

2022年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東北大学 大学院工学研究科 電気エネルギーシステム専攻
職位または役職	助教
氏名	羽根 吉紀

1. 研究題目

リアクタンスネットワーク解析に基づく空調機用 IPM モータの高速・高精度な特性算定手法およびキャリア高調波まで考慮可能な鉄損算定手法の確立

2. 研究目的

近年、地球環境保全および省エネルギーの観点から、動力の電化が進んでおり、国内外のエネルギー消費量に占める電力消費量の割合は年々増加している。2018年現在、我が国では、その割合は46%にまで達しており、消費エネルギーの削減効果はますます大きくなっている。中でも、住宅、オフィス、工場など様々な場所に設置される空調機は、特定のエネルギー多消費機器に対してエネルギー消費効率基準を策定するトップランナー基準の対象とされているとともに、人口増加および発展途上国の経済発展により、今後ますます稼働台数が増えると予想されている。さらに、空調機全体の消費電力の約8割は圧縮機で消費されると言われることから、圧縮機に用いられるモータの損失低減による、さらなる高効率化が強く望まれている。

ここで、近年のパワーエレクトロニクス技術の急速な発達、並びに永久磁石の大幅な性能向上により、現在市場に出回っている多くの空調機には、埋込磁石 (IPM) モータが使用されている。IPM モータの性能は、モータ構造のみならず制御手法にも大きく依存することから、さらなる高効率化のためには、制御系も含めた解析・設計が必須である。これに対して報告者は、解析対象を複数の要素に分割して各々を磁気抵抗で表し、対象全体を一つの磁気抵抗回路網として扱う、リアクタンスネットワーク解析 (RNA) を提案している。RNA はモデルが簡便で計算が速く、外部の電気・電子回路との連成も容易であることから、モータ等の磁気デバイスを含むシステムの解析・設計に適する。一方で、RNA には未だいくつかの課題が残されており、これまで空調機用 IPM モータの解析・設計への適用例は報告されていない。

そこで本研究では、RNA に基づく IPM モータの最適設計手法の確立、並びにこれを応用した空調機用高効率モータの開発を目的とする。

3. 研究内容及び成果

RNA に基づく高速・高精度な鉄損算定手法の確立

高精度な鉄損算定のためには、磁気ヒステリシス、表皮効果、異常渦電流損といった複雑な電磁気現象を RNA に取り入れることが必要不可欠である。これに対して本研究では、上述した様々な現象を考慮可能な一次元磁気回路モデルを、極異方性磁石を有する PM モータの RNA モデルと併用することで、鉄損解析を高速かつ高精度に行う手法(図 1)を提案した。その結果、本モデルは鉄損特性および効率特性を比較的精度良く算定可能であることを明らかにした(図 1)。

