

モータハードウェアの技術革新によるモータドライブの新展開 ー 可変界磁機能をもつモータの設計と制御の可能性 ー

青山 真大* (スズキ), 野口 季彦 (静岡大学)

Next Developments of Motor Drive with Motor Hardware Innovation - Variable Magnetic-Flux Motor Designs and its Future Trends for Motor Drive -

Masahiro Aoyama* (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper introduces the recent research for variable magnetic-flux motor technique and indicates its future trend for motor drive. The following variable magnetic-flux technique will bring about the novel motor hardware innovation, a variable-magnetic-force memory motor, a brushless wound-field motor, a variable-field motor, a variable-skew motor, and a passively variable-magnetic-flux motor. In addition, the motor control development suitable for these variable magnetic flux motor becomes important due to pull out the potential of these hardware. In this paper, the important motor drive technique for variable magnetic-flux motors and its future trends are introduced with citing the prior techniques.

キーワード：モータドライブ，可変磁力，可変界磁，可変スキュー角，パルス電流，巻線界磁，磁化制御

Keywords：motor drive, variable magnetic-force, variable magnetic flux, variable skew angle, pulse current, wound-field, magnetization control

1. はじめに

近年、輸送機器分野における低炭素化社会の取り組みとしてハイブリッド（HEV）技術や電気自動車（EV）をエコカー開発に不可欠なコア技術と位置づけ、適用車両クラスの使われ方に合わせて様々な電動パワートレインシステムが開発されている。近年では、主要部品のモータ単体に対する高効率化・高出力化の要求だけでなく、システム効率向上を満たすために可変界磁技術が注目されている。本稿では先行技術として実機検証までされている可変界磁技術（誘導機は除く）に焦点を当てながら、可変界磁技術がもたらすモータドライブの新展開について紹介する。

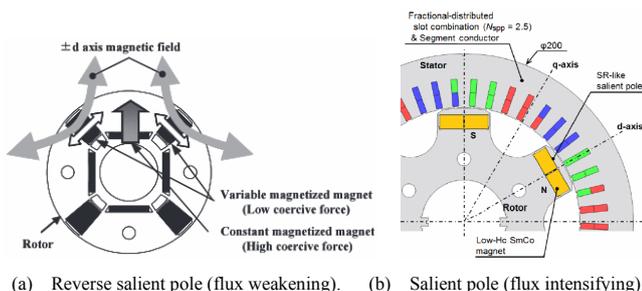


Fig. 1. Variable-magnetic-force memory motors ⁽¹⁾⁻⁽³⁾.

2. 可変界磁モータ

〈2-1〉可変磁力（メモリーモータ）タイプ⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 代表例の永久磁石の磁化状態を可変とするタイプとして、Fig. 1 に示すように逆突極構造で可変磁力させる低保磁力磁石と固定磁力磁石を備えた構造や順突極構造で可変磁力させる磁石のみを備えた構造が提案されている。可変速駆動範囲で界磁磁石の磁力を増減磁させて最適な磁石起磁力と電機子起磁力のバランスで駆動させることで高効率駆動を達成している。駆動システム上の特長として、一般的な永久磁石同期モータ（PMSM）と同様、三相インバータとモータで構成され磁石磁力を変化させるための磁界は、 d 軸電流指令値にパルス波を重畳して三相インバータから供給されるため特別な付加装置が不要である。この種のモータは着減磁時に d 軸パルス電流による損失が発生するため、パルスの印加回数や、印加量と各駆動点での実用着磁率を最適化することでシステム効率の向上に繋がる。文献(3)では電気自動車適用を想定し、実際のドライビングサイクルにおいて着減磁スケジュールのための制御器（ヒステリシス制御）を用いてシステムの総合損失を 39% 低減できると報告している。今後、システムレベルでの技術開発が強く望まれる。

