

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420238

研究課題名(和文) 電力ケーブルの高周波減衰特性に関する研究

研究課題名(英文) Study of High-Frequency Resistance Characteristics of Power Cables

研究代表者

小笠原 悟司 (OGASAWARA, Satoshi)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40160733

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)：本研究は、パワーエレクトロニクス機器で問題となる数百MHzまでのEMI/EMCのシミュレーション精度を向上することを目的として、電力ケーブルの高周波減衰特性の測定法について検討することを目的としている。まず、電力ケーブルの高周波減衰特性の測定法を確立するとともに、単芯電力ケーブルの抵抗の周波数特性は表皮効果から計算した理論値と比較すると1桁程度大きいことを実験的に明らかにした。さらに、実験により求めた電力ケーブルの抵抗特性をEMIシミュレーションに用いることで、表皮効果の理論値を用いた場合に比べてシミュレーション精度が向上することを示した。

研究成果の概要(英文)：This research aims at establishment of measurement method of high-frequency power-cable resistance up to several hundred MHz to improve accuracy of EMI/EMC simulation for power electronics equipment. Some experiments using the proposed measurement method were done for several type cables, i.e., single-core cable, stranded-wire cable and Litz-wire cable. As a result, it is known experimentally that the resistance of the single-core cable is greater than theoretical resistance calculated from the skin effect, and that the resistance of stranded-wire cable or Litz-wire cable is not reduced as well as we have expected. Furthermore, it is shown that the measured resistance can improve the simulation accuracy of power electronics equipment, rather than theoretical resistance calculated from the skin effect.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：高周波減衰特性 電力ケーブル 表皮効果 近接効果 EMI

1. 研究開始当初の背景

近年、パワーエレクトロニクス技術が省エネルギー技術として注目されており、様々な機器への応用が広がっている。パワーエレクトロニクス技術の代表的なものであるインバータは一般産業機器だけでなく、ハイブリッド自動車、電気自動車、電車などの輸送機や、エアコン、冷蔵庫、洗濯機、蛍光灯などの家庭用電気機器に用いられており、他にも幅広い分野で応用されている。

しかし、パワー半導体デバイスのスイッチング動作に伴う電圧、電流の急峻な変化に起因する高周波電流が発生し、その機器内または機器外の電子機器に悪影響を与える電磁妨害(EMI: electromagnetic interference)が問題となっている。そのため、他の機器への影響を抑制し、かつ他の機器からの影響に強い電磁両立性(EMC: electromagnetic compatibility)を考慮した開発設計が求められている。

EMIは2種類に大別され、回路内の導線もしくは接地面を伝わる伝導性EMIと導線から電磁波として放射される放射性EMIに分けられる。伝導性EMIについては主に150kHzから30MHzの周波数範囲で問題となり、発生したノイズが導線や接地面を通して機器内及び機器外に伝搬することで悪影響を与える。伝導性EMI対策にはLCR等価回路などのモデリング技術に基づいた回路解析手法が用いられており、効果的なノイズ対策を施すことが可能となっている。

一方、放射EMIについては30MHz以上の高周波帯域で問題となり、機器に接続されている導線などに高周波ノイズが流れた場合にそれらが送信アンテナに作用し、高周波ノイズが電磁波として外界に放射され他の機器や通信アンテナなどに悪影響を及ぼす。

VHF帯では主に電線から高周波ノイズが電磁波として放射されることから、電線特性は放射EMI解析において大きな影響を持つ。そのため、高周波EMI解析の精度向上の点では正確な電線抵抗の特性を用いることが望ましい。表皮効果と近接効果の影響により電線抵抗が周波数の増加につれて増加することはよく知られているが[1]、実際にVHF帯での電線抵抗の周波数特性を測定した例は筆者の知る限り無い。

2. 研究の目的

本研究ではMHz以上の周波数帯での放射EMI測定の解析モデルの作成及び解析精度の向上を目的として、電力ケーブルの高周波帯域での電線抵抗の測定法を開発し、電力ケーブルの高周波減衰特性について検討を行う。

また、開発した高周波帯域での電線抵抗の測定法を用いて、実際にMHz以上の高周波帯域の電線抵抗の測定を行う。測定から得た電線抵抗をシミュレーションに応用することによる高周波解析の精度向上について考

