

令和 6 年 9 月 17 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04022

研究課題名(和文)透磁率変調に基づく新規可変界磁モータと拡張最大トルク制御法に関する研究

研究課題名(英文) Study on Extended Maximum Torque Control of Novel Adjustable Field Motor Based on Permeability Modulation

研究代表者

野口 敏彦 (Noguchi, Toshihiko)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：10237828

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は透磁率変調に基づく可変界磁PMモータにおいて、透磁率変調電流である零軸電流も含め三次元空間における最大トルク制御(拡張MTPA制御)を新たに構築し、従来のMTPA制御の枠組みを超えることを目的とする。研究期間全体を通じて、(1)三次元空間で出力トルクが最大となるd軸電流、q軸電流、零軸電流の組合せを理論的に検討(2)三次元空間に拡張されたMTPA制御の条件を定式化し、d軸、q軸、零軸電流の制御アルゴリズムを明確化(3)シミュレーションによる3軸電流制御を確認(4)三相4線式インバータやデュアルインバータによる運転試験などを行った。その結果、所期の目的を達成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、d軸電流とq軸電流による二次元的な電流制御に立脚した最大トルク制御(MTPA制御)を、本研究によって零軸電流制御も含めることによって三次元的な電流制御によるMTPA制御に拡張することができた。これによって、零軸電流を可変界磁に有効活用した可変界磁PMモータのベクトル制御の制御自由度を更に拡張し、(1)減磁の懸念がある逆磁界をPMにかけることなくPMモータの界磁を可変できるようになった。(2)可変界磁のために零軸電流を活用するのでインバータの構成を大きく変更することなくモータドライブを実現できる。(3)低速大トルク運転と高速運転を両立でき、高効率運転領域を拡大できる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to establish a maximum torque control (extended MTPA) method in the 3D-space including a zero-sequence current, which is needed to make the adjustable field PM motor based on a permeability modulation technique. Through the entire research activity, the following items have been conducted: (1) theoretical discussion on combination among the d-axis, q-axis, and zero-axis currents in the 3D-space to obtain the maximum output torque; (2) formulation of the extended MTPA condition in the 3D-space, and clarification of control algorithm of the d-axis, q-axis, and zero-axis currents; (3) verification of the three-axes current control through simulation tests; and (4) Operation tests using a three-phase 4-wire inverter and/or a dual inverter. As a result, some expected research goals have been achieved.

研究分野：パワーエレクトロニクス，電気機器

キーワード：可変界磁PMモータ 透磁率変調 拡張MTPA d軸電流 q軸電流 零軸電流 三相4線式インバータ デュアルインバータ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

電気自動車 EV をはじめハイブリッド自動車 HEV に採用されるモータは専ら永久磁石 (PM) モータである。これにより高効率な可変速運転を実現できるが、PM により界磁が一定であるため、低速大トルク運転と高速運転を両立することは困難である。

このため、一般には負の d 軸電流を流す (PM に対して逆磁界をかける) ことにより弱め界磁制御を行い、速度 (逆) 起電力を抑制して高速運転を実現している。また、負の d 軸電流を流すことによってマグネットトルクだけでなくリラクタンストルクも利用できるため、同体格のモータでもトルク密度を高めることができる。しかし、高速運転 (定出力) 領域を伸ばそうとすると大きな負の d 軸電流を流さざるを得なく、銅損が増加して効率悪化を招く。更に、逆磁界が PM の不可逆減磁をもたらす危険性もある。

そこで、同一の電流ノルムとなる d 軸と q 軸電流の組合せで最も大きなトルクを出力する動作点で制御することが行われており、これを最大トルク (MTPA: Maximum Torque Per Ampere) 制御と呼んでいる。従来の PM モータの制御法では、d 軸と q 軸電流だけからなる二次元平面上での MTPA 制御や弱め界磁制御が行われ、高効率運転と運転領域の拡大が行われてきた。

### 2. 研究の目的

本研究は透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータにおいて、従来の d 軸電流と q 軸電流だけでなく、透磁率変調電流とする零相電流までも含めて三次元空間における最大トルク制御 (拡張 MTPA 制御) を新たに構築し、従来の枠組みを超えることを目的とする。具体的には、

