

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20435

研究課題名（和文）数10-100MHzスイッチング電源開発に向けた磁気素子の高速解析法・設計手法の開発

研究課題名（英文）Development of Fast Analysis and Design of Magnetic Components for Switching Converter Driving at Several 10MHz to 100MHz

研究代表者

佐藤 佑樹 (Sato, Yuki)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：00966004

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、100MHzスイッチング電源開発に向けた磁気素子のモデリング手法の検討を行った。磁気素子は、巻線と磁気材料から構成されているが、本研究では巻線の高周波損失の高精度推定法と磁気材料の高周波損失の測定法に関して、成果を挙げどちらも論文として掲載された。巻線の高周波損失の推定法に関しては、均質化法と回路解析を組み合わせることにより、高速かつ高精度な解析を実現した。一方で、高周波磁気損失においては共振法をベースとした測定法と補正法に関して提案を行い、60MHz近い高周波損失の測定を行うことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、100MHzのスイッチング電源開発を目的に研究を行ったが、現状大きく分けて2つの問題があった。一つは、巻線の表皮効果や近接効果、寄生キャパシタンスを同時に考慮しながら高速かつ高精度に解析可能な手法が存在しないことであり、2つ目は10MHz以上の磁気材料の損失の高精度な測定手法が確立されていないことである。本研究では、その2つに取り組み、どちらも成果を上げた。現在においても、今後においてもスイッチング電源の高周波化は必要不可欠であり、本研究で開発した手法は必要となると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, modeling techniques for magnetic components were investigated for the purpose of developing a 100 MHz switching power supply. Magnetic components consist of windings and magnetic materials. In this study, significant results were achieved in both the precise estimation of high-frequency loss in windings and the measurement of high-frequency loss in magnetic materials, both of which were published as papers. For the estimation of high-frequency loss in windings, a fast and accurate analysis was achieved by combining the homogenization method and circuit analysis. On the other hand, for high-frequency magnetic losses, we proposed a measurement method based on resonance and compensation techniques, which enabled us to measure high-frequency losses close to 60 MHz.

研究分野：電気工学

キーワード：マグネティックス パワーエレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

磁性素子は、スイッチング電源回路のパワーエレクトロニクス回路で使用されており、重要な役割を果たしている。一方で、磁性素子は、半導体やキャパシタ等のほかの要素と比較して非常に大きく、またその損失も電源回路中の全損失の 50%近いこともあり、磁性素子の損失推定や最適設計は、電源回路の設計において非常に重要である。

近年のシリコン半導体の集積技術の進歩やワイドギャップ半導体の一つである GaN 半導体デバイスの登場により、数 10MHz-100MHz 帯域における高速スイッチング電源回路の開発が進んでいる。一般的に、電源回路の高速スイッチング化は、電源回路全体の高電力密度化や小型化のメリットが得られ、産業的に非常に重要な技術である。これに伴い磁性素子も高周波で駆動されるため、磁性素子の小型化も期待されている。しかし、現状、数 10MHz-100MHz 帯では磁性材料を使用しない空芯コイルが使用されることが多い。空芯コイルを使用する場合、必要なインダクタンスを確保するためにコイル自体が著しく大きくなるため、大幅な小型化の恩恵を受けることができていない。

そのため、スイッチング電源の更なる小型化、高性能化を実現するためには、数 10MHz-100MHz 帯域においても磁性材料の使用は重要である。一方、数 10MHz 以上で使用可能な磁性材料は開発されているが、10MHz を超える帯域における磁性材料の損失構造は明らかになっていないことが多い。また、10MHz を超えると有効な損失測定手法が確立されておらず、10MHz 以上の磁性材料の損失データはほぼ存在しない。さらに、数 10MHz-100MHz においては、巻線コイルの表皮・近接効果に由来する抵抗損失や巻線コイル間の寄生キャパシタンスに由来する誘電損失も考慮すべきである。しかし、インダクタ (数 cm) と巻線 1 本のサイズ (数十 μ m) のように大きくスケールが異なり、通常の有限要素解析では要素数が膨大となり、求解は容易ではない。

2. 研究の目的

これらの背景より、本研究の目的は、「数 10MHz から 100MHz の高速スイッチング電源開発に向けた高周波用磁性素子の新規解析手法と設計手法を開発」である。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、以下の 2 つに分け検討を行った。

- (1) 巻線由来の高周波損失の高速かつ高精度推定法の開発
- (2) 10MHz 以上における磁気損失測定法の確立

(1) 巻線由来の高周波損失の高速かつ高精度推定法の開発

巻線の由来の高周波損失は、表皮・近接効果に由来する銅損と寄生キャパシタンスに起因する誘導損失に分けられる。これらの損失は従来の有限要素解析を行うことで原理的に解析は可能である。しかし、実際のインダクタのスケールに対して、巻線コイルは数千分の 1 である。さらに表皮・近接効果や巻線間のギャップを精度良くモデル化した場合、その計算時間や計算メモリは膨大なものになってしまう。スーパーコンピュータのような機器を使用することで、計算は可能と考えられるが、磁性素子の最適設計において、形状を繰り返し変更しながら計算を行う場合は、このような方法は現実的でない。

