

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360153

研究課題名(和文) GaN HEMT等を用いた高周波スイッチング増幅器による電源回路の集積回路化

研究課題名(英文) Integration of Power Supply Circuit With High Frequency Switching Amplifier Using GaN HEMT device

研究代表者

末次 正 (Suetsugu, Tadashi)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：60279255

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではE級増幅器の動作および制御についてオンチップ化した時にはピークスイッチ電圧を抑えることが重要な課題となるため、ピーク電圧の抑制方式の実現、およびピークスイッチ電圧に対するトランジスタ浮遊キャパシタンスの非線形性の影響の解析、負荷が変動した場合のサージ電圧を抑える方法および負荷が変動した場合でも高効率動作を維持するための動作方法の実現、GaN HEMTデバイスに適した駆動方法の実現を進め、研究成果はIEEE や、IEEJ、IEICE、IJRERの論文誌などに掲載された。

研究成果の概要(英文)：This research analyzed operation of class E amplifier and its family circuits and proposed several improvements which enables low peak switch voltage, low surge voltage, and high efficient operation for wide load range in order to realize on-chip high frequency power supply. Especially, this research project analyzed effect of nonlinear capacitance to the peak switch voltage. This research project proposed circuits which can reduce peak switch voltage of class E amplifier, circuits which can reduce surge voltage at load fluctuations, circuits which can maintain high efficiency at load variations, and driving circuits suitable for GaN HEMT devices. These research achievements were published in journals of IEEE, IEEJ, IEICE, and IJRER.

研究分野：電子回路

キーワード：電源回路 増幅器 高周波 GaN HEMT マイクロマシン

1. 研究開始当初の背景

IT 機器のコードレス化、IC カード、モバイル機器などの携帯型電子機器はバッテリーで動作するためバッテリーの駆動時間の延長が求められており、バッテリーの駆動時間を延ばすには、バッテリーの容量を増加させる技術とともに電力を消費するほうの電子回路を工夫して消費電力を小さくすることが必要となっていた。電子回路の消費電力はそのほとんどが電子回路自体で消費されているわけではなく、電子回路に電力が到達する前の電源回路の部分でかなりの部分が消費されてしまっているというのが実情である。電源回路はバッテリーの電圧を電子回路が動作する規定の電源電圧（例えば 1.8V）に変換するために用いられるが、従来のドロップ型電源回路では電源電圧を落とすためにトランジスタを可変抵抗として用いていたため、半分以上の電力は電源回路で失われ、特に電力事情の厳しい携帯機器では電子回路自体の低消費電力化とともに電源回路の高効率化も大変有効な手段として重要視されるようになってきた。高効率な電源回路であるスイッチング電源はトランジスタをスイッチとして用いることにより理想的には 100%の変換効率を得ることができる電源回路である。このスイッチング電源は、その動作周波数を高くして回路素子を小さくすることができるが、これは、L や C のインピーダンスは周波数に比例して大きくなるため、高い周波数では小さい値の L や C を用いることができる。しかしスイッチング電源において、この動作周波数を高くしすぎると電力効率が下がるという問題点があった。これはスイッチがターンオンする瞬間にスイッチの寄生キャパシタに蓄えられていたエネルギーが一挙に放出しエネルギー損失として消費されてしまうためである。そこでスイッチ波形を共振によって正弦波状にすることによってスイッチがターンオンする瞬間にスイッチ電圧がゼロになるようにしてスイッチング損失を減らすソフトスイッチング技術が開発されてきていた。本研究開始時にはこのソフトスイッチング技術を用いて従来よりきわめて高い動作周波数で動作するスイッチング電源を実現すれば、IC チップに収めることができるようなきわめて小型の電源を実現することが可能となるため実現が求められていた。

2. 研究の目的

IT 機器のコードレス化、IC カード、モバイル機器などの携帯型電子機器はバッテリーで動作するためバッテリーの駆動時間を延ばすことの重要性が強い。バッテリーの駆動時間を延ばすには、バッテリーの容量を増加させる技術とともに電力を消費するほうの電子回路を工夫して消費電力を小さくすることが重要である。スイッチング電源はその動作周波数を高くして回路素子を小さく

