

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04029

研究課題名（和文）負荷非依存モードを活用した一送電多受電高周波ワイヤレス給電システムの開発

研究課題名（英文）Development of load-independent single-input multiple-output wireless power transfer system with high frequency

研究代表者

魏 秀欽（WEI, XIUQIN）

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：80632009

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、負荷変動と位置ずれにロバストな一送電多受電高周波高効率なワイヤレス給電システムを開発することを目的とした。本研究のアイデアは30年前に提案されたこれまで陽の目を見なかった、負荷変動に依存せず、安定した出力電圧とソフトスイッチングを常に達成できる負荷非依存モードに光を当て、これをワイヤレス給電システム設計に応用することになった。ワイヤレス給電システムに負荷非依存モードを適用するための設計理論を確立した。また、具体的に、負荷変動や送受電コイルの位置ずれによらない高電力伝送効率・定格出力を常に達成できるワイヤレス給電システムを設計し、実機実験によりその妥当性および有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、送受電器の設計により制御システムを簡素化する研究成果がほとんどである。これらの動向は、無線通信を伴う制御システムの構築がワイヤレス給電システムの開発のボトルネックとなっていることを示していた。これまでの研究は、いずれも負荷変動に対する検討にとどまっておらず、無線通信システムを不要とするワイヤレス給電システムを志向している研究は存在しなかった。本研究では、負荷変動や位置ずれに対応し、かつ、無線通信フィードバックを不要とする一対多ワイヤレス給電システムの開発に成功した。本研究により、ワイヤレス給電システムの設計が大幅に簡素化されることとなり、新たな実応用の創成、社会実装への展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a wireless power transfer (WPT) system with high frequency and high efficiency that remains robust against load variations and misalignment in a single-transmitter and multiple-receiver configuration. The focus of this study is to explore the load-independent mode, which was proposed 30 years ago but has not yet been fully investigated. This mode allows for stable output voltage and soft switching regardless of load variations. We aimed to apply this concept to the design of WPT systems. We established a design theory to apply the load-independent mode to WPT systems. Specifically, we designed a WPT system that can always achieve high power-transmission efficiency and rated output regardless of load variations or misalignment of transmitting and receiving coils, and we validated its feasibility and effectiveness through practical experiments.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：ワイヤレス給電 負荷非依存モード 高周波化 高効率化 定格出力 ソフトスイッチング フィードバック 無線通信機構

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ブレイクスルーとなった論文[A]の発表後、10年強経過し、ワイヤレス給電の研究開発は基礎理論の確立から実用化を見据えたフェーズへと移行しつつある。例えば、電気自動車(EV)用の給電においては85 kHz帯を用いることが決まり、特にこの周波数帯での開発が加速している。一方で、MHz帯ISMバンドにおける高周波帯ワイヤレス給電システムの開発も、システムの小型化、軽量化、送電距離の延伸が望めることから、重要な研究開発目標となっている。この周波数はGaN, SiC等の次世代ワイドギャップ半導体の応用としての注目度も高い。

ワイヤレス給電システムにおいては、負荷変動や位置ずれによる電力伝送特性の低下への対応は重要な課題となる。実システムでは、これらに対して出力(電圧または電流)を一定とすることが求められる。この対応策として、例えば、iPhoneなどの「置くだけ受電」で実用化されているQi(チー)規格では、受電器側の出力ポートで負荷変動や位置ずれの情報を検出し、送電器へ無線通信でその情報をフィードバックすることで一定出力を実現している。しかしながら、高周波化を志向すると、無線通信の遅延の影響が大きくなり、最適パラメータの同定に困難性が顕著化する。さらに、高周波化における高効率動作には、ソフトスイッチングが必須となるため、一定出力とソフトスイッチングの2つの制御目標を同時に保証するという新たな課題も生じ、制御システムの複雑化を招く。もし、無線通信システムによる送電器への情報のフィードバックを不要とするワイヤレス給電システムを実現できれば、電力伝送効率や性能の両面で従来のシステムを凌駕できる。

