

## リニアモータ型レールブレーキの 等価回路による特性評価

坂本 泰明\* 柏木 隆行\* 長谷川 均\*  
 笹川 卓\* 狩野 泰\*\*

### Evaluation of Characteristic of the Linear Motor Type Rail Brake Using an Electrical Equivalent Circuit

Yasuaki SAKAMOTO Takayuki KASHIWAGI Hitoshi HASEGAWA  
Takashi SASAKAWA Yasushi KARINO

One type of braking system for railway vehicles is the eddy current brake. Because this type of brake has the problem of rail heating, it has not been put to practical use in Japan. Therefore we have proposed to use a linear induction motor (LIM) for dynamic braking in the eddy current brake system. It uses an inverter for the self-excitation function and reduces rail heating. In this paper, we estimated the performance of a LIM from an electrical equivalent circuit of a fundamental test machine, and confirmed that the LIM under constant current excitation has an approximately constant braking force regardless of frequency for relatively low frequencies, and the generated power is approximately proportional to the frequency.

キーワード：レールブレーキ，リニア誘導モータ，等価回路

### 1. はじめに

車輪とレールの間の摩擦力に依らないブレーキとして渦電流型レールブレーキがあり、特に欧州の鉄道車両において広く実用化されている。その中でもレールと完全に非接触で動作するタイプがドイツの高速鉄道車両ICEにて用いられており、高速走行時の制動力確保に大きな役割を果たしている。日本国内でも過去に非接触タイプのレールブレーキ<sup>1)</sup>の開発が取り組まれていたが、レールの発熱が軌道の座屈安定性に影響を与える可能性があること、比較的大きな励磁電力を確保する必要があることなどが検討項目とされた。その後、開発の主流はそれらの問題が軽減されるレール接触タイプ<sup>2)</sup>に移行していったが、この接触タイプもレールに接触するという原理上の理由より、本格的な実用化に至ることはなかった。

鉄道総研では平成17年度より「鉄道の将来に向けた研究開発」テーマの下、再び非接触タイプのレールブレーキに着目し、これにリニアモータ技術を応用することで過去の課題の解決を図るべく、研究開発を行っている<sup>3)</sup>。ここで、「リニアモータ技術の応用」の主旨は、かつては主として直流励磁が検討されていたレールブレーキに交流励磁及びリニアモータの設計技術を適用すること、また、リニアモータ化することで電気エネルギーと機械エネ

ルギ（車両の運動エネルギー）の融通を図ることなどに集約される。過去に課題となったレール発熱と励磁電力は何れもエネルギーの問題に帰着するため、特に電気、機械エネルギーの融通化によるメリットに期待するものである。

本稿ではリニアモータ技術を応用したレールブレーキ（以降、リニアモータ型レールブレーキと呼称）の電気機械としての特性について、電氣的等価回路を用いて評価する。そして、その特徴を踏まえて励磁電源を含めたリニアモータ型レールブレーキのシステム構成を例示し、そのコンセプトを説明する。

### 2. リニアモータ型レールブレーキの概要

#### 2.1 構成

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励磁極をリニア誘導モータの電機子と置き換えた構成をなす。図1にリニアモータ型レールブレーキのイメージを示す。レールブレーキ本体は車輪間の限られた空間に設置されるため、在来線仕様では電機子鉄心長は1.2m程度と想定される。これに対し、在来線の幹線区間で使用されているレール頭部の幅は65mmであり、リニア誘導モータとしては非常に幅狭な構造となっている。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（モータ、発電機）としての性能を低下させる要因が多い。

