

平成 30 年 4 月 16 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05933

研究課題名(和文) 共振型DC-DCコンバータの更なる効率改善を実現する磁気デバイスの開発

研究課題名(英文) DEVELOPMENT OF MAGNETIC DEVICES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF LLC TYPE DC-DC CONVERTERS

研究代表者

早乙女 英夫 (SAOTOME, Hideo)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50261938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：共振型DC-DCコンバータに適用されるフェライトの鉄損について、ヒステリシス損失に加えて研究代表者らが定義した動的磁気損失を考慮し、両損失の特性について実験的な解析を行った。その結果、両者の温度特性に差異があることが発見され、両者の損失発生メカニズムに本質的な相違があることが示唆された。一方、この発見により、両損失のどちらが支配的かを把握した上でコンバータの仕様策定および回路設計が重要となることが導かれた。

共振型DC-DCコンバータの実機を製作し、シミュレーションのみならず実験にてコンバータの損失解析を行い、磁気デバイスの鉄損がコンバータ全損失の約2/3程度にまで達することが分かった。

研究成果の概要(英文)：The iron loss of ferrite is composed of the hysteresis and dynamic magnetic losses. In this study, it was found that the temperature characteristics of the two losses were different. This fact suggests that their generation mechanisms are different and the specifications of DC-DC converters should be determined in consideration of the operational core temperature because the total amount loss depends on the temperature.

An LLC type DC-DC converter was manufactured and the experiments with it showed the ratio of the iron loss of the transformer was approximately 2/3 to the total amount loss of the converter.

研究分野：磁気応用工学

キーワード：DC-DCコンバータ 磁気デバイス

1. 研究開始当初の背景

概ね 18 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に対して桁違いに小さいため、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 年ころより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。

一方、共振型 DC-DC コンバータの一方式に LLC 共振回路というテクニクスで開発された回路がある。これは、DC-DC コンバータで発生するスイッチングノイズの抑制を狙ったもので、インダクタとコンデンサで共振現象を発生させてスイッチング素子の零電圧スイッチング (ZVS) を実現しており、その結果としてスイッチング損失も低減している。この共振に使用するインダクタは、トランスの漏れインダクタンスを利用し、磁気デバイスのインテグレーション化を実現している。しかしながら、この漏れトランスは、コアにエアギャップを施しているため、励磁電流が大きくなる欠点がある。励磁電流はスイッチング素子から供給されるので、スイッチング素子のオン抵抗によるジュール損失が発生し、特に軽負荷での共振型 DC-DC コンバータの効率を低下させる原因の 1 つとなっている。本研究代表者は、回路学的視点及び磁気デバイスの磁束分布を考慮した視点に立ち、この問題の解決法を考案して特許出願した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、次の 3 つの課題に取り組み、共振型 DC-DC コンバータの更なる効率改善を実現する磁気デバイスを開発し、得られた成果を論文化することにある。

- (1) フェライトの高周波損失の高精度モデル化を行い、磁気デバイスの低損失化を実現する。
- (2) 励磁電流を低減させたエアギャップ付きトランス (磁気デバイス) を開発する。
- (3) ワイヤレス (非接触) 給電、或いは双方向電力伝送を可能とする共振型 DC-DC コンバータへ上記(1)および(2)で確立させた技術を適用し、高効率電力変換システムを構築する。

3. 研究の方法

(1) フェライトの高周波損失の高精度モデル化を行い、磁気デバイスの低損失化を実現する。

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 電圧発生装置を開発する。フェライトコアに方形波電圧および正弦波電圧、あるいは直流バイアス下でこれらの交流電圧を印加し、それらの磁化特性を測定する。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。特に、「動的磁気損失」の温度依存性の有無について実験的に検証する。測定データから動的磁気損失パラメータ λf を磁束密度 B およびその時間微分 dB/dt の関数として求め、磁気デバイスの高精度回路シミュレーションモデルを完成させる。このモデルを用いて最大磁束密度および dB/dt の動作点と動的磁気損失との関係を明らかにし、フェライトの高周波損失が最小となる動作点を見出す。

