

三次元磁路と非対称磁石配置をもつ 可変界磁 PM モータの運転特性評価

Evaluation of Operating Characteristics of Adjustable Field Magnetization PM Motors with 3D Magnetic Path and Asymmetric Magnet Arrangement

日吉 祐太郎 土井 康太朗 野口 季彦

本稿は、一般社団法人電気学会 2023年産業応用部門モータドライブ／回転機合同研究会において優秀論文発表賞を受賞したもので、同会の許可を得て転載したものです。

本論文の著作権は一般社団法人 電気学会に属し、無断複製・転載を禁じます。

要旨

本論文では、低回転動作における高トルクと、高回転動作における高効率な特性の両立が可能となる、3次元磁路構造と非対称な磁石配置のロータを有する可変界磁モータについて述べる。3次元 FEA (Finite Element Analysis) によって、高トルク密度の特性を維持しつつ可変界磁制御が可能であることを確認した。さらに、試作機に対し負荷試験を実施することで、高回転の動作において高効率な特性が得られることを検証した。

Abstract

This paper describes a three-dimensional structure of an adjustable field magnetization permanent magnet (PM) motor and a high-power density rotor structure with asymmetric permanent magnet arrangement for both high torque and high efficiency operation in the high speed and low torque range. 3D-FEA demonstrated that adjustable field magnetization operation is possible without sacrificing high torque density. Furthermore, load tests have confirmed that high efficiency characteristics can be achieved at high-speed operation.

1 はじめに

自動車主機用の電動モータに対する要求水準は日々上昇しており、特にエネルギー効率の高さと、出力密度への要求の高さは顕著である。経済産業省の2030年開発目標としては、「モーターシステムとして、85%以上の平均効率」「モータ単体出力密度:8.0kW/kg」を掲げている^[1]。モータ体積当たりの出力を向上するため、車載主機用モータを高回転化する試みがなされている^{[2][3]}。高トルク・高出力かつ高効率の特性を持ち、車載主機用のモータとして多く用いられる埋め込み磁石型同期モータ(IPMSM)においては、高回転領域での動作時に弱め界磁制御^[4]が一般に用いられるが、弱め界磁制御では、弱め界磁に必要な電流の分だけ損失が増大し、モータ効率が悪化するという課題がある。この課題の解決のため、回転数に応じて界磁強さが制御可能な、可変界磁モータが盛んに研究されている^{[5][6][7][8]}。筆者らはこれまでに、追加の界磁巻線を利用した3次元の磁路をもつ可変界磁モータを提案してきた^{[9][10]}。特に、非対称な磁石配置となる回転子を有することで、マグネットトルク・リラクタンストルクをとともに利用でき、高トルク密度・高

出力かつ可変界磁による高回転高効率のモータを提案した^[11]。本稿では、上記の3次元の磁路と非対称な磁石配置を有する可変界磁モータについて実機を製作し、実施した実負荷試験の結果を報告する。

2 モータ構造

2-1. モータ構造

図1に製作したモータの構造を示す。また表1へモータ諸元を示す。本モータはステータコア・ロータコアを軸方向へ2分割した構造となっている。ステータコア1、2に挟まれた空間へ界磁巻線を配置し、これに電流(以下、零相電流)を印加して生じた零相磁束によって強め界磁の効果を得る。図2へ示すように、零相磁束はロータコア1、ステータコア1、モータフレーム、ステータコア2、ロータコア2、ロータシャフトを順に通る3次元の磁路を流れる。

