

回転機電磁界解析の 実用的総合評価技術

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編

目 次

1. まえがき	3	5. 集中巻 IPMSM のベンチマークモデル	61
2. 回転機解析技術に関する動向調査	4	5.1 ベンチマークモデルの概要	61
2.1 国内（電気学会研究会資料による調査）	4	5.2 試験条件と結果	66
2.2 海外（IEEE Xplore®による調査）	6	5.3 解析および評価	68
2.3 まとめ	8	6. 回転機電磁界解析の応用事例	81
3. 解析技術の最新動向	9	6.1 永久磁石モータ	81
3.1 最適化手法	9	6.2 大形回転機	87
3.2 高速化技術	16	6.3 リラクタンスモータ	91
3.3 モデリング技術	28	7. あとがき	99
3.4 ビヘイビアモデル関連	36		
3.5 交流損失評価	38		
4. 材料特性のモデル化	44		
4.1 電磁鋼板	44		
4.2 永久磁石	56		

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委員

委員長 藤岡琢志(LG Japan Lab (株))
幹事 貝森弘行(サイエンスソリューションズ(株))
山口忠(岐阜大学)
幹事補佐 三須大輔(東芝インフラシステムズ(株))
委員 青山真大(静岡大学)
赤津観(芝浦工業大学)
石川赴夫(群馬大学)
今盛聡(富士電機(株))
岩井明信(株)本田技術研究所)
植田浩史(岡山大学)
梅谷和弘(岡山大学)
大口英樹(東海大学)
大戸基道(株)安川電機)
岡本吉史(法政大学)
沖津隆志(株)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(株))
小林篤史(株)フォトン)
齋藤陽亮(サイバネットシステム(株))
笹山瑛由(九州大学)
高橋康人(同志社大学)
多久征吾(東芝三菱電機産業システム(株))
土井智史(株)デンソー)
中村雅憲(中部大学)
西田青示(株)IDA 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(株))
福井聡(新潟大学大学院)
藤田真史(東芝エネルギーシステムズ(株))
宮城大輔(東北大学大学院)
宮田健治(株)日立製作所)
村松和弘(佐賀大学)

委員 元吉研太(三菱電機(株))
矢野博幸(株)エルフ)
藪見崇生(株)ダイドー電子)
山際昭雄(ダイキン工業(株))
山崎克巳(千葉工業大学)
山田隆(株)JSOL)
和嶋潔(新日鐵住金(株))
渡辺直樹(信越化学工業(株))
途中退任 石川智一(株)デンソー)
委員 筒井宏次(東芝三菱電機産業システム(株))
橋本真吾(信越化学工業(株))
廣谷迪(三菱電機(株))
正木知宏(株)フォトン)
主な 新政憲(TDK(株))
参加者 内村智也(株)IDA J)
大杉保郎(新日鐵住金(株))
長田俊一(岐阜大学)
笠井幹也(岐阜大学)
上川畑正仁(新日鐵住金(株))
北尾純士(三菱電機(株))
熊谷真也(アンシス・ジャパン(株))
佐藤孝洋(東芝エネルギーシステムズ(株))
高橋則雄(東芝エネルギーシステムズ(株))
田邊洋一(株)富士通ゼネラル)
富谷典生(株)IDA J)
長瀬敦義(岐阜大学)
日高勇氣(三菱電機(株))
平野博志(岐阜大学)
堀雅寛(株)日立製作所)
松田弘志郎(岐阜大学)

1. まえがき

モータの消費電力は、我が国の全消費電力量の大半を占めており、モータの高効率化は、経費削減だけでなく、地球温暖化に関する環境対策上もきわめて重要である。

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29年にわたり13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⁾⁻⁽¹³⁾。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、連立一次元方程式や時間周期問題の高速解法、最適化手法等の基本手法開発、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、回転機の実用的な解析設計の観点から観ると、磁気ヒステリシスや応力下磁気特性を含む材料モデリング、高調波損失計算法、総合評価を可能にする各種連成解析技術の開発をはじめ、回転機の電磁界解析にはまだ解決すべき課題が山積しており、今後の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ともに、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、2016年5月に「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」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「電磁界解析の高精度化技術調査専門委員会」と連携をとりながら、静止器・回転機合同研究会を年に2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た形でまとめておくことは、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。

電磁機器の機能を向上させる材料技術および材料特性のモデリング技術は数値解析的にも重要な技術であり、磁性体の磁化回転をも考慮したヒステリシス現象の解析モデルもいくつか提案されている。今後これらを駆使した新たな解析技術の進展が期待される。回転機の運転時には熱、振動、応力他が発生するため、より実機に近い解析評価を行う場合、電磁界と構造・温度・駆動回路との連成・連携解析が必要となる。近年、連成・連携解析の解析例も報告されるようになってきたが、まだ十分に実用化の域に達しているとは言い難く、知見の共有・活用が求められている。

計算速度の観点からは、近年、定常解高速求解法の開発や並列計算手法の導入による大規模解析が実現され、鉄板一枚単位で実物を詳細にモデル化した解析も行われている。しかしインバータ駆動モータの特性を精度良く求めるには、PWMキャリア周波数の百倍以上の周波数の高調波を考慮する必要があり、時間ステップの粗さから特別な補正法を導入したり、時間ステップ数の多さと解析モデル規模から計算時間が膨大となる事例も少なくない。近年、最適化手

法において課題に合わせた手法の選択肢は整いつつあるが、最適化技術で最も慎重に行うべきことは、変数選択と制約条件設定、目的関数設定であり、この視点での最適化設計事例はまだ少なく、今後の研究開発事例の継続的な積み重ねが重要である。

本調査専門委員会では、前の調査専門委員会である「回転機電磁界解析に関する高度先端技術調査専門委員会」の流れを引き継ぎ、集中巻IPMSMベンチマークモデル「Gモデル」の解析および測定を進めた。

また、回転機解析技術の最新動向や材料モデリング、連成・連携解析技術、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2013年から2018年の発表論文を分類・整理し、回転機解析技術の動向調査をまとめている。内外ともに永久磁石モータが多く、材料モデリング連成・連携解析の傾向も確認した。

第3章ではFrozen Permeability法や大形モータコイル端部モデル化など、解析技術の最新動向を紹介している。

第4章では電磁鋼板の渦電流損や磁気飽和近似法、磁石減磁特性等、材料特性のモデル化を紹介する。

第5章では「Gモデル」の概要、測定条件と結果、解析および評価について説明する。

第6章ではIPM、大型回転機、SRM、特殊モータ等、回転機電磁界解析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)