磁性体の増分透磁率測定手段とそれを利用した 直流重畳特性推定フローの構築

福田 雅也,山田 隆志

DC/DC コンバータなど大電流を扱う電源回路で利用されているフェライト等の磁性材料は、直流電流成分が増え るに従い発生する磁束の影響で直流重畳特性と呼ばれる急激なインダクタンスの低下現象が現れる。この現象は電 気エネルギーの変換効率に悪影響を及ぼすため、設計前に電流の限界値を見極める特性予測技術が求められてきた。

この現象を正確に表すことのできる数学モデルとして、プレイモデルが知られている¹⁾。しかし、モデルの入手性の悪さ、モデル作成のための実測の難しさ、大きい計算負荷が、現実に解析を実行しようとする際のネックとなっている。

今回、それに代わり増分透磁率と呼ぶマイナーループの傾きを利用する方法を検討した。この手法は重畳電流が 正弦波に制限されるが、計算負荷が軽い特徴を持っており、トロイダルコアを使った実測と解析の組み合わせを 使って材料定数を導くことで、プレイモデルの手法より迅速に精度よく評価できる。このメリットにより、実用化 の検討を実施した。

その結果、計算負荷は数十分程度と軽く、かつ推定誤差が5%以下と期待通りの結果を得る事ができ、実用化に向 けた目途を立てる事ができた。本論では具体的な事例を通じてその実用性について報告する。

Method for Measuring Incremental Magnetic Permeability of Magnetic Materials and Construction of a DC Superposition Estimation Flow by Using It

FUKUDA Masaya and YAMADA Takashi

Magnetic materials like ferrite, which is used in power supply circuits that handle high currents such as DC/DC converters, exhibit a rapid decrease in inductance due to the influence of the magnetic flux generated as the DC current component increases. This phenomenon is called DC superposition, and it adversely has a negative impact on the efficiency of electrical energy conversion, there has been a need for a property prediction technique to determine the current limit value prior to design.

The Play Model is well known as a mathematical model that can accurately represent this phenomenon¹⁾. However, the poor availability of the model, the difficulty of making actual measurements for the model, and the large computational load have become bottlenecks when trying to perform the analysis in reality.

In this study, we investigated an alternative method that uses the slope of the minor loop, called incremental permeability. Although this method limits the superimposed current to a sinusoidal wave, it has a feature of light computational load, and by deriving the material constants using a combination of actual measurement and analysis using a toroidal core, it can be evaluated more quickly and accurately than the play model method. Due to this advantage, a practical application study was conducted.

As a result, we were able to obtain the expected results with a light computational load of only a few tens of minutes and an estimation error of less than 5%, and we were able to make a prospect for practical application. In this paper, we report on the practicality of the method through a concrete example.

Contact : FUKUDA Masaya masaya.fukuda@omron.com

1. まえがき

近年、大電流化する電気エネルギーの効率的な運用のた め、パワーエレクトロニクス技術の進化は必須のものと なっており、電源の小型化、低損失化の要求はますます大 きくなっている。そのためにスイッチングの高周波化は必 然の流れであるが、電源の重要な構成要素である磁気デバ イスが、それに含まれる磁性体特有の磁気飽和特性のた め、最大電流を制限することが大きな課題となっている。 磁気飽和が影響する主要な特性の一つが直流重畳特性であ り、直流電流によって作られた磁束により磁性体が磁気飽 和に近づくと、急激にインダクタンスが低下する現象が発 生する。こうなると電源動作時のリップル電流や負荷応答 特性に悪影響を及ぼし、動作異常を引き起こすため、直流 電流の限界値を正確に推定できる技術が重要になってく る。

電源を設計する際に直流重畳特性を磁場解析で推定する 試みは実施されてきているが、良く用いられている透磁率 $\mu = B_0/H_0$ (B_0 は図1の点 P での磁束密度B、 H_0 は点 P での 磁界Hを表す) や微分透磁率 $\mu_d = dB/dH$ を用いると原理的 に誤差が発生する事が知られている²⁾。この誤差要因を解 消するためには、図1のマイナーループの発生要因でもあ る、ヒステリシス特性を解析に取り入れる必要がある。



任意のヒステリシス特性を表現するモデルとして、プレ イモデルが提案されている¹⁾。これは、磁気特性を図2の ような複数の対称ループ群の集合として表現する数学モデ ルであり、式(1)で表現される。

$$H = P(B) = \sum_{m} f_m(P_{\xi m}(B), B) \tag{1}$$

ここで P_{im} は、ヒステロンと呼ばれるヒステリシスの動き

を表す関数で、fmがヒステリシスループの形状を表す関数、 それが振幅の異なる m 個の集合体として構成されている。



図2 プレイモデルの例

しかし、実際にプレイモデルを活用する場合、以下のよ うな難しさがあるため、容易に使う事はできない。

- 材料定数が入手困難であるため、実測等により定数 を確定する必要がある。
- 周波数が高く飽和領域に近いヒステリシスループの 測定は、特殊な装置や測定技術が要求される。
- ③ 磁気特性をループとして取り扱う関係上、重畳される交流の周波数が高くなるほど計算負荷が増大する。

