

## 2023 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東洋大学 理工学部 電気電子情報工学科
職位または役職	講師
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。当助成 2 年目となる今年度においては、これまでの検討において課題となっていた q 軸磁路の磁気抵抗の表現方法の見直しによる RNA モデルの計算精度向上、並びに磁石間にブリッジを有する IPM モータの短絡磁束まで表現可能な RNA モデルの構築を目指す。

3. 研究内容及び成果

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。これに対し本研究では、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 モデルの導出を目指す(図 1)。

初年度においては、q 軸磁束の表現精度が不十分であるため、トルクの計算誤差が大きくなってしまふ点が課題であった。具体的には、回転子角度  $\theta$  と磁石磁気抵抗の関係は図 2 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っていた。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まで流れてしまうという課題がある。そこで今年度においては、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 3)を、上述の磁石磁気抵抗に対して直接に接続することで、RNA モデルの計算精度向上を図った。

上述の RNA モデルを用いて解析を行い、有限要素法(FEM)と計算結果の比較を行った(図 4)。その結果、固定子極中央を流れる磁束密度波形については、いずれの電流位相角においても良好に一致した。一方、電流位相角-トルク特性については、概ね一致しているが、電流位相角が小さい領域において誤差が見られる。これは磁石磁気抵抗の波形が厳密には最適化されていないことによる d 軸磁束の誤差が原因と考えられる。したがって、今後は、回転子表面の磁束密度分布が RNA と FEM で一致するように磁石磁気抵抗を最適化する方法について検討を行い、さらなる計算精度向上を目指す。

