

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14645

研究課題名（和文）世界最高水準の超高周波小型電源における理論の体系化とその開発

研究課題名（英文）Systematization of the theory and its development of the world's highest level of very-high-frequency miniaturized power supply

研究代表者

魏 秀欽 (WEI, XIUQIN)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：80632009

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）：本研究では、高調波電流を注入することにより電源回路の周波数が従来の数十kHzから数百MHzまで引き上げる超高周波スイッチング技術を理論的に体系化し、最適化設計により高効率化を安定的に実現することを目的とした。具体的には代表者がこれまでに確立してきた独自の最適化設計技術と高調波成分を含む系に対応できる定常解析技術を融合させることにより、理論解析モデルを構築した。このモデルを用いて、パラメータチューニングを不要とした高精度高効率設計技術を確立し、超高周波高効率スイッチング電源設計の基礎理論を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で具現化したスイッチング技術の与える波及効果は極めて大きい。電源回路の革新的小型高効率化はあらゆる電子機器の小型化、薄型化につながる。さらに小型化の恩恵を活用すると、電源回路の分散処理を通じた次世代電気電子システムへつながる。電源回路の超小型化により、ロボット、自動車等閉じた空間の中で、電力をシームレスにかつ、きめ細やかに制御できる次世代パワーエレクトロニクスへと高度展開するポテンシャルを持つ。さらに、パワーエレクトロニクス分野の多岐に渡るアプリケーションへの適用が期待され、エネルギー利用効率の向上に貢献するだけでなく、電気電子分野に対する領域の枠を超えた革新的インパクトを与える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to systematize theoretically the ultra-high frequency switching technology which enables the frequency of power supplies to be increased from tens of kHz to hundreds of MHz by injecting harmonic currents, and to achieve high efficiency stably by applying optimization design. Specifically, we developed a theoretical analysis model by combining our original optimization design technology and steady-state analysis technology that can handle systems with harmonic components. Using this model, we established a high-precision and high-efficiency design technology that does not require any parameter tuning and established the basic theory of ultra-high-frequency and high-efficiency switching power supply design.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：超高周波 小型 電源回路 高調波電流 最適化 高効率化 定常解析 基礎理論

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。

1. 研究開始当初の背景

2007年、マサチューセッツ工科大学(MIT)の超高周波スイッチング技術の論文発表[A]以降、高周波小型電源は世界中の企業、大学、研究機関の大きな関心を引き起こし、実用化を見据えた研究開発が進んでいる。図1(a)のようにスイッチ素子と並列に高調波共振回路を挿入することにより、スイッチの電圧ストレスの大幅な低減に成功した。これによりスイッチング電源の周波数を従来の数百kHz程度から数百MHzまで一気に引き上げることが可能となり、大型部品である磁性素子機能を回路基板に埋め込むことができるようになった。この結果、革新的に小型のスイッチング電源を実現している。2014年のCES(Consumer Electronics Show)で参考出展されたFINsix(MITからスピンアウトしたベンチャー企業)の小型ACアダプタは、従来のアダプタの3分の1程度の小型化を実現し、大きなインパクトを与えた。ところが、FINsix社のACアダプタの商品出荷は大幅に遅れることになる。MITで開発されたスイッチング技術には解析モデルが存在せず、シミュレータまたは回路実装で試行錯誤的な最適化が行われていることに要因があると考えられる。つまり、理論的サポートを軽視してきた点が仇となり、製品開発へのボトルネックとなっており、その結果さらなるアプリケーション開発の障壁となっているといえる。

研究代表者は図1(b)に示す電力変換回路のスイッチへ外部から高調波電流を注入することによりスイッチ電圧と電流の連続性が担保される電源回路の定常解析技術を確認した[B]。図1(a)と(b)を比較すると、高調波が受動的に生成されるか能動的に生成されるかの差はあるものの、これらふたつの動作の本質は同等である。研究代表者はこのことに着目し、[B]で提案した高調波解析技術と特許技術である数値設計アルゴリズム[C]を融合させることにより、MITによる超高周波スイッチング技術の基礎理論を確認できる可能性を見出した。

