

## 2024 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	准教授
氏 名	羽根 吉紀

### 1. 研究題目

リラクタンスネットワーク解析に基づく自動車用 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、ガソリン車から電気自動車 (EV)・ハイブリッド自動車 (HEV) への移行に代表される動力の電化が進んでいる。これに伴い、我が国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傾向にあり、2018 年現在、我が国では、その割合は 46% にまで達するなど、電気エネルギー利用分野における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。また、EV・HEV 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おり、これらの動力源とな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、リラ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 EV・HEV 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 EV・HEV 用高効率モータの開発を目的とする。当助成 3 年目となる今年度においては、これまで検討を行ってこなかった、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を表現可能な RNA モデルの構築を目指す。

3. 研究内容及び成果

①V 字型 IPM モータの RNA モデルの導出

本研究では、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 V 字型 IPM モータの RNA モデルの導出を目指して検討を行った。本年度は検討対象を自動車 (3 代目トヨタプリウス) 用 V 字型 IPM モータ (図 1(a)) として, 「(i)q 軸磁束: 無視, ブリッジ短絡磁束: 無視」, 「(ii)q 軸磁束: 考慮, ブリッジ短絡磁束: 無視」, 「(iii)q 軸磁束: 考慮, ブリッジ短絡磁束: 考慮」の三種類の RNA モデルを構築し, それぞれ解析を行い, 計算結果を比較した。その結果, 電流振幅 170 A, 電流位相角 0° の場合において, (iii)の RNA モデルで計算した各部の磁束密度波形 (図 1(b)(c)) は有限要素法と良好に一致していることが明らかになった。今後は, 他の負荷条件の計算精度も検証していく必要がある。

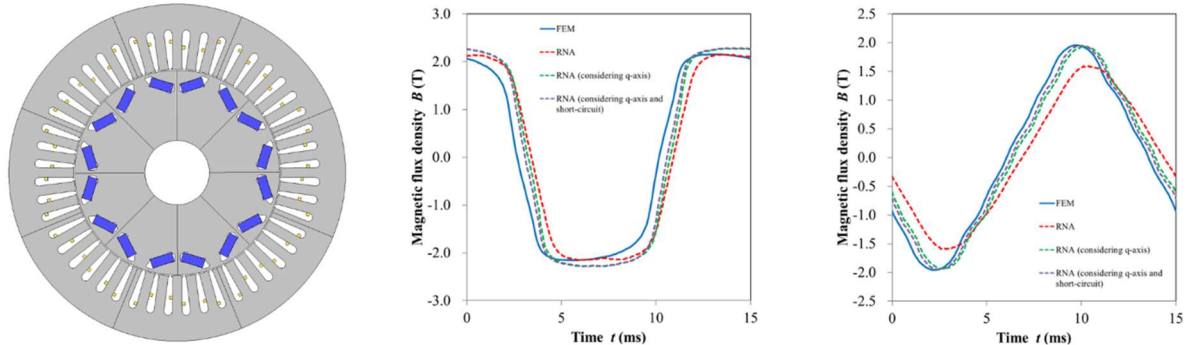
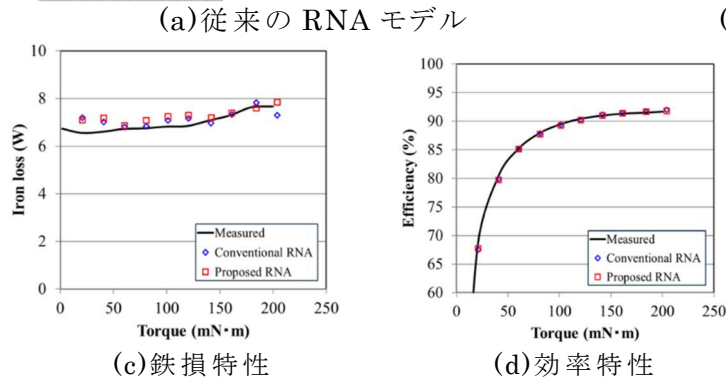
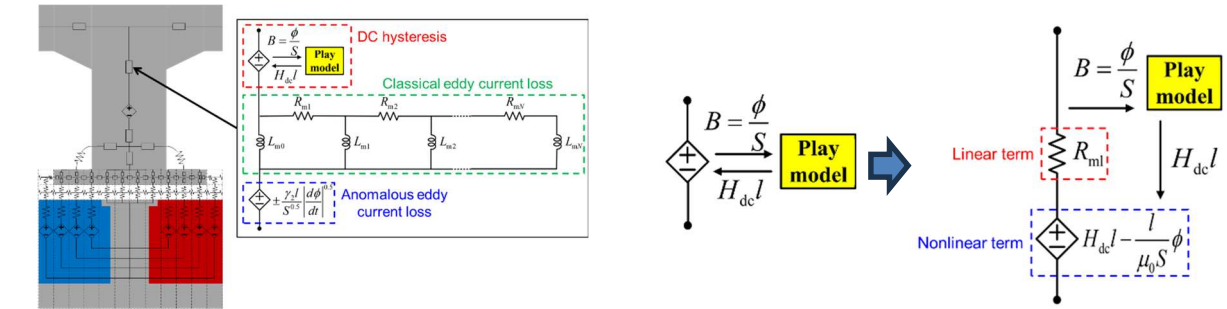


