つのパッケージ技術について述べた。

パッケージ技術は、お客さまのインバータ開発設計を支援するものであり、これらの技術を基にさらなる技術革新を推進し、高効率、省エネルギー化に貢献する製品を提供していく所存である。

参考文献

- (1) Gohara, H. et al. Cooling device for semiconductor module and semiconductor module. Patent Application. PCT/JP2012/072554.
- (2) Saito, K.; Otuka, H. "Development of PCU for a new HEV drive". Proceedings of Japan Society of Automotive Engineers Annual Congress (Spring). Kanagawa, Japan, 2013.
- (3) Nishiura, A. Morozumi, A. "Improved life of IGBT module suitable for electric propulsion system". Proceedings of the 24th EVS, Stavanger, 2009.
- (4) Morozumi, A. et al. "Direct Liquid Cooling Module with High Reliability Solder Joining Technology for Automotive Applications". Proceedings of the 25th ISPSD & ICs, Kanazawa, 2013.
- (5) Saito, T. et al. "New assembly technologies for $T_{jmax}=175^{\circ}\text{C}$ continuous operation guaranty of IGBT module". Proceedings of PCIM Europe 2013, Nuremberg, p. 455-461.



郷原 広道

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ技術部。日本機械学会会員。



荒井 裕久

ハイブリッド自動車用 IGBT モジュール・IPM の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部技術統括部 EV モジュール技術部。



両角 朗

パワー半導体パッケージの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部電子デバイス研究所次世代モジュール開発センターパッケージ開発部。

TIM プリペースト IGBT モジュール

IGBT Modules with Pre-Applied TIM

磯 亜紀良 ISO Akira

吉渡 新一 YOSHIWATARI Shinichi

IGBT モジュールを実装するとき、IGBT モジュールから発生する熱を速やかに伝達するために、冷却フィンと IGBT モジュールの間にサーマルグリースを塗布する。このサーマルグリース塗布を IGBT サプライヤーに求める顧客が増えている。これに応えるために、フェーズチェンジタイプの TIM (Thermal Interface Material) を用いたプリペースト IGBT モジュールを開発した。採用した TIM は、従来の 3 倍以上の放熱性能を持つとともに、45℃ 付近で液状化し、それ以下の温度では固体化するので輸送性に優れている。これにより、放熱性と信頼性 (サーマルマネジメント) を向上させた IGBT モジュールを実現した。

When an IGBT module is mounted, thermal grease is applied between the cooling fin and the IGBT module to promptly transfer the heat generated from the IGBT module. An increasing number of customers are requiring IGBT suppliers to perform this thermal grease application. To meet this requirement, Fuji Electric has developed a family of IGBT modules with pre-applied thermal interface material (TIM) of phase change type. The adopted TIM features a high heat dissipation performance that is three times or better than that of the conventional products, and is liquefied at around 45°C and solidified below that temperature, thus offering ease of transportation. This has realized IGBT modules with improved heat dissipation properties and reliability (thermal management).

① まえがき

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー、自動車、産業機械、社会インフラなどの分野において重要な基幹部品の一つである。IGBT モジュールの特性改善に当たっては、特に、発生損失の改善、放熱性や信頼性の向上が重要である。

本稿では、放熱性と信頼性の向上 (サーマルマネジメント) を実現した TIM (Thermal Interface Material) プリペースト IGBT モジュールについて述べる。

② 開発の背景

IGBT モジュールが電力を変換する際に発生する損失は、熱となって放出される。放熱性は、製品寿命や電力変換装置の性能に大きな影響を及ぼす。一般的に空冷や水冷方式の冷却フィンと IGBT モジュールの間に熱伝達用のサーマルグリースを塗って取り付ける。⁽¹⁾ 1 W 材と呼ばれる熱伝達率 1 W/(m²·K) 付近のサーマルグリースが使用されることが多い。その際、塗布パターンや塗布量が非常に重要である。⁽²⁾ 近年、塗布工程を正確に行うために必要な塗布ツールやグリースプリンタの投資を避けるため、グリース塗布を IGBT サプライヤーに求める顧客が増えている。富士電機はこの要求に応えるために、TIM プリペースト IGBT モジュールを開発した。このモジュールでは、従来の 3 倍以上の放熱性能を持つ 3 W 材を採用し、さらに輸送性を考慮して、従来のサーマルグリースではなく、45℃ 付近で液状化し、それ以下の温度では固体化するフェーズチェンジタイプの TIM を採用した。

フェーズチェンジタイプの TIM は、ぬれ広がり性を制

御することが難しいが、富士電機が設計したステンシルマスクを使用することで、これを可能にした。

③ フェーズチェンジタイプ TIM の特徴

開発したプリペースト IGBT モジュールの最大の特徴は、フェーズチェンジタイプ TIM を採用していることにある。この TIM には次のような性質がある。

- (a) 初期はグリース状である。
- (b) 揮発性溶剤を加熱などにより除去することでゴム状に変化する。
- (c) さらに、一定の温度より高くなると、ゴム状からグリース状に変化する。

この TIM は次に示す手順で使用する。

- (a) グリース状の TIM を IGBT モジュールに塗布する。その際、使用時に厚さが均一になるようにステンシルマスクを使ってパターン状に塗布する。
- (b) 加熱により揮発性溶剤を除去し、ゴム状に変化させる。TIM は固体化しているため、輸送梱包 (こんぼう) が可能である。
- (c) 常温でヒートシンクに取付けを行う。
- (d) デバイス起動により IGBT モジュールの温度が上昇することで、TIM がグリース状に変化し、放熱フィンに均一に広がる。

実際の使用手順を図 1 に示す。

フェーズチェンジタイプ TIM と従来のサーマルグリースとの比較を表 1 に示す。サーマルグリースの熱伝導率が 0.9 W/(m²·K) であるのに対し、フェーズチェンジタイプ TIM は 3.4 W/(m²·K) であり、従来よりも熱伝導率が約 3.8 倍高い。

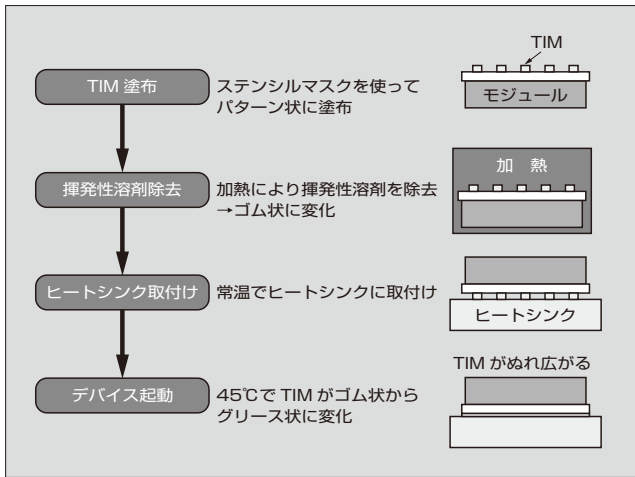


図1 フェーズチェンジタイプTIMの使用手順

表1 TIMの基本仕様

品名	開発品 (フェーズチェンジ タイプTIM)	従来品A (サーマル グリース)	従来品B (サーマル グリース)
外観	灰色	白	白
ベースオイル	ノンシリコーン	シリコーン	ノンシリコーン
粘度 (Pa·s)	135	39	195
熱伝導率 [W/(m·K)]	3.4	0.9	0.9

4 プリペースト IGBT モジュールの性能

プリペースト IGBT モジュールについて性能試験を行った。試験に用いたモジュールと TIM は次のとおりである。

- 試験モジュール：1,200 V/600 A IGBT (2MBI600 VJ-120)
- 使用 TIM：フェーズチェンジタイプ TIM

4.1 めれ広がり性

富士電機が設計したステンシルマスクを使用して TIM を塗布し、TIM メーカーの推奨条件である 60℃、20分 で乾燥させた後に、規定トルクでガラスブロックに取り付けた (図 2)。通電状態を模擬するためにオープンを使って 60℃で加熱し、加熱時間が 10分、30分、60分経過した時点で抜き取り、TIM が全面に広がっていること (めれ広がり性) を確認した。オープン加熱時のモジュール温度を 図 3 に示す。加熱を始めてから 10分 で TIM がゴム状からグリース状に変化するフェーズチェンジが起こり、そこから 50分 で良好なめれ広がり性を確保できることを確認した (図 4)。

4.2 接触熱抵抗

1 W 材のサーマルグリースから 3 W 材のフェーズチェンジタイプ TIM に変えたことによる接触熱抵抗低減の効果について確認を行った。図 5 に接触熱抵抗の測定方法を示す。モジュール、フィン両面に加工を施して熱電対を設

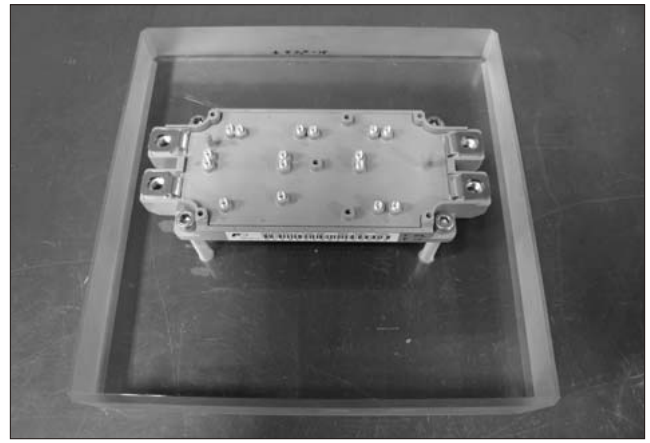


図2 ガラスブロック取付け状態

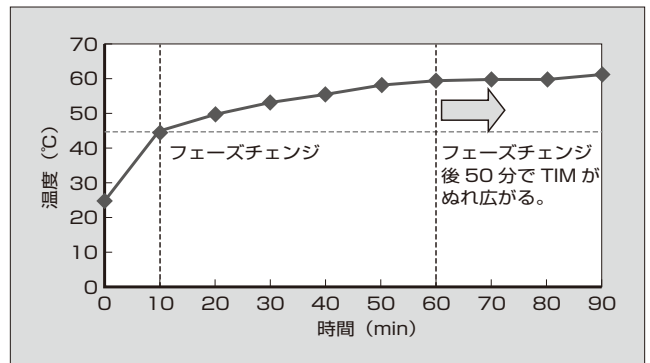


図3 オープン加熱時のモジュール温度

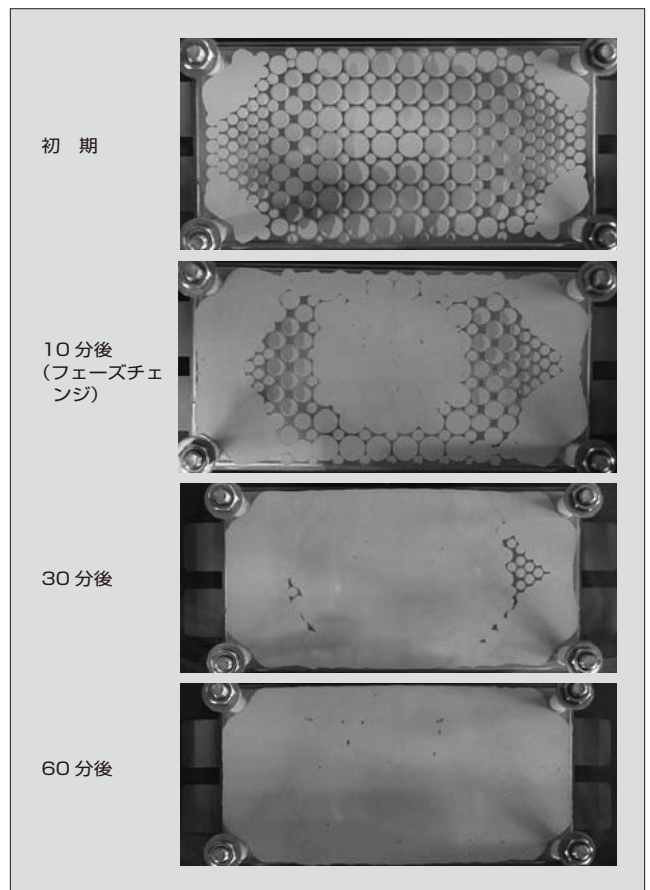


図4 TIMのめれ広がり性

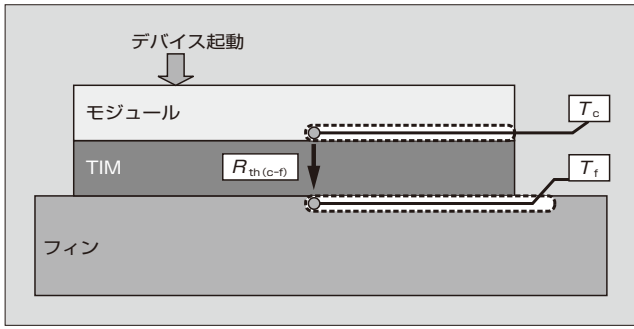


図5 熱抵抗測定方法

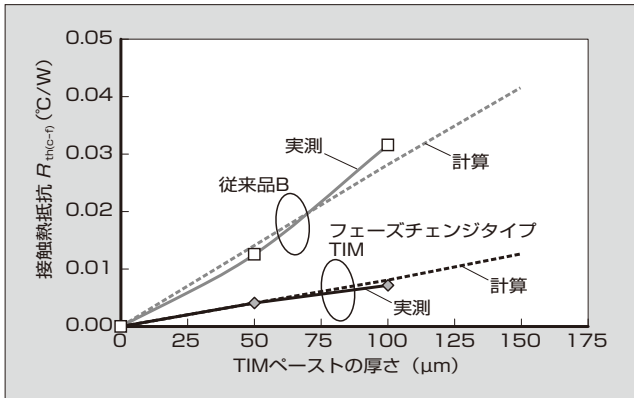


図6 接触熱抵抗比較

置し、式(1)で接触熱抵抗を算出した。

$$R_{th(c-f)} = (T_c - T_f) / P \quad \dots \quad (1)$$

$R_{th(c-f)}$: 接触熱抵抗

T_c : モジュールケース温度

T_f : フィン温度

P : デバイスへの印加電力

測定結果を図6に示す。接触熱抵抗はほぼ計算値と一致し、従来の1/3に低減できている。

4.3 トルク抜け

放熱性を考える上で、TIMの性能のほかに考えなければならないのが、ヒートシンク取付け時に生じるトルク抜けである。トルク抜けとは、TIMがぬれ広がることによりTIMの膜厚が若干薄くなることで、モジュールをヒートシンクに取り付けるときのねじ締め付けトルクが若干低減（ねじが緩む）してしまう現象である。トルク抜けは、TIMの膜厚が厚いほうが発生しやすい傾向がある。この問題に対して、ヒートシンク取付けのねじにスプリングワッシャを使用することを推奨している。スプリングワッシャを使うことでトルク抜け問題が発生することなく実装できることを確認した（図7）。トルク抜け評価は、初期トルク3.5N・mで締め付けた後、ねじを緩めたときの最大トルクを戻しトルクと定義し、戻しトルクが規定トルク以上である場合は問題なしと判断している。締め付けトルク3.5N・mに対し、若干のトルク低下は生じているが、膜厚を厚くした場合においても規定トルクの2.5N・mを下回る

