

令和 4 年 5 月 29 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04090

研究課題名(和文) 高回転仕様で設計された小型表面磁石同期電動機の位置センサレス全速度域駆動法の開発

研究課題名(英文) Development on position sensorless control for whole operating range of high-speed permanent magnet synchronous motor

研究代表者

長谷川 勝 (HASEGAWA, MASARU)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：70340198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高回転仕様で設計された小型表面磁石同期電動機の位置センサレス全速度域駆動法の開発に取り組んだ。始動ならびに低速域においては、位置推定のために高周波信号を重畳するのが一般的ではあるが騒音の問題が生じる。本研究では、極短時間の高周波信号重畳で初期位置推定を完了させ、その後の始動ならびに低速域駆動を高周波信号を用いず実現する方式を開発した。また、低速域においてしばしば見られる位置推定値の周期振動を抑制する簡易な手法を開発した。一方、高速域においてはシャント抵抗による電流検出方式を前提にしたインバータによるドライブシステムにおいて、過変調運転を可能にする方式を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高回転仕様で設計された小型表面磁石同期電動機の位置センサレス制御は民生分野を中心に広く使われており、その小型化、広運転範囲化、低騒音化はユーザの使用感を大きく改善するものである。本研究にてこの課題に取り組んだ結果、位置センサレス制御において始動から高速側運転範囲の拡大を実現した。本方式では、始動前の初期位置推定のためにわずかな時間(10ms～)だけ高周波信号を重畳する以外はこれを用いないため、制御性能の向上と同時に静穏化を図ることができ、特に社会的意義が大きいと判断する。

研究成果の概要(英文)：This project has tackled the development on the position sensorless control for whole operating range of high-speed permanent magnet synchronous motors. Generally, the high frequency signal injection is often utilized for the initial position estimation at the starting and low-speed drive of position sensorless control, which causes acoustic noises. This project successfully develops the starting and low speed control algorithm without any high-frequency signal injection except for the initial position estimation. In addition, this project successfully suppresses the periodic oscillation in the estimated rotor position by simple algorithm. On the other hand, as the high speed drive technique, this project develops the current estimation method which enables to reconstruct the three phase currents in the over-modulation region of the PWM inverter with shunt resistances for low-cost current detection.

研究分野：パワーエレクトロニクス，制御工学

キーワード：永久磁石同期電動機 位置センサレス制御 全速度域 始動

1. 研究開始当初の背景

(1) 埋込磁石同期モータ (以下、IPM モータ) は高出力密度化と高効率化とが両立可能なモータであり、産業界、家電民生、車載用途として用いられる。また、システム全体の小形化、低コスト化を目的とした回転子位置センサレス制御系も実用化が進み、停止・低速から PWM インバータの過変調、1パルス運転を利用した高速・高出力駆動までを高品質な性能で実現することが求められる。ただし、従前の位置センサレス制御技術においては、複数の回転子位置推定法を駆動する速度域に応じて切り替えて適用するのが一般的であり、制御器の切り替えに伴う種々の問題を誘引することになる。また、さらなる低コストを目的に電流センサを排したシャント抵抗方式を採用すると、交流側電流の再現技術との兼ね合いからインバータの過変調・1パルス駆動の利用に制限が生じ、高出力化が達成できない問題が生じる。以上が本研究に関わる技術的背景である。

2. 研究の目的

本研究課題は IPM モータのセンサレス制御に関する上記の技術的課題を制御器の切り替えなく実現する手法を確立することを目的とした。具体的にはこの技術的課題を

- (1) 高周波信号重畳を最小限に留める位置センサレス始動法の確立
- (2) 停止・低速における位置推定精度の改善
- (3) 3シャント2相電流検出方式における PWM インバータ過変調運転を用いた高速駆動の実現に分割し、それぞれの技術的課題の解決を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 高周波信号重畳を最小限に留める位置センサレス始動法の確立については、低速時における基本性能を改善する手法を前提に開発を行った。研究代表者は過去にオールパスフィルタ(以下、APF)を用いた IPM モータの位置センサレス制御における低速性能の改善方法を確立しており、本研究課題ではこの特性を利用した。

