

# 永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタ

会津翔太, 中村健二, \*大日向 敬, \*有松健司  
(東北大学, \*東北電力)

Orthogonal-Core-type Variable Inductor with Permanent Magnets

S. Aizu, K. Nakamura, \*T. Ohinata, and \*K. Arimatsu  
(Tohoku University, \*Tohoku Electric Power Co., Inc.)

## はじめに

可変インダクタは、電力用コンデンサと組み合わせることで、無効電力補償型の電圧調整装置として応用できる。先に筆者らは、カットコアと積層コアの2種類のコアからなる、新しい直交磁心型可変インダクタを提案した<sup>1)</sup>。本可変インダクタは両コアの接合面で積層が平行に揃うため、層間短絡が生じない。

本稿では、上述の可変インダクタの直流制御磁束の磁路に永久磁石を挿入することで、無制御時にもある一定の大きさの無効電力の供給を可能にするとともに、制御電流を正負に変化させることで、無効電力を線形かつ連続的に制御可能な新しい可変インダクタについて、リラクタンسネットワーク解析(RNA)を用いて検討したので報告する。

## 永久磁石を有する直交磁心型可変インダクタの特性

Fig. 1 に、考察に用いた直交磁心型可変インダクタの諸元を示す。カットコア側に直流制御巻線を配置し、積層コア側に交流主巻線を配置する。

Fig. 2 に、永久磁石を挿入した直交磁心型可変インダクタを示す。カットコア側から生じる直流制御磁束の磁路に対して直列に永久磁石を挿入することで、制御電流がゼロの状態でも、ある一定の大きさの無効電力を発生させることができる。また、直流制御電流の大きさと向きを制御することで、無効電力を増減させることができる。

本稿では、同図(a)~(c)に示すように、3種類の磁石配置について、RNAを用いて無効電力制御特性を算定した。なお、磁石材料はフェライト磁石である。

Fig. 3 に、各磁石配置に対する無効電力制御特性の算定結果を示す。また、磁石の無い従来の可変インダクタの特性も同図中に示す。なお、磁石厚は各配置毎に調整して最適化している。この図を見ると、いずれの配置においても、制御電流が0 Aの点で一定の大きさの無効電力を発生できていることがわかる。また、制御電流を正負に変化させることで、線

形かつ連続的に無効電力を制御できていることが了解される。

## 参考文献

- 1) 佐藤, 中村, 大日向, 有松, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 6, No. 1, pp. 53-57 (2022)

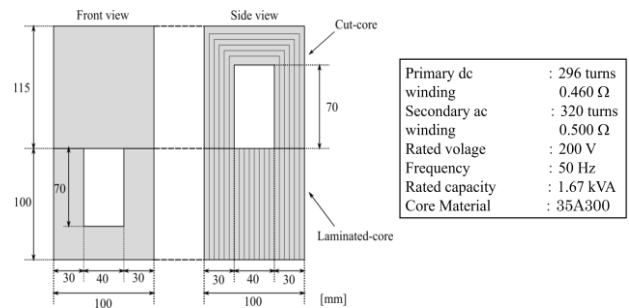


Fig. 1 Specifications of an orthogonal-core-type variable inductor consisting of cut core and laminated core.

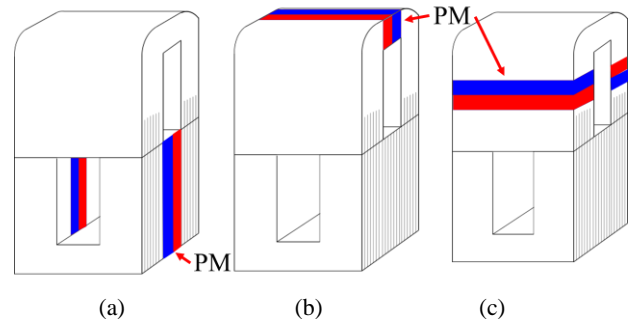


Fig. 2 Three variable inductor models with different magnet arrangements.

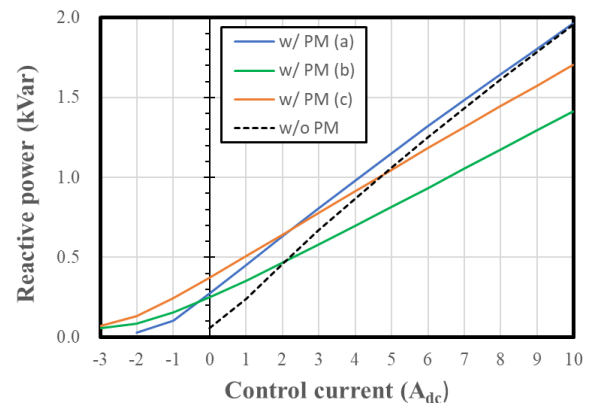


Fig. 3 Comparison of calculated reactive power characteristics of the variable inductors with different magnet arrangements.

