

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760253

研究課題名(和文) 高効率電力変換効率と低コストを両立する次世代電力増幅器の基礎理論の確立とその応用

研究課題名(英文) Basic Theory and Applications for Next-Generation Power Amplifier Achieving High Power-Conversion Efficiency and Low Cost

研究代表者

関屋 大雄 (Sekiya, Hiroo)

千葉大学・融合科学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20334203

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電力変換効率の向上とコストの削減を両立する次世代電力増幅器の研究開発を行った。高調波電流を注入することによりスイッチ素子における電流・電圧波形を連続とするスイッチング技術に着目し、このスイッチング技術の基礎理論を解析的に構築し、また数値設計アルゴリズムを開発した。アプリケーションを意識した回路開発を通じ、開発したアルゴリズムおよび構築した理論の妥当性を確認し、また電力変換効率を削減しつつコストの削減が図れることを例証した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to establish the theory of a switching technique for next-generation power amplifiers, which achieves both power-conversion efficiency enhancement and cost reduction. By applying injection current with harmonics frequency to main amplifier, it is possible to achieve smooth current and voltage at the switches. Additionally, numerical design algorithm for designing the amplifiers was proposed and implemented. Through the research and development of the concrete applications, such as RF power source, dc-dc converter, and lamp ballast, the validities of the established theory and the implemented design tool could be shown. The developed switching techniques is quite effective because of its power-conversion efficiency enhancement and cost reduction and is expected to be used as many applications in the electronics field.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：パワーエレクトロニクス 電力増幅器 非線形回路理論

1. 研究開始当初の背景

電力増幅器では、スイッチ素子における電力損失がエネルギー損失の主要因となる。そのため、スイッチに生じる電力損失の低減が電力増幅器の電力変換効率の向上に直結する。現在実用化されている中で、最もスイッチング損失を低減する技術が、E 級スイッチングである。このスイッチング技術を用いた E 級増幅器は、図 1 (a)の青丸部分のように、スイッチがオンに切り替わる際に電流・電圧が連続的に変化するため、電力損失、およびノイズの発生を極めて低く抑えることができる。しかし、E 級スイッチングにおいても、図 1 (a)の赤丸部分のようにスイッチがオンからオフに切り替わるとき、電流にジャンプが生じる。このとき、電流には降下時間が存在するため、スイッチ電圧と電流が同時に発生することになり、電力損失が生じる。この影響を抑えるためには、高速なスイッチ素子を使わなければならない、それが電力増幅器のコストの削減、電力変換効率の更なる向上へのボトルネックとなっている。

ここで、もし図 1 (b)の赤丸部分のように、スイッチがオンからオフに切り替わる時も電流、電圧が連続となるスイッチング技術を実現できれば、それは理論上最適なスイッチング技術となり、電力変換効率、コストの両面で従来の技術を凌駕する増幅器を実現できる。そのための手法として、スイッチに高調波電流を注入することにより連続した電流波形を実現できる E_M 級動作が書籍[A]で述べられている。しかし、この書籍では概念の紹介にとどまっており、具体的な回路設計法にまで踏み込んだ議論は全くなされてない。これは、連続波形を実現するために、注入電流に求められる条件を与えることが容易ではなく、たとえ条件を与えられたとしても、その条件を満足する回路を設計することが困難であるという二重の問題が存在するためであり、現状では概念そのものが埋もれている状態にあった。

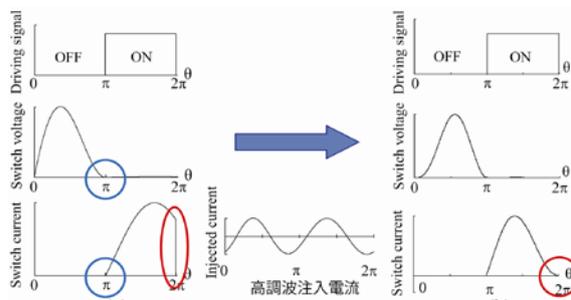


図 1: スwitch素子の電流・電圧波形の例。(a): E 級スイッチング スwitchがオンになるときの電流・電圧の連続性(青丸)は達成されるが、オフになるときに電流にジャンプ(赤丸)が生じる。(b): 高調波電流をスイッチに足しこむことによりスイッチがオフになるときも連続性(赤丸)が達成される。

