

همگام‌سازی لغزشی تطبیقی سیستم‌های آشوب مرتبه کسری دافینگ هلمز با وجود نامعینی و سطح لغزشی مرتبه کسری

سمانه پاینده^{۱،*}، مهناز هاشمی^{۲،۳*}

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، samanehpaiandeh@sel.iaun.ac.ir
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، m.hashemi@pel.iaun.ac.ir
- ۳- مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
- تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۱۰

چکیده: در این مقاله، مساله همگام‌سازی لغزشی تطبیقی سیستم‌های آشوب مرتبه کسری دافینگ هلمز در حضور عدم قطعیت، اغتشاش با وجود سطح لغزشی مرتبه کسری مورد بررسی قرار گرفته است. دینامیک‌های سیستم پیشرو و پیرو دارای نامعینی می‌باشند. در این طراحی، از روش کنترل لغزشی تطبیقی استفاده شده است. در ابتدا کران بالای نامعینی و اغتشاش سیستم پیرو با استفاده از قوانین تطبیقی تخمین زده شده و جبران می‌شود. سپس یک سطح لغزشی مرتبه کسری جدید برای همگام‌سازی دو سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که سیستم پیرو بتواند سیستم پیشرو را دنبال کند. کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی پیشنهادی پایداری مجانبی خطای همگام‌سازی و کران‌داری سیگنال‌های حلقه بسته را علی‌رغم حضور عدم قطعیت و اغتشاش با وجود سطح لغزشی مرتبه کسری تضمین می‌کند. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی کارایی و صحت روش کنترلی ارائه شده را در همگام‌سازی دو سیستم آشوب مرتبه کسری دافینگ هلمز با وجود سطح لغزشی مرتبه کسری و تخمین نامعینی سیستم نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سطح لغزشی مرتبه کسری، سیستم آشوب مرتبه کسری دافینگ هلمز، کنترل لغزشی تطبیقی، نامعینی و اغتشاش، همگام‌سازی

۱- مقدمه

حساب کسری^۱ یک ایده ریاضی است که در حدود سیصد سال پیش مطرح شد. حساب کسری اجازه داشتن هر مرتبه از مشتق و انتگرال را به سیستم می‌دهد [۲،۱]. این ویژگی باعث می‌شود سیستم با دقت بیشتری مدل و کنترل شود [۴،۳]. اولین نگاه کاربردی به ریاضیات مرتبه کسری توسط آبل^۲ در حل مساله یافتن منحنی همزمانی^۳ به کار گرفته شد [۵]. در سی سال گذشته حساب کسری به علت دقت بالا در مدل کردن سیستم‌ها و کنترل آن، در بسیاری از علوم مانند اقتصاد، فیزیک، الکترونیک، شیمی، پزشکی، نظریه آشوب به کار برده شده است. به عنوان نمونه معادلات تفاضلی مرتبه کسری برای

مدل کردن مواد ویسکوالاستیک، سیستم‌های مالی و جمعیت استفاده شده است [۷،۶]. همچنین مشتق مرتبه کسری برای مدل کردن مدارهای الکتریکی، زلزله و مقاومت تنفسی انسان برای اندازه‌گیری مشخصات مکانیکی تنفسی انسان به کار برده شده است [۹،۸]. از دیگر کاربردهای حساب کسری در زمینه کنترل سیستم‌های مختلف است. کنترل‌کننده مرتبه کسری^۴ نسبت به کنترل‌کننده مرتبه صحیح به علت دقت بیشتر، باعث بهبود کارایی سیستم کنترل می‌شود، به طور مثال کنترل‌کننده مرتبه کسری اغتشاش^۵ را بهتر دفع می‌کند و حساسیت کمتری نسبت به تغییر پارامترهای فرایند دارد. در [۱۰]، برای کنترل یک ربات تک لینکی قابل انعطاف، کنترل مد لغزشی مرتبه کسری استفاده شده است. در [۱۱]، کنترل‌کننده مد

سنکرون سازی پروژکتیو هایبرید برای دو سیستم مرتبه کسری مالی و لیو^{۱۵} تاخیردار با وجود نویز انجام شده است. در [۲۸]، برای سنکرون سازی دو سیستم آشوب دینامیکی مرتبه کسری با مرتبه متفاوت از کنترل کننده مد لغزشی انتگرالی فازي کسری استفاده شده است. در [۲۹]، برای همگام سازی دو سیستم آشوب غیر خطی جرک با وجود عیب عملگر و اشباع ورودی روش کنترل تطبیقی گام به عقب بکار برده شده است. در [۳۰]، برای سنکرون سازی دو سیستم آشوب متفاوت در حضور عدم قطعیت، اغتشاش خارجی و پارامترهای نامعلوم از کنترل لغزشی تطبیقی مقاوم استفاده شده است. در [۳۱]، برای سنکرون سازی دو سیستم آشوب جرک در حضور عدم قطعیت و نامعینی از سطح لغزشی مرتبه صحیح استفاده کرده و با یک تابع لیاپانوف مرتبه کسری پایدار محلی به دست آمده است. در [۳۲]، برای سنکرون سازی سیستم های آشوب چن و لورنز از یک کنترل مد لغزشی پایانه مرتبه کسری استفاده کرده است همچنین عدم قطعیت و نامعینی سیستم را محدود در نظر گرفته است ولی تخمین نزده است. در [۳۳]، برای سنکرون سازی سیستم های آشوب مرتبه کسری از نوعی جنسی تسی از کنترل کننده لغزشی تطبیقی با وجود سطح لغزشی مرتبه کسری و تخمین نامعینی استفاده کرده است.