これらの理由より、現実時間で実現可能な手法の提案を行う。まず、表皮・近接効果に由来する損失は申請者らが提案している均質化法を用いた有限要素解析[1]により高速かつ高精度に推定を行う。一方で、本均質化法では寄生キャパシタンスは考慮できないため、本均質化法の拡張を行う。Fig. 1 に示すように各巻線間に発生する寄生キャパシタンスから合成キャパシタンス C_{tot} を推定し、その値を均質化法と組み合わせることで寄生キャパシタンスを考慮した高速解析法の提案を行なった。

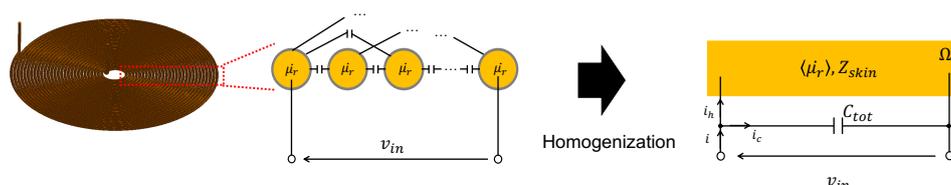


Fig. 1 Homogenization method considering parasitic capacitance.

(2) 10MHz 以上における磁気損失測定法の確立

従来、磁気損失の測定には 2 コイル法と呼ばれる手法が使用されている。その一方で、2 コイル法は 1MHz 以上の高周波領域では、損失測定精度が著しく低下することが知られている。その

ため、数 MHz 以上で有効な損失データというのは極めて少ないのが現状であった。そこで、本研究では、この損失精度の向上を目的として提案された共振法と呼ばれる方法を用いることで、10MHz 以上における高周波での測定を試みた。また、高周波で動作する磁気材料は比透磁率が数十程度である。そのため、磁気コアに巻かれているコイルの結合が損失精度へ影響を与えることが本研究で明らかになった。そこで、本研究では、10MHz 以上における高周波で安定的に高精度に測定可能とする手法の提案を行った。

4. 研究成果

(1) 巻線由来の高周波損失の高速かつ高精度推定法の開発

図 1 に示す平面コイルに対して、巻き数を 5, 10, 20 ターンと設定し、拡張均質化法を適用した。その結果が Fig.2 に示す。Fig.2 中の実線は従来の有限要素解析、点線が提案法による解析結果である。これより、低周波から高周波のような広い周波数帯において、周波数特性が一致していることが確認できる。寄生キャパシタンスに起因する共振の特性も表現できていることも確認できており、本手法により周波数特性が解析可能であることが確認できた。また、計算時間に関してもトータル 5 分程度で点線の周波数特性を得ることができている。一方で、従来の有限要素解析を使用した場合、周波数 1 点の解析においても 5 分以上は要してしまう。これより、本手法を用いることにより、高周波特性を高速かつ高精度に表現できる解析法を確立できた。

(2) 10MHz 以上における磁気損失測定法の確立

本研究では、比透磁率が約 30 のセンダスト材を使用した。トロイダルコアの外径、内径、厚みはそれぞれ 13, 8, 1mm とした。また、結合が異なるコアにおいて精度検証を行うため、Table I に示す巻数(結合係数)が異なる 4 つのコアを用意した。ここで、“# of parallels”はコイルを並列に巻いた数である。そのため、Core A の場合、18turns を 2 並列として巻線を構成している。Table I の 4 つのコアを用いて鉄損測定を行い、測定結果に関して議論を行なった。

Fig. 3 に鉄損測定結果を示す。図 1 中の点線が共振法により得られた測定結果である。結合係数が 100%から離れていくにつれて、損失が低く測定されていることが確認できる。これは、低結合に起因して磁束がコアから多く漏れてしまっており、磁束密度が正しく測定できていないことが挙げられる。そこで、磁束密度の補正式を提案する。

$$B_{cor} = \frac{\mu_{mes}}{\mu_{eff}} B_{mes} \quad (1)$$

ここで、 μ_{mes} , B_{mes} , μ_{eff} は、共振法中に測定された透磁率と磁束密度、ベクトルネットワークアナライザにより測定された透磁率である。(1)式により補正された測定結果を図 1 の実線に示す。結合係数が異なっても、各測定結果が一つの線上に載っている事が確認できる。本研究により、60MHz 近くまで磁気損失を測定することが可能となり、スイッチング電源の高周波化による損失推定に寄与できると考えられる。

参考文献：

- [1] Y. Sato et. al., doi: 10.1109/TMAG.2017.2671449.
- [2] Y. Sato et. al., doi: 10.1109/TMAG.2023.3312070.
- [3] Y. Sato et. al., doi: 10.1109/TMAG.2023.3283955