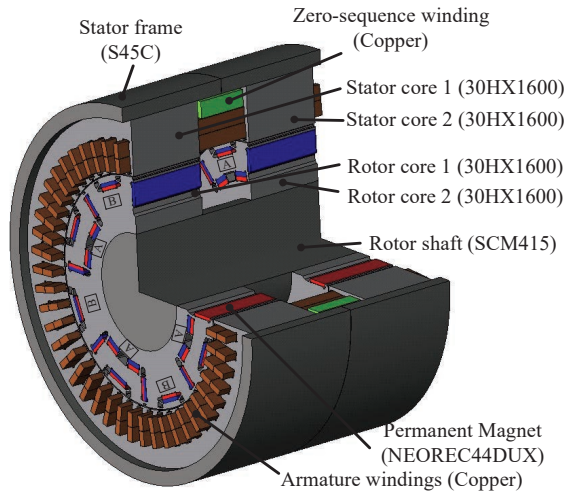


図1 Proposed motor model

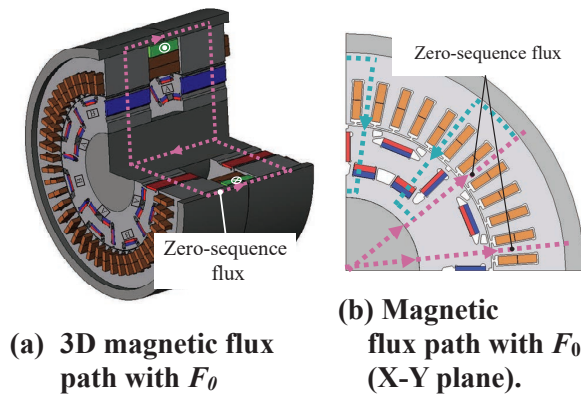


図2 Principle of adjustable field

表1 Specifications of proposed motor

Number of poles and slots	8 poles and 48 slots
Armature winding and resistance	8T-2P, star connection, 0.0209Ω
Zero-sequence winding and resistance	500T-2P, 8.83Ω
Stator frame outer diameter	φ152mm
Stator outer diameter	φ140mm
Rotor outer diameter	φ93mm
Rotor shaft diameter	φ46mm
Axial length	89mm
Maximum armature current and density	240A _{peak} , 24.2A/mm ²
Maximum DC link voltage	300V
Maximum zero-sequence current and density	4A _{dc} , 20.4A/mm ²
Maximum speeds	15000r/min
Cooling system	Water cooling

2-2. 可変界磁原理

ロータコアは磁極間で非対称な形状であり、周方向に磁石量の多い極、少ない極が交互に配置されている。また軸方向に分割されたロータコア1、ロータコア2は、一磁極分位相がずれている。図3の解析結果へ示す通り、零相電流の印加なき場合は磁極の非対称性から、エアギャップでの磁束密度分布は非対称となる。また、全て磁石量の多い極とした場合と比べ磁束密度分布の振幅が小さい。零相磁束を印加することで生じた零相磁束は、磁石が少なく磁気抵抗の小さい極へ集中するため、磁石量の少ない極の磁束を選択的に増加させることができる。増加した磁束によって磁束密度分布の対称性が得られると同時に、界磁全体としての磁束量が増加し、界磁を強めることができる。すなわち、零相電流の制御によって界磁を変化させ、可変界磁を実現する。

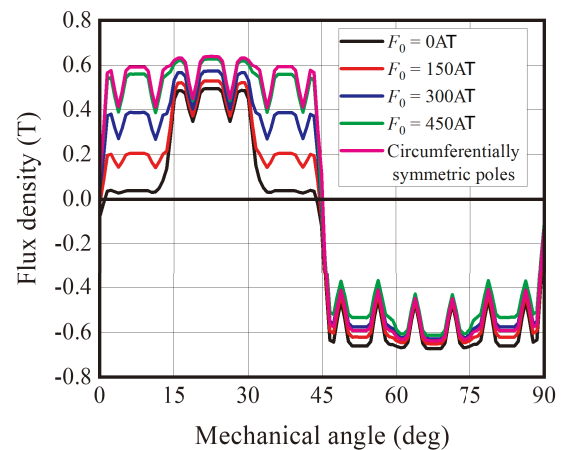


図3 Air gap magnetic flux density vs. F_0 under no-load condition

3 実機試験

3-1. 無負荷誘起電圧計測

提案モータについて、外力によりロータを回転させた際の三相線の電圧を計測する試験を行った。本試験では可変界磁効果を確認するため、零相巻線に安定化電源を接続し、任意の零相電流 I_0 を印加できるようにした。試験の様子を図4に示す。回転数は1,000rpmで固定とし、零相起磁力 F_0 は0、150、300、450、600AT を与えた。

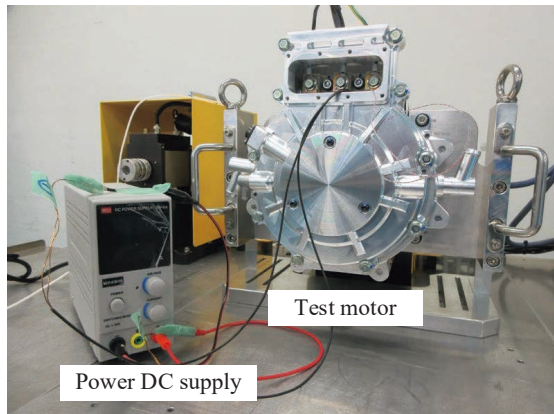


図4 Experimental setup

試験の結果を図5へ示す。零相起磁力の増加に伴い、線間誘起電圧の振幅が増加していることが分かる。無負荷誘起電圧 V は式(1)から与えられるため、電気角周波数 ω 一定の場合、零相起磁力によって鎖交磁束 ψ が変化している。すなわち、零相起磁力によって界磁の制御が行えていると言える。

$$V = \omega \psi$$

(1)

