

SPORT HYBRID i-MMD システム用のモータと PCU の開発

Development of Motor and PCU for a SPORT HYBRID i-MMD System

黒 木 次 郎*
Jiro KUROKI

大 塚 浩*
Hiroshi OTSUKA

要 旨

地球温暖化対策やエネルギー問題への対応と運転する喜びを両立するため、高効率な SPORT HYBRID Intelligent Multi-Mode Drive システムを開発した。開発したパワートレインは、エンジン、モータとジェネレータを内蔵した電気式 CVT、Power Control Unit、Integrated Power Unit で構成される。搭載されたモータはリラクタンストルクの活用と高電圧化により高トルク化、高出力化および高効率化をおこなった。Power Control Unit は放熱性能向上による小型・高出力化と低損失チップによる高効率化をおこなった。その結果、モータは最大トルク 307 Nm と最大出力 124 kW を実現し、Power Control Unit は 700 V 昇圧とトータル出力 400 kVA を達成した。最高効率 は Power Control Unit とモータを含め 96 % を実現した。

ABSTRACT

A highly efficient SPORT HYBRID Intelligent Multi-Mode Drive system was developed in order to achieve a balance between the joy of driving and measures to address climate change and energy issues. The developed power train is composed of the engine, an electric coupled CVT with a built-in motor and generator, a Power Control Unit, and an Integrated Power Unit. The built-in motor was given higher torque, higher output, and higher efficiency by using reluctance torque and raising the voltage. The Power Control Unit was made more compact and power was increased by enhancing the unit's heat dissipation performance, and it was made more efficient by using a low-loss chip. As a result, the motor achieves maximum torque of 307 Nm and maximum output of 124 kW, while the Power Control Unit achieves a voltage increase of 700 V and total output of 400 kVA. The Power Control Unit including the motor achieved a maximum efficiency of 96%.

1. ま え が き

地球温暖化やエネルギー問題に対応するため、エミッションの少ない燃料消費率に優れた自動車が求められている。Honda はこれらの期待に応えるため、INSIGHT、CR-Z、FREED HYBRID、FIT HYBRID などに搭載されている Integrated Motor Assist (IMA) システム⁽¹⁾を開発し、低燃費化を図ってきた。

さらに、究極のゼロエミッション車として燃料電池電気自動車⁽²⁾やバッテリー EV を開発してきた。燃料電池電気自動車は水素を燃料とし、空気中の酸素と反応させ発電して駆動し、バッテリー EV は電池に充電された電気をうい駆動する。走行時エミッションを出さないメリットがあるが、バッテリー EV においては、Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV) に比べ航続距離が制限される課題がある。また、水素ステーションや充電施設が少ない現状があり、

インフラが整備されるまで普及が限定されている。

これらの課題を解決するため、2014 年モデル Accord においてプラグインハイブリッド車を開発した。家庭用電源等からバッテリーを充電し、通勤や買物など日常的な近距離であれば EV 走行可能である。バッテリー残容量が少なくなると、ガソリンのエネルギーを使ってハイブリッドモードで走行できるため、航続距離がバッテリー容量に制限されることがない。

今回開発の車両には、新規に開発した電気伝達比率の高い SPORT HYBRID Intelligent Multi-Mode Drive (SPORT HYBRID i-MMD) システム⁽³⁾を搭載した。モータ、Power Control Unit (PCU) の高性能、高効率化により、高い動力性能と燃費 115 MPGe (Charge Depleting mode: CD)、46 mpg (Charge Sustaining mode: CS) と 13 mile の EV Range を達成した。本稿では新規開発したモータ、PCU の技術について述べる。

*四輪 R&D センター

2. SPORT HYBRID i-MMD システム

SPORT HYBRID i-MMD システムのパワートレインを Fig. 1 に示す。モータとジェネレータを電気式 CVT のケースに内蔵し、その上部に PCU を配置している。エンジンは HEV 用に開発した 2.0 L アトキンソンサイクルエンジンである。

Fig. 2 に SPORT HYBRID i-MMD システムの三つの走行モードを示す。三つの走行モードにはバッテリーのエネルギーを用いモータで駆動する EV ドライブモード、エンジンの機械エネルギーを電気エネルギーに変換しモータで駆動するハイブリッドドライブモード、エンジンで駆動するエンジンドライブモードがある。

