

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：15201  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26420235  
研究課題名(和文) 新材料パワー半導体を用いたハイブリッドカー用次世代型電力変換器に関する研究

研究課題名(英文) Study of Power Conversion System for Hybrid Electric Vehicle using Wide Band Gap Power Semiconductor Device

研究代表者  
山本 真義 (Yamamoto, Masayoshi)  
島根大学・総合理工学研究科・准教授

研究者番号：60432621  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：新材料パワー半導体であるGaNとSiCの車載用電力変換器への応用を試みた。GaNパワー半導体を適用した1.6kW出力のDC-DCコンバータを作成し、駆動周波数200MHzの高周波駆動を実現することで、従来比に対して1/25の平滑キャパシタの小型化を実現できることを実証した。さらに同条件において、3.56W/ccの超高電力密度性能を実現し、GaNパワー半導体の電力変換器応用における大きな可能性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：GaN power device have been applied for the power conversion system of Hybrid Electric Vehicle. In isolated DC-DC converter, GaN power device have been applied and evaluated. The DC-DC converter has achieved 200MHz switching frequency and 1.6kW output power. Under the optimal design for the 1MHz switching frequency, the output smoothing capacitor can achieved 1/25 value of capacitor.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

2013年6月、フォルクスワーゲン社(独)から7代目となるゴルフ(5G型)が日本国内で販売開始された。この車はモジュールプラットフォーム「MQB」という、これまでの車の生産方法と全く異なった思想を持っている。すなわち、他社と自動車の各部品を共有化することで、生産過程におけるコストとエネルギーの最小化を実現している。2013年は自動車業界を産業界の柱とする我が国が、世界販売戦略に後れを取った年となった。今後、フォルクスワーゲン社を初めとし、アウディ、ポルシェ、シヨコダ、セアトといった欧州自動車メーカーは、部品の共有化をさらに推進し、その流れは車載用電力変換器にも及ぶことを示唆している。さらにこの自動車メーカー共同体には、今後、中国メーカーも参入することが表明された。こういった市場動向に対して、我が国の車載用電力変換器においては、各社が独自にそれぞれのモデルに応じた変換器を適用しており、生産ラインの多様化、各変換器モデルにおける設計の分散化等により市場の疲弊が加速しているのが現状である。そしてそれらは、電力変換器における“最適解”を見いだせていないことも大きい。最も高効率で小型化が実現可能であり、かつコストを抑えた電力変換器を設計する場合、パワー半導体、磁性体、容量素子、制御系、熱設計、ノイズ設計に及ぶあらゆる分野を横断した新しい複合領域における視点と知見が必要となり、それらを統括できる技術が我が国には存在しないのが現状である。この技術背景に追い打ちをかけるように、次世代型半導体材料である炭化シリコン(SiC)、窒化ガリウム(GaN)をベースとしたパワー半導体が台頭してきており、その技術ハードルをさらに高くしているのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では、車載用電力変換器として、特に小型軽量化を目的としたDC-DCコンバータの研究開発を研究対象とする。これは、これまで内燃式機関のみの駆動システムだった自動車が、電気システムを搭載することによりこれまでになかった電力システムを追加で搭載しなければならない状況となる。また通常のハイブリッド車は、バッテリーを2つ以上搭載している。1つは従来から搭載されている12V系の鉛蓄電池、もう1つは、電機による車両駆動を直接担う、大容量バッテリーである。我が国の大量的なハイブリッド車であるプリウスでは、現行型(4代目)において202Vのニッケル水素電池、並びに207Vのリチウムイオン電池を各グレードに応じて使い分けている。さらに、これらの2つ以上の電源を仲介する電力変換器が必要となる。この電力変換器は、これまで必要なかった装置であり、この装置に求められる性能は小型軽量化が至上課題となる。

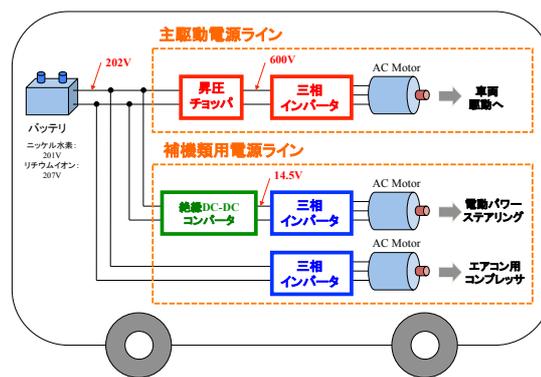


図1 ハイブリッド車用電気システム

図1にハイブリッド車における一般的な電気システム模式図を示す。200V系大容量バッテリーに対して、14.5V出力端子を持つ絶縁DC-DCコンバータが示されているが、この出力端は12V鉛蓄電池を意味する。本研究では、このハイブリッド車における2電源を仲介する絶縁型DC-DCコンバータにおいて、GaNパワー半導体を適用することで、どこまで小型軽量化が可能かについて、評価を行い、実機構築までを行うことで実証による理論との整合性確認を行うものである。

