

平面磁路形パラメトリック変圧器に関する研究

太 田 勝

要 旨

近年、高度情報化社会の発展により、携帯電話、PHS、さらにパーソナルコンピュータなどが急速に普及している。これに伴い、携帯用情報機器の小形化、軽量化が求められており、その電子回路や電源などに用いられるインダクタ、トランスなどの磁気デバイスの小形化・集積化・高周波化への要求が高まっている。このような状況の下で、このマイクロ磁気デバイスに関する研究が、構造、構成に関するものから、薄膜材料の作成方法、加工方法、材料特性の評価方法、及び測定方法に関するものまで幅広く行われている。また、これらのマイクロ磁気デバイスを応用して、電源に用いる研究も行われている。携帯用情報機器はバッテリーで駆動され、このバッテリー電圧を各回路が必要とする電圧に昇圧または降圧するために、電源としてDC-DCコンバータが用いられる。

このような状況の中で、パラメトリック発振現象は過負荷保護機能、雑音ろ波機能、定電圧特性などの実用上有利となる特長を有している。このため、この現象を利用した各種機器、すなわちパラメトリック変圧器、パラメトリックモータ、パラメトリックリニアモータなどに関する研究が行われている。パラメトリック発振の特長である過負荷保護機能、定電圧特性などはDC-DCコンバータに必要とされる機能であり、この機能を補うため市販のDC-DCコンバータには過負荷保護回路、定電圧制御回路が設けられている。したがって、パラメトリック発振の特長を生かしてDC-DCコンバータを作製すれば、これらの回路が不要となり、DC-DCコンバータの小形化が可能となる。また、構造が簡単なため、多出力変圧器などが作製できる可能性があり、一つの変圧器から異なる電圧値の出力を得ることができれば、電源の小形化につながる可能性がある。さらに雑音ろ波機能を利用して小形の正弦波インバータなどへの応用も考えられる。

しかし、パラメトリック発振を利用したパラメトリック変圧器、パラメトリックモータなどは、カットコアを組み合わせた立体的な構造となっているために小形化・薄型化が容易ではない。今ここで、微細で薄い構造の磁気回路にパラメトリック発振を生じさせることができれば、パラメトリック発振の特長を生かした新しいマイクロ磁気デバイスができる可能性がある。

本研究では、このような考えに基づいて平面磁路形パラメトリック変圧器を作製し、基本特性について検討を行った結果、この変圧器がパラメトリック発振の実用上有利な特長を有し、携帯用情報機器の電源に有用であることを明らかにした。さらに、変圧器の設計法の確立、及び応用について種々の検討を行った。その結果、平面磁路形パラメトリック変圧器を実用化する上で有用な結果が得られた。

以下に本論文の概要を述べる。

第1章は、緒言であり、本論文の目的を述べている。

第2章は、平面磁路形パラメトリック変圧器の試作を行い、その基本特性について述べたもので

学位と学位記番号：博士（工学）、博第1号

授与年月日：平成12年3月18日

授与時の所属：八戸工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程

ある。まず、パラメトリック発振の原理について述べ、他のパラメトリック発振を利用したデバイスから、平面磁路においてパラメトリック発振が確立するための条件を検討している。次にその検討結果を基に手加工で12mm×12mm サイズの変圧器をパーマロイとアモルファス磁性材料で作製した。その結果、作製した変圧器にパラメトリック発振が確立していることを明らかにした。また、本変圧器がパラメトリック発振を利用した他の機器と同様に、過負荷保護機能、雑音ろ波機能、定電圧特性などの特長を有していることを明らかにした。さらに、パーマロイとアモルファス磁性材料で作製した変圧器の特性を比較した。その結果、アモルファス磁性材料で作製した変圧器がさらに小形化が可能であることを示した。

