

二列固定子と二層導体可動子を有する磁気誘導 2 相リニアモータの巻線方法

高安勇吉, 吉澤壽夫, 飴井賢治,
山崎登志成, 作井正昭

Two-Phase Induction Linear Motor Furnished with Double File Stator and Bilayer Liner
Yukichi Takayasu, Toshio Yoshizawa, Toshinari Yamazaki, Kenji Amei, Masaaki Sakui

A repulsive magnetic levitation induction linear motor that adopts a two-phase open core has been fabricated. A double file stator and a bilayer liner were adopted to obtain guidance force. The energy balance of the two phases was investigated for two types of winding connections. It was found that the power consumptions of the two phases were nearly equal to each other in one of the windings while they were much different from each other in the other connection. This result was discussed by use of an equivalent circuit. Furthermore, the increase in the frequency, which leads to a high impedance of the exciting circuit, caused large levitation force and high levitation efficiency.

Keywords: double file stator, bilayer liner, open core, force, guidance force, propulsive force, levitation force

1. 序 論

磁気浮上型誘導リニアモータは, 超高速列車の駆動用の他, 最近ではクリーンルームにおける物品の搬送や OA・FA 機器での利用が計られてきている [1-3]. その浮上方式には吸引型と反発型の 2 種類がある. 前者は鉄心にコイルを巻いた可動子を用いるため浮上のための制御装置が複雑であるが効率が良い. 後者は渦電流を利用した可動子を用いることにより可動子の軽量化を計ることができるが, 励磁回路が短絡状態にあることから損失が大きく, リニアモータには不相当とされてきた. とはいえ, 反発型の研究も若干ながら行われてきた. 例えば, 川田等は 3 相オープンコアを用いた反発型磁気浮上システムを検討した [4]. 彼等は, 3 相を印加した固定子に単相を重ねて印加することによって大きな浮揚力を得た. He 等は同じく 3 相オープンコア型の反発型磁気浮上システムの静的力学安定性について報告した [5]. Kim 等はオープンコアを用いた単相の反発型磁気浮上システムにおいて, 磁束の漏れを小さくするためにアルミ製の固定子に鉄板を張り付けることを検討した [6].

本研究では, 2 相オープンコアを用いた反発型磁気浮上誘導リニアモータを検討した. クロードコアを用いた吸引型に関しては, 小西と平根の報告がある [3]. 彼らは 2 相では 3 相に比べてリニアモータの

駆動電源が簡単になるとしている. 最近のエレクトロニクス技術を用いると周波数を容易に高い値に変換できる. 従って, 励磁回路のインピーダンスを大きくすることができ, 電源電圧を高くすることができる. このことは, よりいっそうの大きな浮揚力, 推進力およびガイド力を得ることにつながる. そこで, 筆者等は 2 相オープンコア型の反発型磁気浮上システムを製作した. 固定子の巻線接続方法を検討し, 異なる三つの周波数 60, 120 および 360Hz で浮揚力を測定したのでその結果を報告する.

2. 実験方法

2. 1 2 相リニアモータの構造

筆者等が製作した 2 相リニアモータの構造を図 1 に示す. 固定子は鉄心とコイルからなる. ガイド力を得るために U 字鉄心を 2 列に配列する. 隣り合う 2 つの U 字鉄心が 1 つの極を作る. 8 極×2 列を 1 ブロックとし, これをさらに多数連結する. 固定子はオープンコア構造となっており, その上にアルミ板の可動子を走らせる. 図に示す可動子は幅の異なる二枚のアルミ板からなる. これは, 彼等が安定な浮揚を得るために考案した可動子で, ここでは 2 層導体可動子と呼ぶことにする.

2. 2 巻線接続

筆者等は, まず, 固定子の巻線接続方法を検討した. 図 1 に示された固定子の構造において, 移動磁

界を作るための巻線の接続方法には3種類の方法が考えられた。それらのうち図2に示す2種類は、2層導体可動子を用いることにより安定な浮揚が得られた。これらの接続では巻線はいずれも供給される電源の端子AとBによりA相とB相に分けられる。筆者等は両相の消費電力を測定し、そのバランスを調べた。