(2) 励磁電流を低減させたエアギャップ付きトランス (磁気デバイス) を開発する。

共振型 DC-DC コンバータに適用されるトランスはエアギャップを有するため、励磁インダクタンスが小さく、すなわち励磁電流が比較的大きく、その励磁電流をスイッチング素子から供給するため、コンバータ効率が低下するという欠点がある。この対策として、本研究代表者は、磁気デバイスの外脚の磁束成分に着目し、この外脚に励磁磁束供給用巻線を施してこの巻線にコンデンサを接続することで、スイッチング素子が供給する磁気デバイスの励磁電流を低減させる斬新的な方法を考案した。この方法より、スイッチング素子のオン抵抗によるジュール損失が低減できる。

本研究では、この考案手法のシミュレーションおよび実験による検証を行う。磁気デバイスに施す巻線の巻数およびコンデンサの静電容量値などについて検討し、共振型 DC-DC コンバータの仕様とこれらの回路定数との関係を明確化する。

(3) ワイヤレス (非接触) 給電、或いは双方向電力伝送を可能とする共振型 DC-DC コンバータへ上記(1)および(2)で確立させた技術を適用し、高効率電力変換システムを構築する。

電磁誘導を利用したワイヤレス給電に適用されるトランスは、通常のアエアギャップ付きトランスに比較して桁違いに大きなエアギャップを有しているため結合係数が極めて小さく、その結果として励磁電流が極めて大きくなり、電力供給側電源は非常に大きな（無効）電流をシステムに供給しなければならない。そこで、電源電流を低減させる磁気デバイスを開発し、シミュレーションおよび実験によってその機能の検討を行う。その検討結果から、共振型 DC-DC コンバータを適用したワイヤレス給電のシステム設計法を構築する。

また、双方向電力伝送を行う共振型 DC-DC コンバータにおいては、スイッチング素子を通る電流がコンデンサ短絡にならないように磁気デバイスの励磁電流を供給するコンデンサを配置する必要があるが、双方向電力伝送を行う場合には、その回路の対称性からそのようなコンデンサ配置が困難である。文献[7]による方法は、この問題の解決法を与えるものであり、シミュレーションおよび実験によってその有効性の検証を行う。実験に必要な双方向電力伝送を行う共振型 DC-DC コンバータを設計・試作し、この初めての試みに対する試験評価を行う。

電磁誘導を利用したワイヤレス給電用および双方向電力伝送可能な共振型 DC-DC コンバータに適用される磁気デバイスに対する共通課題およびその解決法を明確化し、それらを磁気デバイスの設計法としてまとめ、また、研究過程で新しく得られた知見などを、産業界に受け入れられやすいよう、実践的、論理的かつ汎用的に、適宜、国内外の学会に論文として公表していく。

4. 研究成果

ケイ素鋼板でも同様であるが、フェライトの B-H ループは、励磁周波数がある値以下で一定となり、このループを直流ヒステリシスループ、もしくは単にヒステリシスループと呼び、その面積がヒステリシス損失である。図 1 に点線で示したループをヒステリシスループとすると、最大磁束密度 B_m 一定条件下で励磁周波数を上げると B-H ループは幅を広げる。図 1 にグレーで示した部分は、高周波励磁による磁気損失増加部で、残留損失と言われていたが、これは磁気損失であることが同材質・異寸法のフェライトコアの損失解析から明らかとなっており、この損失はフェライト結晶粒内の渦電流損失では説明できないことも分かっている。これらのことから、図 1 にグレーで示した部分は、フェライトコア内の電界に起因するジュール損失ではなく、コア内の磁界に起因する磁気損失であり、動的磁気損失とも呼ばれている。本研究では、まず、この動的磁気損失の定量的把握および DC-DC コンバータに磁気デバイスとして適用する場合の等価回路としての扱いについて明確化した。

