

2020 年モデル FIT 用 小型パワーコントロールユニット

Small Size Power Control Unit for 2020 Model Year FIT

西 尾 仁 志¹

Hitoshi NISHIO

野 中 賢 一³

Kenichi NONAKA

近 藤 康 彦²

Yasuhiko KONDO

樫 村 之 哉³

Yukiya KASHIMURA

上 野 雄 一 郎²

Yuichiro UENO

武 林 賢 一³

Kenichi TAKEBAYASHI

要 旨

Honda では 2020 年モデル FIT 用に第 3 世代小型車向けパワーコントロールユニット開発をおこなった。

小型化に対してはパワーコントロールユニットの主要構成部品であるパワーモジュールに使用されるパワー半導体に RC-IGBT を採用し前後方向長さを 12% 削減した。第 2 世代では制御基板であるモータ ECU と駆動回路基板であるゲートドライバに分割されていた制御基板を統合し、それにより各基板間を接続するハーネスを削減し小型化をおこなった。キャパシタに関しては Voltage control unit 制御の電流追従性を向上させることで容量を 50% 低減した。これら技術を投入したことにより、PCU 内部に 12 V DC-DC コンバータを内蔵したうえで、容積 8.5 L を達成し、小型車両への搭載可能な最大出力 267 kVA の PCU を開発することができた。

ABSTRACT

Honda has developed a third-generation power control unit for compact cars for the 2020 model year FIT.

Downsizing was achieved by employing RC-IGBTs in the power semiconductors used in the power module, which is the main component of the power control unit. This reduced the longitudinal length by 12%. The control boards that were divided into a motor ECU (control board) and a gate driver (drive circuit board) in the second-generation unit were integrated to reduce the wire harnesses that connect each board, achieving further downsizing. The capacitance of the capacitor was reduced by 50% by enhancing the current followability of voltage control unit control. The application of these technologies realized development of a PCU with output power up to 267 kVA that achieves a volume of 8.5 L even with the 12 V DC-DC converter incorporated into the PCU, which enables mounting in a compact car.

1. まえがき

近年、自動車の普及拡大に伴う課題は、走行中の CO₂ 排出による地球温暖化および大気汚染である。

これらの課題に対する解決手法の一つとして排ガスを低減するための自動車の電動化が挙げられる。Honda は 2 モータハイブリッドシステムである SPORT HYBRID Intelligent Multi-Mode Drive (以下、i-MMD) システムを 2013 年に開発した⁽¹⁾。i-MMD システムは主として高電

圧バッテリーより電力を供給しモータで走行する EV ドライブモード、エンジンを発電機としてモータに電力を供給してモータで走行するハイブリッドドライブモード、エンジンドライブモードの三つの走行モードを実現している。パワートレインは、エンジン、トラクションモータとジェネレータモータを内蔵した電気式 Continuously Variable Transmission (CVT)、パワーコントロールユニット (Power Control Unit: PCU)、インテリジェントパワーユニット (Intelligent Power Unit: IPU) で構成されている。

¹ 先進パワーユニット・エネルギー研究所

² 本田技研工業株式会社

³ 株式会社ケーヒン

PCU は高電圧バッテリーとトラクションモータおよびジェネレータモータの電力変換機能を担っており、モータ出力および燃費に影響する。車両搭載位置は第1世代2モータハイブリッド (GEN1) 用 PCU ではエンジンルーム内の車体に固定されたフレームにマウントされていた。

2016 年には、エンジンルーム内への搭載性向上および高出力密度化に対応した第2世代2モータハイブリッド (GEN2) 用 PCU を開発した⁽²⁾。GEN2 PCU ではトランスミッション直上に搭載され、エンジンルーム内にコンパクトに搭載されている。これにより多様な車両に対して 12 V バッテリーをエンジンルーム内に搭載することが可能となった。これはキャビンスペースの拡大に貢献している。

2018 年には、第3世代2モータハイブリッド (GEN3) 用 PCU として GEN2 PCU では車両後方に搭載されている IPU に内蔵されていた 12 V DC-DC コンバータをエンジンルームに搭載される PCU に内蔵した GEN3 PCU⁽³⁾ を開発した。

