

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04326

研究課題名（和文）SiCを用いた電力変換器における伝導性ノイズ抑制のための高精度シミュレーション

研究課題名（英文）High accuracy simulation for conductive noise reduction on power converter using SiC device

研究代表者

北川 亘（Kitagawa, Wataru）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：30581805

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、SiC-MOSFETを用いた電力変換器における伝導性ノイズを高精度にシミュレーションするためのモデリング手法を目的として、スイッチングによる漏れ電流解析、インピーダンス測定及びLCRパラメータ導出から、高周波等価回路を導出すること伝導性ノイズをモデリングできる手法を示した。さらに、電源用EMIフィルタを電力変換器に施し、再び実験を行うことで挿入したフィルタの効果について検証した。また、シミュレーション手法として、漏れ電流ベースとインピーダンスベースの二つを提案した。これらを用いた雑音端子電圧のシミュレーション結果と測定結果を比較することで本手法の有用性及び妥当性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、電力変換器の普及に伴い、SiCデバイスのような電力用高速スイッチング素子が実用化され、広く普及していく。SiCデバイスは高効率で装置全体のパワー密度向上に大きく貢献する一方、スイッチングの高速化による高dv/dtが原因でEMIの問題が大きくなる。本研究による社会的意義としては、今後SiCデバイスを用いたシステムでの漏れ電流増大によるEMI問題の解決に対し、加速的に対策フィルタの開発/設計法の変革が進み、開発費の削減さらには価格の低下につながる。また、これら提案は、EMIモデリングに対する学術的分野の新方向性の開拓となり、新たな理論体系を構築し学術的意義をなす。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study is a modeling method to simulate conducted noise in SiC-MOSFET-based power converters with high accuracy. First, a modeling method for conducted noise is presented, in which a high-frequency equivalent circuit is derived from leakage current analysis by switching, impedance measurement, and derivation of LCR parameters. Furthermore, the EMI filter for the power supply was applied to the power converter, and the effectiveness of the inserted filter was verified by conducting the experiment again. Finally, two simulation methods, leakage current-based and impedance-based, are proposed. The usefulness and validity of the proposed methods are demonstrated by comparing the simulation and measurement results of noise terminal voltages using the two methods.

研究分野：電磁界数値解析

キーワード：EMI SiCデバイス 電力変換器 漏れ電流 モデリング シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1 . 研究開始当初の背景

近年、電力変換器の普及に伴い、SiC デバイスのような電力用高速スイッチング素子が実用化され、広く普及していくことが考えられる。SiC デバイスは高耐圧、高温動作、高速スイッチング、低損失駆動など従来の素子をはるかに上回る動作特性が期待されている。これによって、電力変換装置に必要な不可欠なインダクタやコンデンサ、ヒートシンクなどの周辺部品が小型化、軽量化できるため装置全体のパワー密度向上に大きく貢献する。しかし、このような利点を持つ一方、スイッチングの高速化による高 dv/dt が原因で EMI の問題が大きくなる。EMI の問題は漏れ電流が予期せぬループを構成することや放射性ノイズなどの影響により、非常に複雑で対策が難しい。

2 . 研究の目的

研究では、上記の問の解決のため、ノイズの特性を解析するために正確にモデリングしてフィルタを設計する手法を提案する。そのために、次の事を目標とする。

- 1) 測定した高周波漏れ電流の波形を用いた正確な高周波等価回路の構築
- 2) データシートの特性を最大限に用いた EMI モデリング
- 3) 無測定での漏れ電流推測

現在、電力変換器のノイズ対策において一般的な方法は、疑似電源回路網 (LISN) を用い、電源側のインピーダンスを一定化させ、そこで発生する電圧降下を測定してスペクトラムアナライザにて電圧レベルを周波数ごとに確認して、ノイズレベルを算出し、対策を行っている。これまでの他の研究では、3次元電磁界解析を用いたのノイズ解析や、システム全体のシミュレーションを行ってのノイズ予測など行われているが、本研究の独自性として、漏れ電流の実測をもとに、その特性とスイッチングの電圧レベルおよび回路網を分析して、正確な高周波等価回路を構築し、実際の状況に則した対策を可能としていく。