察する。

MHz以上の高周波帯域での電線抵抗の測定法及び測定結果を示し、測定から得た電線抵抗が表皮効果を考慮した電線抵抗の理論値よりも10倍以上大きいこと、シミュレーションに測定した電線抵抗を適用することの有効性を示す。

3. 研究の方法

電線のみの場合の透過電圧の共振時の実験結果のピーク値がシミュレーション結果よりも5dB程度減衰していることが確認できた。EMI測定試験の構成物に存在する減衰の原因として、電線の導体抵抗による損失、電線被覆での誘電損失、グランドプレーンでの損失の3つについて検討を行ったが、電線被覆での誘電損失、グランドプレーンでの損失については無視できるほど小さいということが実験から確認している。このため、残された可能性として、電線の導体抵抗による損失が考えられる。

高周波帯では表皮効果、近接効果の影響により電線の導体抵抗が増加することは知られており、EMI解析などには表皮効果を考慮した導体抵抗の理論値が一般的に使用されている。しかし、EMI測定試験での結果から試験に使用した電線の導体抵抗が表皮効果を考慮した理論値よりも大きい可能性があるため、電線の導体抵抗を定量的に測定し評価することにした。

(1) 電線抵抗の測定法の提案

電線抵抗は非常に小さいため、十分な長さを持つ電線に対して測定を行う必要がある。しかしVHF帯では、電線の両端での信号の反射が原因で発生する共振現象により、電線内の信号にひずみが発生し、電線抵抗の正確な測定が困難になる。この問題を解決するために、分布定数線路理論を適用する[2]。分布定数線路では線路内の電圧・電流信号は波動として扱われ、線路内で発生する信号の透過、反射を数式で表わすことができる。

図1に、分布定数線路モデルを示す。線路モデルは一様であり、単位長さあたりの抵抗 R [Ω/m]、インダクタンス L [H/m]、静電容量 C [F/m]から構成されている。単位長さあたりのコンダクタンス G [S/m]は線路内の漏れ電流は無視できるほど小さいとして、モデル内には含んでいない。また、電圧源を線路の送端に、抵抗を線路の受端に接続している。

線路内で発生する共振現象は送端からの入射波と受端からの反射波が干渉しあうことで発生するので、共振現象の影響を最小限に抑えるには受端での信号の反射を無くせばよい。受端での信号の反射は線路の特性インピーダンスと受端の負荷インピーダンス

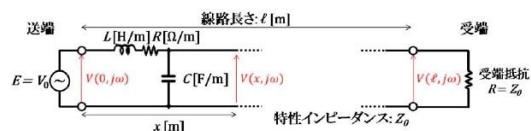


図1 分布定数線路モデル

によって決まり、線路の特性インピーダンスと受端の負荷インピーダンスを一致させることで信号の反射を零にできる。これをインピーダンス整合と呼ぶ。

今回の分布定数線路モデルでは受端抵抗を線路の特性インピーダンス Z_0 と一致させているので、受端でのインピーダンス整合が取れている。したがって、線路内には送端からの入射波のみが存在することとなり、送端からの距離 x の地点での電圧 $V(x, j\omega)$ は以下のように与えられる。

$$V(x, j\omega) = V(0, j\omega)e^{-\alpha x} = V(0, j\omega)e^{-\alpha} e^{j\beta x} \quad (1)$$

ここで、 α は伝搬定数、 β は減衰定数、 γ は位相定数と呼ばれ、線路の分布定数パラメータを用いて以下のように表される。

$$\alpha = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha' + j\alpha'' \quad (2)$$

