

永久磁石同期機における高効率化と実用化に関する研究

長崎大学大学院工学研究科

宮本 恭祐

【要約】

本論文は、筆者が本研究科博士課程に在籍した3年間における永久磁石同期機（以下、PMSM と称す）に関する研究内容を、1983年から今日まで株式会社 安川電機において行ってきた研究開発および技術成果（特許技術）と併せて総括したものである。本論文においては、まず高効率化のための研究の視点を電機子の巻線方法に置き、特に分数スロット巻線方式と高エネルギー積磁石で構成された、電磁部の高効率化設計の検討を行っている。さらに、この高効率化設計検討の成果を、回転電機の代表的な3つの負荷特性、「定トルク負荷特性」、「2乗逓減トルク負荷特性」、「定出力負荷特性」のそれぞれのアプリケーションへの適用開発事例に照らし合わせ、その開発内容について明らかにしている。最後に、博士課程在籍3年間で研究を進めた自起動型 PMSM と、磁石レスモータとしてのセグメントタイプスイッチトリラクタンスモータ（SRM）と、研究の主題である PMSM とを比較することで PMSM の回転電機の中での技術的な位置づけの検討を行った。以降、各章の要旨を述べる。

第1章 緒論においては、研究の目的と背景、および研究を進めるための PMSM の研究課題について述べている。

第2章 本章では本論文を通して PMSM 高効率化設計の基本技術となる、PMSM の最適設計法に関する検討を行っている。モータ定数方程式、トルク方程式を導出し、性能評価指数を“モータ定数密度 (K_m/Volume)”に定め、極数をパラメータにした場合のモータ定数密度最大となる最適機器体格 (L_r/D_o) を求めている。このとき、比較検討の対象として“トルク密度最大”の最適機器体格 (L_r/D_o) も求め、双方を比較することで、それぞれの検討アプローチの差異を明確にした。本研究では、そのモータ定数密度最大最適設計の検討結果を、後述する実用化の研究にも反映させている。

第3章 本章では、高効率化研究の視点で重視した分数スロット巻線の基本的考え方を、Slot Star Diagram を用いて解説し、その適用に関する課題と対策について述べている。また在籍期間中に検討を進めた、分数スロット巻線における不等ピッチ巻線の効果についても述べ、Slot Star Diagram 解析手法

と不等ピッチ巻線方式の有効性について述べている。

第4章 ここからは、これまでの技術検討結果を **PMSM** のアプリケーションに展開した内容について述べる。本章では、「定トルク負荷特性」の適用例として、**PMSM** 技術をリニアモータに展開し、高推力化、低トルクリプル化の検討内容について述べる。特に高推力化に関しては、特許権取得をした吸引力相殺形電機子に方向性電磁鋼板を用いて推力特性を改善させた内容について述べている。また低トルクリプル化についても、特許権を取得したコギング相殺構造についての実証結果について述べている。

第5章 本章では、「2乗逡減トルク負荷特性」の適用例として、**PMSM** を大型風車用発電機に展開した内容を述べている。研究内容は、電機子巻線に特許権を取得した“分数スロット巻線方式 ($1 < q < 3/2$)”を用い、起電力の **Total Harmonics Distortion (THD)** 特性を改善しており、これをマトリクスコンバータと組み合わせて評価することで **Grid** 電流の **THD** 特性の実証試験までを行っている。結果として、初期目標をクリアした結果が得られた。

第6章 本章では、「定出力負荷特性」の適用例として、**PMSM** を工作機械主軸用モータに展開した内容を述べている。研究内容は、モータ構造を磁石埋込型 **PMSM** にして、高効率化方策として特許権を取得した巻線切替制御方式を想定した電磁設計検討を行うことで、誘導機を搭載した主軸に対して、加工時間を短縮、工作機械の加工能力の向上に結びつけることができた。

第7章 本章では、これまで述べてきた **PMSM** と、在籍期間に研究を進めた、国際規格のプレミアム効率 **IEC-3**、**IEC-4** のクリアを目的とした自起動型 **PMSM** や、磁石レスモータとしてのセグメントタイプ **SRM** と比較することで、筆者が本論文で提唱した“交流機の電磁構造マトリクス”の中での位置づけを検討した。その一つの結論として、**PMSM** の位置づけを評価する場合、本論文第2章で述べた“モータ定数密度”の他、“定出力指数”、“定出力指数密度”での比較が必要との結論を得た。

最後に、第8章で論文全体を総括することで、本論文を結んでいる。

このように、本論文において筆者は、**Nd-Fe-B** 磁石の特性向上、制御技術の発達とともに発展を遂げてきた **PMSM** に関して、高効率化技術の研究およびその実用化研究を行い、そして異種構造の回転電機と比較することで、**PMSM** の本質を明らかにする試みを行った。その結果、各テーマの中で開発した技術の特許権取得や、交流機電磁構造マトリクスの想起提案などの成果に結びついた。