

有限要素法によるスイッチトリラクタンスモータの 鉄損および温度解析に関する研究

稲村 慎吾

論文の内容の要旨

本論文では、有限要素法(Finite Element Method : FEM)によるスイッチトリラクタンスモータ(Switched Reluctance Motor : SRM)の簡易的な鉄損解析手法の開発および、鉄損、銅損による温度上昇の解析を目的とした。

SRMの設計目標は多岐に渡っており、性能、駆動回路、振動騒音、効率、そして制御等に関して研究がなされている。これらの指標をより精度よく効率的に評価するために、解析技術の向上は強く要望されている。特にこれらのなかで、環境問題により地球規模で省エネルギーへの要望が高まりつつあり、モータ効率は重要な問題である。SRMにおいても、それは鉄損に大きく影響されており、この正確な推定法が期待されている。しかしながら、鉄損に関して、単板等の試験材料についての基礎研究は多くなされているが、実機に対する解析的なアプローチで検討された例は少ない。

本論文では、SRMにおける、計算コストの低い簡易な鉄損評価法としてFEMによる二次元静磁界解析を基にした手法を提案した。さらに、得られた鉄損分布を用い温度解析をおこない、FEMによるSRM解析手法の有効性を示した。

以上の事項を背景として、本論文は6章で構成されており、それは以下の通りである。

1、2章では背景や基礎理論についてまとめ、主に、FEM解析する対象の物理現象の支配方程式、SRMの動作原理や、基本特性および鉄損について述べた。

3章ではSRM駆動時において鉄損が他の諸特性に与える影響について、実験結果を基に比較、検討した。検証用として形状、寸法が同じで、異なる電磁鋼板を鉄心材料とした試作SRMを用いて実験をおこなった。用いた鉄板は2種類の鉄損特性が大きく異なる電磁鋼板であり、駆動時の鉄損、効率などについて比較、検討した。

その結果、駆動時にて、鉄損が全損失の中で大きく占められており、入力電力に対して最大50%以上までになり、結論として、鉄損特性のよい材質の使用が、効率改善には重要な要素であると述べた。また、試作したSRMの鉄損特性が、単板の状態と比較して劣っており、積層効果による特性が十分に活かされていないことを示した。これより、鉄損軽減にはこれらの点を改善することが重要であり、これにより、大きな効率の向上がはかれると結論づけた。最後に、鉄損の解析的な評価が必要であることを示した。

4章では計算コストの低い簡易な鉄損評価法としてFEMによる二次元静磁界解析の解析結果を基

にした手法を提案した。本手法は、SRMの鉄心内の磁束密度波形をフーリエ解析や形状分析することにより、渦電流損、ヒステリシス損を解析するものであり、従来の手法より容易に計算することが可能である。解析結果と、3章で述べた鉄損特性の異なる2種類のSRMの測定結果とを比較し、本手法の有効性を示した。

一方、積層鋼板はその製造過程において、特性を劣化させる可能性があることを示し、試作したSRMでは、渦電流損が鋼板のデータシートから得られたカタログ値よりも約5～6倍もの上昇がみられた。この上昇が、データシートに基づいた解析値に大きな誤差を生じさせる原因となることを議論した。この誤差の検討として、FEM解析結果より、2枚の積層鉄板の絶縁状況が、大きく損失に影響を与えていることを示した。これにより、パラメータ導出に関しては、実験を基にした導出の必要性を示唆した。

5章では、FEMを用いてSRMの温度上昇に着目し解析をおこなった。発熱源は鉄損・銅損であり前章の鉄損解析から求めた値を用いて計算した。解析は二次元と三次元でおこない、結果と実験値とを比較した。それにより、二次元解析結果は、実験値と大きく異なっていることがわかり、解析モデルとしては妥当ではないことを示した。また、空気との熱伝達の問題について検討した。FEM解析において、空気との熱伝達はNewtonの冷却法則により空気温度を既知として与えられていたが、モータ内部の空気の温度に関しては、ファン等の冷却がおこなわれていない場合、その通気孔の大きさ、形状により完全に除熱できない場合があり、既知ではない。

そこで本論文では、このようなモータ内部の空気の温度上昇を考慮にいれたモデルを提案した。それはモータ内部の空気の温度上昇の式をFEM解析とは別に定義し、それを反復法で連立して解くものである。

本解析により、モータの温度分布が得られ、定常状態での温度解析は測定値と比較して良く一致していることが示され、その有効性が検証された。また、ステータとロータではロータの温度上昇が大きいこと、また、コイルにおける発熱を明らかにすることができた。このように、モータ駆動時において測定の困難な箇所での温度の評価をすることが可能であることを述べた。

6章では、最後にまとめとして、SRMにおける鉄損や温度上昇の現象に関して、FEMが解析手法として有効であることを示した。

以上