

کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم بدون سنسور با سیستم تطبیقی مدل مرجع وابسته به حالت و روینگر افزوده تطبیقی

احمد ایزدی نسب^۱ و محمود قنبری^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۹	<p>موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به دلیل دارا بودن بازده و چگالی توان بالا، عملکرد قابل اعتماد و ساختمان ساده، در صنعت بسیار مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از مشکلات کنترل این موتورها نیاز به اطلاع دقیق از سرعت و موقعیت آنهاست. اخیراً به دلیل مشکلات سنسورهای سرعت از تخمین به جای اندازه گیری آن استفاده می شود. در این مقاله از کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع وابسته به حالت بر اساس نمایش شبه خطی سازی که پارامترهای آن بر اساس تئوری لیاپانوف تعیین می شود برای کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده است. کنترل کننده پیشنهادی با تولید قانون کنترل با وجود تغییر شرایط سیستم و حفظ پایداری آن حتی با وجود تغییر سیگنال مرجع و اغتشاشات خارجی نتایج مناسبی از خود نشان داده است. همچنین در این مقاله برای تخمین سرعت و شناسایی برخط پارامترهای موتور از روینگر افزوده تطبیقی پیشنهاد شده است. مزیت اصلی این روینگر، تخمین سرعت و گشتاور بار و شناسایی پارامترها به صورت همزمان و در نتیجه کاهش حجم و زمان محاسبات و نیز غیرخطی بودن آن است. نتایج شبیه سازی، ردیابی مناسب سرعت دلخواه را با وجود گشتاور بار، تغییر پارامترهای موتور و تغییر سرعت مرجع نشان می دهد.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰	
واژگان کلیدی:	
موتور سنکرون مغناطیس دائم، کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع وابسته به حالت، پایداری لیاپانوف، روینگر افزوده تطبیقی، شناسایی برخط پارامترها.	

۱-مقدمه

سرو تبدیل کرده است [۳،۴]. با وجود مزایای زیاد، این موتورها معایبی نیز دارند. به دلیل وجود هزینه بالای آهنرباها، این موتورها قیمت بالاتری دارند. همچنین مواد مغناطیسی به تغییرات دما حساس هستند و ممکن است در دمای زیاد خاصیت خود را از دست بدهند. علاوه بر این ممکن است آهنرباهای دائم در میدان های شدید مغناطیسی، ضعیف شوند. در نتیجه ظرفیت اضافه بار این موتورها نسبت به موتورهای القایی کمتر است [۳ و ۴].

در سال های اخیر سیستم های محرکه پیشرفت قابل ملاحظه

در سال های اخیر موتورهای سنکرون مغناطیس دائم^۱ (PMSM) در کاربردهای صنعتی بیش از پیش مورد استفاده قرار گرفته اند. به دلیل نبود جریان مغناطیس کنندگی در روتور این موتورها، تلفات اهمی روتور وجود نداشته و در نتیجه ضریب قدرت و بازده بیشتری دارند. اینرسی کم، قدرت زیاد با وجود حجم کوچکتر، گشتاور پسماند کمتر و سرعت زیاد پاسخ گشتاور که به دلیل حذف زمانی روتور ایجاد می شود، این موتورها را به مناسب ترین انتخاب برای کاربردهای

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ghanbari@gorganiau.ac.ir

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، واحد علی آبادکتول، دانشگاه آزاد اسلامی، علی آبادکتول، ایران
 ۲. استادیار، گروه مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران

[۱۳] از ترکیب کنترل مد لغزشی مرتبه دوم و سیستم تطبیقی مدل مرجع نیز برای کنترل و تخمین سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم بهره برده شده است. همچنین با استفاده از باند اشباع سعی شده تا میزان چترینگ کاهش یابد. در [۱۴] رویتگر تطبیقی مدل مرجع برای تخمین سرعت در ماشین‌های مغناطیس دائم داخلی کنترل شده با استفاده از مدولاسیون پهنای باند ارائه شده است. بررسی‌های انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که تغییرات مقاومت استاتور در کنترل سرعت بدون سنسور بسیار مؤثر است. در این مقاله با شناسایی این پارامتر، تخمین سرعت موتور انجام شده است. از کنترل‌کننده تطبیقی مدل مرجع به همراه رویتگر حالت تعمیم یافته برای کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم بهره برده شده است [۱۵]. در این مقاله سرعت و موقعیت موتور با سنسور سرعت اندازه‌گیری شده است. رویتگر حالت تعمیم یافته برای تخمین اغتشاش گشتاور بار استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مناسب ترکیب کنترل تطبیقی مدل مرجع و رویتگر حالت تعمیم یافته را برای کنترل با وجود اعمال اغتشاش‌های بزرگ به موتور نشان داده است. از سیستم تطبیقی مدل مرجع برای تخمین سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم با ترکیب روش کنترل جهت‌دار فیلد استفاده شده است [۱۶]. مزیت این روش کاهش رپل‌های سرعت و گشتاور موتور است.

رویتگر پیوسته تطبیقی برای تخمین ضریب خودالقایی، مقاومت استاتور و سپس تخمین سرعت و موقعیت روتور و گشتاور بار، تنها با استفاده از اندازه‌گیری جریان برای ماشین سنکرون مغناطیس دائم بکار برده شده است [۱۷]. همگرایی و پایداری روش به صورت تحلیلی بر اساس تئوری لیاپانوف اثبات شده و نتایج شبیه‌سازی مقاومت روش را نسبت به تغییر پارامترها و سرعت ماشین نشان داده است. همچنین از این رویتگر به همراه روش پسگام انتگرالی برای کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم داخلی استفاده شده است [۱۸]. استراتژی روش پیشنهادی این مقاله بر اساس رسیدن به گشتاور ماکزیمم نسبت به جریان در هر گام است.

روش پیشنهادی این مقاله روش سیستم تطبیقی مدل مرجع وابسته به حالت^۲ (SDMRAS) بر اساس نمایش شبه‌خطی سازی با قوانین تطابق بر اساس تئوری لیاپانوف برای ردیابی

پیدا کرده است [۵،۶،۷] و همچنین با ساخت آهنرباهای قوی-تر، موتورهای سنکرون مغناطیس دائم کاربردهای فراوانی در کنترل حرکت پیدا کرده‌اند. اما یکی از مهم‌ترین مسائل در کنترل موتورهای مغناطیس دائم، وجود اطلاعات دقیق از سرعت و وضعیت روتور است که عموماً از انکودر و تاکومتر برای اندازه‌گیری آنها استفاده می‌شود. این سنسورها که از نوع مکانیکی هستند قابلیت اطمینان و ایمنی را کاهش و هزینه کلی، ابعاد و آلودگی صوتی سیستم را افزایش می‌دهند. به همین دلیل در مطالعات اخیر روش‌های کنترل بدون سنسور مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۸ و ۹]. با توجه به وجود نامعینی در پارامترهای موتور و تأثیر زیاد آنها در تخمین موقعیت و سرعت، شناسایی این پارامترها نیز امری لازم است. در نظر نگرفتن این نامعینی‌ها در پارامترهای موتور منجر به تخمین ناصحیح از متغیرها شده و در نتیجه باعث کاهش کارایی روش کنترلی می‌شود.

