



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 11, No. 2, 2020
Research Paper

FEM-Aided Analytical Model and Control of SSLFSM Thrust Force

Ehsan Ismaili Zadeh Shirali¹, Saeed Hasanzadeh², Seyed Mohammad Dehghan³

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

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

³ 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.



2252-083X/ © 2020 The Authors. Published by University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2019.114726.1189>

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

احسان اسماعیلی زاده شیرالی^۱، سعید حسن زاده^{۲*}، سید محمد دهقان^۳

۱- فارغ التحصیل 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 حمل و نقل 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 سوئیچینگ با ثانویه قطع شده 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 سوئیچینگ با ثانویه قطع شده ارائه می‌شود. با شبیه‌سازی المان محدود، نتایج مدل تحلیلی صحت‌سنجی می‌شوند و سپس یک روش کنترلی برای کاهش نوسانات نیروی پیشران و کم کردن نیروی نگهدارنده ماشین خطی شار سوئیچینگ با ثانویه قطع بندی شده پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، تحلیل اجزای محدود، ثانویه قطع بندی شده، نیروی نگهدارنده، ماشین خطی شار سوئیچینگ

۱- مقدمه

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 سوئیچینگ (LFMS) با ساختارهای گوناگون نقد و بررسی بیشتری شده‌اند [۳-۶]. LFMSها در آسانسورهای بلند و سیستم‌های حمل و نقل ریلی بیشتر استفاده می‌شوند. LFMSها علاوه بر ساختار قوی و ساده اولیه و ثانویه، چگالی نیروی بالاتری نسبت به ماشین‌های سوئیچینگ شار

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵

نام نویسنده مسئول: سعید حسن زاده

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

ماشین

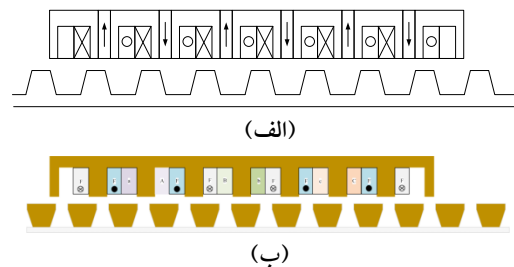
تحلیل رفتار و کنترل نیروی پیشران ماشین امر مهمی است؛ از این رو، مدل‌سازی ماشین ضرورت دارد. برخی از پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه کنترل و مدل‌سازی برخی ماشین‌های خطی به شرح زیر است. یک مدل دندان‌ای با مدار معادل غیرخطی مغناطیسی برای شرح مکانیزم نیروهای دندان‌ای در ماشین شار سوییچینگ ارائه شده است [۱۱]. روش پاسخ سطحی همراه با تحلیل اجزای محدود برای محاسبه بازده ماشین شار سوییچینگ خطی ارائه شده است. به‌منظور 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 ذکرشده، 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 به‌راحتی 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.

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 به‌کاررفته در کاربرد قطارهای معلق مغناطیسی Maglev شده است.

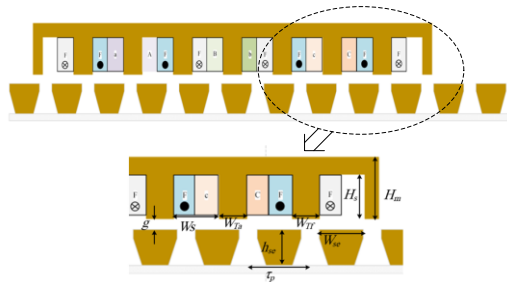
یکی از مشکلات استفاده از ماشین‌های خطی در کاربرد سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی، هزینه‌های ناشی از بلندبودن ثانویه است؛ به همین دلیل، ساختارهای با ثانویه قطع‌بندی شده ارائه شده‌اند. شکل (۱) ساختار مرسوم و ساختار قطع‌بندی شده را برای ماشین LFSM نشان می‌دهد و در آن مشخص است در ثانویه ماشین با ساختار قطع‌بندی 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 محرکه (Back EMF) و عدم تعادل ولتاژ فازها است. یک روش بهبود شکل موج نیروی ضد محرکه 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 کم‌کردن نیروی نگهدارنده ماشین خطی شار سوییچینگ با ثانویه قطع‌بندی شده، می‌توان از روش کنترلی مناسب بهره برد.



