

## اصول موتورهای خطی و شبیه سازی موتورهای خطی سنکرون با مغناطیس دائم

### (PMLSM)

پریسا امجدیان

دانشکده مهندسی برق

دانشگاه علم و صنعت ایران

[p\\_amjadian@yahoo.com](mailto:p_amjadian@yahoo.com)

حامد حمزه بهمنی

دانشکده مهندسی برق

دانشگاه علم و صنعت ایران

[www.hamzهبahmani.net](http://www.hamzهبahmani.net)

### چکیده

موتورهای خطی مدل‌های الکترومکانیکی هستند که در آنها نیرو و حرکت خطی به طور مستقیم و بدون نیاز به هیچ گونه واسطه و مبدل مکانیکی ایجاد می‌شود این موتورها نسل جدیدی از ماشین‌های الکتریکی هستند که در چند سال اخیر مورد توجه طراحان ماشین آلات صنعتی و صاحبان صنایع قرار گرفته‌اند. موتورهای خطی دارای عملکرد خوبی برحسب سرعت، شتاب، نیرو و موقعیت یابی دقیق هستند. به منظور شناخت مشخصات فنی و نحوه عملکرد موتورهای خطی لازم است اصول اولیه و روابط اساسی حاکم بر این نوع ماشین‌های خاص مورد مطالعه قرار بگیرند. در این مقاله ابتدا اصول اساسی و ساختار کلی موتورهای خطی تشریح می‌شود، سپس معادلات و روابط اساسی حاکم بر موتورهای خطی سنکرون با مغناطیس دائم (PMLSM) و نیز مدار معادل این نوع موتورها بدست می‌آید و نهایتاً با شبیه سازی معادلات بدست آمده رفتار خروجی این نوع از موتورهای خطی بدست خواهد آمد.

**واژگان کلیدی:** موتور خطی، موتور خطی سنکرون با مغناطیس دائم، مشخصه‌های دینامیکی

### ۱- مقدمه

حرکت اکثر سیستم‌های اتوماسیون و ماشین آلات صنعتی به صورت خطی انجام می‌شود و به همین خاطر در این سیستم‌ها محرک‌های تولید نیرو و حرکت خطی مورد نیاز هستند. برای تولید حرکت خطی در این سیستم‌ها اغلب از موتورهای

الکتریکی دوار استفاده شده است که به واسطه مبدل‌های مکانیکی ، حرکت دورانی آنها به حرکت خطی با مشخصات مورد نیاز تبدیل می‌شود. وجود این مبدل‌های مکانیکی سبب بروز مشکلات زیادی در حین نگهداری و تعمیرات سیستم می‌شود. موتورهای خطی نسل جدیدی از ماشین‌های الکتریکی هستند که در آنها نیرو و حرکت خطی بدون هیچ واسطه مکانیکی و مستقیماً توسط میدان الکترومغناطیسی تولید می‌شود. موتورهای خطی جایگزین مناسبی برای موتورهای دوار هستند که به واسطه مبدل‌های مکانیکی ، تولید نیرو و حرکت خطی می‌کنند. اغلب کشورهای صنعتی پس از انجام مطالعات وسیعی که روی موتورهای خطی و چگونگی استفاده از آنها در اتوماسیون صنایع داشته‌اند هم اکنون در بسیاری از زمینه‌های کاربردی و صنعتی از شکلهای مختلف این نوع موتورها استفاده می‌کنند. موتورهای خطی در کاربردهایی مانند نصب سریع قطعات ، بالا و پایین بردن وسایل و قطعات ماشین آلات ، صنایع چاپ و بسته بندی ، صنایع غذایی ، خطوط مونتاژ کارخانجات ، زمینه‌های مختلف رباتیک و به طور کلی در مواردی که سرعت پاسخ دهی سریع و موقعیت یابی دقیق مورد نیاز است بسیار مناسب هستند.