\* 浮上式鉄道技術研究部（電磁力応用）

\*\* 車両制御技術研究部（ブレーキ制御）

特集：浮上式鉄道技術とその応用

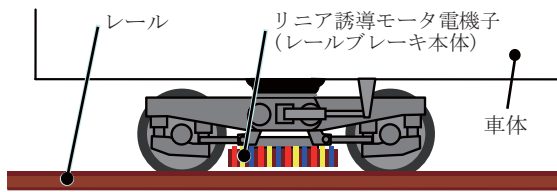


図1 リニアモータ型レールブレーキ

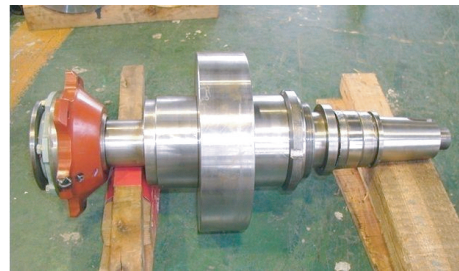
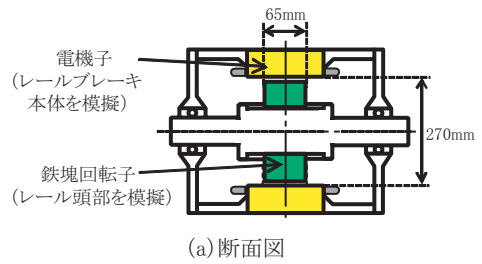
2.2 基本動作

VVVFインバータを用いて発電制動を行い、従来のレールブレーキの二次銅損に起因するレール発熱を低減させる。但し、エネルギーの有効利用を主目的とするものではないため、電気機械としての発電効率は重視せず、制動力とレール発熱低減効果を評価する。ここで、レール発熱低減効果を表す指標として「制動時に減少させる運動エネルギー」に対する「レール発熱以外に変換されるエネルギー」の割合をレール発熱低減率  $\eta_r$  と定義する。同等の制動力を発生する従来のレールブレーキと比べて、どの程度、レール発熱を低減できるかを表している。過去のレールブレーキの検討結果などから単機当りの制動力5kN以上、レール発熱低減率15～40%程度をリニアモータ型の開発目標の目安としている。

3. 電氣的等価回路を用いた特性評価

3.1 回転型基礎試験機

リニアモータ型レールブレーキでは鉄塊レールにおける非線形磁気特性や表皮効果、また、リニア誘導モータに特有な端効果（モータが進行方向に有限長であることの影響）や縁効果（モータやレールが幅方向に有限長であることの影響）などが複雑に影響し、その厳密な特性評価は容易ではない。そこで、文献4)より在来線の速度域(160km/h以下)では縁効果の評価が重要であることが読み取れることから、二次側が幅狭な鉄塊レールであるリニア誘導モータの特徴に絞った実験的調査を実施することとし、一般的ななご型誘導電動機回転子を幅狭な鉄塊と入れ替えた回転型試験機を製作した。端効果については電磁界解析で別途評価を行う。図2に回転型試験機の断面モデル及びその外観、表1に回転型試験機の主な諸元を示す。回転子幅65mmはレール頭部を模擬したものである。これに対して電機子の磁極ピッチは212mmであり、概ね6極機のリニアモータ型レールブレーキの磁極ピッチとモータ幅の関係を再現している。この回転型試験機を電気規格調査会標準規格JEC-2137の温度試験法における直結試験法と同様な構成の試験装置に組み込み、駆動用モータを用いて任意の回転速度と任意の負荷条件にて試験できるようにした。



(b)レール頭部を模擬した鉄塊回転子

図2 回転型基礎試験機

表1 回転型基礎試験機の主要諸元

極数	4
電機子内径	270 mm
ギャップ	5.0 mm
回転子幅	65 mm
回転子材質	SS400

※ 電機子は255kW 誘導電動機と同等

3.2 回転型基礎試験機の電氣的等価回路

回転型試験機の一次側に起因する特性を排除し、二次側が幅狭鉄塊レールであるモータの本質的な特徴を評価する目的で等価回路を求める。本稿では漏れリアクタンス成分を一次側と分離して評価する主旨から図3に示すT型等価回路を用いる。尚、本図に記した抵抗  $r_m$  についてはT型等価回路における二次銅損で表現できない漂遊負荷損や鉄損などを纏めて表すものとした。

ここで、本試験機のように二次側が鉄塊である場合、表皮効果の影響が大きいことが予想される。そこで、試験方法はJEC-2137の拘束試験法のように定格周波数に対して唯一の等価回路定数を求めるのではなく、各周波数、各滑りにおける等価回路定数を直接求めてデータ化し、近似回帰式で表現することとした。

