I 型コアを用いた開磁路形リニアパラメトリックモータ の推力改善に関する検討

Considerations on the Improvement of the Thrust of a Linear Parametric Motor
with an Open Magnetic Circuit Using I-Shaped Core

石川和己, 石塚正人, 菊地新喜

東北学院大学工学部, 多賀城市中央1-13-1 (〒985-8537)

K. Ishikawa, M. Ishizuka, and S. Kikuchi

Faculty of Engineering, Tohoku Gakuin University, 1-13-1 Chuo, Tagajo 985-8537

(1998年10月14日受理, 1999年1月21日採録)

This paper describes the construction and basic characteristics of a linear parametric motor with an open magnetic circuit by using I-shape core. The linear motor can be used by a single phase power source, and has overload protection characteristics. To increase the value of the thrust-to-mass ratio, we reduced the mass of a 4-legged linear parametric motor by eliminating a part of the magnetic circuit experimentally. To increase the thrust further, we investigated the design method of a 4-legged linear motor assembled by using I-shaped laminated cores.

Key words: linear motor, linear parametric motor, open magnetic circuit, I-shaped core, assembled type

1. はじめに

これからの日本は、ますます高齢化社会が進むことや障害を持つ人に対して優しく、住みやすい環境を提供するバリアフリー住宅が普及すると思われる。その中で、家庭内におけるエレベータや自動ドアなどの必要性が高まるにつれて、単相電源で駆動できるリニアモータが必要になると思われる。本研究で用いているリニアパラメトリックモータは、パラメトリック発振を利用したリニアモータであり、単相電源で駆動できる特徴を有している。又、スロットが不要で巻線を型巻きして挿入でき、極めて構造が簡単であるため低コストで製作でき、保守が容易となる特長も有している^{1), 2)}。

筆者らはこれまでに、4脚積層形リニアパラメトリックモータの推力増加および特性改善法について報告し³⁾、更に4脚積層形モータの棒状磁心を取り外して二次導体の反対側に配置し、脚部と棒状磁心の間に二次導体を設置して駆動する開磁路形モータを試作して検討を行ってきた^{4), 5)}。開磁路形モータにすることにより、二次導体は一次側鉄心

の脚部の磁束密度により駆動することになり、空隙磁束密度が大きく、推力の増加を図ることができる。更に棒状磁心を取り外したことにより一次側固定子の質量が軽減でき、推力質量比も改善できた。

今回は、I型コアを用いて4脚磁心とほぼ同寸法の開磁路形モータを試作し、モータ特性および推力増加に関する検討を行った。又、I型コアを用いることにより形状の異なるモータの製作が容易であるため、設計法を検討する際に有用である。

本論文は、これらの検討結果について報告する。

2. 基本構成と実験結果

Fig. 1に4脚積層形リニアパラメトリックモータの基本構成を示し、Fig. 2に4脚積層形モータの一次側磁心を上下反転し、更に棒状磁心 B_2 を脚部から離れた開磁路形モータを示す。開磁路形モータでは棒状磁心 B_2 を二次導体のアルミニウム板の裏張り鉄板 RP_s に置き換えて複合二次導体としている。これらの図において、 P_1 、 P_3 は励磁側磁極、 P_2 、 P_4 は共振側磁極、 B_1 は共通磁路である。励磁側磁路には一次巻線 N_1 を施し単相電源 E_1 を接続し、共振側磁路には二次巻線 N_2 を施して同調用コンデンサ C を接続している。ここで、一次電圧 E_1 を上昇していくと、共通磁路 B_1 が磁気飽和に達してパラメトリック発振が生じ、磁極4から磁極1の方向に進行磁界が形成される。4脚積層形モータでは磁心から外に出る空隙磁束密度を利用することになるが、開磁路形モータは脚部と二次導体の鉄板 RP_s との間の空隙磁束密度を利用する点が異なる。

今回は、I型コアを用いて4脚磁心形モータとほぼ同寸法の開磁路形モータを試作し、4脚磁心形モータの特性と比較検討を行った。脚部と共通磁路部のI型コアには、磁化容易方向が長手方向の方向性珪素鋼板を用い、それぞれを接着して組立て製作している。4脚磁心の材質は無方向

Fig. 1 Structure of a 4-legged linear parametric motor.

Fig. 2 Outline of a linear parametric motor with an open magnetic circuit.

