

平成21年 5月 15日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360138

研究課題名 (和文)

実機の状態での磁気特性考慮永久磁石モータの磁界解析法の開発とその実証的研究

研究課題名 (英文)

Development of Magnetic Field Analysis of PM Motor Considering Magnetic Properties Under Real Working Conditions and Experimental Verification

研究代表者

高橋 則雄 (TAKAHASHI NORIO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：40108121

研究成果の概要：

応力印加時、温度変化時、回転磁界下の磁気特性の測定を行い、約50MPa以下では圧縮応力によって透磁率と鉄損が大きく変化することを明らかにした。また、約2T近くでの回転鉄損の振る舞いを解明できた。このような実機の状態での磁気特性を考慮して、永久磁石モータの鉄損を精度良く算定する有限要素解析手法を開発するとともに、実機に適用して実測値と解析値の比較を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2007年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	10,700,000	3,210,000	13,910,000

研究分野：応用磁気工学・電気機器学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：(1)電気自動車 (2)省エネルギー (3)磁界解析 (4)磁気 (5)モータ (6)有限要素法 (7)磁気特性

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策の一環として、電力消費量の50%以上を占めているモータの高効率化は必須の課題であり、そのためのモータ方式として、永久磁石式モータが脚光を浴びている。また、ハイブリッド自動車やエアコン用に、埋め込み磁石型 (IPM) モータなどの新しい方式のモータが開発されており、これらのモータの小型・軽量・高効率化を計るために、日常の設計業務で磁界解析が広く用いられている。しかるに、有限要素法を用いても鉄損が精度良く推定できないため、これが電磁界解析を用いてモータの高効率化設計を行う際のネックになっている。

鉄損が精度良く推定できない要因としては、モータ鉄心をケースに圧入した際に鉄心にかかるの応力がかかるが、これによるB-H特性や鉄損特性の変化を考慮していないこと、自動車用モータなどで150℃程度まで温度が上昇することによる磁気特性の変化、またモータ固定子鉄心に発生する回転磁界による鉄損を求めていることなど、が考えられる。また、現在行われている解析の多くは、モータ鉄心を導電率零の塊状磁性体で近似しているが、モータ鉄心の端部で電磁鋼板に垂直に侵入する漏れ磁束の影響を考慮するためには、積層鉄心の構造を考慮した解析を行わなければならない。この場合に必要とする計算機容量や計算時間は膨大となるため、電磁

鋼板を1枚毎に要素分割せずに解析が行われている結果、ギャップ部のフリンジング磁束による渦電流損が正確に算定されていない。さらに、エアコン用モータや自動車用モータはインバータで駆動されており、モータの制御法や電源高調波を考慮する必要があるが、ドライブ回路やキャリア高調波を考慮した鉄心・永久磁石の損失算定が精度良く行われていないことも、モータの電磁界解析結果が実機の結果と異なる要因の一つである。

2. 研究の目的

本研究では、実機の状態での磁気特性を考慮して、永久磁石モータの鉄損を精度良く算定する有限要素解析手法を開発するとともに、実機に適用して実測値と解析値の比較を行うことにより、解析精度が向上していることを実証し、広くモータ産業、自動車産業、家電産業などで実用できる手法を開発することを目的とする。まず応力印加時、温度変化時、回転磁界下の磁気特性を、本研究者が長年開発してきた特殊条件下での磁気特性が測定可能な単板磁気試験器を用いて測定し、磁界解析に組み込むためのモデリング手法を考案する。次に、導電率の異方性を巧みに利用するとともに等価な透磁率を導入した積層電磁鋼板のモデリング手法を開発する。さらに、改良 MRTR 法などのマトリクス的高速化、発散防止手法を導入することにより、インバータ駆動時の実用的な解析方法を検討する。永久磁石の着磁率によってヒステリシス損がどの程度増加するかを実験で定量的に明らかにし、これを解析に反映させる方法を考案する。このような実機の状態での磁気特性を考慮して構築した三次元有限要素解析システムを用いて、実機モータの磁界解析を行うとともに、モータの鉄損等の詳細な測定を行って、鉄損推定精度が向上していることを確かめ、解析システムの実用化を図る。

3. 研究の方法

実機の状態での磁気特性を考慮して、永久磁石モータの鉄損を精度良く算定する有限要素解析手法を開発するとともに、実機に適用して実測値と解析値の比較を行った。解析精度が向上していることを実証するために、以下の研究を行う。

