角筒状リニア誘導モータの縁効果とスロットごと給電方式の検討

正員 小 貫 天 (早稲田大)

正員 沼 田 宏 之 (早稲田大)

正員 山 村 次 男 (ニッテイ)

Edge Effect and Independently Supplied Slot Currents in Tubular Linear Induction Motor

Takasi Onuki, Member, Hiroyuki Numata, Member (Waseda University), Tsugio Yamamura, Member (Nittei Co. Ltd.)

The linear induction motor (LIM) is structurally divided into the flat and the tubular-type. In this paper, we study one kind of tubular linear induction motor which has the primary configuration composed of four pieces of flat-type core. We call this type of motor "the square tubular LIM". The square tubular LIM has various merits of the cylindrical tubular LIM, in addition to those of the usual flat-type LIM. There are two remarkable features of the square tubular LIM that the flat-type LIM doesn't have.

The first feature is that it has no edge effect, the second is the normal force in secondary conductor is cancelled by the that of the opposite side of the secondary conductor. Comparing with the cylindrical tubular LIM, moreover, the square tubular LIM is easy to manufacture and maintain it. The tubular LIM also has such a feature that its primary winding is a kind of ring winding, so we can independently supply the primary currents in each slot and hence easily obtain the various winding schemes.

In this paper, we study the features of the square tubular LIM. After analyzing our experimental model numerically, the motor is driven by the independently controlled slot currents, resulting expected performance.

キーワード：角筒状モータ，リニア誘導モータ，縁効果，磁界解析，スロットごと給電方式

1. ま え が き

通常のリニア誘導モータは回転形誘導モータを回転方向の一箇所まで切断し、それを平面に展開したものと考えられるが、こうしてできたりニア誘導モータを上記の展開方向と直角方向に丸めたものが、筒状リニア誘導モータである。この筒状リニア誘導モータは、ストロークの有限な動作を行うアクチュエータとしての応用が考えられる。このような筒状リニア誘導モータが通常のリニア誘導モータに優る点の一つとして、進行横方向の有限性に起因する縁効果がないことが想像される。また、筒状の場合の交流入力巻線は環状巻の

一種であり、各コイルごとに給電できるので、この特徴を活用することもできよう。

本論文は、これらの筒状リニア誘導モータが通常の平板状リニア誘導モータと相違している幾つの特徴を指摘し、それらを検討するため、平板状の一次鉄心を4個組合せて角筒状のリニア誘導モータを試作し、その基本的な特性に関し検討を行ったものである。円筒状ではなく角筒状を採用したのは、寸法などが等しい平板状との比較を実験によって確かめるためである。円筒状リニア誘導モータについて、従来幾つかの研究が見られるが、角筒状についての報告は見あたらない。特に、スロットごとに給電する方式は、円筒状

角筒状を問わず、新しい提案である。

筒状のリニア誘導モータは通常の平板状のものとは異なる性質を有するので、ここで角筒状リニア誘導モータの特徴について記述する⁽¹⁾。

(1) リニア誘導モータとしての特徴 角筒状リニア誘導モータもリニア誘導モータであるからその長所短所はそのまま受け継いでいる。すなわち、直線運動をさせたい可動体にギヤなどを介せずに直線的な推力を加えることができる。これは構造を簡潔にしガタなどを生む要素を少なくする。一方、直線運動を行う範囲全体にわたってリニアモータを構成しなければならないので、機械全体の構造が大きくなり価格も高くなる。

従って、本論文では考察対象とする機械の用途を、ある範囲の行程を有するリニアアクチュエータと考えている。

(2) 筒状リニア誘導モータとしての特徴

(i) 筒状リニア誘導モータの一次巻線は一種の環状巻であるため、コイルごとの給電を行うことが可能である。このため、巻線の極間隔の変更、すなわち同期速度の切換えが機械完成後も簡単な結線換えによって行うことができる。更に、空げき磁束密度の一意性を得るため、台形状の起磁力分布が多く採用されているが、上記の特徴を利用しその立上りの部分を短縮できることが予想される。