式(1)から、線路を伝搬する信号の減衰が減衰定数 α' に依存していることは明らかである。

近似を用いると、減衰定数 α' は以下のよう求められる。

$$\alpha' = R/2\sqrt{CL} = R/(2Z_0) \quad (3)$$

次に、信号の減衰は送端での電圧 $V(0, j\omega)$ と受端での電圧 $V(l, j\omega)$ の振幅比から得られる。

$$|V(l, j\omega)/V(0, j\omega)| = e^{-\alpha' l} = e^{-Rl/(2Z_0)} \quad (4)$$

したがって、電線の単位長さあたりの抵抗 R は以下のように計算できる。

$$R = -(2Z_0/l) \ln |V(l, j\omega)/V(0, j\omega)| \quad (5)$$

(2) 測定手順

まず電線抵抗の測定のための準備として、受端抵抗の値を調整することでインピーダンス整合をとる。矩形波信号を発信器から線路に入力し、送端の入力信号をオシロスコープで観測する。インピーダンス整合が不完全である場合、線路両端での信号の反射によって矩形波信号がひずむ。一方、インピーダンス整合が正しくとれている場合、受端での信号の反射が無くなるので送端での入力信号はひずみの無い矩形波信号が観測できる。したがって、完全なインピーダンス整合をとるため、入力信号が矩形波信号になるように受端抵抗を調整する。

インピーダンス整合をとった後に、送端の入力信号と受端の出力信号の振幅比から信号の減衰量 [dB] を測定する。発振器から 10 ~ 100 MHz の正弦波信号を入力する。入力信号は線路を伝搬する間に電線抵抗により減衰するので、入力信号と出力信号の信号比から減衰量を測定する。

最後に、前項で紹介した分布定数線路理論により、電線の単位長さあたりの抵抗を測定から得た減衰量から計算する。

(3) 測定システム

図 2 に電線抵抗の測定システムの外観を、

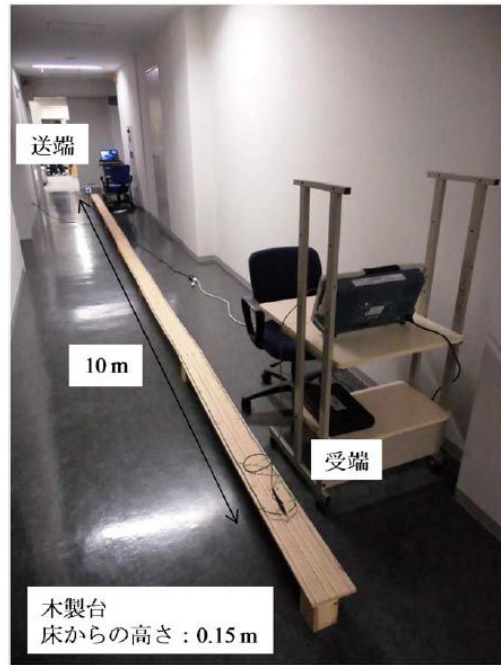


図 2 測定システムの外観

表 1 電線抵抗の測定に使用した機器

機器	製造元	型番
ファンクションジェネレータ	Tektronix	AFG3252
オシロスコープ	Tektronix	MSO4034
FET プローブ	Tektronix	P6205

表 2 電線抵抗の測定に使用した単線、撚り線の構成

	単線	撚り線
導体構成 [本/mm]	1/2.0	45/0.32
絶縁体厚さ [mm]	0.8	0.8
導体断面積 [mm ²]	3.14	3.5
最大導体抵抗 (20℃) [Ω/km]	5.65	5.09

表 1 に電線抵抗の測定に使用した機器の詳細を示す。測定は単芯のビニル絶縁電線(以下、単線)、撚り線のビニル絶縁電線(以下、撚り線)の 2 種類の電線についてそれぞれ行い、それぞれの電線抵抗について考察を行う。電線導体の構成によって導体抵抗に影響が出ないように、電線の導体断面積が同程度の単線、撚り線を選択した。使用した単線、撚り線の構成を表 2 に示す。

それぞれの電線 2 本から成る平行二線線路 10 m を高さ 15 cm の木製台の上に配線する。この時、近接効果の影響を抑制するため、2 本の電線間距離を 12 cm として配線している。線路に信号を入力するため、線路の送端に発振器を接続している。この時、発振器と線路を接続する同軸ケーブルが長い場合、同軸ケーブル内で共振現象が発生し、発振器の出力が不安定になることが確認されている。よって、同軸ケーブルはなるべく最短にすることが高周波測定では重要であるので、発振器の出力端子として全長 10 cm 程度と同軸ケーブルにワニ口クリップを半田付けしたものを使用した。

線路の受端にはインピーダンス整合に使用する炭素被膜抵抗を半田付けしている。線路両端の入出力信号波形を観測するために2台のオシロスコープを使用しており、高周波帯域でも十分に高いインピーダンスを維持するため、FETプローブを使用して電線両端の電圧波形を観測する。

