

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：13102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20427

研究課題名（和文）次世代高性能複数統合型モータを実現する磁気回路モデルベース統合設計手法の開発

研究課題名（英文）Development of a Magnetic Circuit Model-Based Integrated Design Methodology for Next-Generation High-Performance Multiple Integrated Motors

研究代表者

日高 勇気 (Hidaka, Yuki)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30908398

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、電気自動車用モータの飛躍的性能改善を目的に、巻線界磁モータや永久磁石モータのように、全く異なる2つのモータの特性を共に備えた、複数統合型モータを実現する最適設計法を提案した。従来の最適設計法では、得られる解が初期構造に強く依存し、例えば永久磁石モータをベースし、巻線界磁モータの機能を付与すると、巻線界磁モータの特性が弱い結果となっていた。そこで、数式ベースで磁気特性を記述する、磁気回路モデリング法を提案し、その有効性を示した。また、同モデリング法ベースで統合設計する組合せ型最適化法を提案した。提案最適設計法により、従来設計法からの性能改善を数値検証で確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、初期構造に強く依存する従来の最適設計法では得られなかった、複数のモータ長所を備えたモータ構造を獲得できる。例えば、電気自動車では、巻線界磁モータの高い電費と、永久磁石モータの加速性能を両立でき、電気自動車用モータの世界標準化に貢献する。また、電気自動車に限らず、トレードオフ関係にある磁気特性を要求する、様々な電気機器で、提案設計法を用いることで大幅な機器性能の改善が実電できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed an optimal design method to realize a multi-integrated motor with the characteristics of two completely different motors, such as a wire-wound field motor and a permanent magnet motor, with the aim of dramatically improving the performance of motors for electric vehicles. In the conventional optimal design method, the obtained solution strongly depends on the initial structure. For example, when a permanent magnet motor is used as a base and the function of a wire-wound field motor is added, the characteristics of the wire-wound field motor are weak. Therefore, we proposed a magnetic circuit modeling method that describes magnetic characteristics based on mathematical equations, and showed its effectiveness. We also proposed a combinational optimization method for integrated design based on the modeling method. The performance improvement of the proposed optimal design method over the conventional design method was confirmed by numerical verification.

研究分野：電力工学

キーワード：磁気回路 組合せ最適化 巻線界磁モータ 永久磁石モータ

1. 研究開始当初の背景

フランスが、2040年までにガソリン/ディーゼル車の新車販売停止を表明するなど、電気自動車の高性能化は急務である。燃焼エンジンを必要としない電気自動車は、クリーンな移動手段として次世代スタンダードとなるが、現在の電気自動車用モータでは、ガソリン車の走行性能に遠く及ばない。そこで、巻線界磁モータと永久磁石モータと呼ばれる、特性が全く異なるモータの最適化設計を電気自動車用に進めてきた。結果、図1に示す既存モータ構造の限界に辿り着いた。すなわち、運転シーン毎に求められる特性が異なり、それらは電磁気設計的にトレードオフになる。例えば、巻線界磁モータは市街地走行のような、低車速/低出力運転で高い電費性能を持つ。一方、坂道発進時のトルク性能や高速走行時の加速性能は短所である。対して、永久磁石モータは、巻線界磁モータとは相反する特性を持つ。電気自動車用モータのトレードオフを打開するためには、全く異なる2つ以上のモータの特性を、1つのモータで実現する必要がある。

