磁石可動形リニア直流モータの静推力特性

Static Thrust Characteristics of a Moving-Magnet-Type Linear DC Motor

水野 勉・安西哲也*・北村利光*・中村 明*・宮下利仁・山田 一

信州大学工学部, 長野市若里 500 (〒380)

*(株)アマダエンジニアリングセンター, 伊勢原市石田 350 (〒259-11)

T. Mizuno, T. Anzai,* T. Kitamura,* A. Nakamura,* T. Miyashita, and H. Yamada

Faculty of Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380

*Amada Engineering Center Co., Ltd., 350 Ishida, Isehara 259-11

A high-speed hydraulic servo valve using a moving-coil-type linear dc motor (LDM) was developed. A moving-magnet-type LDM has been studied as means of reducing the mass of magnets, which is desirable for economic reasons. This paper describes the static thrust characteristics of the moving-magnet-type LDM, and compares the LDM with the moving-coil type LDM for hydraulic servo valve. The following conclusions are reached: (1) the calculation errors obtained for the static thrust of the moving-magnet-type LDM by using the permeance analysis method and the finite element method are 7% and 2%, respectively, and (2) the masses of the permanent magnets used for the moving-magnet-type LDM are 43% less than those used for the moving-coil-type LDM. However, the electric time constant and the mechanical time constant of the moving-magnet-type LDM are larger than those of the moving-coil-type LDM.

Key words: moving-magnet-type linear dc motor, moving-coil-type linear dc motor, hydraulic servo valve, static thrust, electric time constant, mechanical time constant

1. ま え が き

油圧駆動システムの高速度・高精度化, および省エネルギー化を実現するためには, 応答周波数が高く, かつ消費電力も少ない油圧サーボ弁が要求されている。そこで筆者らは, コイル可動形リニア直流モータ (Linear DC Motor, LDM) を用いた高速油圧サーボ弁 (Linear Servo Valve, LSV) を開発してきた¹⁾。LSV の定格流量は 40 [L/min] であり, 応答周波数は 500 [Hz] で従来のノズルフラップ型サーボ弁と比べて応答周波数が 1.67 倍も向上した²⁾。

一般にコイル可動形 LDM は可動子の質量が小さいため, 可動子の加速度 (最大推力/可動子質量) が大きく高応答を実現できる。しかし, 大きな推力を発生させるためには, 高価な永久磁石を多量に必要とするためにコストパフォーマンスが良くない。そこで筆者らは, 永久磁石の使用量が少なく大きな推力を発生させることのできる磁石可動形 LDM の検討を行った。

本論文では, 大流量サーボ弁 (弁圧力降下 0.4 [MPa] で定格流量 150 [L/min]) のために検討した磁石可動形 LDM とコイル可動形 LDM の以下の事項について述べる。

(1) 磁石可動形 LDM の静推力特性

(2) 磁石可動形 LDM とコイル可動形 LDM との特性比較

2. 磁石可動形 LDM の構造と磁性材料の磁化特性

2.1 構造

Fig. 1 は, 大流量油圧サーボ弁のために試作した磁石可動形 LDM の構造である。固定子は SPCC (冷間圧延鋼板, 板の厚さ 2 [mm]) を積層した構造となっており, スロットの中に配置した 8 個のコイルは直列に接続してある。可動子のロッドには, S45C (機械構造用炭素鋼) を用いており, その表面に高さ 3 [mm] の永久磁石を接着してある。

Table 1 に磁石可動形 LDM の主な基本仕様を挙げてあり, 定格ストロークは ± 5 [mm] である。

2.2 磁性材料の磁化特性

Fig. 2 は, S45C と SPCC の初磁化特性である。試料の磁化特性は, 環状磁心状の試料に励磁・検出コイルを施した上で B - H カーブトレサを用いて測定した。なお試料の熱処理は行っていない。同図中に示したように磁界の強さ 5 [kA/m] おける S45C と SPCC の最大磁束密度は, それぞれ 1.57 [T] と 1.32 [T] であり, SPCC の最大磁束密度は S45C の 84% となった。

Fig. 1 Structure of a moving-magnet-type LDM for a large-capacity hydraulic servo valve (unit: mm).

