二次元二相巻線を用いた二方向リニア誘導機の駆動特性

正員 小貫 天 (早稲田大学)
 学生員 田 宇鎮 (早稲田大学)
 学生員 林 和仁 (早稲田大学)
 非会員 柳 志潤 (高麗大学)

Driving Characteristics of X-Y Linear Induction Motor with Two-dimensional Primary Winding

Takashi Onuki, Member, Woojin Jeon, Student, and Kazuhito Hayashi, Student (Waseda University)

Jiyeon Yoo, Non-member (Korea University)

In the linear induction motor (LIM), the secondary can move in two directions (X and Y) by placing the primary coils two-dimensionally. When these coils are excited in the direction of 45 electrical degree, the secondary moves to the direction, which is determined by the pole pitches of both directions and the load condition. In this paper, we propose a new type of winding scheme composed of four groups of primary exciting coils, which are shifted $\pi/2$ spatially in both directions. These coils are energized by two-phase supply with independent phase shifters. By using this winding scheme, all sides of the primary coils contribute to the secondary movement. Next, we compare the proposed winding scheme with another one using two kinds of independent exciting coils in both directions. The feature of the former is driven by a traveling magnetic field with constant amplitude when the primary coils are excited in the direction of 45 electrical degree, while the latter is simple in construction of the primary coils.

We first made both of flat type X-Y LIMs with the proposed winding scheme and with a normal one. And then, we analyzed the magnetic fields in the air-gap of these motors by the three-dimensional finite element analysis based on $A-\phi$ method, and compared the results with experimental ones. Finally, we apply the motor with the proposed winding scheme to a branch apparatus.

キーワード：二方向リニア誘導機，空間位相差，単相移相器，三次元有限要素法

1. まえがき

リニア誘導機 (Linear Induction Motor ; LIM) は二次側の構造の簡単さや保守の容易さ，また長ストローク往復運動に適していることなどから産業界における応用が広がっている。通常の LIM は主に一方向運動が目的とされており，二次側を二方向運動させるためには，何らかの機械的な変換機構や伝達装置を介する必要がある。その結果，動力伝達機構の複雑化や大型化と共に，エネルギー変換効率の低下を招く。

従来，それらの変換機構や伝達装置を用いず，単体のモータのみで，二次側の二方向運動を得るための様々な研究が行われてきた。必要とする二方向の進行磁界 (X-Y 二方向駆動もしくは回転一直進駆動) を発生させる手法として，両方向に独立したコイルグループを用いたり^{(1),(2)}，複数の一次固定子を並列運転させたり⁽³⁾といった具合である。これらの二方向モータはそれぞれの特長を活かして，前者の場合は完全な二方向駆動を要する X-Y 二方向搬送用モータや列車用分岐装置などに，そして後者の場合は掘削機やドリル駆動用モータなどへの適用が考えられる。

本稿では一次巻線に 4 つの独立したコイルグループを採用した新しい励磁法を提案する。これは X-Y 二方向に $\pi/2$ の空間的ずれを持つコイルグループにそれぞれ異なる位相の電源を供給することにより，進行磁界の方向を変えることができる。この巻線による合成磁界は二方向の巻線が密接な関係で結ばれ，一括して制御されるため，以下この巻線を一括型巻線，そしてこの巻線を用いたモータを X-Y 一括型モータと称する^{(4),(5)}。一方，X-Y 両方向にそれぞれ独立したコイルグループを有する巻線に関しても比較検討を行う。この巻線は二方向進行磁界に対しその巻線が完全に分かれているため，以下この巻線を分離型巻線，そしてこの巻線を用いたモータを X-Y 分離型モータと称する^{(2),(6)}。

本論文ではこれらの巻線を有するモータに対する比較検討を三次元有限要素法による数値シミュレーションと実験により行い，それぞれの特長を調べる。解析においては，二方向モータにおけるカレントシートと三次元境界要素法により求めた拡張カータ係数を採用した解析も行い，従来の解析と同様の結果が得られることを含めて示す。そして，最後に提案した一括型巻線を分岐装置に効果的に応用するための基礎を構築する。

