

# 第2世代48V-ISG用インバータ

Inverter for 2nd Generation 48V Integrated Starter - Generator

北村保彦\*  
Yasuhiko Kitamura  
林 亮兵\*  
Ryohei Hayashi  
原田信吾\*  
Shingo Harada

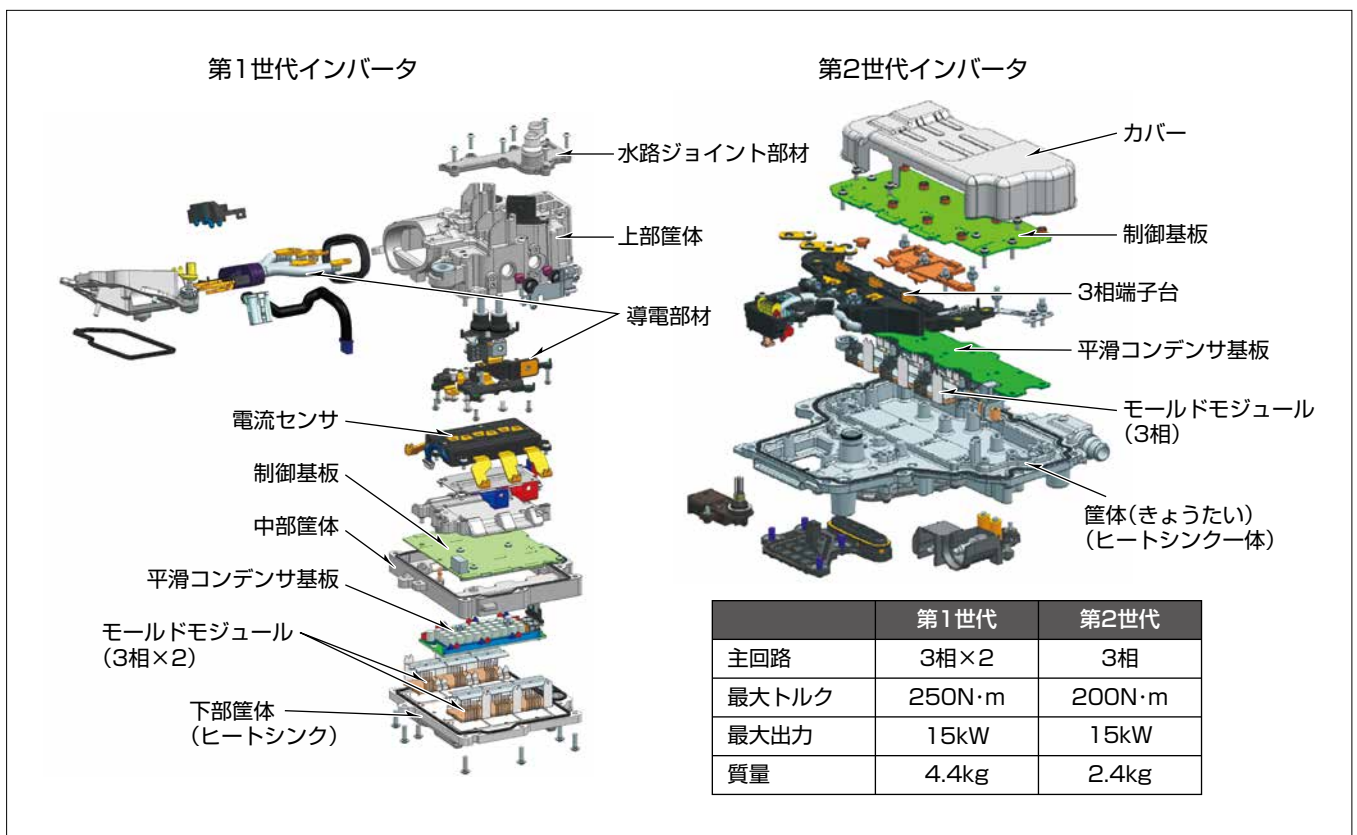
## 要 旨

近年、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出量増加が地球温暖化の一要因であると指摘されており、各国が車両の排出ガス規制強化を進めている。特に欧州では、2021年から欧州で販売する車両のCO<sub>2</sub>平均排出量が95g/kmを1g超過するごとに95€(ユーロ)/台の罰金を科すという排出ガス規制強化が開始された。欧州各国政府はこの規制によってPHEV(Plug-in Hybrid Vehicle)やBEV(Battery Electric Vehicle)の導入促進政策を進めているが、大容量バッテリーの搭載による車両価格の上昇、急速充電のインフラ整備等の課題があり、普及拡大には時間を要することが予測されている。このため、比較的低コストで燃費向上を実現できる48Vマイルドハイブリッド車がこれらの車両の前に普及すると予

