

# 車載48V電圧コンバーター

Automotive 48-Volt Converter

川上 貴史\*  
Takafumi Kawakami

土田 敏之  
Toshiyuki Tsuchida

清水 達哉  
Tatsuya Shimizu

中島 新太  
Arata Nakashima

増田 一輝  
Kazuki Masuda

藤井 滋之  
Shigeyuki Fujii

近年、世界的に強化されていくCO<sub>2</sub>排出規制に適合するために、パワートレーンの電動化開発が各国で加速している。48VマイルドHEVはCO<sub>2</sub>削減の効果が低コストで得られるため、欧州を中心に普及していくとみられている。マイルドHEVで使用されるDC/DCコンバーターは、高出力で高品質な電源性能を求められている。当社では、このような高出力化の要求に対応するために高効率、小型化技術と高い応答性の電源制御技術を開発した。本報告では、これらの技術を導入したDC/DCコンバーターの特長について紹介する。

In order to meet the CO<sub>2</sub> emission target, the electrification of power trains is accelerating in each country. The 48-volt mild hybrid electric vehicle (HEV) can reduce CO<sub>2</sub> emissions at lower costs than other systems, and therefore it is expected to become popular mainly in Europe. DC/DC converters installed in the mild HEV are required to supply high power with good responsibility. To satisfy this need, we have developed a power control technology that features a high efficiency and high response with a compact converter. This paper introduces the features of the converter.

キーワード：マイルドHEV、48V、DC/DCコンバーター

## 1. 緒 言

近年、世界的なCO<sub>2</sub>排出規制の強化や、世界統一の燃費測定基準WLTP<sup>\*1</sup>への見直しに対応するために、各自動車メーカーではEV<sup>\*2</sup>や高電圧のPHEV<sup>\*3</sup>やHEV<sup>\*4</sup>をはじめ、48Vを主電源にしたマイルドHEVなどのパワートレーンの電動化の開発を加速させている。

マイルドHEVは既存の12V電源システムに比べて発電機の高出力化が可能なので、電力回生の効率向上や、発進時のエンジンアシスト及び低速での電動走行を行うことで、CO<sub>2</sub>排出量を低減できる。さらに、自動運転システムをはじめとする大電力が必要な負荷の搭載も可能となり、商品性の向上が期待できる。

また、電源電圧が60V以下のためEVやHEVで必要な安全のための高電圧設計が不要となり、安価にシステムを導入できるメリットがある。特に、欧州を中心にマイルドHEVの開発と普及が進んでいるが、今後は欧州だけではなく、中国においても市場が拡大し、2030年には電動化車輛の中で最もシェアが高くなる見込みである<sup>(1)</sup>。

当社ではマイルドHEVの48Vデュアル電源システムで使用される48V DC/DCコンバーターを開発した。本稿では、そのコンバーターにおける特長について紹介する。

## 2. 48V電源システム

48Vデュアル電源システム構成の一例を図1に示す。特長であるバッテリーの構成は48V電源系にはリチウムイオン電池 (LIB)、12V電源系には鉛バッテリーが搭載される。発

電機は、エンジン始動や発進時のアシスト、電力回生や発電機能を統合したISG<sup>\*5</sup>、12V電源系へ電力供給するDC/DCコンバーターで構成されている。

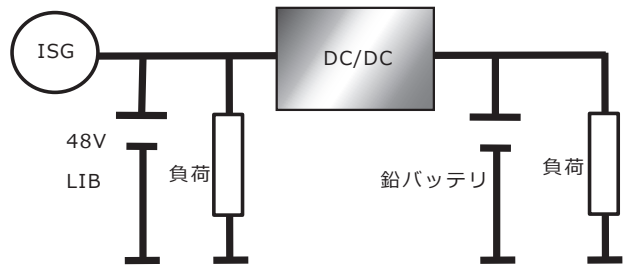


図1 マイルドHEV電源システムの例

## 3. 48VDC/DCコンバーターの特長

### 3-1 コンセプト

当社が開発した48V DC/DCコンバーターのシステム構成を図2に、主要諸元を表1に示す。最大3kWの出力に対応するため、効率96%以上、サイズ3L以下を目標に開発した。また、自動車は外部環境の変化により発電電圧や負荷電流が変化した場合でも安定した出力を維持できるように応答性が良い制御を目指した。