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

۲- ساختار



شکل (۲): ساختار مطالعه‌شده ماشین خطی شار سوییچینگ 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^2)	۲
W_{Ta}	عرض دندان آرمیچر (mm)	۱۵
W_{Tr}	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

حمل و نقل 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 هدف استفاده در حمل و نقل ریلی به دلیل استفاده از قطعه‌بندی در ثانویه و در نتیجه مصرف آهن کمتر مطالعه می‌شود. ساختار استفاده‌شده در این مقاله در شکل (۲) نشان داده شده است. در ماشین‌های خطی شکل موج نیروی ضد محرکه و میزان هارمونیک و عدم تعادل آن به‌طور چشمگیری بر عملکرد ماشین اثر می‌گذارد و این ساختار نیز از این قاعده مستثنی نیست. تعداد قطعه‌ها در ثانویه اصلی‌ترین پارامتر است که بر شکل موج نیروی ضد محرکه تأثیر می‌گذارد. تعداد قطعه‌های ثانویه و تأثیر آن بر رفتار ماشین بررسی شده‌اند [۱۱]. براساس نتایج آن و بررسی انجام‌شده، ساختار بهینه با ۸،۶ قطعه در ثانویه برای تحلیل در این مقاله انتخاب می‌شود.

ساختار هسته محرک SSLFSM مشابه هسته اولیه ماشین‌های خطی سنکرون مرسوم‌اند. کلاف‌ها به‌صورت متمرکزند و هر دندان محرک با یک سیم‌پیچ آرمیچر و یک سیم‌پیچ میدان احاطه شده است. همچنین، جهت جریان در هر سیم‌پیچی میدان باید مخالف با سیم‌پیچ مجاور باشد. ثانویه SSLFSM از قطعه‌های ساده تشکیل شده است که جنس هر قطعه از ورقه‌های فولاد مغناطیسی است. در شکل (۲)، سیم‌پیچ سیم‌پیچی میدان و سیم‌پیچی‌های فاز A، B و C مشخص شده‌اند. پارامترهای طراحی مدار مغناطیسی اصلی SSLFSM شامل تعداد دندان‌های محرک، میدان محرک و عرض دندان آرمیچر، ارتفاع و عرض شیار محرک، عمق یوغ محرک، گام سیم‌پیچ ثانویه و عمق قطعه ثانویه است. در این مقاله، یک SSLFSM با ۱۴ شیار اولیه طراحی شده است. اگرچه پهنای دندان آرمیچر می‌تواند 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.

۳- مدل‌سازی

مدل‌سازی ماشین با استفاده از رابط بین تحلیل اجزای محدود و MATLAB امری بسیار دشوار و وقت‌گیر است. در ادامه، برای مدل‌سازی ماشین از نتایج تحلیل اجزای محدود استفاده می‌شود. در این مقاله با هدف کنترل ماشین، مدل‌سازی انجام می‌شود و پارامترهای ماشین از روابط حوزه زمان abc استخراج شده از تحلیل المان محدود در مدل ماشین به کار گرفته می‌شوند و تأکیدی بر مدار معادل ماشین در حوزه dq نیست. در این بخش، براساس روابط الکترومغناطیسی حاکم بر رفتار ماشین‌های الکتریکی، مدل ریاضی ماشین خطی شار سوییچینگ به دست می‌آید. ولتاژ

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.

