Reduction of the Cogging Force at the Outlet Edge of a Discontinuous Armature Linear Synchronous Motor

Y. J. Kim, H. Dohmeki, and D. Ebihara

Department of Electrical and Electronic Engineering, Musashi Institute of Technology.

1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya, Tokyo 158-8557 Japan

Recently, linear motors capable of transmitting motive power without the use of mechanical converters have been attracting attention as drive sources for transportation systems, and there have been practical implementations of linear induction motors and linear synchronous motors. The authors have been engaged in developing transportation applications of permanent magnet linear synchronous motors using high-energy magnetic materials. We have proposed a discontinuous armature LSM in which the armature side is engaged only when accelerated/decelerated operation is necessary, instead of one in which thrust is constantly applied. However, an outlet edge certainly exists, because the armature uses a discontinuous arrangement method. This edge becomes a problem, because the cogging force that it exerts influences the controllability of the motor. This paper presents the results of an experimental examination and three-dimensional analysis of the cogging force exerted by the outlet edge. We deformed the shape of the armature to decrease the cogging force at the outlet edge, and the results are examined by using three-dimensional analysis.

Key words: linear synchronous motor, discontinuous armature arrangement, outlet edge, cogging force, three-dimensional analysis, energy transduction

一次側間欠配置リニア同期モータの端部コギング力の低減

金 容載・百目鬼 英雄・海老原 大樹

武蔵工業大学 工学部 電気電子情報工学科, 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 (〒158-8557)

1. はじめに

高速化, 低騒音, 駆動機構の簡素化およびメンテナンスフリーが要求される Factory Automation (以下 FA) 分野を中心にリニアモータは普及してきた^{1),2)}。この分野のリニアモータは構造が簡単で大推力を得やすいリニア誘導モータ (Linear Induction Motor 以下 LIM) を主流として発展してきた。しかしながら最近, 高荷重搬送, 水平搬送のほか, 勾配路や縦型搬送の用途も増え, さらに搬送に加えて位置決め制御の精度が要求されるようになった。筆者らは, この様な要求に対し LIM に比べて効率が良く, 制御性に優れるリニア同期モータ (Linear Synchronous Motor 以下 LSM) に着目し, その中でも高エネルギー磁石材料を利用した永久磁石型 LSM (PM-LSM) の, 搬送装置への適用に取り組んで来た。

一般に, リニアモータを用いた搬送装置では固定子を全長配置する地上一次側設置方式が適用されているが, 厳密な定速性を必要としない長距離搬送用途であれば, 間欠配置の適用が可能である。よって常時推力を与えるのではなく, 加減速運転が必要となる部分にのみ LSM の固定子を配置する地上一次側間欠配置 LSM が提案されている³⁾。Fig. 1 に一次側間欠配置方式における, 可動子の運転パターンの一例と, 従来の連続配置方式における運転パターンの比較を示す。このシステムにおける大きな問題点として同期化が挙げられる。この問題について筆者らは検討を行い, 可動子の初期速度と位置を検出する光学式センサを進入部に設置することで水平形状及び, 勾配形状で同期化する手法を確立した^{4),5)}。しかしながら, 固定子側は間欠配置方式であるため, 入口端(以下 進入部)と出口端(以下 搬出部)で働くコギング力が問題となる。最近, 機器の出力や運転特性に影響を与える一定の周期性を持つコギング力を低減するために, 永久磁石とコアにスキューを設ける

方法や磁石端の配置を変える方法などが提案されている^{6)~10)}。しかしながら, 地上一次側間欠 PM-LSM の端部で働くコギング力は進入部では可動子を引き込む力として働くが, 搬出部では可動子を引き戻す力として働く。筆者らは端部で働くコギング力を低減するために, 固定子側の端部形状を変形させる方法を考えた。本稿では, 三次元磁界解析を用いて端部の形状とコギング力の関係について検討を行ったので報告する。

Fig. 1 Speed profiles of PM-LSM horizontal transportation systems.

