

車載充電器における伝導ノイズシミュレーション技術の開発

Development of Conducted Emission Noise Modeling and Simulation Technology for On-Board Charger

嶺 岸 瞳
Akira Minegishi

山 岡 正 拓
Masahiro Yamaoka

崎 山 一 幸
Kazuyuki Sakiyama

山 田 徹
Toru Yamada

要 旨

近年、車載充電器をはじめとする電源回路のノイズは、スイッチング動作の高周波化に伴い大きな課題となっている。特に、1 MHzを超える周波数のノイズは筐体（きょうたい）を経由する共通モードノイズが主成分となるため、配線・筐体構造で特性が変化し、複雑な伝搬経路を有する。立体構造の伝搬特性を考慮するためには、3次元電磁界解析の必要があるが、長い解析時間を要するために設計に適用することが難しかった。

筆者らはノイズの伝播（でんぱ）に影響する筐体などの各要素を、高周波回路で用いられるインピーダンス測定および電磁界解析により、高精度な伝搬特性を抽出し、その結果を基に配線および筐体の高精度等価回路モデルを開発した。本モデルを用いた回路解析を行うことで、配線や筐体の影響を考慮したノイズ解析が可能となった。本手法をEV用車載充電器に適用した結果、回路解析で30 MHzまでの伝導ノイズ特性を良好に再現することを確立した。

Abstract

Recently, noise problems in power circuit systems such as an On-Board Charger (OBC) have become more serious due to their higher speed switching specifications. High-frequency conducted noise over 1 MHz is mainly caused by common-mode noise and has complicated frequency characteristics. It significantly depends on unexpected coupling between a line and structures. To consider these characteristics, it is necessary to perform a full-wave simulation. But such simulation is too long to be applied at the design stage.

So, we have developed a precise equivalent circuit model including a mechanical structure by using impedance measurement and simulation to extract highly accurate propagation characteristics of the structure. Applying this proposed modeling to an OBC circuit, the model has been validated to be able to precisely simulate conducted emissions up to 30 MHz.

1. はじめに

近年、環境保護意識の高まりやCO₂排出規制の強化を背景にEV (Electric Vehicle)、PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)の普及が進められている。これらの車両は走行前に、車内に搭載された電池を充電しエネルギーを蓄積することが必要となる。そのため、電池の状態に応じて充電する電力を制御する車載充電器が搭載されている。

車載充電器はスイッチング電源回路で構成され、動作中は半導体素子がスイッチ動作しノイズを発生させる。充電器は家庭などの電源系統から電源供給を受けて動作するため、電源系統に接続された他の機器にノイズが伝導することで誤動作や故障の原因になる。このような伝導ノイズは法規規格 (IEC61851-21, CISPR14-1 Class B)が定められており、規格に対応するための対策や設計の変更により、設計期間や部品のコストが増大してしまうという課題があった。

一方、初期の回路や基板設計の段階で、ノイズ電力の予測、発生メカニズムの分析、対策実施を行うことができれば、EMC (Electromagnetic Compatibility) 対策に要する時間とコストの低減ができ、課題が解決できる。これを実現するための電源回路ノイズシミュレーション手法に関しては複数、提案されている[1]-[3]。しかしなが

ら、大型筐体（きょうたい）や放熱機構を有する実用回路に適用した報告例は見あたらない。

本取り組みは、シミュレーションを用いて伝導ノイズの定量的な予測と対策立案を可能にする手法を開発し、回路設計時にEMC対策効果が確認できる設計手法の構築を目的とする。本稿では、実用回路で発生する伝導ノイズ現象をシミュレーションで再現するための解析手法について述べ、車載充電器に適用した結果を報告する。

