

# パワー半導体の現状と展望

## Power Semiconductors in the Present and Future

井出 哲雄 Tetsuo Ide

高橋 良和 Yoshikazu Takahashi

藤平 龍彦 Tatsuhiko Fujihira

富士電機では、CO<sub>2</sub>削減などの地球環境保護や再生可能エネルギーの発展に貢献する“エネルギー・環境”分野を事業の柱としている。その中でも、特にパワーエレクトロニクスの基幹部品であるパワー半導体に力を入れており、低損失化・低ノイズ化・小型化・高信頼性化・低コスト化を目指して開発している。本稿では、アドバンスド NPC 回路用 IGBT モジュールや HEV・EV 用 IGBT モジュールなどのパワーモジュール、SJ-MOSFET 搭載のパワーディスクリート、擬似共振制御パワー IC といったパワー半導体の、技術開発の現状と展望について述べる。

Fuji Electric regards energy and the environment as key fields in its business strategy. We offer a wide range of products that can contribute to the development of renewable energy and to protection of the global environment through reduced CO<sub>2</sub> emissions. Fuji Electric puts a lot of effort into the advanced power semiconductors, which are the core components in power electronics. Power semiconductors from Fuji Electric offer low loss, low noise, compact size, high reliability, and low price. This report introduces current and future trends in power semiconductor technology, focusing on power modules such as IGBT modules for advanced NPC (neutral-point-clamped) inverters and the IGBT modules for hybrid and electric vehicles, discrete power devices with superjunction MOSFETs, and quasi-resonant control ICs.

### 1 まえがき

REN21 (21 世紀のための自然エネルギー政策ネットワーク) は、世界の自然エネルギーに関する最新状況を取りまとめた『世界自然エネルギー白書 2011 年版』“Renewables 2011 Global Status Report, GSR2011”を 7 月 12 日に公表した。これは、世界 100 か国以上の研究者の報告に基づき、REN21 が毎年発行している白書である。

白書によると、再生可能エネルギー（水力、風力、太陽光、地熱など）市場は拡大しており、2010 年には総電力の 2 割弱を提供していると報告している。特に太陽光発電の新規導入は、2009 年の 2 倍に達したという。2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災による原子力発電に関わる問題は、世界的にもクリーンで安定したエネルギーの必要性を顕在化させ、風力発電や太陽光発電を筆頭とした持続的、安定的な“再生可能エネルギー”の拡大推進に拍車を掛けた。いわゆる“エネルギー革命”が到来したといえる。

富士電機では、“エネルギー・環境”事業へ注力し、これらを通じて社会に貢献することを目指している。特に、電力エネルギーの有効利用を目的とするパワーエレクトロニクス（パワエレ）と、その基幹部品であるパワー半導体へは、CO<sub>2</sub>削減などの地球環境保護や再生可能エネルギー分野の発展に貢献する重要事業の一つとして力を入れてきている。

最近では、パワエレの応用分野は、家電製品、電気鉄道、FA システム、無停電電源装置（UPS）などから、直流送電や風力発電、太陽光発電のような発電・送電・給電の分野まで広がっており、パワエレとパワー半導体の重要性は今後もさらに高まるものと考えている。

CO<sub>2</sub>削減および再生可能エネルギー拡大の推進のために

パワー半導体が果たすべき役割は、パワエレ機器の電力利用効率を高め、機器の省電力化と利用拡大に効果を発揮することである。より具体的には、パワー半導体製品の低損失化と低ノイズ化、小型化・高信頼性化・低コスト化、そして製品系列と用途の拡大を進めなければならない。

本稿では、富士電機の代表的なパワー半導体製品であるパワーモジュール、パワーディスクリート、パワー IC を中心に、その現状と展望を述べる。

### 2 パワーモジュール

図 1 に、この 1 年の成果となるパワーモジュール製品の応用例を示す。富士電機が得意とする中容量市場では、パワエレ機器の用途別に特色あるパワーモジュール製品を開発している。さらに高耐圧・大容量市場には、風力発電向け、電気鉄道向けの製品ラインアップを充実した。

