

## リング試験における鉄損低減を目的とした電流三次高調波位相制御の基礎検討

秋月 海輝\*, 藤本 博志 (東京大学), 藤田 稔之 (芝浦工業大学), 藤崎 敬介 (豊田工業大学),  
中川 倫博, 宮島 孝幸, 安田 善紀, 山際 昭雄 (ダイキン工業)

Basic Study on Third-Harmonic Current Phase Control for Iron Loss Reduction in Ring Tests

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

Toshiyuki Fujita (Shibaura Institute of Technology)

Keisuke Fujisaki (Toyota Technological Institute)

Michihiro Nakagawa, Takayuki Miyajima, Yoshiki Yasuda, Akio Yamagiwa (Daikin Industries)

### Abstract

PMSMs are widely used due to their high output power density and high efficiency. It is necessary to clarify the iron loss mechanism and establish iron loss optimization control methods which consider the nonlinear behavior of magnetic material for enhancing their efficiency. This paper investigates the influence of third-harmonic current phase on iron loss under motor operating conditions. The results demonstrate that setting the third-harmonic current phase to 60 degrees achieves a 6.84% reduction in iron loss compared with conventional sinusoidal voltage control.

**キーワード:** 永久磁石同期モータ, リング試験, 三次高調波電流制御, 鉄損

(Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM), ring test, third-order harmonic currents control, iron loss )

### 1. はじめに

近年, 地球温暖化対策の観点から電動化が進展している。国際エネルギー機関 (IEA: International Energy Agency) によると, 2023 年時点で電動機システムは世界の電力消費の大部分を占めており, 特に産業分野における電力消費に占める割合は 72% であると報告されている<sup>(1)</sup>。

省エネルギー性能の向上に期待されるモータの一つ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ており, 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家電製品や電気自動車, 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運転を考慮すると, さらなる高効率運転の実現が求められる。

PMSM で発生する損失は主に, 巻線で発生する銅損, 回転の摩擦によって発生する機械損, 鉄心及び磁石部分で発生する鉄損の三種類に分類される。PMSM の損失のモデル化や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。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<sup>(2)</sup>。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<sup>(3)</sup> 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<sup>(4)</sup>, 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<sup>(5)</sup>, 固定子反作用磁束のみが鉄損を発生するという前提のもと, 新たな数学モデルやベクトルシミュレータを提案し, その妥当性を検証した研究<sup>(6)</sup> などが挙げられる。

鉄損低減に関しては, 高速運転時の高出力密度化を目的として, アモルファス金属を用いたモータ設計手法を検討した研究<sup>(7)</sup> や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<sup>(8)</sup> 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<sup>(9)</sup>, 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<sup>(10)</sup> 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<sup>(11)</sup> などが挙げられる。

著者らは, モータ内部の磁界強度及び磁束密度を H コイル法<sup>(12)</sup> を用いることで直接的に計測し, ティースの一部で生じる鉄損の比較を BH 曲線で評価している。提案する不平衡三次高調波電流注入制御により, 一般的な電流制御手法として知られている比例積分 (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) と比較して局所的な鉄損低減効果を実験的に確認した<sup>(13)</sup>。また, モータ応用を想定した単相リング試験において, 電圧/電流正弦波励磁及び基本波に対して 6 分の 1 の振幅を持つ三次高調波成分を同位相で注入した電圧/電流台形波励磁下の鉄損比較を行った<sup>(14)</sup>。結果として, 磁束密度の基本波振幅が低い領域では電流台形波制御, 磁束密度の基本波振幅が高い領域では電流正弦波制御が有効性を示した。しかし, 注入する三次高調波電流の振幅及び位相は固定されており, さらなる鉄損低減に対して改善の余地がある。

