

リニアモータ型レールブレーキの開発

坂本 泰明* 柏木 隆行*
 米山 崇** 嵯峨 信一***

Development of A Rail Brake Derived from Linear Motor Technology

Yasuaki SAKAMOTO Takayuki KASHIWAGI
 Takashi YONEYAMA Shin-ichi SAGA

Studies have been carried out on a rail brake developed by applying linear induction motor technology, called LIM-type rail brake. This brake is capable of generating braking forces without contact. In addition, this method decreases the rise in rail temperature, and no on-board supply of electric power is required by using dynamic braking. It is however necessary to install this brake in the limited space between front and rear wheels of the bogie. A prototype rail brake system was designed and built and its electromagnetic characteristics were examined on a test track in RTRI. These investigations revealed that the LIM-type rail brake could be applicable for practical use.

キーワード：レールブレーキ，リニア誘導モータ（LIM），プロトタイプ，構内走行試験

1. はじめに

鉄道車両における渦電流方式のレールブレーキ¹⁾は車輪とレールの間の摩擦力（粘着力）に依らない非接触のブレーキ力を発生でき、速度の増加と共に減少傾向を示す粘着力に比べて高速域でのブレーキ力の減少が小さいなどの特長を持つ。また、ブレーキ力と共に発生する磁気吸引力が車輪とレールの間の接触圧を増加させ、粘着力及びそれに依存する粘着のブレーキ力を向上させる効果を併せ持つ。この渦電流レールブレーキにリニア誘導モータ（LIM）の発電制動の原理を応用することで、停電時に使用可能で、レール温度上昇も低減され、地震時などの異常時にも有効なブレーキとして提供できる可能性がある。文献²⁾では定置の軌条輪回転試験により、300 km/h までの電磁氣的、熱的特性、及び励磁システムとその制御を検証し、設計通りの性能が得られることを確認した。そこで、今回は構内走行試験の実施を通じて、実用化に向けた設計検討の深度化を行った。

構内走行試験を実施するに当たり、台車への搭載を考慮したリニアモータ型レールブレーキのプロトタイプ、及び営業線仕様の台車を改造した試験用台車を製作した。また、励磁システムの制御方法について、文献²⁾にて示された仕様をより実用に適うように改良を加えた。これらを R291 試験電車³⁾に実装して走行試験に供し、

性能を評価した。

本報告ではこれらのリニアモータ型レールブレーキの設計検討、及び構内走行試験の結果について述べる。

2. リニアモータ型レールブレーキの概要

2.1 電機子

リニアモータ型レールブレーキは従来のレールブレーキの直流電磁石を LIM の電機子と組替えた構成を成す。図 1 にその構成例を示す（本図では支持機構を略している）。電機子は台車前後の車輪間の限られた空間に設置されるため、鉄芯長は最大で 1.2m 程度と想定される。これに対して在来線の幹線区間で使用されているレールの頭部幅は 65mm であり、LIM としてのギャップ面積は幅狭で小さい。更に二次側が鉄塊レールであることもあり、一般的には電気機械として良い性能を期待できる構成ではない。ギャップについては、使用しない時は台車枠に引き上げておき、使用時だけね下装荷となるような上下動機構を設けることを前提として、6mm 程度が最

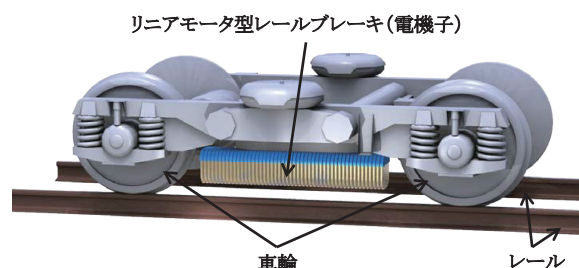


図 1 基本構成

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室
 ** 車両制御技術研究部 動力システム研究室
 *** 車両制御技術研究部 ブレーキ制御研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

小値と見込まれる。これらの制約の下、発電機能を有しつつ、速度 50～300km/h において単機当り 5kN（台車当り 10kN）以上のブレーキ力を開発目標としており、それに応える電機子構成として環状巻電機子を検討している。

