差分進化を用いた IPMSM における磁石とフラックスバリアの同時最適化

Simultaneous Optimization of Magnet and Flux Barrier in IPMSM by Differential Evolution

浮田 浩輔^{*1}, 石川 康太^{*1}, 北川 亘^{*1}, (正員) 竹下 隆晴^{*1}

Kosuke UKITA, Kota ISHIKAWA, Wataru KITAGAWA (Mem.), Takaharu TAKESHITA

Recently, one of the most important problems is energy shortage. Therefore, it is required the high efficiency electromagnetic device like motors. One of them is interior permanent magnetic synchronous motor (IPMSM). It has a high degree of freedom of shape design because permanent magnets are placed in the interior of a rotor. This paper presents optimal design method of a rotor in IPMSM by differential evolution (DE). In the proposed method, magnets have design variables which are its width, length and coordinate. Flux barriers are expressed polygons which are composed by some nodes. These representations are used in simultaneous optimization of them with DE. Authors investigate usefulness of the proposed method by comparison of simulation results.

Keywords: finite element method, electromagnetic numerical field analysis, permanent magnet motor, differential evolution, structural optimization.

1 緒言

近年の地球温暖化やエネルギー問題の観点から高効率な電磁機器の需要が高まっている。例として、産業用機械、電気自動車、家電製品、情報機器などといった広範囲な各分野で不可欠となっているモータが挙げられる。その中でも特に注目されているモータの一つとして、永久磁石埋込型同期モータ(IPMSM)が挙げられる。IPMSM は永久磁石が回転子内部に配置されていることから形状の設計に高い自由度を持っている。また、永久磁石によるマグネットトルクのみならず、回転子内部の磁気抵抗の非対称性から得られるリラクタンストルクも活用できるため高トルク化が実現可能である。

近年、コンピュータの大容量化・高速化や電磁界数値解析による現象把握や性能予測が可能な CAE ソフトウェアの普及が進んでいる。そういった背景もあり、モータの高効率化のために各最適化手法と有限要素法による電磁界数値解析を組み合わせた最適設計の研究が盛んに行われている[1,2]。これら最適設計は、あらかじめ設計領域・設計変数を設定し、有限要素法による電磁界数値解析で特性を評価し、設計変数を変化させ、また評価するといった作業を繰り返し、最終的に得られた優秀な解を最適解とする手法である。最適化

手法を用いることによって、設計者の経験に頼らず、固定観念にとらわれない新しい構造が得られることが期待される。ここで、設計変数を変化させる際、変化の方法は用いる最適化アルゴリズムによって異なってくる。一般的に生物界の進化の仕組みを模倣した遺伝的アルゴリズム(GA)や物理現象である金属の焼きなましを模倣したシミュレーテッドアニーリング(SA)といった確率論的手法が用いられることが多い。

本論文では、これまでの構造最適化ではほとんど報告されることのなかった差分進化(DE)に焦点を当てる。DE は個体間の差分情報を使ってベースとなる個体周辺を探索することで一親個体に該当する一子個体を生成する方法である。DE のメリットとして、比較的簡単な演算、少ないパラメータ、強力な探索能力が挙げられる[3]。しかし、構造最適化に適応する際、形状パラメータを設定することが難しいため使用されることはほとんどなかった。そこで、形状変更の自由度拡大のためにポリゴンモデル法[4]を提案し、DE における形状パラメータ設定を可能にした。本論文では、DE を用いて IPMSM の回転子の最適設計を行い、得られた最適形状と従来形状、先行研究である参考文献[5]の最適形状との比較により DE の有用性を検討する。

2 最適化手法

2.1 解析モデルの表現

本論文では、モータの回転子内の永久磁石とフラッ

連絡先： 浮田 浩輔, 〒466-8555 愛知県名古屋市中区昭和区御器所町, 名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻
e-mail: ukita@motion.elcom.nitech.ac.jp