図 1 3 代目トヨタプリウス用モータの RNA モデルの解析結果 (電流振幅 170 A, 電流位相角 0°)

②RNA 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。一方, これらの現象を考慮した電磁界解析は, 一般に計算時間が膨大になってしまう。これに対して本研究では, 直流ヒステリシスを線形項と非線形項に分離して, 非線形項のみをヒステリシスモデルの一つであるプレイモデルで表現することによって, 解の収束性を改善し計算速度を向上させる手法を提案した (図 2(b))。その結果, 提案手法は従来手法 (図 2(a), 直流ヒステリシスを全てプレイモデルで表現した RNA モデル) と同等の精度で (図 2(c)(d)), かつ計算時間を約 10 分の 1 と大幅に短縮可能 (図 2(e)) であることを明らかにした。今後は本手法を上記の V 字型 IPM モータの解析にも取り入れる必要がある。



Method	Calculation time (min.)	Number of steps
Conventional RNA	581.4	47620
Proposed RNA	60.9	1191

(e) 計算時間

図 2 提案する直流ヒステリシスのモデル化手法を取り入れた RNA モデルによる計算結果

#### 4. 今後の研究の見通し

---

##### ①V字型 IPM モータの RNA モデルの導出

今後は、上述したように、導出した V 字型 IPM モータの RNA モデルを用いて他の負荷条件における計算精度の検証を行う予定である。また、上図 1(b), (c)の磁束密度波形にはさらなる計算精度向上の余地が見られるため、RNA モデルの回路トポロジーの改良についても検討を行う必要がある。例えば具体案としては、磁気飽和が著しいブリッジ部における磁化曲線の外挿方法を真空の透磁率一定となるようにする方法、磁束分布が複雑な回転子を細かく要素分割して回転子の磁気回路素子を定数とする代わりに、固定子の磁気回路素子を回転角  $\theta$  の関数として与えることで、回転運動による固定子と回転子の相対的な位置関係の変化を表現する方法、などが考えられる。

##### ②RNA に基づく高速・高精度な鉄損算定手法の確立

今後は、上述したように、提案した鉄損解析手法を V 字型 IPM モータの RNA モデルに取り入れて高精度な鉄損算定を行う予定である。なお、RNA モデルで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角  $\theta$  の関数として表現しており、回路トポロジーは回転に伴って変化しないため、各要素の磁気ヒステリシスをモデル化するためには、RNA の解析中に隣接する要素間で磁束密度  $B$  の履歴の受け渡しを行う処理が必要になる。

##### ③その他

導出した RNA モデルを、PMM インバータを含む外部の制御系と連成して高速解析を行うことを目指す。これに伴い、キャリア高調波鉄損の解析も可能となる。さらに、将来的には本提案手法による解析結果を実測結果と比較検証することも目指す。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

---

##### 国内会議

羽根，中村：「磁気回路法に基づく軟磁性コア材料のヒステリシス解析技術とモータへの応用事例」，第 49 回日本磁気学会学術講演会，16pA-7 (2025). 【招待講演】

##### その他 (シンポジウム)

羽根：「1D-CAE (Ansys Twin Builder) を活用した磁気回路網モデルによる永久磁石同期モータの解析事例」，ansys simulation world 2025 Japan (2025). 【招待講演】