

磁石可動形リニア直流モータの時定数とスロット開口幅との関係

Relationship between the Time Constant and Slot Width of a Moving-Magnet-Type Linear Dc Motor

岩垂 光宏・水野 勉*・小山 勝巳**・安西 哲也**・山田 一*

信州大学大学院工学系研究科電気電子工学専攻, 長野市若里 500 (〒380-8553)

*信州大学工学部電気電気工学科, 長野市若里 500 (〒380-8553)

**アマダエンジニアリングセンター, 伊勢原市石田 350 (〒259-1196)

M. Iwadore, T. Mizuno*, K. Koyama**, T. Anzai**, and H. Yamada*

Graduate School, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380-8553

* Faculty of Engineering, Shinshu University, 500 Wakasato, Nagano 380-8553

** Amada Engineering Center Co., Ltd., 350 Ishida, Isehara 259-1196

(1998年10月14日受理, 1999年1月21日採用)

The electrical and mechanical time constants of a moving-magnet-type linear dc motor (LDM) are required to have small values so as to realize a high-speed response LDM. This paper describes the relationship between the time constant and slot width of a moving-magnet-type LDM. The following results were obtained:

(1) The measured electrical and mechanical time constants were 10.5 ms and 1.6 ms, respectively. The calculated values of the electrical time constant obtained by the permeance method and the FEM were 13.4 ms and 10.2 ms, respectively. The calculated values of the mechanical time constant obtained by the permeance method and the FEM were 1.4 ms and 1.5 ms, respectively.

(2) When the slot width was changed from 3 mm to 8 mm, the electrical time constant decreased by 30.9% and the mechanical time constant became increased by 6.9%. Changing the slot width improved the response time by 5 ms.

Key words: moving-magnet-type linear dc motor, time constant, step response, slot width

1. まえがき

リニア直流モータ (Linear DC Motor, 以下 LDM と略記) は, 他のリニアモータに比べて構造が簡単であり高速・応答性が良い。この長所を生かして, 現在, 板金機械のプレスブレーキに用いる油圧サーボバルブに應用され, 既に実用化されている。筆者はこれまで大きな発生推力が得られる高応答な永久磁石可動形 LDM の検討, 試作を行ってきた¹⁾。LDM の更なる高応答化を実現するためには機械的時定数と電気的時定数を低減する必要がある²⁾。そこでパーミアンス法を用いた磁気回路解析により磁石可動形 LDM の時定数の表現式を導出し, さらに実際の応答についても検討した。パーミアンス法は他の磁路解析法と比べ計算が簡便であり, 有効な方法である³⁾。

本論文では機械的時定数の低減に着目して試作した磁石可動形 LDM について更なる高応答化のために以下の事項について述べるものである。

- 1) 磁石可動形 LDM の構造
- 2) 磁石可動形 LDM の時定数
- 3) スロット開口幅を変化させた場合のステップ応答

2. 磁石可動形 LDM の構造

Fig. 1 に試作した磁石可動形 LDM の構造を示し, Table 1 にその仕様を示した。LDM の外形寸法は 78×150 mm であり, ヨークおよびロッドには構造用炭素鋼 (S10C) を用いた。S10C の飽和磁束密度 (磁界の強さ 5 kA/m) は 1.6 T である。ステータに埋め込まれた 4 つのコイルは直列に接続してある。円筒状のロッドの表面には総質量 215 g の Nd-Fe-B 系

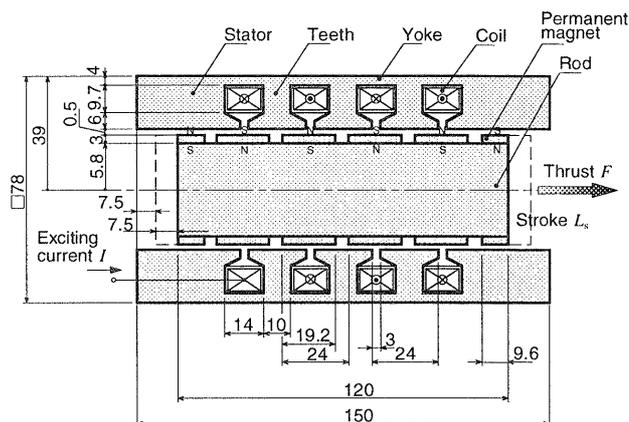


Fig. 1 Basic structure of the LDM (unit : mm).

