

طراحی کنترل کننده مد لغزشی-عصبی برای کلاس خاصی از موتور سنکرون مغناطیس دائم به منظور بهره‌گیری در زیردریایی بدون سرنشین

سجاد محمدعلی نژاد^۱، سیده نرگس مهدیان زاده^۲، رضا قاسمی^۱، مصطفی قضاوی پور مقدم^۲

s.mohammadalinezhad@qom.ac.ir

۱- استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه قم

۲- کارشناسی ارشد گروه مهندسی برق، دانشگاه قم

چکیده

در این مقاله، طراحی کنترل کننده مد لغزشی-عصبی برای کلاس خاصی از موتور سنکرون مغناطیس دائم به منظور بهره‌گیری در زیردریایی بدون سرنشین مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا موتور مدنظر با مشخصاتی که در مقاله ارائه شده در نرم‌افزار تمام موج ماکسول که بر پایه روش المان محدود می‌باشد، طراحی و شبیه سازی شده است؛ سپس با استفاده از داده‌های حاصله از شبیه سازی موتور در نرم افزار، مدل غیرخطی به وسیله شبکه عصبی استخراج شده است. با توجه به این که بهره‌گیری از روش‌های کنترل مبتنی بر مدل به دلیل وابستگی شدید به مدل سازی و همچنین به علت استفاده از سنسورها گران و دارای خطا خواهد بود، بهره‌گیری از کنترل کننده بدون سنسور مورد استفاده قرار گرفته است که با توجه به مدل غیرخطی مطروحه، کنترل کننده مد لغزشی برای این موتور خاص طراحی شده است. کنترل کننده مد لغزشی-عصبی ارائه شده با توجه به مقاوم بودن در مقابل عدم قطعیت های سیستم و اغتشاشات خارجی، پایداری حلقه بسته سیستم کلی و همگرایی خطای ردیابی به صفر، نتایج بهتری را نسبت به کنترل کننده PID بدست آورده است. نتایج شبیه‌سازی انجام شده در این مقاله عملکرد مناسب مدل و کنترل کننده پیشنهادی را تایید می‌نماید.

واژگان کلیدی: موتور سنکرون مغناطیس دائم، کنترل کننده مد لغزشی، شبکه عصبی، روش المان محدود، زیردریایی.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۱۲/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۸/۰۶/۰۳

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل خصوصیات ذاتی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم نظیر چگالی توان بالا، نسبت بالای گشتاور تولیدی به اینرسی، شتاب‌گیری سریع، ضریب توان و بازده مناسب‌تر، این موتورها به موتورهای DC و موتورهای القایی ترجیح داده شده‌اند [۱]. حضور آهنربای دائمی به موتور مقاومت مغناطیسی کمک کرده است تا با هزینه نسبتاً کم، این نیازها را در موتورهای PMSynRel^۱، رفع کند. از کاربرد مهم این موتورها می‌توان به گسترش استفاده از آن‌ها در وسایل برقی و نیز وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی اشاره نمود که علت این امر، کاهش قابل توجهی است که در اندازه و وزن سیستم شارژر به وجود می‌آید. مجموعه مزیت‌های ذکر شده باعث شده تا این نوع موتور عملکرد رضایت بخشی جهت کاربرد در زیردریایی‌های بدون سرنشین از خود نشان دهد [۲]. همچنین پیشرفت علم رباتیک و اهمیت کاهش هزینه‌ها و نیز انجام عملیات‌های با میزان خطرپذیری بیشتر و داشتن تلفات کمتر، از جمله عواملی است که منجر به اهمیت طراحی زیردریایی‌های بدون سرنشین شده- است [۲-۳].

جهت طراحی ماشین مغناطیس دائم با مقاومت مغناطیسی همزمان روش‌های متفاوتی نظیر حل تحلیلی معادلات دینامیکی و یا استفاده از روش‌های عددی مطرح گشته است. زارکو و همکاران [۴]، به ارائه یک نظریه کلی جهت طراحی ماشین مغناطیس دائم با استفاده از ترکیب نظریه المان محدود و تحلیلی پرداخته‌اند. در برخی از موارد به علت اینکه استخراج معادله دینامیکی بسیار دشوار است، معادله دینامیکی از طریق ساده سازی و یا حذف برخی از پارامترها استخراج می‌شود که در نتیجه بهره گرفتن از روش تحلیلی با استفاده از این معادلات دینامیکی ساده شده همراه با محدودیت‌هایی می‌باشد؛ لذا در بسیاری از کاربردها از روش‌های عددی نظیر روش المان محدود بهره برده می‌شود تا تحلیل سیستم به صورت تمام موج و جامع صورت بگیرد. کنترل سرعت موتور در صنعت و زیردریایی بدون سرنشین مورد توجه می‌باشد و انتخاب کنترل‌کننده مناسب جهت تحقق این مهم، به موضوعی چالش برانگیز در این حوزه مبدل گشته است [۵]. در روش‌های کنترل مبتنی بر مدل،

عملکرد سیستم به طور مستقیم به دقت مدل بستگی دارد؛ اما مدل‌سازی معمولاً وقت‌گیر است و حتی اگر زمان زیادی نیز جهت مدل‌سازی فیزیکی فراهم شود همواره دارای خطا خواهد بود که این امر در سیستم‌های پیچیده نمود بیشتری پیدا می‌کند [۶]. از طرفی، به منظور کنترل سرعت موتور، نیاز به حسگر سرعت، جهت اندازه‌گیری این پارامتر وجود دارد. حضور حسگرها به دلیل وجود خطا منجر به گران شدن سیستم و پایین آمدن قابلیت اطمینان خواهد شد [۷]. لذا، مجموع عوامل فوق استفاده از عملکرد بدون حسگر را اولویت می‌دهد که برجستگی مغناطیسی ذاتی این ماشین‌ها، آن‌ها را جهت عملکردهای بدون حسگر در همه سرعت‌ها مناسب کرده است [۸].

