

علمی- پژوهشی

## مدل سازی و تحلیل ماشین ورنیر خطی یک طرفه با ساختار

## مغناطیس دائم سوار شده بر اولیه

محسن رستمی<sup>۱</sup>، پیمان نادری<sup>۲\*</sup>، عباس شیری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، ۳- استادیار گروه قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران  
(دریافت: ۹۸/۰۹/۲۷، پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۱)

## چکیده

در این مقاله، ماشین خطی ورنیر مغناطیس دائم نصب شده روی دندانه‌های اولیه با ابعاد هندسی طراحی شده ارائه می‌شود. ساختار هندسی بهبود یافته اولیه ماشین ورنیر خطی مطالعه شده موجب مطلوب تر شدن عملکرد آن در مقایسه با ساختار ماشین ورنیر موجود شده است. در ماشین مذکور، سیم پیچی‌های آرمیچر و عناصر مغناطیس دائم هر دو روی اولیه ماشین قرار گرفته‌اند که موجب سادگی ساختار ثانویه شامل هسته‌ای آهنی قطب برجسته می‌شود. این ویژگی باعث مقرون به صرفه شدن ماشین در مصارف با مسافت‌های طولانی ریل در عین بهبود ضریب توان و چگالی نیرو می‌گردد. بعد از تشریح ساختار ماشین، اساس کار ماشین بیان شده و در ادامه مشخصه‌های مغناطیسی مانند شار، ولتاژ بی‌باری، نیروی محوری و اندوکتانس‌های خودی و متقابل موجود بین فازهای مختلف ماشین پیشنهادی توسط تحلیل اجزای محدود تحلیل شده و همچنین با تجزیه خروجی‌های مذکور مشخصه‌های الکتریکی ماشین توسط سیمولینک متلب محاسبه می‌گردد.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل اجزای محدود دوبعدی، تحلیل هارمونیک، قاعده قفل‌شدگی مغناطیسی، ماشین ورنیر خطی مغناطیس دائم

## ۱. مقدمه

مشکل از سه فاصله هوایی و دو قسمت متحرک بوده و ساخت و تولید آن‌ها ملاحظات دشوارتری نسبت به سایر انواع ماشین‌ها دارند. به صورت مشابه به دلیل نبود طراحی دوبعدی ماشین‌های شار متقاطع و عرضی نیز از عیب مشکل بودن طراحی و تولید در کنار پایین بودن ضریب توان رنج می‌برند [۶-۵]. اساس عملکرد ماشین مغناطیس دائم ورنیر خطی، خاصیت دندانه مغناطیسی (MG<sup>۳</sup>) می‌باشد [۷]. با استفاده از دندانه‌های اولیه جهت پیاده‌سازی میدان مغناطیسی آهن‌ریا، ماشین ورنیر توانایی دارا بودن توأمان گشتاور بالا در سرعت پایین و سادگی توپولوژی که شامل یک قسمت متحرک به همراه فاصله هوایی مشابه ماشین‌های خطی متداول می‌باشد را پیدا می‌کند [۸ و ۹]. این ساختار دارای مشکل مکانیکی و ناپایداری حرارتی به دلیل قرار گرفتن آهن‌ریاها روی اولیه می‌باشد [۱۰]. با قرارگیری عناصر مغناطیس دائم در سطح دندانه‌های اولیه، مشکل مکانیکی و ناپایداری حرارتی به دلیل انطباق محور شار پیوندی ماشین بر محور طولی (DA<sup>۴</sup>)، که در راستای آن کمترین رلوکتانس وجود دارد، و در پی آن امکان افزایش فاصله اولیه و ثانویه بهبود می‌یابد

با افزایش نگرانی پیرامون مسائل انرژی و محیط‌زیست، بهره‌برداری و استفاده از انرژی‌های نو، مانند انرژی‌های تمیز و تجدیدپذیر به یکی از چالش‌برانگیزترین اولویت‌ها در بسیاری از زمینه‌ها از جمله صنعت برق تبدیل شده است [۱]. اخیراً به واسطه خاصیت سرعت پایین انرژی‌های نو، مانند انرژی بادی و موج، انواع مختلف از ماشین‌های الکتریکی همراه با عملکرد تولید گشتاور یا نیروی چگال به منظور عدم استفاده از روتور یا قسمت متحرک حجیم و گران‌قیمت مانند آنچه در ماشین‌های مغناطیس دائم دندانه‌ای (MGPM<sup>۱</sup>) و شار متقاطع (TFPM<sup>۲</sup>) وجود دارد پیشنهاد شده است [۲ و ۳]. با تجمع دندانه‌های مغناطیسی هم‌محور در ماشین مغناطیس دائم، ماشین‌های مغناطیس دائم دندانه مغناطیسی توانایی طراحی قسمت متحرک با محدوده حرکتی سرعتی وسیع از سرعت‌های بسیار کم تا زیاد را به صورت هم‌زمان به دست می‌آورند [۴]. این ماشین‌ها ساختاری پیچیده

\* رایانامه نویسنده پاسخگو: p.naderi@sru.ac.ir

<sup>۳</sup> Magnetic gearing effect<sup>۴</sup> Secondary direct axis<sup>۱</sup> Magnetic gear permanent magnet<sup>۲</sup> Transverse flux permanent magnet