در این مقاله، سنکرون سازی لغزشی تطبیقی برای سیستم های آشوب مرتبه کسری در حضور نامعینی و اغتشاش نامعلوم در سیستم پیرو بررسی و همچنین یک سطح لغزشی مرتبه کسری جدید برای سیستم پیشنهاد شده است. کنترل کننده پیشنهادی نه تنها نیاز به اطلاعات قبلی در مورد کران های نامعینی و اغتشاش ندارد، بلکه آن ها را با قوانین تطبیقی تخمین می زند. جهت طراحی کنترل کننده و اثبات پایداری آن، یک تابع لیاپانوف مرتبه کسری جدید انتخاب شده است. کنترل کننده پیشنهادی پایداری مجانبی خطای سنکرون سازی را تضمین می کند. نتایج شبیه سازی کارایی کنترل کننده مورد نظر را نشان می دهد. ساختار ادامه مقاله به شکل زیر ترتیب داده شده است: در قسمت دوم، به معرفی مشتق مرتبه کسری کاپوتو و روش حل عددی معادلات مرتبه کسری با استفاده از مشتق کاپوتو پرداخته شده است. قسمت سوم، به توصیف سیستم در حضور عدم قطعیت اختصاص داده شده است. در قسمت چهارم، سطح لغزشی مرتبه کسری پیشنهادی معرفی شده است. همچنین، تحلیل پایداری سیستم با وجود کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی پیشنهادی ارائه شده است. در قسمت پنجم، نتایج شبیه سازی برای نشان دادن کارایی کنترل کننده مورد نظر شرح داده شده و در انتها، نتیجه گیری ارائه شده است.

۲- تعاریف پایه حساب کسری و مقدمات

سه تعریف ریمان لیوویل، گرانوالد لتنیکو و کاپوتو عمدتاً در حساب کسری استفاده می شود. برای محدوده وسیعی از توابع تعریف ریمان لیوویل معادل با تعریف گرانوالد لتنیکو است. با این وجود، تعریف کاپوتو از آنجایی که شرایط اولیه اش مشابه با معادله تفاضلی مرتبه

لغزشی مرتبه کسری فازي تطبیقی برای سیستم ضد قفل ترمز به کار برده شده است. در [۱۲]، از یک کنترل کننده تطبیقی پس گام مرتبه کسری برای یک ربات با n درجه آزادی با وجود عدم قطعیت و اغتشاش استفاده شده است. در [۱۳]، کنترل کننده مد لغزشی پایانه غیر سینگولار مرتبه کسری تطبیقی برای سیستم ربات n لینکی در حضور عدم قطعیت و اغتشاش خارجی ارائه شده است. در [۱۴]، کنترل کننده مد لغزشی پایانه غیر سینگولار مرتبه کسری پیوسته بر مبنای تخمین تاخیر زمانی برای ربات با دو درجه آزادی بررسی شده است. در [۱۵]، برای کنترل سطح سیستم سه مخزن از کنترل کننده مشتقی انتگرالی تناسبی مرتبه کسری^۶ (FOPID) استفاده شده است. همچنین برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده الگوریتم بهینه سازی فاخته بهبود یافته به کار گرفته شده است. در [۱۶]، یک کنترل مشتقی انتگرالی تناسبی فازي مرتبه کسری به ربات دو لینکی چند ورودی - چند خروجی^۷ (MIMO) اعمال شده است. در [۱۷]، از یک کنترل کننده مشتقی - انتگرالی - تناسبی فازي کسری بهینه برای کنترل گام در توربین بادی استفاده شده است. در [۱۸]، برای سنکرون سازی سیستم های غیر خطی مرتبه کسری با وجود عیب متغیر با زمان در عملگر یک کنترل کننده تطبیقی لغزشی به کار برده شده است.

از طرف دیگر، یکی از پدیده های غیر خطی که در بسیاری از سیستم ها همچون سیستم های مکانیکی، پزشکی، الکترونیکی، مرتبه کسری ... مشاهده شده است، پدیده آشوب^۸ است. سیستم های آشوبی بی نظم، تصادفی و غیر قابل پیش بینی هستند اما اگر مدت طولانی مورد بررسی قرار بگیرند دارای نظم خاصی هستند. به دلیل فراوانی سیستم های آشوب، مسئله کنترل و سنکرون سازی این سیستم ها بسیار مورد توجه بوده است.

در [۱۹]، سیستم آشوبی مرتبه کسری جدیدی به نام ولتا^۹ معرفی و روشی برای شبیه سازی عددی آن ارائه شده است. در [۲۰]، براساس سیستم ریکی تیک^{۱۰} یک سیستم آشوبی جدید معرفی، سپس به سیستم حساب کسری اعمال و با استفاده از یک کنترل کننده غیر خطی مناسب سنکرون سازی تصویری شده است. در [۲۱] و [۲۲]، کنترل کننده مد لغزشی مرتبه کسری برای کنترل سیستم مرتبه کسری چن^{۱۱}، مالی^{۱۲}، لورنز^{۱۳} با وجود عدم قطعیت و اغتشاش خارجی به کار برده شده است. در [۲۳]، از کنترل کننده پس گام عصی تطبیقی برای کنترل سیستم های مرتبه کسری دافینگ هلمز و آرنود^{۱۴} در حضور عدم قطعیت و پسماند مغناطیسی نامعلوم غیر خطی استفاده شده است. در [۲۴]، سنکرون سازی دو سیستم آشوب مرتبه کسری غیر مشابه با مرتبه های متفاوت به کمک کنترل کننده تطبیقی فازي انجام شده است. در [۲۵]، همگام سازی دو سیستم دافینگ هلمز مرتبه کسری با کنترل کننده مد لغزشی بررسی شده است. در [۲۶]، برای سنکرون سازی دو سیستم آشوب مرتبه کسری جدید از کنترل کننده تطبیقی مرتبه کسری استفاده شده و همچنین، ریسک استفاده از کنترل کننده در حضور اغتشاش مورد بررسی قرار گرفته است. در [۲۷]،

که در آن:

$$b_{j,n+1} = \frac{h^\alpha}{\alpha} ((n+1-j)^\alpha - (n-j)^\alpha). \quad (10)$$

خطای تخمین این روش به شکل زیر است:

$$e = \max |y(t_j) - y_h(t_j)| = o(h^p), \quad j=1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

که در آن:

$$p = \min(2, 1+\alpha). \quad (12)$$

۳- طراحی کنترل کننده

کنترل مد لغزشی دو گام دارد: اول، ایجاد سطح لغزشی که دینامیک سیستم مطلوب را ارائه کند. دوم، ایجاد کردن یک قانون کنترل که حالت های خارج از سطح در زمان محدود به سطح برساند [۳۶، ۳۵]. برای به دست آوردن قانون کنترل $w(t)$ ، خطای سنکرون سازی به شکل زیر تعریف شده است:

$$e_i = x_i - y_i, \quad i=1, 2. \quad (13)$$

و سطح لغزشی به شکل زیر در نظر گرفته شده است.

$$S(t) = c_1 D^{q-1} e_1 + c_2 D^{q-1} e_2, \quad (14)$$

در رابطه فوق c_1 و c_2 طوری انتخاب خواهند شد که سطح مانند دینامیک سیستم مطلوب رفتار کند و سیستم در حالت مد لغزشی قرار بگیرد.