Table 1 Principal specifications of the LDM.

Item	Symbol	Value	[Unit]	
Mover	Number of poles	p	4 poles	
	Pole pitch	τ	24 [mm]	
	Thickness of magnet	h_m	3 [mm]	
	Width of magnet	W	19.2 [mm]	
	Materials	Permanent magnet	Nd-Fe-B alloy - H_c : 903 [kA/m], B_r : 1.17[T] (BH) _{max} : 263 [kJ/m ³]	
		Rod	Low carbon steel (S10C)	
Rated stroke	L_s	± 7.5 [mm]		
Mass	m	1.097 [kg]		
Stator	Number of slots	N_s	4 slots	
	Number of turns per slot	n	156 turns	
	Slot pitch	τ_s	24 [mm]	
	Slot width	s	3 [mm]	
Material	Low carbon steel (S10C)			
Length of air gap	δ	0.5 [mm]		

永久磁石が接着してあり、可動子全体の質量は1.097 kgである。また、定格ストロークは±7.5 mmであり、固定子と可動子磁石とのギャップはリニアベアリングにより0.5 mmに保持されている。

3. 磁石可動形 LDM の時定数の表現式

等価磁気回路法は有限要素法や境界要素法などと比較して簡素であり、かつ有効な方法である³⁾。ここではパーミアンス法を用いたLDMの磁気回路解析により求めた機械的時定数 T_m 、電気的時定数 T_e について述べる。磁気回路解析にあたり、以下の仮定を設けている。

- (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。

パーミアンス法を用いたLDMの磁気回路解析から、機械的時定数 T_m は次式で表される^{4),5)}。

$$T_m = \frac{mR}{K_f^2} = \frac{m\rho l_c p \tau^2}{\zeta A_c (p+1)^2 \Phi_m^2} \quad [s] \quad (1)$$

ここに、 m ：可動子の質量 [kg]、 R ：コイル抵抗 [Ω]、 K_f ：推力定数 [N/A]、 ρ ：導線の抵抗率 [$\Omega \cdot m$]、 l_c ：コイル1巻の平均長さ [m]、 p ：極数 [極]、 τ ：磁極ピッチ [m]、 ζ ：コイルの占積率、 A_c ：巻線スペース断面積 [m^2]、 Φ_m ：1極あたりの永久磁石の磁束 [Wb]

次に電気的時定数 T_e を求めるために、まずインダクタンス L を求める。Fig. 2に示したようにLDM内部にパーミアンス $P_1 \sim P_9$ を取り、このパーミアンスの取り方をもとにFig. 3のようにコイルのインダクタンスを求めるための等価磁気回路を考える（コイル番号を左からNo. 1～4とする）。等価磁気回路からコイルそれぞれの自己インダクタンス、さらに相互インダクタンスを求めることで4つのコイルを直列に接続した場合のインダクタンス L は次式で表わされる。

$$L = n^2 \left\{ 4(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) + \frac{4P_6(P_7 + P_8 + P_9) + 2P_6^2}{3P_6 + 2(P_7 + P_8 + P_9)} \right\} \quad [H] \quad (2)$$

ここに、 n ：コイルの巻数 [回]、 $P_1 \sim P_9$ ：LDM内部のパーミアンス [H]

