

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04076

研究課題名(和文)高性能SRモータのための最適化と高速解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of fast simulation and optimization methods for high performance SR motors

研究代表者

渡邊 浩太 (Watanabe, Kota)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20322828

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、スイッチトリラクタンス(SR)モータの高性能化を目指した最適化に関する研究である。電気自動車には永久磁石を用いた同期モータがもっぱら用いられているが、永久磁石の価格や資源の同在性が問題視されてきた。それに対してSRモータは永久磁石を用いない利点がある。一方で、トルクが小さく、振動や騒音の問題が指摘されてきた。そこで本研究では、免疫型アルゴリズムをベースとしたトポロジー最適化手法を用いて、SRモータの形状の最適化を行い、トルク性能の向上を実現できた。さらに、有限要素解析の高速化にも取り組み、デフレーション法を導入することで、計算コストを削減することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はSRモータの欠点である低トルク性能と振動・騒音の改善を目的としたものであり、トポロジー最適化による回転子形状の最適化によってこれらの特性を改善可能であることを示した。現在、普及目覚ましい電気自動車は永久磁石同期モータが用いられているが、SRモータの性能がさらに向上すれば、低価格電気自動車や電動バイクをはじめとして幅広い分野で利用されるようになることが期待される。また、開発した最適化手法および解析の高速化手法は他の最適化にも適用可能であり、永久磁石同期モータの高性能化にも応用することが可能である。

研究成果の概要(英文)：This study is an optimization of Switched Reluctance (SR) motors to obtain high performance. Recently, permanent magnet synchronous motors have been used for electric vehicles. High price of magnet is a problem that should be solved. On the other hand, the SR motors do not use the magnets, this is the most merit. However, less torque property, vibration and noises are demerits of SR motors. In this study, topology optimizations of rotor shape are performed by using an immune algorithm. An improvement of torque property is carried out in this optimization. Moreover, a fast computation method for finite element analysis is studied. A deflation technique is introduced into the linear solver in the finite element analysis. Numerical results show that this method can reduce the computational cost of the optimizations.

研究分野：電気工学

キーワード：位相最適化 SRモータ

1 . 研究開始当初の背景

近い将来急速に普及するとされる電気自動車 (EV) には、高価な永久磁石を用いた PM モータが使われている。一方、回転子が磁性体のみから構成されるスイッチトリラクタンスモータ (SR モータ) は低価格・高信頼性で注目されている。さらに近年のパワエレ技術の向上により、その性能が急速に改善されており、PM モータ並みの出力と高効率を実現できつつある。しかし、EV での応用で重要となる低速から高速までの多岐にわたる運転条件での高効率化、振動・騒音の低減はまだ実現できていない。

2 . 研究の目的

我々の研究室では、進化計算をもとにした形状最適化技術と高速な電磁界解析技術の研究を行っており、PM モータの形状最適化に取り組み、成功を収めてきた。そこで、本研究では、SR モータの最適化による高性能化を目指す。この際、電源回路を考慮した数値解析が必要となり、計算コストの大幅低減がキーポイントとなる。そこで、以下にあげる高速化手法の導入を検討し、最適計算に要する計算コスト削減を目指す。

- (a) 可変的前処理付き共役勾配法やデフレーション法などの連立方程式の高速解法
- (b) 有限要素解析での大規模な連立方程式を小数自由度の方程式に縮約するモデル縮約法
- (c) 渦電流場の等価回路近似による高速解法

3 . 研究の方法

SR モータの最適化では、進化型最適化手法の一つである免疫型アルゴリズムを用いたトポロジ最適化 (位相最適化) を行う。最適化計算には、機器の幅、高さ等の寸法等をパラメータとして、最適値を求めるパラメータ最適化と、形状を自由に变化させて、その中から、最適な形状を見出す位相最適化の 2 種類がある。パラメータ最適化は、設計者が機器の概形をあらかじめ設定するため、自由度が限られ計算量は少なくすむ。一方、位相最適化は、形状に制限や仮定を持たせず、完全にランダムな初期形状から最適形状を求めるため、設計者の予想を上回る画期的な特性を持つ形状が得られる可能性がある。しかし、位相最適化計算では、与えられた制約条件を満たす形状は非常に多く (特に 3 次元)、そのさまざまな形状の中から最適形状を見出す必要があるため、その探索に莫大な計算量 (数値解析を数千回繰り返す) を必要とする。また、得られた最適解が工学的に実現困難であることもしばしば発生する。

