閉ループ制御形リニアパルスモータの動的応答解析

Dynamic Response Analysis of Linear Pulse Motor under Closed Loop Control

平田勝弘・各務嘉郎・矢野坂雅巳*・石原好之**・戸高敏之**

松下電工(株)評価技術センター・*生産技術研究所, 大阪府門真市門真 1048 (☎571)

**同志社大学工学部電気工学科, 京都市上京区烏丸今出川 (☎602)

K. Hirata, Y. Kagami, M. Yanosaka*, Y. Ishihara** and T. Todaka**

Evaluation & Reliability Technology Center and *Production Engineering Research Laboratory,

Matsushita Electric Works, Ltd., 1048 Kadoma, Osaka 571

**Dept. of Electrical Engineering, Doshisha Univ., Kamigyo-ku, Kyoto 602

This paper presents a method of dynamic response analysis of a linear pulse motor under closed loop control, in which characteristics of the magnetic circuit and the control circuit of the motor are taken into consideration. This method was applied to a double-sided linear pulse motor with permanent magnets and the influence of current control on the accelerating performance was investigated. Validity was verified through comparison of computed and measured results. Besides optimum condition of control was obtained from the result of average dynamic thrust in each control mode.

Key words: dynamic response analysis, linear pulse motor, closed loop control, Runge-Kutta method, thrust force, building up current, magnetic field, FEM

1. ま え が き

リニアパルスモータは直線運動に変換機構が不要で、機構が簡単、推力/体積比が大きいなどの利点があると同時に、閉ループ制御では走行性のばらつき、振動・脱調の誘発、位置決め精度の限界などの問題がある。そのため位置センサなどによる閉ループ制御を用いることで、上記問題の解決を図っている¹⁾。高速性を生かした

モータの設計を行う上で、動的応答を明らかにすることは極めて重要であり、その解析手法についていくつか報告されている^{2),3)}が、それらは開ループ制御下での動的応答を対象としたものである。

そこで、本研究では閉ループ制御時の制御回路特性および磁気回路特性を考慮した動的応答解析手法を検討し、両側式リニアパルスモータへ適用した。実験結果との比較により、その実用性を確認するとともに最適な制御方法の検討を行ったので報告する。

2. 解析モデルと動作モード

2.1 モータの基本構造

本研究に用いた両側式リニアパルスモータの基本構造を Fig. 1 に示す。本モータは可動子および固定子から成り、両ギャップ間隔は 0.175 mm である。固定子は 2.56 mm のピッチで等間隔に並べられた複数の磁極歯を有している。可動子は中央部に希土類磁石が配され、各磁極にはそれぞれ 300 回のコイルが巻回された 2 個の電磁石で構成されている。なお、可動子の各磁極 a, b, c, d は固定子と同ピッチで配置された 10 個の歯を有し、固定子との相対位置ずれは a を 0 とすれば順に 1/2, 3/4, 1/4 ピッチである。本モータは、チョッピング回路によ

Fig. 1 Basic construction of a double-sided linear pulse motor.

Fig. 2 Operating mode of motor-control.

る定電流 2 相励磁で駆動され、可動子とともに移動テーブル上に固定された、磁気誘導形センサを用いて閉ループ制御を行っている。

2.2 動作モード

Fig. 2 を用いて、本モータの動作モードについて説明する。通常、平均推力が最大となるように c, e の位置で電流を切り替え、モード 1 の推力波形上で動作するように制御している。しかし、可動子の速度増加とともに位置センサからの入力信号の演算遅れ時間およびコイル電流の立ち上がり時間が問題となり、推力が低下する。それを補償するためコイル励磁のタイミングを早める電流制御を行っている⁴⁾。本モデルでは位相進み角を 45° とし、b, d で電流を切り替えるモード 2 および位相進み角を 90° とし、a, c で切り替えるモード 3 の三モードを所定の速度に達した時点で切替えている。

3. 動的応答解析手法

3.1 解析手順

Fig. 3 に本解析の手順を示すが、時間、位置、速度などの初期値を設定し、速度に応じた電流切替え位置を判断する。次にセンサからの入力信号の演算遅れ時間および電流立ち上がり特性を考慮した電流値を設定し、その電流値および可動子の位置に応じた推力を算出する。求めた推力をもとに、摩擦などを考慮して、次式に示す可動子の運動方程式をルンゲクッタ法を用いて解き、可動子の位置、速度、加速度を算出する。これを時間ステップごとに計算し、加速特性を求める。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} = F(x, i_A, i_B) \pm F_c \quad (1)$$

ここに、 m : 可動子の質量、 x : 距離、 i_A : A 相電流、 i_B : B 相電流、 c : 粘性減衰係数、 F_c : クーロン摩擦、 $F(x, i_A, i_B)$: 推力

Fig. 3 Flow chart of dynamic response analysis.

3.2 励磁電流特性

測定より得られた励磁電流波形を Fig. 4 に示す。解析データとして用いるため、以下のような直線で区間近似している。

$$i = 720.0 t_s - 0.9 \quad (0 \leq t_s \leq 2.5 \times 10^{-3} \text{ s}) \quad (2)$$

$$i = 0.9 \quad (2.5 \times 10^{-3} \leq t_s) \quad (3)$$

ここに、 t_s : 電流切り換え時点からの経過時間。

なお、センサからの入力信号の演算時間は測定より、0.25 ms であった。

3.3 推力解析手法および結果

リニアパルスモータの推力算定には、筆者らがすでに提案している有限要素法と等価磁気回路法との併用法⁵⁾を用いている。推力が最大となる可動子の位置において、A, B 相の電流が等しい時の推力を電流を変化させて求めた結果を Fig. 5 に示した。両者に差が生じた理由として、本モータの八つのギャップの設計値は 0.175 mm と非常に小さく、各ギャップに不均一が生じていたものと考えられる。

Fig. 4 Building up characteristic of exciting current.