2. 試作機仕様

本稿において検討を行う二方向モータはいわゆる短二次形であり、その概略図を図1に、一次巻線の配列を図2に、そして設計諸元を表1に示す。図1において、一次鉄心は無極性のフェライトと鉄板で構成されており、X方向とY方向に別々のレールを設けることで二次側の二方向運動を可能にした。バックアイアンはX方向・Y方向共に2極分の長さを有し、二次導体はそれより若干大きくとり、エンドリングの役割を持たせている。本稿では巻線の構造を簡単化するために二相電源をベースにしているが、三相電源をベースにする場合は9つのコイルグループが一次巻線として必要とされる。

図2(a)の一括型巻線において、その一次巻線はA～Dの4つのコイルグループから構成される。二相方式の採用により、コイルグループAを基準とすると、コイルグループBはX方向に $\pi/2$ 、コイルグループCはY方向に $\pi/2$ 、コイルグループDは両方向に $\pi/2$ 、空間的に位相をずらした構造となっている。これら各コイルグループにはそれぞれ異なる位相の電源が単相移相器により供給され、この位相を変えることによって、二次側の方向制御が可能となる。

図1 二方向X-Y リニア誘導機の構造
Fig.1. Structure of X-Y LIM.

図2 一次巻線の配列
Fig.2. Arrangement of primary coils.

表1 試作機の諸元

項目	記号	数値 [単位]
極ピッチ (X方向)	τ_x	0.069 [m]
(Y方向)	τ_y	0.0514 [m]
歯幅 (X方向)	W_{tx}	0.0165 [m]
(Y方向)	W_{ty}	0.0107 [m]
スロット幅 (X方向)	W_{sx}	0.018 [m]
(Y方向)	W_{sy}	0.015 [m]
スロット深さ	D_s	0.03 [m]
極数 (X, Y方向)	p_x, p_y	6
巻数	N	50 [回/極]
二次導体厚さ	d_a	0.001 [m]
二次鉄心厚さ	d_i	0.0015 [m]
エアギャップ	g	0.003 [m]
励磁電流	I	1.5 [A]
電源周波数	f	50 [Hz]

一方、図2(b)で示す分離型巻線は両方向にそれぞれ独立した巻線を採用しており、供給電源の大きさを変えることによって二次導体の方向制御が容易にできる。本研究は巻線の比較が中心であるため、一次鉄心に関する工夫⁽⁶⁾は行わず、図2の二つのタイプに対し同一構成のものを用いる。

3. X-Y一括型モータの駆動原理

〈3・1〉 進行磁界の考察 図2(a)のコイルグループにより発生する起磁力関係は、次式のように表すことができる。以下、磁界の空間高調波成分は無視する。

$$\begin{cases} h_A = H_m \sin \frac{\pi}{\tau_x} x \cdot \sin \frac{\pi}{\tau_y} y \cdot \sin(\omega t - \theta_A) \\ h_B = H_m \sin \left(\frac{\pi}{\tau_x} x - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin \frac{\pi}{\tau_y} y \cdot \sin(\omega t - \theta_B) \\ h_C = H_m \sin \frac{\pi}{\tau_x} x \cdot \sin \left(\frac{\pi}{\tau_y} y - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin(\omega t - \theta_C) \\ h_D = H_m \sin \left(\frac{\pi}{\tau_x} x - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi}{\tau_y} y - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin(\omega t - \theta_D) \end{cases} \quad \dots (1)$$

上式の右辺における第1項と第2項は空間的位相差であり、第3項は供給二相電源による時間的位相差である。ここで、 H_m は磁界の最大値、 ω は角周波数、そして θ は時間位相のずれ角である。これらの式を一つにまとめた合成磁界 h は $h = h_A + h_B + h_C + h_D$ で表され、移相器により供給電源の時間位相を変えることによって、二次側の方向制御が可能になる。つまり、第3項における供給電源の時間位相のずれ角を表2のように変えることによって、磁界の進行方向を自由(0～360度)に制御することができる。表2において、電気角 $\theta_{elec} = (\tau_x/\tau_y) \cdot \theta_{mech}$ である。

表2 進行磁界の方向と電源位相
Table 2. Traveling directions and phase angles.

電気角 [deg]	θ_A [rad]	θ_B [rad]	θ_C [rad]	θ_D [rad]
0 (X方向励磁)	0	$\pi/2$	0	$\pi/2$
:	:	:	:	:
45 (斜め方向励磁)	0	$\pi/2$	$\pi/2$	π
:	:	:	:	:
90 (Y方向励磁)	0	0	$\pi/2$	$\pi/2$
:	:	:	:	:

(a) 0度方向励磁（一括型巻線） (b) 45度方向励磁（一括型巻線） (c) 45度方向励磁（分離型巻線）

図3 進行磁界の形状

Fig.3. Configuration of the instantaneous magnetic field.

