

鉄道車両用永久磁石同期電動機の 駆動制御技術の開発と今後の展望

山崎尚徳* 寺本晃大**
加藤 将*
山下良範**

Development and Future Prospects of PMSM Drive Control Technologies for Railway Rolling Stock

Hisanori Yamasaki, Sho Kato, Yoshinori Yamashita, Kota Teramoto

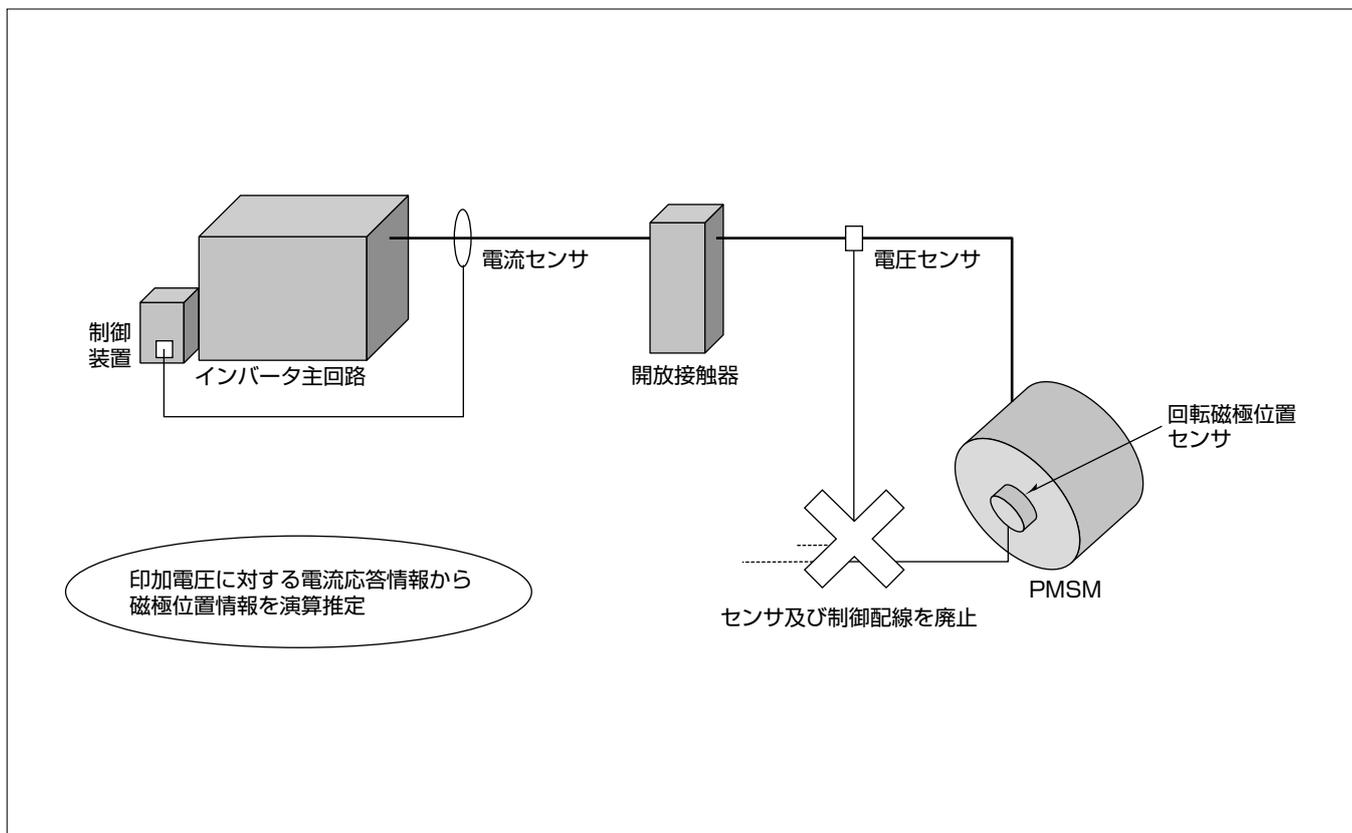
要 旨

鉄道車両駆動用の電動機は、1980年代後半からのインバータ化によって、交流電動機である誘導電動機(Induction Motor)が用いられている。ブラシレス化による保守性向上を実現しただけでなく、省エネルギー化のニーズに応える形で、高効率化が年々進んできている⁽¹⁾。