در حالت مد لغزشی حالت ها به سطح می رسند و در آنجا باقی می مانند. در این مرحله، دینامیک سیستم با دینامیک مد لغزشی کنترل خواهد شد [۳۷-۴۱]. بنابراین، کنترل مد لغزشی در دو فاز طراحی خواهد داشت: فاز رسیدن که $S(t) \neq 0$ و فاز لغزش که $S(t) = 0$. شرط کافی برای اینکه حالت ها از اولین فاز به دومین فاز حرکت کنند به شکل زیر است:

$$S(t) \dot{S}(t) \leq 0. \quad (15)$$

که مشتق $S(t)$ با توجه به رابطه قبل، به شکل زیر تعریف می شود:

$$\dot{S}(t) = c_1 D^q e_1 + c_2 D^q e_2, \quad (16)$$

بنابراین $D^q e_1$ و $D^q e_2$ به صورت زیر به دست می آید:

$$D^q e_1 = D^q (x_1 - y_1) = D^q x_1 - D^q y_1 \quad (17)$$

$$= x_2 - y_2 = e_2,$$

$$\begin{aligned} D^q e_2 &= D^q (x_2 - y_2) = D^q x_2 - D^q y_2 \\ &= f(X, t) + \Delta f(X, t) - f(Y, t) - \\ &\quad \Delta f(Y, t) - d(t) - w(t). \end{aligned} \quad (18)$$

بنابراین با توجه به معادلات خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} S(t) \dot{S}(t) &= S(t)(c_1 D^q e_1 + c_2 D^q e_2) \\ &= S(t)(c_1 e_2 + c_2 (f(X, t) + \Delta f(X, t) \\ &\quad - f(Y, t) - \Delta f(Y, t) - d(t) - w(t))). \end{aligned} \quad (19)$$

برای طراحی کنترل کننده سیستم آشوب مرتبه کسری دافینگ هلمز، تابع لیاپانوف زیر پیشنهاد می شود.

$$V(t) = \frac{1}{2} S^2(t) + \frac{1}{2\eta} \tilde{k}^2, \quad (20)$$

صحیح است در علم مهندسی به کار برده می شود. مشتق کسری کاپوتو از مرتبه α تابع پیوسته $f(t)$ به صورت زیر در نظر گرفته می شود.

$$D_t^\alpha f(t) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_0^t \frac{f^{(m)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+1}} d\tau & m-1 < \alpha < m \\ \frac{d^m f(t)}{dt^m} & \alpha = m \end{cases} \quad (1)$$

که در آن m کوچکترین عدد صحیح بزرگتر از α است. یکی از توابع مهم در حساب کسری تابع گام است و به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt, \quad \Gamma(z+1) = z\Gamma(z). \quad (2)$$

مشتق کسری کاپوتو به صورت زیر به مشتق کسری ریمان لیوویل مربوط می شود.

$$D^\alpha x(t) = {}^C D^\alpha x(t) + \frac{t^{-\alpha}}{\Gamma(1-\alpha)} x_0, \quad (3)$$

که در آن ${}^C D^\alpha$ نماد مشتق کسری کاپوتو از مرتبه α است. عملگر مشتق کسری کاپوتو یک عملگر خطی است بنابراین می توان آن را به صورت زیر نوشت.

$$D^\alpha (ux_1(t) + vx_2(t)) = u D^\alpha (x_1(t)) + v D^\alpha (x_2(t)) \quad (4)$$

روش های عددی متنوعی برای حل معادلات مرتبه کسری وجود دارد. دیتلم و همکارانش روشی بر مبنای پیشبینی-اصلاح گر ارائه داده اند [۳۴]. این روش با استفاده از تعریف کاپوتو به حل عددی معادلات تفاضلی مرتبه کسری می پردازد. در ادامه این الگوریتم به صورت مختصر توضیح داده شده است. معادله تفاضلی مرتبه کسری زیر را در نظر بگیرید.

$$\begin{aligned} D^\alpha y(t) &= f(y, t), \quad 0 \leq t \leq T \\ y^{(k)}(0) &= y_0^{(k)}, \quad k=0, 1, \dots, m-1 (m=[\alpha]). \end{aligned} \quad (5)$$

که معادل با معادله انتگرال ولترا زیر است.

$$y(t) = \sum_{k=0}^{m-1} y_0^{(k)} \frac{t^k}{k!} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t (t-s)^{\alpha-1} f(y(s), s) ds, \quad (6)$$

که در معادله فوق $h=T/N$ و $t_n=nh$ و $n=0, 1, \dots, N$ نهایی، N تعداد گام ها، t_n زمان گام n و h زمان گام انتگرالی است در نتیجه، داریم:

$$\begin{aligned} y_h(t_{n+1}) &= \sum_{k=0}^{m-1} c_k \frac{t_{n+1}^k}{k!} + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha+2)} f(y_h^p(t_{n+1}), t_{n+1}) \\ &\quad + \frac{h^\alpha}{\Gamma(\alpha+2)} \sum_{j=0}^n a_{j,n+1} f(y_h(t_j), t_j) \end{aligned} \quad (7)$$

$$a_{j,n+1} = \begin{cases} n^{\alpha+1} - (n-\alpha)(n+1)^\alpha, & \text{if } j=0 \\ (n-j+2)^{\alpha+1} + (n-j)^{\alpha+1} - 2(n-j-1)^{\alpha+1}, & \text{if } 1 \leq j \leq n \\ 1, & \text{if } j=n+1 \end{cases} \quad (8)$$