3 . 研究の方法

1-1) スwitching時の電圧立ち上がり・立ち下がり時間の考慮

漏れ電流が発生する過程において、電圧の立ち上がり・立ち下がり大きく影響しており、これまでは無視されていた。SiC デバイスでは、高周波スイッチングにより、高 dv/dt となるため、この成分は無視できない。したがって、立ち上がりを2レベルのステップ電圧とみなせば、回路方程式が容易に解けることから、この特殊解を用いて、高周波等価回路を構築することを試みる。

1-2) 各ステップ電圧によるすべての漏れ電流考慮

これまでの研究では、各デューティで発生する漏れ電流のうち、最大のもののみを取り上げ、その高周波等価回路を構成していたが、1周期内におけるすべてのスイッチングによる漏れ電流をすべて等価回路として置き換えモデリングする。

1-3) 2次側 (ステージ別) 完全分離化

主に、高周波トランスを用いた絶縁型の電力変換器においては、これまでの研究により、高周波トランスの浮遊容量を通して、1次側の漏れ電流が2次側へ通過していくことがわかっている。そこで、1次側と2次側のノイズを分離すべく、2次側ヒートシンクからの漏れ電流を1次側とは別の銅板に落とし、LISN に入り込まないようにした上で検討することで、1次側、2次側各ステージに有効な対策法を検討することを試みる。

2-1) 回路網インピーダンスとデータマッピング

実際のシステムにおいては、理想システムと違い、接続ケーブルに対してそれぞれインピーダンスをもち、それらのほとんどは不明な浮遊容量やインダクタンスからなっている。予めこれらの特性をデータシートから取り上げると共に、不明な分はできる限り測定し、知識データベースとしてマッピングする。これらから、漏れ電流のインピーダンスとシステムのインピーダンスとの物理的な関係を導き出し、EMI モデルとしてのシステム全体のモデリングを行う。

2-2) パワーデバイス-ヒートシンクの物理モデル検討

EMI モデリングにおいて最も重要になってくるのが、パワーデバイスとヒートシンク間のモデリングである。この間での浮遊容量とインダクタンスがどのように構成されているかを、3D 電磁界シミュレーションとインピーダンスアナライザを用いて探索することを試みる。

3-1) パワーデバイスのデータシートモデリングと実測モデリングを単体で比較

SiC デバイス単体でのデータシートからの特性を正確にモデリングしたものと、2年目に行ったモデルでの単体でのモデリングを比較し、検討を行う。

3-2) パワーデバイスの物理的配置による特性分布の把握と漏れ電流低減のための検討

上記での結果から、正確な物理パラメータを導き出し、それを用いて、各パワーデバイスの配置

による漏れ電流の違いを導き出す。また、最も漏れ電流が小さくなるパワーデバイスの配置の最適設計を行い、デバイスの配置による漏れ電流においては最小化を図る。

4. 研究成果

1) 電圧変動にかかる時間 (A) は $0.35\mu\text{s}$ であり、漏れ電流の収束にかかる時間に対して十分に大きい。よってスイッチング特性を考慮すべきであると考えられる。よってスイッチング特性を考慮しない従来法とスイッチング特性を考慮した提案法を比較、検討した。(図1)従来法(図2)と提案法(図3)それぞれにおける外来ノイズを考慮した雑音端子電圧のシミュレーション結果をを比較するとスイッチング特性を考慮した場合、150 kHz ~ 2.0 MHz や 7.0 MHz 付近ではスイッチング特性を考慮したほうが、より良好に一致していることがわかった。このことからスイッチング特性を考慮することの有用性が確認できた。

また、漏れ電流では、5つの漏れ電流が発生するデバイスがある。スイッチングによらず周波数が同じである条件下では、漏れ電流のRLC共振回路のパラメータを決定し、電圧変動のタイミングでステップ電圧を印加した。コモンモードモデリング回路は図4のようになる。ここで、ステップ電圧の振幅はスイッチングした各相とヒートシンク間の電圧の測定値を用いた。また、図5にシミュレーション結果と実験結果の比較を示す。漏れ電流の概形・減衰の様子が良好に模擬できていることがわかる。

