

ハイブリッド電気自動車向け 高電力密度インバータ

High-power-density Inverter Technology for Hybrid and Electric Vehicle Applications

木村 隆志

Kimura Takashi

中津 欣也

Nakatsu Kinya

齋藤 隆一

Saitou Ryuichi

石川 秀明

Ishikawa Hideaki

久保 謙二

Kubo Kenji

佐々木 要

Sasaki Kaname

近年、ハイブリッド自動車（HEV）の販売台数が増加し、量産型電気自動車（BEV）が発売されるなど、環境対応自動車が身近なものとなってきている。一方で、環境規制としてのCO₂（燃費）・排気規制は、より一層強化される動向があり、環境対応自動車の販売台数はこれからも増加していく。そのため、モータ、インバータ、バッテリーが中心となって構成される電動システムにおいて、インバータの役割は今まで以上に多用化し、小型化・低価格化と高出力化を同時に実現することが求められている。日立グループは、顧客ニーズに最適なHEV、EV用インバータを提供するとともにインバータの普及に向けた技術開発を進め、これからも低炭素社会の発展に貢献していく。

1. はじめに

持続可能な社会の実現に向け、自動車ではCO₂排出量削減に向けた燃費規制は年々強化されている。2020年には、EV（Electric Vehicle：電気自動車）、HEV（Hybrid Electric Vehicle：ハイブリッド自動車）の市場に占める割合は、大幅に増加すると予測されている。HEVは、さまざまな形式が市場に導入されている。日立グループは、パワーエレクトロニクス技術の強みを生かし、多様な顧客のニーズに応えられるインバータを提供してきた。

近年では、インバータは狭い車両搭載スペースにもフィットできるように小型高出力化が求められており、このようなニーズに応えるため、従来に比べて格段に高い電力密度の両面直冷パワーモジュールを新たに開発した。さらに、両面直冷パワーモジュールを搭載するため、標準的なパワーエレクトロニクスプラットフォームを開発し、標準インバータとして実現した。

ここでは、自動車インバータを構成する両面直冷パワーモジュール、標準インバータの構成、加えてインバータに一体化する日立独自の直流（DC：Direct Current）コンバー

タ、および、さらなる高出力化に向けたインバータの取り組みについて述べる。

2. これまでの取り組み

車載インバータでは、電池に蓄えられた直流電力を交流（AC：Alternating Current）電力に変換し、変換する際に車速やシステム制御に必要な周波数を作り出し、モータ回転数、駆動トルクや電力を制御して、車両の加減速を行う必要がある。このようなHEV、EVの電気駆動システムに求められる性能は、車両搭載性を重視した小型化、EV走行距離を延ばす高効率化、快適な加速性能を実現する高出力化、厳しい車載環境下での高信頼性である。

日立グループは、パワーモジュール実装技術を駆使し、直接水冷方式を開発して、小型化と高性能化を達成してきた。さらに、冷却フィン进行全面浸漬した直接水冷型両面冷却方式とすることで、インバータのさらなる小型化を進め

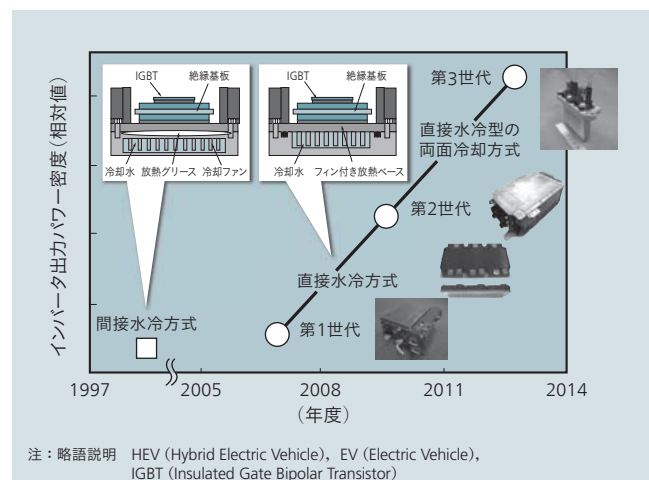


図1 | HEV/EV向けインバータの開発ロードマップ

車載に必要なさまざまな要求に対応するため、電力、産業、民生など多くの分野で培った実装・解析技術を駆使し、直接水冷方式を開発することで小型化、高性能化を実現している。