(1) 応力印加時、温度変化時、回転磁界下の磁気特性の測定

(2) 実機の状態での磁気特性のモデリング手法の検討とシミュレーションによる検証

(3) 実機の状態での磁気特性考慮磁界解析システムの構築

(4) 実機モータの鉄損等の測定及び解析結果との比較検証

4. 研究成果

実機の状態での磁気特性を考慮して、永久磁石モータの鉄損を精度良く算定する有限要素

解析手法を開発するとともに、実機に適用して実測値と解析値の比較を行うことにより、解析精度が向上していることを実証し、広くモータ産業、自動車産業、家電産業などで実用できる手法を開発することを目的として研究を行った。研究成果を要約すると、以下ようになる

(1) 計測システムの構築と測定精度の検討

デジタル方式の計測システムを構築し、システム全体における位相誤差などが測定精度に与える影響を検討した。

(2) 応力印加時の磁気特性の測定

モータ鉄心のプレス打ち抜き時やケースへの圧入時は主に鉄心に圧縮応力が印加されているので、けい素鋼板の試料に圧縮応力を印加して(図1参照)、B-H特性と交番磁界下での鉄損特性を測定し、100MPa程度の圧縮応力を印加すると鉄損が約10-20%増加することを示した(図2参照)。



図1 応力印加時の特性測定装置

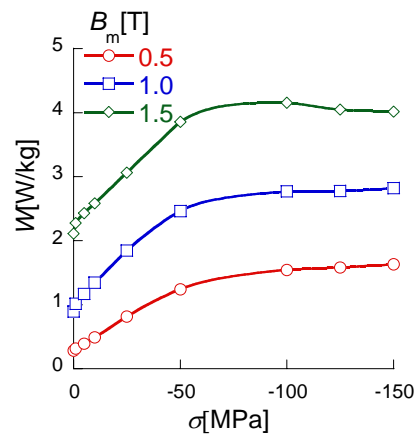


図2 応力による鉄損の変化

(3) 焼きばめ応力付加時の局所磁気特性劣化の測定

実機モデルを用い、素材特性と焼きばめが施されている固定子のバックヨーク部の磁気特性を測定し、これらの測定結果を用いてモータの焼きばめが鉄損に与える影響について

て検討を行った

(4) 回転磁界下の磁気特性の測定

モータでは固定子鉄心に回転磁束が生じるので、モータの鉄損を正確に推定するには、回転磁束条件下での鉄損を精度良く測定しておく必要がある。我々が考案している高磁束密度下での二次元磁気特性を測定する装置(図3参照)の測定領域内の磁界分布の均一度を確かめるとともに、回転磁束条件下の鉄損の測定を行った(図4参照)。

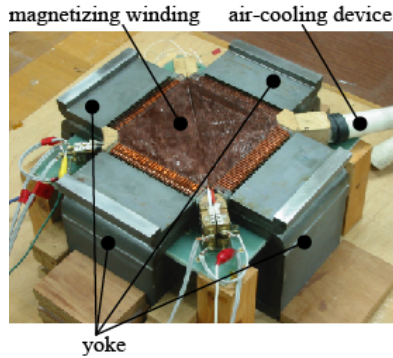


図3 回転磁界下の磁気特性測定装置

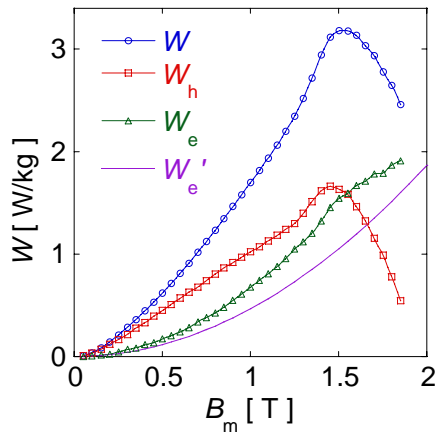


図4 回転磁界下の鉄損

(5) 歪んだ楕円回転磁界印加時の鉄損推定法の検討

前記(4)項で求めた回転磁界下での軸比別の鉄損測定値を用いて鉄損推定を行うため、歪んだ楕円回転磁界による鉄損 W を、磁束密度の基本波成分で作られる楕円回転磁界による鉄損 W_0 と、高調波成分による交番鉄損 W_n の和で表されると仮定して推定を行うと、推定精度が改善されることを示した。

(6) 温度が磁気特性に及ぼす影響の測定

自動車用のモータなどでは 150°C 程度まで温度が上昇するので、この場合のモータ用の電磁鋼板の磁気特性を、焼鈍炉内に挿入したリング試料を用いて測定した。実機で使用される 2T までの範囲で、 B - H 特性、鉄損特性を測定した。また、磁界解析に使えるように、ヒ