図1にこれを前提にした本研究課題におけるアプローチを示す。同図(a)が従来の考え方であり、高周波信号重畳方式で初期位置推定を行った後、高周波信号を重畳したまま位置センサレス制御で始動を行うものである。一方、同図(b)は提案法によるアプローチであり、高周波信号方式で初期位置推定を行った後は高周波信号を重畳することなく位置センサレス始動を実現する。APFを用いることにより始動直後からの位置推定精度が大幅に改善し、高周波信号を重畳することなく位置センサレス始動が可能になると期待できる。また、高周波信号を重畳する時間は始動前に行う初期位置推定が完了するまでの短時間でよく、耳障りな騒音の大幅な低減が期待できる。

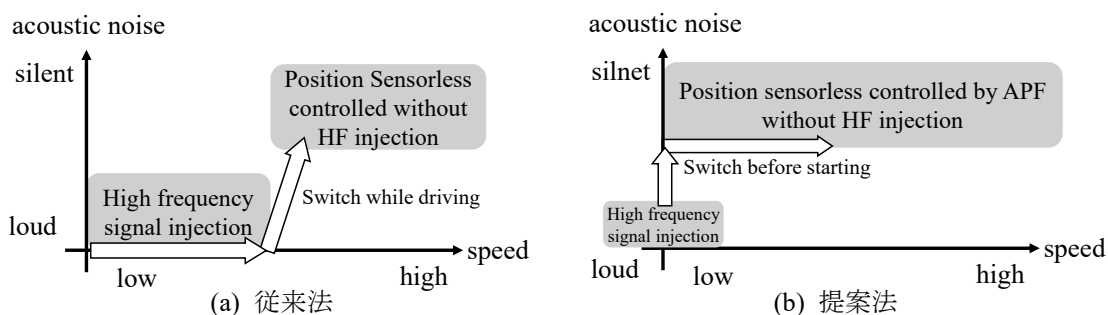


図1 始動方法のアプローチ

- (2) 停止・低速における位置推定精度のさらなる改善技術については、位置推定値の算定アルゴリズムに関わる原点に立ち返って検討した。

図2に示すように、推定磁束ベクトルの軌跡がオフセットをもつ場合、その方向によっては位置推定誤差を生じさせる場合とそうでない場合が生じる。また、図2は磁束振幅に対して伸縮が生じることも示しており、磁束ベクトルの方向によってはその伸縮の有無が異なることがわかる。以上より、図3に示す磁束振幅値と位置推定誤差の関係に着目することで位置推定精度の改善が可能になるとの着想を得た。

- (3) 位置センサレス制御においてさらなる低コスト化を図るために、シャント電流検出方式を採用することがある。高速回転モータなど低インダクタンスをもつ機種を対象にする場合、モータ電流に含まれる PWM キャリア成分が大きくなることからキャリア同期検出が必要であり、3シャント電流検出方式が採用されるが、低コスト化を図るために2相分しか計測しないことがある。この結果、過変調運転時には1相分しか電流検出できず、電流再現に関して不良設定問題に

陥ることから過変調運転による出力向上が困難となる。そこで、本研究課題では電流推定モデルを設定することでこの問題に対処する方針を立てて研究を進めた。

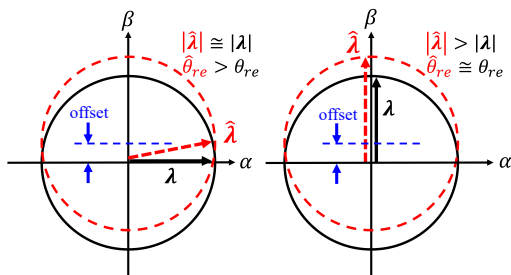


図2 推定磁束ベクトルのオフセットによる位置推定誤差の発生原理

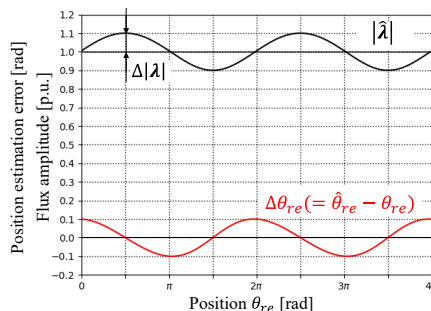


図3 推定磁束の振幅と位相との関係

4. 研究成果

(1) 高周波信号重畳を最小限に留める位置センサレス始動については、初期位置推定時のみ高周波重畳を行う方針で進め、磁束推定器を構成する擬似積分器とAPFとに適切な初期値を設定することにより始動特性を改善するアルゴリズムを確立した。

