

## **FEM-Aided Analytical Model and Control of SSLFSM Thrust Force**

**Ehsan Ismaili Zadeh Shirali<sup>1</sup>, Saeed Hasanzadeh<sup>2</sup>, Seyed Mohammad Dehghan<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Dept. of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran  
ehsan.shiraali@gmail.com

<sup>2</sup> Dept. of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran  
hasanzadeh@qut.ac.ir

<sup>3</sup> Dept. of Electrical and Computer Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran  
dehghan@qut.ac.ir

### **Abstract:**

Nowadays, linear machines have more developed for high power applications such as long-distance transportation. But, their expensive investment and some technical problems are major challenges of these technologies. Here, a linear flux switching machine (LFSM) with segmented secondary is studied. These fluctuations, in other words, detent force have a negative impact on machine performance. The effect of these issues can be notably reduced with a suitable design. In this paper, a FEM-based Analytical model is presented for a linear flux switching machine. The results of analytical model are verified by FEM Simulations and then a control method is proposed to reduce fluctuations of the thrust force.

**Keywords:** FEM-Based, Segmented Secondary Linear Flux Switching Motor (SSLFSM), Thrust Force, Detent Force, Optimization.

## مدل‌سازی تحلیلی با کمک روش المان محدود و کنترل نیروی پیشران ماشین خطی شار

### سویچینگ

احسان اسماعیلی‌زاده شیرالی<sup>۱</sup>، سعید حسن‌زاده<sup>۲\*</sup>، سید محمد دهقان<sup>۳</sup>

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی قم - قم - ایران

ehsan.shiraali@gmail.com

۲- استادیار مهندسی برق، قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی قم - قم - ایران

hasanzadeh@qut.ac.ir

۳- استادیار مهندسی برق، قدرت، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی قم - قم - ایران

dehghan@qut.ac.ir

**چکیده:** امروزه استفاده از ماشین‌های خطی برای کاربردهای توان بالا مانند حمل‌ونقل با مسافت‌های طولانی توسعه زیادی یافته است؛ اما هزینه زیاد سرمایه‌گذاری اولیه و برخی مشکلات فنی از چالش‌های مهم این فناوری‌ها است. در اینجا یک ماشین خطی شار سویچینگ با ثانویه قطع‌شده مطالعه می‌شود. این ماشین‌ها به دلیل اثر انتهایی و شیارها نوساناتی در نیروی پیشران خود دارند. این نیروی تولیدی ناشی از این نوسانات بر عملکرد ماشین تأثیر منفی دارند. با طراحی مناسب اولیه، تأثیر این عوامل تا حدود زیادی کاهش می‌یابد. در این مقاله براساس نتایج تحلیل اجزای محدود، یک مدل تحلیلی برای ماشین خطی شار سویچینگ با ثانویه قطع‌شده ارائه می‌شود. با شبیه‌سازی المان محدود، نتایج مدل تحلیلی صحت‌سنجی می‌شوند و سپس یک روش کنترلی برای کاهش نوسانات نیروی پیشران و کم‌کردن نیروی نگهدارنده ماشین خطی شار سویچینگ با ثانویه قطع‌بندی‌شده پیشنهاد می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی، تحلیل اجزای محدود، ثانویه قطع‌بندی‌شده، نیروی نگهدارنده، ماشین خطی شار سویچینگ

### ۱- مقدمه

(LFSM) با ساختارهای گوناگون نقد و بررسی بیشتری شده‌اند [۳-۶]. LFSM‌ها در آسانسورهای بلند و سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی بیشتر استفاده می‌شوند. LFSM‌ها علاوه بر ساختار قوی و ساده اولیه و ثانویه، چگالی نیروی بالاتری نسبت به ماشین‌های سویچینگ شار چرخان دارند [۷]. این مزیت LFSM‌ها در کاربردهای حمل‌ونقل سرعت بالا باعث کم‌شدن هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و عملکرد بهتر نسبت به ماشین‌های سنکرون خطی با اولیه طولانی به کاررفته در کاربرد قطارهای معلق مغناطیسی Maglev شده است.

ماشین‌های خطی به دلیل پیشرفت وسیع در ساختار الکترومغناطیسی و توسعه مدارات الکترونیک قدرت، در بیشتر کاربردهای حرکت خطی استفاده می‌شوند [۱-۲]. در میان این تکنولوژی‌ها، ماشین خطی شار سویچینگ

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵

نام نویسنده مسئول: سعید حسن‌زاده

نشانی نویسنده مسئول: ایران، قم، دانشگاه صنعتی قم، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