想されている。

三菱電機はエンジンのアイドリングストップ・スタート、車両減速時のエネルギー回生やトルクアシストを行うことで車両の燃費を向上させるエンジン出力軸直結型48V-ISG(Integrated Starter-Generator)システムを2017年に業界で初めて(注1)開発・量産化した。今回、更なる適用車種拡大を狙って、第2世代48V-ISGシステムを開発した。その第2世代インバータでは冷却性能を向上させた高熱伝達フィン、水平磁場検出方式の電流センサ、ホールIC式回転角センサ及び当社独自の回転角演算等の新技術を適用した。

(注1) 2017年10月26日、当社調べ



## 48V-ISG用インバータの第1世代と第2世代の部品構成の比較

当社48V-ISGシステムの第1世代インバータでは主回路部の二重化によって大電流に対応しており、部品を多方向から組み立てる複雑な構造であった。第2世代では主回路部品の改良及びヒートシンクの冷却性能向上によって大電流に対応させ、複数部品を一つの部品に集約させることで第1世代に対して大きく部品点数を削減し、生産性の高いインバータを実現した。

\*姫路製作所

## 1. ま え が き

近年、地球温暖化の観点から各国が車両の排出ガス規制を強化しており、PHEVやBEVなどの様々な電動車両の普及が今後見込まれている。その中でも比較的低コストで燃費向上が実現できる48Vマイルドハイブリッド車がこれらの車両よりも前に普及すると予想されている。

この背景から、当社は従来のエンジン出力軸にベルトを介して駆動力を伝達するBSG(Belt driven Starter-Generator)に比べてトルクと発電量の向上が見込めるエンジン出力軸直結型48V-ISGシステム<sup>(1)</sup>を、2017年に業界で初めて製品化した。そして今回、適用範囲の拡大を狙った第2世代48V-ISGシステムを開発した。

本稿では第2世代48V-ISGシステム用インバータの特長と適用技術を述べる。

## 2. 第2世代48V-ISG用インバータの特長

48V-ISG用インバータの第1世代から部品配置・構成を変更して、第2世代インバータでは1方向からの積み上げ構造を採用することで組立性を改善した。また、モータとインバータ間の振動絶縁部品を廃止し、直接固定を達成した。また、一つの部品に複数の機能を集約化することで部品点数を削減した。

さらに、水路冷却フィンの改善によって半導体パワーモジュールや平滑コンデンサの冷却性能を改善した。

主回路部ではパワーチップの世代進化、平滑コンデンサの冷却方式の進化などの新技術を採用することで、第2世代では第1世代に対してインバータ最大電流を大きく向上させた。また電流センサでも拡大した電流範囲に対応するため、新規の電流検出方式を採用した。

同様にソフトウェアでも、車載ネットワークの高速・大容量化やセキュリティに対応した新ソフトウェア技術の導入を行った。さらに、レゾルバを置き換える新開発のホールIC式回転角センサに対応する回転角演算機能を搭載した。

## 3. 適用技術

### 3.1 構造設計技術

48V-ISG用インバータは、モータと直接接続する機電一体構造が特徴である。これによって3相電流給電ハーネスを不要にし、車両レイアウト性・組立性を大幅に向上させることができる。しかしながらモータに直接接続するためには、インバータは車両駆動部品へ搭載する必要があり、

駆動部品周辺の非常に厳しい環境温度や振動条件に対応することが課題になる。

高耐振化のため、第1世代ではインバータ内部の振動絶縁部品、モータとインバータ間で生じる相対変位を吸収する可撓(かとう)性(弾性変形のしやすさ)の電気接続部品及び筐体防水部品についても可撓性が必要であった。第2世代ではトルクコンバータハウジングとインバータ筐体との締結、インバータ内部部品の配置、及び冷却水経路を最適化することで高耐振性を実現した。これによってモータとインバータの直接固定を可能にし、これまで必要であった振動絶縁部品及び変位吸収用部品を廃止した。