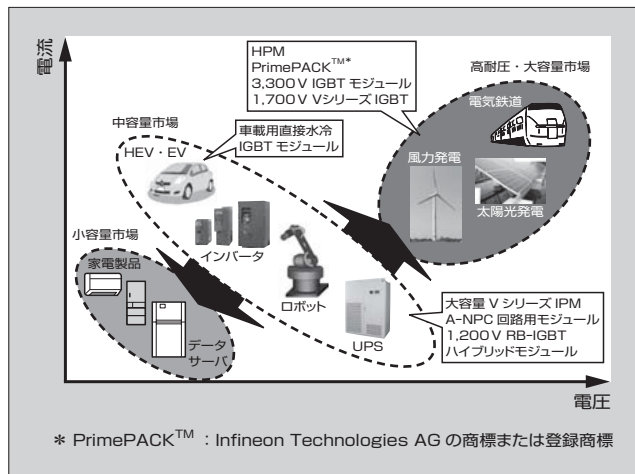


図 1 パワーモジュール製品の適用例

開発した製品および技術のそれぞれについて紹介する。

## 2.1 アドバンスト NPC 回路用 IGBT モジュール

アドバンスト NPC (A-NPC) 回路用 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールは、NPC (Neutral-Point-Clamped) インバータの提案と実用化に伴い、RB-IGBT (Reverse-Blocking IGBT) を双方向スイッチとして中間点クランプに使用した複合 (12 in 1) モジュールである。この A-NPC 回路用 IGBT モジュールは、メインスイッチの電圧定格は 1,200 V で、中間の双方向スイッチには定格電圧が 600 V の RB-IGBT を適用している。図 2 に、従来型 NPC 3 レベルインバータ回路と A-NPC 3 レベルインバータ回路を示す。これらは、従来の NPC インバータ回路に比べて、全ての電流経路において導通する素子数が半分になるため、導通損失が低減できる。また、双方向スイッチを逆直列スイッチ (ディスクリート構成) から RB-IGBT にした A-NPC 3 レベルインバータ回路では、損失がさらに低減できる。

## 2.2 1,200 V 耐圧 RB-IGBT

600 V 耐圧の RB-IGBT は、スクライプ領域にダイシング面を覆うような深い p<sup>+</sup> 分離拡散層を形成することにより、逆バイアス印加時に空乏層がダイシング面に到達するのを阻止することによって逆方向耐圧を確保している。

これに対し、1,200 V RB-IGBT の分離層は、デバイス表面からのボロンの深い拡散と裏面側からの V 溝エッチングの組み合わせにより逆方向耐圧を確保している。この 1,200 V RB-IGBT とメインスイッチに 1,700 V/200 A IGBT を組み合わせたモジュールも作製し、評価を行っている。損失の低減とともに、三次元 CAD シミュレーションを活用して、主電流端子を逆方向にオーバーラップするよう端子形状を改善することにより、サージ電圧を抑制している。RB-IGBT および RB-IGBT を搭載した IGBT モジュール製品は、UPS、PCS (Power Conditioning System)、マトリックスコンバータなどのアプリケーションへの適用が期待できる。

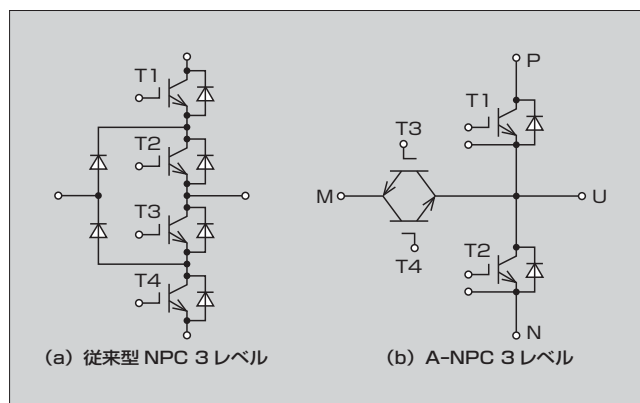


図 2 従来型 NPC 3 レベルインバータ回路と A-NPC 3 レベルインバータ回路

〔注 1〕 3 レベルインバータ技術 (353 ページ「解説 1」参照)

