

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420254

研究課題名(和文) 電力変換装置のコモンモード電磁妨害波を抑制する回路設計方法の開発

研究課題名(英文) Development of circuit design method for suppressing the common-mode noise of power converter

研究代表者

関口 秀紀 (SEKIGUCHI, Hidenori)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・その他部局等・上席研究員

研究者番号：80415843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、電力変換装置のコモンモード電磁妨害波の発生原因となるスイッチング時の電流、回路の線路間の平衡度、コモンモード電磁妨害波の関係から、定性的なコモンモード電磁妨害波発生メカニズムを明らかにした。また、広帯域コモンモード電磁妨害波電流を電流プローブを用いて精度に測定するため、ベクトルネットワークアナライザと校正治具を用いた電流プローブの伝達インピーダンス(感度)を高精度構成方法を開発し、その論文は国際学会論文誌 (IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility) に掲載された。

研究成果の概要(英文)：This study showed qualitatively the generating mechanism of common-mode noise of power converter, from the relationship between the switching current, the degree of impedance balance between outward and homeward lines and the magnitude of common-mode noise. Additionally, in order to measure accurately the wide-band common-mode noise using a current probe, a high reliability and reproducibility measurement method for the transfer impedance of the current probe was developed by means of a VNA (vector network analyzer) and a calibration fixture. The paper that described the measurement method was published in the IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility.

研究分野：環境電磁工学

キーワード：電力変換装置 コモンモード電磁妨害波 電流プローブ

1. 研究開始当初の背景

パワー半導体デバイス等のスイッチング素子を用いた電力変換装置は、小型・軽量・安価となることから近年大幅に普及しているが、そのパワー半導体デバイスのスイッチング動作に起因した電磁妨害波(コモンモードおよびディファレンシャルモード電磁妨害波)が発生し、その装置自身や周辺機器が故障・誤動作を生じる等の悪影響(電磁障害(EMI: Electromagnetic Interference))が問題となっている。

2. 研究の目的

本研究課題では、電力変換装置のコモンモード電磁妨害波の発生原因となるスイッチング時の電流、回路の線路間の平衡度、コモンモード電磁妨害波の関係から、コモンモード電磁妨害波発生メカニズムを明らかにすると共に、コモンモード電磁妨害波を抑制する電力変換装置の回路設計手法を確立する。本研究課題は、電力変換装置の開発において、コモンモード電磁妨害波を抑制する回路設計技術を確立し、付加価値の高い電力変換装置の回路設計手法を創出することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題では、電力変換装置によるコモンモード電磁妨害波の発生を抑制するため、始めに、回路で使用されるパワー半導体デバイスのスイッチング時の電流、回路の線路間のインピーダンスの平衡度、コモンモード電磁妨害波の周波数成分を測定し、定性的にコモンモード電磁妨害波の発生メカニズムを解明する。この際、コモンモード電磁妨害波を正確に測定するため、使用する電流プローブの伝達インピーダンスを高精度に把握する必要がある。次に、これらの関係を基に、回路の素子配置を線路間で対称化することによるコモンモード電磁妨害波の低減量を評価する。また、パワー半導体デバイスとヒートシンク間との寄生成分等も考慮して線路間のインピーダンスの平衡化を行う。これら結果から、コモンモード電磁妨害波の発生を抑制する電力変換装置のインピーダンス平衡化回路設計手法を確立する。

4. 研究成果

(1) 電流プローブの伝達インピーダンスの測定方法の開発

電流プローブの伝達インピーダンスの測定方法は、国際標準化機関である国際無線障害特別委員会(CISPR)の CISPR16-1-2 や国際標準化機構(ISO)の ISO11452-4 によって定められている。一方、多くの電流プローブメーカーや校正機関では、これらの国際規格に準拠した独自の伝達インピーダンス校正方法を用いている。

本研究課題では、コモンモード電磁妨害波を正確に測定するため、使用する電流プローブ

の伝達インピーダンスを高精度に把握する必要があり、国際規格に準拠した電流プローブメーカーの校正手順を用いて伝達インピーダンス特性を測定したところ、校正機器やケーブルによって精度や再現性が異なることを確認した。このため、ベクトルネットワークアナライザ(VNA)と校正治具を用いた高精度かつ再現性の良い電流プローブの伝達インピーダンス測定方法を開発した。

図1は、開発した電流プローブの伝達インピーダンス測定方法構成図を示す。本測定方法では、始めに、同図(a)に示すように、VNAに対して Defined Thru 法や Adapter Removal 法等の高精度の校正を実施する。次に、同図(b)に示すように各機器を接続し、校正治具を通過する信号を伝送係数 S_{21} として測定する。最後に、同図(c)に示すように各機器接続を変更し、電流プローブが検出する信号を伝送係数 S_{21}' として測定する。このとき、電流プローブの伝達インピーダンス Z_T は、式(1)により求めることができる。