لذا، میدان مغناطیسی دوم به کمک سیم‌پیچی‌های اولیه ایجاد می‌گردد. جهت تولید نیروی مفید در ماشین می‌بایست رابطه (۱) در ماشین برقرار باشد.

$$p = |P_{PM} \pm n_s| \quad (1)$$

که  $n_s$ ،  $P_{PM}$  و  $p$  به ترتیب تعداد دندانه‌های فعال ثانویه، تعداد جفت قطب‌های مغناطیسی افقی و تعداد جفت قطب‌های سیم‌پیچی می‌باشد. با بیان تعریف  $l_a$  به عنوان طول فعال ( $AP^T$ ) ماشین، می‌توان گام شیار ثانویه را مطابق رابطه (۲) بیان نمود.

$$\tau_s = \frac{l_a}{n_s} \quad (2)$$

از طرف دیگر با فرض برابری سرعت حرکت آهن‌ربا  $v_{PM}$  با سرعت حرکت اولیه، فرکانس نامی ماشین از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$f = \frac{v}{\tau_s} \quad (3)$$

همچنین با توجه به اساس کار ماشین، نسبت قفل‌شدگی میدان‌های سیار ماشین  $G_r$  رابطه مستقیمی با تعداد جفت قطب‌های مغناطیسی افقی دارد، به عبارت دیگر می‌توان رابطه (۴) را برای نسبت مذکور در نظر گرفت.

$$G_r = \frac{n_s}{n_s - P_{PM}} \quad (4)$$

با توجه به روابط فوق،  $G_r$  یکی از پارامترهای اساسی در ماشین بوده که سرعت و گام قطب مؤثر شار مغناطیسی ماشین را مطابق روابط (۵) و (۶) تعیین می‌نماید.

$$v_{fluxeff} = \frac{n_s}{n_s - P_{PM}} v = G_r v \quad (5)$$

در روابط فوق  $W_{PM}$  عرض آهن‌رباها می‌باشد. با در نظر گرفتن عرض آهن‌ربا به صورت رابطه ذیل:

$$W_{PM} = 0.5\tau_s \quad (7)$$

با جایگذاری رابطه (۷) در (۶)، گام قطب مؤثر شار مغناطیسی ماشین از رابطه (۸) به دست می‌آید.

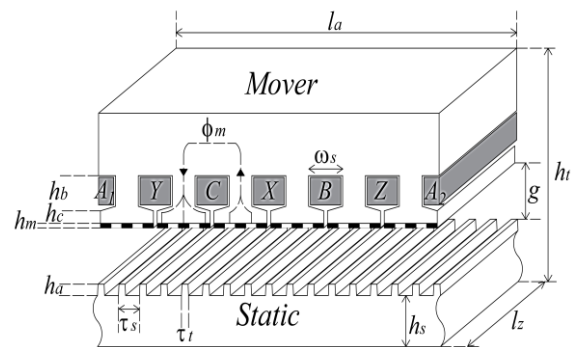
$$v_e = 0.5G_r \tau_s \quad (8)$$

از روابط فوق می‌توان نتایج ذیل را استنباط نمود.

- با انتخاب  $n_s > P_{PM}$  برخلاف ماشین‌های خطی متداول، جهت شار سیار ماشین موافق با جهت حرکت روتور شده و قدرت آن به دلیل تضعیف شار پیوندی کاهش می‌یابد.

[۱۱]. از مزایای دیگر طراحی فوق، توانایی درایو مستقیم تبدیل انرژی امواج به دلیل طراحی ساختاری ماشین و همچنین بالا رفتن راندمان تبدیل انرژی به واسطه حذف سازوکار تسمه‌دنده‌ای تبدیل حرکت دوار به خطی در عین تولید نیروی با چگالی زیاد و سادگی ساختار می‌باشد [۱۲].

در این مقاله، در ابتدا اساس کار ماشین ورنیر خطی مغناطیس دائم شرح داده شده سپس با استفاده از اطلاعات ساختاری ماشین ورنیر بهینه‌شده نمونه رفتار دینامیکی و مشخصه‌های تعیین‌کننده ماشین در حالت بی‌باری و بارداری در عملکرد ژنراتوری توسط اجزای محدود مدل‌سازی و مطالعه می‌شود، سپس خصایص الکتریکی خروجی‌های مدل نظیر توان ظاهری لحظه‌ای، توان اکتیو و راکتیو، ضریب توان به کمک نرم‌افزار متلب محاسبه گردیده و تحلیل هارمونیک انجام می‌شود. شکل (۱) شمای کلی ماشین نمونه را نمایش می‌دهد.