مدار معادل غیرخطی مغناطیسی برای شرح مکانیزم نیروهای دندان‌های در ماشین شار سوییچینگ ارائه شده است [۱۱]. روش پاسخ سطحی همراه با تحلیل اجزای محدود برای محاسبه بازده ماشین شار سوییچینگ خطی ارائه شده است. به منظور کنترل این ماشین یک روش مدل‌سازی و یک روش کنترلی حلقه بسته مبتنی بر کنترل شار اولیه ارائه شده است [۱۲]. در [۵] نیروی پیشران یک ماشین خطی شار سوییچینگ با تحریک سیم‌پیچی و آهن‌ربای دائم با ساختار دو بر با استفاده از بهینه‌سازی روی پارامترها و ابعاد ماشین صورت گرفته است. در [۶] تحلیل و بررسی یک ماشین خطی شار سوییچینگ آهن‌ربای دائم با استفاده از ترکیب روش پاسخ سطح RSM و روش المان محدود FEM انجام شده است. در هر دو مقاله، طراحی ماشین صورت گرفته است. در پژوهش‌های ذکر شده، روش‌های مدل‌سازی و کنترلی مختلفی، معرفی و روی ماشین‌های خطی دیگری اعمال شده‌اند؛ اما مدل‌سازی و کنترل ماشین خطی شار سوییچینگ با ثانویه قطع‌بندی شده کمتر مطالعه شده است. تحلیل و کنترل ماشین با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل اجزای محدود معمولاً زمان‌بر است و روشی که بتوان ماشین را به راحتی و دقیق مدل‌سازی و کنترل کرد بسیار مفید خواهد بود.

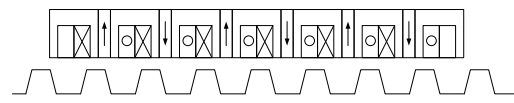
در این مقاله، مدل‌سازی ماشین شار سوییچینگ خطی با ثانویه قطع‌بندی شده براساس تحلیل اجزای محدود و نتایج آن ارائه می‌شود. همچنین، یک روش کنترلی برای کاهش دامنه نوسانات نیروی پیشران ارائه می‌شود. با استفاده از کنترل دامنه ولتاژ تغذیه ماشین خطی و اندازه‌گیری سرعت ماشین، کنترلر سرعت ماشین را حول مقدار مرجع کنترل می‌کند. در ابتدا ساختار ماشین توضیح داده می‌شود. سپس در بخش‌های بعد، ماشین با استفاده از روابط ریاضی و نتایج شبیه‌سازی تحلیل اجزای محدود مدل‌سازی می‌شود. در انتها نیز روش کنترل روی مدل پیشنهادی پیاده‌سازی می‌شود.

## ۲- ساختار

حمل‌ونقل ریلی یکی از امن‌ترین و پاک‌ترین شیوه‌های حمل بار و مسافر است که با ورود پیشرفت‌های اخیر در حوزه تکنولوژی شناور مغناطیسی و ماشین‌های خطی اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند؛ از این رو، ساختار پیشنهادی با

یکی از مشکلات استفاده از ماشین‌های خطی در کاربرد سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی، هزینه‌های ناشی از بلندبودن ثانویه است؛ به همین دلیل، ساختارهای با ثانویه قطع‌بندی شده ارائه شده‌اند. شکل (۱) ساختار مرسوم و ساختار قطع‌بندی شده را برای ماشین LFSM نشان می‌دهد و در آن مشخص است در ثانویه ماشین با ساختار قطع‌بندی شده از آهن و مواد کمتری استفاده شده است.

یکی از معایب ماشین شار سوییچینگ خطی، نیروی نگهدارنده نسبتاً زیاد است که افزایش دامنه نوسانات نیروی پیشران را سبب می‌شود. این نوسانات ناشی از اثر پایانی (End Effect) و اثر شیارهاست که با اضافه کردن قطب‌های کمکی [۸]، اصلاح شیار محرک (Mover) و درایو مناسب [۹] و روش‌های دیگر می‌توان دامنه آنها را کاهش داد. موضوع دیگر در عملکرد LFSM مقدار هارمونیک شکل موج نیروی ضد محرک (Back EMF) و عدم تعادل ولتاژ فازها است. یک روش بهبود شکل موج نیروی ضد محرک با انتخاب ساختار مناسب با تعداد قطعه مطلوب در ثانویه برای تعادل فاز و کاهش هارمونیک ارائه شده است [۱۰]. این ساختار مانند دیگر ساختارهای ارائه شده برای LFSM، مشکلاتی از قبیل نیروی نگهدارنده نسبتاً زیاد و دامنه بالای نوسانات نیروی پیشران دارد. برای کاهش نوسانات نیروی پیشران و کم کردن نیروی نگهدارنده ماشین خطی شار سوییچینگ با ثانویه قطع‌بندی شده، می‌توان از روش کنترلی مناسب بهره برد.