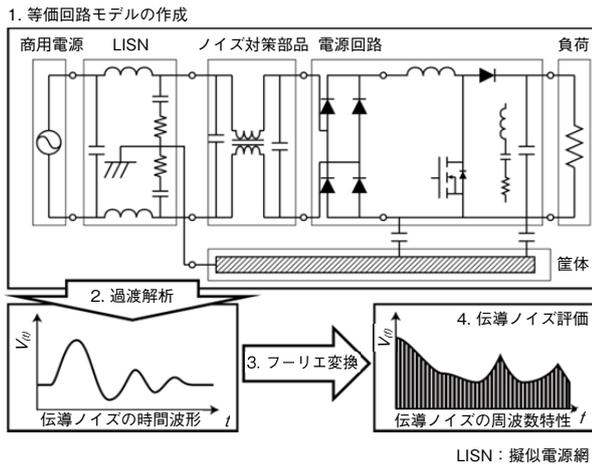
2. 伝導ノイズの解析手法

本取り組みでは伝導ノイズを広帯域な回路現象として捉え、ノイズの発生源とその伝搬経路を広帯域な回路モデル化することで、回路解析による伝導ノイズシミュレーションの実現を目指した。提案手法は3次元電磁界解析を用いる手法に比べ、計算速度の速い回路解析で伝導ノイズが予測できるため、大幅な時間短縮が可能となる。

提案する手法の基本的な考え方は、電源回路におけるノイズ源を、スイッチ素子のオン・オフ動作で発生する過渡的な高周波電圧および電流として捉えている。また、伝導経路は、配線を含む回路部だけではなく筐体を含む構造体までを考えている。これらを詳細にモデル化することで、ノイズ発生源から電源系統への伝導ノイズ伝搬

が再現できる。

提案するEMC特性のシミュレーションのフローを第1図に示す。最初に広帯域なインピーダンス特性をもつモデルを作成する。次に、過渡解析を行いノイズ評価端子の時間波形を取得し、フーリエ変換を行うことでEMC評価と等価なノイズの周波数特性に変換する。

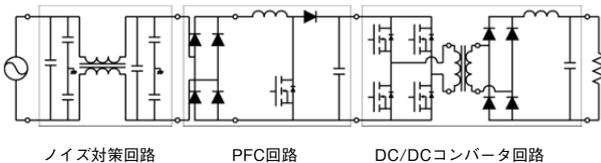


第1図 伝導ノイズシミュレーションの算出フロー
Fig. 1 Conducted noise simulation flow

2.1 車載充電器の構成

車載充電器の構成を第2図に示す。一般家庭に供給される交流電源から電池を充電するために必要な直流電圧および電流に変換する機能が必要となる。今回の検討では、スイッチング回路を含むAC-DC変換回路に電池を模擬した負荷抵抗が接続されている回路モデルを使用した。

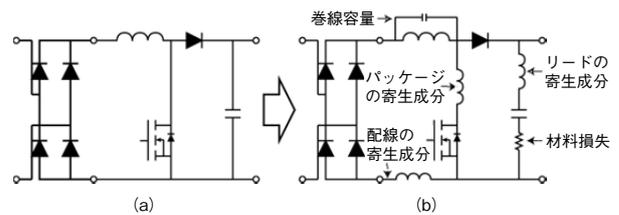
第2図において、交流入力側には伝導ノイズを防止するノイズ対策回路があり、その後段の整流回路およびPFC (Power Factor Correction) 回路がスイッチング動作し、入力電圧に比例した電流が入力側から供給されるよう制御され率が改善される。次にPFC回路が出力する直流電力を絶縁型DC/DCコンバータで、直流電圧および電流に変換し、負荷側 (二次電池) に供給される。



第2図 車載充電器のシステム構成
Fig. 2 On-board charger system diagrams

2.2 伝導ノイズシミュレーションのためのモデル化

ここでは、伝導ノイズのシミュレーションを実現するためのモデル化手法について説明する。実際の伝導ノイズは高い周波数成分をもつため、第3図 (a) のPFC回路図に対して (b) のように個々の部品やケーブルの寄生成分を考慮した高周波等価回路化が必要になる。本節では回路素子や回路図に示されている部品を広帯域で解析するための等価回路モデル化の手法について述べる。



