

令和元年8月27日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04320

研究課題名(和文) GaNパワーデバイスを用いたPWMインバータの高効率化とその応用展開

研究課題名(英文) Design and implementation of PWM inverter using GaN power devices and its applications

研究代表者

和田 圭二 (Wada, Keiji)

首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：00326018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、GaNパワーデバイスを用いたPWMインバータの高効率化を目的とした回路実装技術の研究を行い、ゲート駆動回路およびインバータ回路周辺の実装手法について検討を行った。さらに、回路の小型を想定した電流制御手法の提案を行い、その妥当性と課題について明らかにした。これらの検討事項の妥当性を確認するために、1MHzスイッチング動作のインバータ回路の動作検証を行い、さらに応用技術に関する考察を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

家電・産業機器の省エネルギー化や多機能化を実現するためには、高効率な電力変換回路の需要が今後さらに増加する。電力エネルギー利用の有効活用のためには、制御可能周波数帯域がより高くなることが要求されている。本研究では、100 kHzまでの電力を利用することを前提として、GaNパワーデバイスを用いた回路実装技術の研究、およびその実証試験を行った。以上のことより、100 kHz帯域の電力エネルギー利用に向けた可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：This research discusses a circuit implementation aiming at the high efficiency of the PWM inverter using the GaN power device. Especially, this research dealt with the implementation of gate drive and inverter circuits. Furthermore, the research proposed a current control method that assumed the small size of the circuit, and clarified its validity and issues. In order to confirm the validity of these considerations, the experimental results are verified the operation of the inverter circuit with 1 MHz switching operation, and further discussed the application technology.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：GaNパワーデバイス PWMインバータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

パワーエレクトロニクス回路の代表例であるインバータは数百 W ~ 数 MW クラスの電力エネルギー変換を高效率で行うことができることから、家電・産業機器・輸送機の分野において広く実用化されている。近年では、自動車用ワイヤレス電力伝送(WPT) や家電・産業機器で使用されている誘導加熱装置を対象として 100 kHz 帯域の周波数を適用した電気エネルギー利用の普及拡大が期待されている。従来、100kHz 帯域の電力伝送には、矩形波インバータと共振回路を組み合わせ、エネルギー伝送を行う方式が一般的に採用されている。そのため、電力変換回路のスイッチング周波数が共振回路によって制限されるために出力可能周波数範囲が狭いという課題がある。これらの課題を解決するためには、スイッチング周波数 1 MHz のインバータに PWM 変調を適用して 100 kHz 帯域の正弦波交流電流を直接出力することによって解決可能である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、100 kHz 帯域での電気エネルギーの利用の普及促進を目的とした高周波スイッチングインバータの開発とその応用分野拡大に向けた研究開発である。具体的な目標は、GaN (窒化ガリウム) パワーデバイスを用いて 1 MHz スwitching の PWM インバータを電力変換効率 90%以上で実現する回路を開発することである。本研究では、GaN パワーデバイスを用いて高效率電力変換器を実現し、実用化へ向けた研究を実施する。

3. 研究の方法

1 MHz スwitching PWM インバータを設計製作するために、GaN パワーデバイスを用いた実装技術研究と効率 90%以上を実現できる回路を設計・製作する。また、PWM インバータを対象にして、リアルタイム高速フィードバック制御を実現するためのハードウェア (センサ・AD コンバータ・デジタル制御器) の課題について検討する。次に、デジタル制御装置を含めた具体的な回路実装を行い、インバータと組み合わせることによってフィードバック制御性・安定性に関する実証試験を行う。最後に本研究課題の有効性と実用化に向けた課題を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 回路実装技術研究

本研究で対象とする電力変換回路では、従来回路のスイッチングスピードに対して非常に高速になるために、基板配線パターンの詳細な設計が必要となる。そこで、電力変換回路とパワーデバイスのゲート信号周辺配線の関係性について検討を行った結果、高速スイッチング時には相互インダクタンスが大きく影響を与えることを明らかにした。すなわち、インバータ回路のスイッチング時に生じる、高速な電流変化によって発生する磁束がゲート駆動回路内に誘導し、スイッチング速度が変化することを明らかにした。

