

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06358

研究課題名（和文）高電圧パワーコンバータにおける電磁ノイズ発生・伝搬メカニズムのモデル化

研究課題名（英文）Modeling of EMI noise generation and propagation mechanism in high-voltage power converter

研究代表者

井瀨 貴章（IBUCHI, Takaaki）

大阪大学・工学研究科 ・助教

研究者番号：90755646

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、SiCパワー半導体デバイス的高速・高周波数スイッチング動作の適用による電力変換回路の高効率・小型化と、それに伴って懸念される電磁ノイズを低減させる回路設計に向け、高電圧パワーコンバータにおける電磁ノイズ発生・伝搬メカニズムのモデル化について検討した。昇圧チョッパを例に、用いる回路素子の種類・動作条件や配線パターンなどをパラメータとし、それらがパワー半導体デバイスのスイッチング特性に与える影響を評価し、検討するノイズ発生源モデルの妥当性を示した。

研究成果の概要（英文）：Fast and high-frequency switching operation of power semiconductor devices lead to electromagnetic interference (EMI) noise problem in high-voltage power converters. This research studied the switching noise generation mechanism in a SiC power device-based DC-DC converter. The analysis and experiment results ensure the validity of the proposed noise source model. It contributes to understand the influence of parasitic elements on the dynamic characteristics and EMI noise generation of SiC-based power converter.

研究分野：電気電子工学

キーワード：パワーエレクトロニクス 電磁環境 SiCパワーデバイス 寄生成分 スwitchングノイズ

1. 研究開始当初の背景

地球環境問題の解決や再生可能エネルギー利用のために、パワー半導体デバイス的高速スイッチング動作によって高効率の電力変換を行うパワーエレクトロニクス技術が必要とされている。近年では、SiCやGaN等の次世代パワー半導体デバイスの高電圧・高周波数スイッチング動作によって、回路のさらなる高効率化や高機能化が期待されている。しかし、電力・エネルギーを扱うため電圧・電流レベルが大きく変化するパワーコンバータの高速・高周波数スイッチング動作は、配線・素子等に存在する寄生成分との相互作用による電磁ノイズ発生の要因となる。またこのため、LSIのクロック動作に起因して生じる情報通信機器由来の電磁ノイズと比較して、パワーコンバータ由来のノイズはより広帯域・高レベルとなることが懸念されている。関連する国内外の研究では、個々の回路構成におけるトポロジーや実装の工夫によってノイズ抑制を図る検討例は見られるが、電磁ノイズ問題の根本的な解決を図るためには、回路開発プロセスの初期段階から電磁環境両立性(EMC)を考慮した設計が望まれる。IC/LSIなどのCMOS回路を対象としたノイズ源モデルの検討例として、線形等価回路とノイズ源を表す等価内部電流源を用いたノイズモデルがあり、その妥当性が示されている[Y. Fukumoto, et al. Proc. of IEEE Int. Conf. EMC, 2001]。しかし、小信号かつ容量性負荷を有する電子回路と異なり、一般に抵抗性・誘導性負荷をもち高電圧・大電流動作を行うパワーコンバータにおいては、同モデルの適用は難しいことをこれまでに報告した[T. Ibuchi et al. Proc. of EMC Europe 2012, 2012]。よって、電力変換回路においては、負荷条件や電圧・電流の時間変化率が急峻となって無視できなくなる構成要素固有の特性変化などを考慮したノイズ発生源のモデル化が課題である。

以上の研究背景を踏まえ、スイッチング動作の高速・高周波数化によって期待される電力変換回路の高効率・小型軽量化とそれに伴って懸念される電磁ノイズの低減を両立させる設計の実現に向け、「配線や素子に存在する寄生成分がパワー半導体デバイスのスイッチング動作に与える影響の評価・スイッチングノイズ発生源のモデル化（ノイズ発生メカニズム）」および「伝導エミッションの時間・周波数領域解析・空間磁界分布評価に基づくノイズ伝搬経路の可視化（ノイズ伝搬メカニズム）」などに基づいて、高電圧パワーコンバータにおける電磁ノイズ発生・伝搬メカニズムの解明に取り組む必要があるとの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高いレベルでの省エネルギーや電磁環境両立性の実現に向け、開発プ

