

注入同期型発振器の注入同期能力の最適化に関する研究
(要約)

矢部 洋司

電気通信大学
2022年3月

論文の要約

論文題目	注入同期型発振器の注入同期能力の最適化に関する研究
氏名	矢部 洋司

注入同期とは自励発振系に外部信号を強制注入すると発振系が外部信号に同期する基本的な物理現象である。これを利用する技術は真空管時代に端を発し、現在のミリ波等の高周波数帯での利用、省電力設計、回路の微細化の要請から、さらに進展している。たとえば、無線通信信号の低位相雑音化や無線電力伝送の安定化のための要素技術として、また発振器の周波数安定性向上も含め、研究が盛んである。本論文では、これらの潜在的応用例に貢献することを念頭におき、実用的な注入同期回路についてどのような入力波形が注入同期の性能を最大化できるか?という問いについて回答を与えることで、注入同期回路の系統的設計論を提示する。

注入同期を現実の諸問題に適用するためには、発振器の注入同期特性を解析し、実際の設計に反映させることが必要になる。従来の解析手法では、発振器の弱非線形性や入出力波形が正弦波に近いという前提が必要であった。非線形振動論や非線形物理の分野では、発振器の発振状態を、その発振位相について閉じた微分方程式に縮約する理論が構築され、従来のアドラ方程式の一般化に相当する枠組みが得られている。その結果、CMOSリングオシレータを含む強い非線形性をもつ発振器の位相ノイズや注入同期についての解析が可能となっている。この注入同期の基本方程式を活用し、注入同期を最適化するアプローチが多く研究者により最近取り組まれてきており、理論的な進展が得られてきている。しかし、これらの理論の実験的検証は行われていなかった。事実、唯一の成功した実験実証は硫酸での電気化学反応を用いており、この発振周波数は約1Hzである。つまり工学的応用が可能である実用的な発振器における理論の実験検証が期待されていたものの未着手の状態であった。

そこで本論文では、実用上有用な発振器として、無線通信において搬送波生成のために用いられるCMOSリングオシレータと、パワーエレクトロニクスにおいてDC-ACインバータとして用いられるE級発振器を例として挙げ、これらに対し注入同期の性能の最大化が可能であることを理論、シミュレーション、実験から示す。

注入同期の性能としては、ロックレンジと引き込み時間が挙げられる。ロックレンジとは、所与の入力強度において入力と発振器が同期可能な周波数範囲のことである。本論文では、CMOSリングオシレータとE級発振器について注入同期の基本方程式をシミュレーションから抽出し、その方程式に対して最適化理論を適用した。それにより、ロックレンジの最大化を実現する入力波形を導出し、実験とシミュレーションにより効果を確認した。次に、引き込み時間とは、発振器に入力信号を注入開始してから同期が成立するまでの時間である。ロックレンジ最大化と同様に、注入同期の基本方程式に対して最適化理論を適用することで引き込み時間の最小化を達成する入力波形を導出し、シミュレーションにより効果を確認した。

本論文は次のように構成されている。第1章では序論として研究の背景と目的を述べる。第2章では、関連研究を紹介する。まず、注入同期の応用に関する研究を整理することで、工学における注入同期の重要性を示す。その後、注入同期の理論的解析手法に関する研究を紹介

し、従来の解析法と本研究で用いる解析手法を比較する。さらに、これらの解析手法をベースとして提案されている、注入同期の性能を最大化する最適化理論について紹介することで、本研究の理論的なバックボーンについて説明する。第3章では、注入同期のロックレンジを最大化する入力波形の設計とシミュレーション検証について、CMOSリングオシレータを例として述べる。ここでは、検証結果は理論とシミュレーションによるものである。第4章では、注入同期のロックレンジを最大化する入力波形の設計と実験検証について、E級発振器を例として述べる。ここでは、理論、シミュレーション、実験によりロックレンジ最大化の効果を示している。第5章では、第4章の発展的問題として、低注入消費電力下での注入同期能力の最大化について、E級発振器を例として述べる。所与の同期能力を達成する注入電力を最小化することは可能か?という問題に肯定的な回答を与える。第6章では、注入同期の引き込み時間を最小化する入力波形の設計とシミュレーション検証について、CMOSリングオシレータを例として述べる。第5章以前では注入同期の評価尺度としてロックレンジに焦点を当ててきたが、本章ではロックレンジではなく引き込み時間の最小化について論じる。第7章では、総括的な議論を述べる。最後に、第8章では本研究のまとめを行う。

論文目録

関連論文の印刷公表の方法及び時期

- (1) 矢部洋司, 西川功, 中田一紀, 守川知行, 関屋大雄, 安藤芳晃, 田中久陽
論文題目「注入同期のロックレンジを最大化する入力信号波形
—CMOS リングオシレータを例として—」
2016年6月電子情報通信学会論文誌 C 99 (6) (第3章に関連)
- (2) 矢部洋司, 欧陽有界, 中川正基, 宇都宮健介, 永島和治, 関屋大雄, 田中久陽
論文題目「注入同期型E級発振器のロックレンジを最大化する入力波形の
設計と実験検証」
2018年10月電子情報通信学会論文誌 A 101 (10) (第4章に関連)
- (3) Y Yabe, H-A Tanaka, H Sekiya, M Nakagawa, F Mori, K Utsunomiya, A Keida
論文題目「Locking Range Maximization in Injection-Locked Class-E
Oscillator –A Case Study for Optimizing Synchronizability」
2020年5月IEEE Transactions on Circuits and Systems I:
Regular Papers 67 (5) (第4章に関連)
- (4) Y Yabe, T Terauchi, F Mori, H-A Tanaka
論文題目「Fastest entrainment in injection-locked oscillators」
2020年11月2020 International Symposium on Nonlinear Theory and
its Applications (NOLTA2020) (第6章に関連)
- (5) K Maeda, F Mori, Y Yabe, A Keida, H Sekiya, H-A Tanaka
論文題目「An Attempt to Construct Energetics of Injection-Locking
Using Class-E Oscillator as anExample」
2020年11月2020 International Symposium on Nonlinear Theory and
its Applications (NOLTA2020) (第5章に関連)