^{*1}名古屋工業大学

クスバリア(空気領域)の構造最適化を行う。磁石は Fig. 1 に示すように、幅 a ・長さ l ・座標の 3 つの設計変数によって自由度を持たせる。フラックスバリアは Fig. 2 に示すように複数の頂点によって構成される多角形とみなしており、頂点の数と位置によって様々な形状を表現できる。これら磁石・フラックスバリアをオブジェクトとみなす。本手法では解析モデルを磁石の設計変数とフラックスバリアの頂点の座標を順番に並べた (1) 式に示すようなベクトルに変換し、ベクトルの最適化を行うことによって形状の最適化を行う。(1) 式において、添え字の mag は磁石の座標, $node1, node2 \cdots node m$ は Fig. 2 のようにフラックスバリアの 1 個目, 2 個目 $\cdots m$ 個目の頂点の座標を示している。なお、フラックスバリアは Fig. 2 のように磁石の端点から発生するように制約を設けている。

$$\mathbf{x} = (a \ l \ x_{mag} \ y_{mag} \ x_{node1} \ y_{node2} \ \cdots \ x_{node m} \ y_{node m}) \quad (1)$$

2.2 差分進化 (Differential Evolution)

DE のフローチャートを Fig. 3 に示す。以下、フローチャートにしたがって説明していく。

(1) 初期集団生成 (Initialization)

ランダムな値を持ったベクトルの解析モデルである個体を一定数生成する。個体の数, フラックスバリアの頂点の数といったパラメータや探索範囲等は後述する。

Fig. 1 Design variables of magnet

Fig. 2 Design variables of flux barrier

(2) 評価 (Evaluation)

初期集団生成において生成された個体の電磁気的特性を二次元有限要素法(2D-FEM)により行う。この時、解析モデルをバブルメッシュ法によりメッシュ分割し 2D-FEM を用いて、定常トルク解析を行う[6]。得られた解析結果から個体の優劣をつけるためにそれぞれの個体に対して適応度と呼ばれる値を導出する。適応度の式を以下に示す。

$$f = T_{ave} \cdot w_1 + T_{rp} \cdot w_2 + C \cdot w_3 \quad (2)$$

$$T_{ave} = \frac{T_{ave_opt}}{T_{ave_ori}} \quad (3)$$

$$T_{rp} = \frac{T_{rp_ori}}{T_{rp_ori} + T_{rp_opt}} \quad (4)$$

$$C = \frac{C_{ori}}{C_{opt}} \quad (5)$$

$$C_{ori,opt} = \frac{l^2}{S} \quad (6)$$

f は適応度、 T_{ave} は定常トルクの平均トルク、 T_{rp} はトルクリプル、 C はフラックスバリアの形状複雑度、 $w_{1,2,3}$ は重みを表す。添え字の ori は基本モデル、 opt は最適モデルの値を表す。形状複雑度はフラックスバリアの形状がどれだけ複雑であるかを数値で表したもので (6) 式により計算される。なお、 l はフラックスバリア

Fig. 3 Flowchart of DE

Fig. 4 Example of mutation

Fig. 5 Example of crossover

Fig. 6 Example of inconvenience models

の周長, S はフラックスバリアの面積を示している。(2)~(6)式により, 基本モデルより平均トルクが高く, トルクリプルが小さく, フラックスバリアの形状がシンプルだと, 適応度が高くなり, 優秀な個体と判断される。

(3) 突然変異 (Mutation)

全ての個体に対して, 重複を許さず, 3 個体(x_{r1} , x_{r2} , x_{r3})をランダムに選択し, (7)式により変異ベクトル v を生成する。ここで(7)式における F はスケール係数と呼ばれるパラメータである。Fig. 4 に突然変異例を示す。Fig. 4 のように個体によってフラックスバリアの頂点の数が異なってくるため, (1)式の第 5 成分以降は座標間の距離が一番近い点同士で(7)式の計算を行っている。また, 得られる変異ベクトル v

はフラックスバリアの頂点の数は 3 個体(x_{r1} , x_{r2} , x_{r3})で一番フラックスバリアの頂点が少ない個体と同じ数になる。

$$v = x_{r1} + F(x_{r2} - x_{r3}) \quad (7)$$

(4) 交叉 (Crossover)