# 倍電流整流回路用結合インダクタの作製

川田奈波, \*大山秀樹, 南澤俊孝, 曾根原誠, 佐藤敏郎  
(信州大学, \*味の素ファインテクノ)

Development of Coupled Inductor for Current-Doubler rectification circuit  
Nanami Kawada, \*Hideki Oyama, Toshitaka Minamisawa, Makoto Sonehara, Toshiro Sato  
(Shinshu Univ, \*Ajinomoto Fine-Techno Co.)

## 1.はじめに

近年, 電子機器の小型化および省電力化に対する要求はますます大きくなっている. それに伴い, 専有面積の大きいインダクタ等の受動素子の小型化および高効率化が期待されている. 筆者らのグループは, これまで, MHz 帯での使用に適した複合磁性材料を用いて, Beyond MHz スイッチング電源用インダクタの開発を試みてきた<sup>[1]</sup>. 今回, MHz 帯スイッチング LLC 共振型コンバータの低電圧・大電流出力化に有利な倍電流整流回路の結合インダクタについて, 三種類の磁性材料を組み合わせることで試作を行ったので報告する.

## 2.実験方法

共振周波数 15 MHz の LLC 共振型 DC-DC コンバータに使用する倍電流整流回路用の結合インダクタを試作した. Fig.1 に作製した結合インダクタの構造を示す. インダクタの導体ラインは四層プリント基板を用いた. 一次側導体と二次側導体を交互に配置することで, 結合係数の向上を図った. 磁性材料には Fe 系ナノ結晶球形粉末/エポキシ樹脂コンポジット材料, Fe-Si 多結晶球形粉末/エポキシ樹脂コンポジットシート, および Ar 中熱処理扁平粉末/エポキシ樹脂コンポジットシート<sup>[2]</sup>を使用した. スラリ状のコンポジット磁心材料と 100°C以上の加熱で可塑性を有するコンポジットシート磁心で導体ライン周りに閉磁路を形成し, 高透磁率 Fe 系ナノ結晶扁平粉末シート磁心を最外層に配置することで導体ライン周辺の磁束密度の向上と外部への漏れ磁束の低減を図った. Fig. 1 で示したインダクタ構造を対象に三次元電磁界解析(HFSS Ver.19.2, ANSYS 社)で特性解析を行うとともに試作・評価した.

## 3.実験結果

Fig.2 に結合インダクタの和動動作時インダクタンスの解析結果と実測値を示す. なお, 実測値の No.1, No.2 は二個のインダクタのデータである. 30 MHz 付近までは解析値と実測値はほぼ一致するが, それ以上の高周波領域においては相違が現れた. 共振周波数は 150~200MHz であり, 実測値の方が鋭い共振を示していることから, 解析で使った磁性材料の損失の違いが影響している可能性がある. 結合係数  $k$  の実測値は約 0.99 であり, 倍電流整流回路用結合インダクタとして十分な結合度を確保した. 現在, 10MHz 帯スイッチング LLC 共振/倍電流整流コンバータへの適用を進めている.

## 参考文献

[1] S.Kimura, et al., *IEEE Shin-etsu Section Student Branch(SSB) Online Poster Session*, Dec.2021, [2] 梶原あさみ, 令和 2 年度電気学会全国大会, 2-101, 2020 年 3 月.

