

## 学位論文の要旨

氏名	奥 雅貴
学位論文題目	電流共振形プッシュプルコンバータの動作特性解析

本論文は、共振形プッシュプルコンバータのうち、電流共振半波形プッシュプルコンバータおよび電流共振全波形プッシュプルコンバータについて、サージ電圧を含む動作特性の解析についてまとめたものである。

スイッチング電源回路内部で電力変換を担うDC-DCコンバータは、半導体スイッチを高周波でスイッチングさせることにより、小型・軽量で高効率の電力変換を実現する回路で、現在、広く使われている。共振形コンバータでは、回路の共振現象を利用してスイッチ素子に零電圧スイッチング(ZVS)動作あるいは零電流スイッチング(ZCS)動作を行わせ、これによりコンバータの高周波動作と高効率化の両立を実現する。

共振形コンバータは絶縁形と非絶縁形に大別されるが、本論文で扱う電流共振形プッシュプルコンバータは絶縁形に分類される。一般に、絶縁共振形コンバータは、変圧器の使用により入出力間が絶縁されるだけでなく、巻数比による昇降圧比選択の自由度が高いといった特長を持ち、さらに変圧器の漏れインダクタンスを共振用インダクタとして活用できるという利点も有する。解析対象とする電流共振形プッシュプルコンバータ(半波形および全波形)は、電流入力形であることから昇圧特性が得られやすく、プッシュプル接続によりスイッチとして使われるMOSFETのソースが共通となるためスイッチ駆動が容易であるという特長を持つ。応用としては、太陽電池のパワーコンディショナが考えられている。

電流共振形プッシュプルコンバータの先行研究については、変圧器の励磁電流を考慮した定常状態解析が行われていない、内部損失の評価が不十分である、コンバータの特性を記述する状態平均化方程式が得られていないといった課題が残っている。特に励磁電流は絶縁共振形コンバータの諸特性に影響を与えるため、コンバータの動作特性について正確に把握し、精度の高い設計を行うには励磁電流を考慮する必要がある。さらに、電流共振形プッシュプルコンバータを実際に動作させると、1次側スイッチに高いサージ電圧が発生するが、先行研究ではこのサージ電圧についての十分な検討も行われていない。スイッチに生じるサージ電圧あるいはスイッチに加わる電圧のピーク値を定量的に知ることは、スイッチ保護の観点から非常に重要である。

以上より、本論文の目的は、次の2点にまとめられる：(1) 電流共振形プッシュプルコンバータの動作特性を記述する状態平均化方程式の導出を行い、励磁電流と内部損失が理論値の精度に与える影響を調べること。(2) 電流共振形プッシュプルコンバータの1次側スイッチに生じるサージ電圧について定量的に調べ、その低減を行うこと。

本論文は6章で構成され、内容は以下に示す通りである。

第1章では、最初に本論文の研究背景、目的、概要について述べる。次に、いくつかの絶縁共振形コンバータを紹介するとともに、本論文で解析対象とする絶縁共振形コンバータの一種である共振形プッシュプルコンバータの概要について説明する。最後に、DC-DCコンバータの標準的な動作解析手法である状態平均化法について述べる。

第2章は、電流共振半波形プッシュプルコンバータについて、変圧器の励磁電流および内部損失を考慮した定常状態における動作解析を行った結果を述べたものである。主要な結果として、導いた状態平均化方程式、内部損失の評価方法、励磁電流の算出結果を示す。解析結果を実験結果と比較し、変圧器の励磁電流を考慮することにより解析精度が大きく改善されることを示す。加えて、解析において1個の抵抗に集約した内部損失の内訳として、個別の損失評価を示す。

第3章では、電流共振半波形プッシュプルコンバータの1次側スイッチに生じるサージ電圧の発生メカニズムを調べ、等価回路に基づくサージ電圧の解析を行った結果を述べる。得られた解析結果を実験結果と比較し、解析結果の妥当性を定量的に検討する。また、サージ低減手法としてRCスナバの付加とSiC-MOSFETの使用を検討した結果について報告する。

第4章では、電流共振全波形プッシュプルコンバータについて、内部損失および変圧器の励磁電流という2つの要素を解析モデルに導入して動作解析を行い、これらの要素が理論的な解析結果の精度に与える影響について検討する。さらに、得られた解析結果を利用してコンバータの定常特性を表す近似式を導き、その妥当性を定量的に示す。

第5章は、電流共振全波形プッシュプルコンバータの1次側スイッチに生じるサージ電圧について、その発生メカニズムと等価回路に基づいたサージ電圧の解析を行ったものである。実験により、出力電流の増加に対しサージ電圧が低減するという解析結果が妥当であることを示す。サージ低減手法としては、RCスナバの付加を検討した結果について記述する。

第6章は、本論文の結論を述べたもので、電流共振半波形プッシュプルコンバータおよび電流共振全波形プッシュプルコンバータに関して、状態平均化法に基づく定常状態解析およびサージ電圧解析により得られた主要な結果をまとめて示す。最後に今後の課題について記述して、本論文の総括とする。

## Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Operating Characteristics Analysis of Current-Resonant Push-Pull Converters

Name: Oku Masataka

This dissertation describes the analysis of the operating characteristics, including surge voltages, of the current-resonant half-wave and full-wave push-pull converters.