از اواخر سال ۱۹۸۰ روش‌های کنترل سرعت بدون حسگر در موتورهای القایی مورد مطالعه قرار گرفت که مبنای آن، بهره‌گیری از تخمین سرعت به جای اندازه‌گیری آن بود [۹]. در مرجع [۱۰]، تخمین سرعت موتور بر اساس تخمین موقعیت و شار روتور، ساده‌ترین تکنیک بدون حسگر بیان شده است اما این تکنیک در سرعت‌های پایین و یا نزدیک به صفر دچار خطا می‌شود؛ زیرا در این حالت emf بازگشتی موتور بسیار کم بوده و تخمین شار روتور حساس به تغییرات مقاومت استاتور و یا نویز اندازه‌گیری خواهد بود. در مراجع [۱۱-۱۲] جهت تشخیص موقعیت روتور بر مبنای سنجش اندوکتانس فاز، از روش INFORM استفاده می‌کنند. همچنین جهت تخمین سرعت موتور القایی، می‌توان از روش MRAS^۲ نیز بهره گرفت که این روش در محدوده سرعت پایین دچار خطا خواهد شد [۱۳]. مرجع [۱۴] نیز به کنترل بدون حسگر موتور PMSM با تخمین موقعیت و سرعت موتور می‌پردازد که ایده اصلی آن بهره‌گیری از مدل ریاضی موتور است. تخمین سرعت موتور بدون بهره‌گیری از حسگر، از طریق محاسبات مربوط به ولتاژ و جریان نیز صورت می‌پذیرد [۷].

به منظور تخمین پارامترهای ولتاژ و جریان بدون تکیه بر مدل دینامیکی سیستم، راهکارهای متفاوتی بیان شده که در این میان دیدگاه مبتنی بر مشاهدات یکی از مناسب‌ترین راهکارهای شناخته شده می‌باشد. در مدل‌های مبتنی بر مشاهدات، تخمین‌ها را می‌توان از طریق دانش ورودی و

² Model Reference Adaptive System

¹Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance

در این مقاله، جهت کنترل سرعت، از کنترل کننده مدلغزشی مبتنی بر رویتگر عصبی استفاده شده است. به منظور تامین ورودی شبکه عصبی، موتور در یک نرم افزار بر پایه روش المان محدود شبیه سازی شده است. از آنجا که خروجی شبکه عصبی دارای خطا خواهد بود، استفاده از کنترل کننده مدلغزشی کمک شایانی به کاهش خطای رویتگر خواهد کرد. این مزیت مهمی است که به واسطه کنار هم قرار گرفتن این ترکیب حاصل می گردد. در بخش دوم مقاله، شبیه سازی موتور ارائه شده است. در بخش سوم، رویتگر عصبی بر مبنای داده های حاصله از شبیه سازی، طراحی گردیده و در بخش چهارم کنترل کننده مدلغزشی مبتنی بر رویتگر عصبی طراحی شده است. در انتها پاسخ حاصله با پاسخ دریافتی در هنگام حضور کنترل کننده PID مقایسه می شود تا کنترل کننده مناسب تر جهت قرارگیری در این ترکیب تشخیص داده شود.

۲- شبیه سازی موتور PMSynRel

جنس استاتور و روتور در موتور مورد بررسی در این مقاله، از نوع آهن بوده و همچنین جنس سیم پیچی و آهنرباهای دائمی موتور نیز به ترتیب از نوع مس و نئودیمیوم- آهن- بور است. تعداد قطب های روتور برابر ۴ و با توجه به اینکه تعداد شیارهای استاتور برابر ۲۴ عدد می باشد، تعداد شیارهای زیر هر قطب برابر ۶ شیار می باشد. تعداد شیار هر فاز زیر یک قطب نیز برابر ۲ است. اختلاف فاز مکانی هر کدام از فازهای موتور با یکدیگر ۱۲۰ درجه ی الکتریکی و ۶۰ درجه ی مکانیکی می باشد. نحوه اتصال کوپل ها در این موتور بصورت سری است تا دامنه ولتاژ القایی آرمیچر ناشی از میدان روتور افزایش پیدا کند و دامنه جریان موتور کاهش پیدا کند. جهت کاهش شار نشتی در روتور، شیارها با کوچکترین سطح مقطع به یکدیگر متصل شده اند. تحلیل سیستم و دریافت داده ها از موتور، با بهره گیری از روش المان محدود صورت می گیرد که تحقق آن در نرم افزار تمام موج ماکسول عملی می گردد. نرم افزارهای تمام موج به نرم افزارهایی گفته می شود که تحلیلی الکترو مغناطیسی بر حسب معادلات ماکسول بر روی ساختار

خروجی تعیین کرد که جهت تحقق این امر می توان از انواع رویتگرهایی مانند فیلتر کالمن و مدلغزشی استفاده نمود [۷]. در مرجع [۱۵]، به بررسی کنترل گشتاور موتور، بدون حسگر و با بهره گیری از کنترل کننده مبتنی بر رویتگر اغتشاشات^۱ پرداخته شده است. همچنین مرجع [۱۶]، جهت کنترل بدون حسگر موتورالقایی از فیلترکالمن توسعه یافته استفاده کرده است. اخیراً استفاده از شبکه های عصبی به دلیل توانایی آن ها در تقریب مناسب طیف گسترده ای از توابع غیرخطی با هر درجه دقت مورد نظر، برای تخمین پارامتر گسترش یافته است [۹]. در مرجع [۹]، کنترل سرعت بدون حسگر یک موتور القایی با استفاده از تخمین سرعت توسط شبکه عصبی بررسی شده است.