ロセスの初期段階から電磁ノイズを考慮した回路設計論の構築に必要な、高電圧パワーコンバータにおける電磁ノイズ発生・伝搬メカニズムの解明を目的としている。具体的には、「ノイズ発生源のモデル化」と「ノイズ伝搬特性の評価」に大別し、所望の動作条件下において電磁ノイズを低減した回路設計および実装手法の基礎構築を目指す。

(1) ノイズ発生源のモデル化

① インピーダンスの周波数特性評価に基づく回路構成要素の寄生成分の等価回路モデル化・定量評価

② パワー半導体デバイスの示すスイッチングノイズのモデル化

(2) ノイズ伝搬特性の評価

① 伝導エミッションの時間・周波数領域解析

② 近傍磁界分布評価によるノイズ伝搬経路の可視化

3. 研究の方法

上述の研究目的に対し、以下に示す項目の通り研究を遂行した。

(1) ノイズ発生源のモデル化

① インピーダンスの周波数特性評価に基づく回路構成要素の寄生成分の等価回路モデル化・定量評価

スイッチング動作の高速・高周波数化に伴って生じるノイズのモデル化には、配線や受動素子が持つ微小な寄生成分の評価が必要である。ディスクリット素子を用いる電力変換回路では、IC/LSIとは異なり構成要素ごとの評価が可能である。よって本研究では、構成要素の示すインピーダンスの周波数特性測定に基づき、等価回路モデル化およびモデルパラメータ同定を行う。回路基板上の配線に存在する微小な寄生インダクタンスについては、Sパラメータを用いたインピーダンスの実測評価と電磁界解析をあわせて行い、得られる結果の妥当性を検証する。

② パワー半導体デバイスの示すスイッチングノイズのモデル化

これまでに、DC-DCコンバータにおいて損失・ノイズの発生要因となるダイオードのスイッチング特性のモデル化や特性の温度依存性について検討を行ってきた[T. Ibuchi et al. IEICE ComEX, 2014]。本研究ではさらに、従来のSiパワー半導体デバイスとSiCに代表される次世代パワー半導体デバイスの特性差異に着目し、カーブトレーサを用いて静特性の温度依存性評価や端子間容量の電圧依存性評価を行う。これに基づき、動作電圧・電流、環境温度、スイッチング速度や周波数など種々の条件をパラメータとして動特性を評価し、スイッチングノイズ発生源のモデル化に関する検討へと展開させる。

(2) ノイズ伝搬特性の評価

① 伝導エミッションの時間・周波数領域解析
 高電圧パワーコンバータで生じる電磁ノイズの評価には、単に規格で定められたノイズの周波数スペクトルの大きさだけでなく、ノイズ発生源の動特性や回路電圧・電流の周期変化に対応した時間領域における評価をあわせて行うことが有用である。本研究では、回路に用いるパワー半導体デバイスのスイッチング動作と対応させ、時間および周波数の両領域からコンバータにおける電磁ノイズの測定・解析を行い、ノイズの伝搬特性について考察する。

② 近傍磁界分布評価によるノイズ伝搬経路の可視化

ICやLSI等の電子回路を構成する半導体のEMI特性測定の中で、伝導エミッション測定には、規定の磁界プローブを用いて電源系配線を通る高周波電流を非接触で測定する磁界プローブ法(IEC61967 part 6)が用いられる。本研究では、電磁ノイズを考慮した回路設計の実現に向け、同手法を電力変換回路に対して適用し、回路基板上のノイズ電流発生源及び伝搬経路の可視化を行うことで、配線構造や素子の空間配置がノイズ伝搬に及ぼす影響を評価する。

