

2024 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	岡山大学 学術研究院 環境生命自然科学学域
職位または役職	助教
氏 名	石原 将貴

1. 研究題目

EV 駆動用スイッチトリラクタンスモータの高速回転を実現する GaN-HEMT インバータモジュールの開発

2. 研究目的

近年、スイッチトリラクタンスモータ (SRM) に適切にデザインされた相電流波形を供給すればトルクおよび電源電流のリップルを低減できることが明らかにされている。しかし、従来の Si 系パワーデバイスを用いたインバータでは、特に高速回転領域で、所望の相電流波形を SRM に供給するのは難しい。これは、Si 系パワーデバイスはスイッチングが低速のため高周波化が難しく、高速回転になるにつれて指令値に相電流波形を追従させるのが困難になるためである。そこで本研究では、高周波動作可能で高速回転時にも所望の相電流波形を供給可能な GaN-HEMT を適用したインバータによってこの課題の解決を試みる。図 1 に示すように、GaN-HEMT インバータは複数の GaN-HEMT インバータモジュールから成り、それぞれのモジュールは GaN-HEMT および高速スイッチングによって発生するサージ電圧を低減するために必要不可欠なスナバコンデンサから成る。しかしながら、スナバコンデンサを搭載するとモジュールの外部にある入力平滑コンデンサとスナバコンデンサの間で反共振が発生してしまうため、スナバコンデンサをモジュールに搭載するのは現実的でない。そこで、本研究では、反共振を低損失に抑制可能な新しい磁気デバイスを開発し、これを GaN-HEMT インバータモジュール内に組み込むことで問題解決を図る。提案磁気デバイスは誘導加熱の原理を応用し、反共振で発生する交流電流のみを選択的にダンピングできる。本研究によってスナバコンデンサを備えた実用的な GaN-HEMT インバータモジュールが実現できれば、SRM の用途に限らず、超高電力密度な EV 駆動用の GaN-HEMT インバータの実現が期待できる。

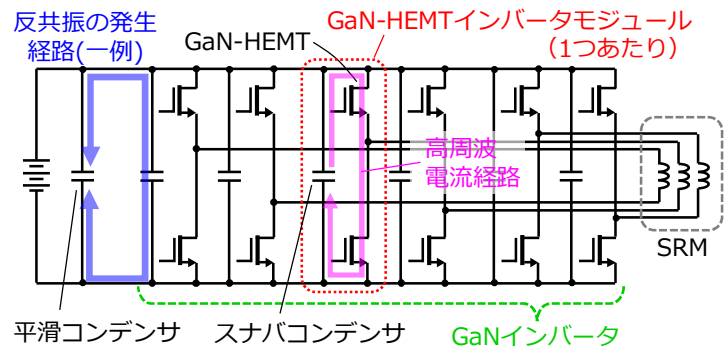


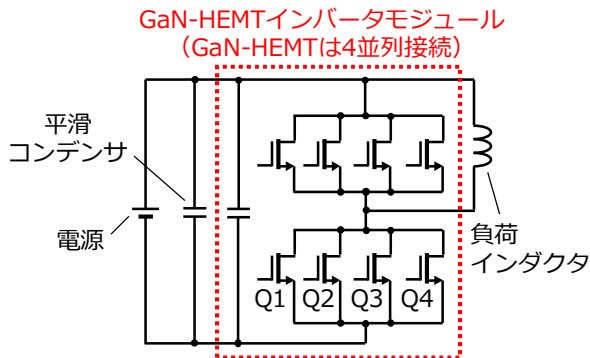
図1：GaNインバータを用いた駆動システム

図 1 に示すように、GaN-HEMT インバータは複数の GaN-HEMT インバータモジュールから成り、それぞれのモジュールは GaN-HEMT および高速スイッチングによって発生するサージ電圧を低減するために必要不可欠なスナバコンデンサから成る。しかしながら、スナバコンデンサを搭載するとモジュールの外部にある入力平滑コンデンサとスナバコンデンサの間で反共振が発生してしまうため、スナバコンデンサをモジュールに搭載するのは現実的でない。そこで、本研究では、反共振を低損失に抑制可能な新しい磁気デバイスを開発し、これを GaN-HEMT インバータモジュール内に組み込むことで問題解決を図る。提案磁気デバイスは誘導加熱の原理を応用し、反共振で発生する交流電流のみを選択的にダンピングできる。本研究によってスナバコンデンサを備えた実用的な GaN-HEMT インバータモジュールが実現できれば、SRM の用途に限らず、超高電力密度な EV 駆動用の GaN-HEMT インバータの実現が期待できる。

