

کاهش نوسانات زیر سنکرون با استفاده از ادوات D-FACTS با کنترل کننده‌های هوشمند

زهرا امینی خوبی^(۱) - عباس کارگر^(۲)

(۱) کارشناس ارشد - گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران

(۲) دانشیار - گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۰

خلاصه: هنگامی که یک توربین-ژنراتور به یک خط انتقال طولانی وصل می‌شود ممکن است عوارض جانبی مانند پدیده SSR در آن به وجود آید. هدف این است که با استفاده از قابلیت‌های جبران کننده سری به عنوان یک عضو از خانواده D-FACTS به کاهش SSR پرداخته شود. برای رسیدن به هدف مورد نظر از کنترل کننده فازی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و شبکه عصبی استفاده شده است. بهینه‌سازی ازدحام ذرات بر اساس کنترل کننده میرایی مرسوم، منطق فازی بر اساس کنترل میرایی و شبکه عصبی نیز بر اساس کنترل میرایی با استفاده از آموزش داده‌های سرعت و تغییرات سرعت طراحی شده‌اند. پایداری سیستم از طریق شبیه‌سازی در حوزه زمان و با مطالعه شاخص عملکرد بر اساس دینامیک سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار Simulink / Matlab آورده شده است. موارد مورد مطالعه به منظور نشان دادن این واقعیت است که الگوریتم‌های مربوطه قادر به کاهش تشدیدهای زیر سنکرون می‌باشند. نشان داده شده که کنترل کننده فازی و الگوریتم PSO به همراه شبکه عصبی به خوبی می‌توانند این نوسانات را کاهش دهند.

کلمات کلیدی: ادوات FACTS، نوسان‌های زیر سنکرون (SSR)، کنترل کننده فازی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN).

Reduction of Sub-SynchroNous Resonances with D-FACTS Devices Using Intelligent Control

Zahra Amini⁽¹⁾ - Abbas Kargar⁽²⁾

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
zahraamini90sku@gmail.com

(2) Associate Professor - Department of Electrical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran
kargar@ieee.org

When a turbine-generator set connect to a long transmission line, may results side effects such as Sub-Synchronous Resonances (SSR). The capabilities of the Distributed Static Series Compensator (DSSC) as a member of the family of D-FACTS can be used to reduce these SSR. To achieve this desired goal, the fuzzy controller, Particle Swarm Optimization (PSO) and artificial neural network is used to control of the DSSC. Particle swarm optimization is designed Based on the Conventional Damping Controller (CDC) and fuzzy logic is designed based on damping controller (FLBDC) and damping control based on artificial neural network trained using the fast pace of changes has been designed. Stability of the system is analysed by simulations in the time domain with performance index (PI). All simulations are done using Matlab / Simulink software. Case studies show that proposed algorithms can reduce SSR in the system. All simulations are done using Matlab / Simulink software. Case studies show that proposed algorithms can reduce SSR in the system.

Index Terms: FACTS devices, Sub-synchronous resonance (SSR), Fuzzy controller, Particle swarm optimization (PSO), Artificial Neural network (ANN).

نویسنده مسئول: زهرا امینی خوبی، کارشناس ارشد - گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران، zahraamini90sku@gmail.com

۱- مقدمه

جبران‌سازی سری خطوط انتقال طولانی به منظور بهبود قابلیت انتقال توان شبکه‌های قدرت از اهمیت زیادی برخوردار است [۱]. جبران‌سازی سری خطوط انتقال، با کاهش مقاومت ظاهری و طول الکتریکی و افزایش بار طبیعی خط، تأثیر به‌سزایی در بهبود حد پایداری ماندگار و گذرا داشته و پروفیل ولتاژ را نیز بهبود می‌بخشد [۲، ۳]. در چنین شبکه‌های جبران‌شده، فعل و انفعالات بین حالت‌های الکتریکی شبکه و حالت‌های مکانیکی شفت توربین ژنراتور منجر به یک پدیده مضر تحت عنوان تشدید زیر سنکرون (SSR) می‌شود [۴، ۵]. پدیده تشدید زیر سنکرون اغلب در سیستم‌های جبران‌شده با خازن سری رخ می‌دهد. یک سیستم قدرت شامل خط انتقال، ژنراتور، توربین‌ها و بارهای مختلف است و در قسمت مکانیکی محور توربین-ژنراتور، به تعداد توربین‌های فشار قوی و فشار ضعیف، ژنراتور وجود دارند که به وسیله فلنچ‌ها به هم متصل می‌شوند. چنین محوری در نیروگاه به عنوان جسم صلب در حال چرخش، مدهای نوسانی پیچشی متفاوتی دارد [۶].

SSR پدیده‌ی نوسانی است که در اثر بروز آن دامنه نوسان‌های الکتریکی و مکانیکی رفته‌رفته افزایش می‌یابد و در روتور توربین-ژنراتور به طور همزمان نوساناتی پیدا می‌شود با توجه به محدودیت محور در تحمل این تنش‌ها، بروز خستگی و در نهایت شکست در محور بوجود می‌آید که خسارت‌های جبران‌ناپذیری را در پی دارد و بایستی در جلوگیری از پیدایش آن تلاش جدی انجام گیرد [۶]. یکی از صورت‌های مختلف پدیده SSR گشتاور گذراست که در اثر اغتشاش‌های بزرگ در شبکه‌های جبران‌شده با خازن سری به وجود می‌آید. در این شرایط عبور جریان‌های گذرا با فرکانس زیرسنکرون (fe) از خط به ایجاد میدانی با همین فرکانس در استاتور ژنراتور منجر می‌شود. این امر موجب ایجاد دو گشتاور نوسانی با فرکانس‌های $f_m = f_o \pm f_e$ (fo فرکانس پایه سیستم) در روتور می‌شود. حال چنانچه فرکانس این دو گشتاور نوسانی با یکی از مدهای نوسانی روتور تقریباً برابر شد، گشتاورهای روتور به سرعت رشد کرده و در نتیجه به محور روتور ضربه می‌زنند.

روش‌های زیادی در مقاله‌های مختلف برای کاهش پدیده نوسانات زیر سنکرون پیشنهاد شده است که می‌توان به سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر AC^۲ (FACTS) و همچنین استفاده از سیستم تحریک ژنراتور و پایدارساز سیستم قدرت^۳ (PSS) به عنوان روش‌های موثر اشاره داشت. تاکنون استفاده از ادوات FACTS به منظور کاهش نوسان‌های زیر سنکرون موفقیت‌آمیز بوده است. جبران‌ساز خازن سری در سیستم‌های انتقال AC یک حد وسط اقتصادی و مؤثر برای کنترل بار اشتراکی میان خطوط موازی و بالا بردن پایداری گذرا است که فاصله الکتریکی خطوط انتقال را کوتاه می‌کند تا قابلیت انتقال توان را افزایش دهد. کنترل‌کننده‌های زیادی به منظور کاهش این پدیده استفاده شده‌اند. از جمله این کنترل‌کننده‌ها می‌توان به کنترل‌کننده‌های^۴ (SVC) و^۵ (TCSC) اشاره کرد. SVC یک وسیله شناخته شده خوب به

