

回転機の三次元電磁界解析 実用化技術

回転機の三次元電磁界解析実用化技術調査専門委員会編

目 次

1. まえがき	3	4. 誘導電動機のベンチマークモデル	41
2. 最近の解析技術動向	4	4.1 ベンチマークモデルの概要	41
2.1 鉄損解析技術	4	4.2 試験条件と結果	45
2.2 永久磁石のモデリング	9	4.3 解析結果と評価	49
2.3 高速化手法	11	5. 最新電磁界解析技術の応用事例	57
2.4 応力連携解析技術	18	5.1 電磁界解析応用による回転機の最適設計例	57
3. 集中巻 IPMSM のベンチマークモデル	25	5.2 電気学会 D モデルの解析事例	58
3.1 ベンチマークモデルの概要	25	5.3 各種回転機の構造を考慮した解析事例	63
3.2 試験条件と結果	29	6. あとがき	69
3.3 解析結果と評価	32		
3.4 パラメータ感度検討	38		

回転機の三次元電磁界解析実用化技術調査専門委員会委員

委員長	河瀬 順 洋(岐 阜 大 学)	委 員	廣 塚 功(中 部 大 学)
幹 事	貝 森 弘 行(サイエンスソリューションズ㈱)		福 井 聡(新 潟 大 学)
	宮 城 大 輔(東 北 大 学)		藤 岡 琢 志(㈱富士通ゼネラル)
幹事補佐	山 口 忠(岐 阜 大 学)		藤 田 真 史(㈱ 東 芝)
委 員	赤 津 観(芝 浦 工 業 大 学)		牧 田 真 治(㈱ デ ン ソ ー)
	石 川 赴 夫(群 馬 大 学)		三 須 大 輔(㈱ 東 芝)
	岩 井 明 信(㈱本田技術研究所)		村 松 和 弘(佐 賀 大 学)
	大 神 光 司(㈱ フ ォ ト ン)		矢 野 博 幸(㈱ エ ル フ)
	大 口 英 樹(富 士 電 機 ㈱)		藪 見 崇 生(大 同 特 殊 鋼 ㈱)
	大 戸 基 道(㈱ 安 川 電 機)		山 際 昭 雄(ダイキン工業㈱)
	岡 本 吉 史(宇 都 宮 大 学)		山 崎 克 巳(千 葉 工 業 大 学)
	沖 津 隆 志(㈱ 明 電 舎)		山 田 隆(㈱ J S O L)
	北 川 亘(名 古 屋 工 業 大 学)		和 嶋 潔(新 日 鐵 住 金 ㈱)
	米 谷 晴 之(三 菱 電 機 ㈱)	途中退任	石 原 好 之(同 志 社 大 学)
	高 橋 則 雄(岡 山 大 学)	委員	滝 沢 大 二 郎(㈱本田技術研究所)
	高 橋 康 人(同 志 社 大 学)	主 な	太 田 信 治(岐 阜 大 学)
	竹 越 邦 夫(㈱ テ ラ バ イ ト)	参加者	高 炎 輝(佐 賀 大 学)
	筒 井 宏 次(東芝三菱電機産業システム㈱)		齋 藤 奏(岡 山 大 学)
	中 原 明 仁(㈱ 日 立 製 作 所)		笹 山 瑛 由(岡 山 大 学)
	西 田 青 示(㈱ I D A J)		田 中 憲(岐 阜 大 学)
	野 口 聡(北 海 道 大 学)		中 尾 矩 也(芝 浦 工 業 大 学)
	野 見 山 琢 磨(シンフォニアテクノロジー㈱)		宮 田 健 治(㈱ 日 立 製 作 所)
	樋 口 大(信 越 化 学 工 業 ㈱)		

1. まえがき

超小形の回転機や電気自動車の電動機など、体格、動作原理、駆動方法を問わず回転機の適用範囲が急激に拡大し、回転機の高効率化、高性能化の要求が一層厳しくなっている。

一方、電磁界解析に関しては、有限要素法が電気機器の解析に適用されて既に 30 年以上経過しているが⁽¹⁾、当初は数百～数千程度の未知数の二次元問題が主であったのに対し、最近では解析技術の発展や計算機環境の進歩により、数千万オーダーの未知数での三次元解析も行われている。

電気学会においても、回転機の電磁界解析技術の重要性を認識し、1980 年代後半から回転機技術委員会の下に電磁界解析技術に関する調査専門委員会を設置してきており、これまでに多数の技術報告を出版し、当該分野の発展に寄与してきた^{(2)・(12)}。本委員会の前身である「電磁界解析による回転機の実用的性能評価技術調査専門委員会」では、回転機の高性能化および開発プロセスの効率化に対する電磁界解析技術の寄与のさらなる加速を目的として、電磁界解析技術の適用とインバータ駆動や材料特性に関連する損失評価技術および新しい解析技術の動向についての調査、検討を行った。