本論文では, 単相リニアアンプ励磁リング試験に焦点を当

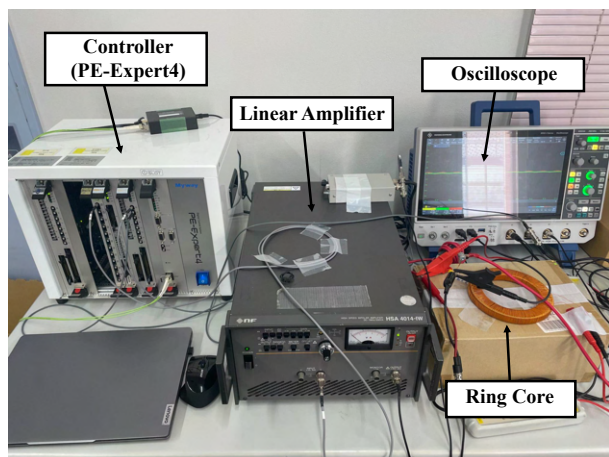


図1 単相リニアアンプ励磁リング試験システム

表1 リングコアの仕様値

| パラメータ          | 値                    |
|----------------|----------------------|
| 平均磁路長 $l$      | 0.36 m               |
| 実効断面積 $S$      | 87.5 mm <sup>2</sup> |
| 一次コイル巻き数 $N_1$ | 254                  |
| 二次コイル巻き数 $N_2$ | 254                  |

て、注入する電流三次高調波位相変化に伴う鉄損への影響を評価する。第2章では本リング試験の概要について述べ、第3章ではリニアアンプ励磁下のリング試験の実験結果について述べる。

## 2. リング試験

図1に本研究で使用する単相リニアアンプ励磁リング試験のシステムを示す。リングコアのパラメータは表1に示すものである。リングコアの電磁鋼板の材料として、35H300が使われている。1次側の励磁電流  $I_1$  と2次側の誘起電圧  $V_2$  を測定し、磁界強度  $H$  と磁束密度  $B$  がそれぞれ以下の式で算出される。

$$H = \frac{N_1 I_1}{l} \quad (1)$$

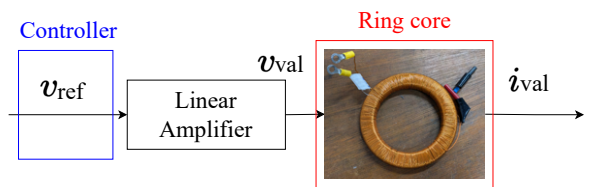
$$B = \frac{1}{N_2 S} \oint V_2 dt \quad (2)$$

以上より、リングコアで発生する鉄損  $P_{iron}$  は(3)式で算出される。

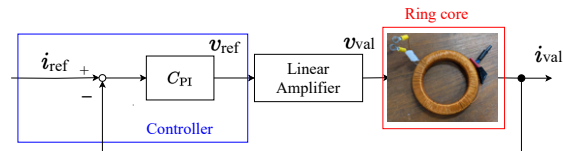
$$P_{iron} = \oint B dH \quad (3)$$

## 3. 電流三次高調波位相変化に伴う鉄損への影響

〈3・1〉 制御手法と実験条件 従来は磁束密度波形が正弦波となるように、指令値を(4)式のように与える電圧正弦波制御がリング試験の評価に用いられてきた。 $A_{vsin}$ は電圧正弦波制御の基本波振幅である。しかし、磁性体が持つ非線形性を考えると、鉄損にとって妥当な制御手法とは言い切れない。そこで、本論文では(5)式に示すように、電圧正弦波制御に対して電流三次高調波位相制御を比較する。 $A_{i3rd}$ は電流三次高調波位相制御の基本波振幅であり、電流三次高調波振幅は基本波振幅の6分の1とする。また、 $\theta_{3rd}$ は電流高調



(a) 電圧制御ブロック線図



(b) 電流制御ブロック線図

図2 各制御ブロック線図

表2 実験パラメータ

| パラメータ                      | 値                                |
|----------------------------|----------------------------------|
| 抵抗値 $R$                    | 0.36 $\Omega$                    |
| インダクタンス $L$                | 3.0 mH                           |
| 制御器設計パラメータ $\omega_{pole}$ | $2 \times \pi \times 1000$ rad/s |
| 基本波周波数 $f$                 | 50 Hz                            |
| 制御周期 $T_s$                 | 100 $\mu$ s                      |