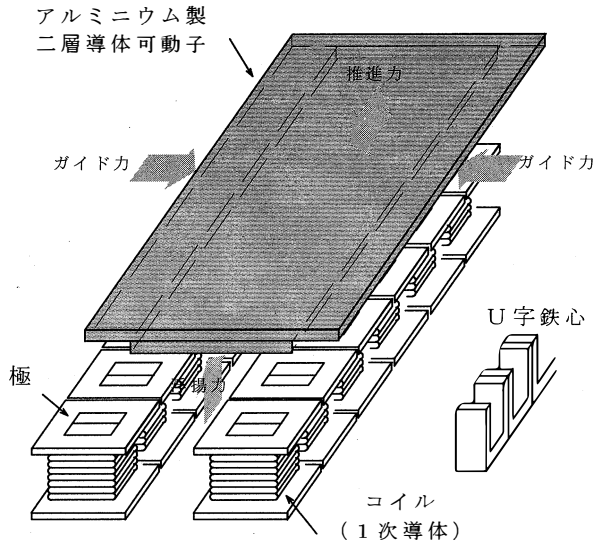
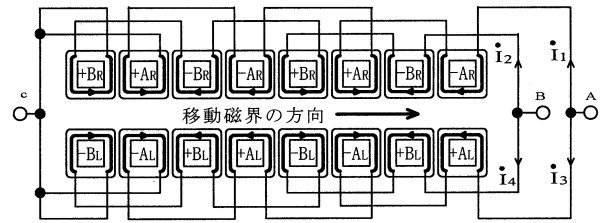


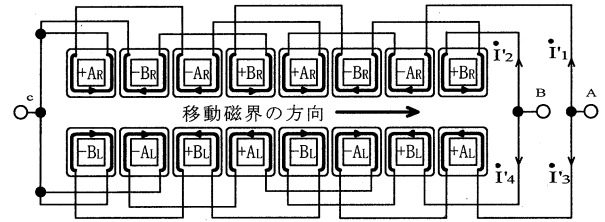
図1 磁気誘導2相リニアモータの構造

図(a)では、AとBの端子はそれぞれ上側の磁極列と下側の磁極列に並列に接続され、上下二つの磁極列のそれぞれにおいて、1つおきの磁極間の接続は直列になっている。これによって向かい合う上下の磁極の極性(図中、+-の記号で示されている)は逆になっている。言い換えると、上列の電気的位相は下列に比べて進行方向に π だけ進んでいることになる。幾何学的に言えば、磁極の状態が右方向に2ピッチ(磁極と磁極の間隔の2倍)だけずれている。この巻線接続は、後で述べるように、A相とB相の消費電力が大きく異なるので不平衡な接続と呼ぶことにする。図(b)では、磁極間の接続の直並列性は図(a)と同じであるが、上列の電気的位相は下列に比べて進行方向に $\pi/2$ だけ進んでいる。磁極の状態を幾何学的に言えば右方向に1ピッチ(極と極の間隔)分ずれている。すなわち、上列の磁極の状態は1ピッチ右にずれている。この接続は、A相とB相の消費電力がほぼ等しいので平衡な接続と呼ぶことにする。図(a)と(b)に示されたもののほかに、上列と下列の電気的位相差が0となる接続方法も考えら

