

富士電機技報

FUJI ELECTRIC JOURNAL

2021
Vol.94 No.

4

特集 自動車電動化・エネルギーマネジメントに貢献する
パワー半導体



特集 自動車電動化・エネルギーマネジメントに貢献する パワー半導体

SDGs（Sustainable Development Goals）が目指す持続可能な社会の実現と気候変動問題の解決に向けて、脱炭素化への世界的な取り組みが急速に進んでいます。富士電機は2019年に、“脱炭素社会の実現”“循環型社会の実現”“自然共生社会の実現”を柱とする“環境ビジョン2050”を発表し、クリーンエネルギー技術・省エネルギー製品の普及拡大を通じてこのビジョンの実現を目指しています。

“脱炭素社会の実現”については、CO₂ガス排出量削減のための自動車電動化ならびにエネルギーの安定的かつ効率的利用のためのパワーエレクトロニクス機器の高効率化が必須です。これらの電動化、高効率化に富士電機のパワー半導体はキーデバイスとして貢献しています。

本特集では、富士電機の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

① xEV 向け RC-IGBT モジュール、② 第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール「Dual XT」、③ 第7世代「Xシリーズ」大容量 IGBT-IPM「P631」



目 次

特集 自動車電動化・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】エネルギーシステムの改善を方向付ける パワー半導体	225 (3)
--------------------------------------	---------

Blaabjerg, Frede

【現状と展望】自動車電動化・エネルギーマネジメントに貢献する パワー半導体	228 (6)
--	---------

大西 泰彦 ・ 宮坂 忠志 ・ 井川 修

xEV 向け 100 kW クラス超小型 RC-IGBT モジュール「M677」	236 (14)
--	----------

安達 新一郎 ・ 小幡 智幸 ・ 東 展弘

xEV 向け超小型 RC-IGBT モジュールの冷却技術	240 (18)
------------------------------	----------

立石 義博 ・ 小山 貴裕 ・ 吉田 大輝

第 7 世代「X シリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール「Dual XT」	246 (24)
--	----------

江袋 佑太 ・ 山野 彰生 ・ 掛布 光泰

第 7 世代「X シリーズ」大容量 IGBT-IPM「P631」	251 (29)
----------------------------------	----------

皆川 啓 ・ 唐沢 達也 ・ 唐本 祐樹

第 3 世代小容量 IPM「P633C シリーズ」	256 (34)
---------------------------	----------

上村 威 ・ 大橋 英知 ・ 田村 隆博

次世代小容量 IPM 用 3ch-HVIC 技術	261 (39)
--------------------------	----------

上西 顕寛 ・ 山路 将晴 ・ 澄田 仁志

第 2 世代ディスクリート SiC-SBD シリーズ	267 (45)
----------------------------	----------

渡邊 荘太 ・ 橋爪 悠一 ・ 島田 隆

第 2 世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET	272 (50)
-----------------------------------	----------

内田 貴史 ・ 奥村 啓樹 ・ 成田 舜基

新製品紹介論文

大容量無停電電源装置「UPS7500WX」	277 (55)
-----------------------	----------

船舶 IoT システム	280 (58)
-------------	----------

略語・商標	283 (61)
-------	----------

富士電機技報 vol.94 2021 年 総目次	
--------------------------	--

Contents

Power Semiconductors Contributing to Vehicle Electrification and Energy Management

[Preface] Power Semiconductors are Making the Direction of Energy System Improvements	225 (3)
--	-----------

Blaabjerg, Frede

Power Semiconductors Contributing to Vehicle Electrification and Energy Management	228 (6)
---	-----------

ONISHI, Yasuhiko MIYASAKA, Tadashi IKAWA, Osamu

“M677” 100 kW-Class Ultra-Compact IGBT Module for xEVs	236 (14)
---	----------

ADACHI, Shinichiro OBATA, Tomoyuki HIGASHI, Nobuhiro

Cooling Technology for Ultra-Compact RC-IGBT Modules for xEVs	240 (18)
--	----------

TATEISHI, Yoshihiro KOYAMA, Takahiro YOSHIDA, Daiki

7th-Generation “X Series” RC-IGBT “Dual XT” Modules for Industrial Applications	246 (24)
--	----------

EBUKURO, Yuta YAMANO, Akio KAKEFU, Mitsuhiro

“P631” 7th-Generation “X Series” High Power IGBT-IPM	251 (29)
---	----------

MINAGAWA, Kei KARASAWA, Tatsuya KARAMOTO, Yuki

“P633C Series” 3rd-Generation Small IPMs	256 (34)
---	----------

KAMIMURA, Takeshi OHASHI, Hidetomo TAMURA, Takahiro

3ch-HVIC Technology for Next-Generation Small IPMs	261 (39)
---	----------

JONISHI, Akihiro YAMAJI, Masaharu SUMIDA, Hitoshi

2nd-Generation Discrete SiC-SBD Series	267 (45)
---	----------

WATANABE, Sota HASHIZUME, Yuichi SHIMADA, Takashi

2nd-Generation 1,700-V SiC Trench Gate MOSFETs	272 (50)
---	----------

UCHIDA, Takafumi OKUMURA, Keiji NARITA, Syunki

New Products

“UPS7500WX” Large-Capacity Uninterruptible Power System	277 (55)
--	----------

EGCS IoT / Remote Monitoring System	280 (58)
--	----------

Abbreviations and Trademarks	283 (61)
-------------------------------------	----------

Volume Contents of FUJI ELECTRIC JOURNAL vol.94, 2021	
--	--

特集に寄せて

Power Semiconductors are Making the Direction of Energy System Improvements エネルギーシステムの改善を方向付ける パワー半導体

Blaabjerg, Frede, Ph.D.

Professor, AAU Energy, Aalborg University, Denmark
デンマーク オールボー大学理工学部エネルギー学科 教授



Modern Power Electronics Era

The modern power electronics evolution started in the mid-fifties last century with the invention of the thyristor, which was based on silicon material and following the technology development and deployment in the society since then – it is very obvious that the power semiconductors have been undergoing a tremendous development in terms of performance improvement and cost reduction – and every time we see an evolution – the consequence will be improved circuits and power electronic based systems having higher efficiencies, faster performance, higher power density and reliability.

Applications are expanding

One of the mega-trends in society is to make it carbon neutral – hopefully already in many countries before 2050-and looking at the future energy generation and consumption mix – the electricity will get a very dominant role due to its flexibility and high efficiency. In some society predictions, the electricity share of the energy mix will be more than doubled – therefore, the role of power electronics and its basic semiconductors have never been more important than what we are looking into now. In the past, renewable generation, industrialization and automation, lighting, railway-transportation, power supplies for computers, power transmission and distribution – just mention some areas-have been driving the technology. In the future, the evolution of EV/HEV's, data centers, battery storage, and lastly Power to X to obtain E-Fuel will demand a huge amount of kW to GW systems – controlled and processed by power electronics.

Design and reliability

Fortunately, the power semiconductors are looking into a constant improvement scenario – both silicon and wide bandgap based devices where the capability will boost in terms of switching speed, blocking volt-

■和文翻訳（富士電機にて作成）

パワーエレクトロニクスの新しい時代

パワーエレクトロニクスの新たな進化は、1950年代半ば、シリコン半導体材料をベースとしたサイリスタの発明から始まった。以降の社会における技術開発とその展開を経て、パワー半導体は性能向上とコスト削減の面で明らかに大きく発展しており、回路の改善とともにパワーエレクトロニクスをベースとしたシステムは進化を重ねて効率化、高速化し、電力密度と信頼性が向上した。

用途の拡大

社会的なメガトレンドの一つは、カーボンニュートラルであり、これは2050年までに多くの国で実現していることが望まれている。電力は、その柔軟性と効率の高さから重要な役割を担うことになると考えられる。一部の社会予測では、エネルギーミックスにおける電力の割合が2倍以上になるとされており、パワーエレクトロニクスとその基本的な半導体の役割がこれまでに重要になっている。これまで、再生可能エネルギー、工業化や自動化、照明、鉄道輸送、コンピュータ用電源、送配電など、さまざまな分野がその技術を牽引（けんいん）してきた。将来的には、EV/HEVやデータセンター、蓄電池貯蔵、そしてE-fuel（E燃料）を得るためのPower-to-Xの普及は、パワーエレクトロニクスによって制御処理されるkW～GW級のシステムを大量に必要とすると考えられる。

設計と信頼性

幸いなことに、パワー半導体は継続的な改善シナリオが検討されている。シリコンデバイスとワイドバンドギャップデバイスの両方でスイッチング速度、耐圧、動作損失の面で性能が向上することによって電力密度も上がり、最終的にはシステムコストが削減される。半導体チップも小さくなるが、そのために堅牢（けんろう）性の課題を解決す

age, lower operating losses, and thereby also higher power density-which in the end will give lower system cost – the die area will also be reduced, which on the other hand can have some robustness challenges to be solved. But the demands are also increasing – we will see applications, which should be operating for many more hours than today (Eg. in renewables 30+ Year of operations are being discussed) in order to have a better system life-cycle performance. It means that we need to understand root causes of failure to deal with reliability challenges and also to model it to make design for reliability. The switching speed and high power density demand rather advanced electro-thermal design methods of the circuits in 3D to fully exploit the potential of power devices. We will also see a trend towards higher operating temperature and the consequences in the components incl packaging, need to be carefully modeled and understood – again in order to do design for reliability.

Will it be standard?

In only very few areas, the power electronic applications do not see significant technology development as it is standardized to a large extent today – as the cost will be constantly reduced to a minimum. Some areas are in massive manufacturing, and the scaling has enabled a considerable cost reduction itself. One area is the lighting which seems to have reached a certain maturity after a tremendous jump in performance due to LED – but also other appliance like areas see not a large jump in technology improvement as the cost is very low per unit. The following years to come maybe see a few areas of maturity, but as the device technology is improving and the power electronic applications are growing with last pace – many areas will not see a final standard. At the same time, more sensors will be included in power electronic systems enabling the measurement of data which can optimize the system operation as well in a smart way monitor the system to avoid unexpected failures – doing condition monitor-

る必要が生じる。しかし、要求も厳しくなっている。用途によっては、システムのライフサイクルパフォーマンスを向上させるのに稼働時間を現在よりも大幅に延長する必要がある（例えば、再生可能エネルギーでは稼働期間として30年以上が必要ではないかと言われている）。すなわち、信頼性の課題に対応するため、障害の根本原因を理解すること、また、信頼性を付与するための設計にはモデル化が必要となる。パワーデバイスの可能性を最大限に活用するには、高スイッチング速度と高電力密度の観点から、電気と熱を考慮した高度な3Dの回路設計法が求められる。また、動作温度が高くなる傾向に対応するため、やはり信頼性を考慮した設計を行うにはパッケージングを含めてコンポーネントを慎重にモデル化して理解する必要がある。

標準化は進むか

パワーエレクトロニクス製品のほとんどの分野で重要な技術開発が行われ、今日では標準化が進み、コストが常に最小限に抑えられている。いくつかの分野では大量生産が行われており、大規模化により、コストの大幅な削減が可能になった。一つは照明分野で、LEDによってパフォーマンスが大幅に向上してからある程度成熟したようであるが、他の電気製品では、1台当たりのコストが非常に低いため、技術の大幅な向上は見られていない。今後数年は、成熟した分野がいくつか見られるかもしれないが、デバイス技術の向上やパワーエレクトロニクス用途拡大のペースが速いため、多くの分野で最終的な標準化には至らないものと考えられる。同時に、これまで以上に多くのセンサがパワーエレクトロニクスシステムに使用され、システム動作の最適化に必要なデータ測定が可能になり、スマートなシステム監視が実現し、状態監視や予防保全により、予期しない障害が回避される。これはコンポーネントだけでなく、例えばシステム内のデータ測定に基づくサービスといった付加価値を、製品やエンドユーザーに与える。

ing and predictive maintenance. That will give added value to the products and end-users – so it is not only the component but also a service, e.g., based on measured data in the system.

Curriculums should be adaptive and train learn how to learn

The pace of generating new knowledge is moving faster and faster – it is also a mirror of the technology development – and curriculums taught today – can be rather outdated within 5-10 years – therefore it is important to constantly assess the need of adjusting electrical engineering programs to teach the student in the best way to understand the possibilities of power electronics – as well as to understand how to design them and the related systems – as the final design is very important in order to stay competitive – the learn hardware-design and test is time-consuming to master it fully as it needs a long time incl practical experience – and we have to find methods to train students that efficiently. Moreover, curriculums have a limited time duration as students also have to be graduated. Therefore I would advocate a little for that curriculums offer-beyond training the students in basics – how to learn more themselves (learn how to learn)– in that way they have skills enabling them fast to understand and apply new knowledge – e.g., use problem based learning in the whole study program as done fundamentally in my university.

Looking decades ahead –power electronics technology will play an essential role in a modern, sustainable and hopefully carbon-neutral world – where every small improvement in power semiconductors can make large impact for many.

時代の変化に適応でき、学び方を学ぶカリキュラム

技術開発の進展によって、新しい知見の生まれるペースはどんどん上がっている。そのため、現在教えられているカリキュラムは5～10年以内に時代遅れになる可能性がある。したがって、パワーエレクトロニクスの可能性やその関連システムを含めた設計方法を学生が理解できるよう最適な方法で教えるために、電気工学プログラムに修正が必要かどうかを、常に評価することが重要である。また、競争力を維持するには最終的な設計が非常に重要となるが、ハードウェア設計と試験方法の習得には、実務経験を含め長い時間がかかるため、効率良く学生を訓練する方法を見いだす必要がある。さらにカリキュラムの期間は、学生が卒業するまでと期間が限られている。したがって、学生に基本的な教育をした上で、自分自身でもっと学ぶ方法（学び方を学ぶ）を身に付けるカリキュラムを提唱したい。例えば、私の大学（オールボー大学）で基本的に全ての学習プログラムで行われている問題解決型学習では、新しい知見をいち早く理解し応用できる能力を身に付けられる。

数十年先を見据えると、パワー半導体で小さな改良を重ねていけば多くの人々に大きな影響がもたらされ、パワーエレクトロニクス技術は、現代の持続可能かつ望ましくはカーボンニュートラルな世界で重要な役割を果たすことになる。

自動車電動化・エネルギーマネジメントに 貢献するパワー半導体

Power Semiconductors Contributing to Vehicle Electrification and Energy Management

大西 泰彦 ONISHI, Yasuhiko

宮坂 忠志 MIYASAKA, Tadashi

井川 修 IKAWA, Osamu

① まえがき

気候変動問題の解決に向けて、脱炭素社会の実現に向けた世界の関心が急激に高まっている。富士電機は2019年に、“脱炭素社会の実現”“循環型社会の実現”“自然共生社会の実現”を柱とする“環境ビジョン2050”を発表し、クリーンエネルギー技術・省エネルギー（省エネ）製品の普及拡大を通じてこのビジョンの実現を目指している。

このビジョンの中でも、“脱炭素社会の実現”については、CO₂ 排出量削減のための自動車電動化およびエネルギーの安定的かつ効率的利用のためのパワーエレクトロニクス機器の高効率化が必須である。これらの電動化、高効率化に富士電機のパワー半導体はキーデバイスとして貢献している。

② 富士電機のパワー半導体

富士電機は、市場や顧客の要求に応じたさまざまなパワー半導体を開発している。図1に富士電機のパ

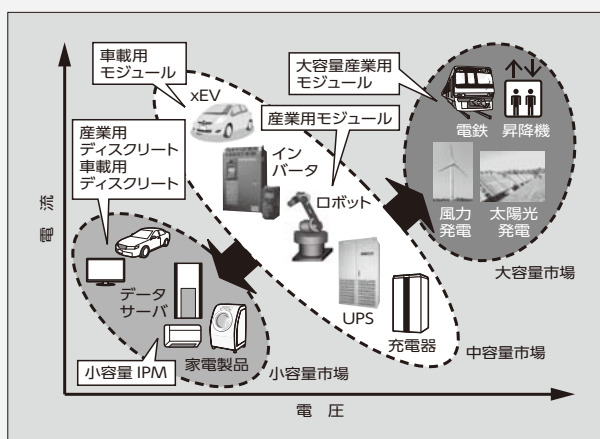


図1 富士電機のパワー半導体製品の応用例

ワー半導体製品の応用例を示す。

2.1 車載分野

図2の世界における動力機関別乗用車の販売台数予想から分かるように、内燃機関搭載車が減り、モータ搭載車が増加すると考えられている。このような中、富士電機は、モータ制御用の車載IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールを開発し、量産している。また、充電器の電力変換や制御用途のパワー半導体製品も開発し、量産している。

一方、内燃機関も環境性能を重視したハイブリッド車などの形で残っていくと予想され、パワートレイン（エンジン、トランスミッション）の油圧バルブなどの駆動電流をオンオフ制御するIPS（Intelligent Power Switch）製品、ガソリン車の吸気系・排気系や、エンジン、トランスミッション、パワーステアリング、ブレーキなどの油圧制御部などに用いられる圧力センサ、ガソリンエンジンの点火制御に用いられるワン

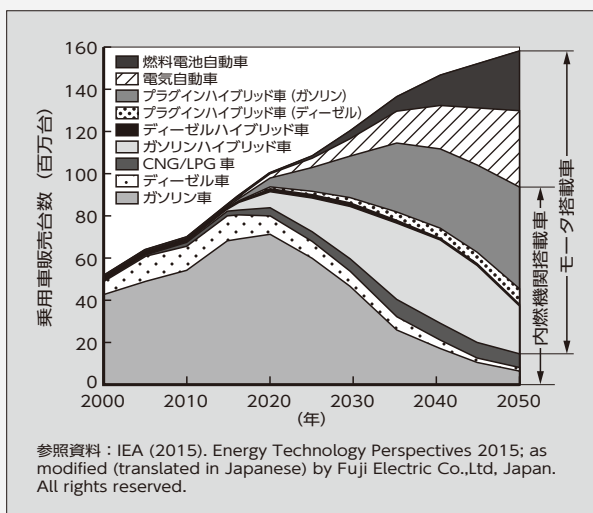


図2 動力機関別乗用車の販売台数予想

(※ 1) IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistorの略である。ゲート部はMOSFETと同じ構造で、酸化物絶縁膜で絶

縁されたゲート部を持つ電圧制御型デバイスである。MOSFETとバイポーラトランジスタの長所を生かしたものである。バイポーラ動作であるため伝導度変調

を用いることができるので、インバータへの応用に十分なスイッチング速度と高耐圧・低オン抵抗を両立できる。

チップイグナイトなどの車載用の製品を開発し、量産している。

2.2 産業分野

産業用途の製品について、容量別に述べる。

小容量の製品分野では、エアコンなど家電製品のモータ駆動用の小容量 IPM (Intelligent Power Module^{(*)2}) を開発し、量産している。また、小容量のパワーコンディショナ (PCS: Power Conditioning System) や無停電電源装置 (UPS: Uninterruptible Power System) などの電力変換装置を主な用途とするディスクリート IGBT や、電源機器などをはじめとするさまざまな機器の電力変換部に用いられるスーパージャンクション (SJ)-MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor^{(*)4}) を開発し、量産している。さらに、LED 照明をはじめとするさまざまな電子機器のスイッチング電源制御のためのパワー IC 製品を開発し、量産している。

中容量の製品分野では、汎用インバータ、工作機械やロボットのサーボモータ制御、業務用エアコンのモータ制御、データセンター向け UPS の電力変換装置などに用いられる産業用 IGBT モジュールを開発し、量産している。この分野では、労働力不足や生産性向上に対応するための自動化投資などに伴い需要の拡大が期待されている。

大容量の製品分野では、風力発電やメガソーラー発電などの再生可能エネルギー向けに、電力変換装置、鉄道車両のモータの可変速駆動装置の IGBT モジュールを開発し、量産している。

これらの製品のほか、それぞれの用途において、既存の Si デバイスと比較して低損失、高耐圧、高温動作といった優れた特徴を持った次世代のパワー半導体である炭化けい素 (SiC^{(*)5}) デバイスも開発し、量産している。

③ パワー半導体の開発状況

富士電機のパワー半導体における最新の開発成果を抜粋してまとめる。

3.1 xEV 向け 100 kW クラス超小型 RC-IGBT モジュール「M677」

電動車 (xEV) の駆動用のモータ制御に必要な車載パワーモジュールは、限られた搭載スペースに配置されることから小型化と高出力化による高電力密度化が求められる。富士電機は、パワーモジュールを高電力密度化する上で必要な半導体やパッケージの技術の開発に取り組んでいる。半導体技術では、IGBT と FWD (Free Wheel Diode^{(*)6}) の二つのチップを 1 チップ化した RC-IGBT (逆導通 IGBT: Reverse-Conducting IGBT^{(*)7}) 技術に取り組んできた。パッケージ技術では、アルミニウムワイヤ配線よりも省スペースで配線可能なリードフレーム配線技術、高出力化に伴う発熱量の増加に対応する冷却技術として、ウォータージャケット一体型アルミニウム冷却器に取り組んできた。これらのさまざまな技術を適用して、100 kW クラスのモータ出力容量をターゲットとした車載用直接水冷型モジュール「M677」を開発し、業界トップクラスの小型化を実現した (図 3)。

M677 は、同等の出力容量の従来品に比べて 50% 以上の体積減を行い、約 2 倍の電力密度を達成し、100 kW クラスの RC-IGBT モジュールを手のひらサイズとなる超小型化を実現した (236 ページ、「xEV 向け 100 kW クラス超小型 RC-IGBT モジュール「M677」」参照)。

3.2 xEV 向け超小型 RC-IGBT モジュールの冷却技術 3.1 節の超小型 RC-IGBT モジュールの開発に当

(*) 2 IPM

Intelligent Power Module の略である。パワー半導体素子に加え、駆動回路、保護回路を内蔵したパワーモジュールである。回路設計の負担を軽減できる上、専用の駆動回路を用いることでパワー半導体素子の性能を最大限に引き出すことができる。

(*) 3 ディスクリート

パワー半導体素子の 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 1 in 1 と呼ばれる回路から構成されるパワー半導体デバイスである。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、小型モータの制御回路などに使われている。

(*) 4 SJ-MOSFET

ドレイン、ソース電極が素子の対向面に形成される縦

型パワー MOSFET において、従来は低濃度の n 層でドリフト層を形成していた。これに対し、ドリフト層を周期的な pn カラム構造にしたものが、スーパージャンクション (SJ)-MOSFET である。SJ-MOSFET は、従来の MOSFET と比較して、素子の $R_{on} \cdot A$ 耐圧とオン抵抗のトレードオフ特性を大幅に改善することができる。

(*) 5 SiC

けい素 (Si) と炭素 (C) の化合物である。3C、4H、6H など多くの結晶の構造多形が存在し、構造によって 2.2 ~ 3.3 eV のバンドギャップを持つワイドギャップ半導体として知られる。絶縁破壊電圧や熱伝導率が高いなどパワーデバイスとして有利な物性を持ったため、高耐圧・低損失・高温動作デバイスが実現できるとして実用化が進められている。

(*) 6 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 の FWD として主に使われている PiN ダイオードは少数キャリアも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。

(*) 7 RC-IGBT

Reverse-Conducting (逆導通) IGBT の略である。モジュールにおいて対で使われる IGBT と FWD をワンチップ化した素子である。IGBT 部と FWD 部が交互に動作するので放熱性に優れ、モジュール内のチップ数を削減できるため、IGBT モジュールの小型化とパワー密度向上につながる。

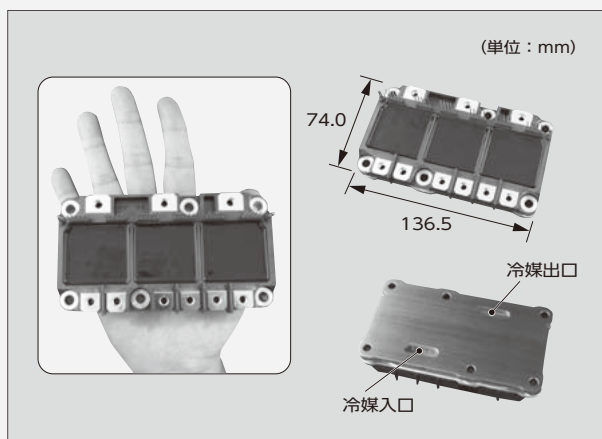


図3 「M677」(開発品)

たって、電力密度向上に伴う発熱量増加に対応した冷却技術の進化は不可欠である。富士電機では、100 kW クラスの xEV 向けパワーモジュール用冷却器の設計技術と小型・薄型化技術を開発した。

図4に富士電機の冷却技術の変遷を示す。第2世代(2015年)冷却技術では、ウォータージャケット一体型フィン構造⁽¹⁾を開発した。これまで別個の部品によって生じていた冷却器のフィンとウォータージャケットの公差を確保するために必要であった隙間をなくすることで、従来よりも冷媒の流速を増やして冷却性能を向上させた。第3世代(2017年)以降の冷却技術では、冷却器のフィン形状を工夫することで、冷却性能をさらに向上させた⁽²⁾⁽³⁾。

今回採用した第4世代の冷却技術では、ピンフィンを採用した。このピンフィンは、第3世代で採用していた波フィンと比較して、冷媒通水部を拡大し、さらにフィンと冷媒との接触面積を約10%増やしたので、冷媒との熱交換量が増加し、冷却性能が高い。しかし、ピンフィンでは波フィンの流路と異なり、冷媒の分岐点や交差部が多数あるため、意図しない冷媒の渦流や

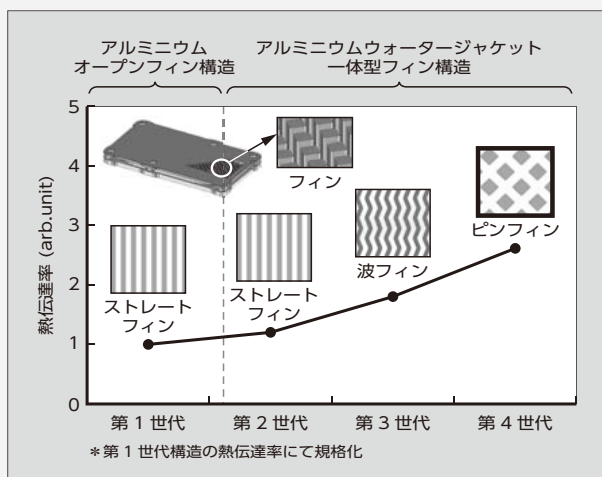


図4 富士電機が採用した冷却器フィンの性能

滞留、流速分布の偏りが発生する。従来よりも精度の高いシミュレーション技術を開発し、これを用いて冷媒の流れを狙いどおりに再現できるように流路を最適化し、目標の冷却性能を実現した。

パワーモジュールは、絶縁基板や冷却器などの異種材料で構成されている。そのため、モジュールは製造工程や通電時の発熱と線膨張率の差によって反りが発生する。冷却器のシール性やインバータへの搭載のしやすさから反りは小さいほどよい。そこで、冷却器の材料に従来よりも変形しづらい材料を採用し、さらに構造を変更することで冷却器を高剛性化し、反り量を70%低減した。モジュールの反りを抑えたことで、冷却器のシール性の向上、インバータ筐体(きょうたい)への搭載性の向上、フランジレス構造を実現した。フランジレス構造により、従来のフランジ構造に存在した突起部が不要になり、部品点数を削減するとともに冷却器を小型化できた(240ページ、「xEV向け超小型RC-IGBTモジュールの冷却技術」参照)。

3.3 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール「Dual XT」

富士電機は、IGBTとFWDの機能をワンチップ化したRC-IGBTの技術と、「Xシリーズ」の技術を組み合わせ、一層の高パワー密度化と高信頼性を両立した産業用XシリーズRC-IGBTモジュールの製品化を進めている。図5にXシリーズRC-IGBT概略図および等価回路図を示す。

汎用インバータや風力発電などのさまざまな容量帯の電力変換装置に対応するため、系列を拡大している。今回、「Dual XT」のパッケージを採用し、定格電圧が1,200 Vと1,700 Vであり、高出力で高い信頼性を持ったRC-IGBTモジュールを実現した。

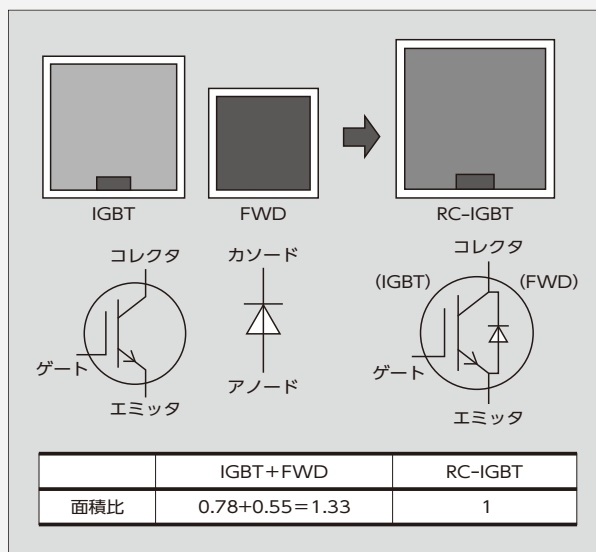


図5 「Xシリーズ」RC-IGBT 概略図および等価回路図

1,200 V/1,000 A X シリーズ RC-IGBT モジュール Dual XT (X シリーズ RC Dual XT) を 1,200 V/600 A V シリーズ IGBT モジュール Dual XT (V シリーズ Dual XT) と比較すると、電力損失と熱抵抗を低減したことから汎用インバータを定常動作させたときの出力電流を 25% 拡大できる。さらに、急激にモータの負荷が大きくなる過負荷動作の比較では、X シリーズ RC Dual XT は V シリーズ Dual XT に比べて出力電流を 34% 拡大できる。

定格電圧 1,700 V の IGBT モジュールが広く使われている風力発電では、10 Hz 以下の低周波運転による温度変化が課題であるが、X シリーズ RC Dual XT では、RC-IGBT の特徴である高放熱性により、接合温度の変化 ΔT_{vj} が従来の IGBT+FWD 方式の 50 °C と比較して 17 °C と大幅に低減している。さらに、熱破壊耐量の指標でもある I^2t 耐量の比較では、従来の IGBT+FWD 方式と比べて約 3 倍に改善している (246 ページ、「第 7 世代「X シリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール「Dual XT」」参照)。

3.4 第 7 世代「X シリーズ」大容量 IGBT-IPM 「P631」

IPM は、駆動機能や保護機能を備えた IGBT モジュールである。富士電機は、IGBT チップの過熱保護機能やアラーム要因識別機能を業界で初めて IPM に内蔵し、高性能化や高信頼性化の要求に応じてきた。中でも、高出力の大容量 IPM は、エレベータなどで利用され、より一層の高性能化や高信頼性化が求められている。このような要求に応えるために、既存の第 6 世代大容量「V シリーズ」IGBT-IPM (大容量 V シリーズ IPM) に対して発生損失を低減し、高温動作化した第 7 世代「X シリーズ」大容量 IGBT-IPM (大容量 X シリーズ IPM) を系列に追加した。図 6 に大容量 IGBT-IPM 「P631」の外観を示す。

従来の大容量 V シリーズ IPM では、定格電圧 600 V 品で 400 A まで、定格電圧 1,200 V 品では

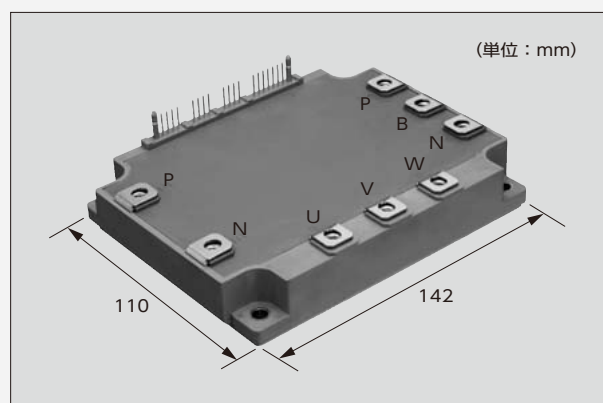


図 6 大容量 IGBT-IPM 「P631」

200 A までのラインアップであった。これに対して、大容量 X シリーズ IPM では、定格電圧 650 V 品で 450 A まで、定格電圧 1,200 V 品で 300 A までにラインアップを拡大する。大容量 X シリーズ IPM におけるチップ温度ワーニング機能やブレーキ部の独立動作機能などの新機能、識別性が向上したアラーム要因識別機能は、今回系列拡大した大容量 X シリーズ IPM でも装備している。

トレンチゲート構造の微細化と薄ウェーハ加工技術によるドリフト層の薄化によって、コレクタ・エミッタ間飽和電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性を改善し、発生損失を低減している。また、ターンオン駆動能力切替え機能の最適化により、スイッチング時の電圧変化率 dv/dt を従来の大容量 V シリーズ IPM と同等以下にし、かつ放射ノイズを抑制し、スイッチング損失を低減した。

高温動作化については、高耐熱ゲルや高信頼性はんだなどの高温動作を可能にする技術を採用し、許容温度を引き上げた。また、IPM に内蔵しているチップ過熱保護機能についても、精度を向上させることで熱破壊に至るリスクを低減して、最高チップ接合温度を 150 °C から 175 °C に引き上げた。これらの発生損失の低減とチップ接合部の許容温度を上げたことにより、出力電流が約 25% 増加できた。

この大容量 X シリーズ IPM の系列製品のラインアップ拡充により、電力変換装置のさらなる高出力化と高機能化とともに、チップ温度ワーニング機能、識別性が向上したアラーム要因識別機能、熱破壊に至るリスク低減などで高信頼性を実現した (251 ページ、「第 7 世代「X シリーズ」大容量 IGBT-IPM 「P631」」参照)。

3.5 第 3 世代小容量 IPM 「P633C シリーズ」

富士電機は、エアコンの三相インバータブリッジ回路に使用する小容量 IPM を製品化している。近年の省エネ性能 (低損失) と EMC 性能に対する要望に応えた第 3 世代小容量 IPM 「P633C シリーズ」を開発した。図 7 に製品の外観を示す。

第 3 世代小容量 IPM には、発生損失と発生ノイズのトレードオフを改善するために最適化した第 7 世代 FWD チップ技術⁽⁸⁾を適用している。

IGBT 自体のターンオン損失と対向する FWD のリカバリ損失は、スイッチング損失全体の 68% を占める。

ターンオン損失とリカバリ損失に対しては、スイッチング速度を速めることによって低減する手法が一般的である。しかし、この手法では、 dv/dt が急峻 (きゅうしゅん) となり放射ノイズが増加する。スイッチング損失の低減と放射ノイズ増加の原因である dv/dt の抑制を両立するために、第 3 世代小容量 IPM では、

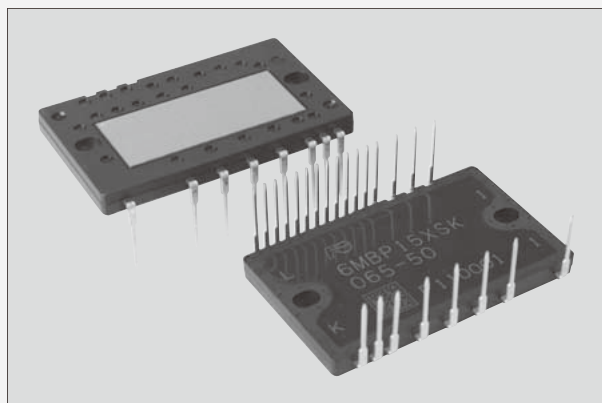


図7 「P633Cシリーズ」

第7世代のFWDチップ技術を基に、ライフタイムキラーとドリフト層の厚さを最適化することで対応している。これにより、第2世代小容量IPMに比べて損失は32%減少し、放射ノイズ増加の原因となる dv/dt は58%低減した。さらに、外来サージに対する破壊耐量や誤動作耐量を向上させるために、新たに開発した3ch-HVIC (High Voltage Integrated Circuit) とLVIC (Low Voltage Integrated Circuit) チップを搭載している。