波の位相角であり、本検討では0度から330度まで30度刻みで比較実験を行う。

$$v_{sin} = A_{vsin} \sin \omega t \quad (4)$$

$$i_{3rd} = A_{i3rd} \sin \omega t + \frac{A_{i3rd}}{6} \sin(3\omega t + \theta_{3rd}) \quad (5)$$

図2は制御ブロック線図であり、図2(a)は電圧制御のブロック線図を、図2(b)は電流制御のブロック線図を示している。(4)式で示される電圧は図2(a)において指令値として入力され、(5)式で示される電流は図2(b)において指令値として入力される。指令値はコントローラから100 kHzのサンプリング周波数でデジタル-アナログ変換されている。実験パラメータは表2に示すものである。PI制御器は極配置法によって設計され、比例ゲイン  $k_p$  および積分ゲイン  $k_i$  は(6)式にて決定された。 $L$ はインダクタンス、 $R$ は抵抗値、 $\omega_{pole}$ は極である。

$$k_p = 2\omega_{pole}L - R, k_i = \omega_{pole}^2 L \quad (6)$$

なお、比較にあたっては、モータのトルク一定条件を想定し、磁束密度の基本波成分が各制御手法で一致する、つまり、2次側誘起電圧  $V_2$  の基本波振幅が一致するように  $A_{vsin}$ 、 $A_{i3rd}$  をそれぞれ調整する。本論文では、磁束密度の基本波成分が0.9 Tになるように調整を行った。

〈3・2〉 リングコアにおける鉄損測定結果 図3に磁束密度基本波振幅0.9 Tにおける鉄損測定結果を示す。横軸は三次高調波の電流位相、縦軸は各制御手法適用時の電圧正弦波制御(従来法)に対する鉄損比率を表しており、1より大きければ従来法より増加、1より小さければ従来法より低減を意味している。図3より、電流三次高調波位相制御の結