منظور پایداری ولتاژ محسوب می‌شود. علاوه بر این در [۷]، ترکیب جدیدی از خازن‌های ثابت و TCSC به کار گرفته شده و از این طرح برای کاهش نوسان‌های زیر سنکرون استفاده شده است. ^۶ DSSC یک مفهوم جدید است که از جبران‌کننده سنکرون سری^۷ (SSSC) مشتق شده است. DSSC هزینه‌های بسیار پایین‌تر و قابلیت اطمینان بالاتری از SSSC، را فراهم می‌کند. به تازگی توسعه کنترل‌کننده فازی مبتنی بر ارائه یک روش سیستماتیک برای کنترل یک فرآیند غیرخطی بر اساس تجربه انسان توسعه یافته است و ممکن است به عنوان یک رویکرد اکتشافی در نظر گرفته شود که می‌تواند به بهبود عملکرد حلقه بسته سیستم کمک نماید [۸]. کنترل‌کننده فازی با طراحی مناسب می‌تواند عملکرد خوبی در برابر تغییرات پارامترهای بار و اغتشاش‌های خارجی داشته باشد. نشان داده شده که منطق فازی بر اساس کاهش نوسان‌ها، می‌تواند نقش مؤثری در ایجاد ثبات در سیستم‌های قدرت بازی کند. از دیگر روش‌های هوشمند در زمینه کاهش نوسان‌های زیر سنکرون می‌توان به کاهش نوسان‌های زیرسنکرون با استفاده از شبکه‌های عصبی اشاره نمود [۹]. شبکه‌های عصبی مصنوعی از توانایی سودمندی برای رفع مشکل‌های سیستم‌های قدرت برخوردار هستند. این شبکه‌ها قادر هستند ورودی و خروجی یک سیستم قدرت را با استفاده از پروسه آموزش پایدار نمایند و بدون هیچ‌گونه برنامه‌نویسی پیچیده‌ای این کار را انجام می‌دهند [۱۰]. از طرفی روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۸ (PSO) به عنوان الگوریتم مدیریت مسائل بهینه‌سازی امیدوارکننده ظاهر شده است. PSO یک جمعیت است مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی تصادفی، که بر اساس رفتار اجتماعی پرنده یا ماهی شکل می‌گیرد [۱۰]. PSO نه تنها کمبود بهینه‌سازی متعارف را از بین می‌برد بلکه آن را با بهره‌گیری از چند پارامتر برای پیاده‌سازی آسان می‌کند. در این مقاله از DSSC با دو کنترل‌کننده مکمل جداگانه به منظور کاهش نوسان‌های نامطلوب که توسط SSR ایجاد می‌شود استفاده شده است. در هر کنترل‌کننده، روش طراحی به خوبی توضیح داده شده و همچنین نتایج به دست آمده به طور کامل مورد بحث قرار گرفته است.

در این مقاله با استفاده از کنترل‌کننده فازی و الگوریتم PSO به انضمام روش‌های صورت گرفته توسط آن‌ها برای کاهش نوسانات زیر سنکرون به خوبی تشدیدهای زیر سنکرون کاهش داده شده‌اند و سپس با استفاده از کنترل‌کننده موجود و بکارگیری شبکه عصبی مصنوعی در آن به همراه آموزش دادن این شبکه سعی شده نوسان‌های بوجود آمده در سیستم قدرت کاهش داده شوند و همچنین نتایج به دست آمده از این روش کاهش با دو روش دیگر موجود در مقاله از جمله الگوریتم PSO و کنترل‌کننده فازی به کار گرفته شده مقایسه شوند و در نهایت روش بهتر برای کاهش و میرایی نوسانات معرفی گردد. ابتدا پیکربندی سیستم قدرت برای مطالعه SSR آورده شده و پاسخ سیستم بدون کنترل‌کننده نیز ارائه شده است. در بخش بعد ساختار پایه DSSC و پیکربندی اصلی کنترل DSSC بر اساس روش کنترل

ترانسفورماتور، واحد پردازش به عنوان کنترل کننده، اینورتر برای تولید ولتاژ سینوسی، ترانسفورماتور (STT) برای وارد کردن ولتاژ در خط انتقال، یک منبع تغذیه انرژی، پردازنده و رابطهای سخت‌افزاری برای ارسال و دریافت سیگنال‌ها به سایر ماژول‌ها و یا کنترل کننده‌ها تشکیل شده است [۱۴]. خازن DC دارای سطح ولتاژ باس DC است که تلفات اینورتر و توان اینورتر را از طریق خط انتقال جبران و جذب می‌کند. حذف یا کاهش هارمونیک ولتاژ تولید شده توسط یک فیلتر LC متصل به خروجی اینورتر صورت می‌گیرد. ترانسفورماتور STT با بهره‌گیری از هادی خط انتقال به عنوان ثانویه و با نسبت تبدیل (۱:۱۰۰) طراحی شده است. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده، هسته ترانسفورماتور متشکل از دو بخش است که در اطراف هادی خط به منظور تشکیل یک مدار مغناطیسی کامل متصل شده است [۱۵].

۳-۱ کنترل DSSC

وظیفه اصلی DSSC کنترل جریان در خط انتقال است و این هدف می‌تواند با کنترل مستقیم به دست آید [۱۶]. پیاده‌سازی اینورتر در حالت کنترل مستقیم در مقایسه با اینورتر در حالت کنترل غیرمستقیم با سختی بیشتر و هزینه بالاتری امکان‌پذیر است. همچنین در کنترل مستقیم تابع اینورتر معمولاً با برخی اشکال‌هایی از نظر افزایش تلفات، پیچیدگی بیشتر مدار و افزایش هارمونیک در خروجی روبروست. از اینرو ساختار کنترل استفاده شده برای DSSC در این مدل مبتنی بر کنترل غیرمستقیم است و DSSC برای یک فاز استفاده شده است. شکل (۳) شماتیک کنترل غیرمستقیم یک DSSC را نشان می‌دهد. کنترل مورد استفاده برای حفظ شارژ خازن در باس DC و برای تزریق ولتاژ همزمان به کار گرفته شده است. به منظور کنترل ولتاژ خازن DC اختلاف فاز ۹۰ درجه‌ای بین ولتاژ تزریقی و جریان خط به عنوان یک سیگنال کنترل مورد نیاز است. حلقه قفل شده فاز (PLL) برای حفظ سنکرونیزم با زاویه فاز خط مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیگنال خطا از مقایسه V_{dc} با V_{dref} و از طریق یک کنترل کننده PI به دست آمده است. پارامترهای کنترل کننده PI، $K_p=0.5, K_i=0.1$ در نظر گرفته شده‌اند.

۴- کنترل کننده فازی

به طور کلی، با توجه به اینکه سیستم قدرت رفتاری غیرخطی دارد، استفاده از کنترل کننده‌های فازی در بسیاری از بخش‌های آن مورد توجه قرار گرفته است. از این کنترل کننده‌ها در سیستم‌های قدرت به منظور بهبود پایداری، کنترل فرکانس بار، در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌ها، جبران توان راکتیو در شبکه توزیع و بسیاری موارد دیگر استفاده شده است [۱۶]. شکل (۴) دیاگرام شماتیک کنترل DSSC بر اساس منطق فازی را نشان می‌دهد. در مقایسه با شکل (۳) می‌توان گفت که در این شکل، کنترل کننده فازی به کنترل جریان DSSC اضافه شده است. با تزریق ولتاژ سری، یعنی V_q ، DSSCs راکتانس متغیر فراهم می‌کند.

غیر مستقیم آورده شده است. کنترل کننده فازی به همراه قوانین به کار گرفته شده برای طراحی آن و همچنین الگوریتم PSO بر اساس CDC به منظور کنترل DSSC معرفی شده است. در این مقاله از الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده کلاسیک استفاده شده است. و در بخش دیگر شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده توضیح داده خواهد شد. در بخشی جداگانه نتایج حاصل از شبیه‌سازی هر کنترل کننده آورده شده و مقایسه‌ای بین این نتایج صورت می‌گیرد.