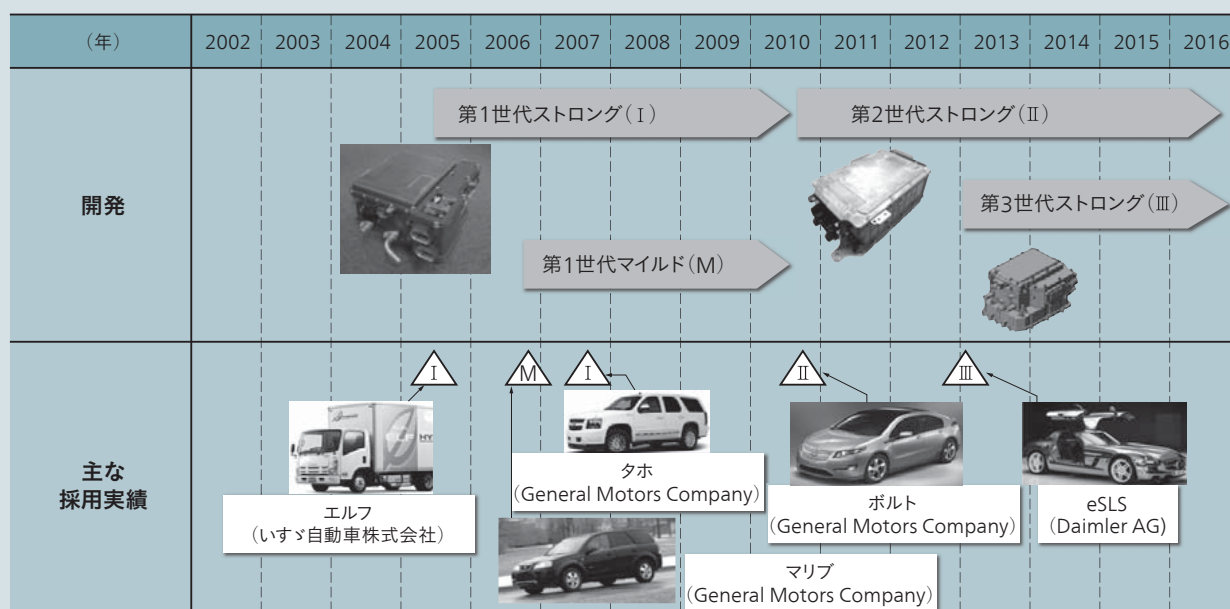


図2 | ハイブリッド自動車への搭載実績

直接冷却方式を採用したインバータは2005年から量産を開始し、これまでに3世代にわたって、高出力インバータを提供してきた。

ている(図1参照)。

電気駆動システムの駆動方式の違いにより、1モータ、2モータを駆動するインバータが求められ、モータ、電池との整合によって60V以下、100V～450Vのさまざまなシステム電圧への適用が求められる。日立グループでは直接冷却方式を採用したHEV用インバータの量産を2005年から開始し、1モータ用、2モータ用、42V対応インバータと量産してきた。第2世代までは片面直冷方式のパワーモジュールを採用したが、第3世代からは両面直冷方式のパワーモジュールを採用し、部品の共用化を進めた標準インバータ構造を開発した(図2参照)。

3. 高電力密度インバータ技術

3.1 高電力密度インバータの特徴

車載インバータの要求事項として、低速回転から高速回転までの制御性、熱、振動の厳しい環境条件に耐える堅牢(ろう)さに加え、大電流スイッチングによるノイズ輻(ふく)射の抑圧[EMC(Electromagnetic Compatibility)性能]、優れた搭載性(小型、軽量)、万一の故障時のフェイルセーフ機能、熱疲労に対して高寿命であること、防水、防塵(じん)性に優れること、高地での絶縁性能を確保することなどが、これらの厳しい要求項目を低価格で実現することが求められる。