- (1) d 軸, q 軸, 零相 (透磁率変調) 電流からなる三次元空間に拡張された MTPA 制御を実現できることを理論, シミュレーション等を通じて立証する。
- (2) 従来の二次元平面上で MTPA 制御を行う場合と, 提案する三次元空間における拡張 MTPA 制御とで, 特に効率面からの運転性能比較を行う。

### 3. 研究の方法

近年、可変界磁 PM モータの研究が精力的に進められているが、負の d 軸電流を流すことなく高効率に界磁を制御することが重要な検討課題である。研究代表者らはこれまでに 60% もの可変界磁幅を実現できる「透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータ」を提案してきた。これにより、高トルクを出力したいときは PM による速度起電力を増加させ、高速運転をしたいときは PM による速度起電力を減少させることができ、低速大トルク運転と高速運転を高効率に両立できる。

図 1 は透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータの動作原理を示したものである。三相巻線に加えて透磁率変調巻線を設け、これに直流電流を流すことにより黄色の三次元磁路をもつ透磁率変調磁束を確立する。この透磁率変調磁束はロータ断面において径方向に放射状に透過する磁束となるため、これによって N と S 極の磁極間部位の磁気飽和の度合いを制御することができる。すなわち、磁極間部位の透磁率を変調できる。図 2 と図 3 に示したように透磁率変調磁束がゼロで磁極間部位が磁気飽和していなければ、N と S 極の両方で短絡磁束が生じステータに鎖交する磁束が減少する。これは弱め界磁の状態に相当し、PM 磁束がロータ内で短絡するため速度起電力が小さくなる。一方、透磁率変調磁束が大きく磁極間部位が磁気飽和すると、N と S 極の間で磁束が短絡しなくなるためステータに鎖交する磁束が増大する。これは界磁が強まった状態に相当し、PM 磁束の殆どがステータに鎖交するので速度起電力が大きくなる。

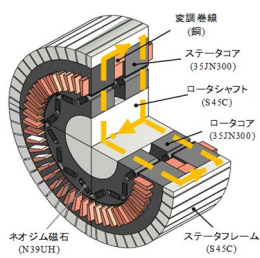


図 1 可変界磁 PM モータ

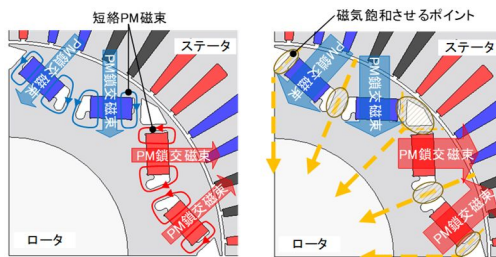


図 2 透磁率変調可変界磁の原理

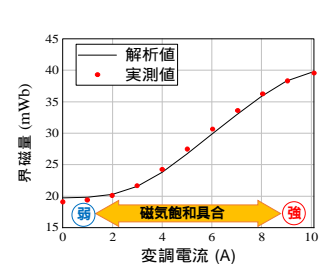


図 3 透磁率変調電流と界磁量

次にインバータで零相直流電流を制御することにより、上述の可変界磁を実現するインバータを図 4 に示す。このように透磁率変調巻線を三相巻線の中性点に接続し、三相 4 線式インバータで零相分 (コモンモード) 電流として直流の透磁率変調電流を流す手法である。また、可変界磁 PM モータを三相 6 線式のオープン巻線とし、直流バスを共通化したデュアルインバータで駆動する場合、直流バスの P と N 側それぞれに透磁率変調巻線を挿入する手法も考えられる。

図 5 に示したように、従来の MTPA 制御に関する理論的な枠組みは d 軸と q 軸電流の組合せだけで論じられてきた。換言すると d 軸と q 軸からなる二次元平面上において出力トルクを最大化する両電流の組合せにより次式のような MTPA カーブを定めてきた。

$$\phi_i' = \cos^{-1} \left( \frac{-\psi_m + \sqrt{\psi_m^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d) I_a} \right) \quad (1)$$