ンへの適用が期待できる。

今後は、幅広い電力変換分野への展開を目指して開発を推進していく。

## 2.3 車載用直接水冷 IGBT モジュール

ハイブリッド自動車 (HEV)、電気自動車 (EV) 用途として幅広く顧客展開できる標準 IGBT モジュール系列を開発している。パワーチップには、第 6 世代 IGBT 「V シリーズ」チップを搭載し、チップ表面にはニッケルめっきを施し信頼性を向上させている。放熱には銅の直接水冷フィンを適用している。フィン形状については、熱流体シミュレーションを用いてチップ温度と圧力損失の比較を行い、最適なフィン形状を選択している。今後は、900 A の大電流定格域のモジュール製品の開発も予定しており、インバータシステムに幅広く適用できるよう系列化を進める。

## 2.4 高効率風力発電システム用 IGBT モジュール

風力発電システムには、高効率風力発電システム用 IGBT モジュールを製品化している。風力発電システムは、設置場所の制約から今後は洋上風力発電システムが主流となり、大容量化が進められている。従来のダブルフェッド方式の風力発電システムでは、変換効率や電力品質面での問題や、ギアボックスが故障しやすいといった問題があり、ダイレクト方式の風力発電システムが本格導入され始めている。図 3 に、ダイレクト方式とダイレクト+マルチレベル方式の風力発電システムの例を示す。

富士電機では、中国清華大学と共同で、マルチレベル方式風力発電システムの研究を実施している。このマルチレベル方式風力発電システムは、発電機の 2 次巻線を多巻線として、コンバータモジュールを直列に接続して高電圧の出力電圧を得る方式で、昇圧用変圧器が省略でき、連系リアクトルが小型化できるという特徴がある。また、今回製品化した風力発電システム用 3,300 V IGBT モジュールの

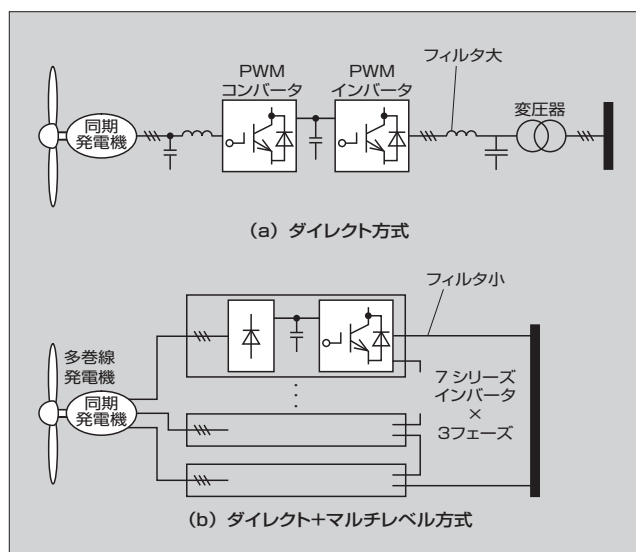


図 3 ダイレクト方式風力発電システムの例

適用により、さらに低損失・高信頼のシステムが構成できる。

今後も、新システムの研究・提案と同時に新システムに適した半導体デバイスの開発を進めていく。

### 2.5 HPM・PrimePACK™

高耐压・大容量市場には、HPM (High Power Module) および PrimePACK™ の製品系列拡大を行っている。本製品は、第6世代 IGBT「V シリーズ」チップの搭載により、業界最高水準の低オン電圧と同時に、低スイッチング損失を達成している。

V シリーズ HPM は、3 種類の Family パッケージに 1in1 および 2in1 モジュールの回路構成で、1,200 V と 1,700 V 耐压クラス、電流容量 600 ~ 3,600 A の製品を系列化した。PrimePACK™ は、2in1 および チョップモジュールの回路構成で、1,200 V と 1,700 V 耐压クラス、電流容量 600 ~ 1,400 A の製品を系列化した。

