

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 16 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560324

研究課題名(和文)大容量高周波スイッチング電源の高性能化及び低コスト化を実現する磁気デバイスの開発

研究課題名(英文) DEVELOPMENT OF THE MAGNETIC DEVICES REALIZING HIGH PERFORMANCE AND LOW COST SWITCHING POWER SUPPLIES

研究代表者

早乙女 英夫 (SAOTOME, Hideo)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50261938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：フェライトの動的磁気損失および等価誘電損失の特性を幅広い励磁条件下において測定し、これらの特性をシミュレーションできる磁気デバイスモデルを完成させた。また、その測定に適用される高電圧および高dv/dtが出力できる励磁装置を開発した。フェライトの鉄損に関し、ヒステリシス損失と動的磁気損失のそれぞれの温度依存性について実験的に検証し、温度特性があるのは前者のみであることを明らかにした。DC-DCコンバータに適用される磁気デバイスの損失を考慮した回路シミュレーションに成功した。シミュレーション結果を実験により検証した。磁気デバイスの損失測定では、低損失コンデンサを用いる手法が有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The dynamic magnetic and equivalent dielectric losses were measured under a wide range of exciting frequencies and voltages. The simulation model can reproduce the experimental data was developed. A rectangular wave voltage power supply that can output large voltage and dv/dt was manufactured for the measurements. Whether the hysteresis and dynamic magnetic losses depend on temperature was verified and it is experimentally found that the former only depends on temperature. DC-DC converter circuit simulations with the magnetic device model developed in this study were succeeded. The simulated results were compared with the experimental data and in accordance with them. It was shown that the loss of magnetic devices was precisely measured with low loss capacitors.

研究分野：磁気応用工学

キーワード：鉄損 フェライト 動的磁気損失

1. 研究開始当初の背景

概ね 15 年程前までのフェライトの損失評価は、磁気ヒステリシス損失に渦電流に起因する損失が加わることを前提として研究が成されていたが、この手法によって計算された損失値は実測値と桁違いであるため、実測値との差を「残留損失」と呼称せざるを得ず、その実態の究明が求められていた。また、この「残留損失」の周波数特性を拠り所に「異常渦電流」を仮定した解析が提案されていたが、その実態が明確化されることはなかった。この従来手法は、フェライトコアの「残留損失」の周波数特性実測値にフィットする周波数の階乗の次数を整数に限らず実数で表す手法であり、フェライト内の電磁界分布などの物理的特性には一切触れないものであった。

本研究代表者は、1996 年ころから正弦波小振幅励磁の条件化であるが、フェライトコア内の電磁界分布解析をベースとした「残留損失」の解析を行い、これが「動的磁気損失」と「等価誘電損失」に分離されることを定量的に明らかにした。ここでは、コアの寸法に依らない材料パラメータである「動的損失パラメータ」を導出した。一方、本研究代表者による等価誘電損失を考慮した研究から数年遅れて、フランスのグルノーブル電気研究所からフェライトの誘電特性に着目した損失解析の論文が発表された。また、本研究代表者の解析モデルの流れを受け、シンガポールのナンヤン工科大学による有限要素法解析が発表された。一方、本研究代表者は正弦波小振幅励磁条件からさらに研究を進めて磁気飽和に至る大振幅方形波電圧励磁条件下において「動的磁気損失パラメータ」を同定し、さらに空間回路網法によるフェライトコア内の電磁界解析法を確立した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、大容量高周波スイッチング電源の高性能化および低コスト化を実現させるための磁気デバイスを開発することである。その目的を達成するには、(1)磁気デバイスの損失解析を行ってその回路シミュレーションモデルを開発する、(2)磁気デバイスの低損失化を実現する、(3)電源装置内の磁気デバイス以外の回路要素の責務を軽減させる磁気デバイスを開発する、などの要素技術を確立する必要がある。高周波電源用磁気デバイスのコアには主として日本で発明されたフェライトが適用されており、研究代表者が現在までに研究開発してきたフェライトの動的磁気損失および等価誘電損失を考慮したコアの電磁界解析法をベースに本研究を遂行する。

3. 研究の方法

(1) 磁気デバイスの損失解析を行って汎用性のある回路シミュレーションモデルを開発する。

高周波磁気デバイスに適用されるフェライトの損失解析は、本研究代表者らによる「動的磁気損失パラメータ」の導入により解析精度を高め、また、コア内の電磁界解析手段として電源回路設計者に親和性のある回路網解析を適用することで「動的磁気損失パラメータ」の実用性を示した。

