

کنترل ولتاژ کاهش یافته بازوی ربات با مفاصل منعطف الکتریکی مبتنی بر روش پیش بین مدل

حمید هوشمند^۱ محمد مهدی فاتح^۲

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

hamidhooshmand85@gmail.com

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

mmfateh@shahroodut.ac.ir

چکیده: در این مقاله رویکردی جدید برای کنترل بازوی ربات با مفاصل انعطاف پذیر بر پایه کنترل کننده پیش بین و راهبرد کنترل ولتاژ در حضور اغتشاشات خارجی ارائه شده است. در این رویکرد از یک بازوی مفصل منعطف دو درجه آزادی جهت مدل سازی، طراحی، تحلیل و شبیه سازی استفاده می شود. طراحی کنترل کننده یک بار با فیدبک از تمامی حالات سیستم (کنترل کننده اصلی) و بار دیگر تنها با فیدبک موقعیت موتور (کنترل کننده کاهش یافته) انجام می شود که در این صورت برخی از تجهیزات سخت افزاری حذف خواهد شد. کنترل کننده طراحی شده دارای مزیت های روش کنترل پیش بین و راهبرد کنترل ولتاژ بطور همزمان خواهد بود. لذا قانون کنترل علاوه بر سادگی دارای ساختار مفصل مستقل است. همچنین این رویکرد محدودیت های راهبرد کنترل گشتاور از قبیل: حجم محاسبات بالا، در نظر نگرفتن دینامیک الکتریکی محرکه ها و مشکلات پیاده سازی را برطرف می سازد. ویژگی های برجسته رویکرد پیشنهادی عبارتند از: بهینه سازی برخط سیگنال کنترل ولتاژ، طراحی کنترل کننده پیش بین مبتنی بر راهبرد ولتاژ و کاهش مرتبه کنترل کننده. دیگر مزیت های این رویکرد عبارتند از: سادگی در طراحی و اثبات پایداری، انعطاف پذیری در تنظیم زمان نمونه برداری و افق کنترل پیش بین، لحاظ شدن محدودیت های ورودی و خروجی سیستم در قانون کنترل ولتاژ، دفع اغتشاش خوب و بهبود عملکرد سیستم حلقه بسته. به منظور بررسی عملکرد رویکرد پیشنهادی، تحلیل پایداری سیستم کنترل برای هر دو کنترل کننده اصلی و کاهش یافته براساس روش لیاپانوف انجام شده و شبیه سازی کامپیوتری در مسئله تنظیم و ردیابی سیگنال مرجع همراه با افزایش و کاهش فرکانس آن به منظور بررسی سرعت پاسخگویی و اضافه نمودن اغتشاش خارجی با بکارگیری کنترل کننده اصلی و کاهش یافته انجام خواهد شد. همچنین مزیت ها و محدودیت های رویکرد پیشنهادی به لحاظ سخت افزاری و عملکرد کنترل کننده از طریق مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی ها با مقالات دیگر تحلیل می شود و بدین صورت پایداری سیستم حلقه بسته و عملکرد مناسب آن تضمین می گردد.

واژه های کلیدی: بازوی ربات با مفاصل انعطاف پذیر الکتریکی؛ کنترل مبتنی بر ولتاژ کاهش یافته؛ کنترل پیش بین مدل.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.3.175

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

نام نویسنده مسئول: حمید هوشمند

نشانی نویسنده مسئول: ایران- شاهرود- میدان هفت تیر - دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده مهندسی برق و رباتیک

۱- مقدمه

از آنجا که کنترل مفاصل ربات نیازمند گشتاور بالا است، طبق رابطه توان مکانیکی در موتورهای الکتریکی، باید سرعت موتور را کاهش داد. افزایش گشتاور در موتور، لرزش را در مفصل صلب ربات به همراه دارد. راهکاری که برای کاهش میزان لرزش در سیستم وجود دارد، بکارگیری فنر در سیستم است که از آن به مفصل منعطف یاد می‌شود. اما افزودن فنر، مدل مفصل صلب را تغییر می‌دهد و در نتیجه رابطه بین موقعیت مفصل و موقعیت موتور تناسبی نخواهد بود [۱]. مفصل منعطف ربات حاوی ترم‌های غیرخطی و معادلات تزویج شده هم در مدل سازی و هم در کنترل است. به همین سبب روش‌های مختلفی برای کاهش ارتعاشات و ردیابی مسیر مرجع ارائه شده است. در این تحقیق کنترل کننده پیش بین بر پایه راهبرد ولتاژ برای ردیابی ربات با مفصل منعطف انتخاب شده است. در ادامه مزایا و معایب این کنترل کننده معرفی شده و برخی کارهای انجام شده در این زمینه بررسی می‌شوند.

از مزایای کنترل پیش بین در کنترل بازوی ربات، می‌توان به بهینه‌سازی همراه با در نظر گرفتن قیدهای فیزیکی ورودی و خروجی سیستم ربات مثل میزان جریان و ولتاژ موتورها و حداکثر زاویه دوران مفاصل اشاره کرد. همچنین با در نظر گرفتن انرژی سیگنال کنترلی در تابع هزینه می‌توان مصرف انرژی سیستم را کاهش داد. مسئله دیگر دفع اثر اغتشاش خارجی است. این کار با استفاده از اصل افق محدود^۱ به شیوه موثری انجام می‌شود. سادگی در تعمیم به سیستم‌های چند متغیره و پیاده سازی دیجیتال [۲] و [۳] از دیگر مزایای این کنترل کننده است.

از معایب کنترل پیش بین می‌توان به نیاز این کنترل کننده به مدل دقیقی از فرآیند اشاره کرد. پیچیده شدن حل مسئله بهینه سازی برای سیستم‌های غیرخطی نظیر مفصل منعطف ربات مشکل دیگر این کنترل کننده است. برای رفع این مشکل از روش‌های خطی‌سازی سیستم مثل روش لاگرانژ یا روش‌هایی مثل خطی سازی فیدبک^۲ استفاده شده است. در بسیاری از مقالات، موضوع کنترل پیش بین بازوی ربات با مفاصل منعطف مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور ارائه شده است. همانند [۴] که روش کنترل پیش بین غیرخطی با استفاده از موقعیت موتور و مفصل و سیگنال کنترل گشتاور، روی ربات با یک مفصل منعطف بررسی کرده است. در این گونه تحقیقات با استفاده از روش کنترل پیش بین، قانون کنترل گشتاور طراحی شده و مسئله ردگیری موقعیت مطلوب بازوی ربات با مفاصل منعطف صورت می‌گیرد. [۵] رویکردی جدید مبتنی بر گشتاور محاسبه شده به منظور کنترل بازوی ربات ارائه می‌دهد که در آن به دلیل تخمین گشتاور مبتنی بر مدل سازی خطی پارامتر^۳ LPV چند وجهی نیازی به شناخت دقیق مدل دینامیکی ربات نیست که یکی از مزیت‌های این روش است و جهت تحلیل عملکرد آن، رویکرد پیشنهادی به بازوی

ربات PUMA560 اعمال می‌شود. بیشتر رویکردهای مبتنی بر راهبرد کنترل گشتاور نقاط ضعف و محدودیت‌های فراوانی در طراحی و پیاده سازی قانون کنترل دارد. از جمله آنها می‌توان به: حجم محاسبات بالا در کنترل کننده به دلیل پیچیدگی دینامیک ربات، مشکلات پیاده سازی کنترل کننده و عدم لحاظ کردن دینامیک عملگرهای الکتریکی مفاصل در طراحی اشاره کرد. همچنین محدودیت مهم دیگر عدم اعمال مستقیم سیگنال کنترل گشتاور به عملگرهای مفاصل ربات است [۶]. راهبرد کنترل ولتاژ^۴ برای اولین بار در کنترل بازوی ربات با عملگرهای الکتریکی [۷] ارائه گردید که در آن از بخش الکتریکی عملگرها در طراحی قانون کنترل استفاده می‌شود و مزیت‌هایی چون دقت و سرعت پاسخگویی بالا، حجم محاسبات پایین و اعمال مستقیم سیگنال کنترلی به عملگرها را داراست. در [۸] روش کنترل PID با استفاده از موقعیت موتور و مفصل بر روی ربات با یک مفصل منعطف هم به صورت شبیه سازی روی مدل خطی ربات و هم به صورت آزمایشگاهی پیاده سازی شده است. در [۹] روش کنترل PID غیرخطی با استفاده از موقعیت موتور و مفصل و سیگنال کنترل ولتاژ شبیه سازی و به صورت آزمایشگاهی پیاده سازی شده است.

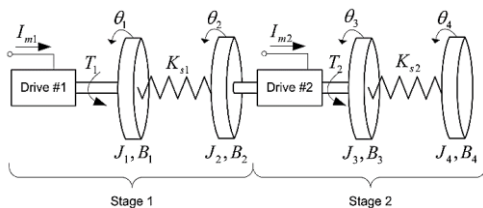
در [۱۰] روش کنترل مقاوم با استفاده از موقعیت موتور و مفصل و جریان الکتریکی موتور روی سیستم با سه مفصل منعطف شبیه سازی شده است. در [۱۱] روش کنترل غیرخطی با فیدبک از موقعیت موتور و مفصل و جریان الکتریکی موتور روی سیستم با سه مفصل منعطف شبیه سازی شده است. [۱۲] برای اولین بار کنترل کننده فازی نوع-۲ غیرمستقیم مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ جهت پیاده سازی روی بازوی ربات هنرمند با مفاصل منعطف ارائه می‌دهد و کارایی و عملکرد خوب آن را بررسی می‌کند.

حال با توجه به مزایای فراوان روش کنترل پیش بین مدل و راهبرد کنترل ولتاژ در کنترل بازوی ربات با مفاصل منعطف و عملگرهای الکتریکی، استفاده از آنها رویکردی کارآمد و موثر خواهد بود. بدین منظور در تحقیق حاضر رویکردی جدید با تکیه بر روش کنترل پیش بین مدل مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ ارائه می‌گردد. که ویژگی‌هایی از قبیل: بهینه سازی برخط سیگنال کنترل ولتاژ، حذف بعضی مسیرهای فیدبک به سمت کنترل کننده، انعطاف و متغیر بودن افق کنترل پیش بین، نقش داشتن بخش الکتریکی عملگرها در قانون کنترل و لحاظ نمودن محدودیت سیگنال کنترل ولتاژ در مسئله بهینه سازی را در کنترل کننده فراهم می‌سازد. در [۱۳] روش کنترل پیش بین صریح^۵ با استفاده از موقعیت موتور و مفصل، روی ربات با یک مفصل منعطف هم به صورت شبیه سازی روی سیستم خطی شده حول نقطه کار و هم به صورت آزمایشگاهی پیاده سازی شده است. در سالهای اخیر توجه زیادی به کاهش مرتبه سیستمها بویژه سیستم‌های غیر خطی شده است که دلیل آن کاهش هزینه‌های کنترلی و تجهیزات سخت افزاری است. [۱۴] در تنظیم پارامترهای سیستم تحریک با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده روشی جدید ارائه می‌

مسئله ارائه شده است. در بخش چهارم مسئله پایداری کنترل کننده پیش بین بررسی شده است. بخش پنجم به نحوه کاهش مرتبه کنترل-کننده اختصاص دارد. در بخش ۶ با انجام شبیه‌سازی، مسئله تنظیم^۷، ردیابی^۸، تاثیر افزایش فرکانس سیگنال در ردیابی و اثر اغتشاشات خارجی روی سیستم تحت کنترل هم با کنترل کننده اصلی و هم با کنترل کننده کاهش یافته بررسی می‌شود. بخش ۷ نیز به مقایسه عملکرد رویکرد پیشنهادی و مزایا و معایب آن نسبت به روش‌های دیگر پرداخته و در نهایت فصل ۸ به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

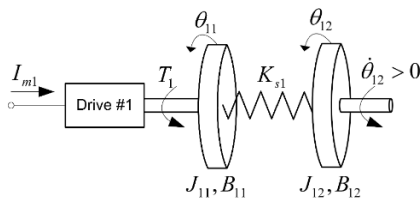
۲- مدل‌سازی

در این بخش، مدل‌سازی سیستم مفصل منعطف ربات با دو درجه آزادی ارائه می‌شود. مدل ارائه شده مربوط به سیستم مفصل منعطف با دو درجه آزادی QUANSER است [۱۶] که در [۱۷]-[۲۳] به عنوان یک نمونه عملی استفاده و بررسی شده است. لازم به توضیح است سازنده سیستم این مدل واقعی را ارائه داده و ضرایب و پارامترهای مورد نیاز را جهت لحاظ کردن اثرات غیر خطی نظیر شتاب گریز از مرکز، نیروی کریولیس، اصطکاک مفاصل و ... در مدل خطی سیستم به درستی محاسبه کرده تا کمترین اختلاف عملکردی را با مدل غیرخطی داشته باشد. در این سیستم، هر مفصل به طور جداگانه کنترل می‌شود. مدل سیستم مفصل منعطف ربات در شکل نشان داده شده است.



