

社会ニーズに応えるモータ駆動制御技術の進化と展望

佐竹 彰*
山崎尚徳*

Progress and Future Prospect of Motor Drive Technology for Needs of Society

Akira Satake, Hisanori Yamasaki

要 旨

モータと電力変換器を組み合わせたドライブシステムは、社会生活や産業活動に欠かせないキーコンポーネントであり、空調機器、ファンポンプ、工作機器、エレベーター、鉄道、電気自動車等、あらゆる大小の産業システムで用いられている。各業界で様々なニーズに対応するため、モータ制御技術による低コスト化と省エネルギー化が求められる。

低コスト化に対応する技術として、モータの位置センサをなくすセンサレス方式の最新技術であるセンサレスサーボ技術、及び大容量モータを複数の標準サイズインバータで駆動する多重巻線モータ駆動技術等がある。また省エネルギー化技術としては、鉄道車両駆動用途におけるSiC（シリコンカーバイド）適用インバータ、及び永久磁石同期電動機向けの駆動制御技術等がある。

センサレスサーボ技術は、制御によってセンサ及びセンサ配線を廃し、システムの低コスト化を実現するものであり、一部制御定数についてはセンサレスシステム用のオートチューニング技術も開発され、装置立ち上げの時間的コストの削減にも寄与している。

多重巻線モータを複数の変換器で駆動する場合、巻線間の相互干渉が制御に悪影響を与えるため、その非干渉制御が、トルク制御応答性確保の鍵となっている。

フルSiC適用鉄道車両用主回路システムでは、SiCを使いこなす変換器設計と電動機設計によって、大幅な省エネルギー化が達せられた。回生制御の安定性確保や低騒音化などと併せ、制御技術が最終製品に貢献している。



センサレスサーボ
(2014年R&D100受賞)

フルSiC適用鉄道車両用主回路システム
(2015年経済産業大臣賞受賞)

低コスト・省エネルギーに資する三菱電機のモータ駆動システム製品

センサレスサーボは、PM(Permanent Magnet)モータの磁極位置センサレス制御技術によってセンサをなくし、低コストのサーボシステムを実現した。フルSiC適用鉄道車両用主回路システムは、電力変換装置を小型・大出力化し、回生トルクを高めたモータ設計との組合せで、最大40%の省エネルギーを達成した。SiCパワーモジュールの開発の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託研究として実施したものである。

1. ま え が き

モータと電力変換器を組み合わせたドライブ技術を適用した製品は、FAなどの産業用途や鉄道車両駆動用途から、昇降機・空調機器・自動車用途などに拡大しており、対応するモータ駆動制御技術にも高度で多様な性能が求められる。近年のドライブ装置に共通して求められる大きなニーズは、低コスト化、省エネルギー化であり、モータ制御でもこれらに対応する新技術が求められる。

本稿では、低コスト化に対応する技術として、モータの位置センサをなくすセンサレス方式の最新技術であるセンサレスサーボ技術、及び大容量モータを複数の標準サイズインバータで駆動する多重巻線モータ駆動技術について述べる。また省エネルギー化技術としては、鉄道車両駆動用途でのSiC適用電力変換器、及び永久磁石同期電動機(以下“PMモータ”という。)向けの駆動制御技術について述べる。

2. 各種のモータ駆動制御技術

2.1 センサレス制御関連技術

2.1.1 全速度域でのセンサレス駆動制御

センサレスサーボ製品はセンサ(エンコーダ)を使用せずに、磁極位置を検出・制御するもので、PMモータのセンサレスベクトル制御がベースである。センサレスベクトル制御は、ドライブユニット内部にモータモデルを持ち、電圧・電流から磁束を演算する適応磁束オブザーバによって速度・位置を推定して制御を行うが、電圧が小さくなる低速域ではその推定が困難になる。そこで低速域では、モータに高周波電圧を注入し、発生する電流からモータのインダクタンスを検出して、その位置依存性(突極性)を利用することによって位置を推定する手法を用いる必要がある。