در [۱۰] نویسندگان با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته روشی برای تخمین سرعت و وضعیت موتور سنکرون مغناطیس دائم بدون سنسور ارائه کرده‌اند. در روش ارائه شده، فیلتر کالمن، تخمین حالت‌های دینامیکی سیستم و حذف اثر اغتشاشات در اندازه‌گیری و تغییر پارامترهای داخلی سیستم را فراهم می‌سازد. اما مشکل این روش حجم محاسبات بالا و نیز وجود خطای خطی‌سازی مدل موتور در معادلات این رویتگر است. در [۱۱] از روش کنترل مد لغزشی برای کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده است. روش مد لغزشی به دلیل مقاوم بودن آن در مقابل تغییر پارامترها و اغتشاشات مناسب است اما مشکل آن داشتن چترینگ و نوسانات زیاد است که البته در مقالات روش‌هایی برای کاهش چترینگ ارائه شده اما در مقابل، از دقت ردیابی کاسته خواهد شد. در این مقاله از دو روش رویتگر حالت لیونبرگر و سیستم تطبیقی مدل مرجع برای تخمین سرعت موتور بهره برده شده است که نتایج شبیه‌سازی عملکرد بهتر سیستم تطبیقی مدل مرجع را برای تخمین سرعت نشان داده است. از رویتگر مد لغزشی نیز برای تخمین سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم که توسط سیستم فازی کنترل می‌شود، استفاده شده است [۱۲]. در این مقاله با بهره‌گیری از باند اشباع و قواعد فازی اگر-آنگاه سعی در کاهش چترینگ رویتگر شده است. در

اختصاص دارد. تخمین سرعت، شناسایی برخط پارامترهای موتور و طراحی رویترگر افزوده تطبیقی در بخش چهارم بررسی می‌شود. در بخش پنجم به نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آنها پرداخته می‌شود. در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری بیان خواهد شد.

۲- مدل دینامیکی موتور سنکرون مغناطیس دائم

مدل دینامیکی موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی مورد استفاده در این مقاله به صورت رابطه زیر است [۱۷]:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_d + p\omega i_q + \frac{v_d}{L_s} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_q - p\omega i_d - p\frac{\phi_f}{L_s}\omega + \frac{v_q}{L_s} \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{f_v}{J}\omega + p\frac{\phi_f}{J}i_q - \frac{T_L}{J} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

که در آن i_d, i_q و v_d, v_q به ترتیب جریان‌ها و ولتاژهای محورهای d و q استاتور، ω سرعت مکانیکی روتور، θ موقعیت زاویه‌ای روتور، R_s, L_s مقاومت و اندوکتانس استاتور، ϕ_f شار مغناطیسی آهنربای دائم، J ممان اینرسی، f_v ضریب اصطکاک، P تعداد زوج قطب و T_L گشتاور بار است. مقادیر پارامترهای موتور در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: پارامترهای موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی [۱۷]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
R_s	$\Omega \cdot 0,295$	J	$0,0679 \text{kgm}^2$
L_s	3mH	f_v	$0,0341 \text{kgm}^2\text{s}^{-1}$
ϕ_f	$0,33 \text{Wb}$	p	3

۳- کنترل تطبیقی مدل مرجع وابسته به حالت

روش کنترل مدل مرجع یکی از روش‌های مهم و پرکاربرد و در زمره روش‌هایی است که قابلیت تطبیقی شدن دارند. هدف این است که با تعیین پارامترهای کنترل‌کننده با یک مکانیزم تطابق مناسب، خروجی سیستم، خروجی مدل مرجع را دنبال کند [۲ و ۱۹]. پارامترها بر اساس پسخور خطا، که تفاوت بین خروجی سیستم و خروجی مدل مرجع است، تغییر داده می‌شوند. مکانیزم تنظیم پارامترها در سیستم تطبیقی مدل مرجع از دو روند اساسی تحلیل و طراحی قابل حصول است:

سرعت دلخواه موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی است. با توجه به این که معادلات موتور غیرخطی است، از روش تطبیقی مدل مرجع فضای حالت خطی نمی‌توان برای کنترل آن استفاده کرد. اما در این مقاله با استفاده از نمایش معادلات موتور به صورت شبه خطی، معادلات غیرخطی موتور به صورت وابسته به حالت خطی درآورده شده و کنترل‌کننده وابسته به حالت طراحی شده است. اثبات پایداری این کنترل‌کننده نیز بر اساس نمایش شبه خطی سازی ارائه شده و لازم به ذکر است تا کنون کنترل‌کننده تطبیقی مدل مرجع در فضای حالت بر اساس نمایش شبه خطی در هیچ مطالعه‌ای ارائه نشده و از نوآوری‌های این مقاله است. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش سادگی طراحی و در عین حال عملکرد بسیار مناسب نسبت به روش‌های غیرخطی است که در مقالات مختلف ارائه شده‌اند. این روش منجر به طراحی کنترل‌کننده‌ای پایدار و مقاوم نسبت به تغییر نقطه کار و سیگنال مرجع می‌شود. دقت و سرعت ردیابی نیز در این نوع کنترل‌کننده بسیار مناسب است. همچنین برای تخمین سرعت و شناسایی برخط پارامترهای موتور از رویترگر افزوده تطبیقی^۳ (AAO) استفاده شده است. استفاده از این رویترگر دو مزیت اساسی نسبت به روش‌های قبلی دارد: اول اینکه معادلات این رویترگر غیرخطی است و لذا مشکل خطای خطی سازی روش‌هایی مانند EKF را ندارد. دوم تخمین سرعت، شناسایی برخط پارامترها و تخمین اغتشاش به صورت همزمان و با یک سری معادلات به صورت افزوده بدست می‌آید. لذا نیازی به ترکیب چند الگوریتم تخمین و شناسایی برای تخمین سرعت و شناسایی پارامترها و یا مشاهده‌گرهای اغتشاش مجزا و جداگانه نیست و در نتیجه حجم، زمان و پیچیدگی محاسبات کاهش یافته و روش پیشنهادی به صورت بلادرنگ قابل پیاده‌سازی خواهد بود. با توجه به ترکیب کنترل‌کننده تطبیقی مدل مرجع و رویترگر افزوده، روش پیشنهادی مقاومت بسیار مناسبی در برابر تغییر پارامترهای موتور، تغییر سرعت مرجع و اعمال اغتشاش از خود نشان می‌دهد.

