

PMSM の鉄損直接測定と電磁界解析の比較

秋月 海輝*, 藤田 稔之, 藤本 博志 (東京大学),
中川 倫博, 山下 尚也, 宮島 孝幸, 安田 善紀, 山際 昭雄 (ダイキン工業)

Comparison of iron loss direct measurement results with electromagnetic field analysis in PMSM

Kaiki Akizuki*, Toshiyuki Fujita, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

Michihiro Nakagawa, Naoya Yamashita, Takayuki Miyajima, Yoshiki Yasuda, Akio Yamagiwa (DAIKIN INDUSTRIES)

Abstract

Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs) are employed for many industrial applications. However, magnetic flux density in the iron core is high, and iron loss generated in the magnet and the iron core is dominant in PMSM, it is important to reduce iron loss for achieving higher efficiency. This paper proposes a method for comparing experimental results by H-coil method, which enables direct measurement of motor iron loss occurred in the teeth and back yoke, with analysis results by JMAG, an electromagnetic field analysis software provided by JSOL, based on results obtained during PI (Proportional Integral) control.

キーワード：永久磁石同期モータ, H コイル法, 電磁界解析, 鉄損

(Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM), H-coil method, electromagnetic field analysis, iron loss)

1. はじめに

近年, 地球温暖化対策が求められており, それに伴い, 省エネ技術の必要性も高まっている. 国際エネルギー機関 (IEA) によると, 2023 年時点で世界電力使用量の 65%がモータに由来していると報告されている⁽¹⁾. 省エネ性能向上に期待できるモータの一種として永久磁石同期モータ (PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor) が挙げられる. PMSM は回転子に永久磁石を使用したもので, 高出力, 高効率, 制御性や保守性に優れるといった利点からエアコン等の家電製品をはじめ, 電気自動車や産業用機器など広い分野で用いられている. しかし, 適用範囲の拡大や産業機器としての長時間稼働などの用途を考えると, 環境負荷軽減のためにさらなる高効率運転の達成が求められる.

PMSM で発生する損失には, 巻線の抵抗成分に起因して発生する銅損, 鉄心及び磁石部分で発生する鉄損, 回転の摩擦に起因して発生する機械損の主に三種類が存在し, PMSM の損失低減手法に関して様々な研究が長年数多くされている. その中でも PMSM では, 鉄心の磁束密度が高くなればなるほど, 鉄損が支配的となるため, さらなる高効率化には鉄損低減が重要であると考えられる. 高効率運転を達成する制御手法として, 最大トルク/電流 (MTPA: Max Torque Per Ampere) 制御が挙げられる⁽²⁾. この手法では銅損最小化を満たす dq 軸電流指令値を生成しているが, 鉄損を考慮していないため, 必ずしも最大効率を保証するものではないと考えられる. 鉄損に関しても多くの研究が存在し, 鉄損の解析や算出方法に関しては, モータの巻線構造に着目してヒステリシス特性や渦電流の考慮の有無によるモータ特性を有限要素法によって解析した研究⁽³⁾ や電磁鋼板における表皮効果と磁気飽和が回転機の鉄損測定に与える影響について考察した研究⁽⁴⁾, IPMSM において発生する鉄損を算出するための回路モデルを構築し, その妥当性を検証した研究⁽⁵⁾ などが挙げられる. 鉄損低減に関しては, 従来の等価鉄損モデルを

拡張して高調波成分まで考慮した等価鉄損モデルを提案し, そのモデルに基づいて最適効率を満たす電流位相を検討した研究⁽⁶⁾ や五次調波重畳 PWM 制御によって, 鉄損を低減させることに成功した研究⁽⁷⁾, 磁気飽和現象に着目し, 可変界磁 IPMSM において変調電流の最適化を検討した研究⁽⁸⁾ や鉄損が大きい高速領域に着目し, 鉄損を低減させることが可能なパルスパターン生成方法を検討した研究⁽⁹⁾ などが挙げられる.

