



GaNを用いた車載DC/DCコンバータの小型化

Downsizing of In-vehicle DC/DC Converters with GaN Devices

田代 圭司*
Keiji Tashiro

岡川 裕典
Yusuke Okagawa

張 魁元
Kuiyuan Zhang

山田 幸伯
Yukinori Yamada

立崎 真輔
Shinsuke Tachizaki

高橋 成治
Seiji Takahashi

近年、電気自動車やハイブリッド車の普及が進んでおり、これらの車両には高圧バッテリーから鉛バッテリーを充電するためのDC/DCコンバータが搭載されている。DC/DCコンバータは車両への搭載容易性という観点から小型化が強く要望されている。当社では、GaNデバイスを用いてスイッチング周波数を高周波化（100kHz→500kHz）することにより、DC/DCコンバータを既存品と比べて1/2に小型化した。

Electric vehicles and hybrid electric vehicles are in widespread use and these vehicles are all equipped with DC/DC converters for charging lead batteries from high-voltage storage batteries. To simplify the installation, DC/DC converters are required to be small. This paper describes a DC/DC converter that has been downsized by 50% compared with conventional ones by increasing the switching frequency from 100 kHz to 500 kHz using GaN devices.

キーワード：GaN、高周波、電動車、DC/DCコンバータ

1. 緒言

近年、社会の環境意識の高まりから電気自動車やハイブリッド車の普及が進んでいる。これらの電動車両には、モータ駆動用の高圧バッテリーから12Vの鉛バッテリーを充電するためのDC/DCコンバータ（以下、コンバータ）が搭載されている（図1）。コンバータは車両への搭載容易性の観点から小型化が強く望まれており、本稿では、コンバータの小型化開発について報告する。

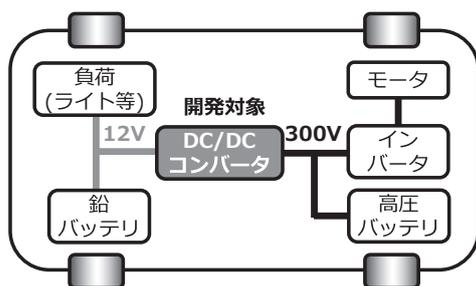


図1 電動車両の電源システム図

2. 開発の狙い

2-1 開発仕様

開発品の主要諸元値を表1に示す。現在、市場に流通しているコンバータは最大出力電流100～150A程度のもので多

表1 開発品の主要諸元値

| 項目 | 値 |
|------|---------------------------------|
| 入力電圧 | 240～400Vdc |
| 出力電圧 | 10～15Vdc |
| 出力電流 | ～200A |
| 冷却条件 | 強制空冷 (40℃、1m ³ /min) |

い。今後、運転支援システムや車内エンターテインメント機器の導入が進む見込みとなっており、これに伴う12V系電源の消費電流増加に対応すべく、開発品では最大出力電流を200Aとした。また、電源の冗長化やさらなる消費電流増加に対応すべく、ユニットを複数台接続して並列運転可能な仕様とした。冷却に関しては、ウォータージャケット/空冷フィンの取り換えにより、水冷/空冷両方に対応できる構造とし、比較的冷却能力の低い強制空冷でも熱成立させる設計とした。

当社で調査したコンバータの出力密度の市場動向を図2に示す。車両への搭載性という観点から、コンバータは高出力密度化、すなわち、単位出力当りのユニットサイズ小型化がトレンドとなっている。これを踏まえ、既存製品の出力密度を大きく上回る6W/ccを開発目標に設定した。これは、上市されている他社量産品の水準に比べ、ユニットサイズを1/2以下に小型化することに相当し、チャレンジングな目標である。