### 3. 研究の方法

車載用電力変換器の小型化に対して、多相化によるアプローチにより検証を行う。具体的にはLLCコンバータと呼ばれるソフトスイッチング電力変換器を3つ並列接続し、さらに各相の駆動位相を120°づつシフトさせることで、出力側平滑キャパシタを大幅に小型化させる手法を採用する。従来の単相における駆動と三相化させた場合の必要平滑キャパシタ容量を理論的に算出し、基本設計のベース資料とする。

また、絶縁DC-DCコンバータ(三相LLCコンバータ)における最適駆動周波数の割り出しも行う。小型化のために闇雲に高周波性能を求めるのではなく、最も小型化性能を実現可能なスイッチング周波数ポイントを理論的に算出していく。図2に、絶縁DC-DCコンバータにおけるインダクタ、トランス、平滑キャパシタの容積とスイッチング周波数が増加するに従い必要となる冷却システムの容積との関係を示す。この様に、スイッチング周波数が増加するに従い、インダクタやトランス、キャパシタといった受動素子は小型化可能となるが、スイッチング周波数の増加はスイッチング損失の増加を意味することから、パワー半導体部における冷却システムの大型化を意味する。このため、あるスイッチング周波数ポイントにおいて、インダクタ、トランス、キャパシタ、冷却システムを全て包括した電力変換器の体積は、ボトムを持つはずである。この電力変換器の最も小型化を実現可能なスイッチング周波数を割り出し、そのスイッチング周波数における実機構築

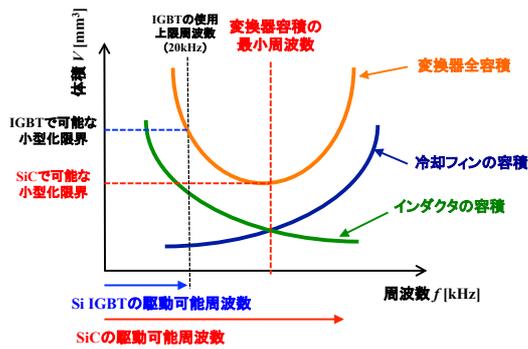


図2 周波数と電力変換器容積との関係

を実現する。

また、設計したスイッチング周波数における電力変換器構築により、定格電力の実測確認を行うことで、電力密度を算出し、本研究において構築した絶縁DC-DCコンバータにおける小型軽量化性能を明確に提示する。

#### 4. 研究成果

車載用絶縁DC-DCコンバータを対象として実機構築による実証試験を行った。ハイブリッド車として比較的高い電圧である380Vを入力電圧として設定し、出力容量を1.6kWとした。今回対象となる三相LLCコンバータの等価回路図を図3に示す。まず、絶縁DC-DCコンバータの多相化による平滑キャパシタの小型化に関する評価結果について、図4に示す。単相LLCコンバータと比較してLLCコンバータを3相化させることで大幅なキャパシタの小型化が実現できていることが確認できる。

次に、車載用絶縁DC-DCコンバータとして実機構築した三相LLCコンバータの各相のパワー半導体におけるソフトスイッチング動作の確認を行った。適用したGaNパワー半導体はパナソニック製のGaN-GIT(600V耐圧20A品)であり、ゲート駆動回路はLLCコンバータの逆導通時での損失を最小限とするキャパシタ値と抵抗値の最適化設計を行っている。この条件において、実機構築を行い、1.6kW出力時におけるスイッチング波形を図5に示す。