具体的な試験方法は、評価する周波数  $f$  (角周波数  $\omega$ ) において駆動用モータを併用して同期運転試験を行い、

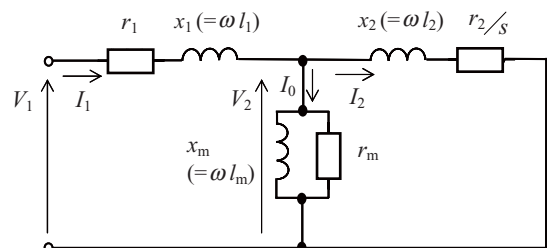


図3 T型等価回路（一相当り）

試験機の相電圧  $V_1$ 、電流  $I_1$ 、力率  $\cos\phi$  を測定する。一次抵抗  $r_1$ 、一次漏れリアクタンス  $x_1$  のとき、励磁回路のインピーダンス  $Z_m$  は次式で求められる。

$$Z_m = Z_1 - Z_a \quad (1)$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} \left( \cos\phi + j\sqrt{1 - \cos^2\phi} \right) \quad (2)$$

$$Z_a = r_1 + jx_1 \quad (3)$$

このときの抵抗  $r_m$ 、励磁リアクタンス  $x_m$ 、二次電圧  $V_2$  は次式で得られる。

$$r_m = \operatorname{Re}^{-1} \left[ \frac{1}{Z_m} \right] \quad (4)$$

$$x_m = \operatorname{Im}^{-1} \left[ \frac{1}{Z_m} \right] \quad (5)$$

$$V_2 = V_1 \cdot \left( \cos\phi + j\sqrt{1 - \cos^2\phi} \right) - Z_a I_1 \quad (6)$$

ここで  $\operatorname{Re}^{-1}$ 、 $\operatorname{Im}^{-1}$  はそれぞれ実部の逆数、虚部の逆数を表す。次に上記で扱った各周波数に対する滑り  $s$  の負荷運転を行い、(6)式を用いてこのときの  $V_2$  を求め、(4)式と(5)式で既に求めた各周波数に対応する抵抗  $r_m$  と励磁リアクタンス  $x_m$  を用いて、二次電流  $I_2$  を求める。

$$I_2 = I_1 - \frac{V_2}{Z_m} = I_1 - \frac{x_m - jr_m}{r_m x_m} V_2 \quad (7)$$

二次抵抗  $r_2/s$  と二次漏れリアクタンス  $x_2$  は次式で得られる。

$$\frac{r_2}{s} = \operatorname{Re} \left[ \frac{V_2}{I_2} \right] \quad (8)$$

$$x_2 = \operatorname{Im} \left[ \frac{V_2}{I_2} \right] \quad (9)$$

以上の処理を様々な滑り  $s$  と周波数  $f$  の組合せについて行うことで得られた等価回路定数（抵抗  $r_m$ 、励磁インダクタンス  $l_m (=x_m/\omega)$ 、二次抵抗  $r_2$ 、二次漏れインダクタンス  $l_2 (=x_2/\omega)$ ）を図4に示す。本図より表皮効果の影響を強く受けている様子が確認できる。また、これらの等価回路定数データについて最小自乗法を用いて回帰近似式を求めると次式を得る。

$$r_m = -9.30 + 6.90 \times \log(f) \quad (\Omega) \quad (10)$$

$$l_m = 6.47 \quad (\text{mH}) \quad (11)$$

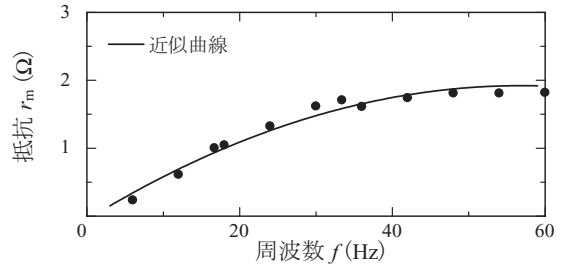
$$r_2 = 0.566 + 0.0108 \times sf \quad (\Omega) \quad (12)$$