### 2. 研究の目的

上述の問題意識を持つ中で、負荷非依存E級インバータの論文[B]との出会いが転機となった。[B]では、特別な制御をかけることなく、負荷変動に対して常に出力電圧を一定とし、かつソフトスイッチングを達成する負荷非依存モードを搭載したインバータが提案されている。報告者は負荷非依存モードの特徴は、ワイヤレス給電システムに対して非常に相性がよいことに目を付けた。本研究では、負荷非依存モードを適用し、負荷変動と位置ずれにロバストな一送電多受電高周波高効率なワイヤレス給電システムの設計論を確立し、実機実験により提案の妥当性、有効性、実用性を示すことを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、負荷非依存モードを適用した、一送電多受電高周波高効率なワイヤレス給電システムの開発を行う。本研究は2015年に実施したJSTA-STEP「非接触電力伝送方式の設計ツールとそれに基づく高効率一送電多受電システムの開発」に端を発し、継続して進めている研究課題である。2015年に実施した一送電多受電ワイヤレス給電システムでは、送電コイル(大きなコイル)を机に設置すれば、机の上に対応デバイスを置くだけで充電することができるワイヤレス給電システムを目標とした。しかし、これまでの研究開発を通じて、受電コイルと比較して送電コイルが大きいワイヤレス給電システムでは、送電コイルの場所によって磁束密度が異なることが問題となる。磁束密度の差異は出力電圧の変化に直結し、位置ずれに依存せず、定格出力を確保することが困難となる。したがって、システムでは、あらかじめ決まった場所に決まった受電デバイスを置き、その中でシステム最適化、つまり、所望の出力電圧を達成する整流器のパラメータ設定を行っている。これは、置く場所が異なると、所望の動作をしないことを意味し、汎用性が乏しく、実用化への高い壁となる。また、実応用を考えると、受電デバイスは常に置かれ

ているわけではなく、送電側からみた場合、受電デバイスの有無によって負荷が大きく変動することになる。この負荷変動は、送電側から見たとき、等価リアクタンスの変動につながり、送電回路の電力伝送効率が大きく劣化する要因になっていた。

未解決の磁束密度のばらつきに起因して、出力電圧が位置に依存して変化する問題を含めた研究課題を解決するため、適切なシステム構成を考える。まず、インバータに負荷非依存 E 級インバータを適用する。また、整流回路には E 級整流器ではなく、D 級整流器(ハーフブリッジ整流器)を適用する。これにより、インバータからみた受電側のインピーダンスは等価抵抗のみで表され、リアクタンスを零となる。これらのシステム構成とワイヤレス給電システムの共鳴理論 [D]により、送電回路は負荷変動によらず、高効率動作を達成する。また、磁束密度のばらつきに起因して、出力電圧が位置に依存して変化する問題に対し、出力段でインピーダンス変換を行うことを提案した。これにより、各受電デバイスが送電回路によって相互結合されることとなり、所望の出力電圧を達成するように各受電デバイスが自動的に協調動作する。このメカニズムにより、無線通信によるフィードバックを不要とできる。また、準備研究から、負荷非依存モードを達成するための回路に求められる条件を数学的に導出することに成功している[C]。この確立した負荷非依存モードを適用した E 級インバータの定常解析技術を発展させ、一送電多受電ワイヤレス給電システムにおいて負荷非依存モードを搭載するための設計理論を構築した。さらに、構築した設計理論に基づき、具体的に 1 対多ワイヤレス給電システムを設計し、実機実験により提案の妥当性および実用性を明らかにした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 設計理論と方法の確立