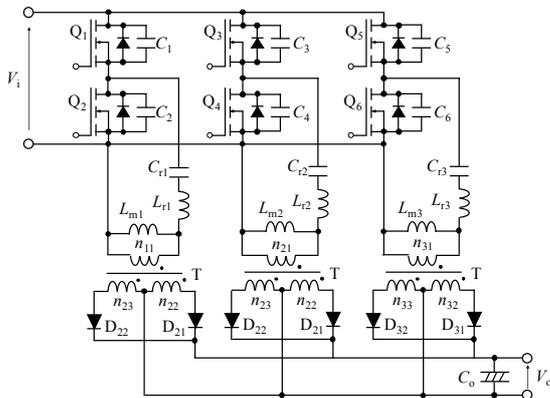


図3 三相LLCコンバータ等価回路図

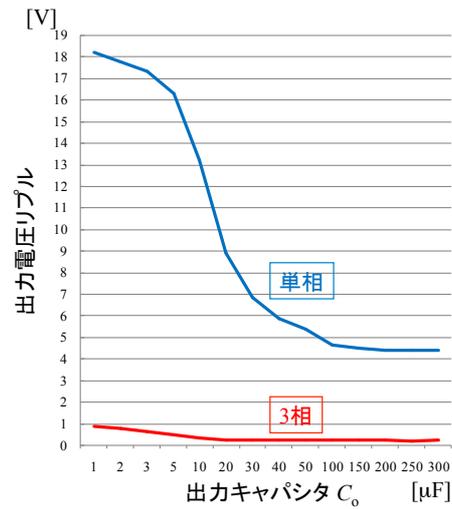


図4 出力キャパシタと電圧リップルの関係

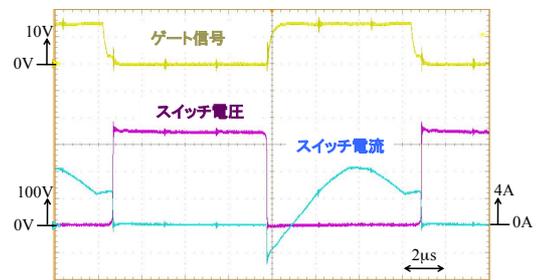


図5 GaNパワー半導体の電圧電流波形

この実測波形より、ターンオフ時にはゼロ電圧ソフトスイッチング、ターンオン時にはゼロ電圧・ゼロ電流ハイブリッドソフトスイッチングが実現できていることが確認できる。よって、スイッチング損失がほとんど発生しないことから、より高周波駆動に向いている回路方式と言える。

この基本回路条件をベースに、スイッチング周波数の最適ポイントを算出し、実機構築した実装回路を図6に示す。結果として、最適スイッチング周波数は200kHzとなり、この条件において最小体積を実現できることが分かった。この条件により実機構築を行ったところ、3.56W/ccという超高電力密度の電力変換器の構築を達成できた。

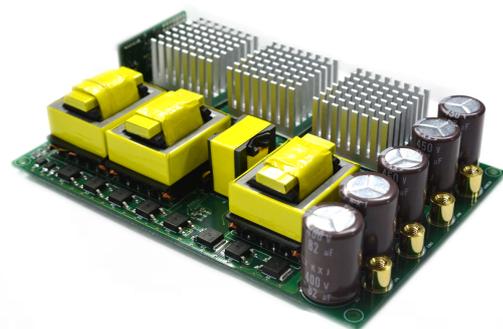


図3 三相LLCコンバータの実機外観

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3件)

- ① Wilmar Martinez, Mostafa Noah, Shun Endo, Kimihiro Nanamori, Shota Kimura, Yuki Itoh, Masayoshi Yamamoto, Jun Imaoka, and Kazuhiro Umetani, “Three-phase LLC Resonant Converter with Integrated Magnetics”, Record of IEEE Energy Conversion Congress & Expo. (ECCE), pp. 1-8 (2016)
- ② Mostafa Noah, Shota Kimura, Shun Endo, Masayoshi Yamamoto, Jun Imaoka, Kazuhiro Umetani, and Wilmar Martinez, “A Novel Three-phase LLC Resonant Converter with Integrated Magnetics for Lower Turn-off Losses and Higher Power Density”, in Proc. 32nd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition (APEC) (2017) (Accepted)
- ③ Mostafa Noah, Kazuhiro Umetani, Shun Endo, Hiroki Ishibashi, Masayoshi Yamamoto and Jun Imaoka, “A Lagrangian Dynamics Model of Integrated Transformer Incorporated in a Multi-phase LLC Resonant Converter”, in Proc. IEEE Energy Conversion Congress & Expo. (IEEE-ECCE 2017), (Accepted)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 真義 (YAMAMOTO, Masayoshi)  
名古屋大学 未来材料・システム研究所  
教授  
研究者番号：60432621