

令和元年6月13日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02328

研究課題名(和文) パワーエレクトロニクス・通信統合システムにおける電磁ノイズの合理的両立性の実現

研究課題名(英文) Development of high electromagnetic coexistence between power electronics instruments and communication networks

研究代表者

清水 敏久 (SHIMIZU, TOSHIHISA)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：30254155

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：パワーエレクトロニクス機器と通信ネットワークが融合したエネルギーシステムにおいて、パワーエレクトロニクス機器から放射される電磁ノイズが通信ネットワークの動作障害を引き起こす問題が顕在化している。本研究では、これを未然に防止する基盤技術として、パワエレ機器内部の耐ノイズ性能の向上技術、および情報通信機器のノイズ耐量向上のための新たな学理を構築し、高度な電磁環境両立に資する研究成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の電磁環境両立性はノイズの周波数成分分布に基づき、エミッションとイミュニティーの制限値が設けられていた。本研究ではパワエレ機器のノイズエミッション量と通信ネットワーク機器のイミュニティー量が十分に離れても、通信ネットワークの誤動作が発生することを示し、その原因がパワエレ機器の時間領域の繰り返しパルスノイズであることを明らかにした。そこで、パワエレ機器のノイズ時間タイミングと通信信号のサンプリングタイミングを一致させないように制御する事でCAN通信のノイズ誤動作をほぼ完全に抑止できることを示した。時間レベルのノイズ波形分析と対策手法は今後の電磁環境の新たな学理展開に極めて有益な知見と考える。

研究成果の概要(英文)：In an energy system in which power electronics devices and communication networks are integrated, a problem that electromagnetic noises radiated from the power electronics devices cause the operation failure of the communications networks has become apparent. In this research, as basic technology to prevent this, we developed a new theories not only to improve the noise resistance performance of the power electronics equipment but also to improve the noise tolerance of the information communication equipment. Those results will contribute to a high level electromagnetic environment coexistence.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：パワーエレクトロニクス 通信ネットワーク 電磁環境

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

重要な社会基盤である電気エネルギーについて、我が国はもとより世界各国における重点施策として、合理的なエネルギー供給体制のあり方に向けて非常に活発な議論が行われ、産学を挙げて研究開発が進められている。その手段として、パワーエレクトロニクス機器と通信ネットワーク機器が融合・連携し、エネルギーの供給を総合的に制御するスマートグリッド、マイクログリッド、HEMS などの実用化に大きな期待が寄せられている。近い将来にはパワーエレクトロニクスと情報通信システムが融合した電力・情報通信システムの巨大化・複雑化の時代が到来することが予想されている。しかし、電力と通信という二つの巨大な社会インフラが融合するということは、両者の相互依存の関係が極めて強くなることに他ならない。その場合、一方のシステム破綻が他方の破綻を誘発することにより、社会インフラの致命的な破綻を招く危険性(リスク)が高くなることを忘れてはならない。特に、パワーエレクトロニクス分野においては、超高速・低損失なスイッチングが行える炭化ケイ素電力用パワーデバイス(SiC)等の出現により、高電力密度化(小型化・高効率化)および電力制御性能などの点で飛躍的に性能が向上したパワーエレクトロニクス機器が広く普及することが予想される一方で、高速スイッチングに伴う電磁ノイズ発生量が増加する問題が明らかになりつつある。また、情報ネットワーク機器では通信伝送速度の飛躍的向上と広域ネットワーク化の一層の進展に伴って、パワーエレクトロニクス機器からの電磁ノイズに対する脆弱性が明らかになりつつある。

電気機器に伴う電磁障害の防止対策は、IEC等の電磁ノイズ規格に基づくのが一般的であるが、ノイズ発生源の発生量(エミッション)と外来ノイズによる誤動作の耐性(イミュニティ)の限度値の規格は既存機器の障害事例と機器ごとのノイズ対策に依拠しており、ノイズ発生から誤動作に至るメカニズムにまで踏み込んでいないところに問題がある。現に、IECの委員会内部でも、ノイズのエミッションとイミュニティを個別に評価したノイズ規制値の考え方には限界があり、パワーエレクトロニクス機器と情報ネットワーク機器の両方の視点から、ノイズエミッションとノイズイミュニティの間のメカニズムに着目した電磁環境の両立性の研究の重要性が認識されつつある。しかし、十分な研究成果が発信されていないことが深刻な問題となっている。