همانند موتورهای دوار ، موتورهای خطی نیز در انواع مختلفی طراحی و ساخته می‌شوند. موتورهای خطی القایی ، موتورهای خطی سنکرون ، موتورهای خطی پله‌ای و سرو موتورهای خطی که هر کدام همتای خطی نوع دوارشان هستند ساخته شده‌اند و بسته به نوع نیاز و کاربرد از آنها استفاده می‌شود. در موتورهای دوار خروجی مکانیکی ماشین با صورت سرعت دورانی (برحسب رادیان بر ثانیه) و گشتاور (برحسب نیوتن - متر) بیان می‌شود. با توجه به اینکه موتورهای خطی دارای حرکت خطی هستند لذا خروجی مکانیکی آنها به صورت سرعت خطی (برحسب متر بر ثانیه) و نیرو (برحسب نیوتن) بیان می‌شود. در این مقاله رفتار دینامیکی موتور خطی سنکرون با مغناطیس دائم در حین راه اندازی و رسیدن به سرعت پایدار و نیز پاسخ دینامیکی آن طی مراحل مختلف بارگذاری و بار برداری شبیه سازی و بدست آمده‌اند.

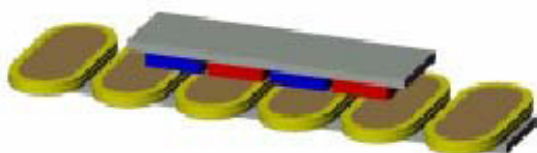
## ۲- اصول کار و ساختار موتورهای خطی سنکرون

اصول اساسی حاکم بر هر نوع موتور خطی ، همانند اصول اساسی حاکم بر همتای دوار آن است. تفاوت این دو نوع ماشین در خروجی مکانیکی آنها است. روابط و معادلات حاکم بر هر نوع موتور خطی را می‌توانیم با انجام تبدیلاتی از روابط و معادلات حاکم بر همتای دوارشان به دست آوریم. چنانچه در یک فرآیند فرضی ، یک موتور دوار سنکرون با مغناطیس دائم را در طول محور دوران آن برش داده و روی سطح گسترده نمائیم ، یک موتور خطی سنکرون با مغناطیس دائم (PMLSM) ساخته می‌شود که در آن به جای گشتاور و حرکت دورانی ، نیرو و حرکت خطی تولید می‌شود. شکل زیر این فرآیند را نشان می‌دهد.

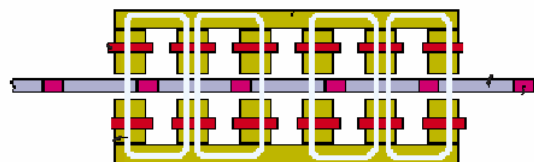


شکل (۱) : اصول موتور خطی

مشابه انواع ماشین‌های الکتریکی ، موتورهای خطی نیز از دو قسمت اصلی ساکن و متحرک تشکیل شده‌اند. قسمت متحرک موتورهای خطی ، اسلایدر و قسمت ساکن آنها استاتور نامیده می‌شود. در موتورهای خطی سنکرون با مغناطیس دائم ، میدان مغناطیسی اصلی توسط آهنربای دائم که روی اسلایدر آن و با قطب‌های متوالی قرار گرفته‌اند تولید می‌شود استاتور این موتورها شامل یک سیم پیچی سه فاز متعادل است که روی یک هسته مغناطیسی مورق پیچیده می‌شود. بسته به نوع کاربرد ، استاتور به صورت یکطرفه یا دو طرفه ساخته می‌شود. در شکل (۲) موتور خطی سنکرون با استاتور دو طرفه و در شکل (۳) موتور خطی سنکرون با استاتور دو طرفه نشان داده شده است :



شکل (۲) : PMLSM با استاتور یک طرفه



شکل (۳) : PMLSM با استاتور دوطرفه

در موتورهای خطی با استاتور دو طرفه نیرو از دو طرف و به طور یکسان بر سطح اسلایدر وارد می‌شود و در نتیجه حرکت یکنواخت‌تر و دقیق‌تری توسط آنها تولید می‌شود.

