山梨リニア実験線における速度起電力位相同期方式を用いた 自制制御走行試験結果

正員 古賀 俊作 (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 中島 強 (鉄道総合技術研究所)

Experimental Results of Self Control System synchronized with Phase of Electromotive Force at the Yamanashi Maglev Test Line

Shunsaku Koga, Member, Jun-ichi Kitano, Member (Central Japan Railway Company)
Tsuyoshi Nakashima, Member (Railway Technical Research Institute)

In the Yamanashi Maglev Test Line, the location of the train is detected with the inductive radio system. The inductive radio system is very reliable and accurate. However using the inductive radio system, we have to lay the cross inductive cable along the guideway accurately and set up the detecting system of train's location in each power conversion station. Therefore the cost of construction and maintenance is very expensive. Moreover, from the redundancy point of view, it is necessary to examine the other method of detecting train's location, in case of inductive radio system down.

We have already proposed a new train's location detecting system using the phase of Electromotive Force (EMF). In this system, the reduced-order state observer estimates the phase of EMF. Therefore the inductive radio system is not required. We have reported the configuration and the basic characteristics of the EMF observer. In this paper, we report the experimental results of running test at the speed of 300km/h~0km/h in the Yamanashi Maglev Test Line. We confirm the performance of velocity and current control with EMF.

キーワード: 磁気浮上式鉄道, 位置検知位相, 速度起電力位相, 位相同期制御, 自制制御, 最小次元オブザーバ

1. はじめに

山梨リニア実験線では, 車両位置に同期した位相を交差誘導線により検出し, LSMの位相同期制御を行っている⁽¹⁾。現在, この位相同期方式では, 全線区・全速度域に亘って安定した特性が得られている。しかしながら, この方式では, 交差誘導線を全線に亘り高精度に敷設し, 維持管理する必要があり, 設備の施工及び保守に多大な労力が必要となる。

先に, 著者らは, 交差誘導線方式以外の位置検知方式として速度起電力位相同期方式を提案し, その理論, シミュレーションを示すと共に, インバータ・キ電系のミニモデルを使用して速度起電力位相同期制御系の安定性を実証した⁽²⁾。この方式は, 速度起電力位相を推定し, その推定位相値を基に, 位相同期制御を行う方式であり, 設備・保守が軽減されるばかりでなく, 制御システム全体の冗長性が上がり, 信頼性も向上する。

本論文では, 山梨リニア実験線において, 速度起電力位相同期方式を用いた実走行試験を行い, その制御方式の有

効性を確認したので, その試験結果について述べる。速度起電力推定に基づく実機における位置・速度のセンサレス制御は, 研究室レベルでの比較的規模の小さい回転機制御で例は見られるが⁽³⁾, 大規模な鉄道制御システムにおいて適用された例はこれまで見当たらない。また, 本論文で検証する制御方式は, ロバスト性を有するオブザーバで推定したd, q軸の速度起電力の比から位相偏差を求め, その位相偏差により入力位相を補正し, さらにPLLにより出力位相として安定した位相基準を得ることで, 低速度域でも速度起電力位相による安定した走行制御が可能である特徴を有する。本論文における速度起電力位相による走行試験結果では, 約300km/hの高速域から0km/hの停止までにおける定常特性, 過渡特性及び停止制御特性を示し, 提案した制御方式の有効性を検証する。

2. 速度起電力位相同期制御系概要

<2・1> 運転制御システムの概要 図1に山梨リニア実験線列車運転制御システムの概要を示す。運行管理システ

ムからは、列車の走り方を定めたランカーブが駆動制御システムへ送出される。位置検知装置からは列車位置に対応する位置検知位相が駆動制御システムへ送出される。駆動制御システムは、これらの情報を基に、電流指令値及び車両と同期をとるための位相基準を電力変換器へ出力する。電力変換器から出力される電力は、き電区分制御部により制御されるき電区分閉装置が投入されることにより、列車の在線する近傍の3系分のセクションのみに供給される。例えば、図1ではC1、A2、B2セクションのみに供給される。