全ての個体に対して, その個体 x と突然変異において生成した変異ベクトルとの間で交叉を行い, 子ベクトル u を生成する。交叉率 Cr というパラメータを用いる。Fig. 5 に Cr が 0.8 の場合の交叉例を示す。交叉点を全ての成分からランダムに選択し, 交叉点では u は v から引き継ぐ。残りの成分は成分毎に乱数 r ($0 < r < 1$) を発生させて, r が Cr より小さい場合には u は v から引き継ぎ, r が Cr より大きい場合には u は x から引き継ぐ。なお, 突然変異の場合と同様に(1)式の第 5 成分以降は座標間の距離が一番近い点同士で交叉を行っている。

(5) 選択 (Selection)

交叉により生成された子ベクトル u を評価し, 適応度を計算した後, 全ての個体に対して, その個体 x と子ベクトル u の適応度の比較を行い, 優秀な方を次世代に残す。

以上の作業を最大世代数に達するまで繰り返し, 最適形状を得る。

2.3 モデルチェック

初期集団生成, 突然変異や交叉の時に生成された解析モデルにおいて, 解析上または設計上不都合なオブジェクトが発生する場合が考えられる。例を挙げると, Fig. 6 に示すようなオブジェクト上に自己交差点を持つモデル, 同じ頂点が重複しているモデル, オブジェクト同士の重なりが存在するモデル等である。本手法では, これらのモデルが生成された場合は解析可能なモデルが生成されるまで, モデル生成や突然変異・交叉といった遺伝子操作をやり直す。

3 解析条件

3.1 基本モデル

基本モデルの周方向 1/4 モデルのメッシュ図を Fig. 7 に, 解析諸元を Table 1 に示す。基本モデルには, 電気学会の「電磁界解析による回転機の実用的性能評価技術調査専門委員会」において解析精度検討用として検討されている, 3 相 4 極 24 スロットの IPMSM を用いた [7]。設計領域は Fig. 7 に示す領域とし, 発生したフラ

Fig. 7 Mesh model of original model and design domain

Table 1 Specification of original model.

Material of stator core	M-36 (JIS: 50A350)
Material of rotor core	M-36 (JIS: 50A350)
Material of shaft	s45c
Magnetization	1.25 T
Direction of magnetization	Parallel
Turn / phase	140
Rated current	3.0 A
Frequency of current	50 Hz
Speed	1500 min ⁻¹
Number of elements	1478
Number of nodes	2868

Table 2 Specification of DE parameter.

Population size	250
Number of objects	1
Number of nodes	3 - 50
Scaling factor	0.80
Crossover probability	0.80
Maximum number of generation	500

Table 3 Specification of initialization parameter.

Initial number of objects	1
Initial number of nodes	3 - 50
Search radius [mm]	8.0 - 27.0

ックスバリアは対称軸を基準に複製する。また、構造的周期性より、全ての解析モデルは周方向 1/4 モデルとして解析を行う。なお、ボルト穴は考慮せず、磁石とフラックスバリアの最適形状を探索する。

3.2 パラメータ

DE のパラメータを Table 2 に、初期集団生成時のパラメータを Table 3 に示す。2.2 節で述べたように、突然変異においてスケール係数を用いて、変異ベクトル

を生成する。一般的にスケール係数 F の値の範囲は $0 < F < 2$ とされていて、値が大きいくほど探索範囲が広がるが、収束性が悪くなる[8]。交叉においては交叉率を用いて、親ベクトルと変異ベクトルの交叉を行い、子ベクトルを生成する。交叉率の値が大きいくほど、子ベクトルの成分が変異ベクトル側から引き継ぎやすくなる。また、最大世代数を 500 としており、500 世代目に最適化を終了するようになっている。

3.3 並列計算手法

本手法では、様々なモデルを持つ集団を繰り返し解析しなければならないため膨大な時間が掛かる。このような大規模な問題を高速に処理するため並列計算を用いる。並列計算にはマスター・スレーブ方式を用いる。本手法では 2 台の PC を使い、それぞれの PC は 4 つのコア数から成り立っており、計 8 のコア数から構成される。マスター側では、初期集団生成、突然変異や交叉といった遺伝子操作や全体の処理を行い、スレーブ側では 2D-FEM を用いて、解析モデルの適応度を計算している。そのため、マスターから送られた解析モデルのファイルをスレーブ側で解析して、適応度を計算し、その解析結果のファイルをマスターへ送ることによって並列計算を行っている。なお、用いた並列計算用 PC は、CPU が Intel Core i7 of 3.40 GHz、メモリが 8 GB である。