2) 絶縁型 AC/DC コンバータの雑音端子電圧は図6のように測定される。図6場合より、おおきな共振点が3つ存在するため、3つのノイズ経路が存在すると思われる。このため、それぞれの経路を詳細に確認する。まず、5MHz、6MHzのノイズについて考える。5MHz、6MHzのノイズは一次側スイッチング部からヒートシンク、銅板、LISN、入力フィルタを通り、スイッチング部に戻ってくる経路と考えられる。ここで、スイッチング素子のスイッチングによるg相とヒートシンク間の電圧変化で発生したノイズはg相とヒートシンクの接合容量を通り、ヒートシンクへと流れるものと、g相とh相の浮遊容量とh相とヒートシンクの接合容量を通り、ヒートシンクへと流れるものがあると考えられる。その後、銅板、LISNを通りg相に還ってくる経路を構成していると考えられる。次に、800kHzのノイズについて考える。800kHzのノイズは、一次側スイッチング部から高周波トランスを介して、二次側、二次側ヒートシンク、銅板、LISN、入力フィルタを通り、スイッチング部に戻ってくる経路と考えられると考えられる。ここでも、スイッチング素子のスイッチングによるドレイン・ソース間の電圧変化で発生したノイズ電流は、g相を流れ、高周波トランスの寄生容量を通り、j、k相へと流れると考えられる。また、j、k相へ流れた後、高周波トランスから流れてきたノイズは、スイッチの接合容量を通して、ヒートシンクへ流れる。その後、LISN、入力フィルタを通り、一次側のスイッチング部分へと還る経路を構成していると考えられる。このような考え方で、回路インピーダンスとデータマッピングによりノイズ経路モデリングすることを可能とした。この結果、800kHz、5.0MHz、6.0MHzの共振点を表現できた。また、雑音端子電圧はピーク値を測定しているため、シミュレーションでも3つのシミュレーション結果の最大値をとることができる。したがって、このシミュレーション結果は、800kHz、5.0MHz、6.0MHzの共振点と低周波から高周波にかけてノイズレベルが良好に一致した。

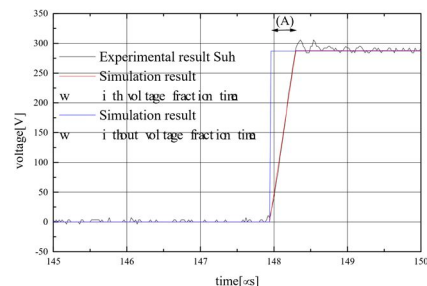


図1 立ち上がり考慮モデリング

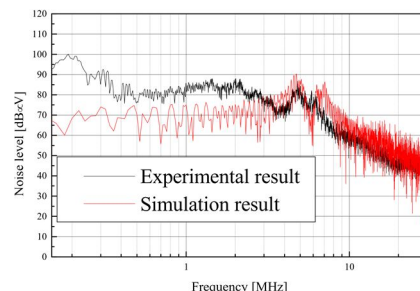


図2 従来法シミュレーション

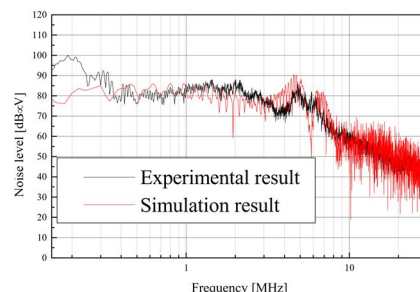


図3 提案法シミュレーション

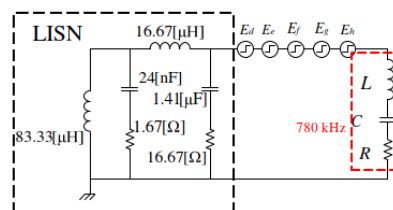


図4 各ステップ電圧モデリング

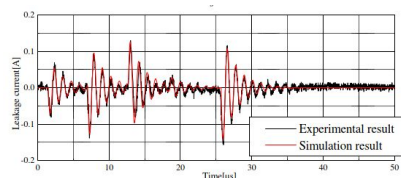


図5 漏れ電流モデリング

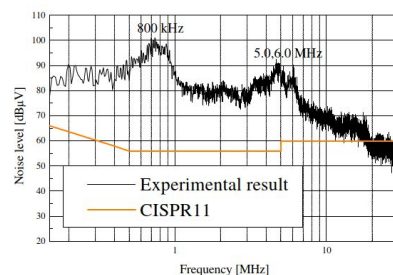


図6 雑音端子電圧

3) 上記でのモデリング回路に EMI フィルタの等価回路を加えてシミュレーションを行った。今回 EMI フィルタとして、Y コンデンサとコモンモードチョーク(以下,CMCC)を使用した。また、シミュレーションにおいて加えた EMI フィルタを実験システムに挿入し、測定を行った。その実験結果と各シミュレーション結果を比較することで導出したモデリング回路の有用性及び妥当性について検証を行った。実施した EMI フィルタを用いたシミュレーション手法の妥当性検証の流れを図 7 に示す。