در ادامه بخش‌های این مقاله به صورت زیر دنبال خواهد شد. در بخش دوم مدل دینامیکی موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی معرفی می‌شود. بخش سوم به شرح روش شبه خطی سازی و سپس کنترل تطبیقی مدل مرجع وابسته به حالت

سیستم حفظ می‌شود. در عمل هر سیستم غیرخطی را نمی‌توان به فرم شبه‌خطی نمایش داد. برای سیستم غیرخطی مناسب^۴ نسبت به ورودی با معادله (۴) همواره فرم شبه‌خطی به صورت رابطه (۵) وجود دارد [۲۰ و ۲۱].

$$\dot{X} = f(X) + B(X)u \quad (4)$$

$$A(X) = \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial X} \Big|_{X=\lambda X} d\lambda \quad (5)$$

در صورتی که بیش از یک متغیر حالت وجود داشته باشد فرم شبه‌خطی سازی به بی‌نهایت شکل مختلف قابل نمایش است. این موضوع باعث ایجاد درجات آزادی در طراحی کنترل‌کننده و رویتر خواهد شد [۲۰، ۲۱]. برای موتور سنکرون مغناطیس دائم که با رابطه (۱) بیان شد با توجه به مناسب بودن آن نسبت به ورودی از بین بی‌شمار نمایش شبه‌خطی، نمایش شبه‌خطی زیر در نظر گرفته شده است.

$$A(X) = \begin{bmatrix} -R_s/L_s & pX(3) & 0 & 0 \\ -pX(3) & -R_s/L_s & -p\phi_f/L_s & 0 \\ 0 & p\phi_f/J & -f_v/J & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B(X) = \begin{bmatrix} 1/L_s & 0 \\ 0 & 1/L_s \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

۳-۲- طراحی کنترل‌کننده SDMRAS

برای طراحی کنترل‌کننده تطبیقی مدل مرجع وابسته به حالت، فرض شده است که سیستم غیرخطی (۲) به صورت شبه‌خطی سازی شده (۳) قابل نمایش است. معادله سیستم مدل مرجع خطی نیز به شکل رابطه زیر است [۲]:

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m u_c \quad (6)$$

که در آن u_c, X_m بردارهای متغیرهای حالت مدل مرجع و ورودی دلخواه و A_m, B_m ماتریس‌های سیستم و ورودی مدل مرجع هستند. قانون کنترل حلقه بسته وابسته به حالت به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$u = M(X)u_c - L(X)X \quad (7)$$

که در آن $M(X), L(X)$ ماتریس‌های وابسته به حالت طراحی هستند که با توجه به ساختار کنترل‌کننده مورد نظر درایه‌های آنها در یک بردار قابل تنظیم قرار داده شده و طبق قضیه ۱ انتخاب می‌شوند. با قرار دادن معادله (۷) در (۳) معادله حلقه بسته سیستم به صورت رابطه زیر بدست می‌آید:

نسل اول روش گرادیان، نسل دوم روش‌های مبتنی بر نظریه پایداری مانند روش لیاپانوف و Passivity. تفاوت این دو نسل در مکانیزم تطابق آنها است. کنترل تطبیقی بر پایه گرادیان ساده‌تر و سریعتر است اما ممکن است در بهره‌های بالا منجر به ناپایداری سیستم گردد. در صورتی که استفاده از تابع لیاپانوف این مشکل را مرتفع می‌سازد و قانون کنترلی را تولید می‌کند که همواره پایداری سیستم را تضمین می‌کند. برخلاف روش گرادیان که بر اساس سیگنال خروجی است با استفاده از کنترل تطبیقی مدل مرجع بر مبنای لیاپانوف، می‌توان طراحی را در فضای حالت انجام داده و تمامی حالات را به مقدار دلخواه رساند. روال کلی طراحی یک سیستم کنترل تطبیقی مدل مرجع به این صورت است: (۱) تعیین ساختار کنترل‌کننده، (۲) تعیین معادله خطا و دینامیک آن و (۳) تعیین تابع لیاپانوف و استفاده از آن در تعیین قانون تطبیق پارامترها [۲ و ۱۹].

۳-۱- شبه‌خطی سازی

طراحی کنترل‌کننده و رویتر برای سیستم‌های غیرخطی به مراتب پیچیده‌تر از سیستم‌های خطی است. انواع کنترل‌کننده‌ها و رویترهای موجود برای کلاس خاصی از سیستم‌های غیرخطی ارائه شده و یا با ایجاد شرایط محدودکننده همراه هستند. خطی‌سازی‌های مختلف حول نقطه تعادل مانند روش ژاکوبین نمی‌تواند بیانگر خصوصیات و ذات سیستم غیرخطی در تمامی حالت باشد. لذا روش شبه-خطی سازی به عنوان روشی برای نمایش سیستم‌های غیرخطی به فرم خطی و سپس تعمیم کنترل‌کننده‌ها و رویترهای خطی برای این نوع سیستم‌ها ارائه شد [۲۰، ۲۱]. در حالت کلی معادله حالت سیستم غیرخطی به صورت رابطه (۱) در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش شبه‌خطی سازی معادله (۲) به صورت رابطه (۳) بازنویسی می‌شود.

$$\dot{X} = f(X, u) \quad (2)$$

$$\dot{X} = A(X)X + B(X)u \quad (3)$$

که در آن u, X بردارهای متغیرهای حالت و ورودی سیستم و $A(X), B(X)$ ماتریس‌های سیستم و ورودی وابسته به حالت هستند. مزیت این نوع نمایش این است که در این روش برخلاف خطی‌سازی ژاکوبین تمامی ویژگی‌های غیرخطی

(۱۲) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{V(e, \vartheta)}{dt} &= -\frac{1}{2} \gamma e^T Q e + \gamma (\vartheta - \vartheta^0)^T \Psi^T(X, \vartheta) P e \\ &+ (\vartheta - \vartheta^0)^T \frac{d\vartheta}{dt} \\ &= -\frac{1}{2} \gamma e^T Q e + (\vartheta - \vartheta^0)^T \left(\frac{d\vartheta}{dt} + \gamma \Psi^T(X, \vartheta) P e \right) \end{aligned} \quad (14)$$

با انتخاب قانون تطابق طبق رابطه (۹)، ترم دوم معادله (۱۴) صفر شده و مشتق تابع لیاپانوف به صورت $\frac{V(e, \vartheta)}{dt} = -\frac{1}{2} \gamma e^T Q e$ و نیمه معین منفی است. لذا سیستم حلقه بسته پایدار خواهد بود.