従来 Honda の i-MMD システムを搭載している車両は、セダンや SUV など中大型向けの車両が対象であった。Honda では電動化のさらなる拡大を目指し、FIT を代表とした小型車両への搭載を目標とし開発をおこなった (Fig. 1)。さらに小型車に対し、人が使う空間を最大限に広げるという Honda 独自のマンマキシマム・メカミニマム思想のもと車両の開発目標を設定し、GEN2 では車両後方に搭載されている IPU に内蔵されていた 12 V DC-DC コンバータをエンジンルームに搭載される PCU に内蔵した。小型車両では Fig. 2 に示すようにエンジンルーム内の搭載可能容積が小さく GEN2 システムのままでは搭載ができなかった。

そのため、サイズを低減した小型車向け第3世代2モータハイブリッド (GEN3S) 用 PCU が必要であった⁽⁴⁾。

12 V DC-DC コンバータを内蔵しつつ前後方向長さで 10% の削減、搭載容積 8.6 L を目指した構成を開発目標とした。

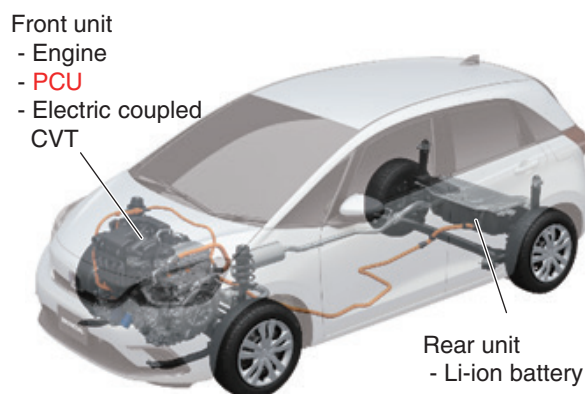


Fig. 1 Position of PCU in SPORT HYBRID i-MMD

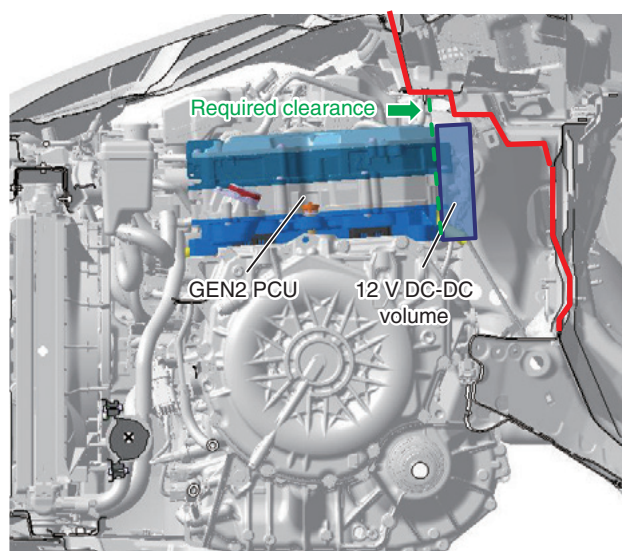


Fig. 2 Layout of PCU in SPORT HYBRID i-MMD

2. FIT 用小型 PCU の紹介

PCU の構成部品を Fig. 3 に示す。

GEN3S PCU の構成は、モータを駆動する二つのインバータおよび最適な電圧に制御する VCU、それらを統合制御する制御基板 (ECU) で構成されている IPM (Intelligent Power Module) を主要部品としている。IPM はトラクションモータ、ジェネレータモータ、VCU 用のパワー半導体をウォータージャケット上一面に配置しその直上に制御基板を配置する構成とした。これに加えて、電圧を平滑化するキャパシタ、昇圧回路部品であるインダクタ、通電電流を検出する電流センサを備える。側面にはトランスミッションに内蔵されるモータと直接接続するための 3 相コネクタを備えている。また前述した、12 V DC-DC コンバータを PCU に内蔵した。