一方、交流電動機としては同期電動機、中でも永久磁石を回転子に用いた、低損失化が可能な永久磁石同期電動機(Permanent Magnet Synchronous Motor : PMSM)がFA(Factory Automation)業界や自動車業界に広く適用されてきた⁽²⁾。鉄道車両駆動用途では、複数のモータを1台のインバータで並列一括駆動可能なことから、誘導電動機を採用することが一般的である。しかし、近年、省エネルギー性に注目し、PMSMを採用する例が見られるように

なっている⁽³⁾⁽⁴⁾。そこで、三菱電機の交通事業でも製品ラインアップ化を図るため、主にFA業界のPMSM制御技術⁽⁵⁾の実績をベースに、鉄道車両特有の駆動制御機能に適合させる開発を行った。

特に鉄道車両では、電動機の設置環境の制約及び設置台数の多さから、各軸の回転センサとその配線を排するニーズが強く、PMSMでも回転磁極位置センサレス制御への対応が必要である。停止状態から高速域まで広い速度範囲での安定性確保、空転再粘着制御のための適切な速度推定応答確保、架線電圧変動に対するロバスト性確保、PMSMセンサレス制御特有の騒音の低減など、鉄道車両駆動用途を考慮して各制御機能を構築した。



PMSM駆動制御システムの回転磁極位置センサレス化

鉄道車両駆動システムでは、劣悪な車両床下・台車内環境にモータを複数配置するため、回転センサやその配線を極力排したいというニーズが強く、回転磁極位置センサレス制御が望まれる。日本国内の一般的な通勤形車両をターゲットとし、250kW級PMSM及びその駆動制御用インバータを開発試作し、各種駆動制御機能の検証評価を行った。

1. ま え が き

可変速ドライブ製品に用いられる交流モータは、誘導電動機と同期電動機に大別される。高性能の磁石材料が開発されて以降、省エネルギーのニーズに応える形で、回転子に永久磁石を用いて回転子損失を削減したPMSMが普及してきた。一方、鉄道車両駆動システムでは、1台のインバータで複数台並列駆動が可能な誘導電動機の採用が一般的であり、誘導電動機の高効率化が進められてきたが、PMSM駆動システムを採用する例も見られるようになってきている。

これらの背景から、当社の交通事業における製品ラインアップ拡充のため、鉄道車両用PMSM駆動制御システムを開発した。

本稿では、PMSM駆動制御技術の開発と今後の展望について述べる。

2. PMSMの駆動制御システム

2.1 鉄道車両用PMSMの駆動主回路構成

図1に、鉄道車両用PMSMの駆動主回路構成例を示す。直流架線から高速度遮断器、主接触器を介してフィルタリアクトル(FL)、そしてフィルタコンデンサ(FC)とインバータ回路へ直流電力が供給され、インバータの交流出力側がPMSMに接続される。現状のシステムでは、インバータ故障時の回路保護のため、PMSMの回転誘起電圧を切り離す開放接触器が設けられている。また、PMSMは同期電動機であるため、各モータに対し個別のインバータ回路が必要となる。

2.2 駆動制御システムの基本構成

鉄道車両用PMSMの回転磁極位置センサレスベクトル制御系の基本構成を図2に示す。運転台の各レバー操作によって生成されるトルク指令が電流指令生成部に入力され、PMSMの回転数条件やインバータの出力電圧制限を考慮して、電流ベクトル指令値(I_d^* , I_q^*)が出力される。その後段の、電流制御部や座標変換、PWM(Pulse Width Modulation)インバータ、PMSM、電流センサからなる電流制御ループによって、電流値、トルク出力が指令値に追従するように制御される。座標変換の基準はPMSMの回転磁極位置であり、レゾルバ等の回転センサがモータ回