また、HVICを最適化することで外来サージだけでなく、電氣的サージなどに対する破壊耐量、誤動作耐量も確保できており、エアコンだけでなくインバータ化が進んでいるコンプレッサ、ファン、サーボモータなどのドライブ機器の顧客要求にも応えた製品である(256ページ、「第3世代小容量IPM「P633Cシリーズ」」参照)。

3.6 次世代小容量IPM用3ch-HVIC技術

次世代の600Vクラス小容量IPM製品の小型化や高ノイズ耐性の実現に貢献する3ch-HVICの技術について述べる。

IPMを小型化するため、3チャンネル分の上アームIGBTゲート駆動回路を1チップに集積化した3ch-HVICを開発した。そのチップと適用技術を図8に示す。

従来の1ch-HVICを搭載したIPMでは、HVICが3チップであるため、各チップの配線に必要なリードフレームが長くなってしまい、実装面積が大きかった。これに対し3ch-HVICを搭載したIPMでは、HVICが1チップのため、配線に必要なリードフレームが短くなる。この効果により制御部の実装面積を約30%削減でき、600V/15A～30AクラスのIPMのパッ



図8 3ch-HVICチップと適用技術

ケージサイズを約10%小さくできる。

HVICを3ch化する上で課題となるノイズ耐量の確保には、図8に示した三つのノイズ対策技術を適用している。ノイズ耐量を確保する上で、従来の1ch-HVICの寄生素子に加え、3ch-HVICではハイスайдウェル周辺の寄生素子の存在が問題になる。これらの問題を解決するため、ハイスайдウェル分離構造技術、ハイスайдウェルの濃度プロファイル最適化の対策などの高ノイズ耐量ハイスайд技術を適用した。

また、高ノイズ耐性レベルシフト技術の適用により、素子の占有面積を小さくする自己遮蔽(しゃへい)型レベルシフト⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾が採用できるようになり、従来の1ch-HVICでは別の領域に独立させて形成していたレベルシフトを、ハイスайдウェル周囲の高耐圧分離構造と一体で形成し、チップ面積の増大を抑えている。

これらの技術によりIPMの小型化、高ノイズ耐性を実現し、電力変換システムの小型化・低コスト化・高信頼性化に寄与できる(261ページ、「次世代小容量IPM用3ch-HVIC技術」参照)。

3.7 第2世代ディスクリートSiC-SBDシリーズ

SiCを使用したパワー半導体デバイスは、装置のさらなる高効率化への寄与が期待される。富士電機は、SiCを用いたSBD (Schottky Barrier Diode)⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を量産している。

今回開発した第2世代ディスクリートSiC-SBDについて、表1にパッケージの外観を示す。

第2世代ディスクリートSiC-SBDの主な用途はサーバ用電源、通信基地局用電源、電気自動車用地上充電器、UPS、PCSなどである。

データセンターのサーバや通信基地局用電源の省電

(* 8) 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

した整流作用を持つダイオードである。その優れた電気特性により、SiC-SBDのFWDへの適用検討が始まっている。少数キャリアも利用するPiN

(P-intrinsic-N)ダイオードと比較して、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。

表1 パッケージ外観

パッケージ	TO-220-2	TO-220F*-2	TO-247-2
外 観			
定格電圧	650 V		1,200 V
定格電流	6 A、8 A、10 A		20 A、40 A

*F：フルモールドタイプ

力化が求められている中、パワー半導体のさらなる低損失化と高信頼性化は、装置の高効率化と高信頼性化のために重要である。SiC-SBD の導通損失を低減するために、次の施策を行った。

- (a) n+SiC 基板の厚さを約 1/3 とすることで基板抵抗を低減
- (b) ショットキー接合の最適化により、バリア高さを低減
- (c) JBS 構造とドリフト層の最適化によりドリフト抵抗を低減

これらの施策により導通損失の指標でもある V_F を 18% 低減した。

実際の装置での損失低減効果と変換効率改善効果を確認するため、通信基地局用電源の電流連続モード力率改善（CCM-PFC：Continuous Conduction Mode-Power Factor Correction）回路に、第 1 世代と第 2 世代品の 650 V/10 A TO-220-2 パッケージ素子を搭載して、装置の損失と変換効率ならびに素子の温度上昇を比較評価した。電源の損失は負荷 3,000 W では 5.5 W の改善を確認し、変換効率においては、負荷 3,000 W では 0.16 ポイントの向上を確認した。また、素子の温度上昇が平均で 16 °C 低減していることから装置としての高寿命化にも貢献できる。

CCM-PFC 回路に使用する SiC-SBD には、電源投入時に流れる突入電流で破壊しないことが求められる。耐サージ電流の指標でもある I_{FSM} 保証値は、第 1 世代では 50 A であったのに対し、第 2 世代では独自のウェーハプロセス技術により、82 A と 1.6 倍向上した（267 ページ、「第 2 世代ディスクリート SiC-SBD シリーズ」参照）。

3.8 第 2 世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET

富士電機は、SiC を用いた素子として、3.7 節の SBD の他にトレンチゲート MOSFET を量産している⁽²⁶⁾⁻⁽²⁷⁾。今回、鉄道・電源向けに開発した最新の 1,200 V 第 2

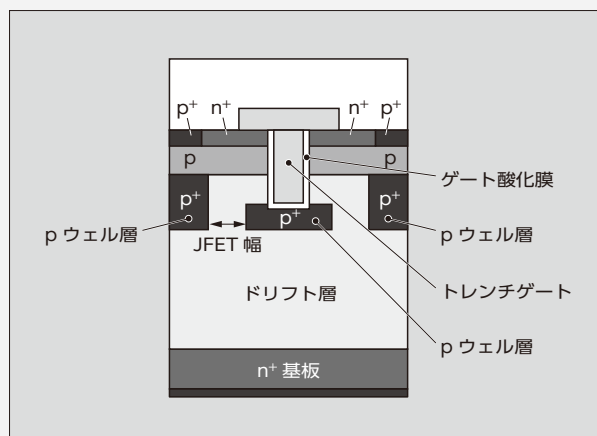


図9 第 2 世代 1,700 V トレンチゲート MOSFET の構造

世代 SiC トレンチゲート MOSFET におけるトレンチゲート構造の技術を適用し、大幅に特性を改善した風力発電や太陽光発電向け 1,700 V 第 2 世代 SiC トレンチゲート MOSFET を開発した。

図9に第 2 世代 1,700 V トレンチゲート MOSFET の構造を示す。1,700 V 素子では、1,200 V 素子から p ウェル層間の距離（JFET 幅）およびドリフト層を最適化することで、高耐圧化を行った。これらの最適化によって、1,700 V プレーナゲート MOSFET（特性比較用の試作品）に比べ、規格化オン抵抗 $R_{on} \cdot A$ が 60% 低減できた。また、ゲートしきい値電圧 $V_{GS(TH)}$ を 5.0 V にすることで、 $V_{GS(TH)}$ が 2.3 V のプレーナゲート MOSFET に対してゲートのノイズ耐性を向上させている。

信頼性については、ゲートプロセスの最適化によって、 $V_{GS(TH)}$ 変動率を低減させ素子動作を安定させた。また、SiC-MOSFET 特有の信頼性上の課題として、ボディダイオード通電によるオン抵抗の増加がある。第 2 世代トレンチゲート MOSFET では、独自のデバイス設計とプロセスの最適化により、このオン抵抗の増加を抑制している。

今回開発した第 2 世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET を搭載したインバータの損失は、富士電機の同定格の Si-IGBT に比べて 78%⁽²⁸⁾、プレーナゲート SiC-MOSFET に比べて 15% 低減している（272 ページ、「第 2 世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET」参照）。

4 あとがき

富士電機のパワー半導体開発における最新の成果を抜粋して述べた。富士電機では、創業以来エネルギー技術の革新に取り組んできており、経営方針として“エネルギー・環境技術の革新により、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献”を掲げている。中でも

パワーエレクトロニクスは、急激に高まっている省エネルギー化、脱炭素化など環境問題への施策を牽引する技術である。パワー半導体は、パワーエレクトロニクスにおけるキーデバイスであり、その技術革新を通じて持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 郷原広道ほか. ハイブリッド車用第2世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.258-262.
- (2) 郷原広道ほか. 車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.274-278.
- (3) 井上大輔ほか. xEV向け第4世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.238-242.
- (4) Takahashi, M. et al. "Extended Power Rating of 1200V IGBT Module with 7G RC-IGBT Chip Technologies", Proceeding of PCIM Europe 2016.
- (5) Takahashi, K. et al. "1200V Class Reverse Conducting IGBT Optimized for Hard Switching Inverter", Proceeding of PCIM Europe 2014.
- (6) 皆川啓ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.219-223.
- (7) Kawabata, J. et al. "The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems". Proceeding of PCIM Europe 2015.
- (8) Kawabata, J. et al. "The High Power Density and High Efficiency 7th Generation IGBT Module Realizing Compact Power Conversion Systems". proc. PCIM Asia 2015, p.410-418.
- (9) Fujihira, T. et al. "Proposal of new interconnection technique for very high-voltage IC's". JJAP, 1996, 35.11R, p.5655-5663.
- (10) Yamaji, M. et al. "A 600V High-Voltage IC Technique With a New Self-Shielding Structure for High Noise Tolerance and Die Shrink". IEEE Trans. Electron Devices, 2015, vol.62, no.5, p.1524-1529.
- (11) 大島雅文ほか. All-SiCモジュール搭載のメガソーラー用PCS「PVI1000 AJ-3/1000」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.13-17.
- (12) 仲村秀世ほか. All-SiCモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.241-244.
- (13) 蝶名林幹也ほか. All-SiC 2in1モジュール. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.238-241.
- (14) 中沢将剛ほか. SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.209-213.
- (15) 梨子田典弘ほか. メガソーラー用パワーコンディショナ向けAll-SiCモジュール. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.244-248.
- (16) 辻崇ほか. 1.2 kV SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.234-237.
- (17) 関野裕介ほか. 大容量SiCハイブリッドモジュール「HPnC」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.228-232.
- (18) 白井亮輔ほか. 高速IGBTとSiC-SBDを組み合わせた高速ハイブリッドモジュール. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.4, p.201-205.
- (19) 岩崎吉記ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.229-233.
- (20) 奥村啓樹ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.224-228.
- (21) Horio, M. et al. "New Power Module Structure with Low Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices". Proceeding of PCIM Europe 2011. p.229-234.
- (22) Iwasaki, Y. et al. "All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package". PCIM Europe 2017. p.651-657.
- (23) Sekino, Y. et al. "High Power next Core (HPnC) package with 3.3 kV SiC Hybrid chip combination". Proceeding of PCIM Asia 2018. p.651-657.
- (24) Chonabayashi, M. et al. "All-SiC Module with 2nd Generation Trench Gate SiC MOSFETs". Proceeding of PCIM Europe 2019. p.318-323.
- (25) Sekino, Y. et al. "3.3 kV All SiC Module with 1st Generation Trench gate SiC MOSFETs for Traction Inverters". Proceeding of PCIM Asia 2020. p.98-103.
- (26) Takasaki, A. et al. "All SiC Module with 1700V Rated 2nd Generation Trench Gate SiC-MOSFETs". Proceeding of PCIM Europe 2021. p.903-908.
- (27) 橋爪悠一ほか. 第2世代SiC-SBD. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.262-264.



大西 泰彦

電子デバイスの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部長。工学博士。電気学会会員。



宮坂 忠志

電子デバイス事業運営に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部長。電気学会会員。



井川 修

電子デバイス事業運営に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部長。工学博士。電気化学会会員。



xEV 向け 100 kW クラス超小型 RC-IGBT モジュール「M677」

“M677” 100 kW-Class Ultra-Compact IGBT Module for xEVs

安達 新一郎 ADACHI, Shinichiro

小幡 智幸 OBATA, Tomoyuki

東 展弘 HIGASHI, Nobuhiro

近年、世界的に自動車の電動化がますます加速しており、パワーモジュールは小型化、低価格化と高出力化が同時に求められている。富士電機は、100 kW クラスのモータ出力容量をターゲットとして、業界トップクラスの xEV 向け超小型 RC-IGBT モジュール「M677」を開発した。低損失な RC-IGBT、リードフレーム配線を用いた新規パッケージ、高放熱冷却器の組合せにより、従来品よりインバータ動作時の発生損失 20% 低減、モジュール体格 50% 低減を達成した。その結果、2 倍の高電力密度化を行い、100 kW クラスの RC-IGBT モジュールを手のひらサイズで実現した。

The electrification of automobiles has been dramatically accelerated worldwide in the last decade and power modules are required to be compact, low-cost, and higher power output at the same time. In order to meet the market requirement, Fuji Electric has developed the “M677,” an industry-leading ultra-compact RC-IGBT module for xEVs targeting motors with output capacity of 100 kW. By combining low-loss RC-IGBTs, a new package with lead frame wiring, and a high thermal performance cooler, it has lower generated loss by 20% during inverter operation and smaller module size by 50% than a conventional product. This enhancement has resulted in a palm-sized 100 kW-class RC-IGBT module that achieves twice the power density compared with the conventional one.

① まえがき

地球温暖化対策の国際的な枠組みである「パリ協定」が 2015 年に採択されて以降、CO₂ 排出量削減が世界各国で重要性を増している。自動車産業では、CO₂ の排出量を削減するため、ハイブリッド自動車（HEV）やプラグインハイブリッド自動車（PHEV）、電気自動車（EV）のように、電力を動力源としてモータで走行する電動車（xEV）の普及を加速している。このモータの制御に用いるインバータユニットはエンジンルームの限られたスペースに搭載されるため、小型化と高出力性能が求められる。そのため、インバータユニットの心臓部であるパワーモジュールも小型化と高出力化の両立が必要であり、高電力密度化が重要である。富士電機はパワーモジュールの高電力密度化を行う上で必要な半導体・パッケージ・冷却技術の開発に取り組んでいる。半導体技術では、チップ搭載面積削減によりパワーモジュールの小型化を可能とする IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）と FWD（Free Wheel Diode）の二つのチップを 1 チップ化した RC-IGBT（逆導通 IGBT：Reverse-Conducting IGBT）技術に取り組んできた。パッケージ技術では、アルミニウムワイヤ配線よりも省スペースで配線可能なリードフレーム技術に取り組んできた。冷却技術では、フィンとウォータージャケットの隙間をなくすことで冷媒の流速を増加させ、冷却性能を向上させたウォータージャケット一体型フィンの開発に取り組んできた。このように取り組んださまざまな技術を適用して、高電力密度化を実現し、2017 年に 200 kW クラスのモータ出力容量をターゲットとした RC-IGBT モジュール「M660」⁽¹⁾⁽²⁾ をリリースした。

今回、100 kW クラスのモータ出力容量をターゲットとして、業界トップクラスの超小型 xEV 向け RC-IGBT モ

ジュール「M677」を開発したので、その特徴および性能について述べる。

② 「M677」への適用技術

開発した M677 の外観を図 1 に示す。表 1 に「M653」（従来品）との性能比較を示す。高電力密度化のためにチップ性能の向上、配線面積の削減、冷却性能を向上した。これらにより出力性能を維持しつつ、従来品に比べて体格（体積）を 50% 以上低減し、約 2 倍の電力密度を達成した。このモジュールの特徴を同等の出力容量の M653 と比較して次に示す。

(a) 第 7 世代 RC-IGBT の性能向上

従来品にて採用した第 7 世代 RC-IGBT に対し、IGBT の出力特性の向上およびスイッチング損失低減により、チップサイズを小型化しつつ、同等のモータ出力容量を実現した。詳細は③章で述べる。

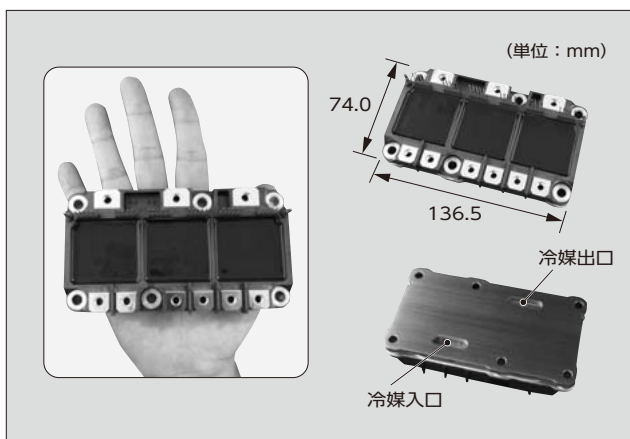
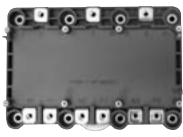
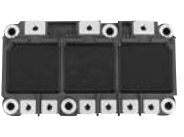


図 1 「M677」（開発品）

表 1 性能比較

項 目	M653 (従来品)	M677 (開発品)
外 観		
モータ出力容量帯	100 kW	100 kW
コレクタ・エミッタ間飽和電圧	750 V	750 V
チップ	第7世代 RC-IGBT	第7世代 RC-IGBT (性能向上)
内部配線	アルミニウムワイヤ	リードフレーム
冷却器	ウォータージャケット 一体型波フィン	ウォータージャケット 一体型ピンフィン
外形寸法	W162.0×D116.0× H24.0 (mm)	W136.5×D74.0× H21.0 (mm)
体 格	0.45 L	0.21 L
電力密度 (arb.unit)	1.00	1.98

(b) リードフレーム配線の採用

従来のアルミニウムワイヤに換わり、リードフレーム配線を採用してモジュール内の配線部面積を約 20% 小型化した。

(c) ピンフィンの採用

冷却フィンの冷却性能向上のため、従来の波フィン構造からピンフィン構造とすることで熱抵抗を 10% 低減した。詳細は4章で述べる。

(d) 新規冷却器インタフェースの採用

従来構造ではウォータージャケット一体型フィンで必要となる冷却器とインバータ管体（きょうたい）との水路インタフェースをフランジやスタッドを用いて構成していたが、ボトムプレートのみで構成することでインタフェースの部品点数を 6 点削減し、パワーモジュールを小型化した。

③ 「M677」の RC-IGBT の性能向上

富士電機は、業界に先駆けて主機の車載インバータ向けの RC-IGBT を開発し、量産してきた⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。RC-IGBT は IGBT と FWD の二つのチップを 1 チップ化しているので、従来の IGBT と FWD が別体となっているチップ（別体チップ）で構成するよりもチップおよびパッケージ面積が縮小できるという利点がある。しかし、RC-IGBT によりパワーモジュールを構成する場合においても、チップはモジュールにおける専有面積は大きく、さらなるモジュールの小型化を進めるためにはチップの小型化が重要となる。チップ小型化の課題は、チップ面積に反比例する導通損失の増加抑制と熱密度低減のためのインバータ動作時の損失低減である。M677 では第 7 世代チップ技術をベースに性能向上を行い、単位面積当たりの出力特性向上により、チップの小型化に伴う導通損失増加を抑制し、スイッチン

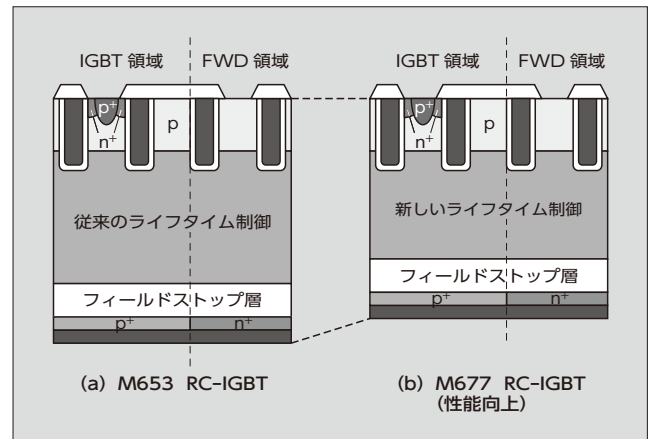
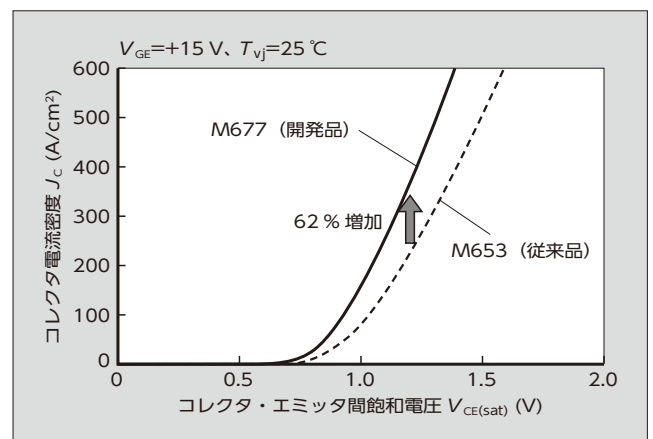


図 2 RC-IGBT の断面構造

グ損失の低減によりインバータ動作時の損失低減を行っている。図 2 に RC-IGBT の断面構造を示す。3.1 節、3.2 節ではそれら出力特性向上とスイッチング損失低減手段について述べる。

3.1 出力特性向上

RC-IGBT は 1 チップ化できるメリットがあるものの IGBT 特性と FWD 特性を個別に最適化した構造を実現することは、別体チップに比べ製造上難しい。例えば、スイッチング損失低減を目的とし、FWD の逆回復電流調整によるライフタイム制御を行うが、その場合 IGBT および FWD の導通損失が増加するというトレードオフの関係が存在する。そこで、M677 向け RC-IGBT では、新たなライフタイム制御技術を開発し、スイッチング損失と導通損失のトレードオフを改善した。加えて、Si ウェーハの薄化と表面構造を最適化して、導通損失を低減している。図 3 にコレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を示す。M653 向け RC-IGBT に比べ同一の飽和電圧下において、コレクタ電流密度は 62% 増加していることが分かる。単位面積当たりの電流出力性能の向上により、導通損失を悪化させることなくチップを小型化している。

図 3 コレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$

3.2 スイッチング損失低減

ターンオン時のスイッチング速度は、逆回復サージ電圧を耐圧以下に抑制する範囲で使用する必要がある。そのため、スイッチング速度の高速化により損失低減するためには逆回復サージ電圧を支配する主要因である逆回復電流の低減が重要である。そこで、M677 では新しいライフタイム制御技術によりダイオードの逆回復電流を抑制し、図 4 に示すように従来の M653 に比べ、ターンオン時に発生するターンオン損失 E_{on} と逆回復損失 E_{rr} を、それぞれ 36% と 27% 低減した。加えて、逆回復サージ電圧を 42 V 低減した。表面構造の最適化およびチップサイズの

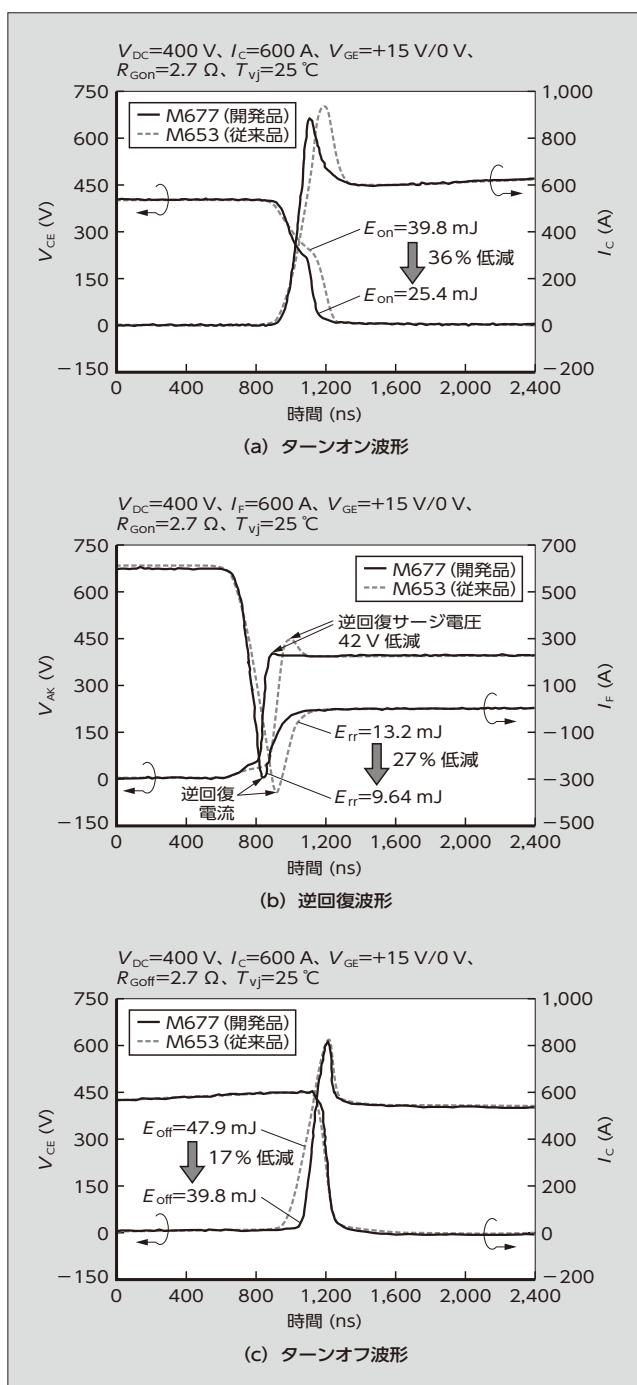


図 4 「M677」開発品のスイッチング特性

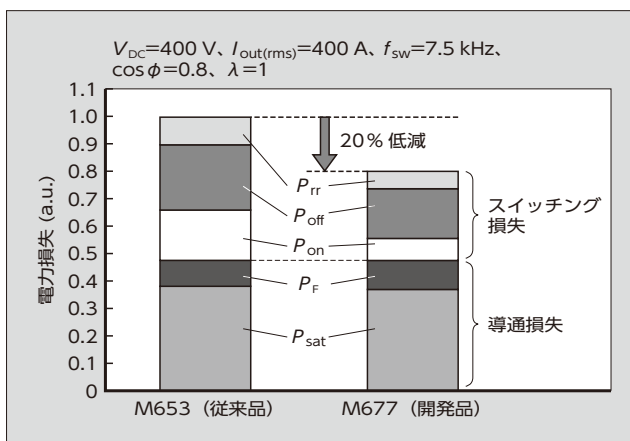


図 5 インバータ動作時の発生損失の比較

小型化によるデバイスの寄生容量の低減によりターンオフ損失 E_{off} についても 17% 低減した。

図 5 にインバータ動作時の M677 と M653 との発生損失の比較を示す。M677 は、M653 に比べて導通損失はほぼ同等だが、スイッチング損失（特に、逆回復損失 P_{rr} とターンオン損失 P_{on} ）が大幅に低減したことで、トータルの発生損失を 20% 低減できる。

4 「M677」の冷却構造と出力性能

4.1 冷却性能の向上

チップおよびモジュールの小型化は熱密度の増加を伴うため、低損失化だけでなく、冷却性能の向上も不可欠である。そこで、M677 では冷却構造の最適化を行った。図 6 に示すように、新規の冷却構造ではピンフィンの採用により、同じ圧力損失において熱抵抗が 10% 以上低減した。冷却構造の詳細は、本号 240 ページ「xEV 向け超小型 RC-IGBT モジュールの冷却構造」で述べる。

4.2 出力性能

システム電圧 400 V のインバータにおいて 100 kW クラスのモータ駆動のためにチップ接合温度 T_{vj} 175 °C で 350 A_(rms) 以上の出力電流が要求される。また、スイッチ

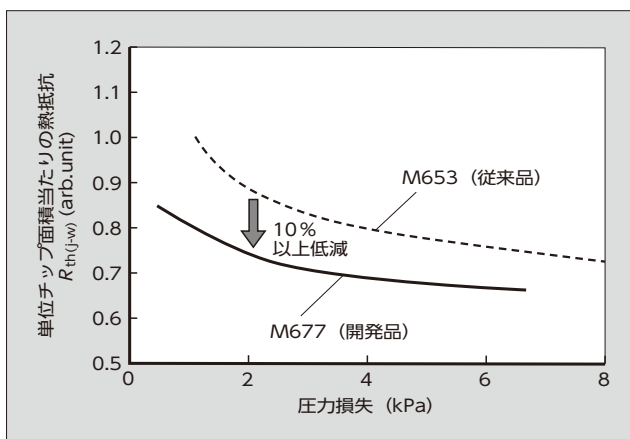


図 6 単位チップ面積当たりの熱抵抗と圧力損失

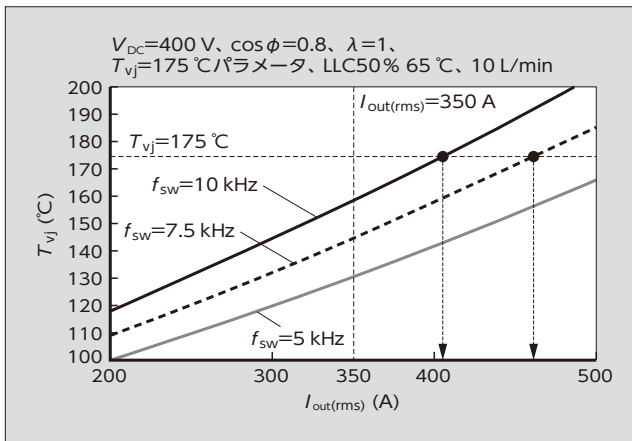


図7 「M677」(開発品)の T_{vj} のシミュレーション

ング周波数は一般的に5～10 kHzでの動作が要求される。図7にM677の出力電流 I_{out} をパラメータとし、 T_{vj} のシミュレーション結果を示す。新規に開発したRC-IGBT、パッケージおよび冷却器の効果により、M677では、高キャリア周波数10 kHzにおいて、350 A_(rms)の出力電流の特性ばらつきを考慮しても得ることができる。また、キャリア周波数を下げることでさらに大きな出力電流が得られる。このように、M677を用いることにより、100 kWよりも高い出力性能を得ることができる。

5 あとがき

xEV向け100 kWクラス超小型RC-IGBTモジュール「M677」について述べた。第7世代技術をベースにRC-IGBT性能および冷却性能の向上を行い、パワーモジュールの小型化を行った。これら技術により、同等の出力容量の従来品に対して50%以上の体格減を行い、約2倍の電力密度を達成し、100 kWクラスIGBTモジュールを手のひらサイズで実現した。今後も電動車のインバータシステムの小型化、高電力密度化の要求に応え、脱炭素社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) Osawa, A. et al, "The highest power density IGBT module in the world for xEV power train", PCIM Europe 2017, p.1761-1766.
- (2) 大澤彰浩ほか. 車載用大容量IGBTモジュール「M660」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.238-241.
- (3) 野口晴司ほか. マイルドハイブリッド車用RC-IGBT. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.254-257.
- (4) Higuchi, K. et al, "New standard 800A/750V IGBT module technology for automotive application", PCIM Europe 2015, p.1137-1144.
- (5) Adachi, S. et al, "Automotive power module technologies for high speed switching", PCIM Europe 2016, p.1956-1962.
- (6) 荒井裕久ほか. 車載用第3世代直接水冷型パワーモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.269-273.



安達 新一郎

電気・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、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装モジュール部。



小幡 智幸

電気・ハイブリッド自動車用IGBTモジュール・IPMのデバイス開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装モジュール部。



東 展弘

電気・ハイブリッド自動車用IGBTモジュール・IPMのパッケージ開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装モジュール部。

xEV 向け超小型 RC-IGBT モジュールの冷却技術

Cooling Technology for Ultra-Compact RC-IGBT Modules for xEVs

立石 義博 TATEISHI, Yoshihiro

小山 貴裕 KOYAMA, Takahiro

吉田 大輝 YOSHIDA, Daiki

電動車ではシステムの小型・高効率化を目的に機電一体型システムの開発が進んでおり、このシステムに搭載されるパワーモジュールも同様に高電力密度化が求められている。この要求に応えるため富士電機は、新たなアルミニウム冷却器を搭載したパワーモジュールを開発した。この冷却器は高精度化したシミュレーションを用いて設計しており、フィンと流路を最適化することで冷却性能の向上を図った。また、機能を集約し部品点数を削減することで小型化を実現した。その結果、第3世代（従来）のパワーモジュールに対して約2倍の電力密度を達成した。

In electric vehicles, the development of integrated mechanical and electrical systems is progressing in order to make systems smaller and more efficient. At the same time, the power modules in these systems are also being required to achieve higher power densities. To meet these requirements, Fuji Electric developed a power module that uses a new aluminum cooling unit. The cooling unit was designed using a highly accurate simulation, and its cooling performance was improved by optimizing its fins and flow paths. In addition, it has achieved a compact size by consolidating functions and reducing the number of parts. As a result, its power density was approximately doubled compared to the 3rd-generation (conventional) power module.