これに対し、本研究では図 6 に示したように透磁率変調に用いる零相電流も考慮し、d 軸, q 軸,

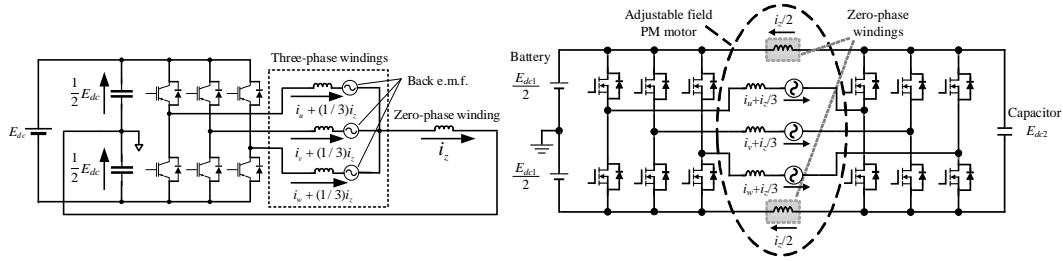


図4 本研究で検討するモータドライブ

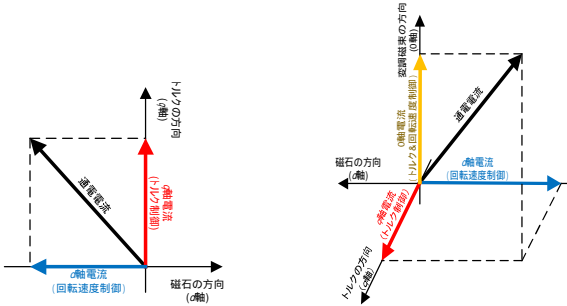


表1 可変界磁 PM モータの主要諸元

Number of poles and slots	8 poles and 48 slots
Armature windings	6 turn/slot, 0.09 Ω
Zero-sequence winding	140 turn, 2.1 Ω
Stator diameter	φ148 mm
Rotor diameter	φ96.6 mm
Air gap	0.5 mm
Stack length	63 mm
Maximum zero-sequence current	6.64 A
d-axis inductance	0.343 mH
q-axis inductance	0.947 mH
Minimum magnetic field	0.0245 Wb
Maximum magnetic field	0.0436 Wb

図5 従来の二次元 MTPA 制御 図6 提案する三次元拡張 MTPA 制御

零軸からなる三次元空間で出力トルクが最大となる d 軸電流, q 軸電流, 零相 (透磁率変調) 電流の組合せを理論的に検討し, 従来方式と比較検討する。本研究では以下の事項を明らかにする。

- (1) d 軸電流, q 軸電流, 零相 (透磁率変調) 電流の組合せで, 最大トルクを出力する組合せは一意に定まるか?
- (2) すでに試作を完了している透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータを用いて, d 軸電流, q 軸電流, 零相 (透磁率変調) 電流を同時独立に制御できるか?
- (3) 従来の二次元 MTPA 制御と, 提案する三次元拡張 MTPA 制御との比較により提案法の優位性を確認できるか?

#### 4. 研究成果

##### (1) 拡張 MTPA 制御

まず, 本研究では表 1 で示したパラメータの可変界磁 PM モータを制御対象とする。図 7 に 0dq 座標系の電流ベクトルを示す。同図より 0 軸電流  $i_0$ , d 軸電流  $i_d$  および q 軸電流  $i_q$  は下式の球面座標で表現できる。

$$\begin{cases} i_0 = I_a \cos \theta_i \\ i_d = I_a \sin \theta_i \cos \varphi_i \\ i_q = I_a \sin \theta_i \sin \varphi_i \end{cases} \quad (2)$$

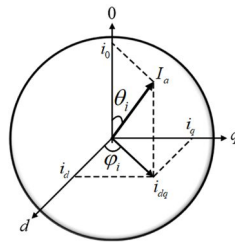


図7 0dq 座標系の電流ベクトル

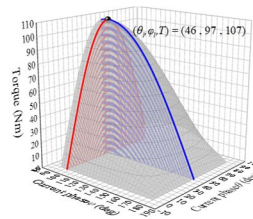


図8 トルクと電流位相

ここで,  $I_a$  は電流ベクトルのノルム,  $\theta_i$  は 0 軸と電流ベクトルがなす角,  $\varphi_i$  は dq 平面上での d 軸からの進み角である。可変界磁された界磁磁束鎖交数の理論式を一般化する都合上, 線形近似した下式を用いる。ここでは 0 軸電流を  $-3.84 \sim 0$  A の範囲で想定すると, 界磁磁束鎖交数は  $i_0 = 0$  A のとき最小値  $\psi_{\min}$ ,  $i_0 = -3.84$  A のとき最大値  $\psi_{\max}$  である。

$$\Psi_{a1}(i_0) = k|i_0| + \psi_{\min} = 4.98 \times 10^{-3}|i_0| + 2.45 \times 10^{-2} \quad (3)$$

