オープンコア形単相リニアアクチュエータの 始動特性算定法

正員 藤田 宏 (富山大学)
 正員 前田 勉 (石川工業高等専門学校)
 正員 作井 正昭 (富山大学)
 正員 中村 文孝 (シャープ㈱)
 学生員 井ノ口 英明 (三ツ葉電気製作所㈱)

Calculation Method of Starting Characteristics of Single Phase Linear Actuator with Open Magnetic Circuit

Hiroshi Fujita, Member (Toyama University)

Tsutomu Maeda, Member (Ishikawa National College of Technology)

Masaaki Sakui, Member (Toyama University)

Fumitaka Nakamura, Member (Sharp Corp.)

Hideaki Inokuchi, Member (Mitsuba Electric M. F. G.)

Recently, many types of the linear actuator are studied and used to get the direct linear motion. This paper is concerned with the most simple linear actuator which is constructed with a horizontal rod-type iron core, a single-phase excitation coil and a moving aluminum ring on which the thrust is exerted. This is the same construction as the well-known jumping ring experiment system. To analyze the characteristics of this actuator, the most difficult point for analysis is how to obtain the formula to show the flux distribution because the magnetic circuit is opened. One new method used the infinite element method (FEM) is proposed for the reason that FEM is optimum to know the numerical flux distribution, but the basic method of analysis which was used in earlier papers is based on the equivalent circuit introduced by dual circuit theory. The calculated values of starting characteristics by this proposed method show close agreement with the experimental ones. This new method must be useful for the system having the open magnetic circuit.

キーワード：リニアアクチュエータ，オープン磁路，始動特性，等価回路，有限要素法

1. まえがき

近年、直接線形動作を呈する動力装置に対する要求の増大から、リニアアクチュエータに関する研究が活発に行われている。筆者等は先に電磁誘導形の交流磁気浮揚システム⁽¹⁾や半閉磁路形リニアアクチュエータ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾に関する解析結果について報告した。これらの装置の基本となるのはいずれも Laithwaite 氏や Jayawant 氏等によって報告された Jumping Ring⁽⁵⁾⁽⁶⁾や Oscillating Motor⁽⁷⁾が原理となっている。また、アクチュエータとしては Burgess 氏等によって報告された電磁θガン⁽⁸⁾も同じ原理といえる。さらに、最近では同様の構造の LOA の特性解析に関する報告⁽⁹⁾もある。

上述の筆者等が検討したアクチュエータやθガンなどは構造的に磁気回路が半閉磁路を成すため、磁気等価回路や磁束密度分布などが比較的求めやすい。しかし、Jumping Ring や Oscillating Motor は磁気回路がオープンであり特

性解析の基本となる磁束密度分布の推測が非常に困難である。なお、この構造のものの無負荷時における磁束密度分布を実測値から指数近似により求めたものがあるが⁽⁷⁾、実際の分布とはかなり異なる結果となっている。さらに、この解析方法では完成機から求められる実測値を用いなければならないことから、設計段階で特性算定をすることは不可能である。

筆者等はこれらの問題点を解決するため、磁束密度分布を求める際に有限要素法を適用し、その結果からアルミニウムリングの位置の変化に対応した推力を求めるための電気等価回路と回路定数決定法を導いた。電気等価回路を用いて特性算定を行う手法はこれまでに同様の装置に適用しその有効性を示しているものである。^{(1)~(4)} さらに、この等価回路から算定した始動時の推力等を実測値と比較し、この方法の妥当性を立証した。ここに提案する算定手法は同様の構造を有する電磁誘導形の磁気浮揚装置やリニ

アシステムの特性算定を設計段階において行うために有効に利用されるものとする。

2. 構造

対象とした装置は図1に示すように、wire coreで構成した鉄心と励磁巻線および被加速子のアルミニウムリングで構成される。Jamping Ringの実験装置を水平に配置し、リングが一方方向に加速されるようにしたものである。なお、鉄心を wire core で構成するのはわずかに電流を軽減するためである。

励磁巻線に単相交流を加えると、リングに誘導電流が流れ、励磁磁束との間にフレミングの法則による推力が生じ、リングは図中の矢印の方向に加速される。始動条件を一定にするため励磁回路にはゼロクロス形の SSR(光点弧サイリスタスイッチ)を用いて通電している。

図1 構造
Fig. 1. Construction.