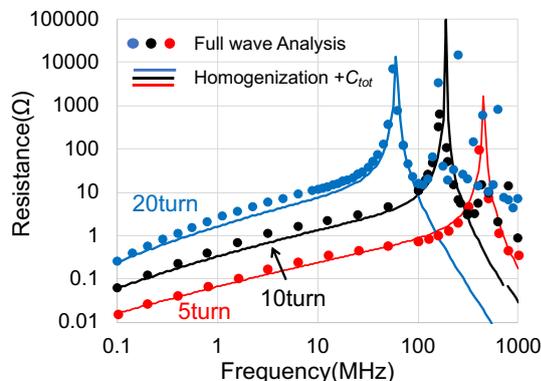


Fig. 2 Analysis results of plane coil by proposed method (Dots : full wave analysis, Lines: Homogenization + C_{tot})[2]

Table I Specification of prepared toroidal cores

	Core A	Core B	Core C	Core D
$N_1:N_2$	1:1	1:1	1:1	1:1
# of turns	18turns	8turns	5turns	3turns
# of parallels	2	4	6	1
Coupling at 10MHz	98%	95%	87.5%	78%

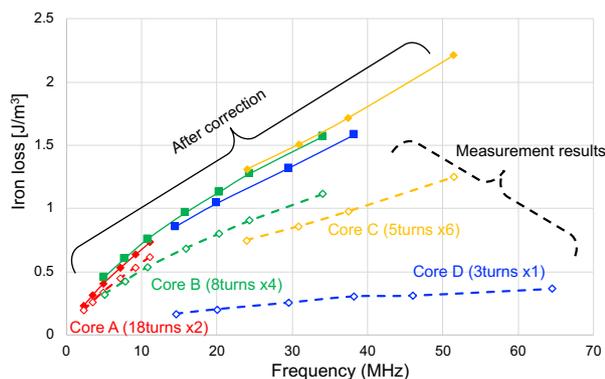


Fig. 3 Measured and corrected curves of iron losses with core A to D. [3]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sato Yuki、Hiruma Shingo、Igarashi Hajime、Matsumoto Hirokazu	4. 巻 59
2. 論文標題 Time-Domain Homogenized Finite Eddy Current Analysis Using Recursive Convolution Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2023.3245056	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sato Yuki、Ishii Daisuke、Matsumoto Hirokazu、Igarashi Hajime	4. 巻 60
2. 論文標題 Homogenized Finite Element Analysis for Multi-Turn Coils Considering Parasitic Capacitances	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2023.3312070	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sato Yuki、Uehara Yuji、Okamoto Satoshi、Yoshida Shigeyoshi、Endo Yasushi、Ono Nobuhisa、Misono Nobuto、Matsumoto Hirokazu	4. 巻 59
2. 論文標題 Accuracy Investigation of High-Frequency Core-Loss Measurement for Low-Permeability Magnetic Materials	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2023.3283955	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 佐藤 佑樹、上原裕二、岡本聡、吉田栄吉、遠藤恭
2. 発表標題 高周波パワエレ回路用低透磁率材料の鉄損測定の精度検証
3. 学会等名 日本金属学会 第174回講演大会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤佑樹
2. 発表標題 共振現象の等価回路によるモデリング
3. 学会等名 令和6年電気学会全国大会（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤佑樹、松本洋和、貝森弘行
2. 発表標題 等価回路による高周波磁気部品の共振現象解析
3. 学会等名 電気学会静止器回転機合同研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuki Sato, Yuji Uehara, Satoshi Okamoto, Shigeyoshi Yoshida, Yasushi Endo, Nobuhisa Ono, Nobuto Misono, Hirokazu Matsumoto
2. 発表標題 Accuracy Investigation of High-Frequency Core Loss Measurement for Low-Permeability Magnetic Materials
3. 学会等名 Intermag2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Sato, Daisuke Ishii, Hirokazu Matsumoto, Hajime Igarashi
2. 発表標題 Homogenized Finite Element Analysis for Multi-Turn Coils Considering Parasitic Capacitances
3. 学会等名 Compumag2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Sato, Kenji Kawano, Hajime Igarashi, Hirokazu Matsumoto
2. 発表標題 Extended Cauer Circuit Model of Inductors: Representing Multi-Resonant Characteristics Due to Parasitic Capacitance
3. 学会等名 Applied Power Electronics Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sato Yuki, Hiruma Shingo, Igarashi Hajime, Matsumoto Hirokazu
2. 発表標題 Time-Domain Homogenized Finite Eddy Current Analysis Using Recursive Convolution Method
3. 学会等名 Computational Electromagnetic Field Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤佑樹、松本洋和、五十嵐一
2. 発表標題 巻線の寄生キャパシタンスを考慮した均質化有限要素解析の検討
3. 学会等名 電気学会静止器回転機合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤佑樹、松本洋和、五十嵐一、河野健二
2. 発表標題 複数共振ピークを考慮した磁性素子の拡張Cauer型回路の検討
3. 学会等名 電気学会静止器回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------