(4) インピーダンス整合

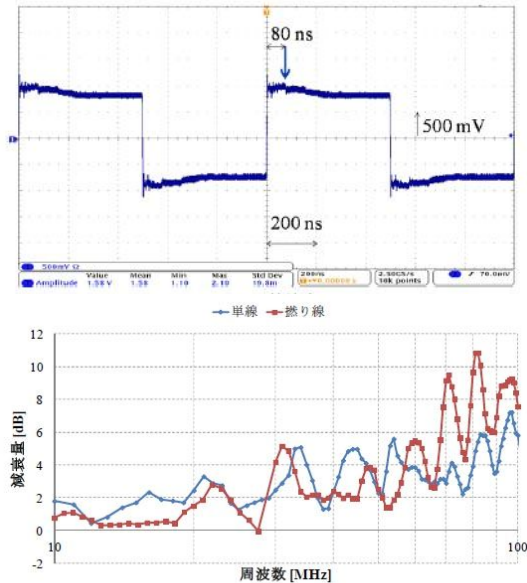


図5 整合試験での入力信号波形

図5(a)~(c)に単線の線路の受端に200Ω、300Ω、400Ωの抵抗をそれぞれ接続した場合の送端の入力波形を示す。図5(a),(c)に青色の矢印で示されているように、200Ωと400Ωを接続した場合に矩形波の立ち上がり時から80ナノ秒経過した後に波形がひずんでいることが確認できる。ひずみの大きさが受端抵抗の値によって変化することと、80ナノ秒という時間が信号の伝搬時間として妥当であることから、波形のひずみは受端での反射によるものであることは明らかである。

図5(b)から、300Ωを接続した時に入力波形のひずみが無く、受端での反射が最小限に抑えられていることがわかる。このことから、インピーダンス整合が正確にとれており、単線の線路の特性インピーダンスは約300Ωであることが推定される。

同様に、撚り線についても整合試験を行った結果、330Ωを接続した時に入力波形のひ

ずみが無くなることを確認した。よって、撚

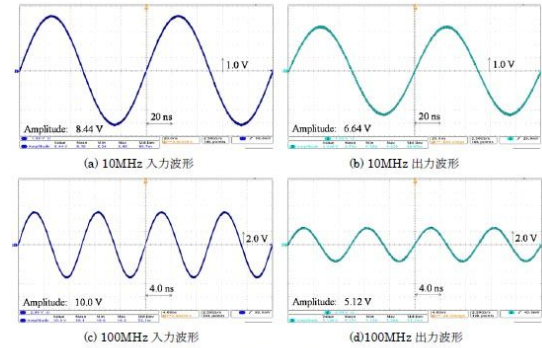


図6 減衰量測定での入出力波形

り線の線路の特性インピーダンスは330Ωだと推定される。

(5) 電線を伝搬する信号の減衰量測定

図6(a),(b)に10 MHzでの、(c),(d)に100 MHzでの入出力波形をそれぞれ示す。図6(a),(b)から、10 MHzでの正弦波信号の振幅が8.44 Vから6.64 Vに若干減衰しており、減衰量は約2 dBである。それに対して、図6(c),(d)から、100 MHzでの信号の振幅が10.00 Vから5.12 Vに比較的大きく減衰しており、減衰量は約6 dBである。

図7にそれぞれの電線の減衰量測定結果を示す。単線、撚り線の結果から、ともに周波数が高くなるにつれて減衰量が増加する傾向がみられる。これは表皮効果により電線抵抗が増加しているためだと考えられる。撚り線は表皮効果の影響を減らす効果が期待されたが、撚り線導体を構成する素線は一本一本絶縁されているわけではないため、表皮効果を抑制する効果がなく単線の測定結果と変わらなかったと思われる。

更に図7から、減衰特性がおよそ15 MHzごとに山なりに脈動していることがわかる。15 MHzという周波数間隔は線路の長さに応じて決まる共振周波数の間隔に等しいことから、受端でのインピーダンス整合が不完全であるために線路内での共振現象が発生しており、その影響により特性が脈動していると考えられる。

(6) 高周波帯域での電線抵抗の算出

図8に10~100 MHzの電線抵抗の算出結果を示す。本章で扱っている測定システムは電線2本で構成される平行二線線路であるので、測定値を2で割った値を電線一本当たりの単位長さ当たりの導体抵抗として、図8に示している。