3. 推力発生原理

リングの誘導電流はリングに誘導起電力が生じることによって流れる。また、誘導起電力の大きさは鎖交磁束数によって決まるが、鎖交磁束数はリングの位置によって変化する。鉄心の軸方向を x 軸とし、励磁巻線の中心からリングの中心までの距離を x' としたとき、誘導起電力を $E(x)$ 、半径方向の磁束密度を $B(x)$ 、リングの誘導電流密度を $J(x)$ 、リングの導電率を κ で表せば、任意の位置 x における推力密度 $f(x)$ は次式で与えられる。

$$f(x) = J(x) B(x) \quad (1)$$

従って、リングの長さを l 、平均半径を r 、厚さを d とすれば、全平均推力 F は次式で与えられる。

$$F = 2\pi r d \int_{x'-1/2}^{x'+1/2} J(x) B(x) \cos\theta(x) dx \quad (2)$$

ここでは推力の発生原理を定性的に示したが、 x に関する定量的な $J(x)$ 、 $B(x)$ 、 $\cos\theta(x)$ を電気等価回路を使用して算出し、さらに推力 F などの特性を求める方法について述べる。

4. 電気等価回路

図2 磁束分布
Fig. 2. Flux distribution.

図3 磁気等価回路
Fig. 3. Equivalent magnetic circuit.

図4 電気等価回路
Fig. 4. Equivalent electric circuit.

磁束分布を図2のように考慮すると、装置全体を図3の磁気等価回路で表すことができる。図中の記号は次の値を示すものである。

- Φ_c = 主磁束 (励磁巻線による全磁束)
- Φ_{cl} = Φ_c のうちリングと鎖交しない漏れ磁束
- Φ_{cr} = Φ_c のうちリングと鎖交する磁束
- Φ_R = リング内の誘導電流により発生し、励磁巻線と鎖交しない磁束

F = 励磁巻線の起磁力、 F_R = リングの起磁力

F_w = 鉄損抵抗に相当する巻線の起磁力

ただし、図3の磁気等価回路を求めるには、リングを励磁巻線と同じ巻数に置き換えるという⁽⁵⁾一般的な手法を適用し、さらに鉄心中に生じる鉄損を考慮するための仮想巻線を設けるなどの工夫が必要である。

図3の回路に双対変換理論⁽¹⁰⁾を適用すると図4の電気等価回路が得られる。図中の記号はそれぞれ次の値を示している。

- V : 励磁電圧
- R_c : 励磁巻線抵抗
- R_w : 鉄損抵抗
- R_R : リングの抵抗
- L_c : 励磁巻線の磁束のうちリングと鎖交する磁束に

よるインダクタンス

L_{cl} : 励磁巻線の磁束のうちリングに鎖交しない磁束によるインダクタンス(漏れインダクタンス)

L_R : リング電流による磁束のうち励磁巻線と鎖交しない磁束によるインダクタンス

なお、等価回路においては R_R および L_R などの二次側の諸量は一次換算値として R_R' および L_R' のように ' を付けて表すことにする。また、これらの回路定数の具体的な求め方は付録に詳しく説明する。

図4の電気等価回路において次の電圧に関する連立方程式が成立する。ただし、電源周波数を f とし、各インダクタンスは $2\pi f$ を乗じてリアクタンスに置き換えている。

$$\begin{aligned} V &= (R_c + R_w)I_c - R_w I_w \\ 0 &= -R_w I_c + \{R_w + j(X_c + X_{cl})\}I_w - jX_c I_R' \\ 0 &= -jX_c I_w + \{R_R' + j(X_R' + X_c)\}I_R' \end{aligned} \quad (3)$$

この方程式を解き各電流を求めるが、 I_R' はリング中に流れる電流である。また、 I_c はリング挿入時の励磁電流であり実測値との比較が可能である。

5. 特性算定法

(3)式の連立方程式を解くことにより、電流 I_c, I_R' を求めることができる。推力を算定するには I_c, I_R' の電流値

の他に、各電流による磁束を合成した合成磁束密度 B および磁束密度を算出するための電流の位相 θ_c, θ_R 値を知る必要がある。

<5.1> リング誘導電流 I_R とその位相 θ_R (3)式における各値はリングの位置によってその大きさが変化するので、各値を x の関数として表現する。(3)式から得られた電源電圧の位相を基準とすれば電流の位相 $\theta_R'(x)$ は電流 I_R' を複素数 $I_R'(x) = I_{Rr}'(x) + j I_{Ri}'(x)$ で表現し、

$$\theta_R'(x) = \cos^{-1} \{ I_{Rr}'(x) / \sqrt{I_{Rr}'(x)^2 + I_{Ri}'(x)^2} \} \quad (4)$$