شکل (۱): بازوی ربات با دو مفصل منعطف و مدل ارائه شده آن

که در آن K_{s1} و K_{s2} به ترتیب ضرایب سفتی فنر مفاصل اول و دوم، I_{m1} و I_{m2} جریان الکتریکی موتورهای اول و دوم و T_1 و T_2 گشتاور موتورهای اول و دوم است. J_i ممان اینرسی و B_i ($i=1,2,3,4$) ضرایب میرایی ویسکوز هستند. این مدل به دو قسمت مجزای مستقل قابل تفکیک است. مدل قسمت اول این سیستم در شکل نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل بخش اول

که در آن θ_{11} و θ_{12} به ترتیب موقعیت موتور و مفصل اول و θ_{11} و θ_{12} به ترتیب سرعت موتور و مفصل اول هستند. در جدول پارامترهای بکار رفته در این سیستم به همراه مقدار و واحد آن ارائه شده است [۱۶].

دهد. این روش در دو گام پیاده سازی می‌شود که گام نخست آن به کاهش مرتبه سیستم با تکیه بر انتشار خطا و مبتنی بر مفهوم مرکز ثقل سیستم در مکانیک می‌پردازد. کاهش مرتبه در سیستم‌های غیرخطی از جمله بازوی ربات به دو شکل اجرا می‌شود: نخست کاهش مرتبه مدل دینامیکی ربات و دوم کاهش مرتبه کنترل کننده. استفاده از روش اختلال منفرد در کنترل بازوی ربات با مفاصل منعطف مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ یکی از روش‌های کاهش مرتبه مدل دینامیکی است که در [۱۵] به تفصیل به آن پرداخته شده است. در این رویکرد سیستم بازوی ربات به سه زیرسیستم سریع، متوسط و کند تقسیم شده و هر یک از زیرسیستم‌ها بطور جداگانه کنترل می‌شوند. و در نهایت از ترکیب سه کنترل کننده سیگنال کنترل ولتاژ جهت اعمال به عملگرهای الکتریکی ربات ساخته می‌شود.

در این مقاله مسئله کنترل بازوی ربات با عملگرهای الکتریکی و مفاصل منعطف بر اساس روش کنترل پیش بین مدل و راهبرد کنترل ولتاژ با دو رویکرد کنترل کننده اصلی و کاهش یافته مطالعه و پیاده سازی نرم افزاری می‌گردد. کنترل کننده اصلی با فیدبک از تمامی حالات سیستم و کنترل کننده کاهش یافته "تنها با فیدبک از موقعیت موتور مفاصل طراحی می‌شوند که در رویکرد دوم بسیاری از تجهیزات سخت افزاری حذف خواهد شد. اگر بخواهیم مزیت‌های اصلی و برجسته تحقیق حاضر را نام ببریم می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- مسأله کنترل پیش بین مدل با راهبرد کنترل ولتاژ با انتخاب افق کنترل متغیر، لحاظ نمودن محدودیت سیگنال کنترل ولتاژ در مسئله بهینه سازی و بهینه سازی برخط سیگنال کنترل ولتاژ به منظور کنترل بازوی ربات با عملگرهای الکتریکی و مفاصل منعطف طراحی و پیاده سازی نرم افزاری شده است.

- مدل الکتریکی عملگرهای مفاصل منعطف بازوی ربات برای کنترل مستقل مفاصل و محاسبه سیگنال کنترل ولتاژ بهینه استفاده می‌شود.

- برخی مسیرهای فیدبک جهت محاسبه حالت‌های سیستم حذف می‌گردد این امر باعث کاهش جملات حاضر در مسأله بهینه سازی و کاهش حجم محاسبات بهینه سازی خواهد شد. همچنین در این رویکرد علاوه بر پایداری حالت‌های سیستم، باقی ماندن سیگنال کنترل و حالت‌های سیستم در محدوده قابل تحمل بدون استفاده از محدود کننده^۹ تضمین می‌شود. اهمیت این روش در هنگام پیاده سازی سخت افزاری نمود پیدا می‌کند. به عنوان مثال محدود ماندن جریان الکتریکی موتورها به عنوان یکی از حالت‌های سیستم تضمین شده و موجب جلوگیری از افزایش بیش از حد جریان کشی و در نهایت سوختن سیم پیچ موتور می‌شود.

در ادامه مقاله بدین صورت دنبال می‌شود. در بخش دوم مدل خطی ربات با دو مفصل منعطف ارائه می‌شود. برای مدل ارائه شده در بخش سوم قانون کنترل پیش بین با در نظر گرفتن محدودیت‌های

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}_i}L\right)\right) - \left(\frac{\partial}{\partial q_i}L\right) = Q_i ; i = 1, \dots, N \quad (10)$$

نوشت که در آن Q_i برآیند نیروهای خارجی وارد شده، q_1, \dots, q_N مختصات مستقل توصیف کننده سیستم و L لاگرانژین است و به صورت

$$L = T - U \quad (11)$$

است که در آن T و U به ترتیب مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم هستند. با قرار دادن روابط مربوط به مفصل منعطف اول در معادلات اولر- لاگرانژ بدست می آید

$$J_{11}\ddot{\theta}_{11} - K_{s1}\theta_{12} + K_{s1}\theta_{11} = K_{t1}I_{m1} - B_{11}\dot{\theta}_{11} \quad (12)$$

$$J_{12}\ddot{\theta}_{12} + K_{s1}\theta_{12} - K_{s1}\theta_{11} = -B_{12}\dot{\theta}_{12} \quad (13)$$

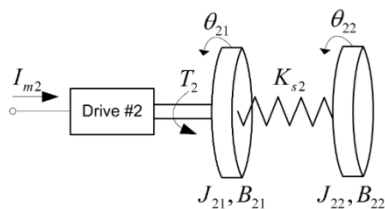
از طرف دیگر معادله الکتریکی موتور اول به صورت

$$V_1 = R_1 I_{m1} + L_1 \dot{I}_{m1} + K_{b1} \dot{\theta}_{11} \quad (14)$$

توصیف می شود. معادلات فوق را می توان به فرم فضای حالت

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \ddot{\theta}_{11} \\ \ddot{\theta}_{12} \\ \dot{I}_{m1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_{s1}}{J_{11}} & \frac{K_{s1}}{J_{11}} & -\frac{B_{11}}{J_{11}} & 0 & \frac{K_{t1}}{J_{11}} \\ \frac{K_{s1}}{J_{12}} & -\frac{K_{s1}}{J_{12}} & 0 & -\frac{B_{12}}{J_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_{b1}}{L_1} & 0 & -\frac{R_1}{L_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{12} \\ \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ I_{m1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{L_1} \end{bmatrix} V_1 \quad (15)$$

نوشت. به طور مشابه، شماتیک قسمت دوم سیستم، در شکل نشان داده شده است.



شکل (۳): مدل بخش دوم سیستم

که در آن θ_{21} و θ_{22} به ترتیب موقعیت موتور و مفصل دوم و $\dot{\theta}_{21}$ و $\dot{\theta}_{22}$ به ترتیب سرعت موتور و مفصل دوم هستند. در جدول نمادهای بخش دوم سیستم ارائه شده است.

جدول (۱): پارامترهای بخش اول سیستم [۱۶]

پارامترهای بخش اول سیستم	مقدار
ضریب گشتاور موتور اول	$K_{t1} = 0.119 \text{ N.m/A}$
ضریب ولتاژ ضد محرکه موتور اول	$K_{b1} = 0.119 \text{ V.s/rad}$
بیشترین جریان موتور اول	$I_{m1} = 0.944 \text{ A}$
بیشترین ولتاژ موتور اول	$V_{max1} = 28 \text{ V}$
مقاومت آرمیچر موتور اول	$R_1 = 11.5 \Omega$
اندوکتانس آرمیچر موتور اول	$L_1 = 3.16 \text{ mH}$
ممان اینرسی مفصل اول	$J_{11} = 6.28 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$
ممان اینرسی محرک نهایی اول	$J_{12} = 0.17043 \text{ kg.m}^2$
ضریب دمپینگ ویسکوز مفصل اول	$B_{11} = 4 \text{ N.m.s/rad}$
ضریب دمپینگ ویسکوز محرک نهایی اول	$B_{12} = 0 \text{ N.m.s/rad}$
ضریب سفتی انحراف مفصل منعطف اول	$K_{s1} = 565 \text{ N.m/rad}$

به منظور مدل سازی سیستم از روش اولر- لاگرانژ استفاده می شود. برای محاسبه لاگرانژین سیستم باید مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل آن را محاسبه کرد. انرژی پتانسیل کل (V_T) به صورت مجموع انرژی پتانسیل گرانشی (V_g) و انرژی پتانسیل الاستیکی (V_e) است.

$$V_T = V_g + V_e \quad (1)$$

که در آن انرژی پتانسیل گرانشی به علت عدم جابجایی در راستای عمودی صفر است. همچنین انرژی پتانسیل الاستیکی به صورت

$$V_T = V_e = \frac{1}{2} K_{s1} (\theta_{12} - \theta_{11})^2 \quad (2)$$

است. از طرفی انرژی جنبشی کل را می توان به صورت مجموع انرژی جنبشی دورانی موتور اول (T_{r11}) و انرژی جنبشی دورانی مفصل منعطف متصل به آن (T_{r12}) نوشت.

$$T_T = T_{r11} + T_{r12} \quad (3)$$

که در آن انرژی جنبشی موتور اول به صورت

$$T_{r11} = \frac{1}{2} J_{11} \left(\frac{d}{dt} \theta_{11}\right)^2 \quad (4)$$

بوده و انرژی جنبشی مفصل منعطف اول نیز به صورت

$$T_{r12} = \frac{1}{2} J_{12} \left(\frac{d}{dt} \theta_{12}\right)^2 \quad (5)$$

است. نیروی وارد شده مجموع نیروهای موتور (Q_1) و مفصل منعطف متصل به آن (Q_2) است.