3. 静推力特性

3.1 パーミアンス法による静推力解析

パーミアンス法による静推力の表現式の導出にあたり, 以下

Table 1 Basic specifications of the moving-magnet-type LDM

Item	Symbol	Value	[Unit]
Mover	Number of poles	P	2 [poles]
	Pole pitch	τ	30 [mm]
	Height of magnet	h_m	3 [mm]
	Length of magnet	l_m	20 [mm]
	Materials	Nd-Fe-B magnet Permanent magnet ($-H_c: 912$ [kA/m], $B_r: 1.18$ [T] (BH) $_{\max}: 263$ [kJ/m ³])	
	Rod	S45C	
Stator	Rated stroke	L_s	± 5 [mm]
	Number of slots	N_s	8 [slots]
	Number of turns	N	544 [turns]
	Slot pitch	τ_s	8 [mm]
	Slot width	s	4 [mm]
	Material	SPCC (thickness is 2 [mm])	
Length of air gap		g	0.5 [mm]

の仮定を設ける。

- (1) 固定子および可動子の端部からの漏れ磁束は無視する。
- (2) 固定子および可動子の磁性材料の透磁率は無限大とし、この部分の磁気抵抗は考慮しない。ただし、永久磁石の磁束 Φ_m は、ロッドでの磁束の飽和を考慮して下式を満足するものとする。

$$\Phi_m \leq B_s A_{\text{rod}} \quad [\text{Wb}] \quad (1)$$

ここに、 B_s : ロッド材質 S45C の飽和磁束密度 [T], A_{rod} : ロッドの断面積 [m²]

上記の仮定に基づき磁石可動形 LDM の磁気等価回路は、永久磁石 1 極分を考慮して Fig. 3 のようになる。同図において F_m は永久磁石の起磁力、 R_m は永久磁石の内部磁気抵抗、 R_g はギャップの磁気抵抗であり、下式で求めることができる。

$$F_m = H_c h_m \quad [\text{A}] \quad (2)$$

$$R_m = \frac{\ln(r_{\text{mo}}/r_{\text{mi}})}{2\pi\mu_0 l_m} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (3)$$

Fig. 2 Initial magnetization characteristics of non-annealed carbon steel, S45C, and non-annealed cold rolled carbon steel sheets, SPCC.

$$R_g = \frac{\ln[(r_{\text{mo}} + k_{cg})/r_{\text{mi}}]}{2\pi\mu_0 l_m} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (4)$$

$$k_c = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_c s} \quad (5)$$

$$\gamma_c = \frac{2}{\pi} \left[\tan^{-1} \frac{s}{2g} - \frac{g}{s} \ln \left\{ 1 + \left(\frac{s}{2g} \right)^2 \right\} \right] \quad (6)$$

ここに、 H_c : 永久磁石の保磁力 [A/m], h_m : 永久磁石の高さ [m], r_{mo} : 永久磁石の外径半径 [m], r_{mi} : 永久磁石の内径半径 [m], μ_0 : 真空の透磁率 [H/m], l_m : 永久磁石の長さ [m], k_c : カータ係数, τ_s : スロットピッチ [m], s : スロット幅 [m], g : ギャップの長さ [m]

永久磁石 1 極当たりの磁束 Φ_m は、磁気等価回路から次式で求められる。

$$\Phi_m = F_m / (R_m + R_g) \quad [\text{Wb}] \quad (7)$$

さらに、ロッドの磁束密度 B_{rod} は下式となる。

$$B_{\text{rod}} = \Phi_m / A_{\text{rod}} \quad [\text{T}] \quad (8)$$

磁束 Φ_m からギャップ中の磁束密度を求め、フレミングの左手則を用いて静推力 F_x を求めると次式のようになる³⁾。

$$F_x = \frac{\Phi_m}{\tau} NI = K_f I \quad [\text{N}] \quad (9)$$

$$K_f = \frac{\Phi_m}{\tau} N \quad [\text{N/A}] \quad (10)$$

ここに、 N : コイルの巻数 [回], I : 励磁電流 [A], τ : ポールピッチ [m], K_f : 推力定数 [N/A]