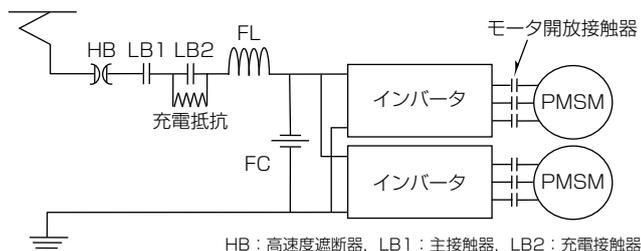


図1. 鉄道車両用PMSMの駆動主回路構成例

転子に設置できる場合には、その回転位置情報に基づいて座標変換される。

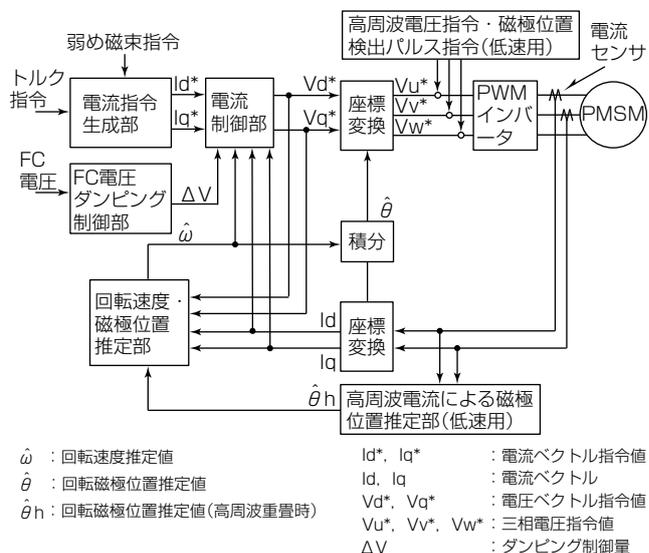
今回開発した回転磁極位置センサレス制御系では、PMSMの回路方程式及び適応磁束オブザーバ理論に基づいた回転速度・位置推定部を備え、推定演算によって取得した回転磁極位置推定値を座標変換器に出力している。なお、ここで得られる回転速度推定値については、モータ軸の速度情報として図2の系の外部にも出力され、空転再粘着制御系等にも用いられる。したがって、回転速度推定部の推定応答としては、空転検知の感度に必要な数10ms程度を確保するように制御応答設定を施している。

2.3 高周波重畳による極低速センサレス制御⁶⁾

2.2節で述べた回転速度・磁極位置推定部の演算は、基本的にはPMSMの誘起電圧情報の推定であり、PMSMの誘起電圧が低下する極低速域では推定精度が劣化する。そこで低速域では、PMSMの突極性(インダクタンスの磁極位置依存性)を検出することで磁極位置推定演算を並列に実施し、推定精度を確保している。このための高周波電圧指令の印加部及びその結果発生する高調波電流からの磁極位置推定部を、図2に低速用として示している。

2.4 停止時からの起動での磁極位置検出機能

2.3節で述べた突極性情報は、電気角1周期中に2周期の変化であるため、電気角360°の情報にするには、磁極のN、S極方向情報を2.2節で述べたオブザーバ演算から補完する必要がある。しかし、停止時には誘起電圧がないため、オブザーバ演算でもN、S極位置は推定できない。そこで、停止時からの制御開始時には、数10msの短時間内に、電気角180°差の電圧パルス対を複数方向に印加し、N、S極の磁気飽和特性の違いに起因した電流信号を検出することで磁極位置検出を行う。これを初期磁極位置として、2.2節、2.3節のセンサレス制御を起動させる。