Fig. 3 に電気式 CVT の断面図と各モードでの伝達経路を示す。モータトルクはギヤを介し足軸に伝わる。EV ドライブモードでは、モータで車両を駆動し、エンジンとジェネレータは停止している。ハイブリッドドライブモードでは、エンジンのトルクをジェネレータに伝え電気エネルギーに変換し、そのエネルギーを用いモータで駆動する。エンジンドライブモードでは、電気式 CVT に内蔵されたオーバードライブクラッチを締結してエンジントルクを足軸に伝える。

低負荷での発進時は EV ドライブモード、高負荷時や加速時はハイブリッドドライブモード、高速クルーズ時はエ

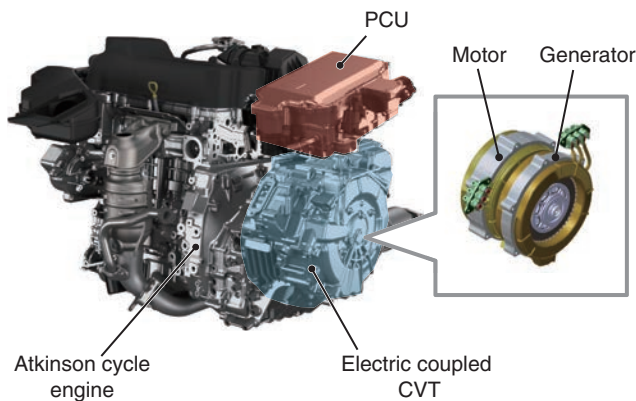


Fig. 1 Hybrid power train

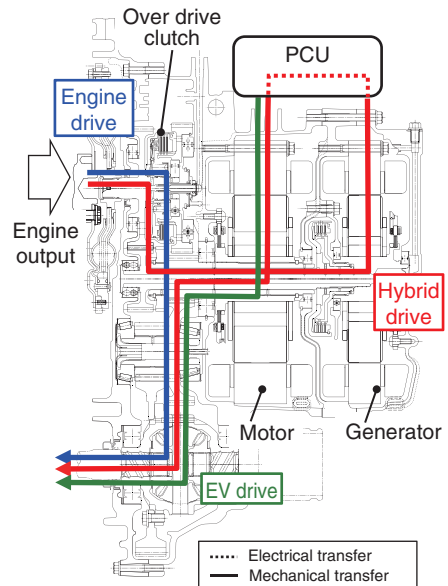


Fig. 3 Section of electric coupled CVT

ンジンドライブモードが使われ、それぞれの運転状態で燃料消費が最小になるようにモードが選択される。このシステムでは、モータが車両の駆動と回生をおこない、PCU が電力変換と電圧制御をしている。

3. モータ

SPORT HYBRID i-MMD システムでは、車両の全駆動領域をモータで駆動することが要求される。車両の加速性能と最高速度はモータのトルク、出力特性と最高回転数に依存し、モータ効率は燃費への影響が大きい。このため、高トルク、高出力かつ高効率なモータが求められる。また、モータ最高回転数が高くなるとロータ強度が課題となるため応力低減対策が必要となる。さらに、モータ高出力化に伴い、モータ発熱は大きくなるため、安定的に駆動力を確保するための冷却システムが必要となる。車両の目標性能である燃費 115 MPGe(CD) と高い動力性能を達成するため、モータは Table 1 に示す性能を目標値として開発した。