2. 研究の目的

本研究の代表者(清水)は、パワーエレクトロニクス分野の専門家として、パワーエレクトロニクス機器から放射される電磁ノイズの定量化、ノイズフィルタなどの受動部品の高性能化、パワーエレクトロニクス機器の高電力密度化に着目した多くの研究成果を持ち(IECに設置された国際無線障害特別委員会のCISPR-B国内作業班主任を勤めている。また、共同研究者(多氣)は電磁界障害の評価・対策の分野における世界的権威であり、総務省・情報通信審議会・電波利用環境委員会の主査を勤める中で、上記の課題を研究代表者と共有し、共同で研究に取り組んできた。さらに、共同研究者(福本)は通信ネットワーク信頼性分野の専門家として、パワーエレクトロニクス機器のノイズ環境下での通信ネットワークの高信頼化手法について豊富な研究実績を有している。

本研究では、同一の研究教育機関に所属するパワーエレクトロニクス、通信ネットワーク、電磁環境解析の3分野の優秀な研究者が研究課題を共有し、緊密に連携して研究に取り組むことにより、パワーエレクトロニクス機器と通信ネットワーク機器が融合したシステムに潜む電磁ノイズ干渉障害のメカニズムを明らかにし、合理的な電磁環境両立性を実現するための基盤技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、以下の3段階ステップを踏んで着実な研究を推進する。

課題1: パワエレ機器内部の制御信号の耐ノイズ性能の向上技術の確立

パワーエレクトロニクス機器内部でも、自身を制御する信号がノイズ誤動作を生じることが問題となっている。これまでの研究により、パワーエレクトロニクス機器の周期的なスイッチング時に生じる高周波振動が誤動作の主要因であることを突き止めている。本研究では、周期的に発生するノイズが制御信号に与える影響について詳細な分析を行い、スイッチング動作波形の改良によるノイズ成分の緩和、および周期ノイズに対応した制御信号の誤動作防止手法を開発する。

課題2: パワエレ機器のノイズに対する耐量を向上した情報通信機器の信号伝送手法の開発

パワーエレクトロニクス機器の近傍に設置された通信線路に誘導される電磁ノイズに対する耐量を向上できる通信プロトコルを開発する。本研究の特長は、パワーエレクトロニクス回路に固有の周期性ノイズに着目したもので、ノイズ発生タイミングの予測・データ保護(待避)・通信回復を効率的に行う手法を開発する。既に、小型インバータのノイズに起因して通信線路(CAN)に生じる伝送フレーム損失の検証と簡便な高信頼化手法について検討を行っている。本研究では、その知見を発展させて、パワーエレクトロニクス機器のスイッチング方式と放出されるノイズ特性、および通信プロトコルの信頼性と通信速度確保の両面から、ノイズ耐性に優れた信号伝送プロトコルの開発を行い、その有効性の検証を行う。

課題3: パワエレ機器と情報通信機器の統合環境における電磁環境両立手法の開発

実際のHEMS等を想定して、複数のパワエレ機器と通信線路が設置された環境を想定した電磁

環境両立性向上の手法を開発する。実際の各種機器の設置環境では、伝導性ノイズと放射性のノイズが混在して多様なノイズ干渉が発生する。そこで、伝導性ノイズについては等価回路法、放射性ノイズに対してはFDTD法（有限差分時間領域法）を用いて、上記（1）および（2）で開発した手法の有効性を評価すると共に、統合化によって新たに生じることが想定される複合ノイズの状態とその対応策を明らかにする。さらに、評価システムを製作して、開発した手法の有効性を検証する。

4. 研究成果

本研究の各研究項目における成果は下記である。

課題1：パワエレ機器内部の制御信号の耐ノイズ性能の向上技術の確立

パワエレ機器の電磁ノイズに起因する機器の誤動作様態の実験評価はこれまでも多くの機関で実施されてきたが、ノイズ誤動作の再現性が極めて低いと言う問題があった。そこで、本研究では、パワエレ機器の電磁ノイズによる動作障害を高い再現性で検証できるよう、図1に示す様なノイズ注入システムを開発した。このシステムでは、ノイズ誤動作の対象となるCAN通信線をパワエレ機器のノイズ電流経路周辺に近接して固定することが特長である。