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (6)$$

برآیند نیروهای موتور به صورت

$$Q_1 = T_1 - B_{11} \left(\frac{d}{dt} \theta_{11}\right) \quad (7)$$

است که در آن گشتاور موتور اول را می توان به صورت

$$T_1 = K_{t1} I_{m1} \quad (8)$$

نوشت. همچنین برآیند نیروهای مفصل منعطف نیز به صورت

$$Q_2 = -B_{12} \left(\frac{d}{dt} \theta_{12}\right) \quad (9)$$

است. برای سیستمی با N درجه آزادی، معادلات اولر- لاگرانژ را می توان به صورت

جدول (۲): مقادیر پارامترهای بخش دوم سیستم [۱۶]

مقدار	پارامترهای بخش اول سیستم
$K_{t2} = 0.0234 \text{ N.m/A}$	ضریب گشتاور موتور دوم
$K_{b2} = 0.0234 \text{ V.s/rad}$	ضریب ولتاژ ضد محرکه موتور دوم
$I_{max2} = 1.21 \text{ A}$	بیشترین جریان موتور دوم
$V_{max2} = 28 \text{ V}$	بیشترین ولتاژ موتور دوم
$R_2 = 2.32 \Omega$	مقاومت آرمیچر موتور دوم
$L_2 = 0.24 \text{ mH}$	اندوکتانس آرمیچر موتور دوم
$J_{21} = 1.03\text{E-}6 \text{ kg.m}^2$	ممان اینرسی مفصل دوم
$J_{22} = 0.00643 \text{ kg.m}^2$	ممان اینرسی محرک نهایی دوم
$B_{21} = 1.5 \text{ N.m.s/rad}$	ضریب دمپینگ ویسکوز مفصل دوم
$B_{22} = 0.0856 \text{ N.m.s/rad}$	ضریب دمپینگ ویسکوز محرک نهایی دوم
$K_{s2} = 565 \text{ N.m/rad}$	ضریب سفتی انحراف مفصل منعطف دوم

برای طراحی سیگنال کنترل پیش بین، بردارهای سیگنال کنترل و خروجی به صورت روابط ۲۱ و ۲۲ تعریف می‌شوند. در این رابطه N_c و N_p به ترتیب نشان دهنده افق کنترل کننده و افق پیش بین هستند.

$$\Delta U = [\Delta u_k^T \quad \Delta u_{k+1}^T \quad \dots \quad \Delta u_{k+N_c-1}^T]^T \quad (21)$$

$$Y = [y_{k+1}^T \quad y_{k+2}^T \quad y_{k+3}^T \quad \dots \quad y_{k+N_p}^T]^T \quad (22)$$

بر اساس مدل فضای حالت، خروجی آینده با استفاده از پارامترهای سیگنال کنترل آینده محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= C_d A_d x_k + C_d B_d \Delta u_k \\ y_{k+2} &= C_d A_d^2 x_{k+1} + C_d A_d B_d \Delta u_k + C_d B_d \Delta u_{k+1} \\ y_{k+3} &= C_d A_d^3 x_k + C_d A_d^2 B_d \Delta u_k + C_d A_d B_d \Delta u_{k+1} + C_d B_d \Delta u_{k+2} \\ &\vdots \\ y_{k+N_p} &= C_d A_d^{N_p} x_k + C_d A_d^{N_p-1} B_d \Delta u_k + C_d A_d^{N_p-2} B_d \Delta u_{k+1} + \dots \\ &\quad + C_d A_d^{N_p-N_c} B_d \Delta u_{k+N_c-1} \end{aligned} \quad (23)$$

روابط فوق را می‌توان به صورت ماتریسی

$$F = \begin{bmatrix} C_d A_d \\ C_d A_d^2 \\ C_d A_d^3 \\ \vdots \\ C_d A_d^{N_p} \end{bmatrix}; \quad (24)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} C_d B_d & 0 & 0 & \dots & 0 \\ C_d A_d B_d & C_d B_d & 0 & \dots & 0 \\ C_d A_d^2 B_d & C_d A_d B_d & C_d B_d & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_d A_d^{N_p-1} B_d & C_d A_d^{N_p-2} B_d & C_d A_d^{N_p-3} B_d & \dots & C_d A_d^{N_p-N_c} \end{bmatrix}$$

نوشت. در نهایت روابط فوق به صورت خلاصه شده

$$Y = Fx_k + \Phi \Delta U \quad (25)$$

نوشته می‌شود. برای مجموعه‌ای از سیگنالهای مرجع در زمان نمونه برداری k و در افق پیش بین، تلاش سیگنال کنترل، رساندن خروجی پیش بینی شده سیستم به سیگنال مرجع است. با در نظر گرفتن بردار سیگنال مرجع به صورت

$$R_s^T = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1] r_k \quad (26)$$

تابع هزینه J ، به صورت

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T R \Delta U \quad (27)$$

تعریف می‌شود. در رابطه ۲۷ جمله اول مربوط به کمینه سازی خطا بین خروجی پیش بینی شده و سیگنال مرجع و جمله دوم مربوط به سیگنال کنترلی است. ماتریس قطری R به صورت $R = r_w I_{N_c \times N_c}$ است که r_w پارامتر وزن دهی به سیگنال کنترل است. برای یافتن ΔU بهینه که تابع J را کمینه کند، می‌توان نوشت:

$$J = (R_s - Fx_k)^T (R_s - Fx_k) - \dots + 2\Delta U^T \Phi^T (R_s - Fx_k) + \Delta U^T (\Phi^T \Phi + R) \Delta U \quad (28)$$

با مشتق گیری از رابطه ۲۸ به صورت:

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = -2\Phi^T (R_s - Fx_k) + 2(\Phi^T \Phi + R) \Delta U = 0 \quad (29)$$

با حل رابطه ۲۹، قانون کنترل در پنجره بهینه سازی به صورت رابطه ۳۰ خواهد بود:

مدل سازی هر مفصل به طور جداگانه انجام شده است. بنابراین به طور مشابه معادله فضای حالت توصیف کننده بخش دوم سیستم به صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{21} \\ \dot{\theta}_{22} \\ \ddot{\theta}_{21} \\ \ddot{\theta}_{22} \\ I_{m_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K_{s2}}{J_{21}} & \frac{K_{s2}}{J_{21}} & -\frac{B_{21}}{J_{21}} & 0 & \frac{K_{t2}}{J_{21}} \\ \frac{K_{s2}}{J_{22}} & -\frac{K_{s2}}{J_{22}} & 0 & -\frac{B_{22}}{J_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_{b2}}{L_2} & 0 & -\frac{R_2}{L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{21} \\ \theta_{22} \\ \dot{\theta}_{21} \\ \dot{\theta}_{22} \\ I_{m_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_2} \end{bmatrix} V_2 \quad (16)$$

۳- طراحی کنترل کننده

در سیستمی با معادله فضای حالت به فرم زمان گسسته به صورت

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k, \quad y_k = C_d x_k \quad (17)$$

$$x_{min} < x_k < x_{max}, \quad u_{min} < u_k < u_{max}$$

که در آن A_d ، B_d و C_d گسسته شده ماتریس‌های A ، B و C با زمان نمونه برداری T است. رابطه ۱۷ را می‌توان به صورت

$$x_k = A_d x_{k-1} + B_d u_{k-1} \quad (18)$$

$$y_{k-1} = C_d x_{k-1}$$

نوشت. با تعریف $\Delta x_k = x_k - x_{k-1}$ و $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ و

تفاضل گیری بین دو رابطه ۱۷ و ۱۸

$$\Delta x_{k+1} = A_d \Delta x_k + B_d \Delta u_k \quad (19)$$

برای ارتباط دادن خروجی به متغیر حالت Δx_k می‌توان نوشت

$$\Delta y_{k+1} = C_d \Delta x_{k+1} = C_d A_d \Delta x_k + C_d B_d \Delta u_k \quad (20)$$

۴- تحلیل پایداری

در این بخش، پایداری سیستم حلقه بسته با در نظر گرفتن دو فرض بررسی می‌شود.

فرض ۲ [۲۴]: $e_{k+N_p} = 0$

فرض ۳: در هر بازه نمونه برداری k مینیمم تابع هزینه J وجود دارد. نکته مهم در اثبات پایداری، یافتن یک تابع لیاپانوف برای سیستم کنترل پیش بین است. تابع لیاپانوف $V(e_k)$ به عنوان مینیمم تابع هزینه J_{min} در نظر گرفته می‌شود:

$$V(e_k) = \sum_{m=1}^{N_p} e_{k+m}^T Q e_{k+m} + \sum_{m=0}^{N_c-1} \Delta u_{k+m}^T R \Delta u_{k+m} \quad (37)$$

که در آن Q و R ماتریس‌های مثبت معین وزن دهی به سیگنال خطا و سیگنال کنترل است. ملاحظه می‌شود که $V(e_k)$ مثبت معین است.

به طور مشابه در زمان $k+1$ تابع لیاپانوف به صورت

$$\begin{aligned} V(e_{k+1}) &= \sum_{m=1}^{N_p} e_{k+1+m}^T Q e_{k+1+m} \\ &+ \sum_{m=0}^{N_c-1} \Delta u_{k+1+m}^T R \Delta u_{k+1+m} \end{aligned} \quad (38)$$

در می‌آید. در اینجا لازم است تا یک ارتباط میان تابع لیاپانوف در زمان نمونه برداری $k+1$ و k یافت شود. از طرفی e_{k+1} پاسخ یک گام جلوتر e_k است که طبق

$$e_{k+1} = A e_k + B u_k \quad (39)$$

به هم مرتبط می‌شوند. بنابراین تفاضل میان $V(e_{k+1})$ و $V(e_k)$ را می‌توان به صورت

$$\begin{aligned} V(e_{k+1}) - V(e_k) &= e_{k+1+N_p}^T Q e_{k+1+N_p} \\ &- e_{k+1}^T Q e_{k+1} \\ &+ \Delta u_{k+N_c}^T R \Delta u_{k+N_c} - \Delta u_k^T R \Delta u_k \end{aligned} \quad (40)$$

نشان داد. حال با در نظر گرفتن فرض $e_{k+N_p} = 0$ سیگنال کنترل $\Delta u_{k+N_c}^T R \Delta u_{k+N_c} = 0$ خواهد بود. از دیگر سو با مثبت معین بودن

ماتریس‌های Q و R

$$V(e_{k+1}) - V(e_k) = -e_{k+1}^T Q e_{k+1} - \Delta u_k^T R \Delta u_k < 0 \quad (41)$$

مقدار تفاضل بدست آمده منفی خواهد بود. در نتیجه سیستم حلقه بسته پایدار مجانبی است. در ذیل پاسخ فرکانسی موقعیت موتور و مفصل (به عنوان مثال مفصل دوم) در حالت‌های با کاهش مرتبه و بدون کاهش مرتبه ارائه می‌شود [۱۶]. با توجه به تطابق پاسخ فرکانسی در دو حالت در فرکانس‌های پایین و اثبات پایداری در سیستم بدون کاهش مرتبه می‌توان نتیجه گرفت که در صورت انتخاب فرکانس ورودی مرجع در محدوده $0/1$ هرتز، کاهش مرتبه سیستم کنترل بدون تغییر در پایداری و خروجی سیستم همراه خواهد بود.

$$\Delta U = (\Phi^T \Phi + R)^{-1} \Phi^T (R_s - F x(k)) \quad (30)$$

فرض ۱: در رابطه ۳۰ ماتریس همبند $(\Phi^T \Phi + R)^{-1}$ وجود دارد.