この課題を解決するために、重畳される交流電流を振幅 一定の正弦波に限定する方法が提案された³⁾⁴⁾。この方法 は図1のマイナーループについて、静特性 B_0 に対して ΔB 、 ΔH が一意に決定され、その比である μ_{Δ} のみで特性を表現 するものであり、特に式(2)で定義される μ_{Δ} を増分透磁率 と呼ぶ。

$$\mu_{\Delta}(B) = \Delta B / \Delta H \tag{2}$$

ただし、μ_Δもプレイモデルと同様に一般に公開されてい る材料特性に含まれないため自ら実測で取得する必要があ る。ただし、特に飽和領域に近い磁束密度でかつ周波数が 高い場合、プレイモデルのように高周波の大電流を駆動さ せる必要がなく、直流電流に小振幅の電流を重畳させるだ けなので、比較的測定を実施しやすい利点がある。

そこで本論文では、増分透磁率を精度よく容易に測定で きる方法と、この測定法を利用して構築した直流重畳特性 推定フローを示し、その方法による計算負荷が十分に軽 く、かつ実測と推定値で実用的な一致が得られたので報告 する。

2. シミュレーションの原理

2.1 マイナーループとは

図1に示した静磁場特性で示される一般的な磁性体の B-H特性は、通常の直流、交流のシミュレーションで材料 定数として使用される。今回はパワーインダクタ等でのイ ンダクタンスの変動原因を想定して、直流電流がバイアス 電流として常時印加されており、さらにある高周波電流が 重畳されている状態を考える。この時、磁性体内では直流 電流が作る静磁界により磁性体の中で磁化が生じることで 磁束が発生するといった変化が起きている(図1の点 P)。 さらにその周りに図1の曲線 P→Q、Q→Pで示す、高周波 電流が作る小さな磁界の振動が生じる。この振動は、静磁 界の B-H 曲線に沿うのではなく、それとは異なる傾きの微 小ループを形成する。これをマイナーループと呼ぶ。この マイナーループの傾きである増分透磁率 μ_{Δ} が直流重畳状 態のインダクタンス値に反映されるため、これを捉えてシ ミュレーションに取り込む仕組みを作る必要がある。

2.2 B-H 特性によるシミュレーションの誤差原因

図3は、直流電流に100 kHzの高周波電流を重畳させた 状態でのインダクタンス特性について、静特性である B-H 曲線の微分透磁率を使ってシミュレーションした結果と実 測とを比較したものであり、直流電流で約2Aの無視でき ない誤差が生じている。この原因は、マイナーループの傾 きが重畳される電流の周波数や静磁場に影響を受けるた め、B-H曲線の傾きとマイナーループの傾き μ_{Δ} との差が無 視できなくなったためと考えられる。



図3 微分透磁率を使った場合の実測との比較

これに対する対処方法は、シミュレーションにおいて材 料特性(μ_{Δ})を反映させた磁束計算を行うことが重要であ り、これにより精度の高い推定結果が得られ、材料のイン ダクタンスの変化を正確に定めることができるようにな る。次節以降、 μ_{Δ} を重要な定数とみなし、実測による値の 確定からシミュレーションへの取り込みまでの詳細手順を 記述する。

2.3 CAE による推定手段

解析の流れは、以下のとおりである。

- ① B-H 特性を使った直流電流による静磁界分布の導出
- B-µ_∆特性を使った静磁界分布を増分透磁率分布へ 変換
- ③ 増分透磁率分布により高周波電流による磁界のイン ダクタンスの導出

今回、磁場解析ツールとして、JSOL社のJMAG-Designer を使用した。このツールは、磁気特性として一定値の比透 磁率 μ_r 、非線形 B-H特性などの他に、磁束密度 B に対する 比透磁率 μ_r の関係を定義する機能を持っている。比透磁率 を増分透磁率 μ_{Δ} と定義し、B-H特性に併せて B- μ_{Δ} の材料 データを使うことで一連の流れを使った推定を実現した。

2.4 実測による材料定数の特定

ここで、予測する上で鍵となる μ_Δ の特性を測定する手 段を考える。

 μ_{Δ} は一般的に式(3)で示すように、高周波電流の周波数 f、高周波磁場の振幅 ΔB 、静磁場 B の関数であるが、重畳 する高周波電流を周波数一定の正弦波とすることで、f, ΔB を変数から除外した。これにより、限定した条件内ではあ るが解析負荷が軽くかつ精度が担保できる方法を追求し た。

$$\mu_{\Delta} = \mu_{\Delta}(f, \Delta B, B) \Rightarrow \mu_{\Delta}(B) \tag{3}$$