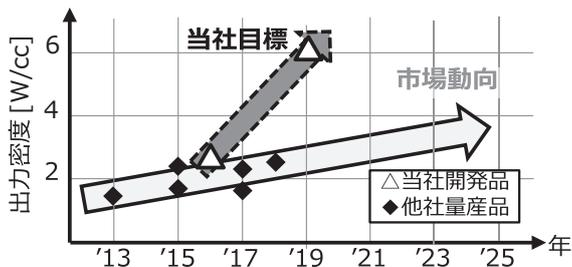


図2 コンバータの出力密度動向

2-2 開発コンセプト

コンバータの部品構成を図3に示す。コンバータにおいてはトランスやフィルタコイルといった磁気部品が大きな体積を占めている。当社ではコンバータのスイッチング周波数を既存品の一般的な水準となっている100kHzから大きく高周波化することで、コイル部品を小型化し、目標のユニットサイズを満たす方針とした。

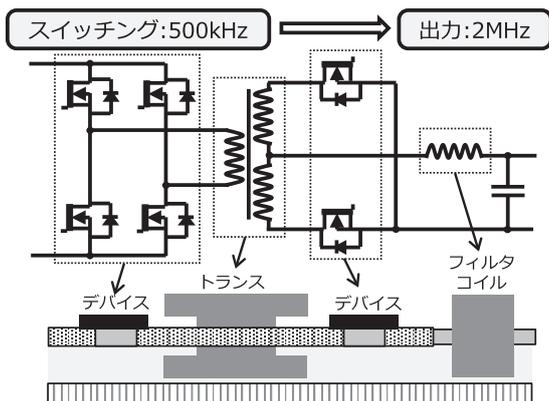


図3 コンバータの部品構成

その一方で、スイッチング周波数を高周波化すると、①半導体デバイスの損失増加、②ノイズの増加が課題となる。①に関しては、従来のSiデバイスと比べて高周波特性に優れたGaNデバイスを採用することにより損失を抑制し、ユニットを小型化しつつ既存製品同等以上の電力変換効率を目指した。②に関しては、車載製品のノイズ設計指針となる規格としてCISPR25⁽¹⁾があり、特にコンバータではAMラジオ用に使用されるMW帯(530k~1800kHz)の規格への適合が高周波化の大きな課題となる。これを踏まえ、ノイズ主要因となるスイッチング周波数を500kHz、出力ケーブルに重畳するリップル^{*1}の周波数を2MHzとし、MW帯を避けて設定することで、必要最小限のフィルタ部品で

ノイズ規格を満足できる構成とした。

また、一般にユニットを小型化していくと、発熱部品が密集するため、部品温度を許容値以下に抑える(熱成立させる)ことが難しくなる。そこで、本開発品では低背部品を選定してユニットを高さ方向に小型化し、ヒートシンクの放熱面積を確保する設計とした。これにより、発熱部品を分散配置することが可能となり、ユニットの小型化と熱成立を両立させることができる。

3. 詳細設計

3-1 回路設計

既存のコンバータで広く使われているSiデバイスとGaNデバイスの特性を表2に示す。GaNデバイスはSiデバイスと比べてスイッチング速度が速く、スイッチング損失^{*2}を抑制できる。その一方、高速動作が原因で生じるノイズが大きく、またデバイスのON/OFFが切替わるゲート閾値電圧が低いため、意図せぬデバイスのON/OFF切替わり(誤動作)が発生しやすい(図4)。そのため、Siデバイス使用時には問題とならないような、配線パターン間の結合によるわずかなノイズによっても誤動作が生じる。当社では、配線パターンの影響まで考慮したシミュレーションを行い、回路定数・配線パターンを最適化した。これにより、誤動作を防止しつつ、GaNデバイスの高速動作特性を最大限引き出すことができた。

表2 半導体デバイス特性

| | Si | GaN |
|-----------|------|------|
| スイッチング速度* | 1.0 | 3.5 |
| ゲート閾値 | 3.0V | 1.3V |