このようにセンサレスサーボでは2つの位置推定手法をモータ速度によって切り替えて使用する必要があるが、加重平均等の簡単な方式では、急加減速時の切替えて速度・位置信号の不連続性のためにショックが発生する場合があります。図1はその一例である制御系の構成を示しており、オブザーバと

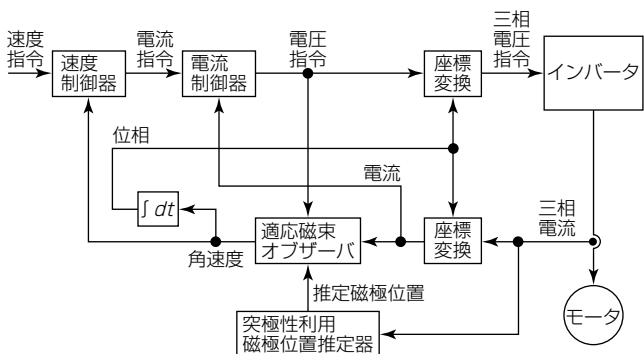


図1. センサレスサーボ制御系の構成

突極性利用の位置推定器を組み合わせたものである⁽¹⁾。速度、位置の推定には基本的にはオブザーバを用いるが、突極性利用の位置推定器からはオブザーバに検出した推定磁極位置がアシスト信号として加えられる。このアシスト信号を用いてオブザーバ内部に磁束補正量を加えることによって、電圧が小さな低速域でもオブザーバの推定磁極位置を精度良く実際のモータ位置に追従させることができる。また磁束補正量の大きさを回転数に応じて可変にすることによって、低速域では突極性利用中心、高速域では電圧情報中心の位置推定が実現可能となる。

これらの技術によって製品化された当社のセンサレスサーボ製品は、革新的な技術開発に対して贈られるR&D100Awards(米国R&Dマガジン社主催)を2014年に受賞している。

2.1.2 オートチューニング技術

PMモータのセンサレスベクトル制御で安定に大負荷運転を行うには、磁気飽和によるインダクタンス変化を把握する必要がある。パルス状の電圧を印加して発生する電流変化を見ることによってインダクタンスは検出可能であるが、過大な電圧を加えると過電流が発生する場合があった。そこでパルス幅の自動調整機能を開発し、定数不明の他社モータについても過電流を発生させずにインダクタンスを検出、定格150%トルクまでの安定運転が可能になった。

またセンサレスサーボの速度・位置制御系を高速かつ安定に制御するには、モータ回転軸に接続された負荷慣性の情報が必要になる。図2はセンサレスサーボ“E700EXシリーズ”に搭載されたオンラインオートチューニング技術の効果を示している⁽²⁾。この技術では、運転中にモータ回転軸に接続された負荷慣性を推定し、この推定した慣性を用いて速度・位置制御系を自動的に調整する。回転角センサを持たないため、慣性の推定には運転中の装置が加速度

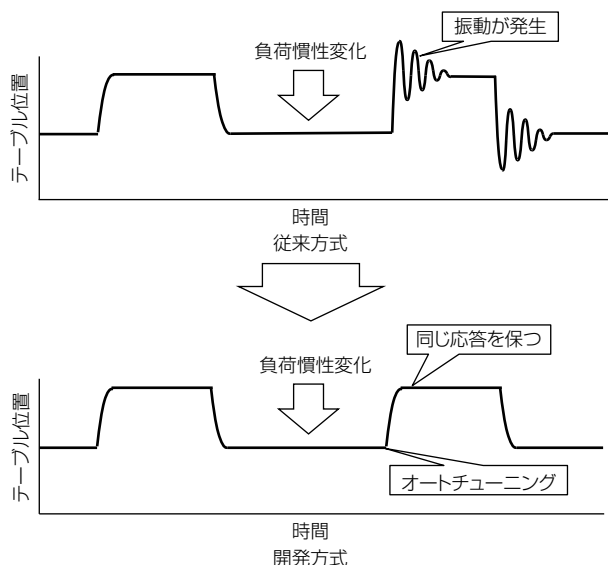


図2. オンラインオートチューニングの効果

変化したときのモータ速度・トルクの推定値を用いる。この技術によって、使用する装置に合わせた制御系の調整を事前に実施する必要がなくなり、また運転中に負荷慣性が変化するような場合でも、安定した応答を実現している。

