

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820112

研究課題名(和文) 注入同期高効率電力発振器の基礎理論の構築およびRF電源への応用

研究課題名(英文) Establishment of fundamental theory for injection-locked oscillators and its applications to RF power supplies

研究代表者

魏 秀欽 (WEI, Xiuqin)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80632009

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電力発振器に対し、周波数安定化・高効率化を低コストで実現する回路技術を提案した。自励式電力発振器の周波数安定化のために注入同期理論を用いることを基本コンセプトとし、物理分野で発展している位相縮約アプローチを用い、電力発振器の動作を位相のみで記述することにより、注入同期の安定化を記述した。その上で、申請者の持つ電力発振器のスイッチ素子に生じる損失を削減するための回路設計技術を融合することにより、高効率化も併せて実現できることが示した。

研究成果の概要(英文)：With the advancement of information devices, high-efficiency high-power-density amplifiers are required in many applications. The oscillator is regarded as a developed amplifier because it has a feature of self-oscillation by a feedback construction. However, there is a problem that the accuracy of the operating frequency is low. This study has presented a technology to achieve an accurate frequency and high efficiency at low cost in the oscillators for communications. In this study, the basic concept is to use the injection-locked theory to the oscillator for achieving an accurate frequency. The injection-locked theory is based on the phase reduction approach (PRA), which is an analysis method developed in the field of physics. By combining the PRA and the original circuit-design technique proposed by the applicant to reduce the switching losses, the results show that it is possible to realize a oscillator with accurate operating frequency and high efficiency at low cost.

研究分野：工学

キーワード：RF電源 高周波 大電力 無線電力伝送 注入同期 位相縮約 安定化

1. 研究開始当初の背景

情報機器の高度化に伴って半導体製造装置で用いられるプラズマ発生機器や医療用機器、IH機器、RFエンドデバイス、無線電力伝送送信部などに用いられる、より高効率で高電力密度の増幅器が求められている。しかしながら、RF電源や無線電力伝送の送信段への応用に向けた、10MHz以上の高周波数において100W以上の高出力動作を達成する用途に対する研究開発が遅れており、このカテゴリーに対応するDC/AC変換回路の設計開発が求められている。このような高周波・高出力動作を行う場合、スイッチ素子を駆動するドライブ回路(図1(a)参照)の設計がボトルネックとなり、開発コストが増大する。この問題に対する解決方法のひとつとして、出力電圧をMOSFETの駆動波形としてフィードバックさせ自励動作させる電力発振器が注目されている。図1(b)のように、電力発振器では駆動回路が不要となり実装コストが低減する。さらに、スイッチング増幅器の利点を維持し高効率動作を実現できる。

一方で、電力発振器は自励振動系であるため、精度の高い周波数出力を確保できないという新たな問題が生じる。この問題に対応するための技術として、図1(c)のように微小な外部信号を注入し、発振器の動作をその信号に同期させることにより周波数の安定化をはかる注入同期技術がある。注入信号は、発振器本体の電力と比較して極めて低い電力レベルの信号でよいから、この注入回路の設計に大きな注意が払われることはこれまでなかった。

電力発振器では、特に高周波動作において、スイッチ素子におけるスイッチング損失が高効率化への問題となる。つまり、高周波動作と高効率動作はトレードオフの関係をもつ。高周波・高効率を両立できる技術として、E級スイッチング技術と呼ばれているソフトスイッチング技術があり、そのE級スイッチング技術を適用した電力発振器に微小な外部信号を注入することにより、電力発振器の周波数の安定化と電力変換効率の向上を同時に達成できる可能性を見出した。

2. 研究の目的

本研究では、高周波電力発振器に対し、周波数安定化・高効率化を低コストで実現する回路技術を提案する。自励式電力発振器の周波数安定化のために注入同期理論を用いることを基本コンセプトとする。さらに注入信号に電力発振器のスイッチ素子に生じる損失を削減のための回路設計技術を融合することにより、高効率化を実現する。本技術が確立されると、周波数安定化を実現しつつ駆動回路が不要となり、結果

