

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02151

研究課題名（和文）小容量電力伝送のデジタル化を実現するための基盤技術の構築

研究課題名（英文）Fundamental study of basic technology to realize digitization of small-capacity power transmission

研究代表者

引原 隆士 (Takashi, Hikihara)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：70198985

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、Si 等に比べ物理的優位性を有するワイドバンドギャップパワーデバイスを用いて、電力のデジタル化を提案し、その基盤となる技術を確認している。二次電池を含む小容量の電源を分散配置し、伝送網において直列、並列および演算技術を用いて電力のデジタル化の下に実現する。ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスはkW オーダーの小容量のシステムの電力制御に適用できることから、そのデジタル駆動および制御技術がキーとなる。検討によりデジタルアクティブゲートドライブ技術、デジタル電力の伝送制御技術、デジタル電力の演算処理技術を検討し、電力のデジタル化が実現可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスによる電力のデジタル化を実現するため、スイッチング動作のデジタル駆動、出力の電力パルスによる時分割駆動、密度演算による電力供給技術の実現を図っている。1MHz以上の高速・高周波スイッチングにおいて、スイッチング過渡状態の制御とデバイスごとのチューニングを排除したスイッチング特性を揃える技術を開発し、アナログ回路のチューニングをソフトウェアによる駆動信号の最適化に置き換える技術を確認し、その有効性を示した。電力パルスを用いた電力のデジタル化を検証し、モータの駆動、無線電力伝送との融合を実証し、デジタル化による電力伝送技術の新しい方向性を示した。

研究成果の概要（英文）：This research proposes the digitalization of electric power by applying wide bandgap power devices, which have physical advantages over Si and other materials, and establishes the underlying technology. Small-capacity power supplies, including rechargeable batteries, are distributed in a transmission network to realize series, parallel and arithmetic techniques under the digitalization of power. Since wide bandgap semiconductor power devices can be applied to power control of systems with small capacities in the order of kW, their digital drive and control technology is key. Through the study, digital active gate drive technology, digital power transmission control technology and digital power arithmetic processing technology were investigated, and it was shown that the digitalization of power is feasible.

研究分野：電気工学

キーワード：ワイドバンドギャップ半導体 電力のデジタル化 デジタルアクティブゲートドライブ 電力の伝送制御 電力の演算制御 動的量子化器

### 1. 研究開始当初の背景

クラウドイオ・シャノンが、電気回路を用いたアナログ計算器の開発において、同じ計算処理がスイッチを用いた回路を用い、記号的にブール代数に基づき実現できることを明らかにした。アナログ量であった物理信号がデジタル処理の対象となった。これがその後の情報の概念および計算機概念の革新を導いたことは周知のとおりである。これに対して、エネルギー伝送の根幹を成す電力は、未だアナログ技術に留まっている。エネルギーとエントロピー伝送を物理層で両立できるかという問いが本申請の核心である。上記シャノンが表した通信理論は、情報に関するエントロピーを最大化することが通信技術の最適化となることを導いた。一方で、エネルギー技術は逆にエントロピーを排除し、大容量の電源で単一に供給することが最適となるシステム設計に収束した。通信キャリアと通信機器の関係は、電力会社と負荷の関係に置き換えて述べられる。しかしながら、電力供給は物理量である電力の流れを維持するポテンシャル勾配系であって、エントロピーすなわち選択枝を物理系では確保できない。その結果、障害時あるいは限られた電源容量の電力伝送において、流路変更、電源追加といったフレキシビリティの点で脆弱である。このことは、最後のアナログ回路と言われる電力伝送が、利用の安定性と安全性の観点から見て限界に来ているにも関わらず、技術の転換ができていないことを表している。電力のデジタル化は、人類の未来を見据えた新しい学理、技術、価値を生み出す可能性がある。