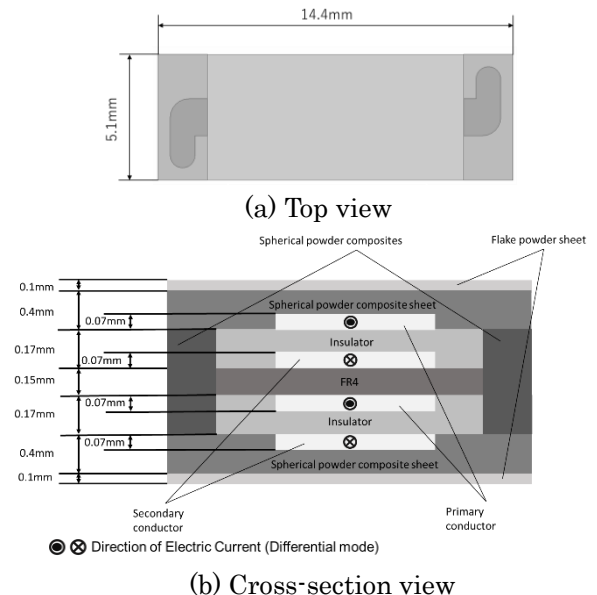


Fig.1 Structure of Coupled Inductor

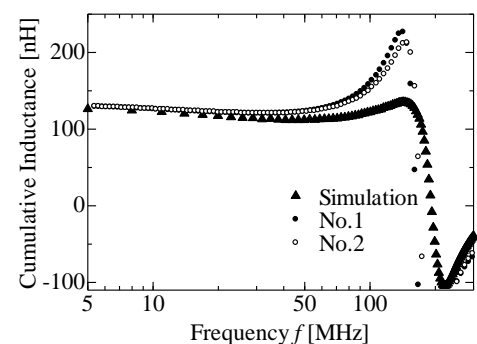


Fig.2 Cumulative Inductance vs. frequency

# Beyond 10MHz スイッチング DC-DC コンバータ用 プレーナパワーインダクタの開発

宮田涼平, 木村創一, 川田奈波, 南澤俊孝, 曾根原誠, 佐藤敏郎  
(信州大学)

Development of Planer Power Inductor for Beyond 10MHz Switching DC-DC Converter  
Ryohei Miyata, Soichi Kimura, Nanami Kawada, Toshitaka Minamisawa,  
Makoto Sonehara, Toshiro Sato  
(Shinshu University)

## 1. はじめに

USB PD 用 DC-DC コンバータ (24V 入力, 5~20V 出力) への適用を目的に, プレーナパワーインダクタを試作し, 10MHz 帯スイッチング二相 GaN-FET Buck コンバータに適用した. インダクタには鉄系メタルコンポジット磁心材料と PCB ベースのプレーナコイルを組み合わせた外鉄内部コイル型構造を採用した.

## 2. プレーナパワーインダクタの試作

Fig.1 に試作したプレーナパワーインダクタの外観と断面構造を示す. インダクタの導体ラインは銅導体厚  $35\mu\text{m}$  の四層プリント基板を用いた.  $2.6\mu\text{m}$  径 Fe-Si-B-C-Cr 系アモルファス球形合金粉末/エポキシ樹脂コンポジット (Fe-AMO) [1], ならびに低保磁力が期待できる  $3.5\mu\text{m}$  径 Fe-Si-B-Nb-Cu 系ナノ結晶球形合金粉末/エポキシ樹脂コンポジット (Fe-Nano) [2] を主磁束磁路に採用して Fig. 1 に示すような閉磁路構造を構成し, コンバータ回路基板実装面側の表面に磁気シールド用として高透磁率 Fe-Si- B-Nb-Cu 系ナノ結晶扁平粉末/シリコンコンポジットシートを配置した.

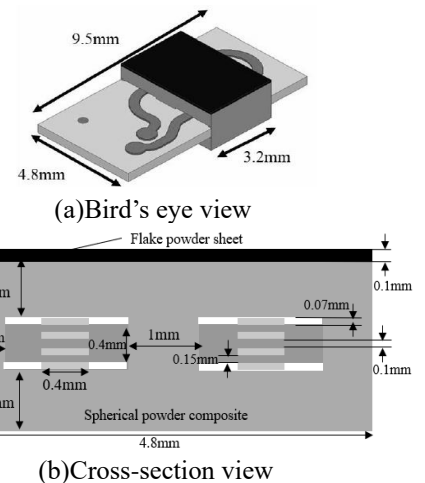


Fig.1 Structure of Planer Power Inductor

## 3. プレーナパワーインダクタの諸特性とコンバータの効率

Fig.2 に主磁束磁路に Fe-Nano コンポジットを使用して試作したインダクタのインダクタンスと Q 値の周波数特性を示す. 12MHz におけるインダクタンスは  $245\text{nH}$ , Q 値は 41 であり, インダクタンスが 10%低下する直流重畳電流は約 4.5A, コイル直流抵抗は  $45\text{m}\Omega$  であった. 主磁束磁路に Fe-AMO コンポジットを使用した場

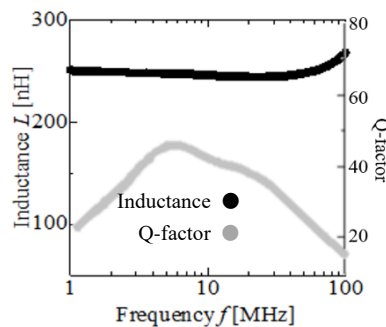


Fig.2 Inductance & Q-factor vs. frequency

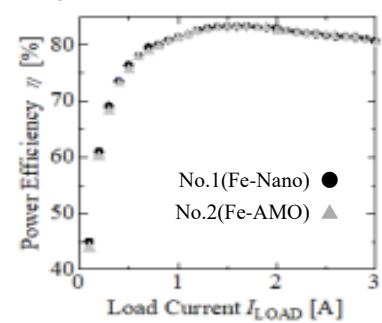


Fig.3 Power Conversion Efficiency.