$$l_2 = 22.6 \times (sf)^{-0.491} \quad (\text{mH}) \quad (13)$$

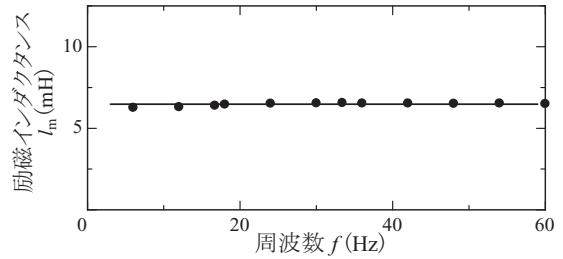
(10)～(13)式の回帰式を用いることで、励磁インピーダンス  $Z_m$ 、二次インピーダンス  $Z_2$ 、等価二次インピーダンス  $Z_{2e}$  は再帰的に次式のように表現される。

$$Z_m = \frac{j\omega r_m l_m}{r_m + j\omega l_m} \quad (14)$$

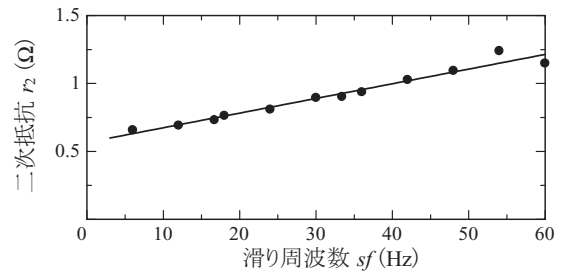
$$Z_2 = \frac{r_2}{s} + j\omega l_2 \quad (15)$$



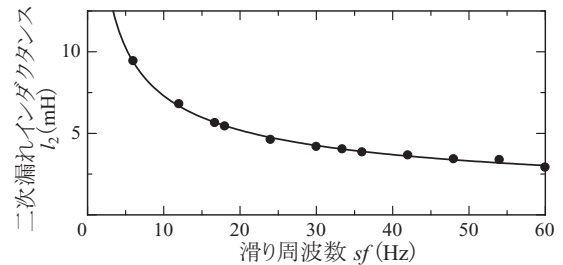
(a) 抵抗  $r_m$



(b) 励磁インダクタンス



(c) 二次抵抗



(d) 二次漏れインダクタンス

図4 回転型基礎試験機の等価回路定数

$$Z_{2e} = \frac{Z_m \cdot Z_2}{Z_m + Z_2} \quad (16)$$

### 3.3 リニアモータ型レールブレーキの特性評価

前節の回転型試験機を仮想的に切り開き直線状としたリニアモータ型レールブレーキを想定する。電機子周長 0.848m の回転型試験機と全長 1.2m のリニアモータ型レールブレーキとはギャップ面積が異なるため、その差分だけ電機子が直列接続的に展開されるものと仮定する。回転型試験機の等価回路インピーダンスを表した(14)～(16)式にギャップ面積比  $k$  を乗じることでリニアモータ型レールブレーキの励磁インピーダンス  $Z'_m$ 、二次インピーダンス  $Z'_2$ 、等価二次インピーダンス  $Z'_{2e}$  を得る。

$$Z'_m = kZ_m \quad (17)$$

特集：浮上式鉄道技術とその応用

$$Z'_2 = kZ_2 \quad (18)$$

$$Z'_{2e} = kZ_{2e} \quad (19)$$

ここでは端効果を見せず、 $k$  を面積比で一義的に決定される実数スカラーとしたが、実際には端効果の影響によって  $k$  に相当する係数が複素ベクトルとなり、その値は面積比のほかにも速度や周波数にも依存した複雑なものとなる。別途行った電磁解析の結果より、滑り周波数  $sf$  が大きな領域では単純な面積比の実数スカラーとした場合と比べて、概してインピーダンスの実数部が1割程度だけ減少すること、また、その減少度合いの速度や周波数に対する依存性は比較的低いことなどが判明している。