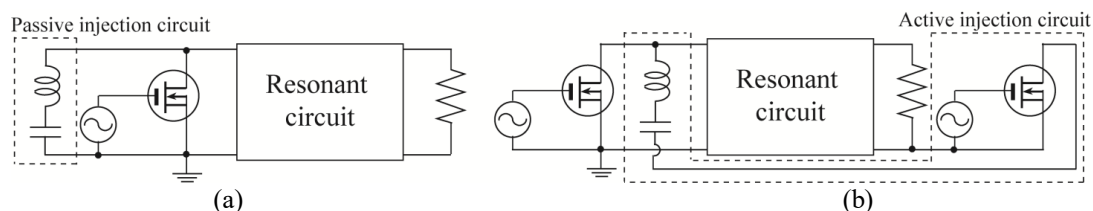


図1 高周波・高効率電力変換回路の回路構成：(a) 受動注入系電力変換回路 高調波共振回路で高調波電流を生成する。(b) 能動注入系電力変換回路 外部補助回路から高調波電流を注入する。

2. 研究の目的

本研究では、高調波電流を注入することにより電源回路の周波数が従来の数十kHzから数百MHzまで引き上げる超高周波スイッチング技術を理論的に体系化し、最適化設計により高効率化を安定的に実現することを目的とする。具体的には研究代表者がこれまでに確立してきた独自の高調波定常解析技術と数値最適化設計技術を融合させることにより、理論解析モデルを構築する。このモデルを用いて、パラメータチューニングを不要とした高精度高効率設計技術を確認し、超高周波高効率スイッチング電源設計の基礎理論を確認する。GaNやSiCといった次世代デバイスを積極的に用い、アプリケーションを意識した電源回路を開発し、超高周波化・小型化・高効率化を達成する。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、下記の手順で研究開発を進めた。

(1) 設計理論と方法の確立

MITの技術は図1(a)のように高調波共振部で高調波電流を生成し、適切な位相差を持たせることでスイッチストレスを大幅に低減させることにより超高周波化への道を拓く。しかしながら、現状高調波電流の周波数、位相、振幅、スイッチの時比率等のパラメータ設定に求められる条件は明に示されておらず、試行錯誤の設計を余儀なくされる。そこで、本フェーズでは図1(a)のタイプの電源回路に対し、高調波定常解析技術を適用し、数値モデルを構築する。また、構築した理論モデルを駆使することにより、電圧、電流の連続性を達成する回路設計技術を提案する。さらに、世界に先駆け様々なアプリケーションに対応するための設計データを蓄積する。本フェーズは本研究の独自性を生む最も重要なフェーズであり、研究代表者の持つ独自の最適化設計技術と解析技術を巧妙に組み合わせることで超高周波小型電源の高度設計を可能とする。

(2) RF電源用高速駆動回路の開発

RF電源では、高周波、大電力の回路動作が求められる。一方、SiCをはじめとするワイドバンドギャップデバイスの登場により、パワーエレクトロニクスはシリコン(Si)使用時における理論限界を超えて新たなステージに展開していく。SiCの特徴はSiと比較して高耐圧、低損失、高速スイッチング動作にある。高耐圧と高速動作の利点を生かしたRF電源回路の高周波化、大電力化は、磁性素子の小型化、高電力密度化を通じ回路サイズの小型化、出力の大電力化に直結す

る。SiC はゲート容量と抵抗が大きいという特徴をもち、高周波動作の場合、高速に充放電する駆動回路が必要となる。つまり、既存の回路のデバイスを SiC に置き換えればいいわけではなく、パワーデバイスの特性を引き出す回路技術が常に求められているという点に注意しなければならない。ここで、RF 電源用駆動回路に、超高周波スイッチング技術を適用し、高周波化のための回路構成を提案し、その設計技術を確認する。

(3) 高周波コンバータの開発

高周波高効率動作を達成するコンバータとして、共振型コンバータが挙げられる。共振型コンバータは、回路に共振構造を持たせることでソフトスイッチングを可能とし、スイッチング損失を大幅に抑制削減することができる。スイッチング損失を低減することで、小型、高効率、高電力密度化が達成されれば、IoT、通信機器向け充電器から民生機器、車載向けデバイスまで幅広く電力レベルのアプリケーションに用いられることが期待される。このように、共振型コンバータの適用範囲は非常に広く、共振型コンバータに超高周波スイッチング技術を適用すると、その高周波高効率動作は超高周波スイッチング技術の高いポテンシャルを引き出すとともに、超高周波スイッチング技術によって共振型コンバータのポテンシャルが引き出される。そこで、本フェーズでは、高周波高効率コンバータの設計及び実装を行う。

4. 研究成果

(1) 設計理論と方法の確立([D])