れるが、ガイド力が適正に働かないため図には示さない。



(a) 不平衡な電力消費となる巻線の接続



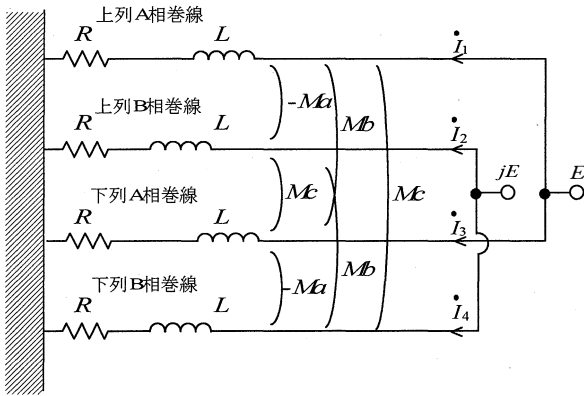
(b) 平衡な電力消費となる巻線の接続

図2 安定浮揚ができる固定子の巻線の接続

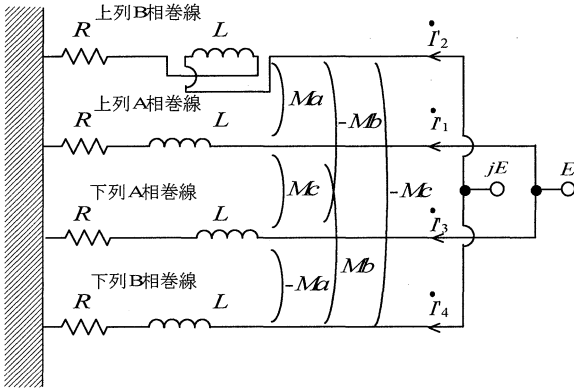
3. 解析方法

3.1 等価回路

消費電力の特性を理解するために、アルミ板を乗せない場合、すなわち無負荷時の巻線接続の等価回路を考えよう。図2示したように巻線の接続は(a)の不平衡と(b)の平衡があり、それぞれの接続は図3の(a)と(b)に示す等価回路で表される。ここで、電源の端子につながる4つの配線に1, 2, 3, 4と番号をつけ、それらに流れる電流の実効値(時間を含まない表現)を(a)では i_1, i_2, i_3, i_4 では(b)では i'_1, i'_2, i'_3, i'_4 と表すことにする。1つの配線には4つの巻線が直列に接続されている。図3の等価回路では4つの巻線を1つのコイルとして表し、その自己インダクタンスを L 、内部抵抗を R とする。また、図2の共通端子Cはアースとして扱い、コイルの相互インダクタンスは M_a, M_b, M_c で表した。 M_a は上列または下列内の巻線間の相互インダクタンスを表している。 M_b と M_c は上列と下列の巻線間の相互インダクタンスを表しているが、 M_b は上下の磁極が真向かいに位置する場合、 M_c は斜め向かいに位置する場合の相互インダクタンスである。



(a) 不平衡な電力消費となる等価回路



(b) 平衡な電力消費となる等価回路

図3 安定浮揚ができる固定子の等価回路

3. 2 等価回路の解析

いま、A相とB相の位相差が $\pi/2$ であることを考慮してそれぞれの電圧の実効値ベクトルを E および jE と表すと、不平衡な場合の電流と平衡な場合の電流は、それぞれ

$$\begin{bmatrix} R+j\omega L & -j\omega M_a & j\omega M_b & j\omega M_c \\ -j\omega M_a & R+j\omega L & j\omega M_c & j\omega M_b \\ j\omega M_b & j\omega M_c & R+j\omega L & -j\omega M_a \\ j\omega M_c & j\omega M_b & -j\omega M_a & R+j\omega L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ jE \\ E \\ jE \end{bmatrix} \quad (1)$$

および

$$\begin{bmatrix} R+j\omega L & j\omega M_a & j\omega M_c & j\omega M_b \\ j\omega M_a & R+j\omega L & -j\omega M_b & -j\omega M_c \\ j\omega M_c & -j\omega M_b & R+j\omega L & -j\omega M_a \\ j\omega M_b & -j\omega M_c & -j\omega M_a & R+j\omega L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_1 \\ i'_2 \\ i'_3 \\ i'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ jE \\ E \\ jE \end{bmatrix} \quad (2)$$

から求められる。

ここで、電力比 W_A/W_B を求めてみよう。A相巻

線とB相巻線の電圧は E および jE であるから、不平衡の場合、A相とB相の電力ベクトルはそれぞれ

$$\dot{W}_A = \dot{I}_A \cdot \bar{E} \quad (3)$$

$$\dot{W}_B = \dot{I}_B \cdot \bar{jE} \quad (4)$$

となる。ここで、 \dot{I}_A と \dot{I}_B はA相電流とB相電流である。

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_3 \quad (5)$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_2 + \dot{I}_4 \quad (6)$$

したがって、A相とB相の電力比 W_A/W_B は

$$\frac{W_A}{W_B} = \frac{\text{Re}(\dot{W}_A)}{\text{Re}(\dot{W}_B)} = \frac{\text{Re}(\dot{I}_A)}{\text{Im}(\dot{I}_B)} \quad (7)$$

となる。

平衡な場合の電力比も巻線電流 i_1, i_2, i_3, i_4 を、 i'_1, i'_2, i'_3, i'_4 に置き換えることによって求めることができる。

3. 3 回路定数の決定

等価回路の回路定数は実験で求められる。自己インダクタンスと相互インダクタンスの値は周波数に依存しないが、巻線の抵抗値は表皮効果のために周波数に依存する。巻線抵抗 R は、どの巻線もほぼ等しく60Hzでは 2.86Ω 、360Hzでは 3.29Ω であった。また、自己インダクタンス L は 18.0mH であった。さらに、相互インダクタンス M_a, M_b と M_c は 0.838mH 、 0.737mH 、 0.0629mH であり、 M_c は M_a, M_b に比べかなり小さな値であった。