まず、素子のデータシート情報から、効果的な EMI フィルタを選定する。評価対象とした変換器において測定した伝導性ノイズの結果及び複数素子のインピーダンス情報から、共振点の位置及び周波数毎のノイズレベルを低減する

ことに着目し、素子を選定する。この工程は、図 7 の ① に該当する。コイルとコンデンサは高周波において、それぞれ RLC 直列回路,RLC 並列回路のインピーダンス特性を持つ。そのため、高周波におけるパラメータとインピーダンス特性をインピーダンスアナライザを用いて、測定した。この工程は、図 7 の ② に該当する。EMI フィルタの等価回路を用いて、シミュレーションを実施する。CMCC を実験において LISN とスイッチング部分の間に挿入する。EMI フィルタ挿入時におけるコモンモード等価回路を作成する。この工程は、図 7 の ③ に該当する。シミュレーションにおいて挿入した EMI フィルタを実験で施し、シミュレーション結果と比較することで導出したモデリング回路の有用性、妥当性について検証する。この工程は、図 7 の ⑤ 及び

④ に該当する。この工程を行って、検証した結果が図 8、図 9 である。雑音端子電圧の実験結果を図 8、図 9 の赤線に示す。図 8、図 9 の黒線は、EMI フィルタを挿入していない時における雑音端子電圧の実験結果である。150 kHz から 8 MHz において、CMCC 挿入前と比較して雑音端子電圧が各周波数に対して平均約 10 dB 低減していることが確認できる。これは雑音端子電圧の原因となるループにおいて、インダクタンス成分が増加することにより共振点が 150 kHz 以下の低周波へと移動したためであると考えられる。CMCC の挿入によって、広帯域の周波数におけるノイズレベルの低減が確認できる。図 8 より、低周波(150 kHz ~ 1 MHz) 及び高周波(18 MHz ~ 30 MHz) において、ノイズ低減の傾向やレベルが良好に一致していることを確認できる。しかし、10 MHz 付近において、CMCC を挿入したにもかかわらず、ノイズ低減効果がない。さらに、シミュレーション結果と実験結果の不一致が確認できる。これは、EUT(被試験機器) と対策部品(コイル) の共振によりノイズが増大したことが原因として挙げられる。スイッチングノイズのみを考えたときに、シミュレーション手法の妥当性を確認できている。図 9 より、全周波数帯域において、ノイズ低減の傾向やレベルや共振点の位置が良好に模擬できていることがわかる。これは、インピーダンス測定を通じて、より細かに回路モデリングを実施することができたためである。以上より、示したシミュレーション法は有用であり、導出したモデリング回路やそのパラメータが妥当であることがわかる。