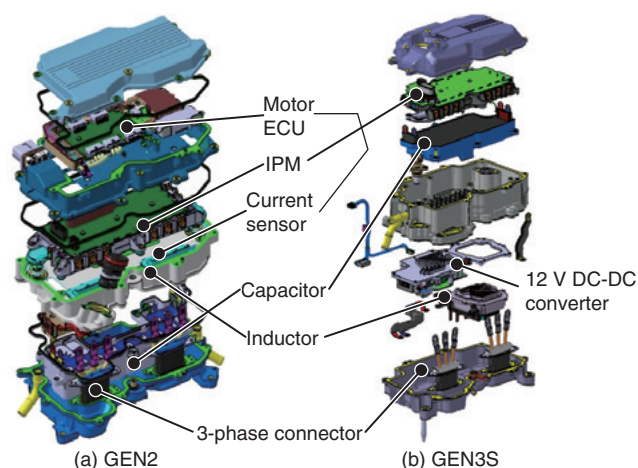


Fig. 3 Exploded view of GEN2 and GEN3S PCUs

Table 1 Comparison of GEN2 and GEN3S specifications

Item	GEN2	GEN3S
Maximum total output power [kVA]	388	267
Maximum boost voltage [V]	700	570
Motor maximum output current [Arms]	320	270
Generator maximum output current [Arms]	155	155
DC-DC converter output voltage [V]	-	12
DC-DC converter maximum output current [Arms]	-	140
Volume [L]	8.9	8.5
Weight [kg]	14.3	13.4

小型車両への搭載を目標としているため、車両に搭載可能な空間は従来に対して狭くなっている。また、Table 1に示す通り求められる出力は GEN2 と比較して小さくなっている。

内部部品を求められる仕様にあわせてサイズダウンをおこなうことは可能であるが、前述する 12 V DC-DC コンバータを新たに内蔵するにはさらなる小型化が各部品に求められることとなる。そのため、PCU に内蔵される部品の増加に対して構成部品を統合することで部品点数の削減をおこなっている。その結果、GEN2 に対して 12% の前後方向の寸法低減、12 V DC-DC コンバータを内蔵しながらも GEN2 比で 4.4% の容積低減し、目標を達成した (Fig. 4)。

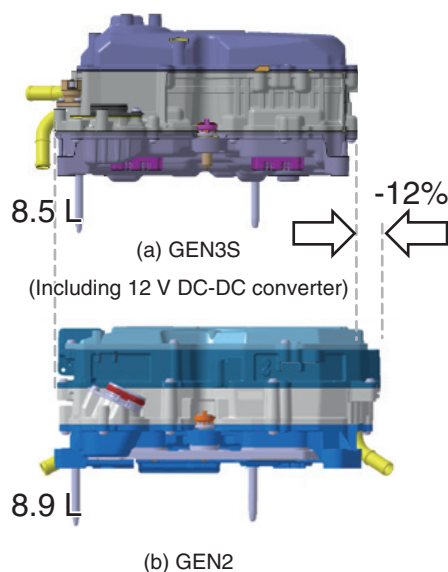


Fig. 4 Comparison of GEN2 and GEN3S sizes

3. 主要技術

PCU 構成部品として占有率の高い部品は、パワーモジュール (PM)、キャパシタ、制御基板と各信号を伝達するためのハーネスが挙げられる。

PM は半導体を平面配置しているため、回路を構成するきょう体を含め PCU の前後方向長さを決めている。また、キャパシタは GEN2 では PCU 下層部の容積の大部分を占めており、12 V DC-DC コンバータを内蔵するため容積の低減をおこなった。

さらに GEN2 では制御基板が分割されていたため、接続ハーネスを含め、これらの要素を低減または部品の統合をおこなうことで PCU の小型化をおこなった。

主な開発技術は以下の 3 点となる

- (1) PM に搭載する半導体として Reverse-conducting insulated gate bipolar transistor (RC-IGBT) の採用
- (2) 制御基板の統合
- (3) キャパシタ容量の低減

3.1. パワーモジュールの小型化

以前より、ハイブリッド向けトラクションモータは高出力が求められるため、駆動用スイッチング素子であるシリコンパワー半導体では IGBT とダイオードが使用されていた。これらの半導体を実装した PM のサイズにより PCU の長さが決まるため、GEN3S PCU では RC-IGBT を採用した。

RC-IGBT の構造概要を Fig. 5 に示す。

従来の車両用インバータは IGBT とダイオードが別々に実装されており、半導体の温度を測定する温度センサは IGBT 上にも実装されていた。

本開発の RC-IGBT は、Fig. 5 (b) に示しているように同一半導体内部で IGBT とダイオードの領域が存在しており、IGBT でありながらダイオードとしても動作可能な新しい半導体デバイスとなる。同一半導体内部に IGBT とダイオードの領域を持つことにより従来 IGBT とダイオードそれぞれの半導体で有していた耐圧保持領域 (ガードリング) を共有することで半導体サイズを低減することができた。