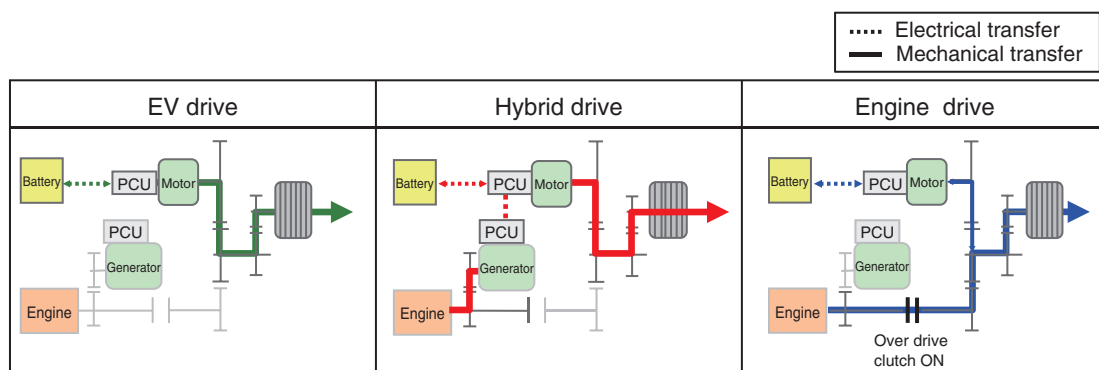


Fig. 2 Operation modes

Table 1 Target performance of motor

Max. torque	307 Nm
Max. power	124 kW
Max. speed	12584 rpm
Max. motor and PCU efficiency	96%

3.1. モータの高効率化

Fig. 4 にモータのトルク特性と従来モータの高効率範囲と通常走行時の動作領域を示す。モータの使い方として、市街地走行時は低負荷領域の動作頻度が高い。また、高速クルーズ時はエンジンドライブモードとなり、モータはゼロトルク付近で運転される。一方、従来のモータは、高効率領域が高出力範囲に存在し、モータの高効率領域を有効に使えていない。

通常走行時の効率を向上するため、低負荷領域の効率向上を目指した。モータの損失はコイルで発生する銅損と電磁鋼板で発生する鉄損に分けられるが、低負荷領域の損失は鉄損の割合が多い。低負荷領域の効率向上には、鉄損を低減することが必要である。低負荷領域の鉄損低減のため、電磁鋼板の重量を低減することと、磁石磁束を低減することが有効であり、これらを実現するため、リラクタンストルクの活用と高電圧化を実施した。

3.2. リラクタンストルクの活用

リラクタンストルクとはロータの磁気的な突極性を利用するトルクである⁽⁴⁾。一般的に、鉄は磁束が通りやすく、空気や磁石は磁束が通りにくい。磁束の通りやすさの差が大きくなると磁気的な吸引力が大きくなる。この力を活用することができれば、磁石トルクを増加させずモータトルクを向上することができ、小型化による電磁鋼板重量低減と磁石磁束低減によって鉄損低減を実現することができる。

開発したモータの形式は、埋込磁石同期モータとし、ステータは分布巻を採用した。モータの断面図を Fig. 5 に示す。リラクタンストルク効果を最大化するため、磁石は V 字配置としている。V 字の角度 α が小さくなるとトルクが増加する。しかしながら、モータ音の原因となるトルク

リップルも増加してしまう。角度 α はモータトルクとトルクリップルの観点から決定した。Fig. 6 に電流位相に対するトルクを示す。電流位相とはロータ位置に対して交流電流を流すタイミングを示し、電流位相 0 deg の時に磁石トルクが最大となる。開発したモータは電流位相 55 deg で最大トルクとなる。磁石トルクに対し最大トルクは 82% 高く、リラクタンストルク比率が高い磁気回路を実現した。

3.3. 高電圧化

モータは高回転になると弱め界磁電流⁽⁴⁾を流すことと、コイルのインダクタンス成分により一定電圧下では発生出力が制限される。鉄損低減のため、最大電流通電時に電磁鋼板の磁束密度が飽和する領域までコイル巻数を増やし、トルクを向上させ電磁鋼板重量を低減しているが、インダクタンスが増加し、出力が低下する課題がある。この課題を解決するため、高電圧化を実施した。Fig. 7 にモータ電圧とトルク特性を示す。高電圧化は PCU に内蔵された Voltage Control Unit (VCU) によりおこなわれている。印加電圧 700 V にすることで 300 V 時と比較し、50% 以上の高出力化を実現し、モータの体格を大きくすることなく、最大出力 124 kW を実現した。