図4に位置センサレス始動結果を示す。同図(a)は適切な初期値補償を行わない従来法での結果であり、始動不良を起こして立ち上げに多くの時間を要していることがわかる。一方、同図(b)は提案法の結果であり、極めて良好な始動特性を実現している。なお、始動と同時に100%負荷を印加した場合や初期位置推定誤差が生じている場合でも10°以内であれば、良好な始動が可能であることを確認している。

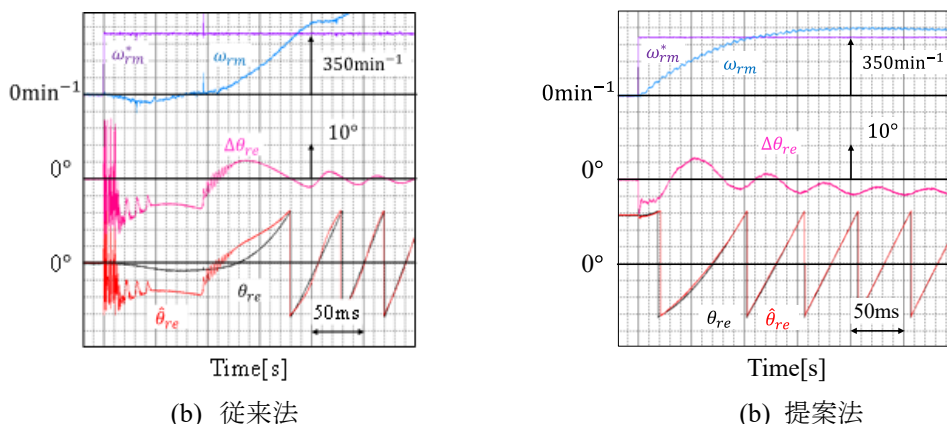


図4 位置センサレス始動特性

(2) 停止・低速における位置推定誤差の脈動低減については、上記の着想に基づいて図5の制御系を構成して評価を行った。赤点線内が提案法による脈動低減部である。

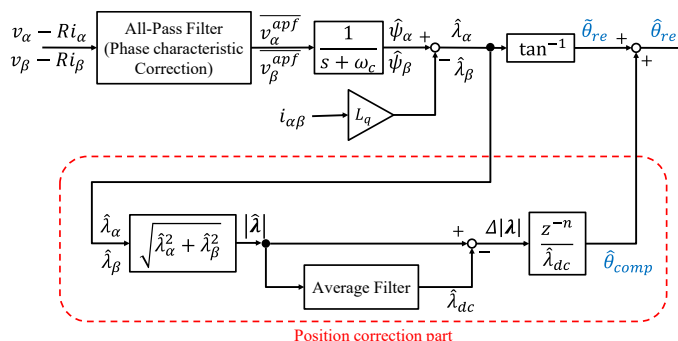
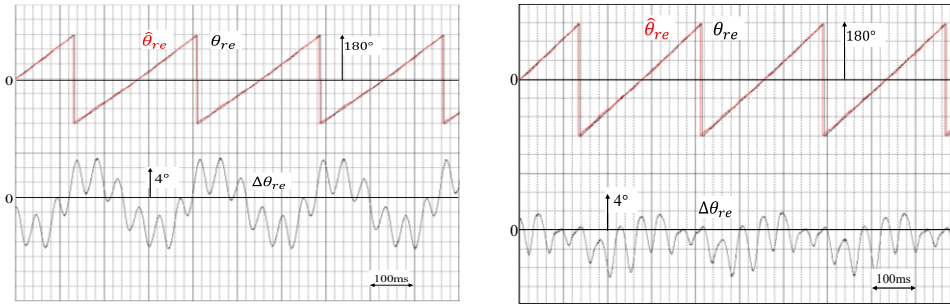