3. 研究内容及び成果

■ 反共振による GaN-HEMT 間の電流アンバランス現象メカニズムの解明

まず、図 2 に示すダブルパルス試験回路を用いて、スナバコンデンサと入力コンデンサの反共振が引き起こす問題を詳細に分析した。その結果、コンデンサ間の反共振がコンデンサ同士だけでなく、並列接続された GaN-HEMT にも大きな還流電流を生成することを新たに明らかにした。この還流電流は、図 3 に示すように GaN-HEMT チップ間の電流アンバランスを誘発する。GaN-HEMT は短絡耐量が低いため、このような電流アンバランスを伴う大きな還流電流の流入は許容できない。以上の知見は、反共振を抑制する磁気デバイスの必要性が従来認識されていた以上に高いことを示している。本成果は、2025 年 3 月に開催された電気学会電力技術・電力系統技術・半導体電力変換合同研究会で報告した。



※ハイサイドGaN-HEMTのゲートソース間は短絡
図2：ダブルパルス試験回路構成

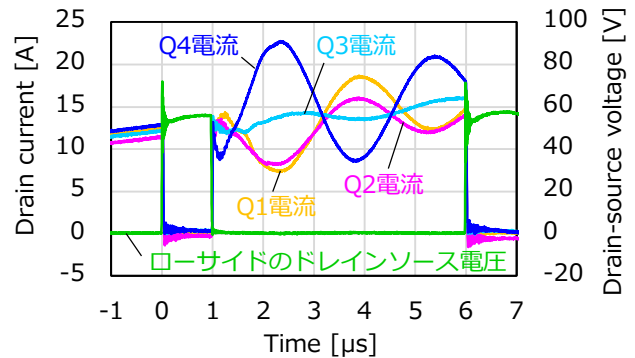


図3：反共振電流が招くGa-N-HEMT
チップ間での電流アンバランス

■ 反共振抑制磁気デバイスの試作とインピーダンス特性の解析

次に、図 4 に示すように、GaN-HEMT インバータモジュールのバスバーに実装可能な反共振抑制磁気デバイスを試作した。さらに、このデバイスの有無や金属板の材質の違いが、スナバコンデンサと入力平滑コンデンサで構成される寄生並列共振回路の特性に与える影響を、インピーダンス測定により調査した（図 5）。その結果、反共振抑制磁気デバイスを挿入すると、反共振周波数におけるインピーダンスのピークが低減することが確認された。一方で、10 kHz 程度の低周波では、デバイスの有無によらずインピーダンス特性に顕著な差は見られなかった。この結果は、反共振抑制磁気デバイスが、特定の周波数帯でのみ選択的に共振電流をダンピングし、高効率に反共振を抑制できることを示唆している。

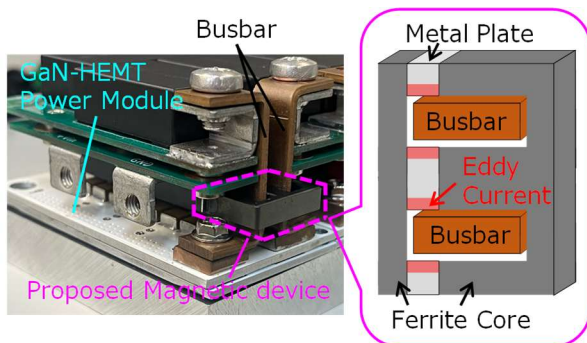


図4：反共振抑制磁気デバイスの試作

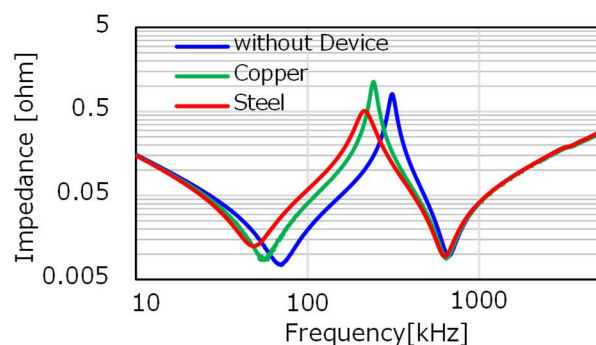


図5：インピーダンスの計測結果

■ 反共振抑制磁気デバイスの原理検証実験

次に、開発した反共振抑制磁気デバイスが実際に反共振電流を抑制できるかを、図 6 の評価回路を用いて検証した。図 7 にその結果を示す。反共振抑制磁気デバイスを適用しない場合、GaN-HEMT インバータモジュールはターンオフ直後に大きなリングングを伴う還流電流がバスバーへ流れている。一方、反共振抑制磁気デバイスを適用した場合には、リングングが明確に低減されていることが分かる。具体的には、リングング時の電流実効値を23%低減できており、これは反共振