本助成を受けた研究は、ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスの新しい利用技術、電力のデジタル化により実現することを検討している。特に、それらの素子の物理的優位性を考慮したとき、従来のスイッチのオン/オフ駆動の見直しにより、新たな電源設計の可能性がある。また電力源である電源の直並列は、回路的には電圧を固定(定電圧駆動)もしくは電流を固定(定電流駆動)しなければ実現できない。これらは、オン状態となる時間幅を連続に変化させることで電力を制御する技術であり、実質的にはアナログ技術以上のものではなく、物理的に電力をデジタル量として扱う技術ではない。一方、電力が物理的にデジタル化された場合に、必要な電力を得るためにデジタル化された電力を処理する演算および誤り訂正等の処理が不可欠となる。このような背景を受けて、電力の変換技術だけでなく電力デジタル化の可能性を検討することが、同分野に技術的展開を生み出す可能性があるかと判断された。

### 2. 研究の目的

GaN, SiC 等のワイドバンドギャップ半導体を適用した、パワー半導体デバイスの電力変換技術は、既に新幹線や地下鉄といった運輸システムの電力変換回路に導入が始まっている。これらのパワーデバイスの高速・高周波スイッチング特性、耐高温特性、耐高圧特性、および低オン抵抗といった物理的優位性は、モータ駆動回路の小型・軽量化を実現している。しかしながら、これら応用はデバイス特性の優位性による従来 Si パワーデバイスの置き換えにすぎない。しかしながら、この応用は既存技術の改良であり、新しい電力変換技術とはなっていない。これらを受けて、本助成を受けた研究は、電力伝送技術そのものをアナログ技術からデジタル技術に変革するための基礎技術を確立することを目的とした。これは電力伝送および供給技術に将来的にパラダイムシフトを生み出すことを目指したものである。

具体的には本研究は、電力のデジタル化を実現するため、スイッチング駆動のデジタル化、出力の電力パルスによる時分割駆動、さらにはその密度演算によって負荷が求める電力を供給する技術の実現可能性を示す。また、電力のデジタル化により、電力変換技術において経験則やアナログ調整などの技術をソフトウェアによる最適化技術に転換することを目指した。

### 3. 研究の方法

電力のデジタル化を実現するため、大きく分けて、デジタルアクティブゲートドライブ技術の開発、および、電力パケットによる電力密度制御による電力伝送およびシステム連携技術の開発に取り組んだ。

デジタルアクティブゲートドライブ技術の開発においては、SiC ワイドバンドギャップ半導体の高速なスイッチング速度を活かすため、そのゲート駆動時のスイッチング過渡状態を高速なデジタル信号処理系で制御できるドライブ回路の開発を行った。これにより、電力をデジタル化するための、ソフトウェアと物理量のインターフェースとなる変換回路のデジタル化を図ると同時に、アナログ素子や回路配線の調整を必要としていたデバイスの駆動実装を、ソフトウェア処理に転換することをすすめた。

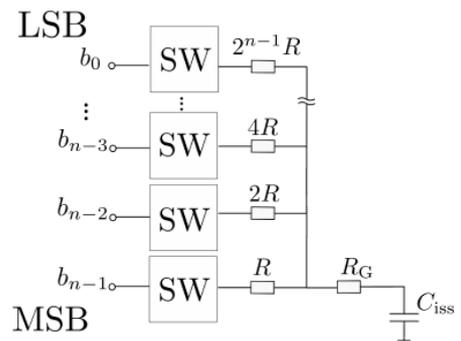


図1 GaN HEMT 駆動 SiC ゲートドライブ

次に、電力自体のデジタル化は、電力を利用する単位をデジタル化することである。その手法として単位化された電力パルスを用いて、パルス密度制御による電力伝送およびシステム連携技術の開発を行った。その適用として、従来十分な検討が行われてこなかった、異なる種類の変換回路の直並列回路の実現を試みた。変換回路の受動性に基づく制御に関する理論を再検討し、パルス密度制御により受動性を満たした直並列が可能であることを理論と実験的から検証を行った。さらに、パルス電力の単位に情報タグを付加した電力パケット技術を電力のデジタル化として見直し、その拡張性を検証した。