〈2-2〉ブラシレス巻線界磁タイプ⁽⁴⁾⁻⁽¹³⁾ ブラシレス

巻線界磁タイプとして古くは文献(4)の自励式が挙げられる。その後、制御的に非同期回転磁界を発生させてロータ巻線に起電力を得てダイオード整流する方法や分布巻ステータで巻線配置を工夫することで第 2 次空間高調波を意図的に発生させる方法が検討されてきた⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。近年は Fig. 2 に示す集中巻ステータで不可避に発生する第 2 次空間高調波を自励界磁エネルギー源に活用する方法が検討されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。この種の自励式巻線界磁モータは空間高調波自励の場合、回転速度や電機子起磁力、電流位相によるパッシブな可変界磁機能を有し、時間高調波自励の場合、基本波回転磁界に重畳させる時間高調波の周波数や振幅によるアクティブな可変界磁機能を有する。一方、空間高調波自励の場合、従来損失だった高調波磁束によって界磁形成するため、一次側から故意にロータ自励のためのエネルギーを供給する必要がない。しかし、時間高調波自励の場合、基本波回転磁界にロータ自励のためのエネルギーを重畳させる必要があるため、システム効率の低下が懸念される。今後、自励技術は空間高調波と時間高調波自励を組み合わせることでシステム効率向上を達成できる技術開発が期待される。

自励式以外の方法として Fig. 3 に示すステータに電機子巻線と界磁巻線を備え、静止磁界を突極ロータのパーミアンス分布で磁気変調するタイプが提案されている⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。駆動原理の都合上、トルク（周方向電磁力）発生に寄与しているロータ鉄心領域が他のモータと比較して低く、原理的に SPM（Surface Permanent Magnet）特性になるためトルク密度が低い。界磁巻線用の追加のチョップ回路も必要になる。一方、ロータが鉄心のみで構成されるため堅牢性が高く巻線界磁による可変界磁機能を備えているため小型高回転化（高出力密度）に適したモータだと言える。今後、追加で必要になるチョップ回路を駆動システムに統合させるなどハード構成面での技術革新が望まれる。

〈2・3〉 イメージポール磁化量調整タイプ⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁷⁾ 代表例として Fig. 4 に示すようにステータ側に電機子巻線と界磁巻線を備え、コンシクエントポール構造のロータが組み合わさる。界磁磁束ベクトルは磁石より透磁率の高い突極に選択的に鎖交し、界磁電流の方向を制御することで磁石磁束と界磁磁束が互いに同じ向きに電機子巻線に鎖交するもしくは、逆向きに鎖交することで可変界磁を実現している。三次元磁路のため圧粉鉄心（SMC）など材料的な課題や漏れ磁束による損失増加の課題もあるが一方で、磁気回路を工夫することでリラクタンストルクも活用できるため、文献(11)-(13)の磁気変調タイプよりもトルク密度向上が可能であり、高トルク密度化に適したモータだと言える。今後、コンシクエントポールの磁気回路工夫による更なる高トルク化が期待される。

〈2・4〉 可変スキュー構造タイプ⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ 一般的なステータと、軸方向に多分割されたセクションの一部が相対的に回転可能（磁極のスキュー角が可変）なロータを備えた構造である。Fig. 5 に示すようにロータの磁極を相対回転させるために外部アクチュエータを用いている。スキュー角

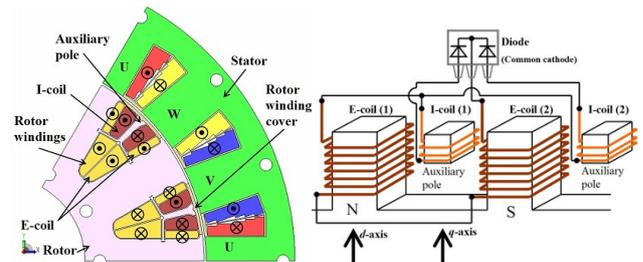
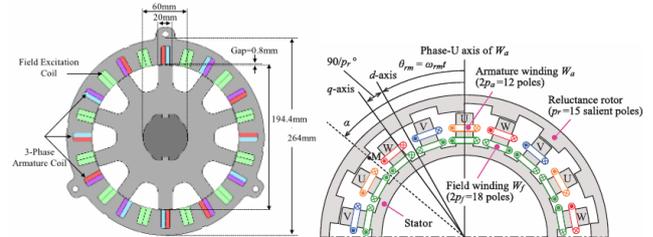


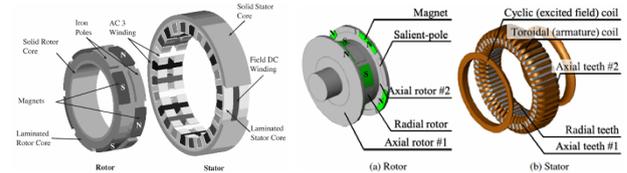
Fig. 2. Self-excited wound-field motor with diode-rectifier circuit⁽⁹⁾.