برای اعمال محدودیت روی سیگنال کنترل ابتدا بردار U حاوی N_c عنصر، به صورت

$$U = \begin{bmatrix} u_k \\ u_{k+1} \\ u_{k+2} \\ \vdots \\ u_{k+N_c-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} u_{k-1} + \dots \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+N_c-1} \end{bmatrix}$$

نوشته می‌شود. رابطه ۳۱ با در نظر گرفتن محدودیت سیگنال کنترل به صورت

$$\begin{aligned} -(C_1 u(k-1) + C_2 \Delta U) &\leq -U^{min} \\ (C_1 u(k-1) + C_2 \Delta U) &\leq U^{max} \end{aligned} \quad (32)$$

نوشته می‌شود. با در نظر گرفتن محدودیت ورودی، محدودیت خروجی را نیز می‌توان به صورت

$$Y^{min} \leq F x_k + \Phi \Delta U \leq Y^{max} \quad (33)$$

نوشته. در نهایت مسئله کنترل پیش بین در حضور محدودیت‌ها به صورت

$$\begin{aligned} J &= (R_s - F x_k)^T (R_s - F x_k) - \dots \\ &2 \Delta U^T \Phi^T (R_s - F x_k) + \Delta U^T (\Phi^T \Phi + \bar{R}) \Delta U \\ \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \Delta U &\leq \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (34)$$

خواهد بود که در آن

$$\begin{aligned} M_1 &= \begin{bmatrix} -C_2 \\ C_2 \end{bmatrix}, \quad M_2 = \begin{bmatrix} -I \\ I \end{bmatrix}, \quad M_3 = \begin{bmatrix} -\Phi \\ \Phi \end{bmatrix} \\ N_1 &= \begin{bmatrix} -U^{min} + C_1 u(k-1) \\ U^{max} - C_1 u(k-1) \end{bmatrix}, \quad N_2 = \begin{bmatrix} -\Delta U^{min} \\ \Delta U^{max} \end{bmatrix}, \\ N_3 &= \begin{bmatrix} -Y^{min} + F x_k \\ Y^{max} - F x_k \end{bmatrix} \end{aligned}$$

است. رابطه فوق را می‌توان به فرم بسته زیر نوشت.

$$\begin{aligned} u_k &= \min_{\substack{u_k \in [u_{min}, u_{max}] \\ y_k \in [y_{min}, y_{max}]}} J \\ &= \sum_{m=1}^{N_p} e_{k+m}^T Q e_{k+m} + \sum_{m=0}^{N_c-1} \Delta u_{k+m}^T R \Delta u_{k+m} \end{aligned} \quad (35)$$

که در آن Q و R به ترتیب ماتریس‌های وزن خطای ردیابی و تلاش کنترلی است. خطای ردیابی به صورت

$$e_k = R_s - F x_k \quad (36)$$

تعریف می‌شود که تفاضل بین بردار حالت شامل موقعیت و سرعت موتور و مفصل و جریان الکتریکی موتور در حالت مطلوب و مقدار موجود خواهد بود.

کنترل کننده پیش بین شرکت دارند، کاسته می شود. به عبارتی متغیرهای حالت مسیر فیدبک به صورت

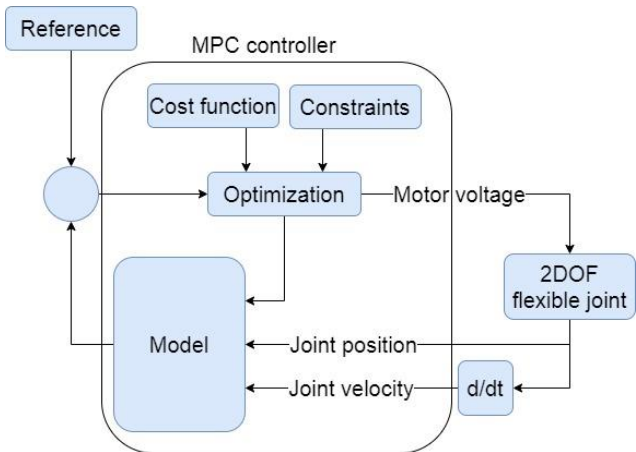
$$\begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \dot{\theta}_{11} & \dot{\theta}_{12} & I_{m_1} \end{bmatrix}^T \rightarrow [\theta_{11} \ 0 \ \dot{\theta}_{11} \ 0 \ 0]^T \quad (42)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{21} & \theta_{22} & \dot{\theta}_{21} & \dot{\theta}_{22} & I_{m_2} \end{bmatrix}^T \rightarrow [\theta_{21} \ 0 \ \dot{\theta}_{21} \ 0 \ 0]^T$$

خواهد شد. بلوک دیاگرام سیستم کنترل در شکل ۴ نشان داده شده است. با در نظر گرفتن فرض زیر امکان محاسبه سیگنال سرعت از روی موقعیت روتور بدون نیاز به سنسور سرعت فراهم خواهد شد. فرض ۴: مشتق سیگنال موقعیت موتور موجود و محدود است و بنابراین می توان سرعت موتور را بدون نیاز به سنسور سرعت و تنها با مشتق گیری از موقعیت موتور بدست آورد.

$$\begin{cases} |\dot{\theta}_{11}| < \mu_1 \\ |\dot{\theta}_{21}| < \mu_2 \end{cases} \quad (43)$$

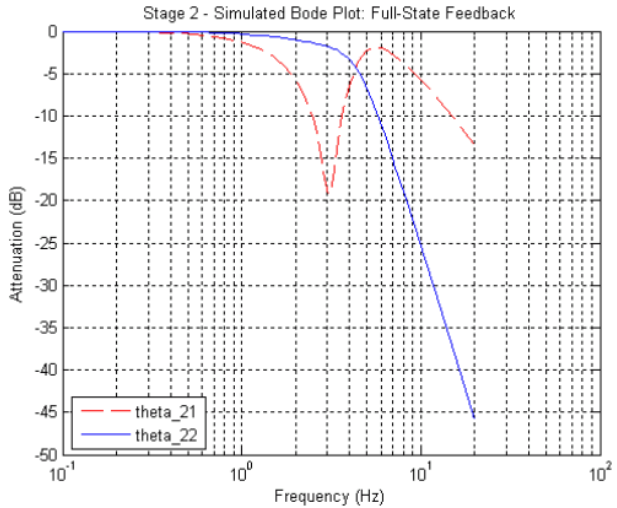
در شکل ۴ بلوک دیاگرام سیستم تحت کنترل در حالت کاهش مرتبه ترسیم شده است.



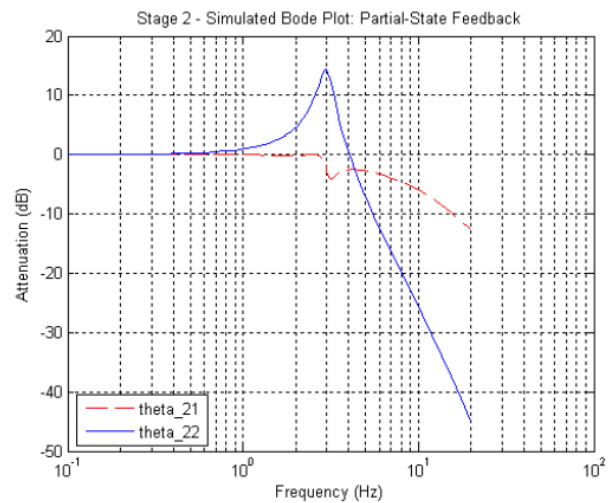
شکل (۵): بلوک دیاگرام سیستم کنترل در حالت کاهش مرتبه

۶- شبیه سازی کامپیوتری

در این قسمت شبیه سازی سیستم رباتیک ارائه شده است. شبیه سازی ها به ترتیب پاسخ پله سیستم، پاسخ به ورودی قطار پالس، پاسخ به ورودی سینوسی، پاسخ به ورودی سینوسی با فرکانس بالاتر و پاسخ به سیگنال های اغتشاش در دو شکل تصادفی و فرکانس متغیر خواهد بود. به منظور کاهش محاسبات بهینه سازی به ازای هر مفصل یک کنترل کننده ساده شده با فیدبک از موقعیت موتور استفاده شده است. در شبیه سازی ها $T = 10 \text{ ms}$ ، $N_p = 30$ و $|V_{1,2}| < 28 \text{ V}$ ثابت در نظر گرفته شده است. در هر شبیه سازی موقعیت مفاصل، تلاش کنترلی، جریان الکتریکی موتورها و خطای ردگیری در دو حالت کنترل کننده اصلی و کاهش یافته ترسیم شده است. لازم به ذکر است که در هر یک از شبیه سازی ها، نمودارهای مربوط به خطای ردیابی و ولتاژ موتورها به دلیل اینکه در تحلیل عملکرد سیستم کنترل، تضمین پایداری، میزان تلاش کنترلی، سرعت پاسخگویی و ردیابی و مصرف



شکل (۳): منحنی پاسخ فرکانسی در حالت بدون کاهش مرتبه



شکل (۴): منحنی پاسخ فرکانسی در حالت با کاهش مرتبه

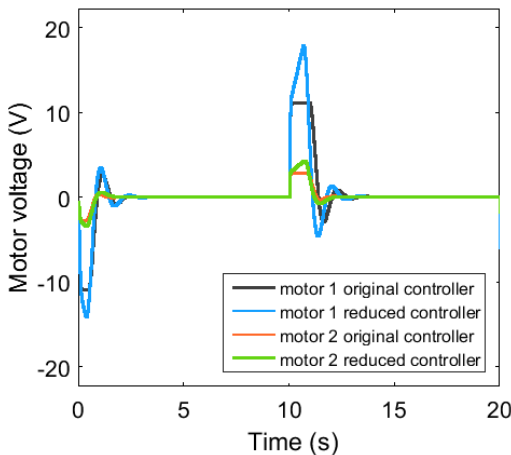
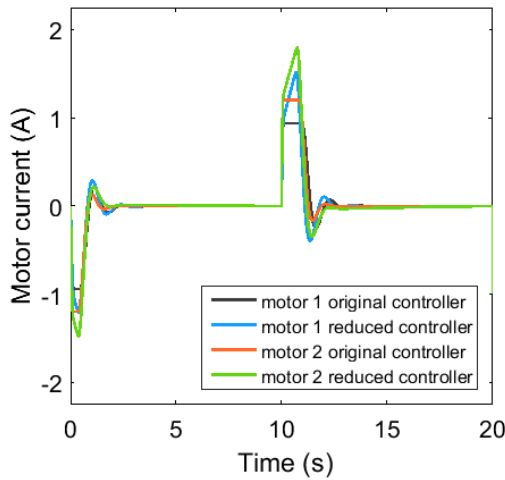
۵- کاهش مرتبه کنترل کننده

به منظور افزایش سرعت محاسبات الگوریتم بهینه سازی لازم است تا به نحوی از حجم محاسباتی که در کنترل کننده انجام می شود، کاسته شود. یک روش، کاستن مرتبه سیستم تحت کنترل است. کاهش مرتبه می تواند به دو روش انجام شود. روش اول کاهش مرتبه مدل تعریف شده برای سیستم است. در این روش حالت هایی که انرژی بیشتری در دینامیک سیستم دارند، باقی مانده و مابقی حالات حذف می شوند. برای این روش، الگوریتم های نظیر Proper Orthogonal Decomposition و Balance Truncation پیشنهاد شده که ممکن است پایداری سیستم را تحت تاثیر قرار دهند [۲۵] و [۲۶].