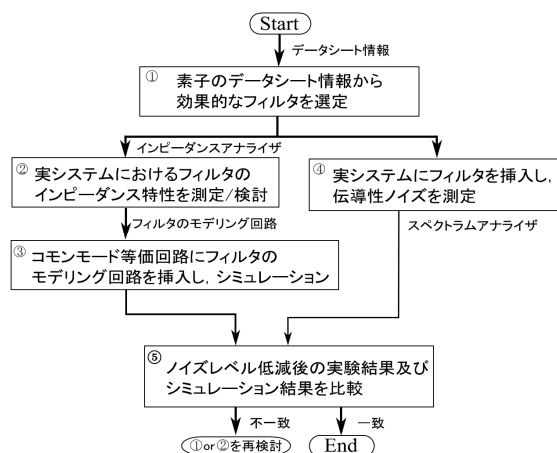


図 7 データシートからのフィルタモデリング

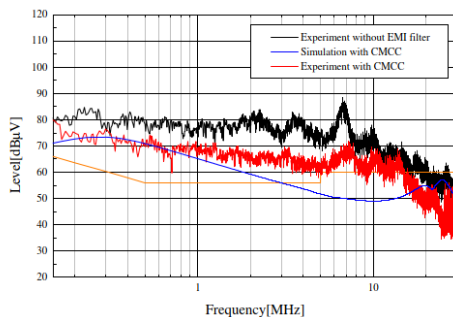


図 7 漏れ電流ベースシミュレーション

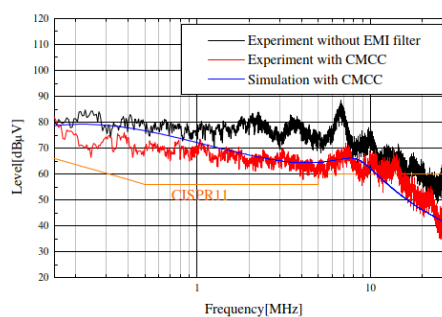


図 8 インピーダンスベースシミュレーション

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kitagawa Wataru, Kutsuna Toshiya, Kuwana Kazuki, Kawamura Yuki, Takeshita Takaharu | 4. 巻 57 |
| 2. 論文標題 Conducted Noise Simulation on AC/DC Converter Using SiC-MOSFET | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industry Applications | 6. 最初と最後の頁 1644 ~ 1651 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIA.2021.3052435 | 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10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 7件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kuwana Kazuki, Mitani Kohei, Kitagawa Wataru, Takeshita Takaharu |
| 2. 発表標題 Investigation of Improvement of Modeling precision for Conducted Noise on Isolated AC/DC Converter using SiC Devices |
| 3. 学会等名 the 22nd European Conference on Power Electronics and Applications EPE ' 20 ECCE Europe（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 桑名一輝，北川亘，竹下隆晴 |
| 2. 発表標題 SiC デバイスを用いた AC/DC コンバータにおける伝導性ノイズモデリングの高精度化に関する一考察 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会・電気学会 電磁環境・半導体電力変換合同研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 沓名俊哉，三谷晃平，桑名一輝，北川亘，竹下 隆晴 |
| 2. 発表標題 SiCデバイスを用いた2台の電力変換器による伝導性ノイズの重畳・干渉を考慮したシミュレーションの一検討 |
| 3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Kohei Mitani, Wataru Kitagawa, Takaharu Takeshita |
| 2 . 発表標題 Modeling Principle for EMI Noise Reduction on AC/DC Converter Using SiC Device |
| 3 . 学会等名 Symposium on Semiconductor Power Conversion (S2PC2019) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 MITANI Kohei, KAWAMURA Yuki, KITAGAWA Wataru, TAKESHITA Takaharu |
| 2 . 発表標題 Circuit modeling for Common mode Noise on AC/DC Converter using SiC Device |
| 3 . 学会等名 the 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2019) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Kohei Mitani, Wataru Kitagawa, Takaharu Takeshita |
| 2 . 発表標題 Modeling for Conducted Noise on AC/DC Converter by Using Impedance Characteristic |
| 3 . 学会等名 the 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2019) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Wataru Kitagawa, Kohei Mitani, Yuki Kawamura, Takaharu Takeshita |
| 2 . 発表標題 Modeling and Simulation for Conducted Noise on AC/DC Converter using SiC-Device |
| 3 . 学会等名 the 10th International Conference on Power Electronics ECCE Asia (ICPE 2020-ECCE Asia) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kazuki Kuwana, Yuki Kawamura, Wataru Kitagawa, Takaharu Takeshita |
| 2. 発表標題 Modeling for Conducted Noise Simulation Considering Switching Characteristics on AC/DC Converter |
| 3. 学会等名 the 10th International Conference on Power Electronics ECCE Asia (ICPE 2020-ECCE Asia) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Toshiya Kutsuna, Kazuki Kuwana, Wataru Kitagawa, Takaharu Takeshita |
| 2. 発表標題 Modeling for Superimposed Conducted Noise on Two AC/DC Converters Using SiC Devices |
| 3. 学会等名 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 奥井俊平, 北川亘, 竹下隆晴 |
| 2. 発表標題 SiCデバイスを用いたAC/DCコンバータにおける伝導性ノイズのシミュレーションに関する一考察 |
| 3. 学会等名 電気学会若手セミナー |
| 4. 発表年 2021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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

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6件

| | |
|--|--------------------|
| 国際研究集会 Symposium on Semiconductor Power Conversion (S2PC2019) | 開催年 2019年～2019年 |
| 国際研究集会 the 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2019) | 開催年 2019年～2019年 |

| | |
|---|--------------------|
| 国際研究集会 the 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2019) | 開催年 2019年～2019年 |
| 国際研究集会 the 10th International Conference on Power Electronics ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia) | 開催年 2019年～2019年 |
| 国際研究集会 the 22nd European Conference on Power Electronics and Applications EPE ' 20 ECCE Europe | 開催年 2020年～2020年 |
| 国際研究集会 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe) | 開催年 2021年～2021年 |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|