DC-DC converters that perform power conversion inside switching power supply circuits are required to be small, light, and highly efficient. It is well-known that in principle, further reduction in size and weight can be realized by operating at higher switching frequency. On the other hand, a major problem is that decreasing converters' efficiency because of increasing of switching losses and high-frequency noise. For this problem, the soft switching technology developed in the 1980s has made it possible to solve a considerable part. A typical example of this soft switching technology is resonant converters. Resonant converters use circuit resonant phenomenon to make switching elements to perform zero-voltage switching (ZVS) or zero-current switching (ZCS) operation, thereby realizing both high-frequency operation and high efficiency of the converters.

Resonant converters are roughly classified into isolated converters and non-isolated converters, this dissertation deals with isolated resonant converters. Isolated resonant converters have not only an isolation function, but also feature of protection on the secondary side when the primary side is short-circuited and vice versa, and a high degree of freedom of selecting the buck-boost ratio. In addition, there is an advantage that the leakage inductance of the transformer can be used as the resonant inductor. In this dissertation, the analysis targets are the current-resonant push-pull converters (half-wave/full-wave). These converters' have advances that the number of MOSFETs used in the isolated resonant converter is relatively small, the switch drive circuit design is easy because of the source of the MOSFETs is connected to the same ground, and boost characteristics can be obtained easily. An application example of these converters, power conditioners for solar cells is considered.

For previous researches of current-resonant push-pull converters, there are problems. There are as follows: steady-state analysis is not conducted with considering the magnetizing current of the transformer and power loss, and the state-space averaging equations which describe converters' characteristics have not been obtained. In particular, since magnetizing current affects various characteristics of the resonant converters, it is necessary to consider the magnetizing current to understand the operating characteristics of the converters accurately and design with high accuracy.

In addition, when current-resonant push-pull converters are actually operated, high surge voltage is generated in the primary switches. However, previous researches have not investigated on this surge voltage. It is important to quantitatively know the surge voltage or the peak voltage generated in the switches in order to prevent from being damaged to the devices.

The purposes of dissertation are summarized the following two points: (1) Derivation of the state-space averaging equations, and investigating the affects that the magnetizing current and power loss give the accuracy of the theoretical value. (2) Investigating the surge voltage generated in the

primary side switches of the current-resonant push-pull converters quantitatively, and studying the reduction method.

This dissertation is composed of six chapters, and the contents are as follows.

Chapter 1 first describes the research background, purpose, and outline of this dissertation. Next, some isolated resonant converters and overview of the resonant push-pull converter which are analyzed in this dissertation are introduced. Finally, state space averaging method which is a standard operation analysis method for DC-DC converters is described.

Chapter 2 describes the results of the steady state analysis of the current-resonant half-wave push-pull converter, taking into account the transformer magnetizing current and power loss. State space averaging equations which are derived, the estimation method of the power loss, and the calculation results of the magnetizing current are showed as main results. The analytic results are compared with the experimental results, and it is shown that the analytical accuracy is greatly improved by considering the magnetizing current. In addition, the individual losses estimation is shown as a breakdown of the internal losses integrated into one resistance in the analysis.

In Chapter 3, mechanism of the surge voltage generation in the primary switches of the current-resonant half-wave push-pull converter is investigated, and the analytical result of surge voltage is described based on an equivalent circuit. The obtained analytical result is compared with the experimental results, and the validity of the analytical result is quantitatively examined. In addition, As the surge voltage reduction method, the result of studying the addition of RC snubber and the use of SiC-MOSFET.

In Chapter 4, operating analysis of the current-resonant full-wave push-pull converter is conducted. analytical model is introduced power loss and the magnetizing current of the transformer. Effects of these two factors on analysis accuracy are examined quantitatively. Furthermore, an approximate expression which represents the characteristics of the converter is derived by using the obtained analytical results, and validity of the expression is shown quantitatively.

Chapter 5 describes the analytical result of the surge voltage generated in the primary side switches of the current-resonant full-wave push-pull converter based on its generation mechanism and equivalent circuit. Analytical result show that surge voltage decreases as the output current increases, this result agrees with experimental result. As the surge voltage reduction method, the result of studying the addition of RC snubbers is described.

Chapter 6 describes the conclusions of this dissertation. For the current-resonant push-pull converters (half-wave/full-wave), results of the steady-state analysis based on the state space averaging method and surge voltage analysis are summarized below the main results. Finally, future works are described.