4 最適化結果

4.1 進化プロセスと最適形状

世代を重ねる毎の集団内で一番優秀な個体の適応度の変化を Fig. 8 に示す。Fig. 8 における点線は基本モデルの適応度の値である 8.50 を示している。なお、解析にかかった時間は 326 時間であった。また、1 世代目、25 世代目、50 世代目、250 世代目、500 世代目それぞれの磁石とフラックスバリアの最適形状を Fig. 9 に示す。さらに先行研究である参考文献[5]の遺伝的プログラミング(GP)を用いた IPMSM の回転子の構造最適化で最終的に得られた 179 世代目の最適形状を Fig. 10 に示す。なお、参考文献[5]での磁石とフラックスバリアへの設計変数の与え方は本論文と同様である。Fig. 8 より 1 世代目から 50 世代目までは急激に適応度が向上しており、Fig. 9(a), (b)より形状も大きく変化しており、最適化の前半では大域的探索を行えていることが確認できる。また 50 世代目以降はゆるやかに適応度が向上しており、特に Fig. 9(d), (e)より 250 世代

Fig. 8 Evolution process

(a) first generation

(b) 25th generation

(c) 50th generation

(d) 250th generation

(e) 500 generation

Fig. 9 Optimized shape with DE

目と 500 世代目の最適形状はかなり似通った形状であることが確認できる。これは集団内の個体に似た形状が増えて、最適化の後半では、大域的探索から局所的探索に切り替わったためと考えられる。また、Fig. 9(e)の最適形状は基本モデルと比べて、磁石が回転子の表面側に移動し、幅は長く、厚さは薄くなり、フラック

Fig. 10 Optimized shape with GP (179th generation)

Fig. 11 Steady torque waveform

Fig. 12 Magnetic flux density

Table 4 Summary of characteristics.

	Average torque [Nm]	Torque ripple
Original model	1.833	0.434
Optimized model with DE	2.528	0.038
Optimized model with GP	2.667	0.477

スバリアは回転子の表面側に発生している。加えて、Fig. 10 の GP の最適形状ほど回転子表面側に磁石が発生していないことが確認できる。

4.2 定常トルク特性と磁束密度分布

DE で得られた Fig. 9(e)の最適形状と GP で得られた Fig. 10 の最適形状と基本モデルの定常トルク波形を Fig. 11 に、エアギャップ中の磁束密度分布を Fig.12 に、平均トルクとトルクリプルを Table.4 に示す。基本モデルと比べて、DE の最適形状の平均トルクは 37.9%向上し、トルクリプルは 91.2%と大幅に低減し、GP の最適形状の平均トルクは 45.5%向上し、トルクリプルは 9.0%悪化したことが確認できる。両者を比較すると、平均トルクに大きな差はないが、トルクリプルは DE の最適形状が大幅に低減している。

Fig. 9(e)から DE の最適形状のフラックスバリアは磁石とエアギャップとの間に発生していることが確認できる。これにより磁石から発生する磁束が無駄なく、極中心に集中し、GP の最適形状ほど磁石が表面側に発生せずとも、同等の平均トルクが得られたと考えられる。また、エアギャップ中の磁束密度分布が正弦波状である永久磁石表面型同期モータ (SPMSM) と比べ、IPMSM はエアギャップ中の磁束密度に高調波を多く含んでおり、その影響で誘起電圧波形にも高調波が多く含まれ、トルクリプルが大きくなる傾向がある[9]。ゆえに、トルクリプルを低減するためにはエアギャップ中の磁束密度分布を正弦波状に近づけることが重要である。Fig.12 から GP の最適形状より DE の最適形状の方がエアギャップ中の磁束密度分布が正弦波状に近づいていることが確認できる。したがって DE の最適形状のトルクリプルが大幅に低減されたと考えられる。