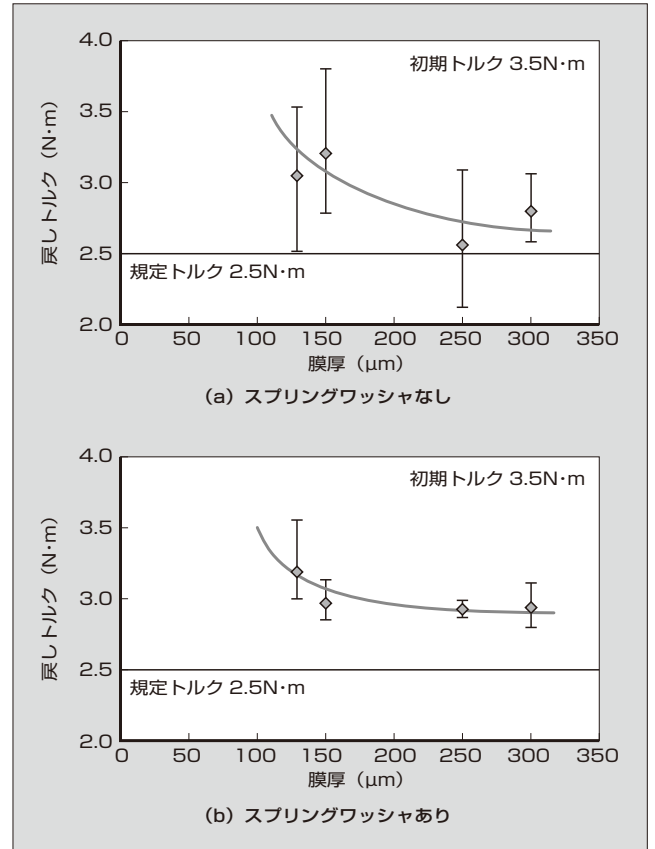


図7 トルク抜け評価

ことはなく、従来のサーマルペーストと同等の結果を得ている。

5 今後の展開

現在、製品展開を行っているプリペースト IGBT モジュールには、M254、M629の2種類のパッケージがある。M271、M272パッケージ製品の開発にも着手しており、その他のパッケージについても系列拡大を進める予定である。

TIM プリペースト IGBT モジュールは、放熱性の向上に加え、TIMを塗布した状態で輸送梱包が可能な製品（図8）であるため、増えつつあるグリース塗布を IGBT サブ



図8 出荷状態

ライヤーに求める顧客への展開が期待できる。

6 あとがき

本稿では、放熱性向上と信頼性向上を実現した TIM プリペースト IGBT モジュールについて述べた。

今後も、さらなる顧客ニーズに応えられるよう、対象製品の系列拡大を進めるとともに、TIM のほか高放熱材料の技術開発など、IGBT モジュールのサーマルマネジメントの技術を高め、新製品の開発を行っていく所存である。

参考文献

- (1) Momose, F. Thermal management of IGBT module systems, PCIM Asia¹.
- (2) FUJI IGBT MODULES APPLICATION MANUAL.

“Chapter 6 Cooling Design”.

- (3) 西村芳孝ほか. IGBTモジュールのサーマルマネジメント技術. 富士時報. 2009, vol.82, no.6, p.423-427.



磯 亜紀良

IGBT モジュールの構造開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部産業モジュール技術部チームリーダー。



吉渡 新一

IGBT モジュールの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部産業モジュール技術部チームリーダー。



第2世代 LLC 電流共振制御 IC 「FA6A00N シリーズ」

2nd Generation LLC Current Resonant Control IC, “FA6A00N Series”

陳 建 CHEN Jian

山田谷 政幸 YAMADAYA Masayuki

城山 博伸 SHIROYAMA Hironobu

LLC 電流共振電源は、ソフトスイッチング、デューティ比 50% の共振制御、リーケージトランス構造という特徴があり、スイッチング電源の高効率化、低ノイズ化、薄型化に適している。富士電機は、第1世代の LLC 電流共振制御 IC 「FA5760N」の特徴を継承しながら、さらなる低待機電力化や保護機能を充実した第2世代の「FA6A00N シリーズ」を開発した。待機電力を従来よりもさらに約 2 割削減しながら、世界で初めて高精度の二次側過負荷保護機能を内蔵した。過電流保護機能は遅延時間を外部で調整することが可能である。

LLC current resonant power supply, which is characterized by soft switching, resonance control with a duty ratio of 50% and leakage transformer structure, is suitable for efficiency improvement, noise reduction and profile lowering in switching power supply. Fuji Electric has developed the 2nd generation “FA6A00N Series,” which inherits the characteristics of the 1st generation LLC current resonant control IC, “FA5760N,” and is enhanced with lower standby power and improved protective functions. It integrates the world’s first high-precision secondary side over-load protection function while further reducing the standby power by approximately 20%. For the over-current protection function, the delay time can be externally adjusted.

1 まえがき

スイッチング電源は、各種電子機器に用いられ、省電力化や省スペース化の要求に応えるため、高効率化、低ノイズ化、薄型化が急速に進んでいる。LLC 電流共振電源は、高効率、低ノイズのソフトスイッチング技術と、薄型のリーケージトランス構造を使用しているという特徴がある。この特徴により、電源の高効率化、低ノイズ化および薄型化に適しているため、スイッチング電源としては中間容量の 100 ~ 500 W の電源に使われている。しかし、LLC 電流共振電源は、起動時や重負荷時および低入力電圧時にスイッチング貫通現象^(注)が発生しやすい。この現象によるパワー MOSFET の破壊や励磁電流による軽負荷時の効率低下などの課題を抱えており、用途は限定的であった。

そこで、これらの課題を解決するため、富士電機は独自の新制御方式を採用した LLC 電流共振制御 IC 「FA5760N」を製品化^{(1),(2)}した。FA5760N は PFC コンバータと専用待機コンバータを不用とした LLC 共振コンバータであり、高効率、低待機電力かつ小型の電源システムの構成が可能である。これにより、PFC コンバータなしの 50 W 程度の電源にも採用されるようになり、適用範囲が広がった。

今回、富士電機は第1世代 LLC 電流共振制御 IC 「FA5760N」の特徴を継承しながら、さらなる低待機電力化、保護機能の充実、高品質化、低システムコストを実現し、かつ設計自由度の高い LLC 電流共振電源を実現する

〈注〉スイッチング貫通現象：ブリッジスイッチ回路において、一方のパワー MOSFET のボディダイオードに電流が流れているときに、対向のパワー MOSFET がターンオンし、瞬間的に大電流が発生する現象である。

第2世代 LLC 電流共振制御 IC 「FA6A00N シリーズ」を開発した。

2 製品の概要

FA6A00N シリーズの外観を図1に、ブロック図を図2に示す。また、主要定格を表1に、主な機能を表2に、製

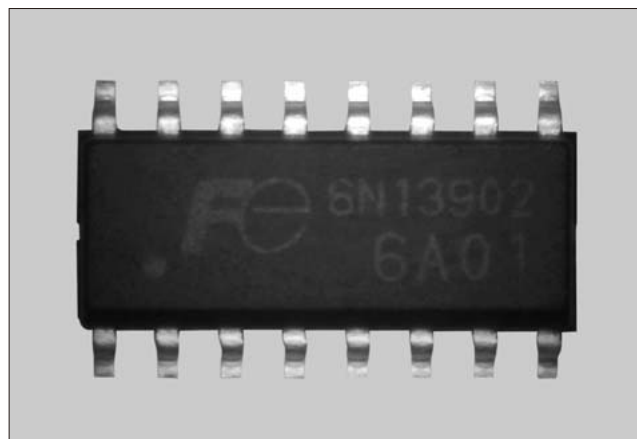


図1 「FA6A00N シリーズ」

表1 主要定格

項目名	定格値
ハイサイド電源対地電圧	-0.3 ~ +630 V
ハイサイド電源電圧 (V _{BS})	-0.3 ~ +30 V
ローサイド電源電圧 (V _{CS})	-0.3 ~ +30 V
VH端子入力電圧	-0.3 ~ +600 V
最大許容オフセット電源電圧 dv/dt	±50 kV/μs (max.)
全損失	0.83 W
動作ジャンクション温度	-40 ~ +150 °C

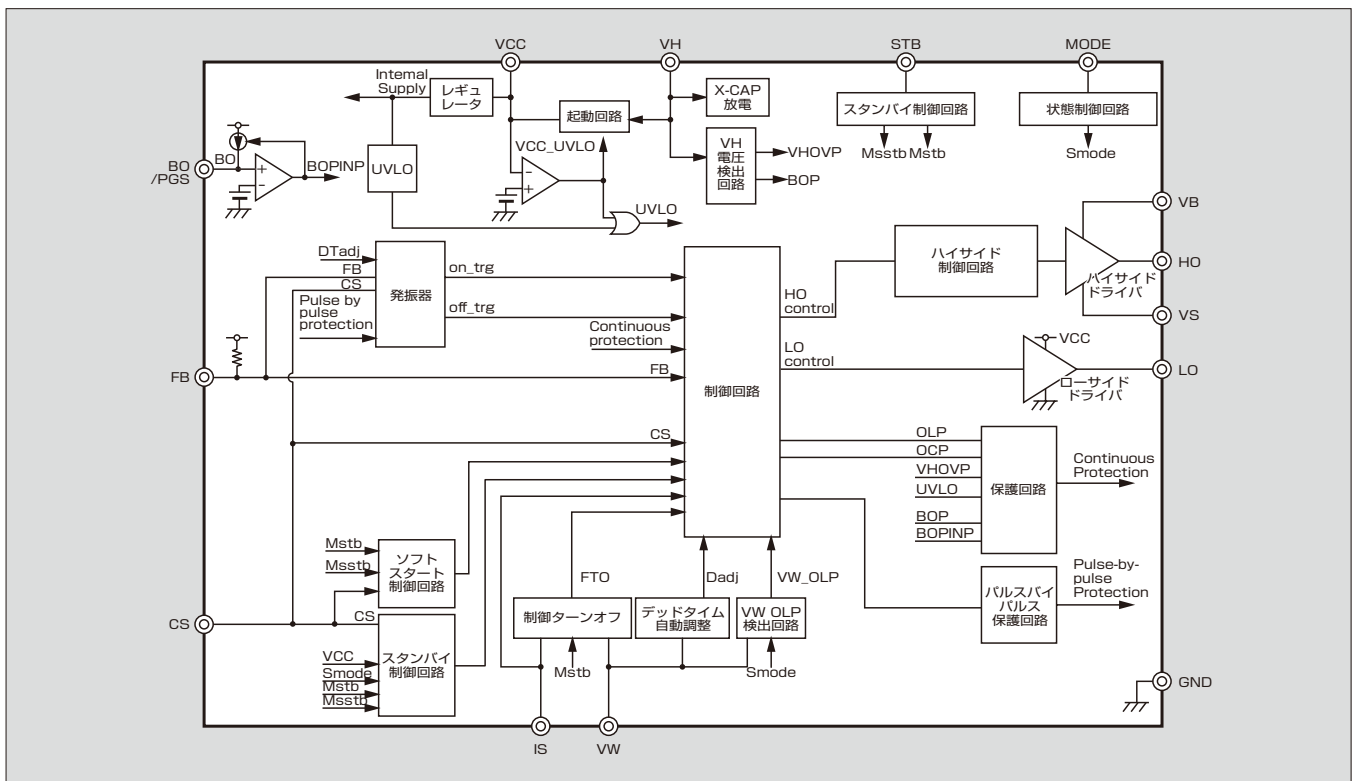


図2 「FA6A00N シリーズ」のブロック図

表2 主な機能と端子

機能	端子 (No.)
起動回路	VH(1), VCC (10)
低電圧誤動作防止回路	VCC (10), VB (16)
状態設定機能	MODE (7)
X-CAP放電機能	VH (1)
固定ブラウンイン・ブラウンアウト	VH (1)
可変ブラウンイン・ブラウンアウト	BO (3)
過電圧保護	VH (1), VCC (10)
遅延時間可変の過電流保護	IS (8), MODE (7)
過負荷保護	VW (9), FB (4)
過熱保護	内蔵
外部ラッチ信号入力	MODE (7)
強制ターンオフ機能	VW (9), IS (8)
デッドタイム自動調整機能	VW (9)
高精度過負荷保護機能	VW (9)
ソフトスタート機能	CS (5)
低待機動作モード	VCC (10), CS (5), VH (1)
パワーグッド信号	PGS (3)

品系列を表3に示す。FA6A00NシリーズのLLC電流共振制御ICの概要は次のとおりである。

- (a) LLC電流共振回路を制御する3.3V、5Vおよび30Vの耐圧制御回路
- (b) ハーフブリッジ回路のハイサイドおよびローサイドスイッチ素子を直接駆動できる630V耐圧ドライバ回路
- (c) 低消費電力でIC起動を実現する600V耐圧起動素子

表3 製品系列

製品名	3番端子	過負荷保護	過電流保護
FA6A00N	PGS端子	自動復帰	ラッチ停止
FA6A01N	PGS端子	自動復帰	自動復帰
FA6A10N	BO端子	自動復帰	自動復帰
FA6A11N	BO端子	ラッチ停止	ラッチ停止

子内蔵

(d) JEDEC準拠の16ピンSOP (Small Outline Package)

ハイサイドとローサイドの両出力は、高精度50%デューティ比で交互に動作し、動作周波数範囲は38k~350kHzである。

3 特徴

3.1 低損失バースト制御

第1世代のFA5760Nは、VCC端子とCS端子でヒステリシスバースト制御を行い、待機コンバータなしで世界トップレベルの低待機電力を実現した。第2世代のFA6A00Nシリーズは、加えてバースト制御の最適化を行い、FA5760Nより待機電力をさらに約2割削減した。

LLC電流共振制御は、ハイサイドとローサイドのデューティ比を50%とし、スイッチング周波数でゲインを制御している。図3に電流共振ゲイン図を示す。周波数の変動範囲は、通常動作時は原理的に狭く、バースト動作時は広くなる。

バースト動作時の周波数を図4に示す。周波数が高い領

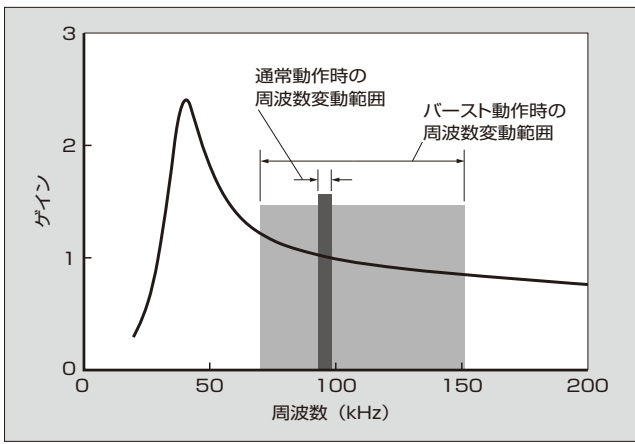


図3 電流共振ゲイン図

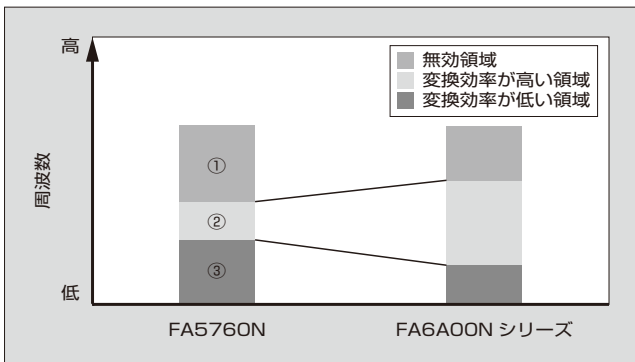


図4 バースト動作時の周波数

域①はゲインが低く、スイッチングを行ってもエネルギーの転送ができない無効領域である。周波数が低い領域③はゲインが高く、励起電流が大きいいため、エネルギー転送の効率が悪く、変換効率が低い領域である。FA6A00N シリーズは無効領域と変換効率が低い領域を削減し、変換効率の高い領域②を広げることで低待機電力化を実現した。また、音鳴りも同時に抑制している。

