

電磁界解析による回転機の高精度性能評価技術

電磁界解析による回転機の高精度性能評価技術調査専門委員会編

(発行日 2022年12月9日)

目次

1. まえがき	3	5. 回転機電磁界解析の応用事例	80
2. 解析技術の最新動向	4	5.1 アウターロータ固定形三相かご形誘導電動機	80
2.1 高速化技術	4	5.2 大形回転機	96
2.2 ビヘイビアモデル	11	5.3 ハイブリッド界磁形 IPM モータ	101
3. 損失のモデル化・評価	28	5.4 多相インバータを用いた極数切替型誘導電動機	102
3.1 モデル化	28	5.5 要因分析	104
3.2 損失評価	36	6. あとがき	111
4. モータ最適化	47		
4.1 最適化手法の進展	47		
4.2 AI・機械学習の適用	54		
4.3 最適化のアプリケーション応用	68		

電磁界解析による回転機の高精度性能評価技術 調査専門委員会委員

委員長 貝 森 弘 行(サイエンスソリューションズ㈱)
幹 事 大 口 英 樹(東 海 大 学)
高 橋 康 人(同 志 社 大 学)
幹事補佐 北 尾 純 士(三 菱 電 機 ㈱)
委 員 青 山 真 大(静 岡 大 学)
五十嵐 一(北海道大学大学院)
今 盛 聡(富 士 電 機 ㈱)
岩 井 明 信(㈱本田技術研究所)
植 田 浩 史(岡 山 大 学)
梅 谷 和 弘(岡 山 大 学)
岡 本 吉 史(法 政 大 学)
沖 津 隆 志(㈱ 明 電 舎)
河 瀬 順 洋(岐 阜 大 学)
北 川 亘(名古屋工業大学)
古 賀 誉 大(アンシス・ジャパン㈱)
小 林 篤 史(㈱ フ ォ ト ン)
小 峯 孝 之(東洋電機製造㈱)
齋 藤 陽 亮(サイバネットシステム㈱)
佐々木秀徳(法 政 大 学)
笹 山 瑛 由(九州大学大学院)
菅 原 賢 悟(近 畿 大 学)
多 久 征 吾(東芝三菱電機産業システム㈱)
土 井 智 史(㈱ デ ン ソ ー)
中 村 雅 憲(中 部 大 学)
西 田 青 示(㈱ I D A J)
野 口 聡(北海道大学大学院)
野見山琢磨(シンフォニアテクノロジー㈱)
羽 根 吉 紀(東 北 大 学)
日 高 勇 気(長岡技術科学大学)
福 井 聡(新潟大学大学院)

委 員 藤 岡 琢 志(華為技術日本㈱)
藤 田 真 史(東芝エネルギーシステムズ㈱)
堀 雅 寛(㈱ 日 立 製 作 所)
三 須 大 輔(東芝インフラシステムズ㈱)
宮 城 大 輔(千 葉 大 学)
村 松 和 弘(佐 賀 大 学)
元 吉 研 太(三 菱 電 機 ㈱)
矢 野 博 幸(㈱ エ ル フ)
藪 見 崇 生(大同特殊鋼㈱)
山 際 昭 雄(ダイキン工業㈱)
山 口 忠(岐 阜 大 学)
山 崎 克 巳(千葉工業大学)
山 田 隆(㈱ J S O L)
若 尾 真 治(早 稲 田 大 学)
和 嶋 潔(日 本 製 鉄 ㈱)
渡 辺 直 樹(信越化学工業㈱)
途中退任委員 石 川 赴 夫(群 馬 大 学)
主な参加者 阿 波 根 明(㈱ J S O L)
井 上 良 太(岡 山 大 学)
桂 井 麻 里 衣(同 志 社 大 学)
小 林 宏 泰(千 葉 大 学)
佐 藤 孝 洋(東芝エネルギーシステムズ㈱)
清 水 悠 生(大阪府立大学)
高 橋 慎 矢(㈱ 明 電 舎)
樋 口 大(信越化学工業㈱)
廣 塚 功(中 部 大 学)
福 田 真 之(昭 和 電 機 ㈱)
正 木 知 宏(㈱ I D A J)
水 田 貴 裕(三 菱 電 機 ㈱)
宮 田 健 治(㈱ 日 立 製 作 所)

1. まえがき

再生可能エネルギーの利用を先進国で推進していることや、今後、車載、航空機を中心に機械式から電動式への置き換えが拡大していることから、回転機の用途拡大がこれからも継続してゆくと考えられる。