۴- تخمین سرعت و شناسایی پارامترها

در سیستم درایو موتورهای سنکرون مغناطیس دائم متداول کنترل سرعت به وسیله سنسورهای شفت از جمله انکودرهای نوری، سنسورهای اثر هال و ... انجام می‌شود. این سنسورها که از نوع مکانیکی هستند قابلیت اطمینان و ایمنی را کاهش و هزینه کلی، ابعاد و آلودگی صوتی سیستم را افزایش می‌دهند. بنابراین هدف مقالات اخیر کنترل بدون سنسور سرعت وضعیت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم است تا قابلیت اطمینان کل سیستم و عملکرد دینامیکی آن را بهبود بخشند [۴ و ۹]. با توجه به وجود نامعینی در پارامترهای موتور مانند مقاومت و اندوکتانس استاتور و شار مغناطیسی و تغییر آنها در اثر تغییر دما و گذشت زمان، وجود گشتاور بار و تأثیر زیاد آنها در تخمین موقعیت و سرعت، شناسایی این پارامترها نیز امری لازم است. در نظر نگرفتن این نامعینی‌ها در پارامترهای موتور منجر به تخمین ناصحیح از حالت‌ها شده و در نتیجه باعث کاهش کارایی روش کنترلی می‌شود. بنابراین در مقالات اخیر با ترکیب شناسایی پارامترهای سیستم به صورت برخط و تخمین سرعت و موقعیت روتور بدون استفاده از سنسور سعی در افزایش کارایی موتور شده است [۱].

در این مقاله از رویکرد افزوده تطبیقی برای تخمین سرعت، موقعیت و گشتاور بار و شناسایی پارامترهای موتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده است. این رویکرد براساس معادلات غیرخطی موتور و بر پایه نمایش شبه خطی، تخمین حالت‌ها را در هر لحظه انجام می‌دهد. یکی از مسائل مهم در انتخاب این رویکرد قابلیت آن برای تخمین سرعت و شناسایی همزمان پارامترهای موتور به صورت برخط است. همچنین در

$$\begin{aligned} \dot{X} &= (A(X) - B(X)L(X))X + B(X)M(X)u_c \\ &= A_c(X, \vartheta)X + B_c(X, \vartheta)u_c \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن ماتریس‌های سیستم و ورودی حلقه بسته به صورت $B_c = B l$ و $A_c = A - BL$ تعریف شده‌اند. ϑ بردار پارامترهای قابل تنظیم بوده و مقدار واقعی آن ϑ^0 در نظر گرفته می‌شود.

قضیه ۱: سیستم حلقه بسته (۸) با قانون کنترل (۷) با انتخاب بردار پارامترهای طراحی به صورت رابطه زیر پایدار خواهد بود.

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -\gamma \Psi(X, \vartheta)^T P e \quad (9)$$

که

$\Psi(X, \vartheta) = (A_c(X, \vartheta) - A_m)X + (B_c(X, \vartheta) - B_m)u_c$ تعریف شده و $\gamma > 0$ پارامتر طراحی برای رسیدن به سرعت دلخواه همگرایی است. $e = X - X_m$ خطای ردیابی بردار حالت سیستم و مدل مرجع است. P ماتریس مثبت معینی است که از معادله لیاپانوف (۱۰) بدست می‌آید. در این رابط Q ماتریسی مثبت معین و دلخواه است.

$$A_m^T P + P A_m = -Q \quad (10)$$

اثبات قضیه ۱: برای اثبات پایداری کنترل‌کننده تطبیقی مدل مرجع وابسته به حالت ارائه شده از تئوری لیاپانوف استفاده شده است. با مشتق گرفتن از بردار خطای حالت و قرار دادن رابطه‌های (۳) و (۶) دینامیک خطا حاصل می‌شود:

$$\dot{e} = \dot{X} - \dot{X}_m = A(X)X + B(X)u - A_m X_m - B_m u_c \quad (11)$$

با اضافه و کم کردن $A_m X$ در سمت راست تساوی و جایگذاری قانون کنترل حلقه بسته طبق رابطه (۷) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_m e + (A(X) - A_m - B(X)L(X))X \\ &+ (B(X)M(X) - B_m)u_c \\ &= A_m e + (A_c(X, \vartheta) - A_m)X + (B_c(X, \vartheta) - B_m)u_c \\ &= A_m e + \Psi(X, \vartheta) \end{aligned} \quad (12)$$

تابع لیاپانوف به صورت رابطه زیر تعریف شده است:

$$V(e, \vartheta) = \frac{1}{2} \left(\gamma e^T P e + (\vartheta - \vartheta^0)^T (\vartheta - \vartheta^0) \right) \quad (13)$$

با توجه به اینکه P ماتریسی مثبت معین و $\gamma > 0$ است لذا تابع لیاپانوف تعریف شده مثبت خواهد بود. با مشتق گرفتن از تابع لیاپانوف و جایگذاری رابطه (۱۰) و دینامیک خطا طبق

$$\dot{\hat{\theta}} = \hat{\omega} + k_{\theta}(i_q - \hat{i}_q) \quad (19)$$

که در آن \hat{X}, \hat{y} حالت‌ها و خروجی‌های تخمین زده شده، $\hat{\theta}$ موقعیت تخمین زده شده و $\hat{\eta} = \hat{R}_s / \hat{L}_s$ است. ماتریس‌های S_{η}, S نیز ماتریس‌های مثبت معین و $k_{\theta} > 0$ بهره تخمین موقعیت است. پارامترهای طراحی به شکل زیر انتخاب می‌شوند:

$$\rho = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_6); \rho_i > 0, i = 1, \dots, 6$$

$$\rho_{\eta} = \text{diag}(p_{\eta 1}, p_{\eta 2}); p_{\eta 1}, p_{\eta 2} > 0$$

قضیه ۲: معادله سیستم (۱۷) و رویکرد افزوده تطبیقی با معادلات (۱۸) و (۱۹) را در نظر بگیرید. با فرض لیبشیتز کلی بودن ماتریس $A(X, u)$ و تابع $g(X, u, y)$ طبق رابطه (۲۰) و برقراری رابطه (۲۱) خطای تخمین حالت‌های رویکرد پیشنهادی به صورت مجانبی به صفر میل خواهد کرد.

$$\|A(X, u) - A(\hat{X}, u)\| \leq k_1 \|e\|$$

$$\|g(X, u, y) - g(\hat{X}, u, y)\| \leq k_2 \|e\| \quad (20)$$

$$\|X\| \leq k_3$$

$$\rho + \left(2 + \frac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)} (k_1^2 k_3^2 + k_2^2) \right) \mathbf{I} > 0 \quad (21)$$

اثبات قضیه ۲: در ابتدا دو لم زیر که برای اثبات قضیه مورد نیاز است بیان می‌شود.