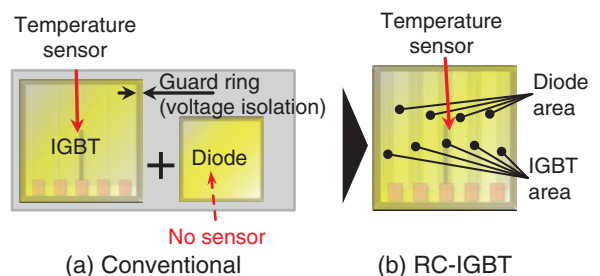


Fig. 5 Comparison of conventional chips and RC-IGBT chip structures

また、従来の構成では IGBT 側には過熱保護用の温度センサを備えているが、ダイオード側には備わっておらず、IGBT 側にある温度センサからの温度推定をおこない過熱保護していた。この手法は半導体温度を温度センサで直接測定する場合に対し推定誤差が大きい。半導体の使用可能上限温度に対し、誤差を考慮して使用温度範囲を限定する必要がある、ダイオードは必要以上のサイズが求められていた。RC-IGBT を採用することで、搭載されている温度センサでダイオード領域まで温度保護が可能になり、ダイオードを必要最小限のサイズへ縮小することができた。

その効果を Fig. 6 で示す。それぞれの半導体で必要だったガードリングを共用することで 33%、ダイオード面積で 64% を削減することで、半導体面積全体として、30% もの小型化を実現している。これにより PM 前後方向の長さを 12% 低減し PCU の小型化に貢献した。

3.2. 制御基板統合による小型化

IPM は、モータ ECU からゲートドライバに指令を送り、それにより VCU やモータおよびジェネレータインバータを駆動する。またそこに制御用の電流センサや電圧センサが接続される。GEN2 PCU ではこれらの部品を搭載する基板は独立しており、ハーネスケーブルによりモータ ECU に接続されていた。外部 ECU との接続はコントロールコネクタを介し PCU と接続されており、PCU 内部ではハーネス接続により基板と接続した。Fig. 7 に従来構造との比較を示す。

GEN3S PCU の開発ではこれらの部品の統合をおこない PCU 容積を低減した。

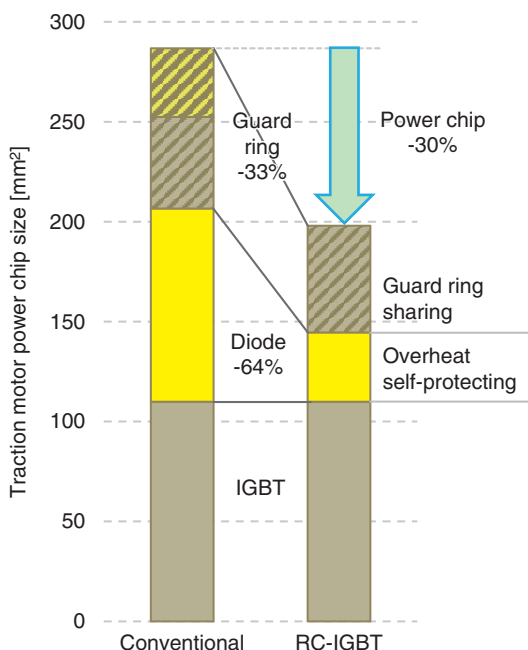


Fig. 6 Comparison of conventional and RC-IGBT semiconductor areas

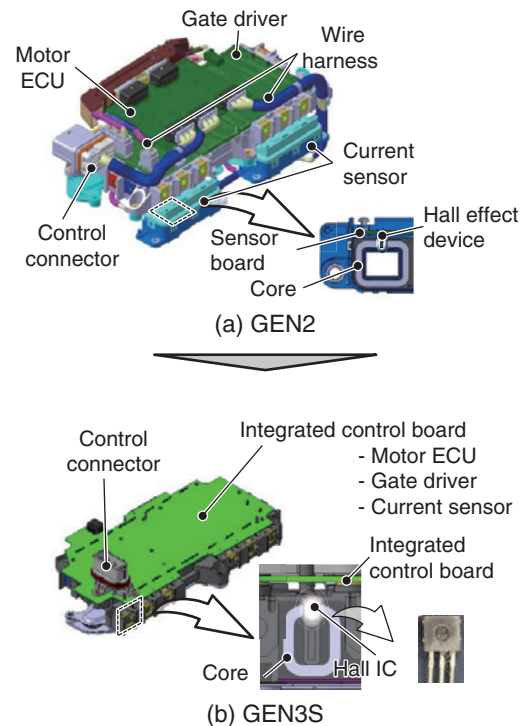


Fig. 7 Comparison of GEN2 and GEN3S circuit structures

外部からの指令を受け取るコネクタは基板上に直接搭載することで接続ハーネスを削減した。コネクタは信号ピンにより統合基板に対して接続される。

モータ ECU とゲートドライバは統合制御基板として一体化をおこなった。この基板は従来のゲートドライバに対し高密度実装技術、電圧センサ回路を 1 パッケージ化するなど回路実装技術の進化により達成した。従来分割されていたモータ ECU とゲートドライバの 2 枚の基板を統合化し PM 上に搭載している。