図 1 に提案した負荷変動および位置ずれに対してロバストな高周波一送電多受電ワイヤレス給電システムを示す。提案システムでは、送電回路に低スイッチストレス負荷非依存 E 級インバータを採用している。低スイッチストレス負荷非依存 E 級インバータを適用することにより、負荷が変動する際に、システムのスイッチ電圧のソフトスイッチング動作と出力電圧を維持することができる。さらに、低スイッチ電圧ストレスのため、より半導体デバイスの選択肢が増加し、導通損失の低減が可能となるという付加価値がある。各受電回路は D 級整流器から構成されており、これにより送電回路からみた受電側の合成インピーダンスは虚部がゼロで実部のみで表される。つまり、受電回路を純抵抗と見なすことができる。さらに、二次側は動作周波数に対し完全共振を取ることにより、負荷変動や位置ずれが生じて送電回路からみた受電側の合成インピーダンスが一定となる。その結果、低スイッチストレス負荷非依存 E 級インバータの負荷非依存条件は、負荷変動や位置ずれによらず維持され、WPT システムにおいても制御なしにソフトスイッチングを保ち高電力伝送効率を達成する。また、受電回路にインピーダンス変換回路を追加することで、出力電圧を一定に保つ。結果として送電回路は受電側で必要とされる電力を特別な制御なしに供給することができる。この提案システムに対し、[C]で確立した負荷非依存モードを適用した E 級インバータの定常解析技術に基づき、その回路動作を解析的に導出することを試みた。提案システムと解析の妥当性を確認するため、1 送電 2 受電のワイヤレス給電システムを設計、実装し、負荷変動および位置ずれに板する回路実験を行った。設計仕様として、動作周波数 6.78 MHz、入力電圧 80 V、そして 2 出力の出力電圧 15 V、定格抵抗それぞれ 10  $\Omega$  と 8  $\Omega$  を与える。図 2 に実験波形を示す。図 2 により、スイッチ電圧は負荷変動や送電コイル間の距離の変動(位置ずれ)によらず常にソフトスイッチングを達成し、定格出力電圧を達成していることがわかる。提案システムは定格状態において 83.4%の電力伝送効率を達成した。図 3

に実装したワイヤレス給電システムを示す。これらのことにより、本研究で提案した一送電多受電ワイヤレス給電システムは負荷変動および位置ずれに対して、フィードバック制御に必要な無線通信なしにソフトスイッチングと一定の出力電圧を達成することを確認した。さらに、提案した設計手法の妥当性も示された。