4. 研究成果

(1) ノイズ発生源のモデル化

① インピーダンスの周波数特性評価に基づく回路構成要素の寄生成分の等価回路モデル化・定量評価

一般に、回路素子のインピーダンス測定には自動平衡ブリッジ法に基づくインピーダンスアナライザが広く用いられ、広い周波数範囲のインピーダンス評価が可能である。ただし、回路基板上の配線に存在する10nH未満の微小な寄生インダクタンス成分を評価するための高精度インピーダンス測定は難しい。本研究では、配線インダクタンスの実測評価について、ネットワーク解析法に基づく2ポート・シャントスルー法(図1(a))の適用を検討した。結果より、従来のインピーダンス測定と比較して2ポート・シャントスルー法に基づく評価結果は、電磁界解析に基づく計算結果ともおおむね一致しており、本測定手法の妥当性を確認できた(図1(b))。

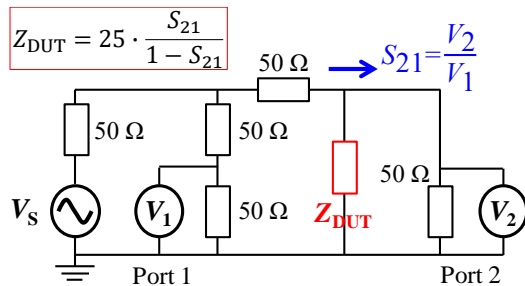


図1(a) 2ポート・シャントスルー法の構成

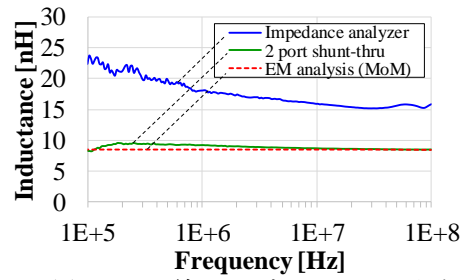


図1(b) PCB配線インダクタンスの評価例

② パワー半導体デバイスの示すスイッチングノイズのモデル化

・SiCパワーデバイスの静特性評価

従来のSiデバイスとSiCに代表される次世代パワー半導体デバイスの特性差異に着目し、静特性および端子間容量の評価を行った。

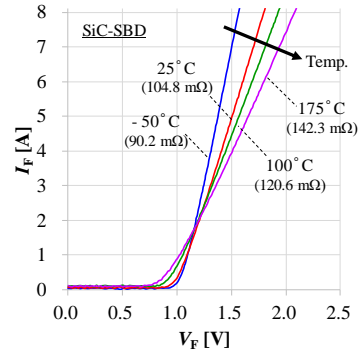


図2(a) SiC-SBDの導通特性(温度依存性)

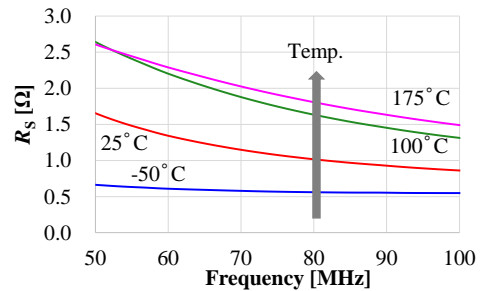


図2(b) SiC-SBDの非導通時ESR特性(温度依存性)

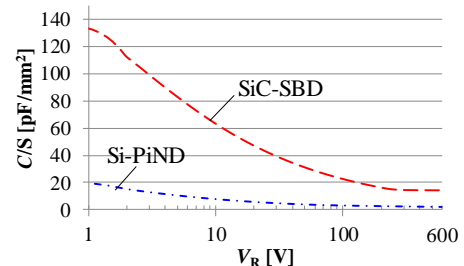


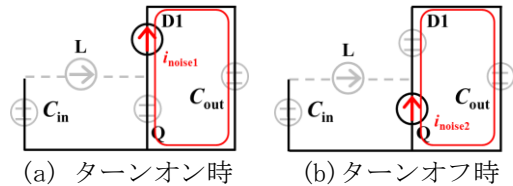
図2(c) 端子間容量のバイアス電圧依存性

一例としてSiC-ショットキーバリアダイオード(SBD)の評価結果を示す。SiC-SBDでは多数キャリアの移動度が温度上昇とともに低下するため、オン抵抗は温度とともに増加する正の温度特性を示す(図2(a))。また、非導通時のESRをインピーダンスアナライザにより評価した結果、高温条件下ほどESRが大きくなる傾向が見られ(図2(b))、ユニポーラデバ

