X-Y LIM 最適設計に関する基礎的検討

— X, Y両巻線励磁の検討 —

Basic Investigation of X-Y LIM Design Approach:
- Exciting Both X and Y Windings -

勘田 真弘・乾 成里・大平 脩一

日本大学工学部電気電子工学科, 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1(〒963-8642)

M. Kanda, S. Inui and Y. Ohira

Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Engineering, Nihon Univ.,

1-Nakagawara, Tokusada, Tamura-machi, Koriyama 963-8642

(1999 年 10 月 28 日受理, 2000 年 1 月 25 日採録)

An X-Y Linear Induction motor (X-Y LIM) is a structure having two windings in the horizontal -X and Y- axes directions. One-direction thrust is created by exciting one winding, and a two-dimensional drive becomes possible by exciting two windings at the same time. We modeled only one pole of an X-Y LIM having a three-phase, six-pole structure, and used a three-dimensional finite element analysis method that ignored end effect and the influence of winding overhang. The following characteristics were examined to obtain guidelines for future designs: (1) flux density with respect to slot depth; (2) flux density with respect to the primary current; and (3) the relationship between the air gap and the thrust.

Key words: X-Y LIM, one-pole model, two-direction winding, three-dimensional finite element method, boundary condition

1. はじめに

X-Y LIM (X-Y リニア誘導モータ) を解析する上で、従来はフーリエ級数法を用いていたが、鉄心などの形状および巻線の位置に起因する磁束の影響について論じるのは困難であった^{1), 2)}。そこで筆者らは、二次元解析では明らかにされていない点を補う目的から、三次元有限要素法を解析手法として採用し、共通磁路を形成する鉄心の歯幅や溝幅を変化させ、主磁束を増加させるための鉄心構造を選定することを目的として報告してきた^{3)~7)}。しかし、これまでは、X, Y方向巻線を別々に励磁した結果を報告したにとどまり、最適設計のための鉄心構造を選定するには不十分であった。

本論文では、歯の形状や、二次導体を考慮し、X, Y方向巻線を同時に励磁した X-Y LIM の最適設計に関する基礎的検討を行い今後の指針を得ることを目的としている^{8), 9)}。解析には 3 相 6 極構造 X-Y LIM の一極分のみを取り出した三次元一極モデルを最適設計の評価検討の対象として、測定値との比較を行う。ここで述べる最適設計とは、X-Y LIM の主磁束が大きく、かつ X 方向と Y 方向の主磁束の差が小さくなるように、共通磁路を形成する磁極鉄心の形状など、鉄心

構造の最適値を選定することである。主磁束の差を小さくすることにより、二次導体を任意の方向へ駆動する際の制御が容易になると考えられる。以上を踏まえて、次に示す項目について検討を行う。

- (1) 溝深さ可変による磁束密度の変化
- (2) 一次電流可変による磁束密度の変化
- (3) 空隙と始動推力の関係

2. X-Y LIM の構造と仕様

Table 1. Principal specifications of the X-Y LIM (6 poles).

	Item	Symbol [unit]	Value
Primary side	Number of phases	m	3
	Number of poles	p	6
	Pole pitch	τ [mm]	90
	Series turns / phase	N [T]	390
	Slots / poles / phases	q	1
	Synchronous velocity	V_s [m/s]	9
	Iron core width X-direction	L_x [mm]	646
	(Common X, Y) Y-direction	L_y [mm]	646
	Yoke thickness	Y_t [mm]	25.3
	Slot length and width X-direction	W_x [mm]	15
	(Common X, Y) Y-direction	W_y [mm]	15
	Slot depth X-direction	d_x [mm]	32.6
	Y-direction	d_y [mm]	65.2
Secondary side	Material		Al + Fe
	Length	l_x [mm]	360
	Width	l_y [mm]	360
	Thickness	d_s [mm]	Al: 2, Fe: 12
	Gap	g [mm]	2 to 15

Fig. 1 X-Y LIM structure

表1に実測で用いた3相6極構造のX-Y LIMの仕様を示す。

図1にX-Y LIMの構造を示す。同図は3相6極構造におけるX-Y LIMの周期構造から一部分を切り出したものである。一つの鉄心内に水平二軸方向(X方向, Y方向)にそれぞれ独立した巻線が配置された構造となっており、二つの巻線を同時に励磁することによって、二次導体を二次元平面内の任意の方向に駆動可能である。