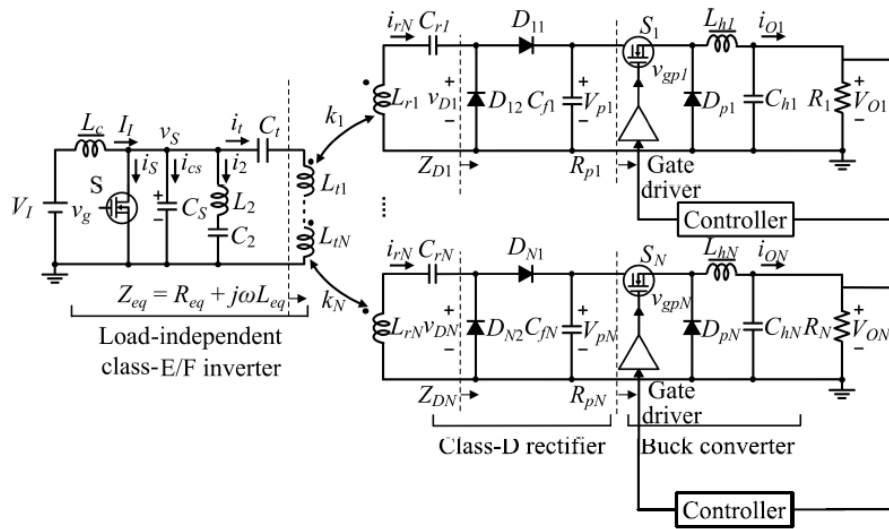


図1: インピーダンス変換回路を追加した負荷変動と位置ずれにロバストな一送電多受電ワイヤレス給電シム

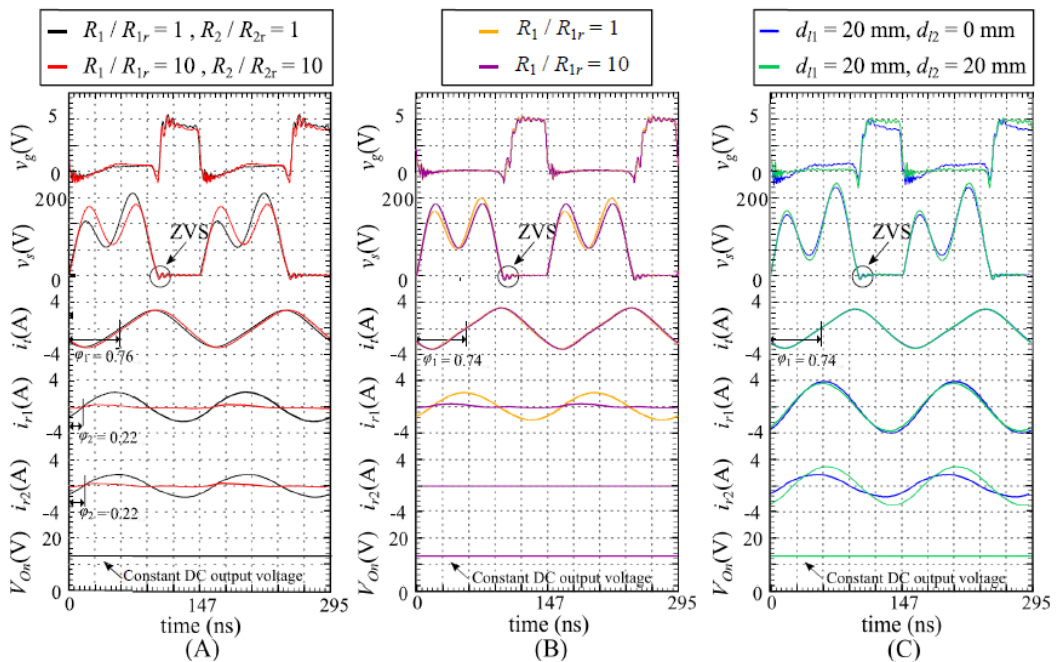


図2: 負荷変動と位置ずれによらない1送電2受電ワイヤレス給電システムの実験波形

## (2)電力伝送効率の最大化

独自の数値最適化設計手法を用い、電力伝送効率を最大化させることを試みた。具体的には、1送電5受電のワイヤレス給電システムを数値的に設計し、実装した。図4と図5にそれぞれ実装したシステムと実験波形を示す。図5には定格抵抗だけでなく、定格抵抗から離れた抵抗による実験結果も示している。これらの波形より、負荷変動に対して、フィードバック制御に必要な無線通信なしにソフトスイッチングと一定の出力電圧を達成することを確認した。