(ii) 一次巻線のコイル端が事実上存在しないため、銅損が少なく温度上昇も少なくできる。

(iii) 通常のリニア誘導モータにおいて現れる一次二次鉄心間の吸引力は、回転機と同様に対称の位置における吸引力が相殺するので問題がない。

(iv) 筒状リニア誘導モータの二次構造は進行直角方向に対してはエンドレスのため、通常のリニア誘導モータに生じる縁効果がないことが予想される。この結果、進行直角方向における空げき磁束や二次電流の分布の均一性が保たれ発生推力の減少を免れる。このように、一次巻線のコイル端部に相当する二次電流成分がないことも特徴の一つである。

(v) 短所としては、巻線のスロット入れ、および二次鉄心の構造とその支持方法に工夫を要する。

(vi) 角筒状を円筒状と比較すると、平板状のリニア誘導モータの鉄心を流用でき、両者の特性の比較もしやすいが、適切な二次導体を確保することや、二次鉄心の構成に苦労する。

本論文は、以上示した特徴の幾つかについて検討を行うと共に、これらの特徴を生かしたりニア誘導モータの特性改善法を提案するものである。

図 1 試作機
Fig. 1. The tubular LIM.

2. 本論文における角筒状リニア誘導モータの構成

図 1 に実験用に試作した角筒状リニア誘導モータの概観図を示す。励磁コイルは 4 個の一次鉄心のスロットを通り、二次導体を一周する環状巻の一種となっている。一次鉄心は積層されており、二次導体の構造は 2 片の L 字形アルミニウムを溶接したものを使用し、中空角筒導体である。二次鉄心は積層されていないソリッド鉄心を用いている。また、二次鉄心は二次導体と接触しない位置で固定されている。

3. 縁効果の吟味 (角筒状と平板状および各種面との比較)

角筒状と平板状の特性を比較するために、角筒状に用いた一次鉄心の一つ用いて平板状リニア誘導モータとした。図 2 は試作機における電流をパラメータとした場合の始動推力の実験結果であるが、例えば入力電力 1.5 A において角筒状の推力は 0.2 N であり、平板状は 0.04 N なので、角筒状は平板状の約 5 倍の始動推力がある。つまり、この例では角筒状は単位面積あたり平板状の 1.25 倍の推力が生じる。これは、両リニア誘導モータの縁効果の相違によるものと考えられる。この現象を理論面より以下のように検討する。

まず、二次導体分布とその推力に対する影響につい

△ : Square tubular LIM
○ : Flat-type LIM

図 2 角筒状と平板状の電流-始動推力特性
Fig. 2. Starting-thrust versus current.

図 3 解析モデル
Fig. 3. The analysis model.

で考察するため、図 3 のようなステータ上にアルミニウム片を固定した解析モデルを有限要素法により解析した。ただし、固定子による進行磁界は正弦波状であり、Z 方向成分のみと仮定する。支配方程式はマクスウェル方程式より、

$$\text{rot } \mathbf{E}_r = -\frac{\partial \mathbf{B}_{sr}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\mathbf{J}_r = \sigma \mathbf{E}_r \quad (2)$$

$$\mathbf{B}_{sr} = \mathbf{B}_s + \mathbf{B}_r$$

更に、電流ベクトルポテンシャル $\mathbf{T}$ を用いると

$$\mathbf{J}_r = \text{rot } \mathbf{T} \quad (3)$$

また、磁位 Ω を次のように定義する。

$$\mathbf{H}_r - \mathbf{T} = -\text{grad } \Omega \quad (4)$$

(1)~(4)式より(3)式を得る。ここで、 Ω は二次電流によって作られる磁界を規定するために必要な磁気スカラーポテンシャルである。

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\sigma} \text{rot } \mathbf{T} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \mu_0 (\mathbf{H}_s + \mathbf{T} - \text{grad } \Omega) \quad (5)$$

従って、二次場における支配方程式は、次式のようになる。

$$\frac{1}{\sigma} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{T}}{\partial y^2} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{H}_{sz} + \mathbf{T} - \frac{\partial \Omega}{\partial t}) \quad (6)$$

図 4 解析による渦電流分布概略
Fig. 4. Eddy current distribution.

図 5 進行横方向磁束密度分布
Fig. 5. Flux density distribution.