することができる。これは、L や C のインピーダンスは周波数に比例して大きくなるため、高い周波数では小さい値の L や C を用いることができるためである。しかしスイッチング電源において、この動作周波数を高くしすぎると電力効率が下がるという問題点があった。これはスイッチがターンオンする瞬間にスイッチの寄生キャパシタに蓄えられていたエネルギーが一挙に放出しエネルギー損失として消費されてしまうためである。そこでスイッチ波形を共振によって正弦波状にすることによってスイッチがターンオンする瞬間にスイッチ電圧がゼロになるようにしてスイッチング損失を減らす技術が開発されている。これをソフトスイッチング技術という。本研究では、このソフトスイッチング技術を用いることにより従来よりもはるかに高い動作周波数でスイッチを動作させることによってスイッチング電源を小型化し、最終的には IC チップ内に収めることが可能な回路技術の確立を目標として、回路方式の開発、解析手法の確立、制御方法の確立を目標としている。

3. 研究の方法

本研究では、スイッチング電源回路をソフトスイッチング技術を用いることにより従来よりもはるかに高い動作周波数でスイッチを動作させることによって小型化し、最終的には IC チップ内に全ての部品を収めてしまうことを目標とし、そのような回路技術の確立を可能とするために、回路方式の開発、解析手法の確立、制御方法の確立を行う。

ソフトスイッチング技術は高周波数でも電力効率が悪化しない回路を用いることができる方式であり、スイッチがターンオンする瞬間にスイッチの電圧がゼロかつスイッチ電圧の傾きがゼロと言う特徴を持っている。

本研究では E 級増幅器の動作および制御についてオンチップ化した時にはピークスイッチ電圧を抑えることが重要な課題となるため、(1)ピーク電圧の抑制方式の実現、および(2)ピークスイッチ電圧に対するトランジスタ浮遊キャパシタンスの非線形性の影響の解析、(3)負荷が変動した場合のサージ電圧を抑える方法および(4)負荷が変動した場合でも高効率動作を維持するための動作方法の実現、(5)GaN HEMT デバイス特有の駆動条件に適した駆動方法の実現を進める。

(1)ピークスイッチ電圧を抑える回路方式の実現に関しては、まず E_M 級増幅器を用いてピーク電圧を抑える可能性について検討を行う。特に E_M 級増幅器をチップ内で動作させるために駆動方式の検討を進め、プッシュプル接続のプッシュプル接続や自励発振接続の可能性について検討する。また、E_M 級増幅器について高調波を考慮した精度の高い解析を行いピーク電圧を正しく予測する手法を確立する。E 級増幅器のスイッチの接続方法を変えることによりピークスイ

チ電圧を低減する方法について可能性を模索する。といった方法により根源的にピーク電圧を抑える回路方式の実現を目指す。

(2)トランジスタ浮遊キャパシタンスの非線形性がピークスイッチ電圧に与える影響の解析に関しては、非線形キャパシタンスが振幅および位相制御、ピークスイッチ電圧に与える影響を求め、ピークスイッチ電圧の低減策について検討する。また、素子の非理想成分により発生する電力損失を求め、これらの損失による出力電力と効率への影響を解析する。

(3)過渡的に発生するサージ電圧の抑制と解析については、その動作を解析し過渡的なピーク電圧の発生を抑える回路を開発する。さらに動作変動による効率の低下およびピークスイッチ電圧の上昇を抑え最適動作を維持する方法を検討する。