شکل (۱): شماتیک کلی ماشین ورنیر مغناطیس دائم

## ۲. ساختار و اساس کار ماشین

با توجه به محدود بودن منابع فریت در طبیعت [۱۳]، در ماشین‌های (LPPMV<sup>۱</sup>) جهت کاهش مصرف فریت علاوه بر سیم‌پیچی‌های آرمیچر، آهن‌ربا نیز بر روی دندانه‌های اولیه (روتور) با جنس هسته فرومغناطیس قرار دارند. جهت عمودی مغناطیسی این آهن‌رباها متناوب برای تولیدی شار مغناطیسی سینوسی در فاصله هوایی تغییر می‌کند، همچنین ثانویه (استاتور) این نوع ماشین دارای ساختار بسیار ساده‌ای می‌باشد [۱۴]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ماشین مذکور بر اساس قاعده دندانه مغناطیسی یا همان ایجاد نیروی مؤثر به واسطه وجود دو میدان مغناطیسی ثابت نسبت به یکدیگر و شار منتهی حاصل از آن‌ها عمل می‌کند، که در آن دندانه‌های ثانویه موظف به پیاده‌سازی میدان آهن‌ربا بوده و از طرف دیگر بر اساس اصل

<sup>۲</sup> Active part

<sup>۱</sup> Linear primary permanent magnet vernier machine

طراحی و تعیین پارامترهای هندسی و الکتریکی ماشین از قیود و روابط متداول طراحی مطرح‌شده در [۱۵] استفاده شده است. ساختار ماشین ورنیر مورد مطالعه بر اساس تغییر ساختار دندان‌های اولیه و آهن‌رباهای سوار شده بر هر یک از دندان‌های اولیه ماشین موجود در [۶] ارائه شده است. در جدول (۱) پارامترها و مؤلفه‌های مربوط به هندسه ماشین ثبت شده است. اطلاعات الکتریکی و مغناطیسی ماشین در پیوست ذکر شده است.

جدول (۱): مشخصه هندسی ماشین

مشخصه	نماد	مقدار	دیمانسیون
طول فعال ماشین	$l_a$	۳۶۰	mm
عرض ماشین	$l_z$	۱۰۰	mm
فاصله هوایی	$g$	۱	mm
ضخامت آهن‌ربا	$h_m$	۴	mm
ارتفاع دندان اولیه	$h_c$	۹	mm
عرض شیار اولیه	$a_s$	۳۵	mm
ارتفاع شیار اولیه	$h_b$	۲۷	mm
ارتفاع دندان ثانویه	$h_a$	۱۰	mm
زاویه رأس دندان ثانویه	$\alpha$	۲۵٫۶	degree
ضخامت یوغ ثانویه	$h_s$	۴۵	mm
گام شیار ثانویه	$\tau_s$	۲۱٫۱۸	mm
ارتفاع ماشین	$h_t$	۱۵۸	mm

#### ۴. مدل‌سازی و تحلیل رفتار ماشین

جهت شبیه‌سازی سازوکار تئوری معرفی‌شده در بخش قبلی دینامیک ماشین در دو حالت بی‌بار و باردار به کمک روش تحلیل اجزای محدود مدل‌سازی شده و تحلیل می‌گردد.

##### ۴-۱. تحلیل عملکرد ماشین در بی‌باری

شکل (۲) توزیع میدان مغناطیسی بی‌بار ماشین را در چهار موقعیت متفاوت هم‌پوشانی دندان اولیه و گام دندان نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قسمت (الف) شکل بیانگر موقعیت اولیه قسمت متحرک ماشین می‌باشد، در قسمت‌های بعدی شکل اولیه به میزان برابر حرکت کرده و به عبارت دیگر در هر کدام از اشکال (ب) تا (د) ۱/۴ گام دندان (TP<sup>۲</sup>) ثانویه توسط اولیه طی می‌شود. مطابق انتظار از ساختار شش دندان‌های اولیه، توزیع میدان مغناطیسی ماشین مشابه ماشین‌های دوقطبی در بازه ۳۶۰ درجه الکتریکی می‌باشد. در ماشین ورنیر خطی، مشابه دیگر انواع ماشین‌های خطی، پدیده اثر انتهایی (EF<sup>۳</sup>) وجود دارد.

• به دلیل پیاده‌سازی مغناطیسی ثانویه، اختلاف دندان‌های فعال ثانویه با تعداد جفت قطب‌های مغناطیسی افقی اولیه، رابطه‌ای معکوس با مغناطیس‌شوندگی ماشین دارد.

به عبارت دیگر، پیاده‌سازی مغناطیسی ثانویه در میدان آهن‌رباهای اولیه می‌تواند مستقیماً بر مبنای مسیر شار مغناطیسی تحلیل و بررسی گردد. جهت سادگی فرآیند تحلیل ماشین می‌توان فرضیات زیر را انجام داد:

(۱) هیچ‌گونه شکاف هوایی بین دندان اولیه و آهن‌رباهای سوار شده بر آن وجود ندارد.

(۲) شار خروجی آهن‌رباهای تنها در راستای محور  $y$  مؤلفه دارند.

(۳) رلوکتانس مغناطیسی شیارهای ثانویه بسیار بزرگ بوده و می‌توان از شار پراکندگی شیارهای ثانویه صرف‌نظر نمود.

با توجه به طرز چیدمان عناصر مغناطیس دائم، چگالی شار فاصله هوایی با میزان همپوشانی عناصر مغناطیس دائم و دندان ثانویه متناسب است و بنابراین ۳۶۰ درجه الکتریکی در این نوع ماشین معادل با حرکت اولیه به میزان یک گام شیار (SP<sup>۱</sup>) تعبیر می‌گردد.