実測に関しては、 μ_{Δ} を測定するための専用の磁性部品を 準備することで、自ら増分透磁率 μ_{Δ} を算出するための測 定実施が容易になった。

実測とシミュレーションを組み合わせたμ_Δの 算出方法

3.1 直流重畳解析の全体フロー

図4は、今回実施した平滑コイルなど一般的な磁気部品 に対する、直流重畳特性解析の全体のフローを示してい る。この中で、「材料定数 B-μ_Δの導出」が磁性材の材料 定数を確定する流れを示す。



図4 直流重畳特性解析の全体フロー

図5は、材料定数 B-µ_△の導出部分を関係図化したもの である。次項より、各々の検討項目を図5に示した流れに 沿って詳細に説明する。



図5 B-µ_Δ特性導出の関係図

3.2 直流電流 *I_{dc}* と平均磁束密度 Bの関係導出(図5の①) トロイダルコイルのコア内部の磁束は、磁気飽和領域ま で考慮する必要がある場合も近似式で概算を求める事は可 能である。それには、非線形磁気特性まで考慮するために B-H特性を非線形関数で近似する方法が用いられている⁵⁾。 今回は、断面の磁束密度の内外径間の不均一性やコアの 磁気特性の飽和領域付近の特性に高い精度を求めるため

の一個は、60回の磁米部及の内外自同の小37回に(コアの) 磁気特性の飽和領域付近の特性に高い精度を求めるため に、シミュレーションを活用した。 まず、飽和特性を確認するためにトロイダルコアに直流 電流を流すモデルを考える。図5の①は、③で実測に使用 するトロイダルコイルをモデル化したものである。これに 材料のB-H磁気特性を適用して、静磁場解析でコイル電流 $I_{dc} \times T$ と平均磁束密度 B_{dc} の関係をシミュレーションで求 める (図6)。ここで、 I_{dc} は直流電流、Tはコイルのターン 数を示す。 B_{dc} はトロイダルコイルの断面の磁束密度を平 均化した値である。ここで、まず静特性として磁気飽和特 性が得られていることが確認できる。





図7は図5の②に示すフローで、同じトロイダルコアの モデルを使い比透磁率µ,とインダクタンスLの関係を周波 数応答解析で求めたグラフである。



図7 比透磁率とインダクタンスの関係

3.3 トロイダルコイルによる AT-L 特性の実測(図5の③)

図8は、実際に使用した測定装置の外観を示す。LCR メータと直流源装置の組み合わせで構成されており、温度 特性も含めた直流重畳特性を測定することが可能になって いる。



図8 直流重畳特性を測定する装置群

図9は、図8で示した装置を使用して図5-③で示すよう な実際のトロイダルコイルを使って直流電流 $I_{dc} \times T$ とイン ダクタンスLとの関係を実測で求めたグラフである。直流 電流に重畳させる高周波電流のスペックは、実際に評価し たい磁気部品の高周波電流と同等に設定することで、 μ_{Δ} 特 性が一致するように設定している。



図9 コイル電流とインダクタンスの実測例

3.4 *B*-µ_Δ特性の材料定数化(図5の④)

3.2 項、3.3 項より、シミュレーションから $B_{dc}=B_{dc}$ $(I_{dc} \times T)$ 、 $L_{ana}=L_{ana}(\mu_r)$ 、実測から、 $L_{mea}=L_{mea}(I_{dc} \times T)$ と表 せる各々の関係が求められた。ここで L_{ana} はシミュレー ションから求めたインダクタンス値、 L_{mea} は実測から求め たインダクタンス値を示す。次に、 L_{mea} 、 $I_{dc} \times T$ をシミュ レーションの結果得られた 2 つの関係式を使って B_{dc} と μ_r に変換すると、 $\mu_r=\mu_r(B_{dc})$ の関係が求められる(図 10)。



図10 $B_{dc} - \mu_r$ の関係(増分透磁率 μ_{Δ})

この μ_r は、直流が作る磁束密度の影響で、重畳する交流 電流が受ける比透磁率が低下することを表し、図1で示し たマイナーループの傾きを表している。これら一連のプロ セスにより、 μ_r を改めて μ_{Δ} (増分透磁率)と定義できるた め、 $B_{dc}-\mu_{\Delta}$ の関係が得られたことになる。

3.5 再解析による µ∆の検証(図4の5)

3.4 項で求められた、 $B-\mu_{\Delta}$ の特性を検証するために、得られた $B-\mu_{\Delta}$ をモデルに適用し、 $I_{dc} \times T \ge L$ の関係をシミュレーションで再現できるかを検証した。