ここで、(17)～(19)式のインピーダンスよりリニアモータ型レールブレーキの制動力  $F_x$ 、レール発熱低減率  $\eta_r$ 、等価二次回路の力率  $\cos\phi_2$ 、発電出力  $P_{out}$ 、等価二次回路の皮相電力  $P_{a2}$  はそれぞれ次式のように計算される。

$$F_x = \frac{3 \cdot (1-s) k r_2 I_1^2}{sv} \cdot \left| \frac{Z'_{2e}}{Z'_2} \right|^2 \quad (20)$$

$$\eta_r = \frac{s}{(1-s)} \cdot \frac{\text{Re}[Z'_{2e}]}{r_2} \cdot \left| \frac{Z'_2}{Z'_{2e}} \right|^2 \quad (21)$$

$$\cos\phi_2 = \left| \frac{\text{Re}[Z'_{2e}]}{Z'_{2e}} \right| \quad (22)$$

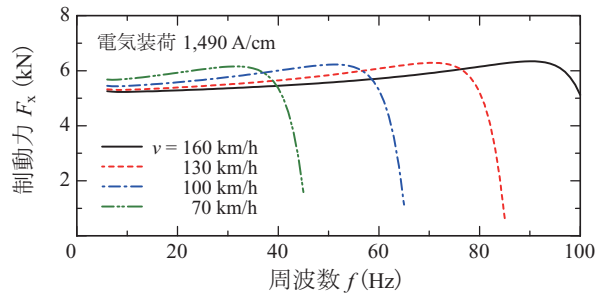
$$P_{out} = -3I_1^2 (k r_1 + \text{Re}[Z'_{2e}]) \quad (23)$$

$$P_{a2} = 3 \cdot |Z'_{2e}| I_1^2 \quad (24)$$

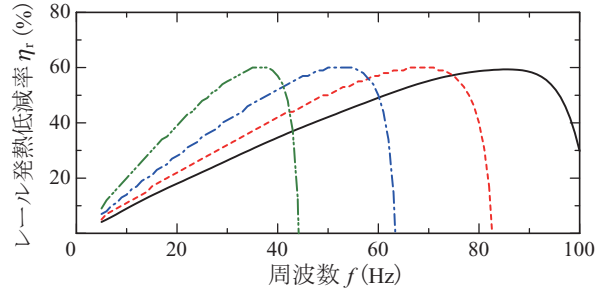
尚、 $v$  は速度である。

図5に(20)～(24)式より計算されるリニアモータ型レールブレーキの周波数特性を示す。速度をパラメータとして、制動力5kN強を発生する一定の電気装荷を与えた場合の周波数に対する特性を表している。前述のように端効果は無視しているが、鉄塊レールにおける非線形磁気特性や表皮効果、縁効果は考慮されている。

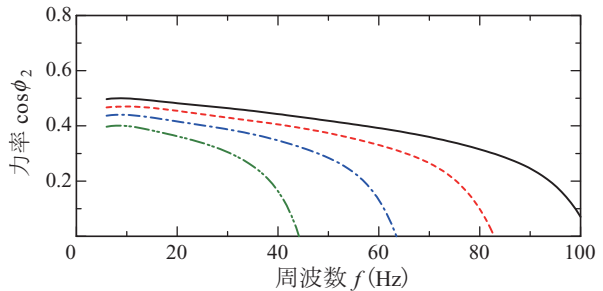
同図より制動力  $F_x$  は各速度における同期周波数に近づくると急激に低下するものの、それ以外の領域では速度や周波数にあまり依存せずに概ね一定の値を示している様子が分かる。また、レール発熱低減率  $\eta_r$  の最大値は約60%である。各速度における同期周波数に近づくると急激に低下するものの、それ以外の領域では直線的に変化している。等価二次回路の力率  $\cos\phi_2$  は比較的低い値を示しており、その値は最大でも0.4～0.5程度である。また、発電出力  $P_{out}$  は低い周波数の領域においては速度に依存せず周波数で一義的に決まる一次関数のように振舞っており、特徴的な特性を示している。等価二次回路の皮相電力  $P_{a2}$  は周波数の増加と共に増大し、各速度における同期周波数に近づくるとその値は非常に大きなものとなる。例えば時速100km/hでは同期周波数(65.5Hz)における皮相電力は約700kVAである。レール発熱低減率  $\eta_r$  のピーク



