

小型・超高速電動機システムにおける
磁場 - 回路連成解析手法に関する研究

生産科学研究科 システム科学専攻

重松 浩一

本研究は、特殊構造を持つ「小型・超高速電動機システム」に対し、有限要素法を用いた磁場解析と制御を含む回路解析の連成シミュレーション解析技術の構築をおこなったものである。従来の簡易的な磁場 - 回路連成解析では、十分研究された既知の磁気回路については答えを出すことが可能であるが、新規の特殊な電動機に関してはその適用範囲に限界がある。本手法の構築により、超高速電動機のみならず汎用的な構造を有する「電動機」に対し磁場 - 回路連成解析が可能となる。これにより解析技術の適用範囲に大きな広がりが期待できるものである。

第 2 章では、試作した小型・超高速電動機の仕様と冷却システム、さらに制御系について述べる。本電動機は飛散防止措置のため、回転子保護の目的でインコネル環を用いた特殊構造であり、従来報告されている高速電動機の研究例に対し、回転速度が 240,000rpm と非常に高速である。そこで、通常の V/f 一定制御に加え、インバータ出力電圧の位相に同期した回転座標系にて行う「安定化方法」と「高効率制御」を利用することで、高速駆動制御システムを構成している。その駆動に関して、現在のところ定格回転数には至っていないが、制御方式の詳細な検討とパラメータの調整により 150,000rpm と十分な速度で駆動することが可能となっている。ここで得られた知見は今後の展開として、電動機のさらなる向上や、新しい制御システムに用いる制御手法の開発につながっていく。

第 3 章では、本電動機の磁場解析について、用いた有限要素法モデルの説明と静磁場解析、過渡磁場解析の詳細について述べる。まず、メッシュ分割や境界条件、物性値など、電動機のモデル化について検討を行い、基礎的な特性を求めるための静解析の方法とその結果を示した。また、本電動機はインコネル環で永久磁石を覆っているという構造上、超高速域ではこのインコネル環に誘起される渦電流の影響が懸念される。そこで、高速運転時において発生する渦電流の振舞いを十分に把握し、それを抑制する設計法を確立することがより重要となる。そこで、有限要素法を用いた過渡磁場解析により、インコネル環に発生する渦電流を詳細に検討した。その結果、誘起される渦電流は永久磁石によるものが

電動機子電流によるものより一桁以上大きく、永久磁石が作る磁束とその空間および時間変化による影響が支配的であることがわかった。また、この渦電流及びパワーロスの低減に対しては、固定子ティース形状の径方向の広がり（歯幅）を大きくすることが有効であることを明らかにした。

第 4 章では、本電動機システムに対する、磁場 - 回路連成解析手法の確立手順について述べる。本手法では、まず、前章の有限要素法を用いた磁場解析結果をもとに電動機モデルを作成し、さらに駆動回路であるインバータや DSP による制御プログラムのモデル化を行う。電動機モデルは、(1)固定子巻線に対する電氣的な等価回路と(2) 回転子に対する等価回路から構成され、有限要素法より得られた電流と位置に対する磁束とトルクの計算結果をテーブルとして利用している。また、インバータや制御プログラムのモデル化では、実験システムにできるだけ近い構成としている。本連成解析手法を用いた 60,000rpm 及び 120,000rpm での定常運転特性において実験とのよい一致を得た。以上の結果より、本手法を用いることで電磁界、回路、制御といった異なる工学分野を同時に考慮できる解析手法を確立することができた。これによりシミュレーション上で電動機システムを再現することが可能となり、今後の設計解析ツールとして期待できる。

第 5 章では、本手法の適用例として、本研究室で開発した円筒形 SRM の連成解析を行った結果について示す。第 4 章では電動機モデルを 2 次元の有限要素法により作成した等価回路モデルを回路解析へ直接導入したが、本モータは回転子に短絡巻線を持つ特殊構造であるため、ここでは、全ての固定子巻線及び回転子巻線間の相互インダクタンスの影響と電源側への回生エネルギーの影響を考慮できるインバータを含む駆動システムのシミュレーションモデルを構築して解析を行った。その結果、電流波形はほぼ一致し、平均トルク特性も計算誤差 10%以内で推定することが可能となった。さらに短絡巻線に誘導される電流によるトルク特性改善の効果を理論的に裏付けることができた。このように、磁場 - 回路連成解析を用いることにより、今後、設計上十分な精度で、励磁電圧の波形や印加開始及び終了のタイミング等がトルク特性等へ及ぼす影響を検討できる。

以上、本研究により、小型・超高速電動機システムに対し磁場 - 回路連成解析技術を構築でき、電動機システムに対する設計解析ツールとして利用できる事を明らかにした。この手法はリアモータを含む特殊あるいは汎用的な電動機に対しても適用可能であり、さらに今後の設計・最適化に対しても有効である。