

世界初の鉄道車両向け同期リラクタンスモータシステム

Synchronous Reluctance Motor and Inverter Traction System for Railway

山下良範*
Yoshinori Yamashita

寺本晃大†
Kota Teramoto

金子健太*
Kenta Kaneko

菅原徹大*
Tetsuo Sugahara

要旨

近年、エネルギー、イノベーション、気候変動に対する国際目標であるSDGs(Sustainable Development Goals)によって、持続可能なエネルギーの確保と利用拡大に向けた活動に注目が集まっている。また、昨今のエネルギー需給を取り巻く情勢の変化や、レアアース等、希少材料の調達上のリスクが高まっており、省エネルギー化に加えて、省資源化についても以前にも増して必要性が高まっている。

今回、レアアースを用いずに世界最高レベルの高効率化を実現する同期リラクタンスモータ(Synchronous Reluctance Motor: SynRM(シンアールエム))と、それを可変速制御す

るインバータ制御技術を鉄道車両では世界で初めて^(注1)開発し、SynRMで世界最大級となる最大出力450kWの高出力・可変速駆動に成功した。それらの技術を独自の鉄道車両推進システム“SynTRACS(シントラックス, Synchronous reluctance motor and inverter TRACtion System)”として開発を進めてきた。その適用性や省エネルギー性能を確認するため、東京地下鉄(株)日比谷線13000系車両へ試験搭載し、実環境での実証試験を実施した。

(注1) 2020年11月26日現在、三菱電機調べ



SynTRACSの特長

同期モータに分類されるSynRMは、鉄道車両に多く使われる誘導モータと比較して回転子の発熱損失が少なく、効率や質量特性に優れることが特長である。今回、高効率化技術の適用でSynRMの力率を改善した、世界最大級の最大出力450kW(定格200kW)を実現する鉄道車両用SynRMを開発した。また、インバータ制御技術として、鉄道車両用途で要求されるトルク制御を実現するためのベクトル制御を開発した。SynRMが持つ高効率という特長を最大限に発揮するインバータ変調方式を適用することで、省エネルギー化を実現した。

1. ま え が き

1997年の京都議定書が採択されて以降、地球温暖化防止対策として鉄道の活用が進められてきたが、2018年に国連でSDGsが採択され、更に幅広い視野での社会課題解決が必要になっている。その中で当社は交通事業で培った技術で、持続可能で安心・安全・快適な、豊かな社会の実現に取り組んでいる。エネルギーの効率的な利用という面では、当社は2012年2月に従来よりも高効率な全閉形誘導電動機とハイブリッドSiCパワーモジュール(IGBTをSi(シリコン)、ダイオードをSiC(シリコンカーバイド)としたパワーモジュール)を適用したインバータ装置を組み合わせた主回路システムを世界に先駆けて^(注2)営業線に導入した。この主回路システムの適用によって、電力再生ブレーキ領域の拡大、高周波スイッチングによるモータ損失の低減等、主回路システム全体としての省エネルギーに寄与している。

SDGsの省エネルギー目標に対して更に貢献するためには、多様な主回路システムに柔軟に対応し、幅広い市場に高効率な主回路システムを使用できるよう新たな主回路システムを開発する必要があった。今回、レアースを用いずに世界最高レベルの高効率化を実現するSynRMと、それを可変速制御するインバータ制御技術を鉄道車両では世界で初めて開発し、SynRMで世界最大級となる最大出力450kWの高出力・可変速駆動に成功した。それらの技術を独自の鉄道車両推進システムSynTRACSとして開発を進めてきた。

本稿では、このシステム開発の成果、及び試験搭載車両の営業線適用での実証結果について述べる。

(注2) 2012年9月27日現在、当社調べ

2. SynTRACS開発背景

2.1 省エネルギー主回路システムの開発変遷

鉄道車両を駆動する主回路システムは、鉄道車両の省エネルギー性能を高めるため、多種多様に進化を続けてきた。

特にSiC素子適用インバータ装置の誕生をきっかけに、従来よりも高効率な誘導電動機(Induction Motor: IM)や、全閉形主電動機の軽量化、主電動機⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾の高出力化

による回生性能向上等、継続した省エネルギー主回路システムの開発を経て、SynTRACSの開発検証・実証試験に至っている(図1)。

2.2 SynRM

SynRMは、産業用等で一般的に実用されている永久磁石同期電動機(Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM)と同じ同期モータに分類され、回転子の損失が少ないため高効率であることが特長である。また、自動車や鉄道等の可変速駆動用モータで採用されているPMSMは、埋め込み磁石型と呼ばれる、マグネットトルクとリラクタンストルクを併用した方式が一般的である。これらのトルク配分はモータの仕様や適用条件に応じて決定されるが、SynRMは100%リラクタンストルクで駆動するモータになる。SynRMの場合、回転子に永久磁石を使用せず、回転子は鉄心だけで構成されるモータになる(図2)。