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

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 \vec{J} و \vec{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، λ_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:

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

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

هر فاز و ولتاژ میدان برحسب جریان و شار هر سیم‌پیچ به صورت (۱) تا (۴) نوشته می‌شوند:

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

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

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

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

که در آن V ولتاژ سیم‌پیچ، r مقاومت سیم‌پیچ، i جریان سیم‌پیچ، ψ 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:

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

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

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

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

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

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

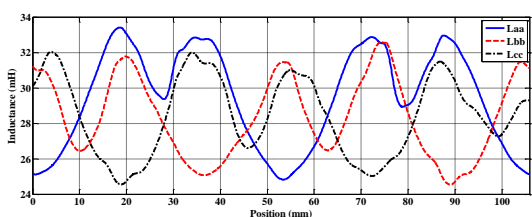
$$V_f = r i_f + L_{fa} \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_{fa}}{dt} + L_{fb} \frac{di_b}{dt} + \quad (12)$$

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

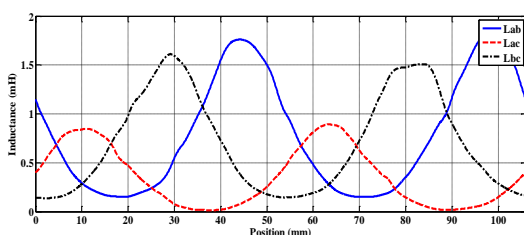
برحسب موقعیت مکانی محرک به دست می‌آید و چون اندوکتانس‌ها در هر دوره تکرار می‌شوند، برای تمام موقعیت‌های مکانی از این روابط می‌توان استفاده کرد و اندوکتانس‌های خودی و متقابل را محاسبه کرد.

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

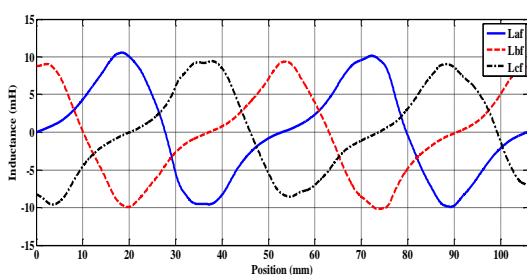
که در آن a_i ، b_i و c_i ها، پارامترهای ثابت فرمول‌اند و با استفاده از نرم‌افزار محاسبه می‌شوند.



شکل (۴): اندوکتانس خودی فازهای آرمیچر



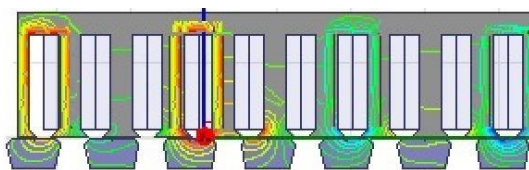
شکل (۵): اندوکتانس‌های متقابل فازهای آرمیچر نسبت به هم



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

با محاسبه روابط اندوکتانس‌ها شار ماشین محاسبه می‌شود و با استفاده از (۹) تا (۱۳) و با اعمال ولتاژ سه فاز و در نظر گرفتن جریان آرمیچر به‌عنوان متغیر حالت، سیم‌پیچی‌های ماشین مدل‌سازی می‌شوند و جریان‌ها به دست می‌آیند. با مشخص شدن جریان و با استفاده از (۱۵) نیروی پیشران ماشین محاسبه می‌شود. به این منظور باید ضریب K_f در (۱۵) محاسبه شود. این رابطه از روابط ماشین خطی آهن‌ربای دائم استخراج شده است که در آن λ_p شار

است. شکل (۳) ساختار تحلیل اجزای محدود و خطوط میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل (۳): شکل میدان مغناطیسی SSLFSM شبیه‌سازی شده با تحلیل اجزای محدود