第3図 PFC回路図(a)と高周波等価回路(b)
Fig. 3 Fundamental (a) and high-frequency equivalent circuit model of PFC circuit

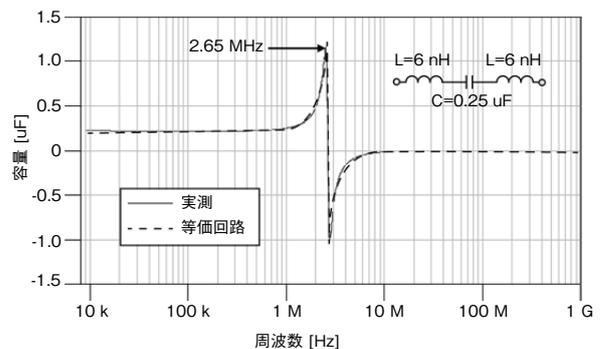
[1] 回路素子の等価回路モデル化

ノイズ現象を再現するために、抵抗やインダクタ、キャパシタなどの受動部品の広帯域なインピーダンス特性を再現する等価回路を作成する。具体的には、各部品に対しベクトルネットワークアナライザ (以下VNA) で透過電力と反射電力を表す、Sパラメータの周波数特性を測定する。測定したSパラメータをYパラメータに変換後、コンデンサの場合は式 (1) を、インダクタンスの場合は式 (2) の変換式を用いて等価回路の定数を抽出する。

$$\left. \begin{aligned} R_s &= \text{Re}(1/Y_{11}) \\ C_s &= -\text{Im}(Y_{11})/(2\pi f) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} R_s &= \text{Re}(1/Y_{12}) \\ L_s &= -\text{Im}(Y_{12})/(2\pi f) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

また、抽出したインピーダンス特性の共振周波数から、各部品の寄生成分を含んだ等価回路の値を求める。一例として、共振用コンデンサの抽出結果を第4図に示す。



第4図 コンデンサの容量値の周波数特性と等価回路
Fig. 4 Frequency responses of capacitor and equivalent circuit

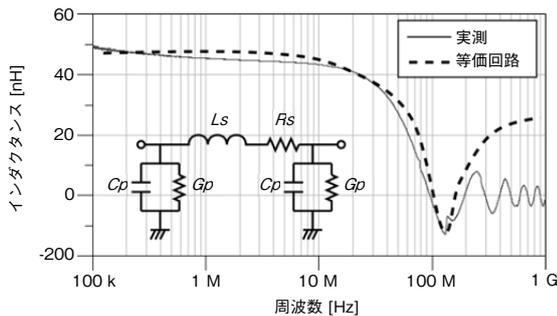
[2] ケーブル類の等価回路モデル化

製品で使われているケーブル類も寄生成分を有し、ノイズ特性に大きく影響を及ぼす。そこで、電源供給用の2芯ケーブル（長さ2 m、導体太さ1 mmφ、導体間隔5 mm、耐熱ビニール皮膜）の等価回路モデルを作成する。

具体的には、第5図に示す等価回路を仮定し、ケーブルのSパラメータをVNAで測定し、各定数を式(3)で求める。

$$\left. \begin{aligned} R_s &= \text{Re}(1/Y_{12}) \\ L_s &= -\text{Im}(Y_{12})/(2\pi f) \\ G_p &= \text{Re}(Y_{11} + Y_{12}) \\ C_p &= \text{Im}(Y_{11} + Y_{12})/(2\pi f) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

第5図に実測したケーブルの周波数特性と、等価回路の周波数特性を示す。作成した等価回路は伝導ノイズの国際規格であるCISPR14で定められている上限周波数である100 MHz程度までの特性をよく再現できていると考えられ、本手法の有効性が確認できた。

