

京都大学	博士（工学）	氏名	宅野 嗣大
論文題目	High Frequency Switching of SiC Transistors and its Applications to In-home Power Distribution (SiC トランジスタの高周波スイッチングとその家庭内電力配電への応用)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>現代社会は、電力供給と情報通信技術に依存している。電力供給をめぐっては、地球環境問題やエネルギー転換の観点から、従来の電力会社が運営する大規模な発電所だけではなく、小規模な太陽光発電施設や風力発電装置などの導入が進んでいる。家庭や小規模なコミュニティにおいても、太陽電池の設置や、燃料電池、風力発電の導入が進められている。これらの電源には出力が周囲環境に影響されやすく、電圧や周波数に変動が生じやすく、電圧や周波数が商用電源と一致しないものもある。一方、負荷となる電気機器の中にはバッテリーを備えるものがあり、全ての機器に対して必ずしも電圧や周波数の安定した商用電源から電力を供給する必要はない。そこで、ある負荷に対して適切な電源からの電力を自動的にルーティングすることを提案し、この手法を実現するハードウェアを製作した。提案手法は、負荷が要求する電力や電源が供給できる電力の情報を電力と共に伝送する。そのため、情報を伝送すると同時に電力をスイッチング制御する装置には、近年研究が進められている高周波特性に優れた SiC 半導体素子の適用の検討が不可欠となる。</p> <p>本論文は、SiC 半導体素子の高周波スイッチング応用、および負荷と電源の特長に応じた電力ルーティングの2つの観点から、電力の情報に基づいた任意の電源負荷間の電力ルーティング方式を論じた結果をまとめたものであって、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景、意義を述べている。また周囲状況および先行研究についてまとめている。</p> <p>第2章では、ノーマリオン型デバイスを MHz 帯域の高周波でスイッチングするためのゲートドライブ回路の開発、および動作の検証を行なっている。半導体スイッチを駆動するためには、グラウンドレベルの変換やゲート電流の増幅のために一般的にゲートドライブ回路が用いられる。制御回路が、大電流をオン・オフする主回路から発生するノイズの影響を避けるため、絶縁型のゲートドライブ回路がよく用いられる。本研究では、高周波信号の空間伝播による絶縁を用いたドライブ IC を採用し、IC と半導体素子の接続方法を改良することにより、ノーマリオン型デバイスをノーマリオフ型デバイスと同様の論理で駆動できる回路を開発した。これは、従来の制御論理を変更無く使用できることを意味し、回路応用上極めて有用である。開発したゲートドライブ回路を用いた実際の SiC JFET の駆動実験において、15MHz までの動作を達成した。</p> <p>第3章は、SiC JFET のハードスイッチング回路におけるスイッチング特性を検討している。第2章で検討したゲートドライブ回路を用いて、ノーマリオン型 SiC JFET を 30W の抵抗負荷のもとで駆動し、15MHz までの動作を確認した。実験によって得られた電流、電圧波形から、スイッチングに伴うリングング、オーバシュートなどノイズの原因となり得る現象が生じることがわかった。これらのうち一部の現象の発生原因を、回路の寄生インダクタンスと半導体素子の接合容量の共振であると特定した。また、スイッチング波形を周波数領域で解析し、広い周波数帯域にスペクトルが拡散</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	宅野 嗣 大
<p> するため、ノイズ対策が難しいことがわかった。さらに、周波数ごとのスイッチング損失の検討により、リング周波数に近いスイッチング周波数を設定すると、共振スイッチングと類似の特長が得られ、高周波のスイッチングであっても効率が良くなる条件が見出せることがわかった。 </p> <p> 第4章は、第3章で得られた結果を踏まえ、電力ルーティング装置への応用に向けて、効率向上、ノイズ抑制のため、SiC JFET を適用したスイッチング回路においてソフトスイッチングを実現する回路構成を実験的、数値的に検討した。本研究では、ソフトスイッチング回路として共振型回路の一種であるE級電力増幅回路を検討し、2MHz、5Wのソフトスイッチングを実験において確認した。実験結果から、共振スイッチングにより、周波数領域においてハードスイッチングに比べ高調波のスペクトルが減少することを確認した。しかしながら、回路に用いたインダクタの等価直列抵抗により損失が発生し、回路全体としては期待される効率は得られなかった。実装において、回路動作は配線や素子の寄生要素に大きく影響を受けるため、実際に回路を動作させながら回路中の素子の値を微調整する必要がある。本研究では、回路動作を数値的にシミュレートし、予め設計段階で寄生要素の影響を見積もることを試みた。設計値および使用素子の実測値を基に回路方程式を解析した結果、概ね実験波形に近い解析波形が得られ、事前に寄生要素による影響の見積もりが可能であることを示した。 </p> <p> 第5章は、負荷が要求する電力の情報と、電源が供給できる電力の情報を元にした、任意の電源から負荷へ電力を供給する、オンデマンド型の電力の供給法について提案した。また、実際に、情報を元に自動的に電力をルーティングする装置を設計、製作し、その動作原理を実験により確認した。電力のルーティングを実現する装置として、交流回線交換方式と直流パケット交換方式の2種類のハードウェアを検討した。前者は電源負荷間の経路を空間的に分割することで、後者は時間的に分割することでルーティングを行うものである。交流回線交換方式は、既存の交流配電システムにおいて電力線通信(PLC)による情報伝送を応用してルーティングを実現する方式である。一方、直流パケット交換方式は、情報通信の手法に倣い電力を小単位に分割し、その前後に高周波信号によるヘッダやフッタによって情報を付加した電力パケットを用いて配電を行う新しい方法である。両手法を実現するハードウェアを設計、製作し、適切な負荷条件の下でルーティングの実験を行った結果、設計通り電力を供給できることを確認した。これらのオンデマンド型電力供給法を使用することで、再生可能エネルギーを最大限に活用する配電構成が可能となり、本研究は、ハードウェアの開発によりその実現の可能性を示した。 </p> <p> 第6章は結論であり、本論文で得られた成果を要約するとともに、今後の研究課題について言及している。 </p>			