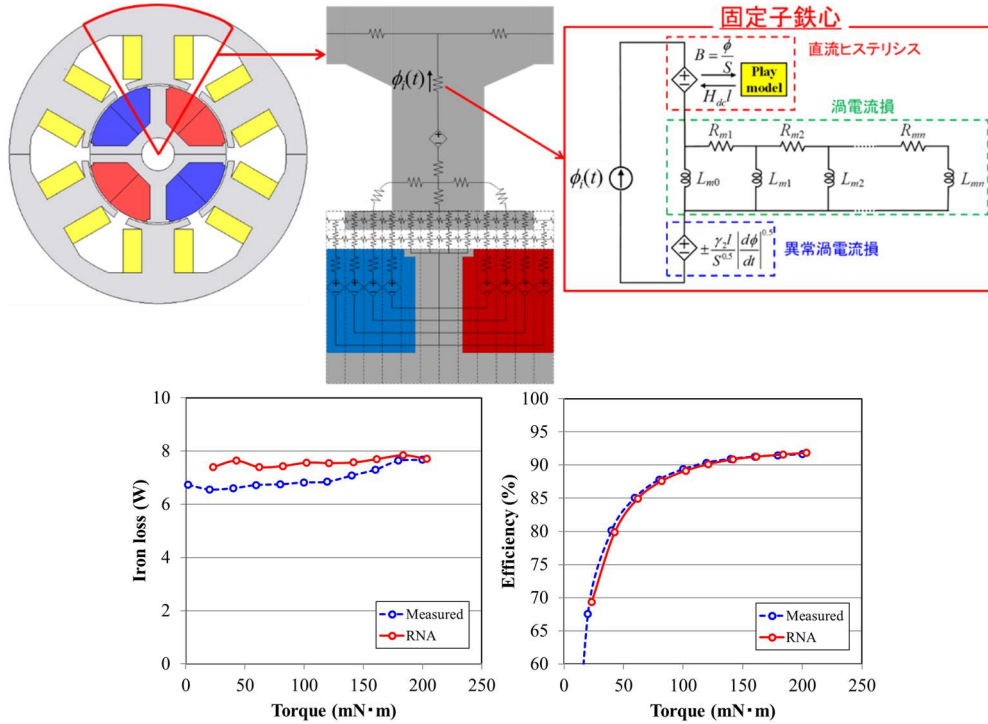


図 1 RNA モデルと一次元磁気回路モデルを併用した鉄損解析手法および計算結果

V 字形 IPM モータの RNA モデルの導出

これまで RNA は、磁束分布が複雑な IPM モータにはほとんど適用されてこなかった。これに対して本研究では、空調機をはじめ多くの機器に最も広く用いられている V 字形に着目し、詳細な要素分割を行わなくとも必要最小限の要素数で磁束分布を高精度に表現可能な RNA モデルを導出した(図 2)。本モデルを用いて解析を行い、有限要素法(FEM)と比較した結果、固定子極中央を流れる磁束密度波形の傾向は良好に一致したが、トルク波形については少し誤差が見られた(図 2)。その原因は、q 軸磁束の算定精度が不十分である点であると考えられる。

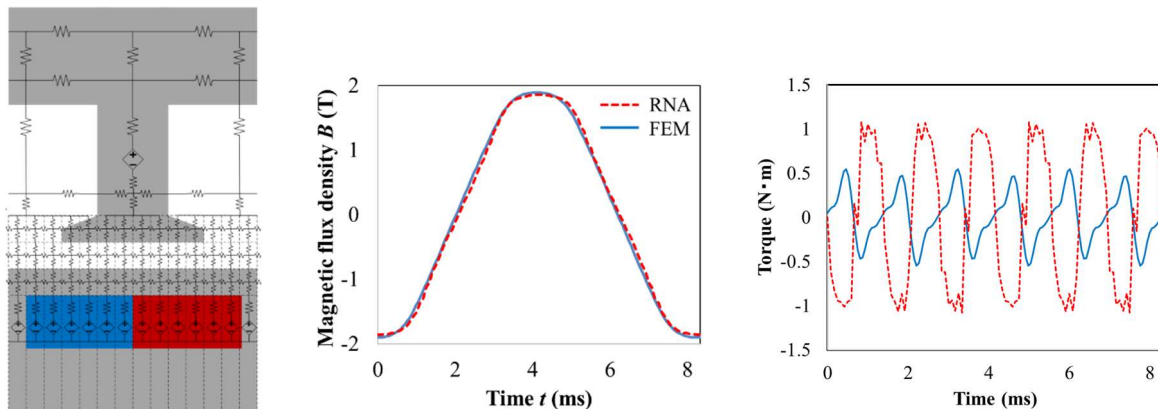


図 2 V 字型 IPM モータの RNA モデルおよび計算結果

4. 今後の研究の見通し

計算精度向上

上述した通り、従来の V 字形 IPM モータの RNA モデル(図 2)は、q 軸磁束の表現精度が不十分であるため、トルク波形の計算誤差が大きくなってしまふことが明らかになっている。具体的には、図 2 の RNA モデルにおいて、回転子角度 θ と磁石磁気抵抗の関係は図 3 に示すように与えられており、磁石が存在しない角度においては磁気抵抗がゼロとなる。しかしながら、このままでは V 字両端のブリッジ部に相当する角度においても磁気抵抗がゼロとなり、本来 q 軸磁束が流れない箇所にもまで流れてしまうという課題がある。そこで、V 字両端のブリッジ部に相当する角度において q 軸磁束を流入させないための補正磁気抵抗(図 4)を、上述の磁石磁気抵抗(図 3)に対して直列に接続することで、RNA モデルの計算精度向上について検討を行う。