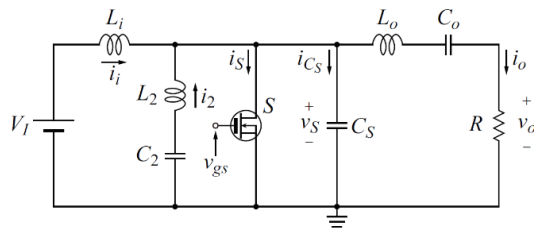


図 2 超高周波スイッチング技術を適用したインバータの回路構成。

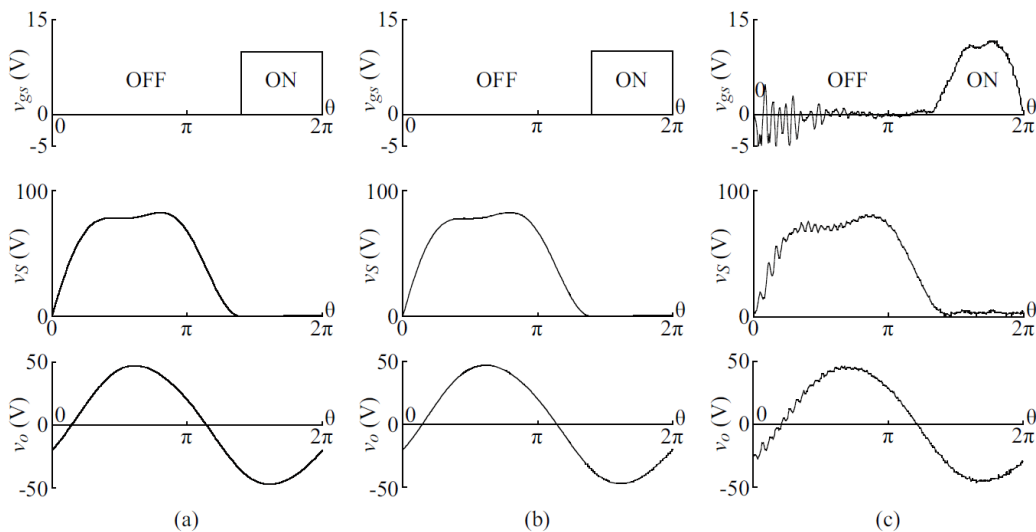


図 3 超高周波スイッチング技術を適用したインバータの動作波形。(a) 理論波形。(b) シミュレーション波形。(c) 実験波形。

図 2 に超高周波スイッチング技術を適用したインバータの回路図を示す。このインバータは、スイッチがオンに切り替わる際に電流・電圧が連続に変化する E 級スイッチング技術を用いた E 級インバータと高調波電流を生成する高調波共振回路から構成される。従来の E 級インバータでは、スイッチ電圧ストレスは約供給電圧の 4 倍である。高調波共振回路を挿入することにより、スイッチ電圧ストレスが大幅に低減され、その結果回路動作周波数が従来の数十 kHz から数百 MHz まで引き上げることができるようになった。本フェーズでは、このインバータに対し、その回路動作を解析的に導出することを試みた。本解析では、インバータ内の高調波の扱いがポイントとなる。そこで、よく用いられている基本波解析でなく、電流、電圧に高調波成分を含むことを仮定した上で解析を進めなければならない。研究代表者がこれまで培ってきた高調波定常解析技術をここに活かして、それらのテクニックを随時適用しながら解析を進めた。解析の妥当性は図 3 に示すように LTspice シミュレーションと回路実験の両面から検証した。また、シミュレーション結果と実験結果と比較検討した結果、この超高周波スイッチング技術を用いたインバータにおいて、高調波共振回路を挿入することにより、そのスイッチ電圧ストレスが約供給電圧の 2 倍まで低減できることが確認できた。

(2) RF 電源用高速駆動回路の開発([E])

RF 電源とは、高周波数大電力の AC 電圧を出力する電源であり、半導体製造装置、液晶(LCD/PDP/LED)製造装置、太陽電池製造装置、MEMS 製造装置、無線電力伝送装置、プラズマ洗浄装置などで必須の電源回路である。特に近年、環境問題に対応する技術開発が注目されるなか、SiC 半導体デバイスの登場により、RF 電源へのさらなる高周波化の要求が高まっている。SiC 半導体デバイスにより、RF 電源のさらなる高周波化が可能となる。しかしながら、SiC 半導体デバイスのゲート容量と抵抗が大きく、高周波動作の場合、高速に充放電する駆動回路を用いる必要がある。そこで、図4に示す回路構成を提案した。この回路は、E 級インバータからなる RF 電源と SiC 半導体デバイスを駆動するための超高周波スイッチング技術を適用した駆動回路より構成される。超高周波スイッチング技術を適用することにより、駆動回路の高周波化を図ることができる。図5に理論と回路実験による波形を示す。図5より、理論波形は実験波形とよく一致していることが分かる。また、回路実験では、動作周波数 13.56 MHz と出力電力 72.3 W において、91.5%の電力変換効率を達成している。さらに、駆動回路に高調波共振回路を挿入することにより、低スイッチ電圧ストレスを達成しており、E 級インバータと比較して 50%程度に抑えることに成功している。