$\hat{\omega}$: 回転速度推定値
 $\hat{\theta}$: 回転磁極位置推定値
 $\hat{\theta}_h$: 回転磁極位置推定値(高周波重畳時)
 I_d^* , I_q^* : 電流ベクトル指令値
 I_d , I_q : 電流ベクトル
 V_d^* , V_q^* : 電圧ベクトル指令値
 V_u^* , V_v^* , V_w^* : 三相電圧指令値
 ΔV : ダンピング制御量

図2. 鉄道車両用PMSMの回転磁極位置センサレスベクトル制御系

電圧パルスの大きさと磁極位置検出精度には強い相関があるため、今回のシステムでは、インバータの入力である架線電圧の大きさに応じてパルス幅を適切に調整する機能を付加し、磁極位置検出精度を確保した。

2.5 惰行からの再起動機能

鉄道車両駆動用のインバータは、加速後の惰行期間には動作を止めることが一般的である。このとき電流値も電圧指令値も0となるため、図2の回転速度・磁極位置推定部の演算結果も0出力となる。したがって、センサレス制御での惰行期間からのインバータ再起動時には、すみやかに速度及び磁極位置の初期値を検出し、トルクや電流のショックなく定常制御機能に移行させることが必要である。今回は、誘導電動機向けに実績のある初期速度検出機能⁽⁷⁾⁽⁸⁾を、PMSM用に一部を修正する形で再起動機能を構築した。具体的には、惰行中に力行／回生の指令値が入力された直後約100ms間を初期速度検出期間とし、トルク0での高速電流制御をしつつ、高応答推定に特化したモータモデル演算によって回転速度・磁極位置推定演算を行い、これらの出力結果を座標変換に用いる。約100ms間内で真値に収束されて得られる回転速度・磁極位置推定値を、2.2節の定常制御系の各部初期値に反映させ、定常トルク制御に移行することで、スムーズなインバータ起動を実現している。

3. 鉄道車両駆動用制御機能への対応

3.1 フィルタコンデンサ電圧安定化制御

図1に示したように、直流架線用の鉄道車両のインバータ入力には、変電所との保護協調、また、架線電流の高調波抑制への対応として、FLが挿入され、インバータのFC

とでLCフィルタが構成される。インバータが理想電源(力行時に負性抵抗特性)として振る舞う結果、LCフィルタの共振周波数近傍でインバータ入力電圧・電流が不安定発振する挙動が内在し、これを抑制するダンピング制御系が実装される。

今回、PMSMの駆動制御システムに対しては、基本的には従来の誘導電動機の制御システムの場合と同様のダンピング制御機能を実装した。すなわち、入力電圧の脈動周波数成分を含む信号を抽出し、これにゲイン・フィルタ処理を施してモータへの電圧指令やトルク指令を操作することで入力電力を補償してシステムの安定化を行う。ただし、従来の誘導電動機の駆動制御システムと比べ、PMSMの駆動制御システムでは、電圧指令やトルク指令から実際の電力までの応答や固有振動の発生の仕方が異なるため、これに対応してゲインの値やフィルタの形態を調整している。

3.2 評価試験結果

図3に、評価試験設備でのPMSMセンサレス駆動試験の結果を示す。力行、回生とも、全速度域で安定な速度推定演算、所望のトルク制御が行われている。回生ブレーキの立ち上げは、インバータ停止中の惰行期間から行っているが、回転磁極位置センサレス制御の再起動によってスムーズに電流、トルクを立ち上げている。