همان‌طور که در (۱) تا (۴) مشخص است، مدل‌سازی سیم‌پیچی‌های ماشین به محاسبه شار پیوندی نیازمند است که برای این امر با توجه به (۵) تا (۸) باید در ابتدا روابط اندوکتانس‌های خودی و متقابل را برای سیم‌پیچی‌های فازها و میدان به دست آورد؛ به‌طور مثال، برای محاسبه L_{aa} با استفاده از تحلیل اجزای محدود در (۵)، همه جریان‌ها به جز I_a صفر و برای یک مقدار DC (۱ آمپر) گذاشته می‌شود و در نتیجه با جایگذاری مقادیر جریان در (۵) و محاسبه شار فاز a با استفاده از تحلیل اجزای محدود، L_{aa} به دست می‌آید. با جایگذاری مقادیر جریان در (۶) تا (۸) و محاسبه شار پیوندی فاز b و c و میدان، L_{ab} ، L_{ac} و L_{bc} نیز محاسبه می‌شوند. به همین روش با جایگذاری مقادیر جریان در هر حالت، در (۵) تا (۸) بقیه اندوکتانس‌ها نیز محاسبه می‌شوند. زمانی به نتایج محاسبه‌شده برای اندوکتانس‌ها در این حالت می‌توان 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) اندوکتانس‌های خودی سیم‌پیچ فاز A ، B و C را برحسب موقعیت مکانی محرک نشان می‌دهد. شکل (۵) اندوکتانس‌های متقابل بین سیم‌پیچی‌های آرمیچر را نشان می‌دهد. در شکل (۶) نیز اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ آرمیچر و میدان نشان داده شده است. واضح است اندوکتانس‌ها برحسب موقعیت مکانی محرک پریودیک‌اند و شکل موج‌ها تکرار می‌شوند. در شکل‌ها دو دوره مکانی آن نشان داده شده است.

برای اندوکتانس‌های ماشین، با استفاده از نتایج تحلیل اجزای محدود، روش برازش منحنی و (۱۷) روابطی

محرك، رپیل 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 رپیل مبتنی بر طراحی غالباً با افزایش مؤثر فاصله هوایی همراه است؛ به همین دلیل، باعث کاهش متوسط نیروی پیشران تولیدشده می‌شوند. روش‌های کاهش رپیل گشتاور 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 رپیل گشتاور در موتورهای PMSM و BLDC شده است.

در اینجا یک روش کنترل کاهش رپیل 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.

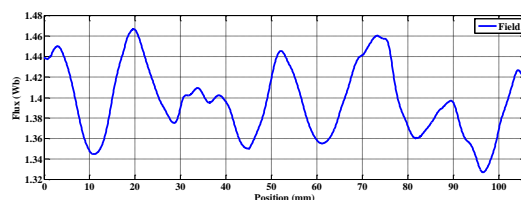
کنترل برداری غیرمستقیم جریان i_q روی ماشین پیاده‌سازی شده است. کنترلر سرعت، مرجع نیروی پیشران F_x را تولید می‌کند که طبق (۱۵) متناسب با جریان i_q است. از سنسور موقعیت خطی می‌توان زاویه θ را به دست آورد که برای به دست آوردن مرجع جریان‌های سه فاز لازم است. علامت منفی در روابط به دلیل حرکت بخش متحرک برخلاف 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 رپیل نیروی پیشران ۱۸٪ است که در مقایسه با حالت بدون کنترل (۴۴٪) نشان می‌دهد روش کنترلی به‌خوبی عمل کرده است و نوسانات نیروی پیشران به‌طور 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

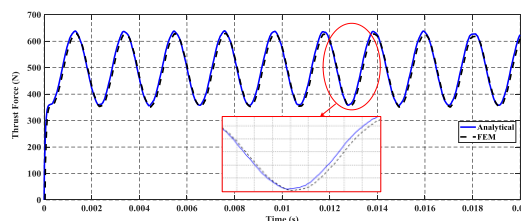
مگنت است. در این ماشین چون جریان تحریک ثابت است، سیم‌پیچی میدان ماشین را می‌توان مشابه یک مگنت در نظر گرفت و شار میدان ناشی از جریان سیم‌پیچ میدان را با استفاده از (۱۸) محاسبه کرد. شکل موج شار میدان در شکل (۷) نشان داده شده است. مقدار عددی از جایگذاری شار مؤثر سیم‌پیچ میدان به دست می‌آید، $k_f = 3\pi n_p \lambda_{fms} / 2 = 46.158$. اکنون با محاسبه نیروی پیشران، مدل‌سازی ماشین به‌صورت 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 رپیل نیروی پیشران ۴۴٪ است که می‌توان با روش‌های کنترلی مناسب میزان رپیل آن را کاهش داد.