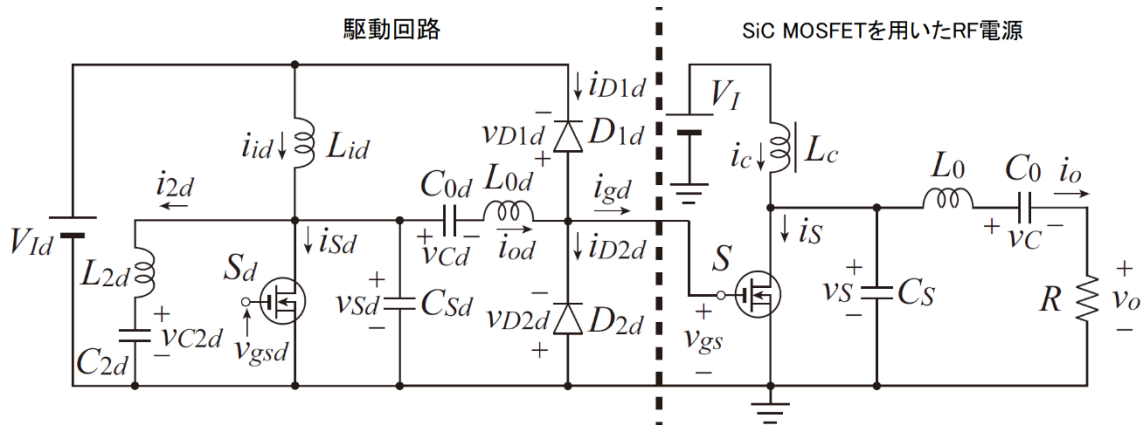


図4 超高周波スイッチング技術を適用した駆動回路を含んだ SiC MOSFET を用いた RF 電源。

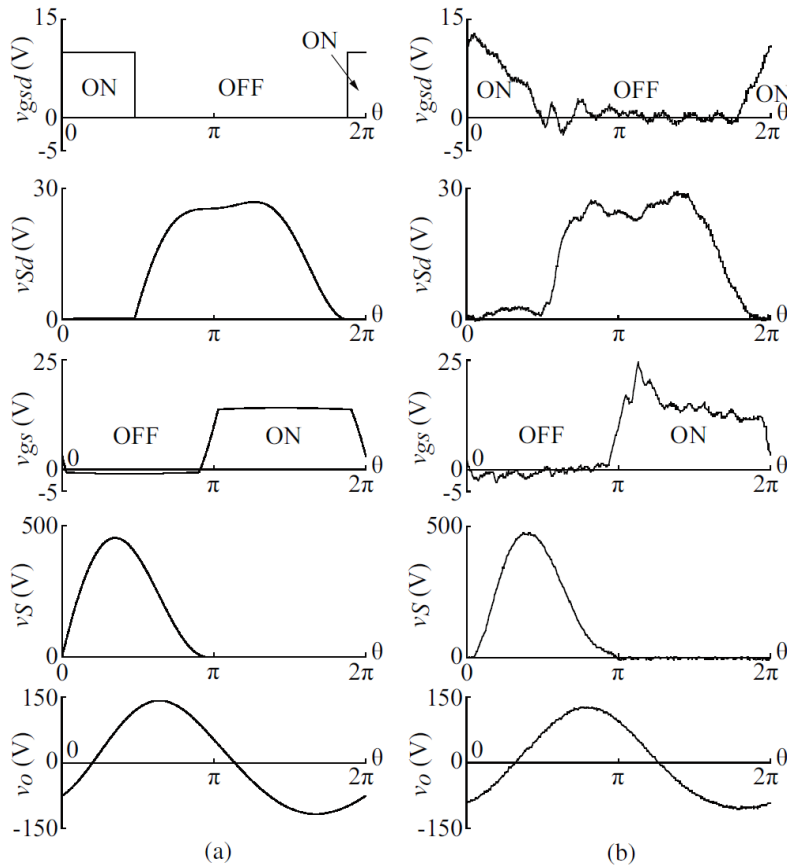


図5 高速駆動回路を含んだ SiC MOSFET を用いた RF 電源の動作波形。(a) 理論波形。(b) 実験波形。

(3) 高周波コンバータの開発([F])