(a) Flux switching type⁽¹²⁾.

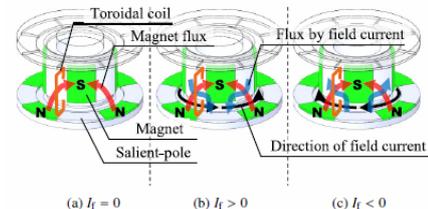
(b) Flux modulating type⁽¹³⁾.

Fig. 3. Separately-excited wound-field motor with flux modulation.



(a) Radial-air-gap type⁽¹⁵⁾.

(b) Multi-air-gap type⁽¹⁶⁾.



(c) Principle of variable-field of consequent-pole⁽¹⁶⁾.

Fig. 4. Variable-field motor.

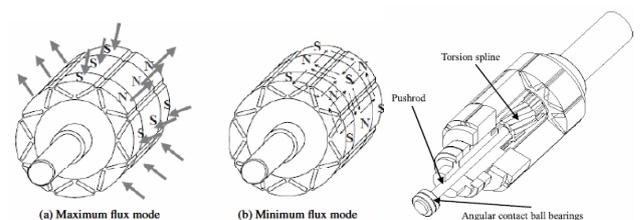


Fig. 5. Variable magnetic flux motor with mechanical adjustment⁽¹⁹⁾.

を変化させることでロータ内部で短絡磁路が形成され電機子鎖交磁束を調整できる。構造的な課題や駆動中の可変スキューの駆動制御方法に課題が残るが、残留磁束密度が高い磁石を用いて界磁調整できるため、可変磁力タイプと比較して高トルク密度化できる。今後、外部アクチュエータが不要になる技術開発や、実駆動時に界磁量（最適なスキュー角）と電流位相の組み合わせをどのように実現するかの制御面での技術開発が望まれる。

〈2・5〉 自励可変界磁タイプ⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾ 可変磁力磁石やアクチュエータ等の追加要素がなく、従来のベクトル制御で可変界磁をパッシブに実現できる方法として、Fig. 6 に示す

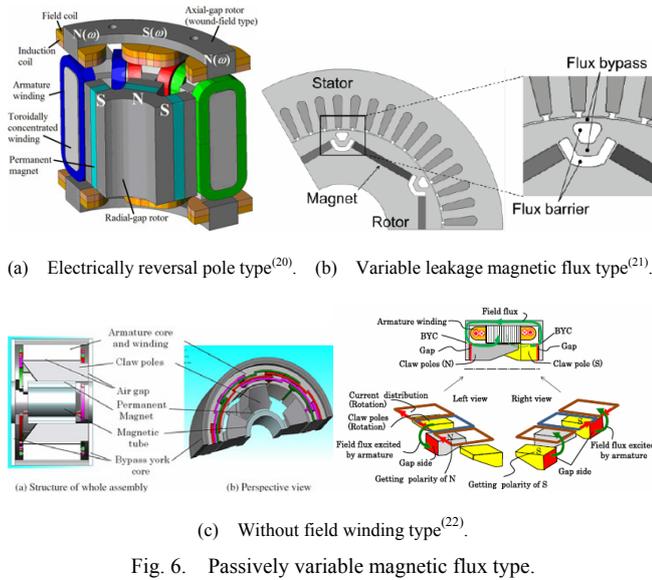


Fig. 6. Passively variable magnetic flux type.

文献(20)の電氣的磁極反転タイプ、文献(21)の可変漏れ磁束タイプ、文献(22)の界磁巻線を不要タイプが挙げられる。前者は回転速度、電機子電流の振幅と位相によって可変界磁特性を実現しており、後者の 2 つは電機子電流の振幅と位相で可変界磁を実現している。電氣的磁極反転タイプは従来損失になっていた空間高調波を弱め界磁に活用している点に新規性があり、各起磁力バランスを調整することで高効率エリアを拡大できる可能性を秘めている。一方で複雑な構造や可変界磁レンジが他の可変界磁タイプと比較して狭いという課題がある。可変漏れ磁束タイプは二次元磁気回路のシンプルな構造で構成されるが電流位相進角により漏れ磁束が増加する傾向のため、リラクタンストルクの活用が難しい。界磁巻線不要タイプは順突極のため電機子反作用トルクを活用できないこと、バイパス磁路での損失が懸念される。一方で界磁銅損が発生しないという利点がある。この種のモータは今後、更なる磁気回路の工夫によりトルク密度の向上が期待される。

