

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820098

研究課題名（和文）永久磁石同期モータの高効率運転に適した新しい数式モデルの構築

研究課題名（英文）Development of a mathematical model suitable for high-efficiency operation of permanent magnet synchronous motors

研究代表者

井上 征則（Inoue, Yukinori）

大阪府立大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：50580148

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）：永久磁石同期モータの高効率運転を実現するために必要となる最大トルク/電流制御の新しい数式モデルを開発した。電機子鎖交磁束に同期したM-T座標上での特性に注目していることが特徴である。昨今のモータ小型化と高出力化により磁気飽和の影響を無視できない場合が増えており、提案する数式モデルでは磁気飽和特性にも対応可能である。実機によるモータパラメータ測定法を確立したことから、簡易な測定で良好な運転特性が得られるモータ駆動システムを実現できる。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a novel mathematical model of maximum torque per ampere (MTPA) control for direct torque control (DTC) of permanent-magnet synchronous motors (PMSMs) in the stator flux linkage synchronous (M-T) frame. Consideration of the magnetic saturation and cross-coupling effects in PMSMs requires significant complexity in most of the mathematical models using the rotor synchronous (d-q) frame. In the M-T frame, the mathematical model for MTPA control requires only three parameters that can be determined from only three measured points. The validity of the proposed model was confirmed by both simulation and experimental results. The proposed model can achieve high-efficiency operation in DTC-based PMSM drive system.

研究分野：電気工学

キーワード：電気機器工学 モデル化 エネルギー効率化 永久磁石同期モータ

1. 研究開始当初の背景

モータは様々な用途で幅広く使用されており、中でも、永久磁石同期モータ(PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor)の利用が近年急速に進んでいる。PMSM を広範囲可変速かつ高効率で運転することは、機器の省エネルギー化が求められる現在では重要な課題である。PMSM を使用する場合、回転速度と負荷トルクに応じた適切な制御が必要であるが、これは容易ではない。そのため、制御法に関する研究が盛んに行われている。

これまで一般的に用いられてきたモータ駆動システムでは、回転子の永久磁石に同期した d - q 座標上での数式モデルを用いて制御が行われている。ここで、座標軸の定義を図1に示す。 d - q 座標の位置は、回転子位置センサを用いて物理的に検出する、もしくは、電機子鎖交磁束(Ψ_s)から電機子反作用($L_d i_d, L_q i_q$)を差し引くことにより推定できるが、この際に d, q 軸インダクタンス(L_d, L_q)の値を必要とする。

一方、直接トルク制御(DTC: Direct Torque Control)を用いてモータ駆動システムを構成することもでき、この場合には電機子鎖交磁束を制御に利用できる。電機子鎖交磁束を基準とした M-T 座標は、誘起電圧(v_e)を時間積分して得ることができるため、モータの種類を問わず利用でき、センサの設置が不要である。これまでに、直接トルク制御に適用できる M-T 座標上での制御法について一部報告されていた。

- ・銅損を最小化しトルクを最大化する最大トルク / 電流(MTPA: Maximum Torque Per Ampere)制御
- ・鉄損を最小化しトルクを最大化する最大トルク / 磁束(MTPF: Maximum Torque Per Flux)制御
- ・広範囲可変速運転を可能にする弱め磁束制御
- ・モータ駆動システムによって決まる電流制限を満足するためのトルク制限

高効率運転のために必要となる MTPA 制御について、従来は参照テーブルを利用する方法が一般的であった。この場合、測定値もしくは d - q 座標上のモータモデルによる数値計算によって MTPA を満足するトルク(T_e)と電機子鎖交磁束の大きさ(Ψ_s)を得る。 d - q 座標は