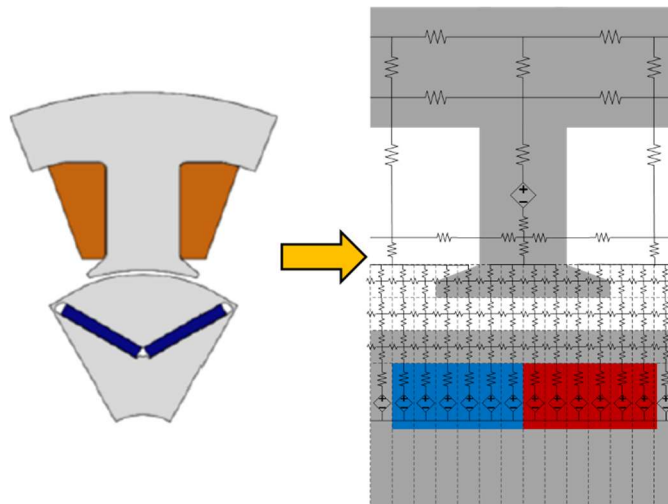


図 1 V 字形 IPM モータの RNA モデル

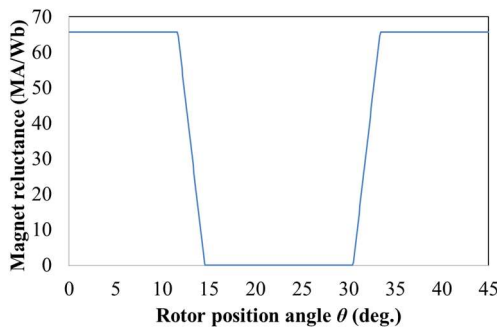


図 2 回転子角度  $\theta$  と磁石磁気抵抗の関係

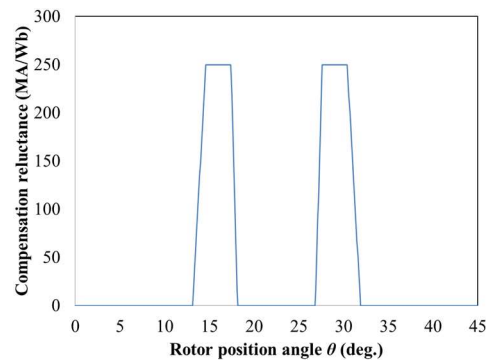


図 3 V 字両端のブリッジ部の補正磁気抵抗

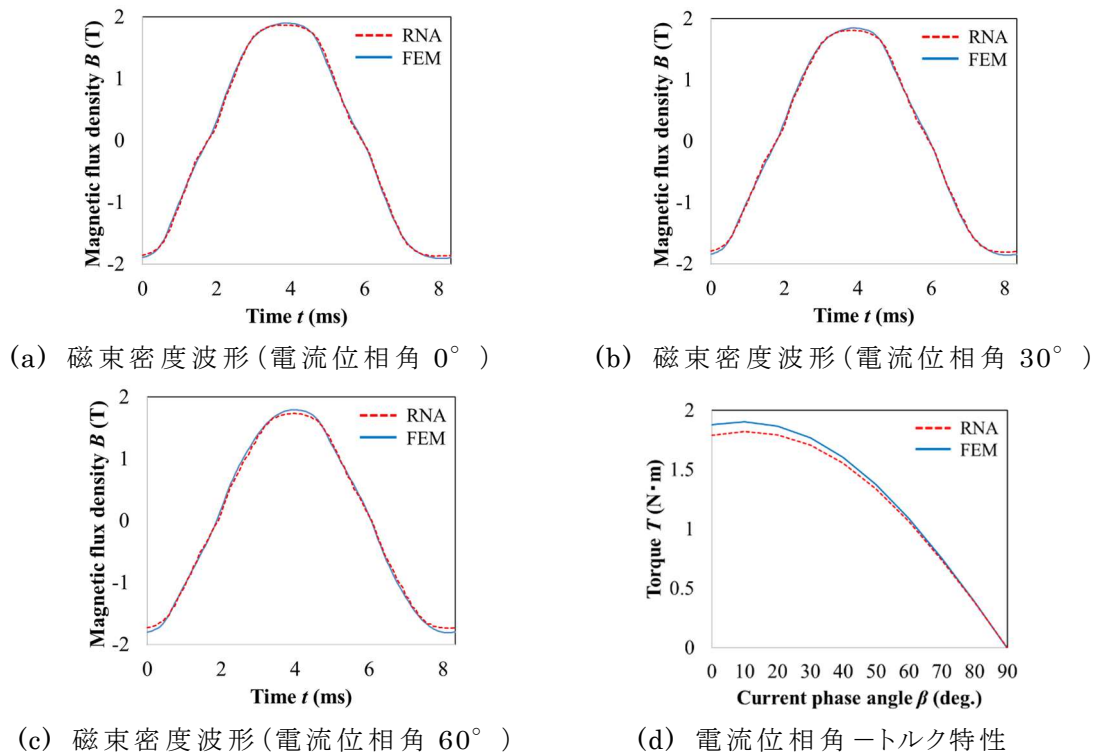


図4 RNAとFEMの計算結果の比較

#### 4. 今後の研究の見通し

##### 1. EV・HEV用IPMモータのRNAモデルの導出

これまで検討に用いてきた空調機用IPMモータ(図1)と比べ、EV・HEV用IPMモータは、磁石間のブリッジにおける磁石磁束の短絡、回転子鉄心の磁気飽和、電流波形の振幅・位相による回転子内の磁束分布の変化などの点において異なる。そこで来年度は、国内の多くの研究機関でベンチマークモータとしてよく用いられる3代目トヨタプリウスのIPMモータを検討対象として、上述した様々な現象を表現可能なRNAモデルの導出について検討を行う。

##### 2. キャリア高調波の影響まで考慮可能な鉄損算定手法の確立

初年度に確立したキャリア高調波の影響まで考慮した鉄損算定手法を、上記1で導出したRNAモデルに取り入れる。なお、これまで用いていたベンチマークモータとは異なり、本モータは空間高調波の影響が大きいいため、回転子鉄心における磁気ヒステリシスのモデル化まで必須となる。RNAモデルは回転運動を表現するにあたり、回路素子のパラメータを回転子角度 $\theta$ の関数として表現しているため、回路トポロジーは回転に伴って変化しない。したがって、回転子鉄心の各要素の磁気ヒステリシスをモデル化するために、本研究では隣接する要素間で磁束密度 $B$ の履歴の受け渡しを行う。

#### 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. Y. Hane and K. Nakamura, "Reluctance Network Model of V-Type IPMSM for Accurate and Practical Design," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 60, No. 9, 8203406 (2024).

##### 国際・国内会議(査読無)

1. Y. Hane and K. Nakamura, "Reluctance Network Model of V-Type IPMSM for Accurate and Practical Design," *INTERMAG 2024*, BE-06 (2024).