موتور PMSynRel همانند بسیاری از سیستم های مکانیکی، دارای رفتار غیرخطی و نامعینی می باشد، لذا جهت کنترل آن می توان از روش های مبتنی بر غیرخطی بودن سیستم، بهره جست. در مرجع [۱۷]، از کنترل منطق فازی به دلیل مزیت مستقل بودن پارامتر و عدم نیاز به مدل دقیق سیستم، جهت کنترل موتور بدون حسگر استفاده شده است. مرجع [۱۸]، از FPTC^۲ جهت کنترل موتورالقایی بهره برده است. همچنین در مرجع [۱۹]، والمارک و همکاران از روش نگاشت ناحیه شدنی با استفاده از سیگنال خطای مکان جهت کنترل بدون حسگر در این ماشین ها بهره گرفته اند. در مرجع [۲۰] کنترل بدون سنسور موتور DDPM^۳ با بهره گیری از کنترل کننده مدلغزشی به منظور به کارگیری در یک ماشین لباسشویی مورد بررسی واقع شده است. مرجع [۲۱] نیز از فیدبک خطی ساز ورودی خروجی جهت طراحی کنترل کننده بهره برده است. همچنین در مرجع [۲۲] کنترل سرعت غیرخطی PMSM با توزیع شار سینوسی، با بهره گیری از تکنیک کنترل مدلغزشی انتگرالی صورت می پذیرد. مدلغزشی یک روش کنترل مقاوم^۴ است که برای سیستم های پیچیده ای که در آن عدم قطعیت و اغتشاشات وجود دارد مورد استفاده واقع می شود [۲۳]. در مرجع [۲۴] با استفاده از فیدبک خطی ساز^۵ و بهره گیری از مدلغزشی به کنترل موتور القایی پرداخته شده است.

⁴ Robust Control

⁵ Feedback linearization

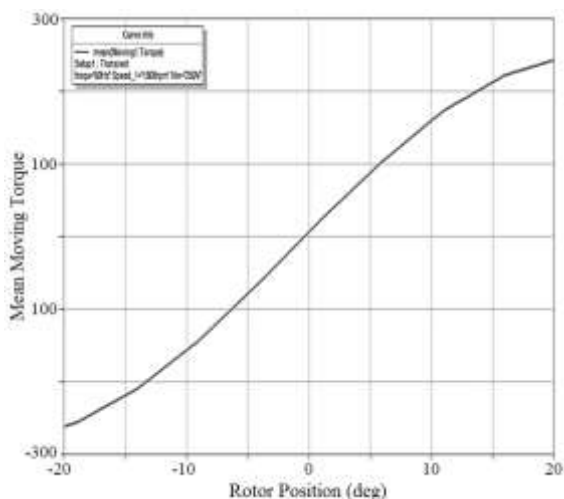
¹ Disturbance Observer

² Fuzzy-Based Predictive Torque Control

³ Direct-Drive PM synchronous Motor

دامنه شار روتور از طریق آهنربا تامین شده که جهت افزایش آن نیاز به افزایش مقدار آهنربا و یا استفاده از آهنربای قوی‌تری در ساختار روتور است. همچنین افزایش میدان یا شار استاتور با افزایش دامنه جریان عبوری از سیم پیچی استاتور امکان‌پذیر است. عامل دوم زاویه بین میدان دوار استاتور و میدان دوار روتور است. اگر میدان دوار روتور به هر دلیلی از میدان دوار استاتور جلوتر باشد، ماشین در مود ژنراتوری عمل می‌کند و اگر میدان دوار استاتور از میدان دوار روتور جلوتر باشد، ماشین در مود موتوری عمل می‌کند. شکل (۲) منحنی گشتاور خروجی موتور را براساس تغییر موقعیت روتور نسبت به میدان دوار استاتور نشان می‌دهد. برای کنترل موتور علاوه بر اطلاعات خروجی موتور نظیر دامنه متوسط گشتاور و سرعت موتور، اطلاعات ورودی نیز مورد نیاز است. این مهم را می‌توان از طریق نقاط منحنی متوسط گشتاور خروجی موتور براساس تغییر موقعیت روتور نسبت به میدان دوار استاتور محاسبه کرد.

دستیابی به اطلاعات ولتاژ برگشتی و اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان ورودی پس از پایدار شدن موتور مغناطیس دائم با مقاومت مغناطیسی امکان‌پذیر می‌باشد که پس از تحقق این مهم، جهت بدست آوردن ضریب قدرت ورودی موتور، ابتدا باید شکل موج ولتاژ و جریان ورودی در یک مختصات رسم شود؛ آنگاه با توجه به اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان ورودی، ضریب قدرت موتور بدست می‌آید.

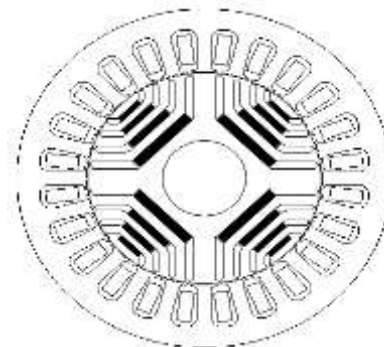


شکل (۲) منحنی مقدار متوسط گشتاور خروجی موتور براساس تغییر موقعیت روتور نسبت به میدان دوار استاتور.

اعمال می‌شود و با مش بندی ساختار اثر کلیه عناصر و پارامترها را بدست می‌آید.

از آنجا که موتور مورد بررسی به صورت شار شعاعی می‌باشد، می‌توان شبیه سازی آن را در هر دو حالت دو بعدی و سه بعدی انجام داد. شکل (۱) بیانگر شبیه سازی موتور در دو حالت دو بعدی و سه بعدی می‌باشد که برحسب ولتاژ و به صورت گذرای^۱ انجام شده است.

به دلیل ساختار شار شعاعی ماشین مورد مطالعه، خطای مدل سازی دوبعدی قابل چشم‌پوشی است؛ لذا به مدلسازی دوبعدی اکتفا شده است. پس از ترسیم موتور سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم در نرم افزار ماکسول، ولتاژ و جریان جهت تولید میدان دوار در سیم پیچی استاتور اعمال می‌گردد. براساس رابطه گشتاور، دو پارامتر اساسی به طور مستقیم بر دامنه متوسط گشتاور و دامنه متوسط توان خروجی تاثیر می‌گذارد. عامل اول مقدار متوسط دامنه شار یا میدان استاتور و روتور است.