第3章は、磁気回路モデルを用いて動作解析を行った結果について述べている。変圧器の形状から磁気回路モデルを作成し、各部磁気抵抗を磁束の5次式で近似している。さらに、共振側の回路から2階の微分方程式を求め、磁気回路から求めた式を代入して基本方程式を求めている。この式を基本波のみを考慮した調波平衡法によって解いている。これにより、変圧器の入出力電圧特性や位相特性、及び負荷特性を理論的に求め得ることを明らかにした。

第4章は、変圧器の小形化について述べている。第3章で用いた磁気回路モデルから、本変圧器におけるパラメトリック発振確立条件を理論的に求め、それに基づいて形状を決定した。変圧器の作製はワイヤカット放電加工機によって行い、変圧器の材質にはアモルファス磁性材料を使用した。結果として、5mm×7mm(厚さ0.9mm)の変圧器を作製することに成功し、この変圧器にパラメトリック発振が生じることを明らかにした。さらに、作製した変圧器の動作解析を行い、第3章で述べた解析方法の妥当性を再確認した。

第5章では、本変圧器の特性改善と設計法の確立を目的とし、変圧器の特性に影響を与える種々の要素について検討を行った。まず巻線の設置位置に着目し、巻線の位置の異なる数種類の変圧器を作製し、巻線位置が特性に与える影響を明らかにした。次に、材料の熱処理により特性改善が期待できることから、熱処理を行い特性を比較した。その結果から、磁化特性の形状を熱処理により変化させることで、特性を向上させることが可能であることを示した。また、本変圧器において重要な設計要素となる磁路の飽和特性と入出力電圧特性の関係を理論的に求め、各部分の特性がパラメトリック発振に与える影響について明らかにした。さらに、設計法の確立の目的から材料自体のB-H特性と磁路形状から飽和特性を求める方法について検討し、その妥当性を明らかにした。

第6章は、この変圧器を利用して、多出力変圧器、及びDC-DCコンバータの可能性を追求した結果について述べている。すなわち、本変圧器を用いた多出力変圧器、並びにDC-DCコンバータを作製し、本変圧器を回路に組み込んだ場合でもパラメトリック発振の特長を有することを示し、DC-DCコンバータが小形になる可能性を示した。

第7章は、結言であり、本研究で得られた結果をまとめたものである。これを以下に示す。

- (1) 5mm×7mmの磁路においてパラメトリック発振を生じさせることに成功し、この変圧器が過負荷保護機能、雑音ろ波機能、定電圧特性を有し、特に定電圧特性が良好であることを明らかにした。
- (2) 変圧器の動作解析を行い、その解析手法の妥当性を明らかにした。さらに、本変圧器において重要な設計要素となる共通磁路と磁路狭窄部分が変圧器特性に与える影響について理論的に明らかにした。
- (3) 本変圧器を使用してDC-DCコンバータを作製すれば、過負荷保護回路、定電圧制御回路が不要となるために、DC-DCコンバータが小形になる可能性があることを明らかにした。

Study of a Planar Parametric Transformer

Masaru OHTA

ABSTRACT

CHAPTER I INTRODUCTION

Remarkable progress has been made in recent years in the field of portable electronic equipment like portable phones and personal computers. Magnetic devices such as inductors and transformers used in the power supply and electronic circuits of portable electronic equipment must be small, lightweight, and consume very little electricity. A considerable body of research documents micro magnetic devices like micro inductors and micro transformers, and this work has accompanied advancements in thin film processing and micro processing techniques.

Parametric oscillation has various desirable features that include voltage regulation, overload protection, and noise rejection. Therefore, development and research has been conducted with regard to the practical application of this oscillation in various electric devices, such as parametric transformers, parametric motors, and parametric linear motors. Generation of parametric oscillation in a thinner and smaller magnetic circuit may produce a new magnetic device like a micro transformer with the previously mentioned features. Although considerable attention has been devoted to magnetic devices that utilize parametric oscillation, a planar magnetic path device has never been examined for power conversion applications. Thus, this work concerns attempts to fabricate a planar transformer utilizing parametric oscillation and successful operation of the device as a parametric transformer.