図 11 は、100℃の条件に設定した実測値とシミュレー ション値を比較したグラフである。誤差 5%以内であり十 分高い精度で再現できていることがわかる。これより、こ れまでの増分透磁率 μ_{Δ} の導出方法と、それを使ったシ ミュレーション方法が有効であることが確かめられた。



図11 トロイダルコイルによる直流重畳特性の再現性検証

4. 平滑コイルの直流重畳特性解析事例

4.1 平滑コイルのコア材による B-µ_△特性の導出

3章で述べたトロイダルコアによる実測とシミュレー ション方法を使って、DCDCコンバータを構成する磁気部 品である平滑コイルの直流重畳特性解析に適用した事例を 述べる。図12は平滑コイルと同じコア材料を使ってトロ イダルコアを製作し、その直流重畳特性の実測結果とシ ミュレーションを組み合わせて算出した *B*-μ_Δ特性である。



4.2 平滑コイルの解析フロー

図13は平滑コイルの磁場解析モデルと、その周波数応 答解析結果の磁束密度コンター図を示す。このモデルに対 して、直流重畳解析を次の順に進めた。

- 平滑コイルのモデルに対して、コア材料にフェライ トコアのB-H非線形静特性を適用して、直流電流に よる静磁場解析を行う。(図4の⑥)
- ② 同じモデルを利用して、①で得られた解析結果であ るコア内の磁束密度分布データを新しいモデルの初 期磁束分布に設定し、直流通電状態の磁束分布を作 る。コアの磁気特性を項4.1 で得られた B-μ_λ特性に 変更し、周波数応答解析を使って平滑コイル稼働時 に重畳される高周波電流を流し、B-µ_小特性から得ら れるインダクタンス Lを求める。(図4の⑦)
- ③ ①の直流電流を 0~Max 電流までスイープさせた結 果を準備して、②の解析をそれぞれ適用し、直流重 畳特性を求める。



平滑コイル解析モデル

磁束密度コンター図

図13 磁気デバイスの磁場解析モデルと磁束密度コンター図

4.3 平滑コイルの直流重畳解析結果と実測比較

図14に、直流重畳特性の実測とシミュレーション結果 を示す。実測は図8で示した測定装置を使って平滑コイル の直流重畳特性を求めたものである。インダクタンスの変 曲点としてインダクタンス1.5 µHの点を確認すると、直流 電流値 200 A に対して誤差 5%以内で一致しており十分実 用的であることがわかる。



5. むすび

大電流化、高周波化する磁気部品の直流重畳特性を容易 に精度良く推定したいという要求に対して、1つの解決手 段としてマイナーループの傾きを利用して材料定数化する 手段が確立でき、それを利用して平滑コイルの特性を予測 すると、計算負荷が軽くかつ十分な精度で直流重畳特性が 得られることが確認できた。

今回これを実現するために、一般に公開されていない増 分透磁率を精度よく材料定数化するための測定方法、更 に、それを使った2種類の解析の組み合わせることによ り、直流重畳特性の推定手段を構築した。

今後この技術は、パワーエレクトロニクスを利用する電 源設計などの商品に展開するとともに、直流重畳特性が重 要な商品に対しては標準設計プロセスに組み込んでいくこ とを提案する。また、更なる大振幅、かつ高周波の重畳電 流に対応するために、材料定数 B_{de}-µ_A を振幅や周波数など の多変数関数化する技術の構築を進める。

参考文献

- 1) Matsuo, T.; Shimasaki, M. An Identification Method of Play Model With Input-Dependent Shape Function. IEEE Trans Magn. 2005, Vol 41, No.10, p.3112-3114.
- 2) 樋口真伍, 高橋康人, 藤原耕二, 山田直人, 西田信博, 高井 恭平. "磁気ヒステリシスを考慮したパワーコンディショナ用 リアクトルの直流重畳特性解析". 電気学会研究会資料. 2014.1.23, p.19-24.
- 3) 橋本和茂, 髙橋康人, 藤原耕二, 他. リアクトル用磁性材料 の磁気特性測定法に関する検討. 信学技報. 2012, Vol.111, No.400, p.91-96.
- 4) 上田幸平. "リアクトルの直流重畳特性の実測と解析の比較検 討". JMAG User Conference. 2011.
- 5) 電気学会マグネティックス委員会編. 改訂 磁気工学の基礎と 応用. コロナ社, 2013, 272p.

執筆者紹介



福田 雅也 FUKUDA Masaya インダストリアルオートメーション ビジネスカンパニー 技術開発本部 第3技術部 専門:磁気 CAE



山田 隆志 YAMDA Takashi 日本電産モビリティ株式会社 パワーエレクトロニクス事業部 開発2部開発4課 専門:磁気 CAE

本文に掲載の商品の名称は、各社が商標としている場合があります。