روش دوم ثابت ماندن مدل سیستم و کاهش تعداد فیدبک های گرفته شده از خروجی سیستم است. در این روش متغیرهای حالت سیستم دخیل در قانون کنترل، کاهش می یابند. در این مقاله برای کاهش مرتبه، از روش دوم استفاده شده است. به همین منظور در مدل ارائه شده، از موقعیت موتور در محاسبه قانون کنترل استفاده می شود. با این کار از تعداد ترم هایی که در مسئله بهینه سازی تابع هزینه

۶-۲- شبیه‌سازی دوم

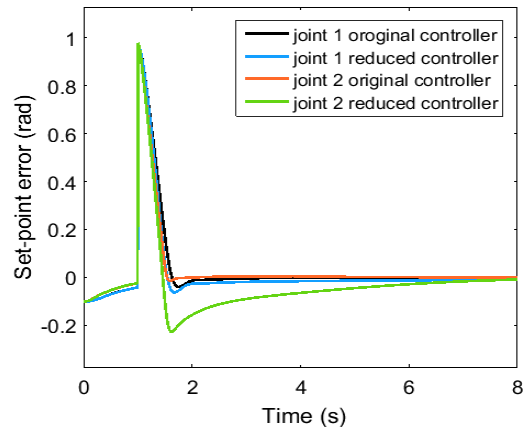
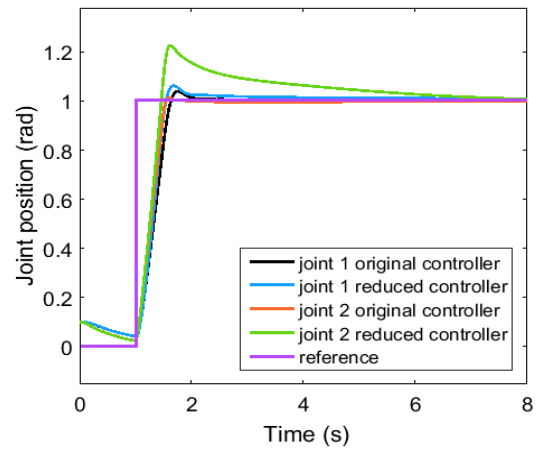
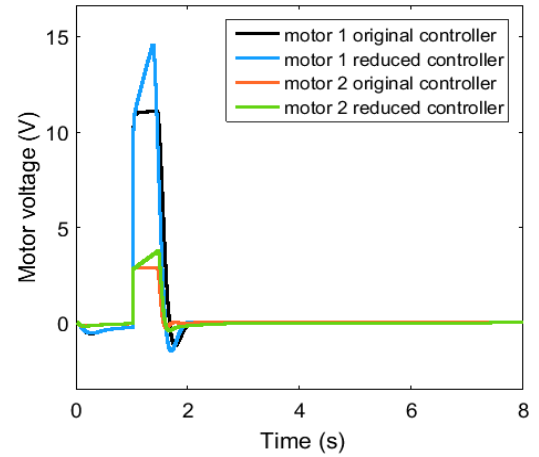
در این شبیه‌سازی مسئله ردیابی بررسی می‌شود. به همین منظور ورودی قطار پالس با فرکانس ۰/۰۵ هرتز به سیستم اعمال می‌شود. محدودیت ولتاژ و جریان الکتریکی موتورها در قانون کنترل اعمال شده است. همچنین مقدار اولیه موقعیت مفاصل ۰/۱ رادیان در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۷ نشان داده شده است. رسیدن به مقدار مطلوب بدون خطای ماندگار هم در حالت کنترل کننده اصلی و هم در کنترل کننده کاهش یافته در شکل دیده می‌شود با این تفاوت که زمان نشست^۱ در حالت کنترل کننده اصلی حدود ۳ ثانیه و در کنترل کننده کاهش یافته حدود ۶ ثانیه است. همچنین مشاهده می‌شود که در حالت کاهش یافته میزان فراجزش برای رسیدن به مقدار مطلوب نسبت به کنترل کننده اصلی بیشتر است. به عنوان مثال مفاصل اول و دوم در حالت کاهش یافته به ترتیب فراجزش ۲۵٪ و ۵۰٪ را تجربه می‌کند. در موتور اول میزان جریان کشی تا ۱/۵ آمپر و در موتور دوم به ۱/۷ آمپر رسیده است. از آنجا که جریان و ولتاژ موتور الکتریکی طبق رابطه ۱۴ به یکدیگر مرتبط اند، با محدود شدن جریان الکتریکی، سیگنال کنترل ولتاژ نیز در حالت کنترل کننده اصلی محدود و داخل بازه مجاز مانده است. همچنین سیگنال کنترل ولتاژ در کنترل کننده کاهش یافته نیز در محدوده مجاز قرار دارد.



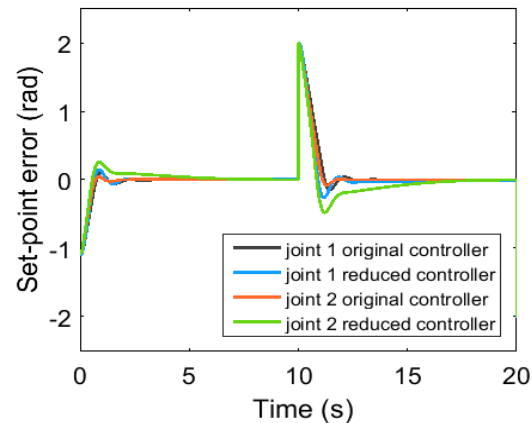
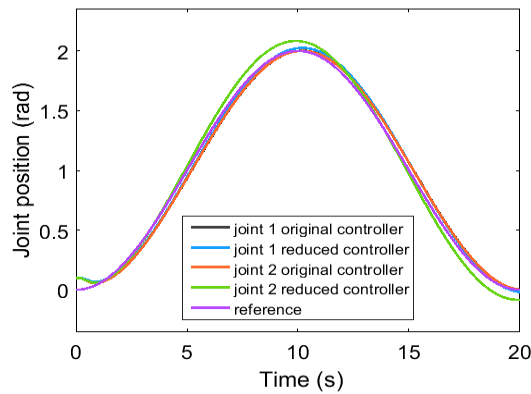
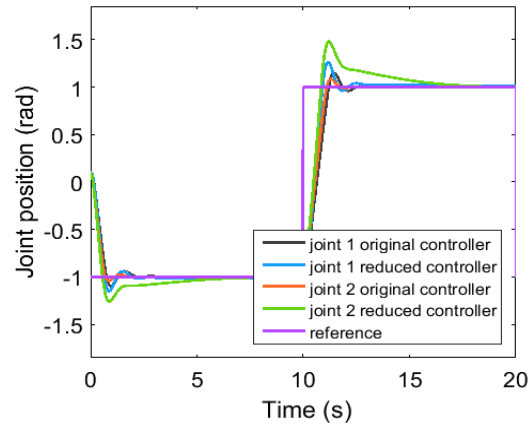
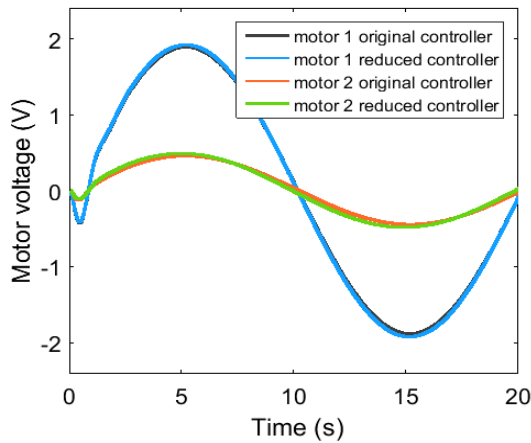
انرژی بسیار کارا و تأثیرگذار هستند، بایستی بیشتر مورد توجه و تحلیل قرار گیرند.

۶-۱- شبیه‌سازی اول

در این شبیه‌سازی پاسخ پله سیستم ترسیم شده است. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در هر دو حالت بدون کاهش مرتبه و با کاهش مرتبه، خطای حالت ماندگار به صفر رسیده است. سیگنال کنترل نیز هم در حالت بدون کاهش و هم در حالت با کاهش مرتبه در محدوده مجاز خود قرار دارد.



شکل (۶): پاسخ پله سیستم شامل ولتاژ ورودی موتور، موقعیت مفصل و خطای تنظیم شبیه‌سازی اول



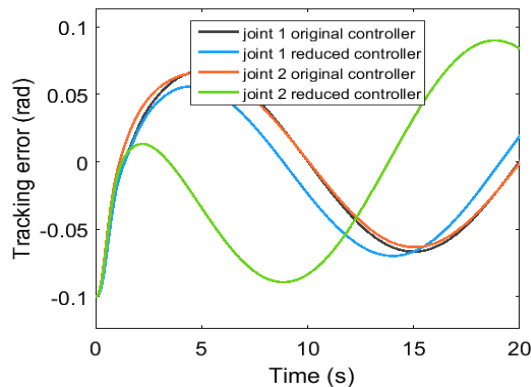
شکل (۷): پاسخ سیستم به قطار پالس با فرکانس ۰/۰۵ هرتز شامل ولتاژ ورودی موتور، موقعیت مفصل و خطای تنظیم شبیه سازی دوم

۳-۶- شبیه سازی سوم

در این شبیه سازی مسئله ردیابی با استفاده از سیگنال سینوسی بررسی می شود. سیگنال مرجع به صورت

$$R_s = 1 - \cos(\pi t/10) \quad (44)$$

خواهد بود. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. بیشترین مقدار خطای در حالت های کنترل کننده اصلی و کاهش یافته حدود ۰/۰۵ رادیان است. ماکزیمم اندازه خطای ماندگار مفاصل اول و دوم در حالت کنترل کننده اصلی حدود ۰/۰۶ رادیان و در کنترل کننده کاهش یافته به ترتیب ۰/۰۶ و ۰/۰۸ برای مفاصل اول و دوم است. فاز منحنی خطا در حالت کنترل کننده کاهش یافته برای مفاصل اول و دوم به ترتیب اختلاف حدودا ۹ و ۶۳ درجه ای را نسبت به کنترل کننده اصلی نشان می دهد. ولتاژ موتورهای اول و دوم در کنترل کننده اصلی کاهش یافته به یکدیگر نزدیک و برای مفاصل اول و دوم به ترتیب ۱/۸ و ۰/۴۸ ولت را نشان می دهد که این مقدار از میزان ولتاژ مجاز موتورها کمتر است. یکی از علل کاهش ولتاژ موتورها، ناشی از نوع سیگنال اعمالی بوده و هر چه تغییرات سیگنال ورودی بیشتر باشد، میزان ولتاژ موتورها بیشتر می شود.