4. 結果と考察

4. 1 消費電力

図2(a)および(b)の接続において、電源周波数を60Hzから360Hzまで様々に変えてA相とB相の消費電力 W_A および W_B を測定し、その比 W_A/W_B を求めた。電源の電圧と周波数の比 V/f は $1/3\text{V/Hz}$ 一定とした。このようにすると、巻線の電流はほぼ 2.5A 一定になった。測定は、アルミ板(厚さ3と5mm)を乗せた場合と乗せない場合の両方について行った。アルミ板を乗せた場合、アルミ板は磁極に押しつけた。

図2(b)の接続では2相の消費電力 W_A と W_B はほぼ等しい値を示した。例えば、アルミ板を乗せない場合、それらの値はいずれも周波数によらずほぼ 60W であった。また、アルミ板(ただし、厚み5mm)

を乗せた場合、周波数 60Hz では 55W、360Hz では 220W であった。アルミ板を載せない場合、下列の A 相と B 相の消費電力の差が上列の A 相と B 相の消費電力の差と相殺されて上列と下列を合わせた電力比がほぼ 1 となるものといえる。電力比がほぼ 1 になることは、式の上からも導くことができる。すなわち、相互インダクタンス M_b, M_c が自己インダクタンス L に比べて充分小さい場合には、式(3)および(4)で計算される W_a と W_b はいずれも

$$W = \frac{2E^2R(R^2 + \omega^2L^2 + \omega^2M_a^2)}{(R^2 + \omega^2L^2 + 2\omega^2LM_a^2)(R^2 + \omega^2L^2 - 2\omega^2LM_a^2)} \quad (8)$$

となる。

図 2(a) の接続における消費電力比の周波数依存性を図 4 に示す。アルミ板の有り無しに関わらず、電力比 W_A/W_B は周波数が低い場合にはほぼ 1 であるが、周波数が増大するにつれて増大し、A 相と B 相の電力バランスが崩れる。ただし、両相の消費電力の合計は図 2(b) の接続の場合にほぼ等しい。即ち、アルミ板を乗せない場合、消費電力 W_A と W_B は例えば 360Hz において 93W と 36W であった。また、アルミ板、例えば厚み 5mm のものを乗せた場合、周波数 360Hz では 255W と 186W であった。アルミ板を乗せると固定子で電力が消費されるだけでなくアルミ板の内部で大量の電力が消費される。この電力は(a)の接続と(b)の接続で大きな差はないためにアルミ板を乗せた場合には図(a)の接続においても消費電力比が 1 に近づくものといえる。

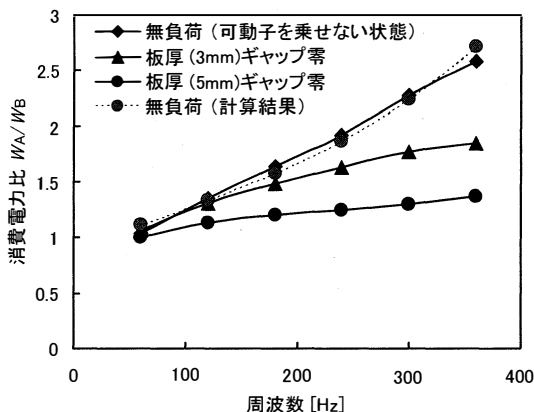


図 4 周波数と消費電力比 W_A/W_B の関係

測定した回路定数を用いて計算された無負荷時の電力比 W_A/W_B は、図 4 に示す点線のようになり、実験で求められた無負荷時の消費電力比 W_A/W_B にほぼ一致する。ここで、4 つの巻線間には 3 種類の相互インダクタンス M_a, M_b, M_c が存在するために A 相の電力と B 相の電力に違いが生じることに注意されたい。A 相の電力と B 相の電力に違いが生じる原因をよく理解するために、仮に、列内の相互インダクタンス M_a を 0 と仮定して不平衡接続と平衡接続の電力比を求めたところ、周波数 60Hz から 360Hz の範囲においていずれの場合も 0.92 から 0.99 の範囲に収まった。一方、不平衡接続においては、上下間の相互インダクタンス M_b, M_c を 0 としても電力比は 1 からずれ、周波数 60Hz から 360Hz の範囲において 1.17 から 3.61 まで変化した。このことから、図 2(a) の接続において不平衡が生じるのは M_a が存在するためである。

4. 2 浮揚力

巻線接続を電力の平衡が得られる図 2(b) とし、厚み 3mm のアルミ板の可動子に様々な重さのおもりを乗せて固定子の上に浮揚させた。電源は 60Hz (20V)、120Hz (40V) および 360Hz (120V) の 3 条件として、浮揚高さを測定した。