2.2 励磁システム

励磁システムとその制御方法についてはVVVFインバータを用いた発電制動を行う。ここで、インバータの動作電力や発電電力の処理を車上の主回路に依存する構成を選択すると、き電系故障や回生失効などが励磁システムに波及する可能性を排除できなくなり、ブレーキシステムとしての信頼性を損なう。そこで、主回路から完全に分離し、バッテリーから供給される補助回路（DC100V）を初期励磁やインバータの制御電源に利用する励磁システムを提案している。図2に1両2台車当りの構成例を示す。補助回路とインバータの直流回路の間にダイオードを挿入することで、インバータは低圧（DC100V）から起動した後に発電電力を利用して平滑コンデンサを充電し、直流電圧を上昇させると共に制動動作に必要なエネルギーを得る。所定の直流電圧に到達後はブレーキ力を保ちつつ、滑り周波数の大きな（励磁周波数の小さな）動作点を用いて発電電力と電機子銅損を平衡させ、外部の制動抵抗器などを用いずに直流電圧を一定に保ち続ける。

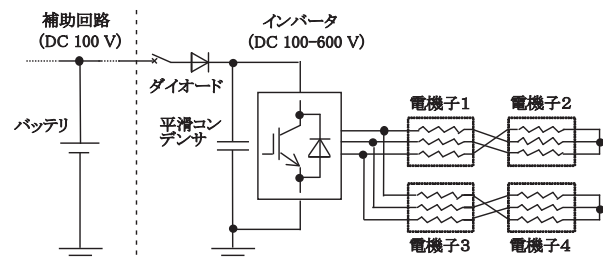


図2 励磁システムの構成例

2.3 零出力発電制動とそれによるシステム上の利点

前述の発電制動の定常状態において、インバータは平滑コンデンサの充放電する平均電力が零となるような制御を行い、直流回路の電圧を所定の値に保つ必要がある。即ち、交流側で励磁に必要な無効電力を電機子に供給しつつ、交流側と直流側の間で伝達される有効電力が零となるような制御を行わなければならない。本稿ではこの制御方法を零出力発電制動⁴⁾と呼ぶ。零出力発電制動を用いた励磁システムはインバータの動作電源や発電電力の処理方法を主回路系に依存していないので、き電系故障や回生失効などの影響を受けず、ブレーキ装置としての信頼性を損なうことがない。ブレーキ力の非粘着性を含め、既存のブレーキとは完全に独立したブレーキシステムを提供することが可能となる（表1参照）。

表1 既存のブレーキとの比較

	機械ブレーキ	電気ブレーキ	リニアモータ型レールブレーキ
エネルギーの処理方法	ブレーキディスクなどの発熱	架線への回生抵抗器の発熱	コイルの発熱 レールの発熱
動作源	圧縮空気	主回路	不要（補助回路）
主な特長	高信頼性 停留動作	省エネルギー 省メンテナンス	非粘着・非接触 高速度域が有利

3. 設計検討

3.1 基本仕様

在来線特急電車（3M6T, 350t）を検討モデルとした場合の基本仕様例を以下に示す。

- ・使用速度 v : 160 km/h（在来線優等列車最高速度）以下
- ・ブレーキ力 F_b : 5 kN 以上（単機当り）
- ・レール発熱低減率 η_r : 18% 以上（但し、速度に依存）
- ・鉄芯長 l : 1000～1200 mm 程度
- ・ギャップ g : 6.5 mm 程度
- ・定格時間 t_{rated} : 120 秒

上記のレール発熱低減率とは、同等のブレーキ力を発生する直流励磁のレールブレーキと比較した場合のレール発熱の低減効果を表す。また、定格時間はモデル編成内の6両の付随車にレールブレーキを搭載すると仮定し、レールブレーキ単独のブレーキ力で列車を停止させるまでの所要時間より定めた。温度上昇限度については、ここでは非常ブレーキなどを想定して誘導機のJEC規格における短時間使用（S2）定格⁵⁾を前提とした。