3.2 有限要素法による静推力解析

有限要素法（以下、FEM）では、非線形場で軸対称問題として磁石可動形 LDM の静推力解析を行った。下式に示したマクスウェルの応力法を用いてロッドと永久磁石の近傍に積分路をとり静推力を求めた。

$$F_x = \frac{1}{\mu_0} \iint \left\{ (\mathbf{B} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{B} - \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2 \mathbf{n} \right\} dA \quad [\text{N}] \quad (11)$$

ここに、 $\mathbf{B}$: 推力作用面の磁束密度 [T], $\mathbf{n}$: 推力作用面の法線ベクトル, A : 推力作用面積 [m²]

3.3 静推力の実測値と計算値との比較

Fig. 4 は磁石可動形 LDM の静推力-変位特性である。同図中に実測値とパーミアンス法（式 (9)）および FEM（式 (11)）を用いて求めた計算値を示した。パーミアンス法による計算では、式 (8) を用いて求めたロッドの磁束密度は 3.2 [T] となり、ロッドが磁気飽和を生じていることが推定された。そこで式

Fig. 3 Magnetic equivalent circuit of the moving-magnet-type LDM obtained by the permeance analysis method.

Fig. 4 Static thrust F_x vs. displacement x characteristics of the moving-magnet-type LDM.

(1) を用いて S45C の磁界の強さ 5 [kA/m] における磁束密度 $B_s = 1.57$ [T] とロッドの断面積との積から求めた磁束 ϕ_m を式 (9) に代入して静推力の計算値を求めた。FEM 解析結果では、ロッドの最大磁束密度は 1.7 [T] でありロッドが磁気飽和を生じていた。静推力の実測値には、スロットピッチに起因する 8 [mm] 周期のディテント力 20 [N] が生じた。油圧サーボ弁に用いるアクチュエータの推力分布は、平坦な特性であることが望ましいためディテント力の低減が必要となろう。

Fig. 5 は静推力-励磁電流特性である。静推力は励磁電流にほぼ比例しており、同図中に示したパーミアンス法と FEM による計算誤差は、実測値に対してそれぞれ 7% と 2% になった。

4. コイル可動形 LDM との特性比較

本章では、大流量油圧サーボ弁用に開発したコイル可動形 LDM と磁石可動形 LDM との特性比較を行い、大流量油圧サーボ弁に用いるリニアアクチュエータとしての考察をする。

4.1 コイル可動形 LDM の構造と静推力特性

Fig. 6 は大流量油圧サーボ弁に用いるコイル可動形 LDM の構造である。LDM の高速・高応答化のためには、下式に示す電気的時定数 T_e および機械的時定数 T_m を小さくする必要がある⁴⁾。

$$T_e = L/R \quad [\text{s}] \quad (12)$$

$$T_m = \frac{mR}{K^2} \quad [\text{s}] \quad (13)$$

ここに、 L : コイルのインダクタンス [H], R : コイルの抵抗 [Ω], m : 可動部の質量 [kg]

コイル可動形 LDM では、電気的時定数 (インダクタンス) を小さくするために、ショートリングを用いた。さらに、可動部を軽量化して機械的時定数を小さくするために、コイルボビンにアルミニウム鋳造品を採用することで、可動子の質量は 65 [g] となった。なお、定格ストロークは ± 5 [mm] であり、永久磁石の材質は磁石可動形 LDM で用いた磁石 (Nd-Fe-B) と同一のものを使用した。

Fig. 7 は、コイル可動形 LDM の静推力-励磁電流特性であ

Fig. 5 Relationship between the static thrust F_x and the exciting current I of the moving-magnet-type LDM (displacement $x = 0$ mm).

Fig. 6 Structure of a moving-coil-type LDM for a large-capacity hydraulic servo valve (unit: mm).

Fig. 7 Relationship between the static thrust F_x and the exciting current I of the moving-coil-type LDM (displacement $x = 0$ mm).