電流を注入することにより図 1 (b)のようなジャンプレスなスイッチ電流を達成するためには周波数、位相、振幅など注入電流に求められる条件を明らかにし、さらに、その条件を実現する注入回路を設計する必要がある。この設計問題は、理想波形をあらかじめ決定し、その理想波形を実現するための回路構成、およびその素子値を決定するという最適化問題に帰着する。我々はこの種の問題を高速・高精度に解く独自の数値計算アルゴリズムを発明している[B]。この数値設計技術と「注入同期系」と呼ばれるシステムに対する非線形解析技術を融合させることにより、スイッチ素子における電流・電圧を連続とするための基礎理論を確立できる可能性を見出した。

2. 研究の目的

本研究では、電力変換効率の向上とコストの削減を両立する次世代電力増幅器の研究開発を行う。現在の電力増幅器はスイッチ素子における電圧・電流のジャンプに起因する電力損失が発生する。また、その影響を抑えるために、高速なスイッチ素子を用いる必要がありコストの増大につながっていた。本研究では、高調波電流を注入することによりスイッチ素子における電流・電圧波形を連続とするスイッチング技術に着目し、我々自身がこれまでに確立してきた独自の設計技術と注入同期系に対する非線形回路解析とを巧妙に融合させることにより、スイッチング技術の基礎理論を構築する。さらに、構築した理論に基づき、無線通信用増幅器、RF 電源、DC-DC コンバータ、ランプバラスト等、アプリケーションを意識した電力増幅器の設計を行う。これらの設計を通じ、電流・電圧波形を連続にすることに加え、アプリケーションに応じた性能改善のための役割を注入電流に付加できることを示す。

これらの研究開発を通じ、1. 概念に留まっていたスイッチ素子の電流・電圧波形を連続にする技術を回路上に実装できること、2. そのための基礎理論、3. 新たなスイッチング技術が具体的なアプリケーションに与えるインパクト、を理論、実験の両面から明らかにすることを研究目的とする。

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。

3-1: 設計理論と方法の確立

本フェーズでは注入電流にスイッチ素子の電流を連続とするために要求される条件を理論的に導出する。その上で、注入電流の条件を満足する注入回路の回路構成を検討し、E_M 級増幅器の設計法を確立する。その回路に対し最適設計を行い、広範囲のパラメータ領域における設計曲線を作成し、様々

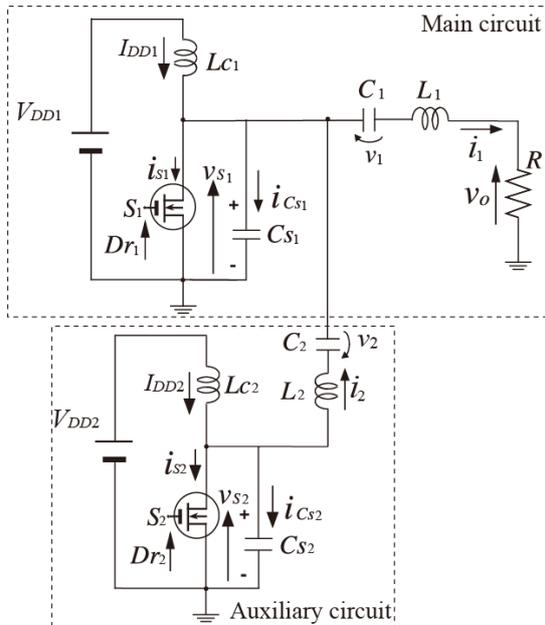


図 2 : E_M 級増幅器の回路構成. 補助回路はその動作モードにより増幅器, 周波数通倍器どちらとしても動作させられる.

なアプリケーションに対応するための基礎データとして整理する. [B]で提案している数値設計手法を適用することにより, スイッチ素子の寄生容量, 寄生インダクタが回路動作に及ぼす影響を組み込んだ回路設計手法を確立する.