図1. Overview of train control system

<2-2> EMF方式制御系の概要 図2にEMF方式制御系のブロック線図を示す。

Fig.2. Block diagram of EMF method

速度制御部Y(s)では、位相同期制御部で演算され2次のLPFを通った速度Vと速度指令値V*の速度偏差に対し、1次のPI制御により電流指令値I*を出力する。速度制御部ブロック線図を図3に示す。

Fig.3. Block Diagram of Velocity control Y(s)

位相同期制御部G(s)では、5ms周期で速度起電力オブザーバにより推定された速度起電力位相θを入力位相として取り込み、PLLを介して出力位相である位相基準θ*を出力する。位相基準は200μs周期で変換器制御へ出力している。位相同期制御部ブロック線図を図4に示す。

Fig.4. Block diagram of compensating velocity G(s)

電流制御部I(s)では、電流指令値I*と出力電流Iとの電流偏差に対し、1次のPI制御により電圧指令値V*を出力する。電圧指令値は、オブザーバにより推定された速度起電力の外乱補償が行われる。電流制御部ブロック線図を図5に示す。尚、図2～図6におけるR及びLは、車両位置に応じたセクション固有の値を切り替えて用いている。

Fig.5. Block diagram of current control I(s)

速度起電力は、出力電流I及び出力電圧Vから図6に示す最小次元オブザーバより推定される。オブザーバゲインは、

オブザーバより上位の制御系である位相同期制御部の応答時定数より十分高速となり且つ電流検出のフィルタや制御装置内部の遅れの影響を受けないように、これらの時間よりは十分遅くなるような値を選択している。速度起電力位相は、速度起電力オブザーバにより推定された速度起電力d, q成分Zd, Zqから位相基準の補正分 $\Delta\hat{\theta}$ を(1)式により求め、位相同期制御部で演算された位相基準 θ^* に加えることで求める。その速度起電力位相はPLLを介して変換器電流制御の位相基準として出力されるため、低速度域でも速度起電力位相により、安定した速度制御が可能となる。尚、詳細の理論は文献(2)を参照されたい。

$$\Delta\hat{\theta} = \tan^{-1} \frac{Zq}{Zd} \dots\dots\dots(1)$$

図6 速度起電力オブザーバB(s)ブロック線図
Fig.6. Block diagram of EMF observer B(s)

速度起電力位相は、A,B,C3系が変換器制御部より送信されるが、そのうち有効な1系分を位相同期制御部にて図7のように選択し、速度起電力入力位相としている。表1に走行試験に用いた電力変換器及び車両の諸元を示す。

図7 速度起電力位相選択
Fig.7. Select method of EMF

表1 電力変換器及び車両の諸元

Table.1. Specifications of power conversion system and vehicle

項目	値	単位	項目	値	単位
容量	20	MVA	編成	77.6(3両)	m
入力電圧	DC 5.25	kV	車両重量	80(3両)	t
出力電圧	AC 11	kV	台車方式	連接台車	
出力電流	1015	A	仕極数	4極2列	
周波数	0~46.3	Hz	極ピッチ	1.35	m
			起磁力	700	kA

3.速度起電力位相による高速度域走行試験結果

<3.1> 走行試験パターン 走行試験時の走行パターンを図8に示す。速度起電力位相による走行区間は、図8中にEMF適用区間と記した区間で速度は300km/h~215km/h, 減速度-0.2gの区間である。

図8 高速度域走行試験パターン
Fig.8. Running test pattern at high speed range

<3-2> 定常特性 図9に、図8の走行パターンで走行試験を行った時の走行全体のチャートを示す。位相、電流、電圧及び速度は、⇔で示したEMF適用区間でも安定した制御特性を示している。特にインバータ電流では、d軸電流は電流指令値通り出力されており、またq軸電流はほとんど0であり、力率1の良好な電流制御が行われていることが分かる。