#### 4. 研究成果

(1) デジタルアクティブゲートドライブ技術: 新しくデジタルアクティブゲートドライブ回路を設計・制作し、1MHz以上の高速・高周波スイッチングにおいて、FPGAによるデバイスのスイッチング過渡状態の制御と、デバイスごとのチューニングを排除してスイッチング特性を揃える技術を開発し、アナログ回路のチューニングをソフトウェアによる駆動信号の最適化に置き換える技術を確立した。さらに、パルス電力による電力密度制御により、DC-DCコンバータの直並列駆動を実現し、その有効性を示した。

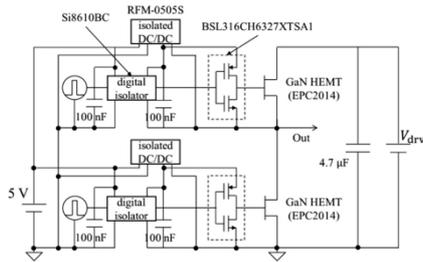


図2 アクティブゲートドライバの回路図

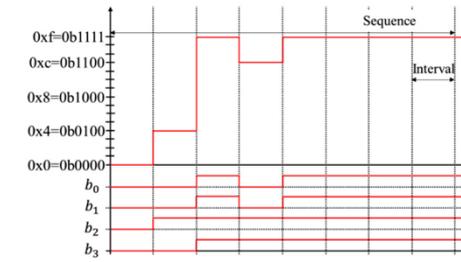


図3 ゲートのビット信号

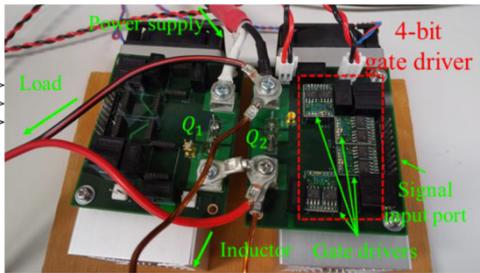


図4 4ビットアクティブゲートドライバの実装写真

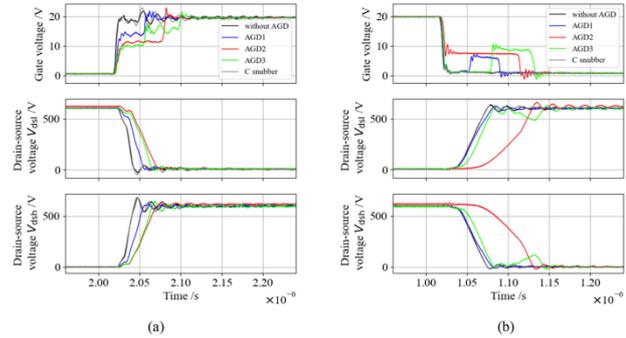


図5 実験結果. AGDなし、複数の駆動パターン、スナバ回路等のスイッチングの比較

図2～5に開発したデジタルアクティブゲートドライブ回路による実回路の駆動結果の一部を示す。これらの結果は、スイッチング時のサージ電圧、電流の抑制が、駆動信号のビットパターンの調整で実現できることを示している。またその効果はスナバ回路による抑制と同程度であった。このことは、アナログ回路を用いたスイッチング波形の調整が、ビットパターンの最適化に置き換えられることを示している。一連の研究において、その最適化手法についても検証し、国際会議において発表した。

#### (2) デジタル電力の伝送制御技術:

まず、複数の異なるコンバータの直並列接続に関する結果を示す。単位化した電力パルスを $\Delta\Sigma$ 変調によって密度制御し、電力変換回路の受動的性質を保ちながら、必要な出力容量、特性に合わせて直並列接続して実現できることを示した。本研究では、その理論的および数値的検証、さらには実験的な実証を行い、システムとして制御系も含めて実現可能であることを明らかにした。