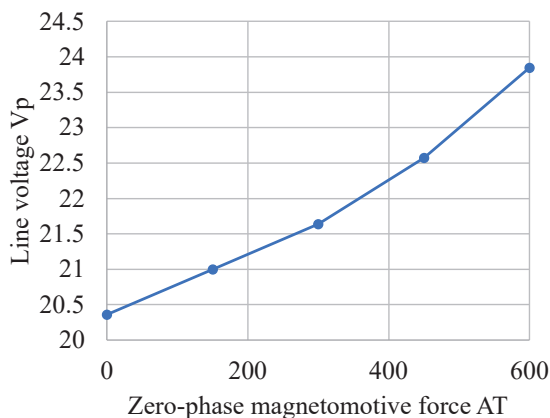
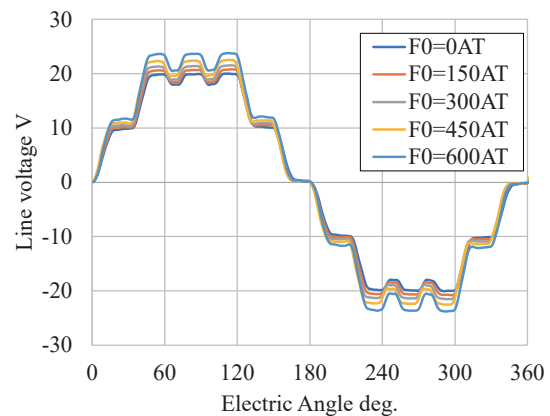


図5 Induced voltage vs. F0

3-2. 電流及び位相角感度確認のための負荷試験

提案モータについて、回転数、3相電流値、3相電流位相角、零相電流値を指定したうえで、軸トルクを計測する試験を行った。試験のパラメータを表2に示す。三相電流の印加には汎用インバータ pMOTION (Myway 社製) を利用し、零相電流の印加には安定化電源を使用した。

表2 Parameters in the test for measuring induced voltage

3-phase current A_{peak}	From 60 to 240, in increments of 20.
3-phase current phase angle deg.	From 0 to 90, in increments of 10.
Zero-phase current A_{dc}	0, 1, 2, 3, 4
Rotational speed rpm	1000

図6(a) (b) に三相電流 I_m 、・零相電流 I_0 条件ごとに、トルク最大となる三相電流位相角 β (以後最適進角 β) と、最適進角にて計測されたトルクを示す。提案モータの最大電流条件において、電流位相角 50deg. にて最大トルク 53.7Nm が確認できた。図6(c) に、各 I_m 、 I_0 条件下での $\beta = 0$ における電機子鎖交磁束 ψ を示す。 I_m の低い領域では I_0 の値に応じて ψ が大きく増減しているが、 I_m が増加すると ψ の変化は小さくなる。 I_m 由来の磁束によって、零相磁束の磁路が飽和してしまっているため、 I_m の大きな条件では I_0 由来の磁束が通らず ψ を増加させられなくなっていると考えられる。

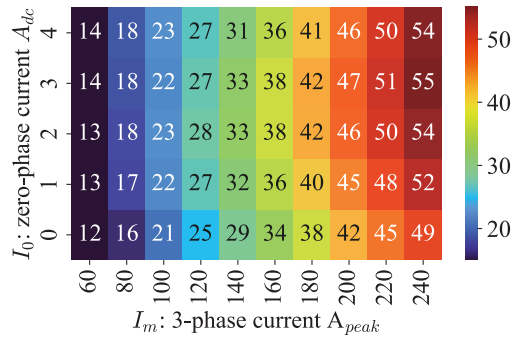
また飽和によって ψ 自体が低下しているため、 I_m の高い条件では式(2)に示す磁石トルク T_m が発揮しにくくなっている。図6(d) に、d 軸・q 軸インダクタンスを示す。 I_m の増加による磁気飽和の影響によって、モータインダクタンスが低下している。ただし L_d 、 L_q がともに減少するため、インダクタンス差 $L_d - L_q$ は極端に減少せず、式(3)に示すリラクタンストルク T_r を維持できている。

