

研究開発 レター

ワイヤレス給電コイルの リラクタンスネットワーク解析法を用いたモデリング

学生員 古川 啓太* 正員 日下 佳祐* 上級会員 伊東 淳一*a)

Modeling of Coils for Wireless Power Transfer Systems with Reluctance Network Analysis

Keita Furukawa*, Student Member, Keisuke Kusaka*, Member, Jun-ichi Itoh*, Senior Member

(20XX 年●月●日受付, 20XX 年●月●日再受付)

This letter proposes a reluctance-network-analysis (RNA) model of coils for wireless power transfer systems in order to reduce the design time for the coils. The coils are expressed as a number of magnetic circuits. As a result, self-inductance and mutual inductance values obtained using the RNA model agree well with the experimental values within a 10% of the error when the number of units of the RNA model is more than 195.

キーワード: コイル,磁気回路, リラクタンスネットワーク解析, ワイヤレス給電 **Keywords**: coil, magnetic circuit, reluctance network analysis, wireless power transfer

1. はじめに

ワイヤレス電力伝送システム向け伝送コイルの設計で は、回路仕様で決めたインダクタンス値を満足するために、 有限要素法 (FEM)を用いたシミュレーションや、試作コイ ルによる試行錯誤が主に用いられている⁽¹⁾。しかし、1回当 たりの試行時間が長いため、簡易設計をおこなわずに最適 形状を探索すると、設計期間の長期化が問題となる。

そこで本論文では、簡易設計の手段として、磁気回路法の 一つであるリラクタンスネットワーク解析法 (RNA) に基づ き、電気回路シミュレータを用いて伝送コイルの自己、相互 インダクタンスを設計する方法を新たに提案する。試作コ イルによる実測値と RNA モデルによるインダクタンス計算 結果を比較し、伝送コイルの簡易設計に適用可能であるか、 要素数を含めて妥当性を評価したので報告する。

2. リラクタンスネットワーク解析 (RNA)

〈2・1〉 RNA と伝送コイル RNA は、磁気部品中の磁性体やギャップ、巻線を複数の磁気抵抗と起磁力源で表現し、電気回路的に解析する手法であるが、ワイヤレス電力伝送システム向け伝送コイルへの適用事例はほとんどない。 RNA は、要素を細分化すればするほど素子数が増え解析的

a) Correspondence to: Jun-ichi Itoh. E-mail: itoh@vos.nagaokaut. ac.jp

長岡技術科学大学 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 Nagaoka University of Technology 1603-1, Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188, Japan に解くのが困難になる。電気機器の簡易設計では,時間短縮 のため要素数を減らすのが一般的であるが,伝送コイルで は精度が悪化する。これは,空気領域の割合が大きく,磁束 が広がることに加え,巻線配置も磁束分布に影響を与える ため,起磁力も分布的に考えなければならないためである。

そこで、本稿では、伝送コイルを多要素の RNA モデルで 表した後、電気回路シミュレータを用いて磁気回路を解き、 自己インダクタンスと相互インダクタンスをもとめる。各 要素内部に磁気抵抗と起磁力源を配置することで、磁束と 起磁力分布の模擬が可能となり、精度が改善する⁽²⁾⁽³⁾。電気 回路シミュレータの実行時間は、FEM に比べ非常に短いた め、設計時間を短縮できる⁽³⁾。

〈2・2〉 RNA モデル 図1に RNA モデルを示す。送受 電コイルが同一構造の軸対称なサーキュラ形コイルについ て,電気回路シミュレータでモデリングし,要素内部の磁気 抵抗 R_{re}, R_{ri}, R_{zt}, R_{zu}に流れる磁束を計算する。その後,巻 線の鎖交磁束と巻数,電流からインダクタンスを導出する。

RNA モデルでは、図1中の中空円筒状の要素を伝送コイ ル寸法に合わせ敷き詰めることで、磁束の流れを表現する。 *Rre*, *Rri*, *Rzt*, *Rzu*は、半径方向と高さ方向に流れる磁束と起 磁力の関係より、要素寸法、位置、割り当てられた物質の比 透磁率を用いてもとめる⁽³⁾。起磁力源は、アンペールの法則 より、巻線のつくる閉曲面内部の要素に配置する⁽³⁾。なお、 ワイヤレス電力伝送システムでは、伝送コイル周囲の磁路 の影響が無視できないため、伝送コイルの上下に45mm、側 面に100mmの空気領域を設けた。

起磁力源に流れる磁束の総和が鎖交磁束に相当するた



め,自己インダクタンス L,相互インダクタンス M は,送 電側巻線電流 I_pと巻数 N を用いて,(1)式と(2)式でそれぞれ あらわされる。

*φ*_{ppn} と*φ*_{psn} は、受電側巻線電流ゼロのときの、送電側起磁力 源と受電側起磁力源に流れる磁束をそれぞれ表している。

3. インダクタンスの計算結果

〈3・1〉 インダクタンスの計算 図 2 と図 3 にコイル半 径 r_{ce} とギャップ h_g を変化させて, $L \ge M$ を実験結果と比較 してそれぞれ示す。各曲線は、コア半径 r_{fe} 一定とし、 r_{ce} の み変えた場合のインダクタンス値を示している。また、縦の プロット点は、同一コイル半径における、 h_g を変化させたと きのインダクタンス値である。

LとM共にフルスケールの誤差 30%以内で一致し、モデ ルの妥当性を確認した。RNAモデル1個あたりの平均計算 時間は、一般のPCで1.4秒であり、FEMで解析した場合 (モデル1個の平均計算時間:245秒)に比べて非常に短

時間である。rceが小さい時の誤差原因は,試作コイルにお ける寸法誤差とインダクタンス値の測定誤差である。hgが 大きい時の Mの誤差は絶対量が小さいことに起因し,Lの 誤差は,後述する理由より,空気領域の要素サイズ増加に 伴うモデル化誤差の影響が大きい。

なお, rceと hgが大きい領域で, Mの誤差が増大する原因は, 空気領域を斜めに流れる磁束の影響で磁路の磁気抵抗が増大していると考えられるが, 詳細は今後検討する。

〈3·2〉 要素数と誤差の関係 図 4 に RNA モデルの要



Fig. 4. Relative error of self-inductance and mutual inductance.

素数を変更した時の, *L* と *M* の実験結果に対する誤差を示 す。モデル領域は図1と同じとし, 要素数は, 要素サイズを 小さくすることで増やした。

図 4 より, 誤差は要素数が大きいほど小さくなる。加え て, 同じ要素数では, *L* より *M* の誤差が小さくなる。精度 良く *L* を計算するためには, 巻線周囲の詳細な磁束密度分 布が必要である。しかし, RNA モデルは要素サイズより詳 細な磁束密度分布を表現することは困難である。したがっ て, 要素数が少ない(要素サイズが大きい)程, 誤差が増大 する。一方, *M* の計算の際は, ノイマンの公式より, 巨視的 な磁束密度分布が支配的となる。したがって, 要素数が少な くとも, 伝送コイル全体の磁束密度分布が概ね再現できれ ば, *M* は精度よく計算できる。

以上の結果より、伝送コイルの周囲を含めた領域を、約 200 個以上の要素で分割すれば、自己インダクタンス、相互 インダクタンス共に誤差 10%以内で簡易的に導出可能であ り、本簡易設計法が妥当であることを確認した。

献

- (1) R. Bosshard, et al.: IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron. , pp. 1370-1382 (2016)
- (2) Y. Yoshida et al.: IEEJ Journal of I. A., pp. 304-309 (2014)

文

(3) K. Furukawa et al.: Ee2019, No. T1.4-6 (2019)