電流によるコンデンサの発熱を約 40%低減できることを示している。以上の結果より、反共振抑制磁気デバイスが狙った通りの反共振電流抑制効果を有していることを確認できた。

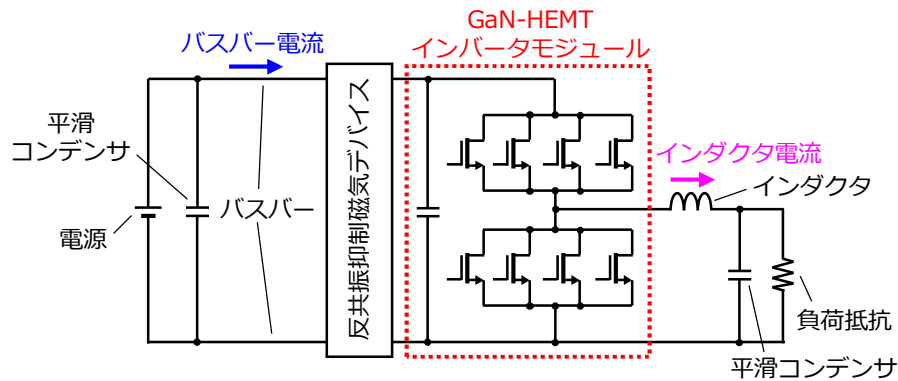


図6：反共振抑制磁気デバイス原理検証用回路構成

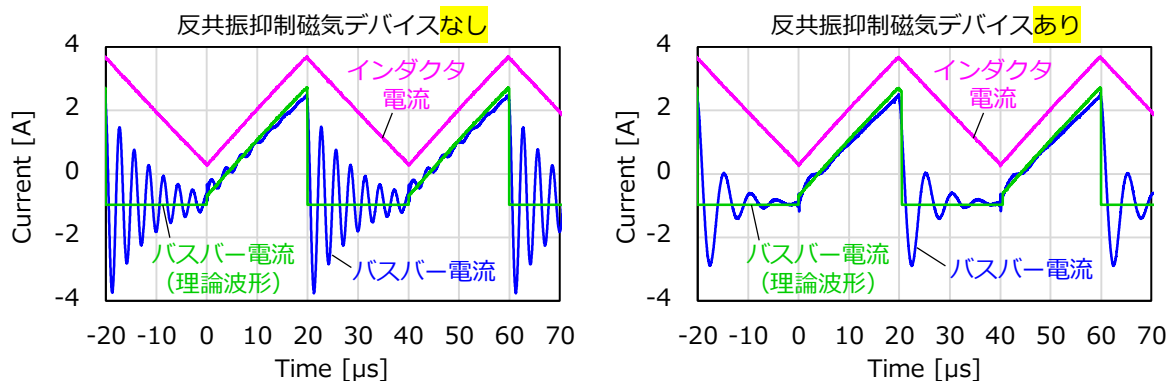


図7：反共振抑制磁気デバイスの有無によるバスバー電流の比較

4. 今後の研究の見通し

1. 改良磁気デバイスの試作

これまでに得た知見を基に、改良磁気デバイスを設計・作製する。具体的には、回路に追加する寄生インダクタンスを最小限に抑えながら効果的に渦電流を発生させ反共振を抑制するための磁性コア・金属板の材料決定および形状設計をする。また、改良磁気デバイスを搭載した GaN-HEMT インバータモジュールを試作する。

2. 改良磁気デバイスの有効性検証

インピーダンスアナライザを用いて、反共振周波数帯におけるインピーダンスの変化を、これまでに作製した従来型磁気デバイスと比較する。具体的には、「反共振を抑制する抵抗成分」を「回路に追加する寄生インダクタンス」で規格化した数値を性能指標として比較を行う。その後、本年度と同様に、降圧コンバータを軽負荷条件で動作させ、実際に反共振電流が低減されるかを実証する。

3. 定格条件での連続通電試験

改良磁気デバイスを搭載した GaN-HEMT インバータモジュールを用いてインバータ回路を構築し、定格負荷条件下での連続通電試験をする。反共振電流について、磁気デバイスの有無による比較を行い、改良磁気デバイスの有効性を確認するとともに実用化に向けた課題を抽出する。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

国内会議

- 山中駿輔, 梅谷和弘, 石原将貴, 平木英治:「金属コア基板を用いて実現した多並列 GaN パワー半導体を有する高電力密度インバータの大電力検証」電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換合同研究会, 2025 年 3 月