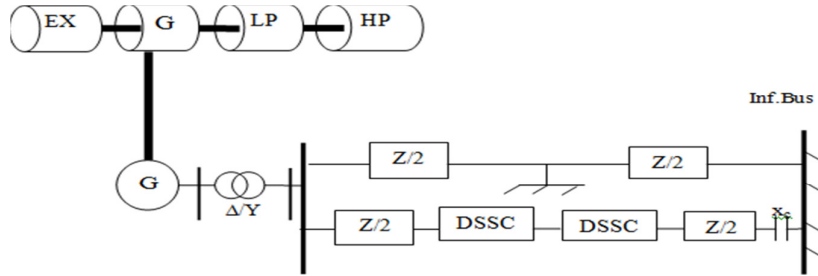
۲- پیکربندی سیستم قدرت برای تجزیه و تحلیل SSR

شکل (۱) نمودار تک خطی سیستم قدرت مورد مطالعه را نشان می‌دهد [۱۱]. این سیستم شامل یک ژنراتور ۶۰۰ MVA با ولتاژ ۲۲ کیلو ولت، ۳۶۰۰ rpm است که از طریق یک ترانسفورماتور مثلث-ستاره، ۶۰۰ MVA، ۶۰ هرتز و ۵۰۰-۲۲ کیلو ولت به باس بینهایت متصل شده و شامل دو خط موازی انتقال با ولتاژ ۵۰۰ کیلو ولت است. سیستم مکانیکی توربین بخار مرکب از توربین فشار بالا (HP)، توربین فشار پایین (LP)، ژنراتور (G) و تحریک دوار (EX) که بر روی محور همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است قرار گرفته‌اند. اطلاعات سیستم قدرت مورد مطالعه در [۱۲] داده شده است. میزان جبران‌سازی توسط خازن سری ۵۲٪ از مجموعه راکتانس X_{L1} در نظر گرفته شده است. در مورد اول، عملکرد این سیستم بدون ماژول DSSC و بدون کنترل کننده خاصی مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف روشن کردن این واقعیت است که بدون وجود کنترل کننده، روتور آسیب خواهد دید و نوسان‌ها در این سیستم افزایش می‌یابند. برای شبیه‌سازی حالت اول یک خطای سه فاز به زمین در وسط خط انتقال در $t = 3s$ اعمال می‌شود و پس از ۱۶۸ میلی ثانیه رفع می‌شود. در مراحل بعد DSSC به همراه کنترل کننده مربوطه وارد ساختار سیستم قدرت خواهد شد سطح ولتاژی که DSSC در آن نصب شده ۵۰۰ کیلو ولت است. علت این که در ساختار از دو جبران کننده استفاده شده، قدرت کم DSSC است که مستلزم نصب و راه‌اندازی دو ماژول DSSC در خط انتقال است. در مراحل بعد DSSC به همراه کنترل کننده مربوطه وارد ساختار سیستم قدرت خواهد شد. علت این که در ساختار از دو جبران کننده استفاده شده، قدرت کم DSSC است که مستلزم نصب و راه‌اندازی دو ماژول DSSC در خط انتقال است.

۳- ساختار DSSC

DSSC در واقع یک مدل تکفاز SSSC اما در اندازه کوچکتر است [۱۳]، که در خطوط انتقال و توزیع برای کنترل جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر دستگاه DSSC تکفاز در هر فاز خط انتقال برای حفظ تقارن جریان قرار داده می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد قدرت کم DSSC مستلزم نصب و راه‌اندازی چندین ماژول DSSC در هر خط انتقال است. شکل (۲) اجزای ماژول DSSC را به صورت شماتیک نشان می‌دهد [۱۳]. این ساختار به طور عمده از یک

موقعیت‌های مختلف قبل و بعد، مجموعه‌های فازی برای کنترلر فازی طراحی شده‌اند. توابع عضویت برای ورودی و خروجی FLBDC در شکل (۵) نشان داده شده‌اند. برای هر ورودی و خروجی γ تابع عضویت بر اساس تنظیم بر اساس شبیه‌سازی و شناخت سیستم قدرت تنظیم و استفاده شده است.



شکل (۱): سیستم مورد مطالعه

Fig. (1): The studied system model

با نام P_{best} شناخته و نگهداری می‌شود. مقدار دیگری که توسط الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهترین موقعیتی است که تاکنون توسط جمعیت ذرات به دست آمده است. این موقعیت با g_{best} نمایش داده می‌شود.

پس از یافتن بهترین مقادیر، سرعت و مکان هر ذره با استفاده از معادله زیر به روز می‌شود:

$$V_{id}(t) = W \times V_{id}(t-1) + C_1 r_1 \times (P_{id}(t-1) - X_{id}(t-1)) + C_2 r_2 \times (P_{gd}(t-1) - X_{id}(t-1)) \quad (1)$$

$$X_{id} = X_{id}(t-1) + CV_{id}(t) \quad (2)$$

در این رابطه V_{id} سرعت ذره i ام، X_{id} موقعیت ذره i ام، P_{id} و P_{gd} به ترتیب بهترین P و بهترین g هستند. C_1, C_2 نیز فاکتورهای یادگیری هستند. r عدد تصادفی در بازه $(0,1)$ است. در شکل (۶) فلوچارت مربوط به طراحی PSO آورده شده است.

Table (1): Rule base of FLBDC

جدول (۱): قوانین به کار رفته در طراحی کنترل‌کننده فازی

Δw	$d \Delta w / dt$						
	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
PL	PL	PL	PL	PL	PM	PS	ZE
PM	PL	PL	PM	PM	PS	ZE	NS
PS	PL	PM	PS	PS	ZE	NS	NM
ZE	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
NS	PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NL
NM	PS	ZE	NS	NM	NM	NL	NL
NL	ZE	NS	NM	NM	NL	NL	NL

X_q با خط انتقال سری است و در تنظیم راکتانس خط موثر است. در شرایط حالت پایدار V_q ثابت است. در شرایط دینامیکی از تزریق ولتاژ سری V_q برای کاهش نوسان‌های سیستم استفاده شده است.

کنترل‌کننده طراحی شده بر اساس موتور استنتاج Mamdani است. ورودی کنترل‌کننده فازی شامل دو سیگنال انحراف سرعت و مشتق انحراف سرعت می‌باشد. با مطالعه رفتار این دو سیگنال ورودی و

با تست کارکردهای مختلف، مشخص شده است که یک مثلث تابع عضویت برای هر دو ورودی و خروجی ترجیح داده می‌شود که نتایج آن باعث میرایی بهتر است. در توابع عضویت، اختصارات Z: صفر، NS: منفی کوچک، NM: منفی متوسط، NL: منفی بزرگ، PS: مثبت کوچک، PM: مثبت متوسط، PL: مثبت بزرگ، پایه کار کنترلر فازی است. استراتژی کنترل فازی در استنتاج متوجه موتور است که پایه تمام ترکیبات ممکن از ورودی‌ها و خروجی‌های مناسب برای هر یک از آن‌ها است. قوانین انتخاب شده بر اساس استدلال انسان و عملکرد سیستم است. مثلاً هنگامی که $\Delta\omega$ مربوط به تابع عضویت PM و $d\Delta\omega/dt$ مربوط به تابع عضویت P باشد، به این معنی که سرعت روتور بیش از ۱ است به دلیل اینکه قدرت ورودی از قدرت خروجی ژنراتور بیشتر است. قوانین نیز در جدول (۱) آورده شده‌اند. دو نمونه از پایگاه‌های اطلاعاتی برای درک بهتر:

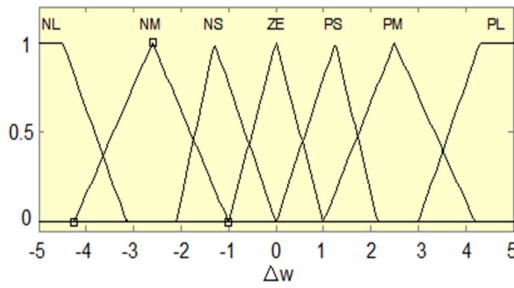
قانون ۱: اگر $\Delta\omega$ مثبت بزرگ و $d\Delta\omega/dt$ متوسط منفی، پس خروجی FLDC باید کوچک مثبت باشد.