(4)負荷変動に対応する高速な過渡追従を可能とする方式を研究し、ピーク電圧抑制やサージ発生の抑制、高効率動作の維持を可能とする回路方式の実現を研究する。

また、(5)GaN HEMT デバイスの駆動方法については、ノーマリオンデバイスであっても公庫率に高周波動作可能な回路を研究する。

4. 研究成果

(1)ピーク電圧の抑制方式の実現については、スイッチのターンオンとオフ時の両方においてソフトスイッチングを行う E_M 級増幅器において出力をスイッチのゲート端子にフィードバックすることにより自励発振をする発振器を提案し IEEE Transactions に掲載された。また E_M 級増幅器をプッシュプル接続することにより出力の高調波ひずみを低減した回路を提案し IEEE Transactions に掲載された。E 級増幅器の高周波動作時の電力損失を極力抑えるための方式である EM 級増幅器について精度の高い解析を行い IEEE Transactions on Circuits and Systems に発表した。また、E 級増幅器のピークスイッチ電圧をスイッチを直列接続することにより分割して低減する方法を提案し IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC2015)において研究発表をした。このようにピークスイッチ電圧を抑制する多くの方法を実現し論文掲載を行った。

(2)ピークスイッチ電圧に対するトランジスタ浮遊キャパシタンスの非線形性の影響の解析を行い、オンチップ E 級増幅器においてトランジスタの寄生容量の非線形性が動作に与える影響を解析した。特に非線形性の影響が出力電力に与える影響が重要であるため、入力電圧の変動に対する出力電力の変動をトランジスタの寄生容量の非線形性を考慮して解析し NOLTA2012 で発表した。また、非線形性の影響がピークスイッチ電圧に与える影響を準 E 級動作時の非線形キャパシタによる動作について解析し IEICE

Transactions on Communications に掲載した。また、振幅および位相制御に対する非線形キャパシタの影響を求め IEEE International Symposium on Circuits and Systems で発表した。まずトランジスタの寄生容量の非線形性が動作に与える影響を解析し IEEE Transactions on Industrial Electronics に発表した。また、電源回路の集積回路化に関して D 級増幅器のスイッチのピーク電圧をトランジスタの出力キャパシタンスの非線形性を考慮して求めて International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)において研究発表した。

(3)負荷が変動した場合のサージ電圧を抑える方法については、トランジスタにかかるピーク電圧が過渡的に大変高くなる現象について解析した。E 級増幅器においてはトランジスタにかかる電圧のピーク値が高いという問題が元々あるが、このトランジスタにかかるピーク電圧が負荷変動時に過渡的に特に高くなる現象がある。すなわちサージ電圧の発生について、その原因を解析し過渡的なピーク電圧の発生を抑える回路を提案し International Journal of Renewable Energy Research に掲載した。また E 級増幅器の過渡応答を高速化するための方法を提案し PEMC2013 で発表し、さらにその発展方式を ICRERA2014 で発表した。

(4)負荷が変動した場合でも高効率動作を維持するための動作方法の実現について研究を行い、E 級増幅器の動作の変動について解析は E 級増幅器の過渡応答を解析的に求める方法を提案し IEICE Transactions on Communications に発表した。また、動作変動による効率の低下およびピークスイッチ電圧の上昇を抑え最適動作を維持する方法を IPEC2014 で発表した。また、E 級増幅器の負荷変動に対して複数のスイッチを切り替えることにより最適動作を維持する方法を提案し IEEJ Journal of Industry Applications において掲載した。

(5)GaN HEMT デバイス特有の駆動条件に適した駆動方法の実現を研究し、GaN HEMT デバイスがノーマリオンデバイスであるため負のバイアスのドライブ信号が必要となっていたので、自励式 E_M 級増幅器のゲート端子にダイオードを接続することにより自己バイアスを起こして負のドライブ信号を発生させる回路を提案して NCSP2013 で発表した。

このように小型の電源回路を実現するために高周波高効率電力増幅器である E 級増幅器およびその派生回路について回路本体および GaN HEMT デバイスを用いた場合の有効な回路方式の開発、解析手法について多くの研究課題について研究成果を得ることができた。

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 22 件)

Dalvir K. Sain, Agasthya Ayachit, Marian K. Kazimierczuk, Tadashi Suetsugu, "Small-Signal Analysis of PWM Boost Converter in CCM with Complex Impedance Load," 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2015), pp. 3597-3602, 2015.

Dalvir K. Saini, Agasthya Ayachit, Marian K. Kazimierczuk, Tadashi Suetsugu, "Buck DC-AC Converter Using Gallium-Nitride," 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2015), pp. 3579-3584, 2015.