که در رابطه فوق، مقدار پیش بینی y در لحظه t_{n+1} برابر است با:

$$y_h^p(t_{n+1}) = \sum_{k=0}^{m-1} c_k \frac{t_{n+1}^k}{k!} + \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \sum_{j=0}^n b_{j,n+1} f(y_h(t_j), t_j), \quad (9)$$

$$\begin{cases} D^q x_1 = x_2, \\ D^q x_2 = x_1 - \alpha x_2 - x_1^3 + \beta \cos(t), \end{cases} \quad (28)$$

و سیستم پیرو دافینگ هلمز مرتبه کسری در حضور اغتشاش و نامعینی به شکل زیر تعریف شده است.

$$\begin{cases} D^q y_1 = y_2, \\ D^q y_2 = y_1 - \alpha y_2 - y_1^3 + \beta \cos(t) + \Delta f(Y, t) + d(t) + w(t), \end{cases} \quad (29)$$

که در آن:

$$d(t) = 0.1 \sin(t) \quad (30)$$

$$\Delta f(Y, t) = 0.1 \sin(t) \sqrt{y_1^2 + y_2^2} \quad (31)$$

$$\alpha = 0.25 \quad (32)$$

$$\beta = 0.3 \quad (33)$$

در نظر گرفته شده است.

نتایج شبیه‌سازی برای $q=0.7$ و $q=0.98$ به‌دست آمده است. شرایط اولیه سیستم پایه و سیستم پیرو به ترتیب با سعی و خطا به شکل $x_1(0)=1, x_2(0)=-1, y_1(0)=0.5, y_2(0)=0.5$ انتخاب شده‌اند. پارامترهای طراحی به‌صورت $c_1=c_2=1$ و $k=10$ انتخاب شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی برای $q=0.98$ در شکل‌های (۱) الی (۶) نشان داده شده است. شکل (۱) به‌ترتیب پرتو فاز سیستم پایه و پیرو را نشان می‌دهد. رفتار آشوبی دو سیستم به خوبی قابل مشاهده است. شکل (۲) مسیر حالت‌های دو سیستم را با وجود کنترل‌کننده پیشنهادی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است حالت‌های سیستم پیرو، حالت‌های سیستم پایه را با وجود عدم قطعیت و سطح لغزشی مرتبه کسری دنبال می‌کنند.

شکل‌های (۳) و (۴) خطای سنکرون‌سازی با وجود سطح لغزشی مرتبه کسری و بدون آن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است خطا در هر دو حالت پایدار مجانبی است و همزمان سازی محقق گردیده است، اما با وجود سطح مرتبه کسری حالت گذرا سیستم بهبود می‌یابد و در زمان خیلی کمتری خطا به صفر می‌رسد. شکل (۵) ورودی کنترل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این ورودی محدود و بسیار کوچک است بنابراین به بسیاری از سیستم‌ها که می‌توانند به صورت دافینگ هلمز مرتبه کسری مدل شوند، قابل اعمال است. شکل (۶) سطح لغزشی پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید با قانون کنترل حالت‌ها به سرعت به سطح لغزشی می‌رسند و در نهایت پایداری مجانبی تضمین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای q برابر 0.7 در شکل‌های (۷) الی (۱۱) نشان داده شده است. شکل (۷) نشان می‌دهد که تغییر اندکی در مرتبه سیستم باعث تغییر در حالت‌های سیستم‌ها شده است. می‌توان مشاهده کرد که حالت‌های دو سیستم با هم همگام شده‌اند بنابراین سیستم پیرو، سیستم پیشرو را دنبال کرده است. شکل‌های (۸) و (۹) مقایسه خطای سنکرون‌سازی با حضور سطح لغزشی مرتبه کسری و مرتبه صحیح را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با وجود سطح پیشنهادی

که در (۲۰)، S سطح لغزشی، $\hat{k} = \tilde{k} - k$ ، $\tilde{k}$ تخمین k ، همچنین η پارامتر مثبت ثابت است که سرعت تطبیق پارامتر را تنظیم می‌کند. مشتق زمانی تابع لیاپانوف پیشنهادی (۲۱) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\dot{V}(t) = S(t)\dot{S}(t) + \frac{1}{\eta} \dot{\tilde{k}}k. \quad (21)$$

با جایگذاری مشتق $V(t)$ به‌صورت زیر می‌شود.

$$\dot{V}(t) \leq S(t)(c_1 e_2 + c_2(f(X, t) - f(Y, t) - w)) + c_2 |S(t)| |\Delta f(Y, t)| \quad (22)$$

$$+ c_2 |S(t)| |\Delta f(X, t)| + c_2 |S(t)| |d(t)| + \frac{1}{\eta} \dot{\tilde{k}}k.$$

با در نظر گرفتن فرض مقاله، $\dot{V}(t)$ به‌صورت زیر خواهد شد:

$$\dot{V}(t) \leq S(t)(c_1 e_2 + c_2(f(X, t) - f(Y, t) - w)) + c_2 |S(t)| k \quad (23)$$

$$+ \frac{1}{\eta} \dot{\tilde{k}}k + c_2 |S(t)| \hat{k} - c_2 |S(t)| \hat{k}.$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\dot{V}(t) \leq S(t)(c_1 e_2 + c_2(f(X, t) - f(Y, t) - w)) - c_2 |S(t)| \tilde{k} + \frac{1}{\eta} \dot{\tilde{k}}k + c_2 |S(t)| \hat{k}. \quad (24)$$

بنابراین قانون به روز رسانی $\hat{k}$ به صورت زیر انتخاب می‌شود.

$$\dot{\hat{k}} = \eta c_2 |S(t)| \quad (25)$$

و سیگنال کنترل به شکل زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$w = f(X, t) - f(Y, t) + \frac{c_1 e_2}{c_2} + \hat{k} \text{sign}(S(t)). \quad (26)$$

بنابراین مشتق تابع لیاپانوف به‌صورت زیر بازنویسی خواهد شد.