(الف)



(ب)

شکل (۱): (الف) ساختار مرسوم، (ب) ساختار پیشنهادی ماشین

تحلیل رفتار و کنترل نیروی پیشران ماشین امر مهمی است؛ از این رو، مدل‌سازی ماشین ضرورت دارد. برخی از پژوهش‌های انجام شده در حوزه کنترل و مدل‌سازی برخی ماشین‌های خطی به شرح زیر است. یک مدل دندان‌های با

ثانویه قطعه‌بندی شده

جدول (۱): پارامترهای ماشین مطالعه شده

پارامتر	توضیح	مقدار
$N_m$	تعداد شیارهای محرک	۱۴
$N_f$	تعداد دور سیم‌پیچ میدان	۱۰۰
$N_a$	تعداد دور سیم‌پیچ آرمیچر	۱۰۰
$S_a$	قطر سیم هادی (mm <sup>2</sup> )	۲
$W_{Ta}$	عرض دندان آرمیچر (mm)	۱۵
$W_{Tf}$	عرض دندان میدان (mm)	۱۶
$S_l$	طول استک (mm)	۳۰۰
$L$	طول محرک (mm)	۴۹۰
$W_s$	عرض شیار محرک (mm)	۲۰
$H_s$	بلندی شیار محرک (mm)	۷۰
$H_m$	بلندی محرک (mm)	۸۵
$g$	فاصله هوایی (mm)	۱
$u$	سرعت محرک (km/h)	۲۹

M400-50A نوع هسته مغناطیسی

### ۳- مدل سازی

مدل سازی ماشین با استفاده از رابط بین تحلیل اجزای محدود و MATLAB امری بسیار دشوار و وقت گیر است. در ادامه، برای مدل سازی ماشین از نتایج تحلیل اجزای محدود استفاده می شود. در این مقاله با هدف کنترل ماشین، مدل سازی انجام می شود و پارامترهای ماشین از روابط حوزه زمان abc استخراج شده از تحلیل المان محدود در مدل ماشین به کار گرفته می شوند و تأییدی بر مدار معادل ماشین در حوزه dq نیست. در این بخش، براساس روابط الکترومغناطیسی حاکم بر رفتار ماشین های الکتریکی، مدل ریاضی ماشین خطی شار سویچینگ به دست می آید. ولتاژ هر فاز و ولتاژ میدان برحسب جریان و شار هر سیم پیچ به صورت (۱) تا (۴) نوشته می شوند:

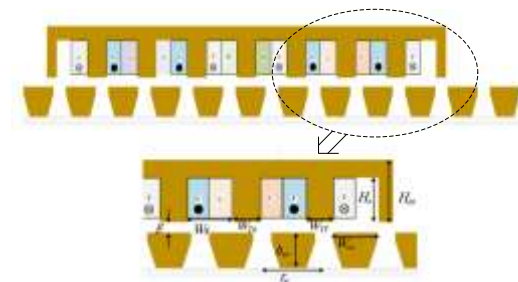
$$V_a = ri_a + d\psi_a/dt \quad (1)$$

$$V_b = ri_b + d\psi_b/dt \quad (2)$$

$$V_c = ri_c + d\psi_c/dt \quad (3)$$

هدف استفاده در حمل و نقل ریلی به دلیل استفاده از قطعه بندی در ثانویه و در نتیجه مصرف آهن کمتر مطالعه می شود. ساختار استفاده شده در این مقاله در شکل (۲) نشان داده شده است. در ماشین های خطی شکل موج نیروی ضد محرکه و میزان هارمونیک و عدم تعادل آن به طور چشمگیری بر عملکرد ماشین اثر می گذارد و این ساختار نیز از این قاعده مستثنی نیست. تعداد قطعه ها در ثانویه اصلی ترین پارامتر است که بر شکل موج نیروی ضد محرکه تأثیر می گذارد. تعداد قطعه های ثانویه و تأثیر آن بر رفتار ماشین بررسی شده اند [۱۱]. براساس نتایج آن و بررسی انجام شده، ساختار بهینه با ۸,۶ قطعه در ثانویه برای تحلیل در این مقاله انتخاب می شود.

ساختار هسته محرک SSLFSM مشابه هسته اولیه ماشین های خطی سنکرون مرسوم اند. کلاف ها به صورت متمرکزند و هر دندان محرک با یک سیم پیچ آرمیچر و یک سیم پیچ میدان احاطه شده است. همچنین، جهت جریان در هر سیم پیچی میدان باید مخالف با سیم پیچ مجاور باشد. ثانویه SSLFSM از قطعه های ساده تشکیل شده است که جنس هر قطعه از ورقه های فولاد مغناطیسی است. در شکل (۲)، سیم پیچ سیم پیچی میدان و سیم پیچی های فاز A, B و C مشخص شده اند. پارامترهای طراحی مدار مغناطیسی اصلی SSLFSM شامل تعداد دندان های محرک، میدان محرک و عرض دندان آرمیچر، ارتفاع و عرض شیار محرک، عمق یوغ محرک، گام سیم پیچ ثانویه و عمق قطعه ثانویه است. در این مقاله، یک SSLFSM با ۱۴ شیار اولیه طراحی شده است. اگرچه پهنای دندان آرمیچر می تواند کمتر از دندان میدان باشد، برای به حداقل رساندن مقدار هارمونیک نیروی ضد محرکه عرض یکسان برای هر دو در نظر گرفته شده است. پارامترهای ماشین در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۲): ساختار مطالعه شده ماشین خطی شار سویچینگ با