شکل (۸): پاسخ سیستم به ورودی سینوسی با فرکانس ۰/۰۵ شامل ولتاژ ورودی موتور، موقعیت مفصل و خطای ردگیری شبیه سازی سوم

۴-۶- شبیه سازی چهارم

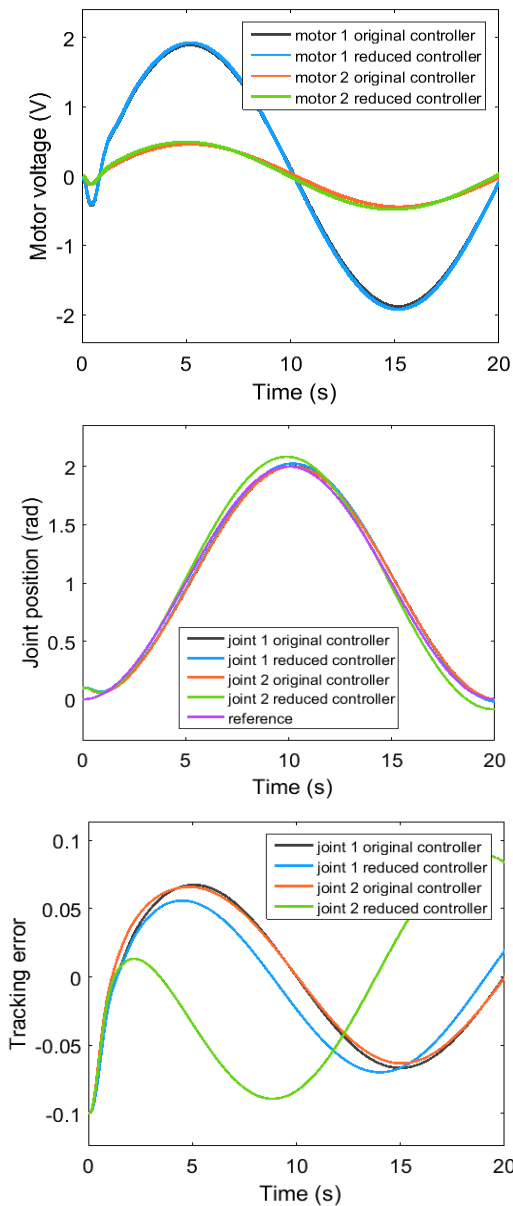
در این شبیه سازی مسئله ردیابی مسیر مرجع با فرکانس بیشتر بررسی می شود. به همین منظور فرکانس مسیر مرجع ۲ برابر می شود. مقدار اولیه موقعیت مفصل ۰/۱ رادیان است. نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است. در این حالت مشاهده می شود که با دو برابر شدن فرکانس سیگنال ورودی، خطای ردیابی، ولتاژ و جریان موتورها حدودا ۲ برابر می شود. ماکزیمم خطای ماندگار مفاصل اول و دوم در حالت کنترل کننده اصلی حدود ۰/۱۲ رادیان و در حالت کنترل کننده کاهش یافته ۰/۱۳ و ۰/۱۷ رادیان برای مفاصل اول و دوم است. ماکزیمم ولتاژ موتورها اول و دوم در حالت کنترل کننده اصلی و کاهش یافته به

۵-۶- شبیه‌سازی پنجم

در این شبیه‌سازی کنترل سیستم در حضور اغتشاش خارجی با دامنه تصادفی بررسی شده است.

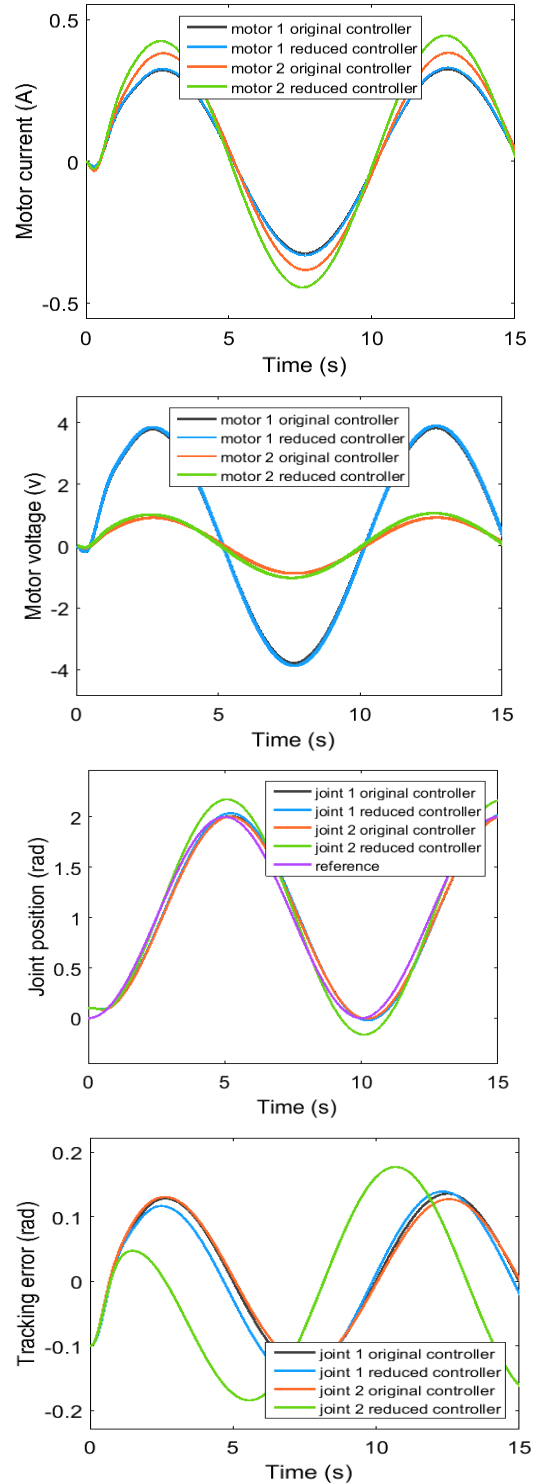
فرض ۵: دامنه سیگنال اغتشاش خارجی محدود است به عبارت دیگر $|\varphi| < \varphi_{max}$ (۴۵)

که در آن φ سیگنال اغتشاش خارجی است. در این شبیه‌سازی ماکزیمم دامنه سیگنال اغتشاش $\varphi_{max} = 1V$ و فرکانس آن 0.5 هرتز در نظر گرفته می‌شود. سیگنال مرجع مشابه شبیه‌سازی دوم و مقدار اولیه موقعیت مفصل 0.1 رادیان است. نتایج در شکل ۱۰ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که اثر اغتشاش خارجی اعمال شده از بین رفته است. لذا کنترل کننده نسبت به اغتشاش خارجی مقاوم است.



شکل (۱۰): پاسخ سیستم با ورودی سینوسی و اغتشاش تصادفی شامل ولتاژ موتور، موقعیت مفصل و خطای ردگیری شبیه‌سازی پنجم

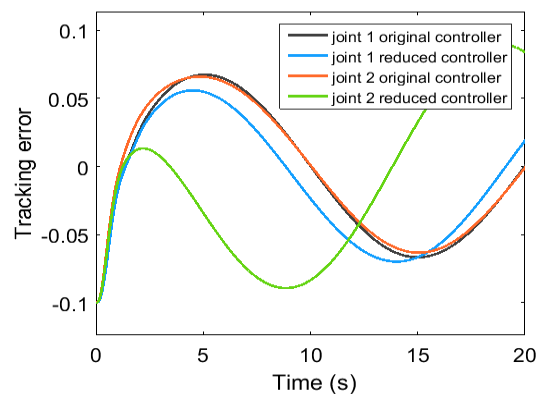
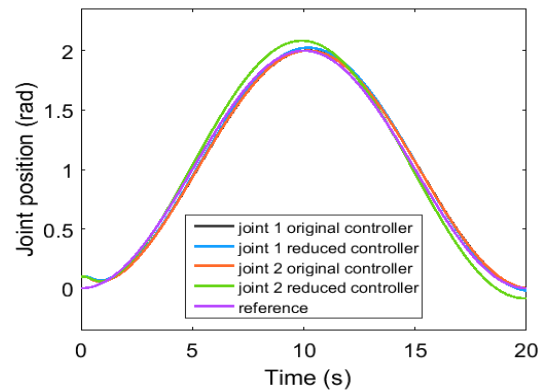
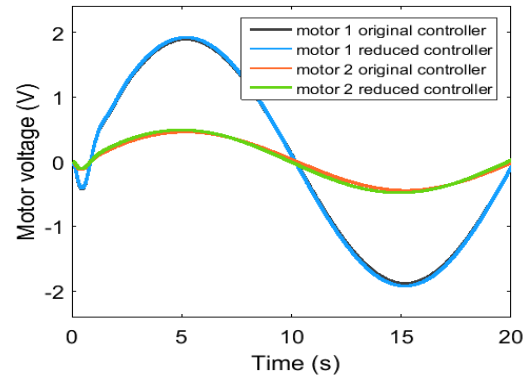
یکدیگر نزدیک و به ترتیب $3/7$ و 0.9 ولت است. همچنین ماکزیمم میزان جریان کشی موتورهای اول و دوم در حالت کنترل کننده اصلی به ترتیب 0.32 و 0.38 آمپر و در حالت کاهش یافته 0.32 و 0.44 آمپر در حالت کاهش یافته است. در این شبیه‌سازی نیز جریان و ولتاژ موتورها در محدوده مجاز بوده و تقریباً هم فاز هستند.



شکل (۹): پاسخ سیستم به ورودی سینوسی با فرکانس 0.1 شامل ولتاژ ورودی موتور، موقعیت مفصل و خطای ردگیری شبیه‌سازی چهارم

۶-۶- شبیه‌سازی ششم

در این شبیه‌سازی نیز تاثیر اغتشاش خارجی این بار با سیگنال اغتشاش سینوسی با دامنه ۱ ولت و فرکانس متغیر از ۰/۱ تا ۱ هرتز بررسی شده است. سیگنال مرجع مشابه شبیه‌سازی دوم و مقدار اولیه موقعیت مفصل ۰/۱ رادیان است. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۱ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که اثر اغتشاش خارجی اعمال شده از بین رفته است. به عبارت دیگر کنترل کننده نسبت به این نوع اغتشاش خارجی نیز مقاوم است.



