二相8極形リニアパルスモータの特性解析

正員 海老原 大樹 (武蔵工大) 准員 佐藤 文彦 (武蔵工大)

1. ま え が き

近年, OA 機器, FA 機器などの駆動源として, リニアモータの利用が活発となっている⁽¹⁾。そのなかにおいて, リニアパルスモータ (以下, LPM と略記) は開ループ制御で速度制御, 位置決め制御が行え, しかもダイレクトドライブ駆動であるため, 駆動回路を含めたトータルシステムとしてシンプルになる利点を有する⁽²⁾。現在, LPM の種類には VR 形 (Variable Reluctance Type), PM 形 (Permanent Magnet Type), HB 形 (Hybrid Type) があるが, 小形 LPM では, 二相4極形の HB 形が主流を成す。しかし, 二相4極形 LPM は同一励磁電流時においても, 励磁相の違いにより静推力特性の相違があるため, 発生推力の不均一に起因する加減速時の脈動, 振動の発生や位置決め精度などに影響を与えるこれらの原因として, 以下のことが挙げられる。

機械的な要因として,

- (i) 歯の加工精度の誤差
- (ii) 各極間の歯ピッチのずれ
- (iii) エアギャップ長の不揃い

磁気的な要因として,

- (i) 極の漏れパーミアンスの不平衡
- (ii) 磁路長の違い
- (iii) 磁気ヒステリシス

などが挙げられるが, 現状の LPM 利用において, ほぼ満足のいく誤差範囲内に製作されている。しかし今後, 更に高度な利用法が必要となったとき, 基本的に LPM の設計を見直す必要がある。

この対応手段として, 位置決め精度を向上させるため通常の極に補助極を付け加えた例がある⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし, この方法は位置決め時のみ歯ピッチの小さい補助極を使用する方法であり, モータの磁気回路を改良し

たものではない。

また, LPM の駆動方法としては, 巻線に方形波の電流を与える方形波駆動が一般的であるが, この方法は駆動回路が比較的簡単である利点を有する反面, 共振, 振動, 騒音などが発生する。これに対し, 巻線に正弦波あるいは三角波の電流を与えるマイクロステップ駆動は滑らかに駆動ができるため, 振動, 騒音などの問題を大幅に軽減できるばかりではなく, 駆動回路により分解能を増やせるという利点を有する。すなわち, マイクロステップ駆動は位置決め性能の向上が可能となり今後の利用が期待されている⁽⁵⁾。そのためには, LPM の各励磁相における静推力特性の均一性が不可欠であり, LPM の特性改良が必要となる。

これらの観点から, 著者らはモータの磁気回路の改良により励磁相の違いによる静推力特性の相違を軽減し, マイクロステップ駆動時にも安定した制御性能を発揮できる HB 形の二相8極形 LPM を考案した。

本論文は, 初めに励磁相の違いによる静推力特性の均一性につき二相4極形 LPM と二相8極形 LPM との解析および実験の両面から比較を行う。次に, 方形波駆動およびマイクロステップ駆動を行うことを考慮して, 二相8極形 LPM の歯寸法変化に対する静推力特性の高調波解析を行う。推力波形のゆがみに影響を与える高調波成分の存在は, LPM の位置決め性能や, マイクロステップ駆動時の滑らか運転に大きな影響を与える。以上の解析結果より, 各駆動方法に適する二相8極形 LPM の歯寸法について検討する。

2. LPM の構造

LPM は基本的に回転形ステッピングモータと同一原理であり, 入力パルス信号に応じて所定のステップ量を直線的に移動するモータである⁽²⁾。移動子の運動は入力パルス信号に同期して歩進することから, 開ループ制御での利用が多く, 具体的にはこれらの特徴を生かしてタイプライタやプリンタ, X-Y プロッタのヘッド送りなどに利用されている。

図1(a)は二相4極形 LPM 構造図を示し, (b)図は二相8極形 LPM 構造図を示す。固定子は両 LPM とも一定の極ピッチ τ の2列の突極をもち, 二相4極

Analysis for the Characteristic of Two-Phase Eight-Pole Type Linear Pulse Motor. By Daiki Ebihara, Member & Fumihiko Satoh, Associate (Faculty of Engineering, Musashi Institute of Technology).

海老原大樹: 正員, 武蔵工業大学電気電子工学科

佐藤文彦: 准員, 武蔵工業大学電気電子工学科〔現在, 三菱電機(株)勤務〕

(a) 二相4極形 LPM 構造図
(a) Construction of two-phase 4-pole type LPM.

(b) 二相8極形 LPM 構造図
(b) Construction of two-phase 8-pole type LPM.

図 1

Fig. 1.