モータのトルク特性の算出に必要な電磁界の数値解析では、特異行列を係数行列とする連立方程式を解く必要があり、用いることができる解法が限られている。従来は不完全コレスキー分解を前処理とする共役勾配法が主流であったが、この解法は並列計算にはあまり適していない。一方、(a) の可変的前処理を用いる解法は並列計算に適しており、GPU を用いた大規模な並列化による高速化も可能である。また、デフレーション法は解の収束の遅い成分を分離して解くことで収束性を改善する手法で、これにより電磁界解析を高速化できることを発表してきた。デフレーション法の最適化への応用は世界的に見ても先駆的な試みであり、独自のものがある。これらの手法と位相最適化を組み合わせることで計算時間の短縮を図る。

従来の電磁界解析では大規模な連立方程式を解く必要があるが、近年、その大規模法手式を数十程度の自由度の方程式に縮約する (b) のモデル縮約法が注目されている。これは、解析時間を数十分の一に短縮することが可能な画期的な解法である。この方法は最適化と相性が良く、最適計算の過程で過去に解いた解データから特異値分解により直交基底を求めておき、現在解こうとしている形状の解をこの基底を用いて表現する方法である。これにより、数万自由度の連立方程式を求める問題から、数十程度の基底ベクトルの線形結合の重みを求めるだけの問題に帰着させることができるため、計算時間を大幅に短縮することができる。ただし、解析精度が低下する問題点があるため、最適化への応用はほとんど成功していない。

(c) の等価回路近似は、電磁界解析の分野でここ数年注目されている手法である。従来膨大な計算時間をかけて算出してきた磁性材料の渦電流場特性を LC ラダー回路に置き換えてしまうものである。一度 LC ラダー回路に置き換えてしまえば、電源周波数の変更といった解析条件の変更に対しても、瞬時に計算することができる。また電源回路との連成解析も容易になり、SR モータの最適化への応用が期待できる。現状では、適用できる形状が円柱や直方体のみだったり、非線形磁気特性への応用が難しかったりなど、多くの研究課題が残っており、非常に学術的に魅力のある手法である。本研究ではこれらの高速化手法の適用を検討する。

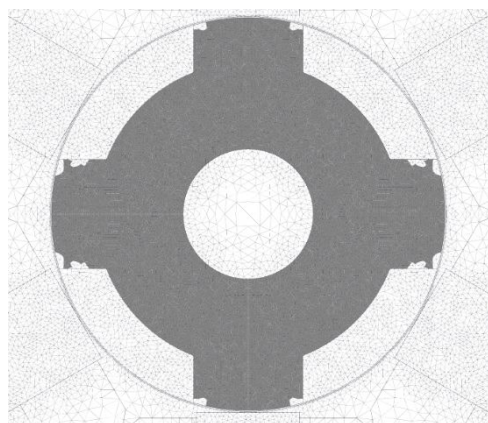
4 . 研究成果

SR モータの最適化では、免疫型アルゴリズムおよび、遺伝的アルゴリズムを用いて回転子形状の位相最適化を行った。最適化の目的として、平均トルクの最大化とトルクリップルの最小化を目指すため、両者の重み付き線形和を目的関数とする単目的最適計算を実施した。最適化で得られた最適形状の例を図 1 に示す。得られた形状は大きく異なるが、どの形状もリファレンスモデルよりも平均トルクの向上をはかることができた。ただし、トルクリップルは逆に増加する結

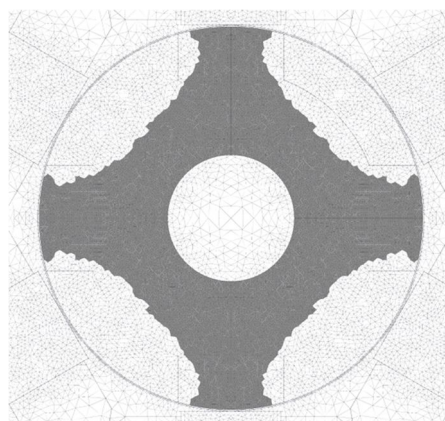
果となったが、これは、電流の通電期間の最適化によって改善できることが判明した。実際、各相の励磁タイミングを早めたところ、トルクリプルが減少することを確認できた。また、どちらの形状も磁性体中に穴や空気中に浮いた要素がなく、比較的な滑らかな形状が得られており、工学的に実用性のある形状である。