また、架線電圧を急変させる試験等でも、ダンピング制御によってフィルタコンデンサ電圧を安定化できることを確認した。

3.3 高周波重畳機能での低騒音化対策

PMSMセンサレス制御の極低速域では、電圧高周波重畳による磁歪(じわい)騒音がインバータ装置やモータから発生する。評価試験でインバータ装置近傍の騒音を測定し

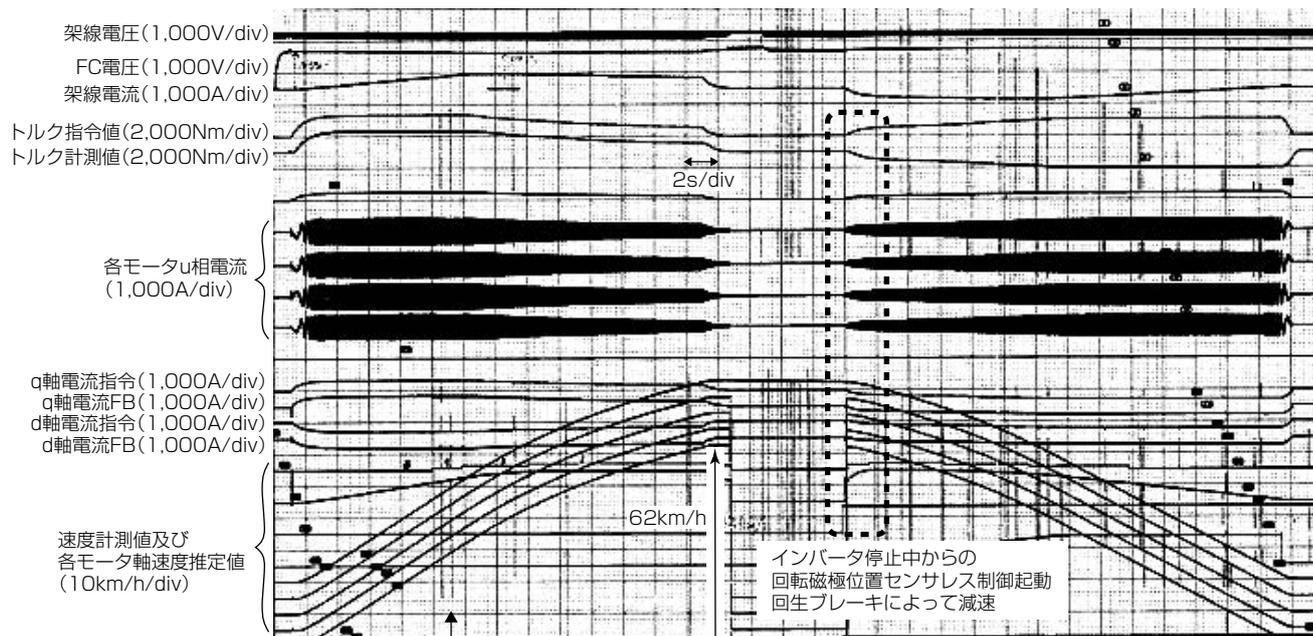


図3. 鉄道車両用PMSM駆動制御システムの評価試験結果

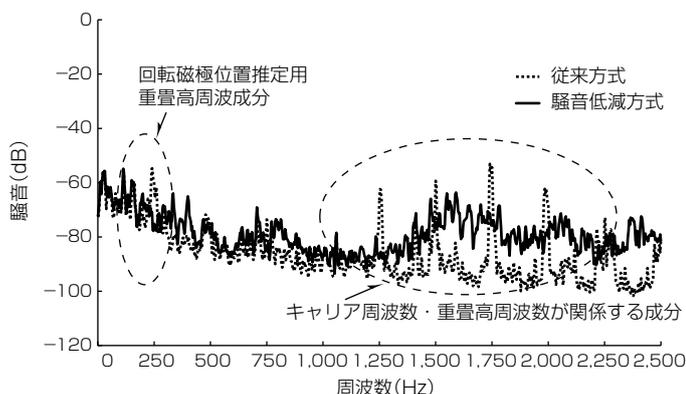


図4. 極低速センサレス制御の高周波重畳機能の低騒音化

た結果が図4である。

鉄道車両用インバータの場合、インバータのスイッチング周波数(キャリア周波数： f_c)は数百～約1 kHzであり、センサレス制御用の重畳高周波周波数(f_h)はその数分の1のオーダーとなる。この重畳高周波の波形精度を確保するためには、 f_c と f_h は整数倍の関係を固定維持することが望ましいが、図4の点線曲線で示すように、特に f_c と f_h が相互に関係した成分のピュアトーン騒音が発生することになる。