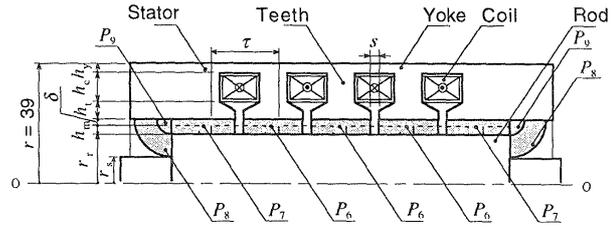
また、4つのコイルを直列に接続した場合の巻線抵抗 R は、次式で求められる。

$$R = \frac{\rho \zeta l_c A_c p}{\pi^2 (d/2)^4} \quad [\Omega] \quad (3)$$

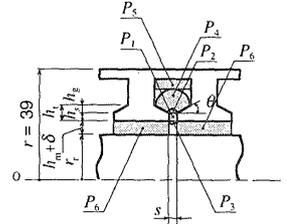
ここに、 d ：コイル巻線の直径 [m]

以上、インダクタンス L と抵抗 R から電気的時定数 T_e は次式で表わされる。

$$T_e = \frac{L}{R} = \frac{\zeta A_c}{4\rho l_c} \left\{ 4(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) + \frac{4P_6(P_7 + P_8 + P_9) + 2P_6^2}{3P_6 + 2(P_7 + P_8 + P_9)} \right\} \quad [s] \quad (4)$$



(a) Permeance in the LDM



(b) Permeance in the slot of the LDM

Fig. 2 Permeance P_n ($n = 1-9$) in the LDM for calculating the inductance L of the coil (unit : mm).

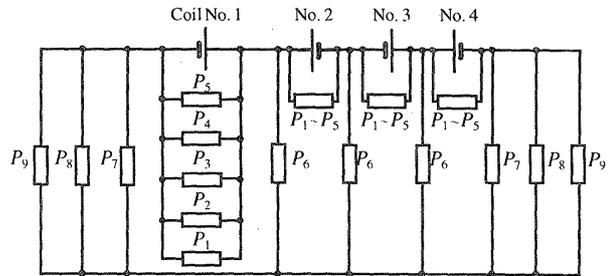


Fig. 3 Magnetic equivalent circuit for calculating the inductance of the LDM.

4 スロット開口幅に依存する時定数

4.1 機械的及び電気的時定数の計算結果

Fig. 4にコイルにステップ電圧を入力したときの電流のステップ応答を示した。電気的時定数の実測値は10.5 msであった。パーミアンス法および有限要素法 (FEM) による計算値は、それぞれ13.4 msおよび10.2 msであり、計算誤差は、28%および3%となった。パーミアンス法による計算では渦電流による影響を考慮に入れていないため、ステップ応答のような動的な特性に対して計算誤差が大きくなったと考えられる。質量、抵抗そして推力定数の実測値より式(1)を用いて算出した機械的時定数の実測値は1.6 msであり、パーミアンス法およびFEMによる計算値はそれぞれ1.4 msおよび1.5 msとなり、計算誤差は12.5%および12%であった。FEM解析では、磁性材料の非線形磁気特性および渦電流を考慮し、さらに電気回路とを連成して電流のステップ応答を計算した。

Table 2に変位 $x = 0$ mmにおけるパーミアンス $P_1 \sim P_9$ の割合を示した。 P_6 、 P_7 の割合は35%以上でありスロットの開口幅 s を大きくすることで全体のパーミアンスを小さくできる。同じくTable 2に s を8 mmに変化させた場合のパーミアンスを示した。即ち s を大きくすることで全体のインダクタンスが小さくなり、電気的時定数 T_e を低減できることを示唆している。Fig. 5に s だけ（その他寸法は一定）を変化させた場合の T_m 、 T_e の計算値を示した。スロット開口幅 s が大

きくなると、磁石からみた磁気抵抗が増加するため推力定数 K_f が減少して、 T_m は増加した。また P_1, P_3, P_4, P_6, P_7 が減少するため T_c は減少した。 $s = 3$ mm から 8 mm に変化させると機械的時定数 T_m は 6.9% 増加するのに対して電気的時定数 T_c は 30.9% 減少する効果が見られた。パーミアンス法