(الف)



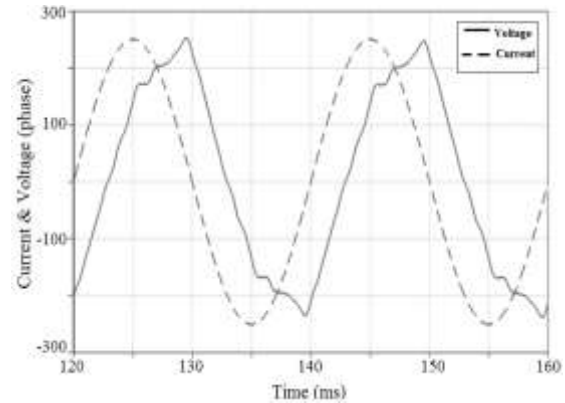
(ب)

شکل (۱) موتور مغناطیس دائم با مقاومت مغناطیسی همزمان در حالت (الف) دو بعدی (ب) سه بعدی.

^۱ Time Stepping

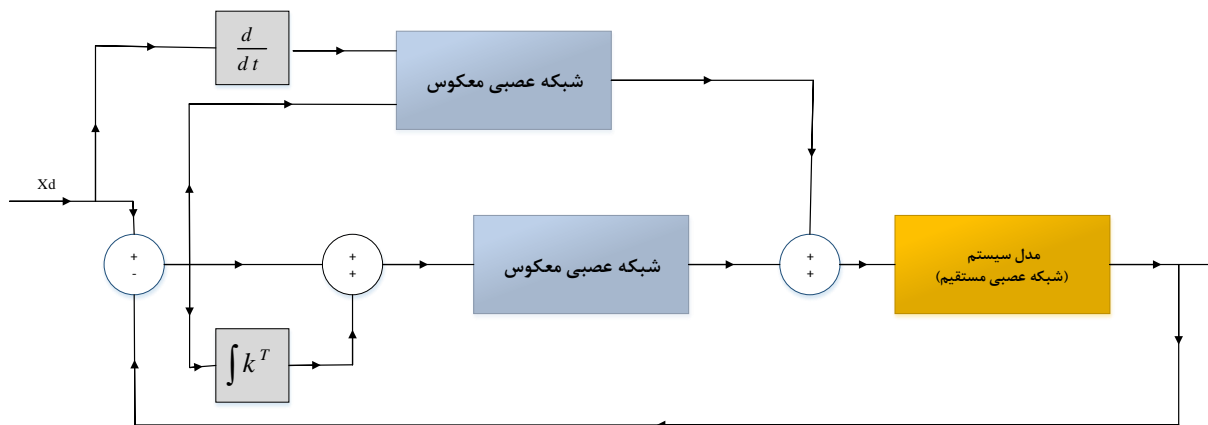
۲- رویتگر عصبی

امروزه هوش مصنوعی به طور گسترده‌ای در زمینه مهندسی برق مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان شبکه عصبی مصنوعی^۱ یکی از قوی‌ترین تکنیک‌های شناخته شده در هوش مصنوعی می‌باشد [۱۷]. از مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه عصبی مصنوعی توانایی یادگیری و انطباق با یک سناریو خاص است [۲۵]. به عبارتی دیگر یادگیری شبکه عصبی در برابر خطاهای داده‌های آموزشی مصون بوده و شبکه با موفقیت به مسائلی نظیر شناسایی گفتار، شناسایی و تعبیر تصاویر و یادگیری ربات اعمال می‌شود. با توجه به شکل (۴) که نشان‌دهنده سیستم کنترل موتور می‌باشد، در مدل پیشنهادی این مقاله، جهت تخمین میزان سرعت موتور از یک شبکه عصبی مستقیم استفاده شده که ورودی تحت عنوان شدت جریان و ولتاژ و یک خروجی تحت عنوان سرعت دارد. در شکل (۵) ساختار شبکه عصبی مستقیم طراحی شده، نشان داده شده است.

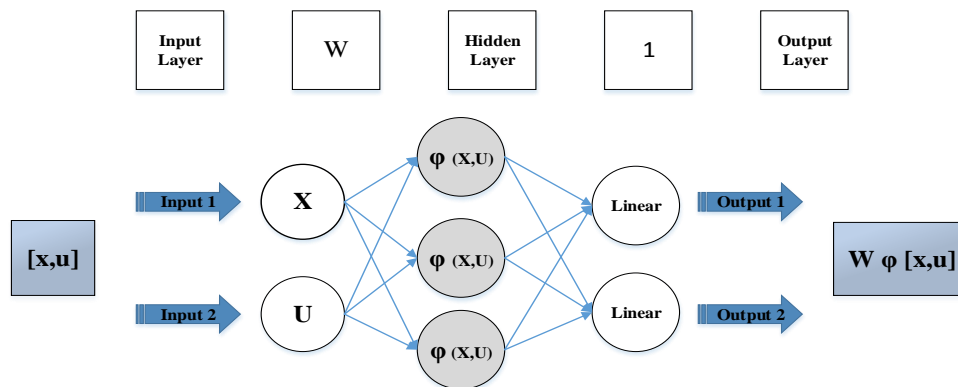


شکل (۳) منحنی ولتاژ و جریان ورودی لحظه ای موتور.

شکل (۳) منحنی ولتاژ و جریان ورودی لحظه‌ای موتور را نشان می‌دهد که با توجه به آن می‌توان گفت ماشین پس فاز است. با توجه به اطلاعات ورودی و خروجی موتور، می‌توان از شبکه عصبی به عنوان رویتگر بهره برد و موتور را به راحتی برای تمامی سرعت‌ها و تمامی توان‌ها کنترل کرد.



شکل (۴) دیاگرام کنترل موتور.

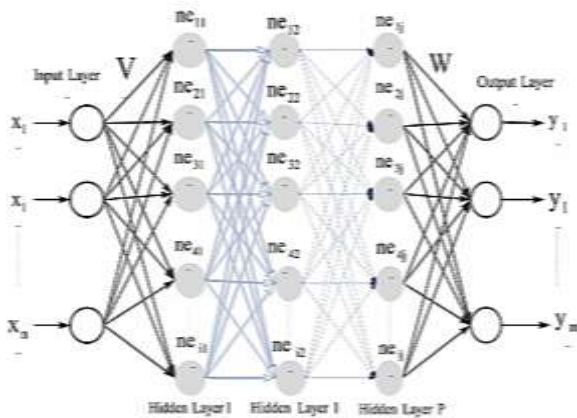


شکل (۵) دیاگرام شبکه عصبی مستقیم.

