

طراحی و شبیه سازی کنترل کننده مد لغزشی - فازی در سیستم تنظیم توربین آبی

فریبا حیدرپور^۱غضنفر شاهقلیان*^۲

چکیده

سیستم تنظیم توربین آبی یک سیستم دینامیکی پیچیده غیرخطی و متغیر با زمان با مشخصه غیرحداقل فاز است و نقش مهمی در کنترل فرکانس و توان خروجی واحد تولید برق آبی دارد. کنترل مد لغزشی یک روش کنترل مقاوم با فیدبک حالت است که ساختار آن برای رسیدن به عملکرد مطلوب تغییر پیدا می کند. در این مقاله کنترل کننده مد لغزشی ارائه شده که در آن پدیده چترینگ حاصل از مدل لغزشی با استفاده از کنترل فازی به حداقل می رسد و قوانین منطق فازی از قضیه پایداری لیاپانوف برای اطمینان از ثبات سیستم تنظیم توربین آبی قابل استخراج است. معادلات حالت توصیف کننده مدل دینامیکی غیرخطی با مخزن اضافی بیان شده و رفتار دینامیکی سیستم با پارامترهای مختلف بررسی شده است. نتایج شبیه سازی سه روش کنترلی PID، کنترل مد لغزشی (SMC) و روش کنترل مد لغزشی فازی (FSMC) ارائه شده است. و همچنین از نظر بهبود عملکرد و پایداری بررسی شده است.

واژه های کلیدی

سیستم تنظیم توربین آبی، کنترل فرکانس بار، کنترل مد لغزشی، کنترل منطق فازی.

۱. کارشناسی ارشد - مرکز تحقیقات ریز شبکه های هوشمند، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران.

۲. دانشیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران، shahgholian@iaun.ac.ir

مقدمه

بدلیل مشکلات ناشی از نوسانات قیمتی منابع سوخت فسیلی، منابع تجدیدپذیر به عنوان جایگزین مناسب سوخت‌های فسیلی در دهه‌های اخیر مورد توجه قرار گرفتند. به منظور پاسخگویی به افزایش تقاضای بار مصرف کنندگان و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک، تولید توان آبی در کشورهای در حال توسعه در اولویت قرار گرفته است و نیروگاه‌های برقآبی ساخته شده‌اند. نیروی برقآبی حدود ۶۵ درصد از انرژی الکتریکی تولیدی منابع تجدیدپذیر را شامل می‌شود و حدود ۲۰ درصد تولید کل انرژی توسط نیروگاه برقآبی تولید می‌شود. کشور ایران بزرگترین تولید کننده برق منطقه خاورمیانه و جزء بیست کشور بزرگ تولید برق در جهان است. انرژی برق مورد نیاز کشور توسط نیروگاه‌های وابسته به وزارت نیرو، صنایع بزرگ و بخش خصوصی متشکل از نیروگاه بخاری، نیروگاه گازی، نیروگاه سیکل ترکیبی، نیروگاه دیزلی، نیروگاه آبی، توربین بادی، واحد فتوولتائیک و نیروگاه بیودیزل تامین می‌شود. نیروگاه‌های برقآبی ایران در حدود ۴/۵ درصد و نیروگاه‌های حرارتی حدود ۹۴/۵ درصد تولید برق کشور را برعهده دارند (مهدویان ۱ و همکاران، ۲۰۱۶، شاهقلیان، ۲۰۱۷). نیروگاه برقآبی می‌تواند براساس ریزش ارتفاع آب، طبیعت بار و مشخصات توربین مطابق شکل (۱) تقسیم‌بندی شوند. مدل‌های ارائه شده برای توربین آبی به دو گروه مدل خطی و مدل غیرخطی تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل خطی توربین، همراه با یک صفر و قطب و خاصیت ناکمینه فاز بودن^۲ به صورت تابعی که تغییرات توان مکانیکی را برحسب میزان بازشدگی دریچه توربین مدل می‌کند که توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته‌است. این مدل، ستون آب را غیرالاستیک و اثرات دیواره‌های الاستیک و مخزن فشارشکن را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، به این نتیجه رسیدند که برای تنظیم کنترل کننده-های سرعت با فرض توربین ایده‌آل، جهت مطالعه نوسانات کم و دامنه‌های تغییر بار کوچک مدل غیرخطی کارایی بیشتری