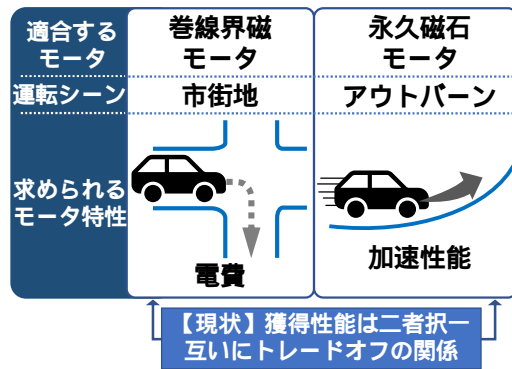


図1 電気自動車用モータの課題

2. 研究の目的

本研究の目的は、モータ性能の飛躍的改善のため、巻線界磁モータと永久磁石モータのように、全く異なる2つのモータの特性を、1つのモータで実現することにある。先行研究として、図2のモータを試作した。試作モータでは、巻線界磁モータ構造体を、永久磁石モータ構造体に挿入統合し、巻線界磁モータの磁束調整機能を、永久磁石モータに付加した。しかし、初期ベース構造に依存する従来設計手法では、巻線界磁モータの特性が弱く、トレードオフ打開には至らなかった。トレードオフ打開には、初期ベース構造に捉われない新しい統合設計手法の開発が必要である。そこで、本研究の具体目標は、個別に最適化された2つのモータを、高精度な磁気回路モデルで表現し、モデルベースで両磁気回路モデルを統合することにある。さらに、最適化アルゴリズムを導入し、初期ベース構造に捉われない、モータ磁気特性のみに着目した統合設計手法を確立させる。

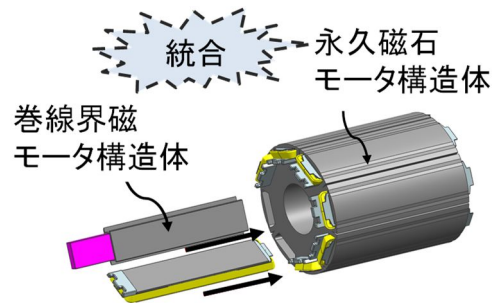


図2 試作した統合型モータ

3. 研究の方法

研究目的達成のため、本研究では図3に示す項目を実施した。具体的には

- A) 磁気非線形を考慮した磁気回路モデルの構築
- B) モジュールの組合せ最適化

上記項目を実施し、数値検証にてその有効性を明らかにした。

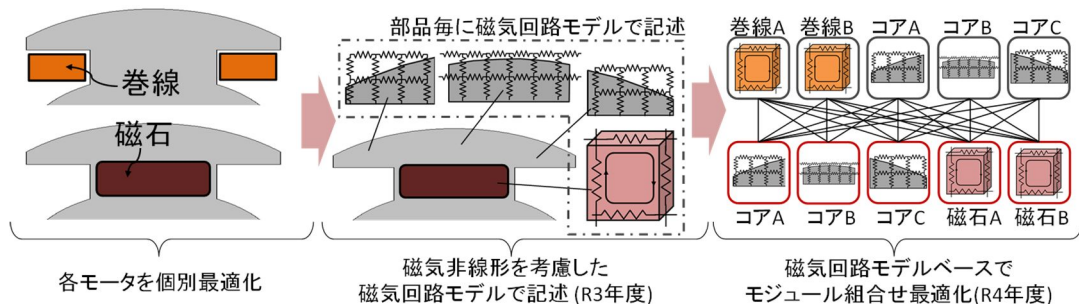


図3 磁気回路モデルベース統合設計手法の概念図

4. 研究成果

A) 磁気非線形を考慮した磁気回路モデルの構築

本項目では、開発した磁気回路法について記述する。開発で使用した検証モデルを図 4 に示す。図 4 は、ロータ内に巻線と磁石を備えたハイブリッド界磁モータと呼ばれる方式である。これは、図 2 に示す検証試作機に相当する。同モータのモデリング法を実現することで、狙いとする複数統合型モータのモデリングが可能となる。

次に、磁気回路法の概要を図 5 に示す。図 4 のモータを構成する各部品を、図 5(a) のような小領域に分割する。これら領域毎に個別の方程式を構築する。まず、起磁力項を分割する。起磁力源として、磁石及び巻線があるため、それぞれ次式で記述する。

$$M(\theta) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} M_n \cos[n(\theta - \theta_o)] \quad (1-a)$$

$$M_n = \frac{4M_o}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi\alpha}{2}\right) \cos[n(\theta - \theta_o)] \quad (1-b)$$

上式をグラフ上にプロットしたものが、図 5(b) である。次に、各領域でフーリエ級数展開に基づき、支配方程式を構築していく。例えば、領域 II では、以下が成り立つ。

$$A_z^{II}(r, \theta) = A_o^{II} + B_o^{II} \ln r + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\begin{aligned} &(A_n^{II} r^{-n} + B_n^{II} r^n + (W_n^m(r) + W_n^j(r)) \cos n\theta_o) \sin n\theta \\ &+ (C_n^{II} r^{-n} + D_n^{II} r^n - (W_n^m(r) + W_n^j(r)) \sin n\theta_o) \cos n\theta \end{aligned} \right] \quad (2)$$