3. 可変界磁のポテンシャルを引出すモータ制御技術

前章で紹介した可変界磁技術のモータハードのポテンシャルを引出すためにはモータ制御技術も非常に重要になる。以下、各可変界磁技術で必要になるモータ制御技術について先行技術の事例を紹介していく。

〈3・1〉可変磁力モータの磁化制御^{(23)~(25)} 可変磁力モータはモータ駆動電流で永久磁石の磁力が変化しないように且つ、インバータ定格の数倍以下の電流で発生できる着減磁界の制約から可変磁力用の磁石の保磁力は 100 ~ 400 kA/m 程度が選ばれる。さらにモータハードの極とスロット比によって磁化磁束が一度に全ての可変磁力磁石に鎖交しない場合もあるため、Fig. 7 に示すように角度依存性を考慮しながら磁化電流を流すタイミングを制御する必要がある。さらに 10 ms 程度の短時間で角度依存性を考慮しながら

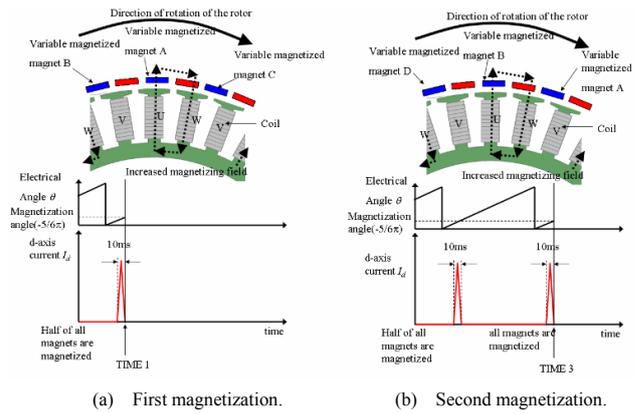


Fig. 7. Magnetization process (4 pole-vs.-3 slot combination)⁽²⁴⁾.

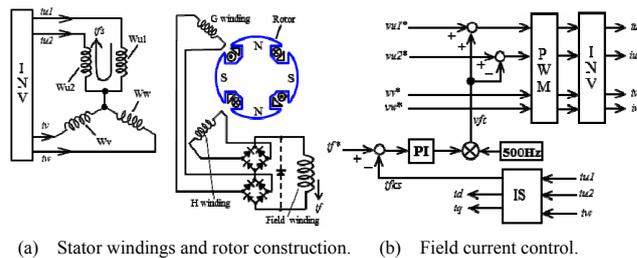


Fig. 8. Non-conductive power supply technique for wound-field motor⁽²⁷⁾.

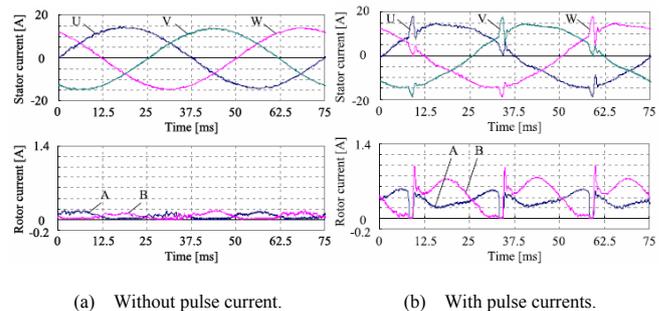
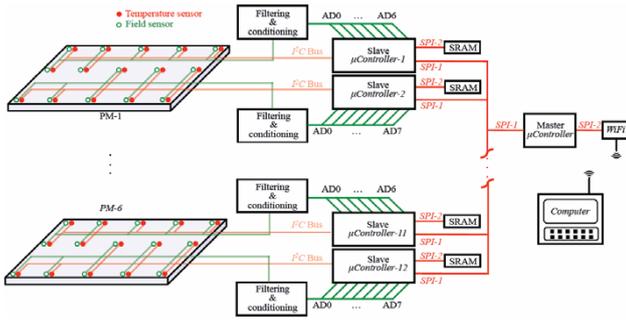