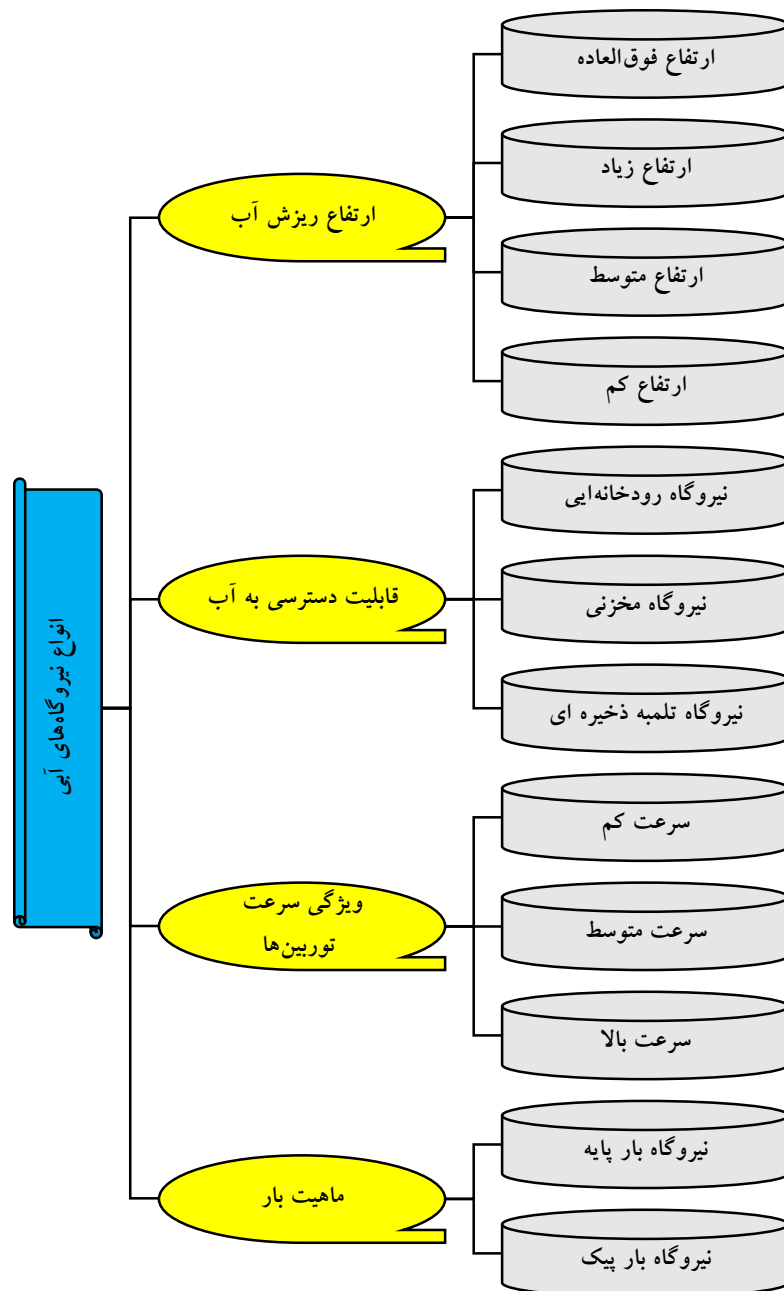
دارد. انحراف فرکانس موضوعی نامطلوب است بنابراین توربین-ها را براساس مشخصه سرعت بسیار دقیق طراحی می‌کنند. در نتیجه، ثابت نگه داشتن فرکانس موضوعی بسیار با اهمیت است که این کار با پیاده سازی کنترل فرکانس بار^۳ (LFC) امکان‌پذیر است (مهدویان و همکاران، ۲۰۱۵).

تاکنون مقالات مختلفی در زمینه کاربرد سیستم تنظیم توربین آبی^۴ (HTGS) برای کنترل فرکانس بار در سیستم قدرت ارائه شده است (خو^۵ و همکاران، دی‌کانوچ^۶ و همکاران ۱۹۹۵، تاپا^۷ و همکاران، ۲۰۱۵، لی^۸ و همکاران، ۲۰۱۶، زو^۹ و همکاران، ۲۰۱۷). در مقاله (لینگ و تائو^{۱۰}، ۲۰۰۶) رفتارهای انشعاب هاف یکی از دلایل رفتارهای نوسانی می‌باشد. از مزایای انشعاب هاف می‌توان به دامنه و فرکانس ثابت در پارامترهای کنترلی IP (کنترل کننده تناسبی-انتگرالی) اشاره کرد که این سیستم، توسط نوعی تئوری به نام انشعاب سیستم‌های دینامیکی غیرخطی شبیه‌سازی شده است. در مقاله (جیانگ^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۶) برنامه‌نویسی تکاملی برای بهینه‌سازی در پارامترهای PID (کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر) معرفی شده و دارای ویژگی همگرایی است که نشان‌دهنده کاربرد بیشتر پارامترهای کنترلی PID برای سیستم توربین آبی است. در مقاله (چن^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۳) یک مدل ریاضی از اثرات مخزن اضافی با استفاده از معادلات فضای حالت برای یک سیستم غیرخطی دینامیکی با نمودار دو شاخه شدن شکل موج، مدار فاز، نقشه پوانکاره^{۱۳} و طیف قدرت ارائه شده و نتایج نشان داده که مقدار ضریب دیفرانسیل باید بین دو مقدار باشد که دورترین مقدار بهترین حالت را ایفا کرده‌است. در مقاله (چن و همکاران، ۲۰۱۴) یک کنترل کننده PID برای سیستم HTGS طراحی شده‌است و هدف از طراحی آن، بهبود و مرتب‌سازی الگوریتم ژنتیک نوع دو (NSGAI)^{۱۴} است که به عنوان ارزیابی، استفاده از NSGAI برای کارایی بیشتر اهداف کنترلی می‌باشد. یک مدل ریاضی همپلتون برای یک سیستم تنظیم توربین آبی شامل آیتم کسری و زمان تاخیر در مقاله (خو و همکاران،

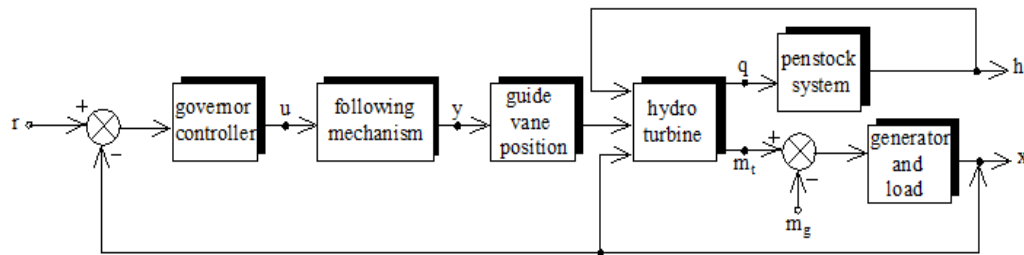
⁸ Li⁹ Zhu¹⁰ Ling and Tao¹¹ Jiang¹² Chen¹³ Map Poincare¹⁴ Non-Sorting Genetic Algorithm II¹ Mahdavian² Non-Minimum Phase³ Load Frequency Control⁴ Hydro-Turbine Governing System⁵ Xu⁶ Djukanovic⁷ Thapa

فرکانس بار دارای کاربرد عملی بسیار می‌باشد که از مزایای آن مقاومت SMC و حذف چترینگ است و نتایج شبیه‌سازی، این روش کنترلی را اثر بخش می‌داند. در مقاله (کیان و همکاران، ۲۰۱۰) روشی براساس کنترل کننده لغزشی برای تنظیم کننده سرعت توربین آبی ارائه شده که در آن برای کاهش مشکل چترینگ در کنترل کننده مد لغزشی از سیستم رابط فازی برای تنظیم بهره کنترل کننده استفاده شده است.