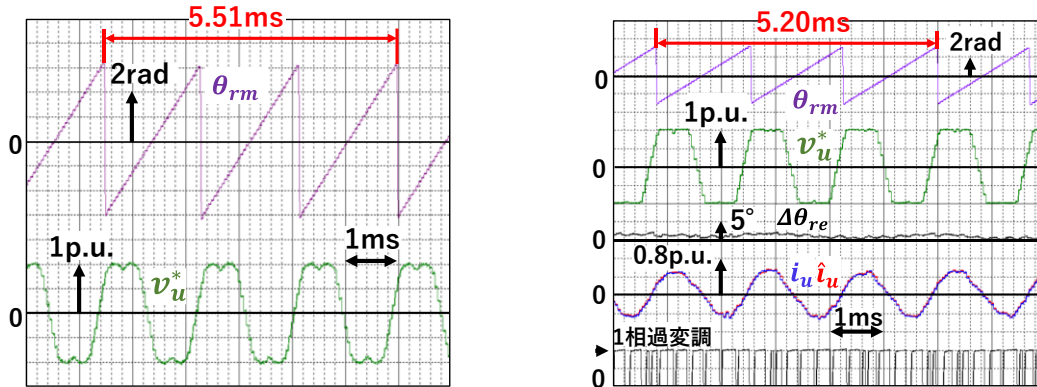
図5 低速時の位置推定誤差の脈動低減制御系

図6にその結果を示す。同図(a)は従来法によるものであり、位置推定誤差に基本波脈動が3.08°、6次調波成分が1.93°残存している。これに対し、同図(b)に示すように提案法を用いれば位置推定誤差に含まれる基本波脈動は0.705°、6次調波成分が1.32°に低減可能となり、本手法の有効性が確認できる。



(a) 従来法 (b) 提案法
 図 6 低速時の位置推定誤差脈動の低減法

(3) 3 シャント 2 相電流検出方式における PWM インバータの過変調運転を利用した高速駆動時の制御結果を図 7 に示す。図(a)はモータ電流を推定する必要のない線形領域における運転可能最高速度時の結果，図(b)は電流推定が必要となる過変調領域を利用した際の運転最高速度時の結果である。同図より，5.9%の速度向上が確認でき，供試モータの高出力駆動が可能になるといえる。ただし，現状では安定な位置センサレス制御の実現が 1 相過変調運転に制限されており，線形領域運転に対して 9%の速度向上実現という目標に対し，約 3%のさらなる速度向上が課題として残った。