2.2 多重巻線モータ駆動技術

電動化された装置の能力拡大のニーズに対応して、モータ及びインバータの大容量化への要求が増加している。大容量のモータを複数のインバータで駆動する技術としては、リアクトルを用いた多重インバータ方式(図3(a))が知られているが、リアクトルのコストやサイズが課題となっていた。一方、多重巻線モータを複数のインバータで駆動する方式(図3(b))はこのような欠点がない反面、モータ内部での巻線間の結合によって相互に干渉作用が発生する場合があります。出力トルクを高応答に制御することができなかった。

この巻線間干渉は、各巻線での電圧と電流の関係で、通常モータと同じ巻線インピーダンスに加えて、一方の電流が他方の電圧に影響を与える干渉成分が存在することによって発生する。これに対して、干渉成分をキャンセルする成分をあらかじめ出力電圧に加えておけば、干渉成分の影響を抑制することが可能になる。図4はその効果を示したもので、巻線間干渉によって電流制御が振動的になり応答が上がらない状態が、この抑制制御によって干渉成分の影響が緩和され応答が改善されていることが分かる⁽³⁾。この技術は大容量ドライブを始めとする各種装置に2016年度から展開されている。

2.3 SiC適用電力変換器向け駆動制御技術

従来の鉄道車両推進向け電力変換器は、パワー素子にSi(シリコン)を用いてきたが、近年、SiC(シリコンカーバ

イド)の適用が進んでおり、当社では、2012年に1.7kVハイブリッドSiC、2015年に3.3kVフルSiCを営業車両に投入してきた。一般に、SiCはSiと比較して低損失化が可能であり、半導体パッケージそのものの小型化、及び付帯する冷却器の小型化が可能となる。これによって、電力変換装置外形を従来のSi製と比較し、40~80%の小型・軽量化が可能となった⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。モータの制御技術の観点からも、SiCの低損失特性を利用した提案が進められており、ここではPWM(Pulse Width Modulation)モードの多様化と大電流モータ設計による回生率の向上についての事例を述べる。

2.3.1 PWMモードの多様化

鉄道用インバータの設計では、冷却系機器の小型化、インバータ損失低減の観点から、スイッチング周波数の上限が決定される。従来は、スイッチング損失低減のため、加減速に応じて各種同期PWMモードを切り替え、高速回転域では同期1パルス運転としていたが、低損失のSiCを適用する場合、これらの制約が緩和可能であり、この利点を利用して全領域非同期PWM運転が適用された⁽⁴⁾。この例ではスイッチング周波数を従来の2倍程度に向上させ、全領域を非同期PWM運転とした。その結果、モータ電流の歪(ひず)みが低減され(図5)、高調波損失を最大40%削減し、磁歪(じわい)騒音も低減した。

2.3.2 大電流モータ設計による回生率の向上

一方、インバータに組み合わせられるモータの性能設計では、2.3.1項の観点に加え、インバータ損失の観点から電流上限を考慮しつつトルク出力性能を確保する必要がある。SiC適用によってインバータ装置の大出力化(大電流化)が可能になるため、モータ側は定格磁束を下げ、トルクあた