¹ Artificial Neural Network (ANN)

در شکل (۸) ساختار این شبکه نشان داده شده است. در جدول (۲) نیز مشخصات شبکه عصبی معکوس مورد استفاده، بیان گشته است.

در شبکه معکوس با توجه به اینکه با استفاده از یک ورودی باید ۲ خروجی پیش‌بینی شود، فرآیند آموزش نسبت به شبکه مستقیم دشوارتر بوده و از تعداد لایه های بیشتری استفاده شده است.



شکل (۸) دیاگرام ساختار شبکه عصبی معکوس.

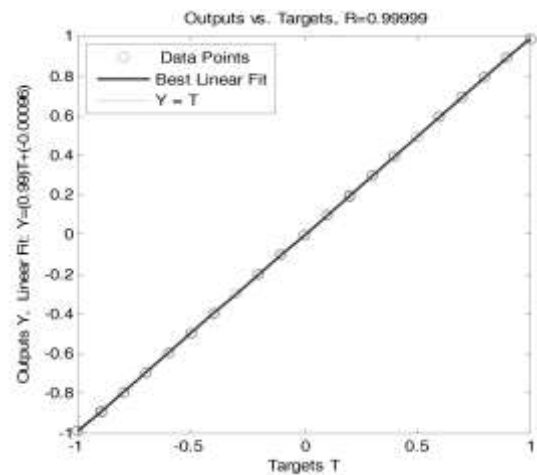
جدول (۱) مشخصات شبکه عصبی مستقیم.

پارامترهای شبکه عصبی	نوع و مقدار انتسابی
تابع مورد استفاده در آموزش شبکه	trainlm
عصبی انتشار رو به عقب	Mse
تابع عملکرد	2
تعداد ورودی در لایه ورودی	1
تعداد لایه های پنهان	5
تعداد نورونهای لایه های پنهان	Logsig
عملکرد لایه مخفی	1
تعداد خروجی در لایه خروجی	Purelin
عملکرد لایه خروجی	

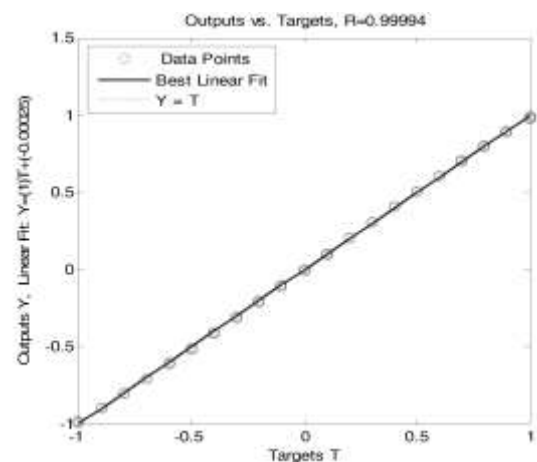
جدول (۲) مشخصات شبکه عصبی معکوس.

پارامترهای شبکه عصبی	نوع و مقدار انتسابی
تابع مورد استفاده در آموزش شبکه	Trainlm
عصبی انتشار رو به عقب	Mse
تابع عملکرد	1
تعداد ورودی در لایه ورودی	13
تعداد لایه های پنهان	5
تعداد نورونهای لایه های پنهان	Logsig
عملکرد لایه مخفی	2
تعداد خروجی در لایه خروجی	Purelin
عملکرد لایه خروجی	

مشخصات شبکه عصبی مستقیم پیشنهادی در جدول (۱) بیان شده است. در این شبکه از ۶۵ درصد داده ها جهت فرآیند آموزش و از ۳۵ درصد جهت فرآیند تست شبکه استفاده شده است. شکل های (۶) و (۷) میزان ضریب همبستگی شبکه به ترتیب در فرآیندهای آموزش و تست را برای مقادیر خروجی واقعی و شبیه سازی نشان می دهد. همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می شود جهت کنترل سرعت موتور نیاز به اجرای یک حلقه بسته و بررسی فیدبک پاسخ ها و نیز تنظیم پارامترهای کنترلی به وسیله الگوریتم کنترل مدغزشی است تا سیستم قادر به کنترل سرعت باشد. لذا جهت تأمین ورودی شبکه عصبی مستقیم از یک شبکه عصبی معکوس استفاده می شود که ورودی آن سرعت موتور و خروجی های آن شدت جریان و ولتاژ می باشد.



شکل (۶) ضریب همبستگی شبکه عصبی مستقیم برای فرآیند آموزش شبکه.



شکل (۷) ضریب همبستگی شبکه مستقیم برای فرآیند تست شبکه.

با بهره گیری از رویکرد عصبی استفاده شده در بخش ۳ و محاسبه ورودی‌های لازم برای کنترل کننده، به طراحی آن پرداخته می‌شود:

۴-۱- طراحی کنترل کننده مدلغزشی

دینامیک سیستم موتور مغناطیسی را به صورت رابطه (۱) تعریف می‌کنیم:

$$\dot{x} = g(x)u + d \quad (1)$$

که در آن d اغتشاش می‌باشد. خطا به صورت $e = x - x_d$ در نظر گرفته می‌شود که در آن x_d خروجی مطلوب می‌باشد. با مشتق گرفتن از خطا رابطه (۲) حاصل می‌گردد:

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_d = g(x)u + d - \dot{x}_d \quad (2)$$

بزرگترین مسئله روش مدلغزشی را می‌توان نحوه تعریف سطح سوئیچینگ دانست. در این مقاله، سطح سوئیچینگ مطابق با (۳) در نظر گرفته شده است.

$$s = e + k^T \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

از s مشتق گرفته و با جایگذاری (۲) در آن، ورودی کنترلی به صورت رابطه (۴) بدست می‌آید:

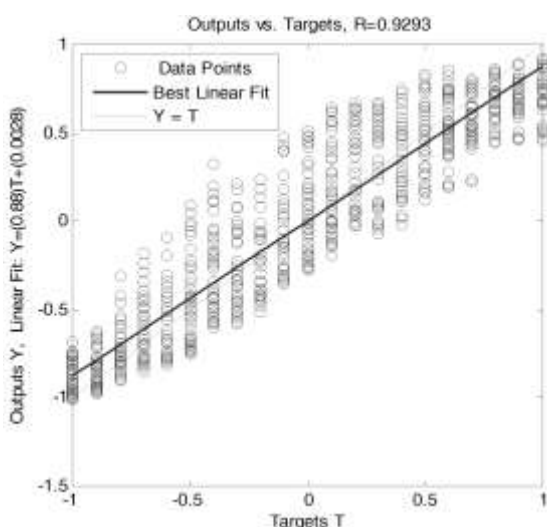
$$u = g(x)^{-1}(\dot{x} - k^T e + k' \text{sign}(e)) \quad (4)$$

که در آن تابع علامت به دلیل مقاوم شدن ورودی در مقابل اغتشاشات افزوده شده است. همچنین جهت آموزش دینامیک سیستم $(g(x))$ ، از شبکه‌های عصبی استفاده شده است.