〈3・2〉 進行磁界の形状 前節の表2に基づいて、(1)式の合成磁界の瞬時値を表すと図3(a),(b)のような形状になる。これは各電気角における進行磁界の変化の概要を把握するために、XとY方向のそれぞれ2極長分における計算結果である。一体型巻線による磁界は0度方向励磁時にはかなりの脈動を有するが、45度になるにつれて、両方向の極ピッチを結ぶ直線上に振幅一定の最大値を保ちながら斜め方向に進行するようになる。一方、分離型巻線は45度励磁時に対して、その進行磁界は大きな脈動を持つようになる。表2において励磁方向を45度（ τ_x と τ_y により正規化した角度）にした場合、その合成磁界は

$$h = H_m \sin\left(\frac{\pi}{\tau_x}x + \frac{\pi}{\tau_y}y - \omega t\right) \dots\dots\dots (2)$$

となる。この磁界を生ずるようなカレントシートは Maxwell の法則 $\nabla \times H = J$ により、次式で表される。

$$\begin{cases} J_{ix} = J_m \cos\left(\frac{\pi}{\tau_x}x + \frac{\pi}{\tau_y}y - \omega t\right) \\ J_{iy} = -J_m \sin\left(\frac{\pi}{\tau_x}x + \frac{\pi}{\tau_y}y - \omega t\right) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

4. 三次元有限要素法解析

本論文では磁気ベクトルポテンシャル A と、電気スカラーポテンシャルを ϕ を考察物理量にとる $A-\phi$ 法を用いる⁽⁵⁾。

〈4・1〉 定式化 解析においては、材質は等方性とし、二次鉄心のうず電流は考慮するが飽和は無視する。また、変位電流は無視する。ここで、周知のガラーキン法を適用し、次式で定義される残差を零とおく。

$$-\int_{\Omega} \text{grad } N \times \frac{1}{\mu} \text{rot } A d\Omega - \int_{\Omega} N J_0 d\Omega + \int_{\Omega} N \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad } \phi \right) d\Omega = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$-\int_{\Omega} \text{grad } N \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad } \phi \right) d\Omega = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 μ : 透磁率 [H/m], σ : 導電率 [s/m], J_0 : 一次電流密度 [A/m²], N_i : 補間関数である。

図4に二方向 LIM の解析モデルを示す。実験機に新しい巻線方式を採用する場合、対称性がなく、解析領域が非常に大きくなるため、XZ平面前後、YZ平面左右に周期境界条件をXY平面上下に遠方境界条件を与えた。基本的に一次電

流としてはスロット内部のコイル電流を用いるが、スロット高調波を無視して現象の概要を把握するために、カレントシートによる解析も試みる。

図4 二方向 LIM の解析モデル

Fig.4. Analysis model for X-Y LIM.

〈4・2〉 拡張カータ係数の算定 解析においてカレントシートを採用する場合、エアギャップの補正が不可欠である。通常のモータはカータ係数によって補正されるが、二次元構造を持つ二方向 LIM に適応できるか定かではない。そこで、本節では境界要素法を用いて等価磁気抵抗を算出し、それから拡張カータ係数を求める。図5は対称性を考慮した 1/4 モデルであり、空気中の考察領域をラプラス場と仮定し、上下の鉄心にそれぞれ磁気スカラーポテンシャル u を与える。以上の計算による拡張カータ係数とカレントシートに基づく磁界分布などは実験とよく一致する⁽⁷⁾。

図5 カータ係数を求めるためのモデル

Fig.5. Analysis model for extended Carter's coefficient.