2. 地上一次側間欠配置 PM-LSM

2.1 実験装置の構成と仕様

Fig. 2 に実験装置の概観を, Fig. 3 に固定子配置の概略を示す。固定子ブロックは走行路全長 6500 mm にわたって複数個間欠配置が可能である。固定子ブロックは打ち抜き鉄心を積層し, これに 3 相コイル巻線を施している。占積率は 38.96 %, 定格電流は 1.3 A, 定格起磁力は 410.8 A である。可動子はネオジム系希土類磁石 (NEOMAX-30SH) を磁路鉄板にスキュー配置している。この

スキュー配置により、固定子と可動子が完全に対向(完全対向)している時のコギングを低減することが可能となる。使用した永久磁石は $BH_{\max} = 238.5 \text{ kJ/m}^3$ である。Fig. 4 に実験装置の断面図を示す。可動子の支持機構として V 字型走行路(レール)を V 字型ガイドホイールが走行する V ガイドシステムを採用した。このガイドシステムを用いることにより、左右の揺れを調節することができる。また、可動子に負荷を搭載することにより、レールとホイールとの摩擦係数を低減できる特徴がある。さらに、この実験装置はプレートの厚さを変えることにより、固定子と可動子とのギャップ長を変化させることが可能である。Table 1 に実験装置の仕様を、Fig. 5 に実験装置のシステム構成を示す。それぞれ、可動子の速度・位置検出はフォトインタラプタを固定子側に設置し、長さが既知である遮光板を可動子に取り付け、遮光の時間間隔から速度情報を得る。その速度情報をコンピュータに取り込み、3 相コイル巻線の各相にそれぞれ接続した定電流型 PWM サーボアンプによって励磁を行う。また、駆動系と完全に独立したアブソリュート型リニアスケール(サンテスト(株): 全長 4000 mm, 分解能 0.1 mm)を用いて、可動子の位置と速度の状態を計測する。

2.2 端部における可動子に働く力

Fig. 6 に固定子端部における可動子に働く力を示す。地上一次側間欠配置リニア同期モータでは、可動子が固定子側設置部と非設置部の境界を通過する際に、固定子側鉄心と可動子永久磁石間に働く吸引力が大きく変動する。進入部における吸引力は可動子の進行方向と同方向、すなわち引き込む力で可動子を加速する。また、搬出部における吸引力は可動子の進行方向と逆方向のため、可動子を減速する力として働く¹⁾。この端部で働く力の影響で、可動子が惰性走行区間から再加速および減速に移る際に可動子の速度が指令速度と異なるという問題が生じる¹⁾。

Fig. 2 View of the experimental device.

Fig. 3 Schematic representations of the armature.

Fig. 4 Cross-section of the experimental device.

Table 1 Specification of the experimental device.

Item	(Unit)
Armature unit	
Pole pitch τ	33 (mm)
Length of the stator (per unit)	324 (mm)
Magnetomotive force mmf	410.8 (A)
Carrier with PM	
Number of magnets	8 (poles)
Magnet	· Length
	28 (mm)
	· Width
	45 (mm)
· Thickness	3 (mm)
	· Maximum energy product $BH_{\max}$
	238.5 (kJ/m ³)
Force	160 (N)
Air-gap g	4.0-8.0 (mm)

Fig. 5 Configuration of the experimental device.

Fig. 6 Forces exerted in the carrier at the outlet edge.

3. 地上一次側間欠配置 PM-LSM の端部コギング力

ここでは、実験による実験値と汎用電磁界解析ソフトウェア JMAG-Studio を用いた解析結果から、各端部におけるコギング力について検討を行う。Fig. 7 に端部コギング力の測定装置を、Fig. 8 に上部から見た PM-LSM の解析モデルを示す。測定方法は、固定子と可動子のギャップ長を 5 mm とし、固定子と可動子に対向していない状態から可動子を固定子側に進入させ、可動子が固定子を完全に出る区間まで可動子を牽引装置により 2 mm ずつ移動させ、コギング力を測定した。可動子の位置は磁歪式リニア変位センサを用い、コギング力は定格 98 N のロードセルを用いて測定を行った。測定に用いた固定子の長さは 1 ユニット 324 mm である。そして汎用電磁界解析ソフトウェアでの解析は 1/2 モデルとした。この時の要素数は 80022、節点数は 92464 である。また、1 ステップあたりの移動量は 2 mm で設定を行った。Fig. 9 にコギング力の実験結果及び解析結果を示す。Fig. 9 より、可動子が固定子側に進入するにつれ、固定子と可動子に対向する磁極数の変化により進入部ではコギング力が増加する。また、搬出部でのコギング力は減少していくことが分かる。そして、各端部で働くコギング力はギャップ長 5 mm の時、最大 10.1 N 発生することが分かった。一方、可動子が固定子側に完全対向すると同時にコギング力は ± 1.5 N 発生し、各端部で発生するコギング力と比べ、小さいことが分かる。これは可動子の永久磁石をスキュー配置することにより、コギング力が低減されたと考える。従って、実験値と解析値を比較した結果、解析の妥当性を確認した。