شکل (۱۱): پاسخ سیستم به ورودی سینوسی و اغتشاش سینوسی با فرکانس متغیر شامل ولتاژ ورودی موتور، موقعیت مفصل و خطای ردگیری شبیه‌سازی ششم

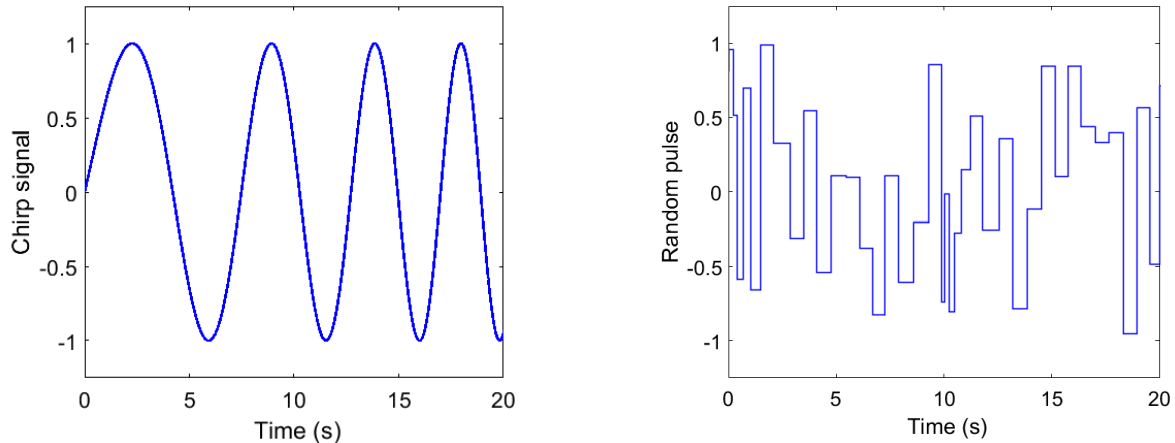
۷- مقایسه رویکرد پیشنهادی با پژوهش‌های مرتبط

در [۱۹] تنها مسئله ردیابی سیگنال قطار پالسی با استفاده از روش کنترل مد لغزشی تطبیقی روی بازوی ربات با یک مفصل منعطف مورد بررسی قرار گرفته است. و از دو انکودر افزایشی^۱ یکی برای موتور و دیگری برای مفصل استفاده شده است. اما در روش پیشنهادی در حالت کاهش مرتبه تنها از یک انکودر برای دریافت موقعیت موتور استفاده می‌شود. بیشترین مقدار انحراف مفصل منعطف در شبیه‌سازی مسئله تنظیم در مرجع مذکور ۰/۱۱ رادیان و در این مقاله در حالت کاهش مرتبه به ترتیب ۰/۲۵ و ۰/۵ رادیان برای مفاصل اول و دوم بود. در مقابل محدودیت دیگر [۱۹] نسبت به روش پیشنهادی وجود پدیده چترینگ در سیگنال کنترل است.

در [۱۶] مسئله ردیابی با استفاده از روش کنترل LQR، سیستم بازوی ربات مشابه این مقاله در حالت های بدون کاهش مرتبه و با کاهش مرتبه تنها با استفاده از سیگنال قطار پالس بررسی شده است.

اما عملکرد مناسبی را در حالت کاهش مرتبه نتیجه نمی‌دهد. در تشکیل سیگنال کنترل این مرجع افق کنترل نامحدود بوده و محدودیت سیگنال کنترل با استفاده از محدود کننده اعمال شده است در حالی که در روش کنترل پیش بین پیشنهادی افق کنترل قابل تغییر بوده و محدودیت سیگنال کنترل ولتاژ در مسئله بهینه سازی لحاظ می‌شود. مشاهده می‌شود در [۱۶] موقعیت مفاصل با کاهش مرتبه کنترل کننده در ثانیه دهم حول مقدار مطلوب دچار نوسان می‌شود (شکل ۱۳) که کارآمد نبودن رویکرد کاهش مرتبه کنترل کننده در [۱۶] را نشان می‌دهد.

در [۱۳] روش کنترل پیش بین صریح روی سیستم رباتیک با یک مفصل پیاده‌سازی شده است. در این مرجع حداقل زمان های نمونه برداری ممکن سخت افزار ۲ میلی ثانیه است. زمان نمونه برداری مناسب در این مقاله ۲۰ میلی ثانیه و افق پیش بین ۴ و ۵ در نظر گرفته شده است. در این مرجع سیگنال کنترل ولتاژ پدیده چترینگ شدیدی دارد (شکل ۱۴). همچنین نشان داده می‌شود که با افزایش وزن ماتریس های R و Q میزان فراجش کاهش می‌یابد. در این مرجع مسئله ردیابی با استفاده از سیگنال سینوسی نیز بررسی شده است (شکل ۱۵). ماکزیمم خطای ردیابی در مسئله شبیه سازی این سیستم ۵ درجه معادل ۰/۰۸ رادیان است که نسبت به روش ارائه شده در این مقاله بیشتر است.



شکل (۱۲): اغتشاش خارجی بصورت پالس تصادفی با دامنه متغیر (سمت چپ) و سیگنال سینوسی با فرکانس متغیر (سمت راست) در شبیه سازی های ۵ و ۶

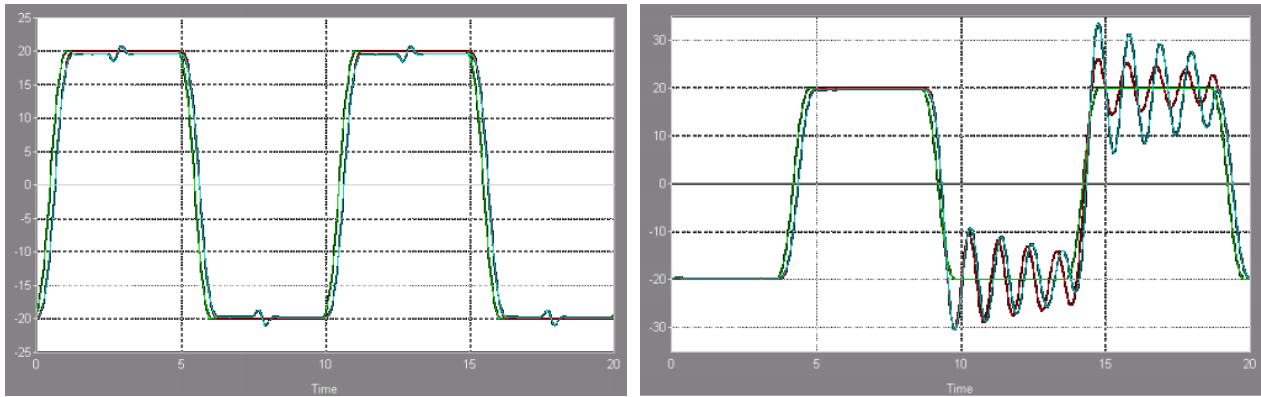
جدول (۳): خلاصه نتایج شبیه سازی ها

شبهه سازی اول	شبهه سازی دوم	شبهه سازی سوم	شبهه سازی چهارم	شبهه سازی پنجم	شبهه سازی ششم	
۱۱/۰۴	۱۱/۰۳	۱/۸	۳/۷	۱/۸	۱/۸	ولتاژ بدون کاهش مرتبه کنترلر مفصل اول
۱۴/۶۳	۱۸/۵۶	۱/۹	۳/۷	۱/۹	۱/۹	ولتاژ با کاهش مرتبه کنترلر مفصل اول
۲/۸۵	۲/۸۳	۰/۴۵	۰/۸۹	۰/۴۵	۰/۴۵	ولتاژ بدون کاهش مرتبه کنترلر مفصل دوم
۳/۷۴	۴/۵	۰/۴۸	۰/۹۹	۰/۴۸	۰/۴۸	ولتاژ با کاهش مرتبه کنترلر مفصل دوم
.	.	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۵	خطای ماندگار بدون کاهش مرتبه کنترلر مفصل اول
.	.	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۳	خطای ماندگار با کاهش مرتبه کنترلر مفصل اول
.	.	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۲	خطای ماندگار بدون کاهش مرتبه کنترلر مفصل دوم
.	.	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱	خطای ماندگار با کاهش مرتبه کنترلر مفصل دوم

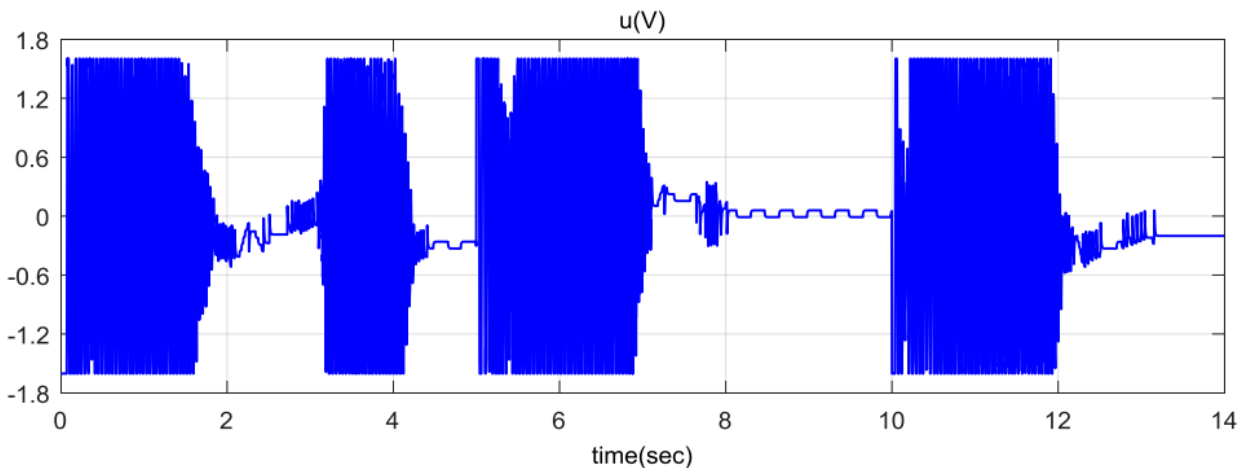
- مثال اگر قرار بود فیدبک تنها از موقعیت مفصل گرفته شود، سیستم ردیابی مطلوب را نخواهد داشت.
- با کاهش مرتبه کنترل کننده، در مسئله تنظیم، پارامترهای پاسخ گذرا مثل زمان نشست و میزان فراجاهش افزایش یافتند، ولی خطای ماندگار صفر شد.
- در مسئله ردیابی هم در حالت کنترل کننده اصلی و هم در حالت کنترل کننده کاهش یافته خطای ماندگار کوچکی در سیستم مشاهده شد که مقدار آن‌ها با افزایش فرکانس سیگنال ورودی افزایش می یابد.
- این نوع کنترل کننده هم در حالت کنترل کننده اصلی و هم در حالت کنترل کننده کاهش یافته به خوبی تاثیر اغتشاش خارجی هم از نوع سیگنال تصادفی و هم از نوع سیگنال با فرکانس متغیر را دفع کرد.