3.2 電機子

零出力発電制動を用いた励磁システムでは、車両の運動エネルギーをレールと電機子巻線の銅損として消費する。即ち、電機子を制動抵抗器として兼用することになる。この思想に則した設計法⁶⁾を以下に示す。

基本仕様よりLIMの機械的入力 P_{in} を求め、レール発熱低減率 η_r から発電すべき電機子銅損 P_{loss} を算出する。

$$P_{loss} = P_{in} \eta_r = v F_b \eta_r \tag{1}$$

零出力発電制動では電機子銅損 P_{loss} が比較的大きく設定されるため、ここでは電機子巻線は放熱を無視できる状況で温度上昇するものと見なす。使用S2において定格時間 t_{rated} 、許容温度上昇 $\Delta\theta_{max}$ に対し、選択し得る最大電流密度 J_{max} と最小導体質量 G_{c_min} を求める。

$$J_{max} = \sqrt{\frac{w_c C_c \Delta\theta_{max}}{\rho_c t_{rated}}} \tag{2}$$

$$G_{c_min} = \frac{w_c P_{loss}}{\rho_c J_{max}^2} = \frac{P_{loss} t_{rated}}{C_c \Delta\theta_{max}} \tag{3}$$

w_c は導体の比重、 C_c は導体の比熱、 ρ_c は導体の抵抗率である。一方、T型等価回路⁵⁾における励磁回路と二次回路を合わせた回路（以降、等価二次回路と呼ぶ）の

力率を $\cos\phi_{2c}$ とすると等価二次回路の皮相容量 P_{a2c} は次式で得られる。

$$P_{a2c} = \frac{P_{\text{loss}}}{\cos\phi_{2c}} \quad (4)$$

同期ワットが前記の電機子銅損 P_{loss} と等しくなるように零出力発電制動の時の極数 N_p と周波数 f_0 を設定する。鉄芯長 l 、極数 N_p に対して磁極ピッチ τ を l/N_p とすると周波数 f_0 は次式で求められる。

$$f_0 = \frac{N_p P_{\text{loss}}}{2lF_b} \quad (5)$$

これより等価二次回路の比容量 S_{2c}/f_0 を求める。

$$S_{2c}/f_0 = \frac{P_{a2c}}{N_p f_0} = \frac{2lF_b}{N_p^2 \cos\phi_{2c}} \quad (6)$$

ここでギャップ磁束密度分布を進行方向に対して正弦波と仮定し、鉄芯幅 h における平均磁気比装荷を B とすると磁気装荷 ϕ は次式となる。

$$\phi = \frac{2lhB}{\pi N_p} \quad (7)$$

これより必要な電気装荷 A 及び電気比装荷 A が求められる。

$$A = \frac{S_{2c}/f_0}{K_0\phi} \quad (8)$$

$$A = \frac{A}{\tau} = \frac{\pi F_b}{K_0 l h B \cos\phi_{2c}} \quad (9)$$

$$K_0 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} k_d k_p \quad (10)$$

k_d は分布係数、 k_p は短節係数である。巻線構成を全節巻で毎極毎相のスロット数 q が 2～3 程度の分布巻と仮定すると $K_0 \approx 2.1$ である。

以上の電気比装荷 A 、最大電流密度 J_{max} 、最小導体質量 $G_{c,\text{min}}$ を考慮しつつ、スロット当りの導体量などの詳細設計を行う。ここで、これまでの調査結果より、性能と電機子重量のバランスを勘案すると磁極ピッチは $\tau=0.2\text{m}$ 程度が相応しいと考えられる。また、 $\tau=0.2\text{m}$ 程度の場合、速度 $v=160\text{km/h}$ など想定される滑り周波数が十分に大きい領域においては等価二次回路の力率は $\cos\phi_{2c} \approx -0.4$ 程度であること、同領域にて電機子の起磁力を高く設定してもギャップ磁束密度は $B_{\text{max}} \approx 0.8\text{T}$ 程度で飽和傾向を示すことなどが判明している。また、許容温度上昇については $\Delta\theta_{\text{max}}=125\text{K}$ とする⁵⁾。これらを上述の設計パラメータに用いることで基本設計値として、電気比装荷 $A=3000\text{A/cm}$ 、磁気比装荷 $B=0.8\text{T}$ 、最小導体質量 $G_{c,\text{min}}=84\text{kg}$ が得られる。