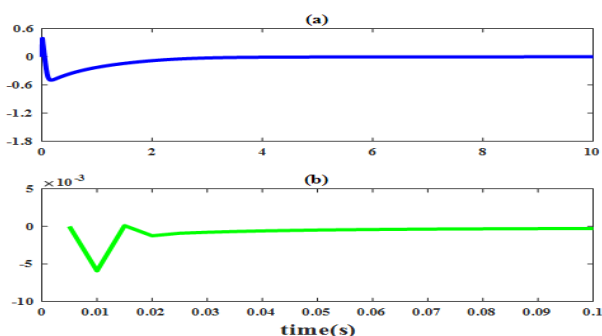
$$\dot{V}(t) \leq 0. \quad (27)$$

چون تابع $V(t)$ از پایین کراندار است و تابع افزایشی نیست. بنابراین، در بی نهایت حد دارد و $\dot{V}(t)$ به‌صورت یکنواخت پیوسته است. در نتیجه طبق لم باربالات $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) = 0$ است و سیستم پایدار مجانبی است نتیجه کلی را می‌توان در قالب قضیه زیر خلاصه کرد.

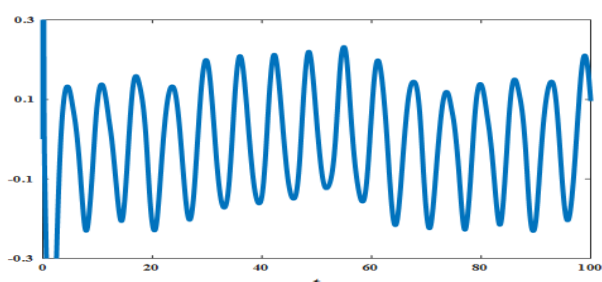
قضیه: برای سیستم پیرو و سیستم پیشرو در حضور عدم قطعیت و اغتشاش، تحت فرض مقاله، با قانون کنترل بیان شده، قانون تطبیق و سطح لغزشی مرتبه کسری کراندار سیگنال‌های حلقه بسته و پایداری مجانبی خطای سنکرون‌سازی تضمین می‌گردد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

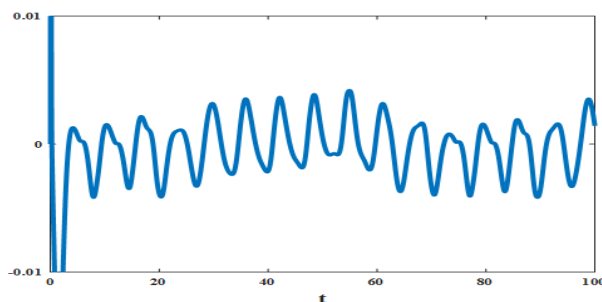
در این قسمت، نتایج تئوری به‌دست آمده برای نشان دادن کارایی کنترل‌کننده پیشنهادی شبیه‌سازی شده است. سیستم پایه آشوب مرتبه کسری از نوع دافینگ هلمز به‌صورت زیر در نظر گرفته شده - است.



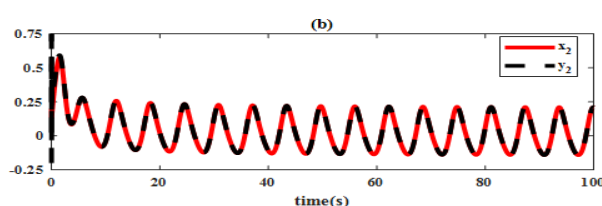
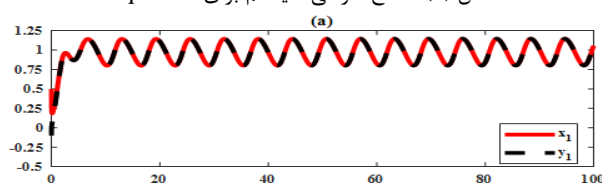
شکل (۴): خطای سنکرون سازی e_2 برای $q=0.98$ با وجود سطح لغزشی (a) مرتبه صحیح (b) مرتبه کسری



شکل (۵): ورودی کنترلی برای $q=0.98$



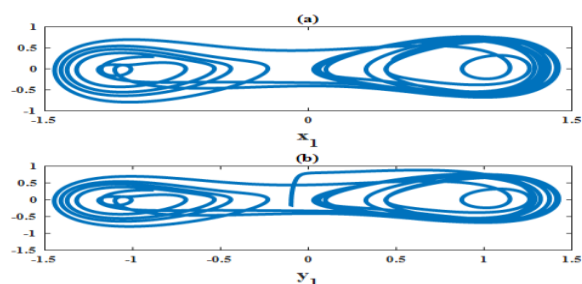
شکل (۶): سطح لغزشی سیستم برای $q=0.98$



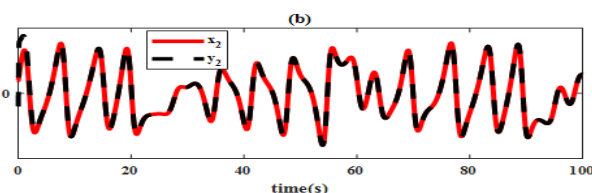
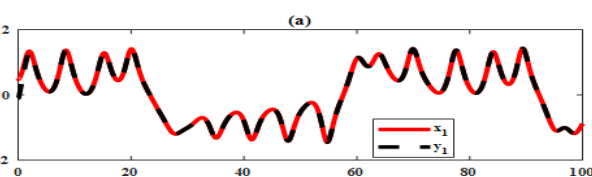
شکل (۷): حالت‌ها برای $q=0.7$ (a) $x_1(t), y_1(t)$ (b) $x_2(t), y_2(t)$

خطا در حدود 0.3% ثانیه به صفر همگرا شده و بیشترین مقدار خطا با سطح مرتبه کسری در حدود 0.12% است، در حالی که بدون سطح مرتبه کسری بیشترین مقدار آن حدود 0.6% است.