また従来磁束コアと磁束を計測するホール素子とそれを制御する基板で構成されていた電流センサを、PM ケースに内蔵した磁束コアと統合制御基板に実装されたホール IC を組み合わせることで電流センサの機能を構成している。構造は従来と同様に七個のセンサがあるが、それを一括で組み付ける精度や組み付け後にセンサを補正する技術を開発することで実現した。それにより 50% の高さを低減した (Fig. 8)。

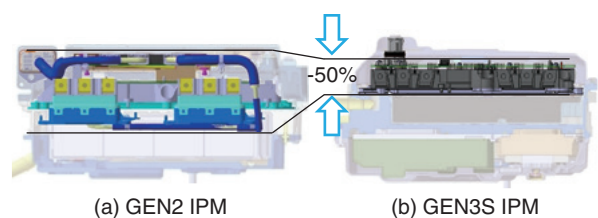


Fig. 8 Comparison of GEN2 and GEN3S IPM structures

3.3. キャパシタ容量低減

キャパシタは GEN2 PCU では全体高さの半分を占めていたが、VCU の制御技術の向上によりキャパシタ容量を 50% 低減した。また、容量低減に伴う熱課題を冷却流路の工夫で解決した。

キャパシタは VCU 電圧源として機能するが、理想的な電源にはならず、インダクタ電流が変動すると内部インピーダンスの影響で電圧が変動する。この電圧変動は制御に影響を及ぼし、さらに電流変動が大きくなる。インダクタ電流変動の増加を防ぐために、電圧変動幅が規定されており、GEN2 PCU では容量の大きなキャパシタを使用して電圧を平滑していた。

VCU の制御は電圧変動の増大に対して電流制御、電圧制御のカスケード制御、および外乱オブザーバ、Duty 推定演算機、Duty 相殺演算機を新規に開発し、これらを用いることにより幅広い周波数領域にわたり電圧共振ゲインを抑制し、負荷電流の AC 成分を低減した。この VCU 制御により、Fig. 9 に示すようにキャパシタ容量を 50% 低減することができた。

一方で、キャパシタ容量を低減すると内部インピーダンスが上昇する。これにより自己発熱量が増加するが、冷却流路の工夫により解決した。キャパシタは発熱量が低いため、水冷ではなく自然放熱部品であり、外部環境からの熱影響を受けやすい。キャパシタ自体の耐熱温度は使用される材料により決まる。そのため、温度上昇要因である、環境により熱せられた温度、および通電により自己発熱する温度の合計を耐熱温度以下とする必要がある。PCU はエンジンルームに搭載されているため環境による温度上昇が大きい。

GEN2 i-MMD から採用しているトランスミッション直載 PCU 構造では Fig. 10 (a) に示すようにキャパシタは、IPM の下側にあり、トランスミッションやエンジンの熱影響を受けやすい構造であった。GEN3S PCU ではこの外部環境の熱影響を低減するためにキャパシタを Fig. 10 (b) に示すように、冷却流路で囲む構造を採用した。

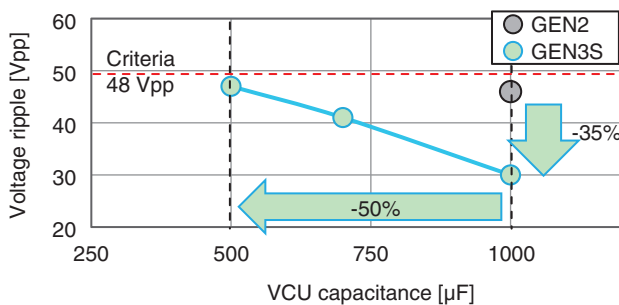


Fig. 9 Comparison of GEN2 and GEN3S VCU capacitance

これに伴い GEN2 では車両前方側から冷却水を入れ PCU 内部を通り車両後方側から排出していた構造に対し、GEN3S は冷却水の出入り口を車両前方側に集約することでエンジンルーム内部の冷却配管を削減することができエンジンルーム占有スペースを削減することにも貢献している。