در ماشین ورنیر نوعی مطالعه شده، با قرارگیری پنج عنصر مغناطیس دائم عمودی روی هر یک از شیارهای اولیه، سه جفت قطب مغناطیسی افقی شکل می‌گیرد. این جفت‌قطب‌های افقی وظیفه پیاده‌سازی میدان مغناطیسی سیار ثابت ماشین را جهت تداخل با سیم‌پیچ‌ها و القای مؤثر دارند، به عبارت دیگر در ساختار پیشنهادی با افزایش طول ماشین و یا زیاد نمودن تعداد جفت‌قطب‌های افقی در یک دندان اولیه، قدرت ماشین افزایش می‌یابد. بنابراین، در ماشین ورنیر نوعی  $PPM=18$  بوده و همچنین با توجه به ابعاد اولیه و گام شیار ثانویه ماشین،  $n_s=17$  می‌باشد.

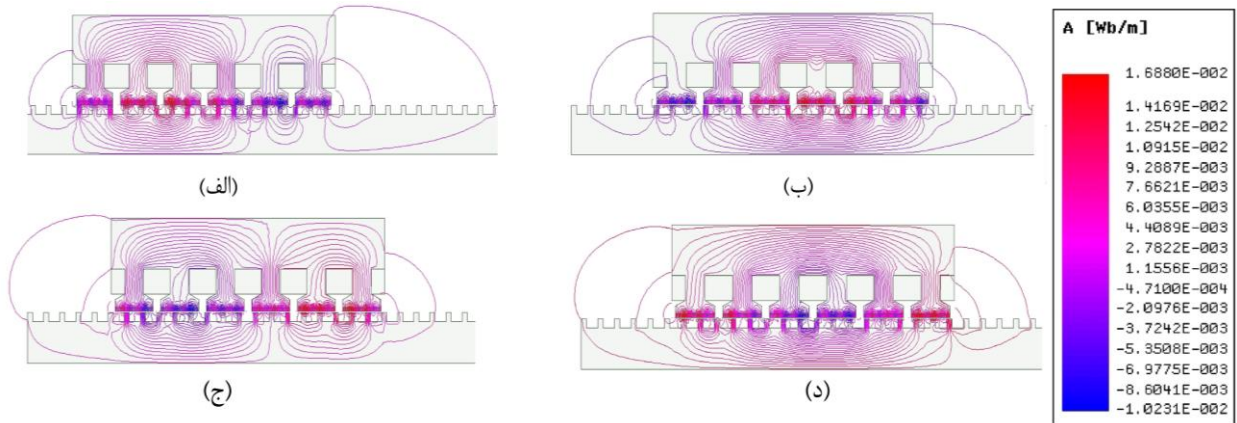
#### ۳. اطلاعات ساختاری ماشین

به منظور به دست آمدن ولتاژ بی‌باری سینوسی و کمینه شدن هارمونیک مکانی در کمیت‌های ذکر شده به گونه‌ای که تنها اثر عدم وجود تقارن ساختاری ماشین در ولتاژ بازگشتی القایی ماشین موجب هارمونیک شدن آن گردد تا جریان ماشین و به تبع آن نیروی افقی رانشی مؤثر تولیدی ماشین که مستقیماً بر روی بازده اثرگذار است به صورت رضایت‌بخشی به دست آید در

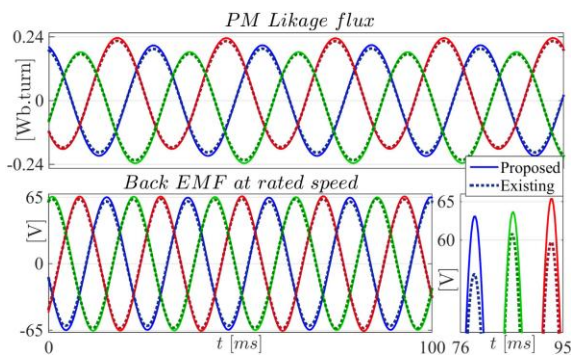
<sup>۲</sup> Tooth pitch

<sup>۳</sup> End effect

<sup>۱</sup> Slot pitch



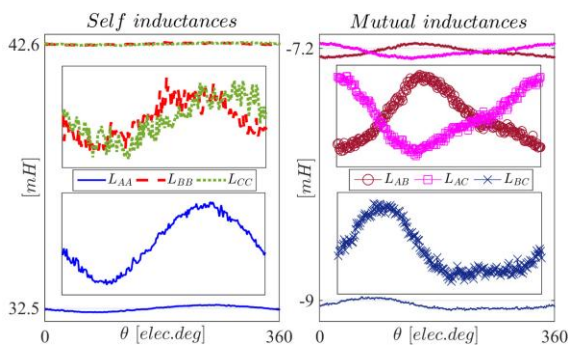
شکل (۲): توزیع شار مغناطیسی در ماشین پیشنهادی. (الف)  $\theta_e=90^\circ$ . (ب)  $\theta_e=180^\circ$ . (ج)  $\theta_e=270^\circ$ . (د)  $\theta_e=360^\circ$ .



شکل (۳): شار پیوندی و ولتاژ بی باری ماشین.

جدول (۲): مشخصه شار پیوندی فازهای ماشین.