本研究では、高周波磁気デバイスに印加される電圧波形の多様性を考え、「動的磁気損失パラメータ」の非線形特性を幅広い条件で試験確認するため、高電圧・高 dv/dt パルス電圧発生装置を開発する。これは、RF 帯域に対応する高周波特性の優れた高圧・大電流電界効果トランジスタを駆動するための高速ゲート駆動回路を開発することと、この電界効果トランジスタのドレイン電流径路の低インダクタンス化を実現することに対応する。これらの技術を確立するため、回路の試作および試験・評価を繰り返して行う。

また、完成させた高電圧・高 dv/dt パルス電圧発生装置により、DC-DC コンバータに装着された磁気デバイスと等価な電圧責務試験を行い、「動的磁気損失パラメータ」の幅広い励磁条件下での非線形特性を把握する。ここでは、磁気デバイスに適用するフェライトの温度特性を考慮し、磁気デバイスの温度管理が行えるような試験を実施する。磁気デバイスに定常的に電圧を印加すると鉄損および銅損によって磁気デバイスの温度が上昇し、「動的磁気損失パラメータ」などの媒質パラメータの温度依存性によって測定精度を劣化させる懸念がある。そこで、開発する高電圧・高 dv/dt パルス電圧発生装置では磁気デバイスの特性測定に対して必要最小限の励磁時間となるよう、パルス波形を操作できるように工夫する。

所望の温度環境と励磁条件下で測定した磁気デバイスの特性から「動的磁気損失パラメータ」 f を磁束密度 B の時間微分 dB/dt の関数として求め、磁気デバイスの回路シミュレーションモデルを完成させ、回路方式の異なる多種の DC-DC コンバータにて磁気デバイスにおける損失の実験値とシミュレーション値との比較検討を行う。

(2) 磁気デバイスの低損失化を実現する。

磁気デバイスのコアに適用されるフェライトのうち、Mn-Zn 系フェライトは比較的大きな誘電特性を有し、これと本来の磁気特性との電磁気的な相互作用により、高周波励磁下ではコア内の磁界分布は一様ではなく、場所によって強弱を示す分布となる。この磁界分布は、コア内の電磁界に対する波動方程式とコア形状による境界条件によって定まり、コアの磁路断面積が大型化するほど顕著に現れる。一方、このようなコア内の磁界分布が生ずる状態での磁気デバイスの損失は、媒質パラメータの非線形性に電磁界分布による特性が加わり、その解析は複雑である。そこで、回路網解析技術を発展させた電磁界解

析法を適用して磁気デバイスの損失解析を行い、損失が最小となるコア形状の設計法を開発する。

(3) 電源装置内の磁気デバイス以外の回路要素の責務を軽減させる磁気デバイスを開発する。

DC-DC コンバータの低コスト化および高性能化の実現には、単に個々の部品の責務低減だけに対する改良ではなく、部品間の相互作用にも目を向け、回路システム全体に亘る幅広い視点で回路部品自体の設計を工夫する必要がある。例えば、ハイブリッド型 DC-DC コンバータの出力電流リップル低減には、コストアップを伴う平滑コンデンサ容量の増加を行うことなく、磁気デバイスの磁気回路設計を工夫することで実現できることが本研究代表者らによって明らかにされた。

極限に近い状態と言われる DC-DC コンバータの低コスト化要求に対して、磁気デバイスの工夫は最後に残された開拓地であると言え、磁気デバイスの複合機能化の検討などを行い、本研究代表者が得意とする磁気回路解析を駆使して新デバイスの開発を行う。

4. 研究成果

(1) 高電圧・高 dv/dt の方形波電圧を出力できるフェライトコアの励磁装置を開発した。これにより、高周波増幅器では得られない大きな dB/dt 条件下に対しても図 1 に示すようなフェライトの B-H ループを測定することができるようになった。