3-2: 解析的記述

アプリケーション開発のためには増幅器の動作の本質を知る必要がある. そのためには回路解析を通じて回路動作を把握することが重要である. そこで, E_M 級増幅器について, 注入回路も含めた回路解析を行い, 注入回路が主回路に及ぼす影響を明らかにする. その上で, 解析式を用いた設計手法を提案する.

3-3: RF 電源用増幅器の開発

RF 電源では, 高周波, 高出力の回路動作が求められる. 3-1 で設計した増幅器に対し, プッシュプル技術を適用し, 講習緑化のための回路構成を提案し, その設計技術を確認する.

3-4: ランプバラスト用発振器の開発

ランプバラストへの応用を意識した自励増幅器を開発する. そのために, 増幅器にフィードバックネットワークを導入し, 自励振動を可能とする E_M 級発振器を提案する. さらに, 非線形回路理論の安定解析を導入し, 自励発振器の安定性を保証した上で増幅器を設計する技術を確認する.

4. 研究成果

4-1: 設計理論と方法の確立

図 2 に E_M 級増幅器の回路図を示す. E_M 級増幅器は E 級増幅器と同様の動作をする「主

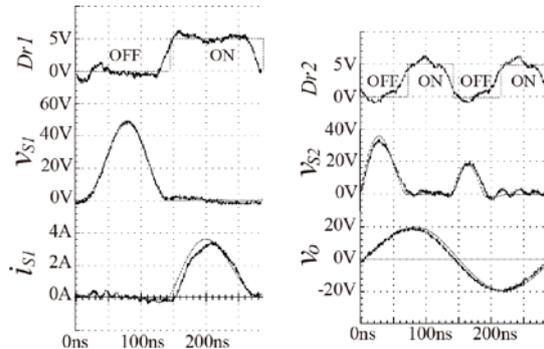


図 3: 補助回路が増幅器である場合の E_M 級増幅器の回路動作. 数値設計と実験の結果を重ねて表示している. 両方の特性は極めて良好な一致を見せ, 94.4% の電力変換効率を達成した.

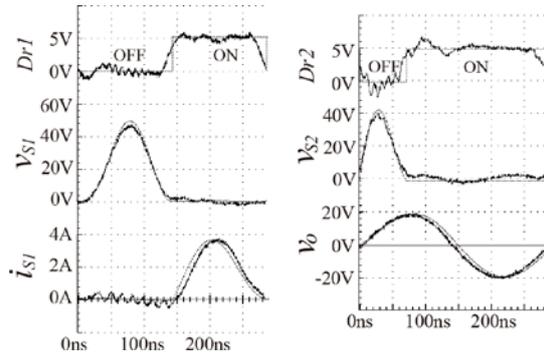


図 4: 補助回路が周波数通倍器である場合の E_M 級増幅器の回路動作. 94.6% の電力変換効率を達成した.

路」からなる. 従来は主回路において図 1 の波形を作ることによって終始した議論のみがなされてきたが, 回路全体で高い電力変換効率を維持するためには補助回路の設計が重要であることが明らかとなった. 具体的には補助回路の動作を動作周波数が主回路の 2 倍の E 級増幅器を適用する場合, および動作周波数は主回路と等しい E 級周波数通倍器を適用することを提案し, それぞれについて設計, 実装した上で比較検討を行った. 図 3 が前者, 図 4 が後者の波形図になる. どちらの回路動作においても, 従来の設計法では 81% であった電力変換率が(つまり, 19% の電力は損失となっていた)が 94.5% 前後にまで改善することができ, その妥当性が示された. これは補助回路において零スイッチング電圧スイッチングを提案し, それを達成する設計に成功したことに起因する.

設計技術が確立できたことに寄り, E_M 級増幅器の設計がきわめて容易となり, さまざまな特性を短時間で導き出すことができるようになった.

