円筒状リニア誘導モータの推力/入力比と寸法

正 員 内 海 達 見 (東海大)

Thrust/Input-power Ratios and Size of Annular Linear Induction Motor

Tatsumi Utsumi, Member (Tokai University)

The characteristics by the changing scale of size in annular linear induction motors are not clear so far. In this paper, therefore, the thrust/input power ratios by the changing scale of pole pitch and radius of the annular linear induction motor are clarified theoretically and experimentally under the conditions of constant voltage source and of constant current source. The theoretical analysis is given by the electromagnetic field equations in analytical model and the circuit equation in equivalent circuit. In experiment, the thrust/input power ratios at slip 1.0 are given by changing length of size in three test prototypes.

The thrust/input power ratio in constant input voltage is inversely proportional to the length of pole pitch (one-dimensional change of size). In the two-dimensional change of size, it is little changed by the length of radius. In the three-dimensional change of size (pole pitch and radius), it shows almost the same as the characteristic of the one-dimensional change of size. In the case of constant input current, the thrust/input power ratios show the same tendency as the case of constant input voltage by influence of annular type structure.

As a result, the thrust/input power ratios depend nearly on the length of pole pitch.

キーワード：リニア誘導モータ，設計論，寸法効果，円筒状

1. ま え が き

円筒状リニア誘導モータの設計において，特性に及ぼすリニアモータ各部の寸法変化の影響は，従来あまり明らかにはされておらず，極間隔を変化した場合の推力特性について二，三の報告^{(1)~(3)}があるのみである。そこで著者は，さきに極間隔と一次巻回数を一定とし，半径方向の寸法を一定倍率で変化した場合の推力特性，入力電力特性，推力/入力比特性について発表した⁽⁴⁾。この場合，半径方向の寸法を変化することであるから，これは，二次元寸法の変化に対応している。

これに対して，円筒座標の z 軸に沿った極間隔の長さを変化することは，一次元寸法の変化に対応している。座標軸に沿うその他の寸法変化としては，円筒座標の r - θ 平面と z 軸を同時に変えた三次元寸法の

変化がある。そこで本論文においては，極間隔と半径方向の寸法を同じ倍率で変えた場合の三次元寸法の変化に対する特性を求め，さきに明らかにした二次元寸法の変化による特性と一次元寸法の変化による特性をも含めて，円筒状リニア誘導モータの寸法変化に対する特性を理論と実験から総合的に検討し，円筒状リニア誘導モータの設計に関する基礎データを提示する。

理論的検討では，さきに発表した推力方程式を用いて，各種寸法の試作モデルにおける推力を求める。この際，電気機器の設計論に用いられる磁気装荷の概念との関係を検討するため，磁気装荷一定に対応する定電圧入力での推力/入力比を実験より求め，計算値と比較検討する。また，電気装荷一定に対応する定電流入力での推力/入力比も，同様に検討する。

2. 解析モデルと試作機との関係

<2・1> 解析モデルの推力 図1は円筒状リニア

図 1 円筒状ニア誘導モータの解析モデル
Fig. 1. Analytical model of annular linear induction motor.

誘導モータの解析モデルであり、次の領域から構成されている。

- 領域Ⅰ：二次鉄心， $\sigma=0$ ， $\mu=\mu_0\mu_{s2}$
- 領域Ⅱ：空けき， $\sigma=0$ ， $\mu=\mu_0$
- 領域Ⅲ：二次導体， σ ， $\mu=\mu_0$
- 領域Ⅳ：空けき， $\sigma=0$ ， $\mu=\mu_0$
- 領域Ⅴ：一次鉄心， $\sigma=0$ ， $\mu=\mu_0\mu_{s1}$

ここで， σ ：導電率， μ_{s1} ， μ_{s2} ：一次二次鉄心の比透率

なお，領域Ⅳと領域Ⅴの間には一次電流層がある。

解析にあたり次の仮定を行う。

- (1) 一次鉄心の出入口端における端効果は無視する。
- (2) 一次電流層を流れる電流密度は $i=i_1 e^{j(\omega t - \alpha z)}$ で表されるものとする (i_1 ：一次電流密度の最大値， ω ：電源の角周波数， $\alpha=\pi/\tau$ ， τ ：極間隔)。
- (3) 領域Ⅴの外部空間の磁界は無視する。