3.4. ロータの高回転化

モータのロータ回転数が高くなると必要とするロータ強度が課題となる。高回転時には磁石に半径方向の遠心力が

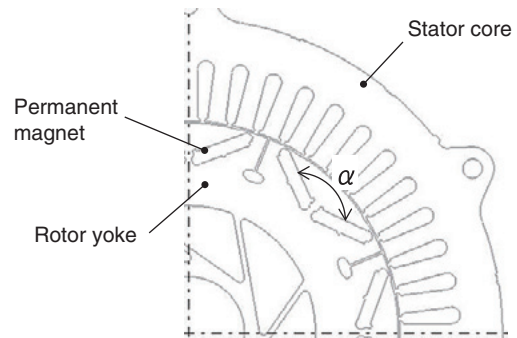


Fig. 5 Profile of motor core

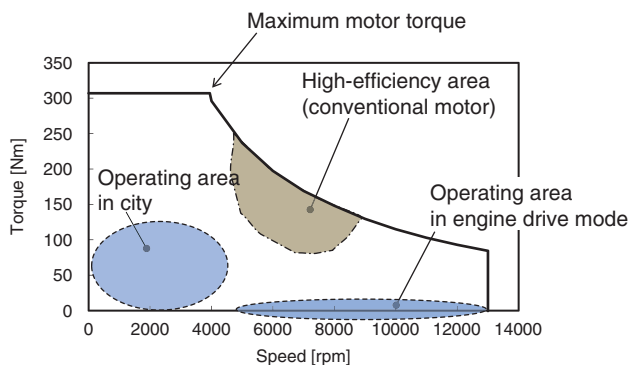


Fig. 4 Motor torque characteristics and operating area

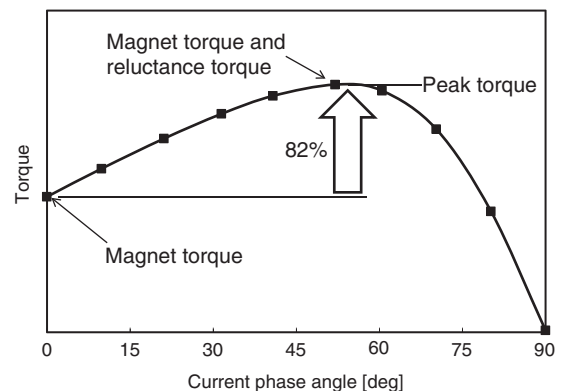


Fig. 6 Torque at different current phase angles

増加する。それにより、V字磁石中央のセンタリブと両端のサイドリブに高い応力が発生する。応力低減には各リブの幅を増加させることが有効だが、トルクに無効となる磁石からの漏れ磁束が多くなり、モータトルクが低減する。

この課題を解決するため、ロータヨークにスリット構造を設けた。ロータ回転時の応力解析結果を Fig. 8 に示す。スリット構造を設けスリット周辺を低剛性にすることで磁石外側のサイドリブに集中する応力を 53% 低減させ、サイドリブ幅を厚くすることなく高回転化を実現した。

3.5. モータ冷却システム

モータを安定的に運転するため油冷方式の冷却システムを構築した。Fig. 9 に冷却システムを、Fig. 10 にモータ冷却構造を示す。電気式 CVT 内の機械損失やモータで発生した銅損や鉄損による熱は Automatic Transmission Fluid (ATF) を冷媒とし、ATF クーラまで運ばれ放熱される。モータは、コイル上部に配置されたパイプから ATF を滴下し冷却される。この冷却システムを構築することで安定的にモータを駆動することが可能となった。