同様の手順でその他領域でも、数式モデルで記述し、全領域で連立方程式を構築する。これにより、メッシュ・CAD モデルのような、設計者の知見に依存する構造表現から脱し、磁気特性のみに着目したモデリングが可能となる。

次に開発した、磁気回路法の計算精度について記述する。ここでは、FEM の解析結果と比較し、提案モデリング法の妥当性を数値的に示す。ここでは、コアバックの磁束密度を比較する。図 6 に FEM との比較結果をまとめる。図中の Analytical が提案法である。図 6 より、FEM と遜色のない計算結果が得られていることが分かる。本結果より、FEM のようなメッシュや CAD 構造など、設計者の知見に依存した表現法ではなく、磁気特性を記述した数式モデルに基づいた磁気モデリング法が確立された。

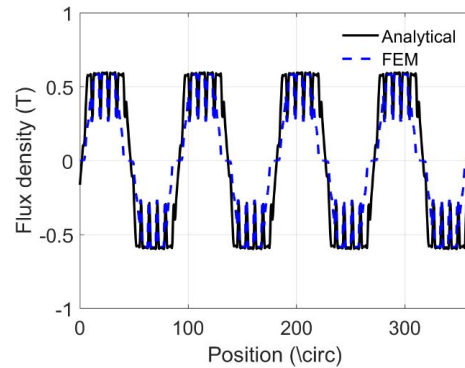


図 6 数値検証結果

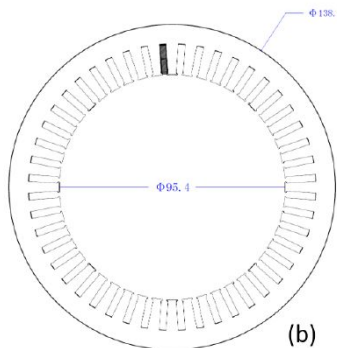
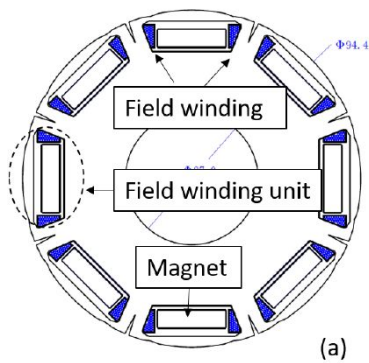


図 4 検証モデル

(a)ロータ, (b)ステータ

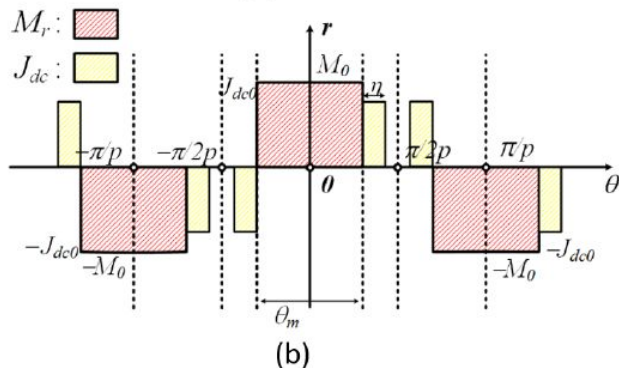
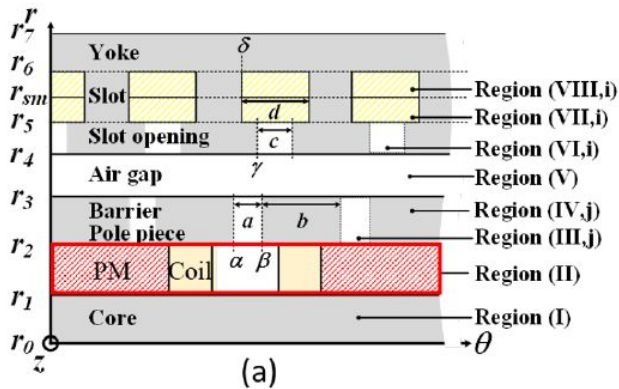