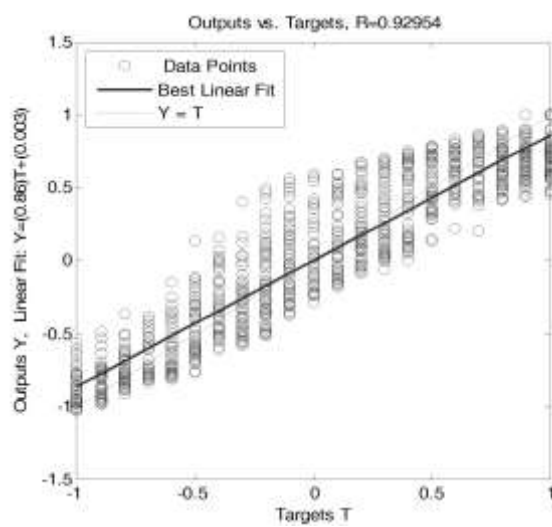
در شکل‌های (۹) و (۱۰) میزان ضریب همبستگی شبکه معکوس به ترتیب در فرآیندهای آموزش و تست برای مقادیر خروجی واقعی و شبیه سازی نشان داده شده است. این نتایج حاکی از دقت بسیار بالای شبکه عصبی در تخمین خروجی‌های مطلوب است. همانطور که انتظار می‌رفت همبستگی در شبکه عصبی معکوس، به دلیل پیچیدگی بیشتر نسبت به شبکه مستقیم کمتر است.

۴- کنترل کننده مدلغزشی

کنترل کننده مدلغزشی یک روش برای پایدارسازی و ایجاد ردیابی مناسب در سیستم‌های غیرخطی می‌باشد که به دلیل مقاومت در مقابل اغتشاش و نامعینی پارامتری جهت کنترل سرعت موتور مدنظر مورد استفاده قرار گرفته است [۲۶]. در روش کنترل مدلغزشی، ابتدا یک صفحه سوئیچینگ معرفی شده و در ادامه، قانون کنترل مدلغزشی برای پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته خطا طراحی می‌شود. پیشگامانی که در این عرصه شناخته شده هستند عبارتند از *Utkin, Spurgeon, Edward* و *Itkis* که از تالیفات این افراد در زمینه بکارگیری مدلغزشی به عنوان کنترلر مقاوم، می‌توان به مواردی از قبیل مراجع [۲۷-۲۸] اشاره کرد. مرجع [۲۹] این موضوع را در ابعاد گسترده‌تر تحت عنوان کنترل کننده هیبرید فازی-مدلغزشی فرایپیش^۱ طراحی کرده است.



شکل (۱۰) ضریب همبستگی شبکه معکوس برای فرآیند تست شبکه.



شکل (۹) ضریب همبستگی شبکه معکوس برای فرآیند آموزش شبکه.

^۱ Fuzzy Hybrid super-Twisting Sliding Mode

به منظور کاهش چترینگ در قانون کنترل، تابع ناپیوسته $sign(s)$ به صورت (۹) تقریب زده شده است:

$$sign(s) = \frac{s}{\|s\| + \sigma} \quad \sigma = 0.3 \quad (9)$$

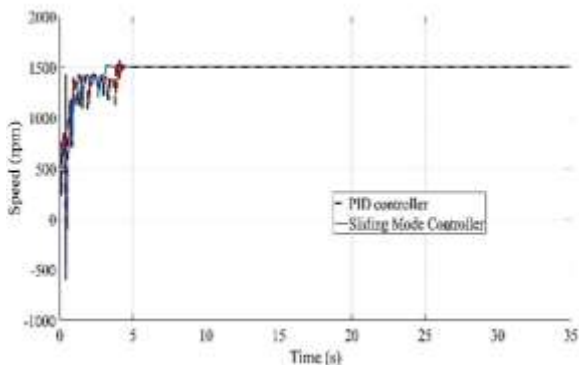
پس از نتایج حاصله برای کنترل کننده مدلفزشی، سیستم را با استفاده از این کنترل کننده و نیز کنترل کننده PID در حضور اغتشاش شبیه سازی کرده تا ادعای خود مبتنی بر کارایی مناسب تر مدلفزشی به دلیل غیرخطی بودن سیستم و وجود اغتشاشات و نامعینی، بررسی گردد.

۵- مقایسه با کنترل کننده PID

نتایج شبیه سازی شده هر دو کنترل کننده مدلفزشی و نیز کنترل کننده PID در مقابله با اغتشاش که به صورت یک تابع پله با دامنه ۰,۴ شبیه سازی شده، در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

با مشاهده شکل (۱۲) به روشنی می توان دریافت که نتیجه همگرایی سرعت موتور سنکرون به مقدار مطلوب ۱۵۰۰ دور در دقیقه با استفاده از کنترل کننده مدلفزشی بهتر از استفاده از کنترل کننده PID است. در زمان گذر، همگرایی در استفاده از کنترل کننده مدلفزشی در زمان حدود ۳ ثانیه بدست آمده و در کنترل کننده PID این همگرایی در زمان حدود ۵ ثانیه فراهم شده است و زمان استقرار نیز در استفاده از کنترل مدلفزشی کمتر است. علاوه بر آن، مقدار نوسانات با بهره گیری از کنترل مدلفزشی کمتر بوده و مقدار بالازدگی نیز در زمان گذر کمتر می باشد.