PrimePACK™ は、超音波端子接合法による銅端子と銅回路パターンとの直接接合を実施している。従来の銅端子接合法であるはんだ接合構造においては、はんだ材と銅材の熱膨張係数差により、はんだ層に最も大きな応力が集中する。このため、温度サイクルを繰り返すとはんだ層にクラックが発生し、銅端子が取れてしまうという不具合が起こることがある。これに対して超音波端子接合法では、接合面の熱膨張係数に差がないことから温度サイクル耐量の著しい改善を達成でき、高パワー密度かつ高信頼性が達成できている。

### 2.6 大容量「V シリーズ」IPM

IPM (Intelligent Power Module) 製品では、第6世代 IGBT「V シリーズ」チップを搭載した製品系列を大容量領域 (400 A/600 V, 200 A/1,200 V) まで拡大した。

この大容量 V シリーズ IPM は、制御 IC の短絡保護機能を高速化することで、スタンダード IGBT モジュール用の V シリーズ IGBT チップの  $V_{CE(sat)}$  とターンオフ損失  $E_{off}$  のトレードオフを改善したことにより、PWM インバータ動作時の発生損失を従来品 (R シリーズ IPM) に比べて 20% 以上低減している。さらに、IGBT の入力容量低減、制御 IC の温度特性の改善、パッケージの内部回路配線パターンの最適化を行い、スイッチング損失と放射ノイズのトレードオフを改善している。保護機能は、従来と同じ短絡保護を含む過電流保護、制御電源電圧保護、チップ過熱保護機能を搭載しており、アラーム要因ごとに識別ができるようになっている。

現在、V シリーズ IGBT は、43 型式 (600 V/1,200 V) の製品を系列化し市場に展開しており、今後もさらなる特性改善とパッケージ系列の拡充を図っていく。

〈注2〉 PrimePACK™ : Infineon Technologies AG の商標または登録商標

### 2.7 Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュール

Si-IGBT・SiC-SBD ハイブリッドモジュールは、PIM (Power Integrated Module) の FWD (Free Wheeling Diode) の替わりに、ユニポーラデバイスの SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) を適用したモジュールである。600 V 系および 1,200 V 系の 5 型式を開発した。

SiC-SBD を適用することにより、ダイオードの逆回復損失が大幅に低減できるほか、対向アームの IGBT のターンオン時のターンオンピーク電流がほとんどないために、ターンオン損失が大幅に低減できる。炭化けい素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) などのワイドバンドギャップ (WBG) デバイスの優れた高周波動作と高温動作特性を最大限に発揮させるためには、小型、低熱抵抗、高温動作を実現する高信頼性モジュール構造が必要不可欠である。

富士電機では、これらの特性を実現する新しいパッケージ技術の開発を行っている。新モジュール構造は、多数の銅ピンを備えたパワー基板、厚銅箔 (はく) DCB (Direct Copper Bonding) 基板、エポキシ樹脂から成る。回路基板に接続された銅ピンは、同一径のアルミワイヤと比較して電気抵抗が低く、さらに配線の長さも短いため、従来のワイヤボンディング構造と比較して配線を集約することができ、パワーモジュールは大幅な小型化が可能となる。さらに、厚銅箔 DCB 基板採用による低熱抵抗化と、エポキシ樹脂充填により高信頼性を達成している。

スイッチング特性評価のために、従来構造のモジュール (Si-IGBT, Si-FWD) と新構造モジュール (Si-IGBT, SiC-SBD) にて電気的特性試験を実施している。図 4 に取得したスイッチング波形を示す。ユニポーラデバイスである SiC-SBD の多数キャリアだけが伝導に関与するという特徴により、逆回復を含むターンオン時において、新構造モジュールのサージ電流ピークは極端に減少している。また、ターンオフ時においても、サージ電圧の低減が認められた。