Tadashi Suetsugu, "Discrete Control of Class E Amplifier with Load Fluctuation," International Telecommunication Energy Conference (INTELEC2015), pp. 874-878, 2015.

Tadashi Suetsugu and Shotaro Kuga, "Development of a Selectable Wireless Power Transfer System," International Telecommunication Energy Conference (INTELEC2015), pp. 870-873, 2015.

Agasthya Ayachit, Dalvir K. Saini, Marian K. Kazimierczuk, and Tadashi Suetsugu, "Three-Coil Wireless Power Transfer System Using Class-E² Resonant DC-DC Converter," International Telecommunication Energy Conference (INTELEC2015), pp. 1116-1119, 2015.

Tadashi Suetsugu, Shotaro Kuga, and Xiuqin Wei, "A Method for Dividing Voltage Stress of High Voltage Class E Inverter," International Telecommunication Energy Conference (INTELEC2015), pp. 437-440, 2015.

Tadashi Suetsugu, Xiuqin Wei, "Switched Capacitor Discrete Control of Class E Amplifier to Achieve Nominal Operation," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 4 No. 4, pp. 402-408, 2015.

Hiroo Sekiya, Kazuhide Inoue, Tomoharu Nagashima, Tadashi Suetsugu, Shotaro Kuga and Xiuqin Wei, "A Loosely Coupled Inductive Wireless Power Transfer Systems with Class-E Transmitter and Multiple Receivers," 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2014), Vol.1, pp. 675 - 680, 2014.

Tadashi Suetsugu, Xiuqin Wei, Marian K. Kazimierczuk, "Analysis of Dynamic and Transient Response of Frequency

Modulated Class E Amplifier," IEICE Transactions on Communications, Vol.E97-B, pp. 1630-1637, 2014.

Xiuqin Wei, Tomoharu Nagashima, Marian K. Kazimierczuk, Hiroo Sekiya, and Tadashi Suetsugu, "Analysis and design of class-EM power amplifier," IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I, Vol. 61, pp. 976-986, 2014.

Tomoharu Nagashima, Xiuqin Wei, Tadashi Suetsugu, Marian K. Kazimierczuk, and Hiroo Sekiya, "Waveform equations, output power, and power conversion efficiency for class-E inverter outside nominal operation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, pp. 1799-1810, 2014.

Tadashi Suetsugu, Xiuqin Wei, Marian K. Kazimierczuk, "Analysis of Power Loss of Class E Amplifier with Nonlinear Shunt Capacitance," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 3 No. 1, pp. 68 - 74., 2013.

Tadashi Suetsugu, Xiuqin Wei, "Clamping of Switch Peak Voltage with Diode and Transformer at Output of Class E Amplifier," International Journal of Renewable Energy Research-IJRER, Vol.3, No.2, pp. 359-363., 2013.

Tadashi Suetsugu, Xiuqin Wei, Marian Kazimierczuk, "Design Equations for Off-Nominal Operation of Class E Amplifier with Nonlinear Shunt Capacitance at $D = 0.5$," IEICE Transactions on Communications, vol. E96-B, No.99, pp. 198-2205., 2013.

Xiuqin Wei, Tomoharu Nagashima, Hiroo Sekiya, Tadashi Suetsugu, "Effect of MOSFET Parasitic Capacitances on EER Transmitter with Class-E Amplifier," IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp. 913-916., 2013.

Youhei Noguchi, Xiuqin Wei, Tomoharu Nagashima, Hiroo Sekiya, and Tadashi Suetsugu, "Negative-Bias Driving Voltage for Class-E GaN HEMT Oscillator Using a Diode," 2013 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP2013), pp. 201-204, 2012.

Tadashi Suetsugu, Xiuqin Wei, "Clamping of Switch Peak Voltage with Diode and Transformer at Output of Class E Amplifier," International Conference on renewable Energy

Research and Applications (ICRERA2012), pp. 1 - 3, 2012.

Tadashi Suetsugu, Hiroo Sekiya, and Xiuqin Wei, "Influence of Nonlinear Shunt Capacitance in Harmonic Distortion in Output Envelope of Drain Voltage Modulated Class E Amplifier," Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2012), pp. 614-617, 2012.