1 まえがき

地球温暖化対策の国際的な枠組みである「パリ協定」が2015年に採択されて以降、CO₂排出量削減が世界各国で重要性を増している。自動車産業では、CO₂の排出量を削減するため、ハイブリッド自動車（HEV）やプラグインハイブリッド自動車（PHEV）、電気自動車（EV）のように、電力を動力源としてモータで走行する電動車（xEV）の普及を加速している。このモータの制御に用いるインバータユニットはエンジンルームの限られたスペースに搭載されるため小型かつ取り付け位置を選ばないこと、低燃費（電費）を実現するため軽量かつ高効率であることなどが求められている。

また、電動化システムは、大幅な効率向上と小型化を目指し、インバータとモータなどの駆動システムを統合した機電一体型システムの開発が活発化している。そのため、インバータに搭載されるパワーモジュールも機電一体型システムに最適となる形状と効率改善が求められており、より高出力かつ小型・薄型化を実現する製品開発を進めている。

富士電機では第4世代のパワーモジュールとし

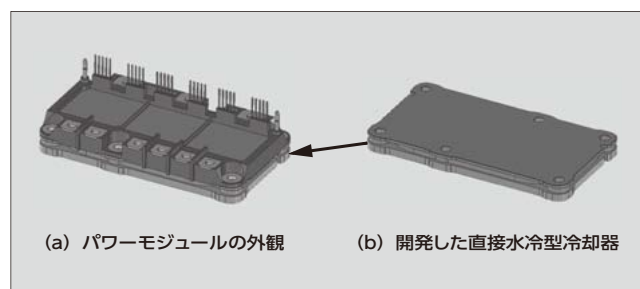


図1 xEV 向け超小型 RC-IGBT モジュール

て、図1(a)に示す xEV 向け超小型 RC-IGBT（Reverse-Conducting Insulated Gate Bipolar Transistor）モジュールを開発した。本稿では、このパワーモジュールに適用した直接水冷型冷却器〔図1(b)〕の設計技術と小型・薄型化技術について述べる。

2 富士電機の車載用直接水冷型パワーモジュールのトレンド

図2に、富士電機が開発した車載用直接水冷型パワーモジュールの電力密度に対するトレンドを示す。これまで富士電機は軽量で耐食性に優れたアルミニウム製の冷却器を採用した xEV 向けパワーモジュールを開発してきた。高放熱冷却器設計技術⁽¹⁾⁻⁽³⁾や高信頼性はんだ技術⁽¹⁾、超音波接合技術⁽²⁾⁽³⁾、175℃連続動作保証技術⁽²⁾⁽³⁾、リードフレーム配線

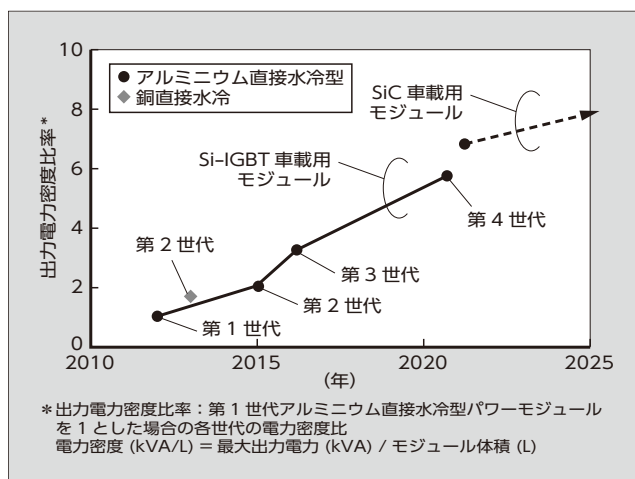


図2 富士電機が開発した車載用直接水冷型パワーモジュールの電力密度のトレンド

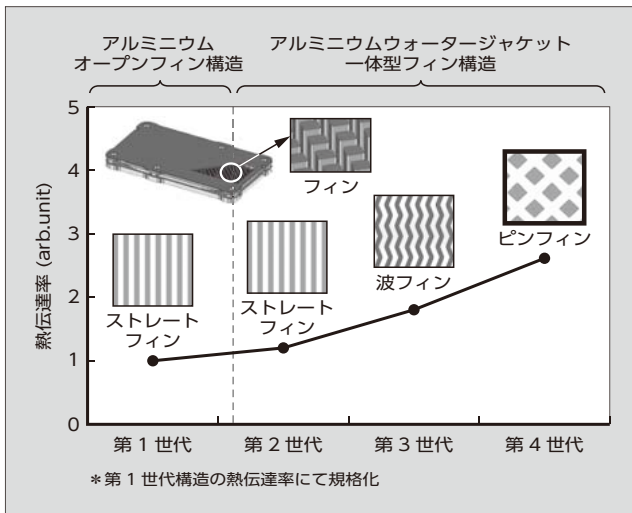


図3 富士電機が採用した冷却器フィンと性能

技術や半導体素子（チップ）である IGBT と FWD（Free Wheeling Diode）を一体化した RC-IGBT を開発し、さまざまな技術をパワーモジュールに適用することで、電力密度を世代ごとに約 20% ずつ向上している。

高放熱冷却器設計技術では、図3に示すように、第2世代（2015年）では、ウォータージャケット一体型フィン構造を開発し、冷却器のフィンとウォータージャケット間の隙間をなくすことで冷媒の流速を増加させ、冷却性能を向上させている。さらに、第3世代（2017年）以降は冷却器のフィン形状を工夫することで、冷却性能を向上させている。

今回開発した xEV 向け超小型 RC-IGBT モジュールは、高電力密度化に向けて、リードフレーム配線技術と RC-IGBT に加えて、新たな冷却器を採用することで、パワーモジュールを小型化し、第3世代のパワーモジュールに対して電力密度を約2倍に高めている。新たな冷却器では、冷却フィンをピンフィンにして、フランジ・スタッドレス構造を採用している。このピンフィンは第3世代のパワーモジュールで採用した波フィンに対して熱伝達率を40%以上向上させている。

③ 高放熱冷却器の設計技術

今回採用したピンフィンは、第3世代で採用していた波フィンと比較して、図4のように冷媒通水部が広く、フィンと冷媒との接触面積が約10%拡大し、冷媒との熱交換量が増加するため、冷却性能が高い。しかし、ピンフィンは波フィンの流路と異なり、冷媒の分岐点や交差部がたくさん存在するため、冷媒の流れる方向が定まりづらく、渦流や滞留、流速分布の偏りが発生する。場合によっては狙いどおりの流れにならず、目標の冷却性能を得ることができないこともある。目標の冷却性能を得るためには、冷媒の流れを正確に再現する高精度なシミュレーション技術が必要であり、狙いどおりの冷媒の流れになるように冷却器内部の流路形状を最適化する必要があった。

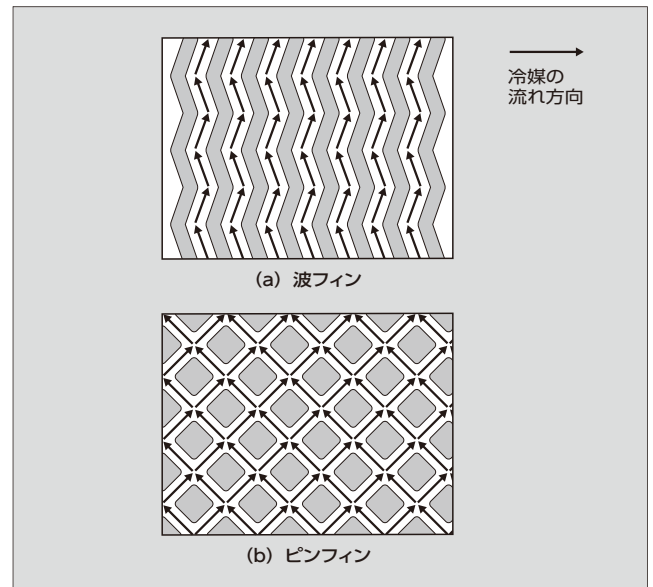


図4 波フィンとピンフィンにおける冷媒の流れ（一部を拡大）

3.1 節以降で冷却器設計のためのシミュレーションの高精度化と冷却性能向上に向けた流路の最適化について述べる。

3.1 熱流体シミュレーションの高精度化

冷却器の設計において、正確に温度や流れを予測するためには高い精度の熱流体シミュレーションが必要である。従来は、温度の実測や流れの可視化技術である粒子画像流速測定法（PIV：Particle Image Velocimetry）を用いた評価を基に、実機の温度分布や冷媒の流れを再現できるように、メッシュの最適化や境界条件の調整を行い、精度の向上を図ってきた。この技術を用いて、最適な流れになるようにフィン形状や流路形状を検討し、高放熱冷却器を開発してきた。しかし、今回採用したピンフィンは従来のメッシュ構想では冷媒の渦流や滞留現象を正確に再現できず、設計に反映することができなかった。特に、ピンフィンの周囲で発生するこれらの現象は熱交換性能を左右し、冷却性能に対しても大きな影響を与える。そのため、現象を正確に再現するシミュレーションの高精度化が必要であった。

そこで、まずは微小な渦流や滞留が生じやすいピンフィン周りの流れの実態を詳細に把握するため、流れの可視化評価の高精度化を目的にマイクロ PIV 技術を新しく導入した。マイクロ PIV 技術は、従来の PIV 技術よりも高解像度で撮影することができる。また、通常はアクリルなどの透明冷却体を作成し、流れの可視化を行うが、実機に近づけるため、アルミニウムの冷却器を使った評価を行った。具体的には、アルミニウムフィンを透明なアクリルカバーで覆って流路を形成し、密度、サイズ、質量を最適化した蛍光粒子を冷媒に混ぜて循環させ評価を行った。

その結果、マイクロ PIV の高解像度技術とより実際に近い評価を行ったことで、図5に示すように、従来の PIV で捉えることができなかった微小な流体の動きを捉えるこ

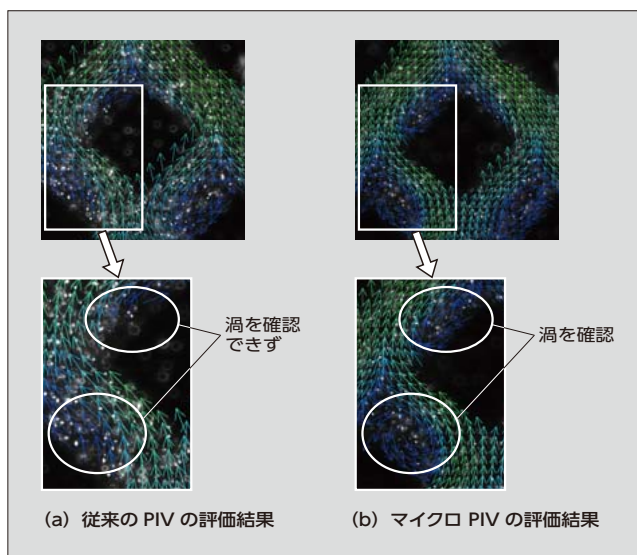


図5 フィン周りの流速分布の評価結果

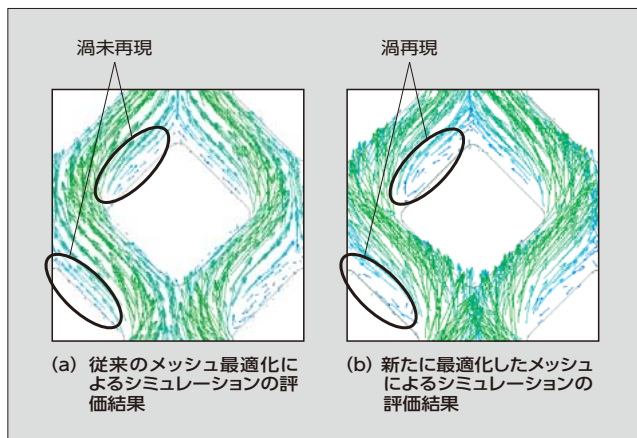


図6 シミュレーションで再現した渦流の流れ

とができ、フィン周りの渦流を捉えることができるようになった。

この渦流はフィンと冷媒の熱交換性能を阻害するため、冷却性能を悪化させることが分かっている。そのため発生状況を詳細に把握する必要があり、実測に加え、熱流体シミュレーションでも渦流を再現する必要がある。

熱交換にも影響が大きいピンフィン周りのメッシュに着目し、形状や切り方やサイズを工夫し最適化を行った。その結果、図6のように熱流体シミュレーション上で渦流を再現できるようになった。これによりシミュレーションで求めた熱抵抗は、実測との誤差が3%以内であることを確認した。

3.2 冷却器の性能向上

パワーモジュールを高電力密度化する上で必要な冷却性能の向上には、フィン表面と冷媒の境目に発生する境界層を薄くするとよい。境界層を薄くする手段の一つとしてフィン表面の流速を速くする方法がある⁷⁾。流速を速くする方法は冷媒の流量の増加や流路を狭くするなどである。しかし、これらの方法は圧力損失が増加し、循環ポンプへの

負荷が増大する。図7に示す熱抵抗と圧力損失の関係のとおり、冷却性能を示す特性の熱抵抗値と、冷却器の圧力損失はトレードオフの関係にある。富士電機では、世代ごとに新たなフィン形状を開発して、このトレードオフを改善することによって、顧客が許容する圧力損失の範囲で冷却性能を向上させている。

また、パワーモジュールに冷媒を通水させる際、図8(a)に示すように、冷却器の長手方向に冷媒を流すことが多い。これはフィンベースとウォータージャケットを別体とするオープンフィン構造に対するもので、インバータ筐体（きょうたい）側で流路を設計する場合に多く見られる。この流し方では、上流にあるチップから冷媒が吸熱し冷媒温度が上昇するため、下流のチップは上流のチップに比べて温度は高くなる。また、パワーモジュールの熱設計は最も温度が高いチップを対象にした設計を行う必要がある。そのため、温度分布が大きい場合、チップの出力を最大限

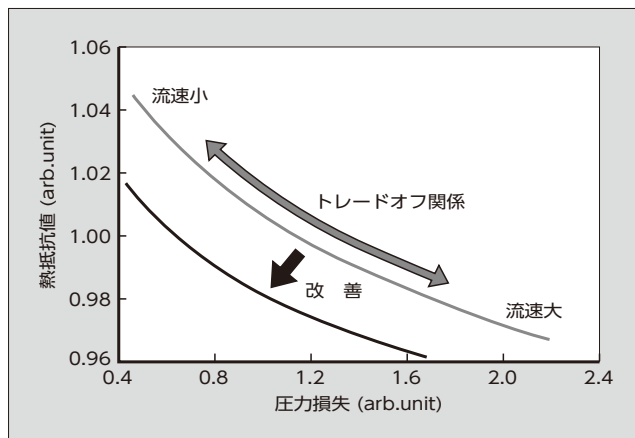


図7 熱抵抗値と圧力損失のトレードオフ関係

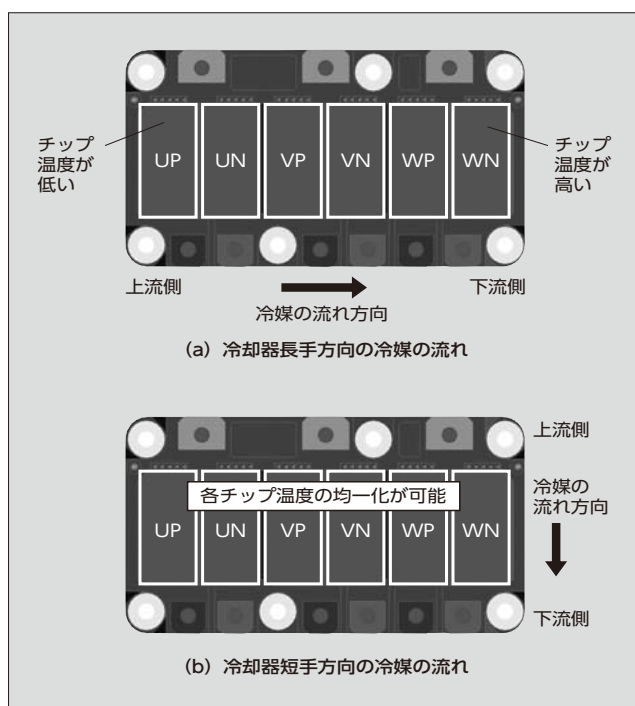


図8 パワーモジュールの冷却器の流路方向

に活用することができない。

そこで富士電機では、ウォータージャケット一体型フィン構造を生かし、図 8 (b)のように各チップに均一に冷えた冷媒を流し、かつ冷却効率を最大化させるように流路設計を行っている⁽¹⁾。さらにこの思想は、冷媒を流す流路長を短くすることができ、かつ流路幅を広げた流れで設計をすることができるため、圧力損失も下げることができる。これらの効果によって、高放熱かつ低圧力損失な冷却器を実現している。

しかし、図 9 (a)のようにピンフィンには多数の分岐点が存在するため、冷媒を拘束できず、冷媒の流れる方向を定めづらい。冷媒の流入出口の位置にもよるが、最短となる経路に冷媒が流れやすくなるため、中央部の VP・VN に冷媒が集中しやすく、両サイドの UP・UN、WP・WN には冷媒が流れにくくなってしまふ。そのため、図 10 (a)の最適化前で示すように中央部の VP・VN チップの熱抵抗は低く、両サイドの UP・UN、WP・WN チップの熱抵抗は高くなっていた。そこで、3.1 節のシミュレーション技術と冷却器の流速調整技術を用いて、図 11 のように流れが左右に広がるようにフィン形状を最適化し、図 9 (b)のように入口と出口の流速調整部材を配置して均一に流れるように流路を最適化した。

その結果、UP・UN と WP・WN のチップ下のフィン周りの流速を増やして、図 10 (a)に示すように最適化前に比べ最適化後には最大の熱抵抗値を 6% 低減した。さらに、図 10 (b)に示すように熱抵抗値の最大値と最小値の差を約 50% 低減した。このピンフィン冷却器を採用することで、第 3 世代のパワーモジュールに採用した波フィン冷却器

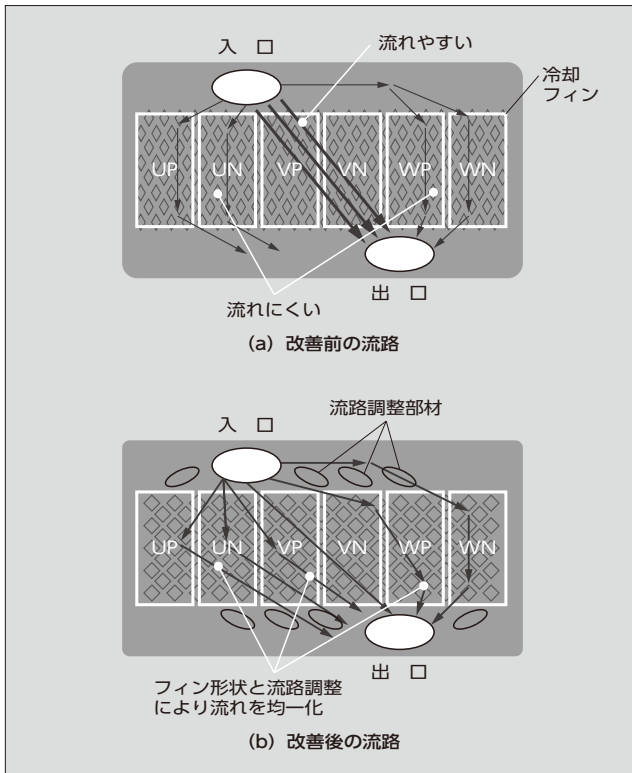


図 9 ピンフィン冷却器内の流速分布

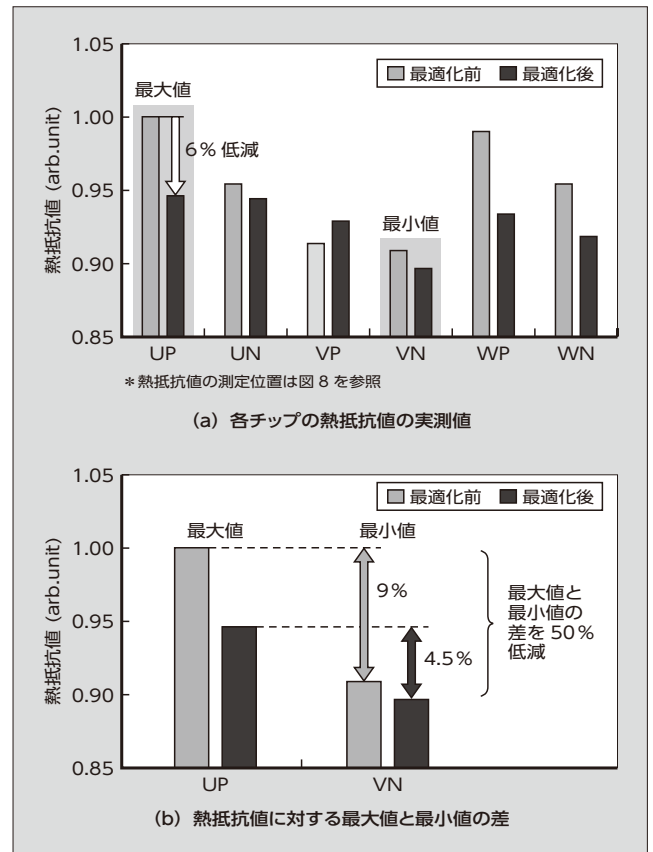


図 10 最適化前後のチップの熱抵抗値について

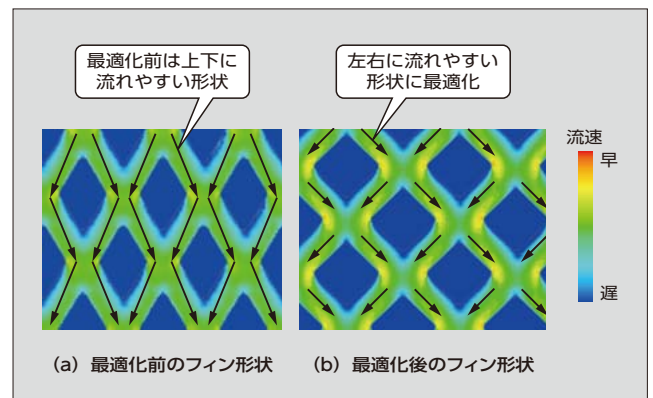


図 11 ピンフィンの形状最適化前後の流れ

と比較して、熱抵抗値を 15% 低減している。

4 冷却器の小型・薄型化技術

4.1 冷却器のフランジ・スタッドレス化

パワーモジュールの小型・薄型化を実現するには、冷却性能を向上させるだけでなく、冷却器自体の小型化も必要である。しかし、冷却器のフィン高さを低く、フィンエリアを縮小した場合、冷媒とフィンとの接触面積が減少するため、冷却性能の低下や圧力損失の増加を引き起こす可能性がある。そこで、これらの性能に影響が少ない冷却器のフランジ・スタッド部分に着目した。

図 12 に示す第 3 世代のパワーモジュールの冷却器構造

ではトッププレートを基材にカバー・フランジ・スタッドをろう付けし、スタッドを用いてインバータ筐体への固定を行っていた。冷媒の入口と出口部分の接続部シール性やインバータ筐体への搭載性を確保するには平坦性が必要である。第3世代のパワーモジュールは、フランジ・スタッドをカバーから独立させてトッププレートに取り付けて締結することにより平坦性を確保していた。

今回開発した xEV 向け超小型 RC-IGBT モジュールは、4.2 節で述べるように、小型かつ反りを抑制した構造なので、冷却器のボトムプレート自体で十分にシール性を確保できる。そこで図 13 に示すように、冷却器のボトムプレートに直接冷媒の入口と出口となる穴や締結穴を設けたフランジ・スタッドレス構造を採用した。フランジやスタッドのスペースを設ける必要がないので、部品点数を削減するとともに冷却器を小型化できた。

4.2 冷却器の高剛性化による反りの抑制

パワーモジュールは、絶縁基板や冷却器などの異種材料で構成されている。そのため、パワーモジュールは製造工程や通電時の発熱と線膨張係数の差によって反りが発生する。冷却器のシール性やインバータへの搭載のしやすさか

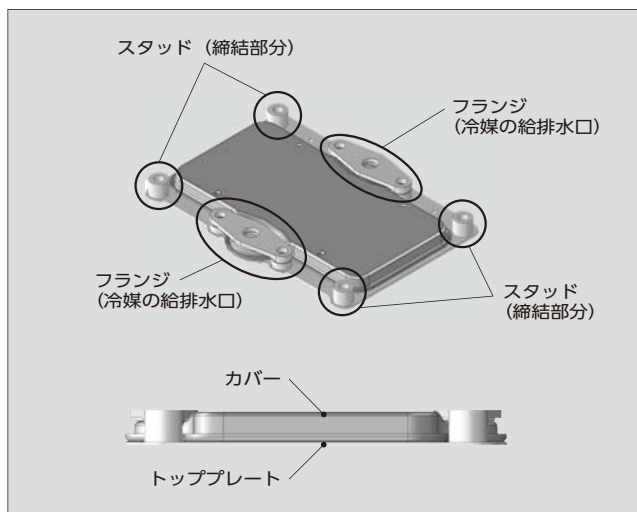


図 12 第3世代のパワーモジュールの冷却器構造

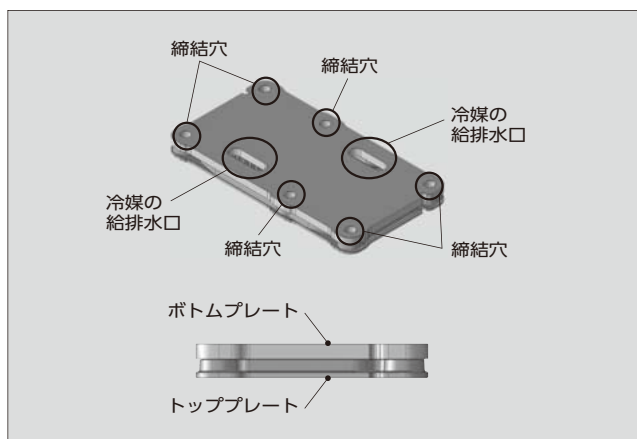


図 13 今回開発したフランジ・スタッドレス構造

ら、反りは小さいほどよい。

そこで、冷却器のボトムプレートを厚くすることで冷却器を高剛性化し、反りを抑制した。この結果、第3世代のパワーモジュールの冷却器構造に比べて、反り量を70%低減することができ、冷却器のシール性とインバータ筐体への搭載性向上と、フランジ・スタッドレス化につながっている。

5 あとがき

本稿では、xEV 向け超小型 RC-IGBT モジュールの冷却技術について述べた。

RC-IGBT 技術、リードフレーム配線技術に加えて、この冷却器をパワーモジュールに採用することで、第3世代のパワーモジュールに比べて約2倍の電力密度を達成した。

今後も、これらの技術を基に継続的な技術開発を推進し、お客さま満足度の高い製品をタイムリーに提供することで、持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 郷原広道ほか. ハイブリッド自動車用IPMのパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.
- (2) 郷原広道ほか. ハイブリッド車用第2世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.258-262.
- (3) 郷原広道ほか. 車載用第3世代パワーモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.274-278.
- (4) 井上大輔ほか. xEV向け第4世代アルミニウム直接水冷パッケージ技術. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.238-242.
- (5) 佐藤憲一郎ほか. RC-IGBTを搭載した車載用第3世代直接水冷型パワーモジュールの高機能化. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.270-274.
- (6) 玉井雄大ほか. xEV向けパワー半導体モジュールの直接水冷技術. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.214-218.
- (7) Gohara, H. et al. "Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation". Proceedings of PCIM Europe 2014, p.1187-1194.



立石 義博

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部パッケージ開発部。



小山 貴裕

車載用 IGBT モジュールのパッケージ技術開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部パッケージ開発部。



吉田 大輝

車載用 IGBT モジュールのパッケージ構造開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部電装事業部電装モジュール部。



第7世代「Xシリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール 「Dual XT」

7th-Generation “X Series” RC-IGBT “Dual XT” Modules for Industrial Applications

江袋 佑太 EBUKURO, Yuta

山野 彰生 YAMANO, Akio

掛布 光泰 KAKEFU, Mitsuhiro

近年、出力電力拡大、高信頼性化といった電力変換装置の高性能化が求められている。これに応えるため富士電機は、IGBT と FWD の機能をワンチップ化した RC-IGBT の開発を行い、この技術と第7世代「Xシリーズ」の技術を適用し、定格電圧 1,200 V および 1,700 V の産業用 RC-IGBT モジュール「Dual XT」をラインアップした。このモジュールは同一パッケージを用いた従来製品と比較して、高い信頼性を確保しながらチップ接合温度を 175℃ に引き上げ、接合温度変動も大幅に改善した。これにより、電力変換装置のさらなる出力電力の拡大や高寿命化を実現した。

In recent years, demand has been increasing for high performance power converters with high output power and high reliability. Against this backdrop, Fuji Electric has developed RC-IGBTs that integrate an IGBT and FWD on a single chip and has applied this technology and a 7th-generation “X Series” technology to create the line-up of the “Dual XT” RC-IGBT modules with 1,200 V and 1,700 V ratings for industrial applications. These modules have a higher chip junction temperature of 175℃ and more reduced junction temperature fluctuations than conventional products using the same package while maintaining high reliability. These improvements have resulted in higher power outputs and longer lifetime of power converters.

① まえがき

近年、人口増加や経済成長によってエネルギー需要が世界的に拡大する中、持続可能な社会を実現する上で、エネルギーを効率的に利用し、省エネルギーに貢献するパワーエレクトロニクス技術への期待が高まっている。中でも電気エネルギーを効率的に変換する電力変換装置の重要性が高まっており、モータドライブや再生可能エネルギーなどの市場への適用が拡大している。そのため、電力変換装置のキーデバイスとなるパワー半導体も重要な役割を担っている。

富士電機はこれまで多くの技術革新によって、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) モジュールの小型化、低損失化および高信頼性化を行い、電力変換装置の小型化や低コスト化および高性能化に貢献してきた。最新世代である第7世代「Xシリーズ」IGBT モジュールではチップおよびパッケージの技術革新により、従来製品である第6世代「Vシリーズ」IGBT モジュールと比べ、さらなる低損失化と高信頼性化を実現した。これにより IGBT モジュールのパッケージサイズを維持したまま、製品体積⁽¹⁾⁽²⁾当たりの出力電力（出力電流）拡大を実現してきた。また、富士電機は IGBT と FWD (Free Wheeling Diode) の機能をワンチップ化した RC-IGBT (逆導通 IGBT: Reverse-Conducting IGBT) を技術開発し⁽³⁾⁽⁴⁾、電動車 (xEV) の動力伝達装置に搭載されるインバータに既に幅広く採用されている⁽⁵⁾。

今回この RC-IGBT 技術と X シリーズの技術を適用することで、より一層の出力電力拡大と高信頼性を両立した産業用「Xシリーズ」RC-IGBT モジュールを系列化した。

② 製品ラインアップ

富士電機は汎用インバータや風力発電などのさまざまな容量帯の電力変換装置に対応するため、図1に示すように 1,200 V および 1,700 V IGBT モジュール「Dual XT」をラインアップしている。今回、RC-IGBT を採用することにより、大電流製品（1,200 V/1,000 A、1,700 V/800 A）を新たにラインアップした。

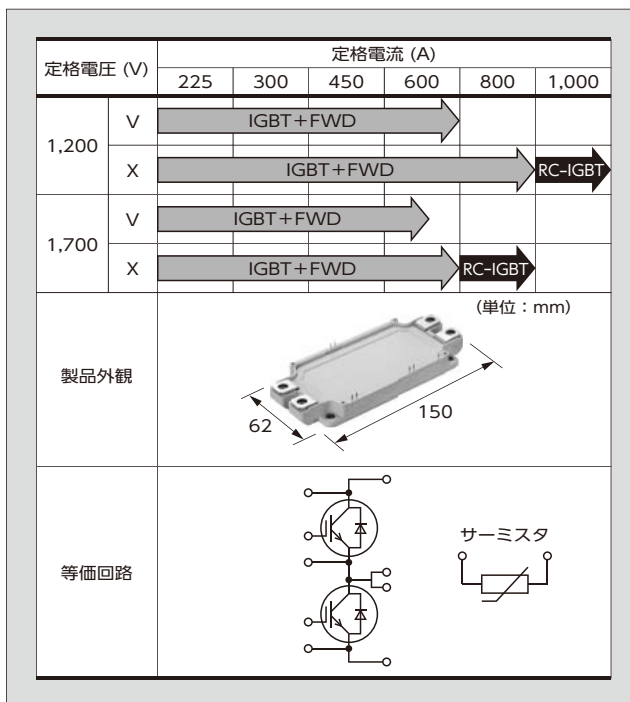


図1 1,200 V および 1,700 V 「Dual XT」のラインアップ

③ 「Xシリーズ」RC-IGBTモジュールの特徴

図2にXシリーズRC-IGBTチップの概略図を示す。電力変換装置として広く用いられている電圧型インバータでは、IGBTとFWDの2種類の半導体チップを逆並列に接続している(IGBT+FWD方式)。これに対してRC-IGBTでは一つのチップにこのIGBTとFWDの機能を集約し、ワンチップ化している。これにより同一定格電流にて従来のIGBT+FWD方式と比較するとRC-IGBTはIGBTまたはFWD単体よりチップサイズが大きいいため放熱面積が広くなる。その結果、熱抵抗が低減し、IGBTまたはFWD単体と比較して放熱性が優れるという特徴を持つ。一方でIGBTとFWDを合わせた総チップ面積はRC-IGBTの方が小さい。これにより総チップ面積を同一にすると、定格電流を拡大することが可能となる。また、XシリーズRC-IGBTではXシリーズのチップ技術を適用することで、従来品であるVシリーズIGBTモジュールと比べ、コレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ とターンオフ損失 E_{off} のトレードオフを改善している。

Xシリーズのパッケージ技術として、新たに窒化アルミニウム(AIN)の絶縁基板を開発し、さらなる熱抵抗の低減を実現した。また、発熱の偏りを考慮したワイヤボンディングの最適化、高強度はんだおよび高耐熱性シリコンゲルを採用した。これにより高い信頼性を確保しながら、動作時の最高チップ接合温度 T_{vjmax} を従来の150℃から175℃に引き上げた。

これらXシリーズのチップ技術による低損失化とパッケージ技術による高温動作下における高信頼性およびRC-IGBT技術の特徴である放熱性の向上により、従来のIGBT+FWD方式と同一パッケージサイズのまま出力電力を拡大したXシリーズRC-IGBTモジュールを実現した。⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾

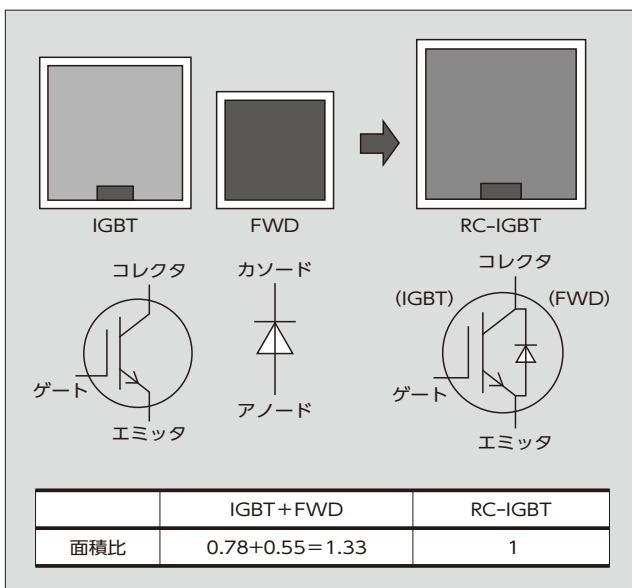


図2 「Xシリーズ」RC-IGBT 概略図および等価回路図

④ 1,200V「Xシリーズ」RC-IGBTモジュール「Dual XT」

今回新たにラインアップに加えた1,200V/1,000A XシリーズRC-IGBTモジュールDual XT(XシリーズRC Dual XT)と、同一パッケージサイズである従来製

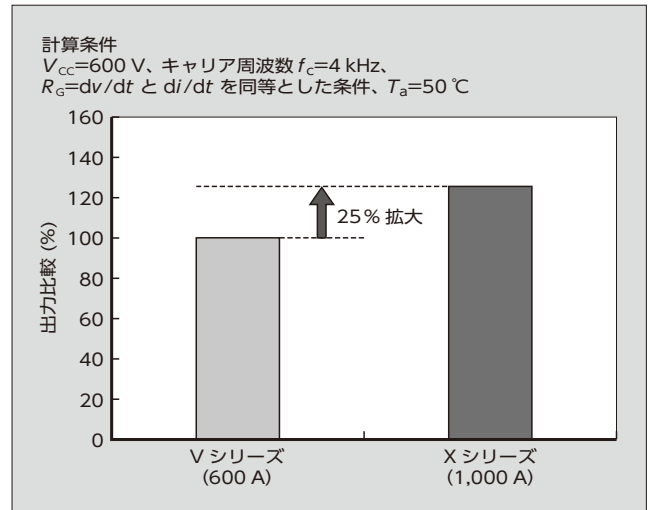


図3 インバータ定常動作時の出力電流比較

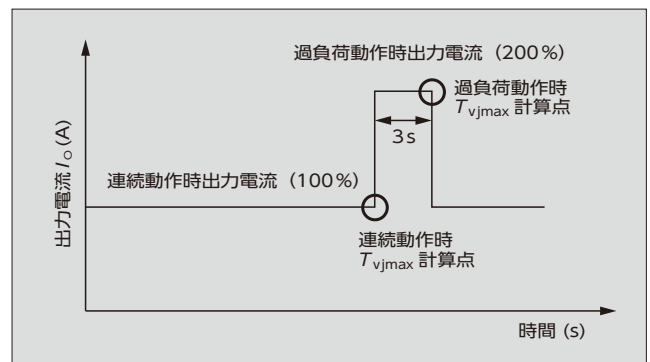


図4 インバータ動作の電流パターン

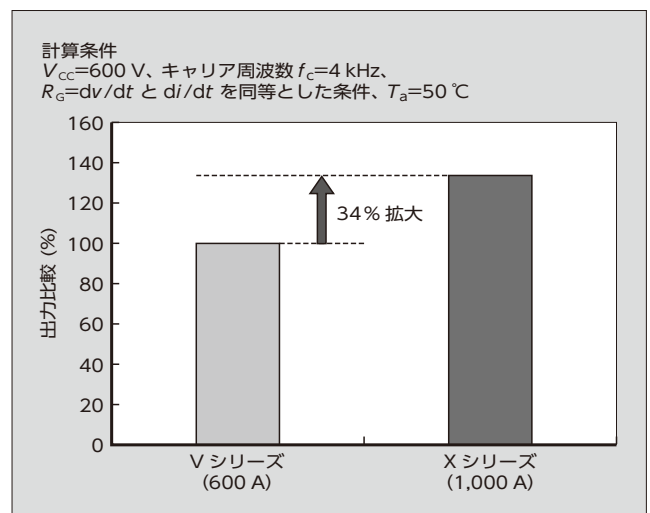


図5 インバータ定常動作時の出力電流比較 (過負荷動作時)