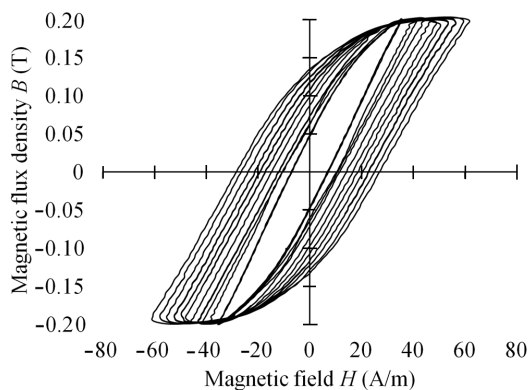


図 1

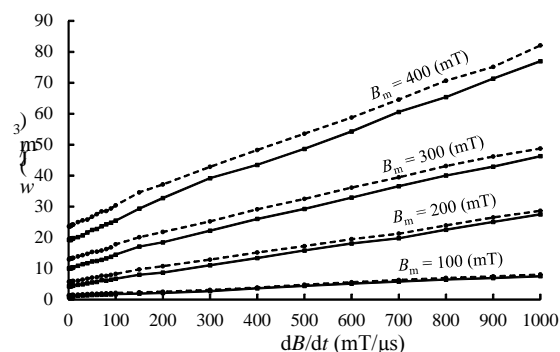


図 2

また、B-H ループの面積に対応する磁気損失のコア温度依存性の有無を実験的に調査し、磁気損失の中のヒステリシス損失には従来から知られている温度依存性があるが、動的磁気損失は温度に依存しないことが新事実として明らかとなった。フェライトコアの磁気損失の dB/dt 特性の実測値を図 2 に示す。点線が 0 近くの低温時、実線が常温での特性であり、図 2 より、 dB/dt が小さいヒステリシス損失の温度による差が動的磁気損失が支配的な高 dB/dt における差と大差なく、温度依存性があるのはヒステリシス損失のみであることが分かる。

(2) 磁気デバイスの低損失化を目的として、DC-DC コンバータに適用される磁気デバイスの損失を測定し、その鉄損抵抗を同定する手法を考案した。DC-DC コンバータに適用される磁気デバイスにはエアギャップを設ける場合が多く、この場合、インダクタンスの値が小さくなって励磁電流が大きくなるため、これと位相が 90° 異なる磁気デバイスの鉄損電流を測定することは困難であった。この問題を解決するため、磁気デバイスの単体試験において低損失コンデンサを磁気デバイスと直列接続し、磁気デバイスのインダクタンスとの共振を生じさせる手法を考案した。この手法により、鉄損電流が高精度で測定可能となった。この手法を適用して磁気デバイスの鉄損抵抗を同定し、DC-DC コンバータ内の磁気デバイスの損失割合をシミュレーションにより見積もることが可能となった。例えば、図 3 および表 1 に示す DC-DC コンバータでは、トランスの鉄損は、コンバータ損失全体の 16% 程度であることがシミュレーションにより分かった。実測では、トランスの相互インダクタンスおよび各巻線の漏れインダクタンスそれぞれの鉄損を測定することはできないが、シミュレーションにより、トランスのどの部分を改良する必要があるかなどの指針を検討する材料を提供できる。

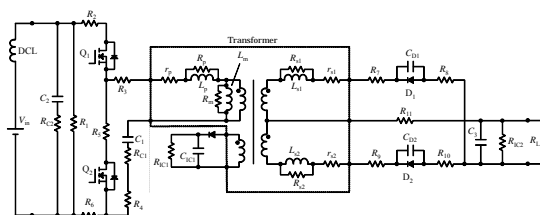


図 3

表 1

	シミュレーション	実験
入力電圧 (V)	100	100
入力電流 (mA)	511	507
出力電圧 (V)	23.8	23.6
出力電流 (A)	2.00	2.00
入力電力 (W)	51.1	50.7
出力電力 (W)	47.6	47.2
損失 (W)	3.5	3.5
効率 (%)	93	93

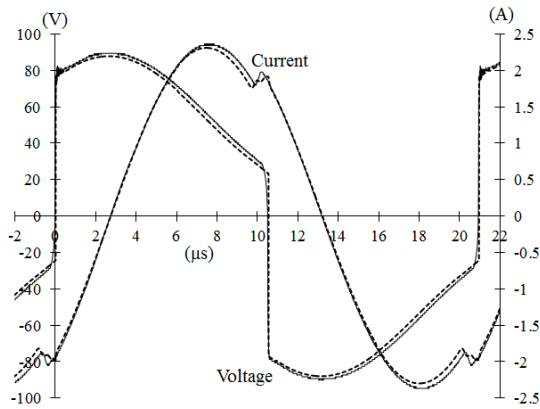


図 4

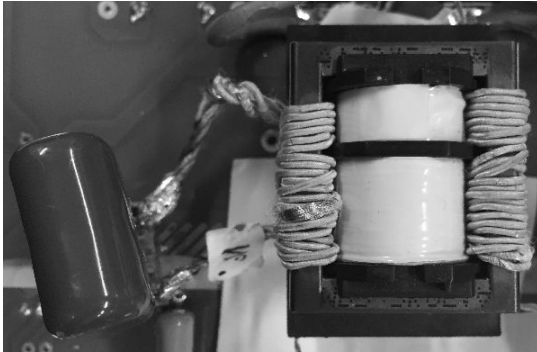
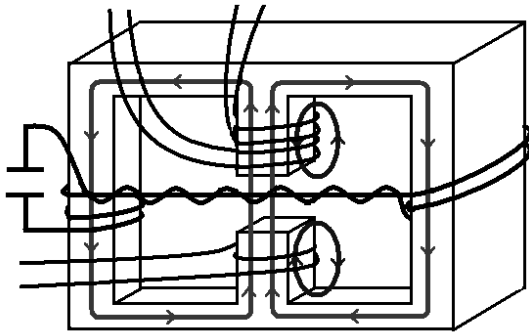