ここで、電気比装荷 $A=3000\text{A/cm}$ は磁気比装荷 $B=0.8\text{T}$ を達成するのに概ね適当な値であることを電磁界解析などによって確認しており、磁気回路の面からもこの装荷設計は妥当であることが分かる。

ここで、実際の設計に際して考慮すべき点を述べる。

リニアモータ型レールブレーキのように滑り周波数が大きな領域を動作点とする場合、電機子の鉄芯量（許容される磁気装荷の上限）を大きく設定しても、高速走行時にはレールの渦電流や表皮効果などの影響で、電気装荷増分に対して磁気装荷増分が飽和傾向を示す。実用化へ向けて小型・軽量化を図るにはこの特徴に着目して、磁気装荷を予め低めの適正值とし、電気装荷を相応値に設定することが有効な手段である。但し、鉄芯量の削減は電機子側の磁気飽和を早めるため、大きな励磁磁束と小さな二次電流とでブレーキ力を発生させている低速走行時の性能を低下させることになる。つまり、鉄芯量の削減による小型・軽量化は低速域の性能とトレードオフ関係にある。このイメージを表したものを図3に示す。

元来、低速域は粘着によるブレーキが有効であることを思慮すると、リニアモータ型レールブレーキは低速域の性能低下を許容しつつ、高速域の性能が確保された小型・軽量化を図るべきであると考えられる。これらを勘案した上で、文献²⁾の軌条輪試験結果などを参考にすると、前述の基本設計値について電気装荷を増大、磁気装荷を減少させ、電気比装荷 $3500 \sim 4000\text{A/cm}$ 程度、磁気比装荷 $0.7 \sim 0.8\text{T}$ 程度として鉄芯量をこれに適う最小値に採るのが妥当な設計と考えられる。

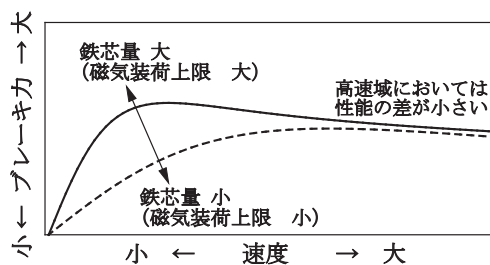


図3 鉄芯量と速度特性の関係（イメージ図）

3.3 励磁システムの制御

励磁システムが担う零出力発電制動はブレーキ力と直流電圧を整定する制御を行う。リニアモータ型レールブレーキが動作点とする滑り周波数は、一般的な誘導機の変速制御に使用されるベクトル制御や滑り周波数制御などが対象とする滑り周波数と大きく異なる。そこで、リニアモータ型レールブレーキの誘導機としての特徴を活用し、出力電流 I のみをブレーキ力指令のパラメータと見なし、それと別個に周波数 f_1 で発電電力を制御することで直流電圧を整定するという単純な基本制御則（図4）を提示し、その有用性を実証した⁴⁾。

本図において、電流指令 I^* の入力部にパターン発生部 $P(I^*)$ を設けている。これにより起動の瞬間に補助回路から励磁システムに流入する初期励磁電力 P_{in} を制限している。その原理は起動時に電機子の一次電流が通電されながらも、二次電流及び二次磁束が立ち上がっていない過渡状態を管理するものである。具体的には、ランプ