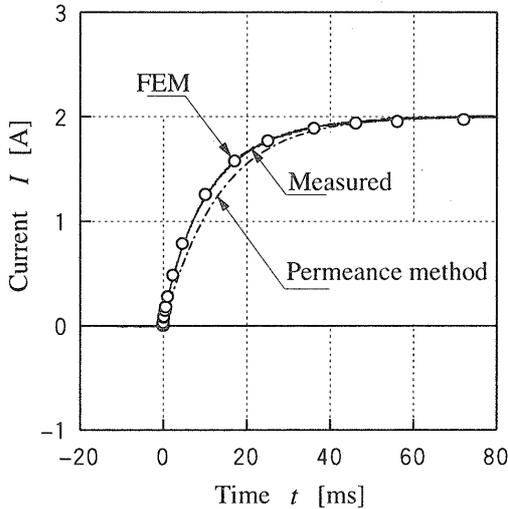


Fig. 4 Step response of the LDM ($x = 0$ mm).

Table 2 Dependence of the permeance P_n on the slot width s in each area of the LDM ($x = 0$ mm at $s = 3$ and 6 mm).

Permeance, P_n	$s = 3$ mm		$s = 8$ mm
	Calculated value [μ H]	Percentage %	Calculated value [μ H]
P_1	0.17	7.0	0.06 (-64.7%)
P_2	0.05	2.0	0.05
P_3	0.05	2.0	0.05
P_4	0.13	5.6	0.07 (-46.2%)
P_5	0.09	3.8	0.08 (-11.1%)
P_6	0.83	35.2	0.63 (-24.1%)
P_7	0.89	37.7	0.79 (-11.2%)
P_8	0.08	3.4	0.08
P_9	0.08	3.2	0.08
$P_1 \sim P_9$	2.37	100.0	1.88 (-20.7%)

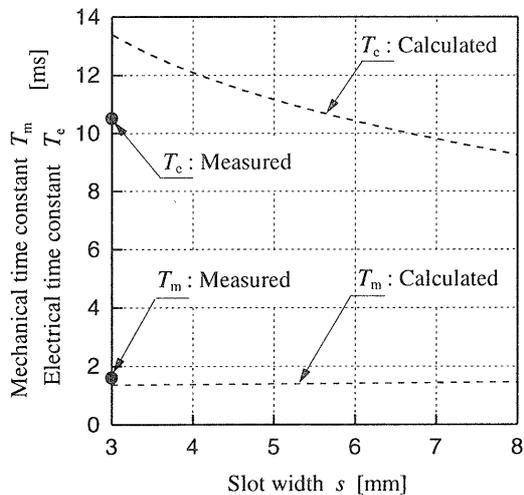


Fig. 5 Calculated results of the electrical and mechanical time constants T_m and T_c vs. the slot width s .

ではLDM各部分のパーミアンスの割合を容易に明らかにできるためLDMの形状を検討する場合、極めて有用である。

4.2 ステップ応答

Fig. 6 に LDM のブロック線図を示した。LDM にステップ電圧 E を入力したときの入力電流 I 、可動子の速度 v 及び変位 x を計算する。同図から下式の連立微分方程式が得られる。ただしインダクタンス L 、抵抗 R は式(2)、(3)により算出された計算値を用いる。

$$E - K_c v = L \frac{dI}{dt} + Ri$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{K_f I - F_f}{m}$$
(5)

ここに、 K_c : 逆起電力定数 [N/A], I : 入力電流 [A], v : 可動子の速度 [m/s], F_f : 摩擦力 [N]