نتیجه اینکه استفاده از کنترل کننده مدلفزشی در مقابله با اغتشاش جهت همگرایی سرعت خروجی موتور سنکرون به مقدار دلخواه، دارای نتیجه بهتری است.



شکل (۱۲) نتیجه شبیه سازی با کنترل کننده مدلفزشی و کنترل کننده PID.

جهت اثبات پایداری، تابع لیاپانوف به صورت رابطه (۵) تعریف می شود:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (5)$$

با مشتق گرفتن از تابع لیاپانوف و جایگذاری (۲)، رابطه (۶) حاصل می گردد:

$$\dot{V} = s\dot{s} = s(\dot{e} + k^T e) \quad (6)$$

برای رابطه (۶) نامساوی (۷) برقرار می باشد.

$$\dot{V} = s(\dot{e} + k^T e) \leq -\gamma|s| \quad (7)$$

که $\gamma > 0$ می باشد. با جایگزینی رابطه (۲) نامساوی به صورت (۸) می شود.

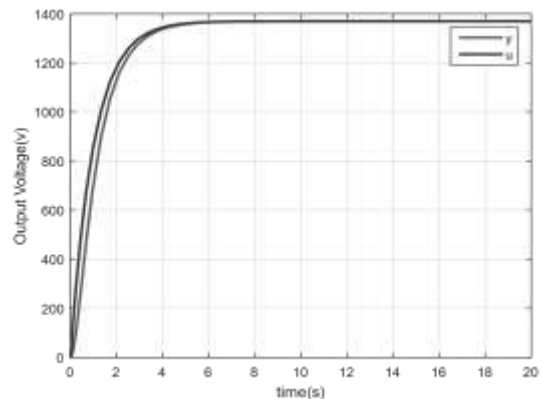
$$s(g(x)u + d - \dot{x}_d + k^T e) \leq -\gamma|s| \quad (8)$$

با توجه به رابطه (۴) پرواضح است که سیستم اصلی پایدار می شود و سطح لغزش به صفر میل می کند.

۴-۲- شبیه سازی

به منظور شبیه سازی قانون کنترل مدلفزشی، سیستم حلقه بسته با حضور کنترل کننده مدلفزشی در سیمولینک متلب شبیه سازی شده و نتایج شبیه سازی با فرض نبود اغتشاش در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

همانطور که از شکل (۱۱) قابل مشاهده است، خروجی موتور، ورودی قانون کنترل مدلفزشی را به خوبی دنبال می کند. تئوری کنترل مدلفزشی دارای پدیده نامطلوبی در قانون کنترل به نام لرزش سیگنال کنترل است که این پدیده به نوبه خود سبب ناپیوستگی در قانون کنترل خواهد شد. لازم به ذکر است که لرزش سیگنال کنترل به دلیل استفاده از تابع ناپیوسته $sign$ در قانون کنترل سویچینگ به وجود می آید.



شکل (۱۱) نتیجه شبیه سازی بدون حضور اغتشاش.

۶= نتیجه گیری

در این مقاله یک ترکیب جدید جهت کنترل سیستم غیر خطی آهنربای دائمی با موتور سنکرون رلوکتانسی تقویت شده با آهنربای دائم پیشنهاد شد. در این روش از شبکه عصبی به عنوان رویکر استفاده گردید تا با داده‌های ورودی بدست آمده از شبیه‌سازی موتور در نرم‌افزار تمام موج ماکسول، متغیرهای حالت را تخمین بزند و با توجه به اینکه شبکه عصبی دارای مقدار کمی خطا می‌باشد، از کنترل‌کننده مدلفزشی جهت از بین بردن این خطا استفاده شد. در واقع می‌توان گفت مقاوم بودن مدلفزشی در برابر اغتشاش و نامعینی‌های سیستم و نیز تخمین حالت‌های سیستم غیرخطی آهنربای دائمی با موتور مقاومت مغناطیسی، از مزایای این روش می‌باشد. لازم به ذکر است که پایداری سیستم حلقه بسته برای کنترل‌کننده مدلفزشی بر مبنای رویکر عصبی، با معیار پایداری لیاپانوف به اثبات رسیده است. سیستم با استفاده از کنترل‌کننده PID نیز شبیه سازی شده است. کنترل‌کننده PID قادر به دستیابی به چنین سیستم پیچیده و غیرخطی نیست، زیرا نمی‌تواند از عدم قطعیت و اختلالات درونی برخوردار باشد. از طرفی استحکام سیستم به دلیل عدم قطعیت پارامتری و ساختاری در این حالت کاهش می‌یابد و تنظیم بهره در PID، کار بسیار سختی خواهد شد. بنابراین، کنترل‌کننده مدلفزشی به دلیل پاسخ مناسب‌تری که به سیستم‌های غیرخطی در حضور نامعینی و اغتشاش می‌دهد، ترجیح داده شد.