قانون ۲: اگر $\Delta\omega$ منفی کوچک و $d\Delta\omega/dt$ صفر است و سپس خروجی FLDC باید کوچک منفی باشد.

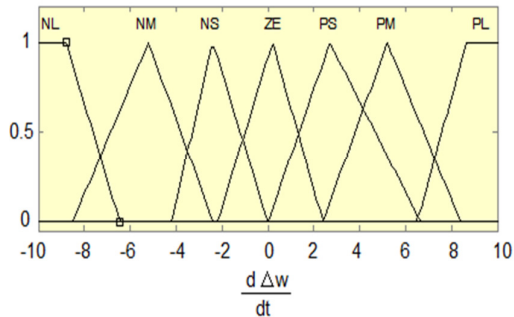
فازی‌سازی در این بخش بر اساس ارزش عددی است که به عنوان یک ورودی برای کنترل خروجی سیستم قدرت از قوانین فازی تولید می‌شود. هنگامی که متغیرهای ورودی فازی‌سازی و به پایه قانون فازی فرستاده شد، سپس خروجی قوانین جمع‌آوری و نافازی‌سازی می‌شوند.

۵- PSO بر اساس طراحی CDC

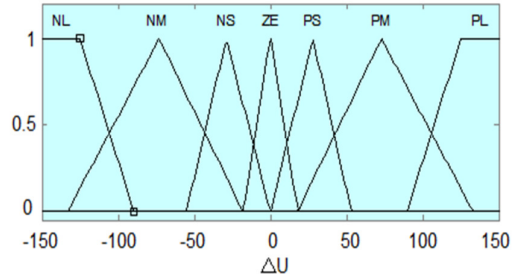
حرکت جمعی ذرات PSO، یک تکنیک بهینه‌سازی احتمالی است که بر مبنای جمعیت کار می‌کند. آغاز کار PSO به این شکل است که گروهی از ذرات به صورت تصادفی به وجود می‌آیند. در هر گام، هر ذره با استفاده از دو بهترین مقدار به روز می‌شود. اولین مورد، بهترین موقعیتی است که تاکنون ذره موفق به رسیدن به آن شده است. موقعیت مذکور



الف: تابع عضویت تغییرات سرعت به عنوان ورودی در کنترل کننده فازی



ب: تابع عضویت مشتق تغییرات سرعت به عنوان ورودی در کنترل کننده فازی

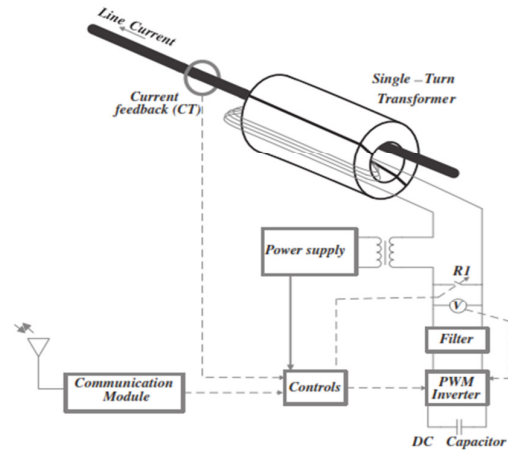


ج: تابع عضویت تغییرات ولتاژ به عنوان خروجی در کنترل کننده فازی

شکل (۵): توابع عضویت پارامترهای ورودی و خروجی کنترل کننده فازی
Fig. (5): Triangular membership functions for inputs and output fuzzy sets of the FLBDC

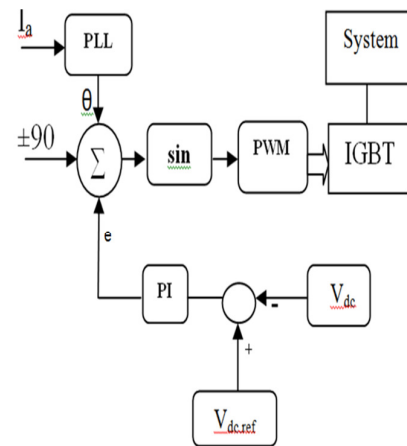
۵-۱ طراحی مبتنی بر CDC-PSO

یکی از مسائل اساسی در طراحی کنترل کننده، انتخاب سیگنال بازخورد برای رسیدن به بهترین مشاهده برای میرایی نوسانها به شکل معین و مطلوب است. فرکانس شاخصی کلیدی برای ثبات، تولید و تعادل سیستم است. از این رو، این پارامتر و یا مشتقهای آن مثل سرعت روتور و نرخ تغییرات آن، معمولاً به عنوان سیگنالهای کنترل بازخورد به کار می‌روند [۱۷، ۱۸]. در این مطالعه، همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است، Δw به عنوان یک سیگنال ورودی به منظور کاهش حالت ناپایدار داده شده است. کنترلر SSRD متشکل از پنج بلوک است: فیلتر، دو بلوک جبران فاز، بلوک محدودکننده و یک بلوک بهره. پارامتر T_w و پارامترهای محدودکننده، توسط الگوریتم PSO، بهینه‌سازی شده و به منظور کاهش SSR به کار رفته‌اند. در این مطالعه، تابع هدف از انحراف سرعت محور روتور به منظور عملکرد مناسب پارامترهای خروجی برای کنترلر SSRD استفاده شده است.



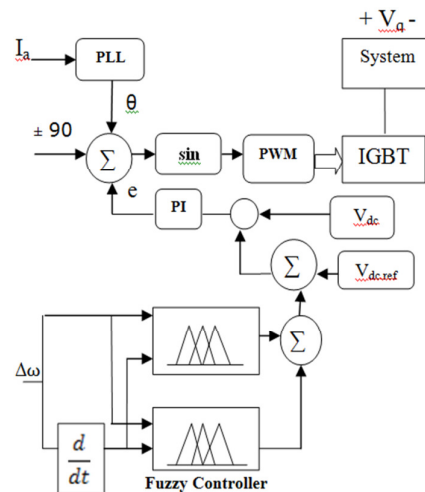
شکل (۲): مدار شماتیک DSSC [۶]

Fig. (2): Schematic circuit of a DSSC module



شکل (۳): کنترل غیر مستقیم DSSC

Fig. (3): Indirect control of the DSSC



شکل (۴): شماتیک کنترل DSSC بر اساس منطق فازی

Fig. (4): FLBDC supplemented to DSSC controller

اطلاعات پایگاه شبکه عصبی با توجه به داده‌های عددی از قسمت فازی استخراج شده‌اند.