車載インバータは、パワー素子(IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor)、パワーモジュール、高耐圧DCラインキャパシタ、主回路バスバー、パワーモジュール駆動回路

基板、モータ制御回路基板、3相電流センサー、強電AC、DCコネクタなどの多くの部品で構成されている。このような高い要求性能に応えるため、これまでは専用の構成部品を必要としていた。これらの構成部品は、高電圧、高電流を扱うパワー部分は高耐圧、絶縁性を確保する必要がある。

そこで、低価格化を実現するために構成部品の標準化を進め、標準化部品を用いて設計することで、さまざまな顧客ニーズに応えられるようにした。

今回、開発した高電力密度インバータの特徴を以下に示す。

- (1) 低熱抵抗パワーモジュールおよび低損失、高性能IGBT、ダイオードの採用
- (2) 低インダクタンス主回路と最適化されたDCキャパシタンス構造
- (3) 効率的な冷却と低圧損を実現した水路構造
- (4) 保護機能を集積化したゲート駆動ASIC(Application Specific Integrated Circuit)の採用
- (5) 機能安全に対応したモータ制御基板
- (6) 小型軽量化を実現したコンパクトなパッケージ構造
- (7) 小型化した補機用インバータ(オプション)

3.2 両面直冷パワーモジュール

3.2.1 パワー素子

IGBT、FWD(Free Wheeling Diode)のパワー素子は、車両の最大動作条件での性能を満たす必要がある。インバータ損失の大部分はパワー素子の損失であるため、電費

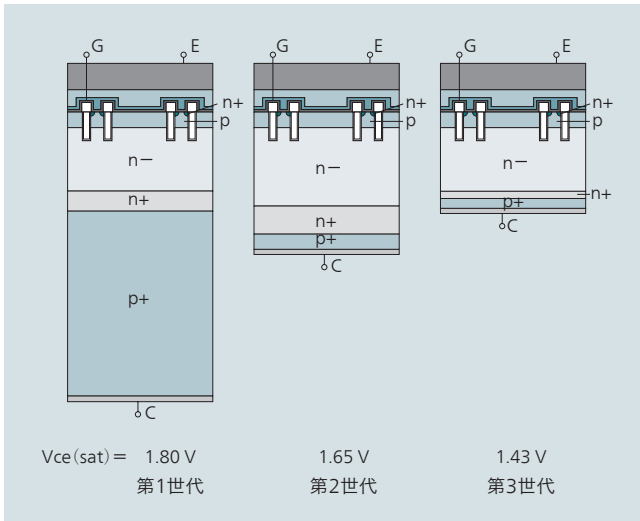


図3 | IGBT素子構造とVce (飽和電圧)の進化

インバータ損失の大部分はIGBT損失であるため、世代ごとに低損失化を進めてきた。第1世代はノンパンチスルー型、第2世代はパンチスルー型を採用してきたが、第3世代ではフィールドストップ型を適用した。

性能に影響が大きい。このため、パワー素子は低損失であることが求められる。日立グループはこれまでインバータの世代ごとに最新のパワー素子技術を適用し、低損失化を実現してきた(図3参照)。

DCリンク電圧は、昇圧を使わない場合、最大400V程度であるので、IGBT耐圧は650V~700Vが必要であり、また電流として実効値で300 Arms~400 Armsを駆動し、キャリア周波数としては5 kHz~12 kHzを想定した。このような駆動条件においても低損失を実現するため、第3世代では、フィールドストップトレンチIGBTを採用し、インバータの小型化に寄与した。