※Siを1.0とした場合

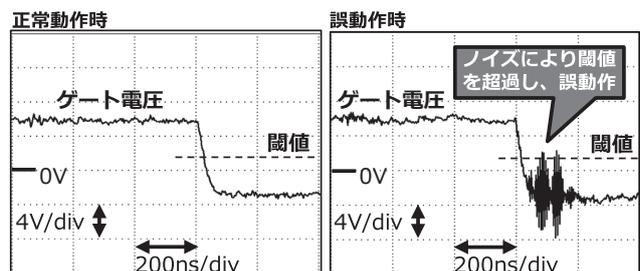


図4 GaNデバイスの誤動作波形

3-2 トランス設計

トランスのコイル構造を図5に示す。従来のコンバータでは、トランスのコイルとして丸線を使った構造が多い。しかし、この構造で高周波化すると表皮効果^{*3}により有効な

| コイル構造 | 丸線 | リッツ線 | 基板 |
|-------|----|------|----|
| 概略図 | | | |
| 損失 | × | ○ | ○ |
| コスト | ○ | × | ○ |

採用構造

図5 トランスのコイル構造

銅の断面積が減少し、損失が大きくなる。表皮効果の影響を低減する構造として、直径0.1mm程度の細線をより合わせたリッツ線構造があるが、丸線構造と比較してコストが増加してしまう。そこで、当社ではプリント基板の銅箔パターンでコイルを形成する基板トランス構造を採用した。この構造では、電子部品実装用の基板とコイルを一体成型できるため、コストを抑制できる。なおかつ、厚さ0.1mm程度の薄い導体を積層してコイルを形成するため、リッツ線同様、表皮効果の影響を受けにくく、損失も低減できる。

また、高周波用トランスの損失はコアの形状やコイルとの位置関係によっても大きく変化する。当社のリアクトル開発^{(2),(3)}で培った電磁気解析技術を活用して磁束の流れを分析(図6)し、コアからの磁束の漏れを抑える等の最適設計を行うことでトランス損失を低減した。

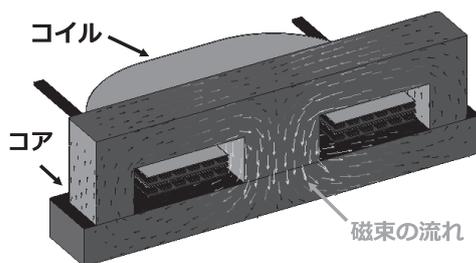


図6 トランス電磁気解析

3-3 フィルタコイル設計

フィルタコイルの構造を図7に示す。スイッチング周波数の高周波化により、フィルタコイルに必要なインダクタンス^{*4}を下げるができる。そのため、従来は必要なインダクタンスを得るため、コアに専用の銅材を巻き付ける構造としていたが、本開発品では、直線状の配線銅材にコアを被せる構造とした。これにより、配線部品とフィルタ

従来構造

新規構造



図7 フィルタコイル構造

部品を共用することができ、ユニット内部のスペースを有効活用できるため、小型化に寄与した。また、銅材を巻き付ける加工が不要となるため、製造コストも削減できた。

3-4 放熱設計

半導体デバイスの放熱構造として、部品自体が放熱用の金属材を持つリード実装構造(図8-A)や、半導体チップを高熱伝導の絶縁材上に実装するモジュール構造(図8-B)がある。しかし、これらの構造ではリードやワイヤボンディングにより、配線インダクタンス^{*5}が大きくなってしまい、GaNの高周波動作を妨げることが課題となる。一方、配線インダクタンスを極小にした構造として、部品のリードの引き出しをなくし、プリント基板上に直接実装する表面実装構造(図8-C)があるが、この構造では熱伝導の低い樹脂製のプリント基板材料が放熱経路上に介在するため、十分な放熱性能を確保できない。そこで、本コンバータでは表面実装構造のデバイス直下に金属材を配置した構造(図8-D)を採用し、配線インダクタンスを抑制しつつ放熱性を確保する設計とした。

| 構造 | (A)リード実装 | (B)モジュール |
|-----|----------|----------|
| 概略図 | | |
| 放熱 | ○ | ◎ |
| 配線L | × | △ |
| コスト | ○ | × |

| 構造 | (C)表面実装 | (D)表面実装+金属材 |
|-----|---------|-------------|
| 概略図 | | |
| 放熱 | × | ○ |
| 配線L | ○ | ○ |
| コスト | ○ | ○ |