ذکر شده جدایی ناپذیر از زمان است و توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$J = \int_0^{t_{sim}} t \cdot |\omega| dt \quad (3)$$

در این رابطه t_{sim} زمان شبیه سازی شده است. هدف اصلی از بهینه سازی به حداقل رساندن تابع هدف با توجه به برخی محدودیت‌ها است. محدودیت‌ها به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

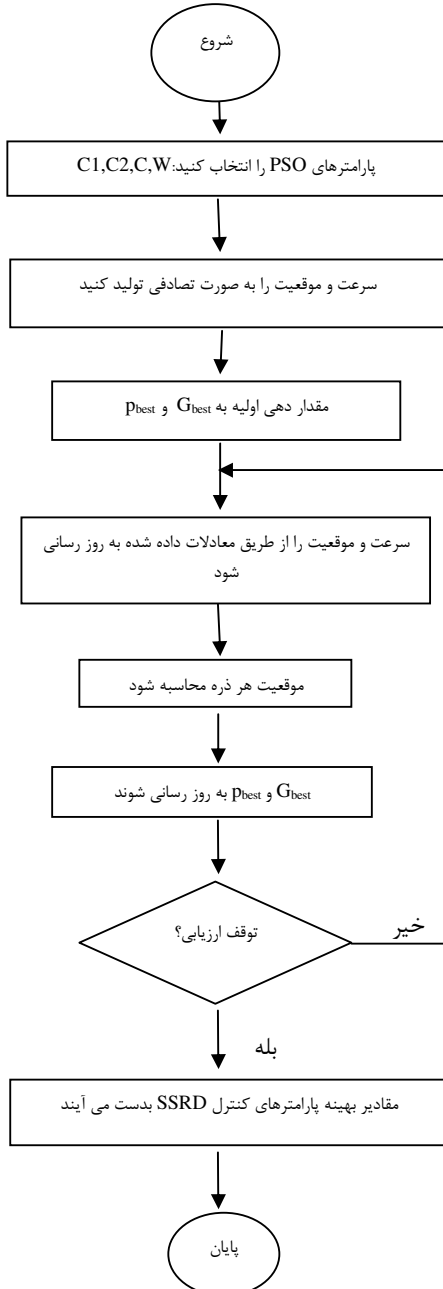
$$\begin{aligned} K^{min} \leq K \leq K^{max} \\ T_1^{min} \leq T_1 \leq T_1^{max} \\ T_2^{min} \leq T_2 \leq T_2^{max} \\ T_3^{min} \leq T_3 \leq T_3^{max} \\ T_4^{min} \leq T_4 \leq T_4^{max} \end{aligned} \quad (4)$$

بنابراین، در این مطالعه برای دستیابی به عملکرد بهتر، تعداد ذرات، تعداد تکرار، C_1, C_2, C و W به ترتیب ۴۰، ۱۰۰، ۲، ۱، ۰/۹ خواهد شد. الگوریتم جستجو PSO برای مقادیر بهینه پارامترهای بالا در محدوده: $K [0.001-200]$ و $T_4, T_3, T_2, T_1: [0.001-3]$ است. با اجرای شبیه‌سازی مدل مورد نظر، تابع هدف محاسبه و پس از رسیدن به یک معیار مشخص شده، پارامترهای بهینه کنترل‌کننده به دست آورده خواهند شد. لازم به ذکر است که، انتخاب مناسب پارامترهای PSO باعث افزایش سرعت همگرایی الگوریتم خواهد شد. لازم به ذکر است، در الگوریتم PSO تفاوت بسیاری از پارامترها بین ارزش‌های تکرار پارامترهای گذشته و پارامترهای تکرار فعلی برابر با ۰/۰۰۱ است. در نهایت پارامترهای پیشنهادی به شرح زیر هستند:

$$K = 50, TW = 2, T_1 = 0.9106, T_2 = 0.0497, T_3 = 0.3532, T_4 = 0.775, \max = 150, \min = -150$$

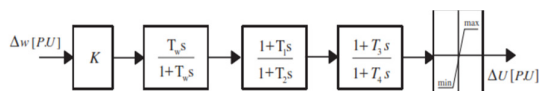
۶- کنترل SSR با استفاده از شبکه عصبی

اخیراً شبکه‌های عصبی نه تنها در تئوری بلکه در عمل به شدت توسعه یافته‌اند. یک شبکه عصبی پیشرو (FF) نشان داده شده در شکل (۸)، از سه لایه تشکیل شده است. در اینجا مانند کنترل‌کننده فازی ورودی‌های شبکه عصبی تغییرات سرعت و مشتق تغییرات سرعت می‌باشند. با استفاده از ورودی‌های مذکور شبکه عصبی تشکیل و آموزش داده می‌شود. برای پیاده‌سازی یک شبکه عصبی ابتدا باید تعداد لایه‌ها، تعداد نرون‌های هر لایه، نوع تابع انتقال در هر لایه و نوع تابع آموزش شبکه را تعیین کرد [۱۹]. شبکه عصبی پیشرو پیشنهادی مطابق شکل (۸) دارای ۳ لایه می‌باشد که لایه اول و لایه دوم هر کدام ۲۰ نرون و لایه سوم یک نرون را در خود جای داده‌اند. تابع انتقال لایه اول و دوم و سوم از نوع Tansig اختیار شده است. شبکه عصبی با تابع Trainlm آموزش داده می‌شود. مجموع مربعات خطای قابل قبول برای شبکه، 10^{-4} در نظر گرفته می‌شود که آموزش این شبکه در ۱۰۰ تکرار به هدف مورد نظر همگرا می‌شود. همچنین بلوک دیگرام کنترل DSSC با استفاده از شبکه عصبی در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۶): فلوچارت الگوریتم PSO

Fig. (6): Flowchart of the proposed PSO algorithm for SSR attenuation



شکل (۷): بلوک دیگرام کنترل SSRD

Fig. (7): SSRD controller block diagram

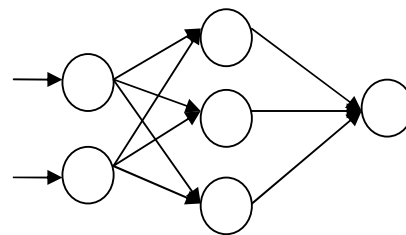
۶-۱ آموزش شبکه عصبی

منظور از آموزش یک شبکه عصبی در واقع تعیین همهی وزنهای آن شبکه است و مهمترین عامل در آموزش داشتن الگوی مناسب می باشد. آموزش این شبکه عصبی برای تعداد ۵۰ سری داده ورودی تغییرات سرعت و مشتق تغییرات سرعت و همچنین ۵۰ خروجی متناظر بهینه شده با PSO انجام گرفته است. لازم به ذکر است که روش آموزش BP بوده است.

۷- نتایج شبیه سازی

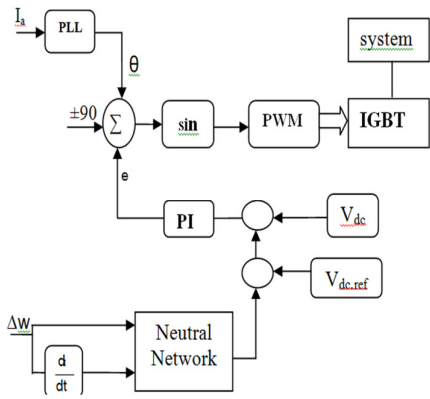
در این بخش نتایج شبیه سازی ارائه خواهد شد. برای مورد اول حالت بدون کنترل کننده، خطای سه فاز به زمین وسط خط انتقال در زمان ۳ ثانیه رخ می دهد و پس از ۱۶۸ میلی ثانیه برداشته می شود. زمانی که از جبران ساز و کنترل کننده مناسب استفاده نشود دامنه نوسانهای گشتاور الکتریکی افزایش می یابد و به چندین برابر مقدار نامی خودش می رسد. زمانی که خطا از بین می رود، نوسانهای بین شفت توربین ژنراتور بزرگ خواهد شد و سیستم کاملاً ناپایدار می شود و چنانچه با روش مناسبی کنترل نشود می تواند به محور روتور آسیب برساند. نتایج مربوط به حالت بدون کنترل را می توان در شکل های ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ مشاهده نمود. شکل (۱۰) نمودار گشتاور بین توربین فشار ضعیف (LP) و ژنراتور را نشان می دهد، در شکل (۱۱) گشتاور بین توربین فشار ضعیف (LP) و توربین فشار قوی (HP) مشاهده می شود. همانطور که بیان شد بعد از اینکه خطا از بین می رود نوسانات بین شفت توربین ژنراتور بزرگ خواهند شد و سیستم را ناپایدار خواهند کرد. در شکل (۱۲) مقایسه ای بین گشتاورهای بین توربین فشار ضعیف و ژنراتور با گشتاور بین توربین فشار ضعیف و فشار قوی مشاهده می گردد. سرعت مجموعه روتور در شکل (۱۳) قابل مشاهده است.