$\lambda$ (Wb)	MAX	MIN	DCcomponent	THD%
A	۰/۲۰۹۰	-۰/۲۰۹۰	-۰/۰۰۸۵	۰/۶۸
B	۰/۱۸۲۸	-۰/۲۳۵۹	-۰/۰۱۷۱	۰/۸۳
C	۰/۲۳۶۱	-۰/۱۸۲۶	۰/۰۲۵۷	۱/۵۰



شکل (۴): اندوکتانس خودی و متقابل فازهای ماشین.

در ماشین ورنیر پیشنهادی، به دلیل تعادل سیم پیچ فاز A حول مرکز ثقل ماشین و یا توزیع کلاف مثبت این فاز بین دو شیار ابتدایی و انتهایی اولیه و در نتیجه سه قطبی شدن ماشین، فاز مذکور در طول ماشین متعادل تر شده است. توزیع چگالی شار بی بار در قسمت های مختلف ماشین در شکل (۵) نشان داده شده

در این نوع ماشین اثر انتهایی استاتیکی که ناشی از عدم تقارن ساختاری ماشین می باشد به عبارت دیگر در ماشین ورنیر نوعی به دلیل وجود اثر انتهایی استاتیکی، دامنه اندوکتانس های فازها با یکدیگر اختلاف مقدار داشته و این پدیده منجر به عدم تعادل کامل در شار پیوندی و ولتاژ بی باری تولید شده در فازهای ماشین می گردد. مؤلفه دینامیکی اثر انتهایی از حرکت اولیه بر روی ریل و ایجاد جریان های گردابی القایی در ثانویه ناشی می گردد. شدت و میزان اثر انتهایی دینامیکی از رابطه (۹) به دست می آید [۱۶].

$$Q = \frac{2\pi f \times I_a \times R_{secondary}}{X_{magnetic} \times v} \quad (9)$$

که در رابطه فوق،  $X_{magnetic}$  و  $R_{secondary}$  به ترتیب بیانگر اندوکتانس مغناطیس کننده و مقاومت ثانویه می باشد. به دلیل سرعت پایین حرکت اولیه، طول نرمالیزه شده  $(NL^1)$  ماشین مقدار بزرگی بوده و مؤلفه دینامیکی اثر انتهایی قابل صرف نظر می باشد. در شکل (۳) موج شار پیوندی و نیروی محرکه بازگشتی در ماشین ورنیر ارائه شده در مقاله و ماشین موجود [۶] مقایسه می شود. دامنه شار پیوندی و نیروی محرکه بازگشتی در ماشین ارائه شده نسبت به ماشین موجود در [۶] افزایش یافته است. میانگین دامنه شار پیوندی در ماشین ارائه شده و ماشین موجود قبلی به ترتیب برابر  $0/209$  و  $0/196$  می باشد. متوسط دامنه ولتاژ بی بار در ماشین ارائه شده  $4/66\%$  به نسبت ماشین موجود افزایش یافته است. در جدول (۲) دامنه شار پیوندی و مقدار نامتعادلی آورده شده است. شکل (۴) نشان دهنده اندوکتانس های خودی و متقابل ماشین است. اندوکتانس خودی فاز A به دلیل ساختار نامتقارن ماشین دارای کمترین مقدار است.

<sup>1</sup> Normalize length

در شکل (۷-۶) چگالی شار در فاصله هوایی و طیف هارمونیک آن دیده می‌شود. شکل (۶) نشان‌دهنده توزیع چگالی شار در فاصله هوایی در شرایط بی‌باری ماشین است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع شار با توجه تقارن سیم‌بندی ماشین و قرارگیری نصف کلاف مثبت فاز A در دو طرف اولیه ماشین، حول مرکز ثقل آن تقارن زوجی دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد پیک‌های چگالی شار فاصله هوایی برابر هجده می‌باشد. در شکل (۷) طیف هارمونیک چگالی شار بی‌بار دیده می‌شود. از آنجا که تعداد سه جفت‌قطب مغناطیسی افقی بر هر یک از دندانه‌های اولیه قرار دارد، در طول فعال ماشین هجده جفت‌قطب مغناطیسی افقی وجود دارد، بنابراین، هارمونیک‌های مضارب شش فرکانس اصلی در چگالی شار غالب بوده و هارمونیک هجدهم بالاترین دامنه طیف هارمونیک را دارد. با توجه به رابطه (۱)، با وجود هجده جفت‌قطب افقی، هفده دندانه ثانویه (که وظیفه مدولاسیون شار را بر عهده دارند) و همچنین سیم‌بندی دو قطب در اولیه رابطه اساسی ماشین‌های ورنیر در ماشین مذکور صدق کرده و بنابراین، هارمونیک هجدهم چگالی شار ناشی از آهن‌رباها امکان تداخل با سیم‌بندی اولیه را داشته و ولتاژ القایی سه‌فاز مؤثر در ماشین ایجاد می‌گردد.