また、アルミ片に作用する推力は次式で求めることができる。

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_r \times \mathbf{B}_s \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{B}_s$: 一次電流による磁束密度、

$\mathbf{B}_r$: 渦電流による磁束密度、 $\mathbf{J}_r$: 渦電流密度、 $\mathbf{H}_{sz}$: $\mathbf{H}_s$ の z 方向成分

実際の計算においては、2 極の進行磁界を外力項 $\mathbf{H}_{sz}$ として与えた。要素分割は 20×20 である。このようにして求めた渦電流分布を図 4 に示す。ただし、渦電流分布は上下対称となるのでその対称性を考慮して下半分について解析を行い、結果も下半分のみを示す。角筒状では二次電流分布が y 方向成分のみと想像されるので、周期境界条件のもとで解析を行った。その結果同一面積のもとで角筒状と平板状との推力比は 1.22 となり、先に述べた実験結果とほぼ一致している。従って、角筒状の実際の渦電流分布も図 4 のように直線状であると考えられる。すなわち、縁効果がないと言える。

以上のことは、同時に空けき磁束密度が幅方向で一樣であることも意味する。この点を実験によって確かめる。

図 5 は平板状と角筒状における進行横方向の磁束密度分布の実験結果である。平板状は中くぼみになるが、角筒状はほぼ平坦な分布となり、縁効果がない

ことがわかる。

更に、図6は二次導体形状が平板状、二面（L字形）、三面（U字形）、角筒状における電流-始動推力特性の実験結果をそれぞれ表したものである⁽²⁾。

二面に発生する推力は、平板状と比べて単位面積あたり1.1倍という結果を得た。また、三面に発生する推力も1.1倍である。この結果は以下のように説明できる。もし、二面の二次導体に対して図7(a)のような二次電流分布であれば、単位面積あたりの推力は平

図6 各種面の電流-始動推力特性
Fig. 6. Starting-thrust versus current.

・ 破線内は推力に関与しない電流分

図7 二次電流分布概念図
Fig. 7. Secondary current distribution.

板状と等しいはずである。しかし、実際には(b)図のような二次電流分布であると考えられ、図における上下方向電流成分、すなわち推力に寄与する成分が多いためであると考えられる。四面の導体から成る角筒状の場合は、二次電流成分のほとんどが推力分電流であるため、実験値では1.25倍、解析値では1.22倍と更に増加している。

このように、角筒状リニア誘導モータにおいては、二次電流分布が進行直角方向になっており、いわゆる縁効果がないことが磁束分布やトルク特性から確かめられた。

4. 一次電流の新給電方式の提案

角筒状リニア誘導モータの予想される用途においては、小形化が要求されるので、一次鉄心のスロット数は必然的に少なくなり、機器の巻線方式の選択が狭められる。しかし、角筒状の巻線が環状巻であることを活用し、各々のコイルに独立した電源を設け給電するコイル別給電によって、少ないスロット数でも十分な空けき磁界を得られることが期待される。

このような考えに基づいて、まず本論文では正弦波起磁力を生じさせるような各スロット電流を決定する方式について検討する。次に、この供給電流に基づいたLIMの特性を二次元解析および実験により考察する⁽³⁾。

<4・1> 正弦波起磁力を与えるスロット電流の決定

一次元等価磁気回路を用いて、独立したスロット電流を決定する際に、以下のような仮定を行う。

(1) 鉄の透磁率は無限大とする。

(2) 一次電流の作り出す磁束密度は y 軸方向のみである。従って一次鉄心の両側における磁気抵抗は無限大で、この磁路の漏れ磁束は存在しない。

起磁力 N_i の電流が図8に示すように入端口から x_0 の

図8 一次元磁気回路
Fig. 8. One-dimensional magnetic circuit.