共振型コンバータは古くて新しい技術であり、部品が変わるとそれに対応した回路設計理論そのものを新たに構築しなくてはならないことも多い。GaN や SiC 等の次世代半導体デバイスの登場はパワーエレクトロニクス分野においても革新的な出来事であり、これにより、周波数、電力密度の大幅な向上が期待され、それに伴う新たな回路設計理論を構築する必要がある。そこで、図6に示す回路構成を提案した。この回路は図2の超高周波インバータ技術を適用したインバータとその動作を反転させる整流器からなるとみることができる。インバータと整流器の両方に高調波電流を注入するため、高周波化・高効率化を図ることができる。また、高調波電流には、電力を注入するという大電力化の効果も持たせることができる。図7に超高周波スイッチング技術を適用した共振型コンバータの動作波形を示す。理論波形、LTspice シミュレーション波形、実験波形とも定量的によく一致しており、スイッチ電圧、電流の連続性を達成していることがわかる。図7の結果では、動作周波数 6.78 MHz において、86.3%の電力変換効率を達成している。

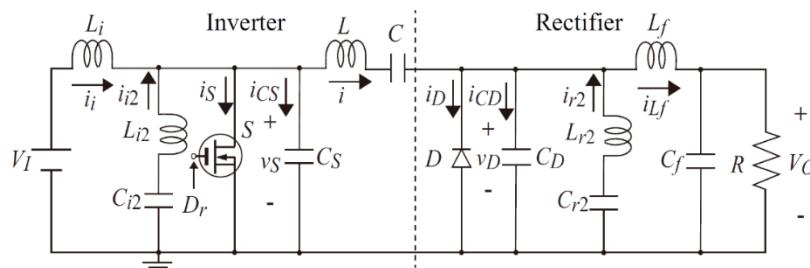


図6 超高周波スイッチング技術を適用した共振型コンバータ。

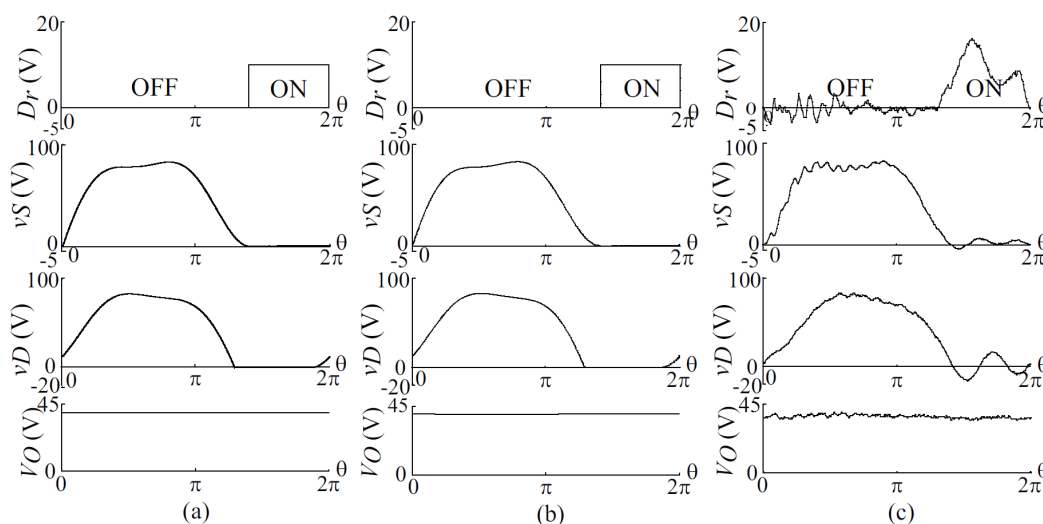


図7 超高周波スイッチング技術を適用した共振型コンバータの動作波形。(a) 理論波形。(b) シミュレーション波形。(c) 実験波形。

参考文献

- [A] “Radio-frequency inverters with transmission-line input networks,” Joshua W. Phinney, David J. Perreault, and Jeffrey H. Lang, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1154-1161, 2007.
- [B] “Analysis and design of class-EM power amplifier,” X. Wei, T. Nagashima, M. K. Kazimierczuk, H. Sekiya, and T. Suetsugu, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, vol. 61, no. 4, pp. 976-986, 2014.
- [C] 魏秀欽, 関屋大雄, 「EM級増幅器」, 特願 2011-246009.
- [D] “Analysis and design of the class-Φ inverter,” K. Kitazawa, X. Wei, A. Katsuki, and M. Hirokawa, *IEEE 44th Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON2018)*, pp. 1023-1028, Washington D. C., USA, Oct. 2018.
- [E] “Design of 6.78 MHz SiC MOSFET class-E inverter with a class-phi high-speed driver,” H. Yogi, X. Wei, H. Sekiya, and T. Hikiyama, *The Eleventh Annual Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2019)*, pp. 375-379, Baltimore, MD, USA, Oct. 2019.
- [F] “A novel circuit topology and its design for class-E² dc-dc converter,” Y. Ogi, F. Ebihara, X. Wei, and H. Sekiya, *The Eleventh Annual Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2019)*, pp. 1256-1260, Baltimore, MD, USA, Oct. 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Asiya, Wei Xiuqin, Ma Jingyue, Osato Tatsuki, Zhu Wenqi, Nguyen Kien, Sekiya Hiroo	4. 巻 8
2. 論文標題 Generalized Analysis and Performance Investigation of the Class-E/Fn Rectifiers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 124145 ~ 124157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.3005701	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 Jingyue Ma, Asiya, Kien Nguyen, Xiuqin Wei, and Hiroo Sekiya	4. 巻 8
2. 論文標題 Analysis and design of generalized class-E/F ₂ and E/F ₃ inverters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 61277-61288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.2983490	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 Tatsuki Osato, Xiuqin Wei, Asiya, Kien Nguyen, and Hiroo Sekiya	4. 巻 11
2. 論文標題 Steady-state analysis and design of phase-controlled class-D ZVS inverter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 189-205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.11.189	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 Asiya, Tatsuki Osato, Xiuqin Wei, Kien Nguyen, and Hiroo Sekiya	4. 巻 11