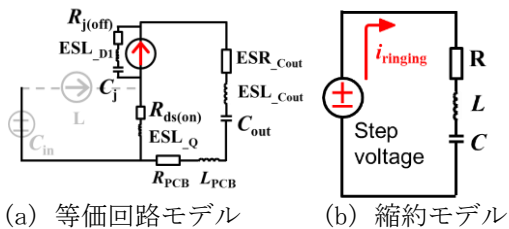
イスにおける多数キャリアの特性と一致することを確認した。端子間容量について、等しい電流定格を持つ Si-PiN ダイオードと比較すると、不純物濃度が高い SiC-SBD の接合容量の方が大きいことが分かる(図 2(c))。

・DC-DC コンバータにおけるスイッチングノイズの発生メカニズム

電力変換回路において電磁ノイズの一要因となるスイッチングノイズの発生メカニズムについて考えるため、昇圧チョップを例に、電圧・電流の過渡応答に重畳する高周波振動を評価し、スイッチングノイズ発生源のモデル化に関して検討を行った。



(a) ターンオン時 (b) ターンオフ時
図 3 スwitchingノイズ発生源モデル



(a) 等価回路モデル (b) 縮約モデル
図 4 MOSFET ターンオン動作時に生じる高周波振動電流の共振経路モデル化

ターンオフとなるパワーデバイスを電流源(内部インピーダンス ∞)、ターンオンとなるデバイスを電圧源(内部インピーダンス 0)で表す。またインダクタ電流に起因するノイズを電流源、入出力の平滑コンデンサに起因するリップル等の電圧変動を電圧源で表す。重ね合わせの理により、解析対象以外の電圧源は短絡除去、電流源は開放除去となる。このとき、スイッチング動作に伴って電圧・電流に重畳する高周波振動は、ターンオン、ターンオフともに MOSFET とダイオードで構成されるハーフブリッジと出力平滑コンデンサで構成される経路内の LC 共振によって生じると考えることができる(図 3)。

次に、高周波振動電流経路の等価回路モデルについて、MOSFET ターンオン動作時を例に説明する(図 4)。導通状態の MOSFET はオン抵抗およびパッケージの寄生インダクタンスで表現される。非導通状態の SBD を表す RLC 直列等価回路を、電流源に並列接続してモデル化する。テブナン・ノートンの定理より、電流源を電圧源に変換すると、ループ内に存在する素子や配線等の寄生成分を含めた RLC 直列回路に縮約して表現できる。上述の考え方は MOSFET ターンオフ動作時においても、同様に適用可能である。

試験回路において MOSFET や SBD の電圧・電流の過渡応答及び伝導エミッションの実測評価を行い、上記モデルの妥当性を検証した。

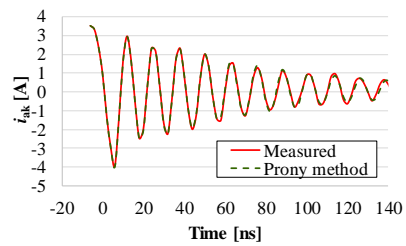


図 5(a) Prony 法に基づく SiC-SBD のターンオフ電流応答特性の評価

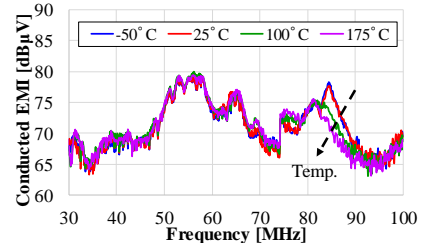


図 5(b) 伝導エミッションの測定結果 (SiC-SBD の温度依存性)

本検討では、Prony 法を用いて時間応答の実測の応答に含まれる振動周波数の定量評価を行い、先述のモデルに基づいて算出した振動周波数と一致することを確認した(図 5(a))。また、SiC-SBD の動作温度がノイズ特性に与える影響について考えると、高温動作時ほどダイオード電流に重畳する高周波振動の減衰が早くなり、伝導エミッションのスペクトルピークが小さくなることを確認した(図 5(a))。この結果は、高温動作時ほど SiC-SBD の ESR が大きくなること(図 2(a)(b))と対応づけられる。さらに、図 4 に示す等価回路モデルにおいてもこの影響を表現可能である。以上より、スイッチング動作時に生じる高周波振動電流の経路および振動減衰・周波数は、図 3 に示したノイズ源のモデル化手法により推定可能であることを実験により明らかにし、その妥当性が示された。