5. 実験・解析結果とその検討

本章では前章で述べた三次元有限要素法解析を用いて、試作機の一次側に一括型巻線と分離型巻線を採用した場合における比較検討を行い、それぞれの特長を探る。初めに各々のモータにおける二次電流の形状と空隙中磁束密度の空間分布を求め、それらの物理現象の違いが推力および垂直力に与える影響を調べる。また、特性実験により、その解析結果の妥当性を確かめる。

〈5・1〉 一括型巻線を用いる場合 二次導体における二次電流形状の解析値を図6に示す。これらの励磁方向は表2の電気角に基づいている。一括型巻線を用いると、そ

の二次電流 J_s は0度方向励磁時には4つの渦状(X, Y方向とも2極の場合)となるが、45度になるにつれ斜め方向に流れる成分が多くなる。この斜め方向成分は図3(b)の発生磁界 B_s の進行方向と垂直であるため、より大きな進行方向の力 $F_r (=J_s \times B_s)$ を発生させる。

図7は空隙中における磁束密度の空間分布である。この種のLIMにおいて、定電流駆動を用いる場合、一次側と二次側の磁気結合が増加すると空隙磁束密度は減少する。図7において、磁束密度は全体的に0度から45度方向励磁に近づくにつれ徐々に低下し、磁気結合が強まっていくことが分かる。45度から90度に対しても45度から0度までの変化と対称的に同じ傾向を呈する。

(a) 0度方向励磁

(b) 22.5度方向励磁

(c) 45度方向励磁

図6 二次電流の形状(解析値)

Fig.6. Configuration of the eddy currents (Slip=1.0).

(a) 0度方向励磁

(b) 22.5度方向励磁

(c) 45度方向励磁

図7 磁束密度の空間分布(実験値)

Fig.7. Distribution of magnetic flux density (Slip=1.0).

＜5・2＞ 分離型巻線を用いる場合 励磁方向の電気角 45 度時における二次電流の形状を図 8 に、空隙中磁束密度の実験値を図 9 に示す。分離型巻線を用いると、その二次電流は電気角が 0 度と 90 度時には片方の巻線しか励磁されないため、一般の LIM と同様に磁界の進行方向に対して垂直に流れる成分が多いが⁽⁵⁾、45 度時には進行する斜め方向に極性の異なる 2 つの大きな渦を含む形状となる。また、磁束密度の空間分布は二次導体長の有限性により、進行磁界の入口端と出口端である 4 つの辺の端部すべてに LIM 特有の高い磁束密度（端効果の影響）が測定される。

図 8 二次電流の形状（解析値）
Fig.8. Configuration of the eddy currents (Slip=1.0).

図 9 磁束密度の空間分布（実験値）
Fig.9. Distribution of magnetic flux density (Slip=1.0).

＜5・3＞ 推力と垂直力特性 二方向モータの推力及び垂直力特性を図 10、図 11 に示す。図 10 において、X-Y 一括型モータの推力特性は励磁方向の電気角が 0 度時には X-Y 分離型モータより劣るが、電気角 45 度になるにつれ分離型モータを上回るようになる。これは前者の磁束が後者に比べ、その電気角が 45 度に近づくにつれ、最大値を示す領域が広くなると共に、推力に働く二次電流成分も増加するからである。なお、カレントシートを採用した解析においても、拡張カータ係数を用いることにより妥当な結果が得られる。また、図 11 の垂直力特性においても、X-Y 分離型モータはその励磁巻線の起磁力に比例するため、電気角 45 度で最大となるが、X-Y 一括型モータはあらゆる励磁方向の電気角に対して変化が少なくなることが分かる。

(a) すべり周波数に対する推力特性（解析値）

(b) 一次起磁力に対する始動推力特性（実験値）

図 10 二方向 LIM の推力特性
Fig.10. Thrust characteristics of X-Y LIM.

図 11 一次起磁力に対する垂直力特性（実験値）
Fig.11. Vertical force versus mmf.

6. 一括型巻線を用いた分岐装置

前節での考察により、一括型巻線は斜め方向励磁に対して非常に有効であることが分かった。本節ではその長所を活用し、一括型巻線を±45 度の二方向分岐装置に応用した場合における基礎的検討を行う。図 12 は製作した分岐装置であり、その始動推力と速度特性を図 13 に示す。試作機的一次側は通常の一方向 LIM 用巻線を用いた直進部と一括型巻線を用いた分岐部に分かれており、両部分の巻線は同じ電流密度で供給される。また、±45 方向に同等の推力を得るため、X-Y 両方向共に極ピッチを 0.048[m] とした。図 13(a) において、直進部の始動推力が大きくなっているのは、一方向運動のみに関しては一方向 LIM 用巻線が一括型巻線より優れているからであり、時間が経つにつれ図 13(b) の両方向の速度は等しくなると考えられる。

図 12 一括型巻線を有する分岐装置
Fig.12. Branch apparatus with proposed winding.