図 5 モデリング法

(a)領域分割, (b)起磁力表現

B) モジュールの組合せ最適化

本項目では、モジュール組合せ最適化法について記述する。項目(A)で構築した磁気回路法を用いて、巻線界磁モータ及び永久磁石モータの構造をモデリングし、構築した磁気回路モデルベースで組合せ最適化を行う。モジュール組合せ最適化法のイメージ図を図7に示す。モジュール組合せ最適化では、図7のように、最適設計された構造を格子状の要素で分割し、それぞれで項目(A)の数式を構築する。次に、それら格子状要素の材料配置を遺伝的アルゴリズムで組合せ最適化する。これにより、巻線界磁モータと永久磁石モータの特徴を兼ね備えた最適形状を獲得できる。本項目では、図8に示すハイブリッド界磁モータ、図9に示す磁石補助型同期リラクタンスモータでその有効性を検証した。図8(c)および図9(c)の両方で、従来最適設計法よりも高いトルク特性が得られていることが分かる。本結果より、提案する最適設計法を用いることで、従来の最適化法では得られなかったような、2つのモータ特性を共に備えた、新しいモータ構造概念を獲得できる。

本研究では、限られたモータ方式に対して、提案法を適用したが、提案法は様々なモータ方式に適用可能である。今後は、適用範囲を拡大し新たな構造概念を模索することで、モータ性能の飛躍的な改善に貢献する。