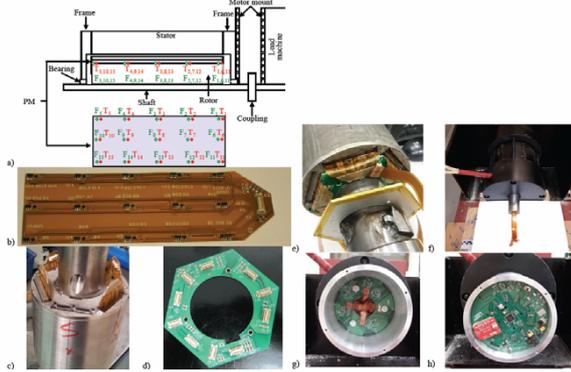
Fig. 9. Flux intensifying control with superimposing pulse currents⁽²⁸⁾.

高速制御をする必要があるため、磁化電流指令は d 軸のモータ逆数学モデルを用いてフィードフォワード制御する。一方、 q 軸電流はフィードバック制御され、磁化制御は 2 つの制御を複合させる必要がある。磁化完了後の d 軸電流はフィードバック制御に戻る。これらの可変磁力モータの磁化制御で重要なことは文献(3)でも述べられている通り、実駆動サイクルにおけるシステム効率で考えることである。さらに磁石温度に対するロバスト性(磁化電流指令に磁石温度も考慮)を高めることが望まれる。

〈3・2〉自励式巻線界磁の強め界磁制御⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾ ロータ上にダイオード整流回路を備えた自励式巻線界磁モータの強め界磁制御手法として、基本波回転磁界に特定周波数の時間高調波を重畳させ、非同期回転磁界により誘導起電力をロータ上で得て自励する方法が知られている。近年では Fig. 8 に示すように、U 相電機子巻線を二組(四線式スター結線)にし、高調波電流を U 相電流指令値に重畳する方法が検討されている。なお、二組の U 相電機子巻線に正相と逆相の高調波電流指令値を重畳させることで非同期回転磁界を発生させながら、基本波回転磁界に直流重畳しないよ



(a) Schematic representation of temperature and field measurement system.



(b) Temperature and field sensors array, mounted on a flexible PCB, rotor assembling, connection PCB, and conditioning PCBs and WiFi module.

Fig. 12. Wireless Permanent Magnet Temperature & Field Distribution Measurement System⁽³³⁾.

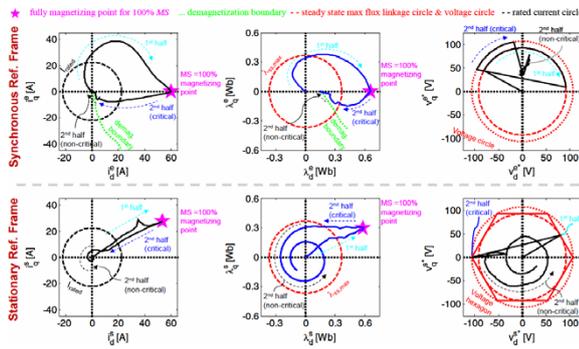


Fig. 13. Stationary synchronous reference frame currents, flux linkages, and commanded voltages in dq -vector format for straight line stationary frame flux linkage trajectory⁽³⁶⁾.

く、コントローラ側で十分に把握する必要がある。可変磁力モータの場合、目標の着減磁率になるように d 軸電流に重畳するパルス電流指令値を決定する際に磁石温度が重要な意味を持つ。可変スキューやイメージポール磁化量調整タイプにおいても磁石温度によって界磁調整幅が異なるため、磁石温度推定が重要になる。磁石温度を推定する方法は誘起電圧に重畳する高調波成分を使う方法や、高調波電流を利用する方法などが提案されている⁽²⁹⁾⁻⁽³²⁾。同時に磁石温度推定方法の有用性を検証するための測定技術も重要となる。スリップリング等を用いて磁石温度測定を行うと熱伝達経路が実駆動状態と異なるため、ワイヤレスで磁石温度を測定する必要がある。近年, Fig. 12 に示すようにフレキシブル PCB にセンサ (温度センサ: TI 社製 TMP100, 磁界センサ: ホール効果 GaAs センサ) をマウントし, WiFi