本システムでパワエレ装置の制御信号を供給するCANの誤動作様態を観測してところ、図2に示す様に、パワエレ機器の動作電圧がある一定値を超過するとCANの誤動作が急速に増加し、その後動作電圧の増加と共に徐々にCAN誤動作が低減する現象を把握した。その現象を分析した結果、パワエレ機器に使用するパワーデバイスのドレイン・ソース間の寄生容量が動作電圧に依存して変化する事が原因であることが明らかとなった。この結果を踏まえて、パワエレ機器に使用するパワーデバイスのスイッチング時の過渡的な電位変動をある程度抑制することが、CANの誤動作の緩和に有効である知見を得た。

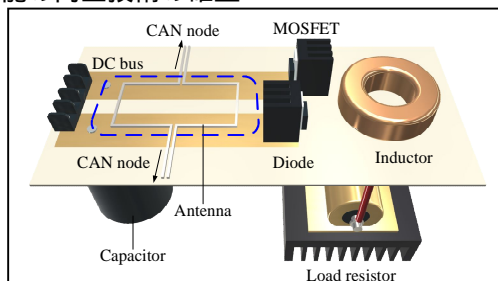


図1 ノイズ注入システムの構成例

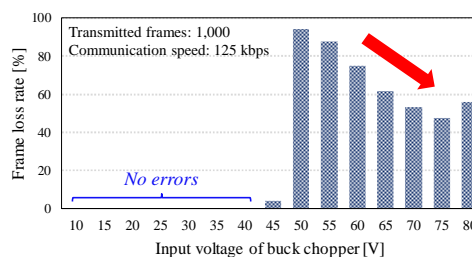


図2 CAN通信エラー試験結果

課題2：パワエレ機器のノイズに対する耐量を向上した情報通信機器の信号伝送手法の開発

パワエレ機器のノイズ電磁界がCANの通信線上に誘起する状況を観測すると共に、CAN通信線の通信エラーの状態を観測した。その結果、図3に示す様にCMノイズ電流(CM current at motor side)の発生タイミングでCAN通信線の信号電圧(Communication signal)に擾乱が発生し、最終的にCAN通信ロジック信号(MCU signal)に誤パルス(Error pulses)が発生することを見いだした。また、CAN通信線の信号電圧をサンプリングするタイミングでノイズが発生した場合に限ってCAN通信ロジック信号に誤パルスが生じることを見いだした。

そこで、パワエレ機器のノイズ発生とCAN通信線のサンプリングのタイミングが一致しないようにパワエレ機器のスイッチングタイミングを微小に時間シフトする手法を開発した。

また、CAN通信線に混入したノイズ信号がCAN通信信号電圧に変換されるメカニズムを明らかにすると共に、その抑制手法の基本検討を行った。

さらに、CAN通信信号のエラーによる通信フレームエラーが発生した場合に従来の再送動作を行う通信プロトコルに、前方誤り訂正を行うプロトコルを追加する手法を開発した。これらによりCAN通信エラーを大幅に低減できることを確認した。