そこで、回路内に存在する相互インダクタンスを考慮した基板設計手法を検討し、GaN デバイスが ON と OFF に変化するそれぞれにおいて状態において最適な相互インダクタンスが異なることを明らかにした。回路内の相互インダクタンスを容易に変更させるために図 1 に示すようにダイオードを用いる回路実装手法を提案し、スイッチング損失低減とノイズ低減を両立できる回路実装手法を提案した。その結果、図 2 に示すように本研究で提案するゲート駆動回路を適用することによって、高速スイッチングを実現しながらサージ電圧を低減できることを降圧チョッパ回路を用いた実験により明らかにした。

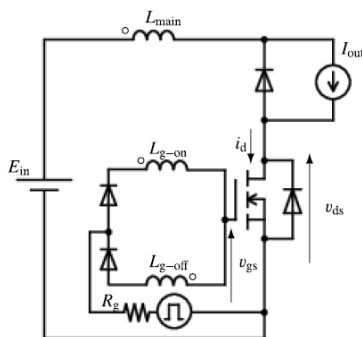


図 1 相互インダクタンスを考慮したゲート駆動回路

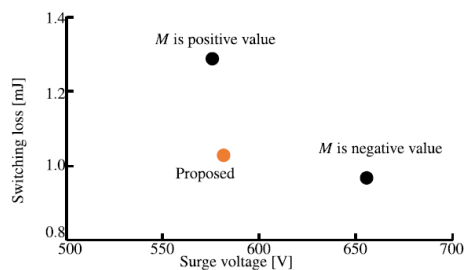


図 2 相互インダクタンスを用いたゲート駆動回路の実験結果

(2) 電流フィードバック手法に関する研究

次に、PWM インバータの出力電流フィードバック手法について検討を行った。ここでは、回路の小型化することを目的として図 3 に示すように各パワーデバイス近傍に電流センサを接続する手法を提案し、その有効性を検討した。

具体的には、インバータ動作と電流サンプリング手法について検討を行い、ある一つのパワー

デバイスのパルス電流のみを検出することで出力電流の制御が可能であることを示した。また、単相 PWM インバータを用いて本研究で提案するサンプリング手法の妥当性を実験により明らかにした。しかしながら、パルス電流をサンプリングするため、電流センサの挿入位置により電流サンプリング時にスイッチングのノイズによる影響を受けるおそれがあることを実験により示した。そこで、単相インバータで使用される 4 つのパワーデバイスのうち、2 つの電流をサンプリングし電流制御することが実際の回路において安定動作のために必要であることを図 4 に示す実験結果により明らかにした。

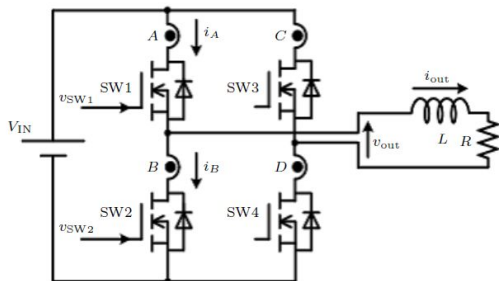


図 3 モジュール内蔵センサを含めた PWM インバータ回路

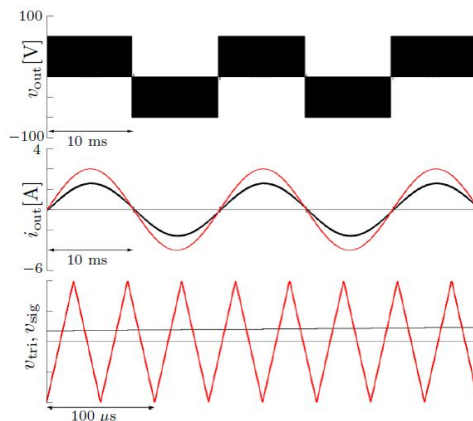


図 4 電流フィードバック制御した場合の各部の実験波形

(3) 1MHz PWM インバータ動作駆動検証

GaN パワーデバイスを用いた 1 MHz スwitching 可能な PWM インバータの試作・評価を行った。ここでは、Si デバイスを利用した場合と比較を行うために、switching 周波数を可変させて実験を行った。GaNFET を用いた 1 MHz switching の PWM 動作試験においては、高速 switching 可能なゲートドライバ選定およびインバータ回路とゲート駆動回路周辺の回路実装手法での検討結果を考慮した回路設計を行った。図 5 にインバータ回路動作時の測定結果を示す。Si デバイスを使用する場合に比べて GaN デバイスを使うことで大幅に効率が上昇していることが確認できる。一方、どちらの場合も switching 周波数が増加することによって効率が低下している。単相インバー回路の場合は、その出力端の等価 switching 周波数はデバイスの switching 周波数に比べて原理的に 2 倍となる。すなわち、500 kHz switching 周波数は等価的に 1 MHz 動作と等しい。以上の実験結果から、本研究では目標通りに 1 MHz switching で 90% 以上の効率を達成することができた。