$$T_m = P_n \psi I_q \quad (2)$$

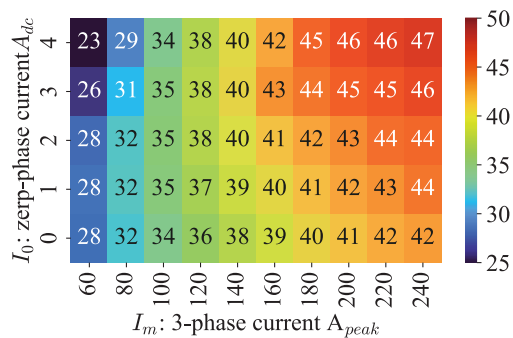
$$T_r = P_n (L_d - L_q) I_d I_q \quad (3)$$

図6(b) に示す最適電流進角の分布からも、高 I_m 条件においてリラクタンストルクが支配的になっていることが確認できる。

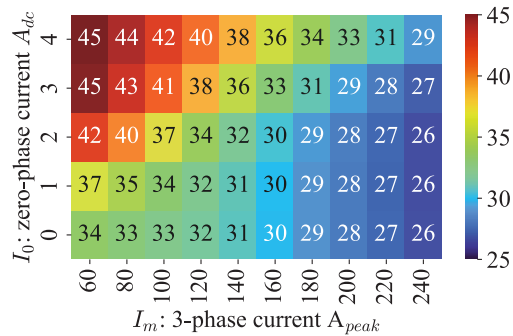
Evaluation of Operating Characteristics of Adjustable Field Magnetization PM Motors with 3D Magnetic Path and Asymmetric Magnet Arrangement



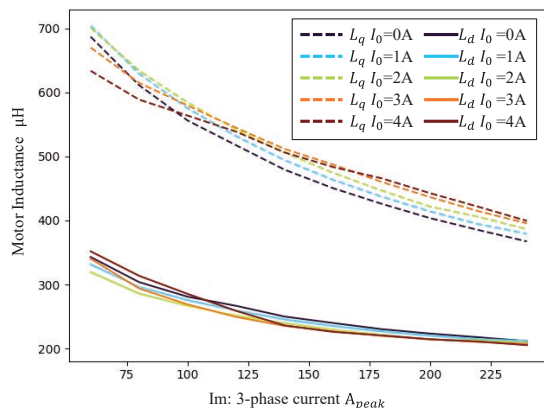
(a) Torque [Nm]



(b) β : Optimum current phase angle [deg.]



(c) ψ : Chained flux [mWb]



(d) Motor inductance vs. 3-phase current.

図6 Results of load tests

3-3. 各動作点における効率計測試験

提案モータについて、任意の回転数、三相電流値を設定したうえで、最もトルクが大きくなる零相電流値 I_0 、三相電流進角 β を探索し、最適な条件におけるモータ効率を計測する試験を行った。本試験の計測結果のうち、最も高い出力は36.7kW であり、回転数9,000rpm にて軸トルク39.0Nm が確認できた。軽自動車の主機としては最高出力30kW 程度が必要であるので^[12]、提案モータの出力は十分であると言える。図7に製作したモータの効率分布を示す。黒い四角は実測したポイントである。提案モータの電源条件において、最高効率は94.7% であり、最高効率点は13,000rpm・13.8Nm であった。 I_0 の低下により界磁を弱められるため、高回転域の効率が良く、最高効率点が13,000rpm と高回転である。

図8(a)–(d)に各種損失の分布を示す。図8(d)に示す「その他損失」には、鉄損、AC 銅損、機械損が含まれる。図8(b)に示すように、DC 銅損は高トルク域にて大きく、また図8(d)に示すように、その他損失は電流値およびモータ回転数に対して感度があり、高出力域で大きい。合計損失としては、両損失が重畳する N-T 線図の肩位置近傍において最も大きくなっている。最高回転数付近の領域では、零相電流の低減による界磁の弱まりと、零相電流自体の損失低減により、合計損失の値としては小さくなっている。図8(c)に示すように、9,000rpm 以下の条件においては I_0 はほぼ最大値となっているため、零相コイル銅損も同様にほぼ最大値で一定である。9,000rpm 以上の領域においては I_0 を低減させ、 ψ を低減させることで式(4)に示す誘起電圧を低減させている。図8(c)から、高回転域では I_0 の減少に伴い零相コイル銅損が低下していることが分かる。