距離に存在するとき、アンペールの法則を適用すると

$$\phi = \frac{\mu_0 x_0 (L - x_0) W}{Lg} N_i \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 ϕ ：空げき磁束、 μ_0 ：真空の透磁率、 L ：一次鉄心長、 W ：一次鉄心幅、 g ：ギャップ長

従って、電流の左および右における磁界はそれぞれ次式のようになる。

$$H_L = -\frac{L-x_0}{Lg}Ni \dots\dots\dots (9)$$

$$H_R = \frac{x_0}{Lg} N_i \dots \dots \dots (10)$$

結局, n 個の電流が作り出す磁界は

$$\left. \begin{aligned} H(l) &= -\frac{L-x_l}{Lg} N_{il} \cdots - \frac{L-x_m}{Lg} N_{im} \\ &\quad \cdots - \frac{L-x_n}{Lg} N_{in} \\ H(m) &= \frac{x_l}{Lg} N_{il} \cdots - \frac{L-x_m}{Lg} N_{im} \\ &\quad \cdots - \frac{L-x_n}{Lg} N_{in} \\ H(n+1) &= \frac{x_l}{Lg} N_{il} \cdots \frac{x_m}{Lg} N_{im} \cdots + \frac{x_n}{Lg} N_{in} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

図 9 解析モデル
Fig. 9. Analysis model.

図 10 空げき磁束密度分布
(2 極)

図 11 空げき磁束密度分布
(4 極)

図 13 空げき磁束密度分布
(4 極)

となる。ここで、 $H(m)$ は一次鉄心を $n+1$ 個のブロックに分割したときの m 番目のブロックにおける磁界を表している。

(11)式をマトリックス表示すると次式のようになる。

$$\left[\begin{array}{ccc} \cdot & & \\ & \cdot & \\ & & \cdot \\ & & & \cdot \\ & & & & \cdot \\ & & & & & \cdot \\ & & & & & & \cdot \\ & & & & & & & \cdot \\ & & & & & & & & \cdot \\ & & & & & & & & & \cdot \\ -\frac{x_m}{Lg}N & & & & & & & & & & \cdot \end{array} \right] - \frac{L-x_m}{Lg}N \left[\begin{array}{c} i_1 \\ i_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ i_m \\ \cdot \\ i_n \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} H(1) \\ H(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ H(m) \\ \cdot \\ H(n) \end{array} \right] \quad (12)$$

(12) 式の右辺列ベクトルに、希望する磁界分布を逐次代入することにより、任意の時刻のスロット電流を求めることができる。すなわち、右辺の磁界項には正弦波磁界を与えそれを進行させることにより、一周期

図 12 空げき磁束密度分布 (6 極)
Fig.12. Flux density distribution in air gap excited by independent currents (6 poles).

Fig. 10. Flux density distribution in air gap excited by independent currents (2 poles).

Fig. 11. Flux density distribution in air gap excited by independent currents (4 poles).

Fig. 13. Flux density distribution in air gap (4 poles).

図 14 電力-始動推力特性
Fig. 14. Starting-thrust versus power.

分の電流値を求める。ただし、上式は正方マトリックスでなく、数学的に厳密な解は存在しない。そこで本論文では最小二乗法により近似解を求めることにした。

〈4・2〉 解析および実験結果 前節で決定したスロット電流が実際に正弦波磁界を作るかを理論解析と実験によって検証する。理論的な解析として、二次元有限-境界要素併用法を用いた⁽⁴⁾。また、実験においてはスロット数と同じだけの電流アンプを製作し、指示した励磁パターンに従ってマイクロコンピュータが電流値を制御できるシステムとなっている。このシステムによれば、スロットごとに振幅値と位相を任意に与えることができ、多様な励磁パターンを設定することが可能である。

解析モデルを図9に示す。渦電流が流れる二次導体(領域II)およびバックアイアン(領域III)に有限要素法を適用する。一方、境界要素法は一次鉄心(領域I)と空気領域(領域IV)に適用した。

図10～図12は、空げき磁束密度分布の解析結果と実験結果(ただし、実験結果は平均磁束密度分布のみ)を示している。これらの新給電方式による結果と比較するために、4極、1スロット短節巻の巻線に3相交流で励磁した場合における結果を図13に示した。両手法の結果を比較して、どちらが正弦波に近いかわかるのは困難であるが、平均磁束密度は解析値および実験値ともに台形波の立上り、立下りの部分が波形が改善されているのがわかる。また、入力電力をパラメータにした場合の始動推力特性を測定した結果が図

図 15 電力-始動推力特性
Fig. 15. Starting-thrust versus power.

