山梨リニア実験線の駆動制御システム

正員	長田 豊	(東海旅客鉄道株式会社)
正員	北野淳一	(東海旅客鉄道株式会社)
正員	池田春男	(鉄道総合技術研究所)
非会員	中島 強	(鉄道総合技術研究所)
正員	水谷麻美	(株式会社東芝)
非会員	鶴田慎一郎	(株式会社東芝)
正員	麦屋安義	(株式会社東芝)
正員	伊藤健治	(株式会社東芝)

The Drive Control System of Yamanashi Maglev Test Line

OSADA, Yutaka, Member, KITANO, Jun-ichi, Member, (Central Japan Railway Co.)

IKEDA, Haruo, Member, NAKASHIMA, Tsuyoshi (Railway Technical Research Institute)

MIZUTANI, Mami, Member TSURUTA, Shin-ichiro, MUGIYA, Yasuyoshi, Member ITO, Kenji, Member (TOSHIBA Co.)

The magnetically levitated vehicle (Maglev) system is the most promising system for high speed mass transportation in the near future. We have carried out running tests at Yamanashi Maglev Test Line since April 1997, and attained the speed of 550km/h in December, the world speed record of the railway systems.

In Yamanashi Maglev Test Line, the vehicles are automatically driven by three pairs of inverter in the power conversion station. The automatic drive control system requires the instantaneous location of the vehicle to generate the current references for LSM. The location signal is detected by the inductive radio wires along the guide-way. And it is superposed with some disturbances, which may cause the fluctuation of the propulsion force.

On the other hand, load variation occurs according to the change of vehicle's weight and running resistance.

We need to design the drive control system considering ride quality as well as speed following performance in spite of the distorted location signal and load variation.

In this paper, we describe the design procedure, the drive control characteristics and the test results in the Yamanashi Maglev Test Line.

キーワード：浮上式鉄道、超電導、駆動システム、山梨リニア実験線

1. まえがき

リニアシンクロサモータ (Linear Synchronous Motor: 以下 LSM と記述) 駆動の超電導磁気浮上式鉄道 (以下浮上式鉄道と記述) は、大都市間を結ぶ次世代の大量高速輸送機関として注目され、宮崎実験線での基礎試験⁽¹⁾を経て、山梨リニア実験線において実用化試験⁽²⁾⁽³⁾が行われている。1997 年 4 月から試験走行を開始し、同年 12 月に鉄道世界最高速度 550km/h を記録した。

この浮上式鉄道は、地上一次による LSM 駆動方式を用いており、車両の走行に関する制御はすべて地上側から行う。車両の動きを監視し、安全性、乗り心地、正確なダイヤ走行などを考慮して列車を運行していくために、正確な

車両の位置や速度を検出し、地上の制御側へ伝送することが必要となる。

LSM は、軌道上に敷設された推進コイルと車両に搭載された超電導磁石で構成されることから、モータの位相を検出する検出器は全線に敷設する必要がある。山梨リニア実験線では、交差誘導線を用いた位相検出方式を採用している。交差誘導線を用いた位相検出方式は、前述のように軌道全線に敷設されるため、回転形モータのパルスジェネレータ並みの検出精度を確保することは困難である。

このような検出位相から、インバータ制御に必要な情報を作成することや、車両の位置、速度を算出し速度制御を行うことは、地上一次 LSM 方式に求められる特有の技

術である。また、乗り物としての乗り心地を確保するために、加減速度の変動を抑制することが必要となる。このため、これら制御系の詳細な検討を行うことが不可欠となる。

本論文では、これらの特殊性を備えた山梨リニア実験線の駆動制御システムについて、そのシステム構成と特性の検討を行うとともに、走行試験によってこれらの確認を行っている。