لم ۱: برای هر بردار دلخواه a, b و هر ماتریس دلخواه $R > 0$ با ابعاد مناسب، نامساوی زیر برقرار است:

$$a^T b + b^T a \leq a^T R a + b^T R^{-1} b \quad (22)$$

لم ۲: برای ماتریس متقارن مثبت معین R و بردار دلخواه a ناساوی‌های زیر برقرار است:

$$a^T R a \geq \lambda_{\min}(R) \|a\|^2, \quad a^T R a \leq \lambda_{\max}(R) \|a\|^2 \quad (23)$$

که در آن $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ بزرگترین و کوچکترین مقدار ویژه هستند.

برای اثبات همگرایی رویکرد پیشنهادی در ابتدا خطای حالت-ها به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e = X - \hat{X} - \Lambda e_{\eta}, \quad e_{\eta} = \eta - \hat{\eta} \quad (24)$$

دینامیک این خطاها با جایگذاری معادلات سیستم و رویکرد و اضافه و کم کردن $A(\hat{X}, u)X$ در معادله \dot{e} به صورت رابطه

رویتگر پیشنهادی تمامی پارامترهای موتور شامل مقاومت و اندوکتانس استاتور و شار مغناطیسی، سرعت و گشتاور بار به صورت افزوده و در یک سری معادلات و در یک لحظه به صورت همزمان بروزرسانی می‌شوند. بنابراین حجم، زمان و پیچیدگی محاسبات کاهش یافته و الگوریتم پیشنهادی قابلیت بیشتری در پیاده‌سازی و بلادرنگ بودن خواهد داشت.

۴-۱- رویکرد افزوده تطبیقی

با فرض اینکه مقاومت و اندوکتانس استاتور، شار و گشتاور بار، توابعی خطی تکه‌ای هستند دینامیک آنها به صورت رابطه زیر قابل بیان است:

$$\dot{R}_s = 0, \quad \dot{L}_s = 0, \quad \dot{\phi}_f = 0, \quad \dot{T}_L = 0 \quad (15)$$

متغیرهای حالت، ورودی و خروجی به صورت زیر تعریف شده-اند:

$$X = [i_d \quad 1/L_s \quad i_q \quad \omega \quad T_L \quad \phi_f]^T$$

$$u = [v_d \quad v_q]^T, \quad y = [i_d \quad i_q]^T \quad (16)$$

بنابراین معادلات حالت و خروجی سیستم افزوده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{X} = A(X, u)X + g(X, u, y) + \Phi(X) \eta \\ y = CX \end{cases} \quad (17)$$

که در آن

$$A(X, u) = \begin{bmatrix} 0 & v_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p(i_d - \phi_f / L_s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -f_v / J & -1/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Phi(y) = [-i_d \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad \eta = R_s / L_s$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$g(X, u, y) = [\rho \omega i_d \quad 0 \quad (-i_q R_s + v_q) / L_s \quad p \phi_f i_q / J \quad 0 \quad 0]^T$$

با تعریف بالا، معادلات رویکرد افزوده تطبیقی به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) بیان می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = A(\hat{X}, u)\hat{X} + g(\hat{X}, u, y) + \Phi(y)\hat{\eta} \\ \quad + K(\hat{X}, u, y)(y - \hat{y}) \\ K(\hat{X}, u, y) = (\Lambda S_{\eta}^{-1} \Lambda^T + S^{-1}) C^T \\ \dot{S} = -\rho S - A^T(\hat{X}, u)S - SA(\hat{X}, u) + C^T C \\ \dot{S}_{\eta} = -\rho_{\eta} S_{\eta} + \Lambda^T C^T C \Lambda \\ \dot{\Lambda} = (A(\hat{X}, u) - S^{-1} C^T C) \Lambda + \Phi(y) \\ \dot{\zeta} = S_{\eta}^{-1} \Lambda^T C^T (y - \hat{y}), \quad \hat{\eta} = \zeta(1) \\ \hat{y} = C\hat{X} \end{cases} \quad (18)$$

بنابراین با برقراری رابطه (۲۱) خطای حالت رویترگر پیشنهادی با معادلات (۱۸) به صورت مجانبی به صفر همگرا می‌شود.

۵- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، این روش بر روی موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی با معادلات (۱) و مقادیر نشان داده شده در جدول ۱ پیاده‌سازی شده است. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است. پارامترهای طراحی در جدول ۲ آورده شده است. گشتاور بار اعمالی به موتور مطابق شکل (۲) است. واضح است که رویترگر پیشنهادی توانسته است با سرعت خوب و خطای ردیابی بسیار کوچک گشتاور بار را تخمین بزند. در شکل (۳) سرعت واقعی و تخمین زده شده نشان داده شده است. این شکل نشانگر عملکرد مناسب کنترل‌کننده و رویترگر پیشنهادی در تخمین و کنترل مناسب سرعت حتی در سرعت‌های پایین (حول صفر)، بالا (۲۵۰ rad/s) و نیز سرعت‌های متغیر و غیر ثابت است. در شکل (۴) جریان محورها و در شکل (۵) ولتاژ آنها مشاهده می‌شود. واضح است که هر دو متغیر در محدوده مجاز خود قرار دارند. مقاومت و اندوکتانس استاتور و شار مغناطیسی آهنربای دائم تخمین زده شده نیز در شکل (۶) تا (۸) نمایش داده شده‌اند. سرعت همگرایی پارامترها به پارامترهای واقعی مناسب بوده و در اثر اعمال گشتاور بار نیز تغییر اندکی در مقدار آنها ایجاد شده که به سرعت از بین رفته و قابل اغماض است. برای نشان دادن کارایی رویترگر پیشنهادی در اثر تغییر پارامترها، مقاومت استاتور به صورت نمایی تغییر کرده است. پدیده اشباع در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم سطحی باعث تغییر و کاهش اندوکتانس می‌شود. در صورتی که رویترگر نتواند مقدار صحیح اندوکتانس را تخمین بزند، باعث تغییر موقعیت و سرعت موتور و ریپل گشتاور و نویز الکترومغناطیسی می‌شود. برای نشان داده عملکرد روش پیشنهادی در ناحیه اشباع، اندوکتانس به صورت نمایی کاهش یافته است. همچنین مقاومت استاتور نیز به صورت نمایی افزایش یافته است. در شکل‌های (۹) تا (۱۱) مقاومت، اندوکتانس و سرعت با وجود تغییرات نمایی در این دو متغیر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تخمین مقاومت و اندوکتانس به

(۲۵) خواهد بود:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (A(X, u) - A(\hat{X}, u))X + g(X, u, y) - g(\hat{X}, u, y) \\ &\quad + (A(\hat{X}, u) - S^{-1}C^T C)e \\ \dot{e}_\eta &= -S_\eta^{-1} \Lambda^T C^T C (e + \Lambda e_\eta) \end{aligned} \quad (25)$$