Tomoharu Nagashima, Xiuqin Wei, Takuji Kousaka, and Hiroo Sekiya, "Bifurcation analysis of the class-E inverter for switching-pattern derivations," IEICE Communications Express (ComEx), vol.1, no.1, pp. 33-39, 2012.

Tomoharu Nagashima and Hiroo Sekiya, "Steady-state behavior of class-E amplifier outside nominal operation taking into account MOSFET-body-diode effect," Journal of Signal Processing, vol.16, no.4, pp. 287-290, 2012.

- ②① Xiuqin Wei, Shingo Kuroiwa, Tomoharu Nagashima, Marian K. Kazimierzczuk, and Hiroo Sekiya, "Push-pull class-E_M power amplifier for low harmonic-contents and high output-power applications," IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I: Regular Papers, vol.59, no.9, pp. 2137-2146, 2012.

- ②② Ryosuke Miyahara, Xiuqin Wei, Tomoharu Nagashima, Takuji Kousaka, and Hiroo Sekiya, "Design of class-E_M oscillator with second harmonic injection," IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I: Regular Papers, vol.59, no.10, pp. 2456-2467, 2012.

〔学会発表〕(計 8 件)

空閑 祥太郎, 末次 正, "選択的無線電力伝送システムの開発," 電子情報通信学会 電子通信エネルギー研究会, 2016年1月29日, 久留米ホテルエスプリ.

末次 正, 空閑 祥太郎, "E級増幅器の電圧ストレスを低減するスイッチの直列接続法," 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 2015年9月26日, 福岡大学.

末次 正, 空閑 祥太郎, 魏 秀欽, "E級増幅器によるEER送信機の応答を高速化するアーキテクチャ," 電気学会 C部門大会, 2015年8月27日, 長崎大学.

末次 正, 大山 修毅, 空閑 祥太郎, 魏 秀欽, "EPWM-EERによるE級増幅器の応答高速化," 電子情報通信学会 電子通信エネルギー研究会, 2014年10月10日, 機械振興会館.

末次 正, 魏 秀欽, 空閑 祥太郎, "E級最適動作を実現するE級増幅器の離散制御," 電気学会産業応用部門家電・民生研究会, 2014年5月29日, 機械振興会館.

末次 正, "E級増幅器の最大動作周波数のデューティ比による変化について," 電子情報通信学会技術研究報告(電子通信エネルギー技術研究専門委員会), 2013年10月10日, 北海道大学.

Tadashi SUETSUGU, Xiuqin WEI, Tomoharu NAGASHIMA and Hiroo SEKIYA, "Parallel Connected Class D Amplifiers for RF Power Source Applications," 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2013年3月14日, 千葉大学.

Tadashi Suetsugu, Xiuqin Wei, Kazunari Shimazaki, Tomoharu Nagashima, Hiroo Sekiya, "Resonant Class E Rectifier for Wireless Power Transfer in Contactless IC Card Reader/Writer," 電気学会日韓ワークショップ, 平成24年11月2日, 韓国慶州.

〔図書〕(計 2 件)

末次 正, 科学技術出版, "RF電力増幅器の基礎と設計法," 2015.

末次 正 / 太郎丸 真(監訳), 草野 忠 四郎(訳), Steve C.Cripps(著), CQ出版, "ワイヤレス通信用RF電力増幅器の設計: 高効率とリニアリティを両立するGHz帯増幅技術(RFデザインシリーズ)," 2012.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 無線電力伝送システム

発明者: 末次 正

権利者: 学校法人福岡大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-223036

出願年月日: 2012年10月

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末次 正 (SUETSUGU, Tadashi)
福岡大学・工学部・教授
研究者番号：60279255

(2)研究分担者

関屋 大雄 (SEKIYA Hiroo)
千葉大学・融合科学研究科・教授
研究者番号：20334203

魏 秀欽 (Wei Xiuqin)
千葉工業大学・電気電子工学科・准教授
研究者番号：80632009