2. 運転制御システム

図 1 に山梨リニア実験線のシステム構成図を示す。山梨リニア実験線では、車両は LSM により駆動される。LSM は、地上に設置された 3 相推進コイルと車上に搭載された超電導磁石によって構成される。推進コイルに 3 相の正弦波電流を流すことで列車の推力を得る。電流は、車両の存在する区間のみ給電するように制御され、列車の移動に伴い、給電区間を次々に切り替えていく。区分けされた給電区間をセクションと呼ぶ。セクションは車両の左右に 1/2 ずつずらして千鳥状に設置されており、3 系統のインバータにより順に給電される。この給電方式を 3 重き電方式という。1 系統のインバータが故障などで給電を行うことができない場合も、残りの 2 系統での走行が可能であり、冗長性が高い。

図1 運転制御システム構成図

Fig. 1 Train Operation Control System of Maglev Vehicle

図 2 に変換器制御⁽⁴⁾のブロック図を示す。インバータの構成が 3 相 4 線式のため、 $d, q, 0$ 軸の直流成分の電流指令を与える。 d 軸電流指令は図 1 の電流指令 I_d^* であり、 $q, 0$ 軸電流指令は 0 に設定される。インバータの 3 相出力電流に対して 3 相- $dq0$ 軸変換を行った値を前述の電流指令と比較し、電流制御を行う。電流制御の出力に対して、き電回路の LR 分の電圧降下を車両の位置に応じて補償し、また、逆起電力降下分を補償することで、インバータの電圧指令とする。

図2 変換器制御ブロック図

Fig. 2 Block Diagram of Inverter Control

推進コイルに電力供給する変電所は、複数の編成車両を駆動するために複数箇所必要となる。車両が 2 つの変電所間を渡るとき、次変電所では現変電所での制御を引き継ぐ。これを変電所渡り制御と呼んでいる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。制御に必要なデータを変電所間でやりとりするが、データ送信が中断されるなどの故障を考慮して、個々の車両制御はできるだけシンプルでかつ、独立で動作できるように考慮して制御系を構成している。

これら一連の列車運転制御は、ダイヤ管理を行う運行管理システム、個々の車両の走行制御を行う駆動制御システム、衝突や逸走を防止する保安制御システムが相互に連携をとって機能している。

駆動制御システムでは、運行管理システムから送信されたランカープ（位置-速度データ）から連続データ（速度指令）の生成を行う。生成された速度指令と実際の列車の速度とを比較し、インバータへの電流指令 I_d^* を演算する。また、位同期制御では、界磁極の位置（位相）に同期した位相基準信号をインバータに与え、インバータは 3 相正弦波電流を推進コイルに供給し、列車を駆動する。

山梨リニア実験線での位置検知には、軌道上に敷設された交差誘導線を用いる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。図 3 に位置検出装置における位相検出の仕組みを示す。交差誘導線は、3 相推進コイルに対して、図 3 に示すように設置されている。図中の交差誘導線は U 相推進コイルに対して設置されているものを示しているが、実際は V, W 相推進コイルに対しても同様に各 2 本ずつが設置されている。これらの交差誘導線から得られる信号を整流・演算することで、図 3 に示すような 1 周期が推進コイル長 (2.7m) に合致するような正弦波状の信号を得ることができる。この正弦波状の信号の位相が、図中の検出位相信号となる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。位同期制御では、検出位相信号を用いて、位相基準信号の生成や、車両の位置および速度を演算する。

図3 位相検出の仕組み

Fig.3 Detection of Phase

3. 駆動制御システム

駆動制御システム内には、位相同期制御、速度制御およびパターン発生における変曲制御がある。これらの詳細について説明する。

〈3.1〉 位相同期制御 検出位相信号は、車両の位置検知および速度信号生成に用いられるほか、インバータ出力電流の位相基準信号の生成にも用いられる。検出位相信号は5ms毎に入力されるが、インバータのPWM制御周期が500Hzであるため、位相同期制御を用いてインバータの制御周期よりも早い、200 μ s周期の位相基準信号を出力する。位相同期制御のブロック図を図4に示す。