بررسی شده که در آن یک مدل دینامیکی عمومی با توجه به سیستم هیدرولیک سرو فشار ارائه شده است. در مقاله (چن و همکاران، ۲۰۱۴) یک مدل ریاضی غیرخطی برای سیستم توربین آبی با مخزن اضافی با استفاده از معادلات فضای حالت و رفتارهای دینامیکی غیرخطی برای ضرایب مختلف توسط توابع لیاپانوف تنظیم شده است. برای کنترل سیستم و رسیدن به یک حالت پایدار، کنترل فازی پیشنهاد شده و همچنین کنترل مد لغزشی براساس طرح کنترل



شکل (۱): تقسیم‌بندی نیروگاه برق آبی



شکل (۲): ساختار سیستم تنظیم کننده در نیروگاه برقآبی

اشتباهات مدلسازی می تواند اثرات سوء بر سیستم های کنترل غیرخطی بگذارد. یکی از مهمترین رویکردهای برخورد با عدم قطعیت، مدل کنترل مقاوم است. کنترل مد لغزشی، یک رویکرد کنترل مقاوم است. روش های مختلف ارائه شده دارای عدم قطعیت هستند و برای نقطه تعادل خاصی موثر می باشند. در پژوهش های فوق، سیستم ها نتوانستند در برابر این تغییرات از خود مقاومت نشان دهند و یکی دیگر از عوامل ایجاد نوسانات، استفاده از بهره کنترلی بزرگ است.

سیستم تنظیم توربین آبی یکی از مهمترین بخش های نیروگاه برقآبی بوده و نقش مهمی در کنترل بار فرکانس و تقسیم بار بین واحدها، پایداری و بهره برداری اقتصادی دارد (چن^۵ و همکاران، ۲۰۱۴، لیو کینگ^۶ و همکاران، ۱۹۹۵). در این مقاله روش ترکیبی از مدل لغزشی و فازی برای کنترل فرکانس بار ارائه شده است و برای اینکه سیستم توانایی رسیدن به عملکرد مطلوب را با وجود عدم قطعیت ها داشته باشد از یک نوع مدل الگوریتم استفاده شد. این الگوریتم باعث شد تا تغییرناپذیری سیستم از بین برود و تمامی حالت های تخمین زده شده به سمت سطح لغزش بروند و پدیده چترینگ را کاهش دهد. مزیت اصلی استفاده از این روش کنترلی، استحکام قوی در برابر عدم قطعیت ها می باشد. برای اطمینان از پایدار بودن سیستم HTGS، قوانین منطق فازی توسط تابع لیاپانوف تعیین گشته و نتایج شبیه سازی در حضور عدم قطعیت ها تعیین شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که کنترل FSMC نسبت به کنترل کننده های دیگر برای پایداری سیستم HTGS بهتر است. با وجود عدم قطعیت در پارامترها، کنترل کننده پیشنهادی این امکان را دارد که تمامی مقادیر

در مقاله (ژانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۵) یک مدل ریاضی غیرخطی دینامیکی با بار گذرا، با استفاده از ضرایب انتقال دینامیکی غیرخطی ارائه شده که نتایج شبیه سازی عددی نشان می دهد که سیستم در یک محدوده بحرانی گذرا وجود دارد و رفتارهای پویا در کنترل سیستماتیک توربین آبی در نوع ساقه نرم و قابل انعطاف روند گذرای را فراهم می سازد. در مقاله (خلفان^۲ و همکاران، ۲۰۱۳) کنترل بار فرکانس برای سیستم قدرت در هر منطقه براساس انحراف فرکانس آن منطقه طراحی شده است. کنترل فازی برای بهره برداری از پارامترهای الگوریتم تطبیقی، به حداقل رساندن خطاهای تقریب و اثرات اغتشاشات خارجی کاربرد دارد که تضمین کننده پایداری سیستم حلقه بسته است. در مقاله (خلفان و همکاران، ۲۰۱۳) کنترل بار فرکانس برای سیستم قدرت در هر منطقه براساس انحراف فرکانس آن منطقه طراحی شده است. کنترل فازی برای بهره برداری از پارامترهای الگوریتم تطبیقی، به حداقل رساندن خطاهای تقریب و اثرات اغتشاشات خارجی کاربرد دارد که تضمین کننده پایداری سیستم حلقه بسته است. کنترل ارائه شده با استفاده از روش کنترل تطبیقی مستقیم و غیرمستقیم منطق فازی^۳ (DLAFLC) که یک سیگنال کمکی برای جبران خطاهای تقریب فازی و رسیدن به عملکرد ردیابی H_∞ است، توسعه یافت. در مقاله (می^۴ و همکاران، ۲۰۱۳) براساس دو کنترل کننده مد لغزشی و فرکانس بار، سیستم قدرت با عدم قطعیت برای سطح سوئیچینگ در هر منطقه به بهبود عملکرد سیستم می پردازد. با استفاده از کنترل پیشنهادی، تغییرات نوسانات فرکانس به سمت صفر همگرا می شوند که برای اثربخشی سیستم از کنترل حالت استفاده شده است.

⁴ Mi⁵ Chen⁶ Luqing¹ Zhang² Khalfan³ Direct-Indirect Adaptive Fuzzy Logic Control

$$\frac{H_D(s)}{Q_D(s)} = -Z_C \frac{\sinh(r\Delta x)}{\cosh(r\Delta x)} = -Z_C \tanh(r\Delta x) \quad (2)$$

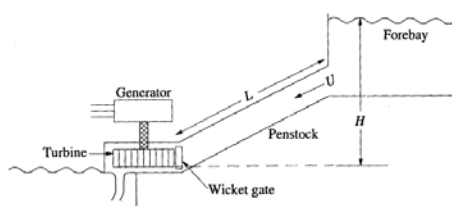
تابع انتقال ضربه آب $[G_h(s)]$ یک تابع تانژانت هیپربولیک غیرخطی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$G_h(s) = -h_w \tanh\left(\frac{T_r s}{2}\right) = -h_w \frac{\sum_{i=0}^n (0.5 T_r s)^{2i+1}}{\sum_{i=0}^n (2i+1)!} \quad (1)$$

که در آن T_r ثابت زمانی ضربه آب و h_w برابر با نسبت زمان شروع آب (T_w) به ثابت زمانی ضربه آب است.