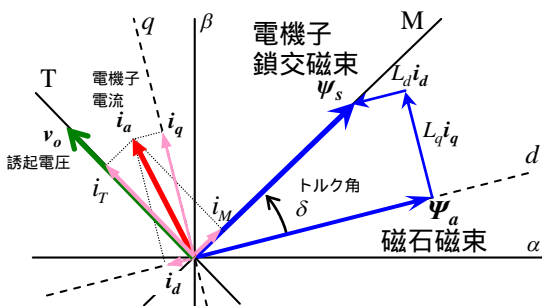


図1 定常状態における PMSM のベクトル図と座標軸の定義

永久磁石磁束、すなわち回転子の形状により決まるため、モータ特性の議論でよく用いられている。一方で、磁気飽和によるパラメータ変動のモデル化とその測定法には万能な手法が無く、現在も研究が続いている。本来は磁気飽和領域を多用しないようにモータ構造の最適設計が必要であるが、近年の小型化・大電流化のような要求仕様の厳しさから、磁気飽和によるパラメータ変動の大きいモータが増えてきている。制御の観点では、線形特性を持つ理想的なモータだけでなく、磁気飽和が顕著で非線形特性の強いモータでも適切に駆動できることが求められる。したがって、回転子の構造で定義される d - q 座標だけではなく、別の座標系でのモータ特性評価と制御則構築も必要である。

2. 研究の目的

永久磁石同期モータを広範囲にわたる速度領域で運転させ、かつ高効率運転を実現するために必要となる新しい数式モデルを開発する。電機子鎖交磁束に同期した M-T 座標上でのモータパラメータを用いることが特徴である。モータ回転子の構造に依存せず、インダクタンスによる電機子反作用と磁石磁束の合成である電機子鎖交磁束を利用するため、磁気飽和の影響を受けにくいモデルを構築できることが期待される。実機によるモータパラメータ測定法を確立し、磁気飽和によるパラメータ変動特性を評価する。新しいモータ数式モデルによって、簡易な測定で良好な運転特性が得られるモータ駆動システムを実現する。

3. 研究の方法

(1) MTPA 数式モデル

数値計算を用いたモデル化

これまでは d - q 座標上でモータの運転特性や制御法が議論されてきたため、まず始めに M-T 座標上での電圧・電流・磁束の特性を整理した。数値計算と実機実験により電圧ベクトルと電流ベクトルの軌跡を考察した結果、電機子鎖交磁束 Ψ_s と T 軸電流 i_T に注目し、曲線の特徴からモデル化した。

実機によるモデルの妥当性評価

既に他の研究テーマで使用していた埋込磁石同期モータ(IPMSM: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)と同期リラクタンスモータ(SynRM: Synchronous Reluctance Motor)を使用して、提案モデルの妥当性を評価した。

(2) DTC への MTPA 数式モデルの適用

DTC では、MTPA 制御のためにトルク T_e と電機子鎖交磁束 Ψ_s の関係を与える必要がある。提案モデルは i_T から Ψ_s を得る数式であったため直接利用することができなかった。トルク T_e と i_T の関係を得るために更にモデル化することは避けて、M-T 座標上でのトルク

式($T_e = P_n \Psi_s i_T$)を利用した手法を開発した。

(3) 対応モータ拡大のための検討

磁気飽和が顕著に現れるモータの導入

磁気飽和によるインダクタンス変動が M-T 座標上でのモータパラメータに与える影響を検討するために必要なモータを導入した。一般に SynRM は磁気飽和の影響が大きく出るモータであるが、これまでに検討できる環境に無かった。研究室所有のモータは最適設計されており特性が非常に良く、磁気飽和が現れにくいモータであった。本研究の前半で実施したモデル化の検討により、IPMSM と SynRM に加えて、表面磁石同期モータ (SPMSM: Surface Permanent Magnet Synchronous Motor) を試作することになった。表 1 にモータ諸元を示す。JSOL 社 JMAG-Express を利用してモータ設計を行い、磁界解析ソフトウェア JMAG で詳細特性を評価した。