۷- مراجع

- Losses for Saturated PMSyn Rel Machines” IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol.28, No.4, pp.841-848, 2013.
- [5] افشین‌گلدانی، علی رمضانی و رکانی، "کنترل سرعت موتور القایی با استفاده از روش کنترل پیش‌بین گشتاور"، پذیرفته شده در فصلنامه علمی - پژوهشی دریا فنون، ۱۳۹۷.
- [6] Erik, H., Frisk, E., and Eriksson, L., "Observer Design and Model Augmentation for Bias Compensation with a Truck Engine Application, Control Engineering Practice, Vol.17, No.3, pp.408-417, 2009.
- [7] Changchun, H., Yu, C., and Guan, X., "Neural Network Observer-based Networked Control for a Class of Nonlinear Systems", Neurocomputing. Vol.133, pp.103-110, 2014.
- [8] Stipetic, S., Zarko, D., and Kovacic, M., "Optimised Design of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Series using Combined Analytical-Finite Element Analysis based Approach," IET Electric Power Applications. Vol.10, No.5, pp.330-338, 2016.
- [9] Seong-Hwan, K., Park, T., Yoo, J., and Park, G., "Speed-Sensorless Vector Control of an Induction Motor using Neural Network Speed Estimation," IEEE Transactions on industrial electronics. Vol.48, No.3, pp.609-614, 2001.
- [10] Alfio, C., Scarcella, G., and Testa, A., "Industry Application of Zero-speed Sensorless Control Techniques for PM Synchronous Motors," IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.37, No.2, pp.513-521, 2001.
- [11] Schroedl M., and Stefan, T., "New Rotor Position Detector for Permanent Magnet Synchronous Machines using the INFORM Method," Eur.Trans. Elect. Power Eng. Vol.1, No.1, pp.47-53, 1991.
- [12] Schroedl, M., "Sensorless Control of ac Machines at Low Speed and Standstill based on the INFORM Method," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, pp.270-277, 1996.
- [13] Young-Real, K., Sul, S., and Park, M., "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor using Extended Kalman Filter," IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.30, No.5, pp.1225-1233, 1994.
- [14] Zhiqian, Ch., Tomita, M., Doki, Sh., and Okuma, Sh., "An Extended Electromotive Force Model for Sensorless Control of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol.50, No.2, pp.288-295, 2003.
- [15] Toshiyuki, M., Yu, F., and Ohnishi, K., "Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator," IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol.40, No.2, pp.259-265, 1993.
- [16] Alonge, F., Cangemi, T., D'ippolito, F., Fagiolini, A., and Sferlazza, A., "Convergence
- [1] Ghasemi, N. and Naderi, S.M., "Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor by using a Fuzzy Algorithm," 1st International Conference on New Research Achievements in Electrical and Computer Engineering, 2016.
- [2] Suleimani, M.J., Goodarzi, A., Morad pour, R., and Alizadeh, M., "Design and Optimization of Permanent Magnet Synchronous Motor for use in Unmanned Submarines," Journal of Marine Science and Technology. Vol.80, pp.44-50, 2016.
- [3] جمال قاسمی، و یاسر عبدی، "کنترل عمق زیر دریایی بدون سرنشین با استفاده از کنترل‌کننده مود لغزشی عصبی". فصلنامه علمی - پژوهشی دریا فنون، شماره ۵، صفحه ۱-۱۳، ۱۳۹۷.
- [4] Zhao, S., Wallmark, O., and Leksell, M., "Low-Speed Sensorless Control with Reduced Copper

مقابل نوسانات ناشی از امواج و عدم قطعیت". فصلنامه

علمی-پژوهشی دریا فنون، شماره ۲ صفحه ۳۵-۴۱، ۱۳۹۴.

[27] Hang, J., Zhang, J., Cheng, M., and Zhang, B., "High-Resistance Connection Detection in Permanent Magnet Synchronous Machine using Zero-sequence Current Component," IEEE Trans. Power Electron. Vol.31, No.7, pp.4710-4719, 2016.

[28] Mohammadpour A., and Parsa, L., "Global Fault-Tolerant Control Technique for Multiphase Permanent-Magnet Machines," IEEE Trans. Ind. Appl, Vol.51, No.1, pp.178-186, 2015.

[۲۹] محمد فرهمند، رضا قاسمی، محمد سالاری، "طراحی

کنترل کننده هیبرید فازی-مد لغزشی فرایپیش برای

کلاس خاصی از دینامیک غیرخطی کوادروتور،" مهندسی

مکانیک مدرس، شماره ۱۸ (۱)، صفحه ۳۰۷-۳۱۶، ۱۳۹۷.

Analysis of Extended Kalman Filter for Sensorless Control of Induction Motor," IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol.62, No.4, pp.2341-2352, 2015.

[17] Hussain, S., Bazaz, M.A., "Neural Network Observer Design for Sensorless Control of Induction Motor Drive," IFAC-Papers On-Line, pp.106-111, 2016.

[18] Rojas, C., Rodriguez, J. R., Kouro, S., and Villarroel, F., "Multiobjective Fuzzy-Decision-Making Predictive Torque Control for an induction motor drive," IEEE Transactions on Power Electronics. Vol.32, No.8, pp.6245-6260, 2017.

[19] Zhao, S., Wallmark, O., and Leksell, M., "Analysis of a Deeply Saturated Sensorless PMSynRel Drive for an Automotive Application," Proceedings of the European Conference on In Power Electronics and Applications, pp.1-10, 2011.

[20] Song, C., Zhang, Zh., and Xu, L., "Sliding-Mode Sensorless Control of Direct-Drive PM Synchronous Motors for Washing Machine Applications," IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.45, No.2, pp.582-590, 2009.

[21] Merabet, A., Tanvir, A., and Beddek, K., "Torque and State Estimation for Real-time Implementation of Multivariable Control in Sensorless Induction Motor Drives," IET Electric Power Applications. Vol.11, No.4, pp.653-663, 2017.

[22] In-Cheol, B., Kim, K., and Youn, M., "Robust Nonlinear Speed Control of PM Synchronous Motor using Boundary Layer Integral Sliding Mode Control Technique," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.8, No.1, pp.47-54, 2000.

[23] Saqib, I., Mehmood, A., Tayyab Razzaq, M., and Iqbal, J., "Advanced Sliding Mode Control Techniques for Inverted Pendulum: Modelling and simulation," Engineering Science and Technology, an International Journal, 2018.

[24] Lascu, C., Jafarzadeh, S., Sami Fadali, M., and Blaabjerg, F., "Direct Torque Control with Feedback Linearization for Induction Motor Drives," IEEE Transactions on Power Electronics. Vol.32, No.3, pp.2072-2080, 2017.

[۲۵] سید محمدرضا موسوی میرکلانی، مسعود کاوه، محمد

خویشه، مجید آقابابایی، "طراحی و پیاده سازی یک

دسته بندی کننده دادگان سوناری مبتنی بر شبکه عصبی

ادراکی چندلایه آموزش دیده شده با الگوریتم بهینه سازی

گروهی فیلها". فصلنامه علمی - پژوهشی دریا فنون، شماره

۵، صفحه ۱-۱۲، ۱۳۹۷.

[۲۶] حمید ملکی زاده، محمد رضا جاهد مطلق، بیژن معاونی،

علی معرفیان پور، "کنترل مد لغزشی رول-فین کشتی در