تابع لیاپانوف به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$V = e^T S e + e_\eta^T S_\eta e_\eta \quad (26)$$

که با توجه به مثبت معین بودن ماتریس‌های S_η, S تابع لیاپانوف مثبت معین است. مشتق تابع لیاپانوف تعریف شده با جایگذاری رابطه (۱۸) و (۲۵) به شکل رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -e^T \rho S e - e^T C^T C e - e_\eta^T \rho_\eta S_\eta e_\eta - e_\eta^T \Lambda^T C^T C \Lambda e_\eta \\ &\quad + e^T S (A(X, u) - A(\hat{X}, u))X \\ &\quad + X^T (A(X, u) - A(\hat{X}, u))^T S e \\ &\quad + e^T S (g(X, u, y) - g(\hat{X}, u, y)) \\ &\quad + (g(X, u, y) - g(\hat{X}, u, y))^T S e \\ &\quad + e^T C^T C \Lambda e_\eta + e_\eta^T \Lambda^T C^T C e \end{aligned} \quad (27)$$

با استفاده از لم ۱ و ۲، در نظر گرفتن $R = S$ و رابطه (۲۰) نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} &e^T S (A(X, u) - A(\hat{X}, u))X \\ &+ X^T (A(X, u) - A(\hat{X}, u))^T S e \leq e^T S e \\ &+ X^T (A(X, u) - A(\hat{X}, u))^T S (A(X, u) - A(\hat{X}, u))X \\ &\leq e^T S e + \frac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)} k_1^2 k_3^2 e^T S e \end{aligned} \quad (28)$$

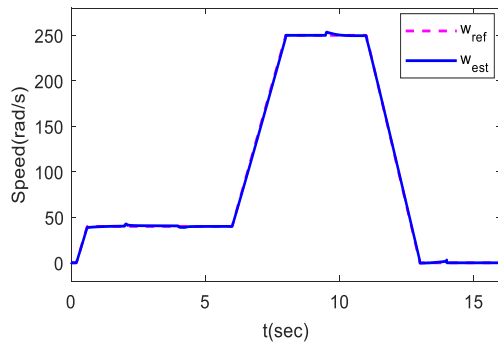
$$\begin{aligned} &e^T S (g(X, u, y) - g(\hat{X}, u, y)) \\ &+ (g(X, u, y) - g(\hat{X}, u, y))^T S e \leq e^T S e \\ &+ (g(X, u, y) - g(\hat{X}, u, y))^T S (g(X, u, y) - g(\hat{X}, u, y)) \\ &\leq e^T S e + \frac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)} k_2^2 e^T S e \end{aligned} \quad (29)$$

با استفاده از لم ۱ و در نظر گرفتن $R = C^T C$ نتیجه می‌شود:

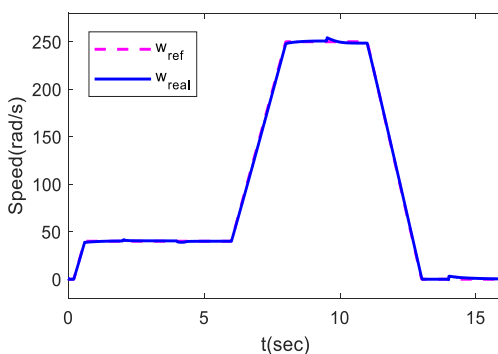
$$e^T C^T C \Lambda e_\eta + e_\eta^T \Lambda^T C^T C e \leq e^T C^T C e + e_\eta^T \Lambda^T C^T C \Lambda e_\eta \quad (30)$$

با جایگذاری روابط (۲۸) تا (۳۰) در رابطه (۲۷) مشتق تابع لیاپانوف به صورت زیر بدست می‌آید:

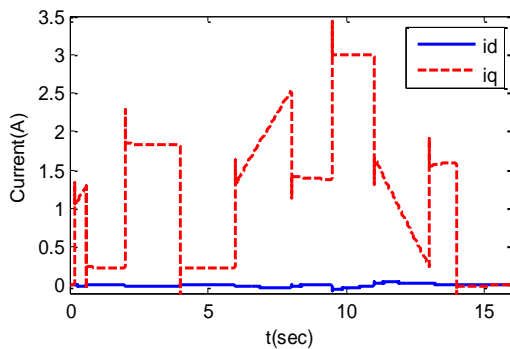
$$\dot{V} \leq -e^T \left(\rho + \left(2 + \frac{\lambda_{\max}(S)}{\lambda_{\min}(S)} (k_1^2 k_3^2 + k_2^2) \right) \mathbf{I} \right) S e - e_\eta^T \rho_\eta S_\eta e_\eta \quad (31)$$



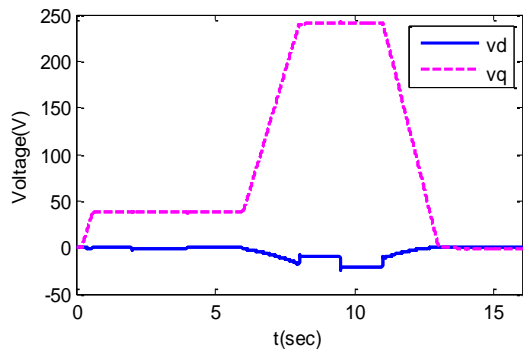
شکل (۳-الف): ردیابی و تخمین سرعت (سرعت تخمین زده شده)



شکل (۳-ب): ردیابی و تخمین سرعت (سرعت واقعی)