一方, 可変界磁 PM モータのトルクは下式で表される。ただし,  $P_n$  は極対数である。

$$T = P_n \{ \Psi_a(i_0)_a + (L_d - L_q) i_d \} i_q \quad (4)$$

上式に式(2)および式(3)を代入することでトルクを球面座標により表現できる。また, 式(3)では拡張 MTPA 制御の理論式を一般化する都合上, 界磁磁束鎖交数と 0 軸電流を線形近似している。図 8 にトルクと位相  $\theta_i, \varphi_i$  の関係を示す。

$$T(\theta, \varphi) = P_n \left\{ \left( (k I_a \cos \theta_i + \psi_{\min}) + (L_d - L_q) I_a \sin \theta_i \cos \varphi_i \right) I_a \sin \theta_i \sin \varphi_i \right\} \quad (5)$$

ここで,  $I_a$  は 100 A であり,  $P_n, L_d, L_q$  には表 1 の値,  $k, \psi_{\min}$  には式(3)を用いている。同図より,  $\theta_i, \varphi_i$  がそれぞれ極大値をもつ点でトルクは最大値をとるため, 最大トルク条件は下式で与えられる。また, 最大トルク点は  $(\theta_i, \varphi_i) = (46 \text{ deg}, 97 \text{ deg})$  付近である。

$$\begin{cases} \partial T(\theta_i, \varphi_i) / \partial \theta_i = 0 \\ \partial T(\theta_i, \varphi_i) / \partial \varphi_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

上式を  $\theta_i, \varphi_i$  について解けば拡張 MTPA 制御の理論式が得られ、次のように一般化できる。

$$\begin{cases} \theta_i = \cos^{-1} \left( \frac{kA}{4I_a \{k^2 + (L_d - L_q)^2\}} \right) \\ \varphi_i = \cos^{-1} \left( \frac{2(L_d - L_q) [4I_a^2 \{k^2 + (L_d - L_q)^2\} - \psi_{min} A]}{A \sqrt{[4I_a \{k^2 + (L_d - L_q)^2\}]^2 - (kA)^2}} \right) \end{cases} \quad (7)$$

$$* A = -\psi_{min} + \sqrt{\psi_{min}^2 + 8I_a^2 \{k^2 + (L_d - L_q)^2\}}$$

上式にモータパラメータを代入すると、 $(\theta_i, \varphi_i) = (46.4 \text{ deg}, 96.6 \text{ deg})$  となり、図の最大トルク点と一致するので、式(7)の妥当性を確認できる。

一方、表 1 より可変界磁に必要な零相電流 (0 軸電流) は最大 6.64 A (3.84 A) である。これはロータ漏れ磁路の透磁率を変調する本可変界磁手法において、これ以上の零相電流を通流しても磁極間は十分に磁気飽和しており、 $\psi_{max}$  以上に界磁磁束鎖交数を増加できないからである。式(7)の拡張 MTPA 制御の理論式から得られる電流動作点  $(i_0, i_d, i_q)$  は  $(69.0, -8.37, 71.9)$  であるため、0 軸電流が最大値を超えている。図 9 にトルクと 0 軸電流の関係を示す。同図より、 $i_{0max}$  以上でトルクは単調増加するため、 $i_0 = i_{0max}$  に制御することで最大トルクを出力できる。図 10 に最大 0 軸電流を考慮したときのトルクと電流位相  $\theta_i, \varphi_i$  の関係を示す。同図より最大トルク点は、 $(\theta_i, \varphi_i) = (88 \text{ deg}, 123 \text{ deg})$  付近である。また、 $i_0 = i_{0max}$  に制御したときの界磁磁束鎖交数は  $\Psi_a(\text{const}) = \psi_{max}$  であるため、式(7)に  $k=0$  および  $\psi_{min} = \psi_{max}$  を代入すれば、次式のように変形できる。