キャパシタは直接水冷していないが、冷却水路に囲まれていることにより外部から受ける熱影響を防ぐことができる。Fig. 11 に容量削減の概要を示す。

キャパシタの自己発熱は 2 倍以上に増えているものの、外部から受ける熱影響を 46% 低減しているため、最大到達温度として、従来同等以下とすることができた。

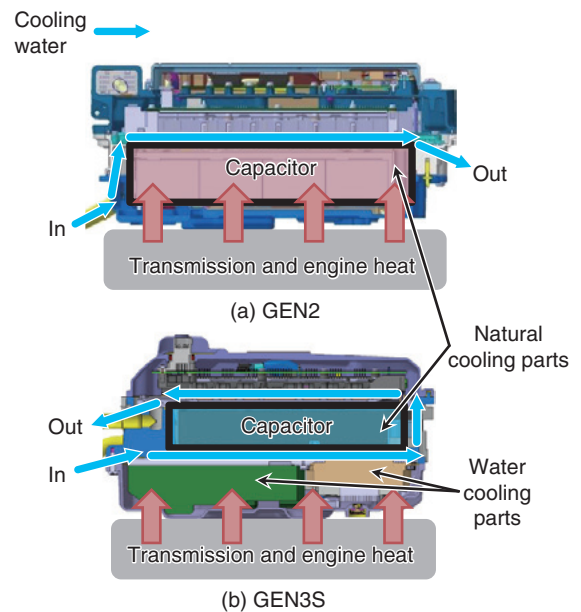


Fig. 10 Difference of capacitor structures

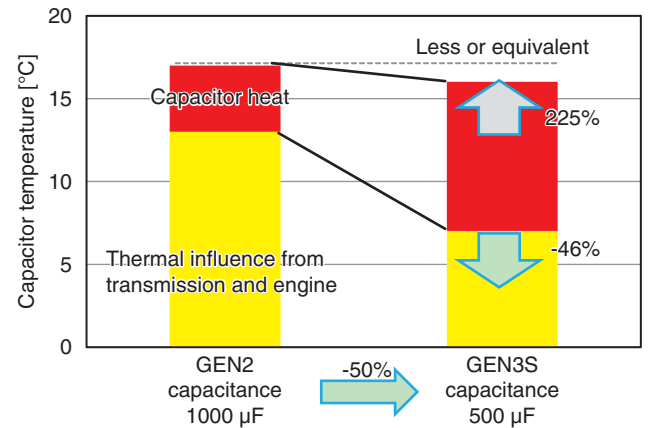


Fig. 11 Comparison of GEN2 and GEN3S capacitor temperatures

4. まとめ

小型車両への i-MMD システムの搭載を目的とした PCU の小型化に対して、以下の技術開発により、目標を達成した。

- (1) パワー半導体に RC-IGBT を採用し、PM 前後方向の長さを 12% 低減した。
- (2) 制御基板、電流センサの統合により IPM の高さを 50% 低減した。
- (3) キャパシタ容量を VCU 制御開発、新規冷却構造の採用で 50% 低減した。

以上により、PCU 内部に 12 V DC-DC コンバータを内蔵したうえで、容積 8.5 L を達成し、小型車両への搭載可能な最大出力 267 kVA の PCU を開発することができた。

参考文献

- (1) 黒木次郎, 大塚浩: SPORT HYBRID i-MMD システム用のモータと PCU の開発, Honda R&D Technical Review, Vol. 25, No. 2, p. 41-47
- (2) Kashimura, Y., Negoro, Y.: Transmission-Mounted Power Control Unit with High Power Density for Two-Motor Hybrid System, SAE Technical Paper, 2016-01-1223, (2016)
- (3) Ozuchi, Y., Tomokage, R.: Transmission-Mounted Power Control Unit Including 12-Volt DC-DC Converter for Two-Motor Hybrid System, SAE Technical Paper, 2018-01-0457, (2018)
- (4) Nonaka, K., Takebayashi, K., Kashimura, Y., Ueno, Y., Kondo, Y.: Development of New Power Control Unit with Small Size and Low Cost for Small Hybrid Vehicle with Two-motor Hybrid System, SAE Technical Paper, 2020-01-0458, (2020)

■ 著 者 ■



西尾 仁志



近 藤 康 彦



上野雄一郎



野 中 賢 一



檜 村 之 哉



武 林 賢 一