### 3-2 システム構成

システム構成は図2に示すとおり、電圧変換部と電源制

御部の他に、コンバーター故障時の12V側に対する過電圧対策専用の保護部及び制御部を設け、機能安全を考慮した設計とした。

電圧変換部は出力電力が大きくなると、単相方式よりも1相当たりの電流を低減できる多相方式がより高効率化しやすいが、相の増加に伴い部品点数が増え、コスト増加や大型化が懸念される。本システムでは効率やサイズ等の性能とコストがバランスする、4相方式を採用した。

電源制御は、アナログ回路で構成することも可能だが、多相方式の場合は、電力変換部を制御する電子部品数が増加するため小型化には向かない。さらに、電源の追従性／応答性の良い制御を実現するためには、高速で応答する回路の追加が必要である。そこで、当社では高効率化、小型化と電源制御の高品質化を成立させるために、高速な応答が容易なデジタル電源制御方式を採用した。

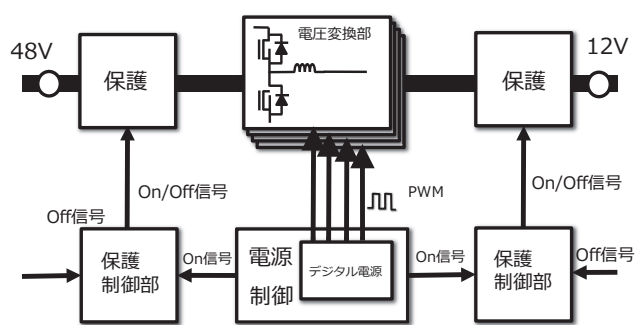


図2 システム構成図

表1 主要諸元

項目	値
入力電圧	24V~60V
出力電圧	10V~16V
出力電力	3kW

### 3-3 高効率化

コンバーターの損失割合を分析すると、最も損失量が多い部品は高速でOn/OffするFET<sup>※6</sup>で全体の40%を占める。さらに、このFETの損失割合を分析するとスイッチング損失が60%を超えていた。スイッチング損失を低減するためには、用途に応じて適切な性能の部品を選定すること、基板パターン設計の最適化が必要である。

具体的には、部品選定において、スイッチング特性に影響する寄生成分の小さいFETが最適だが、寄生成分は導通抵抗と反比例になる場合が多い。今回の開発では、スイッチング損失が支配的なハイサイドFETについて、導通抵抗と寄生成分の積をパラメータ化し、その値が極力小さくな

る部品を選定した（図3）。一方、導通抵抗による損失が支配的なローサイドFETには、導通抵抗が極小となる部品を選定した。

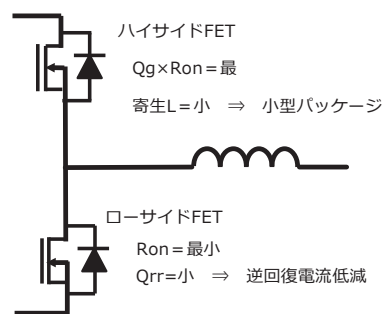


図3 スイッチング部の設計コンセプト

次に、パターン設計では、FETやコンデンサのスイッチング電流の通電するパターンをできる限り短くすることが重要である。設計時にパターンの電磁界解析により、FETがOn/Offしたときの基板パターンの電流密度分布の偏りや、On/Off遷移時間、サージ電圧やリングング波形の解析結果から最適なパターン設計を決定した（図4）。その結果、スイッチング損失を当初から50%削減できた。

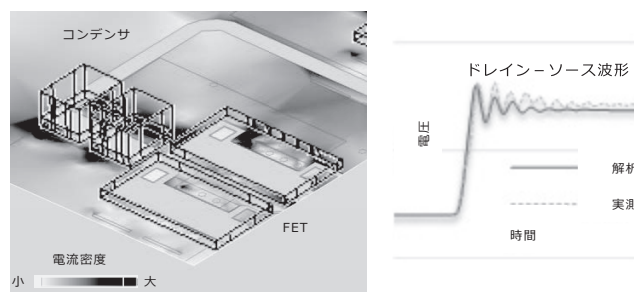


図4 基板パターンの電磁界解析と実測

### 3-4 高放熱化

当社の48V DC/DCコンバーターは、多様な出力と冷却条件に制約されないように、冷却方式を空冷と水冷で開発した。冷却部はそれぞれ専用設計とし、コンバーター部を共通設計とすることで変化点が少ない構成とした（図5）。

