

特集 ハイブリッド用パワーコントロールユニットの開発*

Development of Power Control Unit for Hybrid Vehicles

岡本 幸司 瀬高 庸介 石山 弘 稲垣 充晴
 Koji OKAMOTO Yosuke SETAKA Hiroshi ISHIYAMA Mitsuharu INAGAKI

真光 邦明
 Kuniaki MAMITSU

Recently, the hybrid vehicle market spreads rapidly, and the lineup of the hybrid vehicle of carmakers has been prepared ranging from compact vehicles to full-size vehicles widely. The Power Control Unit (PCU) that controls traction motors of hybrid vehicles is required both to be smaller in size in order to facilitate installation in vehicles, and to have higher power output. To achieve both of these targets, we developed a PCU for full-size vehicles with higher power output per volume through a significantly improved cooling design for semiconductor chips by dissipating heat from both sides of chips. We developed PCU united with DC-DC converter for medium-sized cars for the purpose of further development.

Key words : Hybrid vehicles, Power Control Unit, Inverter, IGBT, Double-sided cooling power module, Stacked cooler

1. はじめに

トヨタ自動車は、2003年のプリウス以降のハイブリッド車（以下、HV）にTHS-II（Toyota Hybrid System II）を採用してきた。THS-IIには、昇圧コンバータと二つのMG（Motor/Generator）の各々を制御する2組のインバータからなるPCU（Power Control Unit）を有する。¹⁾ Fig. 1にTHS-IIのPCU回路構成を示す。IGBT（Insulated-Gate Bipolar Transistor）とFWD（Free Wheeling Diode）の2種類のシリコンチップが並列接続された多数の半導体スイッチから構成されている。

PCUは、エンジンコンパートメントに搭載されるため体格が小さいこと、より高い動力性能を発揮するため高出力であることを両立させる必要がある。結果としてより大きな体積当りの出力、つまり高出力密度が要求されている。

既存のガソリンエンジン駆動の車両をHV化する場合、エンジンコンパートメント内は既存部品に占有されておりPCUのスペースを確保する必要がある。HVでエンジンコンパートメントから移動可能な唯一の部品は補機バッテリーである。なぜなら、スタータモータを駆動する大電流はもはや必要なく、エンジンのそばにある必要がないためである。PCUが鉛バッテリーと同じ大きさと同形であるなら、補機バッテリー搭載位置に収めることができる。トヨタ自動車は2006年のGS450h、カムリ・ハイブリッド、エスティマ・ハイブリッド以降この手法を採っている。²⁾

大排気量HV用のPCUは従来と同じ体格で高出力化が要求されており、出力密度を更に向上する必要があった。しかし、従来技術で設計した場合、必要とする出力を満たすには、シリコンチップの数が多くなり、補機バッテリー搭載位置に収めることは体格的に困難であった。そこで、我々は従来技術に対して単位体積当りの出力を約60%向上させた両面冷却構造を開発し、2007年にLS600h用PCUとして量産化した。Fig. 2にそのPCUの外観を示す。その後、両面冷却方式を用いたPCUは2009年にRX450hにも搭載され、エンジン排気量3.0リットルを超える大排気量のHVに展開されている。

本稿では、更にその後の展開として、エンジン排気量2.5リットルの中排気量HVへの展開として、①バッテリーパック近傍に搭載されていたDCDCコンバータと一体化したこと、②部品の共有化によるシリーズ展開の事例を紹介する。

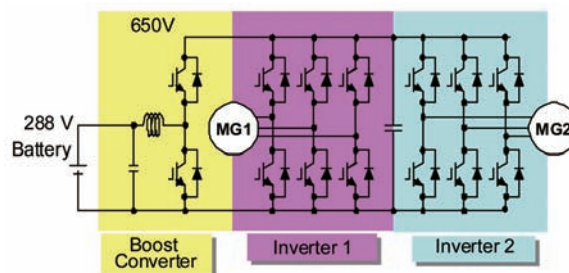


Fig. 1 Simplified circuit diagram of the two-traction-motor system in HVs

*（社）自動車技術会の了解を得て、「シンポジウムテキスト（電気動力技術専門委員会）」No.16-07より、一部加筆して転載



Fig. 2 First developed PCU

2. 両面冷却構造のPCU

はじめに、Fig. 3に両面冷却の概念を示す。両面冷却構造のPCUは両面放熱パワー素子と積層冷却器から構成されている。両面放熱パワー素子は垂直に配置され、冷却板によって挟み込まれる。パワー端子は上方に立ち上げられバスバーに接続され、制御端子は下方に向かいゲート駆動基板に接続されている。