3.2.2 パワーモジュール

パワーモジュールは、インバータの床面積を最小化し、

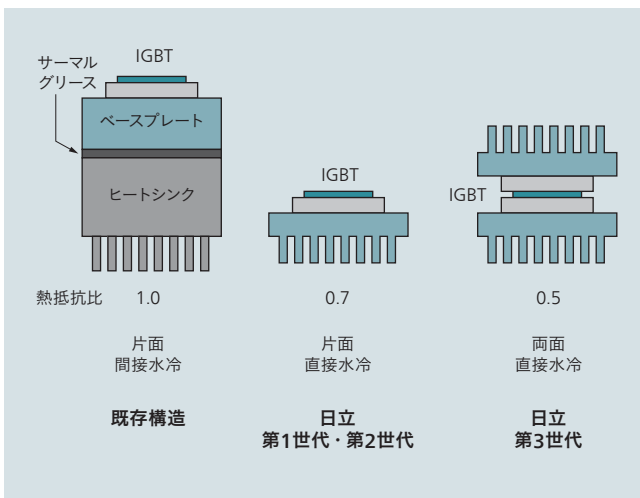


図4 | パワーモジュール冷却構造の進化

従来構造はヒートシンクにグリースを介して放熱するが、日立グループでは第1世代から放熱フィンに冷却水に浸す直接冷却方式を採用し、IGBT電流密度を向上させてきた。第3世代からはさらにチップの両側に放熱フィンを配置した両面冷却方式を新たに開発した。

パワー素子の性能をできるだけ引き出すことが求められる。日立グループは、第1世代、第2世代から直接冷却方式を採用している。直接冷却方式は、モジュールの底面をフィン構造とし、冷却水に浸漬する方式である。この方式では、従来のベースプレートとヒートシンクの間が存在する放熱グリースとヒートシンクの熱抵抗が省かれることから、放熱性能が向上する(図4参照)。

直接冷却方式では、ピンフィン構造が重要であり、フィンを多くすると熱抵抗は減少するが、冷却水路の圧力損が増大する。日立グループはピンフィン構造の最適化を行うために、遺伝的アルゴリズムにより最適化設計を行っている(図5参照)。電気駆動システムの冷却システムからの要求仕様による圧力損と要求される熱抵抗から、最適なピンフィン構造を選択する必要がある。このような最適化を行うことで、第1世代と第2世代の片面冷却方式では、流量10 L/分、20 kPa圧力損の条件で間接冷却方式に対し、素子ジャンクションから冷却水までの熱抵抗で30%の改善を達成している。

第3世代では、この冷却方式をさらに進化させて両面直接冷却方式を採用した(図4参照)。従来ワイヤボンディングを行っていたIGBTのエミッタ側にリードフレームをはんだ接合し、リードフレームは絶縁材を介してヒートシンクに接合する。このようにメタルリード、絶縁材、フィンまで直結する構造を採用することで、熱抵抗を飛躍的に低減することができた。

また、第3世代モジュールでは、三相交流(UVW)の1相ごとに1つのモジュールを適用する2イン1形式を採用したので、モジュール配置の自由度が増し、インバータ構造の最適化が容易になった(図6参照)。

両面直冷パワーモジュールは、片面直冷パワーモジュール

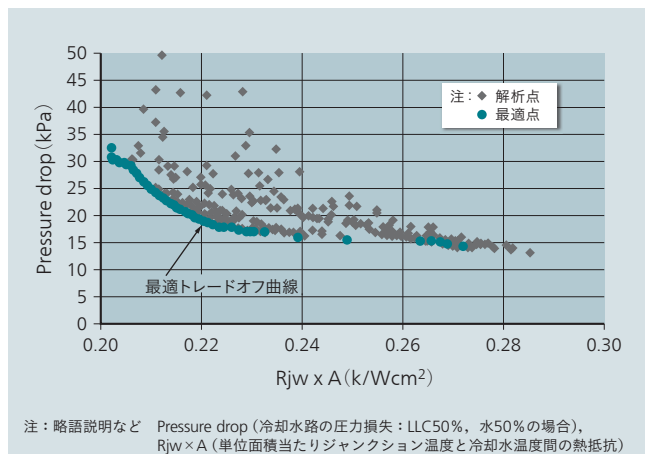


図5 | パワーモジュールにおけるピンフィンの最適化

パワーモジュールの熱抵抗は、冷却水路の圧損を高めることで改善する。一方で、冷却水路の通水抵抗も高くなるため、冷却能力によって最適点を選択する。ここでは、フィン数、フィン間隔、フィン高さのフィン形状をパラメータにし、遺伝的アルゴリズムによって最適曲線を算出したものである。