2.3 SynRM方式採用の狙い

鉄道車両は主電動機の回転変化によって直接車両の速度が変化するため、主電動機は幅広い速度帯で駆動し、さら

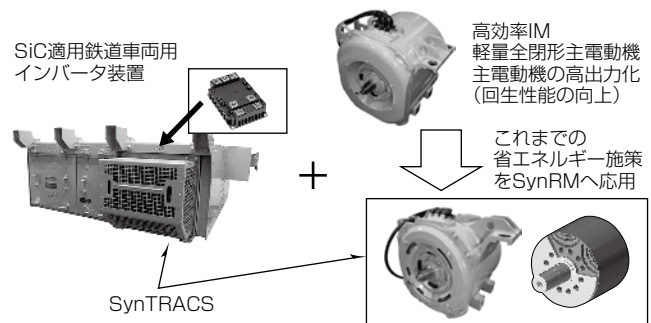


図1. 省エネルギー主回路システム開発変遷

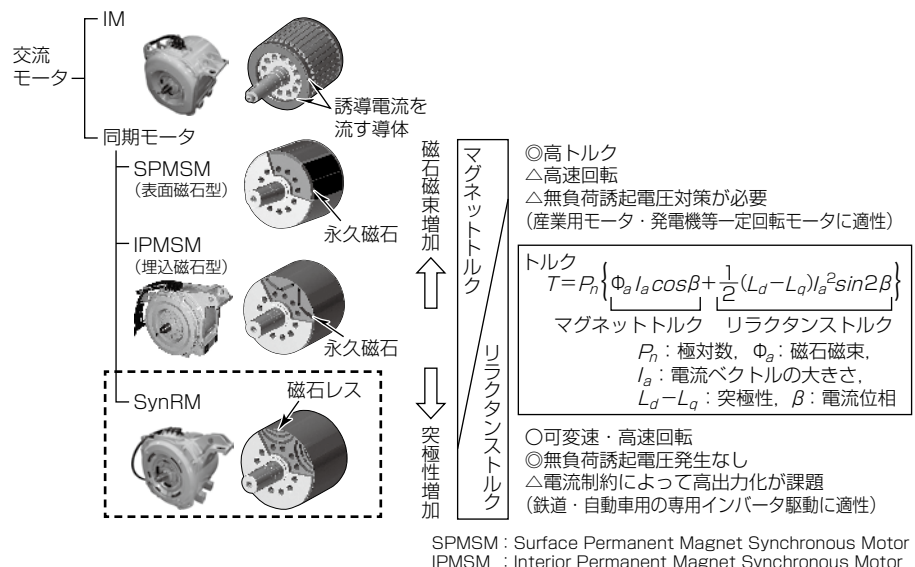


図2. 交流モータの分類とSynRMの位置付け

に惰行運転(無負荷回転)も多用する。そのため、同期モータ方式を採用するに当たっては、回転子に永久磁石がないことで、高速回転時の誘起電圧対策が不要なSynRM方式が最適と考えた。また、PMSMを可変速駆動で使用する場合、モータの回転上昇に伴い誘起電圧が上昇するため、回転子の磁石磁束を固定子巻線による磁束で打ち消す弱め磁束制御が必要になる。この際に固定子巻線で銅損が発生し、さらに、打ち消されなかった分の磁束によって鉄損が増加する。鉄道車両用主電動機では、最大出力域以降の高トルク帯の速度域で、このようなPMSM特有の損失の影響が大きいと考えられ、これらの観点で低鉄損特性に優れたSynRM方式が有利になる。

3. SynTRACS機器仕様

3.1 鉄道車両用主電動機へのSynRM適用

SynRMは原理的には以前から存在する方式であるが、永久磁石を使用せずリラクタンストルクだけで駆動するため、高出力化が難しい方式である。そのため、鉄道車両を駆動するような高出力化(高トルク・高回転)が難しいとされ、現在まで鉄道車両用主電動機として実用化されていない。今回、この課題に対して、次の二つのアプローチによって課題を解決し、世界で初めて鉄道車両用主電動機としてSynRMの実用に成功した。図3に外観を示す。