در [۲۰] سیستم رباتیک با یک مفصل منعطف با روش کنترل مد لغزشی و راهبرد کنترل ولتاژ بررسی شده است. در این مرجع تنها از سیگنال قطار پالس برای مسئله ردیابی استفاده شده و میزان فراجاهش به 0.047 رادیان رسیده است. همچنین از دو انکودر برای تعیین موقعیت موتور و مفصل استفاده شده و ضریب سفتی فنر در میزان فراجاهش موثر ارزیابی شده است. سیستم تحت کنترل در این روش پایدار لیاپانوفی اما در روش ارائه شده پایداری مجانبی دارد. چند نکته مهم در مسئله کاهش مرتبه کنترل کننده پیش بین مشاهده شد که در ذیل به آنها اشاره می شود:

- اول آن که حذف هر حالت تاثیر خاص خود را در پاسخ سیستم خواهد گذاشت. به طوری که با حذف برخی حالات هم می توان تقریب مناسبی از کنترل کننده اصلی را ایجاد کرد و هم موجب عدم ردیابی و کارایی مناسب سیستم تحت کنترل شود. به عنوان

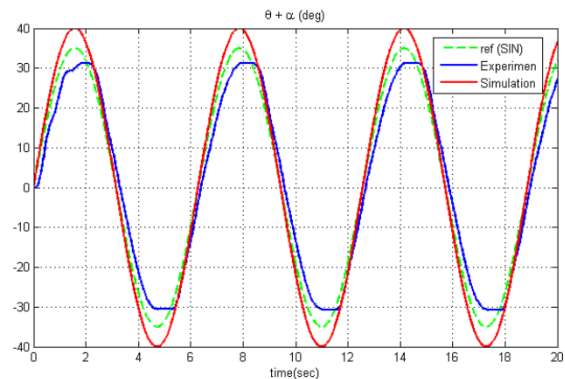


شکل (۱۳): موقعیت مفصل اول در حالت بدون کاهش مرتبه (سمت چپ) و در حالت کاهش مرتبه در ثانیه دهم (سمت راست) [۱۶]



شکل (۱۴): بروز پدیده چترینگ در سیگنال کنترل ولتاژ [۱۴]

سازد. قانون کنترل پیشنهادی با دو رویکرد مختلف طراحی و تحلیل شد، در رویکرد نخست با استفاده از تمامی حالت های سیستم شامل موقعیت موتور، موقعیت مفصل و جریان الکتریکی موتور و در رویکرد دوم تنها با فیدبک از موقعیت موتور. در واقع رویکرد دوم نوعی کاهش مرتبه در دینامیک کنترل کننده است. همچنین در رویکردهای پیشنهادی این تحقیق نه تنها مدل مکانیکی بلکه مدل الکتریکی عملگرهای بازوی ربات در مدل سازی و طراحی کنترل کننده سیستم لحاظ شده است. از طرفی کاهش مرتبه کنترل کننده موجب سادگی و کاهش ترم های بهینه سازی در محاسبه سیگنال کنترل شد. همچنین پایداری مجانبی سیستم حلقه بسته به کمک تابع لیاپانوف اثبات گردید. روش طراحی کنترل کننده به صورت مرحله به مرحله انجام می شود که سادگی شبیه سازی و پیاده سازی آن را هموار می کند. یکی دیگر از مزیت های این روش دفع اغتشاش خارجی است که این مسئله با ارائه دو نوع اغتشاش متفاوت نشان داده شد. از دیگر سو با در نظر گرفتن محدودیت های سیستم، سیگنال کنترل بهینه به سیستم اعمال شد که این امر در پیاده سازی سخت افزاری اهمیت زیادی دارد. براساس شبیه سازی انجام شده سیگنال کنترلی دارای تغییرات بسیار آهسته و نرم بودند که نشان دهنده یک عملکرد مطلوب بدون پدیده چترینگ^{۱۱} است. همچنین ثابت شد که سیگنال خطا در مسئله تنظیم به صورت مجانبی به صفر می رسد اما در مسئله ردیابی سیگنال



شکل ۱۵- موقعیت مفصل منعطف به ازای ورودی مرجع سینوسی با فرکانس ۰/۱ هرتز [۱۳]

۸- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل کننده پیش بین مبتنی بر راهبرد کنترل ولتاژ به منظور کنترل بازوی ربات با مفاصل منعطف ارائه گردید. سیگنال کنترل ولتاژ عملگرهای ربات بر اساس روش کنترل پیش بین با ویژگی هایی جهت کاهش محدودیت های پارامترهای طراحی و بهینه سازی محاسبه می گردد. این کنترل کننده محدودیت های کنترل کننده های مبتنی بر راهبرد گشتاور نظیر پیچیدگی محاسبات، مسائل پیاده سازی و حذف اثرات مدل الکتریکی عملگرهای ربات را برطرف می

[5] فضلی علی، و محمدحسین کاظمی، "مدل سازی خطی پارامتر متغیر (LPV) بازوی PUMA560 در تخمین گشتاور محاسبه شده جهت کنترل مسیر"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۷، شماره ۳: ۳۹-۵۰، ۱۳۹۹.

- [6] C. Liu, C. Cheah and E. Slotine, "Adaptive jacobian tracking control of rigid-link electrically driven robots based on visual task-space information, *Automatica*, Vol. 42, No. 9, pp. 1491-1501, 2018.
- [7] M.M. Fateh, "On the voltage-based control of robot manipulators", *Int. J. Control. Autom. Syst.*, Vol. 6, No. 5, pp. 702-712, 2008.
- [8] W. Alam, N. Ali, H. M. Wahaj Aziz and J. Iqbal, "Control of flexible joint robotic manipulator: Design and prototyping", 2018 *Int. Conf. Electr. Eng. ICEE*, pp. 1-6, 2018.
- [9] A. Izadbakhsh and P. Kheirkhahan, "robots - Theory and experimental verification", pp. 250-255.
- [10] M. M. Fateh, "Robust control of flexible-joint robots using voltage control strategy". *Nonlinear Dyn.*, Vol. 67, No. 2, pp. 1525-1537, 2012.
- [11] M. M. Fateh, "Nonlinear control of electrical flexible-joint robots", *Nonlinear Dyn*, Vol. 67, No. 4, pp. 2549-2559, 2012.

[۱۲] مرادی زیرکوهی مجید، فاتح محمد مهدی و علیاری شوره دلی مهدی، "کنترل فازی نوع-۲ تطبیقی غیرمستقیم ربات های با مفاصل قابل انعطاف"، نشریه مکانیک سازه ها و شاره ها، دوره ۲، شماره ۲: ۳۱-۴۳، ۱۳۹۱.

- [13] M. H. Etefagh, M. Naraghi and F. Towhidkhan, "Position Control of a Flexible Joint via Explicit Model Predictive Control: An Experimental Implementation", *Emerg. Sci. J.*, Vol. 3, No. 3, pp. 146-156, 2019.
- [۱۴] گل پیرا هیمن، بیورانی حسن، "روشی جدید برای بهبود پایداری سیگنال کوچک و تنظیم ولتاژ با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده"، مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۶، شماره ۳: ۶۱-۷۲، ۱۳۹۸.

- [15] H. Hooshmand, and M.M. Fateh, "Voltage Control of Flexible-Joint Robot Manipulators Using Singular Perturbation Technique for Model Order Reduction", *Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations*, 2021. doi: 10.22061/JECEI.2021.7727.424
- [16] S. Plant and D. Robot, *Joint Robot. Quanser Inc, 2 DOF Serial Flexible Joint Robot, User Manual*, <https://www.quanser.com/products/2-dof-serial-flexible-joint>.
- [17] R. Reyes-báez, "A family of virtual contraction based controllers for tracking of flexible-joints port-Hamiltonian robots: Theory and experiments", No. February, pp. 1-27, 2020. doi: 10.1002/rnc.4929.
- [18] M. Razmi and C. J. B. Macnab, "Near-optimal neural-network robot control with adaptive gravity compensation", pp. 1-10, 2020. doi: 10.1016/j.neucom.2020.01.026.
- [19] S. Zaare and M. Reza, "Adaptive sliding mode control of n flexible-joint robot manipulators in the presence of structured", *Multibody Syst Dyn*, 2019. doi: 10.1007/s11044-019-09693-1.
- [20] M. Reza and M. Moattari, "Voltage based sliding mode control of flexible joint robot manipulators in presence of uncertainties", *Rob. Auton. Syst.*, Vol. 118, pp. 204-219, 2019. doi: 10.1016/j.robot.2019.05.014.
- [21] R. Miranda-Colorado, L. T. Aguilar and J. Moreno-Valenzuela, "A model-based velocity controller for chaotization of flexible joint robot manipulators: Synthesis, analysis, and experimental evaluations", *Int. J.*

سینوسی، خطای ماندگار بسیار کم و محدودی در حد ۰/۰۵ رادیان وجود دارد. علاوه بر این کنترل ولتاژ مبتنی بر روش پیش بین پیشنهادی با تعدادی از روش ها و تحقیقات مرتبط مقایسه شده و عملکرد مطلوب رویکرد پیشنهادی نسبت به آنها نشان داده شد. در حالت کلی تحلیل پایداری و نتایج شبیه سازی های ارائه شده، عملکرد خوب روش کنترلی پیشنهادی را تأیید می کنند.

فهرست علائم و نشانه ها و ارقام

زاویه مفاصل اول و دوم (rad)	θ_{12}, θ_{22}
زاویه موتور اول و دوم (rad)	θ_{11}, θ_{21}
سرعت زاویه ای موتور اول و دوم (rad.s^{-1})	$\dot{\theta}_{11}, \dot{\theta}_{21}$
سرعت زاویه ای مفاصل اول و دوم (rad.s^{-1})	$\dot{\theta}_{12}, \dot{\theta}_{22}$
مسیر مطلوب (سیگنال مرجع)	θ_d
خطای ردگیری	e
بردار گشتاور موتورهای اول و دوم ربات	T_1, T_2
ضرایب سفتی فنرهای انعطاف پذیری (Nm^{-1})	K_{s1}, K_{s2}
ماتریس ثابت های گشتاور موتورها	K_{t1}, K_{t2}
جریان موتورهای اول و دوم (A)	I_{m1}, I_{m2}
ولتاژ موتورهای اول و دوم (V)	V_1, V_2
اغتشاشات خارجی	$\varphi(t)$
ماتریس مقاومت موتورهای اول و دوم	R_1, R_2
اندوکتانس موتورهای اول و دوم	L_1, L_2
ماتریس ثابت ضد محرکه موتور اول و دوم	K_{b1}, K_{b2}

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هم‌فکری اعضای هیئت تحریریه مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] C. Ott., "Modeling of flexible joint robots. Springer Tracts in Advanced Robotics", Vol. 49, pp. 13-27, 2008.
- [2] G. Hassapis, "Implementation of model predictive control using real-time multiprocessing computing", *Microprocess Microsyst*, Vol. 27, No. 7, pp. 327-340, 2003.
- [3] K. V Ling, S. P. Yue and J. M. Maciejowski, "A FPGA implementation of model predictive control", *Proc. Am. Control Conf* 2006, pp. 1930-1935, 2006.
- [4] A. Merabet and J. Gu, "Robust nonlinear predictive control with modeling uncertainties and unknown disturbance for single-link flexible joint robot", *Proc. World Congr. Intell. Control Autom.*, pp. 1516-1521, 2008.

Adv. Robot. Syst., Vol. 15, No. 5, pp. 1–15, 2018.

Doi: 10.1177/1729881418802528.

- [22] R. L’Orsa and C. J. B. Macnab, “Experimental evaluation of adaptive CMAC haptic control for teleoperation of compliant-joint manipulators”, IEEE Int. Symp. Ind. Electron, pp. 1087–1092, 2017.
doi: 10.1109/ISIE.2017.8001397.
- [23] R. Miranda-Colorado and J. Moreno-Valenzuela, “Experimental parameter identification of flexible joint robot manipulators” Robotica, Vol. 36, No. 3, pp. 313–332, 2018.
- [24] D. Sáez et al, Liuping_Wang-Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB, B®-Springer.pdf, 2009.
- [25] P. Kürschner, “Balanced truncation model order reduction in limited time intervals for large systems” Adv. Comput. Math., Vol. 44, No. 6, pp. 1821–1844, 2018.
- [26] S. Hovland, K. Willcox and J. T. Gravdahl, “MPC for large-scale systems via model reduction and multiparametric quadratic programming”, Proc. IEEE Conf. Decis. Control, pp. 3418–3423, 2006.

¹ Receding Horizon

² Feedback linearization

³ Linear Parameter Varying

⁴ Voltage Control Strategy

⁵ Explicit

⁶ limiter

⁷ Regulation

⁸ Tracking

⁹ Settling time

¹⁰ Incremental encoder

¹¹ Chattering