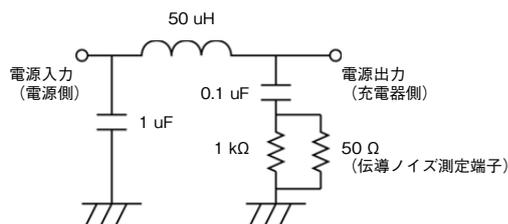


第5図 ケーブルの等価回路とインダクタンス特性
Fig. 5 Cable's equivalent circuit and inductance characteristics

[3] LISN（擬電源網）のモデル化

伝導ノイズの評価方法として代表的な雑音端子電圧はLISN（擬電源網）と呼ばれる電源網を模擬した回路を、電源と車載充電器の間に接続し、LISN内の高域通過フィルタに接続された測定端子で発生する電圧降下を測定する。

従ってLISNの等価回路を実際の回路モデルに組み込むことで実際の伝導ノイズ評価と同様の解析をすること



第6図 LISNのモデル (1相分)
Fig. 6 LISN (Line Impedance Stabilizing Network) model

ができると考え、車載充電器のEMC規格で定められている第6図に示した50 uH/50 Ω型の等価回路を作成した。これを第6図に示す。

2.3 伝導ノイズのシミュレーション

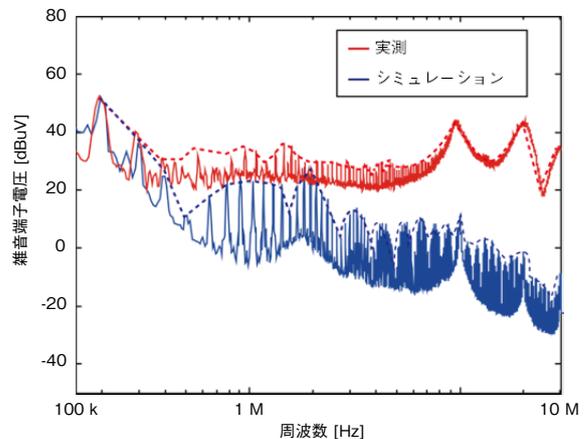
ここまでの検討結果を元に、車載充電器の基本回路に各部品、ケーブルの寄生成分、LISNの等価回路を加えた伝導ノイズモデルを作成しシミュレーションを行った。なお、シミュレーションは回路シミュレーションで一般的に用いられるSPICE（Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis）に基づくソフトウェアを使用した。

第7図にLISNの測定端子電圧（雑音端子電圧）の周波数特性を示す。なお第7図に示した実測値特性はLISNの測定ポートにスペクトラムアナライザを接続し測定した結果である。シミュレーションではLISNモデルの測定端子部分の過渡解析結果をフーリエ変換した値である。

結果より、解析および実測結果はともに駆動周波数である65 kHzの倍数ごとに高いレベルが現れることがわかった。これは一定周期でスイッチ動作しているためであり、解析がノイズ現象の基本を模擬できていることを示している。

ノイズ規制は各周波数の電圧の上限で定められているため、ノイズの最大値の再現性が重要である。第7図の破線は駆動周波数の整数倍成分をつないだもので、この差が推定精度の指標となる。この指標では500 kHz以下では、解析と実測の差が3 dB以内となったが、これ以上の周波数では特性に大きな差が見られた。

従って、本章で述べた提案手法は、低域のノイズ予測には有効である。一方、MHz帯域では大きく異なっており、さらに高い周波数帯域の等価回路化が必要と予測された。

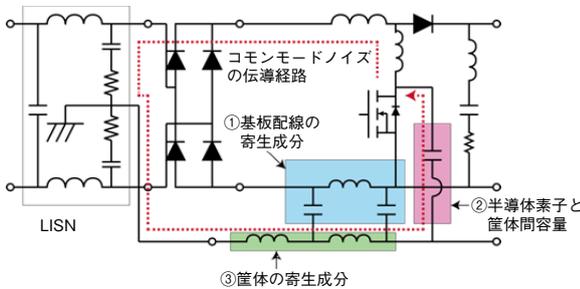


第7図 部品寄生成分を加えた場合の伝導ノイズ解析結果
Fig. 7 Result of conducted noise simulation's added components parasitic

