

Title	GaN-HFETを用いたΦ2級インバータ回路による絶縁形DC-DCコンバータに関する研究
Author(s)	柳澤, 佑太
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76556
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (柳澤 佑太)

論文題名

GaN-HFETを用いたΦ2級インバータ回路による絶縁形DC-DCコンバータに関する研究

論文内容の要旨

IoTや分散電源、再生可能エネルギーの普及に伴い、スイッチング電源を用いた機器が急速に増加している。スイッチング電源は、パワーエレクトロニクスの要素を集合させたものであり、パワーエレクトロニクスが電源の核心を決めるといっても過言ではない。従来のパワーエレクトロニクス要素技術を用いたスイッチング電源は、受動制御などの古典的手法を使っているため、大型かつ大重量であり、その小型化が急務である。また、半導体デバイスの発展も目覚ましく、1960年代に開発されたサイリスタから始まったスイッチングデバイスの開発は、現在まで発展の勢いが衰えることなく、盛んに進められている。現在では、次世代半導体材料である炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)を用いたスイッチングデバイスが広く普及し始め、その普及とともにスイッチング電源の性能も大きく向上している。ただし、次世代スイッチングデバイスをただ単に適用するだけでは、その性能が真に発揮されないため、適用効果を最大限に発揮できる回路・手法・制御を検討する必要がある。

本研究では、次世代スイッチングデバイスであるGaN-HFET(Gallium Nitride Field Effect Transistor)を用いて、Φ2級インバータ回路による絶縁形DC-DCコンバータの設計法および種々の特性、応用法や実用化に向けた課題などについて検討した。Φ2級インバータ回路は、高性能かつ小型・軽量化が可能な1石形インバータである。本回路はE級インバータ回路をベースに、スイッチングデバイスのドレイン-ソース間に第3次高調波を注入するための共振タンクを追加した構成をとる。Φ2級インバータ回路はその回路トポロジより、ソフトスイッチングが達成される。よって、スイッチング電源の大部分の体積・重量を占める受動部品の小型・軽量化を目的としたスイッチング周波数の増加に伴う、スイッチング損失の増加は問題とならない。また、スイッチングデバイス1つでインバータ回路が実現されることから、ハーフブリッジインバータやフルブリッジインバータで困難とされる、高周波領域における上下アームのデッドタイム挿入や調整が不要となる。そのため、数十MHz程度の高周波でも容易にスイッチングが可能である。

また、GaN-HFETはその物理的特性から、低オン抵抗、高速スイッチング特性を有する。そのため、Φ2級インバータ回路のような高速スイッチングが可能な回路に対して適用することが、GaN-HFETの適用効果を最大限に発揮できると考えられる。Φ2級インバータ回路ではスイッチング損失が発生せず、熱損失が抑えられるため、電力変換効率の向上が可能になるだけでなく、ヒートシンクの体積削減も可能である。GaN-HFETは低オン抵抗特性を有するため、スイッチング損失削減に加え、導通損失の削減も可能である。また、一般的に、GaN-HFETのドレイン-ソース間耐電圧は、従来のシリコン(Si)MOSFETと比べ、やや低い。E級インバータ回路では、入力電圧の約3.6倍がスイッチングデバイスのドレイン-ソース間に印加される。一方で、Φ2級インバータ回路では約2倍に抑えられ、同じスイッチングデバイスを適用した場合、入力電圧をE級インバータと比べ約1.8倍まで増加可能であるため、GaN-HFETの耐電圧が低いことによる影響を緩和可能である。

本論文では、GaN-HFETを用いたΦ2級インバータ回路による絶縁形DC-DCコンバータに関して、設計法や負荷特性、応用に向けた各種課題について述べた。はじめに、Φ2級インバータ回路の構成および特性を示し、その設計法を示した。Φ2級インバータ回路は直流から交流へ変換するインバータ回路であるが、本回路を一般的なスイッチング電源で他用される回路の一つである絶縁形DC-DCコンバータ構成に拡張する手法およびその設計法について示した。また、GaN-HFET適用時と従来のSi-MOSFET適用時を比較し、GaN-HFET適用の優位性を明らかにした。さらに、実用化を考慮するうえで必須であるΦ2級インバータ回路の静特性・動特性を含んだ負荷特性についても検証した。また、さらなる応用として、始動時におけるピーク電圧抑制手法や、インターリーブ方式の適用、Φ2級インバータ回路を用いた絶縁形双方向構成とするDC-DCコンバータ回路についても検討した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (柳 澤 佑 太)			
	(職)	氏	名
論文審査担当者	主 査	教授	高井 重昌
	副 査	教授	舟木 剛
	副 査	教授	牛尾 知雄
	副 査	教授	白神 宏之
	副 査	招へい教授	阪部 茂一