لایه خروجی لایه مخفی لایه ورودی



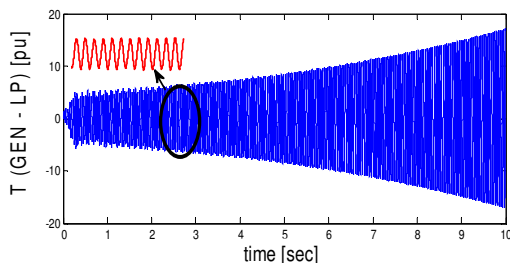
شکل (۸): ساختار شبکه عصبی

Fig. (8): The structure of the neural network

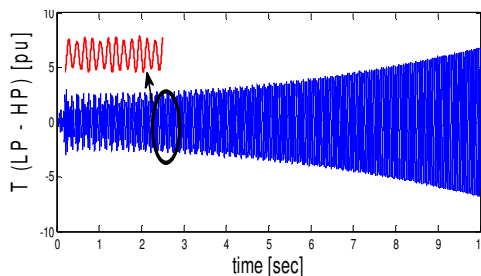


شکل (۹): شماتیک کنترلر DSSC با شبکه عصبی

Fig. (9): Schematic of DC controller with neural network

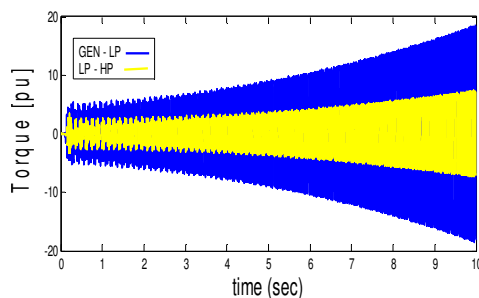


شکل (۱۰): گشتاور بین توربین فشار ضعیف (LP) و ژنراتور بدون کنترل کننده
Fig. (10): Torque between the low pressure turbine (LP) and the generator without controller



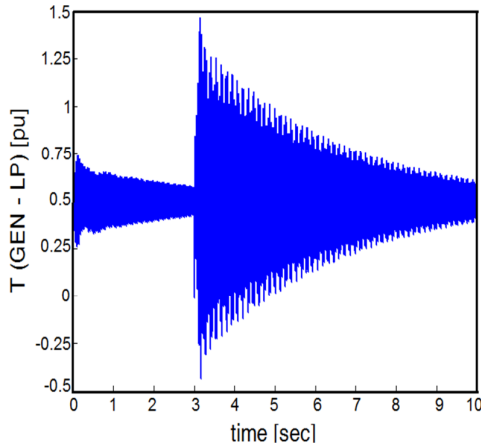
شکل (۱۱): گشتاور بین توربین فشار ضعیف (LP) و توربین فشار قوی (HP) بدون کنترل کننده

Fig.. (11): Torque between the turbine low pressure (LP) turbine high-pressure (HP) without controller



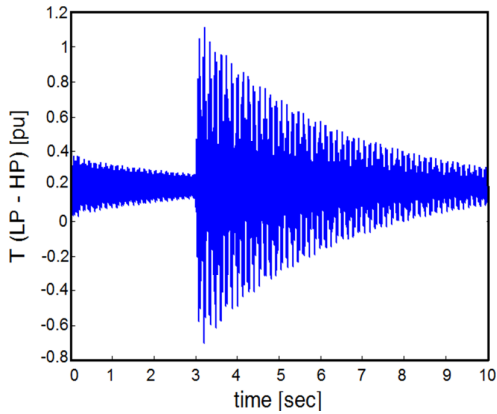
شکل (۱۲): مقایسه بین گشتاورهای توربین فشار ضعیف LP و ژنراتور با گشتاور توربین فشار ضعیف LP و فشار قوی HP بدون کنترل کننده

Fig.. (12): Comparison between low pressure LP turbine and enerator torque with torque low-pressure turbines and high-pressure LP HP without controller



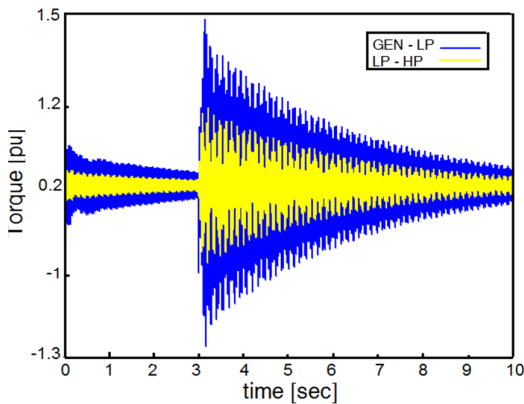
شکل (۱۴): گشتاور بین توربین فشار ضعیف (LP) و توربین ژنراتور با استفاده از کنترل‌کننده فازی

Fig. (14): Torque between the low pressure turbine (LP) and generator turbine using fuzzy controller



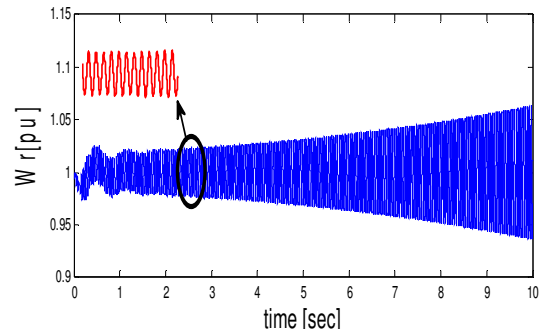
شکل (۱۵): گشتاور بین توربین فشار ضعیف LP و توربین فشار قوی HP با استفاده از کنترل‌کننده فازی

Fig. (15): Torque between the low pressure turbines, high-pressure turbine LP HP using fuzzy controller



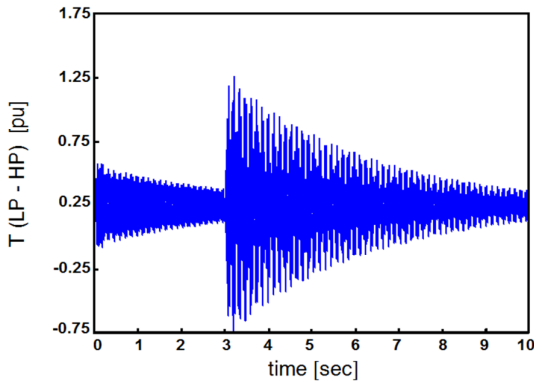
شکل (۱۶): مقایسه بین گشتاورهای توربین فشار ضعیف (LP) و ژنراتور با گشتاور توربین فشار ضعیف (LP) و فشار قوی (HP) با استفاده از کنترل‌کننده فازی

Fig. (16): Comparison between low pressure (LP) turbine and generator torque with torque low-pressure turbines and high-pressure (LP, HP) using fuzzy controller