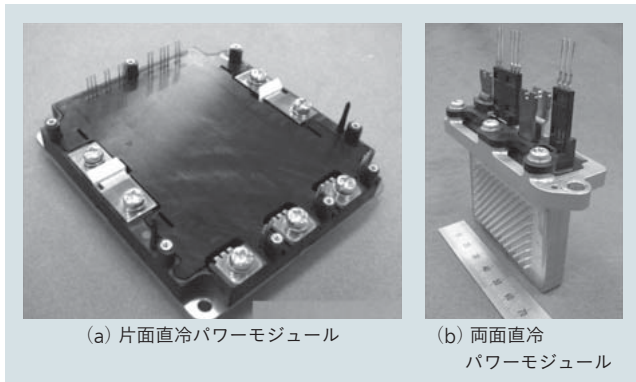


図6 | パワーモジュール外観

第2世代に採用した片面直冷パワーモジュールを(a)に、第3世代向けに開発した両面直冷モジュールを(b)に示す。両面直冷パワーモジュールは耐圧700 V、最大電流325 Arms、絶縁抵抗10 MΩ (500 Vdc)、絶縁抵抗2,700 Vdc (1分間)を達成している。両面直冷パワーモジュールは400 Arms、IGBTチップに換装することで最大電流を拡大することができる。

ルに比べて熱抵抗が約35%改善されており、同一チップサイズのパワーデバイスを用いると約30%以上電流を流す性能改善を達成することができた(図7参照)。

両面冷却モジュールの性能改善により、ジャンクション温度の上昇が少なくなるため、より高温の冷却水温度でのインバータ作動が可能となり、従来は必要であったインバータ専用の冷却システムを簡素化できるようになる。

3.3 冷却水路、主回路、キャパシタ

インバータ損失を低減するには、ゲート抵抗を下げてスイッチング速度を上げる必要があるが、サージ電圧が増大する。このため主回路インダクタンスを低減する必要がある。主回路インダクタンスは、モジュール内部インダクタンス、バスバーインダクタンス、キャパシタ内部インダクタンスで構成されるので、全体を下げるために、端子配置の最適化を行い、各部位のバスバーの+側、-側を重ね合

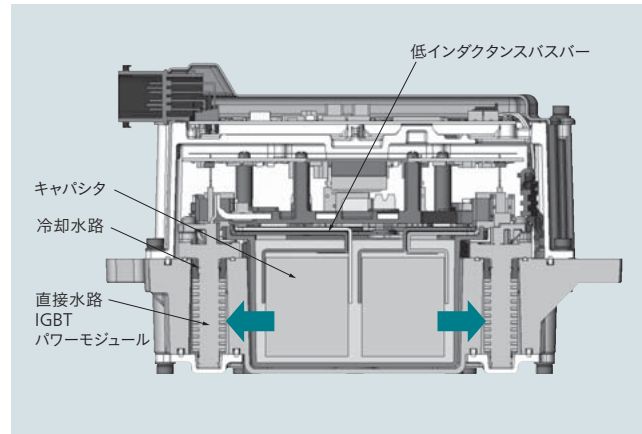


図8 | 両面直冷パワーモジュールを搭載したインバータの内部構造

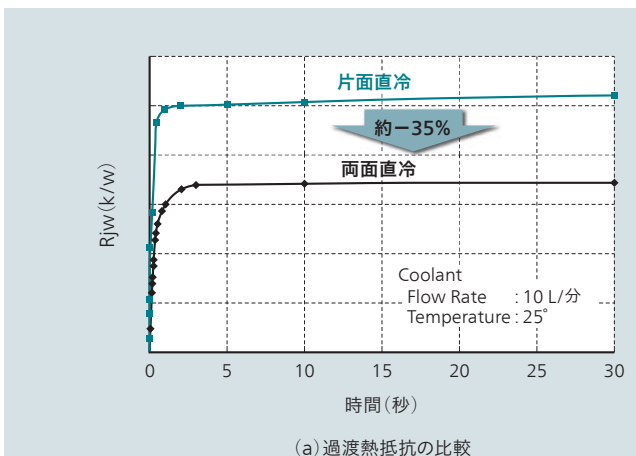
両面直冷パワーモジュールを採用したインバータでは、キャパシタを並行して配置することで、耐熱温度の低いフィルムコンデンサを冷却することが可能となった。