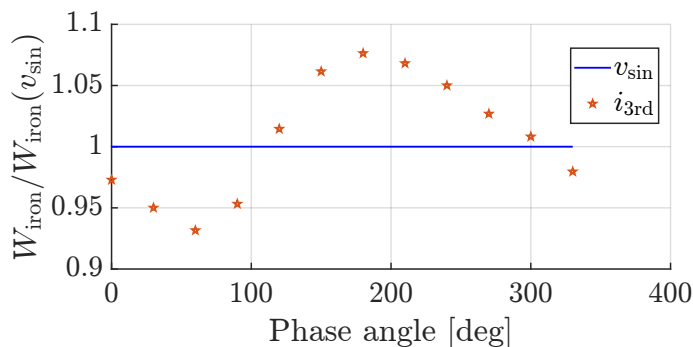


図3 磁束密度基本波振幅 0.9 T における各位相に応じた鉄損特性の変化

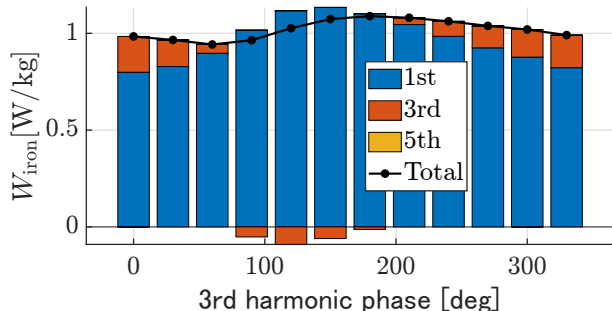


図4 各電流三次高調波位相に対する鉄損の周波数解析

果に注目すると、60度で極小値（最小値）、180度で極大値（最大値）となっており、60度の鉄損値は従来法と比較して、鉄損が6.84%低減した。

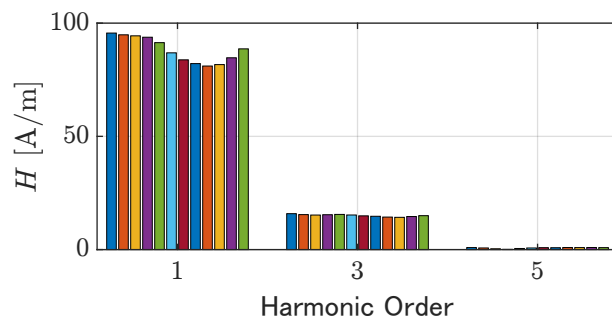
この要因を明らかにするために、鉄損の周波数解析を行う。磁界強度（ $H$ ）および磁束密度（ $B$ ）はそれぞれ(7)式、(8)式のように5次成分まで考慮される。それらの数式を用いて、各高調波成分に起因する鉄損は(9)式で表せる。(9)式より各次数成分の鉄損に寄与するのは同じ次数の高調波成分のみであることが分かる。

$$H_{\text{iron}} = \sum_{k=1,3,5} H_k \sin(k\omega t + \theta_{Hk}) \dots \dots \dots (7)$$

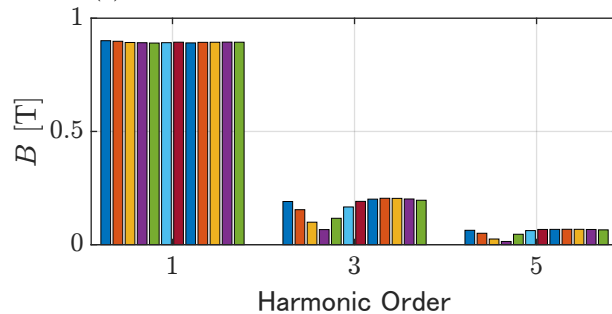
$$B_{\text{iron}} = \sum_{k=1,3,5} B_k \sin(k\omega t + \theta_{Bk}) \dots \dots \dots (8)$$

$$W_{\text{iron}} = \frac{\omega}{2} \sum_{k=1,3,5} k H_k B_k \sin(\theta_{Hk} - \theta_{Bk}) \dots \dots \dots (9)$$

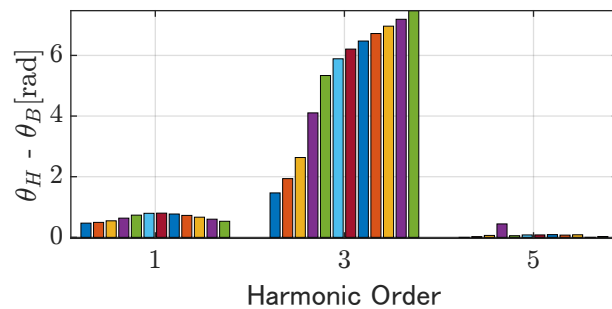
図4に各電流三次高調波位相に対する鉄損の周波数解析結果を示す。横軸は電流三次高調波位相角を、縦軸は鉄損値を示している。図4に注目すると、鉄損に大きく寄与しているのは基本波成分と3次高調波成分であることが分かり、5次成分は無視できるほど小さい。また、基本波成分に起因する鉄損は150度で極大値をとり、90度から180度においては3次高調波鉄損の値が負になっていることが分かる。鉄損の値が負であるということは磁界強度（ $H$ ）及び磁束密度（ $B$ ）の三次高調波成分が全体鉄損を低減しているという意味である。これより、基本波鉄損を低減させつつ、三次高調波鉄損を抑えることが重要であることが確認され、本検討ではその



(a) 磁界強度（ $H$ ）のフーリエ変換結果（振幅）



(b) 磁束密度（ $B$ ）のフーリエ変換結果（振幅）



(c) 磁界強度（ $H$ ）と磁束密度（ $B$ ）の位相差

図5 各フーリエ変換結果

最適点が60度であることが分かった。

さらにこの傾向を考察するために、図5に各フーリエ変換結果を示す。図5(a)は磁界強度（ $H$ ）の振幅のフーリエ変換結果を、図5(b)は磁束密度（ $B$ ）の振幅のフーリエ変換結果を、図5(c)は各次数成分における磁界強度（ $H$ ）と磁束密度（ $B$ ）の位相差を示している。なお、各次数成分において左から順に0度から330度までの結果を示している。