5 結言

本論文では、提案法である DE を用いた最適化手法により IPMSM の磁石とフラックスバリアを対象に構造最適化を行った。結果として、得られた最適形状は基本モデルと比べて、平均トルクが 37.9%向上し、トルクリプルは 91.2%低減され、形状的にも比較的シンプルであった。また、先行研究である参考文献[5]の結果よりも優秀な解が得られた。以上のことから、工学的に应用されることが期待され、提案法の有用性が明らかになった。

今後の提案法に対しての課題・検討事項として以下のことが挙げられる。

- 複数発生やセグメント型の考慮を加えた磁石の自由度の拡大
- 平均トルクとトルクリプル間のパレート最適解の探索のための多目的最適化の検討

著者らは今後、上記の検討事項について研究を進めていく予定である。

(2015 年 10 月 20 日受付, 2016 年 5 月 31 日再受付)

参考文献

- [1] T. Sato, H. Igarashi, S. Takahashi, S. Uchiyama, K. Matsuo and D. Matsuhashi, Shape Optimization of Rotor in Interior Permanent Magnet Motor Based on Topology Optimization Method Using Normalized Gaussian Network, *IEEE Trans. IA*, Vol. 135, No. 3, pp. 291-298, 2015
佐藤孝洋, 五十嵐一, 高橋慎矢, 内山翔, 松尾圭祐, 松橋大器, トポロジー最適化による埋込磁石同期モータの回転子形状最適化, 電学論 D, 135, 3, pp. 291-298, 2015
- [2] Y. Kawase, T. Yamaguchi, M. Mizuno, T. Nakano, and K. Tanaka, Characteristics Analysis of IPM Motor Driven by Voltage Source Inverter with Parallel Computing, *Proceedings of the 19th International Conference on Electrical Machines (ICEM2010)*, pp. 779-783, 2010
- [3] Y. Pei and H. Takagi, Triple and Quadruple Comparison-Based Interactive Differential Evolution and Differential Evolution, *Transaction of the Japanese Society for Evolutionary Computation*, Vol. 3, No. 3 pp. 98-108, 2012
裴岩, 高木英行, 3 点および 4 点比較ベースの対話型差分進化と差分進化, 進化計算学会論文誌, 3, 3, pp. 291-298, 2012
- [4] K. Ishikawa, W. Kitagawa and T. Takeshita, Expansion of Degrees of Freedom for Design Parameter on Optimization Analysis by Using 2D-Polygon, *Technical Meeting on Rotating Machine, IEE Japan, SA-13-089, RM-13-103*, pp. 79-84, 2013
石川康太, 北川亘, 竹下隆晴, 2 次元ポリゴンモデルを用いた形状最適化に関する設計自由度の拡大, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-13-089, RM-13-103, pp. 79-84, 2013
- [5] K. Ishikawa, W. Kitagawa, and T. Takeshita, Shape Optimization for Magnet and Flux Barriers of IPMSM by Using Polygon Model Method with GP, *Journal of the Japan Society of AEM*, Vol. 23, No. 3, pp. 533-538, 2015
- [6] T. Yokoyama, V. Cingoski, K. Kaneda, and H. Yamashita, 3-D Automatic Mesh Generation for FEA Using Dynamic Bubble System, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, no. 3, pp. 1318-1321, 1999
- [7] Investigation R & D Committee on Practical Performance Evaluation Technique of Rotating Machines by Electromagnetic Field Analysis, Practical Performance Evaluation Techniques of Rotating Machines by Electromagnetic Field Analysis, 2012
電磁界解析による回転機の実用的性能評価技術調査専門委員会, 電磁界解析による回転機の実用的性能評価技術, 2012
- [8] 電気学会進化技術応用調査専門委員会, 川上浩司, 玄光男, 辻村泰寛, 大野勝久, 岡本東, 片井修, 進化技術ハンドブック第 1 巻基礎編, 近代科学社, 2010
- [9] 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫, 埋込磁石同期モータの設計と制御, オーム社, 2011