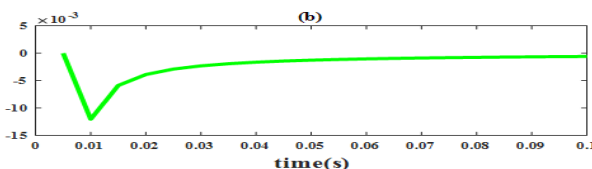
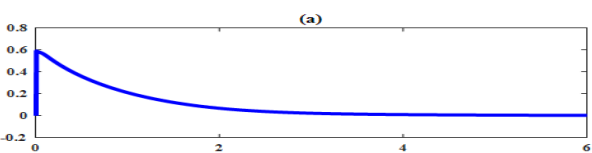
شکل (۱۰) نشان دهنده ورودی سیستم است به دلیل تغییر در حالت‌های سیستم ورودی به مقدار کمی تغییر کرده است همان‌طور که از شکل‌های (۵) و (۱۰) مشخص است ورودی به علت تابع علامت sign دارای پدیده وزوز^{۱۶} است. برای از بین بردن این نوسانات می‌توان از تابع sat استفاده کرد. این تابع نوسانات را از بین می‌برد ولی باعث ایجاد خطای ماندگار بسیار کمی می‌شود. شکل (۱۱) سطح لغزشی پیشنهادی را نشان می‌دهد می‌توان مشاهده کرد که سیستم به سرعت در فاز لغزش قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود این نتایج مشابه $q=0.98$ است.



شکل (۱): پرتوهای فاز برای $q=0.98$ (a) سیستم پایه (b) سیستم پیرو



شکل (۲): حالت‌ها برای $q=0.98$ (a) $x_1(t), y_1(t)$ (b) $x_2(t), y_2(t)$



شکل (۳): خطای سنکرون سازی e_1 برای $q=0.98$ (a) با وجود سطح لغزشی (a) مرتبه صحیح (b) مرتبه کسری

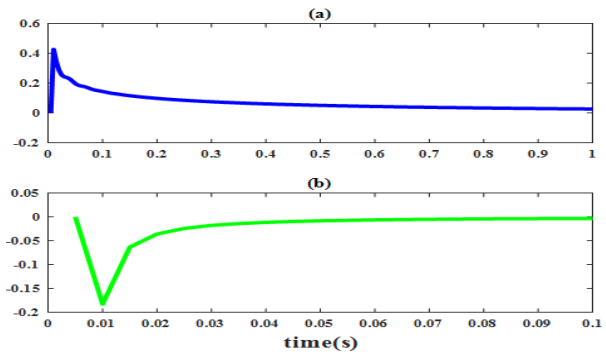
۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش کنترلی تطبیقی لغزشی برای همزمان سازی دو سیستم آشوب مرتبه کسری دافینگ هلمز در حضور عدم قطعیت پیشنهاد شده است. نامعینی و اغتشاش با استفاده از قوانین تطبیقی تقریب زده شده است. با استفاده از سطح لغزشی مرتبه کسری و کنترل کننده پیشنهادی پایداری مجانبی خطای سنکرون سازی براساس نظریه لیپانوف به اثبات رسیده است. تغییر مرتبه سیستم بر روی همگام سازی تأثیری نداشته است. از نوآوری این روش نسبت به موارد مشابه استفاده از سطح لغزشی مرتبه کسری جدید با تخمین همزمان عدم قطعیت ها برای سیستم آشوب مرتبه کسری از دافینگ هلمز است که باعث کاهش زمان تطبیق بدون استفاده از کنترل مد لغزشی ترمینال شده و افزایش دقت کنترل کننده می شود. نتایج شبیه سازی کارایی کنترل کننده پیشنهاد شده را برای سنکرون سازی سیستم های آشوب مرتبه کسری نشان می دهد.

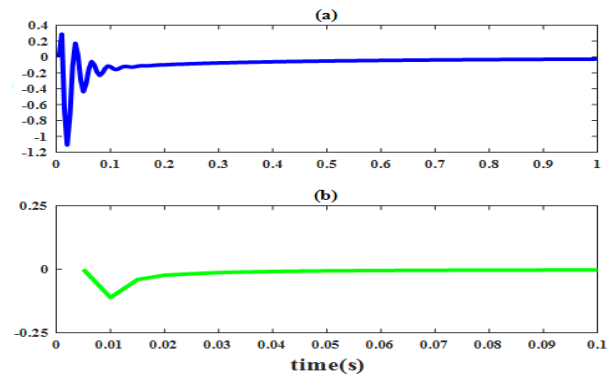
مراجع

- [۱] جناب سمانه، فانی بهادر، قسوری حسین، "بهبود رفتار گذرای توربین های بادی مبتنی بر DFIC با به کارگیری استراتژی کنترلی با محاسبات درجه کسری"، روش های هوشمند در صنعت برق، سال: ۴، ش: ۱۶، ص: ۱۷-۲۸، زمستان ۱۳۹۲.
- [۲] قیصرنژاد میثم، مجلی حامد، "طراحی کنترلر PID مرتبه کسری برای کنترل سطح سیستم سه مخزن براساس الگوریتم بهینه سازی فاخته بهبود یافته"، روش های هوشمند در صنعت برق، سال: ۵، ش: ۲۰، ص: ۵۵-۶۶، زمستان ۱۳۹۳.

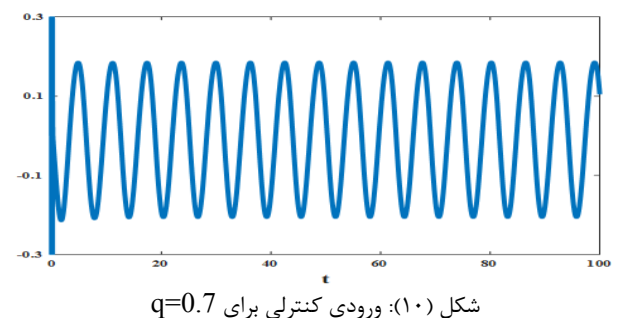
- [3] A. Naderolasli, M. Hashemi, K. Shojaei, "Approximation-based adaptive fault compensation backstepping control of fractional-order nonlinear systems: An output-feedback scheme", International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 34, no. 3, pp. 298-313, March 2020.
- [4] S. Song, B. Zhang, J. Xia, Z. Zhang, "Adaptive backstepping hybrid fuzzy sliding mode control for uncertain fractional-order nonlinear systems based on finite-time scheme", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 50, no. 4, pp. 1559-1569, April 2020.
- [5] I. Podlubny, "An introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications", Mathematics in science and engineering, vol. 198, p. xxiv+ 340, 1999.
- [6] K. Wilkie, C. S. Drapaca, S. Sivaloganathan, "A nonlinear viscoelastic fractional derivative model of infant hydrocephalus", Applied Mathematics and Computation, vol. 217, no. 21, pp. 8693-8704, Jul. 2011.
- [7] M. Rivero, J. J. Trujillo, L. Vázquez, M. P. Velasco, "Fractional dynamics of populations", Applied Mathematics and Computation, vol. 218, no. 3, pp. 1089-1095, Oct. 2011.
- [8] Y. Luo, Y. Chen, Y. Pi, "Experimental study of fractional order proportional derivative controller synthesis for fractional order systems", Mechatronics, vol. 21, no. 1, pp. 204-214, Feb. 2011.