図5(c)に注目すると、各電流三次高調波位相に応じて磁界強度（ $H$ ）と磁束密度（ $B$ ）の基本波成分の位相差も変化していることが分かる。これより図4における鉄損の基本波成分の変化と磁界強度（ $H$ ）と磁束密度（ $B$ ）の基本波成分の位相差の変化に強い相関があることが確認できる。また、3次高調波鉄損を考えるにあたって、図5(a)に注目すると、どの位相角においても磁界強度（ $H$ ）の3次高調波成分の振幅はほぼ同じである。そのため、図5(b)と図5(c)からも分かるように3次高調波鉄損に影響を与えているのは、3次高調波磁束密度（ $B$ ）の振幅と磁界強度（ $H$ ）と磁束密度（ $B$ ）の位相差であることが分かる。

#### 4. まとめ

本論文では、電流三次高調波位相の変化が鉄損に与える影響を評価するために従来法の電圧正弦波制御との比較を行っ

た。電流三次高調波位相制御では、3次高調波電流位相を0度から330度まで30度刻みで変化させ、今回の注入手法においては60度ずらした場合に最も鉄損が低減し、従来法である電圧正弦波制御と比較して鉄損が6.84%低減した。また、フーリエ変換結果から基本波鉄損を低減させるには磁界強度( $H$ )と磁束密度( $B$ )の基本波位相差を小さくすること、3次高調波鉄損を抑えるには、3次高調波磁束密度( $B$ )の振幅と磁界強度( $H$ )と磁束密度( $B$ )の位相差を考慮することが重要であることを示した。結論として、適切な電流三次高調波位相を選択することで基本波鉄損と三次高調波鉄損のトレードオフ最適化が可能であることを示した。

今後はPMSMにおいても同様の手法を適用した場合についても確認する。また、他の三次高調波振幅、または他の次数成分を制御することでさらなる鉄損低減を検討する。

## 文 献

- (1) IEA 4E Electric Motor Systems Platform (EMSA), "Electric motor systems: why are they important?", Policy Brief #9, 2023.
- (2) S. Morimoto, Y. Shimizu, Y. Inoue, and M. Sanada: "Experimental Evaluation of the Online MTPA Angle Search Method Based on Flux-linkage Plane Estimation for IPMSMs", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.13, No.4, pp.400-408, 2024.
- (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) 新中 新二:「鉄損考慮を要する永久磁石同期モータの新規な数学モデルとベクトルシミュレータ」, 電気学会論文誌 D, Vol.144, No.12, pp.826-834, 2024.
- (7) Y. Enomoto, H. Yamakawa, and K. Ashida: "Increasing the Power Density of High-Speed Fan Drive Motors", *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol.14, No.2, pp.333-339, 2025.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) K. Iwama and T. Noguchi: "High-Efficiency Drive Method of Adjustable Field IPMSM Utilizing Magnetic Saturation", *IEEE Access*, Vol.10, pp.1254999-125508, 2022.
- (11) 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.
- (12) 中川 倫博, 北野 伸起, 小林 直人, 浅野 能成, 山際 昭雄:「インバータ励磁下における局所的な鉄損評価技術の開発(第1報)」, 電気学会回転機・リニアドライブ・家電民生合同研究会, RM-16-088 LD-16-096 HCA-16-055, pp. 39-44, 2016.
- (13) K. Akizuki, T. Fujita, H. Fujimoto, M. Nakagawa, N. Yamashita, T. Miyajima, Y. Yasuda, and A. Yamagiwa, "Study of Current Third-Order Harmonics Control to Reduce Iron Loss in Permanent Magnet Synchronous Motors", *2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2024, pp. 6252-6257.
- (14) K. Akizuki, T. Fujita, H. Fujimoto, K. Fujisaki, M. Nakagawa, T. Miyajima, Y. Yasuda, and A. Yamagiwa, "Iron Loss Comparison in Ring Test Excited by Linear Amplifier with Sinusoidal and Trapezoidal Voltage/Current Control Methods", *IEEE International Conference on Magnetics (INTERMAG2026)*, 2026, pp. 1-2.