(1) 回転子鉄心形状の最適化

SynRMは、固定子の磁界と、回転子鉄心内の磁気抵抗差によって生じる磁極との相互作用によってトルクを発生

させるモータであるが、回転子鉄心内の磁気抵抗差を最大化するため、図4に示すように回転子鉄心に複数のスリット(空隙)を構成する。鉄道車両用主電動機の場合、産業用等と比較すると回転子径が大きいため、より磁気抵抗差を大きくするようなスリット形状の構成にできることから、自由度が高い。今回、最新の電磁界解析技術を用いてトルクを最大化する最適スリット設計を実現した。

(2) SiC適用インバータの特性の活用

SynRMを高出力化するには、(1)に加えて、固定子コイルの磁束を強める必要がある。そのためにはSynRMを駆動するインバータの電流容量を増加させる必要がある。通常、この点はインバータにとってデメリットになるが、SiC素子の低損失特性を生かして、モータの高電流駆動を実現した。

3.2 SiC適用インバータ仕様

表1にフルSiC適用VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)インバータの主要諸元を示す。VVVFインバータは同期モータ対応のVVVFインバータとして開発され、フルSiC適用2レベルインバータが4群搭載されており、VVVFインバータ箱1台で4台のSynRMを駆動可能である。パワーモジュールには図5に示すLV100タイプのフルSiCパワーモジュールを採用している。

表1. フルSiC適用VVVFインバータの主要諸元

入力(架線)電圧	DC1,500V
主回路方式	2レベル方式電圧型PWMインバータ
制御単位	SynRM × 1台 × 4群
冷却方式	走行風利用自冷方式
パワーモジュール	3.3kV 750A フルSiC



図3. 鉄道車両用SynRM



図5. LV100タイプのフルSiCパワーモジュール

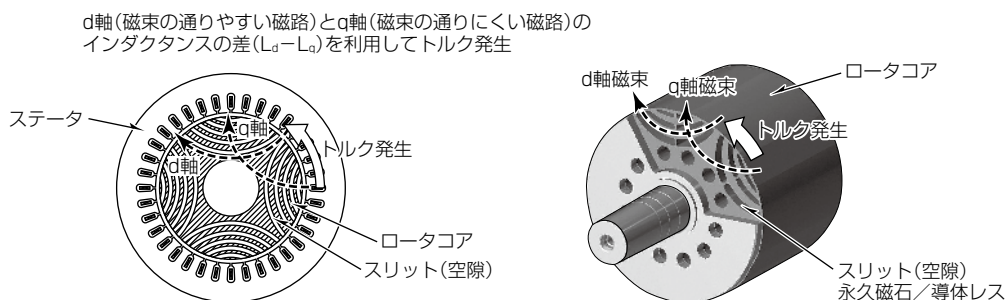
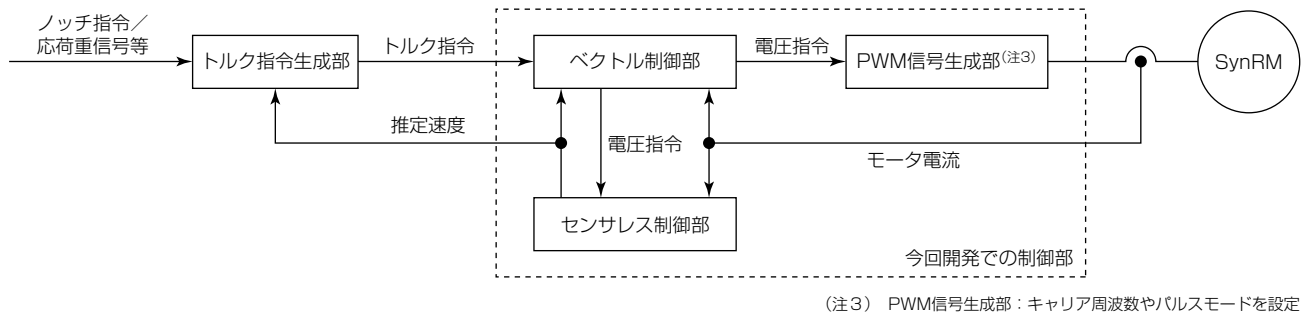


図4. SynRMの回転原理及び回転子イメージ



(注3) PWM信号生成部：キャリア周波数やパルスモードを設定

図6. SynRM制御ブロック

今回の開発では450kWの高出力SynRMに対応したインバータ制御技術として、鉄道車両用途で要求されるトルク制御を実現するためのセンサレスベクトル制御を開発した。なお、450kWのSynRMを可変速制御する技術は世界初である。