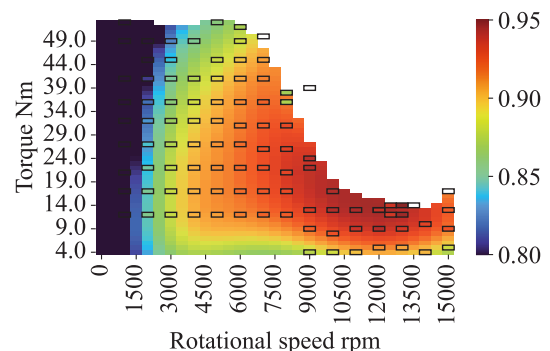


図7 Distribution of motor efficiency in the N-T diagram

Evaluation of Operating Characteristics of Adjustable Field Magnetization PM Motors with 3D Magnetic Path and Asymmetric Magnet Arrangement

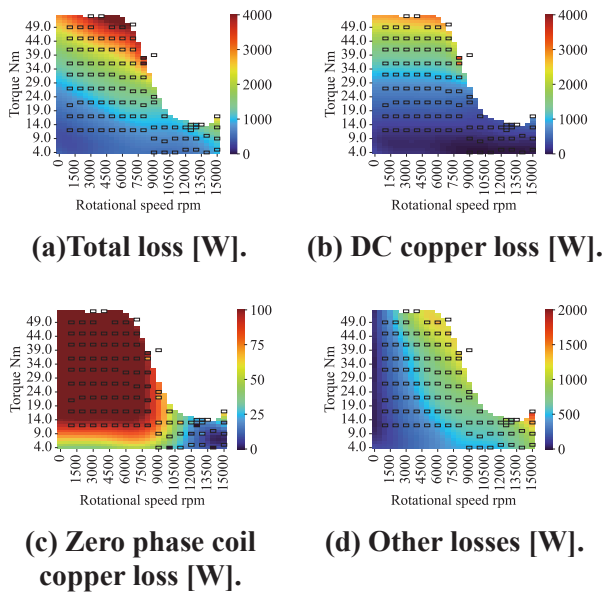


図8 Distribution of each loss

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega \psi \end{pmatrix} \quad (4)$$

実使用を想定した評価のため、図7に示す効率の分布に基づき、WLTC モード走行を仮定した際の平均効率を考える。

モード走行の前提として、車両のパラメータを車重746.4kg、タイヤ径0.6m、減速比1.0 : 12.0とした。

図9に WLTC class 3b に定められた走行パターンを示す。図10にモード走行をした場合の動作点と、各動作点におけるモータ損失を示す。低トルクおよび高回転領域では損失が少なく、高効率での走行ができていると言える。図11にモード走行中のモータ効率を示す。加減速のタイミングにてモータ効率が悪化しているが、中・高速運転中はモータ効率80%以上をとる期間が多く、モード走行を通した平均効率は84.4%であった。提案モータは、電力消費の激しい高速度域の運転において高効率の特性を持つため、モード走行基準では優位性があると考えられる。