わせることで低インダクタンス化を実現している。

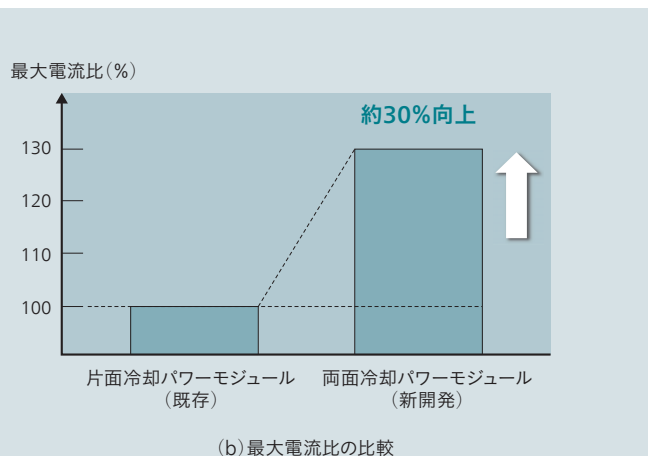
DCキャパシタは高信頼化のため2.5 μmのフィルムコンデンサを採用しており、キャパシタの内部インダクタンスを最小化するために、セルや端子の配置を最適化した。

両面直冷パワーモジュールを搭載したインバータでは、両面モジュールを格納する冷却水路内で適切な圧力損が発生するように冷却水路構造の最適化を行っている。

また、両面直冷モジュールを納めるための縦長の冷却水路に囲まれた空間にDCキャパシタンスを配置し、耐熱温度の低いDCキャパシタンスから発生する熱を水冷ジャケットに熱伝導する構造を採用した。さらに、インバータの組立性、信頼性を向上するため、接続ハーネスを大幅に削減することをめざした。このため、電流センサーは回路基板に直挿入するなどの効率的な構造を採用し、ハーネス、コネクタの接続部品を廃止して、インバータ全体の部品点数を大幅に削減した(図8参照)。



(a) 過渡熱抵抗の比較



(b) 最大電流比の比較

注：略語説明など Rjw [パワー素子のジャンクション温度と冷却水温度間の熱抵抗(ケルビン温度/ワット)]

図7 | 両面直冷パワーモジュールの放熱性能

両面直冷パワーモジュールと片面直冷パワーモジュールの放熱性能を同一のIGBTチップサイズで比較した。Rjwで約35%少ない熱抵抗を実現したことにより、最大電流で約30%改善することができた。

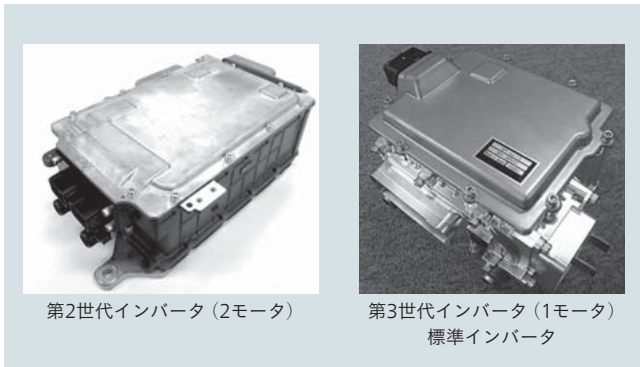


図9 | 最新インバータの構成

1モータ用に日立独自仕様の標準インバータを開発した。この標準インバータはパワー部分を共通化によって固定し、冷却配管、強電コネクタ、小信号コネクタを、インタフェースとなる筐(きょう)体を顧客仕様に応じて最適設計することで、汎用性と車載レイアウトへの柔軟性を両立できるようにした。