図6にこの開発でのSynRM制御ブロックを示す。ベクトル制御部・センサレス制御部とも図4に示すインダクタンスの差を利用して制御することを特徴としている。また、SynRMが持つ高効率という特長を最大限に発揮するため、フルSiCの低損失特性を最大限に活用した高周波スイッチングインバータ変調方式を適用した。この変調は、PWM (Pulse Width Modulation) 信号生成部で実施し、電力損失を大幅に低減できるため省エネルギー化の実現に貢献した。通常、ベクトル制御にはモータの回転角情報が必要であるが、センサレス制御技術の導入によって、位置センサが不要になり、保守の省力化を実現した。

4.2 主回路の構成

図9に搭載したSynTRACS主回路システム構成を示す。主回路システムは断流器箱、フィルタリアクトル (FL),



図7. 日比谷線13000系車両

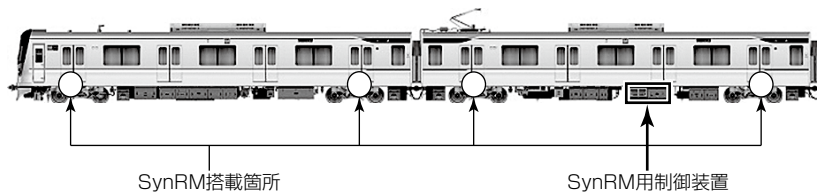


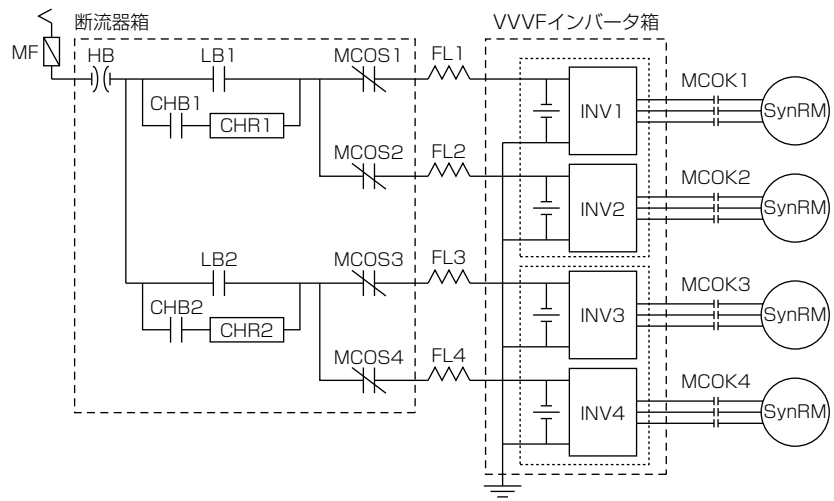
図8. SynTRACS搭載位置

4. 営業車両への試験搭載

4.1 車両諸元

東京地下鉄(株)日比谷線13000系の1編成にSynTRACSを搭載して走行試験及び営業線での評価を実施した。図7に13000系の外観を示す。



1編成7両中の2両にSynTRACSを搭載した。搭載位置を図8に示す。4台のSynRMで既存モータ (PMSM) を載せ替えて、それらを1台のフルSiC適用VVVFインバータ装置で駆動する構成にしている。既存のPMSM方式と装置構成は変えずに艤装(ぎそう)配線は現状のままにして、ユニットだけ変更して、容易に搭載できる構成にした。



MF：主ヒューズ、HB：高速度遮断器、LB：断流器、CHB：充電接触器、CHR：充電抵抗器、MCOS：群開放接触器、INV：インバータ

図9. SynTRACS主回路システム構成

表2. 試験搭載のSynRMと全閉IMとの比較

13000系試験搭載SynRM	高効率全閉IM
	
定格250kW (+11%)	定格225kW
562kg (-7.1%)	605kg
全閉自冷式(走行風利用自冷)	全閉自冷式
フレーム内外気通風なし	フレーム内外気通風あり

VVVFインバータ箱、モータ開放接触器(MCOK)箱, SynRMで構成している。

SynTRACSを実現するに当たって、既存システムからVVVFインバータ内に搭載されている制御ユニット及びモータを変更した。先に述べたとおり、SynRMは惰行時にモータが発電しないため、開放接触器が不要であるが改造を簡単にするためMCOKは搭載した状態とし、惰行時に開放せず、常時接触器を投入した状態で走行試験を実施した。さらに、試験搭載に当たって、機装配線は現状のままにして、ユニットだけ変更して、容易に搭載できる構成にした。

4.3 全閉自冷式SynRM(高エネルギー密度化)