3.2 高精度の過負荷保護機能

第1世代のFA5760Nは、一次側の補助巻線P2(図5)を利用してVCC端子に電源を供給するとともに、ハードスイッチング防止および貫通電流防止を実現した。第2世代のFA6A00Nシリーズは、FA5760Nの機能を継承しな

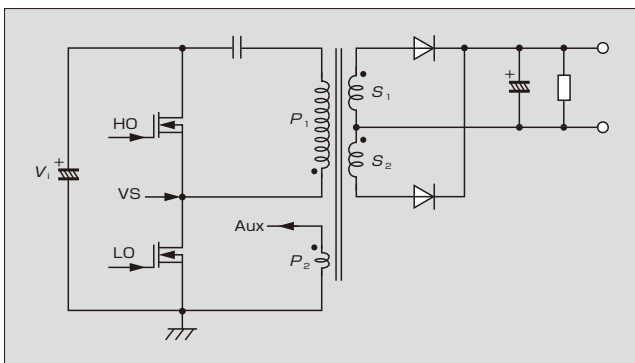


図5 電流共振の簡易回路図

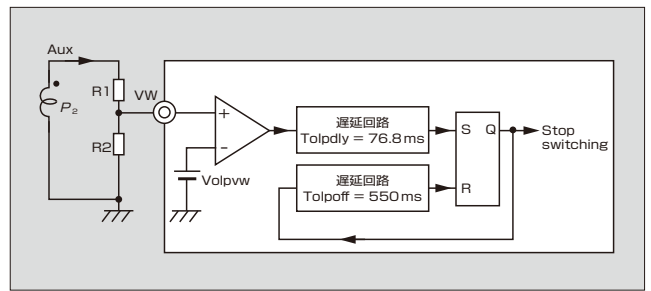


図6 高精度過負荷保護機能の回路構成

がら、この補助巻線を使用して高精度の過負荷保護機能を世界で初めて内蔵した。

過負荷保護機能とは、電源システムを保護するため、負荷が定格負荷の約1.5倍になった場合、一定の遅延時間後にスイッチングを停止する機能である。この機能の精度が悪化すると、出力電力が不足したり、出力電力に制限がかからなくなったりするため、過負荷保護として満足に使えなくなる。さらに、過負荷保護レベルは入力電圧が広範囲に変化しても、過負荷レベルは一定の範囲(±20%程度)に抑えなければならない。

FA6A00Nシリーズの高精度過負荷保護機能の回路構成を図6に示す。補助巻線電圧は抵抗分圧の V_w 電圧で検出する。この分圧抵抗の推奨精度は±1%である。 V_w 電圧はしきい値電圧 V_{olpww} を超えると過負荷状態と認識し、過負荷状態が76.8ms継続すると、スイッチングを停止する。検出精度を高めるため、 V_{olpww} のばらつきは高精度の±3%以内に設定した。製品化したものは、スイッチング停止時間が550msになるとリスタートする自動復帰版と、リスタートしないラッチ停止版である。

過負荷保護動作時の波形を図7に示す。過負荷保護の動作になると、スイッチングが停止してエネルギーの転送がなくなり、出力電圧が下がる。

図8に、過負荷保護動作電力の入力電圧に対する依存性を示す。FA5760Nでは、一般的な共振電流の検出で過負荷保護を行っているが、入力電圧の範囲が広い場合には、

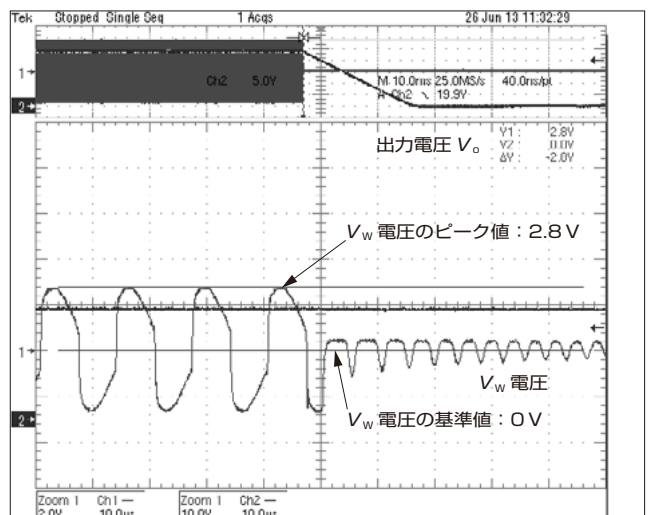


図7 過負荷保護時の動作波形

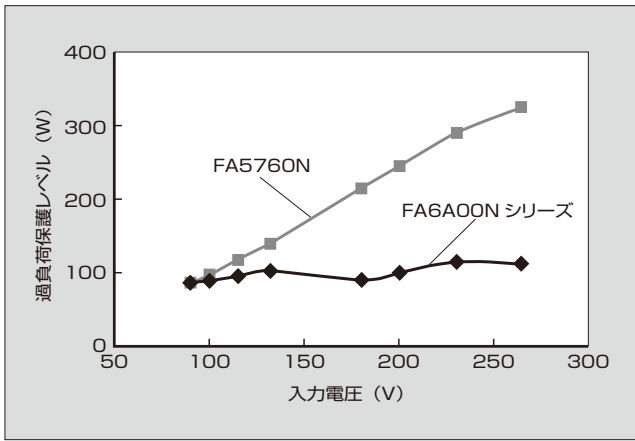


図8 入力電圧と過負荷保護動作電力

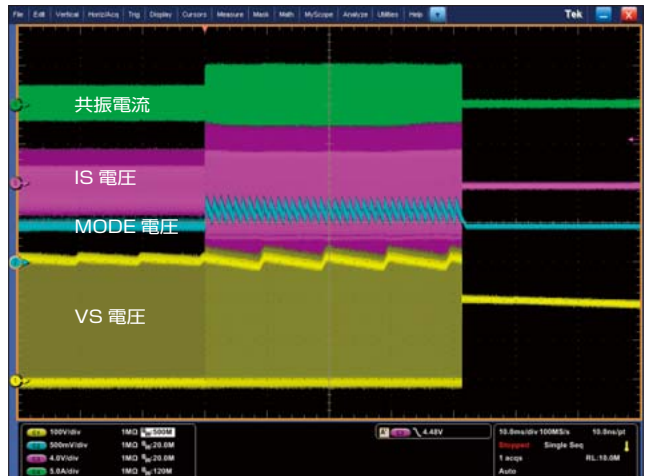


図9 過電流保護動作時の波形

過負荷保護レベルの入力電圧依存性が大きく、専用の過負荷保護回路を追加する必要があった。FA6A00N シリーズは、入力電圧が変動しても、過負荷保護レベルの変動が小さく、専用の過負荷保護回路がなくても高精度の過負荷保護機能を構築することができる。結果的に電源システムの部品点数を削減でき、電源システムのコストダウンが可能である。

3.3 遅延時間可変の過電流保護機能

負荷短絡状態になったとき、一定時間 T_{ocp} の間、過電流状態が継続するとスイッチングを停止する。この機能を過電流保護機能という。 T_{ocp} の設定が長すぎるとパワーデバイスが破壊する可能性がある。 T_{ocp} の設定が短すぎると起動時に過電流状態になり、負荷短絡状態と検出されて起動できない可能性がある。最適な T_{ocp} は電源によって異なるため、 T_{ocp} を外付け部品で調整できれば、電源設計の自由度が高まる。

FA6A00N シリーズは、 T_{ocp} の調整を状態設定用の MODE 端子と兼用し、端子数を増加することなく遅延時間可変の過電流保護機能を実現した。図9 に実測波形を示す。共振電流が急に伸びるときに IS 端子で過電流状態と検出される。MODE 端子電圧は状態設定後に 0.5 V にクランプされており、過負荷状態が検出されると 0.6 V と 0.8 V の間で発振する。発振回数が 36 回になるとスイッチングを停止して過電流から保護する。なお、一回の発振時間は MODE 端子に接続したコンデンサで調整することができる。

4 電源回路への適用効果

4.1 待機電力の削減効果

図10 にアプリケーション回路例を、表4、表5 にアプリケーション回路例の仕様と主な半導体部品を示す。また、

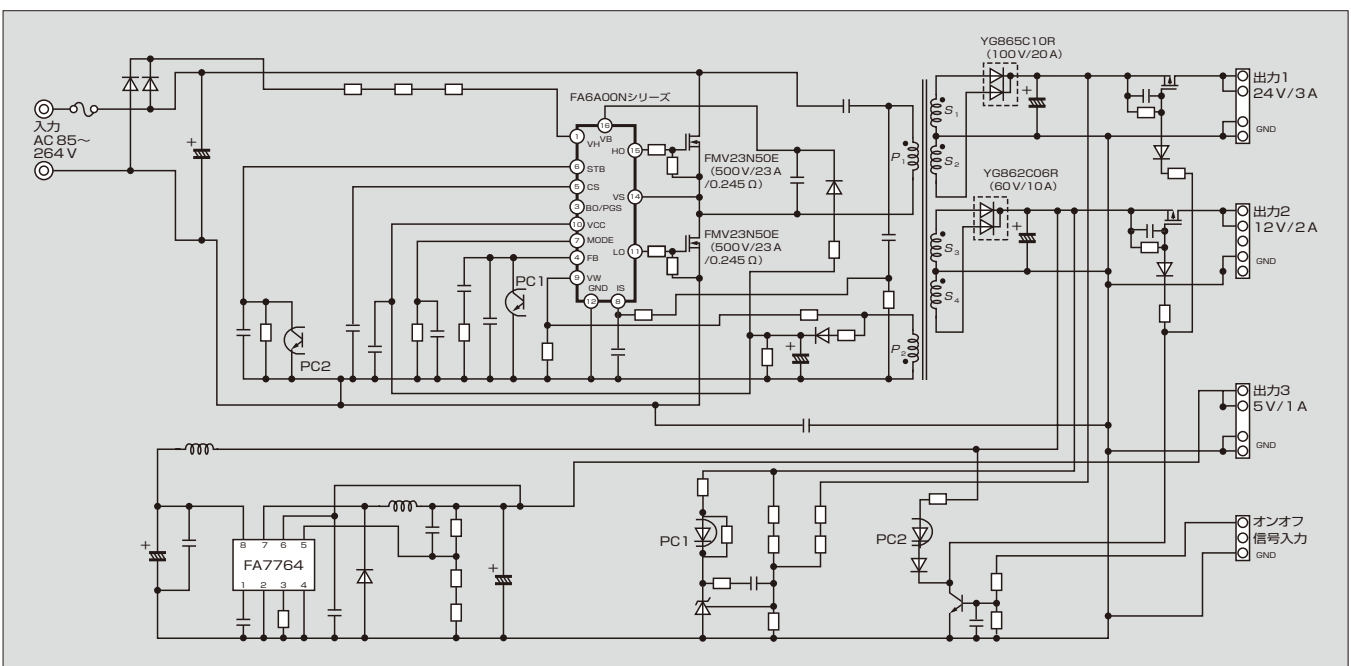


図10 アプリケーション回路例

表4 アプリケーション回路例の仕様

項目	特性など
入力電圧	AC85~264V
出力電圧/電流	24V/3A, 12V/2A, 5V/1A
出力電力	100W (max.)

表5 アプリケーション回路例の主な半導体部品

部品名	型式名
制御IC	FA6A00Nシリーズ
ブリッジ部MOSFET	FMV23N50E (500V/23A/0.245Ω)
ダイオード (24V)	YG865C10R (100V/20A)
ダイオード (12V)	YG862C06R (60V/10A)
5V DC/DCコンバータ	FA7764AN

図11に負荷35mW時の実測待機電力を示す。FA6A00NシリーズはFA5760Nに比べて待機電力を約2割削減できるため、待機電力の要求仕様が厳しい場合でも待機コンバータをなくすことが可能である。

4.2 回路部品点数の削減効果

図12に一般的なLLC電流共振電源の構成を示す。一

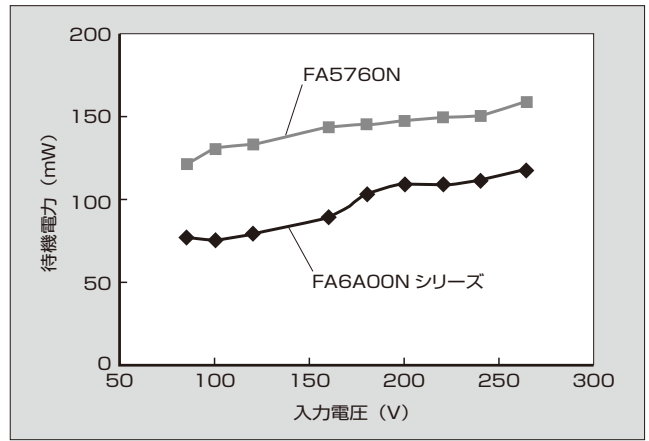


図11 負荷35mW時の待機電力

般的なLLC電流共振電源はEMI (Electromagnetic Interference) ノイズ除去用のフィルタ、力率改善用のPFCコンバータ、待機コンバータおよびLLCコンバータで構成されている。FA6A00Nシリーズの採用により、部品点数を大幅に削減することができるため、低コストのLLC電流共振電源を構築することが可能になる(表6)。