実機試作においては、モータ種類による違いを最小限にすることと、費用削減のために固定子は同じものを使用する。回転子のみ個別に用意し、差替えて使用する設計とした。

SPMSM への対応

研究期間前半の検討で、提案モデルは SPMSM に適用できない場合があったため、モデルの修正を行った。IPMSM と比べて SPMSM の方が突極性の点で自由度が一つ減っていることに注目し、数式モデルの簡略化を行った。

SynRM への対応

モータ試作により、磁気飽和を考慮した検討を行えるようになり、提案モデルの課題が明らかになった。小電流領域と過負荷領域を 1 つの数式モデルで対応することは困難と判断し、自由度を増やす方向でモデル修正を行った。

(4) 線間電圧と相電流の実効値から Ψ_s と i_T の関係を得る方法

三相電圧・電流の実効値とその位相差より算出する方法を開発した。簡易的な手法であるが一般的なパラメータを利用できるこ

表 1 試作モータの諸元

	モータ種類		
	IPMSM	SPMSM	SynRM
固定子外径 (mm)	112		
回転子外径 (mm)	55	54	55
エアギャップ長 (mm)	0.5	1.0	0.5
積厚 (mm)	37.5		
巻数 (回/相)	140		
定格相電流 (A)	3.92		
(電流密度 (A/mm ²))	(5.0)		
過負荷運転の相電流 (A),(電流密度 (A/mm ²))	7.84 (10)		

とから、提案モデルのパラメータ算出を簡略化した。

4. 研究成果

(1) MTPA 数式モデル

数値計算を用いたモデル化

表 2 に示すモータパラメータを持つ PMSM を想定し、数値計算により得られた電機子鎖交磁束 Ψ_s と T 軸電流 i_T の関係を図 2 に示す。Type A は後述する実機の PMSM のモータパラメータであり、Type A1 は永久磁石による電機子鎖交磁束を Type A から 0.5 倍した仮想の PMSM である。Type A2 は永久磁石による電機子鎖交磁束が零であることから、SynRM を想定したモータである。なお、Type B は実機の SynRM であり、 d, q 軸の取り方が PMSM と異なることから d 軸インダクタンスが d 軸電流 i_d によって変化する。

図 2 では q 軸電流 $i_q = 0$ での q 軸インダクタンスを用いた。図 2 より、 i_T に対して Ψ_s は単調増加しており、 $i_T = 0$ で $\Psi_s = \Psi_a$ であるこ

表 2 モータパラメータ

	モータ Type			
	A	A1	A2	B
磁石による電機子鎖交磁束 Ψ_a (Wb)	0.108	0.054	0	0
d 軸インダクタンス L_d (mH)	8.7			399.8 -44.3 $ i_d $
q 軸インダクタンス L_q (mH)	28.3 - 0.657 $ i_q $			55
極対数 P_n	2			2
電機子抵抗 R_a (Ω)	0.64			11.45
定格電流 I_{am} (A)	8.66			2.2