که در آن  $u = dx/dt$ ، سرعت است. چگالی نیرو با رابطه نیروی لورنز به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (14)$$

که در آن  $J$  و  $B$  به ترتیب چگالی جریان و چگالی میدان مغناطیسی‌اند. به دست آوردن فرم بسته نیروی  $F$  برای نیروی پیشران و نیروی نگهدارنده با استفاده از روابط ریاضی براساس تمامی پارامترهای ماشین خطی قطعه‌بندی شده بسیار مشکل است؛ بنابراین با اعمال کنترل برداری روی ماشین [۸-۹]، رابطه نیروی پیشران الکتریکی ماشین خطی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$F_e(x) = k_f \times i_q \quad (15)$$

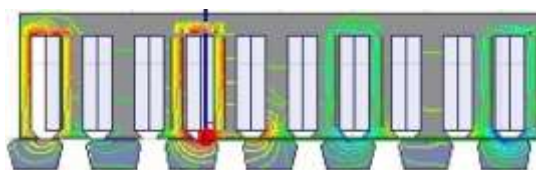
که  $k_f = 3\pi n_p \lambda_{pm} / 2$  و  $n_p$  جفت قطب‌ها،  $\lambda_p$  شار پیوندی میدان و  $i_q$  جریان محور عمودی استاتور در دستگاه  $dq$  است. در نهایت، با استفاده از معادله حرکت، رابطه بین نیروهای وارد شده بر ماشین براساس سرعت به صورت زیر است:

$$F_e(x) - F_d(x) = M \frac{du}{dt} + Du \quad (16)$$

که در آن  $F_e$  نیروی برآیند در راستای  $x$ ،  $F_d$  نیروی نگهدارنده،  $M$  جرم قسمت محرک،  $D$  ضریب اصطکاک و  $u$  بردار سرعت است.

#### ۴- شبیه‌سازی و تحلیل اجزای محدود

به منظور مدل‌سازی دقیق ماشین SSLFSM، لازم است پارامترهای ماشین استخراج شوند. در این بخش با استفاده از تحلیل اجزای محدود، طبق جدول (۱) و تحلیل‌های انجام شده ساختار بهینه با ۸،۶ قطعه در ثانویه انتخاب شده است. شکل (۳) ساختار تحلیل اجزای محدود و خطوط میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): شکل میدان مغناطیسی SSLFSM شبیه‌سازی شده با

$$V_f = ri_f + d\psi_f / dt \quad (4)$$

که در آن  $V$  ولتاژ سیم‌پیچ،  $r$  مقاومت سیم‌پیچ،  $i$  جریان سیم‌پیچ،  $\psi$  شار پیوندی سیم‌پیچ است. معادلات شار هر فاز و شار میدان با روابط زیر به دست می‌آیند.

$$\psi_a = L_{aa}i_a + L_{ab}i_b + L_{ac}i_c + L_{af}i_f \quad (5)$$

$$\psi_b = L_{ba}i_a + L_{bb}i_b + L_{bc}i_c + L_{bf}i_f \quad (6)$$

$$\psi_c = L_{ca}i_a + L_{cb}i_b + L_{cc}i_c + L_{cf}i_f \quad (7)$$

$$\psi_f = L_{fa}i_a + L_{fb}i_b + L_{fc}i_c + L_{ff}i_f \quad (8)$$

با جایگذاری روابط شار در روابط ولتاژ فازها و میدان، (۱) تا (۴) به صورت روابط ولتاژ براساس جریان و اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌های فازها و میدان درمی‌آیند:

$$V_a = ri_a + L_{aa} \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_{aa}}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + \quad (9)$$

$$i_b \frac{dL_{ab}}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + i_c \frac{dL_{ac}}{dt} + L_{af} \frac{di_f}{dt} + i_f \frac{dL_{af}}{dt}$$

$$V_b = ri_b + L_{ba} \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_{ba}}{dt} + L_{bb} \frac{di_b}{dt} + \quad (10)$$

$$i_b \frac{dL_{bb}}{dt} + L_{bc} \frac{di_c}{dt} + i_c \frac{dL_{bc}}{dt} + L_{bf} \frac{di_f}{dt} + i_f \frac{dL_{bf}}{dt}$$

$$V_c = ri_c + L_{ca} \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_{ca}}{dt} + L_{cb} \frac{di_b}{dt} + \quad (11)$$

$$i_b \frac{dL_{cb}}{dt} + L_{cc} \frac{di_c}{dt} + i_c \frac{dL_{cc}}{dt} + L_{cf} \frac{di_f}{dt} + i_f \frac{dL_{cf}}{dt}$$

$$V_f = ri_f + L_{fa} \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_{fa}}{dt} + L_{fb} \frac{di_b}{dt} + \quad (12)$$