採用構造

図8 半導体デバイスの放熱構造

4. 開発品の試作・評価結果

4-1 ユニット構造・熱特性

開発したコンバータの外観写真を写真1に示す。GaNデバイスを採用してスイッチング周波数を高周波化することでトランス、フィルタコイルを小型化し、ユニットを低背化した。出力3kWのコンバータを体格229mm×116mm×18.5mm（空冷フィンおよび突起部を含まない）で実現し、目標出力密度6W/ccを達成した。

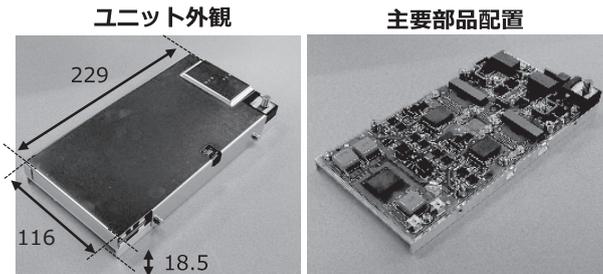


写真1 開発したDCDCコンバータ

室温環境下における温度上昇試験結果を図9に示す。主要発熱部品であるデバイスとコイル部品のみを抜粋し、冷却風からの温度上昇 ΔT を同図に示した。部品の定格温度150℃に対してマージンを持たせた135℃を上限と仮設定し、40℃の強制空冷条件で熱成立できるように、 $\Delta T \leq 95^\circ\text{C}$ を良否の判断基準とした。出力175Aでは温度上昇が飽和しており、連続動作でも熱成立する見込みである。出力200Aではデバイスが温度上がり続けているが、10分程度の動作であれば熱成立する見込みが得られた。長時間の動作が要求される場面では、温度超過を検出して出力電力を抑制することにより、デバイスを保護する。

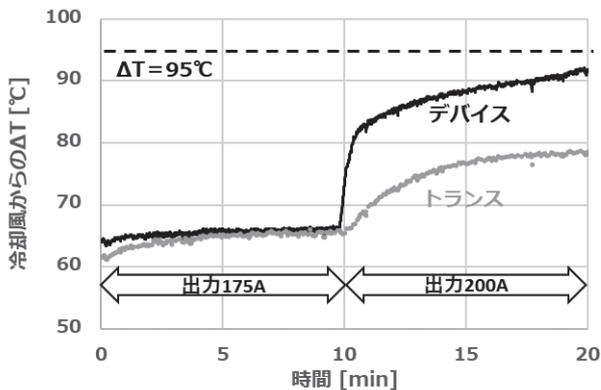


図9 主要発熱部品の温度上昇

4-2 電気的特性

コンバータの性能を判断する電気的特性として、一般的に電力変換効率、ノイズ、負荷応答特性が挙げられる。まず、入力電圧300V、出力電圧14Vで動作させた際の効率データを図10に示す。GaNデバイスの採用、高周波用トランスの最適設計により、スイッチング周波数を500kHzに高周波化しても、他社の100kHz品を上回る効率を実現できている。

次に、ノイズ特性として伝導ノイズの測定データを図11に示す。当社開発品では、500kHzに高周波化したことで他社品よりもスペクトルの間隔が広がっている。高圧入力側、低圧出力側ともにノイズレベルをCISPR25 Class3相当に抑制できている。