図9 速度起電力位相走行制御特性
Fig.9. Characteristics of EMF running test

図10に300km/h一定速度走行時の拡大チャートを示す。速度起電力位相は、図4で記した通り5ms周期で入力されるため階段状の波形となっているが、特に大きな位相飛びや歪みも無く安定した速度起電力位相が推定されている。この速度起電力位相を入力位相として位相同期制御部で200μs毎の補正を行い、変換器制御の基となる

位相基準をPLLを介して出力しているため、位相基準も同様に安定した波形が得られている。

図10 300km/h時におけるEMF走行制御特性

Fig.10 Characteristics of EMF running test at 300km/h

以上のように、300km/h高速走行時の定常特性は、速度起電力位相及びインバータ出力電流が、位置検知位相使用時と同等に安定しており、オブザーバーにより推定された速度起電力位相は走行制御に十分適用可能である。

<3-3> 過渡特性 図11に、図9で示した走行における300km/h一定速から-0.2g減速移行時の拡大チャートを示す。過渡時でも、速度起電力位相及び位相基準とも安定した位相が得られている。また、インバータ出力電流は、d軸q軸とも定常状態時と同様に良好に制御されている。以上より加減速度変化点での過渡特性も安定した制御特性が得られていることが分かる。

図11 速度起電力位相制御時における過渡特性

Fig.11. Transient characteristics if EMF control

<3-4> 入力位相切替時の特性 入力位相切替時における、位相制御特性について検証する。

<3-4-1> 位置検知位相から速度起電力位相への切替

図12に位置検知位相(IR)から速度起電力位相(EMF)への入力位相切替点における位相特性を示す。位相切替点より前の区間では位相基準は位置検知位相に同期し、後の区間では速度起電力位相に同期している。位相切替点では、位置検知位相と速度起電力位相がほぼ同等の位相を示しているため、切替時における位相偏差はほとんど見られず、また速度の変動も無い。

図12 位置検知位相から速度起電力位相への切替

Fig.12 Changing phase from IR to EMF

<3-4-2> 速度起電力位相から位置検知位相への切替

図13に速度起電力位相から位置検知位相への入力位相切替点における位相特性を示す。この位相切替点では、約8度の位相偏差が生じている。主な原因としては、図12における位相切替点は300km/h等速時定常状態での切替であるのに対し、図13の切替は-0.2g減速中の過渡状態

図13 速度起電力位相から位置検知位相への切替

Fig.13 Changing phase from EMF to IR

における切替であり、また位置検知位相と速度起電力位相は非同期であることによる。切替点で8度あった位相偏差は、約1秒後には0度に収束しており、図14のシミュレーション結果と良く一致している。位相偏差8度における推力変動は約1%であるが、図13の速度チャートは切替点において変動しておらず、切替時の位相偏差は、速度制御特性に影響を与えず、問題のないことが分かる。

図14 位相同期制御における8°ステップ応答

Fig.14 Step response of PLL

<3・4・3> 速度起電力位相の系切替

図15にA系からC系への速度起電力位相切替時における位相特性を示す。図7でも説明した通り、入力位相としての速度起電力位相は、3系の内最も安定して速度起電力位相の出力されている電機セクション中間付近の速度起電力位相を選択するようにしている。図15の区間では、A系とC系の間に車両が存在し、B系のインバータは停止しているためB系の速度起電力位相は出力されていない。3系のインバータは、相互干渉無く制御されているため、速度起電力位相は3系とも非同期であるが、図15における位相切替点での位相偏差は、通常時の位相偏差の傾向と変わりなく、若干発生しているが、速度特性に変化は無く、速度起電力位相の系切替による速度制御系への影響は無いことが分かる。

図15 速度起電力位相の系切替

Fig.15 Changing phase from A-EMF to C-EMF

4. 速度起電力位相による低速度域走行試験結果

<4・1> 低速度走行時における制御特性 図16に、速度起電力の小さい低速度域である速度67km/h～0km/h停止までの間で速度起電力位相制御を適用した時の走行制御試験結果を示す。

速度起電力位相は、低速時でも大きな乱れはなく、位相基準は安定して出力されていることが分かる。また、インバータ電流は、d軸電流は電流指令値通り出力されq軸電流はほとんど0であり、良好な電流制御が行われていることが分かる。