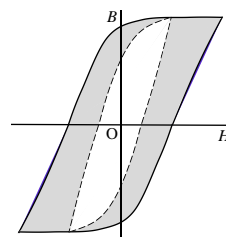


図 1

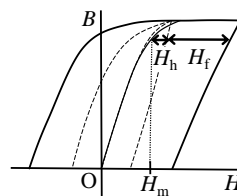


図 2

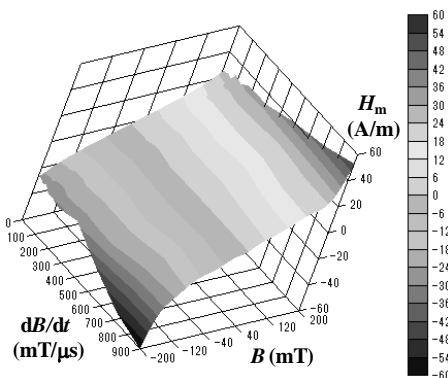


図 3

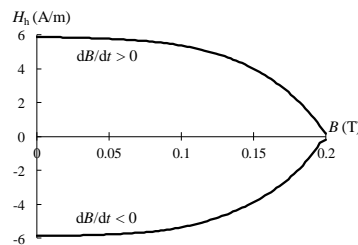


図 4

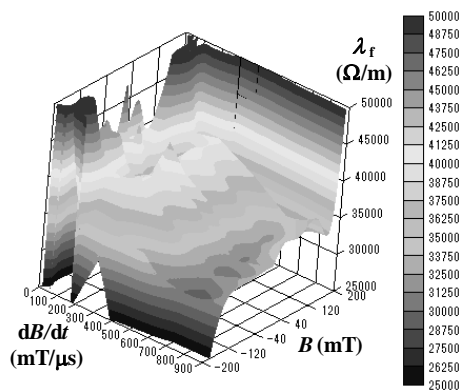


図 5

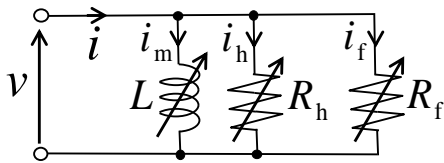


図 6

B-H ループの横軸にあたる磁界を図 2 に示す H_m , H_h および H_f の 3 つの成分に分解して解析する手法を提案し、その解析手法から導出される磁気デバイス等価回路モデルの有効性および有用性を明らかにした。 H_m は磁束密度とその時間微分の間数として図 3 のように示される。 H_h は磁束密度のみ関数として図 4 のように示される。 H_f は磁束密度とその時間微分の間数として図 5 のように示される。また、これらは、励磁最大磁束密度 B_m およびフェライトの温度の間数でもあることが明らかになった。これらの情報を用いると、図 6 に示すようなフェライトコアインダクタの等価回路を導出することができた。

双方向 DC-DC コンバータにおいては、図 7 ~ 10 に示す回路トポロジーに対し、シミュレーションおよび実験による動作確認および損失解析等を行った。特に、図 1 の回路に対しては、トランスの磁気飽和に至らない電圧時間積の範囲での回路設計アルゴリズムの指針を得ることができた。

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 3 件)

① Hideo Saotome, Keisuke Azuma, Hiroki Kizuka, and Takuma Tanaka: Properties of dynamic magnetic loss of ferrite, AIP ADVANCES 8, 査読有, 056103 (2018), <http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5003858>

② H. Saotome, K. Azuma and Y. Hamamoto: Temperature Characteristics of the Dynamic Magnetic Loss of Ferrite, J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, Vol.41, No.3, pp. 63-65 (2017)