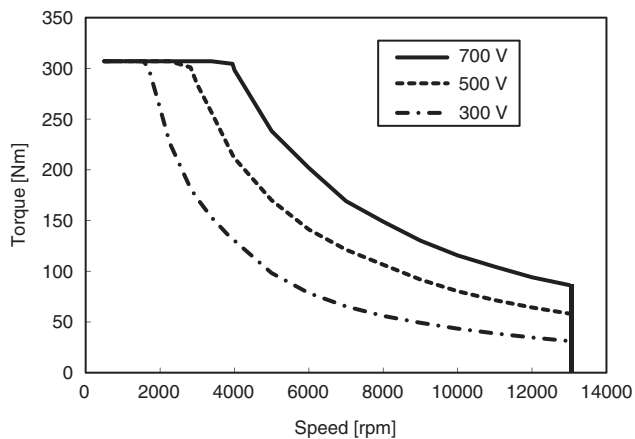


Fig. 7 Motor voltage and torque characteristics

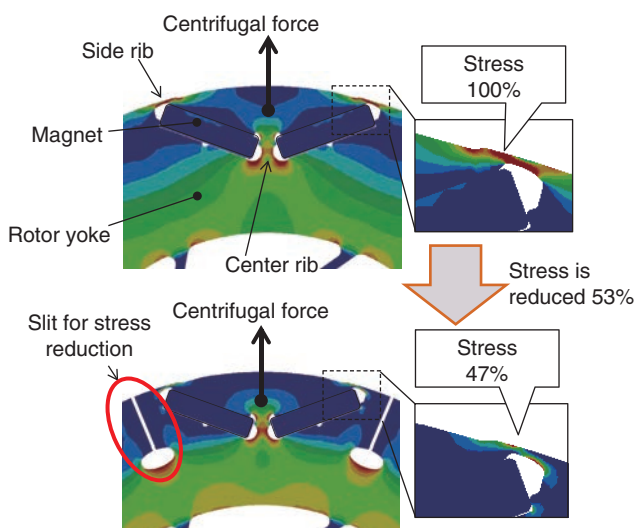


Fig. 8 Comparison of simulated stress distribution

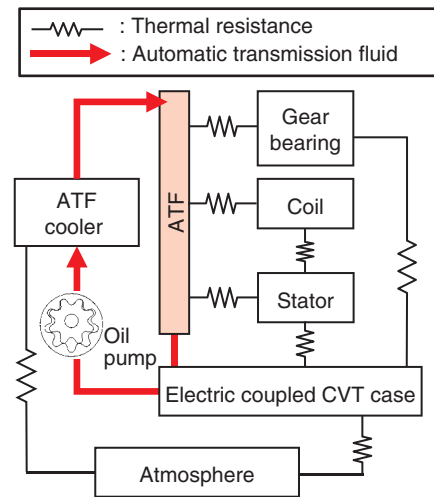


Fig. 9 Cooling system

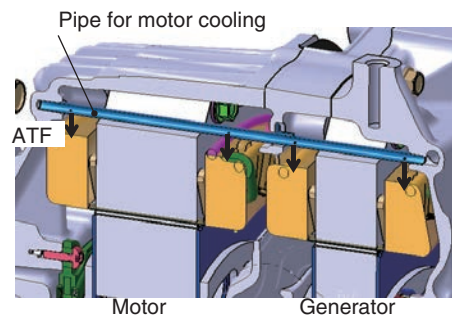


Fig. 10 Structure of motor cooling system

4. PCU

PCU はバッテリーとモータおよびジェネレータの電力変換の機能を担い、モータ出力および燃費に影響する。また、PCU サイズと搭載位置はキャビンスペースに影響し、従来のガソリン車同等のキャビンスペースを確保するには、車両電装用の 12 V バッテリーと共にエンジンルームに搭載する必要がある。車両目標である出力、燃費およびキャビンスペース確保を達成するため、PCU は高出力化、高効率化、小型化が必要となり、Table 2 に示す性能を目標値として開発をした。

4.1. PCU の高出力化と小型化

PCU のブロック構成図を Fig. 11 に、PCU の内部構成図を Fig. 12 に示す。PCU は Intelligent Power Module (IPM)、モータおよびジェネレータ制御用 ECU、コンデンサ、リアクトル、電流センサ等により構成される。IPM はスイッチングにより電流変換をおこなう Power Module (P/M)、スイッチング制御用 Gate Driver (G/D)、VCU 制御用 ECU から構成される。モータ、ジェネレータ、VCU 用の P/M、G/D、VCU ECU を一体パッケージとすること

Table 2 Target performance of PCU

PCU total max. output	400 kVA
System voltage	700 V
Max. motor and PCU efficiency	96%
PCU volume	11.5 L

により部品の共用化, 小型化を実現した. コンデンサにおいても, モータ, ジェネレータ, VCU 用 2 次側平滑コンデンサの機能統合および VCU 用 1 次側平滑コンデンサ, ノイズフィルタを一体パッケージとすることにより小型化した. また, IPM の放熱性向上, DC および 3 相部に大電流対応高圧コネクタを採用することで高出力化対応をおこなった.