パワー素子は挟まれた冷却板によって両面から冷却されることで、優れた放熱性能を得ることができる。その結果、出力時に生じる発熱を効率良く放熱することが可能となり、従来技術より1チップ当りの電流密度を1.6倍にすることができた。つまり、同じ電流量であれば、体格を約40%低減できることになる。

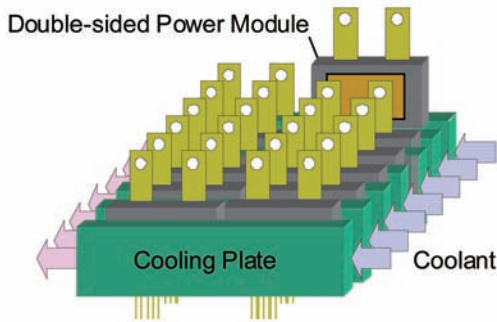


Fig. 3 Original concept of the stacked cooling system

Fig. 4にパワースタックの分解図を示す。積層冷却器は、アルミ板により構成された冷却板が積み重ねられ、出入り口パイプが設けられている。冷却板はエアコン用エバポレータと同様にロウ付けされ、漏れの危険をなくしている。各段の出入り口窓は直列にロウ付けされ、全体として入口、出口のヘッダを形成し、各

冷却板の流量を均等化する。

両面放熱パワー素子は絶縁板と熱伝熱グリスを介して冷却板の隙間に挿入される。積層冷却器は加圧バネによって圧縮され、両面放熱パワー素子に密着する。

Fig. 5に組み立てられたパワースタック部を示す。

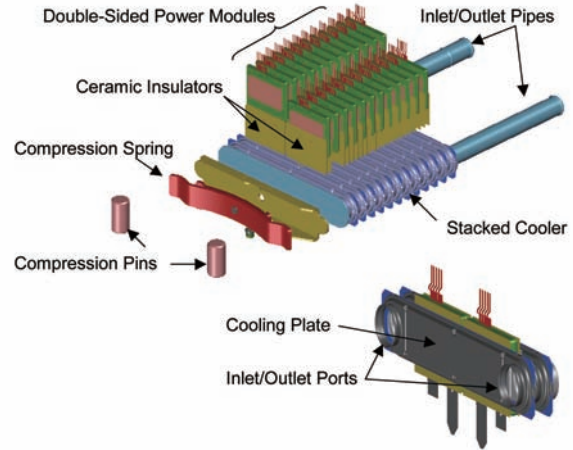


Fig. 4 Exploded perspective view of the power stack

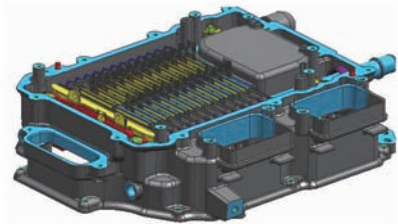


Fig. 5 Assembled power stack

2.1 両面放熱パワー素子

従来のPCUでは、Fig. 6に示すようにシリコンチップはIPM (Intelligent Power Module) に実装される。シリコンチップはDBA (Direct Bonded Aluminum) 基板に半田付けされ、さらに銅モリブデン合金ベース板にロウ付けされる。ベース板は水冷ヒートシンクに熱伝導グリスを介してボルト固定される。シリコンチップの上面はワイヤボンディングで端子に接続される。

IGBTの許容最高動作温度は150℃である。出力電流が増大してもIGBTの温度を限界以内に抑えるためには、熱抵抗、つまり発熱1ワット当たりの温度上昇を減少させることが重要である。シリコンチップから冷却水までの熱抵抗を減少させるには三つの手段がある。即ち、①1チップ当たりのヒートシンク面積を増し、②熱障壁を越える前に熱を効率よく拡散して熱流束を

下げ、③水冷ヒートシンクの熱伝達を改善することである。

両面から放熱するパワーモジュールを採用することにより、チップ当たりのヒートシンク面積を2倍にした。Fig. 7に示す両面放熱構造は、①シリコンチップの両面にヒートスプレッドを半田付けした樹脂モールドパワーモジュールと、②熱拡散した後のパワーモジュール外側にある絶縁板と、③両面放熱パワー素子を挟み込む冷却プレートからなる。