準定常状態におけるマクスウェルの電磁方程式から、各領域の磁界を求め、更にマクスウェルの応力テンソルにより二次導体中の推力を求めると、軸方向単位長さあたりに対して次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$F_z = R_2 \mu_0 \pi (r_3 H_{r3} H_{z3}^* - r_2 H_{r2} H_{z2}^*) \cdots (1)$$

ここで， H_{r3} と， H_{r2} ： r_3 と r_2 における磁界の r 成分。 H_{z3}^* と H_{z2}^* ： r_3 と r_2 における磁界の z 成分の共役複素数

〈2・2〉 試作機の等価回路定数 解析モデルにおける一次電流密度の最大値 i_1 と試作機の三相相電圧 V_1 との関係は、図 2 の円筒状ニア誘導モータの等価回路を用いることにより、次式で与えられる⁽⁴⁾。

図 2 等価回路
Fig. 2. Equivalent circuit.

$$i_1 = \sqrt{2} m N k_w \alpha V_1 / (L_0 Z_1 \alpha + 2 m N k_w h \omega \mu_0 D_3) \cdots (2)$$

ここで， m ：相数， N ：一相スロット中の全導体数， L_0 ：一次鉄心の長さ， k_w ：巻線係数， h ：鉄心積み厚， D_3 ：一次電流層における誘導起電力の大きさ

また、一次漏れインピーダンス Z_1 を構成する一次巻線抵抗 R_1 と一次漏れリアクタンス X_1 は次式で与えられる⁽⁴⁾。なお， X_1 はスロット漏れリアクタンスのみであり、次式で示すように各スロットごとの値を加算したものである。

$$Z_1 = (R_1^2 + X_1^2)^{1/2} \cdots (3)$$

$$R_1 = K \rho L_m N_n / A_1 \cdots (4)$$

$$X_1 = \omega \sum_{n=1}^{ns} \mu_0 h (k_w N_n q / a)^2 (h_2 / b_s + h_1 / 3 b_s) \cdots (5)$$

ここで， K ：交流抵抗と直流抵抗の比， ρ ：巻線の抵抗率， L_m ：1 ターンの平均長さ， N_n ：スロット中の導体数， A_1 ：一次巻線の導体断面積， ns ：一相のスロット数， a ：一相の並列回路数， q ：一極一相のスロット数， h_1 ：一次巻線の高さ， h_2 ：一次鉄心面と巻線面との距離

(2)式により求めた i_1 を(1)式中の磁界に代入することにより、推力が得られる。

3. 寸法倍率特性

〈3・1〉 装荷と寸法 回転形誘導機器の容量は一般的に次式で表される⁽⁶⁾。

$$KVA = K_0 m Z_1 \Phi f \cdots (6)$$

ここで， K_0 ：定数， Φ ：一極あたりの磁束， f ：電源周波数， Z ：導体数

上式で $(m Z_1)$ は電気装荷を， Φ は磁気装荷を表す。すなわち，機器の容量は，電気装荷と磁気装荷と周波数との積で表される。

従って、同一原理で動作するリニア誘導モータにおいて、その電気装荷と磁気装荷の基礎的な関連を求めることは、機器の特性や設計を決定する際に重要な要因になるものと考えられる。更に、これらの装荷は、機器の寸法と密接な関係にある。そこで、磁気装荷一定に対応する定電圧入力の場合の寸法に対する特性と、電気装荷一定に対応する定電流入力の場合の寸法に対する特性とをそれぞれ検討し、装荷と寸法および推力と入力との関係を求める。なお、寸法は一定倍率で変化させるものとする。

〈3・2〉 定電圧入力

(1) 一次元寸法の変化 円筒状リニア誘導モータの一次元寸法の変化として、 z 軸すなわち極間隔を変化した場合の特性に及ぼす影響を検討する。

定電圧入力の場合、極間隔が大きくなると一極の表面積が大きくなり、磁束密度は減少し、推力は低下することになる。しかし、平板状リニアモータと異なって円筒状巻線ではコイル端部がないので、巻線抵抗 R_1 と漏れリアクタンス X_1 は、極間隔が変化しても基本的にはほとんど変わらない。従って、一次漏れインピーダンスに依存している一次電力もあまり変化しない。その結果、推力/入力比は、極間隔に反比例することになる。

(2) 二次元寸法の変化 さきに報告したように⁽⁴⁾、円筒座標の半径を変化して r - θ 平面の面積を変える二次元寸法の変化においては、半径が大きくなれば励磁面積も大きくなり、その結果、磁束密度が小さくなって推力は減少する。しかし、鉄心積み厚の増加による巻線抵抗と漏れリアクタンスの増加による一次電流の減少により、一次電力が減少する。その結果、推力/入力比はわずかに増加することになる。