品の中で最も定格電流の大きい1,200 V/600 A VシリーズIGBTモジュールDual XT（VシリーズDual XT）を搭載した汎用インバータを定常動作させたときの同一到達温度での出力電流の比較を図3に示す。XシリーズRC Dual XTはVシリーズDual XTと比べ、電力損失と熱抵抗を低減したことから、同一サイズで25%の出力電流拡大が可能である。

また、汎用インバータでは定常動作に加え、急激にモータの負荷が大きくなる場合の過負荷動作時の検討が重要である。図4に過負荷動作時の電流パターンを示す。この動作では、インバータが連続動作した後、連続動作時の2倍の出力電流で3秒間の過負荷動作を行うことを想定している。過負荷動作時の出力電流の比較を図5に示す。過負荷動作時においてもXシリーズRC Dual XTを用いることで、従来VシリーズDual XTに対して34%の出力電流拡大が可能である。

これにより、XシリーズRC Dual XTでは、従来のIGBT+FWD方式であるVシリーズDual XTに比べて定格電流を大幅に拡大できるため、電力変換装置のサイズを維持したまま出力電力を拡大することが可能である。

⑤ 1,700 V「Xシリーズ」RC-IGBTモジュール「Dual XT」

再生可能エネルギーの中でも重要な電力源の一つである風力発電では、定格電圧1,700 VのIGBTモジュールが広く使われている。図6に風力発電システムの概略図を示す。発電機側では、風速に応じて回転速度が変化する風車によって発電された交流電力を、電力変換装置により直流電力に変換する。その直流電力を系統側の電力変換装置で交流電力に変換することで、系統に安定した電力を供給している。

(1) 低周波動作時のパワーサイクル寿命向上

風力発電の風車の回転エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機側の電力変換装置では、数Hz程度の低周波運転時の温度変化に対する検討が特に重要である。低周波運転では、一周期の時間が長くなるため、素子に電流が流れている時間が長く素子温度が上昇しやすい。また、電流が流れない時間も長く、その間に素子温度が低下しやすい。そのため、低周波運転では温度変化が大きくなり、製品寿命が短くなる。図7に低周波動作におけるチップ接合温度

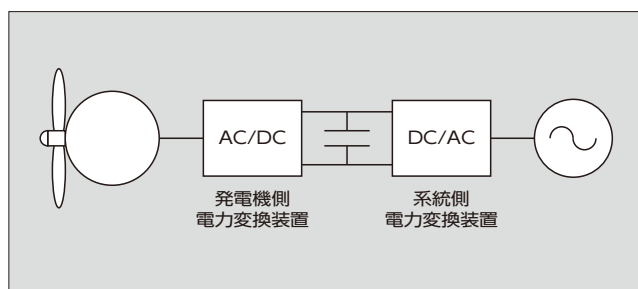


図6 風力発電システムの概略図

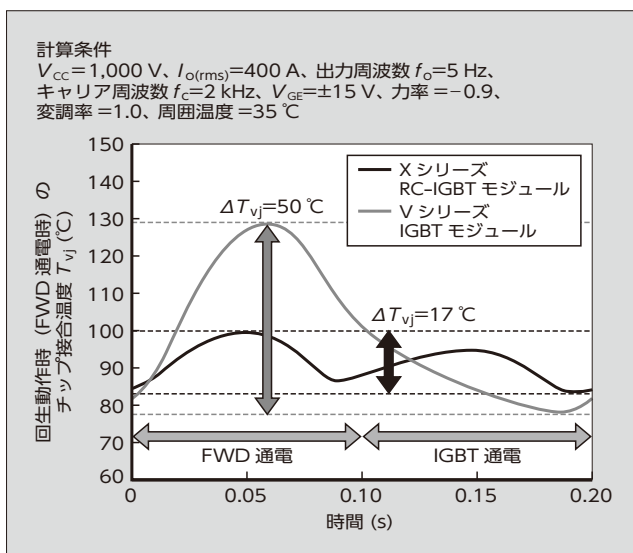


図7 低周波動作時の T_{vj} 計算結果

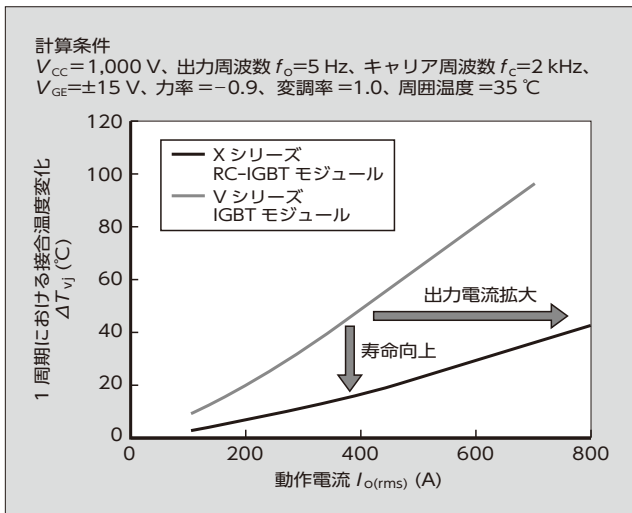
T_{vj} 波形を示す。

従来のIGBT+FWD方式であるVシリーズDual XTでは、IGBTの動作中にはFWDチップに電流が流れないため発熱はなく放熱だけが行われる。その結果、1周期におけるFWDの接合温度の最大値 T_{vjmax} と最小値 T_{vjmin} の差 ΔT_{vj} は $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった。一方、XシリーズRC Dual XTでは、RC-IGBTの特徴であるチップ面積の拡大により放熱性が向上することで T_{vjmax} は低くなる。さらに、RC-IGBTでは1チップ内のIGBT領域およびFWD領域が交互に発熱することにより T_{vjmin} は上昇する。これにより、XシリーズRC Dual XTの温度変化 ΔT_{vj} は従来のIGBT+FWD方式の $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ と比較して $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ と大幅に小さくなり、アルミニウムワイヤやはんだへの繰返し熱応力が軽減することで低周波動作時の ΔT_{vj} パワーサイクル寿命の大幅な改善が実現できる。

IGBTモジュールにおいて ΔT_{vj} を低減することは、IGBTモジュール内部の接合部材に繰返し発生する熱応力が低減するため製品の寿命向上につながる。図8に低周波動作時の ΔT_{vj} と出力電流 I_o の計算結果を示す。同じ出力電流の場合、XシリーズRC Dual XTは、従来のIGBT+FWD方式であるVシリーズDual XTと比較して ΔT_{vj} が低くなる。これにより出力電流 I_o を同じ400 Aとした場合、 ΔT_{vj} を約 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低減することができる。これは、IGBTモジュールの温度変化が小さくなることによる繰返し熱応力の変化量が減少するため、パワーサイクル寿命が1,000倍以上向上することに相当する。また、参考までに、 ΔT_{vj} を $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ とした場合と比較すると、XシリーズRC Dual XTはVシリーズDual XTと比較してパワーサイクル寿命を維持したまま出力電流を2倍以上拡大することが可能である。

(2) LVRT動作時の出力電流向上

風力発電システムでは、系統に瞬間的な電圧低下が発生したときの運転継続（LVRT：Low Voltage Ride Through）機能が重要となる。LVRT機能の動作時（LVRT

図8 低周波動作時の ΔT_{vj} - I_o 計算結果

動作時)では系統側のコンバータが動作を継続しているため、IGBTモジュールのFWDに大電流が流れ、コンデンサに蓄積された電荷が放電される。そのため、発電機側のFWDを介してコンデンサに大きな充電電流が流れる。

図9にLVRT動作を想定した電流の時間変化を示す。LVRT動作では、通常動作時と比較して5倍以上の電流が流れることが想定される。そのため、風力発電システムの実出力電力を拡大するためには、通常動作時の出力電流拡大と同時に、LVRT動作時の出力電流拡大も併せて検討することが必要となる。LVRT動作時の T_{vjmax} とFWDに流れる最大出力電流値 I_o の関係を図10に示す。XシリーズRC Dual XTは、VシリーズDual XTと比較して、LVRT動作時に I_o を96%拡大できる。これは従来のIGBT+FWD方式と比較して、放熱面積を拡大したことによる熱抵抗の改善効果によるものであり、XシリーズRC Dual XTの優位性の一つである。

(3) I^2t 耐量の向上

図11に、XシリーズRC Dual XTおよびVシリーズDual XTの電流二乗時間積(I^2t)耐量の比較を示す。VシリーズDual XTと比較してXシリーズRC Dual XTで

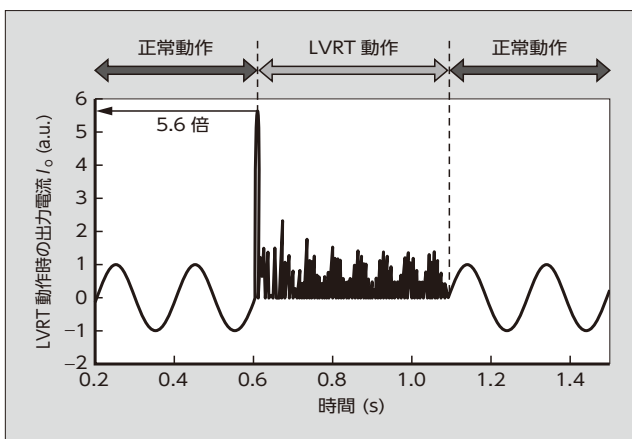
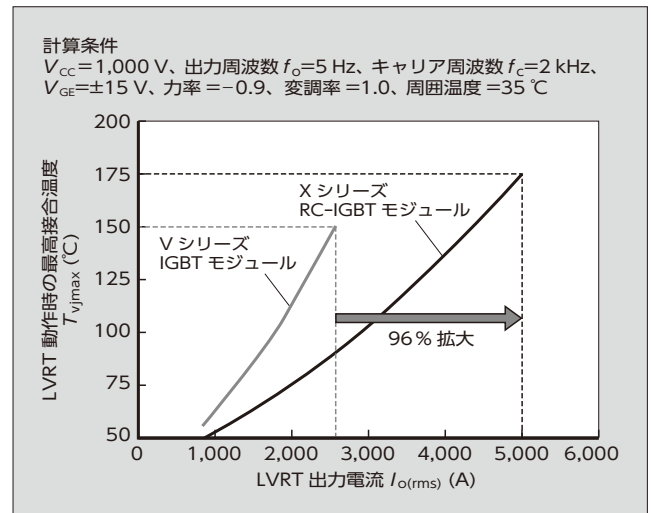
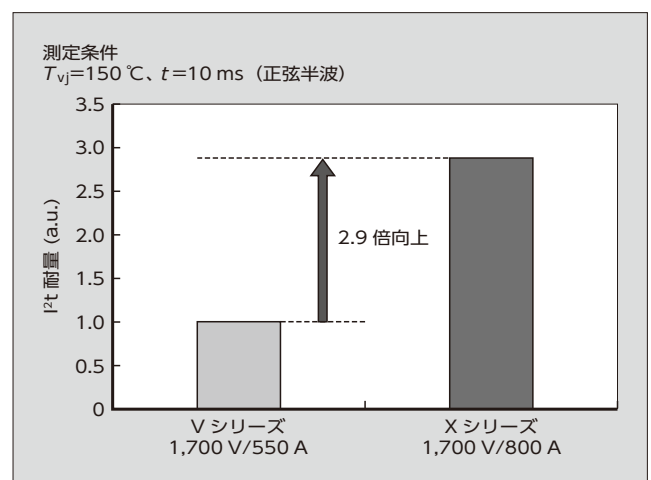


図9 LVRT動作時の電流簡略図

図10 LVRT動作時の T_{vjmax} と I_o の関係図11 I^2t 耐量比較

は、IGBTとFWDを1チップに統合し放熱性を改善したことで、約3倍の I^2t 耐量を実現した。

6 あとがき

第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール「Dual XT」について述べた。富士電機は、RC-IGBTを第7世代IGBTモジュールの一つであるDual XTパッケージに搭載し、定格電圧1,200Vおよび1,700Vの性能を向上し、高出力および高信頼性を実現した。

今後も、さらなるIGBTモジュールの技術革新を進め、安全・安心で持続可能な社会の実現に向け貢献する所存である。

〈注〉電流二乗時間積(I^2t)耐量： I^2t は素子破壊しない範囲で許容される過電流のジュール積分値である。過電流は商用正弦半波に関わる時間幅8～10msの1サイクルで規定される。 I^2t 耐量は素子が破壊する耐量である。

参考文献

- (1) Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”, Proceeding of PCIM Europe 2015.
- (2) 川畑潤也ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBTモジュール. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.254-258.
- (3) Takahashi, M. et al. “Extended Power Rating of 1200V IGBT Module with 7G RC-IGBT Chip Technologies”, Proceeding of PCIM Europe 2016.
- (4) Takahashi, K. et al. “1200V Class Reverse Conducting IGBT Optimized for Hard Switching Inverter”, Proceeding of PCIM Europe 2014.
- (5) 吉田崇一ほか. 車載用RC-IGBT. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.279-282.
- (6) 山野彰生ほか. 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュール. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.256-260.
- (7) 山野彰生ほか. 第7世代「Xシリーズ」産業用RC-IGBTモジュールの系列化. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.233-237.
- (8) Yamano, A. et al. “The Series of 7th-Generation “X Series” RC-IGBT Modules for Industrial Applications”, Proceeding of PCIM Europe 2018.

- (9) Yamano, A. et al. “1,700 V 7th-Generation “X Series” RC-IGBT Modules for Industrial Applications”, Proceeding of PCIM Europe 2019.



江袋 佑太

IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業モジュール部。



山野 彰生

IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業モジュール部。



掛布 光泰

IGBTモジュールの開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業モジュール部。



第7世代「Xシリーズ」大容量 IGBT-IPM「P631」

“P631” 7th-Generation “X Series” High Power IGBT-IPM

皆川 啓 MINAGAWA, Kei

唐沢 達也 KARASAWA, Tatsuya

唐本 祐樹 KARAMOTO, Yuki

富士電機は、電力変換装置のさらなる高出力化、高効率化、高信頼性化の要求に応えるため、高出力で高い放熱性を兼ね備えた第7世代「Xシリーズ」大容量 IGBT-IPM「P631」を開発し、系列化した。現行品の大容量「Vシリーズ」IPMに比べ、定格電流を最大1.5倍まで拡大した。また、連続動作時の発生損失を約7%改善するとともに、150℃での高温動作化を実現した。これにより、インバータの出力電流を約1.3倍増加できる。

Fuji Electric has developed the “P631” high-capacity IGBT-IPM and added it to the 7th-generation “X Series” line. The IGBT-IPM achieves high output and high heat dissipation to meet the demand for higher output, higher efficiency, and higher reliability in power conversion equipment. Its rated current is up to 1.5 times higher than that of the existing high-capacity “V Series” IPMs. In addition, it improves the loss generated during continuous operation by approximately 7% and achieves high-temperature operation at 150°C. This contributes to increasing the output current of inverters by approximately 1.3 times.

① まえがき

近年、地球温暖化対策や安全・安心で持続可能な社会の実現のために、エネルギーを効率的に利用し、省エネルギーに貢献するパワーエレクトロニクス機器への期待が高まっている。中でも、産業や自動車、再生可能エネルギーなどのさまざまな分野で用いられ、電力変換装置のキーデバイスであるパワー半導体が重要な役割を担っている。

富士電機は、1988年にパワー半導体のIGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールの生産を開始し、以来、多くの技術革新によって小型化、低損失化、高信頼性化を実現してきた。IGBT-IPM(Intelligent Power Module)は、ゲート駆動回路を内蔵し、さらに、保護機能を備えたパワー半導体である。このIGBT-IPMにおいて、IGBTチップの過熱保護機能やアラーム要因識別機能を業界で初めて内蔵し、高信頼性化や高機能化の要求に応じてきた。また、第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPMにおいても業界で初めてとなるチップ温度ワーニング機能やブレーキ部独立動作機能を内蔵し、高信頼性化に貢献してきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

IGBT-IPMの中でも、大容量IGBT-IPMはエレベータ、射出成型機など、適用電流が大きく、パワーチップに大きな熱ストレスが加わる装置で利用されることが多いため、高出力可能で壊れにくいことが望まれる。このような要求に応えるために、大容量IGBT-IPM「P631」に第7世代技術を適用し、発生損失低減、高温動作化し、高出力可能な第7世代「Xシリーズ」大容量IGBT-IPM(大容量XシリーズIPM)を開発した。

② 製品概要

図1に大容量IGBT-IPM「P631」の外観を示す。また、図2にP631の内部構造を示す。P631は、大容量製品に

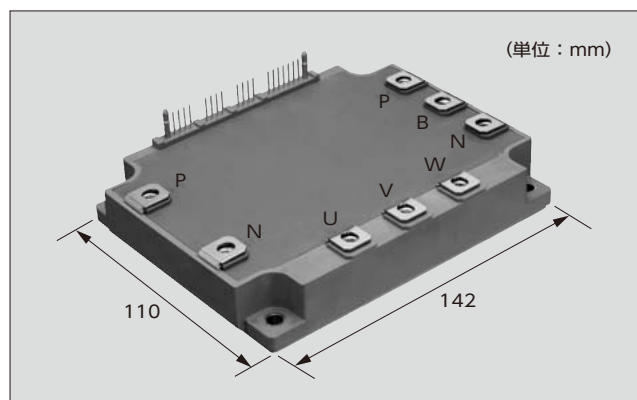


図1 大容量 IGBT-IPM「P631」

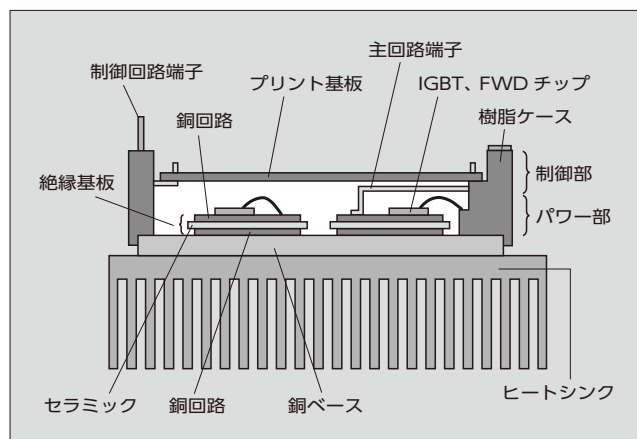


図2 大容量 IGBT-IPM「P631」の内部構造

表1 製品のラインアップ
(a) 大容量VシリーズIPM（現行品）

定格 電圧 (V)	定格 電流 (A)	製品型式	
		6 in 1 ブレーキ部なし	7 in 1 ブレーキ部内蔵
600	200	6MBP200VEA060-50	7MBP200VEA060-50
	300	6MBP300VEA060-50	7MBP300VEA060-50
	400	6MBP400VEA060-50	7MBP400VEA060-50
1,200	100	6MBP100VEA120-50	7MBP100VEA120-50
	150	6MBP150VEA120-50	7MBP150VEA120-50
	200	6MBP200VEA120-50	7MBP200VEA120-50

(b) 大容量XシリーズIPM（開発品）

定格 電圧 (V)	定格 電流 (A)	製品型式	
		6 in 1 ブレーキ部なし	7 in 1 ブレーキ部内蔵
650	200	6MBP200XEN065-50	7MBP200XEN065-50
	300	6MBP300XEN065-50	7MBP300XEN065-50
	450	6MBP450XEN065-50	7MBP450XEN065-50
1,200	100	6MBP100XEN120-50	7MBP100XEN120-50
	150	6MBP150XEN120-50	7MBP150XEN120-50
	200	6MBP200XEN120-50	7MBP200XEN120-50
	300	6MBP300XEN120-50	7MBP300XEN120-50

表2 機能比較

機 能		VシリーズIPM (現行品)	XシリーズIPM (開発品)
駆動回路		○	☆
保護機能	短絡保護	○ (2 μs)	☆ 高速化 (1 μs)
	チップ過熱保護	○ (150℃以上)	☆ (175℃以上)
	電源電圧低下保護	○	○
チップ温度ワーニング出力機能		×	☆ (6 in 1のみ)
ブレーキ部独立動作機能 (アラーム時)		×	☆
アラーム要因識別機能		○ 2 ms、4 ms、8 ms 識別間隔min=0.1 ms	☆ 2 ms、4 ms、8 ms 識別間隔min=1.1 ms

○：機能あり、×：機能なし
☆：現行品VシリーズIPMからの改善点や新規機能

不可欠な放熱性を確保するために4mmの厚い銅ベースを活用し、外部冷却器のヒートシンクに接する銅ベースの上面のほぼ全面にパワー部を配置し、パワー部と制御部が2階建て構造となっている。また、主回路の内部配線に並行平板を用いることで内部インダクタンスを低減している。さらに、スイッチング時に発生するサージ電圧を効果的に抑制できるようP端子とN端子をパッケージの両端に設置しているため、スナバコンデンサを2か所に接続でき、大容量化に適している⁽⁴⁾。

表1に、第7世代大容量XシリーズIPMと現行品の第6世代大容量VシリーズIGBT-IPM（大容量VシリーズIPM）の製品ラインアップを示す。現行品は定格電圧600V品では400Aまで、定格電圧1,200V品では200Aまでのラインアップであった。これに対して、大容量XシリーズIPMでは市場要求の大容量化に応えるため、定格電圧650V品で450Aまで、定格電圧1,200V品で300Aまで系列を拡大した。

また、表2に大容量XシリーズIPMと大容量VシリーズIPMの機能比較を示す。

3 特 徴

大容量XシリーズIPMの最大の特徴である発生損失の低減について述べる。

3.1 IGBTの飽和電圧とターンオフ損失

第7世代IGBTは、表面のトレンチゲート構造の微細化と薄ウェーハ加工技術によるドリフト層の薄化によって、コレクタ・エミッタ間飽和電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性を改善している⁽¹⁾⁽⁵⁾。

図3に、1,200V系大容量XシリーズIPMのコレクタ・エミッタ間飽和電圧とターンオフ損失のトレードオフ特性を示す。大容量XシリーズIPMは、現行品の大容量VシリーズIPMと比べ、ターンオフ損失を維持したまま飽和電圧を約0.3V低減している。また、裏面構造のフィールドストップ（FS）層を最適化することで、薄ウェーハ化による素子耐圧の低下およびターンオフ時の電圧振動を抑制した。

3.2 ターンオン損失

一般にIGBTは、IGBTチップの接合温度が高いほど電

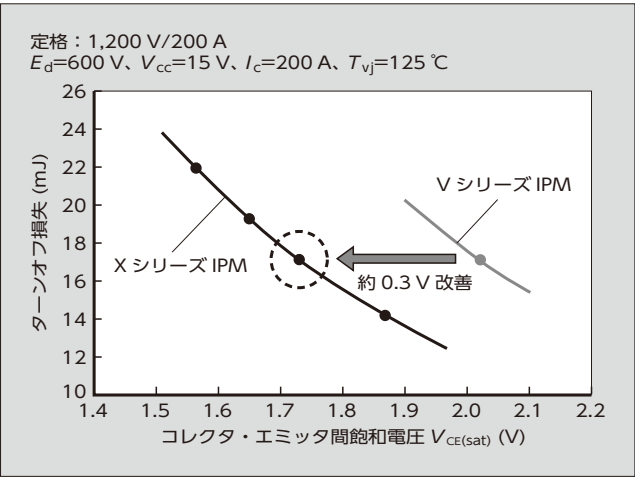


図3 コレクタ・エミッタ間飽和電圧－ターンオフ損失のトレードオフ

圧変化率 dv/dt が小さくなり、スイッチング損失が増加する。一方、スイッチング損失を低減するためにゲート駆動電流を増加して、スイッチング時の dv/dt を大きくすると、放射ノイズが大きくなる傾向がある。

大容量 X シリーズ IPM では、スイッチング時のターンオン損失を低減するために、IGBT チップの接合温度に応じてターンオン時のゲート駆動電流を最適に制御する機能を新たに搭載した。IGBT チップに内蔵した温度センサを使って IGBT チップの温度をリアルタイムに監視することにより、温度上昇によってスイッチング時の dv/dt が小さくならないようゲート駆動電流の切替え制御を行っている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

大容量 X シリーズ IPM は、ゲート駆動電流切り替え後のスイッチング時の dv/dt を市場実績のある現行品の大容量 V シリーズ IPM に対して同等以下になるように最適化し、スイッチング損失を低減しつつ、放射ノイズを抑制した。

図 4 に、製品定格 1,200 V/200 A における PWM インバータ動作時の発生損失をシミュレーションした結果を示す。前述の特性改善により、大容量 X シリーズ IPM の発生損失は、大容量 V シリーズ IPM よりも、約 7% 改善し

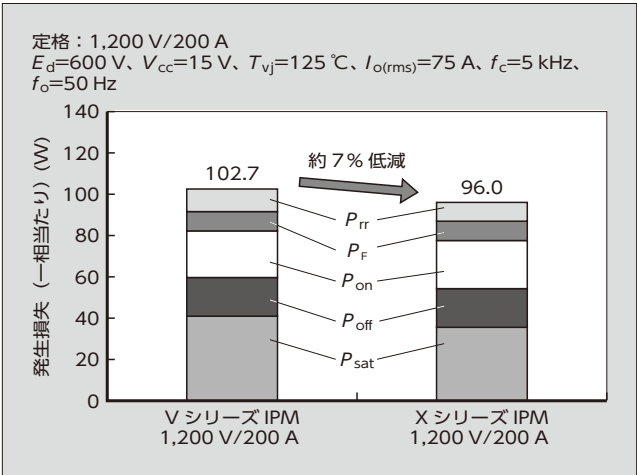


図 4 発生損失の比較

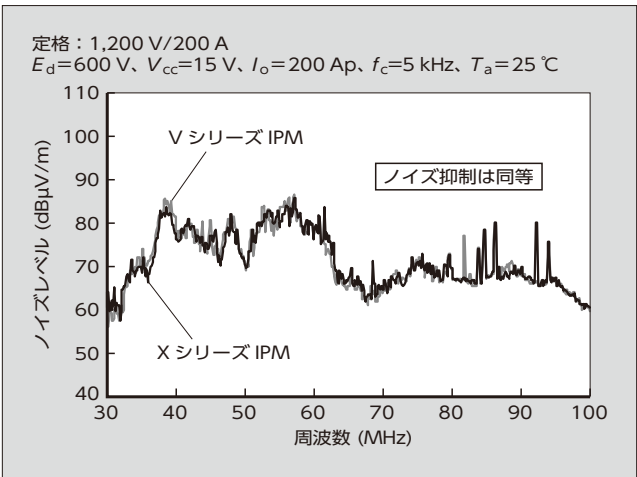


図 5 放射ノイズの比較 (相対比較試験結果)

ている。

また、前述の型式における放射ノイズの比較結果を図 5 に示す。大容量 X シリーズ IPM の放射ノイズは大容量 V シリーズ IPM に対して、同等レベルに抑えられている。

4 高温動作化

表 3 に、大容量 X シリーズ IPM と大容量 V シリーズ IPM の動作温度の比較を示す。大容量 X シリーズ IPM は、第 7 世代パッケージ技術である高耐熱ゲルや高信頼性はんだなどの高温動作を可能にする技術を採用し、連続動作時のチップ接合温度 T_{vjop} を大容量 V シリーズ IPM の 125 °C から 150 °C に引き上げ、最高チップ接合温度 T_{vjmax} を大容量 V シリーズ IPM の 150 °C から 175 °C に引き上げた。

このような製品の高温動作化を実現させるために、IPM

表 3 動作温度の比較

項 目	V シリーズ IPM	X シリーズ IPM
最高ケース温度 T_{cmax}	110 °C	125 °C
連続動作時チップ接合温度 T_{vjop}	125 °C	150 °C
最高チップ接合温度 T_{vjmax}	150 °C	175 °C

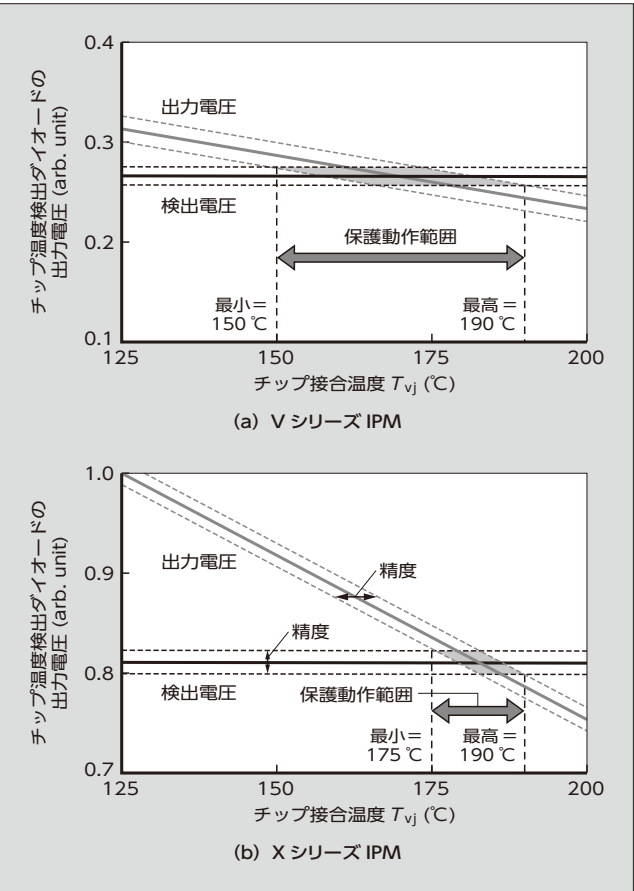


図 6 チップ温度検出ダイオードの出力電圧－温度特性

に内蔵しているチップ過熱保護機能の保護動作温度の精度を向上させている。チップ過熱保護の温度検出素子は、出力電圧に温度依存性があるダイオードをIGBTチップ上に設けている。そのダイオードの出力電圧を制御ICにてモニターすることでチップ温度を検出し、過熱保護を行っている。図6に、IGBTに内蔵しているチップ温度検出ダイオードの出力電圧とチップ接合温度の関係を示す。大容量XシリーズIPMの温度検出ダイオードの1℃当たりの出力電圧変化量を、大容量VシリーズIPMに比べて約3倍大きくした。さらに、大容量XシリーズIPMの検出電圧のばらつきを、大容量VシリーズIPMに比べて約半分にしたことにより、チップ過熱保護の上限温度を変更せずに下限温度を150℃から175℃まで高くすることができた。これにより、高温動作化が可能となった。なお、チップ過熱保護の上限温度は、大容量VシリーズIPMと同じ温度としており熱破壊に至るリスクはない。

5 出力電流拡大

大容量XシリーズIPMでは、IGBTチップ接合温度を上げたことと発生損失の低減により、出力電流の拡大が可能となっている。図7に、代表的な電力変換装置であるインバータにIPMを搭載したときのインバータ出力電流とチップ接合温度の比較を示す。大容量XシリーズIPMでは、大容量VシリーズIPMに比べ、出力電流を約1.3倍に増加できる。

6 短絡保護の高速化

大容量XシリーズIPMは、既存外形を踏襲し、チップサイズを大きくすることなく、最大電流定格を拡大している。このため、短絡時の短絡エネルギーを増加させることなく、保護することが必要となる。大容量XシリーズIPMでは、短絡時のゲート電圧抑制回路の高速化と遅延時間の短縮により、高速な短絡保護を実現した。

図8に、大容量VシリーズIPMの最大定格品

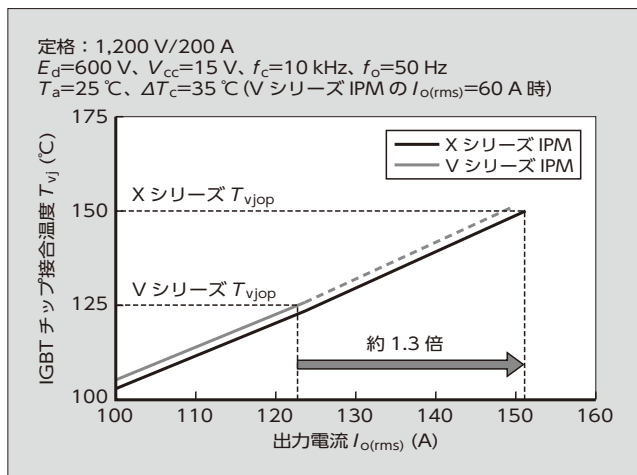


図7 出力電流の拡大

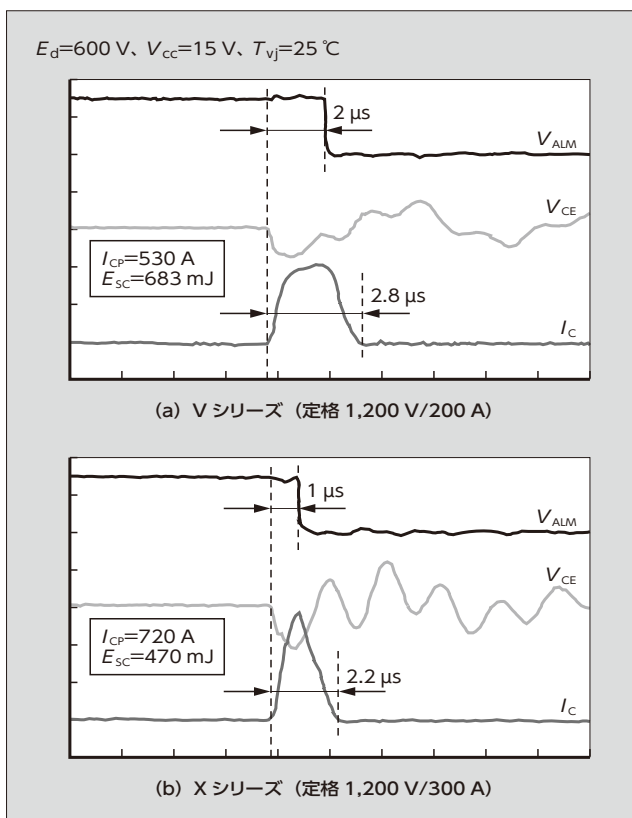


図8 短絡波形の比較

(1,200 V/200 A)と大容量XシリーズIPMの最大定格品(1,200 V/300 A)の短絡波形の比較を示す。大容量VシリーズIPMでは、短絡電流が流れ始めてからアラーム信号が出力されるまでの時間に2μs要していたが、大容量XシリーズIPMでは、アラーム信号が出力されるまでの時間を1μsに高速化した。これにより、大容量XシリーズIPMでは短絡時の短絡エネルギーを約30%抑制でき、電流定格拡大に貢献している。

7 あとがき

本稿では、第7世代「Xシリーズ」大容量IGBT-IPM「P631」について述べた。

「Xシリーズ」大容量IGBT-IPMの系列製品のラインアップ拡充により、今後の電力変換装置のさらなる高出力化と高機能化を実現し、広く世の中に貢献できると考えている。

今後もさらなる技術革新を推進し、IGBTモジュールの製品開発をとおりて地球温暖化の対策や安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献していく所存である。

参考文献

- (1) 皆川啓ほか. 第7世代「Xシリーズ」IGBT-IPM. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.219-223.
- (2) Massimo, C. "Intelligent Power Modules (IPM) Contributes to Energy Saving and faster Time to Market". Bodo's Power system. 2021, May, p.26-29.

- (3) Satou, K. et al. “The 7th Generation Intelligent Power Module for Industrial Applications”. Proceeding of PCIM Asia 2021.
- (4) 清水直樹ほか. 大容量「Vシリーズ」IPMの系列化. 富士時報. 2011, vol.84, no.5, p.322-326.
- (5) Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”. Proceeding of PCIM Europe 2015.