次にステップ応答の実測と計算との比較を行う。Fig. 7 にステップ電圧 10 V を入力したときの入力電流、変位の実測

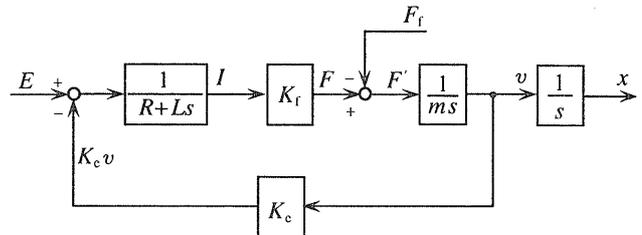
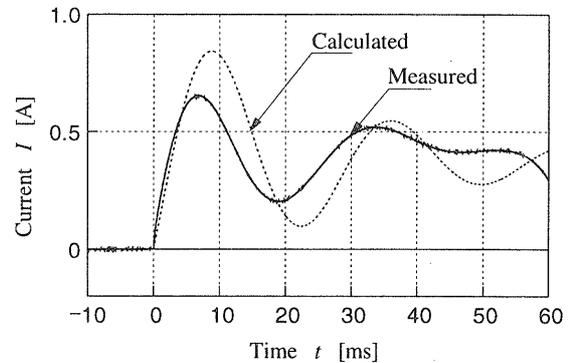
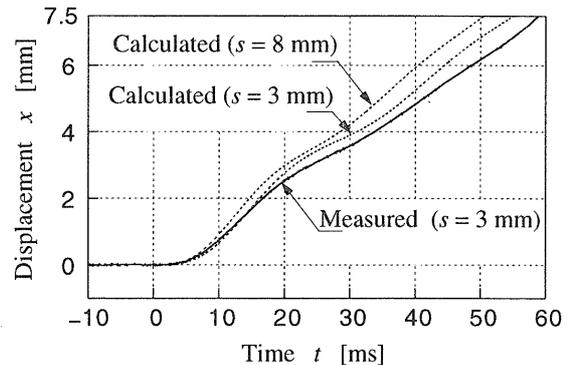


Fig. 6 Block diagram of the LDM.



(a) Input current

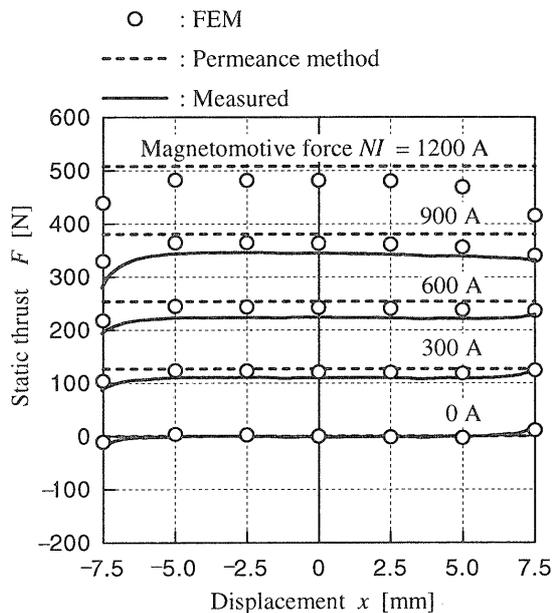


(b) Displacement

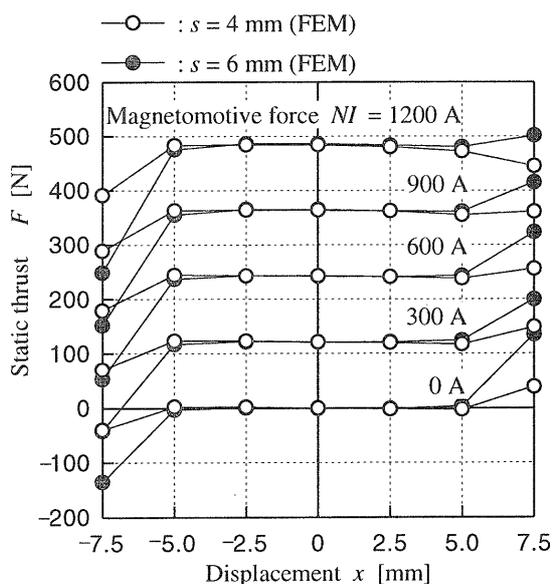
Fig. 7 Step response of the LDM (step voltage : 10 V).