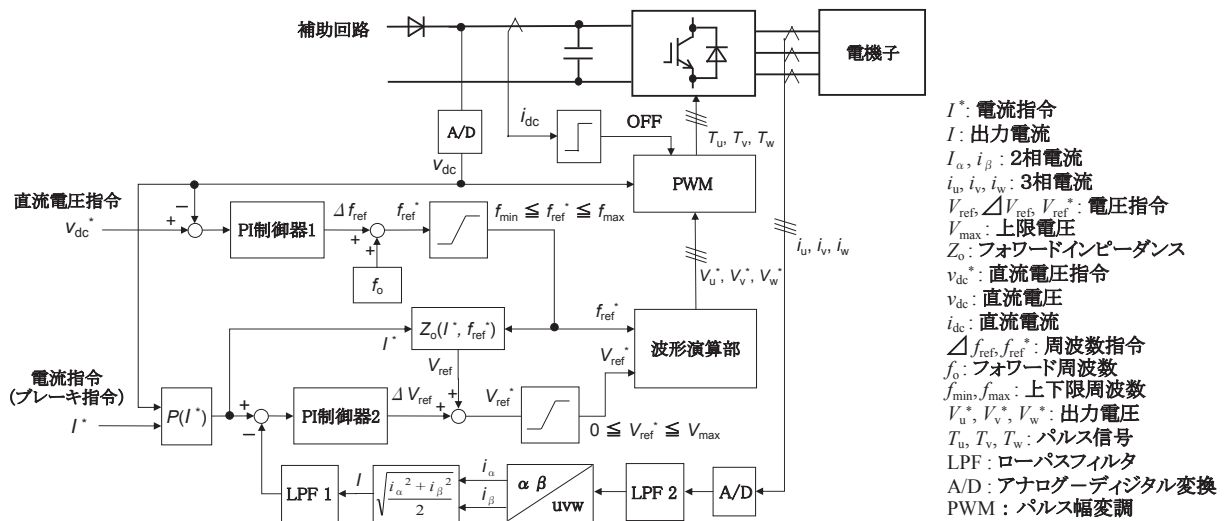


図4 基本制御ブロック図

関数的に増加する電流指令を過去1秒間程度の電流指令 I^* に加算することで起動用電流指令 I_{up}^* を生成する。この時、この起動用電流指令 I_{up}^* の時間変化率により初期励磁電力 P_{in} が概ね決定されるので、これが許容最大値となるように調整する。次に直流電圧 v_{dc} を参照して、補助回路電圧 v_{dc_aux} ($= 100 \text{ V}$) との差分電圧 $v_{dc} - v_{dc_aux}$ にて充電されている平滑コンデンサの蓄積エネルギーのみで時間 Δt だけ通電可能な電流指令最大値 I_{max}^* を算出する。

$$\frac{1}{2}c(v_{dc}^2 - v_{dc_aux}^2) = 3r_1 I_{max}^{*2} \Delta t \quad (11)$$

$$I_{max}^* = \sqrt{\frac{c(v_{dc}^2 - v_{dc_aux}^2)}{6r_1 \Delta t}} \quad (12)$$

ここで、 c は平滑コンデンサ容量、 r_1 は電機子抵抗である。この電流指令最大値 I_{max}^* はリニアモータ型レールブレイキの二次磁束の状態に係わらず、補助回路から電力供給を受けずに平滑コンデンサの蓄積エネルギーだけで通電可能な電流値とするものである。時間 Δt については実用上は電流指令最大値 I_{max}^* を定める係数のように扱われる。以上の演算の後、元来の電流指令 I^* を超えない範囲において、前述の起動用電流指令 I_{up}^* と電流指令最大値 I_{max}^* の大きな方を初期励磁電力の管理を経た電流指令 I^* として出力する。

$$P(I^*) = \min[I^*, \max(I_{up}^*, I_{max}^*)] \quad (13)$$

直流電圧 v_{dc} が十分に上昇した後は、電流指令最大値 I_{max}^* が起動用電流指令 I_{up}^* よりも大きくなるので元来の電流指令 I^* がそのまま出力されることになる。