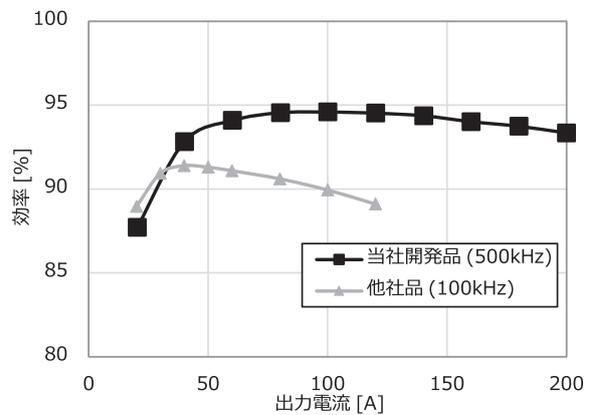


図10 効率データ

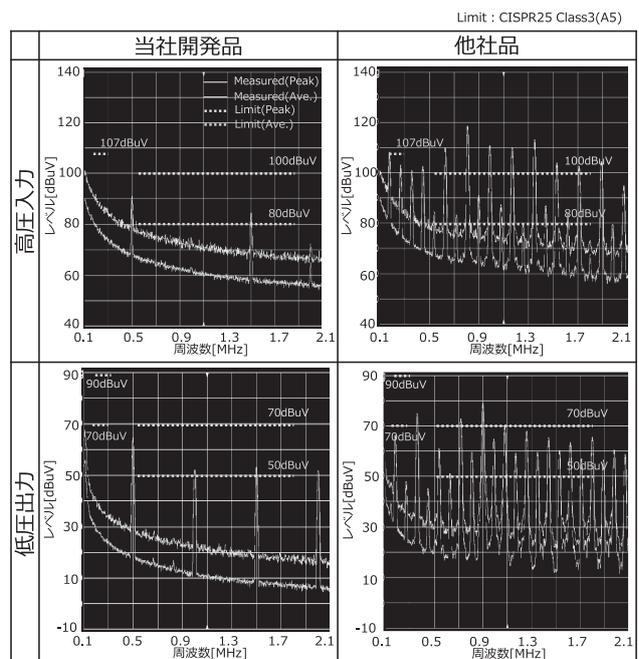


図11 伝導ノイズ特性

負荷応答特性として、負荷電流が5A→100Aに急変した際の出力電圧の変化を図12に示す。負荷電流の変化率は実使用時に想定される最大変化率を十分上回る800A/msとした。高周波化することで電圧制御の応答性を高めることができ、他社品と比べて出力電圧の変動幅、変動時間の両方を抑制できている。これにより、電圧低下により負荷機器が異常停止するリスクを低減できる。

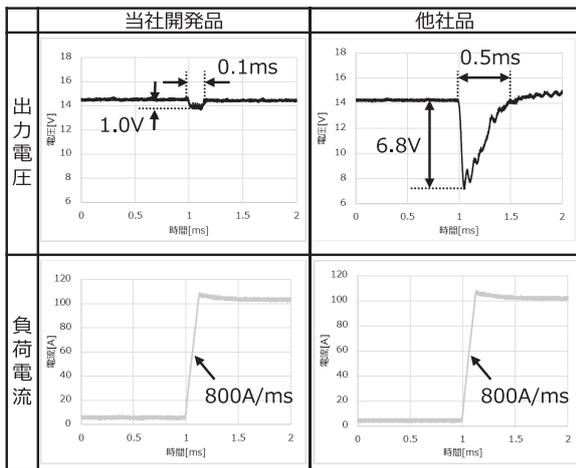


図12 負荷応答特性

5. 並列運転

コンバータを並列運転させることで、ユニット1台当りの最大出力電流より大きな負荷電流にも対応することができるが、その一方で、既存の車載コンバータはCV（定電圧）制御となっており、そのまま並列運転することは難し

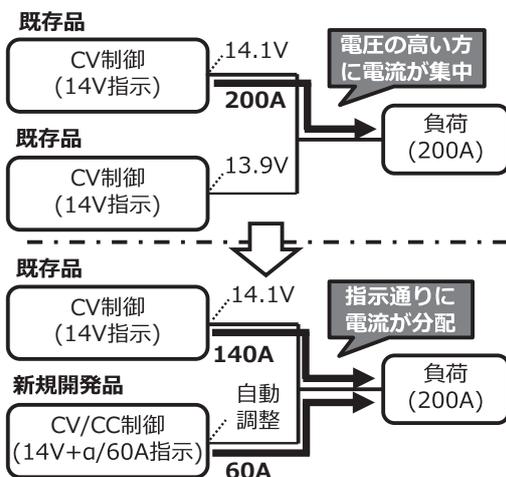


図13 コンバータの並列運転

い。CV制御では、センサ誤差により出力電圧のばらつきが生じると、電圧の高い方のユニットに電流が集中する(図13)。結果、過度な温度上昇や劣化の加速を引き起こしてしまう。