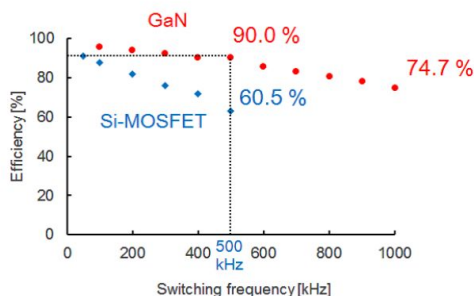


図 5 PWM インバータ回路の効率測定結果

一般に、インバータ回路ではデジタル制御装置で生成した PWM 信号は光ファイバを通して GaN デバイスのゲート駆動回路の信号が伝送される。しかしながら、市販の光ファイバでは、伝送においてパルス波形のひずみと時間遅延が生じる結果、実回路動作状況においては約 250 ns のパルス短縮が起きる。この値は、1 MHz 駆動においては重要な遅延要素となる。そこで、デジタル制御装置内で事前にこの短縮時間を考慮したパルス発生回路を実装し、光ファイバでのパルス短縮に対する課題解決を行う必要がある。

(4) 応用展開

電力変換回路の利用用途拡大に伴い、使用される周波数範囲も広がってきている。本研究では 100 kHz 以下の周波数での電力エネルギーの利用の観点から考察を行う。

現時点においては、20 kHz ~ 100 kHz の誘導加熱装置が共振回路をベースとして利用されているために、その動作範囲に制約がある。ここで、加熱対象が要求する熱量の精密制御を行う

ためにはPWMインバータの適用が必要になると考えられる。さらに、自動車用非接触給電装置においても、現時点では85kHzの周波数の利用が想定されている。これについても同様に共振回路での利用が前提であるために動作範囲に制約があるために、PWMインバータの適用については十分に検討される事項であると考えられる。また、近年では、100,000rpmを超える回転数の高速モータの研究開発も行われている。このモータにおいてもkHzオーダの正弦波電流を流すことによって効率の良いモータ駆動が想定されるため、PWMインバータの需要は非常に高いと想定される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Keiji Wada, 「Circuit implementation of power converter for high-speed switching operations」, Chinese Journal of Electrical Engineering, 47-52, 2018
緒形航, 和田圭二, 「サージ電圧抑制とスイッチング損失の低減を目的とした相互誘導を利用したゲート駆動回路実装」, 電気学会論文誌D, 135-140, 2018

〔学会発表〕(計6件)

Kensuke Suzuki, Keiji Wada, 「Current Control using Pulse Current Sampling Considering both Sampling Points and Sensor Positions for Single-Phase Inverter」, IEEE APEC, 2019
Kensuke Suzuki, Keiji Wada, 「CURRENT CONTROL OF POWER CONVERTER USING CURRENT SENSORS INSIDE POWER MODULE FOR SMART GRID APPLICATION」, AFORE, 2018
鈴木謙介, 和田圭二, 「パルス電流サンプリングによる単相インバータの電流制御」, 電気学会半導体電力変換研究会, 2018
前田宏樹, 和田圭二, 「1MHzスイッチング単相PWMインバータの動作検証」, 電気学会産業応用部門大会, 2017
Ko Ogata and Keiji Wada, 「Influence of induced voltage noise on switching characteristics for a power converter circuit」, URSI AP-RASC, 2016年
Luu Tien Duc and Keiji Wada, 「Experimental Verification of 1MHz PWM Inverter for Generating High Frequency Sinusoidal Current」, IEEE ECCE Asia, 2016年

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

和田 圭二 (WADA, Keiji)

首都大学東京 システムデザイン研究科・准教授

研究者番号: 00326018