سرعت حرکت موتورهای خطی سنکرون در محدوده نیروی نامی مقدار ثابتی است (موتورهای سنکرون دوار در محدوده گشتاور نامی ، سرعت ثابتی دارند) و به همین خاطر این موتورها برای کاربردهایی که سرعت و حرکت خطی دقیق مورد نیاز است مناسب هستند. به عنوان مثال می‌توان به برشگرهای لیزری ، کاراندازهای خطی در رباتیک ، سیستم‌های کنترلی هوشمند و ماشین‌های بینایی اشاره کرد.

### ۳- مدل دینامیکی PMLSM در قاب مرجع ساکن

کارایی تقریباً همه انواع ماشین‌های سنکرون را می‌توان به میزان کافی و با انجام اصلاحاتی ساده، از معادلات ولتاژ استاتور ماشین‌های سنکرون دوار پیش بینی کرد. در ماشین‌های دوار جابجایی زاویه‌ای رتور با  $\theta_r$  مشخص می‌شود و به طور مشابه جابجایی خطی اسلایدر در موتورهای خطی با  $x_m$  نشان داده می‌شود. معادلات ولتاژ استاتور ماشین‌های سنکرون دوار در قاب مرجع سنکرون و چگونگی به دست آوردن آنها به تفصیل در مرجع [۵] آمده است. معادلات نظیر برای همتای خطی این ماشین‌ها یعنی معادلات ولتاژ استاتور موتورهای خطی سنکرون (با مغناطیس دائم)، با جایگزین کردن  $\theta_r$  با  $(\pi x_m)/\tau$  به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$V_{qs}^m = r_s i_{qs}^m + \frac{\pi}{\tau} \frac{dx_m}{dt} \lambda_{ds}^m + (L_{LS} + L_{mq}) p i_{qs}^m \quad (۱-الف)$$

$$V_{ds}^m = r_s i_{ds}^m - \frac{\pi}{\tau} \frac{dx_m}{dt} \lambda_{qs}^m + L_{LS} p i_{ds}^m + L_{md} (i_{ds}^m + i_{fd}^m) \quad (۱-ب)$$

که در آن

$$v = dx_m / dt : \text{سرعت خطی اسلایدر برحسب } m/s$$

$\tau$  : گام قطبی استاتور

$P$  : عملگر مشتق

معادلات شار پیوندی القایی که توسط مغناطیس دائم اسلایدر و جریان استاتور ایجاد می‌شود، توسط معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$\lambda_{qs}^m = L_{LS} i_{qs}^m + L_{mq} i_{qs}^m \quad (۲-الف)$$

$$\lambda_{ds}^m = L_{LS} i_{ds}^m + L_{md} (i_{ds}^m + i_{fd}^m) \quad (۲-ب)$$

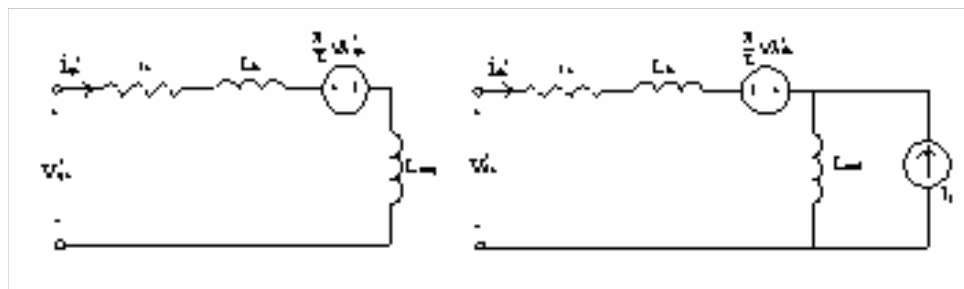
همانطور که در مقدمه اشاره شد، خروجی مکانیکی موتورهای خطی به صورت نیروی الکترومغناطیسی بیان می‌شود. در

موتورهای خطی سنکرون با مغناطیس دائم رابطه نیرو به صورت معادلات زیر بدست می‌آید:

$$F_m = \frac{3\pi}{2\tau} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (۳)$$

این رابطه نیروی الکترومغناطیسی تولید شده توسط PMLSM را بر حسب جریانها و شارهای ماشین روی محورهای  $q$  و  $d$  بیان می کند.