4-2: 解析的記述[論文 2]

4-1 では図 2 の回路構成に対し, 補助回路の動作モードを 2 種類, さらには高効率化のための条件を検討した結果, 実装コストや効率の関係から周波数通倍器で動作させた

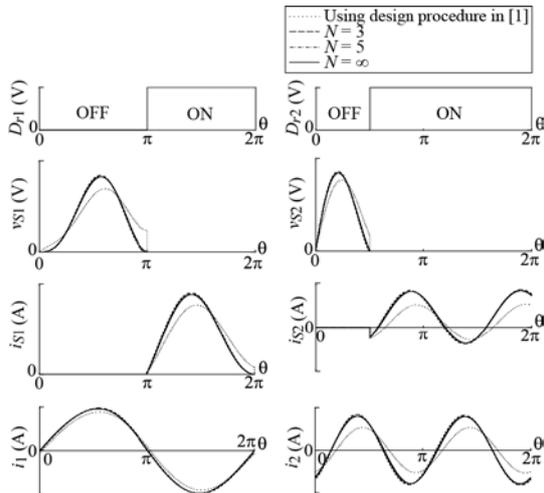


図 5: 解析式による動作波形. N 高調波成分について $N=3$ 以上で波形が一致していることが確認できる. これは 3 次高調波まで考慮することによりよい近似が得られることを意味する.

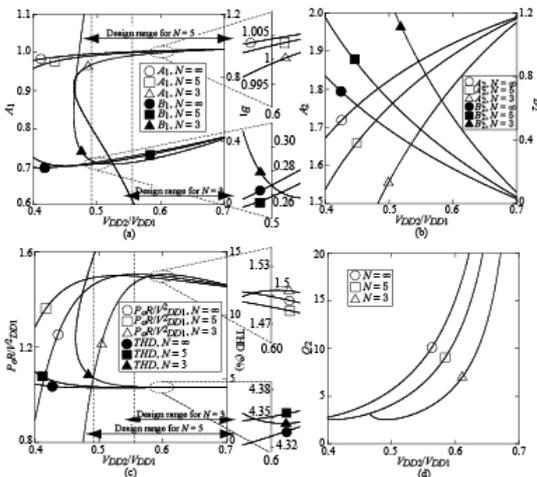


図 6: E_M 級増幅器の設計曲線. 4-1, 4-2 の結果から, あらゆるパラメータにおける設計値を高速に高精度で導出できるようになった.

上で零電圧スイッチングを満足させるのが最適であることが明らかとなった. 本フェーズでは条件下で回路動作を解析的に導出を試みた. このとき, 従来からとられてきた解析アプローチでは回路の動作を正しく記述できないことが分かった. 様々な条件で解析を行い実験結果と比較検討した結果, E_M 級増幅器の動作にはわずかな高調波成分が大きく影響し, その高調波成分を上手に利用しないと高効率化が図れないことが明らかとなった.

図 5 は波形図の比較で, 第 3 高調波まで考慮することで, 十分高い精度の波形が得られることが分かる. また図 4 は E_M 級増幅器の設計曲線である.

4-3: RF 電源用増幅器の開発[論文 4]

