

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04137

研究課題名(和文)無線電力伝送のための高周波パワーエレクトロニクス理論の確立

研究課題名(英文)Establishment of RF Power Electronics for Wireless Power Transfer

研究代表者

平山 裕(Hirayama, Hiroshi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70372539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：無線電力伝送技術には、インバーターの応用としてのパワーエレクトロニクスに基づく技術と、アンテナ・高周波回路の考え方に基づいたマイクロ波技術によるものがある。それぞれの分野における研究は活発に行われているが、さらなる発展のためには、両者を融合した理論体系の確立が有用である。本研究では、「周波数変換」「インピーダンス変換」「伝搬モード変換」の考え方に基づいた、無線電力伝送工学の体系化を行った。さらに、その応用として、高周波におけるインピーダンス整合を、パワエレ回路のDC-DCコンバーターで実現する方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線電力伝送技術の実用化のためには、電力を扱うパワーエレクトロニクス工学と、高周波を扱うマイクロ波工学の融合が必要である。本研究は、両分野の考え方を統一的に説明できる基盤を準備したことにより、一方の分野の考え方が、他方の分野にどのように対応するかが明解になり、技術の融合を容易にしたことが、学術的意義である。さらに、その有用性を実証するために、マイクロ波技術とパワエレ工学を融合した「複素MPPT回路」を提案し、無線電力伝送の高効率化を実現したことが、社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：Wireless power transmission technologies include those based on power electronics as an application of inverters and those based on microwave technology based on the concept of antennas and high-frequency circuits. Although research in each field is active, for further development, it is useful to establish a theoretical system that integrates the two. In this study, we systematized wireless power transmission engineering based on the concepts of "frequency conversion," "impedance conversion," and "propagation mode conversion. Furthermore, as an application of the system, we proposed a method to realize impedance matching at high frequencies in a DC-DC converter of a power electronics circuit.

研究分野：通信・ネットワーク工学/電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：無線電力伝送 マイクロ波 アンテナ パワーエレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

無線電力伝送技術の実用化のためには、電力を扱うパワーエレクトロニクス工学と、高周波を扱うマイクロ波工学の融合が必要である。そのためには、「無線電力伝送工学」を確立し、両分野の考え方を統一的に説明できる基盤を準備することにより、一方の分野の考え方が、他方の分野にどのように対応するを明解にして、技術の融合を容易にすることが有用である。申請者はこれまでの科学研究費補助金により、「結合器（アンテナ・結合コイル等）」間の結合に注目した、無線電力伝送工学の確立に取り組んできた。これにより、パワエレの分野では「結合コイル」、マイクロ波の分野では「アンテナ」と呼ばれるデバイス間の結合を、電界結合と磁界結合、共振と整合などの観点から統一的に説明できるようになった。

しかしながら、その過程において、マイクロ波の分野では電源・フィルタ・アンテナ等を個別に設計して組み合わせる考え方をするのに対し、パワエレの分野ではこれらを一体的に設計するという違いが明確になり、結合器間の説明だけでは、パワエレの考え方には適用できないという問題が明らかになっていた。

2. 研究の目的

2015年からの科学研究費補助金の研究では、結合器間だけに注目して、パワエレ工学とマイクロ波工学を包含する無線電力伝送工学の確立を目指してきた。それに対し、2018年からの本研究では、電源から負荷までを含めた無線電力伝送工学の確立を目指す。

3. 研究の方法

電磁界シミュレーター・回路シミュレータ・実験による結果に基づき等価回路を構築し、抽象化したモデルを作成して、一般化モデルによって現象を説明できるようにした。

4. 研究成果

4.1. 研究成果

同軸ケーブルなどの TEM 伝送路を伝わるエネルギーの実体が、中心導体・外部導体に流れる電流ではなく、絶縁体であるところの誘電体中のポインティングベクトルであることは、マイクロ波の世界では広く知られているところである。しかし、これはマイクロ波特有の現象ではなく、直流や三相交流であっても成立することである。パワエレが電力の周波数とインピーダンスを変換する技術であることを鑑みると、WPT システムは、さらにそれに加えて電磁エネルギーの伝搬モードを変換する技術であるといえる（図1）。

エネルギーの空間伝送のためには、まず周波数変換が必要である。パワエレの領域では、スイッチング損失を最小化させるために D 級や E 級のインバーターを用いるが、その際に発生する高調波を制御することは、不要放射の防止だけでなく、スイッチング損失の低減のためにも重要である。電力の変換機能の観点からは、WPT システムは高調波インピーダンス変換機能を持つことになる。効率の最大化のためにインピーダンスの実部と虚部が変換され、最後に結合器により空間伝送（伝搬モード変換）が行われることになる。図1の様なモデルを考えることにより、無線電力伝送システムの構成要素が、電力の変換機能のどの部分を担い、それが他のシステム（マイクロ波技術から見たパワエレ技術など）のどこに対応するのが明確になる。