4.2. IPM 高出力化, 小型化

IPM の内部構成図を Fig. 13 に示す. IPM はモータ, ジェネレータ, VCU 用 P/M, G/D, VCU ECU, ヒートシンク

等から構成される. P/M に印加する電圧や電流を大きくすると, P/M 内チップ発熱が増加していくため, チップ枚数を増やす必要があるが, PCU 容積も増加してしまう. 高出力化と PCU 容積目標を実現するため, P/M の放熱性を向上し, チップ温度および枚数を低減している.

P/M の基板構造を Fig. 14 に示す. 従来の基板構造は絶縁基板と放熱板をハンダにて接合し, ヒートシンクに対し, サーマルコンパウンドを介して接続されている. 採用した放熱構造は, 放熱板およびサーマルコンパウンドを廃止し, 絶縁基板を直接ハンダにてヒートシンクに接合する直接冷却型 P/M である. 直接冷却構造の場合, 絶縁基板とヒートシンクの線膨張差によるハンダ応力が従来構造に対し大きくなるが, 高強度の鉛フリーハンダを採用することにより従来構造同等の耐久性を確保している. 直接冷却構造を採用することにより, 放熱性能を 24% 向上することができ, Fig. 15 に示すようにチップ枚数を低減し, 小型化を実現している.