RF 電源回路とは数 MHz の動作周波数で交流正弦波を出力する回路であり, 半導体製造装置(プラズマ発生回路)を実現するために,

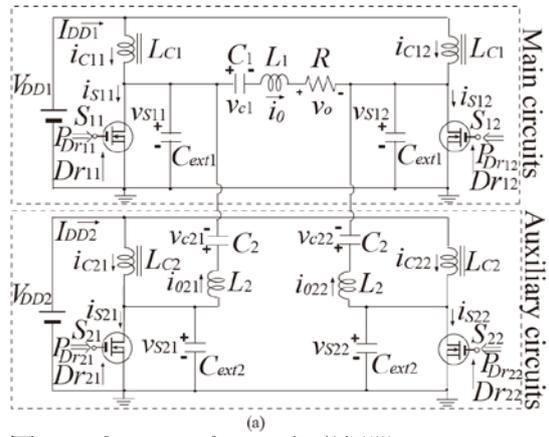


図 7: プッシュプル E_M 級増幅器

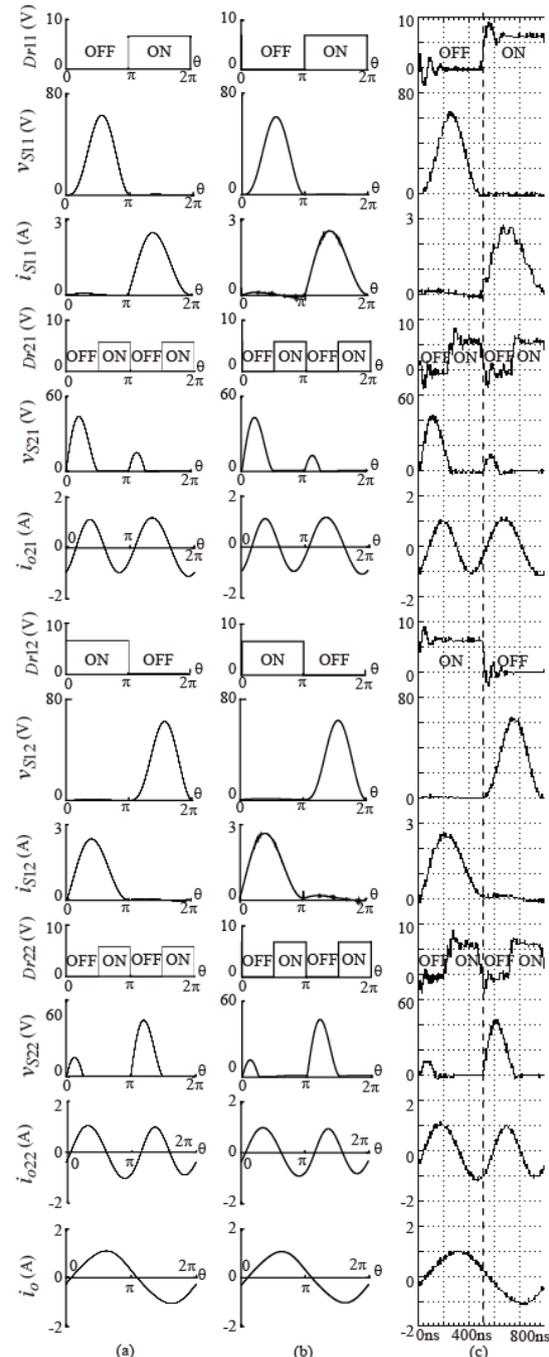


図 8: プッシュプル E_M 級増幅器の動作波形 (a) 数値波形 (b) PSpice シミュレーション (c) 実験波形. いずれも定量的な一致を示している.

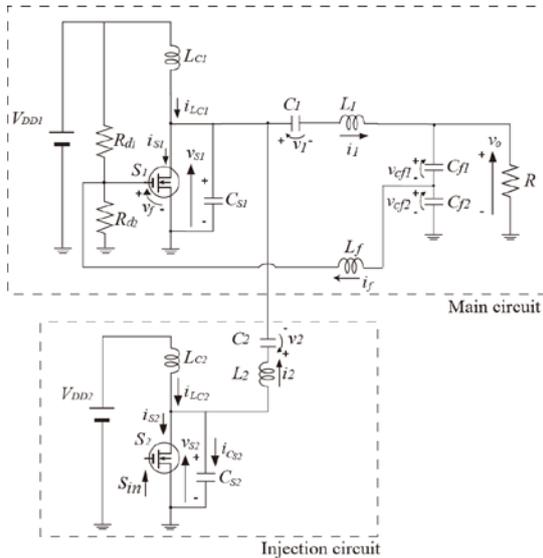


図 7 : E_M 級発振器の回路構成

高出力化を図る必要がある。そこで、図 7 に示す回路構成を提案した。この回路は図 2 の増幅器のプッシュプルタイプであると見ることができる。プッシュプル動作を適用することにより大電力化を図ることができる。一方で、図 7 の回路は主回路であるプッシュプル E 級増幅器に高調波電流を注入した回路とみなすこともできる。そのとき、高調波電流には、高効率化の効果に加え、電力を注入するという大出力化の効果も持たせることができる。

図 8 に動作波形を示す。数値波形、PSpice シミュレーション、実験結果ともよく一致しており、図 1 のスイッチ電圧、電流の連続性を達成していることが分かる。図 8 の結果では、動作周波数 1 MHz、25 W 出力において、93.0 % の電力変換効率を達成している。さらに、プッシュプル動作により低高調波歪率を達成しており、従来の 20% 程度に抑えることに成功している。