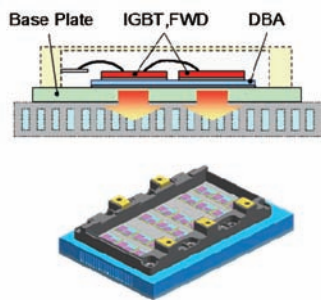


Fig. 6 Intelligent power module

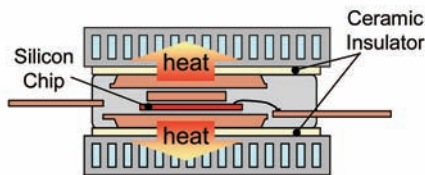


Fig. 7 Concept of double-sided cooling

Fig. 8に今回開発した両面放熱パワー素子を示す。パワーモジュールは、一対のシリコンチップ（IGBTとFWD）と、ヒートスプレッドと端子を一体化した上下リードフレーム、制御信号のボンディングワイヤと上部ヒートスプレッドの接触を避けるための導電スペーサからなっている。これらの部品は鉛フリー半田付けされた後、樹脂トランスファー成型される。

リードフレームと導電スペーサは、熱と電気の伝導性に優れた無酸素銅で作られる。シリコンチップはヒートスプレッドに直接半田付けされるか、または金属の部品を挿入して半田付けされており、熱のボトルネックを作ることなく効率よくヒートスプレッドに熱伝導される。

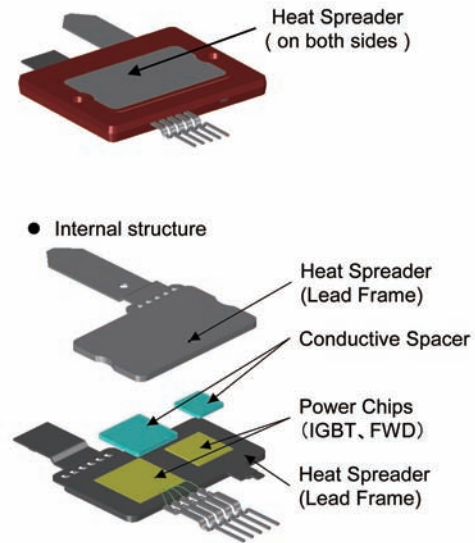


Fig. 8 Double-sided cooling power module

2.2 積層冷却器

Fig. 9は冷却板の断面図である。冷却板は両面から熱を吸収するように設計され、熱交換を促進し圧縮力に耐える平均チャンネル幅0.9mmの波型フィン2層で構成されている。

各々の冷却板は、出入り口窓の周囲に変形可能なダイアフラムを持ち、ヘッダに柔軟性を与えるとともに両面放熱パワー素子を保持するため間隔を狭めることを可能にしている。Fig. 10にヘッダが変形する様子を示す。

今回の開発では、Fig. 9に示すストレートフィンから更に約20%熱伝導率を向上したFig. 11に示すウェーブフィンを採用したことで、同じサイズのシリコンチップであっても、より適用範囲を広くすることができた。即ちHVの要求性能において、同じ電流値であれば小型のシリコンチップで応じることが可能となった。