図4 位相同期制御ブロック図

Fig.4 The Block Diagram of Phase Locked Loop

図4に示すブロック図では、車両の等速走行により位相信号がランプ状に変化する時、PI制御を行うことで位相の定常偏差は解消される。しかし、加減速時には、位相信号が2次曲線状に変化するため、定常偏差が生じる。PI制御に、2乗積分の項を加えることで、加減速時の定常偏差をほぼ0とすることが可能となるが、速度応答に振動を発生するような特性となる。山梨リニア実験線のシステムでは、位相同期制御にPI制御を採用し、加減速時の定常偏差が許容範囲内に収まるように制御定数を設定している。

山梨リニア実験線は、交差誘導線を全線に渡って敷設

することで車両の位置を検知する。このシステムでは、交差誘導線の敷設誤差によっては検出位相に外乱が重畳されることがある。外乱の高周波成分は、フィルタで影響を低減することが可能であるが、低周波成分を除去することは難しい。外乱による影響として、一つにはLSMの同期運転において、本来の位相とのずれが引き起こすLSMの推力変動があげられる。しかし、推力は位相偏差のcos成分となるため影響が軽微であり、位相同期制御内での対策は施していない。

一方、位相の微分から車両の速度を求め、制御を行うため、位相外乱は最終的に推力変動を引き起こす。このことから、演算速度に対して、後述の平均処理を行っている。

加速走行時、位相同期制御において初期状態から位相が追従する様子は、図5で示すことができる。現行の制御ゲイン ($K_{pp}=10$, $K_{pi}=100$) を用いたとき、定常偏差と加速度との関係は、図6で示される。0.2gの加速時において定常偏差は2.6degであり、このときの推力低下は、0.1%にとどまる。

図5 位相同期制御の動作

Fig.5 Characteristics of Phase Locked Loop

図6 車両加速度と定常偏差

Fig.6 Relationship of Acceleration and Phase Deviation

〈3.2〉 速度制御 図 7 に速度制御ブロック図を示す。

浮上時に地上と非接触となる浮上式鉄道では、通常の回転型モータに使用される手段では車両の速度を検出することができない。速度制御に用いる車両速度として、位相同期制御で演算される速度を用いている。検出位相に外乱が重畳される場合には、実際の車両速度に変動がなくても、演算される速度が変動する。

速度制御比例ゲイン：Kpv	500
速度制御積分ゲイン：Kiv	500
推力係数：Kf	180[N/A]
車両重量：M	80,000[kg]
位相同期制御比例ゲイン：Kpp	10
位相同期制御積分ゲイン：Kip	100

周波数 0 の直流外乱すなわち一定誤差が含まれたときの推力の低減量を 1 とする。このとき、外乱の周波数に依って推力変動が先の低減量に対してどれだけ拡大するかを図 8 に示す。図 7 の実線のループでは図 8 の■となる。2Hz 付近の周波数に対して推力の拡大率が增大することがわかる。

理は、制御系で一次遅れとして近似できる。平均回数を多くとることで変動幅を低減することが可能であるが、一方で速度の検出遅れが大きくなるため、速度制御における応答特性が悪くなる。拡大率の低減と、検出遅れによる影響を鑑みて、平均回数を 100 回としている。このときの等価的なブロック図は図 7 の点線の経路で示される。10ms の入力周期に対して、平均回数 100 回での制御遅れは、0.5s の一次遅れで近似できる。平均処理により推力の拡大率のピークは、図 8 の△で示されるように約 1/6 に低減される。

次に、平均処理を施した場合の制御系の特性について検討を行う。一例として、車両が 300km/h で走行中、負荷変動として走行抵抗が 9kN の大きさでステップ状に変化した場合のシミュレーション結果を図 9 に示す。速度は最大 0.3km/h 程度の幅で振動するが、約 8 秒で収束する。

311

〈3.3〉 変曲制御 現行の速度制御系および制御ゲインを用いると、加速度の変化点において速度のオーバーシュートが発生する。このため、パターン発生時に加速度の変化を緩やかにする処理を行う。これを変曲制御と呼ぶ。