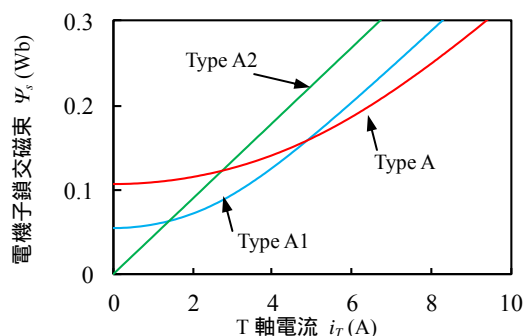


図 2 MTPA 曲線の一例

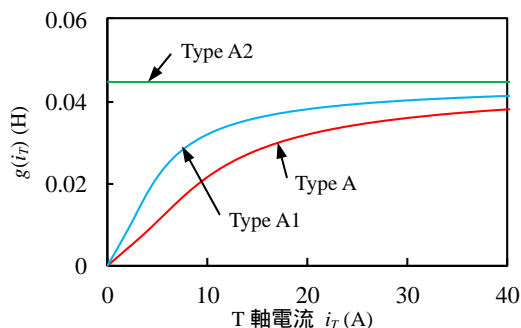


図 3 MTPA 曲線の $g(i_T)$

とから、次式を仮定する。

$$\Psi_s = g(i_T)i_T + \Psi_a \quad (a)$$

ただし、 $g(i_T)$ は曲線の傾きを表し、インダクタンスに相当する量である。

本研究では、曲線の傾きを i_T の関数として取り扱う。図3に $g(i_T)$ の特性を示す。図3より、 $g(i_T)$ は関数 \tan^{-1} のような飽和曲線を描くことが分かる。また、 Ψ_a の値によって曲線形状が異なり、 $\Psi_a = 0$ のとき $g(i_T)$ は一定値をとることが分かる。以上を考慮して、 $g(i_T)$ を(b)式で表現する。

$$g(i_T) = L_T \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{L_k i_T}{\Psi_a} \right) \quad (b)$$

ただし、 L_T は図3において $\Psi_a = 0$ とした SynRM での $g(i_T)$ の値に対応する定数であり、 L_k は i_T に対する \tan^{-1} の増加量に関する定数である。 \tan^{-1} に与える値を Ψ_a で割ることで、図3のような Ψ_a に対する曲線形状の変化を考慮した。

(a)式と(b)式より、MTPA 数式モデルの基本式は次式で与えられる。

$$\Psi_s = \begin{cases} L_T i_T \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{L_k i_T}{\Psi_a} \right) + \Psi_a & (\Psi_a > 0) \\ L_T i_T & (\Psi_a = 0) \end{cases} \quad (c)$$

(c)式は磁気飽和によるインダクタンス変化を無視できる場合のモデルである。磁気飽和を考慮する場合には、(c)式を拡張し、次式を用いる。

$$\Psi_s = \begin{cases} (L_T - b_T i_T) i_T \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{L_k i_T}{\Psi_a} \right) + \Psi_a & (\Psi_a > 0) \\ (L_T - b_T i_T) i_T & (\Psi_a = 0) \end{cases} \quad (d)$$

ただし、 b_T は係数 L_T を i_T の増加に対して相対的に減少させる比例定数である。

実機によるモデルの妥当性評価

本研究では、数値計算と実機実験の両方で新しく構築した数式モデル((c)式、(d)式)の妥当性を確認した。本報告では実機実験の結果

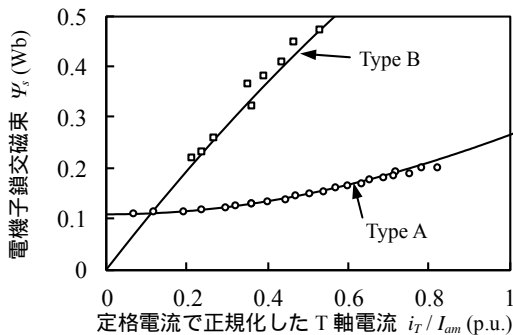


図4 数式モデル(実線)と実機を用いた測定値(プロット点)との比較

果を図4に示す。(d)式の数式モデル(図4の実線)が実機の測定値(プロット点)に一致しており、妥当性を確認できた。数式モデルに与えた定数は下記のとおりである。

Type A: $L_T = 18.9$ mH, $L_k = 17$ mH,
 $b_T = -1.31$ mH/A

Type B: $L_T = 464$ mH, $b_T = 51.6$ mH/A

なお、これらの定数決定方法も本研究で確立した。

(2) DTC への MTPA 数式モデルの適用

(c)式と(d)式の数式モデルは i_T から Ψ_s を得る式である。一方、モータ駆動システムで制御法の一つとして用いられる DTC では、トルク T_e と電機子鎖交磁束 Ψ_s の関係を与える必要がある。本研究では、図5に示す構成で指令トルクから指令磁束を得る方法を提案した。運転中の i_T を補助的に用いることにより、運転中のトルクと指令値が大きく異なる場合でも指令磁束を算出できる。また、制御を繰り返すことにより適切な指令値に収束できる。

