

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04321

研究課題名（和文）改良型インピーダンス展開法による無線電力伝送システムの等価回路モデリング

研究課題名（英文）Equivalent-circuit modeling of wireless power transfer systems using an improved impedance expansion method

研究代表者

羽賀 望（Haga, Nozomi）

群馬大学・大学院理工学府・助教

研究者番号：50638476

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多様な形状・材料が混在した無線電力伝送システムの回路モデリングを行うため、研究代表者が提案してきた回路モデリング手法であるインピーダンス展開法（impedance expansion method: IEM）を拡張した。まず、従来のIEMでは線状導体しか扱えなかったのに対し、任意形状導体（帯状導体など）も扱えるように拡張した。さらに、コイル等の近傍に存在し得る導体（金属筐体や自動車のボディなど）及び誘電・磁性体（誘電体基板やフェライトなど）の影響を考慮できるようにIEMを拡張した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線電力伝送システムの設計において、コイルや電極を回路モデルで表すことは広く行われていた。しかしながら、ごく単純な場合を除いて、回路モデルの素子定数を特定するための理論式の導出は困難であり、素子定数を特定するには、測定データに基づくフィッティングが必要であった。したがって、回路モデルの理論的根拠や適用可能範囲は不明確であった。本研究で拡張された手法は回路モデルの明確な理論的根拠を与えるとともに、その素子定数を容易に特定することができる。このことは、コイルと電力変換回路の一体的設計を可能にし得るなどの工学的意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：In this study, the impedance expansion method (IEM), a circuit modeling method proposed by the principal investigator, is extended to handle wireless power transfer systems with various shapes and materials. First, the IEM was extended to handle arbitrarily shaped conductors (e.g., strip conductors), whereas the conventional IEM could only handle conducting wires. Furthermore, the IEM was extended to consider the effects of conductors (such as metal enclosures and automobile bodies) and dielectric and magnetic materials (such as dielectric substrates and ferrites) that may be present in the vicinity of coils and other components.

研究分野：アンテナ・伝播

キーワード：インピーダンス展開法 モーメント法 回路モデリング

1. 研究開始当初の背景

無線電力伝送 (wireless power transfer : WPT) 技術は古くから知られている。図1のような自己共振コイルを用いたシステムでは、従来考えられていたよりも電力伝送可能距離を長くできることが分かったことをきっかけに、その応用可能性から精力的な研究開発が行われている。

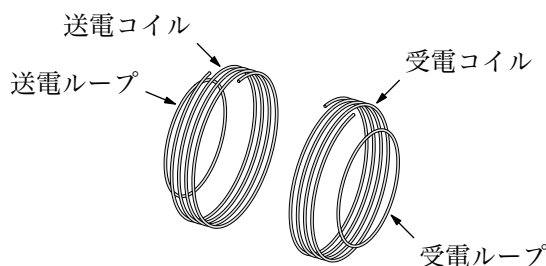


図1：WPTシステム

WPTシステムを設計する際、例えば図2のような回路モデルで表すことが、しばしば行われる。この背景として、送電側のインバータ回路や受電側の整流回路のような非線形回路を設計する上で都合であることが挙げられる。コイル単体では共振しないシステムの場合、図中のキャパシタは外付け部品であり、抵抗とインダクタンスは理論式などから求められることが多い。しかしながら、自己共振を用いたシステムの場合、回路パラメータを求めるための簡便な理論式は存在しない。また、電磁干渉などを議論する上で重要な放射損失を回路モデルに取り入れる方法も、これまで存在していなかった。

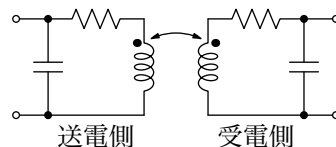


図2：回路モデル

一方、数値電磁界解析 (モーメント法, 有限要素法, FDTD 法など) により送受電間の電装特性を求めることも行われる。図3は、モーメント法で計算したコイル近傍の磁界強度分布である。この方法では、コイルの自己共振現象や放射損失を正確に反映できる利点がある。また、コイルの形状・配置に関する汎用性も高い。しかしながら、一般に電磁界解析は計算コストが高い。さらに、モーメント法や有限要素法は基本的に周波数領域の手法であるため、非線形回路との連成解析が難しい。一方、FDTD法は時間領域の解析手法であるので、非線形回路との連成解析は可能であるものの、回路シミュレータとの動的な接続が必要となる。これは、回路設計の立場からすれば、計算コストが過剰となってしまうことを意味する。