3. コモンモード伝導ノイズのモデル化

前章までのモデル化では500 kHz以上の周波数において実測結果を再現できていない。その原因はノイズの伝導経路が不足しているためであると考えた。MHz帯域では部品などの寄生成分に加え、より微小なインピーダンス成分が伝導に寄与し、筐体などの接地面を介して伝導するコモンモードノイズが主因であると考えており、この視点で等価回路モデルを考えていく。

この伝導に影響する①基板配線②半導体実装③筐体に対する等価回路モデルを第8図に示す。本章では、モデル化の具体的な手法とこれを利用した解析結果について述べる。



第8図 筐体と基板配線を考慮した伝導ノイズモデル
Fig. 8 Conducted noise model considering board and chassis

3.1 基板配線の寄生成分のモデル化

部品間を接続する基板配線はそれぞれインダクタンスを有し、筐体に近い位置に設置されるため、筐体との間に容量を有する。これを第8図中の①で示す。

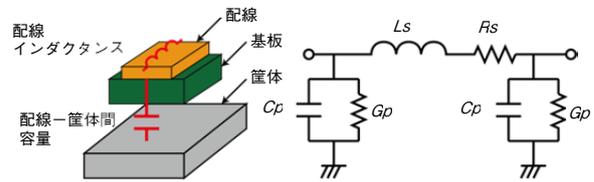
寄生インダクタンスは部品の寄生容量などと共振し、デバイス近傍ではリングングが発生するため、リングング周波数のノイズ電力が増加する。また、前述したように、基板と筐体間の容量によって、コモンモードチョークのインダクタンスと共振し、その周波数のノイズが筐体を介して電源側に伝導するため、ノイズがさらに増加されると考えられる。このような、高い周波数で発生する現象を再現するためには、配線の寄生成分を追加した等価回路化を行う必要がある。

しかし、基板配線のインピーダンスは微小であり、また安定的な接地面が基板内に存在しないため、測定用のコネクタなどによる誤差が無視できない。また、配線間隔も広いので測定自体が困難である。そこで、基板の寄生成分を抽出するために2.5次元電磁界シミュレータを用いた。なお、本シミュレータはモーメント法を用いており、計算上、理想接地点を設定できるため、安定的な接地面を有しない基板において解析境界・空間の取り扱

い方による誤差を考慮する必要がないという利点を有する。

上記の電磁界シミュレーションを用いて得られたSパラメータ特性から等価回路のモデルパラメータを抽出する。今回は基板導体を前述のケーブルと同様に伝送線路として捉え、パターンごとにSパラメータをシミュレーションし、Yパラメータに変換する。これを式(3)を用いて第9図に示す π 型等価回路として求める。

本手法をスイッチング素子に適用した結果、パワーMOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) に接続される配線が37.4 nHのインダクタンス、2.0 pFのキャパシタンスをもつことがわかった。このようにして全配線の等価回路モデルを作成した。



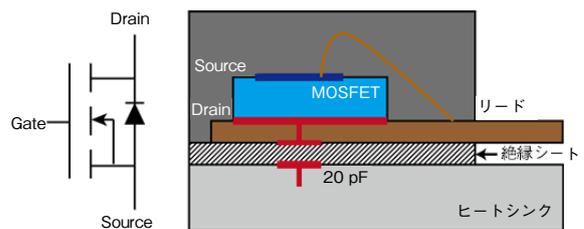
第9図 基板配線の構造と等価回路モデル
Fig. 9 Example of board line model

3.2 半導体素子の実装状態の再現

車載充電器では、半導体素子が損失により発熱するため水冷機構を備えた金属筐体と密着させて実装されている。

半導体素子が実装されている断面形状を第10図に示す。スイッチング素子のドレイン端子は絶縁シートを介して密着している。従って、ヒートシンク表面とMOSFETのドレイン端子間に絶縁シートを介したキャパシタンス成分を有し、それが筐体全体に接続されていると考えられる。この成分を第8図中の②で示す。