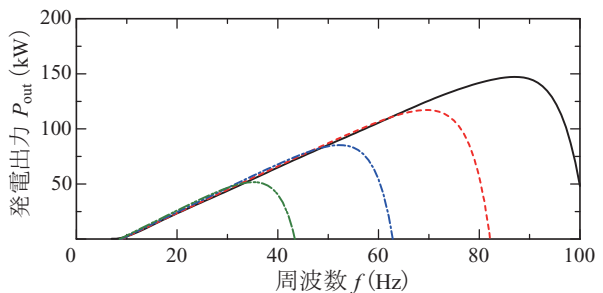
(a) 制動力



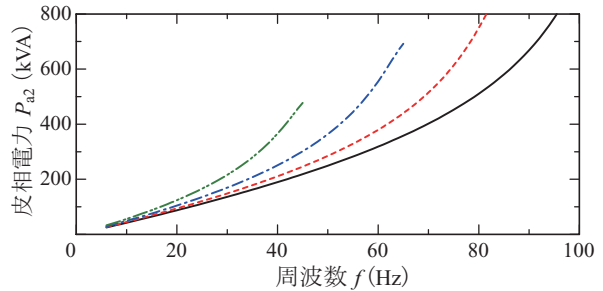
(b) レール発熱低減率



(c) 等価二次回路の力率



(d) 発電出力



(e) 等価二次回路の皮相電力

図5 リニアモータ型レールブレーキの周波数特性

は同期周波数に近い周波数にあるため、レール発熱低減率を高くするためには大きな皮相電力を必要とすることが分

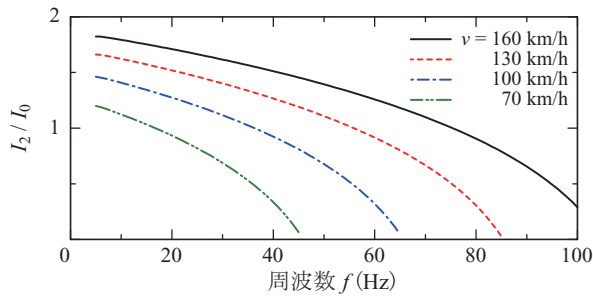


図6 励磁電流に対する二次電流の比率

かる。一方で周波数が低い領域に着目すると皮相電力は比較的小さく、実装に適う規模となる。例えば発電出力が零となる周波数(約9Hz)では皮相電力は約50kVAである。

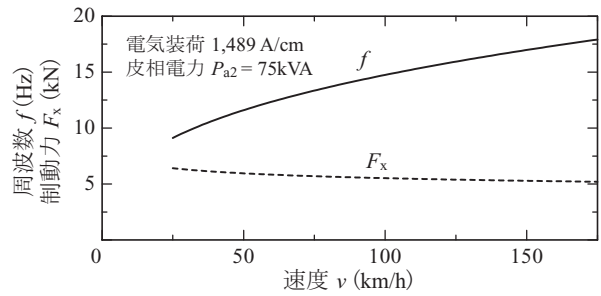
ここで、励磁電流  $I_0$  に対する二次電流  $I_2$  の比率を図6に示す。図5(c)に示されるように力率が低い理由には、励磁インピーダンスに対して二次インピーダンスが比較的大きいことが挙げられる。図6において二次インピーダンスが小さくなる周波数の低い領域においても励磁電流に対する二次電流の比率は1~2程度であり、一般的な誘導機と比べると非常に小さい様子が分かる。

次にリニアモータ型レールブレーキを駆動するインバータの容量や出力の制限を考慮した検討例を示す。図7に電気装荷を一定として等価二次回路の皮相電力  $P_{a2}$  を75kVAに保った場合の速度特性、図8に発電出力  $P_{out}$  を11kWに保った場合の速度特性を示す。尚、図5(d)に示されるように、或る速度において所定の発電出力を得る周波数は周波数の低い領域と高い領域の2箇所に存在するが、ここでは容量低減のために低い周波数を選択している。図7、図8の何れにおいても制動力  $F_x$  はほぼ一定の値を示しており、レール発熱低減率も共に速度に対して反比例的な曲線を示している。一方、容量を一定とした図7においては周波数が大きく変化しているが、発電出力を一定とした図8では周波数はほぼ一定となっている。これらの図より、容量や出力の制限を考慮した運転においては、比較的低い周波数領域にて周波数で皮相電力や出力を制御し、一方、制動力は電気装荷、即ち電流大きさに係わる電圧のみで制御することが基本制御則として考えられる。特に一定の電力を発電する場合には、速度に対して周波数をほぼ一定に保てばよいことも分かる。