**皆川 啓**

インテリジェントパワーモジュールの開発に従事。
現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業
部産業モジュール部。

**唐沢 達也**

パワーモジュールのパッケージ設計に従事。現在、
富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業
モジュール部。

**唐本 祐樹**

パワー半導体の設計開発に従事。現在、富士電機
株式会社半導体事業本部産業事業部産業モジュ
ール部。



第3世代小容量 IPM「P633C シリーズ」

“P633C Series” 3rd-Generation Small IPMs

上村 威 KAMIMURA, Takeshi

大橋 英知 OHASHI, Hidetomo

田村 隆博 TAMURA, Takahiro

世界のエネルギー消費量は年々増加傾向にあり、省エネルギー（省エネ）に関する政策や規制が各国で進んでいる。この省エネ政策や規制に加えて、通信機器や制御機器などの EMC 関連の規格に準拠した低ノイズ性や耐ノイズ性も同時に要求されている。これらの要求に応えるため富士電機は、省エネ性能と EMC 性能を向上した第3世代小容量 IPM「P633C シリーズ」を開発した。第7世代 FWD チップ技術を適用することで、発生損失と発生ノイズのトレードオフを改善した。また、新開発の 3ch-HVIC と LVIC チップを搭載することで、外来サージに対する誤動作耐量や破壊耐量が向上した。

Worldwide energy consumption has been increasing year by year, resulting in many countries advancing policies and regulations related to energy savings. In addition to these energy-saving policies and regulations, there is also demand for low-noise and noise-immunity features in compliance with EMC-related standards for communication and control equipment. To meet these demands, Fuji Electric has developed the “P633C Series” 3rd-generation small IPMs with improved energy-saving and EMC performance. Applying the 7th-generation FWD chip technology improves the trade-off between generated loss and generated noise. In addition, they come with newly developed 3ch-HVIC and LVIC chips to improve malfunction and breakdown capability against external surges.

① まえがき

近年、中国や新興国の経済発展により、世界のエネルギー消費量は年々増加傾向にある。エネルギー消費量の増大に伴い地球温暖化の主な原因となる CO₂ 排出量が増え、エネルギー消費量の削減が急務となっている。

このような背景を踏まえ各国は、省エネルギー（省エネ）を進めるための政策や規制を進めている。

家庭用エアコンは、エネルギー消費の大きな機器の一つである。世界需要の約半分を占める中国では、2020 年に強化された省エネ規制に伴い生産されるエアコンのほとんどはインバータ式に切り替わっている。さらに、東南アジア、中東、南米などの新興国市場においても生活水準の向上に伴う住環境の空調ニーズの高まりとエネルギー消費抑制との両立を図るため、インバータ式エアコンの普及が見込まれている。

省エネ規制強化に加えて、インバータ回路のスイッチング動作によって発生する放射ノイズなどにより、通信機器や制御機器などに悪影響を及ぼさないようにする必要があり、IEC の国際無線障害特別委員会である CISPR (Comité international spécial des perturbations radioélectriques) などが定めた電磁両立性 (EMC: Electromagnetic Compatibility) 関連の規格に準拠した、低ノイズ性や耐ノイズ性も同時に求められている。また、エアコンは他の電気機器と同一の電源系統に近接して設置されるので、雷や静電気などの外来サージだけでなく、他の機器から発生する電氣的サージなどによってエアコンが誤動作や破壊することなく動作し続けることも求められている。

これらの要求に応えるために富士電機は、2012 年からエアコン向け三相インバータブリッジ回路に使用する小容

量 IPM (Intelligent Power Module) を製品化してきた。このたび、従来の第2世代小容量 IPM⁽¹⁾⁽²⁾に比べ、損失と発生ノイズを低減し、耐ノイズ性能を向上した第3世代小容量 IPM「P633C シリーズ」を開発した。

② 製品概要

図1に製品の外観を、表1に製品の概略仕様を示す。

製品ラインアップは、定格 650 V/15、20、30 A の 3 種類である。保護機能として、過電流保護機能、低入力電圧保護機能、温度出力機能、過熱保護機能、アラーム出力機能を内蔵している。

第3世代小容量 IPM は、発生損失と発生ノイズのトレードオフを改善するために最適化した第7世代 FWD (Free Wheeling Diode) チップ技術⁽³⁾を適用している。また、外来サージによる誤動作耐量や破壊耐量を向上させるために、新たに開発した 3ch-HVIC (High Voltage

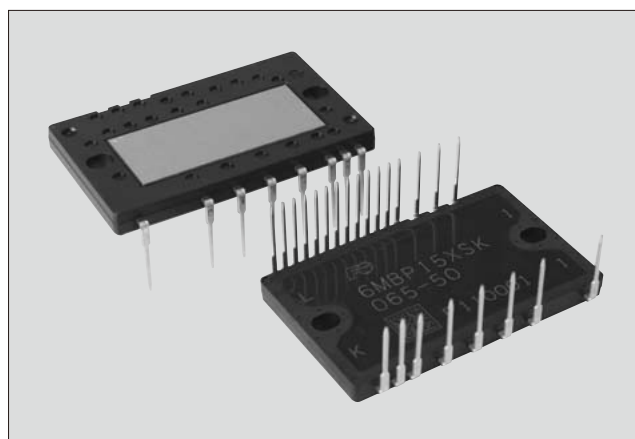


図1 「P633C シリーズ」

表1 第3世代小容量 IPM「P633C シリーズ」の概略仕様

項 目	仕 様		
型 式	6MBP15XSK065-50	6MBP20XSK065-50	6MBP30XSK065-50
コレクタ・エミッタ間電圧 V_{CE}	650 V (max.)		
コレクタ電流 I_C	15 A (max.)	20 A (max.)	30 A (max.)
コレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$	1.6 V (typ.)		
ダイオード順方向電圧 V_F	2.0 V (typ.)		
絶縁電圧 V_{isol}	AC1,500 V _(rms)		
連続動作時チップ接合温度 T_{vjop}	-40 ~ +150 °C		
保護機能	過電流保護、低電圧保護、加熱保護、異常アラーム出力、温度出力保護		

Integrated Circuit) と LVIC (Low Voltage Integrated Circuit) チップを搭載している。

第3世代小容量 IPM のパッケージは、第2世代小容量 IPM と同じ外形寸法 $W43 \times D26 \times H3.7$ (mm) の P633 シリーズのパッケージとしている。絶縁規格は、UL1557 規格に準拠している。

図2に第3世代小容量 IPM の回路構成を、図3に断面構造を示す。第3世代小容量 IPM は、第7世代の IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) と FWD の各チップを絶縁基板上に搭載し、三相インバータブリッジ回路を構成している。この三相インバータブリッジ回路のローサイド側の IGBT を駆動するための LVIC と、ハイサイド側の IGBT を駆動するための HVIC をリードフレーム上に搭載している。HVIC は、三相分を1チップ化した 3ch-HVIC を採用している。

また、ハイサイド回路に線形抵抗特性を持つ電流制限用

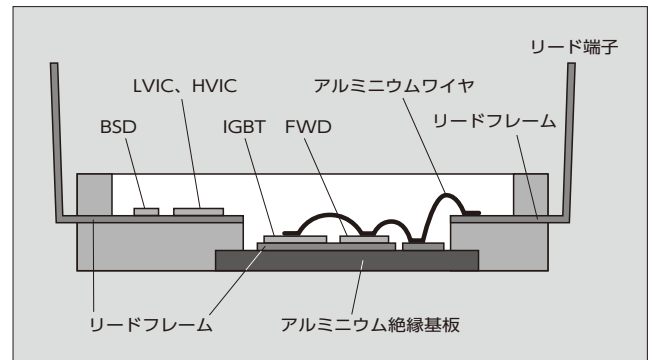


図3 小容量 IPM 断面構造図

の抵抗を内蔵した3個の BSD (Boot-Strap-Diode) を搭載しており、小容量 IPM の外部にコンデンサ3個を接続することによりハイサイド駆動用の電源回路が構成できる。これにより、別途構成が必要な絶縁電源回路が不要となり、回路の簡略化と実装基板の小型化が可能である。

③ 低損失化と低ノイズ化の両立

標準的なインバータエアコンの動作状態におけるスイッチング損失の分析結果を図4に示す。IGBT 自体のターンオン損失 P_{on} と対向の FWD のリカバリ損失 P_{rr} で構成される IGBT のターンオン動作により発生する損失は、スイッチング損失全体の 68% を占める支配的な要素となる。このターンオン損失とリカバリ損失を低減する一般的な

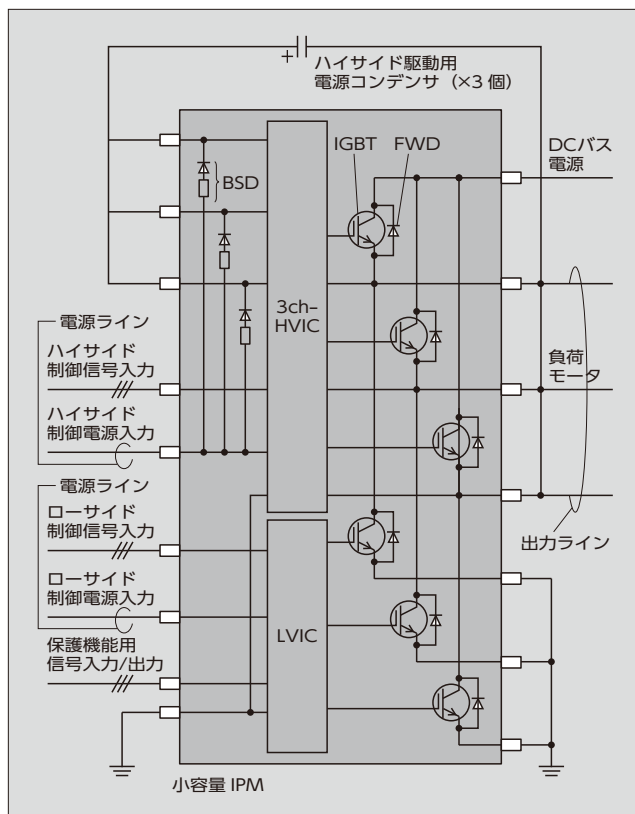


図2 第3世代小容量 IPM の回路構成

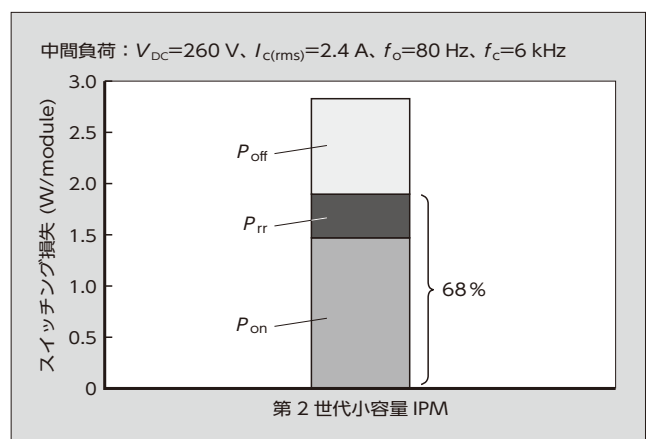


図4 標準的なインバータエアコンのスイッチング損失

手法としては、スイッチング速度を速めることである。しかし、この手法では、スイッチング時の電圧変化率 dv/dt が急峻（きゅうしゅん）となり放射ノイズが増加してしまう。そこで、 dv/dt を増加させずにスイッチング損失を低減することが重要となる。第3世代小容量IPMでは、第7世代のFWDチップ技術を基にライフタイムキラーとドリフト層の厚さを最適化し、スイッチング損失の低減と dv/dt の抑制を両立した。

図5に第2世代および第3世代小容量IPMのFWDリカバリ動作波形を示す。第3世代小容量IPMのFWDのリカバリ動作時における dv/dt は、第2世代小容量IPMに比べて58%低減し、電圧が立ち上がった後の微小な電

圧振動も見られなくなった。また、FWDのリカバリ電流ピーク I_{RP} は、第2世代小容量IPMに比べて1/3となり、ピーク値を過ぎた電流回復波形も緩やかになっている。これにより図6に示すFWDリカバリ動作時における dv/dt とスイッチング損失のトレードオフにおいて、第2世代小容量IPMに比べて損失は32%減少し、 dv/dt は58%低減した。

4 誤動作耐量と破壊耐量の向上

雷や静電気、また、他の機器で発生した伝導ノイズなどに伴う外来サージは、負荷モータを接続している出力ラインや電源ラインを伝播して小容量IPMに印加される（図2）。この出力ラインと電源ラインのそれぞれに印加される外来サージに対する耐量向上について、次に述べる。

4.1 出力ラインのノイズ耐量向上

出力ラインに伝播した外来サージは、直接またはハイサイド駆動用電源のコンデンサを介して小容量IPMの3ch-HVICの内部回路に侵入し、3ch-HVICの誤動作やそれに伴う破壊を引き起こすことがある。

第3世代小容量IPMの3ch-HVICは、内部回路に形成された寄生トランジスタが予期しない動作をしないように抑制する新技術⁽⁴⁾を適用し、外来サージによる誤動作耐量を向上させている。詳細は261ページ「次世代小容量IPM用3ch-HVIC技術」で述べる。

4.2 電源ラインの静電気放電耐量向上

電源ラインは、HVICとLVICの双方に接続されており、小容量IPMの取扱い時や、はんだ付け実装時などにおいて、静電気放電（ESD：Electro-Static Discharge）によりHVICまたはLVICが破壊する危険性がある。図7にLVICのブロック回路図を示す。LVICの内部回路と並列にインピーダンスの低いESD保護回路を接続し、印加される静電気放電のサージ電圧を素早くクランプし、内部回路に伝播する電圧を減衰させることで内部回路のサージに

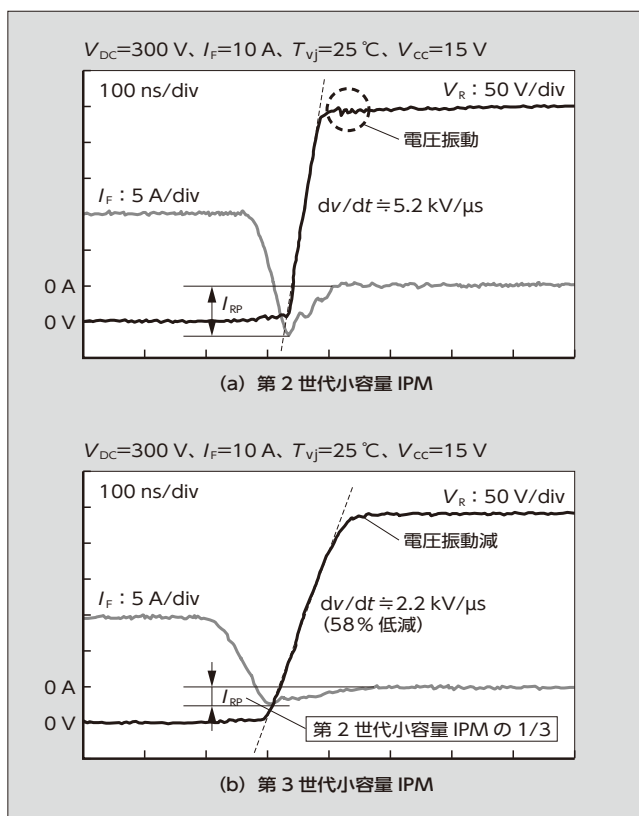


図5 FWDリカバリ動作波形の比較

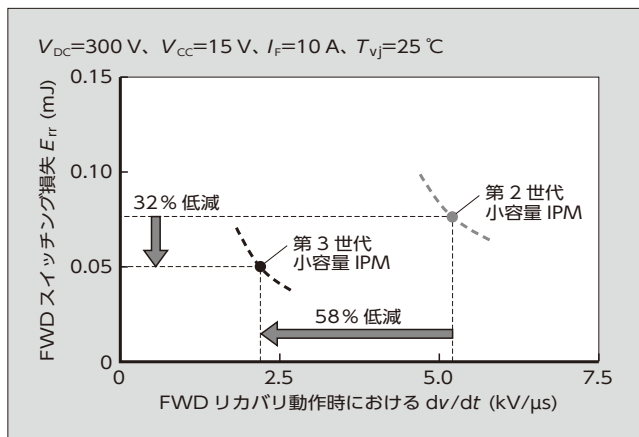


図6 FWDリカバリ動作時における dv/dt と損失のトレードオフ

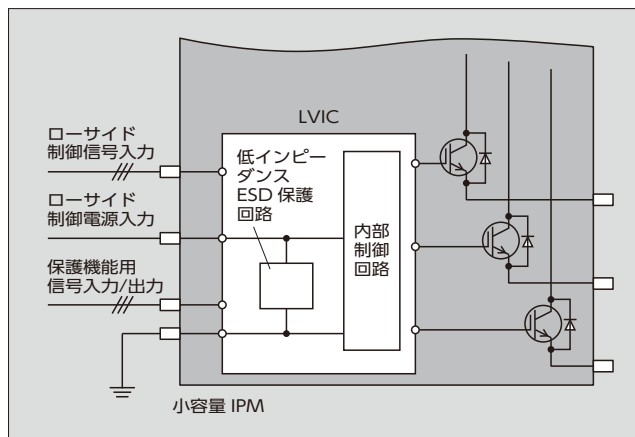


図7 LVICのブロック回路図

よる破壊を抑制している。また、同様な保護回路をHVICにも内蔵している。これにより、第3世代小容量IPMの静電気放電耐量は、第2世代小容量IPMに比べ、2倍以上向上した2.5 kVとなっている。

5 エアコンへの適用効果例

家庭用エアコンを想定した発生損失のシミュレーション結果を図8に示す。エアコンの通年エネルギー消費効率（APF^{（注）}）に大きな影響を与える最小負荷から中間負荷の動作条件において従来品よりも低損失となっている。一方、ノイズ発生原因の一つであるFWDリカバリ動作時に発生する放射ノイズに影響する高調波電圧の周波数解析結果を、図9に示す。第3世代小容量IPMは第2世代よりも10 MHz帯域を中心に約10 dB（約1/3）低くなっている。これらの結果から、従来製品に比べ、損失性能を低減しながら大幅にノイズを低減している。

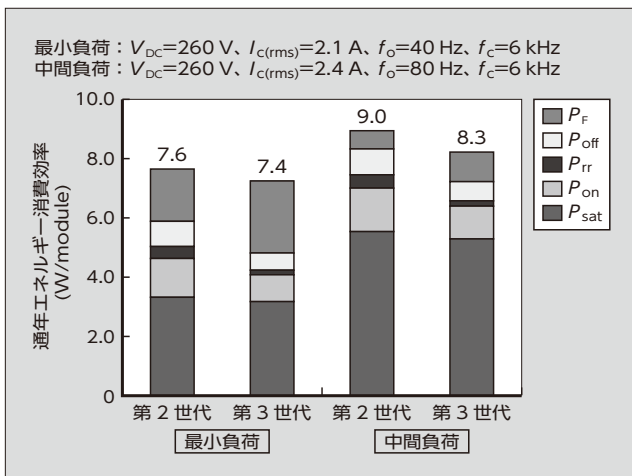


図8 発生損失のシミュレーション比較結果

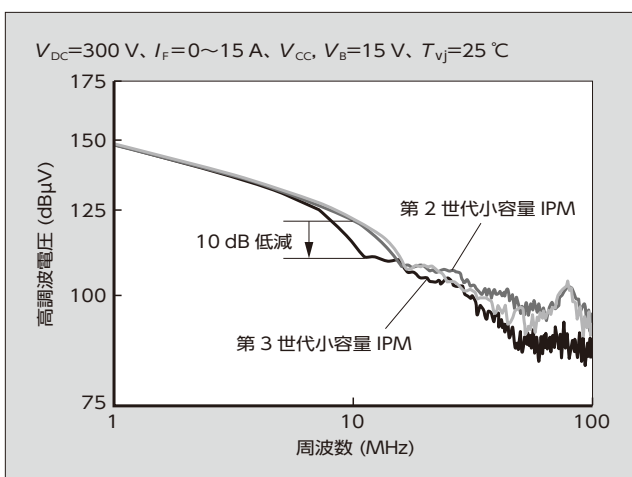


図9 FWDリカバリ動作の高調波電圧周波数解析結果

（注）通年エネルギー消費効率（APF：Annual Performance Factor）：1年間で発揮した冷房能力＋暖房能力／消費電力量

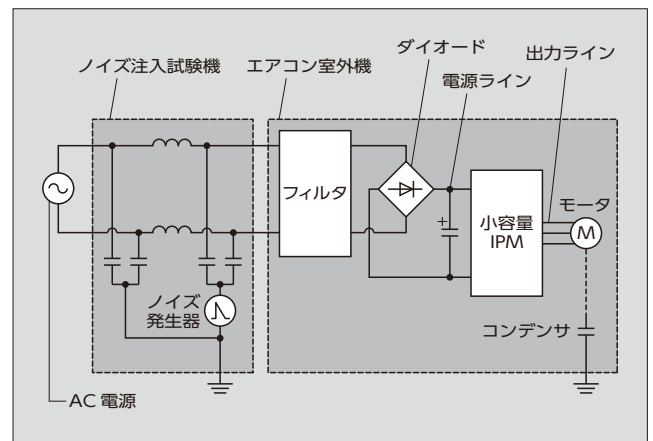


図10 電氣的ファストトランジェント／バーストイミュニティ試験の回路構成

表2 妨害波電圧注入の実験結果

項目		妨害波電圧 (kV)						
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
正電圧	第2世代 小容量IPM	○	○	○	○	△	—	—
	第3世代 小容量IPM	○	○	○	○	○	○	○
負電圧	第2世代 小容量IPM	○	○	○	○	△	—	—
	第3世代 小容量IPM	○	○	○	○	○	○	○

○：誤動作なし、動作継続
 △：誤動作あり、動作停止

また、図10に示す回路構成にて電氣的ファストトランジェント／バーストイミュニティ試験（IEC 61000-4-4）を行い、外来サージ耐量を評価した。第3世代小容量IPMを市販の家庭用エアコン室外機に搭載し、ノイズ注入試験機から交流電源ラインにサージを重畳させて試験を行った結果を表2に示す。第3世代小容量IPMは、4 kV以上の高い外来サージ電圧を模擬した妨害波電圧を印加しても誤動作が発生せず、第2世代小容量IPMに比べ、1 kV以上高いノイズ耐量を持ち、異常停止せず連続動作できることを確認した。

6 あとがき

本稿では、第3世代小容量IPM「P633Cシリーズ」について述べた。第7世代FWDチップ技術を採用し、FWDチップを最適化することにより損失と発生ノイズを低減した。また、HVICを最適化することで外来サージや電氣的サージなどへの破壊耐量、誤動作耐量の向上も確保できており、エアコンのみならずインバータ化が進んでいるコンプレッサ、ファン、サーボモータなどのドライブ機器の市場要求にも応えた製品となっている。

今後も、さらなる省エネルギー化社会に貢献できる製品を開発していく所存である。

参考文献

- (1) 荒木龍ほか. 第2世代小容量IPM. 富士電機技報. 2015,

vol.88, no.4, p.259–263.

- (2) Ohashi, H. et al. “The 2nd Generation Small Intelligent Power Module for General-purpose Inverter”. proc. 2016 PCIM Asia.
- (3) Kawabata, J. et al. “The High Power Density and High Efficiency 7th Generation IGBT Module Realizing Compact Power Conversion Systems”. proc. PCIM Asia 2015, p.410–418.
- (4) Jonishi, A. et al. “An Improved Negative Transient Voltage Noize Immunity for an HVIC using Self-shielding Structure”. ISPSD 2021, p.299–302.



大橋 英知

小容量 IPM の開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業モジュール部主査。電気学会会員。



田村 隆博

パワー半導体デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業モジュール部。



上村 威

小容量 IPM の開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業モジュール部。



次世代小容量 IPM 用 3ch-HVIC 技術

3ch-HVIC Technology for Next-Generation Small IPMs

上西 顕寛 JONISHI, Akihiro

山路 将晴 YAMAJI, Masaharu

澄田 仁志 SUMIDA, Hitoshi

IPM は産業機械や家電製品、サーバ用電源などさまざまな用途で用いられている。富士電機は、電力変換システム向けに、次世代の小容量 IPM 用 3ch-HVIC 技術を開発した。従来の 3 チップで構成していた 3 チャネル分のハイサイド・ゲートドライバ回路 (HVIC) を 1 チップに集積化し、レベルシフタとハイサイドウェル構造に高ノイズ耐量化技術を適用することで、チップ面積を増大させることなく、スイッチングノイズに対する高いノイズ耐量を実現した。また、開発した 3ch-HVIC の適用により制御部の実装面積を従来製品よりも約 30% 削減し、パッケージサイズを約 10% 小型化できる。

IPMs are used in a variety of applications, including industrial machinery, home appliances, and power supplies for servers. Fuji Electric has developed 3ch-HVIC technology for next-generation small IPMs for power conversion systems. It achieves high noise tolerance for switching noise without increasing the chip area by integrating the high-side gate driver circuits (HVIC) for three channels into a single chip instead of using a conventional three-chip configuration and by applying high noise tolerance technology to the level shifter and high-side well structure. Furthermore, applying this newly developed 3ch-HVIC reduces the mounting area of the control unit by approximately 30% and the package size by approximately 10% compared with conventional products.

① まえがき

IPM (Intelligent Power Module) は、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などの電力スイッチング素子と FWD (Free Wheeling Diode) 素子とともに、ゲート駆動機能と保護機能を備えるゲートドライバ IC を一つのパッケージに集積化した電力用半導体素子である。IPM は電力変換システムの部品点数の削減や小型化、設計の簡素化などに貢献し、産業機械や家電製品、サーバ用電源機器などさまざまな用途で用いられている。

富士電機では、1989 年にバイポーラトランジスタを用いた最初の IPM を製品化した。以来、業界初となる IGBT チップの過熱保護機能を搭載した IPM を開発するなど、システムの高信頼性化、小型化に貢献する製品を積極的に開発している。2012 年には高耐圧のゲートドライバ IC である HVIC (High Voltage Integrated Circuit) を搭載することにより、周辺回路のより一層の簡素化を可能にした 600 V/15 A クラスのエアコン用小容量 IPM を開発し、現在では家電や汎用インバータ向けに HVIC を搭載した 600 ~ 650 V/10 ~ 75 A クラスの IPM を展開している。今後も HVIC 搭載品で低損失化、高ノイズ耐量化を進めるとともに、システムの小型化・低コスト化に貢献する、より小型の次世代小容量 IPM を展開していく。

本稿では、次世代の小容量 IPM の小型化や高ノイズ耐量に貢献する最新の HVIC (3ch-HVIC) の技術について述べる。

② 従来技術と次世代小容量 IPM 用 3ch-HVIC の概要

2.1 従来技術

従来の小容量 IPM と内蔵する HVIC の回路ブロック図を図 1 に示す。HVIC はインバータ回路を構成する上アーム側の IGBT を駆動するためのハイサイド・ゲートドライバ IC であり、ゲート駆動信号のレベルシフト機能を備えていることが特徴である。HVIC はマイクロコントローラからの信号を受けるローサイド回路と、上アーム IGBT のエミッタ電位 VS を基準電位としてゲート駆動出力を行うハイサイド回路、そしてローサイド回路からの接地電位 GND 基準の信号を VS 基準の信号にレベルアップしてハイサイド回路に伝達するレベルシフト回路を基本回路として備えている。

HVIC はハイサイド回路のためのフローティング電源が必要であるが、消費電流が 100 μ A 程度 (ゲート出力オフ時) と小さいため、図 1 に示したダイオード (BSD: Boot-Strap-Diode) とコンデンサ (BSC: Boot-Strap-Capacitor) で構成されるブートストラップ回路により、少ない部品点数で必要な電流供給能力を備えるフローティング電源が構成できる。従来の HVIC 搭載 IPM は、三相インバータ回路を構成する素子として、3 チップの上アーム IGBT と 3 チップの下アーム IGBT、6 チップの FWD を内蔵している。また、上アームのゲート駆

〈注 1〉 上アーム：電源から負荷に電流を供給する回路を上アーム、電源に負荷から電流を引き込む回路を下アームと呼ぶ。

〈注 2〉 フローティング電源：出力端子が接地されておらず、基準電位が可変の電源のことである。

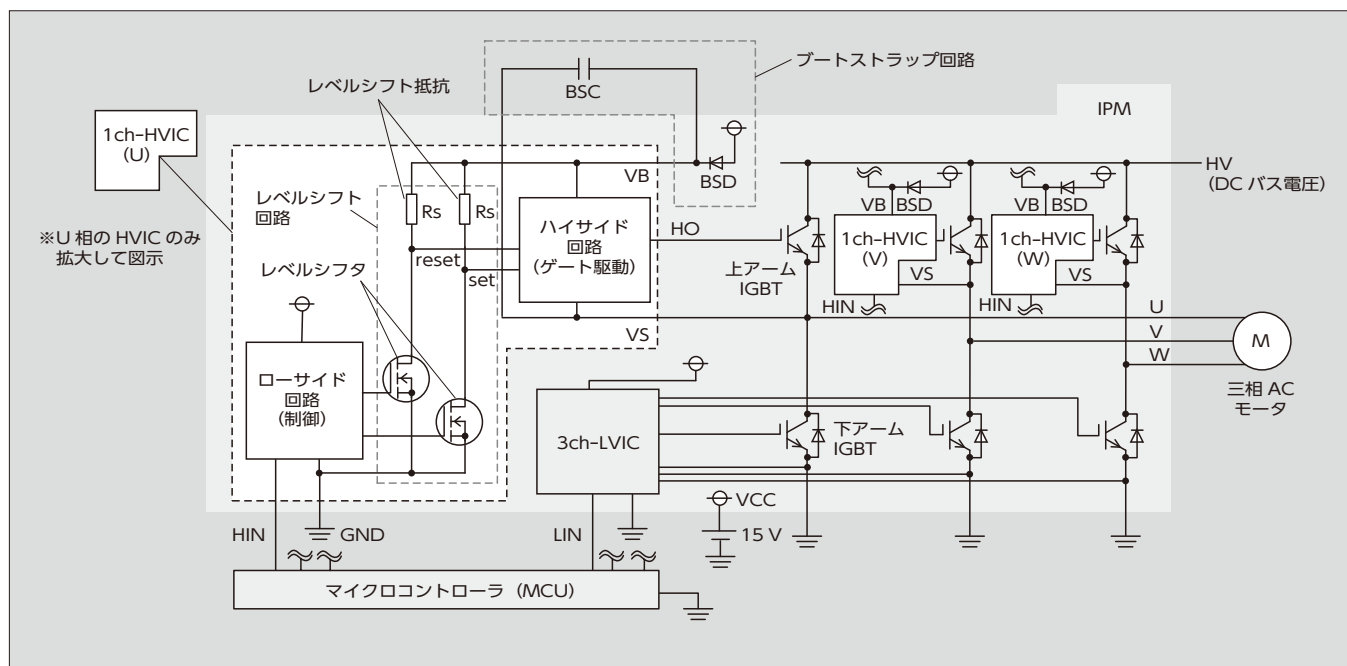


図1 従来の小容量 IPM と内蔵 HVIC の回路ブロック図および IPM 周辺回路

動回路を構成する素子として、3チップの1ch-HVIC (ゲート駆動回路を1チャンネルだけ内蔵したHVIC) と3チップのブートストラップ回路用ダイオード (BSD)、1チップの下アーム IGBT 用のゲート駆動回路を3チャンネル分内蔵した低耐圧のゲートドライバIC (LVIC: Low Voltage Integrated Circuit) を内蔵している。

2.2 次世代小容量 IPM 用 3ch-HVIC の概要

1ch-HVIC を3チップ使った従来のIPMの実装図を図2(a)に示す。この図に示すように、従来の構成ではHVICを3チップ実装する必要があるため、各チップの配線に必要なリードフレームが長くなり、実装に必要な面積が大きい。このため、IPMを小型化する上で実装面積の低減が課題であった。

そこで、IPMを小型化するために、3チャンネル分の上アーム IGBT ゲート駆動回路を1チップに集積した3ch-HVICを開発した。

3ch-HVICを適用した場合のIPMの実装図を図2(b)に示す。この図に示すように、3ch-HVICを搭載したIPMでは、HVICが1チップであるため、配線に必要なリードフレームの全長が短く、実装面積が小さい。この効果により制御部の実装面積を約30%削減し、600V/15A～30AクラスのIPMのパッケージサイズを約10%小さくできる。

図3に今回開発した3ch-HVICのチップ図と適用技術を示す。従来の1ch-HVICの3チャンネル分の回路を1チップに集積すると、誤動作の原因となる寄生素子が形成されてノイズ耐量の低下を招くため、HVICを3ch化する上で、ノイズ耐量の確保が課題であった。

そこで、開発した3ch-HVICでは、図3に示した高ノイズ耐量ハイサイドウェルと高ノイズ耐量レベルシフタの

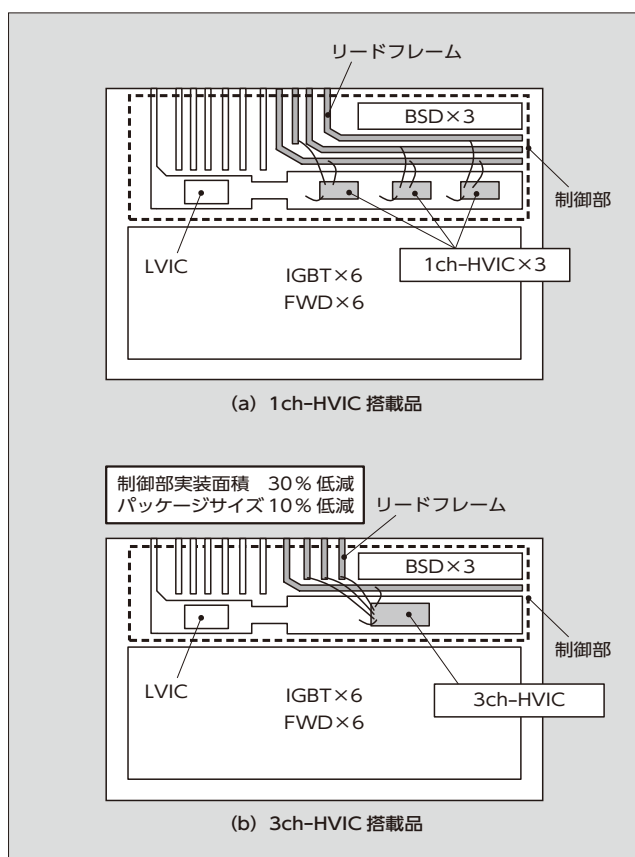


図2 3ch-HVIC適用によるIPMの小型化

二つの技術を適用し、チップ面積を増大させることなく、十分なノイズ耐量を確保した。

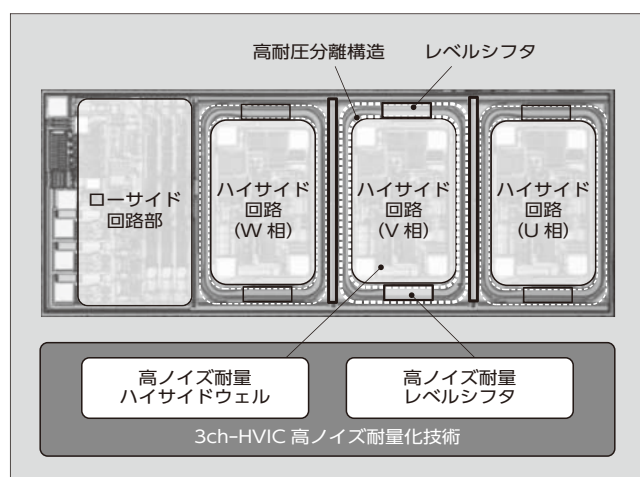


図3 3ch-HVIC チップと適用技術

③ 3ch-HVIC における主要ノイズとノイズ対策技術

3ch-HVIC において問題となった主要ノイズと、ノイズ対策技術の詳細について述べる。

3.1 3ch-HVIC の誤動作・破壊要因となるノイズ

(1) スイッチングノイズ

ハイサイド回路の基準電位である上アーム IGBT の VS はインバータの出力電位であり、HVIC は VS 端子を介してさまざまなスイッチングノイズにさらされる。図4に示すように、VS には IGBT のスイッチング時に GND と電源電圧の間で急峻（きゅうしゅん）な変動が生じ、配線や負荷のインダクタンスの影響により、電圧上昇時、すなわち上アーム IGBT のターンオン時には電源電圧を超えるオーバシュートが発生する。また、電圧降下時、すなわち上アーム IGBT のターンオフ時には GND を下回るアン