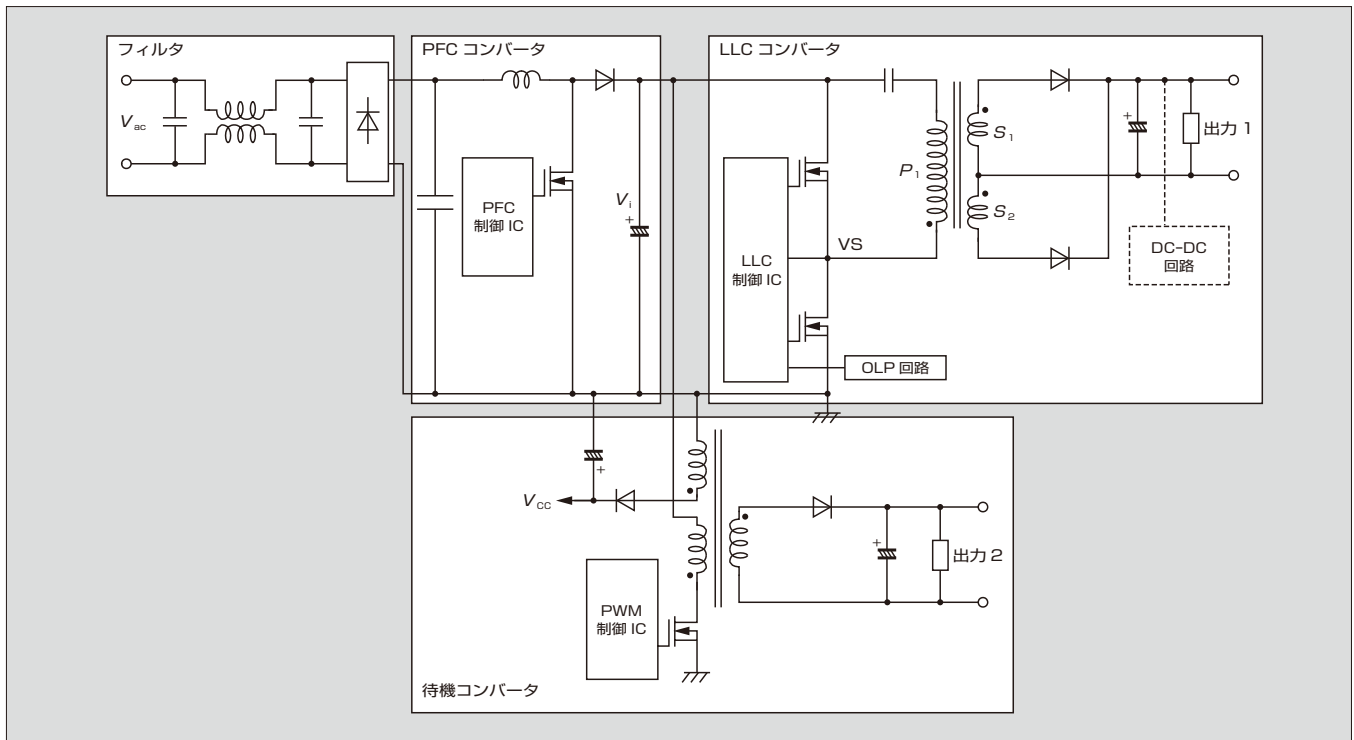


図12 一般的なLLC電流共振電源の構成

表6 部品点数(概数)の比較

	フィルタ	PFCコンバータ	待機コンバータ	LLCコンバータ			部品点数合計
				メイン	DC-DC	高精度OLP	
FA5760N	10	30	40	60	不要	10	150
FA6A00Nシリーズ	75W以上	10	30	60	20	不要	120
	75W未満	10	不要	不要	60	20	不要

5 あとがき

第2世代 LLC 電流共振制御 IC 「FA6A00N シリーズ」について述べた。この IC は第1世代の「FA5760N」の特徴を継承しながら、高精度の過負荷保護機能などで電流共振制御のさらなる進化を成し遂げた。

今後もさらなる高効率化と低ノイズ化を実現する新技術の確立を図り、電源の小型化、薄型化に寄与する電源制御 IC の開発を進めていく所存である。

参考文献

- (1) 山田谷政幸ほか. LLC電流共振制御IC 「FA5760N」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.445-451.
- (2) 陳建. PFC及び待機用コンバータ無しで広入力電圧範囲に対応したLLC共振コンバータ. 第27回スイッチング電源技術シンポジウム. 2012, D2-2.



陳 建

電源 IC の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部ディスクリート・IC 技術部。



山田谷 政幸

電源 IC の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部ディスクリート・IC 技術部。工学博士。電気学会会員。



城山 博伸

パワー半導体のフィールドアプリケーションエンジニアに従事。現在、富士電機株式会社営業本部半導体営業統括部応用技術部課長。工学博士。電気学会会員、電子情報通信学会会員。



ワンチップ リニア制御用 IPS 「F5106H」

One-Chip Linear Control IPS, “F5106H”

中川 翔 NAKAGAWA Sho

大江 崇智 OE Takatoshi

岩本 基光 IWAMOTO Motomitsu

自動車電装分野では、システムの小型化、高信頼性化、高機能化の要求が高まっている。これらの要求に応えるため、従来の IPS に高精度電流検出アンプを搭載したワンチップ リニア制御用 IPS 「F5106H」を開発した。第 4 世代 IPS デバイス・プロセス技術を適用してワンチップ化したことで、SOP-8 パッケージへの搭載を可能にしている。さらに、接合部温度の最大定格を 175℃とし、過酷な温度環境における耐久性を向上するとともに、4.5V までの低電源電圧動作が可能である。

In the field of vehicle electrical components, the increasing demands for miniaturization, reliability improvement and functional enhancement are required. To meet these demands, Fuji Electric has developed one-chip linear control intelligent power switch (IPS), “F5106H,” which mounts a high-precision current detection amplifier on the conventional IPS. Applied with 4th generation IPS device and process technology, it can be integrated into one chip and mounted in a SOP-8 package. In addition, the maximum rating of the junction temperature has been set to 175°C to improve the durability in a harsh temperature environment, and low power operation voltage can be allowed down to 4.5V.

1 まえがき

近年、自動車電装分野では“安全”“環境”“省エネルギー”をキーワードとして、さらなる安全性能向上、排出ガス低減、燃費向上を図っている。その実現のために、車両制御技術の高度化と、自動車の電子制御システムの大規模化が進んでいる。その中でも、広い室内空間を確保するため、ECU (Electronic Control Unit) には小型化と高機能化の両立が求められている。また、ECU の高密度実装に伴い、搭載部品の小型・高機能化と高温対応も求められている。

これに加え、ECU が制御するソレノイドバルブでは、リニアソレノイドバルブを用いたリニア制御が増加傾向にある。リニアソレノイドバルブは、油圧を電流値に応じてリニアに制御できるため、細かな油圧制御による車両制御が可能であり、排ガス低減や燃費向上に貢献する。ただし、このリニア制御では、負荷であるリニアソレノイドに流れる電流を高精度に検出する必要がある。

富士電機では、トランスミッション、エンジン、ブレーキなどに用いられる自動車電装システム向けに IPS (Intelligent Power Switch) 製品の開発を行ってきた。IPS は出力段として用いる縦型パワー MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) と制御・保護回路を構成する横型 MOSFET を同一のチップ上に集積化した製品である。IPS は ECU の回路部品数や実装面積の低減を可能とし、ECU の小型化に貢献してきた。近年では、第 4 世代 IPS デバイス・プロセス技術の適用により、チップのさらなる小型化を実現した。今回、これらの技術を応用して、従来の IPS に高精度電流検出アンプを搭載したワンチップ リニア制御用 IPS 「F5106H」を開発した。

2 特徴

F5106H の外観・外形図・端子配列を図 1 に、回路ブロック図を図 2 に、使用例を図 3 に示す。また、最大定格

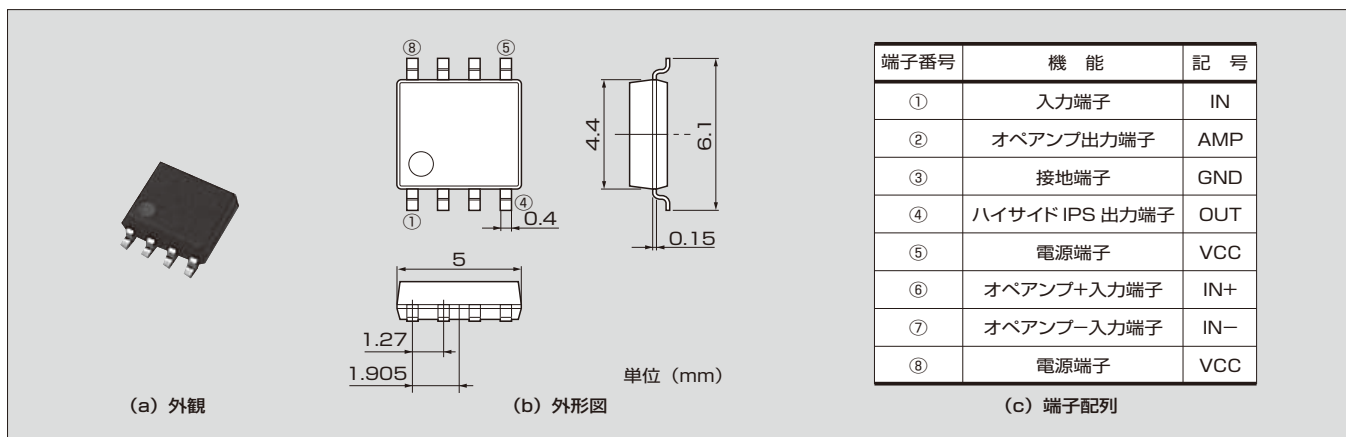


図 1 「F5106H」の外観・外形図・端子配列

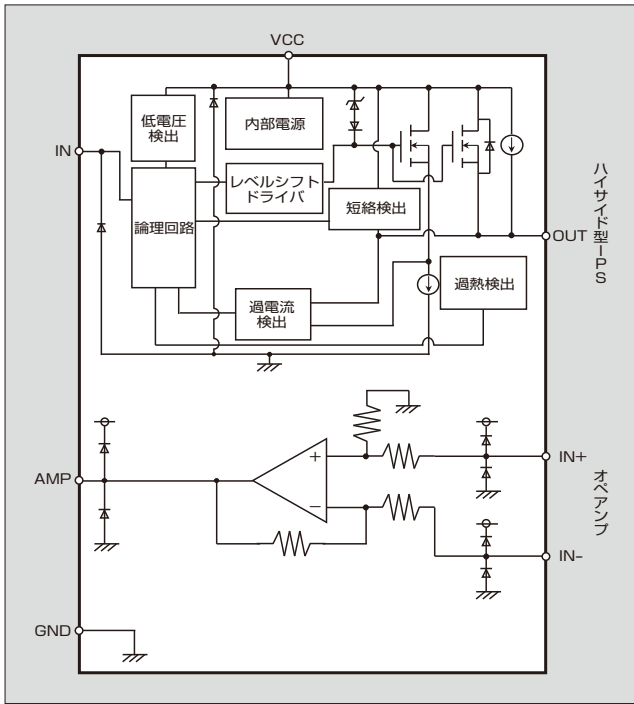


図2 「F5106H」の回路ブロック図

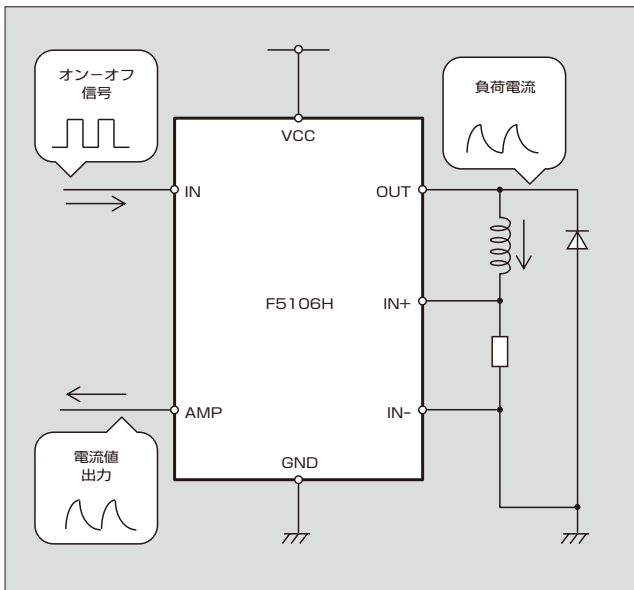


図3 「F5106H」の使用例

を表1に示す。F5106Hの主な特徴は次に示す六つであり、自動車電装システムの小型化、高性能化、高信頼性化を支えている。

- (a) 第4世代IPSデバイス・プロセス技術を適用して、外付けだったオペアンプとハイサイド型IPSとのワンチップ化を実現し、SOP-8パッケージに搭載した。これにより、システムの小型化と部品点数の低減によるトータルコストダウンに貢献する。
- (b) 高精度な負荷電流の検出が可能なオペアンプを内蔵

〔注1〕ハイサイド型IPS：電源側に半導体デバイスを、グラウンド側に負荷を配置するIPSのこと

表1 「F5106H」の最大定格 ($T_a=25^\circ\text{C}$)

項目	記号	条件	定格値	単位
ハイサイドIPS, オペアンプ共通				
電源電圧(1)	$V_{CC(1)}$	Pulse 0.25s	50	V
電源電圧(2)	$V_{CC(2)}$	DC	-0.3~+35	V
接合部温度	T_j	—	175	$^\circ\text{C}$
保存温度	T_{stg}	—	-55~+175	$^\circ\text{C}$
ハイサイドIPS				
出力電流	I_D	DC	2	A
出力電圧	V_{OA}	—	$V_{CC}-50$	V
消費電力	P_D	DC	2	W
入力電圧(1)	$V_{IN(1)}$	DC $R_{IN}=0\Omega$	-0.5	V
入力電圧(2)	$V_{IN(2)}$	DC	7	V
入力電流	I_{IN}	DC	± 10	mA
オペアンプ				
IN+電圧	$V_{IN+(1)}$	DC	-0.5~+7	V
	$V_{IN+(2)}$	5s	-1.1~+18	V
IN-電圧	$V_{IN-(1)}$	DC	-0.5~+7	V
	$V_{IN-(2)}$	5s	-1.1~+18	V
IN+電流	I_{IN+}	DC	10	mA
IN-電流	I_{IN-}	DC	10	mA
AMP電圧	V_{AMP}	DC	7	V
AMP電流	I_{AMP}	DC	10	mA

- することで、高精度なリニア制御を実現している。
- (c) 接合部温度の最大定格を175 $^\circ\text{C}$ とし、過酷な温度環境における耐久性を向上している。
- (d) 4.5Vまでの低電源電圧動作が可能である。
- (e) 負荷短絡保護機能を内蔵している。
- (f) 低インピーダンスサージ吸収用ツェナーダイオードを内蔵し、高いESD (Electrostatic Discharge) 耐量を確保している。

2.1 ハイサイド型IPSの特徴

ハイサイド型IPSの電気的特性を表2に示す。

表2 ハイサイド型IPSの電気的特性

項目	記号	条件	規格値		単位
			最小	最大	
動作電源電圧	V_{CC}	$V_{IN}=5\text{V}$	4.5	16	V
低電圧検出	$UV1$	$V_{IN}=5\text{V}$	2.0	4.3	V
低電圧復帰	$UV2$		2.2	4.5	V
入力しきい値電圧	$V_{IN(H)}$	$V_{CC}=4.5\sim 16\text{V}$ $R_L=10\Omega$	3	7	V
	$V_{IN(L)}$		0	1.5	
オン抵抗	$R_{DS(on)}$	$T_a=25^\circ\text{C}$ $I_{OUT}=1.5\text{A}$	—	0.12	Ω
		$T_a=150^\circ\text{C}$ $I_{OUT}=1.5\text{A}$	—	0.24	Ω
過電流検出	I_{OC}	$V_{CC}=13\text{V}$ $V_{IN}=5\text{V}$	2	7	A
過熱検出	T_{trip}	$V_{IN}=5\text{V}$	175	207	$^\circ\text{C}$