そこで今回、回転磁極位置推定精度と印加高周波電圧のS/N(Signal-to-Noise)比に注意して印加高周波電圧の振幅を下げ、かつインバータPWM電圧波形をランダム操作する制御系を試行した。その結果を図4の実線曲線で示す。これによってセンサレス制御の機能を維持しつつ、1～2 kHzの帯域でのPWM起因の騒音を10dB程度低減でき、聴感も大幅に改善されることを確認した。

4. む す び

鉄道車両駆動システムの省エネルギー化の一方策として、PMSM化に対応し、鉄道車両用PMSM駆動制御システムを開発した。駆動制御技術開発では、FA用PMSMの回転磁極位置センサレス制御技術を鉄道車両駆動用途の仕様に適合させ、駆動制御機能による低騒音化にも取り組んだ。これらによって、鉄道車両用途への製品適用の目処を付けた。

PMSM駆動制御システムは、鉄道車両用途に特有の幾つかの課題があり、今後の取組みについて次に述べる。

鉄道車両の電機品製造・納入では、インバータとモータの製造担当メーカーがしばしば別となり、情報共有に制約があることも多い。PMSMのトルク制御・センサレス制御では、誘導電動機の場合よりも詳細な回路定数情報が必要となるため、インバータの機能設計の観点からは、より

高度な定数測定技術・調整技術を蓄積していくことが求められる。また、インバータ故障時の回路保護用の開放接触器の選定や開放シーケンスの在り方については、実績の積み上げと並行して更なる改善の余地を検討していく。

既に述べたとおり、PMSMは同期電動機であり、モータ1台ごとにインバータを設置する必要がある。誘導電動機複数台を1台のインバータで駆動するシステムと比べ、部品点数(コスト)が増加するデメリットがある。ただし、回路異常時の運転停止波及範囲が狭まるメリットもあり、得失のバランスを車両の用途ごとに吟味することが必要である。

これらを踏まえ、鉄道業界の省エネルギー化に資する製品ラインアップの拡充に対応していく。

参 考 文 献

- (1) 大橋 聡, ほか: DC1500V架線対応SiC適用鉄道車両主回路システム, 鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, **50**, 511 (2013)
- (2) 佐竹 彰, ほか: 最新のモータ制御技術, 三菱電機技報, **76**, No.6, 421～425 (2002)
- (3) 田坂洋祐, ほか: 省エネと環境性能に寄与する鉄道車両用PMSMドライブシステム, 東芝レビュー, **69**, No.6, 28～32 (2014)
- (4) 谷口 峻, ほか: PMSM低速域位置センサレス制御における高周波電圧重畳可変制御による騒音低減法, 電気学会論文誌D, **129**, No.4, 382～387 (2009)
- (5) 西島大輔, ほか: 三菱センサレスサーボ“FR-E720EX・MM-GKRシリーズ”, 三菱電機技報, **88**, No.4, 253～256 (2014)
- (6) 伊藤正人, ほか: 高周波電圧を用いた突極形PMモータの直接位置推定法, 電気学会論文誌D, **131**, No.6, 785～792 (2011)
- (7) 河野雅樹, ほか: 適応磁束オブザーバによる電車用速度センサレスベクトル制御に適した短時間再起動方法, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, 347～352 (2009)
- (8) 根来秀人, ほか: 速度センサレス制御の実機適用, 三菱電機技報, **78**, No.12, 813～816 (2004)
- (9) 中嶋幸夫, ほか: 環境配慮型鉄道車両用パワーエレクトロニクス機器の最新動向～SiC適用インバータシステム補助電源装置～, 三菱電機技報, **86**, No.9, 511～515 (2012)