実機実験による MTPA 制御特性を図6に示す。表2の Type A モータを駆動し、指令トルクをステップ状に変化させた場合の結果である。初期状態は運転点 P_1 であり、指令トルクの変化により最終的に定格トルクの運転点 P_2 に収束することを確認できた。

(3) 対応モータ拡大のための検討

SPMSM への対応

(c)式と(d)式では SPMSM の MTPA 特性に対応できない場合があった。また、パラメータ (L_T, L_k, b_T) が3つと多く、一般的な L_d, L_q を用いる場合と比較して欠点となっていた。本研

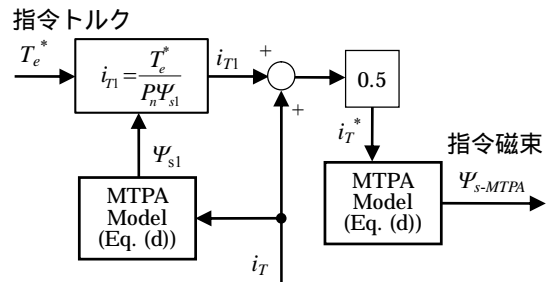


図5 直接トルク制御のための指令値計算

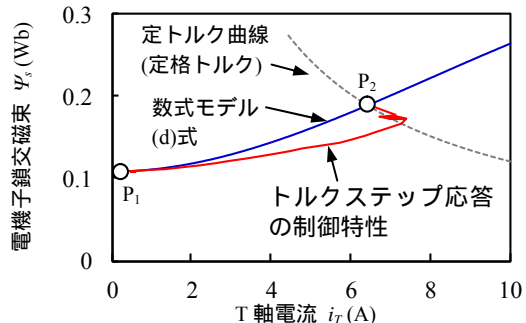


図6 MTPA 制御特性の実験結果 (Type A)

究で検討を進めた結果、SPMSM では L_k が非常に小さい値になることに注目し、(c)式に対して $L_k \rightarrow 0$ の極限をとることにより次式を導出した。

$$\Psi_s = k i_T^2 + \Psi_a \quad (e)$$

ただし、 k は MTPA 特性によって決まる定数である。

表 1 の SPMSM に対して評価した結果を図 7 に示す。(e)式を用いた場合でも実測値によく一致しており、パラメータを削減したモデルが有効であることを確認できた。

なお、IPMSM への(e)式の適用可否についても検証しており、実験結果を図 8 に示す。IPMSM では L_k が十分小さい値とはならないため、(d)式から(e)式への変形は成立しないことから(e)式を適用できないことが分かった。

SynRM への対応

SynRM では、 $\Psi_a = 0$ であることから(c)式と(d)式を利用可能であるが、過負荷領域においては磁気飽和の影響が非常に大きくなるためモデル化誤差が増大する傾向にあった。そのため、過負荷で使用される SynRM への対

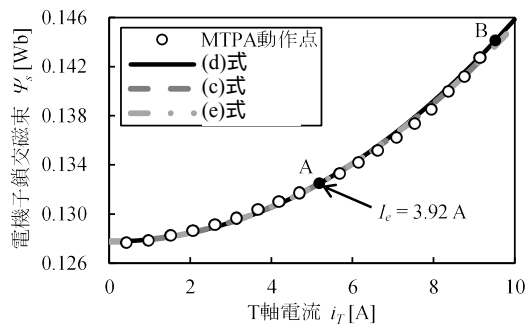


図 7 MTPA 数式モデルの比較 (実機 SPMSM)

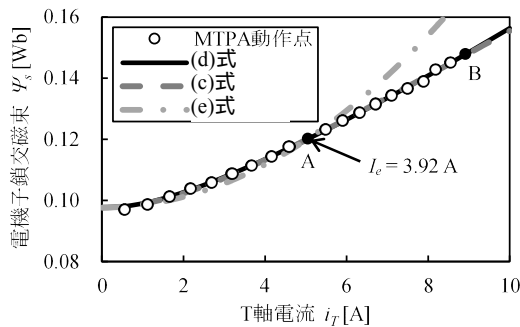


図 8 MTPA 数式モデルの比較 (実機 IPMSM)