SR モータの欠点として低トルク特性のほかに振動・騒音があげられる。そこで、有限要素法による振動解析、固有振動モード解析のプログラムを開発し、トルク算出に必要な有限要素磁場解析とともに最適化計算に組み込んだ。この振動を考慮したSRモータの最適化の成果は今後学会発表する予定である。

SR モータは回転子形状の突極性から、回転子の位置によって各相のコイルのインダクタンスが大きく変化する。そのためインダクタンスの変化が電流波形に影響を与え、トルク特性にも影響を与える。従って、回転子形状の最適化では、回転角度毎のインダクタンスの算出と電流値の算出、そしてトルク値の算出を同時に行う必要があり、回路・磁場連成解析が必要となる。厳密に連成解析を行うと計算コストが高くなり、最適計算が困難となるため、電流値の算出に前ステップの回転角における値を用いることで連成解析を不要とし、計算コストの増加を抑えることができた。



(a) 遺伝的アルゴリズムによる結果



(b) 免疫型アルゴリズムによる結果

図1 SRモータの回転子の最適化形状

位相最適化の計算には膨大な繰り返し計算を要するため計算の高速化は極めて重要である。トルク算出に用いる有限要素解析においては有限要素メッシュ生成と支配方程式を離散化して得られる連立一次方程式の求解に時間を要する。このうち、前者においては、あらかじめメッシュを生成しておき、最適計算過程においてはメッシュの再生成を行わないことで高速化を図った。後者の連立一次方程式の求解においては、通常、不完全コレスキー分解を前処理とする共役勾配法がもっぱら用いられるが、これにデフレーション法を組み入れることで反復計算の収束性を改善した。デフレーション法では収束性の改善により反復回数を減らすことができる反面、固有ベクトルの算出などの追加的なコストがかかる問題点があったが、疑似的な固有ベクトルを用いたり、最適化の過程において、一つ前に評価した形状における解ベクトルを用いたりすることで、計算コストを削減できることを示した。モータの磁場解析においては、用いられている電磁鋼板の非線形磁気特性に起因して、非線形有限要素解析を行う必要がある。その際、非線形方程式の解法としてニュートンラフソン法がもっぱら用いられている。このニュートンラフソン法の計算過程においても、連立一次方程式の高速求解が必要である。そこで、ここにデフレーション法を適用したところ、従来法と比較して40%程度の高速化を実現できた。

有限要素解析の高速化手法の一つであるモデル縮約法のアイデアを取り入れて、最適化の初期世代の形状をスナップショットとするPOD(Proper Orthogonal Decomposition)法と前述のデフレーション法を組み合わせる手法も提案した。この方法ではモデル縮約法ほどの高速化は望めないものの、モデル縮約法の欠点である解の精度が低下する問題は生じない。この手法による最適化の計算コスト削減に関しては、論文投稿を行っている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Watanabe Kota, Taiami Yuki	4. 巻 59
2. 論文標題 Fast linear solver using deflation for shape optimization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 47 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-171139	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 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Fang Shiyang, Kota Watanabe
2. 発表標題 Topology Optimization of Rotor Design in Switched Reluctance Motor Using Immune Algorithm
3. 学会等名 The 19th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Miyata, Kazuki Matsuda, Kota Watanabe
2. 発表標題 Study on Optimization of Current Waveform in Switched Reluctance Motor
3. 学会等名 The 19th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Watanabe and Kaito Oshima
2. 発表標題 Fast Linear Solver Based on Deflation and Proper Orthogonal Decomposition for Topology Optimization
3. 学会等名 International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮田 亮, 渡邊 浩太
2. 発表標題 GAによるスイッチトリラクタンスモータの回転子形状最適化
3. 学会等名 令和元年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 房 世陽, 渡邊 浩太
2. 発表標題 スイッチトリラクタンスモータの回転子形状の最適化に関する研究
3. 学会等名 令和元年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Watanabe
2. 発表標題 Fast Solver for Non-linear Finite Element Analysis Using Deflation Technique
3. 学会等名 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chi Chengjun and Kota Watanabe
2. 発表標題 Robustness of Immune Algorithm for Shape Optimization of Reluctance Motor
3. 学会等名 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kota WATANABE, Fang SHIYANG, Ryo MIYATA
2. 発表標題 Topology Optimization of Switched Reluctance Motor Using Immune Algorithm and ON/OFF Method
3. 学会等名 15th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism (国際学会)
4. 発表年 2018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