特記なき場合は、 $T_a=-40\sim +175^\circ\text{C}$ 、 $V_{CC}=8\sim 16\text{V}$ とする。

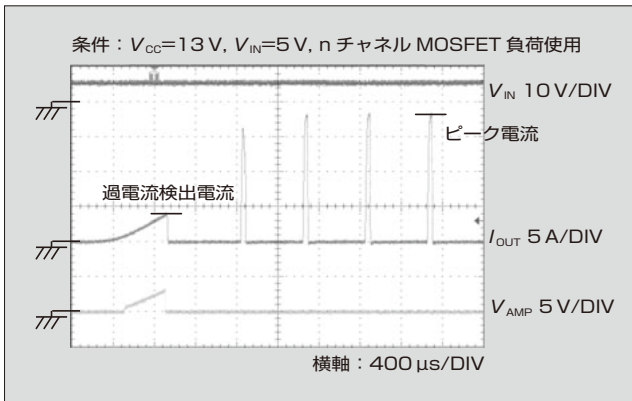


図4 過電流動作時波形

負荷短絡保護と動作電源電圧の低減について次に述べる。

(1) 負荷短絡保護

出力段パワー MOSFET に過電流が流れた場合に備えて、システム、負荷および素子を保護するための過電流検出機能を搭載している。図4に、過電流動作時波形を示す。過電流を検出し、出力電流を発振状態にする際のピーク電流を一定に抑えている。このことにより、異常状態においても素子が発生するノイズを低く抑えることができる。また、出力発振状態のデューティ比を最適化^(注2)することで、平均出力電流を抑え、ECUの配線の微細化およびワイヤーハーネスの細線・軽量化に貢献できる。さらに、異常状態が継続すると、出力段パワー MOSFET が発熱して破壊する恐れがあることから過熱検出機能を搭載している。過熱検出機能は応答性が重要であり、温度センサを出力段パワー MOSFET の活性部内に配置して、応答速度を上げている。

(2) 低電源電圧動作

エンジン始動時など電源電圧が瞬時的に低下する場合にもオン抵抗を維持できるように設計した。回路およびこれを構成する要素デバイスのしきい値を下げることなどにより、電源電圧が4.5Vに低下しても電圧が正常な13Vのときとほぼ同等のオン抵抗が維持できる。また、電源電圧が4.5V未満の領域では、回路動作が不安定にならないように低電圧検出機能を搭載した。これらの工夫により、電源電圧の低下時にも通常時と同等の素子の性能と冗長性を確保している。

2.2 オペアンプの特徴

オペアンプ部の電気的特性を表3に示す。 $-40\sim+175^{\circ}\text{C}$ で高い電流検出精度を実現するために、次に示す3点を実施している。

- 差動増幅部にp形MOSFETを採用し、ゲートサイズを最適化した。
- 差動増幅部をコモンセントロイドレイアウト^(注3)にすることにより、電流検出精度のばらつきを低減した。

〈注2〉デューティ比：出力発振状態におけるオン状態の比率

〈注3〉コモンセントロイド：MOSFET対を分割し、重心が一致するように配置することでばらつきを低減すること

表3 オペアンプ部の電気的特性

項目	記号	条件	規格値		単位
			最小	最大	
出力電圧範囲	V_{OH}	$R_{AMP}=5\text{ k}\Omega$	0	5	V
出力電流	I_{AMP} (SOURCE)	$V_{IN+}=366\text{ mV}$	—	-0.1	mA
	I_{AMP} (SINK)	$V_{IN+}=384\text{ mV}$	0.1	—	mA
ゲイン	G	—	typ.=8		倍
電流検出精度	I_{sns1}	$V_{IN+}=375\text{ mV}$ $R_{AMP}=50\text{ k}\Omega$	-2.3	2.3	%
	I_{sns2}	$V_{IN+}=375\text{ mV}$ $R_{AMP}=50\text{ k}\Omega$ $V_{CC}=14\pm 1\text{ V}$ $T_a=25^{\circ}\text{C}$	-1.6	1.6	%

特記なき場合は、 $T_a=-40\sim+175^{\circ}\text{C}$ 、 $V_{CC}=8\sim 16\text{ V}$ とする。

- トリミング回路を搭載し、オフセットのばらつきを低減した。

③ 適用技術

F5106Hは、第4世代IPSデバイス・プロセス技術を適用している。図5に、第4世代IPSデバイス構造を示す。

チップの小型化を図るため、出力段パワー MOSFET を従来のプレーナゲート型からトレンチゲート型に変更し、要素デバイス自体の微細化に加え、多層配線技術を適用して要素デバイス間を接続する配線面積を低減した。

この技術を発展させてハイサイド型IPSとオペアンプをワンチップ化し、SOP-8パッケージへの搭載を可能にした。ワンチップ化するに当たっては、次に示す2点に留意した。

- ワンチップ化すると、チップ裏面が高電圧（バッテリー電圧）になる。この影響をなくすため、基板バイアス効果を抑えたデバイス構造を採用した。
- オペアンプの電気的特性のばらつきを低減するレイアウトを実施した。具体的には、出力段パワー MOSFET の発熱による差動増幅部の影響を最小限に抑えるレイアウトにするとともに、パッケージ内の残留応力を考慮して差動増幅部をチップの中央に配置した。

また、 175°C 動作を可能とするために次に示す2点を実施している。

- 175°C 環境下においてもノイズ・サージ耐性を確保するために、出力段パワー MOSFET と回路部要素デバイスの耐圧バランスを維持するように設計した。
- パッケージ材料の見直しにより、 175°C 環境下においても高い信頼性を確保した。

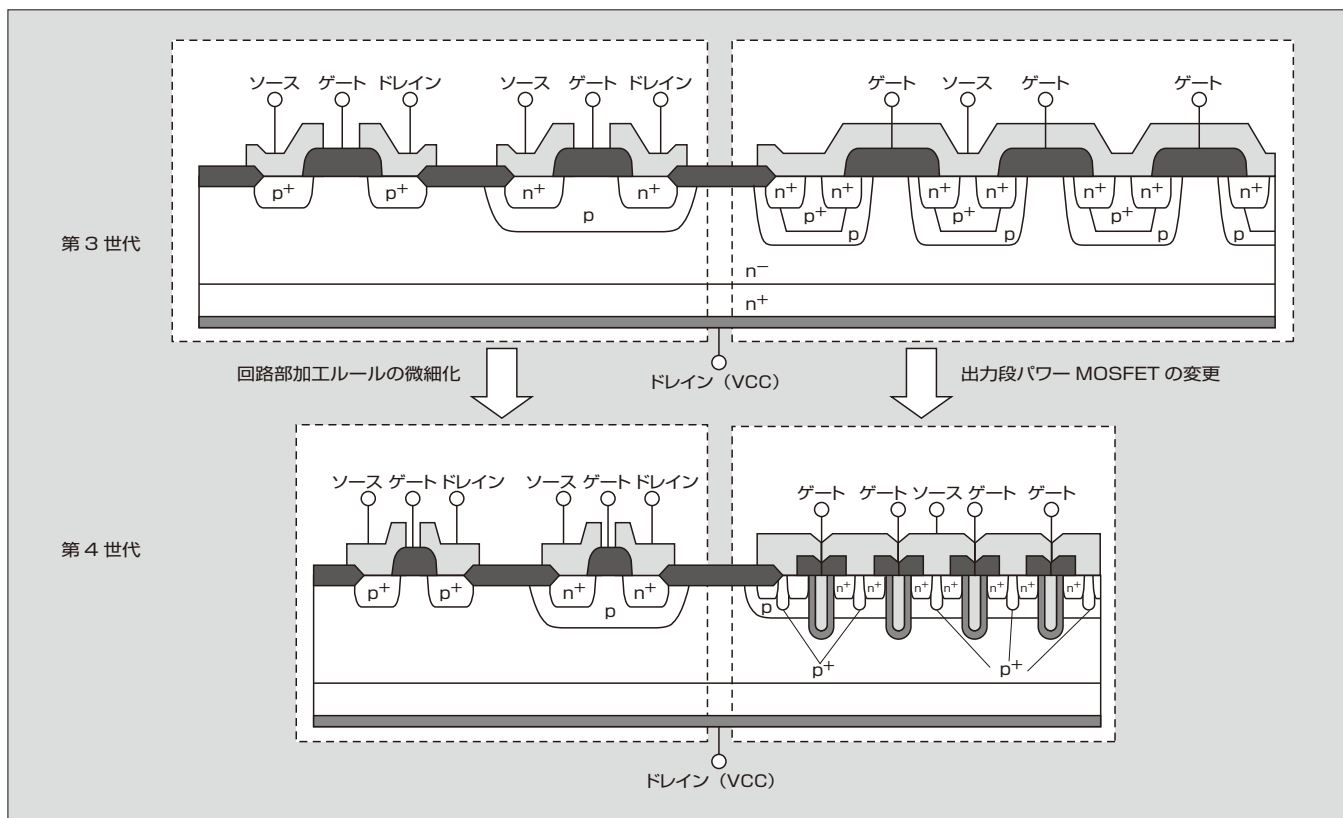


図5 第4世代IPSデバイス・プロセス技術の特徴

4 あとがき

本稿では、ECUの小型・高性能化に貢献できるワンチップ リニア制御用IPS「F5106H」について述べた。今後も、第4世代IPSデバイス・プロセス技術を用いたさまざまなIPS製品を開発し、自動車電装システムの高機能化・小型化・高信頼性化に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 岩田英樹ほか. インテリジェントパワー MOSFET. 富士時報. 2008, vol.81, no.6, p.410-414.
- (2) 鷹坂浩志ほか. 車載用第4世代IPS「F5100シリーズ」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.440-444.
- (3) Toyoda, Y. "60 V-Class Power IC Technology for an Intelligent Power Switch with an Integrated Trench MOSFET". ISPSD. p.147-150, 2013.



中川 翔

半導体デバイスの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部自動車電装技術部。



大江 崇智

半導体デバイスの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部自動車電装技術部主査。



岩本 基光

半導体デバイスの開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部開発統括部デバイス開発部。

解説 1 3レベル電力変換方式

p.236, p.253

3レベル電力変換方式について、インバータを例に説明する。3レベル電力変換方式のインバータ（3レベルインバータ）は、一般的な2レベル電力変換方式のインバータ（2レベルインバータ）に比べて多くのメリットがある。図1に示すように、2レベルインバータの変換器出力の電圧波形が、ゼロ点を中心とした $\pm E_d$ のPWM（Pulse Width Modulation：パルス幅変調）パルスとなるのに対し、3レベルインバータは、ゼロ点を中心とした $\pm E_d/2$ と $\pm E_d$ とのPWMパルスとなる。3レベルインバータの出力波形がより正弦波に近くなることから、出力波形を正弦波化するためのLCフィルタを小型化することができる。また、1回のスイッチ動作当たりの電圧変動幅が2レベルインバータの半分となるため、スイッチ素子に発生するスイッチング損失がおおむね半減し、装置から発生するノイズも低減する。これらの特徴がある3レベルインバータは、システムの小型化や高効率化の実現に有効である。

3レベルインバータの中で、図に示す直流電源の中間電位点（N）に結線されている方式をNPC（Neutral-Point-Clamped）方式と呼ぶ。これはスイッチ素子に印加される電圧が、常に直流電圧 E_d の半分の電圧にクランプされることに由来する。

NPC方式に対してAT-NPC（Advanced T-type-NPC）方式は、直列に接続されたIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）がNPC方式で使用するIGBTの2倍の定格電圧であることと、直流電源の中間電位点（N）と直列に接続したIGBTの中間点（U）との間に結線される素子に、RB-IGBT（Reverse Blocking IGBT）を用いることで回路を簡素化できる。電流の通過素子数が少ないため低損失化が実現でき、インバータを構成するときに必要なゲート駆動回路の電源数も低減できるメリットがある。

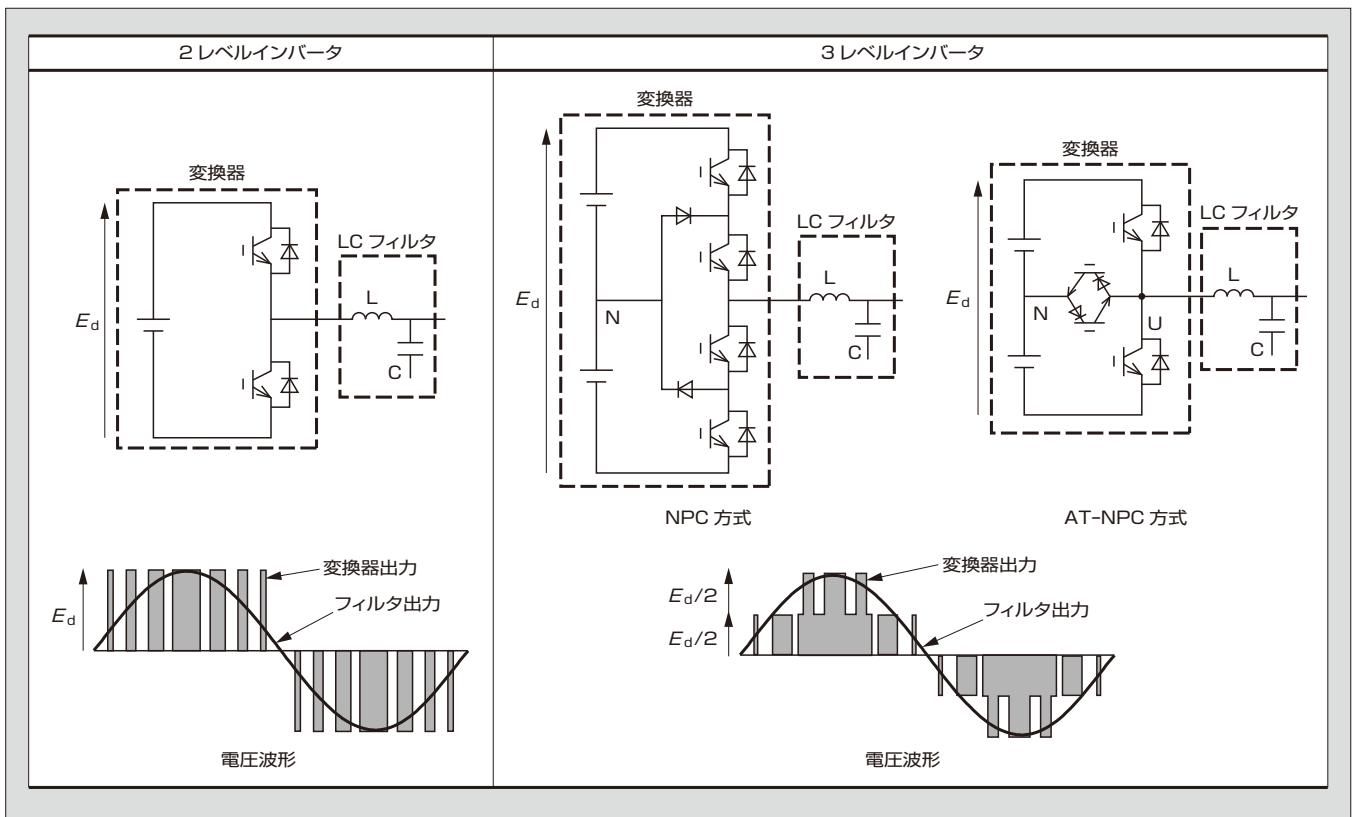


図1 2レベルインバータと3レベルインバータの回路および電圧波形

富士電機のトッランナーモーター —プレミアム効率モーター「MLU・MLK シリーズ」—

Top Runner Motor of Fuji Electric—
Premium Efficiency Motor “MLU and MLK Series”

館 憲弘* TACHI Norihiro

近年、地球の温暖化を防止するためエネルギーの使用を削減する動きが世界的にある。日本も「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(省エネ法)においてトッランナー方式を採用し、対象機器を拡大してきた。三相誘導電動機(モーター)についても2015年からその対象となる。

富士電機は、スロット形状やコア材などの最適化によってトッランナー方式による効率基準(トッランナー基準)を満足したモーター「MLU・MLKシリーズ」を発売した。本製品は低騒音化も実現し、省エネルギー(省エネ)以外にも環境に配慮した製品である。