در معادله (۲-ب)  $L_{md} i'_{fd}^m$  شار پیوندی ناشی از جریان محور  $d$  اسلایدر ، منتقل شده به سمت استاتور است . در ماشین های سنکرون با مغناطیس دائم (هم نوع دوار و هم نوع خطی ) این جمله مقدار ثابتی است و عبارت است از شار پیوندی ناشی از مغناطیس دائم اسلایدر است . از این رو در این نوع ماشین ها این بخش از شار پیوندی را می توان به صورت  $L_{md} I_{fd}$  نشان داد . بنابراین با استفاده از معادلات (۱) مدار معادل PMLSM به صورت شکل زیر بدست می آید :



شکل (۴) : مدار معادل PMLSM

#### ۴- نتایج شبیه سازی

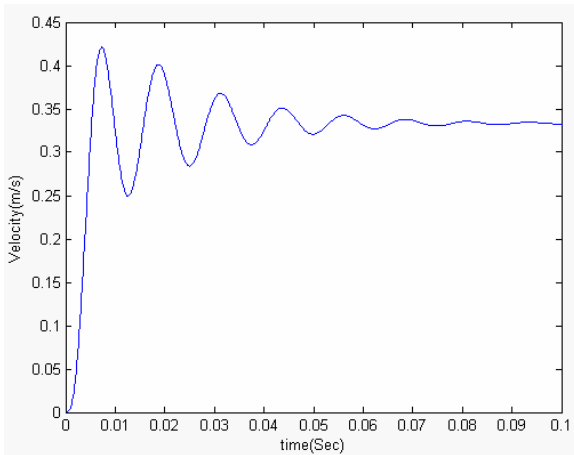
در بخش قبل مدل دینامیکی موتور خطی سنکرون با مغناطیس دائم به صورت معادلات (۱) و (۲) و نیز مدار معادل آن به صورت شکل (۴) بدست آورده شد. در این بخش با شبیه سازی این معادلات پاسخهای دینامیکی این ماشین ، سرعت و شتاب خطی اسلایدر و نیروی الکترومغناطیسی طی مراحل مختلف راه اندازی ، بارگذاری و باربرداری به دست خواهند آمد. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی ، در جدول ضمیمه آورده شده است .

#### ۴-۱- مشخصات دینامیکی PMLSM در راه اندازی :

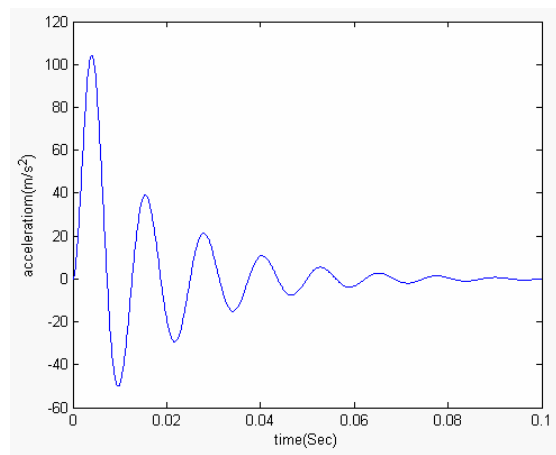
در راه اندازی یک سیستم دینامیکی همواره پاسخهای سیستم با عبور از یک حالت گذرا به حالت پایدار می رسند. در مورد

موتور خطی مورد مطالعه با مشخصات مندرج در جدول ضمیمه سرعت خطی اسلایدر در حالت پایدار  $\frac{1}{3}$  m/s است. در