論文審査の結果の要旨

本研究では新しい半導体GaNを用いたスイッチングデバイスの一つであり、低オン抵抗および高速スイッチング特性を有するGaN-HFET(Gallium Nitride Hetero-structure Field Effect Transistor)の適用効果を最大限に発揮するために $\Phi 2$ 級インバータに着目し、適用手法や制御について検討している。 $\Phi 2$ 級インバータ回路は 1 石形インバータで、E 級インバータ回路をベースにスイッチングデバイスのドレイン-ソース間に第3次高調波を注入するための共振タンク回路を追加して半導体素子への印加電圧を低減する構成をとる。すなわち、E 級インバータでは電源電圧の約 3.6 倍の電圧が半導体素子へ印加されるのに対して $\Phi 2$ 級インバータでは2倍の電圧に抑制されるので、素子の耐圧を下げることができ、GaN-HFETに好適である。 $\Phi 2$ 級インバータ回路ではソフトスイッチングが達成されるためスイッチング周波数の増加に伴うスイッチング損失の増加は問題とならないため、高周波スイッチングが容易に適用できる。また、スイッチングデバイス1個でインバータ回路が実現されることからハーフブリッジインバータやフルブリッジインバータで高周波スイッチング動作において困難とされる上下アーム短絡防止のデッドタイム挿入や調整が不要となる。そのため、数十MHz 程度の高周波でも容易にスイッチングが可能である。本研究では $\Phi 2$ 級インバータを絶縁形DC-DC コンバータ構成に拡張する手法およびその設計法について示し、GaN-HFET 適用時と従来のSi (シリコン) MOSFET 適用時を比較し、GaN-HFET 適用の優位性を明らかにしている。また、絶縁形DC-DC コンバータ構成の $\Phi 2$ 級インバータ回路の負荷特性について、静特性および動特性の検証を行っている。さらに、始動時におけるピーク電圧抑制手法やインターリーブ方式の適用による負荷電力の増加、双方向の電力電動が可能な絶縁形DC-DC コンバータ回路についても検討している。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) GaN-HFET を適用した $\Phi 2$ 級インバータ回路はスイッチング周波数13.56MHz のような高周波領域でも動作が容易であることを計算機シミュレーションおよび実験にて確認している。
- 2) Si-MOSFET 適用時はSi-MOSFET の有する寄生容量のうち出力容量の大きな変化が影響し、スイッチング周波数1MHz 以上の高周波では動作が困難であることを示している。
- 3) $\Phi 2$ 級インバータ回路を用いた絶縁形DC-DC コンバータ回路の構成および設計法を提案し、スイッチング周波数13.56MHz の高周波領域において、その有用性を計算機シミュレーションおよび実験にて確認している。
- 4) 出力電力25Wの $\Phi 2$ 級インバータ回路を用いた絶縁形DC-DC コンバータ回路において、入力電圧40V時に電力変換効率85.41 %を達成している。
- 5) 絶縁形DC-DC コンバータ構成を含む $\Phi 2$ 級インバータ回路の負荷特性について調査し、 $\Phi 2$ 級インバータ回路は共振を用いた電力変換回路であるため適用可能な負荷範囲に制約があることを計算機シミュレーションおよび実

験にて確認している。

- 6) Φ 2 級インバータ回路を用いた絶縁形DC-DC コンバータ回路の動的負荷特性について検証し、回路動作中に負荷をステップ状に変化させた場合においても回路は理想的な動作が継続されることを実験にて確認している。
- 7) Φ 2 級インバータ回路運転始動時に発生するピーク電圧を抑制する手法について検討し、従来のRCD スナバ回路の挿入手法に加え、始動時のスイッチングパターンを調整する手法について提案し、その有効性を評価している。
- 8) Φ 2 級インバータ回路の実用化を考えたいうえで懸念事項となる、適用可能な負荷抵抗の範囲制約、大きな入力電流リップル、および出力電力の制限を解決するため、インターリーブ構成とする Φ 2 級インバータ回路を用いた絶縁形DC-DC コンバータを提案し、計算機シミュレーションおよび実験にてその動作検証を行っている。その結果、上記の懸念事項はいずれも解消され、 Φ 2 級インバータ回路は実用的な回路であることを証明している。
- 9) 双方向の電力融通が可能な絶縁形DC-DC コンバータを構成する Φ 2 級インバータ回路の構成法について検討し、計算機シミュレーションを用いてその動作確認を行っている。

以上のように、本論文は高周波スイッチングデバイスとして開発されてきたGaN-HFETデバイスの特長を最大限に発揮する応用について Φ 2 級インバータ回路に着目し、広範囲の適用が考えられるDC-DCコンバータへの応用を想定して実用上の課題を解決し、GaNパワーデバイスを用いたDC-DCコンバータの高集積化への有益な知見を与える内容となっており、この分野の技術の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。