著者らは, 鉄損について注目し, モータ内部の磁界強度及び磁束密度を H コイル法を用いることで直接的に計測し, 一般的な電流制御手法として知られている PI (Proportional Integral) 制御と入力電流に含まれる高調波の抑制を目的とした繰り返し完全追従制御 (RPTC: Repetitive Perfect Tracking Control) を適用した際のティースの一部分で生じる鉄損の比較を BH 曲線を用いて行った⁽¹⁰⁾. しかし, H コイル法の実験結果を電磁界解析によるシミュレーション結果と比較するための研究は存在せず, 実験結果の妥当性の議論に欠ける. 本論文では, PI 制御時に H コイル法によって得られた鉄損の測定結果を電磁界解析によるシミュレーションと比較するための手法を検討した. 第 2 章では解析条件と実験条件について述べ, 第 3 章では解析結果と実験結果について述べる.

2. 実験条件と解析条件

図 1 に PMSM の電流制御において一般的に用いられる PI 制御のブロック線図を示す. PI 制御器は (1) 式に示すようにインダクタンス L , 電機子抵抗 R , 時定数 τ を用いて極零相殺により設計したものである. (1) 式の PI 制御器を持つ閉ループ伝達関数は (2) 式のように 1 次遅れ系で表せる.

$$C_{PI}(s) = \frac{Ls + R}{\tau s} \dots \dots \dots (1)$$

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \dots \dots \dots (2)$$

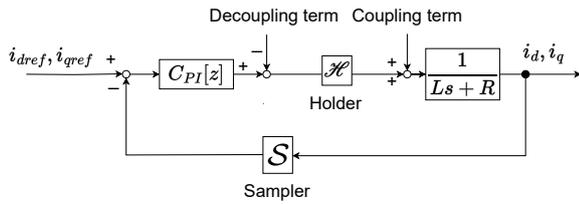


図1 一般的な電流制御 (PI 制御)

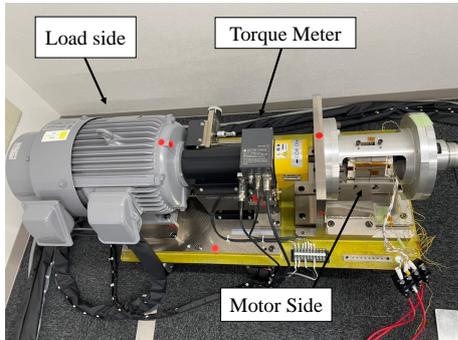


図2 実験環境

表1 IPMSM の実験パラメータ

パラメータ	値
d 軸インダクタンス L_d [mH]	11.2
q 軸インダクタンス L_q [mH]	21.2
電機子抵抗 R [Ω]	0.380
永久磁石鎖交磁束 ψ_a [Wb]	0.107
極対数 P_n	2
時定数 τ [ms]	1
制御周期 T_s [ms]	0.1
基本波周期 T [ms]	10
直流電源 V_{dc} [V]	250

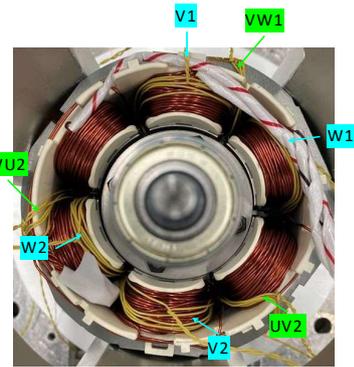


図3 測定箇所

表2 H コイルとサーチコイルのパラメータ

パラメータ	値
真空の透磁率 μ_0 [H/m]	$4\pi \times 10^{-7}$
H コイル断面積 S_H [m ²]	3.2×10^{-6}
H コイル巻き数 N_H	200
H コイル信号 e_H [V]	
磁性体断面積 S_B [m ²]	8.76×10^{-4}
サーチコイル巻き数 N_B	5
サーチコイル信号 e_B [V]	
磁性体体積 V [m ³]	1.46×10^{-5}