一方、起動時においては直流電圧 v_{dc} が低圧であるため、出力電圧が最大変調率に制限され、直流電圧が上昇

しないと電流指令 I^* を通電するために必要十分な交流電圧を出力することができない。出力電流 I の起動応答を向上させるには、直流電圧 v_{dc} の起動応答との相互関係を考慮する必要があり、その為の適切な周波数 f_{ref}^* を選択しなければならない。ここで、起動途中のインバータの最大出力電圧 V_{max} が平滑コンデンサの充電電圧 v_{dc} で決まることに着目し、出力電流 I を次式で表現するものとする。

$$I = \frac{V_{max}}{Z_{in}} \quad (14)$$

$$V_{max} = k_m v_{dc} = k_m \left(v_{dco} + \sqrt{\frac{6}{c} \int |r_{in} + r_{INV}| I^2 \cdot dt} \right) \quad (15)$$

Z_{in} はリニアモータ型レールブレイキのインピーダンス、 r_{in} は同抵抗成分、 k_m は直流電圧と最大交流電圧の関係を表す係数、 v_{dco} は初期充電電圧、 r_{INV} はインバータの等価内部抵抗を表す。これらより次式を得る。

$$\frac{dI}{dt} = \frac{3k_m^2}{c} \cdot \frac{|r_{in} + r_{INV}|}{Z_{in}^2} \cdot I \quad (16)$$

ここで、 $|r_{in} + r_{INV}| / Z_{in}^2$ は周波数の関数である。この $|r_{in} + r_{INV}| / Z_{in}^2$ が最大となる周波数を動作点とするように調整すると出力電流の立ち上がりが最も速くなる。

また、実用化に向けて電機子の小型・軽量化を図ると、定格運転にて鉄芯が磁気飽和するような設計を採らざるを得なくなる。すると、その磁気飽和によって、リニアモータ型レールブレイキのインピーダンスが電流値に対して強い非線形性を示すようになる。この為、出力電流制御におけるフォワード電圧 V_{ref} を生成する為のインピーダンス Z_o は電流指令 I^* と周波数指令 f_{ref}^* を参照した非線形のフォワード電圧を生成するものとしている。

4. 構内走行試験

4.1 試験体系

4.1.1 全体概要

2種類のリニアモータ型レールブレーキのプロトタイプを製作し、試験用台車（1台）の左右にそれぞれ搭載した。この台車をR291試験電車³⁾に艤装し、構内走行試験に供した。構内試験線の速度制限（45km/h）により発電出力を得られる速度での試験が適わないため、励磁システムはSIVからAC440Vの電力を受けるものとした。

4.1.2 電機子

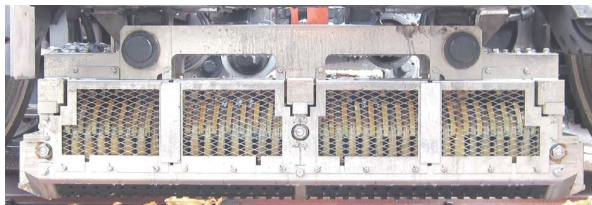
基本設計が同一で導体量と鉄芯量が若干異なる2種類の電機子を製作した。その外観を図5、主な諸元を表2に示す。Type Aは装荷配分から得られる基本設計に則った標準タイプで、Type Bは試行的に鉄芯量と導体量を削減して小型・軽量化を図ったタイプである。

支持や防護はType AとType Bで共通設計とした。鉄芯の長手方向の両端と中間の3ヶ所で支持する為にコイル配置を不等磁極ピッチとするなどの工夫を施した。支持部材は艤装後の在姿での作業性を考慮すると共に、異物衝突時にこの部材で衝撃を負担するように比較的強固なものとした。防護については、支持部材とSUS製の金網などで周囲を覆ったが、この際に鉄芯を取り囲む大きな渦電流路が形成されないように、随所に絶縁を施した。

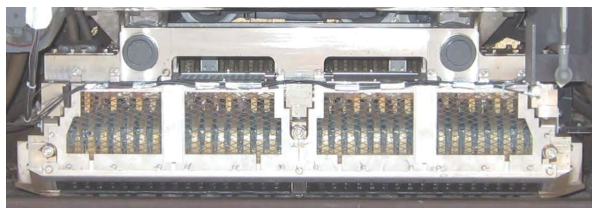
なお、極数について、磁極ピッチは0.2 m程度が相応しいとの前述の知見より6極が適すると考えられたが、今回の試験用台車において、レールとのギャップが目標値（6～7mm）よりも拡大する懸念があったため、ギャップ拡大時の性能低下がやや小さい4極を採用した。