る。静推力は、励磁電流 3 [A] 程度から飽和傾向を示しており、励磁電流 -6 [A], 6 [A] における静推力は、それぞれ -105 [N] と 74 [N] であり、励磁電流の正負によって静推力が大きく異なった。この原因は、励磁電流による磁束が永久磁石とヨークによる磁束分布に影響し、フレミングの左手則による推力と逆向きの力 (磁気力) を発生させるためである¹⁾。

4.2 特性比較

Table 2 は、大容量油圧サーボ弁用に開発したコイル可動形 LDM と磁石可動形 LDM の特性比較である。各 LDM に使用

Table 2 Comparison of a moving-coil-type LDM and a moving-magnet-type LDM for a large-capacity hydraulic servo valve

Item	Symbol	Moving-coil-type LDM	Moving-magnet-type LDM
Dc resistance	R	6.1 [Ω]	5.5 [Ω]
Inductance ($f = 1$ [kHz])	L	0.9 [mH]	6 [mH]
Mass of magnet	m_m	190 [g]	82 [g]
Mass of mover	m	65 [g]	400 [g]
Thrust constant	K_f	17 [N/A]	16 [N/A]
Thrust / input ratio	F_x / P_i	408 [N/kW]	485 [N/kW]
Electrical time constant	T_e	0.15 [ms]	1.1 [ms]
Mechanical time constant	T_m	1.4 [ms]	8.6 [ms]
Mechanical time constant (including mass of load, 700 [g])	T'_m	16 [ms]	24 [ms]

した永久磁石の質量はそれぞれ 190 [g] と 82 [g] であり、磁石可動形 LDM に用いた磁石の質量は、コイル可動形 LDM に用いた永久磁石の質量の 43% である。また、励磁電流 6 [A] におけるコイル可動形 LDM と磁石可動形 LDM の推力/入力比 F_x / P_i は、それぞれ 408 [N/kW] と 485 [N/kW] となり、磁石可動形 LDM の方が 19% 大きくなった。

さらに、コイル可動形 LDM と磁石可動形 LDM の電氣的時定数 T_e は、それぞれ 0.15 [ms] と 1.1 [ms] であり、磁石可動形 LDM の T_e はコイル可動形 LDM の 7.3 倍となった。また、可動子だけの質量を用いて求めた機械的時定数 T_m は、それぞれ 1.4 [ms] と 8.6 [ms] である。さらに、LDM の可動子は大流量サーボ弁のスプールに直結されるため、スプールの質量 700 [g] も加味した機械的時定数 T'_m は、それぞれ 16 [ms] と 24 [ms] となった。上記のように、磁石可動形 LDM は、永久磁石の使用量の低減との引換にコイル可動形 LDM と比較して電氣的時定数および機械的時定数が大きくなった。

5. あとがき

本論文で明らかになった事項をまとめると以下のようになる。

(1) パーミアンス法と FEM による磁石可動形 LDM の静推力-励磁電流特性の計算誤差はそれぞれ 7% と 2% となった。またロッドが磁気飽和を生じており、ロッドの直径と永久磁石の高さの再検討が必要であることがわかった。

(2) 磁石可動形 LDM に用いた永久磁石の質量は、コイル可動形 LDM に用いた永久磁石の質量の 43% となった。コイル可動形 LDM と磁石可動形 LDM の機械的時定数は、それぞれ 1.4 [ms] と 8.6 [ms] であり、磁石可動形 LDM の機械的時定数および電氣的時定数は、コイル可動形 LDM と比較して大きくなった。

文 献

- 1) 水野 勉・脇若弘之・山田 一: 電学論 D, 113, 1002 (1993).
- 2) T. Mizuno, T. Anzai, and H. Yamada: Proc. International Power Electronics Conference (IPEC '95), IEEJ, Yokohama, 1995, pp. 1689-1694 (IEEJ, Tokyo, 1995).
- 3) 大川光吉: フェライト磁石回転機的设计, pp. 89-90 (TDK, 東京, 1992).
- 4) 山田 一: リニアモータとその応用, p. 43 (工業調査会, 東京, 1981).

1996 年 10 月 15 日受理, 1997 年 1 月 16 日採録