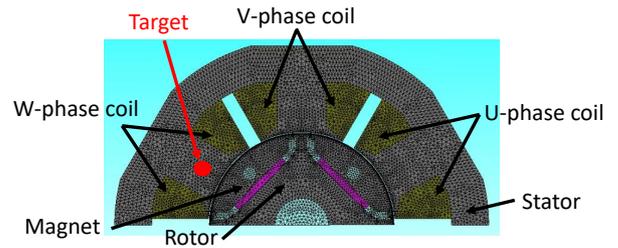


図4 解析用 D1 モデルとプローブ位置

表3 解析諸元

パラメータ	値
要素数	15642
節点数	8278
時間ステップ数	2000

本論文では、PI 制御時の実験結果、解析結果について述べる。

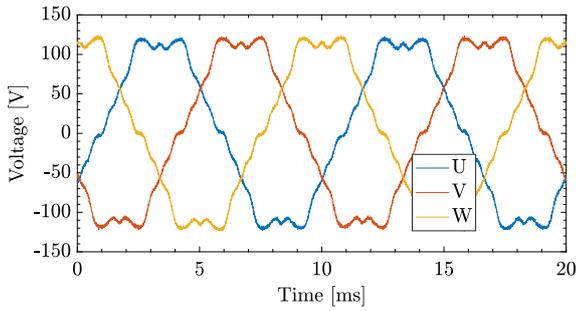
〈2・1〉 実験条件 本実験で使用するモータベンチを図2に、IPMSM の実験パラメータを表1に示す。本論文では、図3に示す測定箇所のうち、ティースの一部分に相当するW1部分についてHコイル法で測定及び評価を行う。Hコイル法に用いる各コイルのパラメータを表2に示す。表2のパラメータを用いて、磁界強度、磁束密度の計算をそれぞれ(3)式、(4)式で行い、基本波周波数に対して奇数次成分のみを残してそれ以外の成分を除去し、逆フーリエ変換を行う。周波数処理後に得られた磁界強度及び磁束密度を用いて、鉄損を(5)式で算出する。なお、回転数は3000 rpm (基本波：100 Hz) とし、dq軸電流指令値は $i_d = 0$ A, $i_q = 6.6$ A とした。出力トルクは1.51 Nmであった。

$$H = \frac{1}{\mu_0 S_H N_H} \int_0^T e_H dt \dots \dots \dots (3)$$

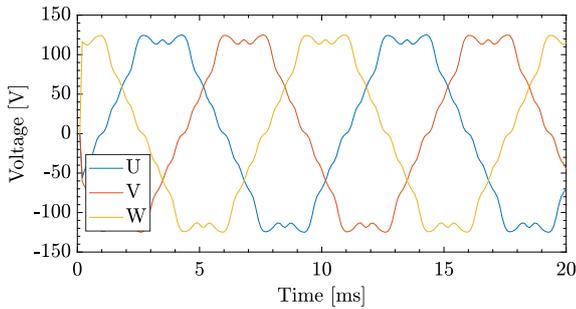
$$B = \frac{1}{S_B N_B} \int_0^T e_B dt \dots \dots \dots (4)$$

$$P = fV \int_0^T H \frac{dB}{dt} dt \dots \dots \dots (5)$$

〈2・2〉 解析条件 集中巻IPMSMのベンチマークモデル(D1モデル)の電磁界解析シミュレーションを行うにあたって、JSOLが提供しているJMAG-Designerを使用する。図4に使用する解析モデルを示す。解析モデルは実験機と同じ固定子と回転子の寸法を持つものであり、計算負荷軽減のために2分の1サイズのモデルとしている。材料部分に関しては、磁石はNMX-39EHで、鉄心は、電磁鋼板35A300で構成されていると想定し、JMAG-Designer ver.22に搭載されている材料データを用いた。観測にあたって、図4に示すようにW相のティース部分に対してBHプローブを用いることで周方向のBHループを観測する。また、解析諸元は表3のように設定した。モデルの妥当性を確認するために、図5に示すような無負荷誘起電圧波形から永久磁石鎖交磁束を算出し、表4に示すように実験値と解析値がほぼ一致してい