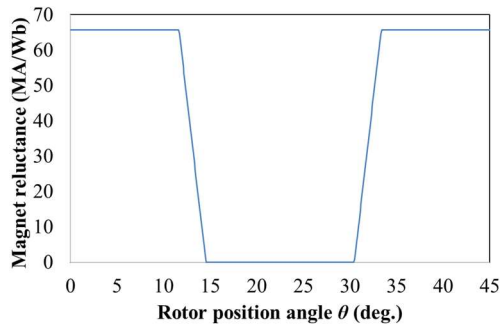


図 3 回転子角度 θ と磁石磁気抵抗の関係

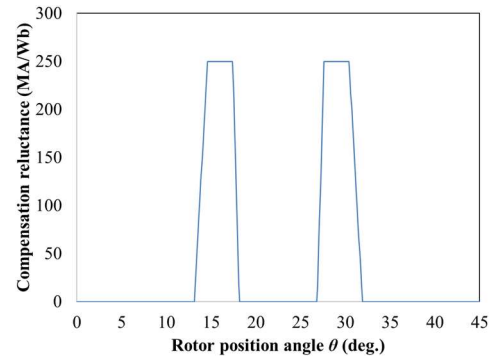


図 4 V 字両端のブリッジ部の補正磁気抵抗

適用範囲拡大

従来の RNA モデル(図 2)は、V 字形の中でも比較的簡便な構造のモータを対象としており、今後は種々のモータへの適用範囲拡大が必要不可欠である。具体的には、以下の検討を行う予定である。

- ①これまで検討を行ってきたモータは、V 字形に配置された 2 つの磁石の間にフラックスバリアが設けられており、磁石磁束の短絡を防ぐ役割を果たしていた。しかしながら、ほとんどの V 字形 IPM モータでは、機械的強度の観点から、2 つの磁石の間にはブリッジが設けられており、これが磁石磁束の短絡が生じる原因となっている。したがって、今後は V 字中央のブリッジを流れる短絡磁路を表現可能な RNA モデルの導出を行う予定である。
- ②これまで検討を行ってきたモータは、回転子鉄心がほとんど磁気飽和しないため、近似的に回転子鉄心の磁気抵抗をゼロとみなしていた。しかしながら、自動車駆動用モータをはじめ、低負荷から高負荷まで幅広い駆動条件で用いられるモータの場合、高負荷駆動時には回転子鉄心が著しく飽和する。したがって、今後は回転子鉄心の磁気飽和を表現可能な RNA モデルの導出を行う予定である。
- ③上記と関連して、幅広い駆動条件で用いられるモータの場合、電流波形の振幅・位相によって回転子内の磁束分布が変化するため、これを表現可能な RNA モデルの導出を行う予定である。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読付)

1. 渡部樹, 羽根吉紀, 中村健二:「LLG 方程式による直流ヒステリシス特性の計算精度に関する諸検討」, 電気学会論文誌 A, Vol. 143, No. 4, pp. 150-157 (2023).
2. 川口正隆, 羽根吉紀, 中村健二:「myRIO を用いたリングコア用磁気特性測定システムにおける簡易波形制御手法に関する検討」, 日本磁気学会論文特集号, Vol. 7, No. 1, pp. 49-54 (2023).

国際・国内会議(査読無)

1. Y. Hane and K. Nakamura, "High-Speed Iron Loss Calculation of Permanent Magnet Synchronous Motor Combining Reluctance Network Analysis and One-Dimensional Magnetic Circuit Models Considering Dynamic Hysteresis Behavior," *INTERMAG 2023*, CA-04(FOA-06) (2023).
2. 羽根吉紀, 中村健二, 齊藤徹, 栗津稔:「V 字形 IPM モータの磁気回路網モデルに関する基礎検討」, 電気学会産業応用部門大会, 3-59 (2023).