氏名	宅野 嗣大
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ワイドバンドギャップ半導体 SiC を用いたパワーデバイスの高周波スイッチングを実現する回路を設計し、設計回路を用いて高周波スイッチング時のデバイス特性を測定し、従来の Si 製パワーデバイスを超える周波数での動作の可能性を示すと共に、高周波スイッチングの特性を活かした新たな電力伝送方式への応用を検討した一連の研究の成果をまとめたものである。本論文により得られた主要な結果は以下の通りである。

1. ノーマリオン型パワーデバイス SiC JFET に関して、制御論理がノーマリオン型素子と同等に扱える絶縁型ゲートドライブ回路を提案し、ノーマリオン型デバイスを制御信号が途絶えた場合でも安全に扱うことを可能にした。さらに、この回路は絶縁に光デバイスではなく電波によるゲート駆動信号伝達を行い、MHz 帯域におけるスイッチングが実現できることを示した。
2. SiC パワーデバイスに関して、数 10W の負荷を 1MHz 以上の周波数でハードスイッチングする回路を設計し、スイッチング時の電圧、電流波形を測定した。デバイスの出力容量とスイッチング回路の寄生インダクタンスの実測値に基づき、測定波形に現れるリングングがこれらの共振によって引き起こされることを明らかにした。また、測定波形の周波数解析により、スイッチング時の高調波の不要放射が電磁障害を引き起こす可能性を指摘した。
3. スwitchングに伴う不要放射を抑制するために、E 級スイッチング回路を用いて、ソフトスイッチング条件での回路動作を検討した。回路やデバイスの寄生要素が E 級回路の定数に与える影響を検討し、回路設計における指針を得た。また、動作時の電圧、電流特性の周波数解析に基づき、ソフトスイッチングにより各高調波成分が抑制され、高周波スイッチング時の電磁障害についてハードスイッチングに比べ優位性があることを明らかにした。
4. 電力の高周波スイッチングの応用として、電力と情報の同時伝送を提案し、電力パケットによる家庭内の電力伝送システムを検討した。提案システムを実現する 2 種類のハードウェアを設計、製作し、パケットに付加された情報に従ってパケットの振り分けが可能であることを示した。

上記のように、本論文では SiC パワーデバイスの高周波スイッチング動作を明らかにすると同時に応用回路の検討を行ったものであり、SiC パワーデバイスのスイッチング動作の基礎的な研究から、回路応用および家庭内配電システムへの具体的な展開を図った極めて独創的な成果と言え、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 1 月 23 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。