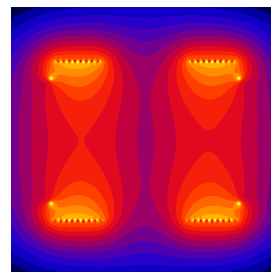


図3：電磁界解析

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、研究代表者はインピーダンス展開法 (impedance expansion method : IEM) という新たなアプローチを提案している。これは上述したモーメント法に基づく回路モデリング手法であり、表1に示すように、一般的な回路モデルと電磁界解析の長所を併せ持つ。一般的なモーメント法では、コイルの電流・電圧を離散化し、それらに関係付けるインピーダンス行列を数値積分により求める。IEMでは、このインピーダンス行列を複素角周波数 s に関してローラン級数展開し、 s^{-1} , s に比例する成分をそれぞれキャパシタとインダクタで表す。また、 s^2 , s^4 に比例する成分により電気双極子と磁気双極子による放射損失を表す。また、この行列の固有値解析により求めたコイルのモード電流でコイルの電流を近似することで、回路モデルの規模を大幅に低減できる。これにより、電子回路とコイルの設計を効率的かつシームレスに行えるようになることが期待できる。

表1：IEM と一般的な回路モデルおよび電磁界解析との比較

	回路モデル	IEM	電磁界解析
計算コスト	◎	◎	△
非線形回路との整合性	◎	◎	△
自己共振・放射損失に関する正確性	△	◎	◎
コイルの形状・配置に関する汎用性	△	◎	◎

ただし、従来の IEM では、コイルがワイヤ状の導体で構成され、かつ周囲に何も無い状態の WPT システムしか扱うことができなかった。本研究の目的は、IEM を拡張して、任意形状の導体と誘電・磁性体を含んだ多様な WPT システムの回路モデリングを行うことにある。

3. 研究の方法

本研究は新しい電磁界解析技術を開拓するものであり、その第1ステップは数式をベースにした理論整備となる。例えば、モーメント法の基礎となる電磁界の積分方程式に低周波数領域における近似表現を求めるなど、解析学的な検討が必要となる。また、積分方程式を離散化した結果であるインピーダンス行列に関する数値計算が精度良く行えるかなどの線形代数的な検討も

必要となる。さらに、後のステップにおける数値計算を高精度・高効率化するため、微分・積分の計算を可能な限り解析的に行うなどの作業も必要となる。

第2ステップは、数値計算プログラムの実装である。まず、インピーダンス行列の各要素を数値積分するサブルーチンの開発が必要である。その際、離散化された電流要素が直角座標系に沿っている場合など、完全に解析的に積分できる例を比較対象として、数値積分の精度を検証する。続いて、全体のプログラムを構築し、理論通りの数値計算が行えることを確認する。この際、一般的なモーメント法による結果を比較対象として、IEM が適用可能な周波数範囲などについて確認する。

第3ステップでは、開発されたプログラムを具体的な WPT システムに適用して、その回路素子定数を求める。そして、この回路モデルにより WPT システムの周波数特性を計算し、通常電磁界解析手法による計算値や測定値とどの程度一致するか確認する。また、コイル近傍の導体や誘電・磁性体の有無やその寸法が素子定数に与える影響などについても検討する。

4. 研究成果

まず、IEM の適用可能対象がワイヤ状導体に限られていたところを任意形状導体にも適用するための拡張を行なった。従来の IEM では、任意形状導体の電流を離散化すると、それらに関係付けるインピーダンス行列にランク落ちが発生してしまうため、モード電流を求めるための固有値解析を行うことができなかった。ランク落ちが発生してしまうのは、導体の電荷分布の自由度に対して、電流要素の数が過剰になってしまうためである。これを回避するため、電荷に関係する電流要素（発散が非ゼロ）と、電荷と無関係の電流要素（発散がゼロ）によって導体の電流分布を離散化するようにした。これに合わせて固有値解析の手順を見直すことで、任意形状導体のモード電流を求められるようになった。

続いて、自動車のボディなど、コイルの近傍に存在する電磁波を散乱する導体（散乱導体）の影響を考慮できるように IEM を拡張した。通常、散乱導体は特定の周波数で共振するように設計されていないため、少数のモード電流でその電流分布を近似することは困難である。そうかと言えど、散乱導体の離散化された電流をそのまま回路モデルに落とし込むと、電流要素数に比例して回路モデルの規模も増大してしまう。これは、回路モデルの利点を大きく損なうことになる。そこで、導体による散乱の寄与をコイルの電流要素間のインピーダンス行列に重畳する方法を考案した。この方法では、コイルの電流要素により散乱導体に誘導される電流と、それにより生じる散乱電界を複素角周波数 s に関するローラン級数の形で求め、この散乱電界をコイルの電流要素で重み付け積分することで、インピーダンス行列に重畳される成分を求める。この拡張された IEM を散乱導体近傍の WPT システムに適用し、散乱導体の影響を正確に回路モデルに反映できることを確認できた。