شکل (۴): جریان محورها

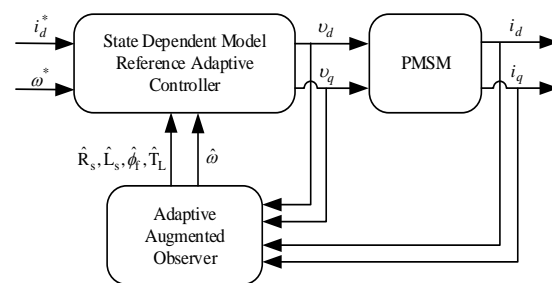


شکل (۵): ولتاژ محورها

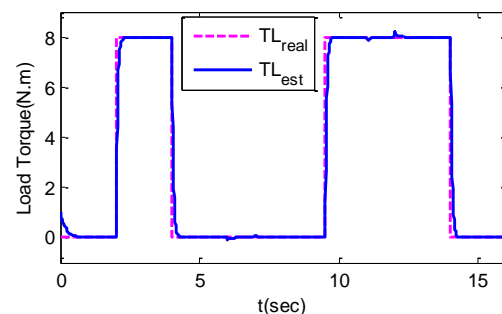
خوبی صورت گرفته است. این نتایج نشان می‌دهند که در ناحیه اشباع با کاهش اندوکتانس نیز رویترگر توانسته است تخمین مناسبی از پارامترها ارائه و در نتیجه کنترل‌کننده ردیابی سرعت را به درستی انجام دهد. یکی دیگر از مشکلات موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، دی‌مغناطیس شدن آهنربا است که می‌تواند به دلایلی مانند پیرشدگی، تکانه‌های مکانیکی یا حرارتی و واکنش آرمیچر در موع اتصال کوتاه ایجاد شود. در مواقع بروز دی‌مغناطیس شدن آهنربا، شار کاهش می‌باید [۲۲]. برای نشان دادن اثر دی‌مغناطیس شدن آهنربای دائم در عملکرد روش پیشنهادی، شار مغناطیسی ۱۰٪ کاهش یافته است و نتایج آورده شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) دیده می‌شود با توجه به این که در روش پیشنهادی شار مغناطیسی توسط رویترگر تخمین زده می‌شود لذا می‌تواند حتی با وجود کاهش شار در اثر دی-مغناطیس شدن آهنربا نیز عملکرد مناسبی از خود نشان دهد.

جدول (۲): پارامترهای طراحی روش پیشنهاد

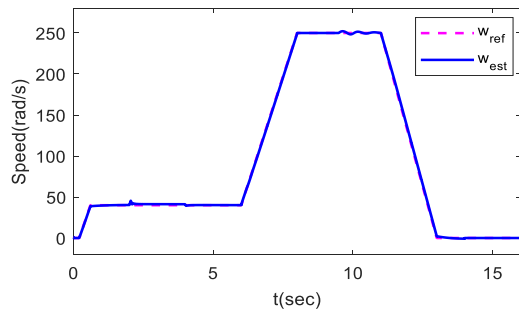
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۱۰	$\rho_{\eta_i}, i=1,2$	۰,۵	$\rho_i, i=1,2$
۱۰۰۰	α	۵۰	$\rho_i, i=3,4,5$
۰,۱	k_{θ}	۰,۱	ρ_6



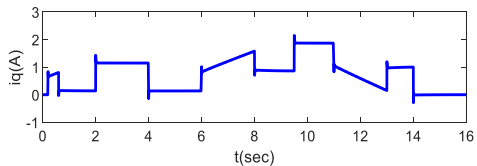
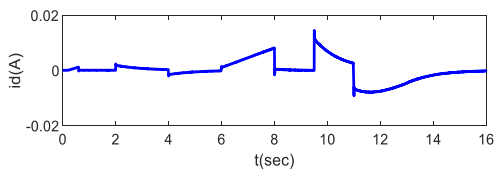
شکل (۱): بلوک دیاگرام روش پیشنهادی



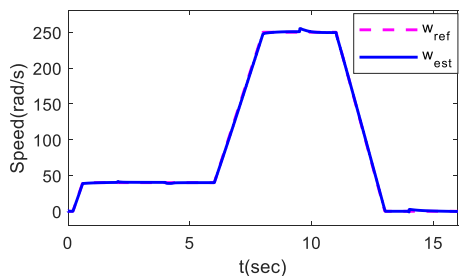
شکل (۲): گشتاور اعمالی و تخمین زده شده



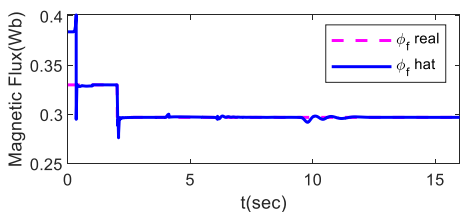
شکل (۱۱): ردیابی و تخمین سرعت با تغییر نمایی مقاومت و اندوکتانس



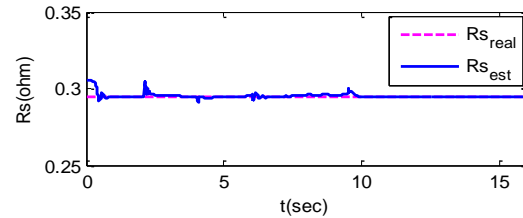
شکل (۱۲): جریان محورهای d و q



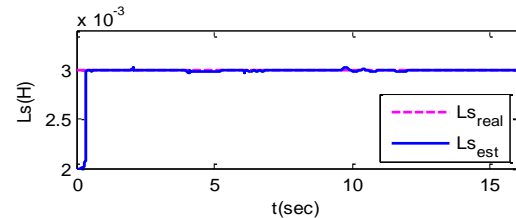
شکل (۱۳): ردیابی و تخمین سرعت با کاهش شار



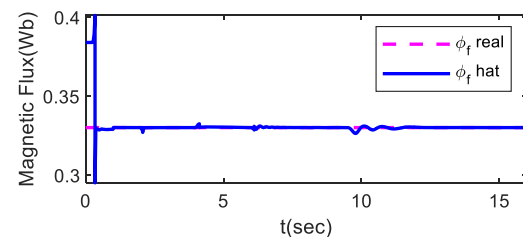
شکل (۱۴): شار مغناطیسی تخمین زده شده با کاهش ۱۰٪ مقدار آن



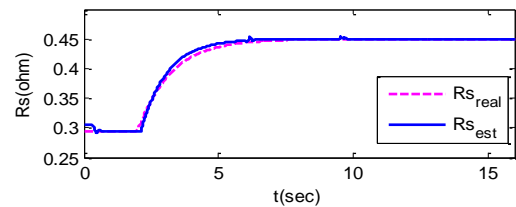
شکل (۶): مقاومت تخمین زده شده



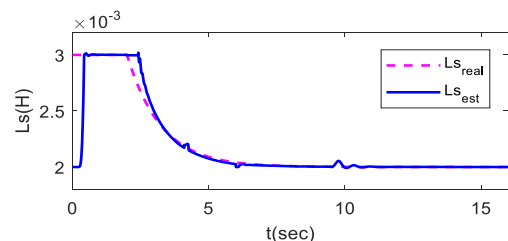
شکل (۷): اندوکتانس تخمین زده شده



شکل (۸): شار مغناطیسی تخمین زده شده



شکل (۹): مقاومت تخمین زده شده با تغییر نمایی



شکل (۱۰): اندوکتانس تخمین زده شده با تغییر نمایی

۶- نتیجه گیری

در این مقاله برای کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی بدون سنسور سرعت، کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع بر اساس نمایش شبه خطی سازی پیشنهاد شد. این

کنترل کننده بدون نیاز به خطی سازی و تنها با نمایش شبه خطی قادر است قانون کنترل را با استفاده از تئوری لیپانوف برای پایدارسازی و ردیابی سیگنال مرجع تولید کند. با توجه به طراحی این کنترل کننده در فضای حالت و نیاز به

گشتاور بار به صورت افزوده در بردار حالت و بروزرسانی آنها در یک سری معادلات، نیاز به بانک رویتگر با چند سری معادلات وجود نخواهد داشت. عملکرد و کارایی روش پیشنهادی در ردیابی سرعت‌های متغیر و پایین، گشتاور بار و تغییر پارامترها با نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد. سپاسگزاری نویسندگان این مقاله از هم‌فکری اعضای هیأت تحریریه مجله کمال سپاسگزاری را دارند.