で与えられる。また、リング電流 I_R' は一次換算値であり、実際に必要なリングに流れる電流 I_R の大きさは次式によって求められる。

$$|I_R(x)| = (N_c / N_R) |I_R'(x)| \quad (5)$$

$\theta_R(x)$ および $|I_R(x)|$ の変化の一例を示すと図5および図6に示すようになる。

<5.2> 励磁巻線電流 $I_c(x)$ とその位相 θ_c リングの位置における磁束密度とその位相を算定するには、リングの誘導電流とその位相だけではなく、励磁巻線電流 $I_c(x)$ とその位相 θ_c も必要である。<5.1> の場合と同様に、 $I_c(x) = I_{cr}(x) + j I_{ci}(x)$ とすれば、電流の位相 θ_c は次式で与えられる。

図5 リング電流
Fig. 5. Ring current.

図7 励磁巻線電流
Fig. 7. Coil current.

図6 リング電流の位相
Fig. 6. Phase of ring current.

図8 励磁巻線電流の位相
Fig. 8. Phase of coil current.

図9 励磁電流およびリング電流による磁束密度分布
Fig. 9. Flux density distributions caused by coil current and ring current.

図10 磁束密度のベクトル図
Fig. 10. Phasors of flux densities.

図11 合成磁束密度
Fig. 11. Total flux density.

図12 合成磁束密度の位相
Fig. 12. Phase of total flux density.

$$\theta_c(x) = \cos^{-1} [I_{cr}(x) / \sqrt{\{I_{cr}(x)^2 + I_{ci}(x)^2\}}] \quad (6)$$

$\theta_c(x)$ および $I_c(x)$ もリングの位置によって大きさが変わるが、一例を示すと図7および図8に示すようになる。

<5.3> リングの位置における磁束密度と位相 リング誘導電流 I_R から磁束密度 B_R 、巻線電流 I_c から磁束密度 B_c をそれぞれ有限要素法によって計算すると図9のような分布を得る。磁束密度 B_R および B_c と位相 θ_R および θ_c より図10に示す関係を考慮して、合成磁束密度 B を求める。このときの合成磁束密度の大きさ $|B|$ およびその位相 θ は図11および図12のように変化する。

<5.4> 推力 F リング誘導電流 I_R および磁束密度 B の大きさが得られたが、さらに推力の計算に必要な I_R と B の間の位相差 θ は

$$\theta = (\theta_R + \theta_c) / 2 - \theta_R \quad (7)$$

によって求められる。これより、リングに作用する推力は

$$F = 2\pi r d \int_{x'-1/2}^{x'+1/2} |B(x)| |I_R(x)| \cos \theta(x) dx \quad (8)$$

から求められる。

6. 計算値と実測値の比較

図1の装置に示したように、リングの大きさあるいは鉄心に対する励磁巻線の位置などを変えることにより、リングに作用する推力の大きさが変化することは当然予想される。しかし、本論文では解析手法の妥当性を証明することを主目的とすることから、リングの大きさが厚さ4mm、長さ40mmの場合のみについて検討した。また、計算においてはリングを細分割して行う方法⁽³⁾もあるが、同様の理由から、ここではリングを一個として扱い、計算回数を少なくしている。

<6.1> リングが存在しない場合 リングが存在しない場合は励磁電流による磁束のみが分布する。このときの磁束密度分布の計算値と実測値を比較した結果が図13である。

図13 リングが存在しないときの磁束密度分布
Fig. 13. Flux density distribution when a ring is not inserted.

図14 リングが存在するときの磁束密度分布
Fig. 14. Flux density distribution when a ring is inserted.

図15 磁束密度の位相
Fig. 15. Phase of flux density.

図16 励磁電流とリング位置の関係
Fig. 16. Relation between exciting current and ring position.

計算値は有限要素法によって得た値であるが、実測値と極めてよく一致している。なお、有限要素法の適用においては二次元軸対象問題として扱った。

〈6.2〉リングを挿入した場合 リングを挿入した場合はリングが存在しない場合に比べて種々の変化が生じる。

図17 力率とリング位置の関係
Fig. 17. Relation between power factor and ring position.

図18 推力とリング位置の関係
Fig. 18. Relation between thrust and ring position.