مدل توربین آبی

شکل (۳) یک طرح ساده از یک نیروگاه آبی را نشان می‌دهد. انرژی آب ناشی از دو عامل جریان آب و اختلاف ارتفاع است. در نیروگاه‌های آبی، از دو نوع توربین ضربه‌ای^۵ و عکس‌العملی^۶ استفاده می‌شود. در توربین‌های ضربه‌ای، انرژی پتانسیل آب ابتدا در مسیر شیب‌دار پنستاک^۷ به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. سپس از طریق نازل با سرعت بالا به پره‌های قاشقی شکل توربین (در فشار معمولی جو) برخورد می‌نماید. در توربین‌های عکس‌العملی، آب از طریق کانال حلزونی شکل به سمت توربین هدایت می‌شود. در این نوع توربین‌ها، قسمت گردنده در داخل آب قرار دارد. توربین فرانسویس^۸ یکی از معمول‌ترین توربین‌های عکس‌العملی است که در نیروگاه‌ها از آن استفاده می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۱۳، اکسیو^۹، ۲۰۱۵).



شکل (۳): یک طرح ساده از نیروگاه برق آبی

مشخصه یک نیروگاه برق آبی با استفاده از راندمان (η)، ارتفاع ریزش موثر آب (h)، گشتاور تولید شده (T_M)، گشتاور بار (T_L)، حد گشایش دریچه آب (g) و سرعت روتور (ω_r) توصیف می‌شود. مشخصه دینامیکی غیرخطی توربین کاپلان بوسیله

موجود در فرمول‌ها را با مقادیر بهینه واقعی مقایسه کند و بهترین مقداری که بین این مقادیر وجود دارد را بوسیله سعی و خطا انتخاب کند.

مدل غیرخطی سیستم تنظیم توربین آبی

اولین مطالعات برای به دست آوردن مدل غیرخطی توربین توسط الدنبرگ^۱ و دنلسون^۲ انجام شد. آن‌ها از دیدگاه مدل-سازی، نوآوری مهمی را در تحقیقات خود ارائه دادند. شکل (۲) ساختار سیستم تنظیم کننده نیروگاه برق آبی با توربین فرانسویس را نشان می‌دهد که در آن u خروجی تنظیم کننده، y راهنمای موقعیت پره، q انحراف جریان توربین افزایشی، m_g ، m_t گشتاور مکانیکی توربین و لنگر، h انحراف سر توربین آبی و r اختلال فرکانسی می‌باشند.

مدل پنستاک آبگذر

راندمان یک توربین برق آبی تحت تاثیر ویژگی‌های ستون‌های آبی است که آن را تغذیه می‌کند. این ویژگی‌ها شامل اثرات اینرسی آب، قابلیت فشرده شدن آب و الاستیسیته دیواره مجرای آب در پنستاک می‌باشد. تاثیر لختی آب آبی است که تغییرات جریان آب توربین نسبت به تغییرات باز شدن دریچه توربین، با تأخیر زمانی صورت می‌گیرد. قابلیت ارتجاع دیواره، ایجاد امواج سیار فشار و جریان در کانال به پدیده ضربه‌زنی آب موسوم است. برای مدل‌سازی توربین آبی به صورت غیرخطی با توجه به نظریه هیدرولیک، معادله بین دو بخش ارتفاع (H) و فلوی آب (Q) به صورت زیر بیان می‌گردد (فنگ^۳ و همکاران، ۲۰۰۸):

$$\begin{bmatrix} H_D(s) \\ Q_D(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(r\Delta x) & -Z_C \sinh(r\Delta x) \\ -\sinh(r\Delta x) & \cosh(r\Delta x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_U(s) \\ Q_U(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن D و U پارامترهای جریان بالا و پایین خط لوله را نشان می‌دهد و پارامترهای Z_C ، r و Δx به ترتیب امپدانس هیدرولیک، پارامتر دریچه‌ای و طول لوله می‌باشند. اگر از مقامت هیدرولیکی صرف‌نظر شود (به عبارت دیگر $H_q(s)$ برابر صفر است)، تابع انتقال فلو و ارتفاع عبارت است از (یوان^۴ و همکاران، ۲۰۱۵):

⁷ Penstock

⁸ Francis

⁹ Xu

¹ Aldenberg

² Denleson

³ Fang

⁴ Yuan

⁵ Impulse

⁶ Reaction

که در آن K_D ضریب گشتاور میرا کننده، J_M ممان اینرسی، T_M گشتاور مکانیکی، T_E گشتاور الکتریکی، E_F خروجی سیستم تحریک و ثابت زمانی گذرای مدار باز برحسب ثانیه است. راکتانس‌های مانا و حالت گذرا محور طولی X'_d و X_d می‌باشند. با صرفنظر از تغییرات T'_{do} مولفه‌های دو محوری شار استاتور ($d\lambda_q/dt, d\lambda_d/dt$) کمیت‌های استاتور فقط دارای مولفه فرکانس اصلی بوده و معادلات ولتاژ استاتور به صورت معادلات جبری می‌باشند.

مدل سرو موتور

موتور برق آبی به عنوان محرک توربین برای تقویت سیگنال کنترل و برق استفاده می‌شود و با معادله دیفرانسیل زیر نشان داده می‌شود (لی و ژو^۵، وانگ^۶ و همکاران، ۲۰۱۶):

$$\dot{y} = (u - y) / T_y \quad (7)$$

که در آن u خروجی کنترل‌کننده، y خروجی توربین فرانسسیس و T_y ثابت زمانی سرو می‌باشد.