形 LPM では $\pi/4$ 、二相8極形 LPM では $\pi/2$ ずれて配置されている。移動子は両 LPM とも、鉄心 α 、 β 、2枚の永久磁石、バックプレートから構成されている。また、二相4極形 LPM は鉄心 α 、 β とも、それぞれ電気角 180° ずれた二つの極からなっており、鉄心 α 、 β では電気角 90° ずれている。二相8極形 LPM では鉄心 α 、 β とも、それぞれ電気角 90° ずつずれた四つの極からなっており、鉄心 α 、 β では電気角 180° ずれている。また、両 LPM は表1に示すようにほぼ同一の機械的、電気的特性を持っている。

二相4極では、図1(a)に示すように、A極の中心線が固定子鉄心の誘導子の中心と一致しているとき、他極では必ず偏差を有する。これに対し、二相8極では図1(b)に示すように、鉄心 α と鉄心 β に分かれるものの、A極と A' 極が誘導子中心線で一致している (B と B' 、 $\bar{A}$ と $\bar{A}'$ 、 $\bar{B}$ と $\bar{B}'$ も同様)。

次に、動作原理は両機とも永久磁石と電磁石の合成磁束により説明できる。すなわち、各励磁ごとに合成磁束を集中させる極を移動させ、固定子側の歯との吸引力により推力を発生させる。

例えば、AB相を励磁した場合の振舞につき、二相

表 1 LPM の仕様

Table 1. Specification of LPM.

機械的仕様		電気的仕様	
項 目	値	項 目	値
歯 数 (/極)	5	相 数 (相)	2
極ピッチ (mm)	2	コイル巻線数 (/極)	200
歯 幅 (mm)	1	巻 線 直 径 (mm)	0.25
溝 幅 (mm)	1	巻線抵抗 (8極) (Ω /相)	20
歯奥行き (mm)	14	巻線抵抗 (4極) (Ω /相)	10
ギャップ (μ m)	100		

4極と二相8極の磁気回路を比較してみよう。この際、永久磁石は鉄心 α 側が N 極、鉄心 β 側を S 極とする。

二相4極の場合、図1(a)において、A極とB極では永久磁石の磁束を強め合うため、合成磁束はA極から鉄心 α へ流入し、鉄心 β からB極を通るループが考えられる。

従って、A極と鉄心 α の誘導子、B極と鉄心 β の誘導子のそれぞれに吸引力が働きバランスした位置で停止する。

これに対し二相8極では、図1(b)において鉄心 α 側のA極と鉄心 β 側の A' 極に合成磁束が集中するため、それぞれが誘導子と一致する方向に吸引力が働く。

二相8極では、電磁石の磁路が永久磁石鉄心を通らず、鉄心 α 側と鉄心 β 側に独立して構成されやすい状況であるため、永久磁石磁束の影響を受けにくい。

これに対し、二相4極では電磁石による磁路が、バックプレートや永久磁石および鉄心 α と鉄心 β の両方を通るループを構成しやすいため、永久磁石の影響を受けやすいと考えられる。

3. 静推力特性の比較

励磁状態が違う場合について、二相4極形 LPM と二相8極形 LPM との静推力特性の比較を行う。図2(a)、(b)にそれぞれ二相4極形 LPM と二相8極形 LPM の磁気等価回路を示す。図2において、 $P_{\alpha A} \sim P_{\alpha B}$ がギャップパーミアンスである。また、 P_m 、 NI_m はそれぞれ永久磁石のパーミアンス、起磁力であり、 $NI_A \sim NI_B$ は励磁電流の起磁力である。これらの値の計算方法は次章で述べる。

励磁相の違いにより静推力特性に相違が生じる磁気的な理由として、(i) LPM の外側の極と内側の極での漏れパーミアンスの不均衡、(ii) 励磁相の違いによる磁路長の違い、(iii) 磁気ヒステリシスなどが挙げられる。

以上の事柄を踏まえて両磁気等価回路を比較する

と、(i)については、二相8極形 LPM では鉄心 α 、鉄心 β にそれぞれ A 相と B 相があり、しかもその相配置が鉄心 α と鉄心 β で逆になっているため、どの相を励磁しても主磁束が外側の極と内側の極を通る構造になっている。従って、パーミヤンスの不均衡による静推力特性の違いが少ない。二相4極形 LPM の場合は、A 相が鉄心 α 、B 相が鉄心 β にある構造なので、主磁束が外側の極か内側の極を通る構造になっているので、パーミヤンスの不均衡の影響が大きい。また(ii)の励磁相の違いによる磁路長の違いによる影響については、一相励磁では両 LPM と励磁相の違いによる磁路長の違いはほとんどないが、二相励磁では二相4極形 LPM は磁路長の違いが

図 3

Fig. 3.