(a) 無負荷誘起電圧の実験結果



(b) 無負荷誘起電圧の解析結果

図 5 無負荷誘起電圧波形

表 4 永久磁石鎖交磁束の実験値と解析値の比較

パラメータ	実験値	解析値
永久磁石鎖交磁束	0.107 Wb	0.110 Wb

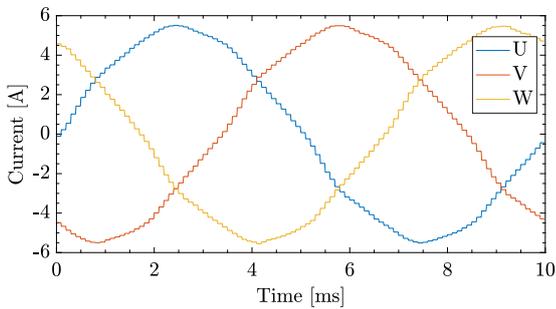


図 6 PI 制御時の三相交流電流波形

ることを確認した。鉄心部分の渦電流損の時系列データを解析に含めると計算時間が大幅に増大すると考え、本論文では、ヒステリシス損失のみを考慮した解析を行う。解析にはPI制御実験で得られた三相交流電流波形のデータを利用する。図6にPI制御時の三相交流電流波形を示す。これらの電流データは100kHzのサンプリング周波数によって得られたものであり、解析には電気角1周期分の電流データを使用するため、データ個数は1000個とした。また、ステップ数は、機械角1周期分の解析を行うために表3に示すように2000と設定した。なお、図6の三相交流電流を用いた解析を行うにあたり、必要とされた解析時間は約4.5時間であり、解析後に出力されたトルク波形は図7のようになった。

3. 実験結果と解析結果

図8に実験結果と解析結果をそれぞれ示す。図8(a)はH

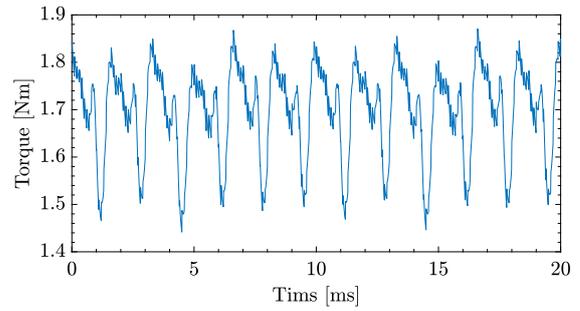
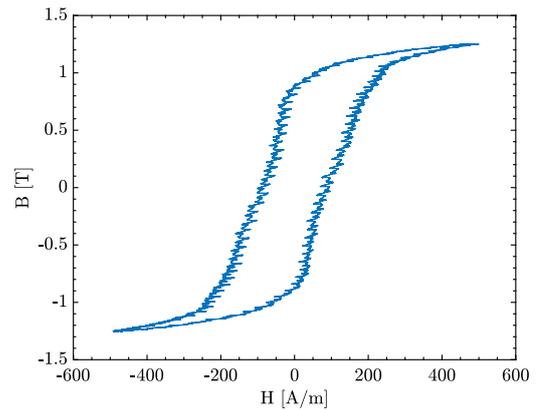
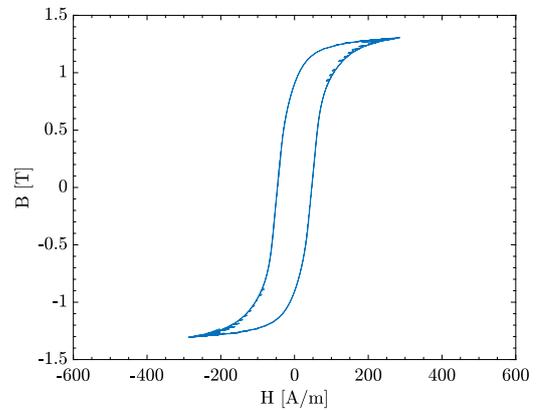


図 7 電磁界解析シミュレーションで得られたトルク波形



(a) H コイル法によって得られた BH 曲線の測定結果 (ヒステリシス損+渦電流損)



(b) 電磁界解析シミュレーションによって得られた BH 曲線 (ヒステリシス損のみ)

図 8 実験結果と解析結果の BH 曲線の比較

表 5 図 8 を (5) 式を用いて計算した結果

制御手法	実験値	解析値
PI	0.6420 W/kg	0.3184 W/kg

コイル法によって得られた BH 曲線の測定結果を、図 8(b) は電磁界解析シミュレーションによって得られた BH 曲線の解析結果を示す。さらに、表 5 に図 8 を (5) 式を用いて計算した結果を示す。BH 曲線で囲まれた面積が局所的な鉄損値に等しい。本論文の電磁界解析シミュレーションでは、前述し