3. 定式化

Maxwellの方程式より基本方程式を導出し、鉄心の飽和、変位電流を無視すれば式(1)が得られる。ここでは、解析領域内における二次導体に渦電流が流れるものとする。

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J_0 + J_e \quad \dots (1)$$

ここで

$$J_e = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad } \phi \right)$$

ただし、 ν : 磁気抵抗率, J_0 : 強制電流密度, J_e : 渦電流密度, $A: B = \text{rot} A$ で定義される磁気ベクトルポテンシャル

式(1)にガラーキン法を適用し、次式で定義される残差を零とする。

$$G_i = \int_v N_i \{ \nabla \times (\nu \nabla \times A) - (J_0 + J_e) \} dx dy dz \quad \dots (2)$$

$$= \int_v N_i \{ \nabla \times (\nu \nabla \times A) \} dx dy dz - \int_v N_i J_0 dx dy dz$$

$$+ \int_v N_i \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad } \phi \right) dx dy dz = 0$$

$\dots (2)'$

ここで、 N_i は補間関数である。

式(2)を計算するには各要素ごとに離散化を行い、全要素の局所行列を加算する。以前は、解析領域を直方体に分割し、直方体を二つの五面体に分割し、さらに五面体を三つの四面体に分割していた^{5), 6)}。今回の解析では解析領域を直方体に分割し、さらに5つの四面体に細分割した事により、計算の簡略化または計算時間の短縮をする事ができた。四面体の考察量を一次式で近似すると補間関数 N_i は式(3)のようになる。

$$N_i = a_i x + b_i y + c_i z + d_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad \dots (3)$$

ここで、 a_i, b_i, c_i, d_i は各要素を構成する節点座標によって決まる定数である。連立一次方程式の解法としては、ICCG法を適用する。

4. 解析モデルと境界条件

4.1 解析モデル

図2に解析モデルを示す。一般にX-Y LIMを解析する上

Fig. 2 Three-dimensional analysis model of one pole

ではX-Y LIMの全領域にわたって解析を行わなければならない。しかし、全領域にわたって解析を行った場合、膨大な計算量のために計算時間を要してしまうので、以下に示す必要最低限の条件を具備したモデルで解析を行うことにする。

- (1) X-Y LIMの一極分のみを考慮する。
- (2) 一次鉄心の巻線の両端部に存在するオーバーハングの影響を無視する。
- (3) 鉄心および二次導体の鉄の透磁率 $\mu_r = 1000$ H/mは等方的な定数とする。
- (4) 二次導体の導電率は等方的で一定の値、鉄 $\sigma_{Fe} = 0.87 \times 10^7$ S/m, アルミニウム $\sigma_{Al} = 3.28 \times 10^7$ S/mとする。
- (5) 一次鉄心の導電率は零とする。

より厳密な解を得るためには一次鉄心の端部における端効果の影響を考慮する必要があるが、解析の容易性を観点において今回は省略する。

4.2 境界条件

一般に一方向LIMの解析においては、無限長を仮定した境界である周期境界条件が用いられている。しかし、X-Y LIMではyz平面とxz平面の交辺における条件の決定が困難であるために、境界条件を以下のように設定した。

$$xy \text{ 平面上下: } Ax = Ay = Az = 0$$

$$yz \text{ 平面前後: } Ay = Az = 0$$

$$xz \text{ 平面左右: } Ax = Az = 0$$

ただし、A: 磁気ベクトルポテンシャル
以上を考慮すると、X, Y方向の無限長モデルの解析となり、発生磁束密度はZ方向のみとなる。図2はこれらの点を考慮に入れた解析モデルである。

5. 一次電流

一次電流の位置については、

- (1) 一次鉄心のスロット、歯部の形状
 - (2) X方向巻線, Y方向巻線の位置
- の両者によって定まる。U相, V相, W相にそれぞれ 120° の位相差をもった正弦波電流が流れているものとする。

Fig. 3 Side view of X-Y LIM.