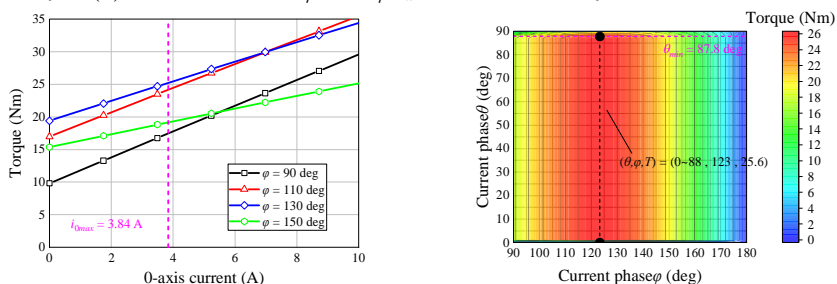


図 9 トルクと 0 軸電流の関係

図 10 最大 0 軸電流を考慮したときのトルクと電流位相

次式にモータパラメータを代入すると、 $(\theta_i, \varphi_i) = (87.8 \text{ deg}, 123 \text{ deg})$  となり、図 10 の最大トルク点と一致することから、式(8)の妥当性を確認できる。したがって、可変界磁 PM モータの電流ノ

$$\begin{cases} \theta_i = \cos^{-1} \left( \frac{i_{0max}}{I_a} \right) \\ \varphi_i = \cos^{-1} \left( \frac{2(L_d - L_q) [4\sqrt{I_a^2 - i_{0max}^2} (L_d - L_q)^2 - \psi_{max} A]}{A \sqrt{[4\sqrt{I_a^2 - i_{0max}^2} (L_d - L_q)^2] - (kA)^2}} \right) \end{cases} \quad (8)$$

$$* A = -\psi_{max} + \sqrt{\psi_{max}^2 + 8(I_a^2 - i_{0max}^2)(L_d - L_q)^2}$$

ルム 100 A における拡張 MTPA 制御の電流動作点は、 $(i_0, i_d, i_q) = (3.84, -54.9, 83.5)$  であり、最大トルクは 25.6 Nm となる。

## (2) 二次元電流ベクトル制御との比較

図 11 に可変界磁 PM モータに二次元と三次元電流ベクトル制御を適用したときの各電流指令値およびトルクの比較を示す。

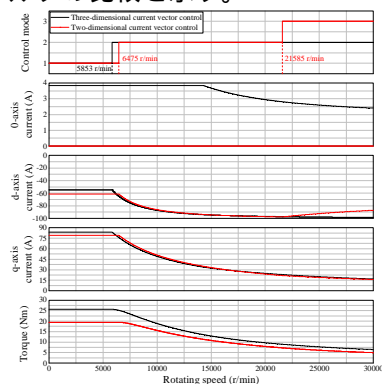


表 2 二次元と三次元の運転領域比較

	MTPA control (Nmr/min)	Field weakening control (Nmr/min)	MTPV control (Nmr/min)	Operating range (Nmr/min)
3D control	150016	305879		455895
2D control	125911	185826	50243	361980

図 11 二次元と三次元電流ベクトル制御の電流指令値およびトルクの比較

ここで、電流制限値は 100 A、最高回転速度は 30,000 r/min であり、電圧制限値は直流バス電圧 150 V で変調方式に空間ベクトル変調を想定した。また、モータパラメータには表 1 の値を用いた。三次元電流ベクトル制御を適用したときの基底速度は 5853 r/min であり、これより低速では拡張 MTPA 制御、高速では拡張弱め界磁制御や拡張 MTPV 制御を行っている。ただし、拡張

弱め界磁制御と拡張 MTPV 制御は本研究の対象外であるが、拡張 MTPA 制御と同様に三次元空間で検討した手法である。また、二次元電流ベクトル制御では従来の MTPA 制御を行っている。

三次元電流ベクトル制御では、回転速度の増加に伴い、0 軸電流指令値が減少しており、高速運転時の電圧制限を満たすように界磁磁束鎖交数が減少していることがわかる。表 2 に、各電流ベクトル制御の運転領域の比較を示す。ここで、運転領域とは図 11 の T-N 曲線で囲まれた面積である。同表より三次元電流ベクトル制御を用いることで、MTPA 制御で 1.19 倍、弱め界磁制御 + MTPV 制御で 1.30 倍の運転領域の拡大を実現している。これより運転領域拡大の観点から 0 軸電流を加味した三次元電流ベクトル制御は非常に有利であることがわかる。