1 特徴

トッランナー方式によるプレミアム効率モーター「MLU・MLKシリーズ」の主な仕様を表1に示す。

(1) 高効率化

トッランナー基準を満足させるため、銅損、鉄損、機械損失を低減し、効率を3~10%向上させた。

モーター効率の国際規格として、IEC(国際電気標準会議)のIEC 60034-30“回転電気機械—第30部:単一速度三相かご形誘導電動機の効率クラス(IEコード)”がある。現在の標準モーターの効率は、図1に示す標準効率(IE1)のレベルである。これに対し、本製品はプレミアム効率(IE3)のレベルを満足している。

(2) 従来品との互換性

モーターは既設品の置換え需要が多いため、従来品と寸

表1 「MLU・MLKシリーズ」の主な仕様

項目	仕様
外被構造	全閉外扇形 屋内または屋外
形式	MLU(鋳鉄フレーム) MLK(鋼板フレーム)
出力	0.75~375(kW)
極数	2, 4, 6
枠番号	80M~355M
定格	S1(連続)
耐熱クラス	155(F)
回転方向	CCW(負荷側から見て反時計方向)
塗装色	マンセルN1.2(黒ツヤなし)

* 富士電機株式会社技術開発本部製品技術研究所回転機技術開発部

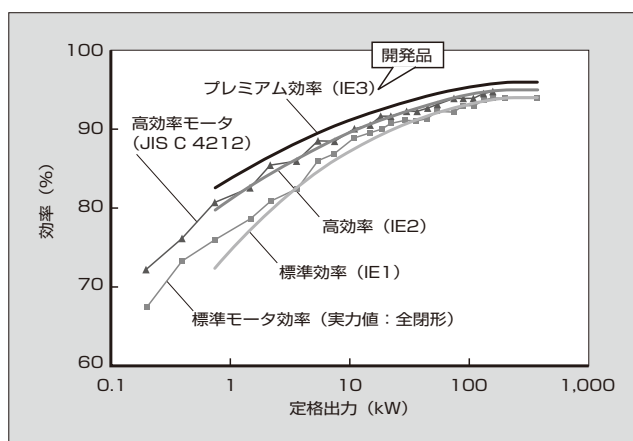


図1 効率クラス別のモーター効率値

法および電気特性の互換性が重要である。

外国の規格における寸法の規定は、枠番号(ベース底から軸中心までの距離に対する軸や脚幅などの寸法)で、出力・極数ごとの寸法の規定はない。一方、2013年度中に制定予定のJIS C 4213では、枠番号および出力・極数ごとの各部寸法の規定となる予定である。

JIS C 4213に準拠した上で、本製品は置換えを容易にするため、既設の電磁開閉器の遮断電流を超えない仕様とした。

(3) 低騒音化

作業環境を改善するために、機器の低騒音化の要求は強く、機器の駆動源であるモーターの低騒音化のニーズは強い。MLUでは、鋳鉄製のフレームの採用による剛性の向上や冷却ファンの最適化などによって、従来品(IE1)に対し、5~8dBの低騒音化を実現している。なお、鋼板フレームを採用したMLKにおいても最大で騒音を5dB低減している。

(4) 長寿命化

耐熱クラスF種の絶縁を標準で採用したことにより、モーターの絶縁寿命は従来品(IE1, IE2)に対し、約4倍長くなった。また、周囲温度50℃での使用も可能にした。

(5) 耐サージ性の向上

ファン・ポンプの省エネ化を図るには、流量調整をダンパーなどで行うよりもインバータによる回転速度調整で行う方が効果的である。そこで、本製品は、パルス状の急峻(きゅうしゅん)な波形の電圧を発生するインバータで駆動しても問題ないように耐サージ性を約10%向上させた。

(6) 耐食性の向上

MLUでは、軽量化のためアルミニウム合金ダイカストフレームを採用するメーカーが多い中で、耐食性を向上させるために鋳鉄フレームを採用した。

2 モータ高効率化の背景と規格

図2に示すように、モータは、ファン・ポンプなど各種産業機器の駆動源として広く使用されている。これは、全世界の電力消費の40%を占めている(図3)。仮に全てのモータの効率を1%向上させると、全世界における1年間の電力消費量を800億kWh、CO₂排出量を3,200万t削減できる。

日本では、インバータ技術と組み合わせたシステムとして省エネを推進してきたため、モータそのものの高効率化はほとんど手付かずの状態であった。このため、高効率モータ(JIS C 4212)の年間の出荷実績は、わずか1~3%程度であった。

一方、欧米をはじめとするエネルギー消費大国にとって、モータの高効率化は、電力消費量やCO₂排出量を削減するための非常に効果的な施策と位置付けられ、モータ単体での効率向上を図る動きが活発化している。

米国では高効率(IE2)とプレミアム効率(IE3)の合計が90%となっている。欧州ではIE2の普及が過半数を

超えていると想定される上、2015年にはIE3での規制が始まる予定である。これに対し、日本もようやくトップランナー基準による効率規制が始まることになる。

日本でのトップランナー基準は、IE3をベースにししながら日本独自の電源である3種類の定格電源を考慮した規制となっている。すなわち、200V/50Hzおよび220V/60Hzの効率規制値はIE3に準拠しているのに対し、200V/60HzはIE3に係数を掛けたIE2相当の値を規制値とし、また、目標基準値を欧州ほど細かいものではなく、およそ1/3の36区分に分けて設定している。

3 背景となる技術

図4に、モータの構造断面と損失低減策を示す。モータの各部で損失が発生しており、効率規制値を満足させるためには、損失が発生する全ての部位で低減する必要がある。特に、全体の約50%を占める銅損(一次および二次)と約30%を占める鉄損の低減が重要である。

(1) 銅損の低減

一次銅損は、モータ巻線の電気抵抗と電流とによるジュール損失である。固定子スロット形状の最適化や、巻線の充填率を向上させて導体の断面積を増やすこと、およびコイルエンドを短縮して導体長を短縮することにより、電気抵抗を小さくして銅損を低減した。

また、回転子スロット形状を見直し、二次銅損の低減とトルク特性および電流特性の最適化との両立も図った。

(2) 鉄損の低減

鉄損は、鉄心内の磁束の変化によって発生する渦電流損とヒステリシス損との和である。材料自体の鉄損を減少するためハイグレードな低損失電磁鋼板を採用し、鉄心内の磁束の変化を少なくするために、その材料に合った磁束バランスの最適化を図った。

また、鉄心各部に応力が加わることで損失が増加するため、応力を緩和させることも重要である。例えば、フレームに圧入後のしめしろを見直すことでコア変形を小さくし、損失の増加を防いでいる。

鉄損を低減するには、固定子と回転子の溝数(スロットコンビ)やスロット寸法など多くのパラメータを考慮

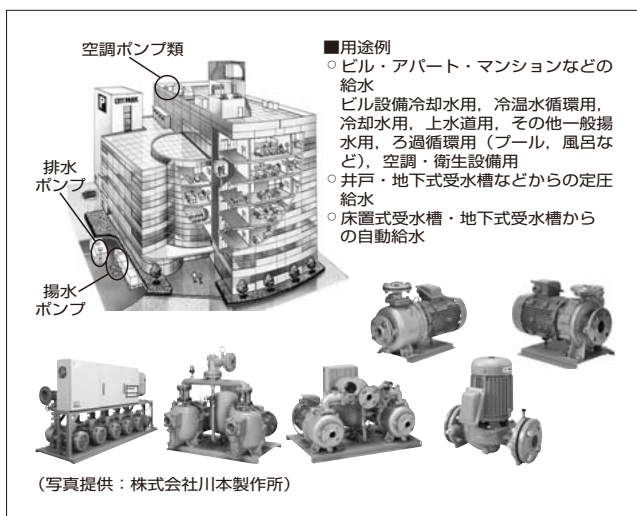


図2 モータの使用例

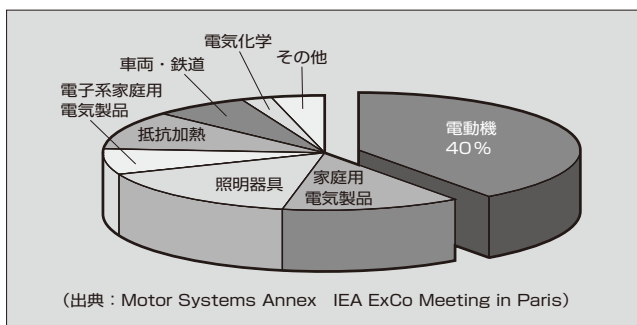


図3 全世界の電力消費の内訳

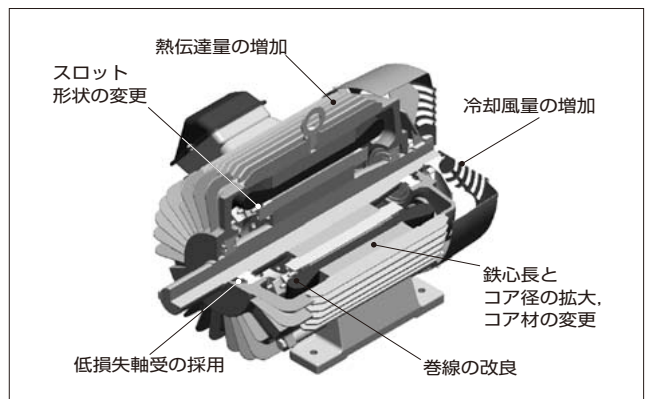


図4 モータの構造断面と損失低減策

する必要がある。また、銅損とのバランスや電気特性を考慮しながら鉄損を大きく低減することが重要となるため、既存の計算プログラムと磁界解析とを使い分けて最適化を図った。

(3) 冷却ファンによる機械損失の低減

モーターには外皮冷却用のファンがあり、その回転によって発生する風損は電動機の損失に含まれる。ファンによる冷却を必要最小限にするためには、設計段階でモーター温度を高精度に算出する必要がある。このため、熱流体回路網法を採用した熱設計を行い、冷却ファンによる損失の低減を図った。熱流体回路網法は、流体回路網計算で風速を算出したのち、熱回路網計算で各部の温度を算出する方法である。

(4) 損失の製品間のばらつきの低減

トッランナー基準では加重平均で効率規制値を満足させる必要があるため、製品個々の損失ばらつきを小さく抑えることも重要となる。製造時の加工精度や管理を厳しくすることで、ばらつきを抑えている。

発売開始時期

2013年6月1日

お問い合わせ先

富士電機株式会社
パワエレ機器事業本部ドライブ事業部
電話 (03) 5435-7059



(2013年10月7日 Web 公開)

ストライカ引外し式限流ヒューズ付高圧交流負荷開閉器 (LBS)

High-Voltage Air Load Break Switch (LBS)

菊地 征範* KIKUCHI Masanori

高圧交流負荷開閉器は、高圧受配電回路において負荷電流を開閉する装置のことである。中でもストライカ引外し式^(注1)限流ヒューズ付高圧交流負荷開閉器 (LBS) は、負荷電流の開閉から短絡電流の遮断に至る幅広い電流領域で開閉・保護性能を持っている。そのため、キュービクル式高圧受電設備の主遮断装置や変圧器の一次側の保護装置など、さまざまな用途で使用されている。特に、受電容量 300 kVA 以下の PF・S 形高圧受電設備に用いられる主遮断装置のほとんどに LBS が採用されている。

近年、太陽光発電設備の高圧側回路にも LBS が使用され、用途がさらに拡大している。また、配電盤の小型化により、LBS をはじめとした配電盤に収納される機器に小型化が求められている。

今回、富士電機ではこれらの需要に応え、小型で使いやすいさを向上させた LBS を開発した。

1 特徴

LBS の外観を図 1 に、仕様を表 1 に示す。特徴は次に示すとおりである。

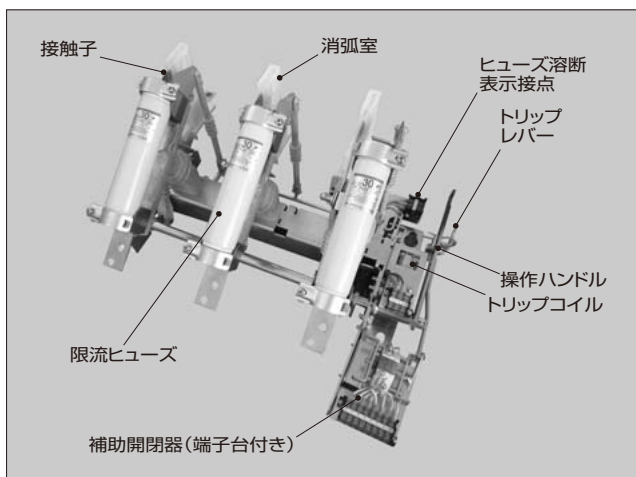


図 1 LBS

〈注 1〉 ストライカ引外し式：限流ヒューズは、溶断したときに溶断表示棒が飛び出す構造となっている。この飛び出す力を利用して負荷開閉器のリンク機構を動作させ、負荷開閉器を開極する方式をいう。

* 富士電機機器制御株式会社開発・生産本部開発統括部開発部

表 1 LBS の仕様

項目	仕様	
形式	LBS-6 A/200 (F)	LBS-6 A/210 (F)
定格電圧	3.6/7.2kV (50/60Hz)	
定格耐電圧	60kV	
定格電流	200A	
定格投入遮断電流	12.5kA (1回)	
定格開閉容量	負荷電流 200A (200回) 励磁電流 10A (10回) 充電電流 10A (10回) コンデンサ電流 50A (200回, 6%リアクトル付き)	
過負荷遮断電流	1,100A (1回)	
操作方式	手動フック操作	
接点構造	通電接点、アーク接点一体形	
消弧方式	細隙、ガス冷却消弧	
適用ヒューズ形式	JC-6/5 ~ 75	JC-6/100
ヒューズ定格電流	G5 ~ G75 A	G100 A
準拠規格	JIS C 4611	

(1) 小型化

従来品に比べて奥行寸法を約 40mm 縮小し、容積で 10% 小型化した。

(2) 限流ヒューズ交換時の作業性・安全性の向上

従来品は、接触子部と限流ヒューズ部が一体で、開閉操作時は接触子の動作に合わせて限流ヒューズ部も動く構造のため、開極状態では限流ヒューズ取付部が容易に動き、不安定な状態で限流ヒューズの交換作業を行っていた。開発品は、接触子部と限流ヒューズ部を分離し、限流ヒューズ部は動かない構造とした。これにより、限流ヒューズを交換する時の作業性および安全性を向上させた。

(3) 取扱性の向上

(a) 限流ヒューズの溶断時に動作する接点出力は、従来品では動作時に一瞬しか出力しなかった。開発品では動作した後、限流ヒューズを交換するまで継続して出力するようにした。これにより、この出力を使用する配電盤の制御回路に設けていた自己保持回路を省略できるようにした。