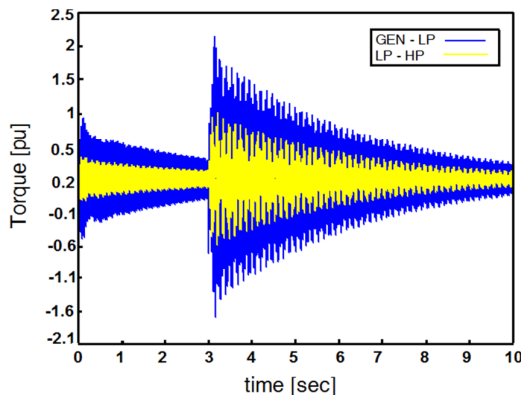
شکل (۱۳): سرعت مجموعه روتور بدون کنترل‌کننده
Fig. (13): The speed of the rotor without controller

نتایج شبیه‌سازی سیستم با استفاده از کنترل‌کننده فازی در ادامه در شکل‌های ۱۶، ۱۵، ۱۴ و ۱۷ آورده شده است. با استفاده از روش کنترل فازی، عملکرد سیستم در این حالت تا حد زیادی بهبود یافته است. علاوه بر این، همانطور که در شکل (۱۴) و (۱۵) مشاهده می‌شود دامنه نوسانات گشتاور بین توربین فشار ضعیف و ژنراتور و دامنه گشتاور بین توربین فشار ضعیف و فشار قوی با روش کنترل فازی تا حد زیادی کاهش یافته است. شکل (۱۶) مقایسه‌ای بین گشتاورهای مشاهده شده در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) را نشان می‌دهد. در شکل (۱۷) سرعت مجموعه روتور مشاهده می‌شود در مقایسه با حالت بدون کنترل نوسانات سرعت نیز به شدت کاهش یافته‌اند. بنابراین می‌توان گفت که با استفاده از کنترل‌کننده فازی دامنه نوسانات گشتاور الکتریکی کاهش یافته است و می‌تواند از آسیب رسیدن به محور روتور جلوگیری کند. در مقایسه شکل (۱۴) با شکل (۱۰) حالت بدون کنترل به خوبی مشاهده می‌شود که بدون حضور کنترل‌کننده فازی گشتاور بین ژنراتور و توربین فشار ضعیف تا Δpu هم افزایش داشته است (که با ادامه یافتن زمان شبیه‌سازی این دامنه افزایش بیشتری نیز خواهد داشت) ولی در حالت با کنترل‌کننده فازی دامنه گشتاور کاهش داشته است و تنها در چند ثانیه این گشتاور به مقدار $1/4 pu$ رسیده است. همچنین در مقایسه شکل (۱۱) با شکل (۱۵) نیز می‌توان به خوبی مشاهده کرد که دامنه نوسانات گشتاور بین توربین فشار ضعیف و توربین فشار قوی در حالت بدون استفاده از کنترل‌کننده در مدت زمان شبیه‌سازی تعیین شده به $2 pu$ هم رسیده است در حالی که دامنه نوسانات این گشتاور با استفاده از کنترل‌کننده فازی کاهش خوبی داشته و فقط در چند ثانیه به $1/1 pu$ رسیده است. اگر به سرعت مجموعه روتور در حالت بدون کنترل شکل (۱۳) و سرعت مجموعه روتور با استفاده از کنترل‌کننده فازی شکل (۱۷) توجه نمود به خوبی مشاهده می‌شود دامنه نوسانات سرعت روتور در شکل (۱۳) با گذشت زمان شبیه‌سازی رو به افزایش است، در مقایسه با سرعت مجموعه روتور با استفاده از کنترل‌کننده فازی شکل (۱۷) مشاهده می‌شود دامنه نوسانات سرعت رو به کاهش رفته است و کنترل‌کننده فازی به خوبی توانسته است تشدید زیر سنکرون را کاهش و نوسانات را میرا سازد و موفق عمل کرده است.



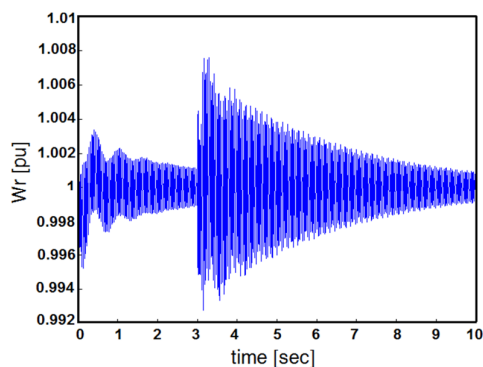
شکل (۱۹): گشتاور بین توربین فشار ضعیف LP و توربین فشار قوی HP با استفاده از PSO

Fig. (19): Torque between the low pressure turbines, high-pressure turbine LP HP using PSO



شکل (۲۰): مقایسه بین گشتاورهای توربین فشار ضعیف (LP) و ژنراتور با

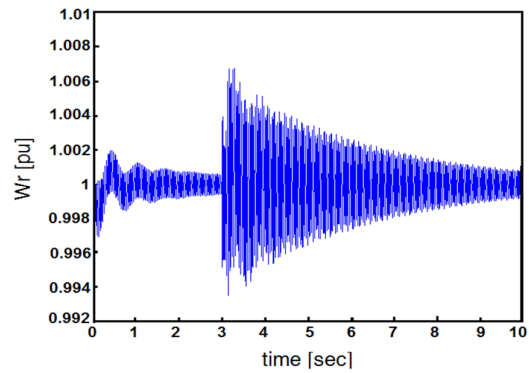
گشتاور توربین فشار ضعیف (LP) و فشار قوی (HP) با استفاده از PSO
Fig. (20): Comparison between low pressure (LP) turbine and generator torque with torque low-pressure turbines and high-pressure (LP, HP) using PSO



شکل (۲۱): سرعت مجموعه روتور با استفاده از PSO

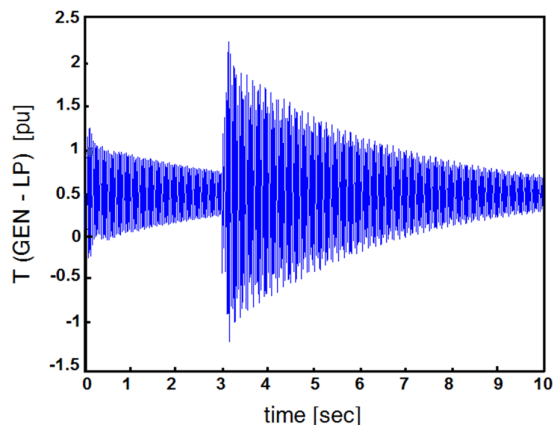
Fig. (21): Speed of the rotor using PSO

نتایج با استفاده از شبکه عصبی در شکل‌های (۲۲-۲۵) نشان داده شده‌اند. شکل (۲۲) گشتاور توربین فشار ضعیف و ژنراتور را نشان می‌دهد و شکل (۲۳) گشتاور بین توربین فشار ضعیف و توربین فشار قوی را نشان می‌دهد. مقایسه بین این دو گشتاور در شکل (۲۴) نشان



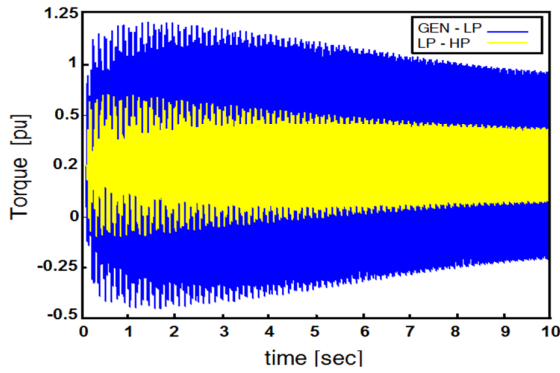
شکل (۱۷): سرعت مجموعه روتور با استفاده از کنترل کننده فازی
Fig. (17): The speed of the rotor using fuzzy controller