また、表皮効果を考慮した電線抵抗の理論値を図8に合わせて示す。表皮効果により電線に流れる電流が導体表面に集中し、導体中心に近いほど電流値が小さくなる。なお、電流密度が導体表面のそれより1/eとなる導体表面からの深さを表皮深さと呼び、以下のように定義される。

$$= \sqrt{\frac{1}{\mu f}} \quad (6)$$



図8 電線抵抗の算出結果

ここで、 ρ は導体の抵抗率、 μ は導体の透磁率、 f は周波数を表す。

電流が表皮深さよりも外側の部分に一樣に流れると仮定すると、正円状の断面を持つ電線の導体抵抗 R は以下のように与えられる。

$$R = \frac{1}{S} = \frac{1}{\pi r^2} \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (7)$$

ここで、 S は導体の断面積、 r は導体半径を表す。

10 MHz 以上の周波数において、銅の表皮深さは $21 \mu\text{m}$ 以下となり、これは今回の電線の導体半径 1 mm よりも非常に小さいといえる。したがって、(7)式右辺の分母の第2項を無視できるものとする、表皮効果を考慮した電線の導体抵抗の理論式は以下のように得られる。

$$R = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{f \mu \rho} \quad (8)$$

図8より、測定から得られた電線の導体抵抗が表皮効果を考慮した理論値よりも10倍以上大きいことがわかる。更に、理論式では周波数の1/2乗に比例しているのに対し、測定値の近似式では約2/3乗に比例しており、周波数への依存性が強いことが分かる。

これらの電線の導体抵抗の増加の原因として、導体表面の状態に依存した抵抗の増加が考えられる。表皮効果理論によれば、100 MHzでの銅の表皮深さは $6.71 \mu\text{m}$ となり、電線に流れる電流のほとんどが導体表面に集中することになる。したがって、導体表面の酸化や表面粗さなどの影響を強く受けるものと考えられる。

(7) シミュレーションへの応用

前述の測定結果から得た電線の導体抵抗を検証するため、単線の減衰量測定での試験条件に基づくシミュレーションを行う。シミュレーションには3次元電磁界解析ソフトウェア「EMC Studio」を使用している。

図9に減衰量測定のシミュレーションモデルを示す。単線モデルは表2に示されている単線の寸法、物性値を参考にモデリングした。2本の単線モデルをプレーンより0.15 mの高さの位置に平行に並べ、長さ10 m、電線間隔0.12 mの平行二線線路を形成している。

線路の送端に発振器を模した電圧源モデルを接続し、線路の受端には終端抵抗を模し

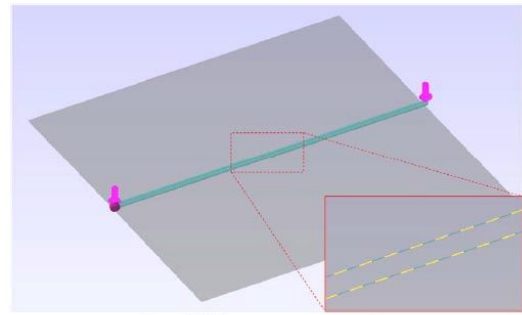


図9 抵抗測定のシミュレーションモデル

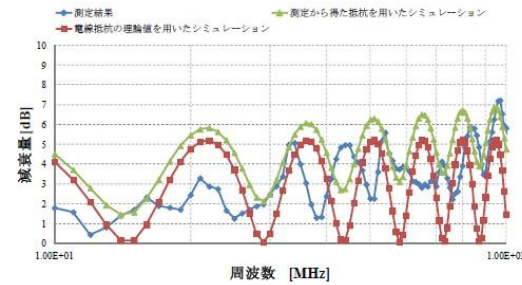


図10 測定結果とシミュレーション結果の比較

た抵抗を接続した。整合試験の結果から終端抵抗の値は 300Ω としている。

シミュレーションでは電圧源モデルから10 Vの出力電圧を線路に入力し、送端での入力電圧と受端での出力電圧から信号の減衰量をシミュレーションから得た。「EMC Studio」では電線モデルに単位長さ当たりの抵抗値を与えることができるので、シミュレーションでは、「測定から得た電線抵抗の近似値を用いた場合」、「表皮効果を考慮した電線抵抗の理論値を用いた場合」の2つの条件で行った。

