

京都大学	博士 (工学)	氏名	高山 創
論文題目	Digital Active Gate Drive System for Silicon Carbide Power MOSFETs (シリコンカーバイドパワー-MOSFETのためのデジタルアクティブゲート駆動システム)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、電力変換回路の小型化、高電力密度化に寄与することが期待されるシリコンカーバイド(SiC)パワー半導体素子の性能を引き出すため、デジタルアクティブゲート駆動(DAGD)技術の開発を行ったものである。SiCパワー半導体素子の優位性である高速スイッチング特性の応用には、微小な回路寄生成分による駆動への影響が課題となる。本論文はこのような課題等に対して、新たなゲート駆動方法を提案し開発した結果をまとめたものである。本論文は6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究の背景、意義、関連研究の状況をまとめている。電力変換回路にワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスであるSiC MOSFETを応用することで、回路の小型化、高電力密度化を実現するにあたって、アクティブゲートドライブ(AGD)の適用に着目すると共にその汎用性や設計技術への可能性を述べている。</p> <p>第2章では、AGDの考え方に信号領域で用いられるデジタル・アナログ変換回路技術を適用したデジタルアクティブゲートドライブ(DAGD)のコンセプトを提案している。そして提案の妥当性を検証するため、回路構成の検討および回路実装による動作検証を行った。複数ビットの入力信号を電圧値へ逐次変換することにより、素子の駆動に適した電圧波形を生成できることを確認し、DAGD提案の妥当性と有効性を確認した。</p> <p>第3章では、提案したDAGDの機能を活かした電力変換回路のシステム設計に資する検討を行っている。ハードウェア自体の変更が避けられないアナログ型AGDに対してDAGDは入力信号によりその動作を自由に変更できる優位性がある。DAGDの回路実装後に様々な信号パターンを試行して最適化するソフトウェア上の検証と、信号パターンの回路への入力インターフェースを開発することにより並列化し、デジタルツイン構造を持つDAGDの動作最適化システムを開発した。同システムをSiC MOSFETのスイッチング特性の評価に用いられるダブルパルス試験に適用し、シミュレーションおよび実験により最適解の分布とAGD動作波形についてMOSFETのゲート電圧依存特性の観点から検討を加えた。その結果、素子特性のばらつきや回路条件の変化が生じて、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いたアルゴリズムにより最適なスイッチングが容易に実現できることを明らかにした。開発したシステムは、異なる動作条件や素子の型番の違いに対しても適用でき、デジタルツインが設計者の回路設計のノウハウやスキルによらず、計算機の援用によって汎用的な手法で最適解を得ることを可能にすることを明らかにした。</p> <p>第4章では、これまでの検討で用いた抵抗分圧による任意波形生成DAGDがゲート駆動回路に生じる損失を無視できず高周波動作に制約が生じることから、新たにハーフブリッジ構造のモジュールを直列接続したDAGD回路を開発している。同構造は抵抗分圧の構造に比べて、ゲートの導通時のバイアス電圧を調整できる機能を追加で有することから、MOSFETの並列動作に対して適用できる。本章では開発したDAGDによりSiC MOSFETの並列回路の駆動を行い、個別のゲート電圧波形を設定することにより、スイッチング時の素子間の電流分担のバランスを調整できることを実証した。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	高山 創
<p>第 5 章では開発した AGD の動作の最適化アルゴリズムに関して，実回路の種々の動作条件に対して適用できるよう，実回路における動作条件の変動や素子特性の変化が生じた場合においても DAGD の有効性を得るため，最適な駆動信号を得るための探索手法として人工蜂コロニーアルゴリズムの採用を提案している．その結果，多目的最適化のための解の評価関数を導いた．ブーストコンバータ回路の実験において，提案手法の有効性を明らかにした．</p> <p>第 6 章は結論であり，本論文で得られた成果について要約すると共に，本研究の将来展望を述べている．</p>			

本論文は、電力変換回路の小型化、高電力密度化に寄与することが期待されるシリコンカーバイド(SiC)パワー半導体素子の性能を引き出すため、デジタルアクティブゲート駆動(DAGD)技術の開発を行ったものである。SiCパワー半導体素子の優位性である高速スイッチング特性の応用には、微小な回路寄生成分による駆動への影響が課題となる。本論文はこのような課題等に対して、新たなゲート駆動方法を提案し開発したものである。本論文により得られた主な結果は以下の通り要約される。

- (1) DAGD の提案の妥当性を検証するため、回路構成の検討および回路による動作検証を行った。DAGD は信号領域で用いられるデジタル・アナログ変換(DAC)技術の原理および回路構成をゲートドライブ回路に応用したものであり、複数ビットの入力信号を電圧値へ逐次変換することにより、素子の駆動に適した電圧波形を生成することができる。まずバイナリ重み抵抗型に着目した DAGD 回路を試作・設計し、DAGD 提案の妥当性と有効性を示した。
- (2) DAGD の適用により、SiC のスイッチング特性の優位性を活かしたシステムの検討を行った。DAGD は入力信号によりその動作を自由に変更でき、ハードウェアの変更を要せず、回路実装後に信号生成のソフトウェアによりその動作を最適化できる。この特性を利用し、最適なスイッチング信号を生成するシミュレーションと実回路のデジタルツインによる DAGD 動作検証システムを構築し、素子特性のばらつきや回路条件の変化が生じて、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いたソフトウェアにより最適なスイッチングが容易に実現できることを明らかにした。
- (3) (1), (2) の検証結果に基づき、高周波動作が可能なハーフブリッジ構造モジュールを用いた DAGD を新たに開発した。これはバイナリ重み抵抗型に比べ、パワー素子のバイアス変更も可能にするもので、パワー素子の高電力密度化に向けた並列駆動のバランス調整を可能にする。実験による検証の結果、素子間の不均衡が駆動信号のみにより調整できることを示した。
- (4) 実回路における動作条件の変動や素子特性の変化が生じた場合においても DAGD の有効性を得るため、最適な駆動信号を得るための探索手法として人工蜂コロニーアルゴリズムを採用し、多目的最適化のための解の評価関数を導いた。ブーストコンバータ回路の実験において、提案手法の有効性を明らかにした。

上記のように本論文では、DAGD を提案し、その回路の設計と製作を行うと共に、デジタル最適化技術を併用した電力変換素子の回路最適な駆動が実現できることを実証したものである。課題提案、設定、検討および成果は極めて独創的であって、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、令和6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た結果、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。