通信で測定するシステムで磁石温度分布の測定とそのときの磁場分布測定を行い実機検証されている⁽³³⁾。制御的に磁石温度による影響を数学モデルに考慮する取り組みも行われており、これらの技術は今後、磁石を備えた可変界磁モータの開発を促進させる上で重要な技術となる⁽³⁵⁾。

4.2) 磁化制御アルゴリズム⁽²⁶⁾⁽³⁶⁾ 可変磁力モータの磁化制御アルゴリズムを検討していくにあたり, Fig. 13 に示すように磁化時の軌跡を分析する技術が重要になる。軌跡を追うことで最適な磁化スケジュールの考察や、磁化エネルギー量を最小にしながる磁化制御する方法の検討などが可能になる。

4.3) ロータ巻線温度推定制御⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾ ブラシレス巻線界磁モータ (ステータに界磁巻線を備えたフラックススイッチングモータは除く) の場合、磁石式モータと同等のロータ界磁起磁力を狙って設計するとロータ巻線での発熱が問題となる。ワニス等で含浸している場合、一般的にコイル含浸に用いられるワニスのガラス転移温度 (T_g) が $160 \sim 180^\circ\text{C}$ となる。遠心力や電磁振動等に対する機械強度確保の観点からロータ発熱がワニスのガラス転移温度に達しないようにコントローラ側で推定することが求められる。空間高調波を界磁エネルギー源にした自励式において、ロータ巻線温度推定を見据えて従来の巻線形同期モータのベクトル制御を適用してオフラインで測定したモータパラメータと dq 軸電圧方程式で計算したトルクを実測値と比較し、既存制御モデル適用時の課題を抽出する検討がされている⁽³⁷⁾。さらに界磁エネルギー源になる第 3 次時間高調波 (静止座標系における第 2 次空間高調波) を考慮し、既存の dq 軸電圧方程式を拡張する試みも行われている⁽³⁸⁾。時間高調波によりロータ巻線へ給電するブラシレス巻線界磁技術においても、システム効率向上の観点から自励現象を数学モデルに表現することは重要であり、機能性安全を確保する上でも必須の技術となる。

4.4) d 軸インダクタンス推定技術 可変界磁モータ全般において、電圧制限閾値以上の回転速度において界磁調整を行うため d 軸インダクタンスが増加する傾向になる。従来の固定界磁の場合、 d 軸インダクタンスは d 軸電流と軸間干渉 (q 軸電流) によって変動する値 (d 軸電流もしくは q 軸電流の増加によって d 軸インダクタンスは減少する傾向) であったが、可変界磁においては界磁調整のタイミング (例えば電圧制限閾値威容の回転速度) によっても変動する値になる。制御モデル構築時にこの変動を推定する技術が可変界磁モータのポテンシャルを引出すためには重要な技術となる。

5. まとめ

本稿では、先行技術として実機検証までされている可変界磁技術 (誘導機は除く) に焦点を当てながら、可変界磁技術がもたらすモータドライブの新展開について紹介した。可変界磁技術によってもたらされる制御技術の今後の可能性は、ハード設計を工夫することで実現しようとして

いる目的を支えてハードのポテンシャルを引出すために重要な意味を持つ。現時点ではハードの技術革新に対して、モータドライブは従来の固定界磁もしくは巻線界磁の数学モデルを適用するにとどまっているため、今後ハードに適したモータ制御開発が強く期待される。