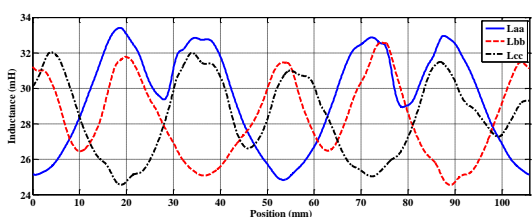
$$i_b \frac{dL_{fb}}{dt} + L_{fc} \frac{di_c}{dt} + i_c \frac{dL_{fc}}{dt} + L_{ff} \frac{di_f}{dt} + i_f \frac{dL_{ff}}{dt}$$

تغییرات اندوکتانس برحسب زمان به صورت تغییرات مکانی نوشته می‌شوند. روابط (۹) تا (۱۲) را می‌توان با جایگذاری (۱۳) در آنها برحسب سرعت و تغییرات مکانی بازنویسی کرد.

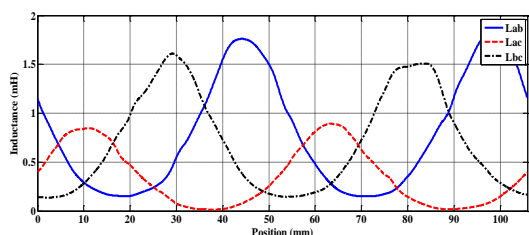
$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL}{dx} \times \frac{dx}{dt} = \frac{dL}{dx} \times u \quad (13)$$

### تحلیل اجزای محدود

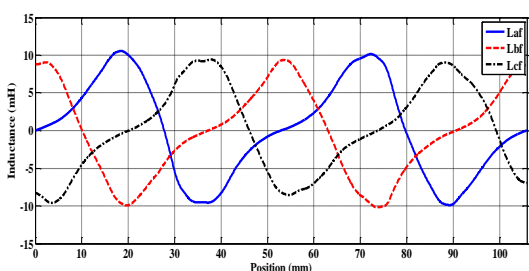
که در آن  $a_i$ ،  $b_i$  و  $c_i$ ها، پارامترهای ثابت فرمولاند و با استفاده از نرم افزار محاسبه می شوند.



شکل (۴): اندوکتانس خودی فازهای آرمیچر



شکل (۵): اندوکتانس های متقابل فازهای آرمیچر نسبت به هم



شکل (۶): اندوکتانس متقابل بین فازهای آرمیچر و میدان

با محاسبه روابط اندوکتانس ها شار ماشین محاسبه می شود و با استفاده از (۹) تا (۱۳) و با اعمال ولتاژ سه فاز و در نظر گرفتن جریان آرمیچر به عنوان متغیر حالت، سیم پیچی های ماشین مدل سازی می شوند و جریان ها به دست می آیند. با مشخص شدن جریان و با استفاده از (۱۵) نیروی پیشران ماشین محاسبه می شود. به این منظور باید ضریب  $K_f$  در (۱۵) محاسبه شود. این رابطه از روابط ماشین خطی آهن ربای دائم استخراج شده است که در آن  $\mathcal{N}_p$  شار مگنت است. در این ماشین چون جریان تحریک ثابت است، سیم پیچی میدان ماشین را می توان مشابه یک مگنت در نظر گرفت و شار میدان ناشی از جریان سیم پیچ میدان را با استفاده از (۱۸) محاسبه کرد. شکل موج شار میدان در شکل (۷) نشان داده شده است. مقدار عددی از جایگذاری شار مؤثر سیم پیچ میدان به دست می آید،

همان طور که در (۱) تا (۴) مشخص است، مدل سازی سیم پیچی های ماشین به محاسبه شار پیوندی نیازمند است که برای این امر با توجه به (۵) تا (۸) باید در ابتدا روابط اندوکتانس های خودی و متقابل را برای سیم پیچی های فازها و میدان به دست آورد؛ به طور مثال، برای محاسبه  $L_{aa}$  با استفاده از تحلیل اجزای محدود در (۵)، همه جریان ها به جز  $I_a$  صفر و برای یک مقدار  $DC$  (۱ آمپر) گذاشته می شود و در نتیجه با جایگذاری مقادیر جریان در (۵) و محاسبه شار فاز  $a$  با استفاده از تحلیل اجزای محدود،  $L_{aa}$  به دست می آید. با جایگذاری مقادیر جریان در (۶) تا (۸) و محاسبه شار پیوندی فاز  $b$  و  $c$  و میدان،  $L_{ab}$ ،  $L_{ac}$ ،  $L_{af}$  نیز محاسبه می شوند. به همین روش با جایگذاری مقادیر جریان در هر حالت، در (۵) تا (۸) بقیه اندوکتانس ها نیز محاسبه می شوند. زمانی به نتایج محاسبه شده برای اندوکتانس ها در این حالت می توان اعتماد کرد که رفتار ماشین در نقطه کار ماشین نیز خطی باشد و دچار اشباع نشود؛ در غیر این صورت، رفتار غیرخطی آهن تأثیر بسزایی بر مدل ماشین خواهد داشت. شکل (۴) اندوکتانس های خودی سیم پیچ فاز  $A$ ،  $B$  و  $C$  را برحسب موقعیت مکانی محرک نشان می دهد. شکل (۵) اندوکتانس های متقابل بین سیم پیچی فازهای آرمیچر را نشان می دهد. در شکل (۶) نیز اندوکتانس متقابل بین سیم پیچ آرمیچر و میدان نشان داده شده است. واضح است اندوکتانس ها برحسب موقعیت مکانی محرک پریودیک اند و شکل موج ها تکرار می شوند. در شکل ها دو دوره مکانی آن نشان داده شده است.