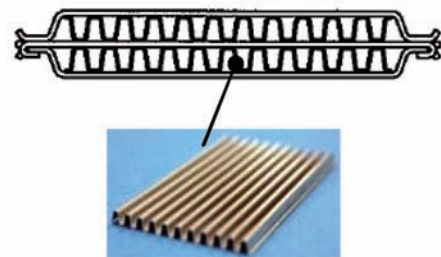


Fig. 9 Cross section of a cooling plate

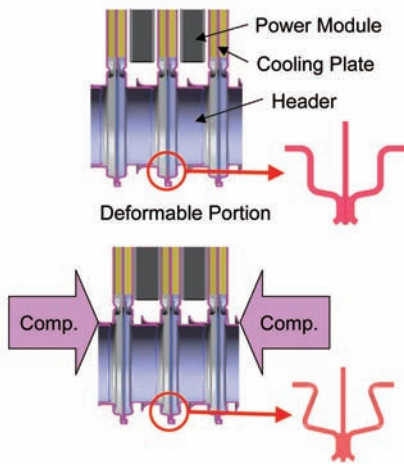


Fig. 10 Deformation of the header

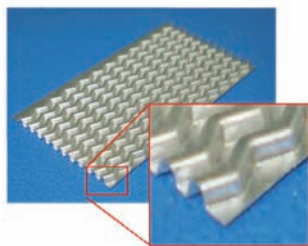


Fig. 11 Inner fin: wave shape

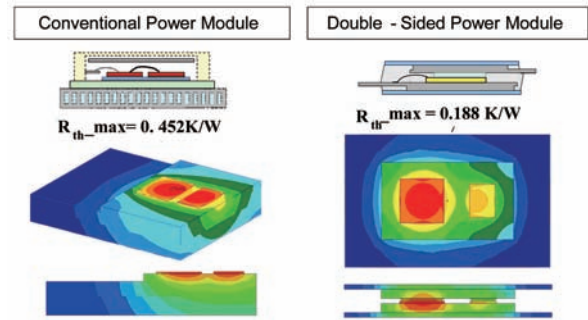


Fig. 12 Simulation result of thermal resistance and temperature distribution

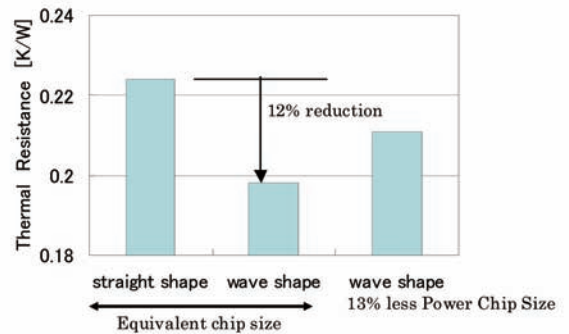


Fig. 13 Test result of thermal resistance measurement

2.3 冷却性能

Fig. 12に従来のIPMと両面放熱パワー素子の温度分布シミュレーション結果を示す。両面放熱パワー素子の推定熱抵抗は0.203K/Wであったが、ウェーブフィンの採用により、更に推定熱抵抗は低減できており、同等面積のシリコンチップで0.188K/Wを実現した。

Fig. 13にTable 1の条件でパワースタック部を評価した結果を示す。ウェーブフィンの採用により従来のストレートフィンから熱抵抗が約12%低減できていることを確認した。またシリコンチップ面積が約13%低減した両面放熱パワー素子でもストレートフィンを採用した場合より、熱抵抗が低減できていることを確認した。

Table 1 Test conditions

Coolant	Long-Life Coolant water solution
Concentration	50 wt%
Flow Rate	12 L/min (total)
Heat Dissipation	300 W/module

3. DC-DCコンバータとPCU一体化

DC-DCコンバータには水冷と電池パック近傍に設置する空冷の2つのタイプを揃えているが、従来の冷却構造を両面冷却構造に変えることで、PCUの体格を小さくすることが可能となり、DC-DCコンバータと一体化してもエンジンコンパートメントに搭載が可能となった。結果として、ラゲージスペースの拡張に貢献している。Fig. 14にPCUとDC-DCコンバータの構成のイメージ図を示す。実際にはPCUのケースとDC-DCのケースは一体となっている。