文 献

- (1) V. Ostovic: "Memory motors: a new class of controllable flux PM machines for a true wide speed operation", *Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*, Conference Record of the 2001 IEEE, Vol. 4, pp.2577-2584 (2001).
- (2) 堺和人・結城和明・橋場豊・高橋則雄・安井和也・ゴウウツェックンランシーリット: 「可変磁力モータの原理と基本特性」, 電学論 D, Vol. 131, No. 1, pp. 53-60 (2011).
- (3) 福重孝志・加藤崇・赤津観・Robert D. Lorenz: 「電動車両における可変磁力モータの検討」, 電学論 D, Vol. 135, No. 9, pp. 922-928 (2015).
- (4) 野中作太郎: 「自励形単同期電動機」, 電気学会雑誌, Vol. 78, No. 842, pp. 18-26 (1958).
- (5) 小山純・樋口剛・阿部稔彦・山田英二: 「交流励磁方式ブラシなし同期電動機の原理と基礎特性」, 電学論 D, Vol. 109, No. 7, pp. 515-522 (1989).
- (6) 野中作太郎・袈裟丸勝巳・堀田一夫: 「励磁機なしブラシレス三相同期発電機の解析」, 電学論 D, Vol. 112, No. 5, pp. 483-489 (1992).
- (7) 深見正・高香滋・宮本紀男・柴田福夫: 「三相同期発電機の新しい自己励磁法」, 電学論 D, Vol. 114, No. 11, pp. 1083-1089 (1994).
- (8) 梨木政行・道木慎二: 「ロータ科維持巻線への比接触給電機能をもつ界磁巻線形同期モータの検討」, H27 年電気学会産業応用部門大会, No. 3-27, pp. III-175-178 (2015).
- (9) 青山真大・野口季彦: 「空間高調波を利用した補極付ラジアルギャップ形磁石フリーモータの実機検証」, 電学論 D, Vol. 135, No. 8, pp. 869-881 (2015).
- (10) 平本健二・中井英雄・加納裕子・山田英治・水谷良治: 「ダイオード整流型磁石フリーモータの提案と原理検証」, 電学論 D, Vol. 136, No. 1, pp. 54-60 (2016).
- (11) C. Pollock, and M. Wallace: "The flux switching motor, a DC motor without magnets or brushes", *Thirty-Fourth IAS Annual Meeting*, Conference Record of the 1999 IEEE (1999).
- (12) 桑原優・小坂卓・鎌田義信・梶浦裕章・松井信行: 「HEV 駆動用 WFFSM の界磁巻線電流増加による高出力化メカニズムの実験検証」, 電学論 D, Vol. 135, No. 9, pp. 939-947 (2015).
- (13) 深見正・山田知徳・島和男・津田敏宏・川村光弘: 「磁束変調同期電動機」, 電学論 D, Vol. 134, No. 6, pp. 634-640 (2014).
- (14) 水野孝行・永山和俊・足利正・小林忠夫: 「ハイブリッド励磁形ブラシレス同期機の動作原理と基本特性」, 電学論 D, Vol. 115, No. 11, pp. 1402-1411 (1995).
- (15) J. A. Tapia, F. Leonardi, and T. A. Lipo: "Consequent-Pole Permanent-Magnet Machine with Extended Field-Weakening Capability", *IEEE Trans. IA.*, Vol. 139, No. 6, pp. 1704-1709 (2003).
- (16) 難波雅史・平本健二・中井英雄: 「可変界磁機能を有する 3 次元磁気回路モータの提案」, 電学論 D, Vol. 135, No. 11, pp. 1085-1090 (2015).
- (17) 高橋朋平・竹本真紹・小笠原悟司・小川徹・有田秀哲・大穀晃裕: 「界磁巻線を備えたコンシクエントポール PM 型アキシャルギャップモータの運転特性」, IEEJ MD/RM/VT 合同研究会資料, MD-15-088, RM-15-069, VT-15-016 (2015).
- (18) 野中剛・大賀荘平・大戸基道: 「可変界磁モータの駆動に関する考察」, 電学論 D, Vol. 135, No. 5, pp. 451-456 (2015).
- (19) 石井隆明・野中剛・大賀荘平・大戸基道: 「機械調整式化変界磁モータの試作と制御」, 電学論 D, Vol. 136, No. 5, pp. 328-335 (2016).
- (20) 青山真大・中島一清・野口季彦: 「電氣的磁極反転形可変界磁 PM モータの実機検証」, IEEJ SPC/MD 合同研究会資料, SPC-17-010, MD-17-010 (2017).
- (21) 加藤崇・赤津観: 「漏れ磁束制御型可変特性モータの磁石動作点特性」, H27 年電気学会産業応用部門大会, No. 3-1, pp. III-65-III-70 (2015).
- (22) 草瀬新・栗原和美: 「電機子巻線を界磁源とする新たなハイブリッド可変界磁モータ」, 電学論 D, Vol. 136, No. 11, pp. 872-877 (2016).
- (23) 前川佐理・永井一信・新田勇・細糸強至: 「可変磁力モータの制御方法」, H22 年電気学会全国大会, No. 5-13, pp. 17-18 (2010).
- (24) 新田勇・前川佐理・志賀剛: 「直列型可変磁力モータ」, H22 年電気学会全国大会, No. 5-11, pp. 20-21 (2010).