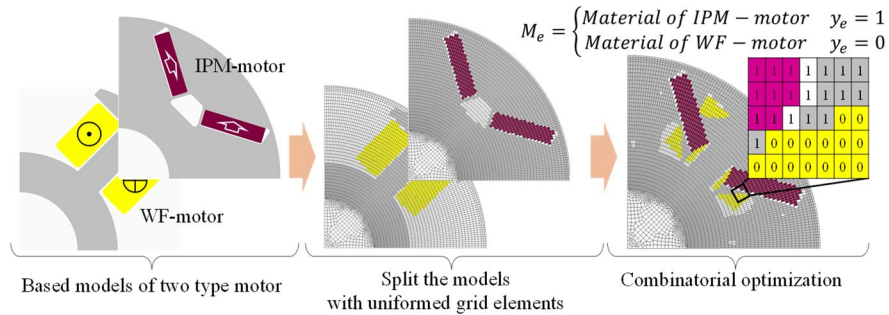


図7 モジュール組合せ最適化法

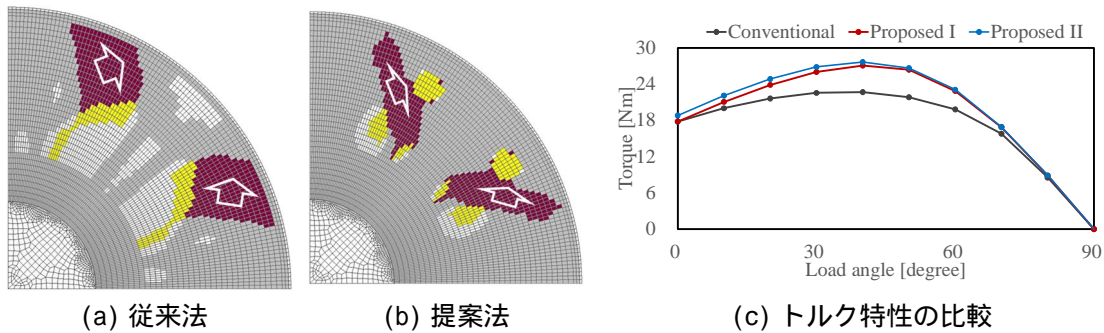


図8 提案法による最適化結果 -ハイブリッド界磁モータ-

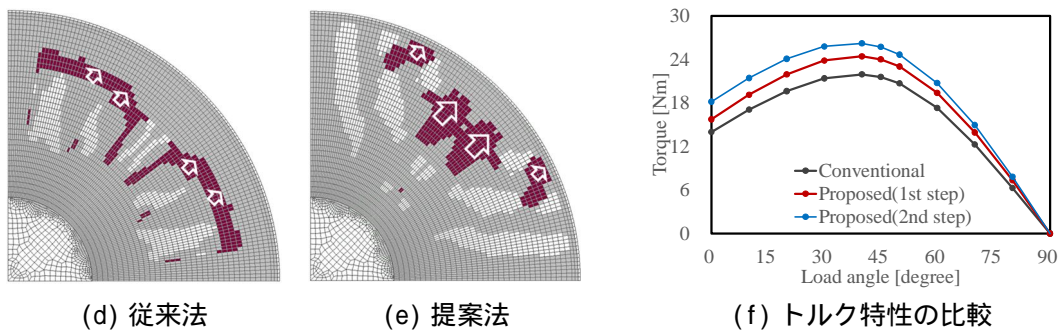


図9 提案法による最適化結果 -磁石補助型同期リラクタンスモータ-

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hidaka Yuki	4. 巻 ahead-of-print
2. 論文標題 A novel multi-material topology optimization method for permanent magnet assisted synchronous reluctance motors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering	6. 最初と最後の頁 4142-4148
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1108/compel-08-2021-0285	査読の有無 有
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 Seno Ryota, Manabe Tomohisa, Matsutomo Shinya, Hidaka Yuki	4. 巻 Early Access Articles
2. 論文標題 Interactive Motor Design System using 2D Finite Element Analysis with Fast Mesh Modification Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/tmag.2022.3159993	査読の有無 有
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 Sasaki Hidenori, Hidaka Yuki, Igarashi Hajime	4. 巻 10
2. 論文標題 Prediction of IPM Machine Torque Characteristics Using Deep Learning Based on Magnetic Field Distribution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 60814 ~ 60822
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/access.2022.3179835	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hidaka Yuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Multimaterial Topology Optimization Method Based on Global Search by Combinatorial Optimization and Local Search by Variable Design Region Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 62450 ~ 62458
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/access.2022.3182502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hidaka Yuki	4. 巻 142
2. 論文標題 Mathematical-model-based Simulation Method for Wound Field Motors Using Alternative Flux Model by RBF-net	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 609 ~ 619
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.142.609	査読の有無 有
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 Aoyagi Taiga, Otomo Yoshitsugu, Igarashi Hajime, Sasaki Hidenori, Hidaka Yuki, Arita Hideaki	4. 巻 58
2. 論文標題 Prediction of Current-Dependent Motor Torque Characteristics Using Deep Learning for Topology Optimization	5. 発行年 2022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.2022.3167254	査読の有無 有
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8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Bingnan Wang, Kyung-Hun Shin, Yuki Hidaka, Shota Kondo, Hideaki Arita, Kazumasa Ito
2. 発表標題 Analytical Magnetic Model for Variable-Flux Interior Permanent Magnet Synchronous Motors
3. 学会等名 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日高 勇気, 江川 みち, 松下 嘉子, 貝森 弘行
2. 発表標題 オンライン学習を用いた高速多目的形状最適化に関する基礎検討: IPMモータの形状最適化問題への適用
3. 学会等名 電気学会研究会資料. RM 2021(87-102), 31-34, 2021-09-10
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日高 勇気
2. 発表標題 組合せ型トポロジー最適化に関する基礎検討
3. 学会等名 2022年3月7日-2022年3月8日静止器/回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日高勇気, 趙 鉄陽, 比留間真悟, 貝森弘行, 江川みち, 松下嘉子
2. 発表標題 単層ニューラルネットワークを用いた代替磁束モデル生成における d 軸磁束の推定精度向上に関する基礎検討
3. 学会等名 2022年9月29日-2022年9月30日静止器/回転機合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Hidaka
2. 発表標題 High-Torque Density Magnet-Assisted Wound Field Motor using a Field-Unit-Type Rotor
3. 学会等名 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 貝森弘行, 日高勇気
2. 発表標題 PMアシスト型巻線界磁同期モータの鎖交磁束を用いたビヘイビアモデルの提案
3. 学会等名 電気学会 全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 趙 鉄陽 , 日高勇氣 , 比留間真吾 , 貝森弘行 , 江川みち , 松下佳子
2. 発表標題 ベイズアプローチとRBF-netを用いた巻線界磁モータの実機データドリブン
3. 学会等名 電気学会 全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日高 勇氣
2. 発表標題 単層ニューラルネットワークを用いた巻線界磁モータの代替磁束モデル生成法
3. 学会等名 電気学会 全国大会 シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2023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
---------	---------