برای اندوکتانس های ماشین، با استفاده از نتایج تحلیل اجزای محدود، روش برازش منحنی و (۱۷) روابطی برحسب موقعیت مکانی محرک به دست می آید و چون اندوکتانس ها در هر دوره تکرار می شوند، برای تمام موقعیت های مکانی از این روابط می توان استفاده کرد و اندوکتانس های خودی و متقابل را محاسبه کرد.

$$f(x) = a_1 * \sin(b_1x + c_1) + \dots + a_8 * \sin(b_8x + c_8) \quad (17)$$

بر مبنای طراحی و کنترل در موتورهای سویچ [۱۴] رلوکتانس مرسوم و ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم [۱۵] را با اندکی تحلیل بیشتر می‌توان برای کاهش نوسانات نیروی پیشران در موتورهای خطی به کار برد. در [۱۶-۱۷] مرور کاملی بر روش‌های کنترلی کاهش ریپل گشتاور در موتورهای PMSM و BLDC شده است.

در اینجا یک روش کنترل کاهش ریپل پیشران ارائه شده است که با استفاده از کنترل دامنه ولتاژ تغذیه ماشین خطی و اندازه‌گیری سرعت ماشین، سرعت ماشین را حول مقدار مرجع کنترل می‌کند و نوسانات نیروی پیشران را کاهش می‌دهد. سیستم کنترلی مطابق شکل (۹) روی مدل ماشین اعمال می‌شود.

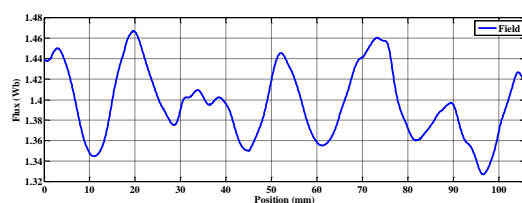
کنترل برداری غیرمستقیم جریان  $i_q$  روی ماشین پیاده‌سازی شده است. کنترلر سرعت، مرجع نیروی پیشران  $F_x$  را تولید می‌کند که طبق (۱۵) متناسب با جریان  $i_q$  است. از سنسور موقعیت خطی می‌توان زاویه  $\theta$  را به دست آورد که برای به دست آوردن مرجع جریان‌های سه فاز لازم است. علامت منفی در روابط به دلیل حرکت بخش متحرک برخلاف جهت میدان سیار است. در بلوک مدل ماشین، نیروی پیشران ماشین با استفاده از (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌شود که معادله حرکت ماشین است.

شکل (۱۰) نیروی پیشران SSLFSM پس از اعمال روش کنترلی را نشان می‌دهد. میزان ریپل نیروی پیشران ۱۸٪ است که در مقایسه با حالت بدون کنترل (۴۴٪) نشان می‌دهد روش کنترلی به خوبی عمل کرده است و نوسانات نیروی پیشران به طور محسوسی کاهش یافته و عملکرد ماشین نسبت به حالت بدون کنترل بهتر شده است. شکل (۱۱) و شکل (۱۲) به ترتیب شکل موج سرعت و ولتاژ تغذیه فاز A را نشان می‌دهند. شکل (۱۳) نیز شکل موج جریان سه فاز تغذیه آرمیچر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود به دلیل تغذیه موتور با اینورتر و اعمال ولتاژهای واقعی موج مربعی، هارمونیک‌هایی در شکل موج جریان به وجود می‌آیند که میزان این هارمونیک‌ها نسبت به حالت بدون کنترل کاهش می‌یابد. شکل (۱۴) نمودار FFT جریان یک فاز را نشان می‌دهد.