1987年における「回転機の電磁界数値解析法調査専門委員会」発足後、これまで32年にわたり14の調査専門委員会にて、回転機の電磁界数値解析技術に関する調査検討が進められてきた⁽¹⁾⁻⁽¹⁴⁾。電磁界解析技術はこの間着実に進歩し、非線形特性の扱いや渦電流解析、回路連成、並列計算や時間周期問題の高速解法、最適化手法のモータ解析への適用、および多くの研究開発事例により、実用に供する水準の成果も少なくない。しかし、近年の産業界における回転機のこれまで以上の技術発展速度に鑑みると、回転機の電磁界解析にはまだ解決すべき課題が多く、さらなる技術の進展が切望されている。そこで回転機の電磁界数値解析技術を引き続き調査検討し、その内容を体系的にまとめると共に、検証モデルや研究開発課題への適用と応用を図り、効果的な技術を広く普及させて、我が国の回転機電磁界解析技術のレベル向上に資することを目的として、2019年4月に「電磁界解析による回転機の高精度性能評価技術調査専門委員会」が発足し、3年間調査活動を実施してきた。この間、電気学会電力エネルギー部門において同時期に活動した「電磁界解析の先進技術応用調査専門委員会」と連携をとりながら、静止器・回転機合同研究会を年に二回開催することで、電磁界解析に関する技術交流を図ってきた。これらの活動において議論された最新の技術動向について体系化しておくことは、回転機解析技術の普及促進の観点で大変重要であり、本技術報告にも多くの内容を収めた。

近年の動向として、次世代パワー半導体の実用化が見込まれることから、さらなる高周波駆動領域での解析による高精度な損失評価が要望されている。解析による損失評価技術は、これまでも後処理による表皮効果を考慮した渦電流一次元解析手法やヒステリシスを直接考慮可能なプレイモデル等を用いた評価が行われているが、計算コスト削減や高精度化への課題が残されており、さらなる解析技術の進展が期待される。近年は平角線コイルを用いてスロット占積率を高めたモータの検討がされているものの、電磁界解析では表皮効果や近接効果を含めた損失評価には膨大なメッシュ数が必要となるため計算コストが高くなってしまいうという課題がある。また、運転領域が広いモータにおいては、評価すべき回転速度における損失評価も課題であり、新たな計算コスト削減手法が望まれる。制御技術によるモータの損失最小化やトルクリプル最小化、さらには事故時の挙動制御等が検討されている。こうした検討を行うには高精度なモータのビヘイビアモデルが必要であり、空間高調波も考慮した正確な非線形ビヘイビアモデルの要望も多い。特に最大効率制御には電磁界解析による瞬時損失算出

手法が寄与できると予想され、今後の技術発展への期待も大きい。AI・機械学習等のモータの形状最適化等への適用も進んできており、形状変更がトルクリプルや鉄損の低減に大きく寄与することがわかりつつあるなど、更なる最適化技術のモータ解析への適用が進むと期待される。

本調査専門委員会では、前の調査専門委員会である「回転機電磁界解析の実用的総合評価技術調査専門委員会」の流れを引き継ぎ、簡易な平角線コイルモデルやアウターロータ固定形誘導電動機の解析結果と測定結果との比較を行った。また回転機解析技術の最新動向として高速解析技術、高精度制御連成技術、材料モデリング、モータ最適化技術、解析応用事例を調査した。

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章では並列計算や時間周期法による高速解析技術と、ビヘイビアモデルの高精度化、三相二重化等による高速制御連成技術の最新動向を紹介する。

第3章では電磁鋼板や永久磁石、平角線コイルのモデル化と損失評価について紹介する。

第4章ではモータ最適化についてまとめており、最適化手法の進展、AI・機械学習の適用と最適化アプリケーションへの適用について、技術動向を紹介する。

第5章では大形回転機、ハイブリッド界磁形モータ、IPMSM、誘導電動機等の応用事例を紹介する。

参考文献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 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)
- (5) 回転機のバ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：「回転機のバ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)
- (6) 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)
- (7) 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)
- (8) 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)
- (9) 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)
- (10) 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)
- (11) 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)
- (12) 回転機の三次元電磁界解析実用化技術調査専門委員会：「回転機の三次元電磁界解析実用化技術」，電学技報，No.1296 (2013)
- (13) 回転機電磁界解析に関する高度先端技術調査専門委員会：「回転機電磁界解析に関する高度先端」，電学技報，No.1388 (2016)
- (14) 回転機電磁界解析の実用的総合評価技術調査専門委員会：「回転機電磁界解析の実用的総合評価」，電学技報，No.1476 (2020)