- (25) 加藤崇・福重孝志・佐々木健介・谷本勉: 「直列積層磁石を用いた車両駆動用可変磁力モータの磁化制御特性」, H28 年電気学会産業応用部門大会, No. 3-34, pp. III-221-III-224 (2016).
- (26) 佐々木健介・Brent S. Gagas, 福重孝志・加藤崇・赤津観・Robert D. Lorenz: 「可変磁力モータの高速領域における着磁時電圧上昇の抑制及び、着磁制御に伴うトルク脈動に関する考察」, H28 年電気学会産業応用部門大会, No. 3-5, pp. III-109-III-112 (2016).
- (27) 梨木政行・道木慎二: 「ロータ界磁巻線への非接触給電機能を持つ界磁巻線形同期モータの検討」, H27 年電気学会産業応用部門大会, No. 3-27, pp. III-175-III-178 (2015).
- (28) 平本健二・中井英雄・鈴木博光・山田英治・水谷良治: 「ダイオード整流型磁石フリーモータの低回転域のトルク向上」, 電学論 D, Vol. 136, No. 10, pp. 784-790 (2016).
- (29) D. Reigosa, F. Briz, P. Garcia, J. M. Guerrero, and M. W. Degner: "Magnet Temperature Estimation in Surface PM Machines Using High Frequency Signal Injection", *IEEE Trans. IA.*, Vol. 46, No. 4, pp. 1468-1475 (July-Aug., 2010).
- (30) D. Reigosa, D. Fernandez, H. Yoshida, T. Kato, and F. Briz: "Permanent Magnet Temperature Estimation in PMSMs Using Pulsating High Frequency Current Injection", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'14)*, pp. 1729-1736 (Sept., 2014).
- (31) M. Ganchev, C. Kral, and T. Wolbank: "Compensation of Speed Dependency in Sensorless Rotor Temperature Estimation for Permanent Magnet Synchronous Motors", *IEEE Trans. IA.*, Vol. 49, No. 6, pp. 2487-2495 (Nov.-Dec., 2013).
- (32) D. Reigosa, D. Fernandez, T. Tanimoto, T. Kato, F. Briz: "Permanent Magnet Temperature Distribution, Estimation in PMSMs Using BEMF Harmonics", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'15)*, pp. 768-775 (Sept., 2015).
- (33) D. Fernandez, D. Reigosa, T. Tanimoto, T. Kato, and F. Briz: "Wireless Permanent Magnet Temperature & Field Distribution Measurement System for IPMSMs", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'15)*, pp. 3996-4003, (Sept., 2015).
- (34) J. Herbert, AKM Arafat, S. Choi: "Novel Frequency Determination Method for Dynamic Magnet Temperature Estimation of a Five Phase PMA-SynRM Using Signal Injection Method", *IEEE Thirty Second Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC2017)*, pp. 3179-3186, (Mar., 2017).
- (35) 中津川潤之介・岩路善尚・榎本裕治: 「温度変化に対応した永久磁石同期モータの数学モデルの拡張」, 電学論 D, Vol. 136, No. 4, pp. 263-269 (2016).
- (36) B. S. Gagas, K. Sasaki, T. Fukushima, A. Athavale, T. Kato, R. D. Lorenz: "Analysis of Magnetizing Trajectories for Variable Flux PM Synchronous Machines Considering Voltage, High Speed Capability, Torque Ripple, and Time Duration", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'15)*, pp. 5642-5649 (Sept., 2015).
- (37) 森川真樹・松尾健太郎・許琮媛・名取賢二・近藤圭一郎・青山真大・大塚宏明: 「空間高調波を利用した自励式巻線界磁形同期モータのインダクタンス同定と評価」, 電気学会半導体電力変換/モータドライブ合同研究会資料, SPC-17-023/MD-17-023 (2017).
- (38) 青山真大・大塚宏明・森川真樹・松尾健太郎・近藤圭一郎: 「ロータ電流推定を目的とした空間高調波自励式巻線界磁形同期モータの数学モデルの基礎検討」, 電気学会モータドライブ/家電・民生合同研究会資料, MD-17-050/HCA-17-001 (2017).