(2) ノイズ伝搬特性の評価

① 伝導エミッションの時間・周波数領域解析
一般に、機器から生じる電磁ノイズは周波数領域におけるスペクトルのレベルにより評価される。本研究では、時間および周波数の両領域から伝導エミッションの評価を試みた。短時間フーリエ変換に基づくスペクトログラム表示により、伝導エミッションの時間変動を表現することができ、前項(1)に示したノイズ発生源となるパワー半導体デバイスの動特性と対応させ、スイッチング動作と電磁ノイズの伝搬の両方を結び付けた特性付けが可能になることを実測評価により確認した(図 6)。

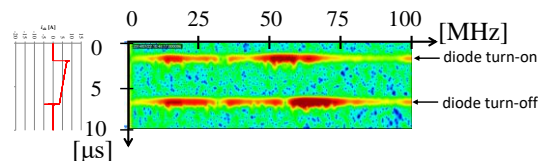


図 6 伝導エミッションの時間・周波数領域解析

② 近傍磁界分布評価によるノイズ伝搬経路の可視化

電流が流れる経路の近傍における磁界強度は、流れる電流の振幅に比例する。本検討では、回路上で発生及び伝搬するノイズ電流について評価するため、動作中のコンバータ回路基板に対して磁界プローブを用いた近傍磁界強度測定を行った。上述の(1)や(2)①で評価したノイズスペクトルピークを示す周波数成分について、空間磁界の強度と分布からノイズ発生源及びその伝搬経路を可視化できることを示した(図7)。本手法の結果を、回路設計における配線パターンや実装レイアウトの検討に応用することで、小型・低損失・低ノイズ特性を有する電力変換回路設計への展開が期待できる。

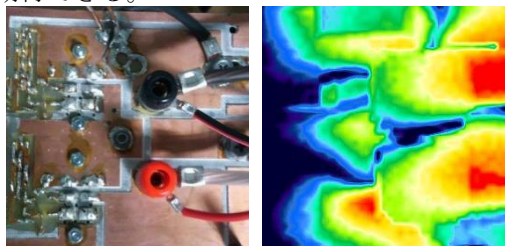


図7 近傍磁界測定に基づくノイズ電流の伝搬経路・空間分布評価

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① 井瀨 貴章, 舟木 剛, 「SiC ショットキーバリアダイオードの非導通時 ESR 特性が DC-DC コンバータの伝導性 EMI ノイズに与える影響評価」, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J100-B, No. 3, pp.149-157 (2017)

ホームページ等 :

http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j100-b_3_149&category=B&year=2017&lang=J&abst=

[学会発表] (計 5 件)

① 井瀨 貴章, 舟木 剛, 「SiC 素子を用いた DC-DC コンバータにおけるスイッチングノイズ発生源モデルに関する一考察」, 電気学会・電磁環境研究会, EMC-17-001, 2017 年 2 月.

② 井瀨 貴章, 「パワーエレクトロニクスと EMC」, 電子情報通信学会・ソサイエティ大会, BI-2-6, 2016 年 9 月.

③ Takaaki Ibuchi, Tsuyoshi Funaki, "A comparative study on conducted noise characteristics of SiC and GaN power transistor," Int. Conf. Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2016), 2016 年 9 月.

④ 井瀨 貴章, 舟木 剛, "An experimental investigation on conducted emission characteristics of SiC MOSFET in a DC-DC boost converter," 電気学会・電磁環境・マグネティックス合同研究会, EMC-16-036, MAG-16-073, 2016 年 6 月.

⑤ 井瀨 貴章, 舟木 剛, 「パワートランジスタの動作特性が DC-DC コンバータの伝導性エミッションに与える影響に関する一検討」, 電気学会・電磁環境研究会, EMC-16-015, 2016 年 3 月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井瀨 貴章 (IBUCHI, Takaaki)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号 : 90755646