3.4 ゲート駆動基板

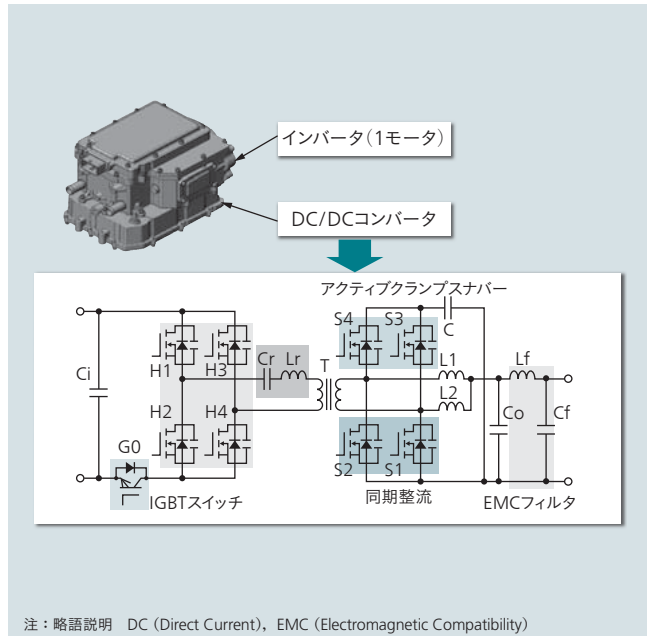
ゲート駆動基板はパワーモジュールの配置に合わせて設計しており、過温度、過電流検知の保護機能を集積化したASICを開発し、部品点数を大幅に削減した。パワー素子の性能を最大限に発揮できるように標準化している。

3.5 モータ制御基板

ハイブリッド自動車用モータは高トルク、高回転の制御が求められるため、埋め込み磁石型同期モータ (IPM-SM: Internal Permanent Magnet Synchronous Motor) が多く採用されている。ベクトル制御を実現するために、標準制御ソフトウェア、標準モータ制御基板を新たに開発した。自動車インバータ向けに基本的に必要な機能として、レゾルバイナタフェース、2系統CAN (Control Area Network)、モータ温度検知、高電圧検知、トルクセキュリティ、故障診断メモリを備えている。自動車電子システムはISO26262で定義された機能安全に対応することが今後必要となるが、日立グループは、インバータとして先駆けて機能安全規格 (ASIL-C: Automotive Safety Integrity Level-C) に対応する設計を実現している。また、デュアルコアCPU (Central Processing Unit) を採用し、機能安全要件を実現するのに必要な監視機能を付与した。

3.6 標準インバータ

これまで述べた高密度化技術を適用した最新インバータの構成を図9に示す。第2世代インバータは、片面直冷モジュールを適用したもので、2モータを駆動できる。第3世代は、両面直冷モジュールを適用し、第1世代に対し、5.6倍の高電力密度、35 kW/Lを達成した。これまでは顧客ごとに最適化したインバータを開発してきたが、第3世代では、車両レイアウト設計の容易化、開発設計期間の短縮をめざし、1モータ用の標準インバータを新たに開発し



注：略語説明 DC (Direct Current), EMC (Electromagnetic Compatibility)

図10 | DCコンバーター一体インバータおよびDCコンバータの主回路構成

インバータと一体化できるDC/DCコンバータを開発した。冷却水路をインバータと共有化することで、小型化を実現している。

た。このインバータは、両面直冷パワーモジュールを適用したことで、容積3.5 Lの小型化を実現し、車両搭載性を大幅に向上することができた。電流定格は300 Armsから400 Armsまでパワーモジュールを換装することで、同じパッケージで対応でき、ハイブリッド自動車から電気自動車までのモータ出力に対応できる。

4. DC/DCコンバータ

HEV, EVでは12 V系発電システムが廃止されるため、強電系 (150 V~450 V) から弱電系 (12 V) に電力を供給するDC/DCコンバータが必要となる。このため、インバータにDC/DCコンバータを一体化し、冷却系統や強電コネクタなどを共用することで、車両搭載上のメリットをめざした日立独自のDC/DCコンバータを開発した (図10参照)。アクティブクランプ回路とIGBTスイッチ方式の開発により、高効率 (最大95%, 定格時92%以上) で、バックおよびブースト双方向動作の3 kW出力DC/DCコンバータを製品化した。

5. おわりに

ここでは、自動車インバータを構成する両面直冷パワーモジュール、標準インバータの構成、加えてインバータに一体化する日立独自のDC/DCコンバータ、および、さらなる高出力に向けたインバータの取り組みについて述べた。