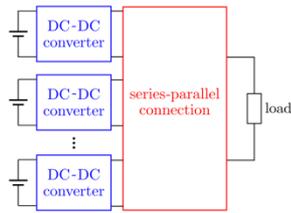


図6 コンバータの直並列システム概念

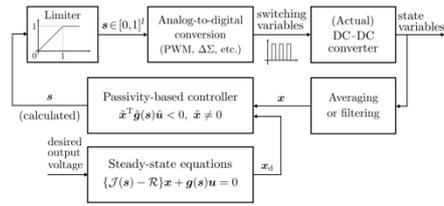


図7 受動性を考慮した制御のブロック図

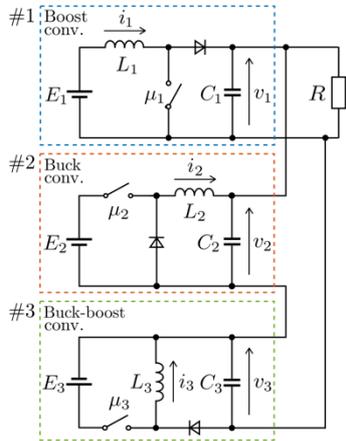


図8 複数の異なる種類のコンバータの直並列

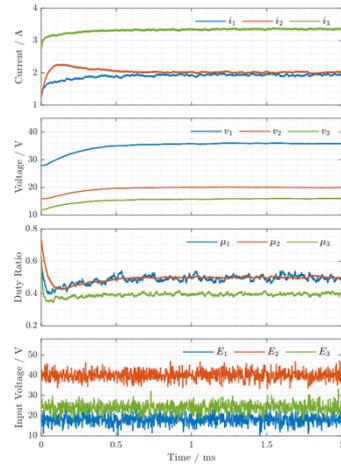


図9 図8のシステムの動作検証結果

さらに本研究では、電力パルスを用いた電力のデジタル化を実現し、シンクロナス・リラクタンスマータの駆動に適用できることを検討し、カートへ応用し、駆動を実証した。これにより、商用レベルの負荷の駆動に適用できることを明らかにした。また、異なるサブシステム間で電力の融通を想定して、無線電力伝送方式との融合を図り、電力パケット伝送系と無線電力伝送系がシームレスに接続できることを実証した。



図10 デジタル化した電力によるモータ駆動の実証

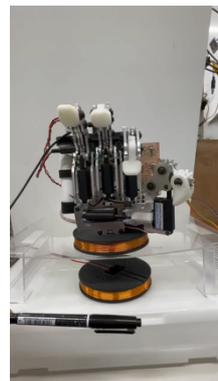


図11 無線電力伝送への電力パケットの適用

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Inagaki Shota, Mochiyama Shiu, Hikiyara Takashi	4. 巻 8
2. 論文標題 Electric power processing using logic operation and error correction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 202344 ~ 202344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.202344	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takayama Hajime, Okuda Takafumi, Hikiyara Takashi	4. 巻 50
2. 論文標題 Digital active gate drive of SiC MOSFETs for controlling switching behavior- Preparation toward universal digitization of power switching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Circuit Theory and Applications	6. 最初と最後の頁 183 ~ 196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/cta.3136	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Shuhei Fukunaga, Hajime Takayama, and Takashi Hikiyara
2. 発表標題 A study on switching surge voltage suppression of SiC MOSFET by digital active gate drive
3. 学会等名 The 12th IEEE Energy Conversion Congress and Exposition -Asia, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Yu Shiogai, Alberto Castellazzi, and Takashi Hikiyara
2. 発表標題 Split-Mid-Point Modular Design for Low-Load Efficiency Boost in WBG Power Converters
3. 学会等名 The 12th IEEE Energy Conversion Congress and Exposition - Asia, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Taiki Ikeda, Alberto Castellazzi, and Takashi Hikihara
2. 発表標題 Modulation Options for a High-Frequency High-Efficiency GaN-Based Non-Inverting Buck-Boost DC-DC Converter
3. 学会等名 The 12th IEEE Energy Conversion Congress and Exposition - Asia, 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	持山 志宇  (Mochiyama Shiu)  (20867866)	京都大学・工学研究科・助教   (14301)	
研究 分担者	カステラッツィ アルベルト  (Castellazzi Alberto)  (70866897)	京都先端科学大学・工学部・教授   (34303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------