さらに、散乱導体に対する IEM を更に拡張して、樹脂やフェライトなど、誘電・磁性体を含んだ WPT システムを扱えるようにした。この方法では、コイルの電流要素により誘導される誘電・磁性体の表面電磁界と、それにより生じる散乱電界を複素角周波数 s に関するローラン級数の形で求め、この散乱電界をコイルの電流要素で重み付け積分することで、インピーダンス行列に重畳される成分を求める。このさらに拡張された IEM を図4に示すフェライト板付き WPT システムに適用し、図5のような回路モデルを得た。図6に示す通り、この回路モデルにより求めた送受電間の伝送特性は、一般的な電磁界解析により求めた結果とほぼ一致しており、回路モデルの妥当性が確認できる。

なお、IEM と同様に電磁界解析手法に基づく回路モデリング手法として、部分要素等価回路法（partial-element equivalent-circuit method : PEEC 法）が挙げられる。この PEEC 法でも誘電体・磁性体の表面電磁界あるいは内部電磁界が離散化されるが、PEEC 法による回路モデルにはこの離散化された電磁界に対応する電流を含める必要があるため、回路モデルの規模が大きくなってしまふ。それに対して、拡張された IEM では、誘電・磁性体の寄与を回路素子定数の変化として表せるため、回路モデルの規模は小さく保たれる。これが、既存の手法に対する本研究の優位性と言える。

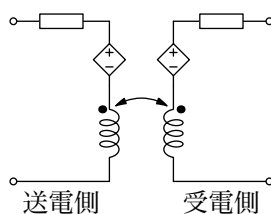


図5：回路モデル

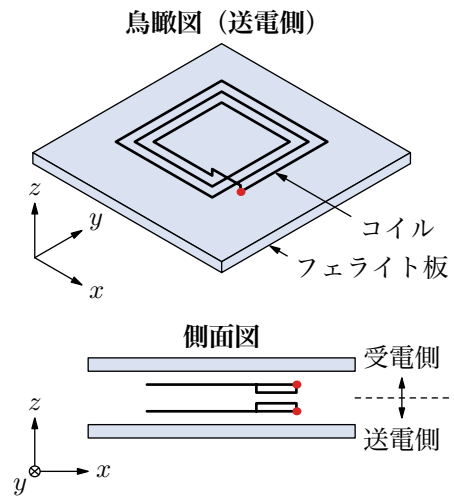


図4：フェライト板付き WPT システム

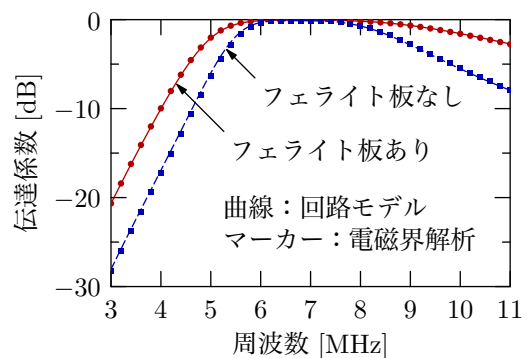


図6：電力伝送特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nozomi Haga, Jerdvisanop Chakaroathai, and Keisuke Konno	4. 巻 70
2. 論文標題 Circuit modeling of a wireless power transfer system containing ferrite shields using an extended impedance expansion method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques	6. 最初と最後の頁 2872-2881
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMTT.2022.3149830	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nozomi Haga, Keisuke Konno, and Jerdvisanop Chakaroathai	4. 巻 19
2. 論文標題 Notes on EFIE-PMCHWT formulation for feeding gaps on printed conductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters	6. 最初と最後の頁 2028-2032
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LAWP.2020.3020565	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nozomi Haga, Jerdvisanop Chakaroathai, and Keisuke Konno	4. 巻 E103-B
2. 論文標題 Circuit modeling of wireless power transfer system in the vicinity of perfectly conducting scatterer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1411-1420
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2019EBP3211	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nozomi Haga and Masaharu Takahashi	4. 巻 18
2. 論文標題 Modal impedance expansion method using loop-star basis functions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters	6. 最初と最後の頁 1601-1605
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LAWP.2019.2925058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Nozomi Haga, Jerdvisanop Chakaroathai, and Keisuke Konno
2. 発表標題 Circuit modeling of wireless power transfer systems using impedance expansion method
3. 学会等名 Asia-Pacific Microwave Conference 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽賀望, チャカロタイ ジェドヴィスノブ, 今野佳祐
2. 発表標題 完全導体からの散乱を考慮した無線電力伝送システムの回路モデリング
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線電力伝送研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 羽賀望, 高橋応明
2. 発表標題 無線電力伝送システムの受動素子回路モデル
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線電力伝送研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽賀望, 高橋応明
2. 発表標題 無線電力伝送システムのマルチモード回路モデル
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線電力伝送研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽賀望
2. 発表標題 モーメント法によるシース付き海中ループアンテナの解析
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関