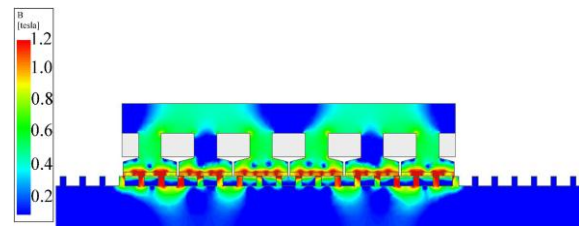
#### ۴-۲. تحلیل عملکرد ماشین در زیر بار

در شکل‌های (۸-۹) خروجی‌های ماشین تحت اعمال بار امیدانس ثابت  $Z_{load} = 3 + j1$  مطالعه می‌شود. در شکل (۹) نیروی رانش افقی  $(TF^1)$  و نیروی عمودی  $(LF^2)$  وارد بر اولیه ماشین رسم شده است. در زمان‌های ابتدایی حرکت ماشین، به دلیل وجود آهن‌ربا روی قسمت محرک آهن ثانویه به اولیه جذب می‌شود. با حرکت اولیه، در ثانویه ماشین جریان‌های گردابی القا گشته و باعث پدید آمدن نیروی دافعه بین اولیه و ثانویه ماشین شده که به دلیل بالا بودن مقاومت ویژه آهن ثانویه جریان‌های القایی فوق دامنه نسبتاً کمی دارند، این جریان‌های القایی درصدی از نیروی عمودی سیستم را کاهش می‌دهند. یکی از چالش‌های موجود در ماشین ورنیر خطی میزان نوسانی بودن نیروی افقی به دلیل زیاد بودن فاصله هوایی در این ماشین‌ها می‌باشد. نیروی افقی را به دو مؤلفه نیروی مؤثر و اعوجاجی  $(DF^3)$  مطابق رابطه (۹) می‌توان تجزیه نمود [۱۷].

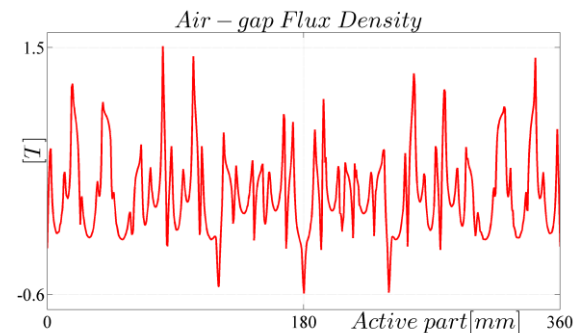
$$F_x = F_{xo} + F_{detent} \quad (9)$$

نیروی اعوجاجی و توان‌های بار متصل به ماشین مطابق شکل‌های (۱۰-۱۱) می‌باشند. نیروی اعوجاجی از دو عامل اثر پراکندگی شار در شیارهای ثانویه و اثر انتهایی ناشی می‌گردد.

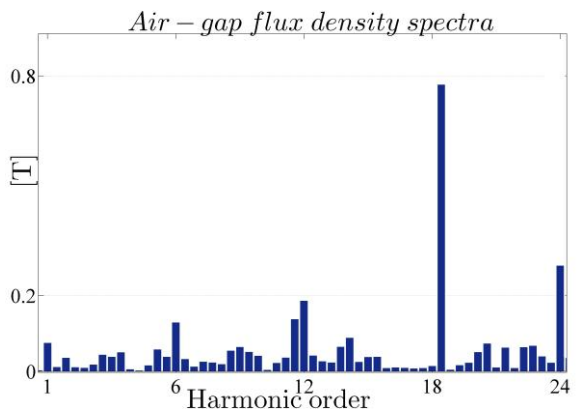
است. در جدول (۳) مشخصه‌های شار پیوندی و ولتاژ القاشده بی‌بار در ماشین ارائه شده و ماشین قبلی مقایسه شده است.



شکل (۵): توزیع چگالی شار در قسمت‌های مختلف ماشین



شکل (۶): توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی



شکل (۷): توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی

جدول (۳): مقایسه مشخصه‌های بی‌باری دو ماشین

پارامتر	ماشین ارائه شده	ماشین موجود قبلی	درصد بهبود
دامنه شار پیوندی	۰/۲۰۹	۰/۱۹۶	۶۱/۶۳
دامنه ولتاژ بی‌باری	۶۵/۳	۶۲/۲۵	۴۱/۶۶
درصد اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ بی‌باری	۱/۳۲	۱/۲۴	۶۱/۴۵

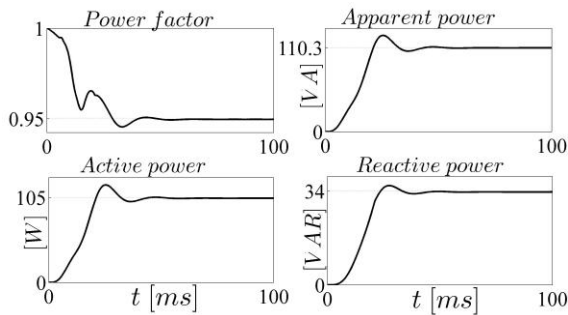
توزیع چگالی شار بی‌بار در قسمت‌های مختلف ماشین در شکل (۵) نشان داده شده است. به وضوح دیده می‌شود که چگالی شار در قسمت‌های مختلف ماشین در محدوده مناسبی قرار داشته و هیچ‌گونه اشباعی در هسته ماشین رخ نداده است.