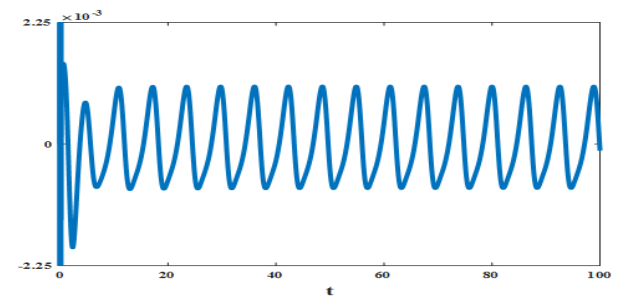
شکل (۸): خطای سنکرون سازی e_1 برای $q=0.7$ با وجود سطح لغزشی (a) مرتبه صحیح (b) مرتبه کسری



شکل (۹): خطای سنکرون سازی e_2 برای $q=0.7$ با وجود سطح لغزشی (a) مرتبه صحیح (b) مرتبه کسری



شکل (۱۰): ورودی کنترلی برای $q=0.7$



شکل (۱۱): سطح لغزشی سیستم برای $q=0.7$

همان طور که نتایج شبیه سازی نشان می دهد، با وجود اغتشاش، نامعینی در سیستم پیرو و سطح لغزشی جدید، کنترل کننده طراحی شده سنکرون سازی را برای مقادیر برابر $0.98/0$ و $0.7/0$ محقق ساخته است. نتایج برای q های کوچکتر نیز مشابه است.

- [24] A. Boulkroune, A. Bouzeriba, T. Bouden, "Fuzzy generalized projective synchronization of incommensurate fractional-order chaotic systems", *Neurocomputing*, vol. 173, pp. 606-614, Jan. 2016.
- [25] S. H. Hosseinnia, R. Ghaderi, M. Mahmoudian, S. Momani, "Sliding mode synchronization of an uncertain fractional order chaotic system", *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 59, no. 5, pp. 1637-1643, Mar. 2010.
- [26] R. Behinfaraz, S. Ghaemi, S. Khanmohammadi, "Adaptive synchronization of new fractional-order chaotic systems with fractional adaption laws based on risk analysis", *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, vol. 42, no. 6, pp. 1772-1785, Apr. 2019.
- [27] S. Wang, Y. Yu, G. Wen, "Hybrid projective synchronization of time-delayed fractional order chaotic systems", *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, vol. 11, pp. 129-138, Jan. 2014.
- [28] P. Balasubramaniam, P. Muthukumar, K. Ratnavelu, "Theoretical and practical applications of fuzzy fractional integral sliding mode control for fractional-order dynamical system", *Nonlinear Dynamics*, vol. 80, no. 1-2, pp. 249-267, Apr. 2015.
- [۲۹] هاشمی مهناز، پویان امیر، "کنترل همزمان ساز تطبیقی سیستم‌های غیرخطی آشوب در حضور اشباع ورودی و عیب عملکرد"، *روش‌های هوشمند در صنعت برق*، سال: ۱۰، ش: ۳۹، ص: ۵۳-۶۰، ۱۳۹۸.
- [30] M. Pourmahmood, S. Khanmohammadi, G. Alizadeh, "Synchronization of two different uncertain chaotic systems with unknown parameters using a robust adaptive sliding mode controller", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 16, no. 7, pp. 2853-2868, July 2011.
- [31] S. Shao, M. Chen, X. Yan, "Adaptive sliding mode synchronization for a class of fractional-order chaotic systems with disturbance", *Nonlinear Dynamics*, vol. 83, no. 4, pp. 1855-1866, Mar. 2016.
- [32] A. Modiri, S. Mobayen, "Adaptive terminal sliding mode control scheme for synchronization of fractional-order uncertain chaotic systems", *ISA transactions*, vol. 105, pp. 33-50, Oct. 2020.
- [33] M. Tabasi, S. Balochian, "Synchronization of the chaotic fractional-order Genesio-Tesi systems using the adaptive sliding mode fractional-order controller", *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 15-21, Feb. 2018.
- [34] K. Diethelm, N. J. Ford, A. D. Freed, "A predictor-corrector approach for the numerical solution of fractional differential equations", *Nonlinear Dynamics*, vol. 29, no. 1-4, pp. 3-22, July 2002.
- [35] G. Shahgholian, Z. Azimi, "Analysis and design of a DSTATCOM based on sliding mode control strategy for improvement of voltage sag in distribution systems", *Electronics*, vol. 5, no. 3, pp. 1-12, 2016.
- [36] B. Khajeh-Shalaly, G. Shahgholian, "A multi-slope sliding-mode control approach for single-phase inverters under different loads", *Electronics*, vol. 5, no. 4, Oct. 2016.
- [۳۷] طبیبی حامد، پارسا محسن، "کنترل مد لغزشی توربین گازی مبتنی بر ریت‌گر تطبیقی غیرخطی"، *روش‌های هوشمند در صنعت برق*، سال: ۱۳، ش: ۴۹، ص: ۱۹-۳۰، بهار ۱۴۰۱.
- [38] G. Shahgholian, A. Rajabi, B. Karimi, "Analysis and design of PSS for multi-machine power system based on
- [9] C. Ionescu, J. T. Machado, R. De Keyser, "Fractional-order impulse response of the respiratory system", *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 62, no. 3, pp. 845-854, Aug. 2011.
- [10] H. Delavari, P. Lanusse, J. Sabatier, "Fractional order controller design for a flexible link manipulator robot", *Asian Journal of Control*, vol. 15, no. 3, pp. 783-795, May 2013.
- [11] Y. Tang, Y. Wang, M. Han, Q. Lian, "Adaptive fuzzy fractional-order sliding mode controller design for antilock braking systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 138, no. 4, Apr. 2016.
- [12] N. Nikdel, M. Badamchizadeh, V. Azimirad, M. A. Nazari, "Fractional-order adaptive backstepping control of robotic manipulators in the presence of model uncertainties and external disturbances", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6249-6256, Jun 2016.
- [13] D. Nojavanzadeh, M. Badamchizadeh, "Adaptive fractional-order non-singular fast terminal sliding mode control for robot manipulators", *IET Control Theory & Applications*, vol. 10, no. 13, pp. 1565-1572, Aug. 2016.
- [14] Y. Wang, L. Gu, Y. Xu, X. Cao, "Practical tracking control of robot manipulators with continuous fractional-order nonsingular terminal sliding mode", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6194-6204, May 2016.
- [15] M. Gheisarneshad, H. Mojallali, "Fractional order PID controller design for level control of three tank system based on improved cuckoo optimization algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 5, no. 20, pp. 55-66, Winter 2015 (in Persian).
- [16] R. Sharma, K. Rana, V. Kumar, "Performance analysis of fractional order fuzzy PID controllers applied to a robotic manipulator", *Expert systems with applications*, vol. 41, no. 9, pp. 4274-4289, Jul. 2014.
- [17] A. Asgharnia, R. Shahnazi, A. Jamali, "Performance and robustness of optimal fractional fuzzy PID controllers for pitch control of a wind turbine using chaotic optimization algorithms", *ISA transactions*, vol. 79, pp. 27-44, Aug. 2018.
- [18] M. Bataghva, M. Hashemi, "Adaptive sliding mode synchronisation for fractional-order non-linear systems in the presence of time-varying actuator faults", *IET Control Theory and Applications*, vol. 12, no. 3, pp. 377-383, Nov. 2017.
- [19] I. Petráš, "Chaos in the fractional-order Volta's system: modeling and simulation", *Nonlinear Dynamics*, vol. 57, no. 1-2, pp. 157-170, Jul. 2009.
- [20] X. Wu, H. Wang, "A new chaotic system with fractional order and its projective synchronization", *Nonlinear dynamics*, vol. 61, no. 3, pp. 407-417, Aug. 2010.
- [21] D.-y. Chen, Y.-x. Liu, X.-y. Ma, R.-f. Zhang, "Control of a class of fractional-order chaotic systems via sliding mode", *Nonlinear Dynamics*, vol. 67, no. 1, pp. 893-901, Jan. 2012.
- [22] C. Yin, S.-m. Zhong, W.-f. Chen, "Design of sliding mode controller for a class of fractional-order chaotic systems", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 17, no. 1, pp. 356-366, Jan. 2012.
- [23] Y. Wu, H. Lv, "Adaptive neural network backstepping control for a class of uncertain fractional-order chaotic systems with unknown backlash-like hysteresis", *Aip Advances*, vol. 6, no. 8, p. 085121, Aug. 2016.