各方式の開発では熱解析を活用し放熱器の放熱性能を定量化することで最適な放熱構造を決定した。例として、水冷方式では水路の圧力損失を考慮した水路設計が必要のため、サイズに影響する水路厚みや機構的な制約により水路

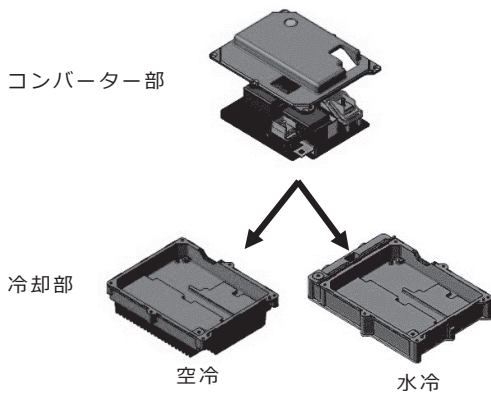


図5 コンバーター構造

に生じた凹凸による圧力損失の見極めが必要である。そこで、設計したモデルで流体解析を行い水路厚みや水流を最適化した水冷構造を開発した (図6)。

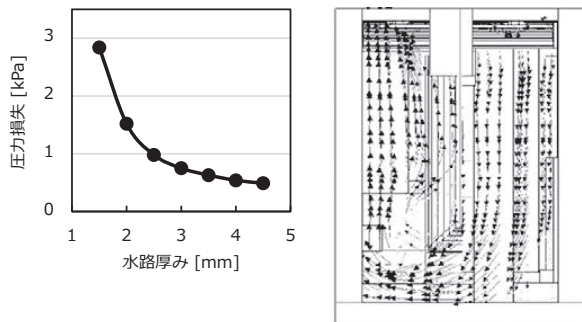


図6 流体解析の結果

### 3-5 結合コイル

チョークコイルは、DC/DCコンバーターの構成部品の中で最大のものであり、ユニットの小型化への大きな障害であった。そこで、結合コイル<sup>(2)</sup>を利用し、チョークコイルの小型化を実現した。

結合コイルとは、複数のコイルで発生する磁束をコアで結合し、互いに干渉させることで、リップル電流の低減を可能とする技術である。この技術を適応することにより、リップル電流を一定値以下にするために必要なインダクタンス値を小さくすることができた (図7)。

結合コイルでは、組み合わせたコイルの片側に電流が偏ると、磁気飽和を起しやすくなるため、電磁界解析により磁束密度分布を求め、電流の偏りにより発生する磁束を抑制できる構造とした (図8)。その結果、2相1組の結合コイルを設計し、従来品と比較したところ出力を20%増加