4. 地上一次側間欠配置 PM-LSM の端部コギング力の低減手法

4.1 端部コギング力を低減するためのモデル

Fig. 10 に解析に用いた基本モデルを、Fig. 11 に端部で働くコギング力を低減するために固定子側の端部形状を変形させた提案モデルを示す。固定子には短節巻でコイルが施されている。Fig. 10 の基本モデルのスロット(a),(b)はシングルレイヤーとなる。このシングルレイヤーの部分の歯の長さ 23 mm を 3 等分し、上部から 1/3 ずつ歯を切り、固定子側の端部形状を変形させた。歯の長さを調節した四つのモデルと基本モデルを用い、端部におけるコギング力の検討を行った。ただし、本研究では可動子が再加速部から搬出する際に速度低下が生じることから¹⁾、搬出部のみ固定子側の端部形状を変形させ検討を行う。解析には汎用電磁界解析ソフトウェア JMAG-Studio を使用した。可動子には 4 極の永久磁石を配置し、固定子には 17 スロットを設け、計算は 1/2 モデルで行った。要素数は 53622、節点数は 61552 である。極ピッチは 33 mm でギャップ長は 5 mm とした。また、1 ステップあたりの移動量は 2 mm とした。

4.2 解析結果

基本モデルと提案モデルにて三次元解析を行い、コギング力を計算した。計算によって得られたコギング力の波形を Fig. 12 に示す。ここでギャップ長は 5 mm である。Fig. 12 より、コギング力は進入部において増加し、完全対向部では可動子永久磁石のスキュー配置により低減され、搬出部において再度増加する傾向を示

Fig. 7 Measurement device.

Fig. 8 3D analyzed model (top view from the z-axis).

Fig. 9 Cogging force (8poles, 29slots).

Fig. 10 Basic model (side view from the y-axis).

Fig. 11 Proposed model (side view from the y-axis).

している。また、搬出部の固定子側の端部形状を変形することにより各モデルのコギング力の値が異なることが分かる。しかしながら、Fig. 12 では各モデルにおけるコギング力の値を比較し難いので、筆者らは各モデルの搬出部のコギング力を比較するために、可動子が固定子側を搬出し始める位置から完全に固定子側を抜ける位置までの距離を計算し、コギング力の波形を重ね合わせた。Fig. 13 に各モデルにおける搬出時のコギング力を示す。これを見ると、搬出部の固定子側の端部形状を変形することにより、コギング力の低減が可能であることがわかる。これは端部の歯を切削して磁路のパーミアンスを変化させることにより、永久磁石による磁束の磁気エネルギーの変化が減少したためと考えられる。基本モデルの場合、最大コギング力は6.68 Nであったが、提案モデルの中で最もコギング力が低減できたモデル3は、最大コギング力は5.29 Nであった。また、提案モデル1と提案モデル2、提案モデル3と提案モデル4を比較すると、歯を2/3切ったモデルより歯を1/3切った提案モデル1と提案モデル3の方のコギング力が低減されることが分かる。さらに、提案モデル1と提案モデル4を比較すると提案モデル4が提案モデル1より、コギング力は微かに低減されているがほぼ同じ大きさといえる。

ここで筆者らはFig. 13で端部コギング力の差異は分かるが、優劣を判定し難いので端部で発生するコギング力の評価法としてエネルギー変換手法を用い、評価を行った。すなわち、Fig. 13の結果に基づき、搬出部で発生するコギング力が持っているエネルギーを次式で算出した。

$$W_c = \int_{x_1}^{x_2} F_c(x) dx \quad (1)$$

ここに、 $F_c(x)$: 端部コギング力 (N)、 x_1 : 可動子が固定子側を出る直前の完全対向位置 (m)、 x_2 : 可動子が固定子側を完全に抜けた時の位置 (m)。