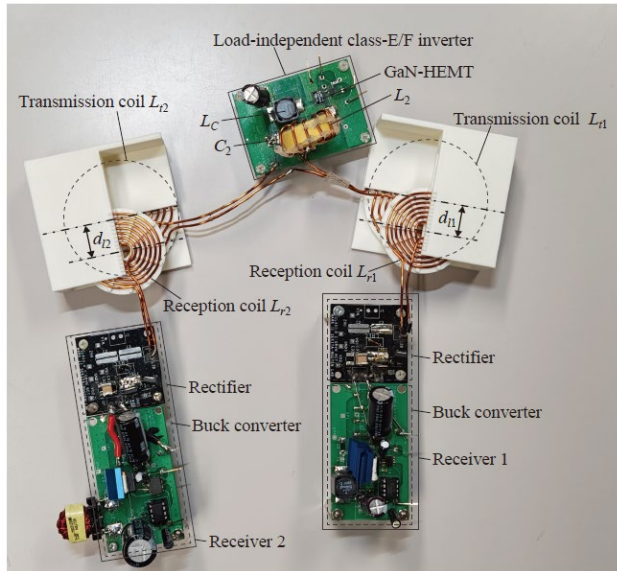


図 3: 負荷変動と位置ずれによらない 1 送電 2 受電ワイヤレス給電システムの実装

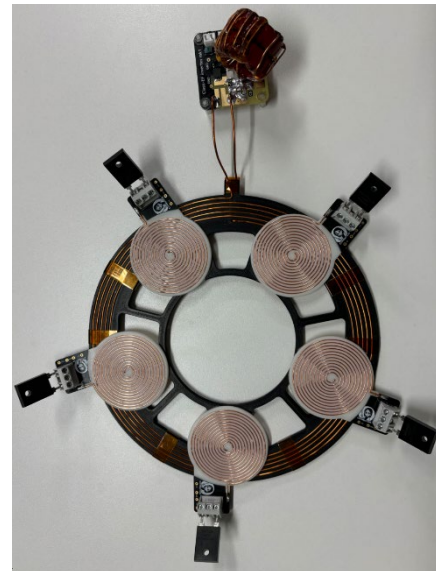


図 4: 負荷非依存 1 送電 5 受電ワイヤレス給電システムの実装

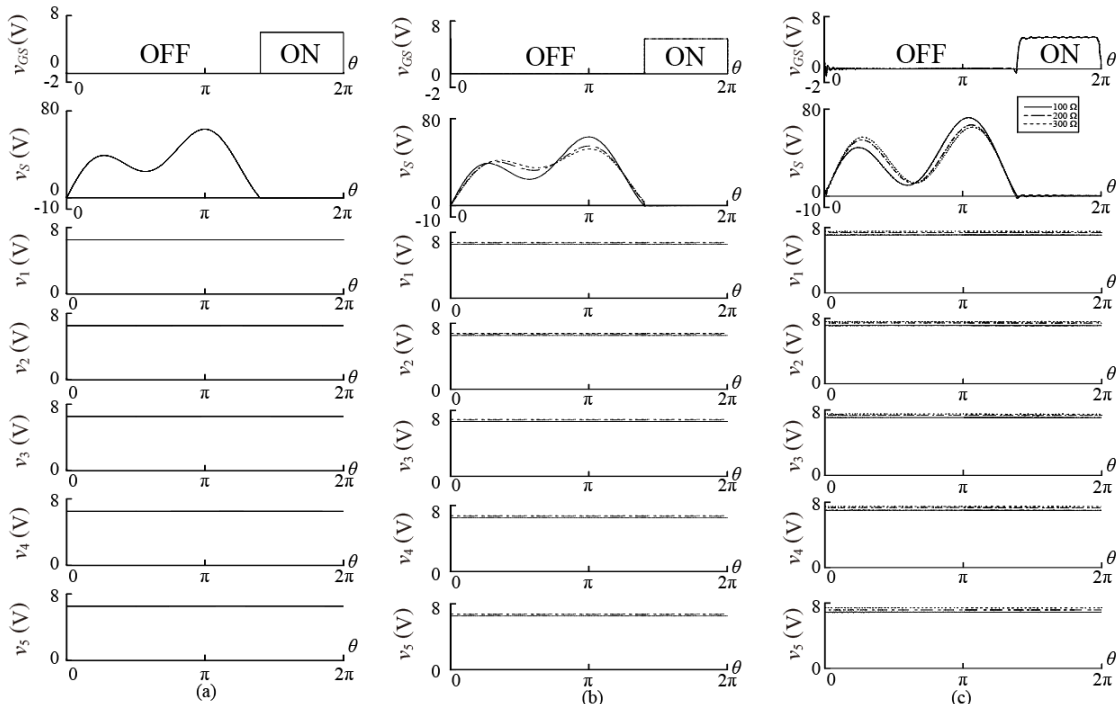


図 5: 負荷非依存モードを適用した 1 送電 5 受電ワイヤレス給電システムの理論、シミュレーション、および回路実験波形

#### 参考文献

- [A] J. W. Phinney, D. J. Perreault, and J. H. Lang, "Radio-frequency inverters with transmission-line input networks," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1154-1161, 2007.
- [B] R. E. Zulinski and K. J. Grady, "Load-independent class E power inverters: part I-theoretical development," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 37, no. 8, pp. 1010-1018, Aug. 1990.
- [C] N. Obinata, W. Luo, X. Wei, and H. Sekiya, "Analysis of load-independent class-E inverter at any duty ratio," *IEEE IECON2019*, pp. 1451-1456, Lisbon, Portugal, Oct. 2019.
- [D] T. Nagashima, X. Wei, E. Bou, E. Alarcon, M. K. Kazimierzuk, and H. Sekiya, "Steady-state analysis of isolated class-E<sup>2</sup> converter outside nominal operation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 4, pp. 3227-3238, Apr. 2017.