12MHz におけるインダクタンスは  $229\text{nH}$ , Q 値は 48 となった. 4.5A まででは直流重畳特性はみられず, コイル直流抵抗は  $36\text{m}\Omega$  であった. Fig.3 に試作インダクタを実装した 24V 入力-5V 出力 12MHz スイッチング二相 Buck コンバータの電力変換効率の出力電流特性を示す. No.1 はインダクタの主磁束磁路に Fe-Nano コンポジット, No.2 は Fe-AMO コンポジットを使用した場合を示している. 最大効率はいずれも負荷電流 1.7A のときに 83.3%となる. それより軽負荷側ではインダクタンスの違いにより, Fe-Nano コンポジット磁心を採用した方が若干効率が高くなっている.

[1] Kanako Sugimura *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, 53, #2801406, 2017.

[2] 木村創一, 他, 第 45 回日本磁気学会学術講演概要集, 02pC-3, 2021.

# myRIO を用いたリングコア用磁気特性測定システムにおける 簡易波形制御手法に関する検討

川口正隆, 羽根吉紀, 中村健二  
(東北大学)

A Study on Simple Waveform Control Method  
in Magnetic-Properties Measurement System for Ring Core Using myRIO

M. Kawaguchi, Y. Hane, K. Nakamura  
(Tohoku University)

## はじめに

一般に電気機器の解析・設計においては、鉄心材料の磁気特性の実測データが用いられる。高精度な磁気特性の測定においては、フィードバック制御により磁束正弦波条件を満たすことが求められる。これに対して先行研究では、種々の波形制御手法が提案されてきたが、その多くは特別な機器の使用が必要であり、実装は必ずしも容易ではない。そこで本稿では、多くの高等教育機関で用いられている NI 社製 myRIO を磁束波形制御に用いた磁気特性測定システムを構築するとともに、これをリングコアの磁気特性測定に適用することにより、本システムの妥当性の検証を行ったので報告する。

## 提案する磁気特性測定システム

Fig. 1 に本稿で提案する磁気特性システムを示す。本システムでは、サーチコイル電圧  $v_s$  を制御量、出力電圧  $v_o$  を操作量とし、myRIO に搭載された FPGA をフィードバック制御に用いて、出力波形をリアルタイムで更新しながら磁束波形制御を行っている。

本稿では、提案システムを用いて、無方向性ケイ素鋼板 (35A300) のリングコアの測定を行うことで、その妥当性の検証を行った。Fig. 2 に、周波数 50 Hz, 最大磁束密度 1.8 T における励磁電圧  $v_e$ , サーチコイル電圧  $v_s$ , 励磁電流  $i$  の各波形を示す。このように、波形制御を行うことで、高磁束密度領域においてもサーチコイル電圧を正弦波に制御可能である。

次いで、上述のサーチコイル電圧波形の時間積分により求まる磁束波形について、Fig. 3 に示すように、制御時と非制御時の各最大磁束密度における歪み率を計算した。同図より、非制御時には高磁束密度において歪み率が著しく増加しているのに対して、制御時にはすべての最大磁束密度において歪み率を 1% 未満にまで抑えられていることがわかる。

今後は、より高い周波数帯や直流重畳時の磁気特性測定に提案手法を適用し、有用性について検証を行う予定である。

なお、本研究の一部は、JSPS 科研費 JP22K14232 およびパワースタディウム研究助成の交付を得て行った。

## 参考文献

- 1) 中瀬知哉, 他: 電学論 A, Vol. 199, No. 7, pp. 1019-1025 (1999).

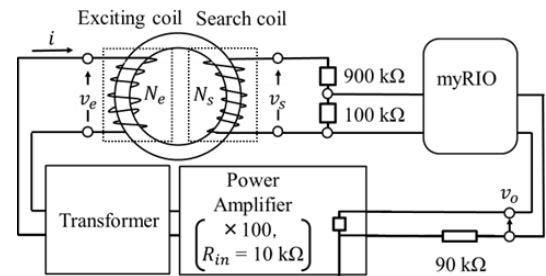


Fig. 1 Proposed magnetic-properties measurement system.