リングが任意の位置に在るときの磁束密度および位相の分布を求めた結果の一例を図14および図15に示す。また、リングの位置を変化させたときの励磁電流、力率および推力を求めた結果を図16、図17および図18に示した。計算値と実測値との間の誤差は鉄損を一定として計算したことが一因と考えられるが、極めて僅かなものといえる。

7. あとがき

本論文は、設計段階においてオープン磁路を有するリニアアクチュエータの特性算定を行う一手法を提案したものであるが、その内容をまとめると次のようになる。

- (1) 磁気回路が閉回路に近い場合の解析手法として、磁気等価回路から導かれる電気等価回路を使用する方法が有効であることは既に報告した。^{(6)~(8)} この方法を磁路が完全にオープンである装置に適用することを試みた。
- (2) 基本となる磁束密度分布を求めるには有限要素法を適用することが極めて有効である。
- (3) 本論文では始動時における特性について検討したが、計算値と実測値は極めてよく一致し、提案した手法がオープン磁路を有する装置に対しても有効であることを示すことができた。

付 録

(4) 実際の動作状態では、リング位置が変化することによって等価回路の回路定数、特に鉄損の値が変わることが予想される。ただし、図17および図18の実験結果から、鉄損を一定として扱うことに因る影響は実用上さほど大きいものではない。しかし、理論的にはこのことについて考慮する必要がある。

(5) 本論文で検討した装置は jumping ring の実験装置を横方向にして利用したものである。この装置において、励磁巻線を鉄心の両端にそれぞれ配置し、さらに励磁回路にコンデンサを接続することによって、Occillating Motor として利用できる。従って、Occillating Motor の場合においても完成機を必要としない本論文の解析手法の有効性を確かめることが次の課題である。

最後に、電気学会リニアドライブ研究会において本研究に対し有意義な御討議を戴きました各位に深く感謝いたします。

(平成 7年10月23日受付, 平成 8年 4月15日再受付)

文 献

- (1) 藤田 宏・増川伸二・作井正昭・高安勇吉:「交流磁気浮揚システムの浮揚力算定法」電学論B, 102, 620~626 (昭57-9)
- (2) 前田 勉・藤田 宏・濱崎 仁:「半閉磁路形単相交流リニアアクチュエータ」電学論D, 108, 749~756 (昭63-8)
- (3) 前田 勉・藤田 宏:「磁気飽和を考慮した半閉磁路形単相交流リニアアクチュエータの特性」電学論D, 110, 403~409 (平2-4)
- (4) 前田 勉・藤田 宏:「コンデンサ放電電流により駆動される半閉磁路形リニアアクチュエータの特性」電学論D, 112, 972~976 (平4-10)
- (5) E.R.Laithwaite: "Induction Machines for Special Purposes", NEWNES (GB) (1966)
- (6) B. V. Jayawant: "Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques", Edward Arnord (1981)
- (7) J. C. West · B. V. Jayawant: "A New Linear Oscillating Motor", I. E. E(GB) (1962-8)
- (8) T.J.Burgess·E.C.Cnare·W.L.Oberkamp·S.G.Beard and M.Cowan: "The Electromagnetic θ Gun and Tubular Projectiles", IEEE Trans. Mag-18, No.1 (1982)
- (9) 長谷部・鹿野・伊藤:「LOAにおける体積力の性質」, 電気学会マグネティクス研究会資料, MAG-87-168 (1987-11)
- (10) 宮入庄太:「エネルギー変換工学入門」, 33-47, 丸善 (1967)
- (11) Brosan · Heyden: "Advanced Electrical Power and Machines", Sir Isaac Pitman (LONDON) (1966)
- (12) 加川幸雄・村山健一:「BASICによる電気・電子有限要素法」, 科学技術出版社 (1986)

電気等価回路の回路定数算定法

<1> R_c , R_w の算定 励磁巻線抵抗 R_c は簡単な計算または実測によって求められる。鉄損抵抗 R_w は装置固有の値であり、リングを除いた無負荷状態における無負荷

付図1. 無負荷等価回路

app. Fig.1. No-load equivalent circuit.

試験から求められる。無負荷時の等価回路は付図1のようになる。

無負荷試験電圧を V_0 , 電流を I_0 , 損失を W_0 とすれば、鉄損 R_w は次式で与えられる。

$$R_w = (W_0 / I_0^2) - R_c \quad \text{----- (付1)}$$

なお、ここでは鉄心と励磁巻線の位置関係が定まることで鉄損を求め、一定値として扱うことで始動時の特性を算定することになる。リングが存在し、さらにその位置が変化する動作状態ではこの値も変化することが考えられる。従って、動作状態における厳密な特性算定にはこのことを考慮する必要がある。

<2> L_c および L_{cl} の算定 L_c , L_{cl} を算定するには磁束分布を正確に求める必要がある。しかし、本装置のようにオープン磁路を有するものでは、磁束分布を数式によって表現することは極めて困難である。このため有限要素法を用いた磁束密度分布シミュレーションを行いその結果を利用する。

付図2. 励磁電流による磁束密度分布

app. Fig.2. Flux density distribution by the exciting current.