そこで、この寄生成分を求めるために、ヒートシンクのスイッチ素子の端子とヒートシンク間の接続を再現した治具を用いて、SパラメータをVNAで実測し、Yパラメータに変換後、そのアドミッタンス特性から等価回路パ



第10図 半導体素子の実装状態の断面図
Fig. 10 Sectioned drawing of semiconductor mounting

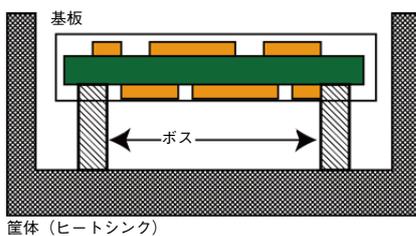
ラメータを抽出した。その結果ドレイン端子からヒートシンクまでの容量が20 pFであることがわかった。

3.3 筐体のモデル化

筐体は保安のために接地され、接地線を介してLISNに接続されおりノイズ伝搬の経路となる。また、筐体自体にもインダクタンス成分を有するため、第8図中の③の等価回路として考えることができる。配線や半導体素子の寄生成分を介して、筐体を伝導するノイズはノイズ対策部品を通らず直接接続されるため、筐体のもつ寄生成分の影響を大きく受ける。

また、雷サージなどのエミッション対策部品やYコンデンサなどのノイズ対策部品などは、金属ボスから筐体を介して接地している。Yコンデンサは、高い周波数成分のノイズが電源側へ伝導を防ぐ役割をしているが、筐体をもつインダクタンスとYコンデンサが直列共振した場合、インピーダンスが増大しノイズ伝搬を防ぐ効果が低下するため、筐体のインピーダンスを詳細にモデル化することが重要となる。

第11図に筐体と基板・半導体それぞれの実装状態を示す。半導体は前節でも示した通り筐体に絶縁シートを介して接地されており、基板は筐体から樹脂ボスで電気的に浮いた状態で配置されている。そこで、接地された部品が接続される各金属ボスからケーブルの接地線までのインピーダンスと、基板中心部からのケーブルの接地線までのインピーダンスを計測し第8図中③の等価回路に反映し、コモンモードノイズの経路をモデル上に再現した。



第11図 充電器の基板と筐体の関係

Fig. 11 Sectioned drawing of board and chassis

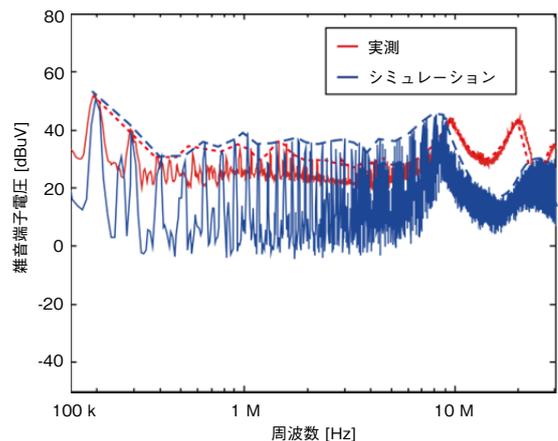
3.4 コモンモード経路を含む解析結果

以上の検討結果を元に、2章で作成した伝導ノイズに筐体および実装影響による寄生成分を加えた伝導ノイズモデルを作成し、回路動作および雑音端子電圧のシミュレーションを行った。解析方法は2.3節と同一である。