図 5 に浮揚力 (アルミ板の重さ + おもりの重さ) と駆動電流を浮揚高さの関数として示す。図によれば、浮揚高さが低下すると巻線電流は次第に増加する。ここで、巻線電流が励磁電流と一次負荷電流の和であることに注意して考えると、この巻線電流の増加は一次負荷電流の増加によるものであり、一次負荷電流の増加が浮揚力の急激な増大をもたらしているものといえる。一次負荷電流は周波数の増大によっても増大する。その結果、予想されたように、浮揚力は周波数の増大に伴って急激に増大した。

表 1 にアルミ板を乗せたときの全消費電力 W (ただし、浮揚高さは 4mm) およびアルミ板を乗せない場合の消費電力 W_0 の値を示す。アルミ板の浮揚のために消費する電力はほぼ $W - W_0$ で与えられるので、 $\eta = (W - W_0)/W$ は浮揚のためのエネルギーの効率といえることができる。表によれば、周波数を上げることによってより高い効率を得ることができる。

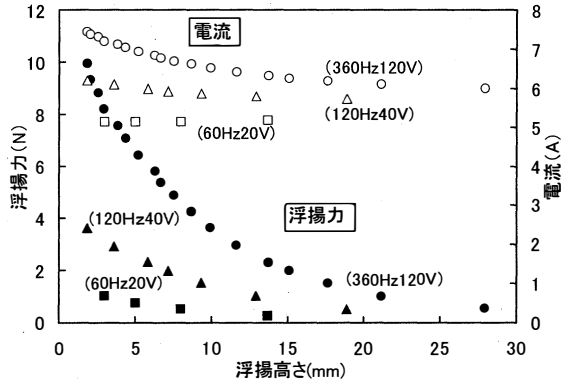


図5 浮揚力と電流 (A相・B相) の浮揚高さ依存性

	W(w)	W0(w)	$\eta = \frac{W-W_0}{W}$
60Hz(20V)	46.5	45.5	0.02
120Hz(40V)	80.0	52.8	0.34
360Hz(120V)	156.0	64.0	0.59

表1 可動子の浮揚効率 板厚は3mm, 浮揚高さは4mmとした。

5. 結論

オープンコアを用いた反発型の磁気浮上型誘導リニアモータを検討した。このモータでは、ガイド力を得るために2列固定子を用いた。得られた結果をまとめると、

- (1) 2つの相において、消費電力がほぼ等しくなるような固定子巻線接続を明らかにした。
- (2) 固定子の巻線接続を等価回路で表し、巻線の消費電力を解析し、実験値を理解することができた。
- (3) 電源周波数を高くすると、励磁インピーダンスを高くすることができるので大きな浮揚力が得られた。
- (4) 周波数を増加させると浮揚効率が增大する。

参考文献

(1)海老原, 鳥居, 和多田「最近2年間におけるリニアドライブ関連研究の動向」電気学会論文誌D, Vol.118, No.10, pp.1217-1221 (1998).

(2)水間「リニアモータを利用した輸送システムの現状と展望」電気学会論文誌, D, Vol.120, No.4, pp.479-481 (2000).

(3)小西, 平根「2相リニアモータを用いた交流吸引磁気浮上搬送システムの移動に関する研究」電気学

会論文誌 D, Vol.121, No.3, pp.403-409, (2001).

(4)川田, 森井, 中島, 金子, 山田「誘導反発原理による磁気浮上搬送の試み」電気学会リニアドライブ研究会資料 Vol.LD-91, No. 98-111, pp.69-77 (1991).

(5)J.L. He, Z. Wang, D.M. Rote, and S. Winkelman, "Investigation of the Stability of AC Repulsive-Force Levitation Systems for Low-Speed Maglev", IEEE Trans. on Magn., Vol.28, No.5, pp.3315-3317, sep. 1992.

(6)Y.J.Kim, P.S.Shin, D.H.Kang, Y.H.Cho "Design and Analysis of Electromagnetic System in a Magnetically Levitated Vehicle, KOMAG-01" IEEE Trans. on Magn. Vol28, pp.3321-3323 sep.(1992).

本研究の内容は"Two-Phase Induction Linear Motor Furnished with Double File Stator and Bilayer Liner"の題目で IEEE Trans on Magnetics, Vol. 40, 2004, No.4, 1897-1900 に掲載された。