(a) 線形領域での上限速度運転特性 (b) 提案法による上限速度
 図 7 3 シャント 2 相電流検出方式による位置センサレス制御特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Naoki Kawamura, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, Masaru Hasegawa	4. 巻 10
2. 論文標題 Position Sensorless Adaptive Positioning Servo System with Simplified Differential Calculation and High-Frequency Voltage Injection Strategy Considering Acoustic Noise Suppression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejia.19012766	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 藤田和樹, 長谷川勝	4. 巻 141
2. 論文標題 オールパスフィルタを用いた埋込磁石同期電動機の位置センサレス始動法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 Naoki Kawamura, Tadanao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, Masaru Hasegawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Simultaneous Estimation of Rotor Speed and Stator Resistance in Speed-Sensorless Vector Control of Ims	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejia.20011814	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 Naoki Kawamura, Tadanao Zanma, Yuta Nomura, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, Masaru Hasegawa	4. 巻 -
2. 論文標題 Improved adaptive parameters estimation considering transient-state estimation error in sensorless control system of IPMSM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IET Electric Power Applications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/elp2.12075	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 松本純、尾崎真、長谷川勝	4. 巻 139
2. 論文標題 最大トルク制御に適した磁束モデルに基づくIPMSMの低速域における位置および最大トルク位相推定法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会産業応用部門論文誌	6. 最初と最後の頁 624 - 630
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.139.624	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 赤塚弘恭、長谷川勝	4. 巻 139
2. 論文標題 磁気特性の非線形性を考慮した集中巻埋込磁石同期電動機のトルクリプル推定法と低減法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会産業応用部門論文誌	6. 最初と最後の頁 890 - 900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.139.890	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 Naoki Kawamura, Tadao Zanma, Kenta Koiwa, Kang-Zhi Liu, Masaru Hasegawa	4. 巻 10
2. 論文標題 Position Sensorless Adaptive Positioning Servo System with Simplified Differential Calculation and High-Frequency Voltage Injection Strategy Considering Acoustic Noise Suppression	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 --
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 長谷川勝	4. 巻 138
2. 論文標題 オールパスフィルタを用いた同期電動機の位置センサレス制御	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会産業応用部門ニュースレター	6. 最初と最後の頁 NL12_16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.138.NL12_16	査読の有無 無
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34件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 河村尚輝, 残間忠直, 劉康志, 長谷川 勝
2. 発表標題 DyCE原理および回転行列を用いた適応二次磁束オブザーバによる誘導電動機の一次抵抗同定
3. 学会等名 電気学会モータドライブ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kawamura N., Nomura Y., Zanma T., Liu K. Z., Hasegawa M.
2. 発表標題 q-axis inductance identification for IPMSMs using DyCE principle based adaptive flux observer
3. 学会等名 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H.Akatsuka, M.Hasegawa, S.Doki
2. 発表標題 Torque ripple reduction of IPMSM considering compensation of nonlinearities of magnetic characteristics
3. 学会等名 International Conference of Electric Machine and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H.Akatsuka, M.Hasegawa, S.Doki
2. 発表標題 Examination of Magnetization Curve Model for Torque Ripple Reduction of IPMSMs to Compensate for Magnetic Characteristics
3. 学会等名 International Conference of Electric Machine and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Soma Kato, Mutuwo Tomita, Masaru Hasegawa, Shinji Doki
2. 発表標題 Position Sensorless Estimation for Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Using Eddy Current
3. 学会等名 International Conference of Electric Machine and Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水捷治, 長谷川 勝
2. 発表標題 推定磁束脈動情報に基づく位置推定補正法を用いたPMSM位置センサレス制御における移動平均フィルタによる補正信号生成時間の短縮化
3. 学会等名 電気学会モータドライブ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田和樹, 長谷川 勝
2. 発表標題 埋込磁石同期電動機位置センサレス制御始動のためのオールパスフィルタ初期値設定法
3. 学会等名 電気学会モータドライブ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古池佑次, 長谷川勝
2. 発表標題 オールパスフィルタと磁束オブザーバの併用による誘導電動機速度センサレス制御の低速・回生領域における安定化
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 立喜, 國枝 武史, 富田 睦雄, 長谷川 勝, 道木 慎二
2. 発表標題 高周波電流制御を用いたSynRMの低速時の位置センサレス制御におけるインダクタンス誤差の影響
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keiju Matsui, Mikio Yasubayashi, Eiji Oishi, Masaru Hasegawa
2. 発表標題 Novel Boost Chopper Delivering Power During Both On and Off Periods
3. 学会等名 The Fifth International Conference on Electronics and Software Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畑中 孝斗, 加藤 聡馬, 伊藤 亮人, 富田 睦雄, 長谷川 勝, 道木 慎二, 加藤 真二
2. 発表標題 高周波電流重畳システムを用いた 極低速域における SynRM の位置センサレス制御
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河村尚輝, 劉康志, 残間忠直, 長谷川 勝
2. 発表標題 DyCE 原理に基づく適応磁束オブザーバを用いた誘導電動機の低速・回生領域における一次抵抗同定の安定性解析
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤塚弘恭、長谷川勝、道木慎二
2. 発表標題 d-q軸磁束の非線形性を補償した IPMSMのトルクリプル低減性能向上
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤 聡馬, 畑中 孝斗, 富田 睦雄, 松本純、長谷川 勝, 道木 慎二, 加藤 真二
2. 発表標題 MTPA 制御が容易な磁束モデルに基づく同一次元オブザーバを用いた IPMSM の位置センサレス制御
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 亮人, 加藤 聡馬, 畑中 孝斗, 富田 睦雄, 長谷川 勝, 道木 慎二, 加藤 真二
2. 発表標題 渦電流を用いた SPMSM の回転子位置推定
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 畑中 孝斗, 加藤 聡馬, 富田 睦雄、長谷川 勝, 道木 慎二, 加藤 真二
2. 発表標題 高周波電流重畳システムを用いた極低速時における SynRM の位置センサレス制御
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤 亮人, 加藤 聡馬, 畑中 孝斗, 富田 睦雄, 長谷川 勝, 道木 慎二, 加藤 真二
2. 発表標題 渦電流を用いたSPMSM の回転子位置推定
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加藤 聡馬, 畑中 孝斗, 富田 睦雄, 松本純、長谷川 勝, 道木 慎二, 加藤 真二
2. 発表標題 MTPA 制御が容易な磁束モデルを持つ同次元オブザーバを用いたIPMSM の位置センサレス制御
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoki Kawamura, Kang-Zhi Liu, Tadanao Zanma, Masaru Hasegawa
2. 発表標題 Stator resistance identification for induction motors using DyCE principle based adaptive flux observer
3. 学会等名 IEEE-IECON 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Soma Kato, Takato Hatanaka, Mutuwo Tomita, Atsushi Matsumoto, Masaru Hasegawa, Shinji Doki
2. 発表標題 Pole Assignment of Full-Order Flux Observer to Realize Both MTPA Control and Position Sensorless Control of IPMSM
3. 学会等名 IEEE-IFPEC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takato Hatanaka, Soma Kato, Mutuwo Tomita, Masaru Hasegawa, Shinji Doki, Shinji Kato
2. 発表標題 Position Sensorless Control of Synchronous Reluctance Motors at Low-Speeds
3. 学会等名 IEEE- IFFEC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川裕真, 安藤寿希, 長谷川勝
2. 発表標題 オールパスフィルタを用いたPMSM位置センサレス制御の低速域における位置推定脈動の低減
3. 学会等名 電気学会 マグネティックス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤田和樹, 長谷川勝
2. 発表標題 オールパスフィルタを用いた埋込磁石同期電動機における位置センサレス始動法の検討
3. 学会等名 パワーエレクトロニクス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安藤寿希, 石川裕真, 長谷川勝
2. 発表標題 推定磁束の振幅情報を用いたPMSM位置センサレス制御法における位置推定誤差の脈動低減
3. 学会等名 パワーエレクトロニクス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤塚弘恭, 道木慎二, 長谷川勝
2. 発表標題 磁気特性の非線形性補償に用いるIPMSMのトルクリプル低減に適した磁化曲線の近似モデルの検討
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 2020年