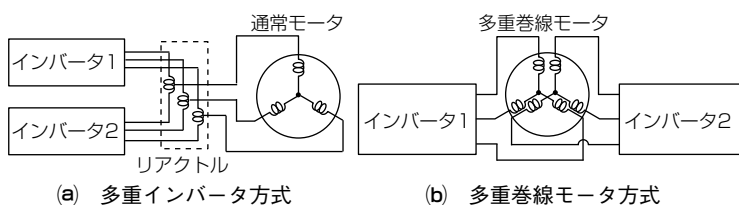


図3. 複数インバータによるモータ駆動方式

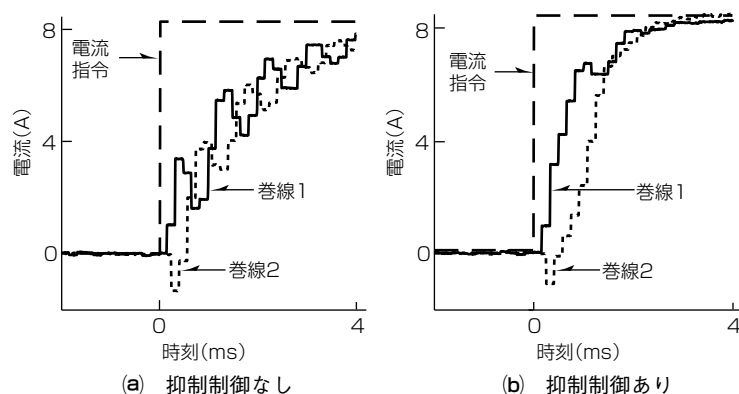
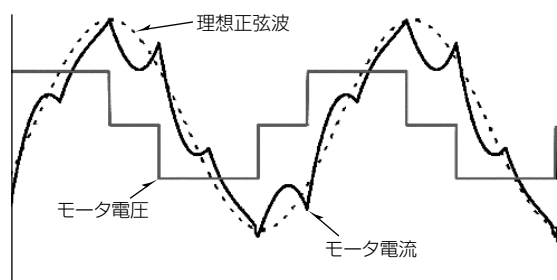
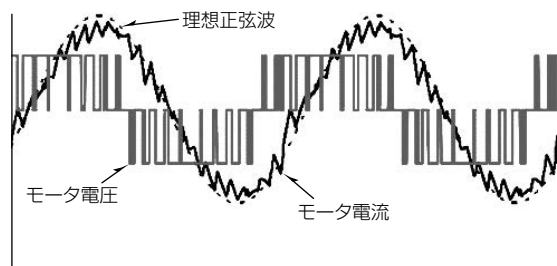


図4. 巻線間干渉の抑制制御



(a) 従来の同期1パルス運転



(b) 非同期PWM運転

図5. スwitching周波数向上による電流歪みの改善

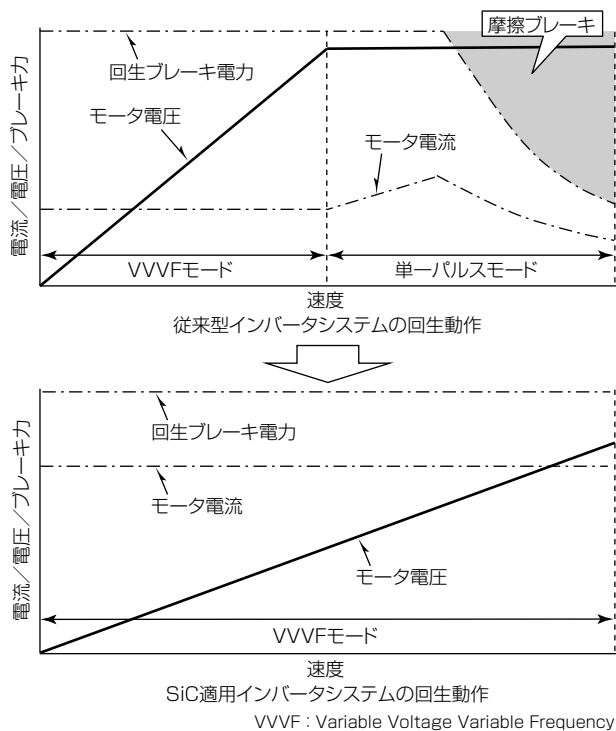


図6. 回生ブレーキ性能設定の比較

りの電流を増加させる設計が可能となる。これはモータのインピーダンスを低減させる設計と等価であり、高速域に存在するトルク出力可能曲線(停動トルク特性)をより高速域に移し、回生トルク出力範囲を拡大できることを意味する。この利点を活用した鉄道車両用ドライブ装置⁽⁶⁾では、従来、機械摩擦ブレーキとしていた運転領域を電動機の回生ブレーキでカバーし、停車頻度の高い地下鉄・在来線のランカーブでは最大40%の省エネルギー化を実証した(図6)。なお、回生率向上の効果を最大化するためには、パンタ点電圧の上昇を抑制する制御系を高精度かつ高応答に設定し、過電圧系の保護を発生させず運転継続することが肝要であり⁽⁷⁾、モータトルクと架線電圧の連携制御技術も、省エネルギーに貢献している。