<sup>1</sup> Thrust force

<sup>2</sup> Lift/Normal force

<sup>3</sup> Detent force





شکل (۱۱): مشخصه‌های توانی بار متصل به ماشین

شکل (۱۰)، نیروی اعوجاجی برای یک گام شیار ثانویه رسم شده است. در بازه صفر تا  $\tau_r$  به دلیل کاهش فاصله هوایی و در پی آن کاهش رلوکتانس و پراکندگی شار، میزان نیروی اعوجاجی کمتر می‌شود. در بازه عرض شیار ثانویه ماشین با افزایش فاصله هوایی مؤثر بین اولیه و ثانویه به دلیل افزایش رلوکتانس موجود در مسیر شار و زیاد شدن شار پراکندگی نیروی اعوجاجی ماشین افزایش می‌یابد. شکل (۱۱) نشان‌دهنده توان‌های مصرفی در بار اهمی-سلفی متصل به ماشین است. همان‌طور که مشاهده، مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو محاسبه شده هم‌خوانی منطقی با نسبت مقاومت و راکتانس بار اهمی-سلفی متصل به ماشین دارد.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ساختار و اساس عمل‌کردی ماشین ورنیر خطی یک‌طرفه که از آرایه‌های مغناطیسی با جهت مغناطیس‌شوندگی متناوب استفاده می‌کند، تشریح شده است. ساختار هندسی دندانه‌های اولیه و آهن‌ربای ماشین مذکور در فرآیند تغییرات پلکانی نسبت به ماشین پیشین بازطراحی شده و بهترین خروجی‌ها در قالب ساختار جدید در مقاله حاضر ارائه شده است. ویژگی قطب برجسته بودن ماشین پیشنهادی سبب قرارگیری سیم‌پیچی‌های آرمیچر و عناصر مغناطیس دائم روی متحرک ساده و کوچک ماشین می‌گردد، در حالی که ثانویه ماشین از هسته آهنی دندانه‌دار ساده تشکیل شده و بنابراین، توپولوژی پیشنهادی جهت ماشین با ساختار بلند ریل بسیار مناسب است. در ماشین پیشنهادی، نوسانات دامنه‌ای نیروی رانشی ناشی شده از تغییرات رلوکتانس مؤثر مقابل شار پیوندی به دلیل مخالفت شارهای مغناطیسی تولیدی آهن‌رباها کم شده که می‌تواند عملکرد ماشین را بهبود دهد.

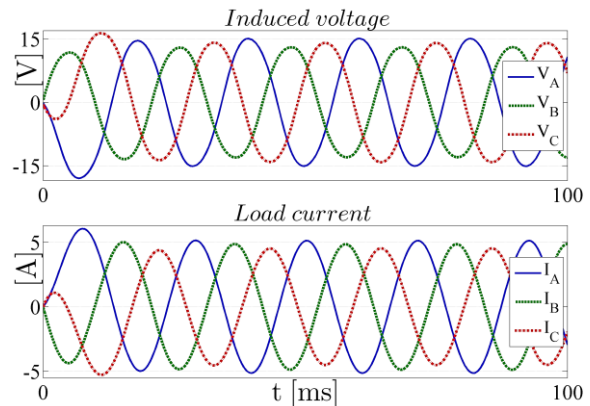
### ۶. مراجع

[1] Oprea, C. A., et al. "Permanent magnet linear generator for renewable energy applications: Tubular vs. four-sided structures." Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 International Conference on. IEEE, 2011.

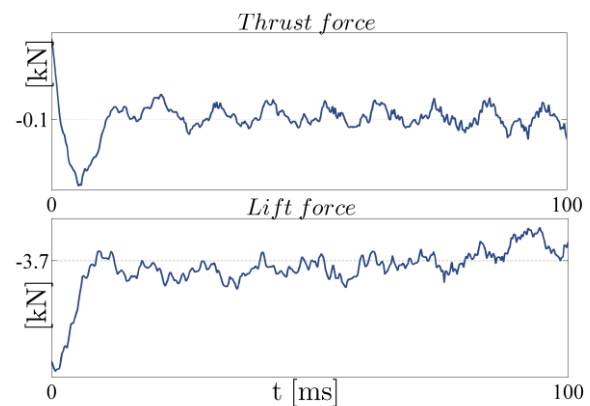
برای جداسازی تقریبی مؤلفه‌های سازنده نیروی افقی می‌توان از رابطه (۱۱) بهره گرفت [۱۸].

$$F_{detent} \approx F_{ripple} = \frac{F_x|_{MAX} - F_x|_{MIN}}{F_x|_{AVE}} \quad (10)$$

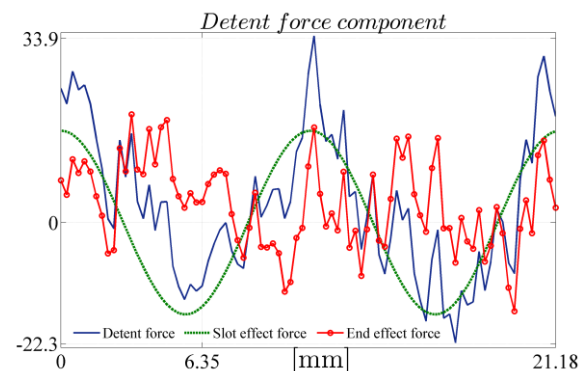
$$F_e = F_{detent} - F_{slot} \approx F_{detent} - AVE(F_{detent}) \quad (11)$$