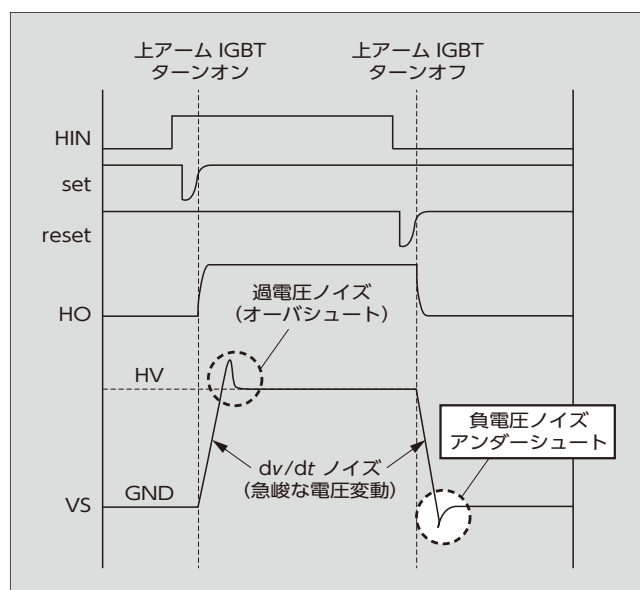


図4 HVIC の動作とスイッチングノイズ

ダーシュートが発生する。VS の急峻な変動、オーバシュート、アンダーシュートはいずれも HVIC の誤動作や破壊の原因になり得るスイッチングノイズであり、中でもアンダーシュートによる負電圧のノイズは、HVIC の構造上、問題を引き起こす可能性が高く、ノイズ対策が必要である。

(2) 外来ノイズ

HVIC はスイッチングノイズだけでなく、雷サージなどの外的要因に起因する外来ノイズにもさらされる。外来ノイズは VS 端子に限らず、HVIC のその他の電源端子や入出力端子を介して HVIC に流入し、誤動作や破壊を引き起こす。

3.2 ノイズ対策技術

スイッチングノイズおよび外来ノイズによる HVIC の誤動作や破壊を防止するため、高ノイズ耐量ハイサイドウェルを適用した。また、スイッチングノイズによる誤動作を防止する別の技術として、高ノイズ耐量レベルシフタも併せて適用した。

(1) 高ノイズ耐量ハイサイドウェル

図5に開発した 3ch-HVIC の断面構造を示す。p 型基板上に回路形成のための四つの深い n 型拡散層 Nwell を配置している。そのうち三つはハイサイド回路用であり、ハイサイドウェルと呼んでいる。残りの一つはローサイド回路用である。ハイサイドウェルには、スイッチング時の VS のオーバシュートによってインバータの電源電圧を超える高電圧が加わるため、その周囲に高耐圧分離構造を配置している。この構造によって、600 V クラスの IPM 向けとして十分な VS-GND 間耐圧を確保している。

ノイズ耐量を確保する上で問題となるのは、図5に示したハイサイドウェル周辺の寄生素子 A、B、C の存在である。負電圧ノイズが VS 端子に印加されると、これらの寄生素子が動作してしまい、HVIC 内部に二次的なノイズ電流が発生することで回路の誤動作や破壊の原因となる。特に寄生素子 C は、従来の 1ch-HVIC では存在しなかったが、3ch-HVIC では隣接するハイサイドウェル間に存在し、寄生素子 B の動作を誘発する。そのため、3ch-HVIC ではスイッチングにより発生する負電圧ノイズの問題がより顕著となる。また、寄生素子 B、C の存在により、外来ノイズをトリガとして、破壊の原因となる寄生サイリスタ動作も発生し得る。

これらの問題を解決するため、ハイサイドウェルには次の二つのノイズ対策を行った。

(a) ハイサイドウェル分離構造の配置

隣接するハイサイドウェルの間に、寄生素子 C の寄生 npn トランジスタの動作を抑制する分離構造を配置している。この分離構造は、寄生素子 C のエミッタから放出される電子をコレクタに到達する前に取り込む働きがあり、寄生素子 C の増幅率を低減する効果を持つ。この分離構造により、寄生素子 C の増幅率が分離構造がない場合に比べて 1/10 以下に低減し、寄生素子 C の動作による二次的なノイズ電流の量を 1/10 以下に抑制

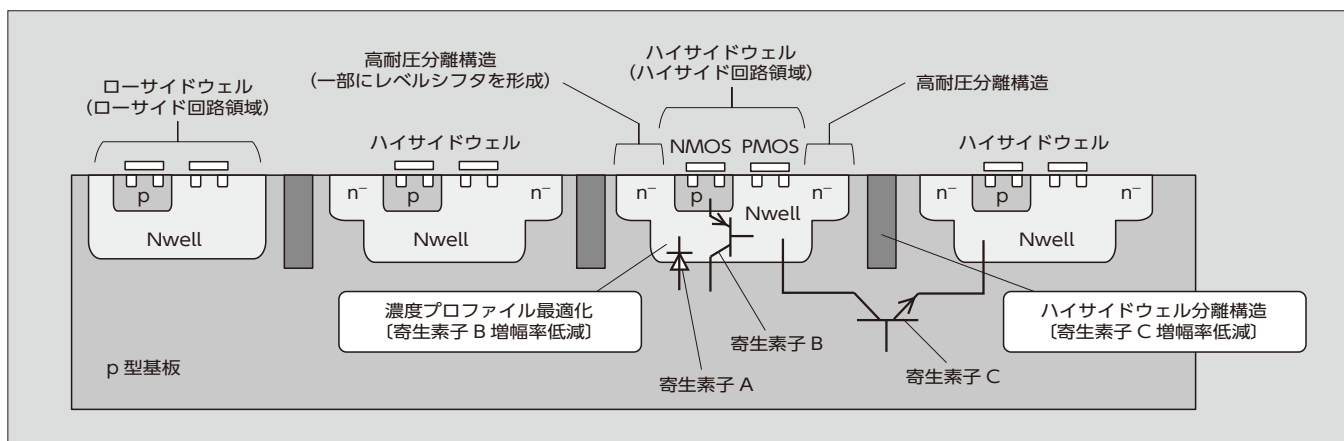


図5 3ch-HVIC の断面構造

している。

(b) ハイサイドウェルの濃度プロファイル最適化

寄生素子 B の寄生 pnp トランジスタの増幅率を低減するため、ハイサイドウェルの濃度プロファイルを最適化している。これにより、その増幅率を最適化前の 1/10 以下に低減し、寄生素子 B の動作により発生する二次的なノイズ電流の量を 1/10 以下に抑制している。

上記の対策(a)、(b)により、スイッチング時の負電圧ノイズによって発生する二次的なノイズ電流による素子破壊を防止している。また、電源端子 VB、VS への外来ノイズに対するノイズ耐量を従来製品の約 5 倍に向上した。

(2) 高ノイズ耐量レベルシフト

図6にレベルシフトの構造を示す。⁽⁴⁾レベルシフトは、レベルシフト回路の中核部品であり、高耐圧の横型 N チャネル MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) である。レベルシフトのゲートが入力端子、ドレインが出力端子である。ハイサイド回路の電源端子である VB 端子とレベルシフトのドレインに接続したレベルシフト抵抗に電流を流すことにより、レベル変換された電圧信号を出力する。

従来の 1ch-HVIC では、レベルシフトを、ハイサイドウェルを囲む高耐圧分離構造とは別の領域に独立させて形

成していた。これに対し開発した 3ch-HVIC では、チップ面積の増大を抑えるため、自己遮蔽（しゃへい）⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 技術を適用することにより、レベルシフトをハイサイドウェル周囲の高耐圧分離構造と一体で形成している。

この自己遮蔽型レベルシフトは、素子の占有面積を小さくできるという利点がある一方、ハイサイドウェルに近接しているため前述の寄生素子 A の影響を受けやすいという欠点がある。寄生素子 A の寄生ダイオードは、スイッチング時の負電圧ノイズによりターンオンし、ターンオフ時には逆回復電流が流れる。自己遮蔽型レベルシフトは、この逆回復電流の影響を受けやすい。⁽⁴⁾

図7は、ノイズ対策前の自己遮蔽型レベルシフトを採用した HVIC に、負電圧ノイズ（-44 V/500 ns）を印加した時の動作波形である。負電圧ノイズ期間（i）直後の期間（ii）で、逆回復電流によりレベルシフトが異常動作し、誤動作が発生している。また期間（iii）でもレベルシフトが異常動作している。期間（ii）、（iii）の異常動作は、逆回復電流により図6に示したレベルシフト内の寄生素子 D、E の動作が誘発されることで発生する。

開発した 3ch-HVIC では、この異常動作を抑制するため、レベルシフトおよびその周辺のデバイス構造に対して次の二つの対策を実施した。

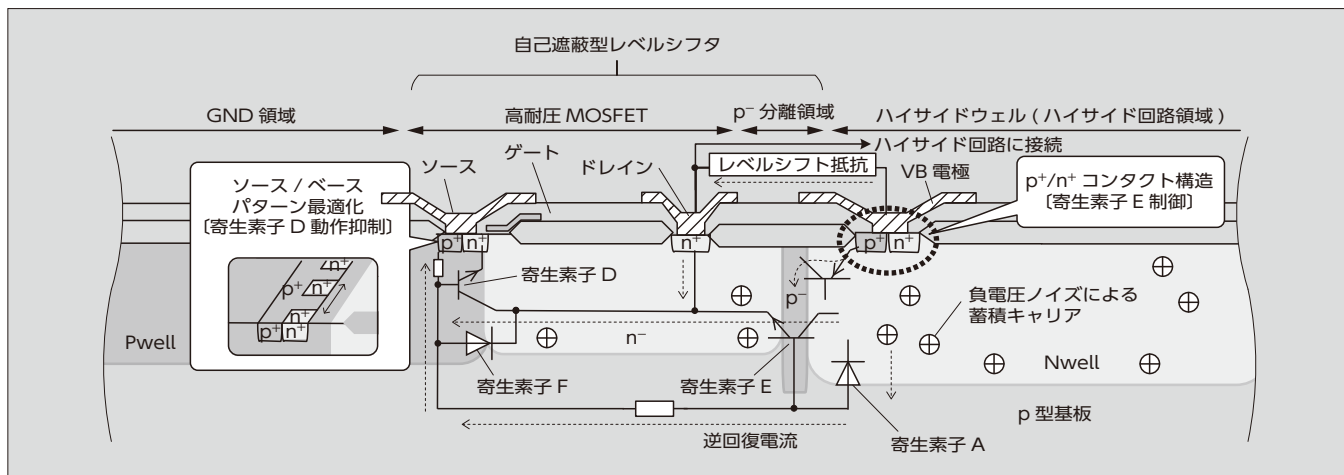


図6 レベルシフトの断面構造と寄生素子

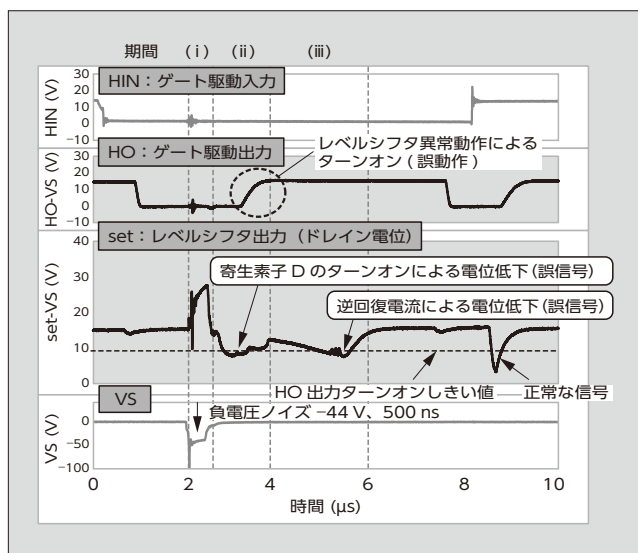


図7 負電圧ノイズ印加時の動作波形 (ノイズ対策前)

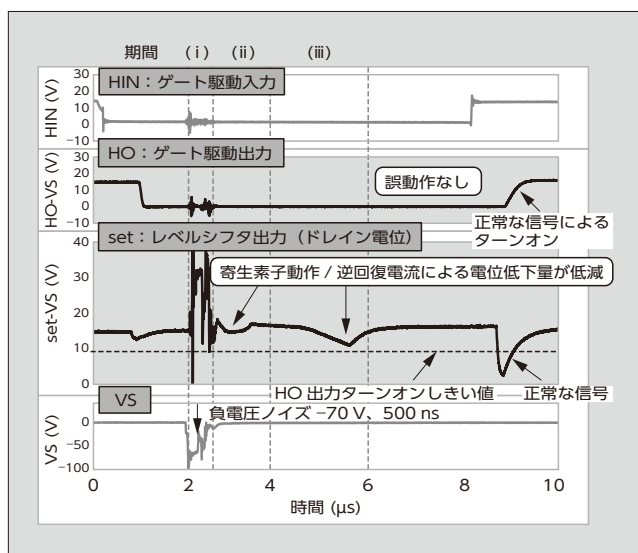


図8 負電圧ノイズ印加時の動作波形 (ノイズ対策後)

(a) ソース・ベース領域のパターン最適化

レベルシフトのソース領域周辺は、図6に示すように、高濃度 n 型拡散層 n^+ によるソースと、チャンネルを構成するベース層の p 型拡散層 Pwell、高濃度 p 型拡散層 p^+ によるベースコンタクトにより構成されている。

寄生素子 D は、逆回復電流によりベース層 Pwell の電位が上昇することで動作し、図7の期間(ii)における異常動作を引き起こす。これを防止するため、ソースの n^+ を図6の紙面奥行き方向において部分的に一定間隔でベースコンタクトの p^+ に置き換え、ベース抵抗の低減を図っている⁽⁴⁾。3ch-HVIC では、このベースコンタクトの間隔を従来の 1ch-HVIC よりも狭くすることで、寄生素子 D の動作を抑制した。

(b) ハイサイドウェルへの p^+/n^+ コンタクト構造の配置

図7の期間(iii)におけるレベルシフトの出力異常は、寄生素子 E を流れる逆回復電流が、寄生素子 E のター

ンオフによりレベルシフト抵抗を流れることにより生じる。

この出力異常を抑制するため、図6に示したように p^+/n^+ コンタクト構造をド레인領域近傍のハイサイドウェル領域に配置している。 p^+/n^+ コンタクト構造とは、従来 n^+ のみで構成されるハイサイドウェル領域の VB 電位のコンタクト部に、 n^+ に接するように p^+ を追加した構造である。

この構造により、寄生素子 E のベースには p^+/n^+ コンタクト構造から pnp トランジスタを介してベース電流が供給されるため、逆回復電流発生時に寄生素子 E が従来構造よりも遅れてターンオフする。この遅れにより寄生素子 E のターンオフ時にレベルシフト抵抗に流れる逆回復電流を低減でき、出力異常を抑制できる。

これらの対策を行った 3ch-HVIC に、負電圧ノイズ (-70 V/500 ns) を印加した時の動作波形を図8に示す。なお、ゲート駆動の入出力 (HIN、HO) 波形は、ノイズを印加したチャンネルについてのみ示してある。

この新規のレベルシフト構造の採用により、レベルシフトの寄生素子 D、E に起因する期間(ii)、(iii)の出力異常を抑制した。

なお、図8の波形は、印加ノイズの波形を安定させ、解析を容易にするために、ノイズパルス幅を 500 ns で評価した結果であるが、ワーストケース値(後述)の 50 ns でも同様の改善効果が得られている。

図9に開発した 3ch-HVIC の負電圧ノイズ耐量を示す。上述のハイサイドウェルおよびレベルシフトへのノイズ対策技術の適用により、負電圧ノイズ耐量は適用前より 50% 以上改善し、従来 IPM に搭載している 1ch-HVIC と同等の高い負電圧ノイズ耐量を実現した。負電圧ノイズ発生時のワーストケースとして想定されるのは、負荷短絡の発生時に、保護動作により短絡電流が流れる上アーム IGBT が強制遮断される場合である。この場合の負電圧ノイズの大きさは、例えば、650 V/30 A クラスの IPM では最大で約 -100 V/50 ns、650 V/75 A クラスの IPM では -200 V/50 ns が想定される。

開発した 3ch-HVIC は、ノイズパルス幅 50 ns におい

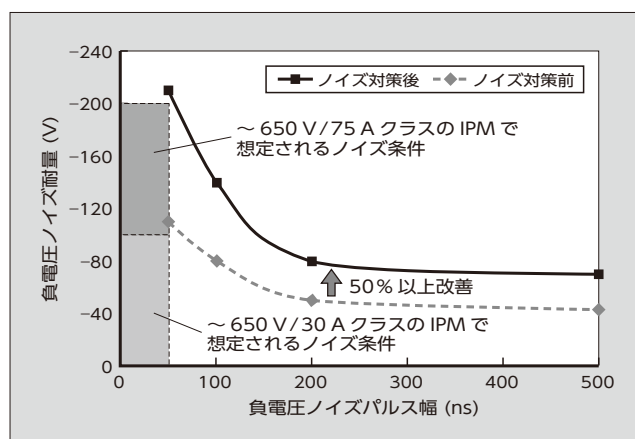


図9 負電圧ノイズ耐量

て -200 V 超の負電圧ノイズ耐量を備えているため、業務用大型エアコンや産業用インバータの用途をカバーする 650 V/75 A までの IPM に使用できる。これにより、アプリケーションの小型化、高信頼性化に寄与する小型・高ノイズ耐量の IPM が実現する。

4 あとがき

本稿では、次世代小容量 IPM 用 3ch-HVIC 技術について述べた。この技術は、電力変換システムの小型化・低コスト化・高信頼性化に寄与し、小型・高ノイズ耐量の IPM を実現するものである。今後、さらに電力変換システムの価値向上に寄与するパワー IC 技術を開発していく所存である。

参考文献

- (1) Shigekane, H. et al. "High power transistor modules with intelligent functions". 2nd ISPSD. IEEE, 1990, p.150-155.
- (2) Kumazawa, Y. et al. "The 7th Generation X Series Intelligent Power Module and Its Control IC Technology". PCIM Asia 2022. VDE (to be accepted).
- (3) Yamada, T. et al. "Novel Small Intelligent Power Module For RAC". PCIM Asia 2012. VDE, 2012, p.58-62.
- (4) Jonishi, A. et al. "An Improved Negative Transient Voltage Noise Immunity for an HVIC using Self-shielding Structure". 33rd ISPSD. IEEE, 2021, p.299-

302.

- (5) Fujihira, T. et al. "Proposal of new interconnection technique for very high-voltage IC's". JJAP, 1996, 35.11R, p.5655-5663.
- (6) Yamaji, M. et al. "A 600 V High-Voltage IC Technique With a New Self-Shielding Structure for High Noise Tolerance and Die Shrink". IEEE Trans. Electron Devices, 2015, vol.62, no.5, p.1524-1529.



上西 顕寛

パワー IC のデバイス・プロセスの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部デバイス開発部。IEEE 会員。



山路 将晴

パワー IC のデバイス・プロセスの研究開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部デバイス開発部主査。工学博士。IEEE 会員。



澄田 仁志

パワー IC の開発に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部デバイス開発部課長。工学博士。電気学会会員。



第2世代ディスクリート SiC-SBD シリーズ

2nd-Generation Discrete SiC-SBD Series

渡邊 荘太 WATANABE, Sota

橋爪 悠一 HASHIZUME, Yuichi

島田 隆 SHIMADA, Takashi

データ通信量の増加に伴い、サーバや通信基地局の消費電力は増加傾向にあり、電力変換装置の高効率化による省電力化が求められている。富士電機は、サーバや通信基地局用電源の電流連続モード力率改善回路向けに、導通損失とサージ順電流が向上した第2世代ディスクリート SiC-SBD を開発した。独自のウェーハプロセス技術により、pn 接合ダイオードの動作が向上した。また、n+SiC 基盤の厚さを約 1/3 に薄化することで熱抵抗が低減し、放熱性が向上した。これらにより、サージ順電流の保証値が第1世代に対して 1.6 倍向上した。

Increases in data transmission volumes have been increasing the power consumption of servers and communication base stations. As a result, high efficiency power conversion equipment is being required to improve power savings. Against this backdrop, Fuji Electric has developed a 2nd-generation discrete SiC-SBD with improved conductive loss and surge forward current for current continuous mode power factor correction circuits in power supplies for servers and communication base stations. Our proprietary wafer processing technology has improved pn junction diode operation. In addition, by reducing the thickness of the n+SiC substrate to about one-third the size, it reduces thermal resistance and improves heat dissipation. These enhancements have improved the guaranteed surge forward current by 1.6 times compared to 1st-generation products.

① まえがき

近年、IoT (Internet of Things) 機器の増加やクラウドサービスの拡大、第5世代移動通信システム (5G : 5th Generation) の普及に伴い、全世界のデータ通信量 (IP トラフィック) が増加している。データ通信量の増加に伴いデータセンターの増設が行われ、5G の普及に伴い通信基地局が増設されている。また、データ通信量の増加に伴ってデータセンターのサーバや通信基地局の消費電力は増加する傾向にある。そのため、サーバ用電源や通信基地局用電源では交流を直流に変換する際の省電力化が必須であり、それらを動かすパワー半導体のさらなる低損失化が重要課題となっている。また、常時稼働が必要な装置であるため高い信頼性も要求される。

従来のシリコン (Si) を使用したパワー半導体デバイスは、材料物性に基づく理論的な耐圧と導通損失のトレードオフ特性限界に近づいている。そのため、Si に比べて、絶縁破壊電界強度が約 10 倍の炭化けい素 (SiC) を使用することにより、ドリフト層の不純物濃度を高濃度化し、かつドリフト層の厚さを薄化することで、抵抗値が低減でき、順方向電圧 V_F の低減が可能となる。さらに SBD (Schottky Barrier Diode) 構造を用いることで、Si の pn 接合ダイオード同等の耐圧を確保しつつ、 V_F の低減とスイッチング速度の高速化により損失が低減し、電力変換装置のさらなる高効率化 (省電力化) が可能となる。⁽¹⁾

富士電機は、2014 年から SiC を用いた SBD やプレーナゲート MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) の量産を開始した。⁽²⁾⁻⁽¹¹⁾ それ以来、技術革新によって低損失化、高効率化、高信頼性化を実現してきた。

本稿では、第1世代ディスクリート SiC-SBD シリー

ズに比べ、 V_F およびサージ順電流 I_{FSM} を向上させた第2世代ディスクリート SiC-SBD シリーズについて述べる。なお、本製品の系列には定格電圧 650 V と 1,200 V があるが、本稿では主力の 650 V について述べる。

② 製品概要

第2世代ディスクリート SiC-SBD シリーズの主な用途は、サーバ用電源、通信基地局用電源、電気自動車用地上充電器、無停電電源装置 (UPS : Uninterruptible Power System)、パワーコンディショナ (PCS : Power Conditioning System) などである。定格電圧 650 V 品は、主に出力容量で 3,000 W 以下、入力電圧で 100 ~ 200 V 系のサーバ用電源、通信基地局用電源の電流連続モード力率改善 (CCM-PFC : Continuous Conduction Mode-Power Factor Correction) 回路をターゲットとしている。

表1 パッケージ外観

パッケージ	TO-220-2	TO-220F*-2	TO-247-2
外 観			
定格電圧	650 V		1,200 V
定格電流	6 A, 8 A, 10 A		20 A, 40 A

*F : フルモールドタイプ

表 2 主要最大定格と電気的特性

型 式	パッケージ	最大定格			電気特性	
		V_{RRM}	I_F	I_{FSM}	V_F $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$ (typ.)	V_F $T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$ (typ.)
		(V)	(A)	(A)	(V)	(V)
FDC2PT06S65	TO-220-2	650	6	54	1.30	1.48
FDC2PT08S65			8	68		
FDC2PT10S65			10	82		
FDC2AT06S65	TO-220F*-2	650	6	54	1.30	1.48
FDC2AT08S65			8	68		
FDC2AT10S65			10	82		
FDC2WT20S120	TO-247-2	1,200	20	190	1.57	2.29
FDC2WT40S120			40	305		

*F：フルモールドタイプ

今回開発した第2世代ディスクリート SiC-SBD シリーズのパッケージの外観と定格を表1に、主要最大定格と電気的特性を表2に示す。

③ 低 V_F 化による損失低減および電源変換効率向上と信頼性向上

サーバや通信基地局の電力変換効率を向上させるためには、パワーデバイスで発生する損失を低減して電源で発生する損失を低減することが課題である。例えば、CCM-PFC 回路に使用するダイオードには次のように大きく分けて二つの損失がある。

- (a) 逆回復時のスイッチング損失
 - (b) 電流がデバイスを導通しているときの導通損失
- その中で、逆回復時のスイッチング損失は、Si のダイオードから SiC-SBD に置き換えることで大幅に低減できる。逆回復時の Si のダイオードと SiC-SBD の電流波形を図1に示す。Si のダイオードは pn ダイオードであり、順電流 I_F が流れる状態から、逆バイアス電圧が印加されると、pn 接合ダイオードに蓄積された少数キャリアが消滅するまでの間、大きな逆回復電流が流れるため大きな損失が発生する。一方、SiC-SBD はユニポーラデバイスであり、原理的には少数キャリアの蓄積が発生しない。ただ

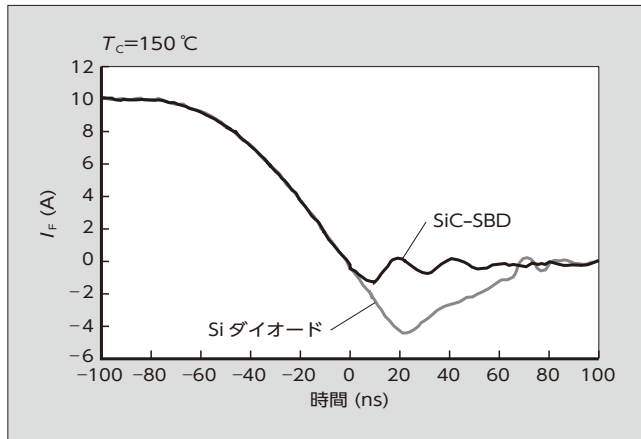


図 1 Si ダイオードと SiC-SBD の逆回復電流波形

し、逆回復のスイッチング時には金属-半導体間の接合容量を放電する程度の小さな電流が流れるものの、温度に依存しないことから、高温動作下で逆回復時のスイッチング損失が大幅に低減できる。これらにより、さらなる損失低減のための SiC-SBD の性能向上のポイントは、導通損失の低減であり、 V_F の改善がカギとなる。

図2に、第1世代 SiC-SBD と第2世代 SiC-SBD のチップ構造を示す。いずれも素子表面に p+層を形成した JBS (Junction Barrier Schottky) 構造である。p+層を形成すると、欠陥などの存在確率の高い n-ドリフト層と金属の接合面での電界強度を下げることができ、p+層を形成しない構造の SBD に比べ、リーク電流を抑制できる。第2世代 SiC-SBD は V_F の改善のため、第1世代と比較して次の特徴を持つ。

- (a) n+SiC 基板の厚さを約 1/3 に薄化することで基板抵抗を低減
- (b) ショットキー接合の最適化により、バリアハイトを低減
- (c) JBS 構造とドリフト層の最適化によりドリフト抵抗を低減

図3に、第1世代と第2世代の 650V/10A 定格の $I_F=10\text{A}$ における V_F の温度特性を示す。-55 ~ +175℃までの全領域において、第2世代は第1世代より V_F が低く、 $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$ においては 18% 低い。

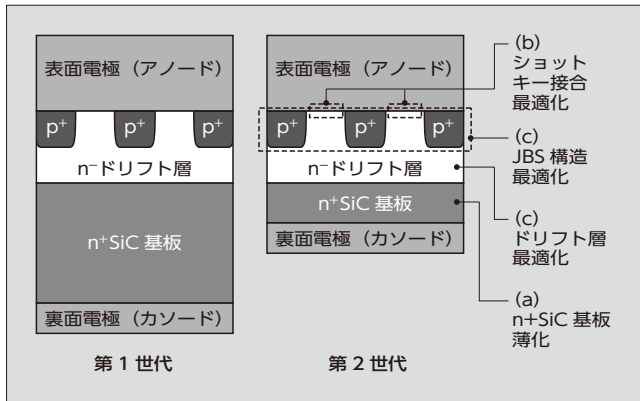


図 2 第1世代と第2世代の SiC-SBD チップ構造

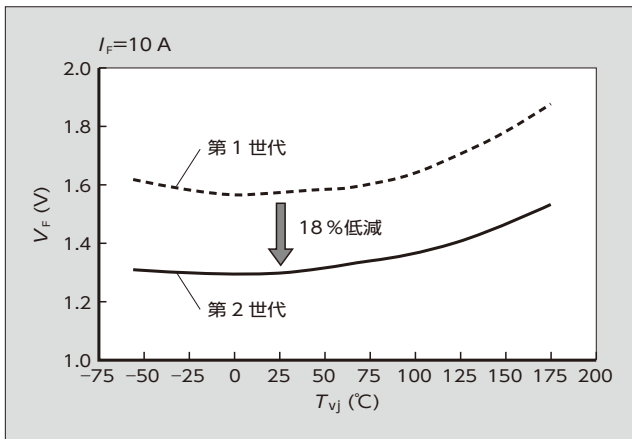
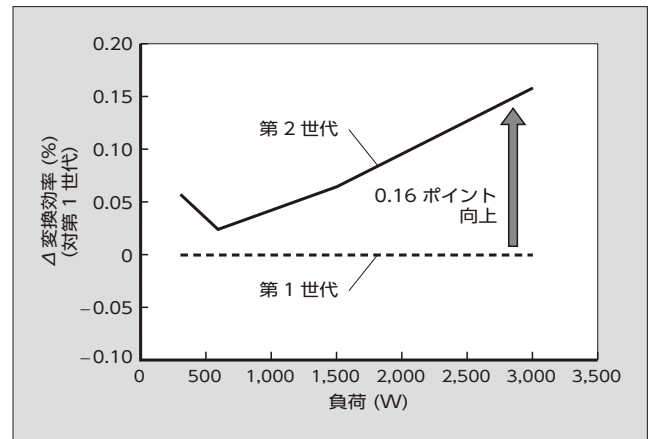
図3 650 V 10 A 素子の第1世代と第2世代の V_F 温度特性

図6 電源の変換効率特性

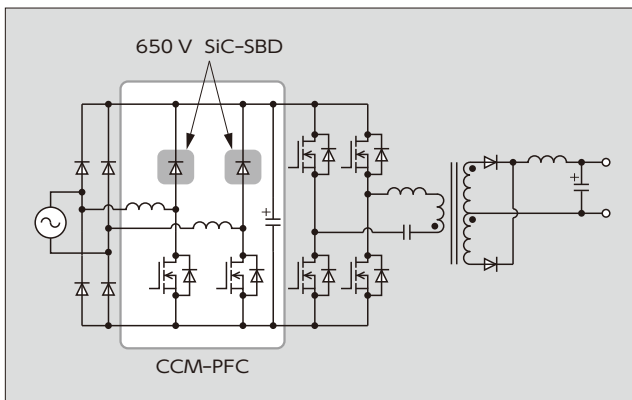


図4 通信基地局用電源の CCM-PFC 回路

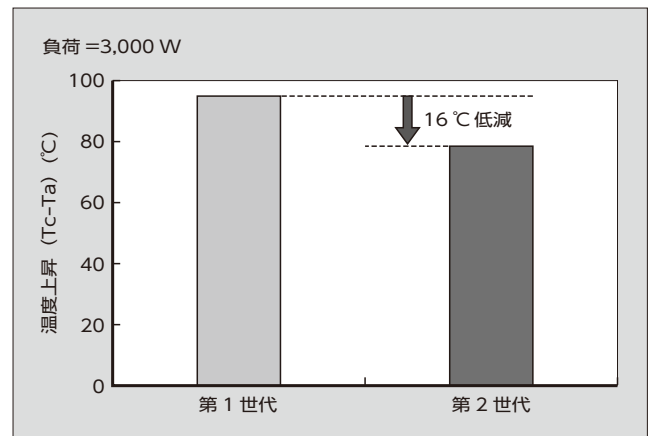


図7 素子の温度上昇特性

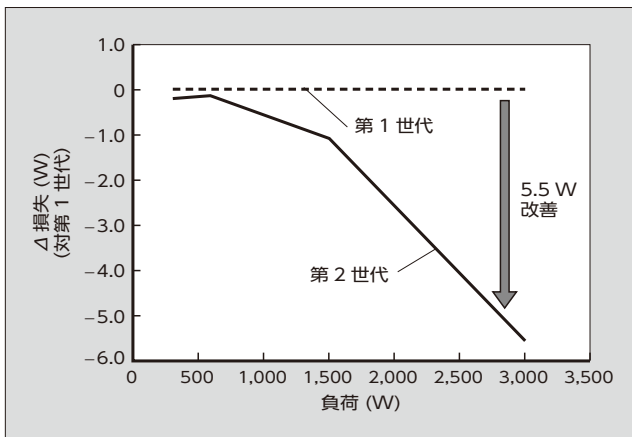


図5 電源の損失特性

実際の装置での損失低減効果と変換効率改善効果を確認するため、図4に示す通信基地局用電源の CCM-PFC 回路に、第1世代と第2世代品の 650 V/10 A TO-220-2 パッケージ素子を搭載して、装置の損失と変換効率ならびに素子の温度上昇を比較評価した。図5に電源の損失特性を、図6に電源の変換効率特性を、図7に負荷 3,000 W 時の素子の温度上昇特性を示す。このときの入出力条件は、入力電圧が 200 V、出力電圧が 53.5 V である。

第2世代品は第1世代品に対し V_F を低減したことで、電源の損失は負荷 3,000 W では 5.5 W の改善を確認し、

変換効率においては、負荷 3,000 W では 0.16 ポイントの向上 (93.02% $\Rightarrow$ 93.18%) を確認した。また、素子の温度上昇も平均で 16 °C 低減 (95.2 °C $\Rightarrow$ 79.2 °C) していることから、装置としての高寿命化にも貢献できる。

④ サージ順電流 I_{FSM} (耐サージ電流) 向上による電源信頼性品質確保

電源の投入時や瞬停の直後に平滑コンデンサを充電するために CCM-PFC 回路のダイオードの順方向に瞬間的に大電流が流れ、ダイオードが破壊することがある。バイパスダイオードを搭載して、この破壊を防ぐことができる。しかし、サーバや通信基地局用電源では、一般に、コストを抑えるためバイパスダイオードを搭載しない。そのため、CCM-PFC 回路に使用する SiC-SBD には、瞬間的に流れる大電流で破壊しないことが求められる。サーバや通信基地局用電源で使用するためには、サージ順電流 I_{FSM} の向上が必須である。

瞬間的に SiC-SBD の順方向に大電流が流れる場合、表面電極 (アノード) と接している p+ 層と n-ドリフト層で構成される pn 接合ダイオードが動作し、表面電極 (アノード) と p+ 層のオーミック領域に大電流が流れる⁽²⁾。第2世代 SiC-SBD では、独自のウェーハプロセス技術によ

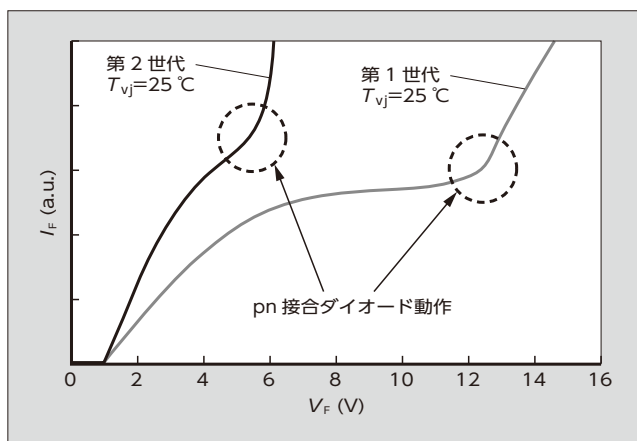


図8 650V 10A素子の第1世代と第2世代の大電流域の I_F - V_F 特性

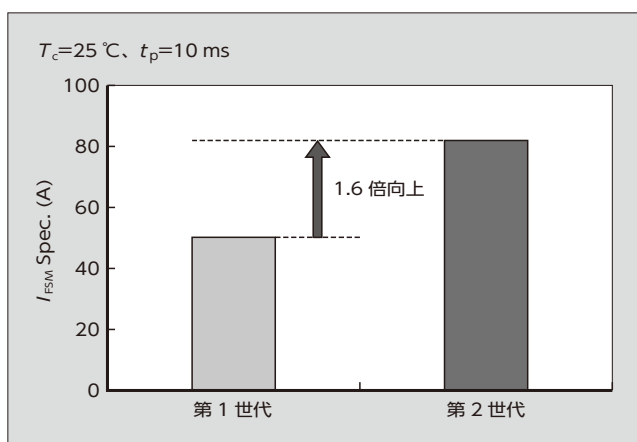


図9 650V 10A素子の第1世代と第2世代の I_{FSM} 特性

り、図1に示したように表面電極（アノード）とp+層のオーミック領域の接触抵抗を低減させ、pn接合ダイオードを動作しやすくした。これにより、 I_{FSM} が向上した。図8に650V/10A定格の大電流域の I_F - V_F 特性を、図9に I_{FSM} の保証値を示す。第2世代SiC-SBDは、接触抵抗を低減したことで、第1世代よりpn接合ダイオードで電流が流れやすくなっているため、大電流通電時の V_F が低下し、発生損失が小さくなる。また、n+SiC基板の厚さを約1/3に薄化することで、熱抵抗が低減し、放熱性が向上する。これらの効果により、第1世代では I_{FSM} 保証値は50Aであったのに対し、第2世代では82Aと1.6倍に向上した。

5 あとがき

第2世代ディスクリートSiC-SBDシリーズについて述べた。第2世代ディスクリートSiC-SBDは、第1世代に対し、低損失を実現し、サージ順電流 I_{FSM} （耐サージ電流）を向上した製品である。通信基地局用電源のCCM-PFC回路に搭載して行った比較評価から、第1世代よりも高効率になり、素子の温度上昇を抑制できることから、電源の高効率化および高寿命化につながる。主な

ターゲットを、サーバ、通信基地局用電源として開発した本製品は、スイッチング電源のPFC回路や産業機器などにも使用可能である。

今後も市場ニーズのさらなる要求に応えるため、デバイスのさらなる低損失化に取り組んでいく所存である。

参考文献

- (1) Kimoto, T. Cooper, James A. Fundamentals of Silicon Carbide Technology: Growth, Characterization, Devices and Applications.
- (2) 大島雅文ほか. All-SiCモジュール搭載のメガソーラー用PCS「PVI1000 AJ-3/1000」. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.1, p.13-17.
- (3) 仲村秀世ほか. All-SiCモジュールのパッケージ技術. 富士電機技報. 2015, vol.88, no.4, p.241-244.
- (4) 蝶名林幹也ほか. All-SiC 2in1モジュール. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.238-241.
- (5) 中沢将剛ほか. SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.209-213.
- (6) 梨子田典弘ほか. メガソーラー用パワーコンディショナ向けAll-SiCモジュール. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.4, p.244-248.
- (7) 辻崇ほか. 1.2kV SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.4, p.234-237.
- (8) 関野裕介ほか. 大容量SiCハイブリッドモジュール「HPnC」. 富士電機技報. 2017, vol.90, no.4, p.228-232.
- (9) 白井亮輔ほか. 高速IGBTとSiC-SBDを組み合わせた高速ハイブリッドモジュール. 富士電機技報. 2018, vol.91, no.4, p.201-205.
- (10) 奥村啓樹ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.224-228.
- (11) 岩崎吉記ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.229-233.
- (12) Bjoerk, F. et al, "2nd generation 600 V SiC Schottky diodes use merged pn/Schottky structure for surge overload protection". Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06.
- (13) 橋爪悠一ほか. 第2世代SiC-SBD. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.262-264.
- (14) Hashizume, Y. et al, The 2nd generation 650 V SiC-SBD with low forward voltage drop and high surge current withstand capability, PCIM Asia 2021.