(b) 相間バリアの取付けをねじ止めからワンタッチ構造に変更し、取付け時の作業性を向上させた。

(c) 補助回路の配線位置を LBS 本体の右側に集約するとともに、補助開閉器用の端子台を設け、配電盤側

の配線時の作業性を向上させた。

(4) 環境対応

RoHS 指令^(注2)に対応し、環境有害物質を含まないものにした。

2 背景となる技術

2.1 主回路可動部の構造見直し

小型でシンプルな構造を実現するため、主回路可動部の構造を抜本的に見直した。図2に接触子と可動部の構

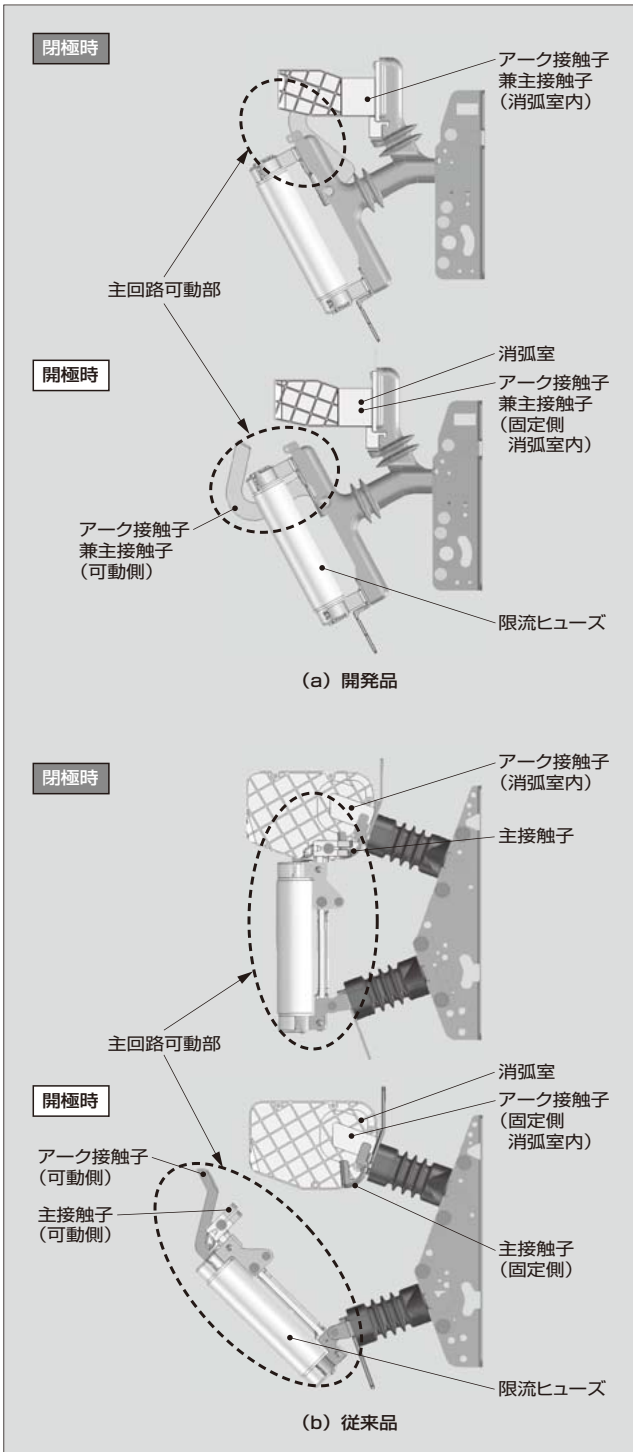


図2 接触子と可動部の構造

造を示す。

従来品では開閉操作により、アーク接触子、主接触子および限流ヒューズが一体で動くことから、奥行寸法の小型化の障害となっていた。そこで、開発品では可動接触子とアーク接触子とを一体化するとともに、限流ヒューズが動かない構造とし、可動部分の動作量を小さくし、奥行寸法の小型化を達成した。

2.2 接触子の一体化

従来品は、負荷電流が流れる主接触子と、電流遮断時に消弧室内でアークを消弧するアーク接触子とを並列に接続した構造となっている。これにより、アーク消弧と負荷電流の通電にそれぞれ役割を分担していた。

開発品では、製品を小型化するためにアーク接触子と主接触子を一体化する構造にした。この構造にするためには、消弧と負荷通電に関する要求性能を両立することが課題であり、消弧室の形状・通電温度・接点消耗・開閉耐久性などを細分化して考察し、最適な材料・形状・表面処理・接触圧力など、一体化するための要素技術を確認し、解決した。

2.3 消弧部の構造

消弧部の構造は、従来品と同様に、発生したアークを消弧室の細隙部で消弧する方式とした。

製品の小型化のためには、各機能部位の小型化が不可欠である。気中遮断においては、消弧室内でアークを消滅させる必要があるが、消弧室の容積を縮小すると、アークの消弧が不完全になり遮断不能につながる。したがって、消弧室の長さや接触子の乖離（かいり）速度の関係を最適化し、乖離後の極間絶縁距離を確保することなどが課題となる。

消弧部の構造を図3に示す。消弧室の内部には固定側接触子とアークガイドを設け、可動側接触子は曲線形状とし、アークは常にアークガイドと可動側接触子の先端

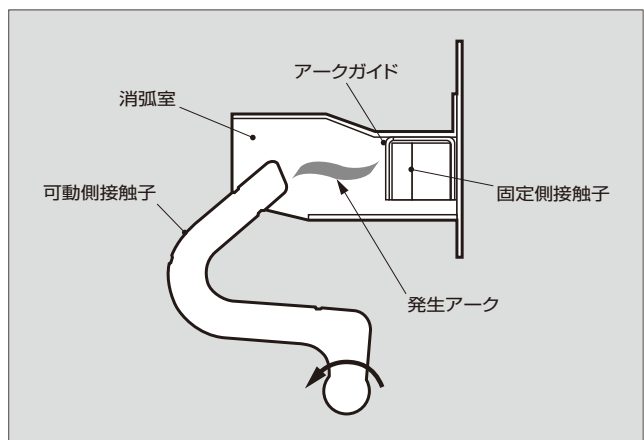


図3 消弧部の構造

〈注2〉 RoHS 指令：電気・電子機器における特定有害物質の使用制限についての EU（欧州連合）の指令

部との間で発生するようにした。アークが消弧するために必要な距離や可動側接触子の回転速度など、構造の各要素の相互影響を考察して消弧室の大きさを最適化した。その結果、開発品は安定した開閉遮断性能を維持したまま、従来品に比べて消弧室の容積を投影面積でほぼ半分までにまで縮小した。

図4に、この消弧部の構造での200Aの負荷電流開閉

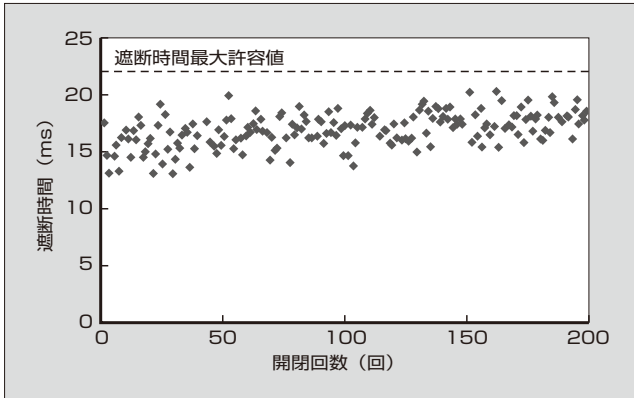


図4 負荷電流開閉回数と遮断時間の関係

試験における負荷電流開閉回数と遮断時間の関係を示す。図の遮断時間最大許容値とは、消弧室内でこの時間までに遮断が完了していなければならない値である。開閉回数が200回に至るまで遮断時間は最大許容値以下であり、安定して遮断が完了していることが分かる。

発売開始時期

2013年10月

お問い合わせ先

富士電機機器制御株式会社
 管理本部事業統括部業務部受配機器課
 電話 (03) 5847-8060

新製品紹介



ディスクリート RB-IGBT 「FGW85N60RB」

Discrete RB-IGBT “FGW85N60RB”

原 幸仁* HARA Yukihito

富士電機の独自技術により量産化を実現した RB-IGBT (Reverse-Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor : 逆阻止 IGBT) をディスクリートパッケージに搭載した「FGW85N60RB」を発売する (図 1)。

無停電電源装置 (UPS: Uninterruptible Power Supply) や太陽光発電用パワーコンディショナ (PCS: Power Conditioner) などでは、電力変換効率をいかに高めるかが課題である。中性点クランプを持つ AT-NPC (Advanced T-type Neutral-Point-Clamped) (図 2) がその手段の一つである。AT-NPC において、中性点クランプに RB-IGBT を使用すると電力変換効率をさらに高めることができる。

富士電機では、RB-IGBT を搭載した AT-NPC 用モジュールを製品化している。FGW85N60RB は、ディスクリート製品用に最適化した RB-IGBT を TO-247 パッケージに搭載した製品であり、ディスクリート構成でも高効

率な AT-NPC を実現できる。

1 特徴

- (1) 業界初の 600 V ディスクリート RB-IGBT
- (2) 業界標準の TO-247 パッケージ
- (3) 低インダクタンスパッケージ

ディスクリート製品は、モジュール製品よりパッケージ内部のインダクタンスが低いため、外付けゲート抵抗を高くしなくてもターンオフサージを抑制し、ターンオフ損失を低減できる。

- (4) 逆並列接続により双方向スイッチの形成が可能

逆方向スイッチは 2 個の RB-IGBT で形成できるので、IGBT 2 個とダイオード 2 個で構成した従来品よりも、導通損失を大幅に低減し (図 3)、発生損失を約 3% 低減した (図 4)。

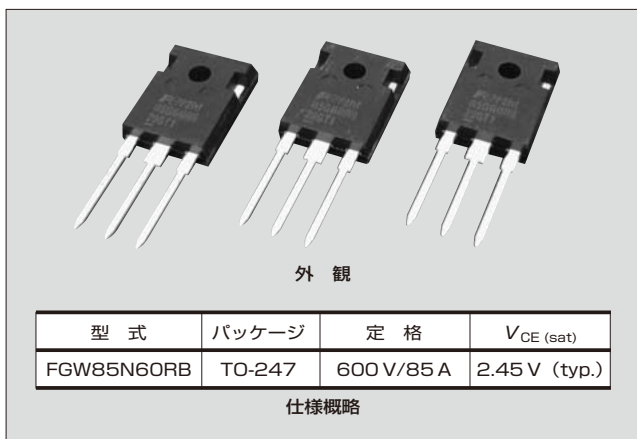


図 1 「FGW85N60RB」の外観と仕様概略

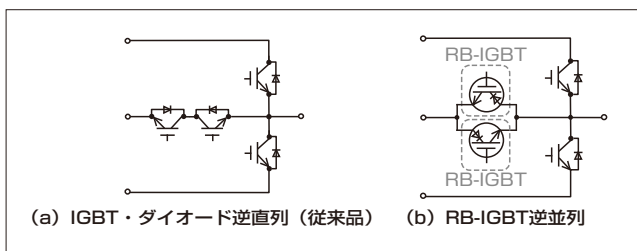


図 2 AT-NPC による電力変換回路

* 富士電機株式会社電子デバイス事業本部事業統括部ディスクリート・IC 技術部

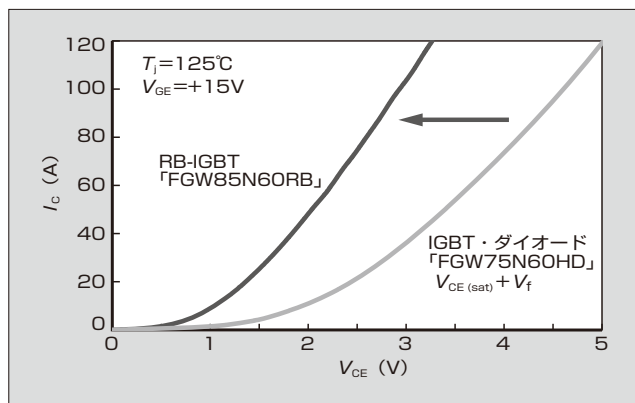


図 3 $V_{CE}-I_C$ 特性

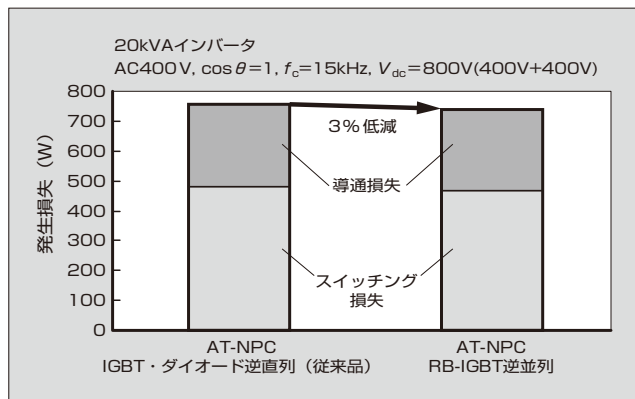


図 4 インバータ回路損失比較

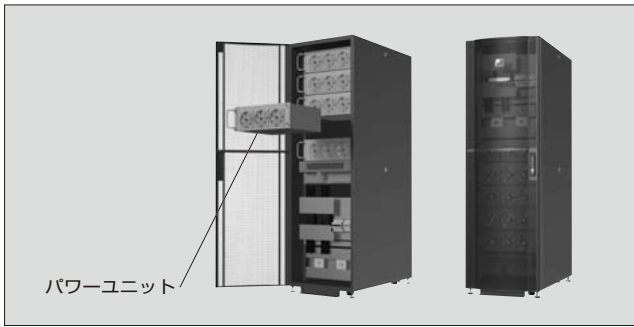


図5 UPS の例

2 適用事例

UPS への適用事例について述べる。図5に示すUPSは、パワーユニット（20kVA/台）を増設していく積上げ構造であり、容量を最大200kVAまで拡張できる。AT-NPCで構成するコンバータおよびインバータの中性点クランプにFGW85N60RBを採用し、導通損失を低減するとともに、UPSの効率を改善している。

3 背景となる技術

3.1 チップ技術

通常のIGBTではpn接合がダイシング面と接しているため、コレクタ-エミッタ間に逆バイアスを印加するとダイシングにより生じた高密度の結晶欠陥が起因となって大量のキャリアが発生し、電圧を保持することができない。したがって、通常のIGBTに逆電圧を印加するためには、逆電圧を保持するためのブロックダイオードが必要であった。RB-IGBTではスクライプ領域に深いp+分離層を高温で長時間の拡散工程により形成しており、逆バイアスを印加しても空乏層がダイシング面にまで拡大しないので逆耐圧特性を確保している（図6）。深いp+分離層を形成する工程では、高温で長時間の拡散を行うため、n⁻ドリフト層に多数の結晶欠陥が生じる。結晶欠陥が多くなると漏れ電流が大きくなるため、工程の見直しにより、結晶欠陥が発生しにくいp+分離層を形成する工程を確立した。これにより、安定した生産性を確保した。

一方、RB-IGBTはコレクタ-エミッタ間の逆電圧印加時の漏れ電流が、順電圧印加時の漏れ電流より大きい。逆漏れ電流の発生メカニズムは次のとおりである。

- (a) コレクタ-エミッタ間に逆電圧を印加する。
- (b) 裏面p層にホールが生成され、エミッタ領域に電子が流れる。
- (c) 電子がpnpトランジスタのベース電流となる。
- (d) 裏面p層でさらにホールが生成され、大きな逆漏れ電流となる。