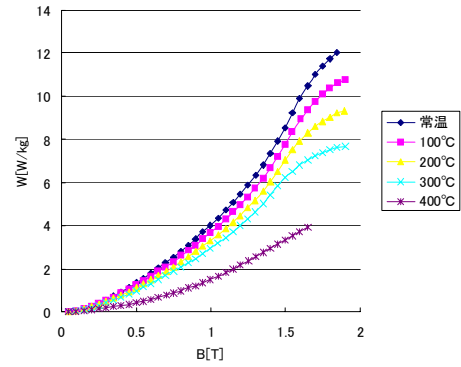


図5 鉄損の温度による変化

ステリシス損と渦電流損への分離も行った。その結果、透磁率と鉄損が温度とともに減少することを明らかにした(図5参照)。

(7) 応力印加時、回転磁界下、高温時の磁気特性の測定値を用いたシミュレーションシステムの構築

圧縮応力と磁束密度を変化させた場合の磁気特性、長軸、短軸、高調波成分を変化させた場合の楕円回転磁界下の磁気特性、高温下での磁気特性を計算機に入力できる形にモデリング(データベースをもとにした補間)して、実際の機器の状態での解析が可能なシステムを構築した。

(8) モータの鉄損測定法の検討

供試モータを無励磁状態で外部より駆動させた時のトルク T を求め、 $W = (2 \cdot N / 60) \times T$ (N は回転数) により鉄損 W (w) を求めた。機械損は、着磁していない永久磁石回転子かわりに挿入したモータのトルクを測定して求めた(図6参照)。この場合の微小トルクの精度が問題なので、カップリング、モータとトルクメータの設置精度がどの程度損失の測定値に影響を及ぼすかの検討を行った。鉄損の測定結果を有限要素法を用いた解析結果と比較して、解析値と差が生ずる原因の検討を行った。



図6 モータの鉄損測定装置

(9) キャリア高調波を考慮したインバータ駆動時の永久磁石モータの解析と実験

インバータ駆動時のキャリア周波数は数10kHzであり、このような高調波が含まれるモータの非線形解析をステップ・バイ・ステップ法を用いて実用的に計算を行う手法の検討を行った。

(10) マイナーループ鉄損の推定法の検討

磁束波形はティースの先端部などでかなりひずんでいる。これは多数の複雑なマイナーループが各部で生じていることを示している。そこで、マイナーループが存在する場合の鉄損を推定する方法を検討するための第一ステップとして、種々のマイナーループ条件下での鉄損の測定を行った。さらに、異常渦電流が無視できないので、これを考慮したヒステリシスのモデリング法の検討を行った。

(11) 積層鉄心のモデリング法の検討

モータギャップ部のフリンジング磁束により誘起される渦電流による局部損失の正確な算定をするために、積層鋼板1枚毎を細かく有限要素に分割しては、解析は実用上不可能である。そこで、表面の数枚の鋼板のみを細かく分割し、それ以外の鋼板を導電率に異方性を有するバルクとして取り扱い、かつ透磁率を巧妙に制御することにより、実用的な解析が可能な手法を確立した。

日本がこの分野で世界をリードするためには、このような実機の状態での磁気特性を考慮した磁界解析システムを構築し、それを用いれば高効率化モータの開発が可能であることを実証することが必要不可欠である。産業界からの強い要望に応じて本研究を遂行することにより、日本のモータ産業のさらなる飛躍に寄与するとともに、地球環境にやさしいモータの開発に少なからず貢献できたものとする。

上記のように順調に研究は推移した。ところで、インバータ駆動時の鉄損や直流偏磁、マイナーループの問題などが、最近の学会や産業界でのホットな話題になっており、平成21年度が最終年度であるが、その終了を待たずに、基盤研究(A)を申請した結果、採択された。これにより、平成21年度よりインバータの専門家である芝浦工業大学の赤津准教授を研究チームに迎え、さらに、大分大学後藤准教授に電磁モデリングを担当願ひ、本研究テーマをさらに発展させる予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4件)

・ D. Miyagi, N. Maeda, Y. Ozeki, K. Miki, N. Takahashi: “Estimation of Iron Loss in Motor Core With Shrink Fitting Using FEM Analysis”, IEEE Trans. on Magn., Vol. 45, No. 3, pp. 1704-1707, 2009. (査読有)

・ D. Miyagi, Y. Yunoki, M. Nakano, N.