4-4: ランプバラスト用発振器の開発[論文 5]

ランプバラストへの応用を考えた場合、高周波数、高効率で動作させた上で、自励振動を実現する必要がある。そこで、図 2 の回路をもとに、次の変換を考慮した。図 2 の主回路の駆動波形を出力電圧からフィードバックすることにより電力発振器を作成することができる。このフィードバック駆動した回路を E 級発振器と呼ぶ。このとき、E 級発振器に外部から高調波電流を注入すれば、E_M 級と同じ動作原理により、E 級発振器のさらなる高効率化、低コスト化が望める。以上の検討をふまえて、図 7 に示す回路構成を提案し、E_M 級発振器と命名した。

E_M 級発振器では主回路が自律的にフィードバック駆動するため、補助回路のスイッチ駆動と同期をとる必要がない。つまり、補助回路にさらに拘束条件を課すことができる。

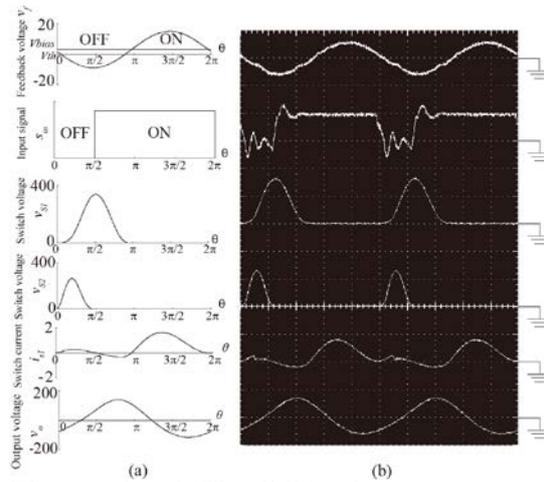


図 8 : E_M 級発振器の動作波形

そこで、E_M 級発振器では、その拘束条件として、零電圧スイッチングに加え、電圧の傾きも零とする E 級動作条件を適用することを提案し、その設計および実装に成功した。数値設計を採用することにより、あらゆる設計仕様において、8 つの拘束条件を同時に満足する素子値を一意に導出することに成功した。理論波形と実験波形との比較を図 9 に示す。図 9 の結果ではランプバラストへの応用を意図し、動作周波数 1 MHz、出力電力 35 W の設計仕様において、設計および実験を行った。従来の E 級増幅器と比較して電力損失を 12% 削減することに成功しつつ、図 1 のスイッチング条件を達成させることで、低コスト化も実現している。

参考文献

- [A] A. Grebnnikov and N. O. Sokal, Switchmode RF Power Amplifier, Newnes, Burlington, MA, USA
 [B] H. Sekiya, T. Ezawa, and Y. Tanji, "Design procedure for class E switching circuits allowing implicit circuit equations," IEEE Trans. Circuits and Syst.I, vol. 55, no. 11, pp. 3688-3696, 2008.

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)

[雑誌論文] (計 15 件)

- [1] T. Nagashima, X. Wei, T. Suetsugu, M. K. Kazimierczuk, and H. Sekiya, "Waveform equations, output power, and power conversion efficiency for class-E inverter outside nominal operation," IEEE Trans. Industrial Electron., vol.61, no.4, pp.1799-1810, Apr. 2014. (査読有) DOI:10.1109/TIE.2013.2267693

- [2] X. Wei, T. Nagashima, M. K. Kazimierczuk, H. Sekiya, and T. Suetsugu, "Analysis and design of class-E_M power amplifier," IEEE Trans. Circuits Syst.-I, vol.61, no.4, pp. 976-986, Apr. 2014. (査読有) DOI:10.1109/TCSI.2013.2283991

[3] M. Hayati, A. Lotfi, M. K. Kazimierczuk, and H. Sekiya, "Analysis and design of class-E power amplifier with MOSFET parasitic linear and nonlinear capacitances at any duty ratio," IEEE Trans. Power Electron., vol.28, no.11, pp.5222-5232, Nov. 2013. (査読有)
DOI:10.1109/TPEL.2013.2286160