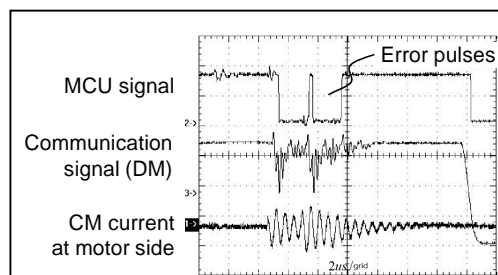


図3 CAN通信線上のノイズ波形

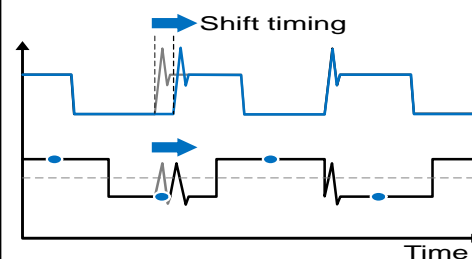


図4 タイミングシフト制御

課題3：パワエレ機器と情報通信機器の統合環境における電磁環境両立手法の開発

パワエレ機器とCAN通信を組み合わせて小規模HEMSシステムを模した実験装置を製作し、上記で開発したCAN通信障害の抑制効果を検証した。

図 5 はタイミングシフト制御(TSC)の有無による CAN 通信エラーの比較である。TSC 非動作時は CAN 誤動作数が極めて大きく、またパワエレ機器のスイッチング周波数に依存して大きく変化しているが、TSC 動作時はスイッチング周波数にかかわらず、CAN 通信エラーは完全に抑制されていることがわかる。

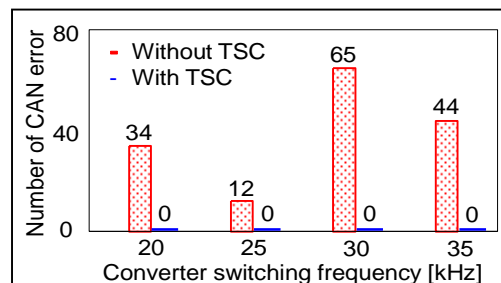


図 5 CAN 誤動作の比較

図 6 は TSC 非動作時と動作時のパワエレ機器の出力電圧の観測結果である。TSC 非動作時はパワエレ機器の出力電圧は一定値に安定に制御されているが、TSC 動作時は出力電圧が動揺していることがわかる。その原因は TSC 動作によってパワエレ機器のスイッチングが必要なタイミングで行われず、制御外乱となった為である。これを防止するにはパワエレ機器の出力電圧制御系に TSC に起因する制御外乱を補償する外乱オブザーバなどの補償器を適切に導入することにより解決出来ることがシミュレーションで明らかとなっており、本研究に引き続いて具体的な実験検証を行う予定である。

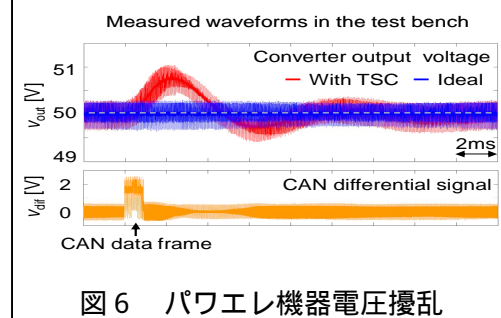


図 6 パワエレ機器電圧擾乱

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- (1) R. Shirai, T. Shimizu, “Time domain analysis of transmission failure on CAN system due to differential-mode noise emitted from a buck converter,” IEEJ-IAS Proceedings (accepted for publication)
- (2) 白井 諒, 清水 敏久, “電力変換回路が CAN 通信にもたらす電磁妨害の対策手法”, 電気学会論文誌 D, Vol.138, No.8, PP.713-714(2018)
- (3) Aromhack Saysanasongkham, Satoshi Fukumoto, and Masayuki Arai, “Fault masking issue on a dependable processor using BIST under highly electromagnetic environment,” Int. J. Computational Science and Engineering, Vol. 14, No. 4, pp.309-320, 2017.
- (4) 成田 剣太, 清水 敏久, “コモンモードモータサージ電圧の抑制法”, 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 9, pp. 635-645 (2016)
- (5) 林 真一郎, 和田 圭二, “スイッチング損失とサージ電圧の低減に着目したゲート駆動回路実装”, 電気学会論文誌 D, Vol. 136, No. 10, pp. 791-797 (2016)
- (6) Aromhack Saysanasongkham, Satoshi Fukumoto, and Masayuki Arai, “Fault masking issue on a dependable processor using BIST under highly electromagnetic environment,” Int. J. Computational Science and Engineering, Vol. 14, No. 4, pp.309-320, 2017.