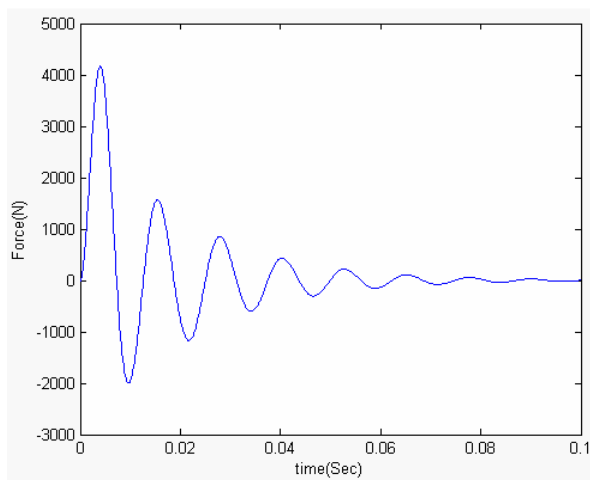
شکل های (۵) مشخصات دینامیکی این ماشین در حالت راه اندازی بدون بار نشان داده شده است:



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۵) : مشخصه های دینامیکی PMLSM در حالت راه اندازی بدون بار

الف) سرعت    ب) شتاب    ج) نیرو

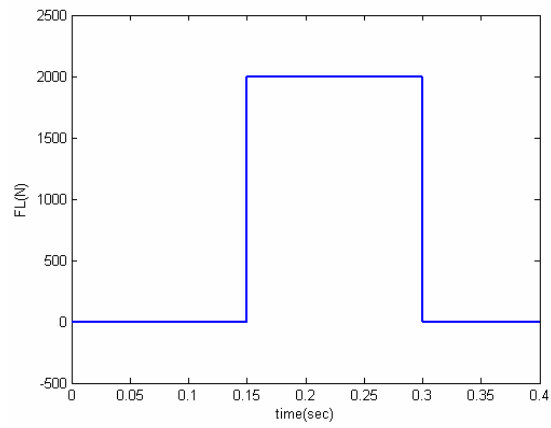
با توجه به شکل (۵-الف) دیده می شود سرعت اسلایدر در حالت پایدار به  $\frac{1}{3}$  m/s می رسد که پس از آن موتور با شتاب

صفر و سرعت ثابت به حرکت ادامه می دهد .

#### ۴-۲- مشخصات دینامیکی PMLSM طی مراحل بارگذاری و باربرداری

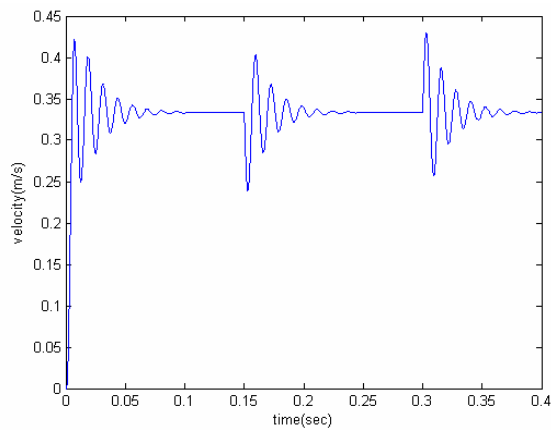
به منظور مشاهده رفتار دینامیکی موتور خطی مورد مطالعه در پاسخ به بارگذاری و باربرداری باری با مشخصه زمانی شکل

(۶) به موتور اعمال می شود:

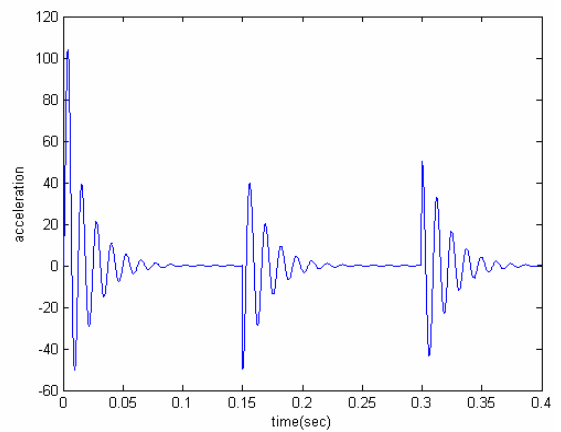


شکل (۶) : مشخصه بار اعمال شده به PMLSM

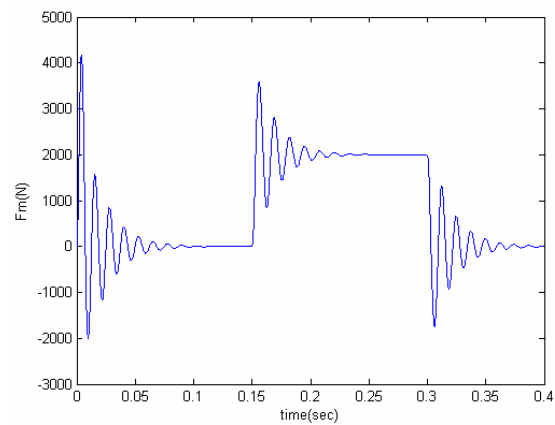
در شکل‌های زیر پاسخ‌های دینامیکی ماشین به مشخصه بار اعمال شده نشان داده شده است:



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۷) : مشخصات PMLSM طی مراحل مختلف بار گذاری و بار برداری

در شکل (۷-الف) دیده می‌شود که سرعت موتور در هر شرایط تغییر بار، در حالت پایدار به سرعت حالت بی‌باری می‌رسد (از مشخصه‌های موتورهای سنکرون) و با توجه به شکل (۷-ج) ملاحظه می‌شود که نیروی الکترومغناطیسی تولید شده توسط PMLSM، مشخصه بار را دنبال می‌کند.

#### ضمیمه :

مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی انجام شده به صورت جدول زیر می باشد :

voltage	Inductance q	Inductance d	resistance	PM flux	mass	Pole
۱۲۰V(rms)	۰.۰۰۸۵	۰.۰۰۸۵	۲.۸۷۵	۰.۱۷۵	۴۰	۲

جدول (۱)

#### نتیجه گیری

با توجه به سادگی ساختمان ، عدم وجود قسمت‌های مکانیکی متحرک و امکان کنترل دقیقی که روی موتورهای خطی می‌تواند صورت بگیرد ، استفاده از این نوع مولدهای حرکت خطی باعث کوچک شدن حجم سیستم و مهمتر از همه بالابردن راندمان سیستم می‌شود. خوشبختانه در چند سال اخیر کارهای تحقیقاتی مفیدی در زمینه موتورهای خطی در داخل کشور انجام شده است که امیدوارم با ادامه این روند بستر مناسبی برای تحقیقات بعدی و استفاده بهینه از موتورهای خطی در صنایع مختلف کشور فراهم گردد.

#### منابع :

[۱] jang-hwan , jong-woo choi and seung-ki sui “ High Proction Control of Linear Permanent Magnet Synchronouse Motor for Surface Mount Device Placement System”

[۲] Seok-Myeong jang, Member IEEE , Sung-Ho Lee, andIn-Ki Yoon “ Design Criteria for Detect Force Reduction of Permanent Magnet LinearSynchronous Motors With Halbach Array”

[۳] حمزه بهمنی ، حامد “ اصول و کاربرد موتورهای خطی و نظریه موتورهای خطی سنکرون ” پایان نامه کارشناسی ، دانشگاه بیرجند دیماه ۱۳۸۲

[۴] حمزه بهمنی ، حامد “ اصول موتورهای خطی و کاربردهای آن در اتوماسیون صنایع ” کارگاه آموزشی ، هفتمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ،

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

[۵] Krouse , poul C “ Analysis of Electric Machinery “ ۱۹۹۷