また、部品一体化に関しては図1に示すとおり、第1世代の筐体は機能別に配置したヒートシンク・中部筐体・上部筐体・水路ジョイント部材・モータ接続部筐体や内部部品の保持部材で構成され、多方向から組み上げる必要があった。一方、第2世代の筐体ではベース部材を一体化することで1方向から積み上げ可能な構造にした。これによって、部品点数を6部品から2部品へ削減した。

次に図2に示すとおり、3相端子台は電流センサシールドプレートや12V電源・通信信号用ノイズフィルタ(フェライトコア)、モータ信号コネクタ、AC端子締結ねじの保持部材などを統合した構成にした。

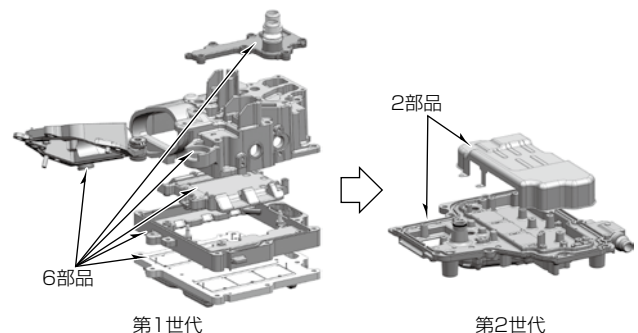


図1. 筐体の部品点数削減

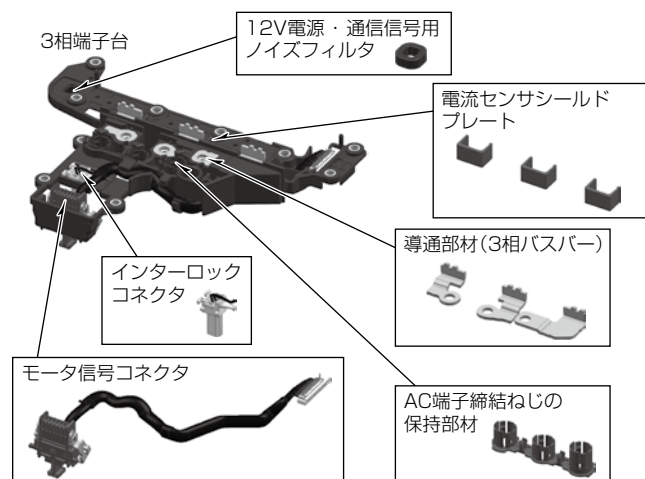


図2. 第2世代インバータ3相端子台の構成

また、ゲートドライブ基板とモータコントロール基板を一体化し、ホールICを実装することで電流センサを含めた制御系基板を集約している。第2世代では第1世代と比較して部品点数は半減し、質量を4.4kgから2.4kgへと40%以上の軽量化を達成した。

冷却系の進化については、第1世代ではアルミニウム押出材を切削することでフィンを製造しているが、第2世代ではより生産性に優れたアルミニウムダイカストで筐体との一体化を実現している。一般にダイカストに用いるアルミニウム材はアルミニウム押出材に比べて熱伝導率が低いことが課題であるが、フィン形状の最適化を図ることで铸造性を犠牲にすることなく冷却性能を第1世代比で2倍以上向上させた。

### 3.2 主回路部

48V-ISGシステムで高回生電力、高トルク出力を達成するためには高電圧システムに比べて大電流が必要である。第1世代ではパワーモジュール、平滑コンデンサ、電流センサ等の主回路部を二重化することで実現したが、制御システムが複雑化するという課題があった。第2世代では主回路部を大電流対応させることで二重化することなくシンプルなシステム構成を実現できた。

パワーモジュールは第1世代で採用したスーパージャクションMOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)から、Pカラム(柱状のP層)をより深くすることでオン抵抗を第1世代比で約40%低減でき、インバータの最大電流は40%増加した。

平滑コンデンサは48V-ISGシステムでは低電圧・大電流の対応が必要なため、高リプル耐量の特徴を持つ導電性高分子ハイブリッドアルミニウム電解コンデンサを採用している。また、コンデンサの温度上昇対策として、第1世代では図3に示すとおりコンデンサを金属基板と放熱グリスを介して冷却する方式を採用していた。これに対して第2世代ではコンデンサ天面を放熱コンパウンドを介して直接冷却する方式を採用し、放熱面積を大幅に増加させるこ