として回路の実装コスト削減も達成できる。本研究では、注入同期発振器に対し周波数安定化および高効率化を達成するための理論を構築するため、注入同期発振器を物理分野で発展している位相縮約アプローチを用い電力増幅器を位相記述することにより、注入同期の安定化を物理学の視点から記述する。その上で、申請者の持つ高効率化のための設計技術を融合し、周波数安定化と高効率化を同時に達成する注入回路設計技術の理論の基盤を固める。さらに、確立した理論を用いRF電源への応用を意図した高周波数大電力発振器の開発を行い、その周波数安定性・高効率化・低コスト化の効果を定量的に評価する。

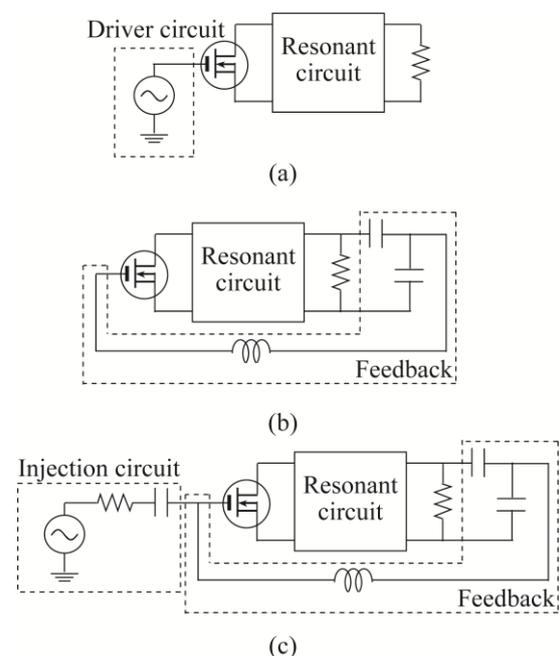


図1 高周波・高効率DC/AC変換回路の回路構成。(a)増幅器。(b)発振器。(c)注入同期系発振器。

3. 研究の方法

本研究では、周波数の安定化と電力変換効率の向上を同時に達成する注入系電力発振器の基礎理論を確立することを主目的とした。その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: 注入同期系電力発振器のモデル化

スイッチング技術を用いる電力発振器においてスイッチング周波数を高くすると、電流・電圧は急峻に変化し、回路の受動素子、能動素子に存在する寄生成分の影響を無視できなくなる。特に能動素子(MOSFET)の寄生素子の影響は大きい。そこで、MOSFETや磁性素子の寄生抵

抗, 寄生容量を考慮する必要がある. 本研究を遂行するための最初のフェーズとして, MOSFET や磁性素子の寄生抵抗, 寄生容量を考慮した注入同期系電力発振器の等価回路を導出する.

3-2: 位相感受関数の導出

一般に, 注入信号の電力が高ければ高いほど, 同期しやすくなる. しかし, 高注入信号電力はフィードバック電圧波形および時比率に影響を及ぼす. また, 電力付加効率の視点から, 低注入信号電力が有益であるため, 同期範囲の導出は極めて重要である. しかし, 同期範囲が位相感受関数と外部注入信号との畳み込み積分より得られるため, 位相感受関数を求める必要がある. したがって, 本フェーズでは, 注入同期系電力発振器の位相記述を行い, 感受関数を導出する.

3-3: 同期範囲の導出

本フェーズでは, 3-2で導出した位相感受関数に基づき同期範囲を導出する. また, 注入信号の波形種類が電力発振器の同期範囲にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることは重要である. そのため, 本フェーズでは様々な波形の注入信号の同期範囲を導出する.

4. 研究成果

4-1: 注入同期系電力発振器のモデル化

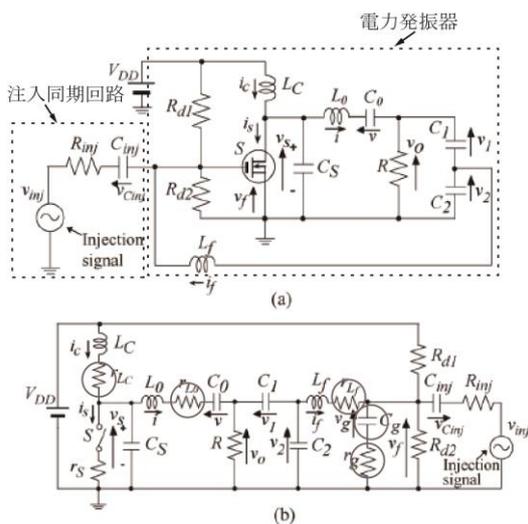


図2 回路構成. (a) 注入同期系電力発振器. (b) 寄生成分(oを付けている)を考慮した等価回路.