今後の WBG デバイスの適用製品の拡大をにらみ、低コ

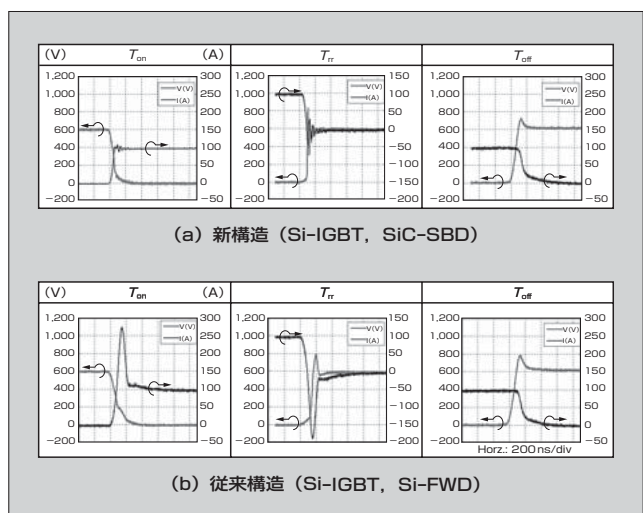


図 4 スイッチング波形比較



スト化を含めた開発を推進していく。

### ③ パワーディスクリート

パワーディスクリート製品の最近の成果には、低損失 SJ-MOSFET の製品化と宇宙用 p チャネルパワー MOSFET の製品化が挙げられる。

図 5 に、各種パワーデバイスの特性比較を示す。

#### 3.1 SJ-MOSFET [Super-JMOS]

SJ (Superjunction)-MOSFET [Super-JMOS] は、従来のパワー MOSFET に比べ、素子耐圧  $V_B$  と単位面積当たりのオン抵抗  $R_{on} \cdot A$  とのトレードオフ関係を大幅に改善することが可能であり、導通損失を大きく低減できることから、情報通信機器用電源などへの採用が急速に進んでいる。

SJ-MOSFET は、既存の MOSFET よりもゲートードレイン容量  $C_{GD}$  が極端に小さいために、実機動作時のターンオフ  $dV/dt$  が大きくなってしまいう問題がある。ターンオフ  $dV/dt$  を小さくするためにゲート抵抗  $R_g$  を大きくするような回路改善では、結果的に素子がターンオフするときに発生する損失  $E_{off}$  が増大してしまう。したがって、素子設計として実機動作時の  $E_{off}$  とターンオフ  $dV/dt$  とのトレードオフ関係を改善し、ターンオフ損失を低減することができれば、低導通損失と低スイッチング損失を両立した低損失素子が実現できる。Super-JMOS は、理論的観点から SJ-MOSFET の表面構造最適化を試み、 $E_{off}$  とターンオフ  $dV/dt$  とのトレードオフ関係の改善を行うことができ、実機評価において極めて高い水準の  $R_{on} \cdot A$  と  $E_{off}$  が得られたことを確認した。

今後は、車載用など幅広い用途に採用できるよう、性能向上を進めていく。

#### 3.2 宇宙用 p チャネルパワー MOSFET

宇宙用 p チャネルパワー MOSFET は、既に製品化している宇宙用 n チャネルパワー MOSFET で培った技術を用いている。宇宙環境下で動作するパワー MOSFET の要

求事項には、一般的に求められる低損失に加え、電離放射線<sup>(6)</sup>や高エネルギー荷電粒子（重粒子）<sup>(7)</sup>に対する耐性などの高信頼性がある。

製品化した宇宙用 p チャネルパワー MOSFET は、ゲート酸化膜へのダメージを抑える低温プロセスと、一般向け MOSFET で採用している低オン抵抗技術とを適用し、電離放射線耐性や重粒子耐性などの宇宙環境要求性能を持ち、かつ一般パワー MOSFET レベルの低オン抵抗を実現している。製品ラインアップは、4 種類のパッケージに合計 12 型式をそろえている。

### ④ パワー IC

パワー IC においては、第 4 世代擬似共振制御 IC [FA5640] を開発し、5 機種の製品をシリーズ化した。

液晶 TV 用の電源では、表示画面にノイズが出ないように低ノイズのスイッチング電源方式が適用されている。消費電力の少ない小型液晶 TV では、部品コストが安い擬似共振方式の電源が多用されている。