二相8極形 LPM よりも大きく生じることがわかる。(iii)の磁気ヒステリシスによる影響については両 LPM と同じであり、残留磁気は静推力特性に対し影響を与えと思われる。

図3は二相励磁における二相4極形 LPM と二相8極形 LPM の静推力特性を示す。両図とも励磁巻線のアンペア回数は 100 A であり、測定条件は同一である。また、極数の違いにより歯の面積が違うので、縦軸は接線応力(静推力/歯の面積)を用いた。図3から、二相8極形 LPM は二相4極形 LPM と比べて、励磁相の違いによる静推力特性の違いが少ないことがわかる。解析値と実験値との差は、モータの機械的な誤差のためと思われる。

以上のことより、二相8極形 LPM は、マイクロステップ駆動時にも安定した制御性能を発揮できると判断する。すなわち、一定の発生推力を保った状態で、ほぼ定速の磁極移動が行え、移動子が滑らかに移動す

ることから、振動、騒音の軽減に効果がある。

4. 二相8極形 LPM の静推力高調波解析

二相8極形 LPM に方形波駆動およびマイクロステップ駆動を行うことを考慮して、二相8極形 LPM の静推力高調波解析を行い、各駆動方法に適する LPM の歯寸法について検討する。静推力の計算方法としては、磁気スカラーポテンシャルを用いた有限要素法により LPM の小歯一つあたりのギャップパーミアンスを求め、その値を用いて磁気等価回路を解き、LPM の静推力の計算を行った。

〈4.1〉 ギャップパーミアンスの計算方法 図4にギャップパーミアンスの計算モデル図を示す。ギャップパーミアンスの計算方法として、磁気スカラーポテンシャルを用いた有限要素法を用いた。領域を二次元場とし、領域中に電流がないことから、マクスウェルの方程式より次式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial \Omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial \Omega}{\partial y} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 Ω : 磁気スカラーポテンシャル、 μ_x , μ_y : 透磁率

境界条件として、境界 AB , $A'B'$ は固定境界条件、境界 AA' , BB' は周期境界条件とした。設定条件として、移動子と固定子の歯は一定の極ピッチで周期的に並んでいるものとし、領域は線形場とした。

境界 AB , $A'B'$ の磁位をそれぞれ Ω_1 , Ω_2 とすると、領域にかかる起磁力 $\mathcal{F}$ は、

$$\mathcal{F} = \Omega_2 - \Omega_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1)式を解くことにより磁束 ϕ が求まり、(2)式から起磁力 $\mathcal{F}$ が求まる。従って、ギャップパーミアンス P_g は次式で得られる。

$$P_g = \phi / \mathcal{F} \quad \dots\dots\dots (3)$$

〈4.2〉 ギャップパーミアンスの計算結果 図5はこの計算より得られた変位-ギャップパーミアンス

図4 ギャップパーミアンス計算モデル図

Fig. 4. Calculation model of gap permeance.

図5 変位-ギャップパーミアンス特性

Fig. 5. Gap permeance versus displacement.

特性を示す。同図より、ギャップパーミアンスは τ を1周期とする余弦波状となっていることがわかる。従って、ギャップパーミアンスは次式で表される。

$$P_g(x) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos \frac{2\pi}{\tau} nx \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 n : 高調波次数、 τ : 極ピッチ、 C_0 : ギャップパーミアンス直流成分、 C_n : ギャップパーミアンス高調波振幅

図6は a'/τ -ギャップパーミアンス高調波振幅 C_n 特性を示す。同図より、 C_n は極幅が変化することにより大きく変化し、実用可能な範囲である $a'/\tau = 0.30 \sim 0.60$ に注目すると、奇数次高調波は $a'/\tau = 0.40 \sim 0.45$ 付近で大きくなり、逆に偶数次高調波は小さくなっている。

〈4.3〉 静推力の計算方法 (4)式で求めたギャップパーミアンス値を、図2(b)に示す磁気等価回路に用いる。この磁気等価回路を解くと、磁気伴随エネルギー W_m が求まり、それを変位 x で微分することにより静推力 F_x が求まる。すなわち、

$$F_x = \frac{\partial W_m}{\partial x} = \frac{1}{2} (NI_0)^2 \frac{\partial P_g(x)}{\partial x} \\ = -\frac{2\pi}{\tau} \sum_{n=1}^{\infty} n D_n(i) \sin \frac{2\pi}{\tau} nx \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 W_m : 磁気伴随エネルギー、 $P_g(x)$: ギャップパーミアンス、 NI_0 : ギャップ印加起磁力、 i : 励磁電流、 $D_n(i)$: 高調波振幅

〈4.4〉 静推力の計算結果 図7(a), (b)は、そ

図 6 a'/τ -ギャップパーミアンス
高調波振幅 C_n 特性

Fig. 6. Harmonic amplitude C_n of the gap permeance versus a'/τ .