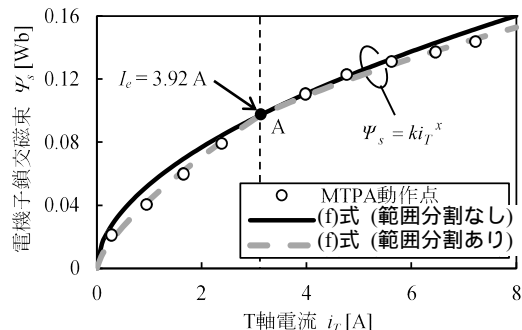


図 9 MTPA 数式モデルの比較 (SynRM 解析結果)

応として、 i_T の乗数を変化させる方法を提案した。

$$\Psi_s = k i_T^x + \Psi_a \quad (f)$$

ただし、 x は i_T の乗数であり、モータの MTPA 特性によって決まる値である。

さらに、定格電流でモデル式を使い分ける方法を適用した結果を図 9 に示す。図 9 は磁界解析ソフトウェアによって得られた結果である。1 つの式で MTPA 特性を得る場合(図 9 の実線)には定格電流の運転点 A では一致するものの、電流が小さい領域で誤差が増加した。一方、定格電流を境に定数 k, x を変えて 2 つの式で分割する場合には MTPA 動作点に一致しており良好な特性が得られた。

以上の成果により、SynRM を含む PMSM の MTPA 数式モデルを構築できたことになり、DTC による PMSM 駆動システムへの適用が容易になった。

なお、実機の SynRM でも同様の検証を行ったが、実機の場合には(f)式を定数固定とした場合でも一致する結果となり、定格電流での分割は不要であった。実機測定では値の変化を十分に観測できなかった可能性もあり、引き続き評価を進める予定である。

(4) 線間電圧と相電流の実効値から Ψ_s と i_T の関係を得る方法

DTC と同様に、電機子鎖交磁束は電圧の時間積分によって算出することができるが、電圧と電流の瞬時値が必要となり、MTPA 数式モデルのパラメータ決定には適さない場合がある。そのため、パワーメータのように電圧実効値 V_e と電流実効値 I_e から Ψ_s と i_T を算出する式を整理した。

$$\Psi_s = \frac{V_o}{\omega} = \frac{30\sqrt{v_{od}^2 + v_{oq}^2}}{\pi P_n N_m} \quad (g)$$

$$i_T = \sqrt{3} I_e \cos \left(\tan^{-1} \frac{v_{od}}{v_{oq}} - \beta \right) \quad (h)$$

$$v_{od} = -V_e \sin \left(\phi + \beta - \frac{\pi}{6} \right) + \sqrt{3} R_a I_e \sin \beta \quad (i)$$

$$v_{oq} = V_e \cos \left(\phi + \beta - \frac{\pi}{6} \right) - \sqrt{3} R_a I_e \cos \beta \quad (j)$$

ただし、 N_m は回転速度 (min^{-1})、 ϕ は線間電圧と相電流の位相差、 β は電流位相である。

(g)~(h)式を用いることにより、オシロスコープなどの波形観測装置が利用できない環境でもパワーメータがあればよく、M-T 座標上での数式モデルのパラメータ測定を容易に行うことができるようになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

(1) Tatsuki Inoue, Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada: "Maximum

Torque Per Ampere Control of a Direct Torque-Controlled PMSM in a Stator Flux Linkage Synchronous Frame”, IEEE Transactions on Industry Applications, 査読有, Vol. 52, No. 3, pp. 2360-2367, 2016, DOI: 10.1109/TIA.2016.2531618