Takahashi: “Study on Measurement Method of 2 Dimensional Magnetic Properties of Electrical Steel using Diagonal Exciting Coil”, Electrical Review, ISSN0033-2097, R. 85 NR-1, pp. 47-51, 2009. (査読有)

・ N. Takahashi, H. Morimoto, Y. Yunoki, and D. Miyagi: “Effect of Shrink Fitting and Cutting on Iron Loss of Permanent Magnet Motor”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 320, pp. e925-e928, 2008. (査読有)

・ N. Takahashi, D. Miyagi, R. Usui, M. Nakaoka, M. Nakano: “Measurement of Deterioration of Magnetic Properties due to Shrink Fitting,” Journal of The Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 15, no. 3, pp. 222-225, 2007. (査読有)

〔学会発表〕(計 13件)

・ 三木 浩平, 中野 正典, 宮城 大輔, 高橋 則雄 「圧縮応力下の積層電磁鋼板の磁気特性測定」平成20年電気学会全国大会, 2-124, pp.143. 2008.3.19-21(福岡市)

・ 柚木泰志, 中野正典, 宮城大輔, 高橋則雄

「対角線方向励磁巻線を用いた回転鉄損測定装置の改良-試料内の磁束密度の均一性の考慮」平成20年電気学会全国大会, 2-123, pp.142. 2008.3.19-21(福岡市)

・ 小関 祐生, 宮城大輔, 高橋則雄 「モータコアの焼きばめ圧縮力並びに鉄損の測定」平成20年電気学会全国大会, 5-036, pp.56-57 2008.3.19-21(福岡市)

・ 三木 浩平, 宮城 大輔, 中野 正典, 高橋 則雄

「圧縮応力が積層電磁鋼板の磁気特性に及ぼす影響」電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-08-75, pp.47-51. 2008.6.5(愛知県)

・ 柚木泰志, 中野正典, 宮城大輔, 高橋則雄

「高磁束密度での無方向性電磁鋼板の二次元磁気特性測定法の検討」電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-08-82, pp.31-36. 2008.6.6(愛知県)

・ 高橋 則雄, 宮城 大輔, 前田 訓子, 小関 祐生, 三木 浩平 「焼きばめされたモータコアの有限要素法を用いた鉄損解析」第17回MAGDAコンファレンスin 日立, pp.43-47. 2008.11.20(日立市)

・ 柚木泰志, 中野正典, 宮城大輔, 高橋則雄

「無方向性電磁鋼板の回転鉄損測定」平成19年電気学会全国大会, no.2-122, p.144. 2007.3.15(富山市)

・ 森本隼人, 柚木泰志, 宮城大輔, 高橋則雄

「永久磁石モータの焼きばめ、ティース部の

端部の切断ひずみが鉄損に及ぼす影響」電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-07-32，pp.29-34. 2007.3.30(下関市)

・柚木泰志，浅野拓也，中野正典，宮城大輔，高橋則雄「対角方向励磁コイルを用いた2DSSTによる任意方向磁気特性測定」第30回日本応用磁気学会学術講演会概要集，13aB-1，p.193. 2006.9.13(松江市)

・森本隼人，宮城大輔，高橋則雄「永久磁石モータの焼きばめが鉄損に与える影響についての検討」平成18年度電気・情報関連学会中国支部連合大会，No.4-18，p.447. 2006.10.21(岡山市)

・財前善明，松岡克典，宮城大輔，高橋則雄

「電磁鋼板の厚さ方向圧縮力が磁気特性に及ぼす影響の検討」平成18年度電気・情報関連学会中国支部連合大会，No.16-3，p.3. 2006.10.21(岡山市)

・高橋則雄「電気・電子機器の実動作状態解析のためのモデリング並びに関連トピックス」電気学会電磁界理論研究会資料，EMT127，pp.59-64. 2006.10.27(松江市)

・財前善明，大原元宏，柚木泰志，松岡克典，中野正典，宮城大輔，高橋則雄

「厚さ方向の圧縮力が電磁鋼板の磁気特性に及ぼす影響-単板磁気試験器を用いた検討」電気学会マグネティックス・回転機合同研究会資料，MAG-06-124，RM-06-108，pp.35-40. 2006.11.8(大津市)

〔図書〕(計1件)

・高橋則雄，技術情報協会，「最新版 カラーエレクトロニクス技術全集」，pp. 288-303，2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 則雄 (TAKAHASHI NORIO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：40108121

(2) 研究分担者

宮城 大輔 (MIYAGI DAISUKE)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：10346413