(3) 三次元寸法の変化 円筒座標の三軸の長さを同時に変化する三次元寸法の変化は、二次元寸法の変化と一次元寸法の変化とを重ね合せた状態とみなすことができる。従って、推力/入力比は、一次元寸法の変化では寸法に反比例し、二次元寸法の変化では大きく変化しないので、三次元寸法の変化は一次元寸法の変化とほぼ同じ傾向をもつことになる。

〈3・3〉 定電流入力 コイル端がない円筒状リニア誘導モータの一次巻線構造のため、極間隔が変化する場合、巻線の一次漏れインピーダンスはほとんど変化しない。従って、極間隔の変化に対して入力電圧があまり変化せず、定電圧入力の特性とほぼ同じ状態を表す。

r - θ 平面の面積を変える二次元寸法の変化においては、一次巻線の半径が大きくなると、鉄心積み厚の

増加による漏れリアクタンスが増加する。従って、一定電流を維持するために一次電圧が増加し、その結果、推力も増加する。そのため、推力/入力比は半径に比例して緩やかに増加する。

三次元寸法の変化は、定電圧入力の場合と同様に、一次元寸法の変化とほぼ同じ傾向となる。

4. 実測値との比較

〈4・1〉 試作機 実験に供した三種類の円筒状リニア誘導モータの寸法を表1に示す。同表において、 d は二次導体の厚み、 g は一次鉄心と二次鉄心間の空げき長、 d/g は空げきに占める二次導体の割合を示す。

試作機 A, B, C の半径方向の寸法および極間隔は 1.5 倍の関係にある。そして、半径方向の寸法はそれぞれの極間隔により無次元化されている。また便宜上、試作機 B を倍率 1.0 の基準機とした。

積層鉄心構造の一次鉄心は、三相全節巻の 2 極機であり、巻回数は試作機 A, B, C とも同一で、一スロットあたり 90 回である。なお、計算にあたり一次鉄心の比透磁率は $\mu_{s1}=1,000$ としたが、中心軸に設置したリターン磁束用の二次鉄心は、軟鉄棒のため $\mu_{s2}=500$ と設定した。

実験は、始動時の推力をロードセルにより測定して求めた。

〈4・2〉 推力/入力比

(1) 定電圧入力の場合 磁気装荷一定の状態に対応する定電圧入力において、極間隔および半径をそれぞれ変えた場合の、推力/入力比特性の一・二・三次元寸法の変化を、図3～図6に示す。図において、実線は計算値を、破線は実測値を示す。

図3、図4の極間隔（一次元寸法）の変化の場合、推力/入力比は極間隔の増加に対してほぼ直線的に減少している。これは、極間隔の増加による磁束密度の減少のために、推力が減少したためである。図5の半

表1 円筒状リニア誘導モータの試作機寸法
Table 1. Size and scales of annular linear induction motors.

ALIM	r	r_0/r	r_0/r	r_1/r	d/g	倍 率
A	8	1.35	0.425	0.281	0.27	1.5
	12	0.9	0.281	0.188		
	18	0.6	0.188	0.125		
B	8	0.9	0.281	0.188	0.27	1.0
	12	0.6	0.188	0.125		
	18	0.4	0.125	0.083		
C	8	0.6	0.188	0.125	0.27	1/1.5
	12	0.4	0.125	0.083		
	18	0.267	0.083	0.056

図 3 極間隔に対する推力/入力比特性の計算値 (定電圧入力)
Fig. 3. Calculated values of thrust/input power ratios by pole pitch (constant input voltage).

図 4 極間隔に対する推力/入力比特性の実測値 (定電圧入力)
Fig. 4. Measured values of thrust/input power ratios by pole pitch (constant input voltage).

図 5 半径に対する推力/入力比特性 (定電圧入力)
Fig. 5. Thrust/input power ratios by radius (constant input voltage).

図 6 極間隔と半径に対する推力/入力比特性 (定電圧入力)
Fig. 6. Thrust/input power ratios by pole pitch and radius (constant input voltage).

径 (二次元寸法) の変化では、半径の増加に対する推力/入力比の変化は、あまり大きくない。また、図 6 の極間隔と半径 (三次元寸法) の変化では、表 1 から明らかなように、試作機 A・B・C の r/τ の比率は同一となる。すなわち、寸法倍率に関する限り、この三機は同一モータとみなすことができる。従って、これら三機の推力/入力比の違いは、極間隔による一次元

図 7 極間隔に対する推力/入力比特性の計算値 (定電流入力)

Fig. 7. Calculated values of thrust/input power ratios by pole pitch (constant input current).