駆動制御システムでは、運行管理システムからランカーブとして、図 10-(a)に示すような加速度の変化点の位置-速度データが送られてくる。それを受けて、図 11に示すような加速度の変化点を緩和した連続的な速度指令を改めて生成する。図 12には、0.15g の一定加速走行から等速走行に移行したときの速度指令およびそれに対する車両速度を示している。このときのジャークは 0.07g/s および 0.03g/s を示している。変曲制御を行うことにより、速度のオーバーシュートは低減される。

図10 運行管理システムからのランカーブ
Fig.10 Run-curve from Traffic Control System

図11 変曲制御

Fig.11 Jerk Control

図12 変曲制御特性

Fig.12 Characteristics of Jerk Control

4. 試験結果

図 13に山梨リニア実験線における走行試験結果を示す。運行管理からのランカーブに基づいて、ジャーク 0.07g/s で変曲制御を行い、速度指令を生成している。速度指令と列車速度の偏差（速度偏差）をみると 0.15g 加速から等速に移行する加速度の変化点において、オーバーシュートが 2km/h となっていることがわかる。この結果は図 12に示す結果とほぼ一致する。図 12に示すように、ジャークを小さく設定することで、オーバーシュートを低減できる。今後の試験において、この効果について検証を行っていく。

オーバーシュート以外の変動として速度偏差にあらわれているものには、浮上走行から車輪走行に移行したときの車輪着地による変動と出発時の速度偏差がある。山梨リニア実験線では、速度指令を列車の位置に対して与えている。このため出発時に電流指令を発生させるために一定の速度指令を与える。出発時に検出される速度偏差はこの制御によるものである。図 13に示される走行区間にもトンネルや勾配が分布しているが、これらの走行抵抗の変化に対しても、速度の変動はほとんどみられないことがわかる。

位相偏差に関しては、0.15g の加速時において 2deg 程度となっており、図 6の解析結果に一致している。

平均前および平均後の列車速度を拡大した箇所をみると、速度位相外乱によって演算した列車速度（平均前）に大きく振動が生じていることがわかる。この振動は平均処理によって低減されており、推力に相当する d 軸電流指令にはその影響が及んでいない。

また、インバータの出力電流は、A,B,C の 3 系統あるインバータの A 系について示している。d 軸成分については指令値どおりに、q, 0 軸成分はほぼ 0 に制御されている。d 軸電流指令、および出力電流に休止区間があるが、これは、B,C 系のインバータが給電している区間でこの間 A 系からは電流は出力されない。また、電流指令値に対して、d 軸電流指令を反転させているセクションがあるが、これはコイルへの配線の関係上当該セクションの極性が反転しているためである。

併せて、電流、電圧および位相信号の拡大図を図 13に示す。5ms 入力の検出位相に対して、位相基準が演算され、それをもとに、インバータから電流が出力される。このように粗い位相信号を元にしても、ほぼ正弦波状の出力電流を得ることができる。

5. むすび

山梨リニア実験線の駆動制御システムについて特性検討と検証を行った。

(1) 位相同期制御の制御ゲインを表1のように設定することにより、加減速時の定常偏差を許容範囲内に収め、

図13 走行試験結果

Fig.13 The Experiments at Yamanashi Maglev Test Line

推力低下を抑制することができる。

- (2) 位相同期制御を含む速度制御では、位相信号に含まれる外乱成分により、特定の周波数においては推力変動が増大する傾向が見られる。この変動を抑制するためには、速度の平均処理を行うことが有効である。
- (3) 速度制御においては、ランカーブにおける加速度のステップ状の変化により、速度のオーバーシュートが発生する。変曲制御を用いて加速度の変化を緩和するような速度指令を作成することで、このオーバーシュート量を低減させることができる。

以上述べた山梨リニア実験線の駆動制御システムは、超高速走行試験を通してその実用性を確認することができた。今後は、2変電所間の渡り制御や複数列車制御試験などを行っていく予定である。

(平成10年6月26日受付、平成10年9月24日再受付)