試験搭載に向け製作したSynRMは、高効率特性を生かして冷却構造を簡素化することで、表2に示すように従来の全閉IMと比較して軽量かつ高出力化を実現した。

5. システムの評価結果

今回の実証試験では、まず夜間試運転を行い、全ての試験条件下で安定したモータ制御ができていることや、鉄道車両が加速・減速する際に使用する広い速度範囲で高効率特性を発揮できること、それに加えて、工場内で事前評価した消費電力量と同等であることなどを確認した。実証試験結果の概要を表3、代表的な力行・回生ブレーキの試験結果を図10及び図11に示す。どの試験でも、安定した動作を確認し、良好な結果であった。

表3. 本線試運転結果

実証試験の項目	実証試験の結果
加速度・減速度評価	既存システムと同等の車両性能を持つことを確認
運転操作評価	既存システムと同等の挙動であることを確認
特殊環境評価	雨天条件、上り勾配条件、回生ブレーキ時の負荷変動等の特殊環境下で既存システムと同等の挙動であることを確認
騒音評価	既存システムと同等以下の騒音レベルになることを確認

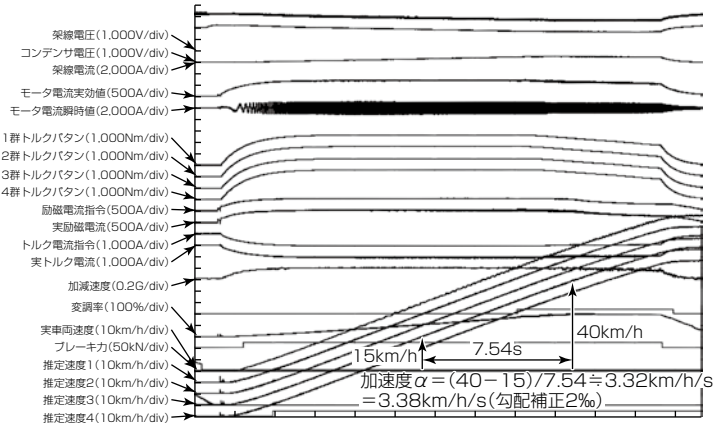


図10. 力行試験結果

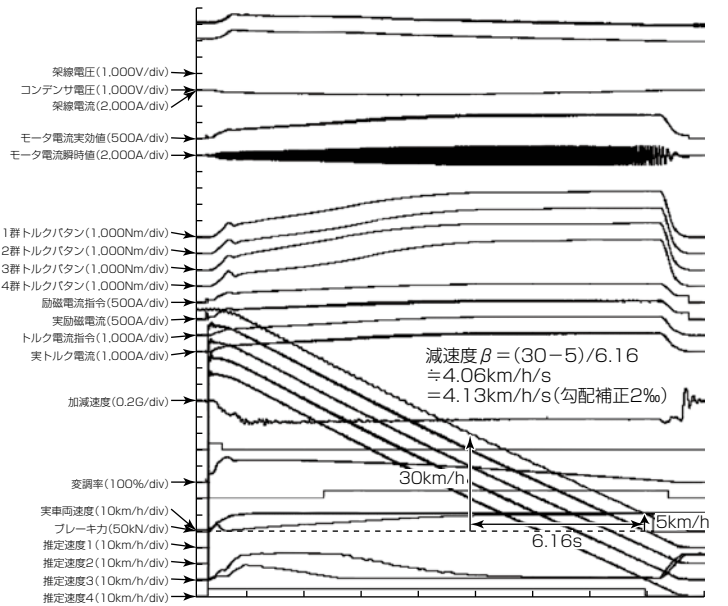


図11. 回生試験結果

6. むすび

世界最高レベルの高効率化を実現し、レアアースを使用しないSynRMと、それを可変速制御するインバータ制御技術を世界で初めて開発し、鉄道車両推進システム“SynTRACS”としての開発成果を述べた。それに加えて、東京地下鉄丸日比谷線13000系車両へ試験搭載し、実環境での評価結果を述べた。

今後、これらを主回路システムの選択肢に加えることで、地球資源の節約(レアアース)とともに世界最高レベルの効率によって、鉄道車両の更なる省エネルギー化を実現して、持続可能性の確保に貢献していく。

参考文献

- (1) 菅原 徹大, ほか: SiCパワーモジュールを適用した鉄道車両用インバータ装置, 三菱電機技報, 94, No.12, 694~697 (2020)
- (2) 根岸 哲, ほか: 3.3kVフルSiCパワーモジュール, 三菱電機技報, 92, No.3, 175~178 (2018)
- (3) 金子 健太, ほか: 全閉形主電動機の環境配慮型社会への適用技術, 三菱電機技報, 90, No.9, 521~524 (2016)