させながら、体積を13%小型化できた (写真1)。これにより、ユニット設計の自由度が大きく向上した。

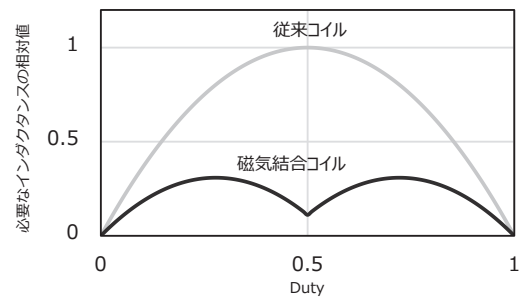


図7 必要なインダクタンスの相対比較

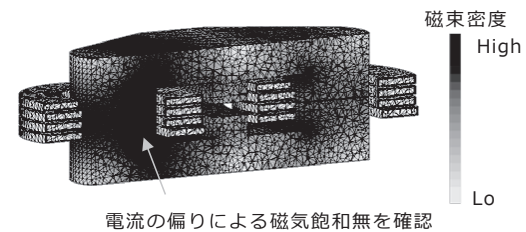


図8 磁束密度のシミュレーション

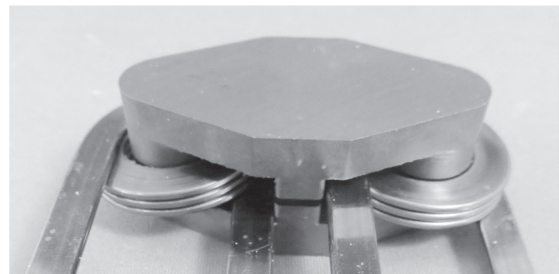


写真1 試作した2相磁気結合コイル

### 3-6 高応答性

マイコンによるデジタル制御方式は、電子部品の組み合わせで制御部を構成するアナログ制御方式と比べ、電圧変換部の多相化や位相制御に柔軟に対応ができることから、拡張性に優れている。

一般にアナログ/デジタルにかかわらず制御部はフィードバック制御の一種であるPI制御方式<sup>\*7</sup>が採用されることが多い。PI制御方式は精度よく電圧電流を維持できるため、12V側の負荷電流が急激に変動した場合でも俊敏に応答し12V側の電圧を安定に制御することができる。一方、48V側の電圧変動に対しては、PI制御では追従できず12V側の

電圧が大きく変動するため、当社では新たに48V側の電圧変動に伴う12V側の電圧に対する影響を予測し、事前に電圧変動を抑制する方向にPWM<sup>※8</sup>を調整するフィードフォワード制御を導入した<sup>(3)</sup> (図9)。

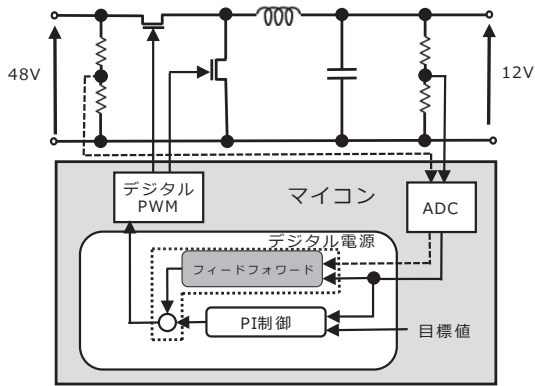


図9 デジタル電源制御

図10にPI制御+フィードフォワード制御を導入したデジタル電源の48V側の電圧変動における応答性能を示す。その結果、フィードフォワード制御の追加により、12V側の電圧変動は1V以内となり、フィードフォワード制御の有効性が確認された。

PI制御とフィードフォワード制御を組み合わせることで12V側の負荷変動と48V側の電圧変動に対して、出力電圧の応答性が良い制御を実現できた。また、48V電源の規格である「VDA320」の電源変動を与えても、安定した出力特性を示すことを確認した。