معادلات غیرخطی سیستم تنظیم توربین آبی

با تجزیه و تحلیل معادلات دینامیک غیرخطی، معادلات سیستم برای مدل یکپارچه با عدم قطعیت^۷ (IMWU) با استفاده از معادلات فضای حالت به صورت زیر بیان می‌شوند (جیو^۸ و همکاران، ۲۰۱۵):

$$\dot{x}_1 = x_2 + d_1 \quad (8)$$

$$\dot{x}_2 = x_3 + d_2 \quad (9)$$

$$\dot{x}_3 = -a_0 x_1 - a_1 x_2 - a_2 x_3 + y + d_3 \quad (10)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{T_y} (u - y) + d_4 \quad (11)$$

$$\dot{\delta} = x_1 + d_5 \quad (12)$$

توابع غیرخطی فلوی توربین (f_q) و گشتاور (f_t) به صورت زیر بیان می‌شود (کیشور^۱، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۹):

$$\begin{cases} q = f_q(h, g, \omega_r) \\ T_M = f_t(h, g, \omega_r) \end{cases} \quad (2)$$

دینامیک آنالیز سیستم نسبت به نقطه عملکرد می‌تواند با تغییر نقطه کار بررسی شود (استراح^۲ و همکاران، ۲۰۰۵). برای دینامیک سیگنال کوچک، معادلات دیفرانسیل مرتبه اول سیستم گاورنر توربین آبی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (کیشور و همکاران، ۲۰۰۵):

$$\begin{cases} q = q_h h + q_g g + q_w \omega_r \\ T_M = m_h h + m_g g + m_w \omega_r \end{cases} \quad (3)$$

ضرایب q_h, q_g, q_w مشتقات جزئی جریان آب نسبت به ارتفاع موثر آب، حد گشایش دریچه و سرعت توربین و ضرایب m_h, m_g, m_w مشتقات جزئی توان خروجی توربین نسبت به ارتفاع آب، حد گشایش دریچه و سرعت توربین است. این ضرایب به حد بارگذاری ماشین و به مشخصه توربین آبی در نقطه کار بستگی دارند (لیو^۳، ۲۰۰۷).

مدل ژنراتور سنکرون

در مدل مرتبه سه ژنراتور سنکرون از اثر سیم پیچ‌های دمپر از حالت‌های گذرای الکتریکی در معادله ولتاژ استاتور صرفنظر می‌شود و معادلات جبری برای استاتور در نظر گرفته می‌شود. در مدل مرتبه سه اثر دینامیکی مدار تحریک ژنراتور در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از سه متغیر حالت زاویه بار (δ)، سرعت روتور (ω_r) و ولتاژ گذرای محور عرضی (E'_q) معادلات تعیین می‌گردد. معادلات دیفرانسیل مدل مرتبه سه ماشین سنکرون عبارتند از (چن و همکاران، ۲۰۱۳، جیانگ^۴، ۲۰۰۹):

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J_M} [T_M - T_E - K_D (\omega_r - \omega_b)] \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega_b (\omega_r - 1) \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} E'_q = \frac{1}{T_{do}} [E_F - E'_q - (X_d - X'_d) i_d] \quad (6)$$

⁵ Li and Zhou

⁶ Wang

⁷ Integrated Model With Uncertainties

⁸ Guo

¹ Kishor

² Strah

³ Liu

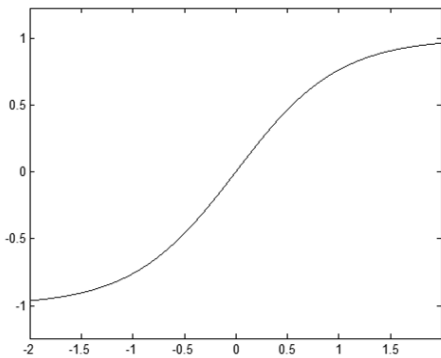
⁴ Jeiang

η مقادیر ثابتی هستند. با مشتق‌گیری از معادله خطا و جایگذاری معادلات خواهیم داشت (لی و همکاران، ۲۰۱۳):

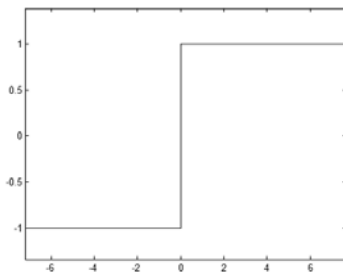
$$u_{eq} = \frac{J_m T_y}{q_h q_g} \left[\frac{d^2 \omega_r}{dt^2} + \lambda \frac{d}{dt} e - F(x) \right] \quad (17)$$

m_h

روش کنترل لغزشی یکی از حالت‌های کنترل ساختار متغیر است که در این روش حالت‌های سیستم توسط قوانین کنترلی روی مسیر از پیش تعیین شده‌ای (سطح سوئیچینگ) قرار می‌گیرد و با دینامیک مشخصی که توسط طراح مشخص می‌شود که می‌تواند غیر از دینامیک سیستم باشد به سمت نقطه مورد نظر (مبدأ) حرکت می‌کند. اگر اغتشاش وارد شده به سیستم دارای علامت معینی باشد در هر لحظه با اعمال قانون کنترلی معین می‌توان اثر این اغتشاش را از بین برد، که برای این عمل از تابع علامت $\tanh(s/\epsilon)$ استفاده می‌شود. دقت زیاد، پاسخ دینامیکی سریع، سادگی پیاده‌سازی و پایداری مقاوم از مهمترین عوامل توسعه این روش است. شکل‌های (۴) و (۵) روش کار مشابهی با یکدیگر دارند و شامل ۳ ناحیه منفی، صفر و مثبت می‌باشند و دارای برد یکسانی هستند که برای حذف چترینگ از این نمودارها می‌توان استفاده کرد.