[4] X. Wei, S. Kuroiwa, T. Nagashima, M. K. Kazimierczuk, and H. Sekiya, "Push-pull class- E_M power amplifier for low harmonic contents and high output-power applications," IEEE Trans. Circuits Syst.-I, vol.59, no.9, pp.2137-2146, Sept. 2012. (査読有)
DOI:10.1109/TCSI.2012.2185301

[5] R. Miyahara, X. Wei, T. Nagashima, T. Kousaka, and H. Sekiya, "Design of class- E_M oscillator with second harmonic injection," IEEE Trans. Circuits Syst.-I, vol.59, no.10, pp.2456-2467, Oct. 2012. (査読有)
DOI:10.1109/TCSI.2012.2188936

[6] X. Wei, H. Sekiya, S. Kuroiwa, T. Suetsugu, and M. K. Kazimierczuk, "Design of class-E amplifier with MOSFET linear gate-to-drain and nonlinear drain-to-source capacitances," IEEE Trans. Circuits Syst.-I, vol.58, no.10, pp.2556-2565, Oct. 2011. (査読有)
DOI:10.1109/TCSI.2011.2123490

〔学会発表〕 (計 38 件)

[1] Z. Zhang, X. Wei, H. Sekiya, N. Oyama, T. Suetsugu, and T. Nagashima, "Analysis of class E_M amplifier with considering non-zero current fall time of drain current," Prof. of International Future Energy Electronics Conference 2013 (IFEEEC2013), Taipei, Taiwan, pp.338-343, Nov. 5, 2013.

[2] H. Sekiya, X. Wei, and T. Nagashima, "High-frequency high-efficiency resonant converter with class- E_M inverter and class-E rectifier," Proc. of IEEE 56th Intl Midwest Symposium on Circuits & Systems (MWSCAS2013), Ohio, USA, pp.33-36, Aug. 5, 2013.

[3] R. Nakamura, X. Wei, T. Kousaka, and H. Sekiya, "Bifurcation in injection-locked class- E_M oscillator," Proc. of 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2012), Majorca, Spain, pp.691-694, Oct. 25, 2012.

[4] T. Kakimoto, T. Nagashima, X. Wei and H. Sekiya, "Approximate analysis for class- E_M amplifier taking into account harmonic frequency components," Proc. of 2012 International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP2012), Hawaii, USA,

pp.154-157, Mar. 4, 2012.

[5] X. Wei, T. Nagashima, S. Kuroiwa, H. Sekiya, "Design of symmetric class- E_M power amplifier," Proc. of 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON2011), Melbourne, Australia, pp.1300-1305, Nov. 10, 2011.

[6] M. Taromaru, N. Oyama, H. Sekiya, and T. Suetsugu, "Fundamental study on drain efficiency of EDSM/EPWM transmitter using class- E_M amplifier," Proc. 2011 Korea-Japan Microwave Conf. (KJMW 2011), Seoul, Korea, pp.134-137, Nov. 11, 2011.

[7] R. Nakamura, H. Sekiya, and T. Kousaka, "The dynamic behavior of the class- E_M amplifier outside of nominal conditions," Proc. of International Workshop on Nonlinear Maps and their Applications (NOMA2011), Évora, Portugal, pp.38-40, Sept. 15, 2011.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称 : EM 級増幅器

発明者 : 魏秀欽, 関屋大雄

権利者 : 国立大学法人 千葉大学

種類 : 特許

番号 : 特願 2011-246009

出願年月日 : 2011 年 11 月 9 日

国内外の別 : 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称 : EM 級増幅器及びこれを備えた機器

発明者 : 宮原良介, 関屋大雄

権利者 : 国立大学法人 千葉大学

種類 : 特許

番号 : 第 5207390 号

取得年月日 : 2013 年 3 月 1 日

国内外の別 : 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.s-lab.nd.chiba-u.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

関屋 大雄 (SEKIYA, Hiroo)

千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授

研究者番号 : 20334203