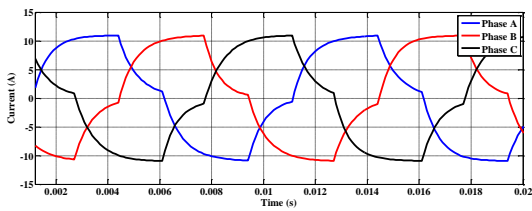
شکل (۷): شکل موج شار پیوندی سیم‌پیچی میدان



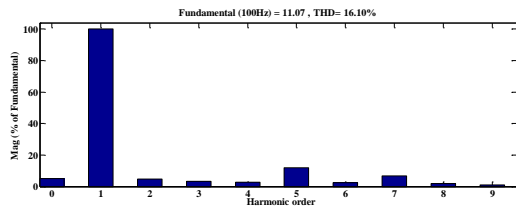
شکل (۸): نیروی پیشران ماشین

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 دندانه



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



شکل (۱۴): تحلیل FFT جریان تغذیه ماشین

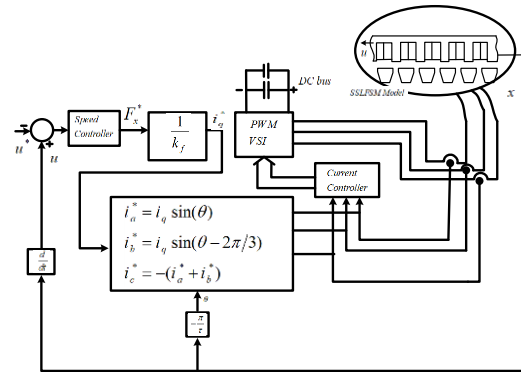
۶- نتیجه گیری

در این مقاله مدل ماشین خطی شار سویچینگ با ثانویه قطعه بندی شده به طور جامع بررسی و تحلیل شد و با مطالعه مقالات دیگر و همچنین، شبیه سازی 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 به خوبی با نتایج تحلیل اجزای محدود مطابقت داشتند. نیروی پیشران در ماشین های SSLFSM، نوسانات زیادی دارد. اینجا برای نخستین بار، کاهش دامنه نوسانات نیرو در SSLFSM، بررسی و یک روش کنترلی برای کاهش نوسانات نیروی پیشران و کنترل سرعت ارائه شد. نتایج حاصل از شبیه سازی، موثر بودن این روش کنترلی را تأیید می کند.

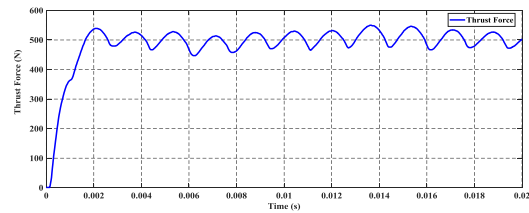
مراجع

- [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.

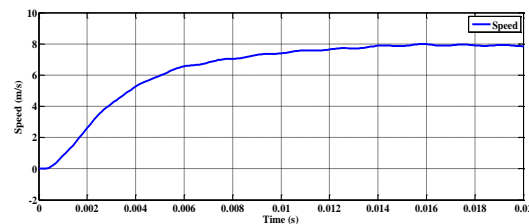
می شود به دلیل تغذیه موتور با اینورتر و اعمال ولتاژهای واقعی موج مربعی، هارمونیک هایی در شکل موج جریان به وجود می آیند که میزان این هارمونیک ها نسبت به حالت بدون کنترل کاهش می یابد. شکل (۱۴) نمودار FFT جریان یک فاز را نشان می دهد.



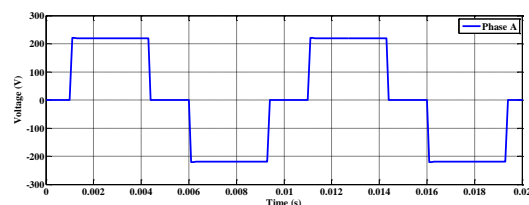
شکل (۹): دیاگرام ماشین و کنترل آن



شکل (۱۰): نیروی پیشران شبیه سازی با کنترل



شکل (۱۱): شکل موج سرعت ماشین



شکل (۱۲): شکل موج ولتاژ تغذیه (فاز A)

- 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-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.
- [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*, 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

¹ Segmented Secondary Linear Flux Switching Machine (SSLFSM)