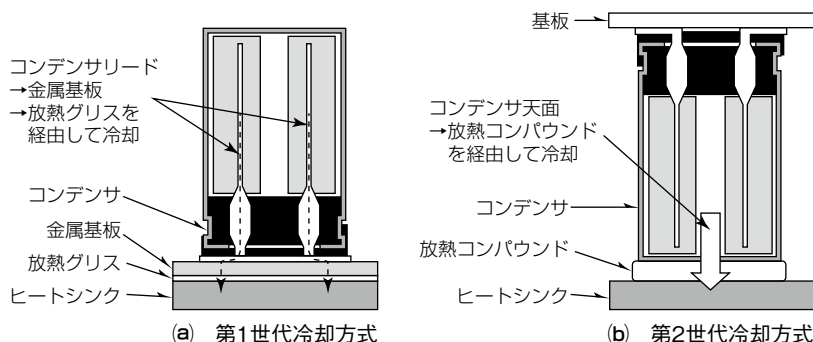


図3. コンデンサ冷却方式

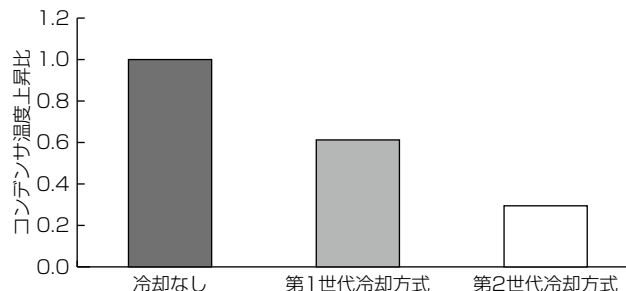


図4. コンデンサ冷却方式変更による温度上昇抑制効果

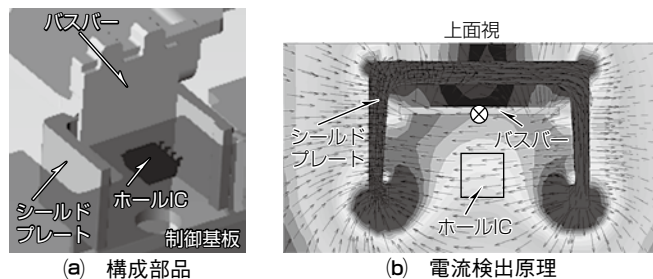


図5. 電流センサ

とで通電電流の増加に対応し、図4に示すように内部の温度上昇を抑制した。

第1世代では主回路部を二重化していたこともあり、電流センサは大型の6相用電流センサモジュールを採用し、インバータ内部スペースを大きく占有していた。第2世代では水平磁場検出タイプのホールICを制御基板に実装し、図5に示すようにホールIC周りにシールドプレートを配置することでホールIC部の磁束密度をコントロールする電流センサを開発した。

この方式の採用及び主回路部の簡素化に伴う電流センサ数の削減によって、インバータ内部スペースの電流センサが占める割合を第1世代に対して大幅に低減し、さらにシールドプレートの形状最適化による磁気特性の最適化によって、電流検出レンジ拡大を実現した。

### 3.3 ソフトウェア・制御技術

ソフトウェアでは、車載ネットワークの高速・大容量通信の要求を満たすために、新しくCAN FD<sup>(注2)</sup>(Controller Area Network Flexible Data-Rate)に対応した。また、近年急速に必要性が増しているサイバーセキュリティに対して、機器認証などのセキュリティ機能を新たに導入した。これらの新ソフトウェア技術を導入し、次世代規格を満たした。

さらに、車載製品では回転角センサとしてレゾルバが一般に利用されるが、挟み込



みタイプのISGではレゾルバが大径化するためにコスト上昇や製造面での課題があった。そこで第2世代48V-ISGでは、ホールIC式回転角センサ(図6)を採用した。このセンサはモータのステータに固定されたセンサユニットとロータに固定されたセンサロータで構成される。センサユニットは主にホールIC、マグネット、コアで構成され、センサロータとの間で磁路が形成される。センサロータが回転すると磁路のギャップ長が変化し、ホールICで検出される磁界の強さが変化する。この磁界の強度変化を正弦波状にすることで、センサ信号を得ることができる。このセンサ信号を演算処理することでロータの回転角を得る。なお、検出信号を3信号にすることで、後述の回転角演算で3相2相変換を行い、モータコイルからの外部磁界の影響を相殺除去して信頼性を高めている。開発したホールIC式回転角センサでは、センサユニットがステータ全周を囲う必要がなく、レゾルバ信号を回転角に変換するRD(Resolver Digital)コンバータも不要になる。このホールIC式回転角センサを内製化して適用することでモータ・インバータシステムとして小型・低コスト化を実現した。