Fig. 14に搬出部における端部コギング力のエネルギーを示す。Fig. 14は可動子に位置に対するコギング力が持っているエネルギーを表している。0 mm 地点は可動子が固定子を搬出し始める地点で140 mm 地点は可動子が固定子を完全に離れた地点となる。また、Fig. 15に提案モデルにおける端部コギング力エネルギーの減少率を示す。Fig. 14より、搬出部における端部コギング力のエネルギーは基本モデルの場合最大0.436 J、提案モデル3の場合最大0.364 Jであった。そして、歯を2/3切った提案モデルより、歯を1/3切った提案モデルの方が最もコギング力が低減できる。また、提案モデル1と提案モデル4で発生するコギング力が持っているエネルギーがほぼ同じであることがこの結果で分かる。従って、端部コギング力低減手法として切り取る歯の長さを調節する場合、歯を2/3以上切ことは端部コギング力低減を図る上で好ましくないと考える。さらにFig. 15より、提案モデルにおける端部コギング力エネルギーの減少率を比較すると、固定子側の端部形状を提案モデル3にすることにより、基本モデルと比べて搬出部における端部コギング力エネルギーが16.46%低減可能であることが分かった。

Fig. 12 Cogging force (4poles, 17Slots).

Fig. 13 Cogging force at the ejection interval (4poles, 17Slots).

Fig. 14 Energy of the cogging force at the ejection interval.

Fig. 15 Attrition rate of the cogging force energy at the ejection interval.

5. まとめ

本稿では PM-LSM の固定子側を間欠配置する地上一次側間欠配置 PM-LSM の端部コギング力について、検討を行った。その結果、端部で発生するコギング力はギャップ長 5mm 時、最大 10.1 N 発生することを実験と解析から明らかにした。さらに筆者らは、制御性に影響を与える端部コギング力を低減するために、固定子側の端部形状を変形させた四つのモデルを提案し、三次元磁界解析を用いて検討を行った。検討を行った結果、明らかとなった事項を以下に示す。

- 1) 基本モデルに対して、提案モデルを用いることで端部コギング力が低減できることを確認した。また、提案モデルの中で最もコギング力が低減できたモデル 3 は基本モデルの端部コギング力の最大値に比べ、1.39 N 低減できた。
- 2) 端部コギング力の評価法としてエネルギー変換手法を用い、端部コギング力が持っているエネルギーの算出を行った結果、基本モデルに比べ、提案モデル 3 の場合 16.46 % 減少し、提案手法の有効性を示せた。
- 3) 切削するシングルレイヤーの歯数は一つより二つの歯を切削した方が端部コギング力の低減に効果があることを判明した。
- 4) 切削する歯のサイズはもとの歯長の上部から $2/3$ 切るよりは $1/3$ を切削する方が最もコギング力が低減できることが分かった。本研究で提案した手法では切削する歯の長さは歯長の上部から $1/3$ 切る辺りに最適値が存在すると考えられる。

References

- 1) M. Karita: *Proc. LDIA 2001, Linear Drives for Industry Applications*, Nagano, 2001, pp.462-467 (2001).
- 2) T. Azukizawa: *Proc. LDIA 2003, Linear Drives for Industry Applications*, Birmingham, 2003, pp.12-19 (2003).
- 3) K. Seki, M. Watada, S. Torii, and D. Ebihara: *Proc. PEDS97, International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore*, 1997, IEEE, **2**, pp.697-702 (1997).
- 4) M. Kajioka, K. Oka, M. Watada, S. Torii, and D. Ebihara: *Proc. Speedam2000, Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Ischia, 2000, A2-25-A2-30 (2000).
- 5) A. Endou, M. Watada, S. Torii and D. Ebihara: *IEEJ trans. Linear drives*, Tokyo, 2000, LD-00-91, pp.17-22 (2000) (in Japanese).
- 6) T. Li and G. Slemon: *IEEE Trans. Magn.*, **24**, 2901 (1988).
- 7) P. J. Hor, Z. Q. Zhu, D. Howe and J. Rees-Jones: *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 3544 (1998).
- 8) I. S. Jung, J. Hur and D. S. Hyun: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 3653 (2001).
- 9) N. Binachi and S. Bolognani: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **38**, 1259 (2002).
- 10) T. Yosimura, H. J. Kim, M. Watada, S. Torii and D. Ebihara: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 3728 (1995).
- 11) Y. J. Kim, M. Watada, S. Torii, H. Dohmeki and D. Ebihara: *Proc. IPEC2005, International Power Electronics Conference*, Niigata, 2005, pp.859-864 (2005).

2005年10月19日受理, 2005年12月16日採録