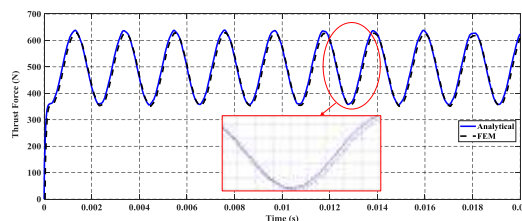
اکنون با محاسبه  $k_f = 3\pi n_p \lambda_{rms} / 2 = 46.158$  نیروی پیشران، مدل‌سازی ماشین به صورت کامل انجام شده است.

$$\lambda_f = L_{ff} i_f \quad (18)$$

شکل (۸) نیروی پیشران محاسبه‌شده ماشین را نشان می‌دهد که تحلیل آن را تأیید می‌کند. روش استفاده‌شده برای به دست آوردن نیرو در شبیه‌سازی اجزای محدود بر مبنای روش تانسور نیرو است. در اینجا ماشین با جریان ۱۰ آمپر سینوسی تغذیه می‌شود. همان‌طور که مشخص است نوسانات نیروی پیشران، زیاد و میزان ریپل نیروی پیشران ۴۴٪ است که می‌توان با روش‌های کنترلی مناسب میزان ریپل آن را کاهش داد.



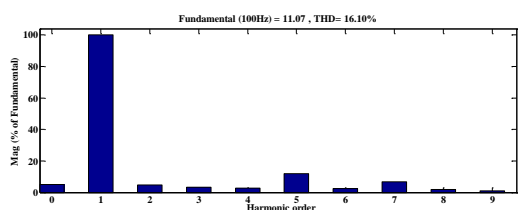
شکل (۷): شکل موج شار پیوندی سیم پیچی میدان



شکل (۸): نیروی پیشران ماشین

## ۵- کنترل

در ماشین‌های خطی، با طراحی مغناطیسی بهینه یا با روش‌های کنترلی، نوسانات نیروی پیشران را می‌توان کاهش داد؛ برای مثال، در [۸] با استفاده از تغییر انتهای دندان‌های دندانه محرک، ریپل نیروی پیشران کاهش داده شده است. در [۱۳] نحوه ایجاد نیروی پیشران با استفاده از طراحی ماشین خطی شار سویچینگ بررسی شده است؛ اما روش‌های کاهش ریپل مبتنی بر طراحی غالباً با افزایش مؤثر فاصله هوایی همراه است؛ به همین دلیل، باعث کاهش متوسط نیروی پیشران تولیدشده می‌شوند. روش‌های کاهش ریپل گشتاور



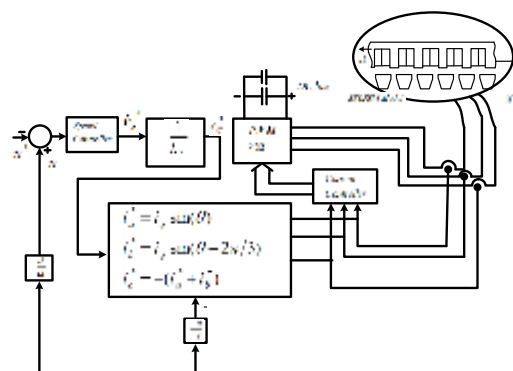
شکل (۱۴): تحلیل جریان تغذیه ماشین

### ۶- نتیجه گیری

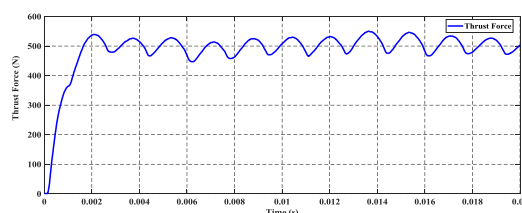
در این مقاله مدل ماشین خطی شار سوییچینگ با ثانویه قطعه‌بندی شده به‌طور جامع بررسی و تحلیل شد و با مطالعه مقالات دیگر و همچنین، شبیه‌سازی با تحلیل اجزای محدود ساختار بهینه از لحاظ هارمونیک و عدم تعادل شکل موج نیروی ضد محرکه انتخاب شد. در ادامه، مدل تحلیلی ماشین با استفاده از اجزای محدود ارائه شد که نتایج این روش به‌خوبی با نتایج تحلیل اجزای محدود مطابقت داشتند. نیروی پیشران در ماشین‌های SSLFSM، نوسانات زیادی دارد. اینجا برای نخستین‌بار، کاهش دامنه نوسانات نیرو در SSLFSM، بررسی و یک روش کنترلی برای کاهش نوسانات نیروی پیشران و کنترل سرعت ارائه شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، موثر بودن این روش کنترلی را تأیید می‌کند.