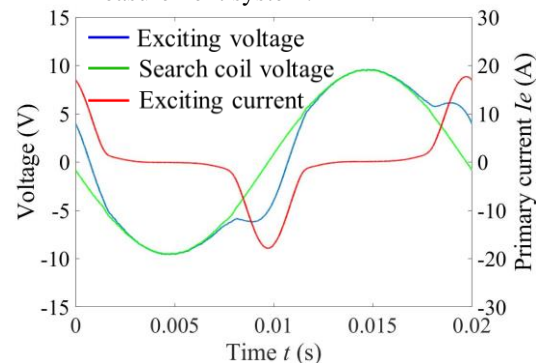


Fig. 2 Each waveform when controlled at  $B_m = 1.8$  T and  $f = 50$  Hz.

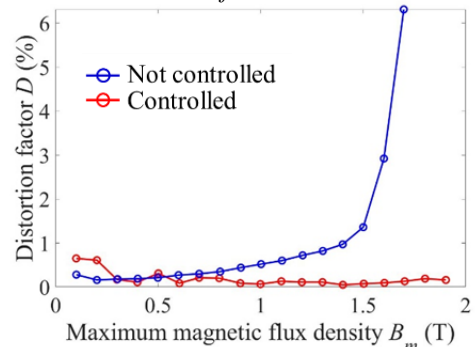


Fig. 3 The distortion factor of magnetic flux density characteristics according to maximum magnetic flux density.

# 単一アトマイズ粒子の測定のためのトランス結合型透磁率測定装置の感度向上

田丸 慎吾

(産総研 新原理コンピューティング研究センター)

Sensitivity enhancement of transformer coupled permeameter for characterizing a single atomized particle

Shingo Tamaru

(AIST, Research Center for Emerging Computing Technologies)

## はじめに

パワエレ回路は、脱炭素社会実現に向けた中核技術の一つとして、その重要性が益々高まっている。現在のパワエレ回路ではインダクタコアの損失が周波数に伴い急激に増加し、高周波限界を決めている。従ってコア用軟磁性材料の高周波における損失機構の解明及びその低減は喫緊の課題となっている。

重要なコア材の一つに、アトマイズ粉をプレス成型した圧粉磁心がある[1]。この材料は数 100 kHz 程度までは優れた特性を示すが、パワエレ回路の高周波化のためには、さらなる高性能化が必要である。これまで透磁率測定はコア最終形状においてのみ可能であったが、粉末状態、理想的には単一粒子の透磁率が測定できれば、高周波特性や損失機構の詳細が明らかになり、高性能な圧粉磁心材料の創成に繋がる事が期待される。我々は高周波透磁率を高感度で測定するトランス結合型透磁率測定装置(Transformer coupled permeameter, TC-Perm)を開発し、これを用いてノイズ抑制シートに含まれる扁平磁性粒子単体の透磁率測定に成功した[2]。本研究では、圧粉磁心用アトマイズ粉の単一粒子測定のために TC-Perm の改良を行った。

## 装置改良の概要

図1は、現在の TC-Perm 構成による、直径 50  $\mu\text{m}$  の  $\text{Fe}_2\text{B}$  アトマイズ粒子の透磁率測定結果である。1 MHz 程度までは概ね良好な感度が得られているが、それ以下では感度の低下により測定が困難となってしまう。現在の圧粉磁心の動作周波数は数 100 kHz 以下なため、これでは下限周波数がまだ高すぎる。TC-Perm においては磁束変化の検出に短絡終端された平面導波路(CPW)が用いられ、その出力インピーダンスは非常に低い一方、検出信号は入力インピーダンス 50  $\Omega$  の低雑音アンプ(LNA)に送られるため、非常に大きな不整合が生じている。これを解消するため、図2に示すように、CPW と LNA の間に巻線比 1:10 の昇圧トランスを挿入し、100 kHz における透過係数  $S_{21}$  及びそのばらつきを測定した。その結果を図3に示す。トランス挿入により  $S_{21}$  が約2倍に増加したが、標準偏差は全く変化しなかった。このトランスは本来 10 kHz 以下で動作し、またもっと高いインピーダンス間の整合を取るよう設計されているため、トランスを TC-Perm に最適化することにより、更なる感度向上が期待できる。発表では、TC-Perm に合わせたトランスの設計指針やその性能、またトランス導入後の TC-Perm による単一アトマイズ粉の測定結果を報告する。

(謝辞)  $\text{Fe}_2\text{B}$  粒子をご提供頂いた(株)トーキンの五十嵐利行様に感謝致します。本研究開発は、文部科学省 革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 JPJ009777 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 住友電工テクニカルレビュー、2016年1月号 No.188, 2) J. Magn. Magn. Mater. 501, 166434(2020).