4.1.3 台車

営業線通勤型電車の付随台車を改造し、リニアモータ型レールブレーキ試験用台車を製作した。図6にその外観を示す。電機子の取り付け方法について、実用化時の想



(a) Type A



(b) Type B

図5 プロトタイプ電機子の外観

表2 プロトタイプ電機子の諸元

項目	Type A	Type B
電圧	440 V	同左
電流	700 A	800 A
同期ワット	50 kW	同左
磁極ピッチ	252 mm	同左
鉄芯長	1107 mm	同左
鉄芯幅	89 mm	71 mm
継鉄高	62 mm	同左
コイル数	36	同左
コイル巻数	16	14
絶縁種	H	同左
質量	206 kg (コイル 120 kg, 鉄芯ほか 86 kg) 支持・防護を含めると 330 kg	164 kg (コイル 95 kg, 鉄芯ほか 69 kg) 支持・防護を含めると 280 kg



図6 リニアモータ型レールブレーキ試験用台車

定と異なり、常時、台車枠に装荷することとした。

これに伴い、軸ばねを高剛性化することによってレールとのギャップを保持するものとした。試験用台車の質量は4,590kg（車体支持装置を除く）であり、その内、リニアモータ型レールブレーキ関連の質量は610kgである。ブレーキ力は、車体との間の牽引装置（一本リンク）に取り付けた歪ゲージを用いて測定できるものとした。

R291試験電車への艤装後、確認走行を経て、電機子とレールの間のメカニカルクリアランスを調整し、Type Aは6mm、Type Bは7.5mmとした。

4.1.4 励磁システム

前述のように今回はSIV出力のAC440V補助電源を用いて励磁電力を供給するものとした。試験用として、2つのインバータで2つの電機子をそれぞれ個別に励磁する構成とした。供試インバータは定格電圧440V、出力容量514kVAであり、外部に設けた制御器から周波数指令と出力電圧指令を受けるものとした。制御器には「3.3励磁システムの制御」に示した制御則を実装している。

4.2 試験結果

4.2.1 ブレーキ性能

図7に出力電流とブレーキ力の時間波形の測定例を示す。本図は車両を試験速度まで加速した後、惰行状態とし、その間にリニアモータ型レールブレーキを励磁した時の一本リンク荷重を計測したものである。出力電流と共にブレーキ力が発生している様子が確認できる。

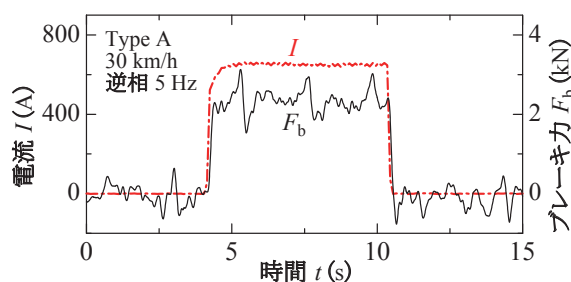


図7 ブレーキ力の測定波形

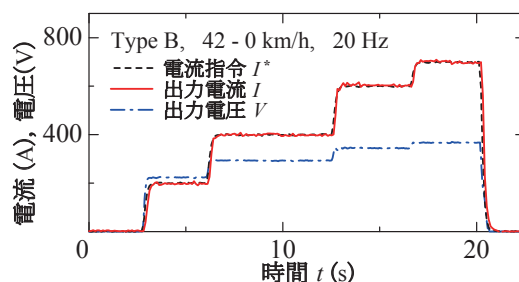


図10 試験結果（出力電流制御）

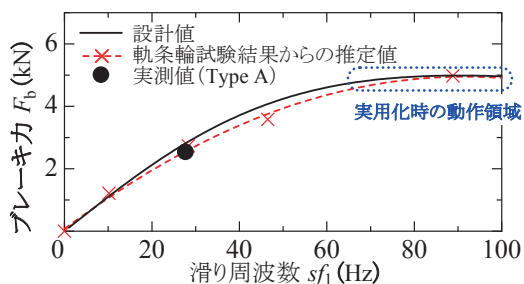


図8 試験結果（ブレーキ性能）

図8に滑り周波数に対するブレーキ力を示す。実用化時の動作領域より大幅に低い滑り周波数であるが、実測値は設計値や軌条輪試験結果^{2) 4)}からの推定曲線に概ね一致している様子が分かる。これより、実用化時に目標5kNを発生できることが確認された。