مقادیر حالتها از جمله سرعت، از رویتگر افزوده تطبیقی برای تخمین آن بهره برده شد. با توجه به حساسیت پارامترهای موتور از جمله مقاومت و اندوکتانس استاتور و شار مغناطیسی به تغییرات دما و تغییر آنها به مرور زمان، نیاز به شناسایی برخط این پارامترها است. اما در این مقاله با هدف کاهش حجم، زمان و پیچیدگی محاسبات و نیز حفظ ذات غیرخطی معادلات موتور، از رویتگر افزوده تطبیقی برای شناسایی پارامترها و تخمین سرعت به صورت همزمان استفاده شد. همچنین با قرار دادن تمامی حالتها، پارامترها و همچنین

مراجع

- [۱] مهدی، کراری، "شناسایی سیستم‌ها"، ویرایش اول، تهران، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۹۱.
- [2] K. J. Astrom, and B. Wittenmark, "Adaptive Control", Prentice Hall Publishing, 1994.
- [۳] علی اکبر دامکی علی‌آباد و علی محمد حریری، "طراحی جامع و ساخت موتور سنکرون آهن‌ربای دائم با هدف دستیابی به کمترین گشتاور دندانه"، مجله انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران، سال ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۳۹۷، صفحات ۱۱۳-۱۲۱.
- [4] Y. Zhao, "Position/speed Sensorless Control for Permanent Magnet Synchronous Machines", Ph.D. Thesis, University of Nebraska-Lincoln, Nebraska, 2014.
- [۵] محمد جواد غازی غازی اردکانی، مجید حسین پور، مهدی شاهپرستی و مهدی سیاهی، "کنترل برداری غیرمستقیم سرعت ماشین القایی مبتنی بر اینورتر دو-سه سطحی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، آماده انتشار، 10.22075/jme.2019.17166.1685.
- [۶] مهرداد جعفر بلند و محمد هادی ریسمانی، "یک روش کنترل بدون حسگر جدید برای موتورهای DC بدون جاروبک مبتنی بر شار پیوندی خط به خط"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۳۹-۱۵۰.
- [۷] روح اله مقصودی، یعقوب حیدری و بهزاد مشیری، "یک تحلیل مقایسه‌ای از الگوریتم‌های هوش جمعی کلونی زنبور مصنوعی و بهینه سازی گروهی ذرات در طراحی یک کنترل کننده PID فازی کسری و پیاده سازی آن بر روی موتور DC"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۱، شماره ۳۵، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۱۱-۲۳.
- [8] O. Benjak, and D. Gerling, "Review of Position Estimation Methods for IPMSM Drives without Position Sensor, PartII: Adaptive Methods", International Conference on Electrical Machines, pp. 1-6, 2010.
- [9] Y. Yan, and J. G. Zhu, "A Survey of Sensorless Initial Rotor Position Estimation Schemes for Permanent Magnet Synchronous Motors", Australasian University Power Engineering Conference, pp. 1-6, 2004.
- [10] R. A. Walambe, A. Apte, and V. A. Joshi, "Disturbance Observer Based Sensor-less Vector Control Drive for PMSM using EKF", IEEE Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives, pp. 1-5, 2016.
- [11] L. Saihi, and A. Bouteraa, "Robust Sensorless Sliding Mode Control of PMSM with MRAS and Luenberger Extended Observer", International Conference on Modelling, Identification and Control, pp. 174-179, 2016.
- [12] M. M. Gaballah, M. El-Bardini, and M. Sharaf, "Chattering-free Sliding Mode Observer for Speed Sensorless Control of PMSM", Applied Computing and Informatics, Vol. 31, No. 1, pp. 1-8, 2016.
- [13] L. Sunil, "Adaptive Sliding Mode-MRAS Strategy for Sensorless Speed Control of SPIM Drives", International Journal of Engineering and Technology, Vol. 4, No. 4, pp. 644-652, 2017.

[14] A. Khlaief, M. Boussak, and A. Chaari, "A MRAS-based Stator Resistance and Speed Estimation for Sensorless Vector Controlled IPMSM Drive", *Electric Power System Research Journal*, Vol. 108, No. 7, pp. 1-15, 2014.

[15] X. Li, and Sh. Li, "Speed Control for a PMSM Servo System using Model Reference Adaptive Control and an Extended State Observer", *Journal of Power Electronics*, Vol. 14, No. 3, pp. 549-563, 2014.

[16] N. H. Saad, A. A.El-Sattar, and M. A. Gad, "Sensorless Field Oriented Control Based on Improved MRAS Speed Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", *Power Systems Conference*, pp. 1-8, 2016.

[17] M. A. Hamida, J. D. Leon, A. Glumineau, and R. Boisliveau, "An Adaptive Interconnected Observer for Sensorless Control of PM Synchronous Motor with Online Parameter identification", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 2, pp. 739-748, 2013.

[18] M. A. Hamida, J. D. Leon, and A. Glumineau, "Experimental Sensorless Control for IPMSM by using Integral Backstepping Strategy and Adaptive high Gain Observer", *Control Engineering Practice*, Vol. 59, No. 1, pp. 64-76, 2017.

[۱۹] رضا همتی، حمیدرضا کوفیگر و محمد عطایی، "کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع بهبودیافته نرمالیزه شده برای UPFC"، *مجله انجمن مهندسين برق و الکترونیک ایران*، سال ۱۲، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴، صفحات ۱۳۹-۱۵۳.

[20] M. H. Korayem, and S. R. Nekko, "State-Dependent Riccati Equation to Track Control of Time-Varing Systems with State and Control Nonlinearities", *ISA Transactions*, Vol. 57, No. 1, pp. 117-135, 2015.

[21] N. Kalamian, H. Khaloozadeh, and S. Ayati, "State-Dependent Impulsive Observer Design for Nonlinear Time-Delay Systems", *International Conference on Control, Instrumentation, and Automation*, pp. 183-188, 2017.

[۲۲] سیده سارا معروفیان و کریم عباسزاده، "مدلسازی و تشخیص خطای موتور آهنربای دائم شار محوری با استفاده از مدار معادل مغناطیسی و مدل ARX"، *مجله کنترل*، جلد ۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۲، صفحات ۹-۱۸.