鉄心表面における半径方向の磁束密度 B は付図 2 のように分布する。この結果から L_c および L_{cl} を求め、励磁巻線の断面積を S_c 、励磁電流を I_c 、巻線の電流密度を J_c とすれば、

$$\Phi_{cr} = 2\pi r \int_{x'}^{\infty} B(x) dx \quad \text{----- (付2)}$$

$$\Phi_{cl} = 2\pi r \int_0^{x'} B(x) dx \quad \text{----- (付3)}$$

$$I_c = J_c S_c / N_c \quad \text{----- (付4)}$$

$$L_c = N_c (\Phi_c / I_c) \quad \text{----- (付5)}$$

$$L_{cl} = N_c (\Phi_{cl} / I_c) \quad \text{----- (付6)}$$

ここで、 x' はリングの中心位置、 N_c は励磁巻線の巻数である。

<3> L_R の算定 リングの漏れインダクタンス L_R も L_c 、 L_{cl} と同様に有限要素法によって求めた磁束密度分布から算定する。リング中に任意の大きさの電流が流れたときの磁束密度分布は付図 3 のように求められることから、リングの漏れ磁束 Φ_{Rl} は次式で与えられる。

$$\Phi_{Rl} = 2\pi r \int_0^{x'} B_R(x) dx \quad \text{----- (付7)}$$

よって、リング漏れインダクタンス L_R は

$$L_R = N_R (\Phi_{Rl} / I_R) \quad \text{----- (付8)}$$

で与えられる。ここで N_R はリングの巻数 (=1) である。

さらにこの値を一次側に換算すると、

$$L_R' = (N_c / N_R)^2 L_R \quad \text{----- (付9)}$$

となる。ここで N_c は励磁巻線の巻数である。

<4> リングの抵抗 R_R リング抵抗は次式から求める。

$$R_R = \frac{\pi (D_o + D_i)}{l d} \{1 + \alpha (T - t)\} \quad \text{----- (付10)}$$

ここで、 D_o はリングの外径、 D_i はリングの内径、 α はアルミニウムの温度係数、 T は基準温度、 t は室温である。さらに、得られた値を一次側へ換算すると次のようになる。

$$R_R' = (N_c / N_R)^2 R_R \quad \text{----- (付11)}$$

付図 3 リング電流による磁束密度分布

app. Fig.3. Flux density distribution by the ring current.

藤田 宏 (正員) 昭和7年2月12日生。29年富山大学工学部電気工学科卒業。29年(株)明電舎入社。38年富山大学工学部電気工学科勤務。41年同助教授。49年同教授、現在に至る。電気機器学、電動応用を担当。この間、IM、パワーエレクトロニクス、リニアアクチュエータ、磁気応用装置の研究に従事。工学博士。IEEE、電気設備学会会員。

前田 勉 (正員) 昭和19年1月5日生。45年富山大学大学院工学研究科修了。45年石川工業高等専門学校電気工学科勤務。54年同助教授。63年同教授、現在に至る。電気機器、電気機器設計、電動応用工学を担当。この間、特殊磁気回路を形成する変圧器、リニアアクチュエータに関する研究に従事。工学博士。

作井 正昭 (正員) 昭和24年10月27日生。49年富山大学大学院工学研究科修了。49年富山大学工学部助手。平成2年同講師。4年助教授、現在に至る。電気機器学、電気・電子工学製図を担当。この間、サイリスタ応用、インバータ・コンバータ、磁気応用の研究に従事。工学博士。IEEE、電気設備学会会員。

中村 文孝 (正員) 昭和41年5月21日生。平成2年八戸工業大学電気工学科卒業。4年富山大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。4年シャープ(株)入社、現在に至る。3年度北陸支部連合大会優秀論文発表賞受賞。

井ノ口 英明 (学生員) 昭和45年11月14日生。平成7年富山大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。7年(株)三ツ葉電気製作所入社、現在に至る。6年度北陸支部連合大会優秀論文発表賞受賞。