図2(a)に具体的に開発する回路構成を示す. この回路の本体は E 級発振器と呼ばれる電力発振器である. この E 級発振器はスイッチがオンに切り替わる瞬間にスイッチ素子にかかる電圧

が零かつその傾きも零となる E 級スイッチングを満足するため, 高周波動作において高効率を実現することができる. つまり, 高周波化と高効率を両立するため, その E 級スイッチングを維持することがキーポイントである. また, 図2(a)に示しているように E 級発振器に注入信号を発生する回路を加えることより, 電力発振器の周波数の安定化と電力変換効率の向上を同時に達成可能となる. しかし, 高周波動作において, 回路の能動素子や磁性素子に存在する寄生成分の影響が大きく, その影響で E 級スイッチングを失う恐れがある. そこで, 図2(a)の回路をモデル化する場合, 図2(b)に示されるように, MOSFET や磁性素子の寄生抵抗や寄生容量を考慮し, それらを含む等価回路を導出した.

4-2: 位相感受関数の導出

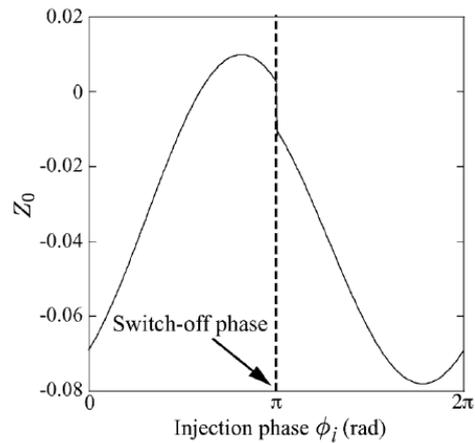


図3 位相感受関数

本研究では, 図2(b)の回路において, 周波数安定化・高周波化・高効率化を達成する注入同期系電力発振器を簡素な方法で設計することが課題となる. 図2(b)の回路において, 位相記述による同期解析技術を用いて安定化解析を進めた. 位相縮約アプローチは物理分野で発展しているシステムのダイナミクスをシステム次元を縮退させ表現し, 位相のみで記述する手法である. このとき位相差の変化量が小さければ, 微小な外力と自励発振器が安定同期状態に落ち着いたとみなすことができ, 注入同期系電力発振器は動作周波数が注入信号の周波数で動作することが示される. この位相縮約アプローチを適用することにより, 同期範囲が簡単かつ高精度で導出することができる. しかし, 同期範囲を導出するために, 位相感受関数を求める必要がある. そこで, 図2(b)の位相を定義し, 位相感受関数と呼ばれる位相を記述関数の導出を行った. 図3に導出した位相感受関数を示す.