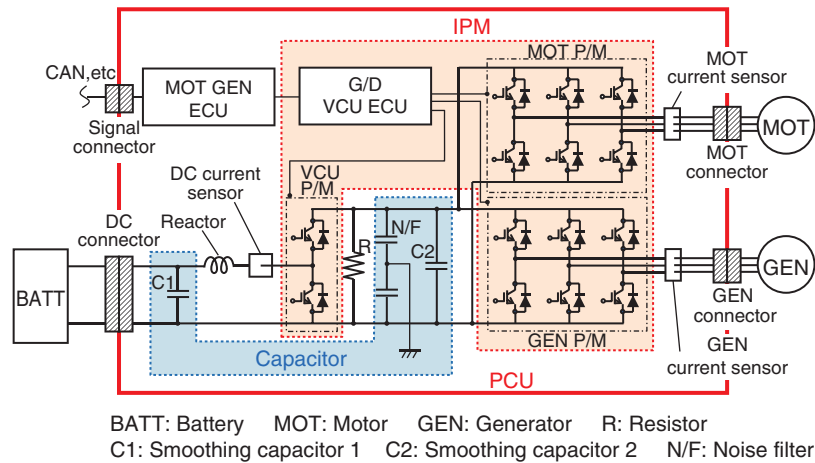


Fig. 11 Block diagram of PCU

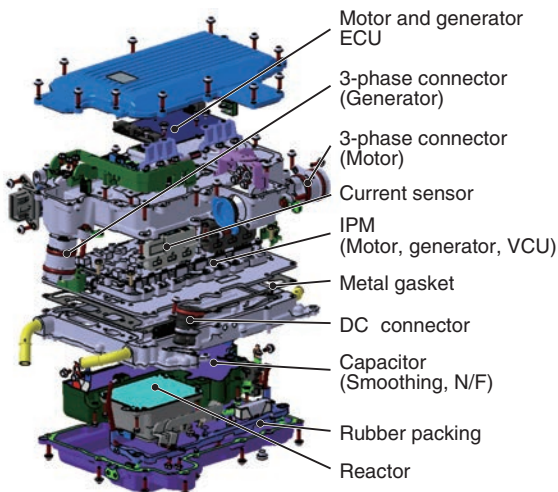


Fig. 12 Configuration of PCU

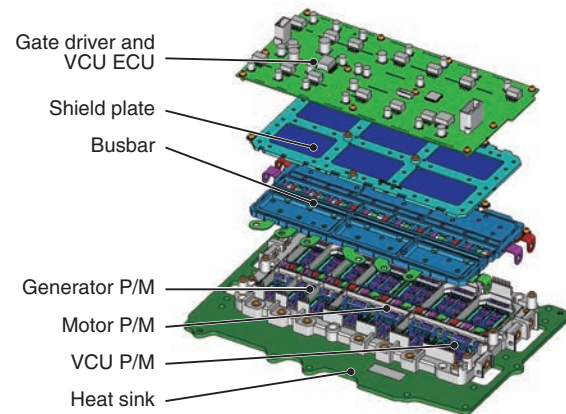


Fig. 13 Configuration of IPM

4.3. 大電流対応高圧コネクタ

PCUに接続されるDCおよび3相コネクタの内部端子構造をFig. 16に示す。従来端子構造はオス端子をメス側接点へ単一方向で押さえて接触面積を確保していたが、オス端子を円柱化して、円弧形状の断面を持つメス側接点を中心方向へ押さえることで接点数(接触面積)を増加させた。これにより、接触抵抗を半減することができ、電流増加による高出力化の対応およびPCUのエンジンルーム搭載可能な小型化を実現している。従来比で、1 Aあたりの重量、容積を30%低減させたまま、許容電流は2倍となっている。

4.4. IPM 高効率化

IPMのスイッチング素子として、高電力高速スイッチングが可能なInsulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)を採用している。PCU効率におけるIGBT性能の影響は大きく、本システムにおけるIPMではIGBTの損失低減をおこなっている。採用したIGBTでは表面構造のPベース配置の局在化およびゲート配置の変更をおこなっている(Fig. 17)。この構造はキャリア蓄積効果を損なうことなく、ターンオン di/dt 制御性の改善、低抵抗 N^- ドリフト層の適用が可能となり、ターンオフ時の振動を抑制しつつ、素子厚み9%低減、損失特性20%改善を実現している⁽⁵⁾。