شکل (۴): $\text{sgn}(x)$



شکل (۵): $\tanh(s/\epsilon)$

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_r = & \frac{1}{T_y} [b_3 y + (b_0 - a_0 b_3) x_1 \\ & + (b_1 - a_1 b_3) x_2 + (b_2 - a_2 b_3) x_3 \\ & - \frac{v_s}{x'_d} E'_q \sin \delta \\ & - \frac{v_s^2}{2} \left(\frac{1}{Z_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \sin(2\delta) - K_D \omega_r] + d_6 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\dot{E}_q = \frac{1}{T_{do}} \left[E_f - E'_q - (x_d - x'_d) + \frac{E'_q - v_s \cos \delta}{x'_d} \right] + d_7 \quad (14)$$

که در آن d_1 الی d_7 عدم قطعیت‌ها (شامل مدل‌سازی خطای ناشی از فرض، مدل غیرخطی، اغتشاشات درونی و خارجی)، γ سرعت دورانی توربین، δ زاویه روتور، J_M ثابت زمانی ژنراتور مکانیکی، v_s ولتاژ باس بی‌نهایت، x'_d راکتانس گذرای محور E'_q ولتاژ فاصله آرماتور، Z_q راکتانس متعامد محور، K_D ضریب دمپر، T_{do} ثابت زمانی میدان سیم‌پیچ، E_f ولتاژ واقعی، x_1, x_2, x_3 متغیرهای میانی توربین می‌باشند.

کنترل کننده مد لغزشی

روش کنترل مد لغزشی یکی از مهمترین روش‌های کنترل غیرخطی می‌باشد که از مشخصه‌های بارز آن، عدم حساسیت به تغییر پارامترها، دفع کامل اغتشاش و مقابله با عدم قطعیت است. این کنترل‌کننده ابتدا سیستم را از حالت اولیه با استفاده از قانون رسیدن به سطح تعریف شده لغزش که از پایداری مجانبی لیاپانوف برخوردار است، رسانده و سپس با استفاده از قانون لغزشی آن را به حالت تعادل می‌رساند. در این مد یک سطح سوئیچینگ تعریف می‌شود که این سطح دقیقاً برابر با خطا در نظر گرفته می‌شود و هدف به صفر رساندن این خطا است. با استفاده از توابع لیاپانوف مقدار انرژی کنترلی عبارت است از:

$$e = s = \lambda e + \dot{e} = 0 \quad (15)$$

که در آن λ یک مقدار ثابت است و یک تابع مد لغزشی ابر-صفحه^۱ (u_{sw}) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$u_{sw} = \frac{J_m T_y}{q_h q_g} \eta \text{sgn}(s) \quad (16)$$

m_h

¹ Hyper-Plane

نتایج شبیه سازی

با توجه به شکل های (۶) الی (۸)، مشاهده می شود که وابستگی گردشی (دارای دوره تناوب تکرار) با وجود اختلاف فاز، بین زاویه بار و سرعت روتور وجود دارد. این بدان معناست که هر چه Tr بزرگتر می شود تا جایی که در محدوده مذکور قرار داشته باشد به ازای چند سیکل از سرعت سیکلی از زاویه بار را خواهیم داشت. اما چنانچه این مقدار از محدوده $1/72$ تجاوز کرده و مانند شکل (۸) به مقدار $2/4$ برسد، به سمت نامیرایی رفته و دیگر سیکل های تکراری وجود نخواهد داشت.

از طرفی با بررسی سیگنال سرعت در مد زمان [شکل (۶)] مشاهده می شود که هر چه ضرائب ثابت زمانی پایین تر باشند مقادیر دامنه برای سرعت نیز پایین تر بوده ولی در ازای آن با سرعت بیشتری به پایداری می رسد. هر چه که این مقدار بزرگتر شود خواهیم دید که سرعت سیستم کند شده و دامنه نوسانات افزایش می یابد، اما این افزایش تا جایی سیکل تکرار را در بر خواهد داشت که ثابت زمانی بیش از حد (بزرگتر از $1/72$) نشده باشد زیرا که در این حالت نه تنها سیستم بسیار کند می شود بلکه به سمت نامیرایی میل می کند.

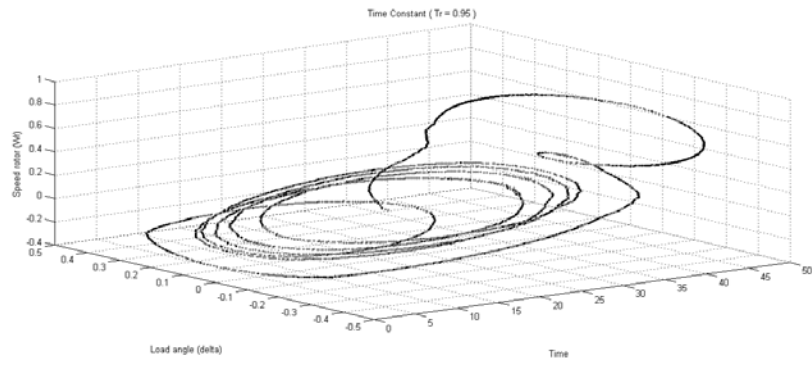
در شکل های (۶) و (۷) می توان تغییر دو پارامتر اساسی کنترل لغزشی را برحسب یکدیگر و برحسب زمان نیز مشاهده نمود. در شکل (۸) نیز مشاهده می شود که با افزایش مقدار ثابت زمانی Tr سیستم ابتدا تثبیت و بعد از گذشتن از محدوده گفته شده به سمت ناپایداری میل می کند. در این مقاله، وظیفه اصلی سیستم توربین آبی تنظیم توان خروجی به شبکه برای پیگیری فرکانس کل شبکه است و پارامترهای توربین آبی وابستگی زیادی به زمان و نقطه کار سیستم دارند و این به عنوان یک مشکل اساسی برای ساخت نمونه اولیه و طرح کلی سیستم محسوب می شوند. مطابق الگوریتمی که برای این سیستم بکار برده شد، امکان آن وجود دارد که با بکارگیری توانایی های الگوریتم موجود، برخی از نواقص کنترل کننده های

قبلی را رفع کرد. این الگوریتم بدین گونه عمل می کند که سیستم را در شرایط مختلف عملیاتی مورد آزمایش قرار می دهد. در واقع تمامی داده های مقاله را می گیرد و آن ها را با مقادیر بهینه واقعی مقایسه می کند که این روش به صورت یک حلقه تکرار می شود. (تکرار حلقه بصورت دستی تنظیم می شود). این روش آنقدر تکرار می شود تا سیستم بتواند از طریق سعی و خطا بهترین بازه مطلوب را انتخاب کند.