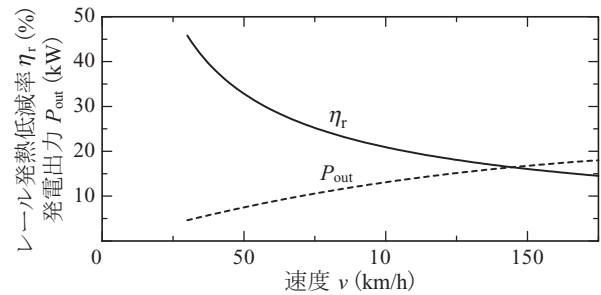
#### 4. 特徴を踏まえたシステムの提案

前章までに述べたリニアモータ型レールブレーキの電気機械としての特徴を以下に要約する。

- (1) 制動力の大きさは基本的には電気装荷のみに依存し、容量との直接の関係は低い。
- (2) レール発熱低減率を高く設定すると大きな容量のインバータが必要となる。

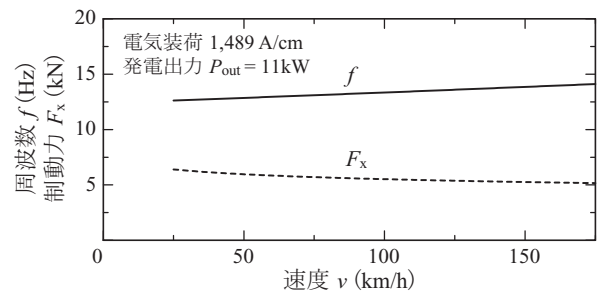


(a) 制動力と周波数

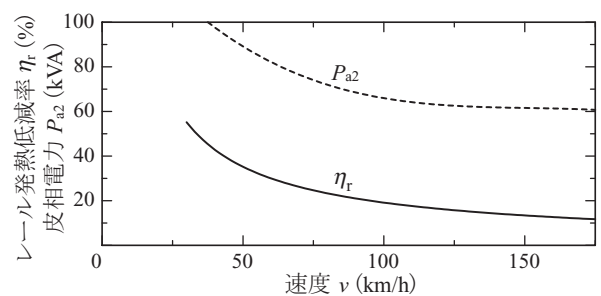


(b) レール発熱低減率と発電出力

図7 リニアモータ型レールブレーキの速度特性  
(インバータ容量上限での運転を想定した場合)



(a) 制動力と周波数



(b) レール発熱低減率と発電出力

図8 リニアモータ型レールブレーキの速度特性  
(一定の発電出力での運転を想定した場合)

- (3) 発電出力を抑えればインバータ容量は大幅に低減できる。但し、レール発熱低減率は高く設定し難い。

これらの特徴を踏まえて、本稿では発電電力と電機子銅損を平衡させて「零出力」の発電制動を行うようなシステムを提案する。図5における周波数9Hz付近に相当する動作点を利用するものである。

図9に機器構成を示す。主回路系から完全に分離し、制

特集：浮上式鉄道技術とその応用

御電源や初期励磁のみに補助回路を利用する。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、インバータは低圧から起動した後に発電電力を利用して直流電圧を上昇させる。所定の直流電圧に到達後は制動力を保ちつつ、発電電力と電機子銅損が平衡するような電力制御を併用し、インバータの定常動作に必要な直流電圧を維持し続ける。この制御は図8に示した運転方法を応用することで実現できる。この方法によればインバータ容量は最小化され、コンパクトなシステムとなる。また、インバータの動作電源や発電電力の処理方法が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が波及せず、ブレーキシステムとしての信頼性を損なうことがない。非粘着性を含め、既存の機械ブレーキや主電動機の電気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2)。