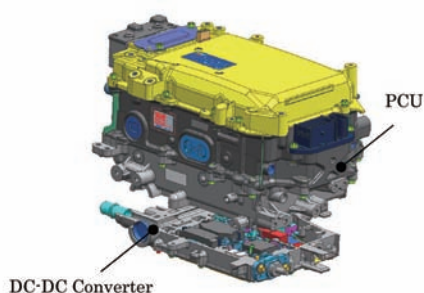


Fig. 14 3D view of the PCU

3.1 DC-DCコンバータ

DC-DCコンバータは、高電圧バッテリーから補機バッテリーへ電力変換し電力供給する装置であり、デンソー独自の2トランス方式を採用している。

PCUと一体化するため、PCUのコンデンサケースを共用し、冷却経路の簡素化と部品配置の工夫により小型化を実現した。Fig. 15に主要部品と構成を示す。

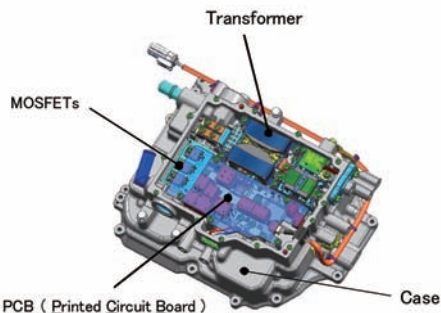


Fig. 15 Internal view of the DC-DC converter

4. 部品共用化

両面冷却構造のPCUはFig. 16の示すコアであるパワースタック部を共通化することで、基本の構造設計部は共通のまま両面放熱パワー素子を変更することで、組付け性は変更することなく、組み合わせでHVの要求仕様に応じることができる。即ち、生産設備を共用することができる。Fig. 16の例はウェーブフィンを採用することで、シリコンチップのサイズが異なる2種類の両面放熱パワー素子から必要な出力に応じて選択することが可能であることを示す。この結果、HVの要求に幅広く対応することが可能となった。

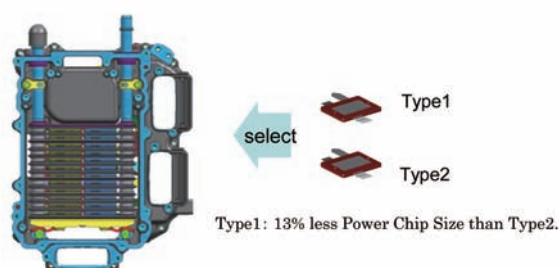


Fig. 16 Common design of assembled power stack assembly

また、Fig. 17, Fig. 18に示す四輪駆動などの3つのMG構成とする場合、積層冷却器の段数を追加することで構造や部品の組付け性を大きく変更することなく対応することが可能である。

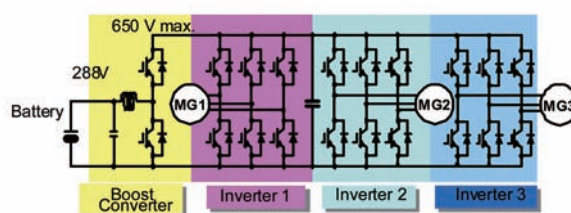


Fig. 17 Simplified circuit diagram of the three-traction-motor system in HVs

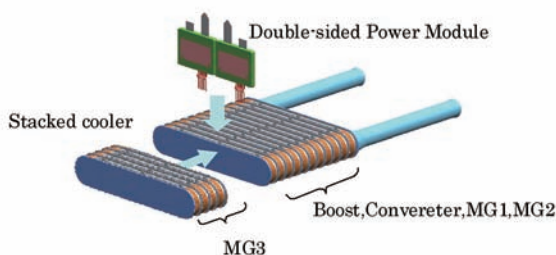


Fig.18 Application example of the PCU to a three-traction-motor HV

5. 開発結果

最後にFig. 19に今回開発したPCUを示す。2011年カムリ・ハイブリッド用として、DC-DCコンバータと一体化しても、従来のHVの補機バッテリー搭載位置に収めることが可能な小型のPCUを開発した。本PCUは、構成部品のスペックを変更することで、さまざまなエンジン排気量のHVと四輪駆動までシリーズ展開が可能である。



Fig. 19 View of the advanced PCU composed of an Inverter-PCU and DC-DC converter

<参考文献>

- 1) T. KIKUCHI, O. SHINMURA, "DEVELOPMENT OF POWER CONTROL UNIT FOR SUVs", IN PROC. EVS-21, 2005
- 2) R. HIRONAKA, H. KUSAFUKA, "DEVELOPMENT OF SMALL SIZE POWER CONTROL UNIT", IN PROC. EVS-22, 2006

6. まとめ

今後のHVの車種展開に向けて、本PCUのシリーズ展開を進め、更なる小型・低コスト製品開発に取り組み、環境にやさしいHVの普及に貢献したい。

<著 者>



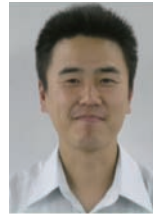
岡本 幸司
(おかもと こうじ)
EHV機器技術1部
PCUの開発・設計に従事



瀬高 庸介
(せたか ようすけ)
EHV機器品質保証部
ハイブリッド製品開発・設計に
従事後、品質保証に従事



石山 弘
(いしやま ひろし)
EHV機器開発部
PCUの開発・設計に従事



稲垣 充晴
(いながき みつはる)
熱交換器開発部
熱交換器の開発・設計に
従事



真光 邦明
(まみつ くにあき)
IC技術3部
半導体素子の開発・設計に
従事