値と計算値を示した。変位が定格ストロークである $x=7.5$ mmに達するまでの時間は実測値58.9 msに対して計算値55.0 msであり誤差4.5%となった。電流及び変位における計算誤差は、本手法では渦電流、端部等でのディテント力 (Fig. 8 参照)などを考慮していないためであると考えられる。

さらにスロット開口幅 s を変化させた場合のステップ応答の変化を計算した。Fig. 7 (b)にスロット開口幅 s を変化させた場合のステップ応答を示した。現在の寸法である $s=3$ mmから s を8 mmに大きくすると可動子の応答が速くなっていることを示している。定格ストローク7.5 mmに達するまでの時間の計算値は $s=3$ mmで55.1 msであるのに対して $s=4, 6, 8$ mmでは53.0, 51.5, 50.5 msとなった。



(a) Measured and calculated values ($s = 3$ mm)



(b) Calculated value ($s = 4$ and 6 mm)

Fig. 8 Static thrust F vs. exciting current I characteristics of the LDM ($x = 0$ mm).

4.3 静推力-変位特性

スロット開口幅を大きくすると、可動子磁石と固定子とのギャップ中の磁束が変位に対して不均一になり、変位に対して安定した推力が得られなくなる。したがってスロット開口幅を変化させる場合、推力-変位特性に注意する必要がある。Fig. 8に静推力-変位特性を示した。 $s = 3$ mmの場合、実測の推力定数60.7 N/Aに対してパーミアンス法および有限要素法を用いた計算値はそれぞれ66.1, 62.8 N/Aであり計算誤差8.9と3.5%であった。計算値は傾向、値とも実測とよく一致しており静推力の計算法の妥当性が確認できた。

s が6 mm以上の場合、ディテント力の影響により変位端部において安定した静推力が得られなかった。ストローク ± 7.5 mmが必要とされる場合、変位に対して安定した推力を得るためには s は現状の3 mmから4 mm程度まで大きくできる。

5. あとがき

パーミアンス法を用いてLDMの機械的・電氣的時定数、ステップ応答を計算した。さらにスロット開口幅を変化させたときの時定数、ステップ応答について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 磁石可動形LDMの機械的及び電氣的時定数の表現式を導出した。さらにステップ応答の計算をおこなった。パーミアンス法ではLDM各部分のパーミアンスの割合を容易に明らかにできるためLDMの形状を検討する上で、極めて有用である。

(2) パーミアンス法による計算において、ステップ応答 $x = 7.5$ mmに達するまでの時間は実測値58.9 msに対して計算値55.0 msであり誤差4.5%である。

(3) スロット開口幅 $s = 3$ mmから8 mmに変化させると、パーミアンス法による時定数の表現式から、機械的時定数 T_m は6.9%増加するのに対して電氣的時定数 T_e は30.9%減少する傾向が見られた。定格ストローク7.5 mmに達するまでの時間の計算値は $s = 3$ mmで55.0 msに対し $s = 4, 6, 8$ mmでは53.0, 51.5, 50.5 msとなった。変位に対して安定した推力を得るためには s は4 mm程度まで大きくできる。

文献

- 1) 水野 勉, 安西 哲也, 北村 利光, 中村 明, 宮下 利人, 山田 一: 磁石可動形リニア直流モータの静推力特性, 日本応用磁気学会誌, Vol.21, No.4-2, pp.837-840,1997.
- 2) 山田 一: リニアモータとその応用, 工業調査会, p.43, 1981.
- 3) S.A.Nasar, C.Chen: Magnet circuit analysis of a tubular permanent linear alternator, Electric Machines and Power Systems, Vol.13,361-371,1987.
- 4) 水野 勉, 七原 正輝, 小山 勝巳, 安西 哲也, 脇若 弘之, 山田 一: 磁石可動形リニア直流モータの機械的時定数に関する考察, 電気学会リニアドライブ研究会資料, No.LD-97-52, pp.39-44,1997.
- 5) 水野 勉, 七原 正輝, 小山 勝巳, 安西 哲也, 脇若 弘之, 山田 一: 磁石可動形リニア直流モータの機械的時定数についての検討, 日本応用磁気学会誌, Vol.22, No.4-2, pp.921-924, 1998.