図 8 極間隔に対する推力/入力比特性の実測値 (定電流入力)

Fig. 8. Measured values of thrust/input power ratios by pole pitch (constant input current).

の変化によることを示している。そのため、図 4 とほぼ同じ推力/入力比の傾向を示している。なお、図 5 において、寸法倍率が増加した場合に計算値と実測値との差が大きくなっているが、これは計算値が鉄損を考慮していないためである。

図 9 半径に対する推力/入力比特性 (定電流入力)

Fig. 9. Thrust/input power ratios by radius (constant input current).

図 10 極間隔と半径に対する推力/入力比特性 (定電流入力)

Fig. 10. Thrust/input power ratios by pole pitch and radius (constant input current).

(2) 定電流入力の場合 電気装荷一定の状態に対応する定電流入力特性を図 7～図 10 に示す。

図 7、図 8 の極間隔 (一次元寸法) の変化の場合、図 3、図 4 の定電圧入力と比較すると、ほぼ同じ傾向を示している。計算値である図 7 の定電流入力における極間隔 8 cm の場合の推力/入力比は、図 3 の定電圧入力値よりも若干増大している。これは、鉄損を考

慮していない推力 F_x の計算値に対して、入力電力 P_i が鉄損を含んだ実測値であるため、この鉄損の両電源による相違によるものである。しかし、図4と図8の実測値を比較すると、両者の間にはあまり大きな相違は認められない。また、図9の半径（二次元寸法）の変化では、極間隔と寸法倍率が大きい場合に、推力/入力比は多少増加している。図10の極間隔と半径（三次元寸法）の変化の場合は、一次元寸法の変化と同じ傾向を示しているが、定電圧入力の場合よりも直線的に減少している。これは、寸法の増加に伴う漏れリアクタンスの増加が、定電圧入力の場合よりも大きいからである。

5. ま と め

円筒状リニア誘導モータの推力/入力比と寸法との基礎的な関係として、一・二・三次元寸法の長さを同一倍率で変化した場合の始動時の推力/入力比特性を、磁気装荷一定に対する定電圧入力と、電気装荷一定に対する定電流入力とに対してそれぞれ求めた。

定電圧入力の場合、一次元寸法の変化による推力/入力比は、極間隔に反比例し、二次元寸法（半径）の変化に対してはあまり変化しない。そして、三次元寸法（極間隔と半径）の変化は、一次元寸法の変化とほぼ同じ特性を示す。また、定電流入力の場合は現象としては異なるものの、結果的には定電圧入力の場合とほぼ同じ特性を示すことが明らかになった。これは、円筒状リニア誘導モータの構造に起因する現象である。

以上の結果から、円筒状リニア誘導モータの推力/

入力比は、極間隔が小さくなるほど増加し、半径の大きさにはあまり影響されないことが明らかになった。

推力/入力比と周波数との関係については、次回に報告する予定である。

終りに、研究指導を賜っている明治大学工学部高木亀一教授に深く感謝いたします。

（昭和63年12月9日受付，平成元年5月15日再受付）

文 献

- (1) Nix & Laithwaite: "Linear induction motors for low-speed and standstill application", *Proc. Instn Elect. Engrs*, 113, 1044 (1966)
- (2) 山田・竹内: 「円筒状リニアモータの推理解析」, 信州大工紀, No. 30, 37 (昭46)
- (3) 杉田: 「小形円筒状リニアインダクションモータの推特性」, 電気学会マグネティックス研資, MAG-81-51 (昭56)
- (4) 内海: 「円筒形リニアモータの寸法倍率特性」, 電学論D, 108, 261 (昭63-3)
- (5) 内海: 「円筒形誘導電磁ポンプの解析」, 同上B, 98, 663 (昭53-8)
- (6) 竹内・磯部: 新版電気機器設計学, p. 30 (昭47) オーム社

内 海 達 見 (正員)

昭和14年2月3日生。42年3月明治大学大学院博士課程単位取得退学。同年4月東海大学工学部電気工学科講師，47年4月同助教授，現在に至る。その間，55年～57年国際協力事業団派遣専門家としてタイ国に派遣。リニア誘導モータ，リニア直流モータの研究に従事。計測自動制御学会，日本応用磁気学会会員。