る。ここで各相の電流密度 J_0 A/m², 周波数 $f = 50$ Hz は一定とする。

6. 解析方法

図3は X-Y LIM の鉄心の形状、巻線の位置、二次導体の位置関係を側面図で示したものである。磁極鉄心上端部の中心上での Z 方向の磁束密度（主磁束）に着目する。ここで X 方向巻線の電流を I_x , 発生した主磁束を B_{Xm} , Y 方向巻線の電流を I_y , 発生した主磁束を B_{Ym} とし, I_x, I_y に同じ値の電流を同時に励磁した場合を I_{xy} , 発生した主磁束を B_{XYm} , 始動推力を F_{xy} とする。また, B_{Xm}, B_{Ym}, B_{XYm} は式 (4) ~ 式 (6) の時間 t を変化させた場合の時間平均値である。

6. 1 溝深さ可変による磁束密度の変化

磁極鉄心の溝深さを可変した場合の磁束密度の変化を確認する目的から、二次導体を考慮し、空隙 $g = 2$ mm 一定、継鉄厚さ $Yt = 25.3$ mm 一定として、溝深さ dx を 22.6 mm ~ 37.6 mm まで可変した解析を行う。磁極鉄心の溝深さは巻線の位置を考慮し 22.6 mm からとする。 $I_x = 10$ A の場合と、 $I_y = 10$ A の磁束密度の差違と、 $I_{xy} = 10$ A の磁束密度の変化について解析を行う。

6. 2 一次電流可変による磁束密度の変化

実測において、 0 A ~ 12 A まで電流値を変化した場合、磁気飽和しないことから、 I_x, I_y, I_{xy} を変化させた場合の B_{Xm}, B_{Ym}, B_{XYm} の変化割合を解析する。解析においても、鉄心の形状を可変することなく、 I_x, I_y, I_{xy} を 0 A ~ 12 A まで変化させた場合の解析を行う。

6. 3 空隙と始動推力の関係

I_x, I_y, I_{xy} は 10 A 一定とし、鉄心の形状を変化させずに、空隙のみ 2 mm ~ 15 mm まで可変した場合の始動推力についての解析を行う。

7. 解析結果

6. 1 ~ 6. 3 について解析を行った結果、表1に示して

Fig. 4 Relationship of depth of slot dx to magnetic flux densities B_{Xm} , B_{Ym} , and B_{XYm} . (Gap $g = 2$ mm, primary current $I_x, I_y, I_{xy} = 10$ A, $f = 50$ Hz)

いる実測で用いた一次鉄心の形状について、 $dx = 32.6$ mm で B_{Xm}, B_{Ym}, B_{XYm} の測定値と解析値はよく一致した。また、 I_x, I_y, I_{xy} を 0 A ~ 12 A に変化させた場合と、 g を 2 mm ~ 15 mm に変化させた場合も測定値と解析値がよく一致したことから、解析結果が妥当であることが確認できた。各パラメータを変化させた場合の特性は以下の通りである。

7. 1 溝深さ可変による磁束密度の変化

図4に溝深さを可変した場合の B_{Xm}, B_{Ym}, B_{XYm} の変化を示す。同図から dx を高くすると、 B_{Xm}, B_{Ym}, B_{XYm} が減少していることが分かる。また X 方向巻線の方が Y 方向巻線よりも上層に位置しているために、約 14% の B_{Xm} が B_{Ym} よりも増となる。 B_{XYm} は、溝深さが増加するに伴い B_{Xm}, B_{Ym} との差が減少することが判明した。

7. 2 一次電流可変による磁束密度の変化

図5に I_x, I_y, I_{xy} を変化させた場合の B_{Xm}, B_{Ym}, B_{XYm} の変化を示す。同図からわかるように、 I_x, I_y, I_{xy} の増加とともに B_{Xm}, B_{Ym}, B_{XYm} は増加する。一次電流の増加に伴い、 B_{Xm}, B_{Ym}, B_{XYm} の

Fig. 5 Relationship of primary current I_x, I_y, I_{xy} to magnetic flux densities B_{Xm}, B_{Ym}, B_{XYm} . (Gap $g = 2$ mm, $f = 50$ Hz)

Fig. 6 Relationship of gap g to starting thrust F_x , F_y , F_{xy} . (Primary current I_x , I_y , $I_{xy} = 10$ A, $f = 50$ Hz)

差が大きい。 B_{XYm} , B_{Xm} , B_{Ym} の比は1:0.84:0.66であることが明らかとなった。また、この比率から計算を行い式(4)の関係であることを明らかにした。

$$B_{XYm}^2 = B_{Xm}^2 + B_{Ym}^2 \quad \dots (4)$$

7. 3 空隙と始動推力の関係

図6に g を2 mm ~ 15 mm まで可変した場合の始動推力特性を示す。同図から始動推力についてはX方向, Y方向の巻線を励磁した場合の始動推力 F_x , F_y の差は小さいことが分かる。 $g=10$ mm 以上においては, F_x , F_y , F_{xy} が緩やかな減少を示している。空隙の増加に伴い始動推力の差が小さくなる。また、空隙の減少に伴い始動推力が増加することからX-Y LIM の実用化にあたって始動推力を大きくするためには、一次鉄心に二次導体を極力近づけた構造を設計する必要があると考えられる。