- (2) Tatsuki Inoue, Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, “Mathematical Model for MTPA Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor in Stator Flux Linkage Synchronous Frame”, IEEE Transactions on Industry Applications, 査読有, Vol. 51, No. 5, pp. 3620-3628, 2015, DOI: 10.1109/TIA.2015.2417128
- (3) 井上達貴, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之, 「電機子鎖交磁束に同期した座標系における PMSM の最大トルク / 電流制御の数式モデルと制御手法」, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), 査読有, Vol. 135, No. 6, pp. 689-696, 2015, DOI: 10.1541/ieejias.135.689

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, “Wide-Speed-Range Operation of PMSM Drive System Based on Direct Torque Control in M-T Frame Synchronized With Stator Flux-Linkage Vector”, The 3rd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC 2017), 2017 年 6 月 5 日, 高雄 (台湾)
- (2) 上山輝, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之, 「電機子鎖交磁束に同期した M-T 座標上の MTPA 数式モデルの SPMSM への適用」, 平成 28 年電気関係学会関西連合大会, 2016 年 11 月 23 日, 大阪府立大学 (大阪府堺市)
- (3) Hikaru Kamiyama, Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, and Masayuki Sanada, “Mathematical Model of PMSM and SynRM Under Maximum Torque Per Ampere Condition in a Stator Flux-Linkage Synchronous Frame”, The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2016), 2016 年 11 月 15 日, APA Hotel & Resort Tokyo Bay Makuhari (千葉県千葉市)
- (4) 上山輝, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之, “電機子鎖交磁束に同期した M-T 座標における PMSM の最大トルク / 電流曲線を表す簡略化モデル”, 平成 28 年電気学会産業応用部門大会, 2016 年 8 月 31 日, 群馬大学 (群馬県前橋市)
- (5) 上山輝, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之, 「電機子鎖交磁束に同期した M-T 座標における SynRM の最大トルク / 電流曲線を表す数式モデルの検討」, 平成 28 年電気学会全国大会, 2016 年 3 月 18 日, 東北大学 (宮城県仙台市)
- (6) 上山輝, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之,

「電機子鎖交磁束に同期した M-T 座標における SPMSM の最大トルク / 電流曲線を表す過負荷領域に適した数式モデルの改善」, パワーエレクトロニクス学会 第 211 回定例研究会, 2015 年 12 月 19 日, 神戸市立工業高等専門学校 (兵庫県神戸市)

- (7) 上山輝, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之, 「電機子鎖交磁束に同期した M-T 座標における PMSM の最大トルク / 電流曲線を表す数式モデルの検討」, 平成 27 年電気関係学会関西連合大会, 2015 年 11 月 15 日, 摂南大学 (大阪府寝屋川市)
- (8) Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, “Mechanical Sensorless PMSM Drive System Based on Direct Torque Control in M-T Frame Synchronized With Stator Flux-Linkage Vector”, 2015 IEEE Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED2015), 2015 年 6 月 8 日, シドニー (オーストラリア)
- (9) 井上達貴, 井上征則, 森本茂雄, 真田雅之, 「電機子鎖交磁束に同期した座標における MTPA 数式モデルの高出力密度 PMSM への適用」, 平成 26 年電気関係学会関西連合大会, 2014 年 11 月 24 日, 奈良先端科学技術大学院大学 (奈良県生駒市)
- (10) Tatsuki Inoue, Yukinori Inoue, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, “A Novel Method of Maximum Torque per Ampere Control for a Direct Torque-Controlled PMSM in a Stator Flux-Linkage Synchronous Frame”, IEEE Energy Conversion-Congress and Exposition (ECCE2014), 2014 年 9 月 18 日, ピッツバーグ (アメリカ)
- (11) 井上征則, 「直接トルク制御による永久磁石同期モータ駆動システムと新しい数式モデル」, TECHNO-FRONTIER 2014 第 34 回モータ技術シンポジウム, 2014 年 7 月 24 日, 東京ビックサイト (東京都江東区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 征則 (INOUE YUKINORI)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 50580148