渡邊 荘太

ディスクリート半導体デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業ディスクリート部。



橋爪 悠一

SiC デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部産業事業部産業モジュール部。



島田 隆

SiC デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部プロセス開発部。



第2世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET

2nd-Generation 1,700-V SiC Trench Gate MOSFETs

内田 貴史 UCHIDA, Takafumi

奥村 啓樹 OKUMURA, Keiji

成田 舜基 NARITA, Syunki

富士電機は、地球温暖化をはじめとする社会・環境課題の解決に向けて、さまざまな高効率のパワーエレクトロニクス機器を市場に展開している。今回、第2世代 1,200 V SiC トレンチゲート MOSFET のトレンチゲート構造を応用し、プレーナゲート構造よりも規格化オン抵抗を 60% 低減した第2世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET を開発した。SiC の信頼性上の課題であるゲートバイアスによるゲートしきい値電圧の変動とボディダイオード通電による規格化オン抵抗の上昇を抑えた。また、インバータ動作時の損失は、従来の Si モジュールに比べて 78% 低減した。

Fuji Electric has launched a variety of high-efficiency power electronics equipment to solve social and environmental challenges, such as global warming. Recently, we have developed a 2nd-generation 1,700-V SiC trench gate MOSFET by using the trench gate structure of our 2nd-generation 1,200-V SiC trench gate MOSFET. It has a 60% lower specific on-resistance than those with planar gate structure. It suppresses gate threshold voltage fluctuation due to gate bias and specific on-resistance increase due to body diode conduction, both of which have caused reliability issues for SiC devices. In addition, its power loss during inverter operation is 78% lower than that of conventional Si modules.

1 まえがき

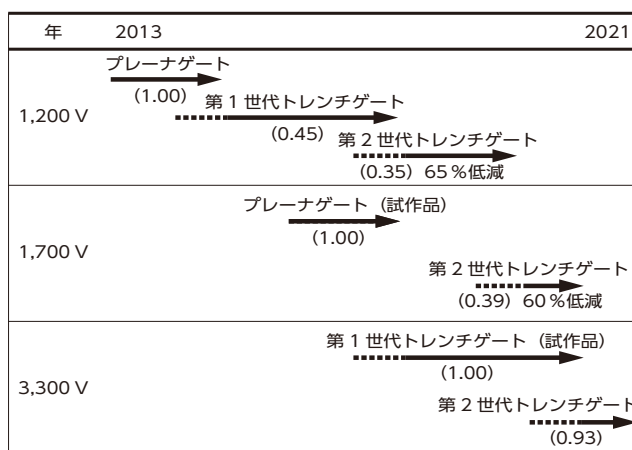
近年、カーボンニュートラルの実現に向けて、電気自動車（EV）や、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーの普及が拡大している。これらのシステムに搭載される電力変換機器には高効率化が求められており、電力変換を行うパワー半導体にはさらなる低損失化が期待されている。

これまで、シリコン（Si）を材料としたパワー半導体デバイスが主に用いられてきたが、炭化けい素（SiC）を材料とする次世代パワー半導体デバイスの普及が進んでいる。SiC は Si よりバンドギャップが広く約 10 倍の絶縁破壊電界を持つため、同じ耐圧を実現するために必要なドリフト層の厚さを Si と比較して約 1/10 に薄くできるので、Si パワー半導体に比べて導通損失を大幅に低減できる。

富士電機は、SiC を用いた SBD（Schottky Barrier Diode）や MOSFET（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor）を搭載したモジュールを製品化しており、太陽光 PCS（Power Conditioning System）や産業用インバータに採用されている⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。

図1に、富士電機の SiC-MOSFET のチップ開発ロードマップを示す。富士電機は、セルサイズを縮小して導通損失の低減を図るために、ゲート構造を従来のプレーナゲートからトレンチゲートに変更した第1世代トレンチゲート MOSFET を開発した⁽²⁾⁽⁵⁾。また、車載・電源向けに技術開発を行った最新の 1,200 V 第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET では、さらにセルサイズを縮小することでプレーナゲート MOSFET に比べ、単位面積換算の規格化オン抵抗 $R_{on} \cdot A$ を 65% 低減した⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾。

今回、第2世代 1,200 V SiC トレンチゲート MOSFET のトレンチゲート構造の技術を応用し、従来のプレーナ



*（ ）内は、規格化オン抵抗比

図1 SiC-MOSFET のチップ開発ロードマップ

ゲート構造に対して大幅に特性を改善した大容量用途の風力発電・太陽光発電向け第2世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET を開発し、 $R_{on} \cdot A$ を 60% 低減した。

2 第2世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET の構造

図2に、第2世代 SiC トレンチゲート MOSFET の構造を示す。1,700 V 素子は、1,200 V 素子から次の点を最適化することで、高耐圧化した。

(a) ドリフト層の最適化

ドリフト層の厚さと不純物濃度を最適化することにより高耐圧化を実現している。

(b) p ウェル層間の距離（JFET 幅）の最適化

トレンチゲート底部のゲート酸化膜を p ウェルで覆うことで、この部分に印加される電界を緩和している⁽⁷⁾。

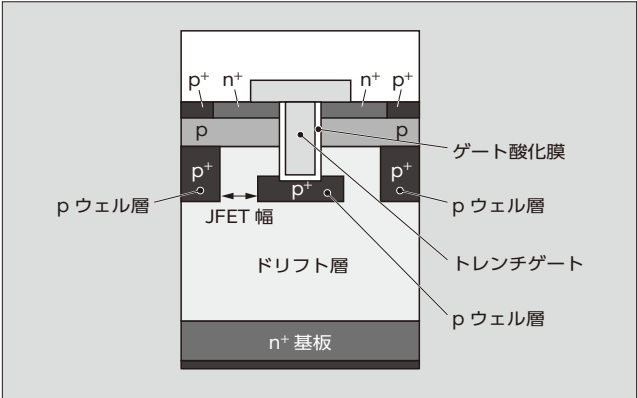


図2 第2世代 1,700 V トレンチゲート MOSFET の構造

しかし、このpウェル層間の距離（JFET幅）が狭すぎるとオン抵抗が上昇し、広すぎるとドレイン・ソース間電圧 V_{DS} が印加された時に、pウェル層の電界が増加し耐圧が低下するという問題があった。そこで、JFET幅を最適化することで、1,700 V 定格素子においてもオン抵抗の増加を抑えつつ、長期信頼性確保のための耐圧を実現した（図3）。

これらの最適化を行った、第2世代 1,700 V トレンチゲート MOSFET の主な特徴を表1に示す。 $R_{on} \cdot A$ は、1,700 V プレーナゲート MOSFET（特性比較用の試作品）に比べ、60% 低減した。また、ゲートしきい値電圧 V_{TH} は、チャンネルp層の不純物濃度を調整することにより

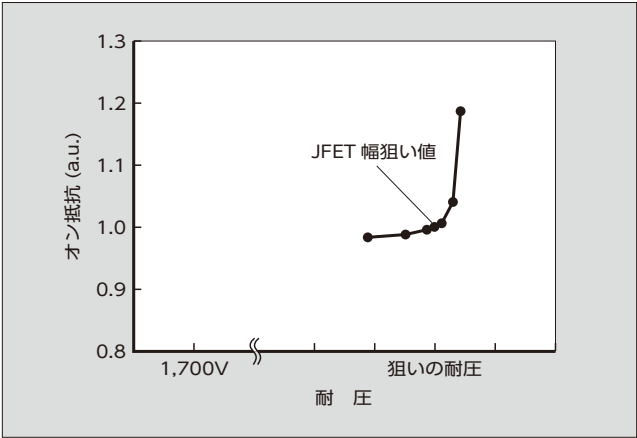


図3 シミュレーションによるJFET幅を変えたときのオン抵抗、耐圧依存性

表1 1,700 V のプレーナゲート MOSFET と第2世代トレンチゲート MOSFET の特性比較

1,700 V耐圧の比較	プレーナゲート	第2世代トレンチゲート
規格化オン抵抗 (プレーナゲートを1とする)	1.00	0.39 (60%低減)
ゲートしきい値電圧 V_{TH} (V)	2.3	5.0
ゲート推奨駆動電圧 (V)	+15/-5	+15/-3
ゲート絶対最大定格電圧 (V)	+20/-10	+20/-7

5.0 V に高めることで、1,200 V 定格素子と同じくゲートのノイズに対する耐性を向上させている。

③ 第2世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET の特性

3.1 特性

図4と図5に 1,700 V 定格のプレーナゲート MOSFET と第2世代トレンチゲート MOSFET の順方向および逆方向の出力特性の比較結果を示す。定格電流におけるオン電圧は、プレーナゲート MOSFET に対し、いずれも 60% 低減する。

図6に、ゲートに負バイアスを印加した状態の逆方向特性（MOSFET のボディダイオードの出力特性）の比較結果を示す。ゲートに負バイアスを印加した時はpn接合部の内蔵電位により、ドレイン・ソース間の電圧が約-2.5 V に達すると電流が流れ始める。導通後の I_D-V_{DS} カーブの傾きが第2世代トレンチゲート MOSFET の方が高くなっており、ゲート負バイアス印加時の抵抗が定格電流で37% 低減（定格電流時）している。これにより、インバータの発生損失が低減する（詳細は 3.3 節で述べる）。

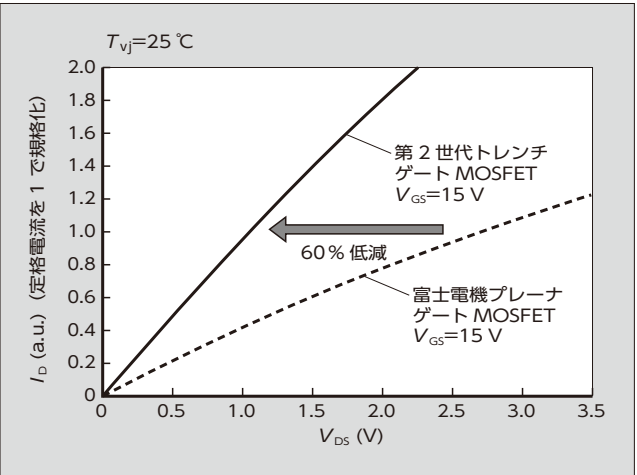


図4 順方向特性（ I_D-V_{DS} 特性、第一象限）

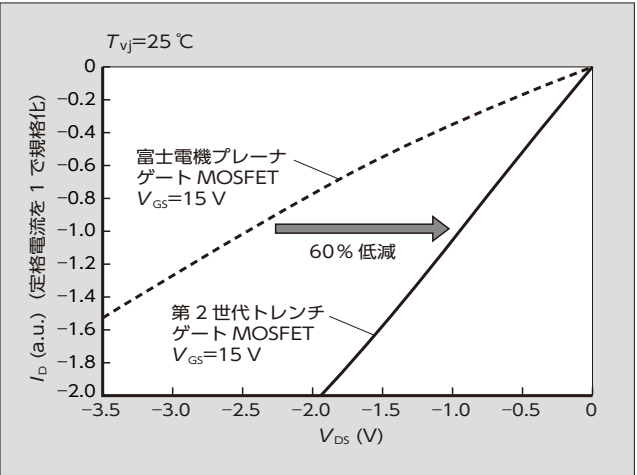


図5 逆方向特性（ I_D-V_{DS} 特性、第三象限）

特集 自動車電動化・エネルギーマネジメントに貢献するパワー半導体

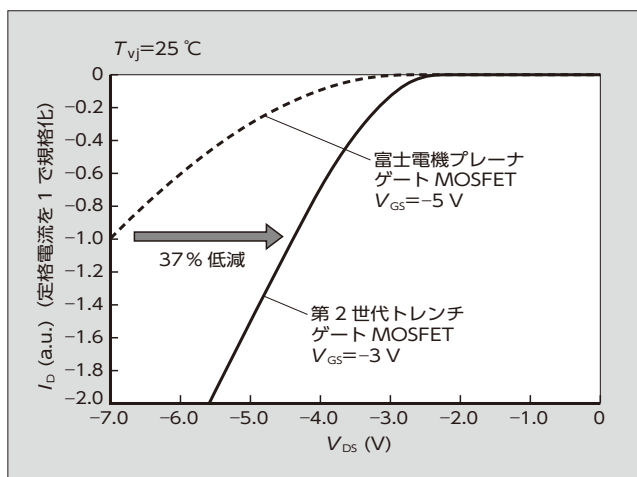
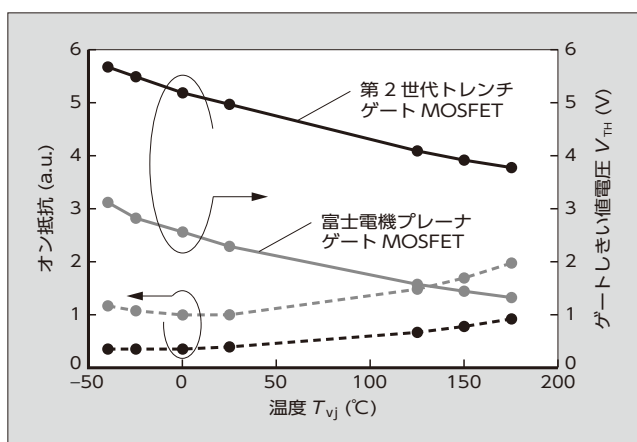
図6 ボディダイオードの I_D - V_{DS} 特性図7 オン抵抗と V_{TH} の T_{vj} 依存性比較

図7に、オン抵抗とゲートしきい値電圧 V_{TH} のチップ接合温度 T_{vj} に対する依存性を示す。オン抵抗は温度とともに増加するが、175℃においてもプレーナゲートMOSFETよりオン抵抗は53%低い。一方、 V_{TH} は温度とともに低下するが、175℃でも約3.8Vと高い値を維持している。

3.2 信頼性

SiC-MOSFETに形成されるゲート酸化膜の高い界面準位密度が原因となり、ゲートへの電圧印加で V_{TH} が変動する問題がある。図8に、1,700VのプレーナゲートMOSFETと第2世代トレンチゲートMOSFETのゲート負バイアス印加試験($T_{vj}=175^\circ\text{C}$ 、 V_{GS} は絶対最大定格)の結果を示す。第2世代トレンチゲートMOSFETではゲートプロセスの最適化によって、 V_{TH} 変動の大幅な低減を実現し、高いゲート信頼性を確保した。

また、SiC-MOSFET特有の信頼性上の課題として、ボディダイオード通電によるオン抵抗の増加がある。

一例を示すと、リカバリ損失を低減するために、図9のようにMOSFETとSBDを並列接続する場合、ゲートに負バイアスを印加しているときはMOSFETのチャンネル部には電流が流れず、ボディダイオードとSBDには同じ電

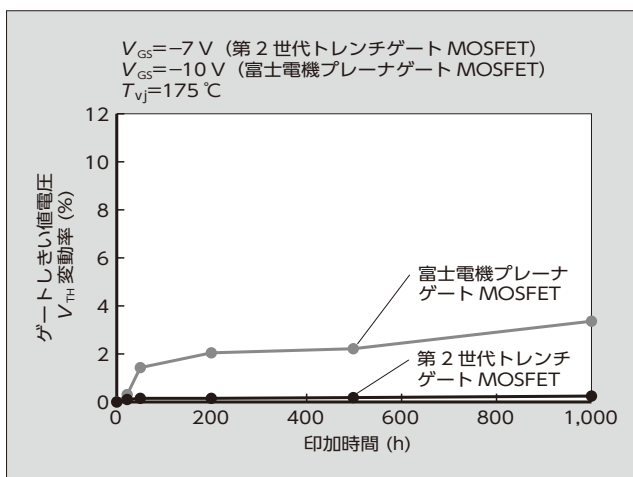
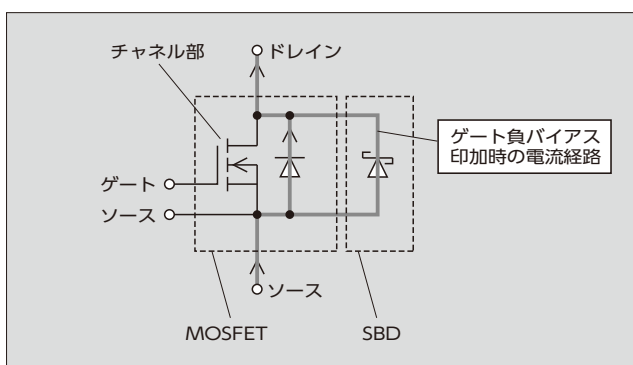
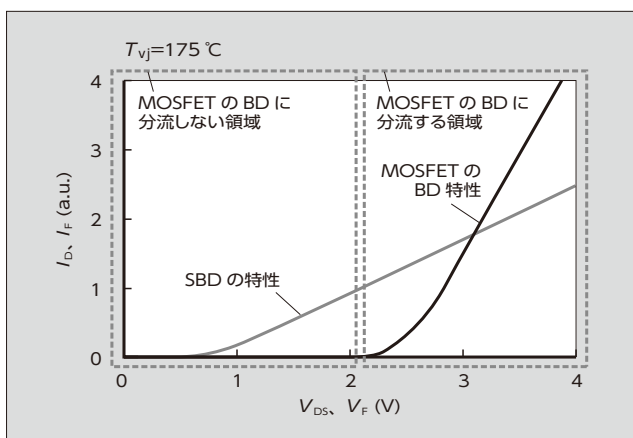
図8 ゲート負バイアス印加後のゲートしきい値電圧 V_{TH} 変動率比較

図9 MOSFETとSBDを並列接続した場合の回路図

図10 MOSFETのボディダイオード(BD)とSBDの I_D - V_{DS} (I_F - V_F)特性

圧が印加される。図10のボディダイオードとSBDの I_D - V_{DS} (I_F - V_F)特性から、ボディダイオードへの印加電圧がpn接合部の内蔵電位以下では、ボディダイオードには電流がほとんど流れないが、電流が増加しボディダイオードの内蔵電位を超えるとボディダイオードにも分流する。ボディダイオードに電流が流れると、正孔と電子が再結合する際に発生するエネルギーによって素子内に存在する結晶転位を起点に積層欠陥が拡張し、この積層欠陥により電

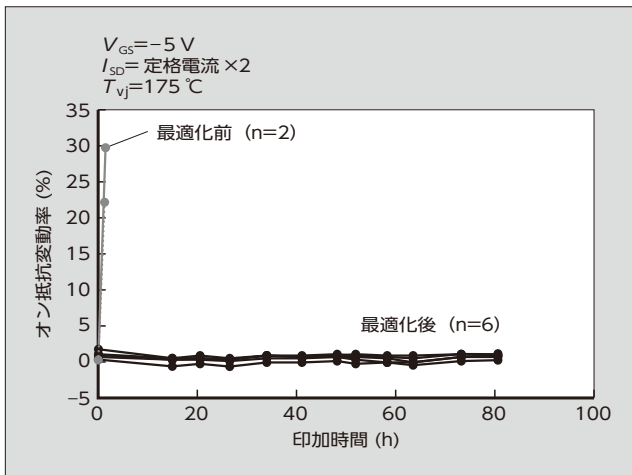


図 11 第2世代 1,700 V トレンチゲート MOSFET のボディダイオード通電時のオン抵抗変動率

流経路が減少してオン抵抗が増加し、発生損失が増加する⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾。

そこで、第2世代トレンチゲート MOSFET では、独自のデバイス設計とプロセスの最適化により、このボディダイオード通電による積層欠陥の拡張を抑制した。図 11 に、より厳しい条件である SBD を並列接続しない場合を想定し、 $T_{vj}=175^{\circ}\text{C}$ でボディダイオードに定格の2倍電流を通電したときの最適化前後のオン抵抗の増加率を示す。最適化後の構造では、印加時間 80 h までオン抵抗の増加は見られず、この厳しい条件においても積層欠陥の拡張を効果的に抑制できていることが分かる。

3.3 インバータ損失の比較

図 12 に、今回開発した 1,700 V 第2世代トレンチゲート MOSFET を搭載したインバータの損失計算の結果を示す。富士電機の同定格の Si-IGBT に比べて 78% の損失が低減し、プレーナゲート SiC-MOSFET に比べて 15% の損失が低減する。

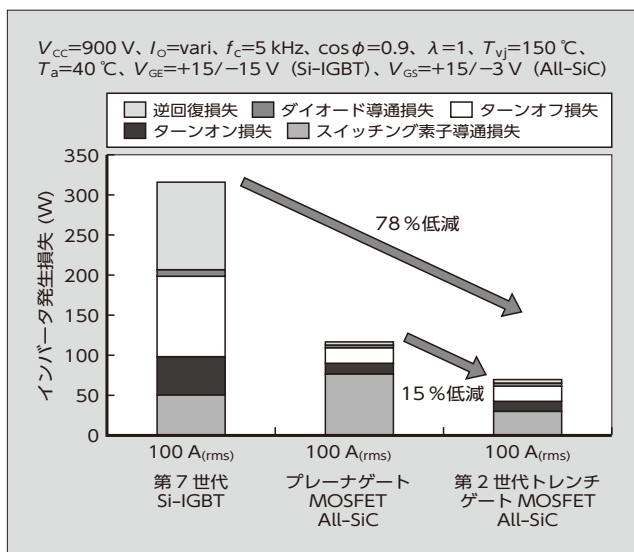


図 12 シミュレーションでのインバータ発生損失比較

4 あとがき

本稿では、第2世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET について述べた。

1,200 V 定格の第2世代トレンチゲート MOSFET のトレンチゲート構造の技術を応用することで、1,700 V 定格の第2世代トレンチゲート MOSFET はプレーナゲート MOSFET に対して 60% のオン抵抗低減を実現した。2021 年度は、3,300 V 定格の第2世代トレンチゲート MOSFET の開発を行っている。今後も、SiC-MOSFET のオン抵抗低減に向けた技術開発を進め、より低損失のパワー半導体を実現し、電力変換機器の高効率化に貢献する所存である。

参考文献

- (1) Horio, M. et al. "New Power Module Structure with Low Thermal Impedance and High Reliability for SiC Devices". Proceeding of PCIM Europe 2011. p.229-234.
- (2) Iwasaki, Y. et al. "All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package". PCIM Europe 2017. p.651-657.
- (3) Sekino, Y. et al. "High Power next Core (HPnC) package with 3.3 kV SiC Hybrid chip combination". Proceeding of PCIM Asia 2018. p.651-657.
- (4) Chonabayashi, M. et al. "All-SiC Module with 2nd Generation Trench Gate SiC MOSFETs". Proceeding of PCIM Europe 2019. p.318-323.
- (5) Sekino, Y. et al. "3.3 kV All SiC Module with 1st Generation Trench gate SiC MOSFETs for Traction Inverters". Proceeding of PCIM Asia 2020. p.98-103.
- (6) Takasaki, A. et al. "All SiC Module with 1700 V Rated 2nd Generation Trench Gate SiC-MOSFETs". Proceeding of PCIM Europe 2021. p.903-908.
- (7) 奥村啓樹ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET. 富士電機技報. 2019, vol.92, no.4, p.224-228.
- (8) 岩崎吉記ほか. 第2世代SiCトレンチゲートMOSFET搭載All-SiCモジュール. 富士電機技報. 2019, vol.92 no.4, p.229-233.
- (9) 橋爪悠一ほか. 第2世代SiC-SBD. 富士電機技報. 2020, vol.93, no.4, p.262-264.
- (10) J. P. Bergman. et al. Mater. Sci. Forum 353-356 (2001) 299.
- (11) H. Lendenmann. et al. Mater. Sci. Forum 433-436 (2003) 901.
- (12) A. Agarwall. et al. IEEE Electron Device Lett. 28 (2007) 587.



内田 貴史

SiC デバイスの開発・設計に従事。現在、富士電機株式会社半導体事業本部開発統括部デバイス開発部。工学博士。



成田 舜基

SiC デバイスの開発・設計に従事。現在、国立研究開発法人 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（富士電機から出向）。



奥村 啓樹

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



大容量無停電電源装置「UPS7500WX」

“UPS7500 WX” Large-Capacity Uninterruptible Power System

濱田 一平* HAMADA, Ippei

絹田 隆紘* KINUTA, Takahiro

久保寺 晋嗣* KUBODERA, Shinji

情報システムのクラウド化や電子商取引の増加により、世界中でデータセンター（DC）の建設が増えている。DC は、重要な情報を保管するサーバの保守・運用サービスやインターネット接続などの提供を行う。そのため、DC における給電は安定かつ継続的に行われることが必要である。

富士電機は、DC の電気設備全体の設計から運用支援まで一貫したエンジニアリングを提供し、電力の安定供給や省エネルギー（省エネ）化、省スペース化に貢献している。この中核となる機器の一つが、停電などの電源異常時にも電力供給を継続する無停電電源装置（UPS）である。

近年、北米やアジアを中心に建設が増大しているハイパースケール DC では、電力使用量が膨大となるため、UPS にはさらなる大容量化と省エネ化が求められている。富士電機は、2018 年度に北米市場の安全規格に適合する容量 1,000 kVA の「UPS7400WX」を発売した。

本稿では、電力変換回路や UPS モジュールの並列制御技術などのプラットフォーム技術を基に開発した、UPS7400WX の次世代機となる大容量無停電電源装置「UPS7500WX」について述べる。

1 特徴

本 UPS は、常時インバータ給電方式で業界最高レベルの電力変換効率を実現した。一方、常時商用給電方式も採用しており、富士電機では HE（High Efficiency）モードと呼んでいる。HE モードは、商用電源が正常なときは商用電源から直接負荷に給電し、給電の効率を重視した方式である。

1.1 単機大容量化・省スペース化

本 UPS は、1 台当たり 600 kVA の電力変換モジュール（W1,000 mm、D900 mm）を、将来は最大 4 台まで組み合わせて単機 UPS の容量を 600 kVA から 2,400 kVA まで拡張できる。

* 富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部開発統括部電源機器開発部

* 富士電機株式会社パワエレ エネルギー事業本部施設・電源システム事業部施設電源技術部

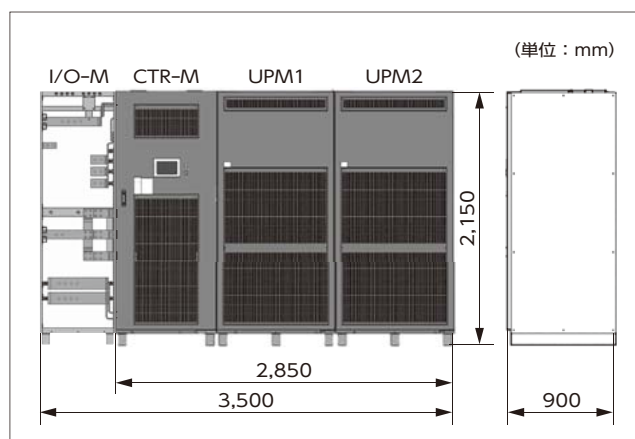


図1 「UPS7500WX」 (400V系、1,200kVA機)

例として、図1に1,200 kVA機を示す。本UPSの基本構成は、主回路ケーブルや制御信号線を接続する入出力モジュール（I/O-M）、制御装置や内部バイパス回路を実装した制御モジュール（CTR-M）、整流器やインバータを内蔵した電力変換モジュール（UPM）である。

1,200 kVA機は、I/O-Mを1台、CTR-Mを1台、UPMを2台で構成し、列盤としたときの幅は3,500 mm、奥行きは900 mmであり、業界最小レベルのフットプリントである。

盤の左右や背面の保守スペースを不要にしているの、盤を配置する上で、さらなる省スペース化を行うことができる。また、周辺盤を含めて一括設計を行う場合、I/O-Mの機能を周辺盤に組み込むことによってI/O-Mが不要になる。これにより1,200 kVA機は、CTR-Mが1台、UPMが2台の構成となり、幅は3,500 mmから2,850 mmに縮小できる。UPSシステムの省スペース化によってサーバなどのIT機器の設置スペースが拡大できる。

1.2 給電方式

本UPSの内部バイパス回路は、図2に示すHEモード対応タイプ（図2(a)）またはハイブリッドモード対応タイプ（図2(b)）が選択できる。HEモード対応タイプの回路構成は、UPSの定格出力電流を連続的に通流する設計のサイリスタ、および機械スイッチの直列回路である。一方、従来製品からあるハイブリッドモード対応タイプは、無瞬断切換のために短時間の過電流耐量の領域で設計したサイリスタと、機械スイッチの並列回路である。

HEモードは、常時商用給電によって平常時の給電の効

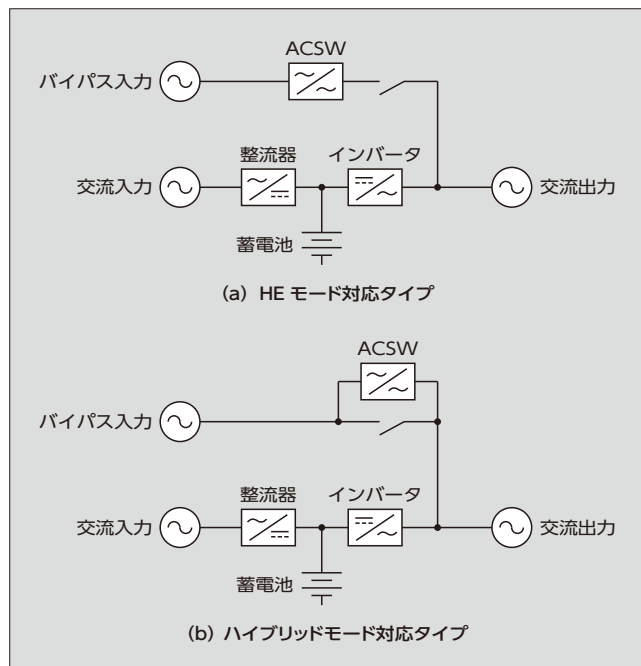


図2 給電方式

率を優先して、装置効率は98.4%である。このとき、各変換器は次の状態にある。

- (a) 整流器の停止
- (b) アクティブフィルタ動作によるインバータの力率改善と高調波の抑制
- (c) インバータ出力側から逆変換することによる蓄電池の浮動充電^(注)

万が一、HE モード中にバイパスの電源異常やサイリスタの失弧を検出すると、2 ms 以内にインバータ給電に切り換える。

用途に応じて対応する内部バイパス回路を選択することで、装置の効率的な運用ができる。

1.3 最適負荷運転機能

DC の信頼性を高めるためにシステムを冗長化しているので、平常時の UPS の負荷率は 20 ～ 40% の範囲である。この負荷率の範囲は、高い負荷率の場合に比べ、格段に効率が低い。本 UPS は、図3 に示すように各 UPM の負荷率を判定し、低負荷時には自動的に不要な UPM を停止して運用台数を減らして、UPS 全体の効率を改善する最適負荷運転機能を持っている。

1.4 電力回生機能

DC に納入した UPS は、認証試験として試験運用時にコンサルティング企業によって定格負荷で 8 時間の連続運転や 30 分の過負荷試験が行われる。その際、従来は試