(a) 分岐部における始動推力 (Slip=1.0)

(b) 速度特性 (実験値)

図 13 一括型巻線を用いた分岐特性

Fig.13. Characteristics of branch apparatus.

7. あとがき

本論文の目的は二方向運動を呈するリニア誘導モータにおいて、効果的な励磁法を開発することである。そこで、構造を簡単化するために二相電源をベースにし、X-Y 両方向にそれぞれ $\pi/2$ の空間的位相差を持つ4つの励磁コイルグループを用いた励磁法を提案した(X-Y 一括型モータ)。

このモータを既に発表されている X-Y 二方向を別個に励磁する分離型モータ^{(2),(6)}と比較し、解析及び実験により得られた結果をまとめると次のようになる。前者は励磁方向の電気角が 45 度時に高い推力が得られるため斜め方向(± 45 度)駆動に適しており、後者は 0 度と 90 度の二方向の駆動に適する。また垂直力に関し、前者があらゆる方向の励磁に対してほぼ一定の値を保つのにに対し、後者は電気角が 45 度になるにつれて急速に増加する。以上の考察により、 ± 45 度の二方向分岐を必要とする装置に効果的であると考えられ、試作機を製作して基礎的検証を行った。なお、通常

の回転機に用いられるカータ係数の概念を二次元モデルに拡張し、二方向モータにも十分適用できることを示した。

最後に、本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの研究費によることを記し、関係各位に謝意を表する。

(平成 9 年 3 月 3 日受付, 平成 9 年 6 月 11 日再受付)

文 献

- (1) E.A. Mendrela, E. Gierczak: "Double-winding rotary-linear induction motor", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, No.1, pp.47-54, (1987).
- (2) 大平・川西・正田: 「X-Y リニア誘導モータを用いた分岐装置の制御特性」, 電学論 D, Vol.108, No.5, pp.469-476, (1988).
- (3) E.A. Mendrela, J. Turowski: "Rotary-linear induction motor", IEEE Winter Power Mtng, NY, A78 091-1, (1978).
- (4) 小貫・室井・山村: 「回転リニア誘導モータの基本特性」, 電気学会回転機研究会資料, RM-90-80, pp.11-19, (1990).
- (5) 小貫・林・田藤・藤本・田: 「位相制御による X-Y 誘導モータの駆動特性」, 電気学会回転機研究会資料, RM-95-112, pp.113-122, (1995).
- (6) 大平・山本・竹内・山田: 「X-Y LIM の磁気回路解析」, 電学論 D, Vol.109, No.9, pp.675-681, (1989).
- (7) 小貫・田・伊良波・小川・林: 「二方向 LIM における境界要素法を用いたカータ係数の算定」, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-96-103, pp.39-48, (1996).

小貫 天

(正員) 昭和 4 年 7 月 3 1 日生。26 年 3 月早稲田大学第一理工学部電気工学科卒業。43 年 4 月同大学教授, 63 年同大学理工学研究所所長, 工学博士。昭和 39・40 年電気学会本部・東京支部評議員。62 年電気学会論文賞受賞。平成 6 年度電気学会業績賞受賞。IEEE 他会員。

田 宇鎮

(学生員) 昭和 42 年 3 月 3 日生。平成 3 年 2 月韓国建国大学工学部電気工学科卒業。平成 7 年 3 月早稲田大学理工学研究科修士課程修了。同年 4 月博士後期課程入学, 現在に至る。主に, 有限要素法解析に基づいた特殊モータの開発および性能向上に関する研究に従事。

林 和仁

(学生員) 昭和 48 年 12 月 27 日生。平成 8 年 3 月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年 4 月同大学理工学研究科修士課程入学, 現在に至る。主に, 二方向リニア誘導機, リニア誘導同期モータなどの特殊リニアモータの製作およびその制御に関する研究に従事。

柳 志潤

(非会員) 昭和 30 年 2 月 25 日生。昭和 52 年韓国高麗大学工学部電気工学科卒業。昭和 58 年同大学修士課程修了。昭和 62 年早稲田大学理工学研究科博士後期課程修了。工学博士。昭和 62 年～平成 3 年韓国昌原大学工学部電気工学科助教授。現在, 韓国高麗大学工学部電気工学科教授。