## 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 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Komanaka Ayano, Zhu Wenqi, Wei Xiuqin, Nguyen Kien, Sekiya Hiroo	4. 巻 15
2. 論文標題 Load independent inverse class E ZVS inverter and its application to wireless power transfer systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IET Power Electronics	6. 最初と最後の頁 644 ~ 658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/pe12.12256	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 該当する
1. 著者名 Ayano Komanaka, Wenqi Zhu, Xiuqin Wei, Kien Nguyen, Hiroo Sekiya	4. 巻 -
2. 論文標題 Load independent inverse class E ZVS inverter and its application to wireless power transfer systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IET Power Electronics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/pe12.12256	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 該当する
1. 著者名 Kentaro Nakayama, Tomoyuki Tamura, Xiuqin Wei, Nobuo Satoh	4. 巻 142
2. 論文標題 Design of isolated class- <sub>2</sub> dc-dc converter based on harmonic analysis technology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 177 ~ 186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.177	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 該当する
1. 著者名 Ayano Komanaka, Wenqi Zhu, Xiuqin Wei, Kien Nguyen, Hiroo Sekiya	4. 巻 69
2. 論文標題 Generalized analysis of load-independent ZCS parallel-resonant inverter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 347 ~ 356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2021.3053888	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 該当する

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Yutaro Komiyama, Wenqi Zhu, Xiuqin Wei, Kien Nguyen, and Hiroo Sekiya
2. 発表標題 Design of load-independent class-EF inverter with nonsinusoidal output current
3. 学会等名 2023 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'23)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Aoi Noda, Yota Matui, Weisen Luo, and Xiuqin Wei
2. 発表標題 Design of load-independent class-EF inverter with nonsinusoidal output current
3. 学会等名 2023 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'23)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takuya Iwami, Hiroki Kagawa, and Xiuqin Wei
2. 発表標題 Power losses and efficiency of class-E-D WPT system at any output voltage
3. 学会等名 2023 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'23)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroki Kagawa, Takuya Iwami, Yota Matui, and Xiuqin Wei
2. 発表標題 An easy-to-use design approach of class-E-D WPT system
3. 学会等名 2023 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'23)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yota Matsui, Kisara Nakajima, Weisen Luo, and Xiuqin Wei
2. 発表標題 Design of class-EF <sup>2</sup> WPT system with relay coil
3. 学会等名 19th International SoC Design Conference (ISOCC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 町澤改, 中島樹咲果, 羅イ森, 魏秀欽
2. 発表標題 eGaNを用いたE級インバータの設計
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会 (SPC)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内田東, 中島樹咲果, 羅イ森, 魏秀欽
2. 発表標題 MOSFETのドレイン-ソースとゲート-ドレイン間の非線形寄生容量を考慮したEF <sub>2</sub> 級発振器の設計
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会 (SPC)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kai Machizawa, Kazuki Tanaka, Kisara Nakajima, Weisen Luo, and Xiuqin Wei
2. 発表標題 Design of a 27.12 MHz class-E inverter using an eGaN FET
3. 学会等名 2022 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'22) (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Azuma Uchida, Kisara Nakajima, Weisen Luo, and Xiuqin Wei
2. 発表標題 Design of class-EF <sub>2</sub> oscillator with nonlinearities of MOSFET drain-to-source and gate-to-drain parasitic capacitances
3. 学会等名 022 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kisara Nakajima, Yusuke Hagiwara, Weisen Luo, and Xiuqin Wei
2. 発表標題 Design of class-E <sup>2</sup> wireless power transfer system
3. 学会等名 2022 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ayano Komanaka, Wenqi Zhu, Kien Nguyen, Hiroo Sekiya, and Xiuqin Wei
2. 発表標題 Load Independent Class-E <sup>-1</sup> Inverter with Shunt Capacitance
3. 学会等名 The 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 萩原佑亮, 中島樹咲果, 羅イ森, 魏秀欽
2. 発表標題 EF <sub>2</sub> 級インバータを用いたE <sup>2</sup> 級WPTシステムの解析
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会 (SPC)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島樹咲果, 萩原佑亮, 羅イ森, 魏秀欽
2. 発表標題 EF <sup>2</sup> 級コンバータを用いたワイヤレス給電システム
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会 (SPC)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羅イ森, 中島樹咲果, 萩原佑亮, 魏秀欽
2. 発表標題 <sup>2</sup> 級ワイヤレス給電システムの解析設計手法
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会 (SPC)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 駒中綾乃, 朱聞起, 魏秀欽, グエンキエン, 関屋大雄
2. 発表標題 負荷非依存ZVS並列共振インバータの解析と設計
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換研究会 (SPC)
4. 発表年 2021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
---------	---------