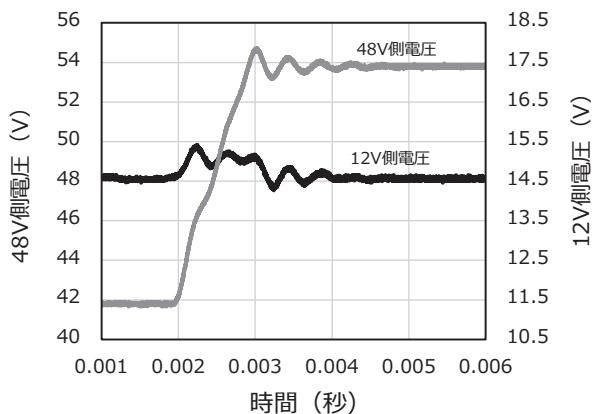


図10 48V電圧変動における応答性能比較

#### 4. 評価結果

今回、開発した48V DC/DCコンバーター（水冷）の外観を写真2に示す。水冷方式ではコンバーターのサイズは2.0Lとなったが、空冷方式では2.8Lで設計した。

効率評価結果を図11に示す。最大効率は97.8%、最大出力の3kWでは96.7%を確認した。

温度上昇試験の結果、水冷方式、空冷方式のどちらも3kWの常時出力が可能であることを確認した。また、熱解析と実測値の差が10℃以内であった (図12)。

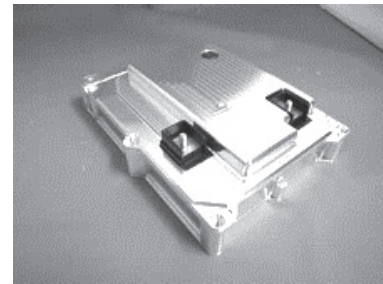


写真2 開発品の外観（水冷）

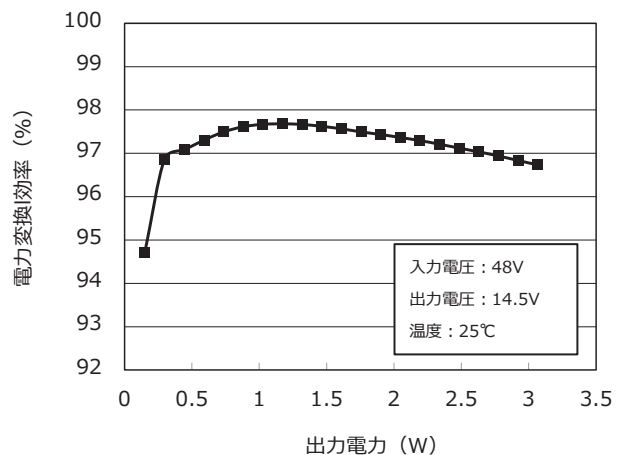


図11 電力変換効率

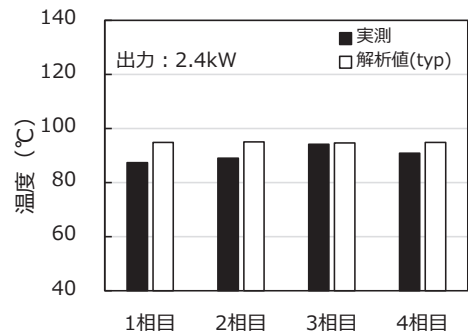


図12 熱解析と実測の比較

## 5. 結 言

今回、当社では高効率かつ小型の48V DC/DCコンバーターの開発を行った。以下に特長をまとめる。

1. スイッチング損失の低減により高効率化を実現し、試験結果では最大出力の3kWで効率96.7%を示した。
2. 空冷、水冷方式に対応し、空冷方式では2.8L、水冷方式においては2.0Lで設計し温度上昇試験において十分な熱性能を得られていることを確認した。
3. 結合コイル採用によりコイル体積を13%低減した。
4. ドイツ規格「VDA320」の電源変動試験に準拠した電源応答性能を獲得した。

## 用語集

### ※1 WLTP

Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure: 国際調和排出ガス・燃費試験法。

### ※2 EV

Electric Vehicle : 電気自動車。

### ※3 PHEV

Plug in Hybrid Electric Vehicle : プラグインハイブリッド自動車。

### ※4 HEV

Hybrid Electric Vehicle : ハイブリッド自動車。

### ※5 ISG

Integrated Starter Generator : スターター内蔵発電機。

### ※6 FET

Field Effect Transistor : 電界効果トランジスタ。

### ※7 PI制御方式

Proportional-Integral 制御方式: 出力値と目標値の偏差と積分を用いた制御方式。

### ※8 PWM

Pulse Width Modulation : パルス幅変調。

## 参 考 文 献

- (1) 山本真義、川島崇宏、「パワーエレクトロニクス回路における小型化・高効率設計法」、初版、科学情報出版、187p (2014)
- (2) 「2018年版次世代自動車における技術革新と部品の変化」、総合技研(株)、180p (2018)
- (3) 田本貞治、「デジタルコンバーターの回路と制御設計の基礎」、トリックプレス (2013)

## 執 筆 者

川上 貴史\* : (株)オートネットワーク技術研究所



土田 敏之 : (株)オートネットワーク技術研究所 技師



清水 達哉 : (株)オートネットワーク技術研究所



中島 新太 : (株)オートネットワーク技術研究所



増田 一輝 : (株)オートネットワーク技術研究所



藤井 滋之 : (株)オートネットワーク技術研究所 室長



\*主執筆者