14, 図15である。若干ではあるが同一電力のもとでは、発生推力が増大していることが見られる。

このように、スロットごとの独立給電方式は、一次鉄心上の進行磁界の振幅が一定である範囲を増加させ、多少ではあるが特性を向上させることができる。

5. む す び

本研究で考察した角筒状リニア誘導モータでは、通常の平板状リニア誘導モータにおいて生じる縁効果、すなわち進行横方向の二次導体有限性に起因する磁界の不均一性とそれに基づく特性の低下がないことが想像される。そこで、この点に関して検討を加え、有限要素法による解析と実験の両者より磁束分布の幅方向の変動がなく、本試作機の例では角筒状は平板状の単位面積あたり1.25倍の推力が生じることを確かめ、同時に解析手法の妥当性を確かめた。

また平板状リニア誘導モータでは不可能である各スロットにおけるコイルに個々に独立して給電する、コイル別給電方式を提案し、その場合の磁界解析に有限-境界要素併用法を適用し検討を行った。リニア誘導モータにとって最も有効な励磁方法は、空げき磁束分布が完全に正弦波状の進行磁界となることである。平板状リニア誘導モータでは、分布巻や短節巻を施すことにより、磁束分布を正弦波に近づける努力をしている。しかし、角筒状リニア誘導モータにおいては、提

案したコイル別給電方式により正弦波に近くなるよう励磁できる。本論文では2極、4極、6極について各コイル電流、始動推力の計算をしているが、使用した試作機はスロット数が14と比較的少ないので極数が多くなると高調波成分が大きくなる。従って、2極の励磁方法が最も大きな始動推力を発生することが推定され、実験においてこのことを確認している。

(平成元年6月6日受付, 同2年3月5日再受付)

文 献

- (1) T. Onuki, T. Yamamura & H. Sekine: "Tubular Linear Induction Motor with Square Section", Proc. International Conf. Electrical Machines, Part 1, p. 293 (1986)
- (2) 垣田・中村・長谷川・小貫・山村: 「角筒型リニア誘導機の基本特性とその制御」, 昭61電気学会大会, No. 8561
- (3) T. Yamamura, T. Onuki, K. Kakita & H. Numata: "Performance Characteristics of The Tubular Linear Induction Motor Driven by Each Slot Current Source", Proc. International Conf. Electrical Machines, Vol. 2 p. 153 (1988)
- (4) T. Yamamura, T. Onuki, K. Kakita & M. Hashimoto: "Characteristics of the Tubular Linear Induction Motor with Square Cross Section Energised by Optimized Primary", Proc. Electrical Energy Conf., p. 193 (1987)

小 貫 天 (正員)

昭和4年7月31日生。26年3月早稲田大学第一理工学部電気工学科卒業。同年4月通産省工業技術院電気試験所入所。29年4月早稲田大学理工学部助手, 専任講師・助教授を経て43年4月同大学教授, 63年10月同大学理工学研究所所長, 現在に至る。この間, 接触交流機, 増幅発電機, 脈流電動

機, リニア誘導機, 小形モータ, 磁気浮上パワー・エレクトロニクス, 磁界解析などの研究に従事。43年7月より1年間ロンドン大学 Academic Visitor としてリニア誘導機の研究に従事。工学博士。39・40年度電気学会本部および東京支部評議員。同期機専門委員会, 有限要素法調査専門委員会, うず電流場解析調査専門委員会, 回転機技術委員会の委員長を歴任。62年電気学会論文賞受賞。計測制御学会, シミュレーション学会, IEEE 会員。

沼 田 宏 之 (正員)

昭和40年1月28日生。平成元年3月早稲田大学大学院修士課程修了。在学中, リニア誘導機に関する研究に従事。同年4月横河電機(株)入社, 現在に至る。

山 村 次 男 (正員)

昭和10年6月5日生。33年3月早稲田大学第一理工学部機械工学科卒業。34年1月～37年8月アメリカ国務省招聘留学生としてMinnesota Dunwoody Instituteに留学。37年9月(株)ニッテイ入社。医療機器開発に従事, 現在に至る。工学博士。ME学会会員。