れぞれ一相励磁、二相励磁における二相8極形 LPM の電流-静推力特性である。両図において、第四調波以上の高調波成分は値が小さいので省略した。一相励磁、二相励磁とも、奇数次高調波は電流に対しほぼ線形の関係となり、偶数次高調波はほぼ電流の二乗に比例している。また、一相励磁と二相励磁では、基本波に対する第三調波の位相関係は逆になっている。両図とも実験値と計算値はほぼ一致しているが、電流が大きくなるにつれて差が生じている。これは、鉄心の磁気飽和の影響と思われる。

図 8 (a) は a'/τ -静推力基本波成分特性を示し、図 8 (b) は a'/τ -静推力高調波成分特性を示す。これらの図より、以下に方形波駆動、マイクロステップ駆動に適する推力および代表的な歯寸法の例を示す。

- (1) 方形波駆動の場合
 - (i) 静推力の基本波成分が大きいこと
 - (ii) 基本波以外の成分は位置決めを考えた場合、基本波と同位相になること

これに適する歯寸法は、

$$a/\tau = 0.40, \quad a'/\tau = 0.35$$

- (2) マイクロステップ駆動の場合

- (i) 静推力の基本波成分が大きいこと
- (ii) 基本波以外の成分は小さいこと

これに適する歯寸法は、

$$a/\tau = 0.30, \quad a'/\tau = 0.43$$

図 9 は方形波駆動およびマイクロステップ駆動に適する変位-静推力特性を示す。(a) 図は方形波駆動に

(a) 一相励磁

(b) 二相励磁

図 7 二相8極形 LPM の電流-静推力特性

Fig. 7. Standstill force of two-phase 8-pole type LPM versus current.

適する静推力特性であり、静推力の基本波に対しほかの高調波は同位相になっているので、安定点付近での静推力の傾きが大きく、位置決め精度が良い。(b) 図はマイクロステップ駆動に適する特性であり、静推力の基本波以外の成分はほぼ零になっているので、静推力は正弦波に近くなっている。

以上、静推力高調波解析について述べたが、これらの計算結果はすべて線形場での結果であるので、 a/τ 、 a'/τ が小さくなるにつれて磁気飽和が起こりやすく

(a) 方形波駆動に適する静推力特性
(a) Standstill force suitable for the rectangle drive.

(b) マイクロステップ駆動に適する静推力特性
(b) Standstill force suitable for the micro-step drive.

図 9

Fig. 9.

図 8 a'/τ -静推力基本波成分特性

Fig. 8. Fundamental component of standstill force versus a'/τ .

なるため、実際の値とは多少のずれを生じると思われる。

5. あとがき

著者らは、励磁相の違いによる静推力特性の相違を軽減した二相 8 極形 LPM を考案し、まず初めに二相 4 極形 LPM との静推力特性の均一性について比較を行った。次に、二相 8 極形 LPM に方形波駆動およびマイクロステップ駆動を行うことを考慮して、歯寸法変化に対する静推力特性の高調波解析を行った。

その結果、二相 8 極形 LPM は二相 4 極形 LPM と比較して各励磁相における静推力特性は等しく、安定した制御性能を発揮できることがわかった。更に、各駆動方法に適する LPM の歯寸法が明らかになった。

なお、本研究に対し熱心な討論をいただいた電気学

会リニア電磁駆動システム調査専門委員会（委員長、東京大学工学部 正田英介教授）の方々、モータの製作に協力していただいたオリエンタルモータ（株）百目鬼英雄氏および実験ならびに解析に協力していただいた当研究室 丸山秀典君、村田洋君、山本純一君に対し心よりお礼を述べる次第であります。

（昭和 62 年 1 月 19 日受付）

文 献

- (1) 山田、他：リニアモータ応用ハンドブック（昭 61）工業調査会
- (2) 電気学会編：リニアモータとその応用（昭 59）
- (3) O. Podzimek: Paper of Technical Meeting on Magnetics, MAG-84-102, 55（昭 59）
- (4) O. Roubicek, et al.: Proc. ICEM '84 Conf. (1984)
- (5) 海老原：オートメーション, p. 26（昭 61-9）日本工業新聞社
- (6) 海老原、他：電気学会マグネティックス研資, MAG-86-122, 41（昭 61）
- (7) 長坂：同上, MAG-83-13, 39（昭 58）
- (8) 山本・山田：電学論 B, 104, 265（昭 56-5）
- (9) 酒井：信学論 J 62-D, 379（昭 54-6）