図10に減衰量測定の測定結果と2つの条件で行ったシミュレーション結果を示す。

表皮効果を考慮した抵抗の理論値を用いたシミュレーションでは、減衰量が0~5 dBの範囲で脈動しているが、周波数が増えるにつれて減衰量が増加する傾向は見られない。測定から得られた抵抗の近似値を用いたシミュレーションでは、周波数が増えるにつれて減衰量が増加しており、脈動の谷(最低値)の部分の減衰量のレベルが測定結果に近い値が得られていることが分かる。このことから、測定から得た抵抗の近似値を用いたシミュレーション結果の方が表皮効果を考慮した抵抗の理論値を用いた場合より減衰の傾向が似ていることがわかる。

4. 研究成果

EMI測定試験結果では、電線の透過電圧の共振時のピーク値がシミュレーション結果よりも約6 dB減衰していることが確認できた。その減衰の原因について検討したところ、電線の導体抵抗による損失が一つの可能性として挙げられた。そこで、分布定数線路理論とインピーダンス整合に基づく高周波帯域の電線の導体抵抗の測定方法を提案し、実際に単芯及び撚り線のビニル絶縁電線の導

体抵抗の測定を行った。

測定ではまず、線路の受端に接続した抵抗の値を調整することで受端でのインピーダンス整合をとった。その後、線路の送端の入力信号と受端の出力信号の振幅比から、線路を伝搬する信号の減衰量を測定した。最後に、測定した減衰量から電線の導体抵抗を算出した。

測定結果から、測定から得た電線の導体抵抗が、EMI解析等によく使用されている、表皮効果を考慮した電線抵抗の理論値よりも10倍以上大きいことが判明した。これらの電線の導体抵抗の増加の原因として、酸化や表面粗さ等の導体表面の状態に依存した抵抗の増加が考えられる。

測定から得た電線抵抗の近似値を今回の電線抵抗測定のシミュレーションに適用し、その有効性を検証したところ、測定から得た電線抵抗の近似値を用いたシミュレーション結果と試験結果の減衰の傾向が似ていることが確認できた。

<引用文献>

大島修三他、「2 接触線の高周波通電に於ける近接抵抗に関する自由電子論的考察」電学論A、118巻2号、平成10年

C. Rodriguez Valdez, R. M. Tallam, and R. J. Kerkman, "A New Frequency-Dependent-Model for Cables", IEEE International conference on electro/information technology, pp. 151-158, 2008.

Xin Liu, Xiang Cui, Lei Qi, Guishu Liang, and Lizhi Yan, "Wide-band Modeling of Cables Based on the Fractional Order Differential Theory", 2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), pp.604-608, 2011.

Andre W. Cirino, Helder de Paula, Renato C. Mesquita, and E. Saraiva, "Cable Parameter Variation due to Skin and Proximity Effects: Determination by means of Finite Element Analysis", Industrial Electronics, 2009. IECON09. 35th Annual Conference of IEEE, pp. 4073~4079, 2009.

Alberto Pagnetti, Alain Xemard, Francoise Paladian, and Carlo Alberto Nucci, "Evaluation of the Impact of Proximity Effect in the Calculation of the Internal Impedance of Cylindrical Conductors", General Assembly and Scientific Symposium, pp. 1~4, 2011.

Bidyut K. Sen and Richard L. Wheeler, "Skin Effects Models for Transmission Line Structures Using Generic SPICE Circuit Simulators", IEEE 7th topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging, pp. 128~131,

1998.

武部幹、「回路の応答」、編著：電子情報通信学会、発行：コロナ社、発行日：昭和56年4月30日

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)

[学会発表](計1件)

Yutaro Fujimori, Satoshi Ogasawara, Masatsugu Takemoto, "Measurement of resistance characteristics of power cables in the very high frequency band for improving electromagnetic interference analysis", International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), pp. 903-908, 2013/11/4

[その他]

ホームページ等

<https://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/eec/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小笠原 悟司 (OGASAWARA, Satoshi)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：40160733

(4) 研究協力者

藤森 祐太郎 (FUJIMORI, Yutaro)