4.2. パワエレ回路とマイクロ波回路の協調による適応受電回路

無線電力伝送システムにおいて、インピーダンス変換は重要な機能の一つであり、従来はマイクロ波伝送回路、パワエレ回路でそれぞれ完結したインピーダンス変換を行っていた。しかし、前節の研究により、DCの負荷におけるパワエレ回路でのインピーダンス変換の結果、マイクロ波側でのインピーダンスも変化するため、パワエレ回路での制御により、マイクロ波のインピーダンスが制御され、複素共役整合が実現可能である可能性が示された。そこで、2系統のDC-DCコンバータの制御によりマイクロ波での複素共役整合を実現する「複素MPPT回路」を提案した。

結合型マイクロ波無線電力伝送の受電側回路において、伝送距離の変化によりインピーダンスが変化しても、複素共役整合条件を満たして受電電力の最大化を行うための自動整合回路・整流回路を、パワエレで広く用いられている MPPT 制御された DC-DC コンバータと、マイクロ波デバイスである 90° ハイブリッドカップラ、および整流用ダイオードを用いて実現する方法を開発する（図2）。

結合型のマイクロ波無線電力伝送では、伝送距離の変化により受電アンテナのインピーダンスが変化する。そのため、最大の伝送効率を得るためには、伝送距離が変化しても複素共役整合条件が保てるよう、受電アンテナから整流回路側を見たインピーダンスを変化させる仕組みが必要となる。従来は可変キャパシタを用いた可変整合回路などにより、機械的にインピーダンスを変化させてきた（図2a）。

一方、パワエレにおけるMPPTは、受電電力が最大になるようにインピーダンス制御を行う点ではマイクロ波無線電力伝送用の可変整合回路と同じであるが、MPPTは直流に対して行うものであり、それ故、インピーダンス変化の自由度は1（直流抵抗）である。マイクロ波無線電力伝送で必要な複素共役整合を実現するためには、インピーダンスの調整の自由度2（インピーダンスの実部と虚部）が必要となる。

そこで、本研究では2組の整流回路およびMPPT制御されたDC-DCコンバータを用いて、複素共役整合のために必要な2個の自由度を確保する。それぞれのDC-DCコンバータの直流のインピーダンスを変化させると、アンテナから見た複素インピーダンスが変化するような電力分配回路のトポロジーを決定することが、本研究の中心となる。電力分配回路においては、マイクロ波デバイスである「90度ハイブリッド」を用いて、2個の直流インピーダンスの変化によるマイクロ波の複素インピーダンスの変化を実現した。