自動車インバータの進化はパワーデバイスの進化とパワーモジュール実装を基本として今後も継続していく。日立グループは、インバータのロードマップに示すように

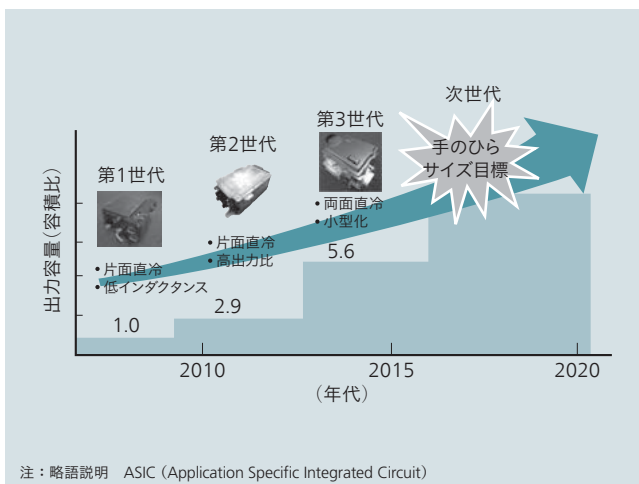


図11 | インバータの今後の展開

第1世代から第3世代と小型で高出力なインバータを継続して開発してきた。今後、さらに高出力化を進め、次世代では“手のひらサイズ”の超小型インバータをめざす。

小型化，高出力化を進め，次世代では「手のひらサイズ」のインバータをめざしていく（図11参照）。自動車インバータの将来は，シリコンカーバイド（SiC）に代表されるワイドバンドギャップ半導体によって技術革新が起こり，電動システムのシステムコストダウンの達成に向けて，さらなる統合化が行われると考えられる。

参考文献

- 1) 浜田，外：低燃費で地球に優しく力強いHEVシステムの開発，日立評論，86，5，343～346（2004.5）
- 2) 吉原，外：ハイブリッド電気自動車用パワートレインの電動化技術開発，日立評論，91，10，768～771（2009.10）
- 3) 井出，外：グリーンモビリティを支えるパワーエレクトロニクスコンポーネント技術，日立評論，93，5-6，412～415（2011.5-6）
- 4) 中津，外：電気自動車，ハイブリッド自動車用インバータに搭載されるパワーモジュールの床面積を半減する技術を開発，日立評論，94，1，129，（2012.1）
- 5) 中津，外：環境対応自動車を支える次世代インバータ技術，日立評論，94，4，330～333（2012.4）
- 6) R. Saito, et al. : High power density inverter technology for automotive applications, Ingénieurs de l'Automobile, No. 825, (2013)

執筆者紹介



木村 隆志

2009年日立オートモティブシステムズ株式会社入社，パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 インバータ設計部 所属
現在，自動車用インバータの開発設計に従事
自動車技術会会員



齋藤 隆一

1981年日立製作所入社，日立オートモティブシステムズ株式会社パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 インバータ設計部 所属
現在，自動車用インバータ開発に従事
電気学会会員，自動車技術会会員



久保 謙二

1979年日立製作所入社，日立オートモティブシステムズ株式会社パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 インバータ設計部 所属
現在，車載パワーエレクトロニクス機器，DC/DCコンバータの設計に従事
電気学会会員，自動車技術会会員



中津 欣也

1994年日立製作所入社，日立研究所 情報制御研究センター パワーエレクトロニクスシステム研究部 所属
現在，車載インバータ，産業用インバータ，パワーモジュールの研究開発に従事
電気学会会員，自動車技術会会員，IEEE会員，電子情報通信学会会員



石川 秀明

1980年日立製作所入社，日立オートモティブシステムズ株式会社パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 インバータ設計部 所属
現在，車載用インバータ，DC/DCコンバータの設計・開発に従事
自動車技術会会員



佐々木 要

1997年日立製作所入社，日立オートモティブシステムズ株式会社パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 インバータ設計部 所属
現在，EV/HEV向けインバータの開発，設計に従事
日本機械学会会員，自動車技術会会員