Fig. 5 Relation of maximum thrust vs. exciting current.

上記で得られた結果から、最大推力の電流特性を次に示す2次の回帰曲線で近似している。

$$F(i) = -20.82i^2 + 92.22i + 0.24 \quad (4)$$

ここに、 $F(i)$: 推力 (N), i : 電流 (A)

次に、A, B 相のコイル電流が異なる時の推力の算定は、以下の仮定に基づいて行う。

- 1) A, B 相は電氣的に 90° ずれており、モータの推力は、各相で励磁された磁極で発生する推力の合成とする。

- 2) 各相で励磁された磁極で発生する推力およびその合成推力は、位置に対して正弦的に変化する。

したがって、2相励磁によって発生する推力は次式で示される。

$$F(x, i_A, i_B) = F(i_A)/\sqrt{2} \sin 2\pi(x/p - 1/8) + F(i_B)/\sqrt{2} \sin 2\pi(x/p + 3/8) \quad (5)$$

3.4 粘性減衰係数の推定

一般にはステップ応答実験の結果から得られた減衰比をもとに粘性減衰係数を求めているが⁶⁾、本モータはクーロン摩擦力の影響が大きいと、正確な粘性減衰係数が得られない。そこで、Fig. 6 に示すように解析結果との比較から、本モータの粘性減衰係数は $c=20$ kg/s と推定した。また、クーロン摩擦力は推力測定より得られる推力曲線の往路と復路から、摩擦力を分離して求めており⁷⁾、 $F_c=4.8$ N であった。

4. 動的応答解析結果および検討

4.1 モード切替えパターンによる影響

Table 1 に示すように、モータの速度が 0.18 m/s, 0.3 m/s に達した時点で、モード1からモード2、モード3と順次切替えていく場合 (CASE I) と、モード2以降切替えない場合 (CASE II) の加速特性を求め、両者を比較した結果を Fig. 7 に示す。モータの速度が 0.40 m/s 付近までは両者に差は見られないが、CASE II ではそれ以降、急激に速度上昇が鈍り一定速度に近づいていく。

(a) Measured result

(b) Calculated result

Fig. 6 Step response of a motor.

4.2 モード切替え速度による影響

モード2, 3 への切替え速度をそれぞれ 0.18 m/s, 0.60 m/s とした場合 (CASE III) の加速特性を求め、CASE I での計算結果と比較した結果を Fig. 8 に示す。CASE III では、モータの速度が 0.40 m/s 付近から速度上昇は鈍ってくるが、 0.60 m/s でモード切替えを行った後、特性は改善され CASE I の加速曲線に近づいていく。

上記理由は、モータの速度上昇とともに位置センサからの入力信号の演算遅れ時間および電流の立ち上がり時間が問題となり推力が低下していくが、モード切替えによりコイル励磁のタイミングを早めることで、ある程度補償されるためと考えられる。Fig. 9 に示した各モードにおける平均動推力の計算結果からも、モード切替えの効果は明らかであり、本モータは速度 0.13 m/s, 0.35 m/s でモードを切替えていく制御方法が最適であることも分かった。

以上、閉ループ制御における電流切替え条件が加速特性へ与える影響を検討し、実験結果との比較によりその

Table 1 Condition of current control

CASE I	Mode 1 ($v < 0.18$ m/s) $\Rightarrow$	Mode 2 ($0.18 \leq v < 0.30$) $\Rightarrow$	Mode 3 ($0.30 \leq v$)
CASE II	Mode 1 ($v < 0.18$ m/s) $\Rightarrow$	Mode 2 ($0.18 \leq v$)	
CASE III	Mode 1 ($v < 0.18$ m/s) $\Rightarrow$	Mode 2 ($0.18 \leq v < 0.60$) $\Rightarrow$	Mode 3 ($0.60 \leq v$)

Fig. 7 Influence by pattern of switching mode.

Fig. 8 Influence by velocity of switching mode.

妥当性を確認できた。

5. あとがき

閉ループ制御下におけるリニアパルスモータの動的応答を明らかにするため、制御回路特性および磁気回路特性を考慮した解析手法を検討した。本手法を両側式リニアパルスモータへ適用し、モード切替えパターンおよび切替え速度が加速特性へ与える影響を検討した。その結果、実験結果と非常に良く一致し、本解析手法の実用性を確認した。

また、各モード単独での平均動推力特性の計算結果よ

Fig. 9 Average dynamic thrust of each mode.

り、本モータは、現状の三モード切替え方式では、速度 0.13 m/s、0.35 m/s でモードを順次切替えていくことで、速度上昇に伴う推力低下を最小限に抑えることができることがわかった。

今後、さらに細かくモードを分けて最適な制御を実現する予定である。

文 献

- 1) 松崎一浩, 榊 陽, 山田 一: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-89-98, p. 1 (1989).
- 2) 山本行雄, 海老原大樹, 山田 一: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-86-32, p. 71 (1986).
- 3) 山本行雄, 山田 一: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-89-186, p. 29 (1989).
- 4) 水野 勉, 山田 一, 山本 栄: 電気学会論文誌, D1-10, p. 903 (1988).
- 5) K. Hirata, Y. Kagami, M. Yanosaka, Y. Ishihara and T. Todaka: on contributing to COMPUMAG (1991).
- 6) 山田 一, 祖川憲司, 水野 勉, 山本行雄: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-81-56, p. 19 (1981).
- 7) 山本行雄, 山田 一, 三輪善一郎: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-83-88, p. 31 (1983).

1990年12月4日受理, 1991年2月28日採録