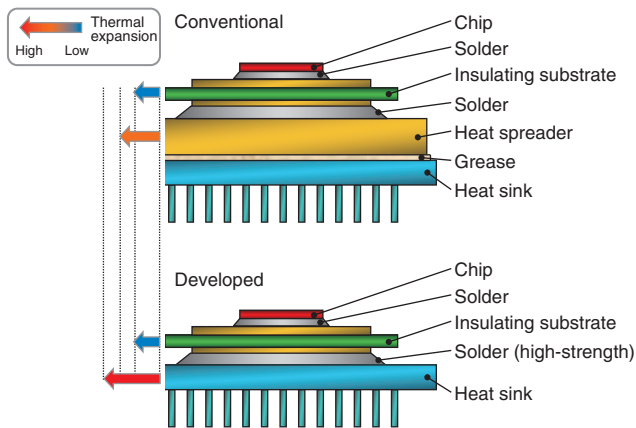


Fig. 14 Structure of P/M substrate

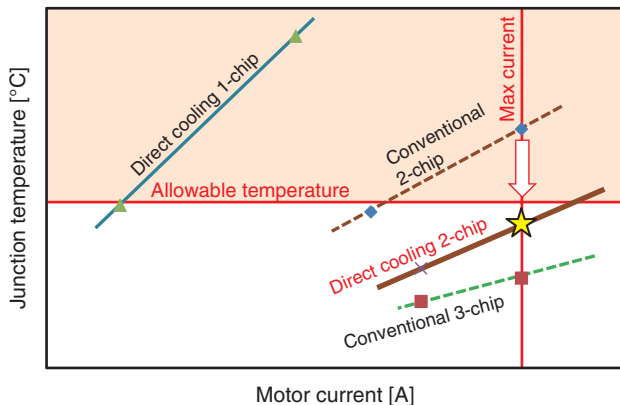


Fig. 15 Comparison of P/M substrate characteristics

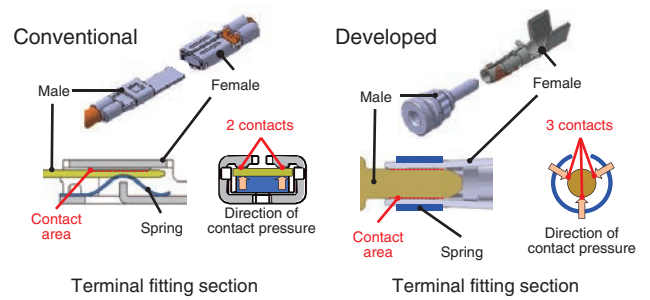


Fig. 16 Structure of high-voltage connector

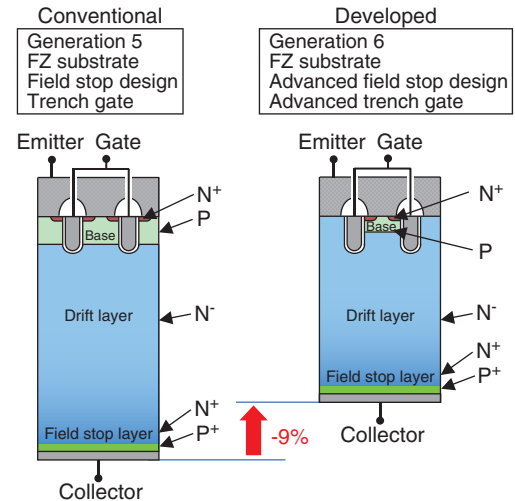


Fig. 17 Structure of IGBT

5. 性能

Fig. 18に達成したモータ性能とPCUを含むモータ効率を示す。最大出力400 kVAと700 V昇圧を実現したPCUを用い、モータは最大トルク307 Nm、最大出力124 kW、最高回転数12584 rpmを達成した。最高効率はモータとPCUを含め96%を達成した。さらに、高効率領域が拡大するように電圧を制御することで、低負荷領域の広い領域まで高効率領域を拡大でき、通常走行領域の効率向上を実現した。

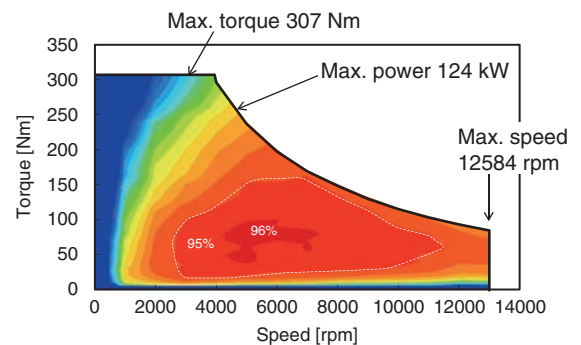


Fig. 18 Motor performance and efficiency with PCU

6. まとめ

地球温暖化対策、エネルギー問題への対応と運転する喜びを両立するため、モータ、PCU の開発をおこない、下記項目を達成した。

- (1) リラクタンストルク活用、高電圧化によるモータの高トルク化、高出力化と高効率化
- (2) ロータスリット構造応力低減によるロータの高回転化
- (3) 油冷システムによる安定的なモータ駆動の実現
- (4) VCU 搭載によるシステム電圧 700 V 化、IPM の放熱性向上、大電流対応高压コネクタによる PCU の高出力化
- (5) IPM の放熱性向上、同一機能部品一体化による PCU の小型化
- (6) 低損失 IGBT 採用による IPM の高効率化と小型化

以上の技術を採用し、モータは最高トルク 307 Nm, 最大出力 124 kW, 最高回転数 12584 rpm を達成し、PCU は出力 400 kVA, 容積 11.5 L を達成し、モータと PCU を含めた効率は 96% を実現した。

参考文献

- (1) 堀江達郎, 岸勉, 長谷川修: 新型 CIVIC Hybrid IMA システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.16-21
- (2) 松永稔, 福嶋達也, 尾島邦明, 木村顕一郎, 小川隆行: FCX クラリティ用燃料電池パワートレイン, Honda R&D Technical Review, Vol.21, No.1, p.7-14
- (3) 井手博仁, 須永義弘, 樋口成智: 2014 年モデル Accord 用 SPORT HYBRID i-MMD 制御システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.25, No.2, p.32-40
- (4) 森本茂雄, 上野智広, 武田洋次: 埋込磁石構造 PM モータの広範囲可変速制御, 電気学会論文誌 .D, Vol.114, No.6, p.668-673(1994)
- (5) Onozawa, Y., Nakano, H., Otsuki, M., Yoshikawa, K., Miyasaka, T., Seki, T.: Development of the next generation 1200V trench-gate FS-IGBT featuring lower EMI noise and lowerswitching loss, in Proc. 19th ISPSD, p.13-16(2007)

■ 著 者 ■



黒木次郎



大塚 浩