2. 論文標題 Analysis and design of generalized class-E rectifier	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 206-223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.11.206	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 Weisen Luo, Yusuke Ogi, Fumiya Ebihara, Xiuqin Wei, and Hiroo Sekiya	4. 巻 11
2. 論文標題 Design of load-independent class-E inverter with MOSFET gate-to-drain and drain-to-source parasitic capacitances	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Nonlinear Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 267-277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.11.267	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 Tomoharu Nagashima, Xiuqin Wei, Elisenda Bou, Eduard Alarcon, Marian K. Kazimierczuk, and Hiroo Sekiya	4. 巻 64
2. 論文標題 Steady-state analysis of isolated class-E ² converter outside nominal operation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 3227-3238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2016.2631439	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37件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 22件)

1. 発表者名 Yusuke Hagiwara, Kazuki Miyauchi, Fumiya Ebihara, Yusuke Ogi, and Xiuqin Wei
2. 発表標題 Analysis and design of class-EF ₂ -E wireless power transfer system
3. 学会等名 2019 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'19) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiki Sakurayama, Fumiya Ebihara, Yusuke Ogi, and Xiuqin Wei
2. 発表標題 Design of 13.56 MHz class-E inverter by using eGaN
3. 学会等名 2019 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP'19) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Natsumi Obinata, Weisen Luo, Xiuqin Wei, and Hiroo Sekiya
2. 発表標題 Analysis of load-independent class-E inverter at any duty ratio
3. 学会等名 IEEE 45th Annual Conference of the Industrial Electronics Society (IECON2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Haruma Yogi, Xiuqin Wei, Hiroo Sekiya, and Takashi Hikihara
2. 発表標題 Design of 6.78 MHz SiC MOSFET class-E inverter with a class-phi high-speed driver
3. 学会等名 The Eleventh Annual Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Ogi, Fumiya Ebihara, Xiuqin Wei, and Hiroo Sekiya
2. 発表標題 A novel circuit topology and its design for class-E ² dc-dc converter
3. 学会等名 The Eleventh Annual Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Weisen Luo, Xiuqin Wei, Hiroo Sekiya, and Tadashi Suetsugu
2. 発表標題 Design of load-independent class-E inverter with MOSFET parasitic capacitances
3. 学会等名 62nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Kitazawa, Xiuqin Wei, Akihiko Katsuki, and Masahiko Hirokawa
2. 発表標題 Analysis and design of the class- inverter
3. 学会等名 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2018) (国際学会)
4. 発表年 2018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