図 5

また、シミュレーションの精度検証結果として、トランスの1次側電圧および電流波形の実測値（実線）およびシミュレーション結果（点線）を図4に示す。

(3)磁気デバイス自体の損失低減も重要であるが、半導体スイッチングデバイスの通流損失を低減することができる磁気デバイスの開発もDC-DCコンバータの総合効率アップには有効である。このことを目的として、図5に示すような磁気デバイスを考案し、シミュレーションおよび実験によってその効力を検証した。DC-DCコンバータに適用されるエアギャップのあるトランスの励磁電流を半導体スイッチングデバイスから供給せず、トランスの外脚に施した巻線に接続したコンデンサから供給するもので、その基本動作はシミュレーションにより確認できたが、実験ではコンバータの効率改善に至らなかった。

(4)DC-DCコンバータの一種であるフライバックコンバータの動作原理とフェライトコアを用いてシート抵抗を測定する手法を考案し、実験によりその有用性を検証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

H. Saotome and H. Ohta: Independence of the Dynamic Magnetic Loss from Temperature, 査読有, J. Magn. Soc. Jpn., Vol.39, No.2, pp.62-64(2015)

Hideo Saotome and Hiroaki Kaneko: Prototype Instrument for Sheet Resistance Measurement by Pulse Voltage Excitation, 査読有, Proceedings of the 2013 Seventh International Conference on Sensing Technology, pp.573-576(2013)

早乙女英夫, 大井翔太, 金子弘明: パルス電圧励磁による非接触型シート抵抗測定器の開発, 電気学会論文誌E, 査読有, Vol.133, No. 2, pp.52-53(2013)

〔学会発表〕(計9件)

早乙女英夫, 磁気デバイスに視点を置いたDC-DCコンバータの損失解析, 電気学会マグネティックス研究会資料MAG-15-014, 2015年3月10日, 金沢大学(石川県金沢市)

太田浩樹, 早乙女英夫, フェライトの動的磁気損失の温度依存性の有無の検討, 電気学会マグネティックス研究会資料MAG-14-165, 2014年10月24日, 文部科学省共済組合箱根宿泊所・四季の湯強羅静雲荘(神奈川県箱根町)

菅原幸平, 白澤昌寛, 早乙女英夫, 双方向ZVS DC-DCコンバータの負荷・周波数特性, 電気学会マグネティックス研究会資料MAG-14-165, 2014年10月23日, 文部科学省共済組合箱根宿泊所・四季の湯強羅静雲荘(神奈川県箱根町)

原田拓明, 早乙女英夫, ワイヤレス電力伝送用トランスへの励磁電流供給方法の一例, 電気学会マグネティックス研究会資料MAG-14-165, 2014年10月23日, 文部科学省共済組合箱根宿泊所・四季の湯強羅静雲荘(神奈川県箱根町)

清水雅斗, 早乙女英夫, DC-DCコンバータに用いられるトランスの鉄損とFETのターンオフ損失, 電気学会マグネティックス研究会資料MAG-13-085, 2013年10月24日, 金沢大学(石川県金沢市)

白澤昌寛, 早乙女英夫, LLCコンバータの効率向上に関する考察, 電気学会マグネティックス研究会資料MAG-13-086, 2013年10月24日, 金沢大学(石川県金沢市)

宮島晶生, 早乙女英夫, LLCコンバータを適用した非接触給電の高効率化, 電気

学会マグネティックス研究会資料
MAG-13-087, 2013年10月24日, 金沢大学
(石川県金沢市)

近藤和樹, 早乙女英夫, 電流共振型コン
バータを適用したワイヤレス給電システ
ムにおける効率の周波数特性, 電気学会
マグネティックス研究会資料MAG-12-102,
2012年10月29日, みやづ歴史の館(京
都府宮津市)

三浦智也, 早乙女英夫, 動的磁気損失パ
ラメータ f の B および dB/dt 依存性,
電気学会マグネティックス研究会資料
MAG-12-106, 2012年10月29日, みやづ
歴史の館(京都府宮津市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早乙女 英夫 (SAOTOME, Hideo)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50261938

(2) 研究分担者

なし ()

(3) 連携研究者

なし ()