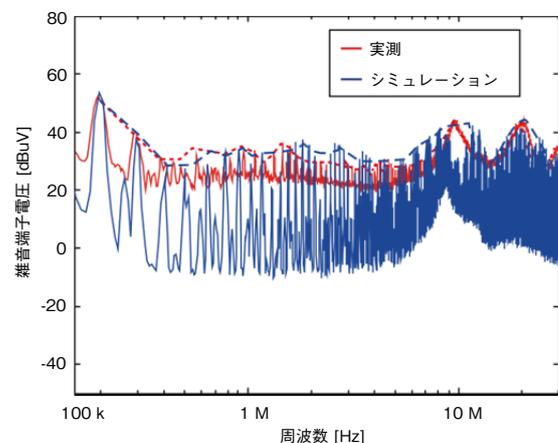
最初に基板配線のモデルを追加した結果を第12図(a)に示す。第7図では見られなかった9 MHzおよび20 MHz付

近にピークが現れている。次に、基板配線のモデルに筐体のモデルを加えた結果を第12図(b)に示す。結果より、実測とより一致することが確認できた。

9 MHz付近では基板寄生成分が、20 MHz付近では筐体の寄生成分が影響していることが確認できた。このように、伝導経路全体の詳細なモデル化により、実測に近いノイズ特性の再現ができた。



(a) 基板寄生成分を含むモデル
(a) Added board parasitic



(b) 基板と筐体の寄生成分を含むモデル
(b) Added board and chassis parasitic

第12図 伝導ノイズ解析結果

Fig. 12 Result of conducted noise simulation

5. まとめ

伝導ノイズを設計段階でシミュレーションするために、ノイズ現象を等価回路で表現するためのモデル化および解析手法を開発した。基板配線および筐体構造の寄生成分を抽出し、広帯域な伝導ノイズモデルを作成することで、伝導ノイズを回路モデルとして扱うことが可能となった。

そのため電磁界解析を用いた従来の手法では数日を要した伝導ノイズシミュレーションを、本手法により短時間で実施できるようになり、設計時点での伝導ノイズ対策が可能となった。

本解析技術は、車載充電器だけでなく伝導ノイズが問題となるパワエレ機器に広く応用可能と考えている。

参考文献

- [1] Liyu Yang et al., "Modeling and characterization of a 1 KW CCM PFC converter for conducted EMI prediction," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC 2004. Nineteenth Annual IEEE, vol. 2, pp. 763-769, 2004.
- [2] 井舘貴章 他, "EMIノイズ源モデル化に向けた電力変換回路のインピーダンス周波数特性の実験的考察," 信学技報, vol. 111, no. 335, pp. 29-34, 2011.
- [3] 白木康博 他, "等価回路による車載インバータの伝導ノイズ解析手法の検討," 信学技報, vol. 112, no. 468, pp. 19-23, 2013.
- [4] パワーエレクトロニクスシステムにおけるモデリングとシミュレーション技術, パワーエレクトロニクスシステムにおけるモデリングとシミュレーション技術協同研究委員会 (編), 電気学会技術報告, no. 1114, 2008.
- [5] 嶺岸 瞳 他, "インバータ電源回路の伝導ノイズ解析手法の検討," 信学技報, vol. 110, no. 237, pp. 37-41, 2010.
- [6] 嶺岸 瞳 他, "インバータ電源回路のコモンモードノイズ解析手法の検討," 信学技報, vol. 112, no. 100, pp. 13-16, 2012.
- [7] 原翔一 他, "パワーエレクトロニクス機器の大規模解析に向けた高速・高精度デバイスモデルの検討," 電子デバイス/半導体電力変換合同研究会, EDD-13-081, 大阪, Aug. 2013.

執筆者紹介



嶺岸 瞳 Akira Minegishi
 オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
 Engineering Div.,
 Automotive & Industrial Systems Company



山岡 正拓 Masahiro Yamaoka
 オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
 Engineering Div.,
 Automotive & Industrial Systems Company



崎山 一幸 Kazuyuki Sakiyama
 オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
 Engineering Div.,
 Automotive & Industrial Systems Company
 工学博士



山田 徹 Toru Yamada
 オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
 Engineering Div.,
 Automotive & Industrial Systems Company
 工学博士