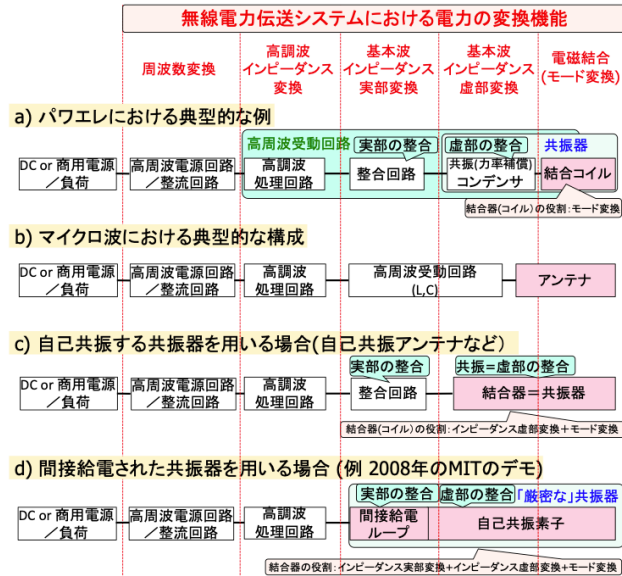


図1. 無線電力伝送システムにおける電力の変換機能と、それにおける結合器（コイルやアンテナ）の役割

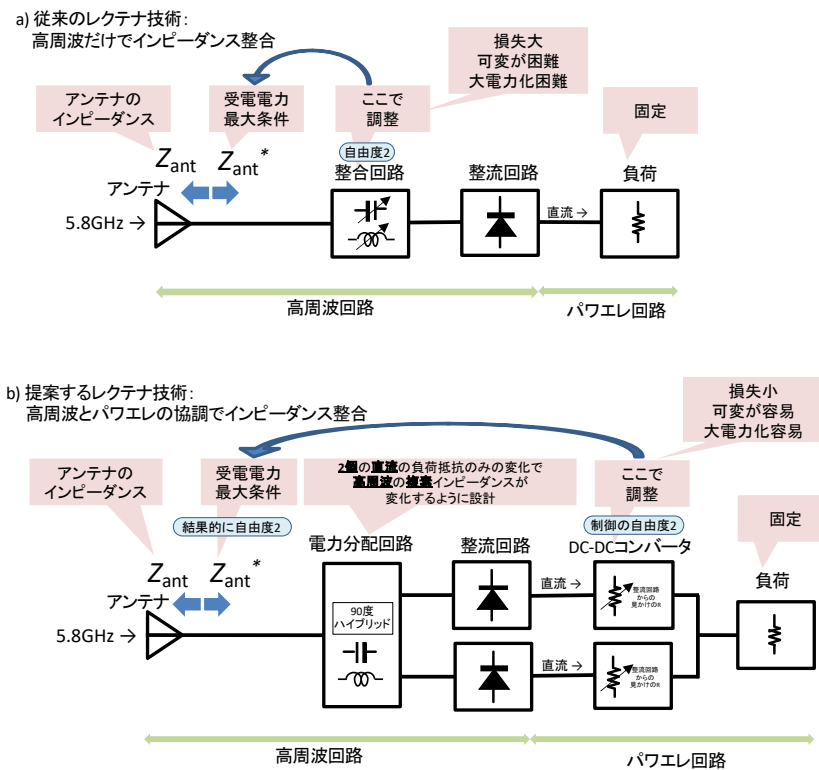


図2: 提案した複素MPPT回路

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6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 1件）

1. 著者名 Oshima Takase, Hirayama Hiroshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Folded dipole antenna with class-F load function for rectenna of microwave power transfer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 524 ~ 528
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2020XBL0105	査読の有無 無
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 Kumazawa Akihiko, Diao Yinliang, Hirata Akimasa, Hirayama Hiroshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Reduction of Human Interaction with Wireless Power Transfer System Using Shielded Loop Coil	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 953 ~ 953
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/electronics9060953	査読の有無 無
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 Arai Takaya, Hirayama Hiroshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Folded Spiral Resonator with Double-Layered Structure for Near-Field Wireless Power Transfer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1581 ~ 1581
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en13071581	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takase OSHIMA, Hiroshi HIRAYAMA	4. 巻 8
2. 論文標題 Near-field Wireless Power Transfer for Moving Vehicle Using Collinear Array Antenna	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 617-622
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2019GCL0067	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 Kumazawa Akihiko, Hirayama Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Transmission efficiency improvement using shielded loop antenna for coupled-resonant wireless power transfer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 485 ~ 489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2019GCL0015	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 Arai Takaya, Nimura Kohei, Hirayama Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Double-layered folded spiral resonator for coupled-resonant wireless power transfer	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 490 ~ 494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2019GCL0016	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15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 平山裕
2. 発表標題 無線電力伝送用高性能アンテナ
3. 学会等名 MWE2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihiko Kumazawa, Hiroshi Hirayama
2. 発表標題 Impedance Matching Mechanism of Shielded Loop Antenna for Wireless Power Transfer
3. 学会等名 AWPT 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohei Nimura,Hiroshi Hirayama
2. 発表標題 Basic Characteristics of a Double-layered Folded Spiral Resonator for Coupled-resonant Wireless Power Transfer
3. 学会等名 AWPT 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenta Yamada,Hiroshi Hirayama
2. 発表標題 Mechanism of SAR Reduction of Shielded-Loop Antenna in Wireless Power Transfer
3. 学会等名 AWPT 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jun Deguchi,Hiroshi Hirayama
2. 発表標題 Wireless Power Transfer for Moving Vehicle Using Collinear Array Antenna
3. 学会等名 AWPT 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Reiji Nishigaki,Hiroshi Hirayama
2. 発表標題 Basic Design and Analysis of Folded Dipole Antenna for 5.8 GHz Wireless Power Transfer
3. 学会等名 AWPT 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takaya Arai, Hiroshi Hirayama
2. 発表標題 Characteristic Comparison of Various Kinds of Couplers for Near-Field Wireless Power Transfer
3. 学会等名 AWPT2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田健太・平山 裕
2. 発表標題 無線電力伝送におけるシールドドロープアンテナを用いたSAR低減
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 二村康平, 平山裕
2. 発表標題 結合共振型無線電力伝送における一層型, 二層型フォールテットス ハイラル共振器の比較検討
3. 学会等名 2018年電子情報通信学会東海支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 出口潤, 平山裕
2. 発表標題 コリニアレーアンテナを用いた近傍界による走行中無線給電に関する検討
3. 学会等名 MIKA2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田健太, 平山裕
2. 発表標題 結合共振型無線電力伝送におけるシールドループアンテナを用いたインピーダンス整合
3. 学会等名 MIKA2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新井貴也, 平山裕
2. 発表標題 結合型無線電力伝送における自己共振型・LC共振型結合器の諸特性の比較
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 2018年

1. 発表者名 Kouzaburo Tanahashi, Hiroshi Hirayama
2. 発表標題 Basic Consideration of RF-DC Conversion Circuit Using Quadrature Hybrid for Complex Maximum Power Point Tracking
3. 学会等名 AWPT2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 棚橋功三郎, 平山裕
2. 発表標題 90°ハイブリッドを用いた複素 MPPT による RF-DC 変換回路の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会WPT研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 棚橋功三郎、中江拓真、平山裕
2. 発表標題 複素MPPTを用いたRF-DC変換回路の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会2021年総合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Naoki Shinohara (編集)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 The Institution of Engineering and Technology	5. 総ページ数 14(分担分)
3. 書名 Wireless Power Transfer: Theory, technology, and applications	

〔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
---------	---------