شکل (۸): ولتاژ و جریان ماشین تحت بار



شکل (۹): نیروی افقی رانشی و نیروی عمودی ماشین باردار



شکل (۱۰): تجزیه مؤلفه‌های نیروی اعوجاجی

- [13] T. M. Jahns, "The expanding role of PM machines in direct-drive applications," in proc. ICEMS'2011, Beijing, China, pp. 1-6, 2011.
- [14] S. U. Chung, H. J. Lee, and S. M. Hwang, "A novel design of linear synchronous motor using FRM Topology," IEEE Trans. Magn., vol. 44, no. 6, pp. 1514-1517, 2008.
- [15] Du, Yi, et al. "A linear stator permanent magnet vernier HTS machine for wave energy conversion." IEEE Transactions on Applied Superconductivity 22.3 (2012): 5202505-5202505.
- [16] J. Duncan, "Linear induction motor—Equivalent circuit model," Proc. Inst. Elec. Eng., pt. B, vol. 130, no. 1, 1983.
- [17] C. Wang and J. Shen, "A method to segregate detent force components in permanent-magnet flux-switching linear machines," IEEE Trans. Magn. vol. 48, no. 5, pp. 1948-1955, May 2012.
- [18] Almoraya, A. A., et al. "Development of a double-sided consequent pole linear Vernier hybrid permanent-magnet machine for wave energy converters." Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017 IEEE International. IEEE, 2017.
- [2] Brooking, P.R.M., Mueller, M.A.: 'Power conditioning of the output from a linear vernier hybrid permanent magnet generator for use in direct drive wave energy converters', IEE Proc., Gener. Transm.Distrib., 2005, 152, (5), pp. 673-681
- [3] Fang, Zhuoya, et al. "A primary-permanent-magnet vernier linear machine with improved fault-tolerant capability." Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 International Conference on. IEEE, 2013.
- [4] Li, W., Chau, K.T., Jiang, J.Z.: 'Application of linear magnetic gears for pseudo-direct-drive oceanic wave energy harvesting', IEEE Trans. Magn., 2011, 47, (10), pp. 2624-262
- [5] EL-Refai, A.M.: 'Fault-tolerant permanent magnet machines: a review', IET Electr. Power Appl., 2011, 5, (1), pp. 59-74
- [6] Du, Yi, et al. "Comparison of linear primary permanent magnet vernier machine and linear vernier hybrid machine." IEEE Transactions on Magnetics 50.11 (2014): 1-4.
- [7] L. Jian and K. T. Chau, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 2, pp. 319-328, Jun. 2010.
- [8] Du, Yi, et al. "Linear primary permanent magnet vernier machine for wave energy conversion." IET Electric Power Applications 9.3 (2015): 203-212.
- [9] Imada, Takayuki, and Shoji Shimomura. "Magnet arrangement of linear PM vernier machine." Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on. IEEE, 2014.
- [10] Du, Yi, et al. "Design and analysis of linear stator permanent magnet vernier machines." IEEE Transactions on Magnetics 47.10 (2011): 4219-4222.
- [11] Liu, Xinbo, et al. "A Novel Triple-Permanent-Magnet-Excited Vernier Machine with Double-Stator Structure for Low-Speed and High-Torque Applications." Energies 11.7 (2018): 1713.
- [12] Shao, Yi, He Zhang, and Baoquan Kou. "Investigation of a novel linear permanent magnet vernier motor." Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2017 IEEE Conference and Exp. IEEE, 2017.

پیوست

مشخصه الکتریکی و مغناطیسی ماشین

مشخصه	نماد	مقدار	دیمانسیون
تعداد فاز	$m$	۳	--
تعداد جفت قطب سیم پیچی	$p$	۱	--
جریان نامی	$I$	۱۳	A
سرعت نامی	$v$	۱	m/s
چگالی شار پسماند مغناطیسی	$B_r$	۱,۲	T
تعداد آهنربای یک دندانه اولیه	$n$	۵	--
تعداد دور بر فاز سیم پیچ آرمیچر	$N$	۱۴۰	--

## **Modeling and Analysis of Single-sided Linear Primary Permanent Magnet Vernier Machine**

**M. Rostami<sup>1</sup>, P. Naderi<sup>2\*</sup>, A. Shiri<sup>3</sup>**

**Power Engineering Department, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran**

(Received: 18/10/2019; Accepted: 10/06/2020)

### **Abstract**

*In this paper, modeling and analysis of a linear primary permanent magnet vernier machine (LPPV) is presented. The novelty of the proposed machine is implemented by improvement of the primary structure. Since both armature windings and permanent magnet (PM) arrays are located on primary of the machine, this type of vernier machines are classified as flux reversal machines. Vernier effect and flux reversal operation lead to high force density in the machine. The simple structure of the machine translator is suitable for machines with a long-distance rail. Firstly, the operation principle and geometric structure of the machine is presented. Then, the 2D time stepping finite element method (TS-FEM) is utilized for performance evaluation of the machine. Finally, the quality of the no-load flux linkage, the no-load electro motive force (EMF), the thrust and normal forces, the self and mutual inductances and the output power of the machine at loading conditions are discussed and analyzed.*

**Keywords:** 2D Time stepping finite element analysis, Harmonic analysis, Magnetic gear effect, Linear permanent magnet vernier machine

---

\* Corresponding author E-mail: p.naderi@sru.ac.ir