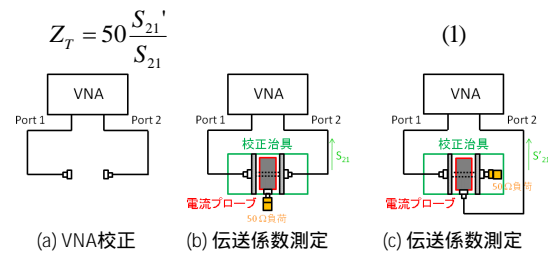


図1 伝達インピーダンス測定方法の構成図

開発した測定方法を用いて、使用する電流プローブの伝達インピーダンスを測定した結果を図2に示す。なお、同図中の E5061B および E5071C は Agilent 社の VNA の型番を示し、Reference は従来の測定方法による測定結果を示す。この結果から、開発した電流プローブの伝達インピーダンス測定方法は、従来の国際規格に準拠した方法より高精度かつ再現性良く伝達インピーダンス特性を測定できることを確認した。

本結果は、本研究課題の成果として、学術論文誌 (IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility) に投稿し掲載された。

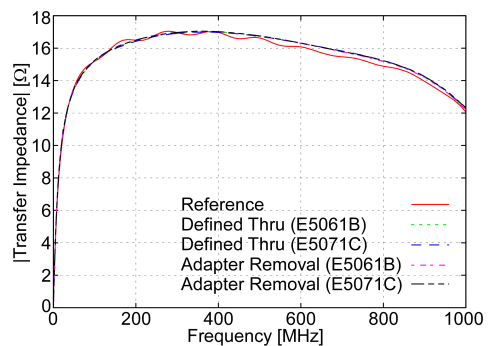


図2 伝達インピーダンスの測定結果

(2) コモンモード電磁妨害波の発生を抑制する電力変換装置のインピーダンス平衡化回路設計方法の開発

電力変換装置内に含まれるスイッチング回路では、スイッチング時の急峻な電圧変化により生じた高周波成分を含む電流がその電流経路を伝搬する。この電流経路上の電流をディファレンシャルモード（正相またはノーマルモード）電流と呼ぶ。また、通常、回路上の素子配置は非対称であるため、電流経路の往路と帰路のインピーダンスが不平衡となり、この不平衡度に依存してディファレンシャルモード電流がコモンモード（同相）電流に変換されると考えられる。このコモンモード電流は、回路上の浮遊キャパシタを介してグラウンドに流れ、他の周辺回路の動作に悪影響を与えるコモンモードノイズとなる場合がある。

図3は、一例として、パワー半導体スイッチングデバイス的一种である MOSFET を用いた非絶縁 DCDC コンバータの基本回路とディファレンシャルモード電流とコモンモード電流の伝搬経路を示す。なお、通常、MOSFET やダイオード D とそれらのヒートシンクの間には数十 pF から数百 pF の浮遊キャパシタ C_s が存在する（ヒートシンクは一般的には接地される）。

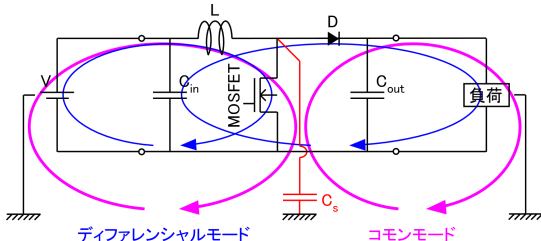


図3 非絶縁 DCDC コンバータの基本回路とディファレンシャルモード電流とコモンモード電流の伝搬経路

このスイッチング回路をプリント基板上に実装する際、EMI を予防する基本事項は以下の通りである。

- 広く安定したグラウンド面の確保
- 電源線・グラウンド線・配線は太く短く
- 電流経路（配線長）の最適化（最短化）
- 電流ループ面積の最小化
- ケーブルのシールド化，ペアケーブルのツイスト化

これらの基本事項を可能な限り実行した場合においても EMI 問題が生じる場合には、フィルタ等の対策部品も実装することになるが、費用の増加や回路基板面積の増大となる。

一方、コモンモードノイズの発生を抑制する回路設計手法として、電流経路のインピーダンスを平衡化する手法がある。本手法は、スイッチング回路等において、通常、電流経路に対して非対称である回路素子配置を対称化し、電流往路・復路のインピーダンスを平衡化することにより、ディファレンシャル