③ H. Saotome: Negative Hypothesis of Equivalence between Dynamic Magnetic Loss and Eddy Current Loss in Ferrite Grains, J. Magn. Soc. Jpn., 査読有, Vol.40, No.2, pp. 19-21 (2016)

[学会発表] (計 9 件)

① 五来一樹, 木塚大貴, 田中たく磨, 早乙女英夫, 高電圧比双方向 DC-DC コンバータ開発に関する課題の検討, 電気学会マグネティ

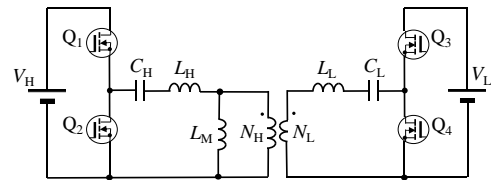


図 7

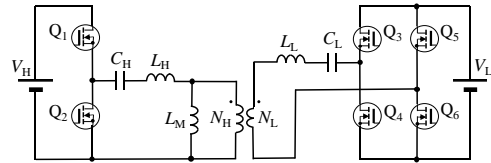


図 8

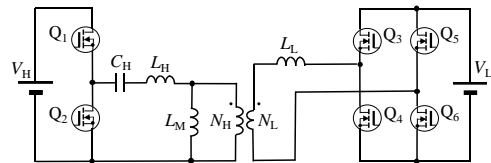


図 9

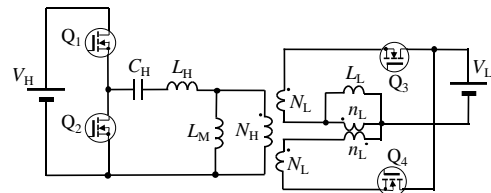


図 10

ックス研究会資料 MAG-18-022, 2018 年 3 月 9 日

② 鷲巣樹, 東啓輔, 早乙女英夫, B_m 依存性を考慮したフェライトの非線形磁化特性のモデリング, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-18-021, 2018 年 3 月 8 日

③ Hideo Saotome, Yuki Hamamoto and Keisuke Azuma: Circuit Simulation Model for Ferrite Core Inductor Taking into Account Dynamic Magnetic Loss, Proc. of Power Electronics and Drive Systems (PEDS2017), ID: 70 (2017)

④ 東啓輔, 木塚大貴, 田中たく磨, 早乙女英夫, フェライトの動的磁気損失の温度特性とフェライトインダクタの等価回路, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-17-128, 2017 年 10 月 18 日

⑤ 木塚大貴, 田淵正信, 田中たく磨, 早乙女英夫, 双方向 LLC 共振形 DC-DC コンバータの伝送電力拡大のための回路定数検討, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-17-020, 2017 年 2 月 24 日

⑥ 田中たく磨, 木塚大貴, 田淵正信, 早乙女英夫, 双方向 LLC 共振形 DC-DC コンバータの

伝送電力拡大のための動作モードの検討, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-17-021, 2017年2月24日

⑦東啓輔, 濱元勇樹, 早乙女英夫, 動的磁気損失パラメータの測定改善と温度特性, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-16-227, 2016年12月8日

⑧濱元勇樹, 太田浩樹, 早乙女英夫, 動的磁気損失の温度特性, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-15-165, 2015年11月26日

⑨田渕正信, 菅原幸平, 早乙女英夫, 電流共振型双方向 DC-DC コンバータ, 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG-15-127, 2015年11月6日

〔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・大学院工学研究院・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 ()

(4) 研究協力者

五来 一樹 (GORAI Kazuki)
鷺巣 樹 (WASHIZU Tatsuki)
東 啓輔 (AZUMA Keisuke)
木塚 大貴 (KIDUKA Hiroki)
田中 琢磨 (TANAKA Takuma)
田渕 正信 (TABUCHI Masanobu)
濱元 勇樹 (HAMAMOTO Yuki)
太田 浩樹 (OHTA Hiroki)
菅原 幸平 (SUGAWARA Kouhei)