性珪素鋼板であり、切削加工により脚部と共通磁路部を一体構造としている。

Table 1 に実験に用いたモータの仕様を示す。材質は 4 脚磁心形が無方向性珪素鋼板 (S14, 厚さ 0.35[mm]) , I 型磁心形が方向性珪素鋼板 (G9H, 厚さ 0.35[mm]) であり、磁心寸法はほぼ同程度としている。共通磁路の厚さ $t_c = 5$ [mm]、巻線数は $N_1 = N_2 = 1500$ [turns] であり、モータの質量はほぼ同程度になっている。実験では、磁極と二次導体のアルミニウム板までのメカニカルギャップ $g_m = 1$ [mm]、二次導体の裏張り鉄板 RP_{Fe} は幅 70 [mm]、長さ 180 [mm]、厚さ 5 [mm] 一定とし、アルミニウム板 (幅 100 [mm]、長さ 200 [mm]) の厚さ Al を 1 [mm] ~ 3 [mm] まで変えて行った。

Fig. 3 と Fig. 4 にそれぞれ 4 脚磁心形および I 型磁心形の起磁力 $N_1 I_1$ に対する誘起電圧 E_1 の交流磁化特性を示す。これらは磁極と二次導体の裏張り鉄板 RP_{Fe} のギャップを 2 [mm] ~ 4 [mm] まで変え、更に RP_{Fe} の無い解放状態で測定した結果である。両図を比較して見ると、同様の傾向となっている。4 脚磁心形は I 型磁心形に比べて、起磁力 $N_1 I_1$ が小さい時の誘起電圧 E_1 の立ち上がりが鋭いが、飽和領域になると I 型磁心形の方が電圧が高くなっており最大磁束密度が大きくなると考えられる。立ち上がり時の I 型磁心形は、磁極と共通磁路を接着して製作しているために空隙の影響があり、飽和領域では方向性珪素鋼板を用いたことによる材質の影響と考えられる。

Table 1 Dimensions of the linear motor.

Shapes	4-legged type	I-shaped core type
Quality of the material	non-oriented Si-Fe sheet	grain-oriented Si-Fe sheet
Size of core (WxLxH) [mm ³]	17x115x54	15x115x56
Thickness of common magnetic circuit	$t_c = 5$ [mm]	$t_c = 5$ [mm]
Turns of winding ($N_1 = N_2$)	1500 [turns]	1500 [turns]
Weight	1.375 [kg]	1.335 [kg]

Fig. 3 AC magnetization curves (4-legged type).

Fig. 4 AC magnetization curves (I-shaped core type).

Fig. 5にI型磁心形モータの無負荷特性を示す。これは同調用コンデンサ $C=59.0\text{ }\mu\text{F}$ を接続して、モータから二次導体の裏張り鉄板 RP_{Fe} までの磁気ギャップを $g=2\text{ [mm]}$ として測定した結果である。これを見ると、一次電圧 $E_1=60\text{ [V]}$ 付近でパラメトリック発振が生じており、その後二次電圧 E_2 および二次電流 I_2 がほぼ一定となっている。これは4脚磁心形モータもほぼ同様の特性³⁾となっているが、二次電圧 E_2 はI型磁心形モータの方が高くなっている。

Fig. 6にI型磁心形モータのパラメトリック発振後の一次電圧 $E_1=100\text{ [V]}$ における一次および二次電圧波形を示す。これを見ると、一次電圧 e_1 に対して二次電圧 e_2 がほぼ 90 [deg] 進み位相の正弦波電圧になっていることがわかる。

Fig. 7に4脚磁心形モータの同調用コンデンサ C に対する静推力 F_s の関係を示す。これは一次電流 $I_1=2\text{ [A]}$ 、メカニカルギャップ $g_m=1\text{ [mm]}$ 、二次導体の裏張り鉄板 RP_{Fe}

の厚さを 5 [mm] とし、アルミニウム板の厚さを $1\text{ [mm]}\sim 3\text{ [mm]}$ まで変えて測定した結果である。これを見ると、それぞれのアルミニウム板の厚さに対して推力を最大にする最適な同調用コンデンサが存在し、アルミニウム板が厚くなるほど最適な同調用コンデンサの値が大きくなっている。この図から、同調用コンデンサ $C=61.0\text{ }\mu\text{F}$ で、アルミニウム板の厚さが 1 [mm] の時に最も推力が大きくなっていることがわかる。

Fig. 8に4脚磁心形モータの同調用コンデンサ C に対する推力入力比 F_s/P_1 の関係を示す。これはFig. 7の静推力と同様の傾向となっており、アルミニウム板の厚さが 1 [mm] の時に 40 [N/kW] 以上の推力入力比が得られている。又、アルミニウム板の厚さが 2 [mm] 、 3 [mm] の時でも 30 [N/kW] 以上の値が得られていることがわかる。

Fig. 5 No-load characteristic curves (I-shaped core type).