この課題を解決すべく、本開発品ではCV/CC（定電圧／定電流）制御を搭載した。この制御では、既存のCV制御ユニットよりも電圧指示値を高く設定しておくことで、出力電流が指示通りとなるよう自動で出力電圧が調整される。これにより、2台のユニットにバランスよく負荷電流を分配できる。このCV/CC制御はGa_Nデバイスを使ったコンバータに限定されず、Siデバイスを使ったコンバータにも搭載可能である。

並列運転の実機検証データとして、市場流通している既存品と当社開発品を並列運転させた際の電流波形を図14に示す。負荷分配の一例として、既存品と開発品の電流比が5:2（71%:29%）となるよう電流指示を与えた。3通りの負荷電流に対し、誤差1~2%以内の負荷分配となっており、想定通りの動作を確認できた。

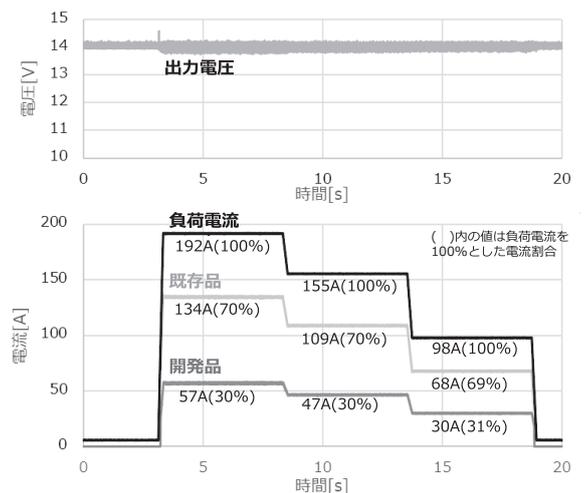


図14 並列運転の実機検証

6. 結 言

GaNデバイスを使ってコンバータを高周波化することで、市場トレンドを上回る出力密度6W/ccを実現した。開発したコンバータは高さ18.5mmの低背構造のため車両床下スペースなどにも容易に搭載することができ、既存製品と比べて自由度の高い搭載設計を可能とした。高周波化の課題であった電力変換効率、ノイズに関しても、他社品と比べて同等以上の性能を確認できており、今後は実車への搭載に向けたシステム設計に取り組んでいく。

用語集

※1 リップル

コンバータの動作により生じる電流や電圧の脈動。

※2 スイッチング損失

コンバータ内部の半導体デバイスのON/OFFを切り替える際に生じる損失。1秒間のON/OFFを切り替える回数(=スイッチング周波数)に比例して増加する。

※3 表皮効果

導体に高周波の電流を流すと、発生した磁束によって導体表面に電流が集中する現象。この現象により、電流を流すのに有効な断面積が小さくなり、損失が増加する。

※4 インダクタンス

高周波電流が流れるのを妨げる性質を持つ回路成分。インダクタンスの大きなフィルタ部品を使用することで、高周波ノイズの流出を抑制できる。

※5 配線インダクタンス

部品の端子リードや接続配線が持つインダクタンス成分。一般に、配線が細く、長くなるほど値が大きくなる。

参考文献

- (1) CISPR25:2016, Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers
- (2) 神頭卓司 他、「リアクトル開発における電磁気/熱設計技術」、SEIテクニカルレビュー第175号、pp78-83 (2009年7月)
- (3) 山本伸一郎 他、「小型・軽量昇圧コンバータ用リアクトル」、SEIテクニカルレビュー第185号、pp29-33 (2014年7月)

執筆者

田代 圭司* : CAS-EV 開発推進部



岡川 裕典 : CAS-EV 開発推進部



張 魁元 : CAS-EV 開発推進部
博士 (工学)



山田 幸伯 : CAS-EV 開発推進部 主査



立崎 真輔 : CAS-EV 開発推進部 主席



高橋 成治 : CAS-EV 開発推進部 グループ長



*主執筆者