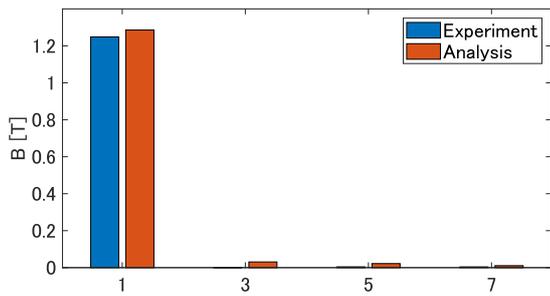


図9 磁束密度の実験値と解析値のFFT結果

たようにヒステリシス損のみを考慮しており、渦電流損については考慮されていないが、図8より実験結果のBH曲線が解析結果のBH曲線に比べて面積が大きいことが視覚的に、表5より実験結果の方が鉄損値が大きいことが定量的にも確認でき、これは渦電流損による差分であると考えられる。

また、解析の妥当性を確かめるために、磁束密度の実験値と解析値の比較を行う。図9に磁束密度の実験値と解析値のFFT結果を示す。図9より実験値と解析値がある程度一致していることが確認できる。これらの結果が得られた要因として、電流のサンプル数に応じたステップ数の設定が挙げられる。多少の誤差が発生している原因としては、本論文で評価しているW相部分は圧延方向に対して60度ずれている測定箇所であり、材料の磁気異方性を考慮していない点が挙げられる。そのため、電磁界解析シミュレーションにおいて磁気異方性を考慮した材料データに変更することで、さらなるヒステリシスループの改善が見込める。

4. まとめ

本論文では、Hコイル法の実験結果の妥当性を評価するために電磁界解析によるシミュレーション結果との比較手法について検討した。実験結果と解析結果の比較から、実験結果を渦電流損とヒステリシス損に切り分けることができ、解析精度の妥当性も確認することができた。

文 献

- (1) International Energy Agency: “World Energy Outlook 2023”, World Energy Outlook 2023 (windows.net)
- (2) T. Inoue, Y. Inoue, S. Morimoto, M. Sanada: “Maximum Torque per Ampere Control of a Direct Torque-Controlled PMSM in a Stator Flux Linkage Synchronous Frame”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.52, No.3, pp.2360–2367, 2016.
- (3) 北尾 純士, 高橋 康人, 藤原 耕二, 阿波 根明, 松尾 哲司, 大穀 晃裕: 「永久磁石同期電動機のヒステリシス特性を考慮した有限要素法解析」, 電気学会論文誌 D, Vol.139, No.5, pp.513-522, 2019.
- (4) 山崎 克巳, 谷田 誠, 里見 倫: 「電磁鋼板の渦電流を考慮した回転機の損失解析」, 電気学会論文誌 D, Vol.128, No.5, pp.1298-1307, 2008.
- (5) N. Minowa, Y. Takahashi, K. Fujiwara: “Iron Loss Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Using Dynamic Hysteresis Model Represented by Cauer Circuit”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.55, No.6, pp.1-4, 2019.

- (6) A. Balamurali, A. Kundu, Z. Li and N. C. Kar: “Improved Harmonic Iron Loss and Stator Current Vector Determination for Maximum Efficiency Control of PMSM in EV Applications”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.57, No.1, pp.363-373, 2021.
- (7) 成瀬 賢哉, 藤崎 敬介, グエン・ザー・ミン・タオ: 「五次調波重畳 PWM 制御によるモータ駆動システムの損失低減」, 電気学会論文誌 D, Vol.143, No.4, pp.273-280, 2023.
- (8) K. Iwama, T. Noguchi: “High-Efficiency Drive Method of Adjustable Field IPMSM Utilizing Magnetic Saturation”, IEEE ACCESS, Vol.10, pp.1254999-125508, 2022.
- (9) 熊谷 崇広, 伊藤 健, 西川 滉大, 伊東 淳一, 山根 和貴, 山田 伸明, 名和 政道: 「高速 IPMSM における最適パルスパターンによるステータ鉄心の鉄損低減」, 電気学会論文誌 D, Vol.141, No.4, pp.313-323, 2021.
- (10) 秋月 海輝, 藤田 稔之, 永井 栄寿, 藤本 博志, 中川 倫博, 山下尚也, 宮島 孝幸, 安田 善紀, 山際 昭雄: 「PMSM における低次高調波電流抑制時の H コイル法による鉄損評価」, 電気学会モータドライブ・回転機・自動車研究会, MD-23-078 RM-23-046 VT-23-008, pp. 39-44, 2023.