以上の結果から, F_x , F_y の差を少なくするためには、鉄心の溝深さを浅くして、巻線を挿入した設計にすることが良いと判明した。さらに I_x , I_y の割合を変え、さらにより大きな始動推力を得るためには、 g を10 mm 以内での設計をする必要があると考えられる。

8. むすび

X-Y LIM の磁極鉄心からの主磁束を増加させるための鉄心構造を選定し、X方向, Y方向巻線からの磁束密度の差を小さくする目的から、三次元有限要素法を用いた磁界解析を行った。本論文では、より最適な設計を行うために、鉄心寸法の変化や、一次電流の変化による磁束密度の差、さらに空隙の可変による始動推力についての基礎的検討を行った。その結果、主磁束の測定値と解析値が一致していることから、以下に示す結論を得た。

8. 1 溝深さ可変による磁束密度の変化

dx を可変した場合は、 dx が深くなるにつれて、 B_{Xm} , B_{Ym} , B_{XYm} が減少することを明らかにした。これは、鉄心側面から発生する磁束密度の総和が増加し、その分、鉄心上端部中央からの磁束が弱くなるた

めであると考えられる。したがって、 dx をなるべく巻線位置まで低下させた設計が必要である。よって、 dx を可変させた場合について、 $I_x=10$ A における B_{Xm} が、 $I_y=10$ A における B_{Ym} と比較して約14%増加することを明らかにした。

8. 2 一次電流可変による磁束密度の変化

I_x , I_y , I_{xy} を増加するに伴い、 B_{Xm} , B_{Ym} , B_{XYm} の差が、大きくなることを明らかにした。この結果から、 B_{Xm} , B_{Ym} の差を小さくすることが必要である。したがって、 B_{Xm} , B_{Ym} を同一にするための励磁は、 I_x より29%増の電流が I_y には必要である。

8. 3 空隙と始動推力の関係

g の増加に伴い、2 mm ~ 15 mm の範囲においては F_x , F_y , F_{xy} が減少し、 $g=10$ mm 以上は緩やかな減少を示すことを明らかにした。より大きな始動推力を得るためには、二次導体をなるべく一次鉄心に近づけた構造を設計する必要があると考えられる。

以上の結果より、最適な B_{Xm} , B_{Ym} を得るためには、 dx を現在の32.6 mm から22.6 mm に浅くし、 I_y を I_x の1.3倍とする必要がある。また、 g の値を2 mm ~ 10 mm の範囲であればより大きな推力が得られる。今回の解析では、電流を同時に励磁した場合における二次元駆動を想定した磁束密度についての基礎的な検討を行うことができた。

本論文では、3相6極構造のX-Y LIM について端効果の影響が極めて少ない中心部の一極分について解析を行い、測定値も、端効果の影響を極力排除した測定を行った。今後は、端効果を考慮した解析や、可変周波数制御を行った磁束密度や始動推力について検討を行う予定である。

文献

- 1) 大平 廣一, 川西 利昌: 計測自動制御学会論文集, 19, 74 (1983).
- 2) 大平 廣一, 古関 隆章, 正田 英介: 日本応用磁気学会誌, 21, 929 (1997).
- 3) 大平 廣一, 山本 行雄, 竹内 勝広, 山田 一: 電気学会論文誌D, 109, 675 (1989).
- 4) 室賀 洋介, 大平 廣一, 戴 海鳴, 菊田 充二, 正田 英介: 電学リニアドライブ研究会資料, LD-96-36, 1 (1996).
- 5) 室賀 洋介, 大平 廣一, 戴 海鳴, 正田 英介: 電学リニアドライブ研究会資料, LD-97-31, 13 (1997).
- 6) 鈴木 健, 大平 廣一: 電学リニアドライブ研究会資料, LD-98-26, 7 (1998).
- 7) 塚田 博之, 大平 廣一: 日本応用磁気学会誌, 23, 1693 (1999).
- 8) 勘田 真弘, 乾 成里, 大平 廣一: 第23回日本応用磁気学会学術講演概要集, p.494 (1999).
- 9) 勘田 真弘, 宇津野 良, 知久 順一, 市村 寛之, 乾 成里, 大平 廣一: 電学リニアドライブ研究会資料, LD-99-143, 17 (1999).