4.2.2 発電性能

図9に滑り周波数に対する発電機としての同期ワットを示す。構内走行試験では速度が低い為、発電出力を得られないが、電機子内に誘起される電力（同期ワット）によって、インバータから電機子へ供給される励磁電力が低減された状態となる。本図はその低減量を表したものである。実測値は設計値と概ね一致している様子が分かる。また、この発電性能が設計通りであることから、レール発熱の低減効果も想定通りであることが分かる。

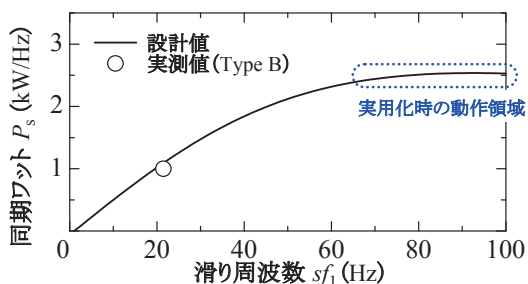


図9 試験結果（発電性能）

4.2.3 励磁制御

構内走行試験では発電出力が得られないため、励磁制御の検証に関しては出力電流の整定のみを実施した。図10に速度42km/hからの減速中に様々な電流指令を与えた時の出力電流を示す。電流値に対してインピーダンスが大きく変化（出力電圧の変化から分かる）しているにも関わらず、良好に整定されている様子が確認できる。

一方、初期励磁電力の管理を含め、電力に関する制御については、軌条輪試験や車両駆動用LIM試験装置⁷⁾による模擬実験によって、想定通りの動作を確認した。

5. まとめ

リニアモータ型レールブレーキについて、設計検討の深度化を図り、構内走行試験を通じてその性能を検証した。営業線仕様の台車を改造した試験用台車にプロトタイプを搭載し、R291試験電車に艤装して走行試験を行った。その結果、実台車への搭載方法の知見を得ると共に、ブレーキ力と発電性能が設計値とほぼ一致することを確認した。また、文献²⁾で報告したように軌条輪試験や車両駆動用LIM試験装置による模擬実験によって、補助回路を用いて停電時でも起動可能な制御方法を確立した。これらより、目標である台車あたり10kNのブレーキ力が得られること、主回路からの電力供給なしに自己発電にて動作可能なことが証明され、実車へ適用可能なことを実証した。

文献

- 1) 小原孝則, 丸岡昭, 由川透, 蔭山朝昭, 滝口敏: 在来線用非常ブレーキシステム, 鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, pp.252-256, 1991
- 2) 長谷川均, 柏木隆行, 坂本泰明, 笹川卓, 狩野泰: 軌条輪を用いたリニアモータ型レールブレーキの性能試験, 鉄道総研報告, Vol.25, No.3, pp.35-40, 2011
- 3) <http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd42/rd4220/rd42200301.html>
- 4) 坂本泰明, 柏木隆行, 長谷川均, 笹川卓, 藤井信男: 零出力発電制御を用いたリニアモータ型レールブレーキの励磁電源レス運転, 電気学会論文誌D, Vol.131, No.2, pp.219-226, 2011
- 5) 電気学会 電気規格調査会標準規格, JEC-2137
- 6) 坂本泰明, 柏木隆行, 長谷川均, 笹川卓, 藤井信男: リニア誘導モータを応用したレールブレーキの設計と実験的検証, 電気学会論文誌D, Vol.131, No.1, pp.127-134, 2011
- 7) 坂本泰明, 柏木隆行, 長谷川均: リニアモータ型レールブレーキにおける発電制御起動則の検討, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-11-056, 2011