Fig. 6 Waveforms of the input voltage e_1 and the induced voltage e_2 (I-shaped core type).

Fig. 7 Relation between the static thrust F_s and the tuning capacitance C (4-legged type).

Fig. 8 Relation between the static thrust to the input power ratio F_s/P_1 and the tuning capacitance C (4-legged type).

Fig. 9 と Fig.10 にそれぞれ I 型磁心形モータの同調用コンデンサ C に対する静推力 F_s および推力入力比 F_s/P_1 の関係を示す。両図共、4 脚磁心形モータの結果と同様の傾向になっていることがわかる。

Fig. 9 Relation between the static thrust F_s and the tuning capacitance C (I-shaped core type).

Fig. 10 Relation between the static thrust to the input power ratio F_s/P_1 and the tuning capacitance C (I-shaped core type).

Table 2 Comparison of values.

Shapes Values	4-legged type	I-shaped core type
F_s [N]	4.31	4.07
F_s/P_1 [N/kW]	41.58	39.12
F_s/M [N/kg]	3.13	3.05
C [μ F]	61.0	59.0

静推力 F_s を比較して見ると、アルミニウム板の厚さが 1 [mm] の時に 4 脚磁心形モータの方が I 型磁心形モータに比べて大きな推力が得られていることがわかる。又、アルミニウム板の厚さが 2 [mm]、3 [mm] の時はほぼ同程度の推力が得られている。推力入力比 F_s/P_1 は、静推力の場合と同様にアルミニウム板の厚さが 1 [mm] の時に 4 脚磁心形モータの方が良好な値が得られており、アルミニウム板の厚さが 2 [mm]、3 [mm] の時はほぼ同程度の値となっている。

Table 2 に一次電流 $I_1 = 2$ [A]、ギャップ $g = 2$ [mm]、アルミニウム板の厚さが 1 [mm]、二次導体の裏張り鉄板 RP_{Fe} の厚さを 5 [mm] とした時の 4 脚磁心形モータと I 型磁心形モータの特性値を比較して示す。4 脚磁心形モータの最大静推力は 4.31 [N] で、I 型磁心形モータの最大静推力は 4.07 [N] となっており、4 脚磁心形モータの方が約 6 [%] 大きくなっている。推力入力比および推力質量比についても 4 脚磁心形モータの方が良好な値が得られていることがわかる。これは 4 脚磁心形が一体構造となっているのに対して、I 型磁心形は脚部と共通磁路を接着して製作しているために生じるギャップの影響によるものと考えられる。しかし、アルミニウム板の厚さが 2 [mm]、3 [mm] と厚くなり、モータと二次導体の裏張り鉄板 RP_{Fe} までの磁気ギャップが大きくなるとほぼ同程度の特性値が得られていることわかる。これは、アルミニウム板の厚さによる磁気ギャップの増加に対して、脚部と共通磁路部のギャップの影響が小さくなるためと考えられる。

3. まとめ

リニアパラメトリックモータの製作法に関して、4 脚磁心形モータと I 型磁心形モータを用いて検討した結果、磁気ギャップが小さくなるアルミニウム板の厚さが 1 [mm] では 4 脚磁心形モータの方が良好な特性値が得られたが、磁気ギャップが大きくなると I 型磁心形モータでも同程度の特性値が得られた。

I 型コアを用いてモータ磁心を組立製作することで更に製作が容易となり、今後モータ形状、各部寸法および材質などを検討する際に、有用であると思われる。

文 献

- 1) K. Murakami, S. Kikuchi, O. Ichinokura and T. Watanabe: IEEE Trans. Magn., MAG-19, 5, 2085 (1983)
- 2) S. Kikuchi, T. Furukawa and K. Murakami: IEEE Trans. Magn., MAG-23, 5, 2844 (1987)
- 3) 石川, 菊地, 一ノ倉, 渡辺, 村上: 電気設備学会誌, 15, 11, 1074 (1995)
- 4) S. Kikuchi and K. Ishikawa: IEEE Trans. Magn., 33, 5, 4188 (1997)
- 5) 川上, 石川, 菊地: 日本応用磁気学会誌, 21, 4-2, 853 (1997)