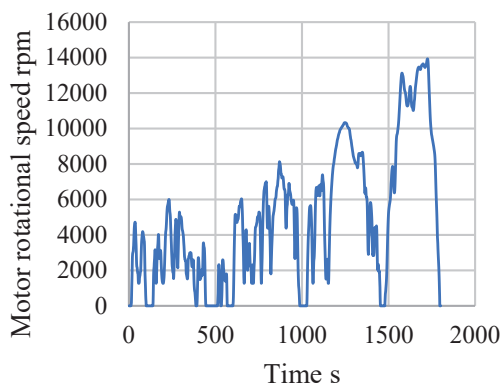


図9 Motor rotation speed [rpm] in WLTC Class 3B mode

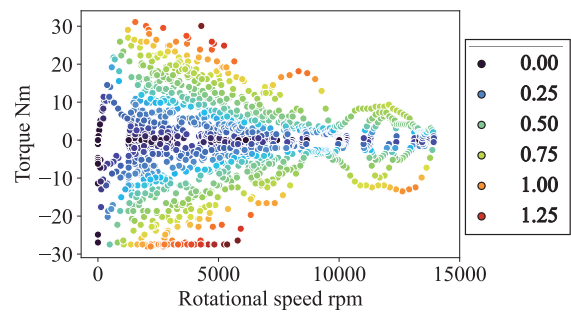


図10 Total motor loss [kW] for WLTC Class 3B driving

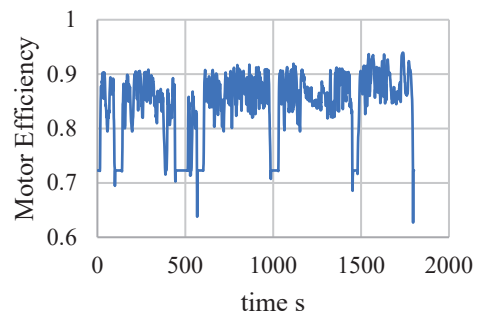


図11 Motor efficiency transition in mode driving

4 まとめ

本稿では、3次元の磁路と非対称な磁石配置を有する可変界磁モータについて実機を製作し、実負荷試験を実施した。今回の計測では最大53.3Nm、36.7kW の出力特性が確認できた。モータ単体での最高効率は94.7%であり、WLTC class3b モードにおける平均効率は84.4%であった。自動車主機として利用可能な出力と、可変界磁モータの特徴である高回転運転の高効率な特性が確認できた。最高効率点が高回転に位置する特性から、モード走行における平均効率は良好な結果となった。

一方で零相磁束を通すためのケース・シャフトを軽量化することが困難であること、また零相巻線といった部品が追加されることから、モータ単体重量は20.3kg、モータ単体出力密度は1.8kW/kg となった。出力密度向上のためには、より高回転・高電圧で動作可能なモータとすること、零相磁束を通しながらも体積の小さい回転子を最適設計することなどの対策が考えられる。

参考文献

[1] 経済産業省製造産業局, “「次世代蓄電池・次世代モーターの開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装の方向性”, 2021. [オンライン]. Available: <https://www.meti.go.jp/press/2021/04/20210421001/20210421001.pdf>

go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/005_03_00.pdf

[2] I. Husain, B. Ozpineci, M. S. Islam, E. Gurpinar, G.-J. Su, W. Yu, S. Chowdhury, L. Xue, D. Rahman, R. Sahu, "Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles," Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021.

[3] K. Mohamed, A. A. Abdussalam, A. Abdulagader, "Technology Challenges and Trends of Electric Motor and Drive in Electric Vehicle," IJEES, February 8, 2023.

[4] T. M. Jahns, "Flux-Weakening Regime Operation of an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive," IEEE Transactions on Industry Applications, July 1987.

[5] H. Hijikata, Y. Sakai, K. Akatsu, Y. Miyama, H. Arita, A. Daikoku, "Multi-phase inverter-fed MATRIX motor for high efficiency driving," IEEE Transactions on Industry Applications, 2018.

[6] K. Sakai, K. Yuki, Y. Hashiba, N. Takahashi, K. Yasui, "Principal and Basic Characteristics of Variable-Magnetic-Force Memory Motors," 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011.

[7] T. Mizuno, K. Nagayama, T. Ashikaga, T. Kobayashi, "Basic Principles and Characteristics of Hybrid Excitation Type Synchronous Machine," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 115, no. 11, pp. 1402-1411, 1995.

[8] R. Tsunata, M. Takemoto, S. Ogasawara, K. Orikawa, "Variable Flux Memory Motor Employing Double-Layer Delta-Type PM Arrangement and Large Flux Barrier for Traction Applications," IEEE Transactions on Industry Applications, July-Aug. 2021.

[9] 土井康太郎, 野口季彦, "三次元磁路と非対称磁石配置をもつ可変界磁PMモータの検討", 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, 2022.

[10] K. Iwama, T. Noguchi, "High-Efficiency Drive Method of Adjustable Field IPMSM Utilizing Magnetic Saturation," MDPI, Energies, Dec. 2021.

[11] 土井康太郎, 山田幹太, 日吉祐太郎, 野口季彦, "三次元磁路と非対称磁石配置をもつ可変界磁PMモータの運転特性", 電気学会, 2023.

[12] MITSUBISHI MOTORS CORPORATION, "MINICAB MiEV", [オンライン]. Available: <https://www.mitsubishi-motors.co.jp/lineup/minicab-miev/performance/>. [アクセス日: 7 9 2023].

■著者



日吉 祐太郎
Yutaro Hiyoshi
技術・研究本部
AM 開発統括部
第2技術部



土井 康太郎
Kotaro Doi
静岡大学
創造科学技術大学院



野口 季彦
Toshihiko Noguchi
静岡大学