富士電機では、AC100V や AC230V の商用交流電源から直接 IC の起動電流を供給し、起動後にはこの電流をオフできる高耐圧起動素子を内蔵した 8 ピンの擬似共振 IC の系列化を推進している。第 4 世代擬似共振制御 IC [FA5640 シリーズ] は、軽負荷時の低電力化と音鳴り対策を強化している。音鳴り対策は、ボトムスキップ音鳴り対策とバースト時音鳴り対策を実施しており、かつ外部調整部品の削除を可能とした使いやすい製品となっている。

今後もさらなる低待機電力化要求に対応し、電源制御 IC の製品化・系列化を進めていく。

### ⑤ あとがき

富士電機は、パワーエレクトロニクス技術の革新と普及を通じて、CO<sub>2</sub> 削減などの地球環境保護や再生可能エネルギー分野の発展に貢献していきたいと考えている。パワー半導体はその柱の一つを担う基幹部品であり、本稿ではパワー半導体の主要製品を中心に現状と展望を述べた。

パワー半導体が CO<sub>2</sub> 削減などの地球環境保護や再生可能エネルギー分野の発展に貢献するためには、その低損失化や低ノイズ化、小型化、高信頼化、低コスト化、ならびに製品系列と用途の拡大をこれまで以上に加速していかなければならない。今後も技術開発にさらに力を入れていくとともに、技術を生み出せる人材、技術を革新できる人材の育成に努めていく所存である。

#### 参考文献

- (1) Nabae, A. et al. "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter", IEEE Trans. on industrial applications, 1981, vol. IA-17, no.5, p.518-523.
- (2) Takei, M. et al. "The Reverse Blocking IGBT for Matrix Converter with Ultra-Thin Wafer Technology", Proc. of

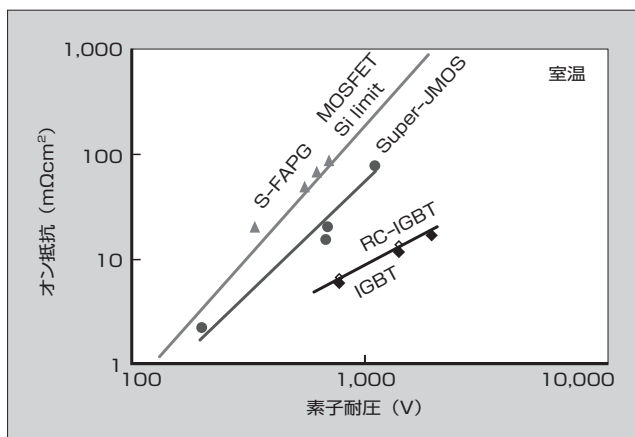


図 5 各種パワーデバイスの特性比較

ISPSD '03, 2003, p.156-159.

- (3) Nakazawa, H. et al, "Hybrid Isolation Process with Deep Diffusion and V-Groove for Reverse Blocking IGBTs", ISPSD '11 proceedings, 2011, p.116-119.
- (4) Horio, M. et al. "New Power Module Structure with Low Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices" PCIM Europe, 2011, Proceeding CD, p.229-234.
- (5) Fujihira, T. Theory of Semiconductor Superjunction Devices, Jpn. J. Appl. Phys., 1997, vol.36, p.6254-6262.
- (6) J. E. Gover, "Basic Radiation Effects in Electronics Technology," Colorado Springs, CO, Proc. 1984 IEEE NSREC Tutorial Short Course on Radiation Effects, July 22, 1984.
- (7) A. E. Waskiewicz, et al. "Burnout of Power MOSFET with Heavy Ions of Californium-252," IEEE Trans. Nucl. Sci., Dec. 1986, vol.NS-33, no.6, p.1710-1713.



**井出 哲雄**

パワー半導体の開発に従事。現在、富士電機株式会社電子デバイス事業本部松本工場技術統括部長。



**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 Si デバイス開発センター長。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、IMAPS 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。





\*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。