〔学会発表〕(計 16 件)

- (1) 福本聡, “高電磁ノイズによる CAN バス伝送誤りの能動的回避手法,” 首都大学東京エネルギーインテグリティシステム研究センターシンポジウム, 2019 年 3 月.
- (2) Ryo Shirai, and Toshihisa Shimizu, “Failure Protection for Controller Area Network Against EMI Emitted by Buck Converter”, APEC(2019).
- (3) 永村美一, 福本聡, 新井雅之, “CNN による LSI レイアウト上の障害抽出に向けて,” 第 80

回 FTC 研究会, セッション 7, 2019 年 1 月.

(4) 佐藤諒平, 福本聡, “車載ネットワーク CAN の評価に関する考察,” 日本信頼性学会第 26 回信頼性シンポジウム, 2018 年 6 月 4 日.

(5) 佐藤諒平, 福本聡, 大原衛, “CAN プロトコルにおけるイベントトリガ型メッセージの応答時間解析,” 信学技報, vol. 118, no. 365, R2018-47, pp. 23-28, 2018 年 12 月.

(6) 佐藤諒平, 福本聡, 新井雅之, “標準車載ネットワーク CAN の評価手法,” 信学技報, vol. 118, no. 364, DC2018-60, pp. 13-17, 2018 年 12 月.

(7) 白井諒, 清水敏久, “降圧チョッパ回路が CAN 通信にもたらすディファレンシャルモードおよびコモンモード電磁障害の解析と対策手法の実験検証”, 電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, SPC-18-127, MD-18-087(2018).

(8) 白井諒, 清水敏久, 松崎頼人, 福本聡, “電力変換回路の制御通信に生じる電磁障害”, 平成 30 年電気学会全国大会, 第 4 分冊, p. 184 (2018)

(9) Ryo Shirai, Toshihisa Shimizu, “Study of EMI Caused by Buck Converter on Controller Area Network”, IPEC 2018 - ECCE Asia(2018).

(10) 白井 諒, 清水敏久, “電力変換回路が CAN 通信にもたらす電磁妨害の解析”, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 1-5, pp.111-112 (2017)

(11) 白井諒, 清水敏久, 福本聡, 松崎頼人, 許斐康司, “半導体電力変換回路が CAN 通信にもたらす電磁干渉解析に向けた基礎検討”, 平成 29 年電気学会全国大会, 第 4 分冊, p. 241 (2017)

(12) Ryo Shirai, Toshihisa Shimizu, “Study on Electromagnetic Disturbance of Buck Chopper Circuit into Control Area Network Communications”, S2PC(2017)

(13) 白井 諒, 清水敏久, “電解コンデンサの浮遊容量に起因する EMI ノイズの解析”, 電子デバイス・半導体電力変換合同研究会, EDD-16-057, SPC-16-144, pp.63-68(2016)

(14) Ryo Shirai, Toshihisa Shimizu “Study of Electromagnetic Disturbance Caused by Buck Converter on Controller Area Network”, IEEE ET & D (2017)

(15) 白井諒, 清水敏久, 福本聡, 松崎頼人, 許斐康司, “半導体電力変換回路が CAN 通信にもたらす電磁干渉解析に向けた基礎検討”, 平成 28 年電気学会全国大会, 第 4 分冊, p. 241 (2017)

(16) 白井諒, 清水敏久, “電力変換回路が CAN 通信にもたらす電磁妨害を対象とした新たな EMC 対策手法の基礎検討”, 電気学会半導体電力変換・モータドライブ合同研究会, SPC-17-134, pp.17 – 22(2017).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：和田 圭二
ローマ字氏名：WADA Keiji
所属研究機関名：首都大学東京
部局名：システムデザイン研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：00326018

研究分担者氏名：福本 聡
ローマ字氏名：FUKUMOTO Satoshi
所属研究機関名：首都大学東京
部局名：システムデザイン研究科
職名：教授
研究者番号（8桁）：50247590

研究分担者氏名：酒井 和哉
ローマ字氏名：SAKAI Kazuya
所属研究機関名：首都大学東京
部局名：システムデザイン研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：80730746

研究分担者氏名：多氣 昌生
ローマ字氏名：TAKI Masao
所属研究機関名：首都大学東京
部局名：システムデザイン研究科
職名：教授
研究者番号（8桁）：60145670

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

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、研究者個人に帰属されます。