しかしながら、上記の調査検討を通して、実機の設計開発に寄与する多くの有用な知見が得られた一方で今後の課題も浮かび上がってきた。例えば、三次元電磁界解析による損失評価は多くの情報を提供するが、最新の計算機を使用しても解析に多大な時間を要する。また、渦電流を考慮した解析では、1 周期分の定常解を求めるのさえ解析的過渡状態を取り除くために数周期分の計算をしなくてはならないという実態がある。さらには、より高精度な解析結果を得るために、磁気飽和やヒステリシス、駆動回路を考慮する必要があるが、これらの解析技術の進歩や、多様化するデータをより容易に生成し、かつ、解析結果を分かり易くするブリ・ポスト処理技術が求められている。

このような背景のもと、本調査専門委員会では、回転機の三次元電磁界解析の実用化を目的として、電磁界解析の大規模化・高速化に関する解析手法、回転機内の電磁現象に関する詳細な解析、ならびに、熱、構造、駆動回路など複数の領域にまたがる現象に関する解析方法などについて調査、検討を行ってきた。

解析技術の動向に関しては、鉄損解析技術や永久磁石のモデリング、解析の三次元化、大規模化に対応した高速化手法、応力連携技術等の新しい解析技術、実際の各種回転機における最新電磁界解析の応用事例に関して、文献調査等による情報収集を行った。

また、これまでの調査専門委員会の流れを引き継ぎ、ベンチマーク問題を設定して、集中巻 IPMSM のベンチマークモデルでは、インバータ駆動やモータの高出力密度化などで課題になっている高調波損失、材料特性と各特性の関係、

駆動回路との連成解析等の検討を行い、同時に新しい解析技術を適用した検討も行った。

誘導電動機のベンチマークモデルでは、負荷試験特性の実測ならびに解析を行い、検討した。同時に新しい解析方法を適用した検討も行った。

本技術報告は、以上の結果をまとめたものであり、第 2 章以降、以下のように構成されている。

第 2 章は最近の解析技術動向として、鉄損解析、永久磁石のモデリング、高速化手法、応力連携技術などについて技術動向を調査した結果をまとめている。

第 3 章は集中巻 IPMSM のベンチマークモデルについて、モデルの概要、使用材料、測定と解析結果との比較についてまとめている。

第 4 章は誘導電動機のベンチマークモデルについて、モデルの概要、使用材料、測定と解析結果との比較についてまとめている。

第 5 章は、最新電磁界解析技術の応用事例についてまとめている。

第 6 章において、本技術報告を総括している。

参考文献

- (1) 有限要素法による電力機器の電磁界解析法調査専門委員会:「有限要素法による電力機器の電磁界解析の現状」, 電学技報, II 部 No.118 (1981)
- (2) 回転機の電磁界数値解析法応用調査専門委員会:「回転機の電磁界数値解析法」, 電学技報, No.375 (1991)
- (3) 回転機電磁界解析ソフトウェアの適用技術調査専門委員会:「回転機電磁界解析ソフトウェアの適用技術」, 電学技報, No.486 (1994)
- (4) 回転機の電磁界高精度数値シミュレーション技術調査専門委員会:「回転機の高精度数値シミュレーション技術」, 電学技報, No.565 (1996)
- (5) 回転機の電磁界解析応用技術調査専門委員会:「回転機の電磁界解析実用化技術の現状と実例」, 電学技報, No.663 (1998)
- (6) 回転機のパーチャルエンジニアリングのための電磁界解析技術調査専門委員会:「回転機のパーチャルエンジニアリングのための電磁界解析技術」, 電学技報, No.776 (2000)
- (7) 回転機の三次元 CAE のための電磁界解析技術調査専門委員会:「回転機の三次元 CAE のための電磁界解析技術」, 電学技報, No.855 (2001)
- (8) 回転機の三次元電磁界解析高度化技術調査専門委員会:「回転機の電磁界解析高度化技術」, 電学技報, No.942 (2004)
- (9) 回転機の電磁界解析高精度モデリング技術調査専門委員会:「回転機の電磁界解析高精度モデリング技術」, 電学技報, No.1044 (2006)
- (10) 回転機の高速高精度電磁界解析技術調査専門委員会:「回転機の高速高精度電磁界解析技術」, 電学技報, No.1094 (2007)
- (11) 電磁界解析による回転機的设计・性能評価技術調査専門委員会:「電磁界解析による回転機的设计・性能評価技術」, 電学技報, No.1168 (2009)
- (12) 電磁界解析による回転機の実用的性能評価技術調査専門委員会:「電磁界解析による回転機の実用的性能評価技術」, 電学技報, No.1244 (2012)