2.4 鉄道車両向けPMモータへの対応

鉄道車両では複数モータを1台のインバータで並列駆動可能な誘導モータが標準的に用いられるが、近年、省エネルギーを目的にPMモータの適用が一部鉄道事業者から進められている。当社も開発を進め、鉄道車両PMモータ用インバータを製品化した⁽⁸⁾。PMモータでの磁極位置センサレスベクトル制御では、極低速域で磁極位置を検出するために高周波電圧を印加する際に、独特の磁歪騒音が発生する場合があるが、磁極位置推定の機能を確保できる範囲でPWM電圧波形をランダム操作することで聴感を改善している(図7)。鉄道用途に限らず、PMモータのセンサレス制御とトルク制御では、詳細なモータ回路定数を必要とするため、定数測定技術や制御調整技術は今後とも経験の蓄積が必要である。

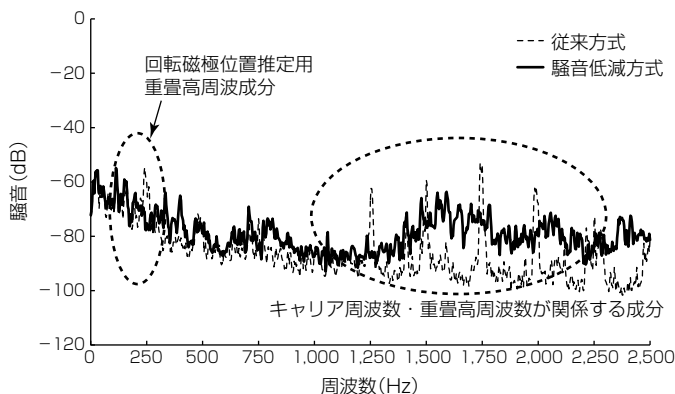


図7. 極低速センサレス制御の高周波重畳機能の低騒音化

3. む す び

近年のドライブ装置での低コスト化ニーズと省エネルギーニーズに応えた制御技術の事例を述べた。ドライブ製品は複数事業それぞれで基幹製品の一翼を担っており、開発のシナジーが期待できる技術要素も多いが、各事業、市場に固有のニーズやその重み付け、優先順位が存在する。社会ニーズの多様化、高度化に柔軟に 대응するために、制御技術による製品機能確保・向上を継続的に実施していく。

参 考 文 献

- (1) 伊藤正人, ほか: 突極情報を併用した適応磁束オブザーバによるIPMモータの位置センサレス制御, 電気学会研究会, MD-16-077 (2016)
- (2) センサレスサーボ向け制御系オートチューニング技術, 三菱電機技報, 91, No.1, 31 (2017)
- (3) Satake, A., et al.: Design of Coupling Cancellation Control for a Double-winding PMSM, IEEJ Journal of Industry Applications, 6, No.1, 29~35 (2017)
- (4) 根来秀人, ほか: SiCパワーモジュール適用鉄道車両用高効率インバータシステム, 電気学会産業応用部門全国大会, 1-O1-5, 65~68 (2012)
- (5) 中口勝己, ほか: DC1500V架線対応フルSiC適用VVVFインバータ装置実証結果について, 鉄道車両と技術, No.225, 10~14 (2015)
- (6) 菅原徹大, ほか: SiCパワーモジュールの主回路素子への適用技術, 三菱電機技報, 90, No.9, 517~520 (2016)
- (7) 河野洋一, ほか: 車両の省エネ技術の適用と具体的な効果, 電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, 5-S1-6, 21~26 (2016)
- (8) 山崎尚徳, ほか: 鉄道車両用永久磁石電動機の駆動制御技術の開発と今後の展望, 三菱電機技報, 90, No.9, 513~516 (2016)