ゲートに順電圧を印加することで逆漏れ電流を低減できる（図7）。ゲートに順電圧を印加すると、エミッタ領域に流れる電子はpnpトランジスタのベース電流とはな

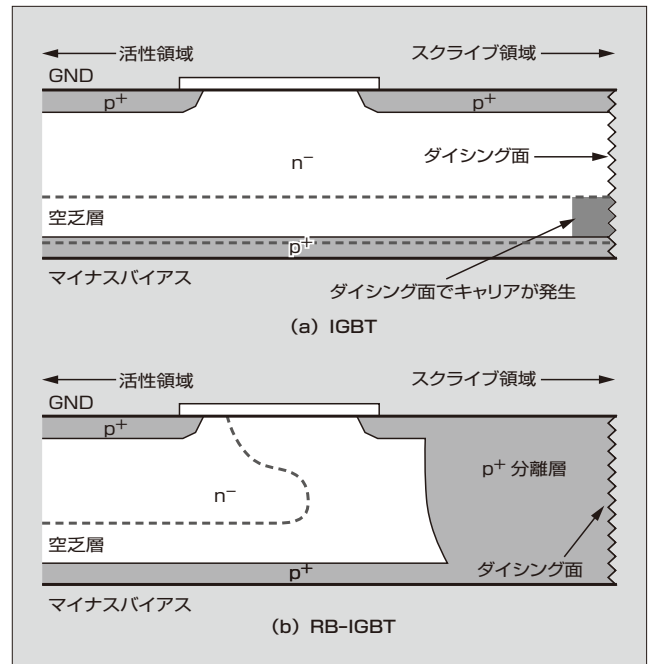


図6 RB-IGBT チップ断面構造

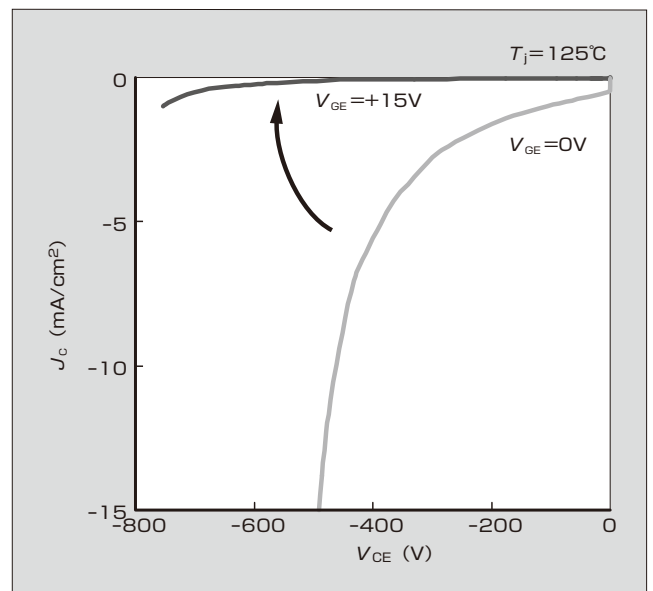


図7 RB-IGBT 逆漏れ電流

らず、チャネルへと流れるため、裏面p層からホールが生成されない。

また、ゲートにしきい値電圧以上の順電圧を印加することにより、従来のダイオードと同様の逆回復動作が可能である。

3.2 パッケージ技術

FGW85N60RBのパッケージには、ディスクリートIGBT「High-Speed Vシリーズ」と同様に、業界標準のTO-247パッケージを適用している。このため、従来のIGBTからの置き換えが容易である。

FGW85N60RBは、ディスクリートIGBT High-Speed Vシリーズと同様に、チップ下のダイはんだには鉛フリー

はんだを使用しており、RoHS 指令^{〈注〉}や EU 2002/95/EC 指令に完全に対応している。また、同時にヒートサイクルやパワーサイクルなどの熱応力が掛かる信頼性試験で、高い耐量があることを確認している。

〈注〉 RoHS 指令：電気・電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限についての EU（欧州連合）の指令

発売開始時期

2013 年 10 月 1 日

お問い合わせ先

富士電機株式会社電子デバイス事業本部
事業統括部ディスクリート・IC 技術部
電話（0263）28-8734



略語（本号で使った主な略語）

AMB	Active Metal Brazing	
AT-NPC	Advanced T-type NPC	
DCB	Direct Copper Bonding	
EBSD	Electron Back Scatter Diffraction	
ECU	Electronic Control Unit	電子制御装置
EMI	Electromagnetic Interference	電磁障害
ESD	Electrostatic Discharge	静電気放電
EV	Electric Vehicle	電気自動車
FWD	Free Wheeling Diode	
HEV	Hybrid Electric Vehicle	ハイブリッド自動車
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ
IPM	Intelligent Power Module	
IPS	Intelligent Power Switch	
LBS	Load Break Switch	高圧交流負荷開閉器
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ
NPC	Neutral-Point-Clamped	
PCS	Power Conditioner	パワーコンディショナ
PiN	P-intrinsic-N	
PWM	Pulse Width Modulation	パルス幅変調
RB-IGBT	Reverse-Blocking IGBT	逆阻止 IGBT
SAT	Scanning Acoustic Tomograph	超音波探傷装置
SBD	Schottky Barrier Diode	
SOP	Small Outline Package	
SR	Switched Reluctance	
TIM	Thermal Interface Material	
UPS	Uninterruptible Power Supplies	無停電電源装置

主要事業内容

発電・社会インフラ

環境にやさしい発電プラントとエネルギーマネジメントを融合させ、スマートコミュニティの実現に貢献します。

発電プラント

火力・地熱・水力発電設備、原子力関連機器、太陽光発電システム

社会システム

エネルギーマネジメントシステム、電力量計

社会情報

情報システム

産業インフラ

産業分野のさまざまなお客様に、生産ライン・インフラ設備に関わる、「省エネルギー化」、「ライフサイクルサービス」を提供します。

変電

受変電設備、産業電源設備

機電システム

産業用ドライブシステム、加熱・誘導炉設備、工場エネルギーマネジメントシステム、データセンタ、クリーンルーム設備

計測制御システム

プラント制御システム、計測システム、放射線管理システム

設備工事

電気・空調設備工事

パワーエレクトロニクス

エネルギーの効率化や安定化に寄与するパワーエレクトロニクス応用製品を提供します。

ドライブ

インバータ・サーボ、モータ、EV用システム、輸送システム

パワーサプライ

無停電電源装置 (UPS)、パワーコンディショナ (PCS)

器具

受配電・制御機器

電子デバイス

産業機器・自動車・情報機器および新エネルギー分野に欠かせないパワー半導体をはじめとする電子デバイスを提供します。

半導体

パワー半導体、感光体、太陽電池

ディスク媒体

ディスク媒体

食品流通

冷熱技術をコアに、メカトロ技術やITを融合し、お客様に最適な製品とソリューションを提供します。

自販機

飲料・食品自動販売機

店舗流通

流通システム、ショーケース、通貨機器

次号予定

富士電機技報 第87巻 第1号

特集 産業・社会に貢献する計測・制御ソリューション

*「技術成果と展望」は、第87巻 第2号(6月発行)でお送りする予定です。

富士電機技報企画委員会

企画委員長 江口 直也

企画委員幹事 瀬谷 彰利

企画委員 荻野 慎次 森岡 崇行 片桐 源一 根岸 久方

吉野 稔 尾崎 覚 鶴田 芳雄 久野 宏仁

須藤 晴彦 吉田 隆 橋本 親 眞下 真弓

安納 俊之 大山 和則

特集委員 鶴田 芳雄 澤田 睦美 井川 修 多田 元

事務局 柳下 修 木村 基 小野 直樹 山本 亮太

富士電機技報 第86巻 第4号

平成25年12月20日印刷 平成25年12月30日発行

編集兼発行人 江口 直也

発行所 富士電機株式会社 技術開発本部
〒141-0032 東京都品川区大崎一丁目11番2号
(ゲートシティ大崎イーストタワー)

編集・印刷 富士オフィス&ライフサービス株式会社内
「富士電機技報」編集室
〒191-8502 東京都日野市富士町1番地
電話 (042) 585-6965
FAX (042) 585-6539

発売元 株式会社 オーム社
〒101-8460 東京都千代田区神田錦町三丁目1番地
電話 (03) 3233-0641
振替口座 東京 6-20018

定価 735円(本体700円・送料別)

*本誌に掲載されている論文を含め、創刊からのアーカイブスは下記URLで利用できます。

富士電機技報(和文) http://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html

FUJI ELECTRIC REVIEW(英文) <http://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する商標または登録商標である場合があります。

© 2013 Fuji Electric Co., Ltd. Printed in Japan (禁無断転載)

No.1 技術成果と展望

新しい年を迎えて	2 (2)
年頭特別対談	4 (4)
成果と展望	12 (12)
ハイライト	18 (18)
電気エネルギー技術	27 (27)
熱エネルギー技術	48 (48)
制御技術	54 (54)
基盤・先端技術	67 (67)
略語・商標	76 (76)

No.2 特集 創エネルギー技術 —発電プラントと新エネルギー—

【特集に寄せて】復興後の電力供給と電力産業の課題	内山 洋司	87 (3)
【現状と展望】創エネルギー技術の現状と展望	米山 直人	88 (4)
火力・地熱発電所のプラント技術	尾上 健志 山形 通史	上野 康夫 94 (10)
最新の地熱タービンにおける耐食性・性能向上技術	森田 耕平	佐藤 雅浩 98 (14)
地熱熱水利用バイナリー発電システムにおけるシリカスケール対策技術	川原 義隆 柴田 浩晃	久保田康幹 102 (18)
火力発電所向け蒸気タービンの最新技術	和泉 栄 森山 高志	池田 誠 107 (23)
一軸式コンバインドサイクル発電設備用全含浸絶縁水素間接冷却タービン 発電機	山崎 勝 新倉 仁之	谷藤 怜 113 (29)
大規模太陽光発電システム技術	中川 雅之	項 東輝 118 (34)
風力発電用のパワーコンディショナおよびコンバータにおける回路・制 御技術	梅沢 一喜 上原 深志	山田 歳也 124 (40)
風力発電用永久磁石同期発電機	真下 明秀 星 昌博	梅田 望緒 129 (45)
新規ニーズに対応した燃料電池	腰 一昭 黒田 健一	堀内 義実 134 (50)
水車・発電機の最新技術	塚本 直史 高橋 正宏	藤井 恒彰 139 (55)
水力発電プラントの機器更新技術		高橋 正宏 144 (60)
汚染土壌乾式除染・減容技術	神坐 圭介	富塚 千昭 148 (64)
新製品・新技術紹介		152 (68)
略語・商標		154 (70)

No.3 特集 エネルギーマネジメントシステム (EMS)

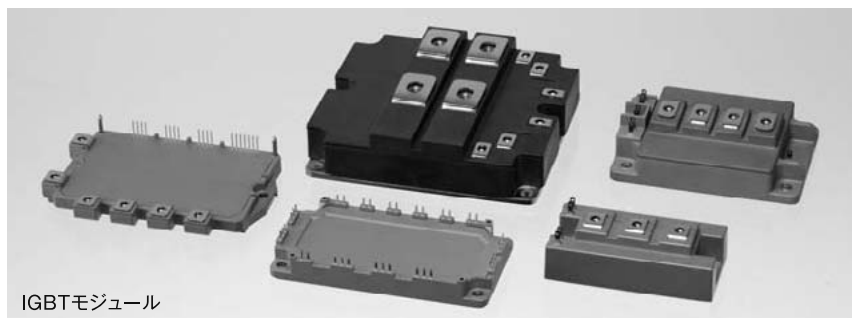
【特集に寄せて】 xEMS への期待	馬場 旬平	159 (3)
【現状と展望】 エネルギーマネジメントシステム (EMS) の現状と展望	白川 正広 小林 直人 桑山 仁平	160 (4)
北九州スマートコミュニティ創造事業におけるダイナミックプライシング社会実証.....	大賀 英治 樺澤 明裕	166 (10)
製紙工場におけるコージェネレーション設備のエネルギー最適運転システム.....	竜田 尚登 金平 芳司	173 (17)
製鉄所のエネルギー管理を最適化する「鉄鋼 EMS パッケージ」	鳴海 克則 木村 隆之 渡辺 拓也	177 (21)
大型商業施設向け EMS	小松原 滋 項 東輝 山田 康之	182 (26)
クラウド型 EMS によるエネルギー管理支援サービス	東谷 直紀	188 (32)
店舗の EMS を実現する「エコマックスコントローラ」	城戸 武志 神崎 克也	193 (37)
統合 EMS プラットフォームによる最適運用計画機能構築フレームワーク	川村 雄 堀口 浩 大野 健	197 (41)
分散電源系統における需給制御システム技術.....	勝野 徹 飯坂 達也 林 巨己	202 (46)
太陽光発電の発電量予測技術.....	石橋 直人 飯坂 達也 勝野 徹	207 (51)
新製品紹介論文		
太陽光発電システム用ストリング監視ユニット「F-MPC PV」.....		211 (55)
新型スマートメータ「Azos GFI」.....		213 (57)
コンパクト形インバータ「FRENIC-Mini (C2S) シリーズ」の拡充		216 (60)
住宅用火災(煙式)・ガス・CO 警報器「KN-95」.....		219 (63)
高圧真空遮断器「MULTI.VCB」(固定形).....		222 (66)
高速・大容量ネットワーク対応コントローラ「MICREX-SX SPH3000MG」		225 (69)
略語・商標.....		228 (72)

No.4 特集 エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

【特集に寄せて】 小型・高速・高効率への果てしなき挑戦	岩崎 誠	233 (3)
【現状と展望】 パワー半導体の現状と展望	高橋 良和 藤平 龍彦 宝泉 徹	234 (4)
1,700 V 耐圧 SiC ハイブリッドモジュール	小林 邦雄 北村 祥司 安達 和哉	240 (10)
超小型・高信頼性 All-SiC モジュール.....	仲野 逸人 日向裕一朗 堀尾 真史	244 (14)
175℃連続動作を保証する IGBT モジュールのパッケージ技術	百瀬 文彦 齊藤 隆 西村 芳孝	249 (19)
3 レベル電力変換器用大容量 IGBT モジュール	陳 土爽清 小川 省吾 磯 亜紀良	253 (23)
ハイブリッド自動車用 IPM のパッケージ技術	郷原 広道 荒井 裕久 両角 朗	258 (28)
TIM プリバースト IGBT モジュール	磯 亜紀良 吉渡 新一	263 (33)
第 2 世代 LLC 電流共振制御 IC「FA6A00N シリーズ」	陳 建 山田谷政幸 城山 博伸	267 (37)
ワンチップ リニア制御用 IPS「F5106H」	中川 翔 大江 崇智 岩本 基光	273 (43)
解説		
3 レベル電力変換方式		277 (47)
新製品紹介論文		
富士電機のトップランナーモータープレミアム効率モーター「MLU・MLK シリーズ」		278 (48)
ストライカ引外し式限流ヒューズ付高圧交流負荷開閉器 (LBS)		281 (51)
ディスクリット RB-IGBT「FGW85N60RB」.....		284 (54)
略語.....		287 (57)

未来の集積

独自のパワーエレクトロニクス技術と用途の可能性を凝縮した、富士電機のパワー半導体。高耐圧・大容量化、低電力損失化、小型軽量パッケージ化を進めているこのキーデバイスは、太陽光発電・風力発電などの創エネルギー分野、各産業や家庭に求められる省エネルギー分野、ハイブリッドカー・電気自動車ほかの次世代交通システムなど、様々な場面で貢献しています。その先には、スマートコミュニティをはじめ資源循環型持続可能社会の実現という、未来の目標が。人の営みと地球が共生していくために、エネルギー関連事業を通じた富士電機の挑戦はこれからも続きます。



IGBTモジュール

富士電機のパワー半導体

Innovating Energy Technology



エネルギー技術を、究める。

電気、熱エネルギー技術の革新を通じて、
エネルギーを最も効率的に利用できる製品を創り出し、
安全で安心して暮らすことのできる
持続可能な社会の実現に貢献していきます。

FE 富士電機