### (3) 可変界磁モータドライブの動作検証

表 3 に駆動条件、図 12 に三相 6 線式制御ブロック図を示す。

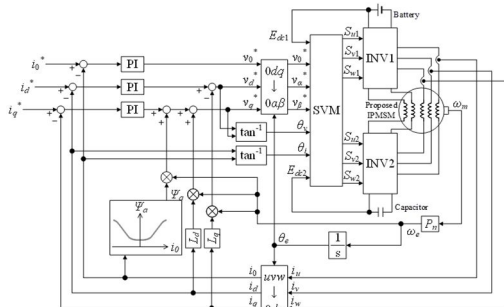


図 12 制御ブロック図

表 3 駆動条件

Switching frequency	10 kHz
Voltage of battery	150 V
Capacitor voltage command	150±10 V
Capacitance	7800 μF
Current norm	100 A
0-axis current command	-3.84 A
d-axis current command	-54.9 A
q-axis current command	83.5 A
Crossover frequency	1000 rad/s
Resistance of armature windings	0.09 Ω
Resistance of modulation windings	4.2 Ω
d-axis inductance	0.372 mH
q-axis inductance	0.947 mH
Minimum magnetic field	0.0263 Wb
Maximum magnetic field	0.0470 Wb

図 12 で可変界磁 PM モータには式(9)の電圧方程式で表されるモデルを想定する。

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_a + \frac{3}{2}R_z) + 3pL_z & 0 & 0 \\ 0 & R_a + pL_d & -\omega L_q \\ 0 & \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \Psi_a(i_0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

また、可変界磁 PM モータの界磁磁束鎖交数は、磁気飽和の影響を考慮して式(10)にて得られる近似曲線から 0 軸電流を用いて計算する。

$$\Psi_{a1}(i_0) = -3.25 \times 10^{-5} i_0^4 + 1.78 \times 10^{-3} i_0^2 + 2.45 \times 10^{-2} \quad (10)$$

空間ベクトル変調 (SVM) ブロックではモータの瞬時力率とキャパシタ電圧からキャパシタの充放電に合わせた最適スイッチング状態の選択と出力時間の演算を行う。

図 13 は上段から、0 軸、d 軸、q 軸電流  $i_0, i_d, i_q$ 、上側、下側の零相電流  $i_p, i_n$ 、零相電流の和  $i_p + i_n$ 、d 軸を基準とした電圧、電流ベクトルの位相  $\theta_v, \theta_i$ 、バッテリー電圧  $E_{dc1}$ 、キャパシタ電圧  $E_{dc2}$ 、U 相巻線両端電圧  $v_u$  を表している。この結果より、0dq 軸電流は指令値通りに制御できていることが確認できる。また、上下の零相電流の和と 0 軸電流には下式の関係が成り立つ。

$$-(i_p + i_n) = i_z = \sqrt{3}i_0 \quad (11)$$

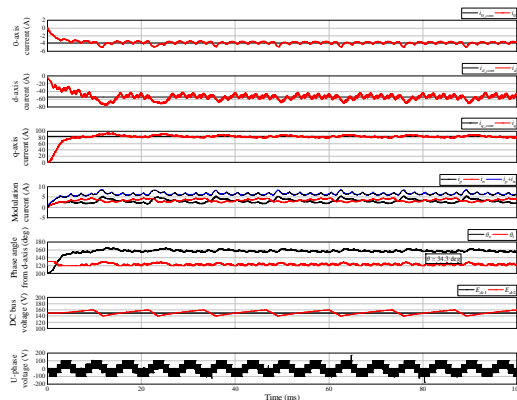


図 13 動作波形 ( $i_{0\_cmd} = -3.84$  A,  $n_m = 2250$  r/min)

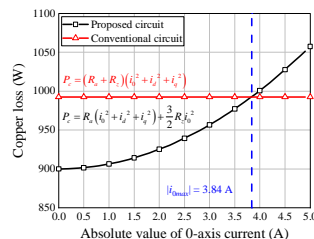


図 14 三相 4 線式と三相 6 線式の銅損

さらに、低変調率時では 0 軸電流に依らず、直流バス電圧比が 1 : 1 となるようにキャパシタ電圧を一定に制御しつつ、同時に 5 レベル電圧波形を出力できる。

次に三相 4 線式と三相 6 線式モータドライブの比較検討を行う。両者では零相巻線に通流する電流が異なるため、モータ体積および零相巻線の電流密度を一定とする条件を課す。図 14 に両回路の銅損を示す。同図より三相 6 線式を用いることで三相 4 線式よりも銅損を低減できる。