ここで、提案するシステムにおける電圧・電流ベクトルのイメージ図を図10、基本的なエネルギーフローを図11に示す。図10における各記号の意味は図3と同様である。図10に示すように発電電力と電機子銅損を平衡させると相電圧  $V_1$  と電流  $I_1$  が直交する。即ち入力端から見た力率を零とすることがこの制御の基本となる。また、このときインバータはレールブレーキに励磁に必要な無効電力のみを供給する役割を担い、それに伴って車両の運動エネルギーから生まれた有効電力がレールとレールブレーキ本体とで分散消費される(図11)。レールブレーキ電機子は比較的大きな起磁力を要するため、敢えて電気装荷を過剰に設定することで制動力の向上並びにレール発熱低減率の向上の両面において好都合となる。つまり、電機子を制動抵抗器として兼用しながら、同時に起磁力増加を図るものである。

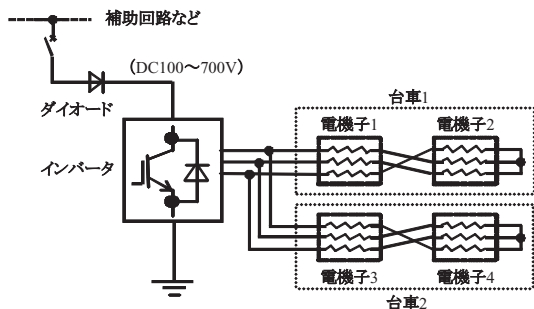


図9 電源システムの構成例

表2 ブレーキシステムの比較

	機械ブレーキ	電気ブレーキ	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	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

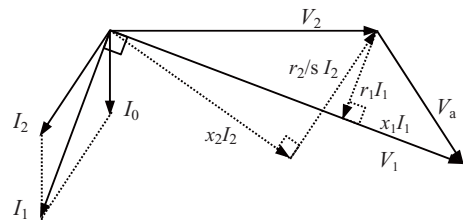


図10 電圧・電流ベクトル図

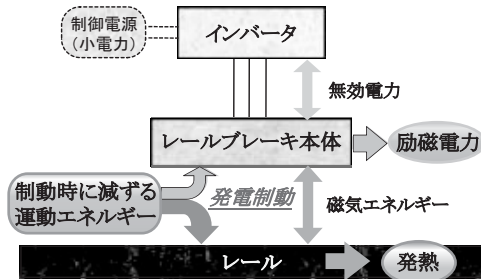


図11 エネルギーフロー図

5. 結論

基礎試験機の実験結果よりリニアモータ型レールブレーキの電気的等価回路を推定し、それを用いて各種特性を示した。その結果、制動力と電気的性能について周波数特性や速度特性が明らかとなった。一方、レール発熱低減率とインバータ容量のトレードオフ関係も示された。そこで、容量の最小化とブレーキシステムとしての信頼性を重視した電源システム及びその運転方法を提案し、その基本的な制御則を示した。今回は一般的な誘導機の電機子を検討モデルとしており、端効果も無視していることから、電気機械として好条件な状態での評価に留まっているが、リニアモータ型レールブレーキの実用化に向けた開発方向性は明確化された。

尚、現在は本稿で示したシステムコンセプトに則したリニアモータ電機子(レールブレーキ本体)の開発に取り組んでいる。今後とも関係各所のご理解とご支援をお願いする次第である。

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) 松村省吾, 内田清五, 熊谷則道, 小原孝則: 新幹線用レールブレーキの基本特性, 鉄道総研報告, Vol. 12, No. 1, pp. 11-16, 1998
- 3) 柏木隆行, 坂本泰明, 笹川卓, 田中実, 狩野泰: リニア技術を活用した交流励磁レールブレーキの基礎特性, 鉄道総研報告, Vol. 22, No. 11, pp. 29-34, 2008
- 4) M. Hofmann, T. Werle, R. Pfeiffer, and A. Binder: "2D and 3D numerical field computation of eddy-current brakes for traction," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 4, pp. 1758-1763, 2000.