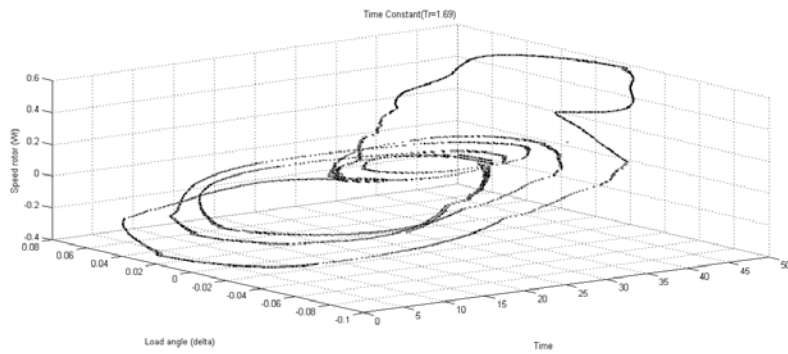
با توجه به شکل (۹) می توان دید که با وجود الگوریتم پیشنهادی سیستم سریعتر به سمت همگرایی رفته و نسبت به روش هایی که بدون وجود این الگوریتم بودند پایداری بیشتری دارد.

نتیجه گیری

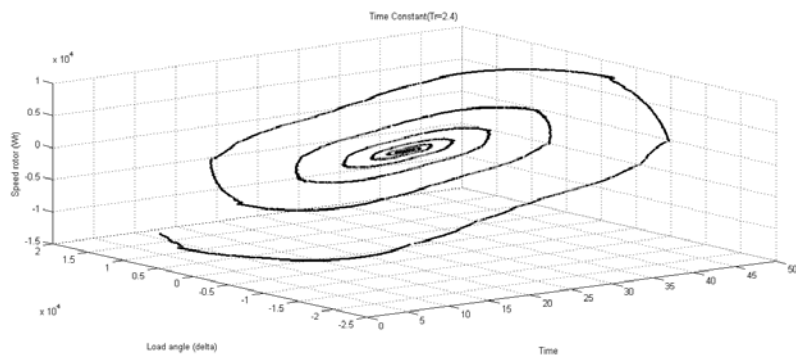
مدل های ریاضی غیرخطی نمی تواند ثبات سیستم های پیچیده را به خوبی توصیف کند و لذا از مدل های غیرخطی ریاضی برای توصیف ویژگی های دینامیکی سیستم های حاکم بر توربین آبی استفاده می شود. در این مقاله، از یک مدل ریاضی غیرخطی دینامیکی حاکم بر سیستم HTSG با استفاده از ضرایب انتقال دینامیکی غیرخطی استفاده شده که رفتارهای غیرخطی دینامیکی حاکم بر سیستم از جمله نمودار شکل موج زمان، مدار فاز ارائه شده اند. نتایج شبیه سازی عددی، سیستم را در محدوده بین $2/4$ و $0/95$ برای rT مورد بررسی قرار داده و نشان داده شد که سیستم در محدوده $rT = 2/4$ بیش از حد بی نظم می شود. زمانی که HTSG در شرایط بی نظمی به ثبات برسد، کل سیستم به مقادیر اولیه حساس می شود و در نتیجه برای طراحی یک کنترل کننده مناسب، سیستم بیش از حد بی نظم به یک حالت پایدار می رسد. نتایج، اثربخشی و دقت روش ارائه شده را نشان می دهد. در شکل (۹) می توان مشاهده کرد تغییرات اعمالی بر روی سیستم مشابه، نتایج مساعدتری را بدست آورده است.



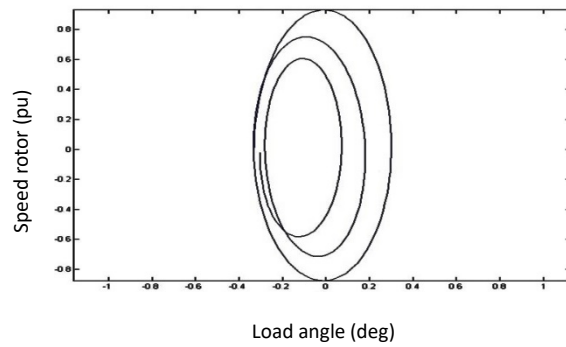
شکل (۶): شبیه‌سازی در ثابت زمانی ۰/۹۵



شکل (۷): شبیه‌سازی در ثابت زمانی ۱/۶۹



شکل (۸): شبیه‌سازی در ثابت زمانی ۲/۴



شکل (۹): تغییرات زاویه بار و سرعت روتور

chaotic-mutation evolutionary programming (DCMEP)", *Energy Conversion and Management*, 47 (9-10), 1222-1230.

10- Jiang, Z., 2009, "Design of a nonlinear power system stabilizer using synergetic control theory", *Electrical Power Systems Research*, 79 (6), 855-862.

11- Kishor, N., 2009, "Oscillation damping with optimal pole-shift approach in application to a hydro plant connected as SMIB system", *IEEE Trans. on Systems Journal*, 3 (3), 317-330.

12- Kishor, N., Saini, R.P., Singh, S.P., 2005, "Optimal pole shift control in application to hydro power plant", *Journal of Electrical Engineering*, 56 (11-12), 290-297.

13- Kishor, N., Singh, S.P., Raghuvanshi, A.S., 2006, "Dynamic simulations of hydro turbine and its state estimation based LQ control", *Energy Conversion and Management*, 47 (18-19), 3119-3137.

14- Li, C., Chang, L., Huang, Z., Liu, Y., Zhang, N., 2016, "Parameter identification of a nonlinear model of hydraulic turbine governing system with an elastic water hammer based on a modified gravitational search algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 50, 177-191.

15- Li, C., Zhou, J., 2011, "Parameters identification of hydraulic turbine governing system using improved gravitational search algorithm", *Energy Conversion and Management*, 52 (1), 374-381.