4-3: 同期範囲の導出

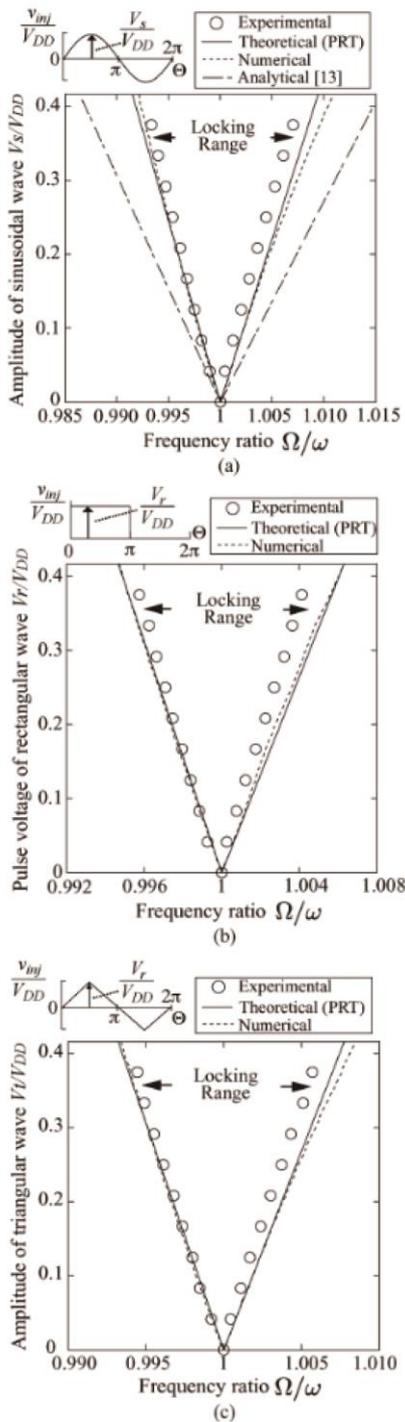


図4 注入信号に対する注入同期系電力発振器の同期範囲。(a) 正弦波。(b) 矩形波。(c) 三角形波。

本研究では、正弦波、矩形波、および三角形波の三種類の注入信号による電力発振器の同期範囲を導出した。図4はそれぞれの注入信号に対する電力発振器の同期範囲を示す。図4より、同期範囲は注入信号の電圧ピーク値に比例し、増加することがわかる。また、注入信号に関

わらず、理論結果は実験結果とよく一致することもわかる。これにより、本研究で提案された位相縮約アプローチに基づく同期範囲の予測の有効性と妥当性を示す。

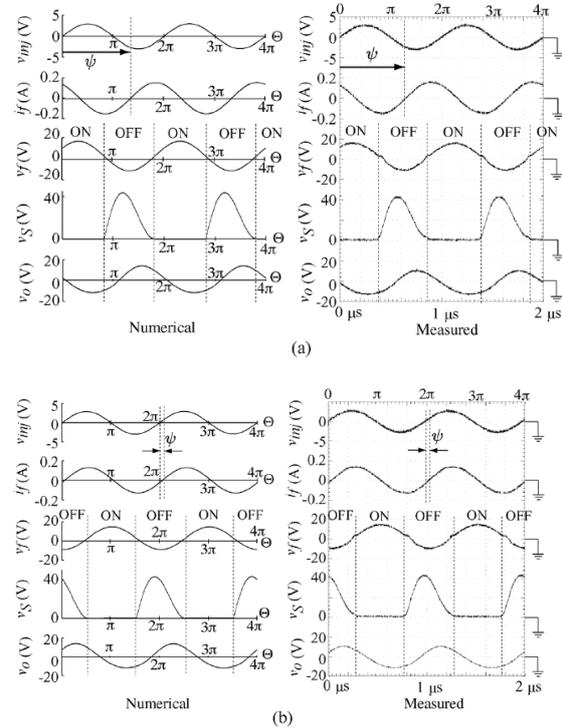


図5 $V_s = 3 \text{ V}$ の時の波形。(a) $\Omega = 0.99551 \omega$ 。(b) $\Omega = 1.00449 \omega$ 。

図5は周波数 $\Omega = 0.99551 \omega$ と $\Omega = 1.00449 \omega$ かつ電圧ピーク値 $V_s = 3 \text{ V}$ の正弦波注入信号の理論波形および実験波形を示す。この図より、全てのスイッチ電圧波形はE級スイッチングを達成していることがわかる。また、発振周波数は注入信号の周波数に同期していることもわかる。さらに、93%の電力変換効率を達成した。

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 11 件)

[1] Steady-state analysis and design of class-D ZVS inverter at any duty ratio, Xiuqin Wei, Hiroo Sekiya, Tomoharu Nagashima, Marian K. Kazimierczuk, and Tadashi Suetsugu, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 1, pp. 394-405, Jan. 2016.(査読有)
DOI: 10.1109/TPEL.2015.2400463

[2] Analysis and design of loosely inductive coupled wireless power transfer system based on class-E² DC-DC converter for efficiency enhancement, Tomoharu Nagashima, Xiuqin Wei,