次に従来RDコンバータで行っていた故障検知・回転角演算・フィルタ演算などの処理をこのセンサ向けに適用・開発した。さらに、当社鉄道車両用インバータ及びFA機器製品で採用しているセンサレスベクトル制御技術<sup>②</sup>を当社車載製品として初めて適用することでセンサ信号欠落時にも運転継続可能にした。これらの技術によってセンサの低コスト化と制御機能及び信頼性の向上を両立させた。

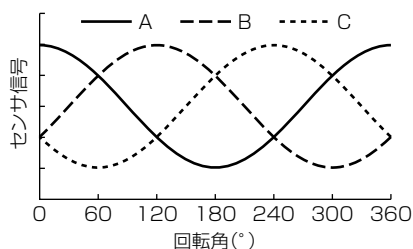
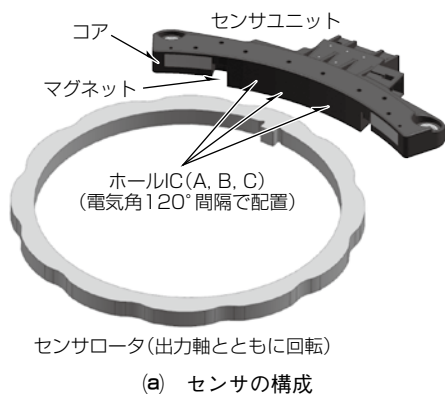


図6. ホールIC式回転角センサ

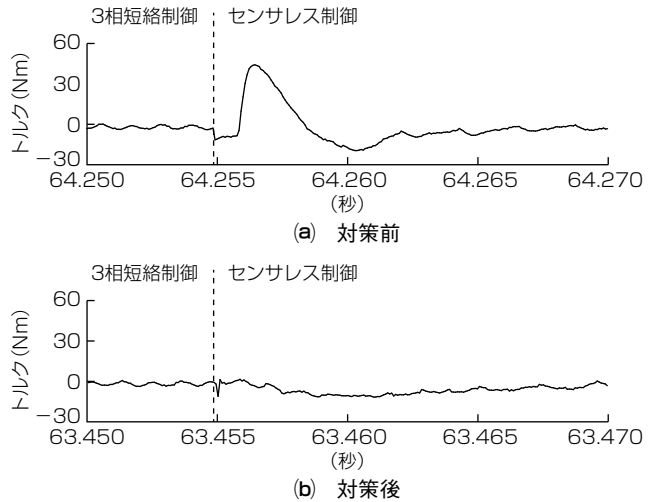


図7. 3相短絡制御からセンサレス制御に移行した際のトルク波形

センサレスベクトル制御を適用するため、課題であったセンサレス制御移行時のトルク変動抑制技術を開発した。回転角センサ故障時にはまず保護機能としてインバータの3相端子を全て短絡する3相短絡制御が働く。その後、センサレス制御に移行する際にインバータ出力電圧と3相短絡制御時のモータ電流に起因する電圧の不整合によるトルク変動が発生する(図7(a))。これを回避するため、センサレス制御に移行する際に、トルク指令に加えて3相短絡制御中の電流を考慮した指令値を設定することで適切なインバータ出力電圧を発生させ、トルク変動の抑制を実現した(図7(b))。この制御によってセンサ故障時にもトルク変動が発生させずに運転継続が可能になる。

(注2) CAN FDは、Robert Bosch GmbHの登録商標である。

## 4. む す び

2017年に業界で初めて開発・量産化した第1世代48V-ISGシステムを進化させ、複数機能の単一部品への集約、冷却性能向上を目指した高熱伝達フィン、平滑コンデンサの天面冷却、水平磁場検出方式の電流センサ、ホールIC式回転角センサ及びその回転角演算等の新技術を適用した第2世代48V-ISGシステム用インバータを開発した。当社は今後もインバータの小型・軽量・低コスト・高機能化開発を継続して電動車両の更なる普及と環境負荷低減に貢献していく。

## 参 考 文 献

- (1) エンジンランク軸搭載用48V-ISGシステム, 三菱電機技報, 92, No.1, 21 (2018)
- (2) 金原義彦: 回転座標上の適応オブザーバを用いたPM電動機の位置センサレス制御, 電気学会論文誌D, 123, No.5, 600~609 (2003)