16- Li, C., Zhou, J., Xiao, J., Xiao, H., 2013, "Hydraulic turbine governing system identification using T-S fuzzy model optimized by chaotic gravitational search algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26 (9), 2073-2082.

17- Ling, D., Tao, Y., 2006, "An analysis of the hopf bifurcation in a hydro turbine governing system with saturation", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 21 (2), 512-515.

18- Luqing, Y., Weidong, L., Zhaohui, L., Malik, O.P., Hope, G.S., 1995, "An integral criterion for appraising the overall quality of a computer-based

مراجع

1- Chen, D., Ding, C., Do, Y., Ma, X., Zhao, H., Wang, Y., 2014, "Nonlinear dynamic analysis for a Francis hydro-turbine governing system and its control", *Journal of the Franklin Institute*, 351 (9), 4596-4618.

2- Chen, D., Ding, C., Ma, X., Yuan, P., Ba, D., 2013, "Nonlinear dynamic analysis of hydro-turbine governing system with a surge tank", *Applied Mathematical Modelling*, 37 (14-15), 7611-7623.

3- Chen, Z., Yuan, X., Ji, B., Wang, P., Tian, H., 2014, "Design of a fractional order PID controller for hydraulic turbine regulating system using chaotic non-dominated sorting genetic algorithm II", *Energy Conversion and Management*, 84, 390-404.

4- Chen, Z., Yuan, X., Tian, H., Ji, B., 2014, "Improved gravitational search algorithm for parameter identification of water turbine regulation system", *Energy Conversion and Management*, 78, 306-315.

5- Djukanovic, M., Novicevic, M., Dobrijevic, D., Babic, B., Sobajic, D.J., Pao, Y.H., 1995, "Neural-net based coordinated stabilizing control for the exciter and governor loops of low head hydropower plants", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 10 (4), 760-767.

6- Fang, H., Chen, L., Dlakavu, N., Shen, Z., 2008, "Basic modeling and simulation tool for analysis of hydraulic transients in hydroelectric power plants", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 23 (3), 834-841.

7- Guo, W., Yang, J., Wang, M., Lai, X., 2015, "Nonlinear modeling and stability analysis of hydro-turbine governing system with sloping ceiling tailrace tunnel under load disturbance", *Energy Conversion and Management*, 106, 127-138.

8- H.A.Y. Khalfan, M. Albadi, 2013, "Load frequency control of a Multi-Area power system: An adaptive fuzzy logic approach", *IEEE Trans. On Energy Conversion*, 28, 1-9.

9- Jiang, C., Ma, Y., Wang, C., 2006, "PID controller parameters optimization of hydro-turbine governing systems using deterministic-

- order Francis hydro-turbine governing system", *Chaos, Solitons and Fractals*, 75, 50–61.
- 29- Xu, B., Wang, F., Chen, D., Zhang, H., 2016, "Hamiltonian modeling of multi-hydro-turbine governing systems with sharing common penstock and dynamic analyses under shock load", *Energy Conversion and Management*, 108, 478–487.
- 30- Yu, X., Yang, F., Huang, Y., Nan, H., 2007, "Fuzzy immune sliding mode control based hydro turbine governor", *Proceeding of the IEEE/ICNC*, 1, Haikou, 171-176,
- 31- Yuan, X., Chen, Z., Yuan, Y., Huang, Y., 2015, "Design of fuzzy sliding mode controller for hydraulic turbine regulating system via input state feedback linearization method", *Energy*, 93, 173–187.
- 32- Zhang, H., Chen, D., Xu, B., Wang, F., 2015, "Nonlinear modeling and dynamic analysis of hydro-turbine governing system in the process of load rejection transient", *Energy Conversion and Management*, 90, 128-137.
- 33- Zhu, W., Zheng, Y., Dai, J., Zhou, J., 2017, "Design of integrated synergetic controller for the excitation and governing system of hydraulic generator unit", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 58, pp. 79–87.
- hydro turbine governing system", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 10 (2), 376-381.
- 19- Mahdavian, M., Shahgholian, G., Janghorbani, M., Farazpey, S., Azadeh, M., 2016, "Modelling and analysis of a PSS application for LFC in hydro-electric power plant", *Proceeding of the IEEE/ECTICON*, 1-6, Chiang Mai, Thailand.
- 20- Mahdavian, M., Shahgholian, G., Janghorbani, M., Soltani, B., Wattanapongsakorn, N., 2015, "Load frequency control in power system with hydro turbine under various conditions", *Proceeding of the IEEE/ECTICON*, Hua Hin, Thailand, 1-5.
- 21- Mi, Y., Fu, Y., Wang, C., 2013, "Decentralized sliding mode load frequency control for Multi-Area power systems", *IEEE Trans. on Energy conversion*, 52, 1-9.
- 22- Qian, D., Yi, J., Liu, X., Li, X., 2010, "GA-based fuzzy sliding mode governor for hydro-turbine", *Proceeding of the IEEE/ICICIP*, 382-387.
- 23- Shahgholian, G., 2017, "Power system stabilizer application for load frequency control in hydro-electric power plant", *Engineering Mathematics*, 2 (1), 21-30.
- 24- Strah, B., Kuljaca, O., Vukic, Z., 2005, "Speed and active power control of hydro turbine unit", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 20 (2), 424-434.
- 25- Thapa, B.S., Dahlhaug, O.G., Thapa, B., 2015, "Sediment erosion in hydro turbines and its effect on the flow around guide vanes of Francis turbine", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1100–1113.
- 26- Wang, F., Chen, D., Xu, B., Zhang, H., 2016, "Nonlinear dynamics of a novel fractional-order Francis hydro-turbine governing system with time delay", *Chaos, Solitons and Fractals*, 91, 329–338.
- 27- Xu, B., Chen, D., Zhang, H., Wang, F., Zhang, X., Wu, Y., 2017, "Hamiltonian model and dynamic analyses for a hydro-turbine governing system with fractional item and time-lag", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 47, 35–47.
- 28- Xu, B., Chen, D., Zhang, H., Wang, F., 2015, "Modeling and stability analysis of a fractional-