図16 低速時における速度起電力位相走行制御特性

Fig.16 Characteristics of EMF running test at low speed

<4・2> 停止時における制御特性 図17に、図16における停止時の走行制御特性拡大図を示す。

図17 停止時の速度起電力位相走行制御特性

Fig.17 Characteristics of EMF running test at stopping

停止時の試験では、急激な減速度でも停止出来ることを確認するため、非常ブレーキを指令し停止させる試験を行った。図17では約4km/h時、図中▼を付した時点で非常ブレーキが指令され、その直後約-400Aの回生電流

が流れ、それに伴い速度起電力位相及び位相基準は若干乱れているが、電流の収束する停止時は位相も安定しており、速度0km/hの停止まで、速度起電力位相による走行制御が良好に行われていることが分かる。

停止付近でも速度起電力位相により安定した制御が可能である理由として、以下の4点をあげることが出来る。

(1)出力電流 $I=0$ (A)となる停止制御では、速度起電力 Z を求める際の誤差要因となる変数としては、出力電圧 V のみとなり、速度起電力を推定する際の誤差要因が小さい。

(2)速度起電力位相検出限界付近でも、PLLのフィルター機能により位相を正整可能である。

(3) d 、 q 軸の速度起電力の比より位相基準を補正しているため、位相基準が安定する。

(4)速度が0.2km/h以下となると、ディスクブレーキ動作により停止する⁽⁴⁾ため、速度起電力が0となる速度0km/hまで速度起電力位相により制御する必要はない。

なお、停止時は、以上の理由により、速度起電力位相により停止まで制御可能であるが、0km/hからの出発制御は、出発時に速度起電力が発生しないため、模擬位相による制御が必要となる。

5. まとめ

本論文では、先に発表した論文「磁気浮上式鉄道における速度起電力位相を用いた自制制御」⁽²⁾における理論を検証するための実列車による走行試験結果を示した。その結果300km/hにおける高速走行、-0.2gにおける減速走行、約60km/h以下における低速走行及び非常ブレーキにおける停止共に速度起電力位相は安定に推定され変換器制御の基となる位相基準及びインバータ出力 d 軸 q 軸電流とも良好に制御され速度起電力位相による走行制御に問題のないことが検証された。今後は文献(2)で示した模擬位相を利用した他制制御による出発制御の検討を進め、出発から停止まで位置検知位相に依らない位置・速度センサレス制御の走行試験を行う予定である。最後に、この試験を進めるにあたり、山梨実験センター、JR東海リニア開発本部及び三菱電機(株)の多くの方々に、御協力頂き感謝致します。また、本研究は運輸省国庫補助金を受けて行った。

(平成11年08月30日受付、平成12年01月06日再受付)

文 献

- (1) 長田豊, 他:「山梨リニア実験線の駆動制御システム」, 電学論D, Vol. 119, No3, P308~P313, 1999年
- (2) 古賀俊作, 他:「磁気浮上式鉄道における速度起電力同期方式を用いた自制制御」, 電学論D, Vol. 119, No6, P816~P824, 1999年
- (3) 竹下隆晴, 他:「速度起電力推定に基づくセンサレス突極形ブラシレスDCモータ制御」, 電学論D, Vol. 117, No1, P98~P104, 1997年
- (4) 古賀俊作, 他:「磁気浮上式鉄道における停止制御」, 電学論D, Vol. 119, No11, P1301~P1306, 1999年

古賀 俊作

(正員)平成3年3月早稲田大学理工学研究科電気工学修士課程修了。同年4月東海旅客鉄道株式会社入社。以来、主に、超電導磁気浮上式鉄道電力設備、駆動制御の開発に従事。工学博士

北野 淳一

(正員)昭和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。昭和60年3月同博士課程単位修得退学。同年4月同大学工学部助手。平成元年4月東海旅客鉄道株式会社入社。以来、超電導磁気浮上式鉄道の開発に従事。

中島 強

(正員)昭和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。