1. 発表者名 藤田和樹, 石川裕真, 長谷川勝
2. 発表標題 オールパスフィルタを用いた埋込磁石同期電動機の位置センサレス始動法
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 2020年

1. 発表者名 赤塚弘恭, 長谷川勝, 道木慎二
2. 発表標題 トルクリプルの主成分が高次調波成分の場合における埋込磁石同期電動機のトルクリプル推定法と低減法の評価
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤聡馬, 畑中孝斗, 富田睦雄, 長谷川 勝, 道木慎二, 加藤真二
2. 発表標題 渦電流を用いたSPMSMの位置推定法
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Keiju Matsui, Eiji Oishi, Masayoshi Umeno, Mikio Yasubayashi, Masaru Hasegawa
2. 発表標題 Further Development of Resonant Converter Employing Saturable Inductor
3. 学会等名 IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川裕真、長谷川勝
2. 発表標題 オールパスフィルタを用いた高速PMSMにおける回転子位置推定法の検討
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大月康平、長谷川勝
2. 発表標題 高回転PMSM位置センサレス制御のためのオールパスフィルタを用いた適応磁束オブザーバの安定性改善
3. 学会等名 電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 真柄光志、長谷川勝
2. 発表標題 オールパスフィルタと電流位相規範形デッドタイム補償を用いた誘導電動機速度センサレスベクトル制御の低速負荷特性
3. 学会等名 パワーエレクトロニクス学会 第226回定例研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuma Ishikawa, Masaru Hasegawa
2. 発表標題 Improvement of Position Sensorless Control Performance for High Speed PMSM with All-pass Filters
3. 学会等名 IEEE International Conference on Industrial Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大月康平、長谷川勝
2. 発表標題 高回転PMSM位置センサレス制御のためのAPF/DyCE原理を用いた適応磁束オブザーバの性能改善
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 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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