文献

- (1) T. Saijo, S. Koike, and S. Tadakuma: "Characteristics of Linear Synchronous Motor Drive Cycloconverter for Maglev Vehicle ML-500 at Miyazaki Test Track.", IEEE Trans. on IA, Vol. IA-17, No. 5, (Sep./Oct. 1981)
- (2) 波多野、水谷他: 「浮上式鉄道の走行制御に関する考察」、平4電気学会全大、No. 674
- (3) S. Tadakuma, S. Tanaka, H. Inoguchi, Y. Tanoue, H. Ikeda, and S. Kaga: "Consideration on Large Capacity PWM Inverter for LSM Drives." IPEC-Tokyo 90 Session 8-5, p.413, (1989)
- (4) 北野、位田他: 「山梨リニア実験線用駆動制御システムの開発」、平9リニアドライブ研究会 LD-97-1
- (5) 横田、渡辺、酒井: 「運転保安システムMTPとデジタル位置検知の開発」、鉄道総研報告、Vol.7, No.9 (1993-9)
- (6) M. ONO et. Al: "Train Control Characteristic and the Function of the Position Detecting System at Yamanashi Maglev test Line" MAGLEV 98 pp184

長田 豊

(正員) 昭和 28 年 6 月 27 日生。51 年 3 月、東京電機大学電気工学科卒業。同年 4 月日本国有鉄道入社。現在、東海旅客鉄道(株)勤務。この間、主として、電気設備の保守、開発、設計、管理に従事。63 年より超電導磁気浮上式鉄道の開発に従事。技術士。

北野 淳一

(正員) 昭和 32 年 4 月 10 日生。57 年 3 月、東京工業大学大学院理工学研究科電気・電子工学専攻修士課程修了。60 年 3 月同博士課程単位取得退学。同年同大学工学部助手。平成元年 4 月、東海旅客鉄道(株)入社。以来超電導浮上式鉄道の開発に従事。

池田 春男

(正員) 昭和 22 年 1 月 11 日生。46 年 3 月、中央鉄道学園大学課程電気科卒業。以後、国鉄鉄道技術研究所、宮崎浮上式鉄道実験センターにて浮上式鉄道の研究開発に従事。現在、(財)鉄道総合技術研究所にて浮上式鉄道の電力供給システムに関する研究開発を担当。工学博士。

中島 強

(非会員) 昭和 32 年 6 月 28 日生。57 年 3 月、中央鉄道学園大学課程電気科卒業。59 年 3 月より宮崎浮上式鉄道実験センター、鉄道総合技術研究所にて浮上式鉄道の研究開発に従事。現在、鉄道総合研究所にて浮上式鉄道の電力供給システムに関する研究開発を担当。

水谷 麻美

(正員) 昭和 43 年 1 月 9 日生。平成 2 年 3 月、日本女子大学家政理学科物理学専攻卒業。同年 4 月、(株)東芝入社。重電技術研究所(現電力・産業システム技術開発センター)にて超電導磁気浮上式鉄道の走行制御、電力変換器などのパワーエレクトロニクスの研究開発に従事。

鶴田慎一郎

(非会員) 昭和 39 年 7 月 4 日生。平成元年東海大学大学院工学研究科電気工学専攻卒業。同年 4 月、(株)東芝入社。入社後、超電導磁気浮上式鉄道の列車制御システムの開発に従事。

麦屋 安義

(正員) 昭和 35 年 1 月 1 日生。58 年 3 月、北海道大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月、東京芝浦電気株式会社(現(株)東芝)入社。超電導磁気浮上式鉄道の列車制御システムおよび電力供給システムエンジニアリング業務に従事。

伊藤 健治

(正員) 昭和 24 年 1 月 27 日生。47 年 3 月、東京理科大学工学研究科電気工学修士課程修了。同年 4 月、東京芝浦電気株式会社(現(株)東芝)入社。超電導磁気浮上式鉄道の電力供給システムエンジニアリング業務に従事。