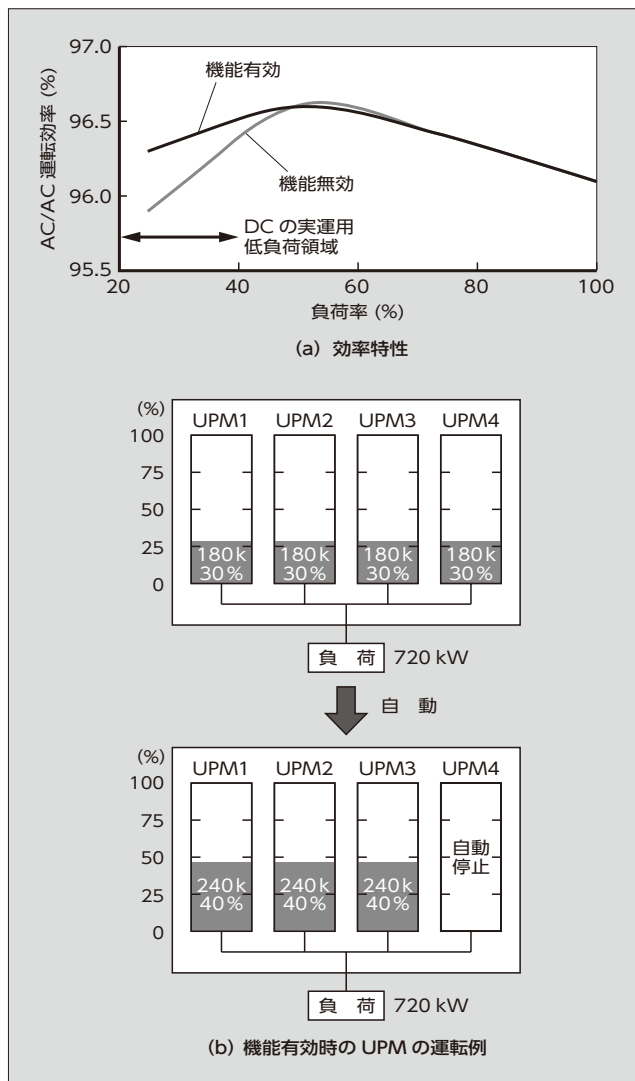


図3 最適負荷運転機能による UPS 効率の改善

験に必要な模擬負荷を調達していた。これに対して、本 UPS は実装している電力回生機能を使うことで模擬負荷が不要になり、現地試験の効率化と省エネ化を実現した。主な特徴は次に示すとおりである。

- (1) 図4 に示すように、並列に接続した UPS 間で試験を完結できる。そのため、模擬負荷や仮設ケーブルが不

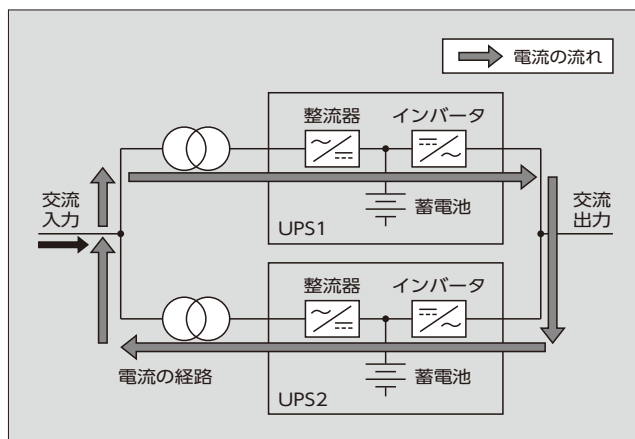


図4 電力回生機能の使用例

〈注〉浮動充電：電力変換器に対して負荷と蓄電池を並列に接続し、一定電圧を連続的に印加して負荷に給電しながら蓄電池に充電する方式

表1 「UPS7500WX」(1,200 kVA 機)の基本仕様

項 目		仕 様
方 式		常時インバータ給電方式 (VFI) HEモードまたはハイブリッドモード (VFD)
定格容量		1,200 kVA / 1,200 kW
外形寸法		W3,500×D900×H2,050 (mm) (I/O-M含む) W2,850×D900×H2,050 (mm) (I/O-M含まず)
装置最高効率		96.6% (VFI)、98.4% (VFD)
切換時間		無瞬断 (VFI)、<2 ms (VFD)
質 量		3,450 kg
交流入力	相 数	三相4線
	電 圧	380 V、400 V、415 V、420 V
	周波数	50 / 60 Hz
	入力力率	0.99 (遅れ) 以上、1.0以下
	入力高調波電流	総合3%以下
バイパス入力	相 数	三相3線または三相4線
	電 圧	380 V、400 V、415 V、420 V
直流入力	定格電圧	480 V
	種 類	リチウムイオン電池、鉛蓄電池
交流出力	相 数	三相3線または三相4線
	電 圧	380 V、400 V、415 V、420 V
	周波数	50 / 60 Hz
	出力力率	0.7 (遅れ) ~ 1.0
	電圧精度	±1%以下 (負荷平衡)
	過渡電圧変動	±3%以下 (負荷急変)
	電圧ひずみ率	2%以下 (線形負荷) 2.5%以下 (IEC 62040-3)
	過負荷耐量	125% : 10分、150% : 1分 (推奨温度時)
環 境	周囲温度	0 ~ 40℃ (推奨25℃)
	周囲湿度	5 ~ 95% (結露なきこと)
通信プロトコル		Web/SNMP、MODBUS* RTU、 MODBUS TCP/IP

* MODBUS : Schneider Automation, Inc.の商標または登録商標

要になる。

(2) 従来は模擬負荷を流れる電力は熱エネルギーとして

放出されていた。本 UPS では、試験時の電力を回生するため、消費電力が UPS の電力損失分だけとなり、従来比で電力消費量は 10% に削減できる。

1.5 高信頼システム化

UPS は、システムやサービスの利用割合を示す稼働率を向上させるために、複数の UPS で構成し、冗長化する。これにより、DC の保守や運用時だけでなく、いずれかの単一 UPS で故障が発生しても、UPS システムとして 24 時間 365 日、安定した給電を実現する。

1.6 グローバル仕様への対応

従来、日本国内は三相 3 線方式の UPS が主流であった。近年、国外の大手 DC 事業者は、日本国内に DC を建設する際に、ベンダーに対してグローバルで標準的な三相 4 線方式を要求する。本 UPS は、このような要求に応えるため、定格電圧は 380 ~ 420 V、三相 4 線方式も用意している。

2 仕 様

UPS7500 WX (1,200 kVA 機) の基本仕様を表 1 に示す。

発売時期

2021 年 6 月 (1,200 kVA 機)

以降順次発売 (600 kVA、1,800 kVA、2,400 kVA 機)

お問い合わせ先

富士電機株式会社

パワエレ エネルギー事業本部

施設・電源システム事業部

電話 (042) 843-1332



船舶 IoT システム

EGCS IoT / Remote Monitoring System

河村 賢* KAWAMURA, Satoshi

近年、衛星通信を使った船陸間ブロードバンド通信の普及が急速に進み、海上を航行する船舶でも、定額で高速通信サービスを楽しむようになってきている。これにより、陸上との情報格差が解消されつつあり、リモートサービスに関するニーズが急増している。このようなニーズに対応して富士電機が展開している排ガス浄化システム（EGCS：Exhaust Gas Cleaning Systems）において、よりよいサービスを提供する船舶 IoT（Internet of Things）システムを開発した。

1 開発の背景

「海洋汚染防止条約」(MARPOL 73/78) に基づく排ガス規制によって、硫黄成分が少なく価格の高い A 重油を原則として使う必要がある。しかし、排ガス中の硫黄成分を除去する装置を設置すれば、価格の安い C 重油を

使うことができる。そこで、富士電機は船舶の EGCS を開発し、2018 年度から提供している。この EGCS を運用する上で、次のような課題がある。

- (a) 専門家ではない作業員（船員）が EGCS を容易に操作できること。
 - (b) EGCS が故障した場合、迅速な対応ができること。
- 富士電機は、このような課題を解決し、EGCS のサービスを向上させるため、船舶 IoT システムを開発した。

2 概要

図 1 に、船舶 IoT システムのシステム構成図を示す。本システムは、次に示すように船内と陸上のサブシステムから構成されている。

- (a) EGCS のログデータ、ヒストリーデータを収集し船内の通信機器を介して富士電機クラウドサーバに

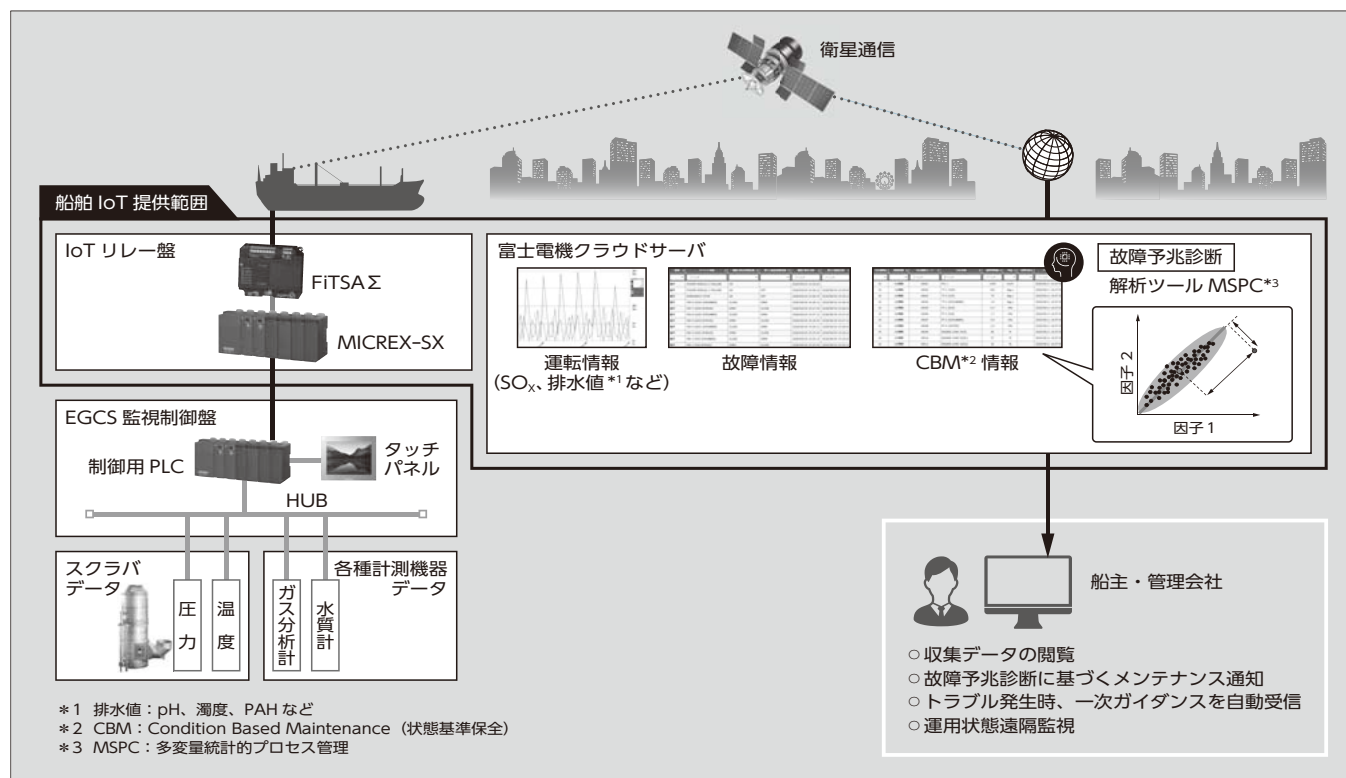


図 1 システム構成図

* 富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部社会ソリューション事業部船舶・交通システム部

送信する IoT リレー盤（船内）

- (b) 定期検査などでシステムを停止するとき以外は常に 30 分周期で船上から送信されたデータ^(注1)を自動収集し、蓄積する富士電機クラウドサーバ（陸上側）

③ IoT リレー盤（船内）

3.1 特徴

IoT リレー盤（図 1）は、EGCS 監視制御盤から取得したデータ（pH、濁度、PAH^(注2)の濃度などのログデータ、ヒストリーデータ）を一時的に蓄積し、一定周期で陸上側に送信する機能を持っており次の機器で構成されている。

(1) 「MICREX-SX」

制御盤からのデータをシリアル通信に変換してセキュリティを担保し、今後の機能拡張に対応する装置

(2) 「FiTSAΣ」

制御盤から収集したデータを一時的に蓄積し、一定周期で陸上に送信するゲートウェイ装置

通信プロトコルは、衛星通信の特性を鑑み、データ量が小さく、ネットワーク環境が不安定でも再送信などによって情報の到達性を担保する MQTT（Message Queue Telemetry Transport）方式を採用した。IoT リレー盤と顧客が利用する回線との接続は、一般的なインターネット接続作業と同様に、固定 IP アドレスやデフォルトゲートウェイなどを設定すれば完了する。

3.2 機能

IoT リレー盤には船陸間通信を確実に行うことができ

るようにするために、次の二つの機能がある。

(1) データ送信リトライ機能

衛星通信が不通になるなどによって送信が失敗した場合、次の送信タイミングに合わせて送信する機能である。

(2) 通信ログ送信機能

衛星回線を使った船陸間通信は天候に左右されるため、通信が不通となった場合その原因が船陸間通信と機器のどちらに起因するのかを切分けることができる機能である。通信ログを一定周期で陸上側に送信することで、早期の原因の切分けと迅速な対応を行うことができる。

④ 富士電機クラウドサーバ（陸上側）

4.1 富士電機クラウドサーバの特徴

船から衛星回線を通じて送信されたデータは、富士電機クラウドサーバに蓄積する。蓄積したデータは、O&M（Operation & Maintenance）サービスプラットフォームを使って閲覧可能である。

富士電機クラウドサーバの特徴を次に述べる。

- (a) 船側のゲートウェイ装置（FiTSAΣ）を特定し、通信の安全性を確保するための認証機能を持つ。
- (b) 富士電機クラウドサーバの運営において、ISO/IEC27017：2015 や富士電機の IoT セキュリティガイドラインに基づいて策定したセキュリティポリシーに従って、リスクの低減や重要情報の保護を行っている。

4.2 富士電機クラウドサーバが提供する機能

(1) 監視機能（図 2）

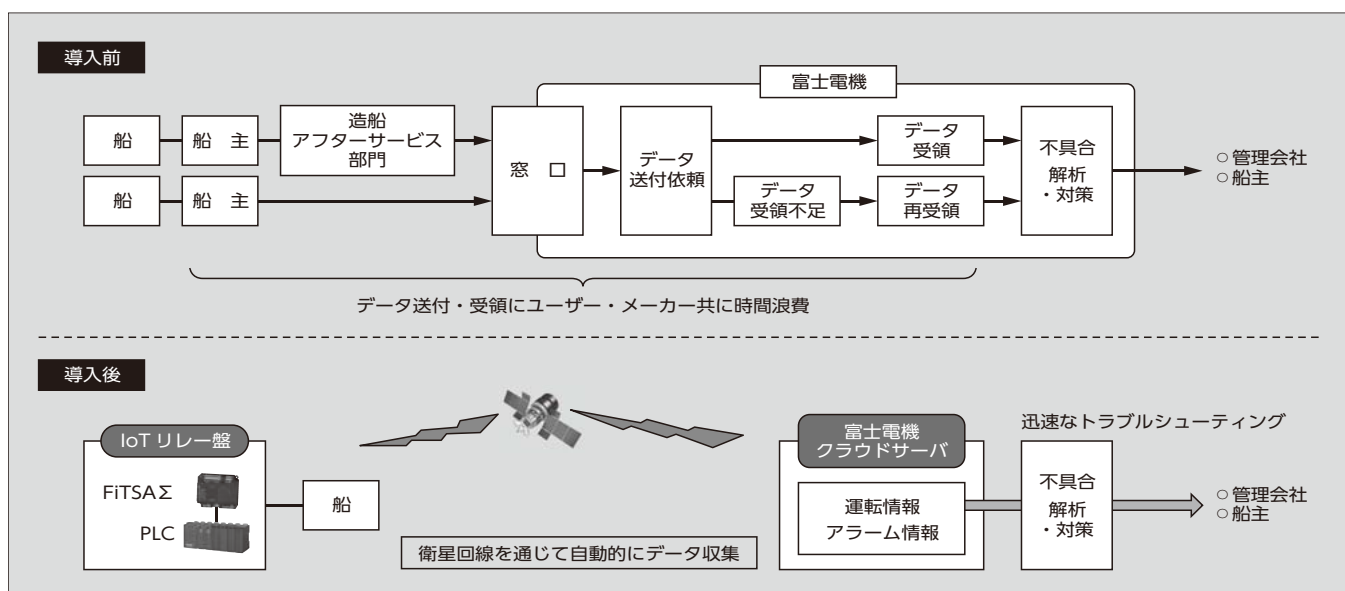


図2 監視機能概要

〈注1〉送信：顧客が利用する衛星通信システムの回線を使って行う

〈注2〉PAH：多環芳香族炭化水素

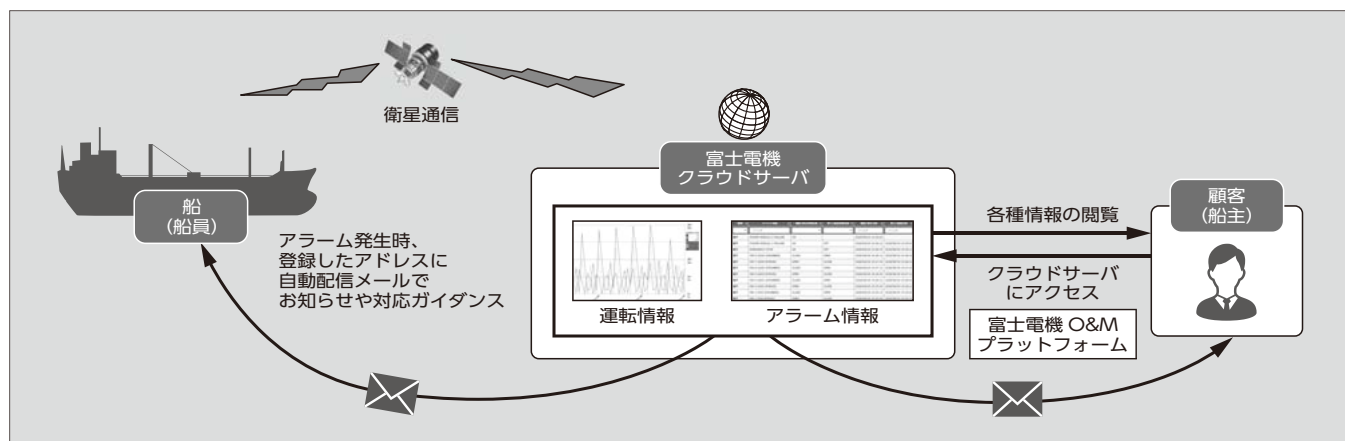


図3 一次ガイダンス自動配信機能

定期検査などでシステムを停止するとき以外は常に30分周期でデータを自動収集し、常時監視ができる。確認可能な項目は次の2点である。

- 計測値確認（ログデータ監視）
- 状態確認（履歴データ監視）

この監視機能を活用すると、次の効果がある。

- (a) データ取得・送信のための船員の工数を削減
 - (b) 陸上のユーザーと船員間の認識の齟齬（そご）により、必要なデータがタイムリーに取得できないといった問題を解決
 - (c) トラブル対応後の経過観察が容易。次回のメンテナンスへのフィードバックが可能
- (2) 一次ガイダンス自動配信機能（図3）

船内でEGCSのアラームが発報すると、船員がメールを使って陸上に問い合わせることが多く、船員の時間と労力を費やしていた。そこで、クラウドサーバ上のトラブルシューティングのリストと自動受信したアラーム情報をひもづけし、トラブルシューティングを24時間自動配信する機能を開発した。この機能により、メールアドレスをクラウドサーバに登録しておけば、EGCSに関する経験や知識が少ない船員でも迅速なトラブル解決や、トラブルの影響を最小限にできる。

5 今後の展開

IoTシステムを活用したリモートサービスの向上を図るため次に示す課題を検討している。

(1) 故障予兆診断

故障を未然に防止するために、富士電機のアナリティクス・AIを活用し、故障が発生する前に予兆を検知し、自動配信機能で関係者に通知する。

(2) 他社の船用機器との連携

EGCS含めた補機類を統合的に監視できるようにするために、IoTリレー盤に搭載しているゲートウェイ装置のFiTSAΣに、ボイラ、バラスト水処理装置、空調機器などといった他社の船用機器を接続して連携する。

発売時期

2021年4月

お問い合わせ先

富士電機株式会社
 パワエレインダストリー事業本部
 社会ソリューション事業部船舶・交通システム部
 電話（03）5435-7168

（2021年12月14日Web公開）

略語（本号で使った主な略語）

5G	5th Generation	第 5 世代移動通信システム
APF	Annual Performance Factor	通年エネルギー消費効率
BSC	Boot-Strap-Capacitor	
BSD	Boot-Strap-Diode	
CBM	Condition Based Maintenance	状態基準保全
CCM-PFC	Continuous Conduction Mode-Power Factor Correction	電流連続モード力率改善
CISPR	Comité international spécial des perturbations radioélectriques	国際無線障害特別委員会
DC	Data Center	データセンター
EGCS	Exhaust Gas Cleaning Systems	排ガス浄化システム
EMC	Electromagnetic Compatibility	電磁両立性
ESD	Electro-Static Discharge	
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
HVIC	High Voltage Integrated Circuit	
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	
IoT	Internet of Things	
IPM	Intelligent Power Module	
IPS	Intelligent Power Switch	
JBS	Junction Barrier Schottky	
LVIC	Low Voltage Integrated Circuit	
LVRT	Low Voltage Ride Through	
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor	
MQTT	Message Queue Telemetry Transport	
MSPC	Multivariate Statistical Process Control	多変量統計のプロセス管理
O&M	Operation and Maintenance	
PCS	Power Conditioning System	パワーコンディショナ
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle	プラグインハイブリッド自動車
PIV	Particle Image Velocimetry	粒子画像流速測定法
RC-IGBT	Reverse-Conducting IGBT	逆導通 IGBT
SBD	Schottky Barrier Diode	
UPS	Uninterruptible Power System	無停電電源装置

商標（本号に記載した主な商標または登録商標）

MODBUS	Schneider Automation, Inc. の商標または登録商標
その他の会社名、製品名は、それぞれの会社の商標または登録商標である。	

訂正：富士電機技報. vol.94, no.1, p.8、左側 2 行目

(正)	(誤)
促す	促する

脚注左下 1 行目

(正)	(誤)
汎用工作機械	汎工作機械

訂正：富士電機技報. vol.94, no.1, p.11、図 5

(正)	(誤)
図 5 絶縁施工方法に拠る部分放電電荷量の発生状況比較	図 5 絶縁施工方法に拠る部分放電電化量の発生状況比較

訂正：富士電機技報. vol.94, no.1, p.43、表 1、3 行目

(正)	(誤)
AC500 V × 12 回路	AC500 × 12 回路
AC500 V × 24 回路	AC500 × 24 回路

表 1、6 行目、7 行目

(正)	(誤)
容量 (kVA)	容量
定格電流 (A)	定格電流

訂正：富士電機技報. vol.94, no.2, p.82、下段 8 ～ 9 行目

(正)	(誤)
それぞれ 2020 年 5 月に営業運転を開始した。	それぞれ 2020 年 4 月および 5 月に営業運転を開始した。

訂正：富士電機技報. vol.94, no.3, p.173、左側 16 行目脚注

(正)	(誤)
〈注 3〉	〈注 2〉

訂正：富士電機技報. vol.94, no.3, p.186、右側 13 行目

(正)	(誤)
AI (Artificial Intelligence)	AI (Artificial Intelligence)

訂正：富士電機技報. vol.94, no.3, p.198、左側 8 行目

(正)

切れ端をセンサが

(誤)

切れ端センサが

訂正：富士電機技報. vol.94, no.3, p.215、図 1 の注 P216、図 3 の注、脚注

(正)

OPC UA：OPC Foundation の商標または登録商標

(誤)

OPC UA：PC Foundation の商標または登録商標

訂正：富士電機技報. vol.94, no.3, p.216、左側 2 行目、脚注

(正)

〈注 2〉

(誤)

〈注 1〉

右側 18 行目、脚注

(正)

〈注 3〉

(誤)

〈注 2〉

訂正：富士電機技報. vol.94, no.3, p.217、左側 2 行目、脚注

(正)

〈注 4〉

(誤)

〈注 3〉

左側 23 行目、脚注

(正)

〈注 5〉

(誤)

〈注 4〉

訂正：富士電機技報. vol.94, no.3, p.219、下から 8 行目

(正)

OPC UA：OPC Foundation の商標または登録商標

(誤)

OPC UA：PC Foundation の商標または登録商標



主要事業内容

パワエレ エネルギー

確かな技術で電力インフラを支え、エネルギーの安定供給、最適化、安定化に貢献します。

エネルギーマネジメント

エネルギーマネジメントシステム（EMS）、電力流通、スマートメータ、変電

施設・電源システム

データセンター、無停電電源装置（UPS）、配電盤

器 具

受配電・制御機器

パワエレ インダストリー

パワーエレクトロニクス応用製品に計測機器、IoT を組み合わせ、工場の自動化や見える化により生産性の向上と省エネを実現します。

オートメーション

インバータ、モータ、FA コンポーネント、計測機器、FA システム、駆動制御システム、計測制御システム、工業電熱

社会ソリューション

鉄道車両電機品、EV システム、放射線管理システム、船舶用排ガス浄化システム

情報ソリューション

情報制御システム

半導体

高い品質、変換効率を実現、小型化・省エネ化に貢献します。

産 業

IGBT モジュール、SiC モジュール、MOSFET、ダイオード、電源制御 IC、感光体

電 装

IGBT モジュール、圧力センサ、パワー IC、イグナイタ

発電プラント

高度なプラントエンジニアリング力で、設計・製作から現地据付・試運転・アフターサービスまで一貫して提供します。

再生可能・新エネルギー

地熱発電、水力発電、太陽光発電、風力発電、燃料電池

火力発電・原子力関連設備

食品流通

自動化・省エネを食の安全・安心とともに提供します。

自販機

飲料・食品自動販売機

店舗流通

店舗設備機器、金銭機器、エネルギー管理システム

*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）

https://www.fujielectric.co.jp/about/company/contents_02_03.html

FUJI ELECTRIC REVIEW（英文）

<https://www.fujielectric.com/company/tech/contents3.html>

富士電機技術期刊（中文）

<http://www.fujielectric.com.cn/jtkw.html>



次号予定

富士電機技報 第95巻 第1号

特集 電力安定供給と省エネルギーに貢献する電源システム

富士電機技報企画会議

幹 事 中山 和哉

企画メンバー 斎藤 哲哉 桑山 仁平 眞下 真弓 前田政一郎

渡部 雅教 熊谷 明恭 片桐 源一 出野 裕

岡本 泰道

特 集 委 員 熊谷 明恭 折笠 仁

事 務 局 堀口 道子 中田 栄寿

編 集 室 藤木 徹 木村 基 小野寺拓也 小野 直樹

高橋 徹

富士電機技報 第94巻 第4号

令和4年3月20日 印刷 令和4年3月30日 発行

編集兼発行人 近藤 史郎

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

*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。

© 2022 Fuji Electric Co., Ltd., Printed in Japan (禁無断転載)

富士電機技報 vol.94 2021 年 総目次

No.1 特集 省エネルギー・小型化と生産性向上に貢献するパワーエレクトロニクス

〔特集に寄せて〕パワーエレクトロニクスのニューノーマル	藤田 英明	3 (3)
〔現状と展望〕省エネルギー・小型化と生産性向上に貢献する パワーエレクトロニクス	鉄谷 裕司 松本 康 劉 江桁	4 (4)
省エネルギー・小型化		
高効率高周波誘導炉「F-MELT100G シリーズ」	田中 克尚 松永 和久 山本 勝也	10 (10)
メガソーラー向け DC1,500 V 用 PCS「PVI1500CJ-3/2500」	久世 直樹 森嶋 洋介	15 (15)
世界の安全・安心・快適な公共交通に貢献する		
鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器	藤田 憲司 小林 宣之	19 (19)
流体機器用 PM モータの小型・高速・高効率化	廣瀬 英男 佐々木敏哉 中谷 僚太	24 (24)
制御盤用 AC-DC 電源	沖 一洋 八ツ田 豊 橋爪 真悟	28 (28)
生産性向上		
高性能・多機能形インバータ「FRENIC-MEGA (G2) シリーズ」	鷹見 裕一 矢山 高裕 山澤航太郎	32 (32)
電源回生機能付き高効率 PWM コンバータ「FRENIC-RHC シリーズ」	佐藤 和久 栗井 昭裕 大森 聖史	37 (37)
高圧インバータ「FRENIC4600FM4 シリーズ」用		
レトロフィット製品	山田 達也 市位 嘉崇 高橋 義和	42 (42)
産業用低圧インバータ「FRENIC4000VM6」	日夏 遼	47 (47)
サーボシステム「ALPHA7 シリーズ」の新機能と適用例	山下 智史 高山 哲也 谷口 享	51 (51)
新製品紹介論文		
ETC 車両検知器用着雪除去装置		57 (57)
第 7 世代「X シリーズ」1,200 V/250 A RC-IGBT モジュール		60 (60)
電鉄向け 3.3 kV SiC ハイブリッドハイパワーモジュール		63 (63)

No.2 特集 2020 年度の技術成果と展望

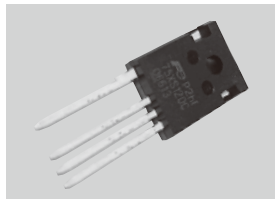
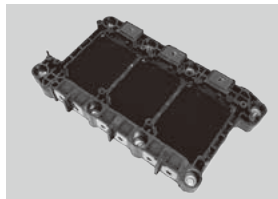
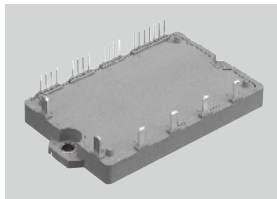
〔特集に寄せて〕		
“パワエレとパワー半導体事業を核にして、 SDGs 達成、脱炭素社会の実現に貢献”	北澤 通宏	71 (3)
“リアルフィールドとサイバー空間、 アナログとデジタルの技術を連携させて、 お客さまの新たな価値創出と社会課題解決を目指す”	近藤 史郎	72 (4)
〔対 談〕		
“安全・安心で持続可能な社会の実現を目指して” エネルギー・環境分野において産学連携を深化させ、 社会課題であるカーボンニュートラル実現に貢献	福田 晋 近藤 史郎	73 (5)
〔座談会〕		
“CO ₂ の排出削減を通じて、 安全・安心で持続可能な社会の実現を目指す”	板岡 健之 辻 健 林 潤一郎 吉田 隆 齋藤 秀介 中川 功夫	76 (8)
ハイライト		81 (13)
パワエレ エネルギー		89 (21)
□エネルギーマネジメント □施設・電源システム		
□受配電・開閉・制御機器コンポーネント		
パワエレ インダストリー		94 (26)
□ファクトリーオートメーション □プロセスオートメーション		
□情報ソリューション □社会ソリューション □フィールドサービス		
半導体		104 (36)
□産 業 □電 装		
発電プラント		108 (40)
□再生可能エネルギー □新エネルギー □ソリューション・サービス		
食品流通		111 (43)
□自動販売機 □店舗流通		
基盤・先端技術		113 (45)
□基盤技術 □先端技術		
デザイン (Fe design)		119 (51)

No.3 富士電機の DX（デジタルトランスフォーメーション）			
〔特集に寄せて〕DX は気づきから始まる 森川 博之 129（3）			
〔現状と展望〕富士電機の DX（デジタルトランスフォーメーション）			
の現状と展望.....	瀬谷 彰利	安川 和行	引地 正則 130（4）
DX ソリューション			
リアルタイムで不良品検出を実現する AI を適用した			
機械装置向け診断ソリューション.....	湯尾 幸輝	島村 明夫	宗像 昌朗 141（15）
AI 技術適用により蒸気利用設備の CO ₂ 排出量削減に			
貢献する熱 EMS ソリューション	山口 貴久	竜田 尚登	146（20）
オペレーション業務の効率化に貢献する IoT・AI を			
活用した自動販売機運用サービス.....	片山 修吾	後閑 武	起 賢一 151（25）
制御システムのライフサイクルフルサポートに貢献する			
IoT を活用した遠隔監視診断システム.....		原口 隆	157（31）
IoT を活用した現場業務の全体最適を支援する O&M ソリューション	喜多村 卓	山田 隆雄	162（36）
DX を支える技術			
富士電機のアナリティクス・AI	浅野 貴正	渡辺 拓也	白木 崇志 168（42）
設備保全の技術伝承・情報共有を推進するためのテキスト認識技術.....	真鍋 章	谷本 恒野	浅野 貴正 174（48）
富士電機のサイバーセキュリティの取り組み.....		梅崎 一也	吉田 聡 179（53）
拡張現実を用いた保守支援技術.....		城戸 武志	大秋 大輔 184（58）
パワーエレクトロニクス機器のモデルベースシステムズエンジニアリング.....			吉田 収志 189（63）
デジタルツールの活用による生産ライン構築プロセスの変革.....			澁田 学 194（68）
シミュレーションによる騒音推定技術.....	金子 公寿	大野 和彦	山本 勉 199（73）
分子レベル計算を活用した SiC-MOSFET の界面解析シミュレーション			広瀬 隆之 204（78）
ウイルス不活化技術のための UV 空間照射光量と気流の連成解析			
—シミュレーションを活用した開発プロセスの変革—.....	松本 伸	浅田 規	大栗 延章 209（83）
解 説			
BERT 半教師あり学習			214（88）
新製品紹介論文			
「MONITOUCH X1 シリーズ」.....			215（89）

No.4 特集 自動車電動化・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〕エネルギーシステムの改善を方向付けるパワー半導体 Blaabjerg, Frede 225（3）			
〔現状と展望〕自動車電動化・エネルギーマネジメントに貢献する			
パワー半導体.....	大西 泰彦	宮坂 忠志	井川 修 228（6）
xEV 向け 100 kW クラス超小型 RC-IGBT モジュール「M677」.....	安達新一郎	小幡 智幸	東 展弘 236（14）
xEV 向け超小型 RC-IGBT モジュールの冷却技術	立石 義博	小山 貴裕	吉田 大輝 240（18）
第 7 世代「X シリーズ」産業用 RC-IGBT モジュール「Dual XT」.....	江袋 佑太	山野 彰生	掛布 光泰 246（24）
第 7 世代「X シリーズ」大容量 IGBT-IPM「P631」	皆川 啓	唐沢 達也	唐本 祐樹 251（29）
第 3 世代小容量 IPM「P633C シリーズ」	上村 威	大橋 英知	田村 隆博 256（34）
次世代小容量 IPM 用 3ch-HVIC 技術	上西 顕寛	山路 将晴	澄田 仁志 261（39）
第 2 世代ディスクリート SiC-SBD シリーズ.....	渡邊 荘太	橋爪 悠一	島田 隆 267（45）
第 2 世代 1,700 V SiC トレンチゲート MOSFET	内田 貴史	奥村 啓樹	成田 舜基 272（50）
新製品紹介論文			
大容量無停電電源装置「UPS7500WX」.....			277（55）
船舶 IoT システム			280（58）

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、風力発電などのクリーンエネルギー分野、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・電気自動車といった交通分野まで、様々な場面で活躍しています。さらに、新素材 SiC を採用した、より高性能な次世代パワー半導体を開発。富士電機は、これからもエネルギー技術を革新し、安全・安心で持続可能な社会の実現に貢献していきます。



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の追求により、
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・安心で持続可能な社会の実現に貢献します。



Courtesy of PT SEMI
耐食・材料・熱水利用技術
地熱発電プラント



デバイス技術
パワー半導体



パワーエレクトロニクス技術
メガソーラー向けPCS
(パワーコンディショナ)



パワーエレクトロニクス技術
インバータ



パワーエレクトロニクス技術
UPS(無停電電源装置)



熱交換・冷媒制御技術
ハイブリッドヒートポンプ式
自動販売機

F 富士電機

本誌は、環境に配慮した FSC® 認証紙および
植物油インキを使用しています。また、ユニ
バーサルデザイン(UD)の考えに基づいた
見やすいデザインの文字を採用しています。