Elisenda Bou, Eduard Alarcon, Marian K. Kazimierczuk, and Hiroo Sekiya, IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 62, no. 11, pp. 2781-2791, Nov. 2015. (査読有)
DOI: 10.1109/TCSI.2015.2482338

[3] Steady-state analysis and design of class-DE inverter at any duty ratio, Hiroo Sekiya, Xiuqin Wei, Tomoharu Nagashima, and Marian K. Kazimierczuk, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 7, pp. 3685-3694, July 2015. (査読有)
DOI: 10.1109/TPEL.2014.2339355

[4] Locking range derivations for injection-locked class-E oscillator applying phase reduction theory, Tomoharu Nagashima, Xiuqin Wei, Hisa-Aki Tanaka, and Hiroo Sekiya, IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 61, no. 10, pp. 2904-2911, Oct. 2014. (査読有)
DOI: 10.1109/TCSI.2014.2327276

[5] Analysis and design of class- E_M power amplifier, Xiuqin Wei, Tomoharu Nagashima, Marian K. Kazimierczuk, Hiroo Sekiya, and Tadashi Suetsugu, IEEE Transactions on Circuits and Systems I, vol. 61, no. 4, pp. 976-986, Apr. 2014. (査読有)
DOI: 10.1109/TCSI.2013.2283991

[6] Waveform equations, output power, and power conversion efficiency for class-E inverter outside nominal operation, Tomoharu Nagashima, Xiuqin Wei, Tadashi Suetsugu, Marian K. Kazimierczuk, and Hiroo Sekiya, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 4, pp. 1799-1810, Apr. 2014. (査読有)
DOI: 10.1109/TIE.2013.2267693

[学会発表] (計 28 件)

[1] Design and analysis of class E inverter with MOSFET nonlinear gate-drain and nonlinear drain-to-source capacitances, Xiuqin Wei, 37th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC2015), Osaka, Japan, pp. 859-863, Oct. 22, 2015.

[2] Analytical design for resonant inductive coupling wireless power transfer system with class-E inverter and class-DE rectifier, Tomoharu Nagashima, Xiuqin Wei, Elisenda Bou, Eduard Alarcon, and Hiroo Sekiya, 2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2015), Lisbon, Portugal, pp. 686-689, May 25, 2015.

[3] pEPWM architectures for fast transient response of class E amplifiers in EER system, Tadashi Suetsugu, Naoki Oyama, Shotaro Kuga, Makoto Taromaru, and Xiuqin Wei, International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA2014), Milwaukee, USA, pp. 354-358, Oct. 22, 2014.

[4] A loosely coupled inductive wireless power transfer systems with class-E transmitter and multiple receivers, Hiroo Sekiya, Kazuhide Inoue, Tomoharu Nagashima, Tadashi Suetsugu, Shotaro Kuga, Xiuqin Wei, Kenichi Shirota, Hironobu Hatamoto, and Satoru Shimizu, 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE2014), PA, USA, pp. 675-680, Sept. 16, 2014.

[5] Analytical design procedure for resonant inductively coupled wireless power transfer with class- E^2 dc-dc converter, Tomoharu Nagashima, Kazuhide Inoue, Xiuqin Wei, Elisenda Bou, Eduard Alarcon, Marian K. Kazimierczuk, and Hiroo Sekiya, 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2014), Melbourne, Australia, pp. 113-116, June 2, 2014.

[6] Effect of MOSFET Parasitic Capacitances on EER Transmitter with Class-E Amplifier, Xiuqin Wei, Tomoharu Nagashima, Hiroo Sekiya, and Tadashi Suetsugu, 2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2013), pp. 913-916, Beijing, China, May 21, 2013.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○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

<http://research.jimu.nagasaki-u.ac.jp/IST?ISTActId=FINDJPDetail&ISTKidoKbn=&ISTErrorChkKbn=&ISTFormSetKbn=&ISTTokenChkKbn=&userId=100001081>

6. 研究組織

(1)研究代表者

魏 秀欽 (WEI, Xiuqin)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号:80632009