### مراجع

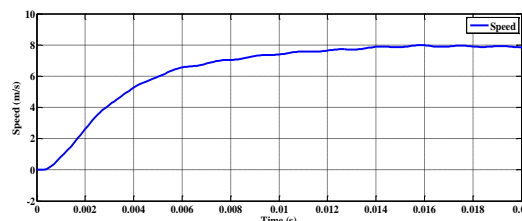
- [1] M. Golzarzadeh, and B. Ganji. "Analytical modelling of the linear switched reluctance motor with segmental translator." *IET Electric Power Applications*, Vol. 13, no. 4, pp. 527-537, 2019.
- [2] A. Rezaei, B. Norouzi, "Modeling and Simulation of Down Hole Drilling Motor Using Computational Intelligence Methods," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 71-82, 2017. (in Persian)
- [3] M.S. Hosseini, H. Javadi, S. Vaez-Zadeh, and S. Abdollahi, "Precise dq model development of linear flux switching motors with segmented secondary for rail transportation applications," *IET Electric Power Applications*, Vol. 12, No. 2, pp. 213-221, 2018.
- [4] Q.Lu, Y.Yao, J. Shi, Y. Shen, X.Huang, and Y. Fang, "Design and Performance Investigation of Novel Linear Switched Flux PM Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, No. 5, pp. 4590-4602, 2017.
- [5] C. Liu, C. Hwang, P. Li, S. Hung and P. Wending, "Design Optimization of a Double-Sided Hybrid Excited Linear Flux Switching PM Motor with Low Force Ripple," *IEEE Transactions on Magnetics*,



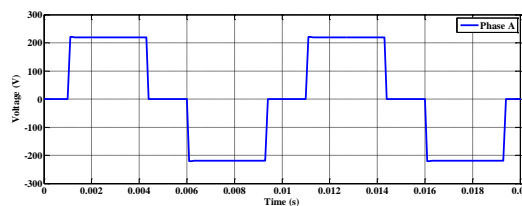
شکل (۹): دیاگرام ماشین و کنترل آن



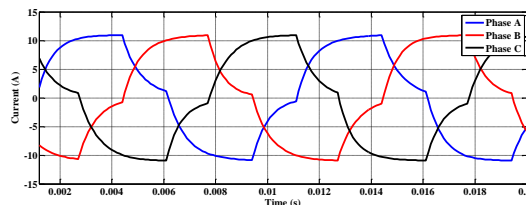
شکل (۱۰): نیروی پیشران شبیه‌سازی با کنترل



شکل (۱۱): شکل موج سرعت ماشین



شکل (۱۲): شکل موج ولتاژ تغذیه (فاز A)



شکل (۱۳): جریان آرمیچر SSLFSM با ۸,۶ قطعه در ثانویه



- switching permanent-magnet motor,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 7, pp. 4056-4064, 2015.
- [13] A. Gandhi, and L. Parsa, “Thrust optimization of a flux-switching linear synchronous machine with yokeless translator,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 49, No. 4, pp. 1436-1443, 2013.
- [14] O. Naderi Samani, B. Ganji, “Noise Reduction in Switched Reluctance Machine Using Shape Optimization and Design of Experiment Algorithm,” *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 1-8, 2017. (in Persian).
- [15] H. Mostafavi, B. Mirzaeian, Dehkordi, M. Ataie, M. Sadeghi Goghar, “Direct Torque Control of IPMSM to Improve Torque ripple and Efficiency based on Fuzzy Controller”, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 31-38, 2012. (in Persian).
- [16] C. A. Lopez, W. R. Jensen, S. Hayslett, S. N. Foster, and E. G. Strangas. "A Review of Control Methods for PMSM Torque Ripple Reduction." *XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 521-526. IEEE, 2018.d
- [17] M. P. Maharajan and S. A. E. Xavier, "Design of Speed Control and Reduction of Torque Ripple Factor in BLdc Motor Using Spider Based Controller," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, No. 8, pp. 7826-7837, Aug. 2019.
- Vol. 50, No. 11, pp. 1-4, Nov. 2014.
- [6] B.Zhang, M.Cheng, R.Cao, Y.Du and G.Zhang, “Analysis of linear flux-switching permanent magnet motor using response surface methodology,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 11, pp. 1-4, 2014.
- [7] D.Wang, X. Du, D.Zhang and Wang, “Design, Optimization, and Prototyping of Segmental-Type Linear Switched-Reluctance Motor with a Toroidally Wound Mover for Vertical Propulsion Application,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 2, pp. 1865-1874, 2018.
- [8] C.F.Wang, J.X. Shen, Y.Wang, L.L. Wang, and M.J. Jin, “A new method for reduction of detent force in permanent magnet flux-switching linear motors,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45 No. 6, pp. 2843-2846, 2009.
- [9] Y.W Zhu, S.M. Jin, K.S. Chung, and Y.H Cho, “Control-based reduction of detent force for permanent magnet linear synchronous motor,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 6, pp. 2827-2830, 2009.
- [10] S.E. Abdollahi, and S.Vaez-Zadeh, “Back EMF analysis of a novel linear flux switching motor with segmented secondary,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 50, No. 4, pp. 1-9, 2014.
- [11] S. Zhou, H.Yu, M.Hu, C. Jiang and L.Huang, “Nonlinear equivalent magnetic circuit analysis for linear flux-switching permanent magnet machines,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 2, pp. 883-886, 2012.
- [12] R. Cao, M. Cheng and B. Zhang, “Speed control of complementary and modular linear flux-

---

<sup>1</sup> Segmented Secondary Linear Flux Switching Machine (SSLFSM)