モード電流からコモンモード電流への変換を抑制する手法である。

図4は、図3に示す非絶縁 DCDC コンバータ回路において、素子配置を電流往路・復路に対して対称化した回路を示す。本回路では、入出力部において電流往路・復路のインピーダンス平衡化のための Y コンデンサ C_Y を挿入すると共に、インダクタ L の分割配置、MOSFET およびダイオード D とヒートシンク間の浮遊キャパシタ C_s およびダイオード D に対するインピーダンス平衡化のためのキャパシタ C_s およびダイオード D を挿入している。

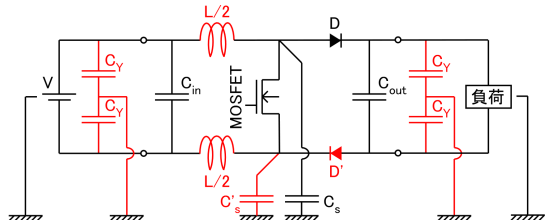


図4 インピーダンス平衡化非絶縁 DCDC コンバータ回路

図5は、基本非絶縁 DCDC コンバータ回路（図3）とインピーダンス平衡化非絶縁 DCDC コンバータ回路（図4）のコモンモード電磁妨害波の測定結果を示す。同図から、電流経路に対して非対称である回路素子配置を対称化し、電流往路・復路のインピーダンスを平衡化することにより、約 55MHz までのコモンモード電磁妨害波を抑制できることを確認した。

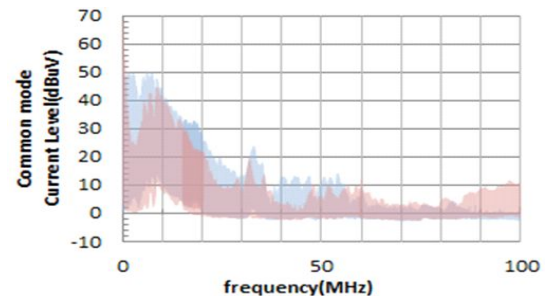


図5 コモンモード電磁妨害波の測定結果（青：基本非絶縁 DCDC コンバータ回路（図3）、赤：インピーダンス平衡化非絶縁 DCDC コンバータ回路（図4））

本研究課題では、回路素子の対称配置によるインピーダンスの平衡化により、伝導エミッション規格で規定される 30MHz 以下のコモンモードノイズが抑制されることが確認された。一方、対称配置された各素子の値に僅かな差があることから、高周波数領域において電流往路・復路のインピーダンスが完全平衡にならず、高周波数領域の伝導コモンモードノイズが大きくなることが確認された。また、電流往路・復路のインピーダンスを完全に平衡化する場合は、各素子自身の等価回路も検討する必要があると考える。本結果については、専門分野の講演会（招待講演）において報告した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

関口秀紀、パワーエレクトロニクス機器の省エネルギー化とEMI対策、科学技術出版株式会社 電磁環境工学情報 EMC、査読無、No.334、2016年、pp.9-22

<http://www.it-book.co.jp/EMC/backnumber/334.html>

Hidenori Sekiguchi, Tsuyoshi Funaki, Proposal for Measurement Method of Transfer Impedance of Current Probe, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 査読有, Vol.56, Issue.4, 2014年, pp.871-877

DOI:10.1109/TEMC.2013.2295415

関口秀紀、パワーエレクトロニクス機器のEMI対策、科学技術出版株式会社 電磁環境工学情報 EMC、査読無、No.314、2014年、pp.17-28

<http://www.it-book.co.jp/EMC/backnumber/314.html>

関口秀紀、舟木剛、パワーエレクトロニクス機器とEMC、電気学会論文誌A、査読無、134巻、1号、2014年、pp. 36~40

DOI:10.1541/ieejfms.134.36

〔学会発表〕(計2件)

関口秀紀、半導体スイッチングデバイスの発展とパワーエレクトロニクス機器のEMI対策、科学技術出版株式会社 次世代 EMC 研究会 2014EMC 環境フォーラム 技術セッション1(招待講演) 2014年12月5日、サンシャインシティ文化会館(東京都豊島区)

関口秀紀、半導体スイッチングデバイスの発展とEMI対策、科学技術出版株式会社 次世代 EMC 研究会 EMC 環境フォーラム 技術セッション1(招待講演) 2013年6月19日、サンシャインシティ文化会館(東京都豊島区)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

関口 秀紀 (SEKIGUCHI, Hidenori)

国立研究開発法人 海上技術安全研究所・
その他部局等・上席研究員

研究者番号：80415843

(2)研究分担者

舟木 剛 (FUNAKI, Tsuyoshi)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20263220