In this paper, the fundamental performance characteristics, design method, and application of the planar parametric transformer have been discussed.

The summaries in each chapter are as follows :

CHAPTER II FUNDAMENTAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

This chapter describes attempts to fabricate a planar parametric transformer and explains the performance characteristics of the transformer. The generating conditions for parametric oscillation are also examined in the transformer. In light of these considerations, a 12×12 -mm device has been formed from a stack of 50% Ni-Fe laminations or $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ laminations. The device has been successfully operated as a parametric transformer. The planar transformer displays various desirable features that include voltage regulation, overload protection, and noise rejection.

CHAPTER III ANALYSIS

The performance characteristics of the planar parametric transformer have been analyzed

in this chapter. The analysis begins with the formulation of two expressions which relate the flux in the primary and secondary magnetic circuits to the magnetomotive forces of the input and output circuits of the transformer. A fifth-order polynomial is used to represent the nonlinear magnetization curve of the magnetic circuit. From these equations and the parametric circuit, a nonlinear second-order differential equation with time-varying coefficients can be obtained. The equation is solved by the harmonic balance method. The relation between input and output voltage and the relation between the phase of output voltage and the input voltage have been calculated. The calculated values agreed to a large extent with the experimental values.

CHAPTER IV MINIATURIZATION OF THE DEVICE

The miniaturization of the planar parametric transformer is studied in this chapter. The device was built in accordance with the conditions for generating a parametric oscillation in a planar magnetic device based on a magnetic circuit model. Thus, the device was successfully formed with a wire-electric discharge machine and is a 5×7 -mm planar parametric transformer. Results clearly indicate that the transformer provides excellent voltage regulation.

The performance characteristics of the device have been also analyzed. The validity of the magnetic circuit model proposed in chapter III was confirmed.

CHAPTER V AN EXAMINATION OF THE DESIGN METHOD

In this chapter, the important design factors for the transformer were examined in order to improve its performance characteristics and to establish a method for its design. The summary is as follows:

- (1) Examination of the relationship between the position of the windings and the characteristics of the transformer provided the optimal winding arrangement.
- (2) The effect of annealing the material in terms of the performance characteristics was also considered. Improvement of the transformer's performance characteristics can be expected because annealing the material reduces the hysteresis loss of the device.
- (3) The operating point and stability of the transformer are determined from the device's input-output voltage characteristics. The relationship between input-output voltage characteristics and the magnetic saturation curve of the transformer's magnetic path have been clarified in theory.
- (4) To examine the magnetic path of the transformer quantitatively, a method of obtaining the magnetic saturation curve of the device from the B-H curve of the material and from the transformer's magnetic path has also been examined.

CHAPTER VI APPLICATION

This chapter describes the possibility of using the planar parametric transformer in a multi-output parametric transformer and a dc-to-dc converter. As a result, a one-input-two-output parametric transformer and a dc-to-dc converter were produced, and parametric

oscillations were generated in these devices. The parametric transformer may be used for a thinner and smaller integrated switched-mode power supply or for a dc-to-dc converter in the future.

CHAPTER VII CONCLUSIONS

The results obtained from this study are as follows :

(1) Parametric oscillations have been generated in a 5×7 -mm planar magnetic path, and the planar parametric transformer produced displays excellent voltage regulation, overload protection, and noise rejection.

(2) The planar parametric transformer was analyzed with a harmonic balance method using a magnetic circuit model of the device. The validity of the method of analysis was also confirmed. The relationship between the input-output voltage characteristics and the magnetic saturation curve of the transformer's magnetic path has been explained in theory.

(3) Results clearly indicate that a planar parametric transformer is useful for a dc-to-dc converter.

The results obtained in this study will be helpful in the future design of micro transformers that use parametric oscillation.