### (4) 研究成果

本研究では透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータの新たな駆動手法について検討した。特に従来の d 軸と q 軸電流だけでなく、透磁率変調電流に該当する零相電流までも含めて三次元空間における最大トルク制御 (拡張 MTPA 制御) を新たに構築し、従来の d 軸と q 軸電流だけからなる二次元の MTPA 制御の枠組みを超える制御体系を構築できた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Kimura Tomonori、Yamada Takahiro、Kazaoka Ryoya、Noguchi Toshihiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Control Method of Dual Inverter System for EV with One Battery	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Journal of Industry Applications	6. 最初と最後の頁 376～383
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejia.22007660	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Husnayain Faiz、Noguchi Toshihiko、Akaki Ryosuke、Yusivar Feri	4. 巻 16
2. 論文標題 Improved Current and MTPA Control Characteristics Using FEM-Based Inductance Maps for Vector-Controlled IPM Motor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 4712～4712
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en16124712	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Iwama Kiyohiro、Noguchi Toshihiko	4. 巻 10
2. 論文標題 High-Efficiency Drive Method of Adjustable Field IPMSM Utilizing Magnetic Saturation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 125499～125508
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3226335	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hattori Akihisa、Noguchi Toshihiko、Kamiyama Hiromu	4. 巻 15
2. 論文標題 High-Torque Density Design of Small Motors for Automotive Applications with Double Axial-Air-Gap Structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 7341～
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en15197341	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Iwama Kiyohiro, Noguchi Toshihiko	4. 巻 70
2. 論文標題 Three-Phase Inverter Fed Adjustable Field IPMSM Drive Utilizing Zero-Sequence Current	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 1239 ~ 1249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2022.3165300	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hattori Akihisa, Noguchi Toshihiko, Murakami Kazuhiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Mathematical Model Derivation and Experimental Verification of Novel Consequent-Pole Adjustable Speed PM Motor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 6147 ~
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en15176147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Iwama Kiyohiro, Noguchi Toshihiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Three-Phase Inverter Fed Adjustable Field IPMSM Drive Utilizing Zero-Sequence Current	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2022.3165300	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Iwama Kiyohiro, Noguchi Toshihiko	4. 巻 15
2. 論文標題 Operation Characteristics of Adjustable Field IPMSM Utilizing Magnetic Saturation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 52 ~ 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/en15010052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山田幹太・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 可変界磁 PM モータの運転性能を向上する空間ベクトル変調の検討
3. 学会等名 令和4年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土井康太郎・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 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
3. 学会等名 令和4年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩間清大・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 透磁率変調に基づく可変界磁IPMSMの高効率運転法に関する基礎検討
3. 学会等名 2022年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩間清大・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 電機子巻線のコイルエンドに着目した変調巻線レス可変界磁 IPMSM の設計とその制御法
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換 / モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 山田幹太・土井康太郎・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 磁気飽和を考慮した可変界磁 PM モータの拡張電流ベクトル制御とその効率マップに関する検討
3. 学会等名 電気学会半導体電力変換 / モータドライブ合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 土井康太郎・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 集中巻構造に基づく変調磁束の三次元磁路をもつ可変界磁IPMSM
3. 学会等名 令和3年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩間清大・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 透磁率変調に基づく三相4線式インバータ可変界磁IPMSM駆動システム
3. 学会等名 令和3年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田幹太・岩間清大・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 透磁率変調に基づく可変界磁PMモータの拡張弱め界磁制御
3. 学会等名 令和3年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田幹太・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 2台のインバータ直流バス間に透磁率変調巻線をもつ可変界磁PMモータの駆動回路とその制御法
3. 学会等名 電気学会モータドライブ/家電・民生合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩間清大・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 透磁率変調に基づく可変界磁IPMモータの無負荷特性
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩間清大・野口季彦（敏彦）
2. 発表標題 透磁率変調に基づく可変界磁IPMモータの実機検証
3. 学会等名 電気学会モータドライブ/家電・民生合同研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学 野口研究室 <a href="http://www.noguchi-lab.com/index.html">http://www.noguchi-lab.com/index.html</a> 静岡大学 野口研究室 <a href="http://www.noguchi-lab.com/index.html">http://www.noguchi-lab.com/index.html</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------