sliding mode control theory", International Review of Electrical Engineering, vol. 4, no. 2, Oct. 2010.

[۳۹] عباس‌نژاد احسان، حریفی عباس، "طراحی کنترل کننده مد لغزشی برای ربات تعادلی دو چرخ"، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۵، ش: ۱۹، ص: ۴۵-۵۴، ۱۳۹۳.

[40] A. Jafari, G. Shahgholian, "Analysis and simulation of a sliding mode controller for mechanical part of a doubly-fed induction generator based wind turbine", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 11, No. 10, pp. 2677-2688, July 2017.

[41] P. Gao, G. Zhang, H. Ouyang, L. Mei, "An adaptive super twisting nonlinear fractional order PID sliding mode control of permanent magnet synchronous motor speed regulation system based on extended state observer", IEEE Access, vol. 8, pp. 53498-53510, 2020.

زیر نویس‌ها

1. Fractional calculus
2. Abel
3. Isochrones curve
4. Fractional order controller
5. Disturbance
6. Fractional order proportional integral derivative
7. Multi-Input Multi-Output
8. Chaos
9. Volta
10. Rikitake
11. Chen
12. Financial
13. Lorenz
14. Arendo
15. Liue
16. Chattering phenomenon

Adaptive Sliding Synchronization of Duffing-Holmes Fractional Order Chaotic Systems with Uncertainty and the Fractional Order Sliding Surface

Samaneh Payandeh Najafabadi^{1,3}, Mahnaz Hashemi^{2,3}

- 1- M.Sc, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, samanehpaiandeh@sel.iaun.ac.ir
- 2- Assistant Professor- Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, m.hashemi@pel.iaun.ac.ir
- 3- Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract: In this paper, the problem of adaptive sliding synchronization of Duffing-Holmes fractional order chaotic systems is investigated in the presence of uncertainty, disturbance with the fractional order sliding surface. Master and Slave systems dynamics include uncertainty. In this design, the adaptive sliding control method is used. At first, the upper bound of uncertainty and disturbance in the slave system is estimated and compensated, then a new fractional order sliding surface is designed for two systems synchronization as the slave system can follow the master system. Despite the presence of uncertainty and disturbance, the proposed adaptive sliding mode controller guarantees the asymptotic stability of synchronization error and boundedness of close loop signals with the fractional order sliding surface. Finally, simulation results show the effectiveness and correctness of the control method presented in synchronization of two Duffing-Holmes fractional order chaotic systems together with the fractional order sliding surface and the estimation of the system uncertainty.

Keywords: Fractional Order Sliding Surface, Duffing-Holmes Fractional Order Chaotic System, Adaptive Sliding Control, Uncertainty and Disturbance, Synchronization.