در این حالت مازول DSSC به خط انتقال جبران متصل شده و خط را با PSO بر اساس CDC به منظور کاهش SSR تقویت می‌کند. نتایج شبیه‌سازی برای گشتاور بین توربین فشار ضعیف و ژنراتور در شکل (۱۸) و گشتاور بین توربین فشار ضعیف و توربین فشار قوی در شکل (۱۹) و مقایسه بین این دو گشتاور در شکل (۲۰) و سرعت روتور در شکل (۲۱) نشان داده شده است. اگر چه گشتاور بیشینه در شکل (۱۸) برابر است با $2/2$ pu با این حال، مدت زمان این گشتاور تنها برای یک دوره بسیار کوتاه است و در نتیجه محور ژنراتور با هیچ خطری مواجه نشده است. اگر نتایج شبیه‌سازی با PSO با حالت بدون کنترل‌کننده بررسی شود مشاهده می‌شود که در حالت بدون کنترل‌کننده همانطور که قبلاً نیز بیان شد دامنه نوسانات گشتاور در شکل (۱۰) در مدت زمان شبیه‌سازی تا 5 pu هم افزایش داشته است ولی با استفاده از PSO همانطور که در شکل (۱۸) قابل مشاهده است دامنه گشتاور در یک مدت زمان کوتاه $2/2$ pu شده و پس از چند ثانیه رفع شده است و نسبت به حالت بدون کنترل‌کننده به خوبی توانسته است نوسانات گشتاور را کاهش دهد.

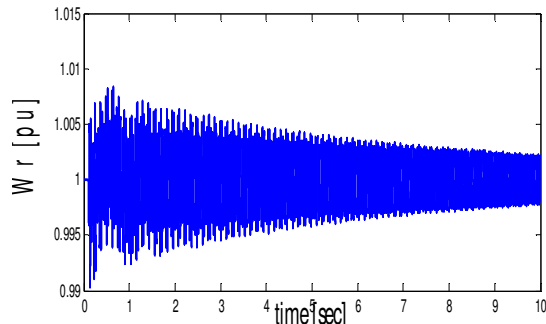


شکل (۱۸): گشتاور بین توربین فشار ضعیف (LP) و توربین ژنراتور با استفاده از PSO

Fig. (18): Torque between the turbine low pressure (LP) generator turbine and using PSO



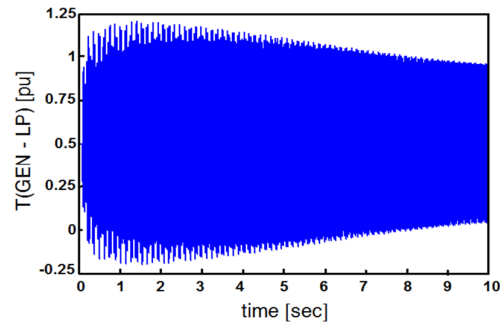
شکل (۲۴): مقایسه بین گشتاورهای توربین فشار ضعیف (LP) و ژنراتور با گشتاور توربین فشار ضعیف (LP) و فشار قوی (HP) با استفاده از شبکه عصبی
Fig. (24): Comparison between low pressure (LP) turbine and generator torque with torque low-pressure turbines and high-pressure (LP, HP) using neural networks



شکل (۲۵): سرعت مجموعه روتور با استفاده از شبکه عصبی
Fig. (25): The speed of the rotor using neural networks

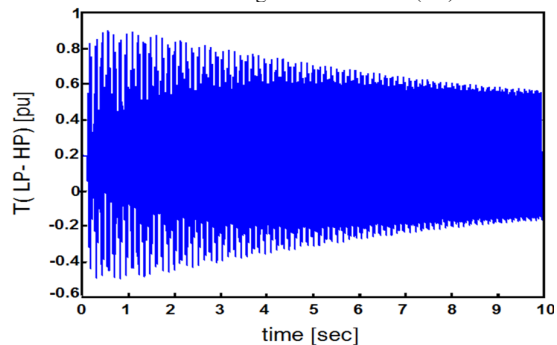
در ادامه سعی بر این است که مقایسه‌ای بین نتایج الگوریتم‌های به کار گرفته شده در این مقاله بیان و بررسی شوند. نتایج حاصله از شبیه‌سازی حالت‌های مختلف در مدت زمان شبیه‌سازی در جدول (۲) به صورت کمی آورده شده‌اند. در این جدول نتایج به دست آمده از الگوریتم‌های استفاده شده در این مقاله را در طول مدت زمان شبیه‌سازی در چند زمان مشخص که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند، آورده شده است. با توجه به اطلاعات آورده شده در جدول (۲) به خوبی می‌توان بیان کرد که عملکرد کدام الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم‌ها بهتر بوده است. عملکرد کنترل‌کننده فازی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی PSO به مراتب بهتر است. شبکه عصبی نیز عملکرد خوبی برای میراسازی نوسانات داشته است و در لحظاتی نیز بهتر از کنترل‌کننده فازی و الگوریتم بهینه‌سازی PSO عمل کرده است. می‌توان بیان نمود که سرعت مجموعه روتور با استفاده از شبکه عصبی حتی نسبت به کنترل‌کننده فازی و الگوریتم بهینه‌سازی PSO از پایداری بیشتری برخوردار بوده و شبکه عصبی به سرعت روتور مطمئن‌تری رسیده است. پس با توجه به نتایج به دست آمده و با توجه به مقادیری که در جدول (۲) آمده است می‌توان نتیجه‌گیری نمود که هر یک از کنترل‌کننده فازی، الگوریتم بهینه‌سازی PSO و شبکه

داده شده است. مشاهده می‌شود که دامنه نوسان‌های گشتاور الکتریکی کاهش یافته است. در شکل (۲۵) سرعت مجموعه روتور با استفاده از شبکه عصبی نشان داده شده است. در مقایسه نتایج حاصل شده با استفاده از شبکه عصبی به خوبی مشاهده می‌شود که با استفاده از یک شبکه عصبی می‌توان به گشتاورهای مطمئن‌تری نسبت به حالت بدون کنترل دست یافت. در لحظات ابتدایی شبیه‌سازی گشتاور بین توربین فشار ضعیف و ژنراتور به $1/2$ پریونیت هم رسیده است ولی با گذشت زمان شبیه‌سازی سیستم به حالت پایدار بودن خودش نزدیک‌تر شده و به خوبی توانسته است دامنه نوسانات گشتاور را که در حالت بدون کنترل رو به افزایش بوده را کاهش و به حالت ماندگارتر و به عدد 0.2 پریونیت برساند. وضعیت گشتاور بین توربین فشار ضعیف و توربین فشار قوی نیز به همین ترتیب قابل بیان است. وضعیت سرعت مجموعه روتور در شکل (۲۵) نسبت به شکل مجموعه سرعت روتور در شکل (۱۳) حالت بدون کنترل با استفاده از شبکه عصبی پایداری بهتری داشته است و از نوسانات سرعت با گذشت مدت زمان شبیه‌سازی کاسته شده است.



شکل (۲۲): گشتاور بین توربین فشار ضعیف (LP) و توربین ژنراتور با استفاده از شبکه عصبی

Fig. (22): Torque between the low pressure turbine and Vturbine X using neural network (LP)



شکل (۲۳): گشتاور بین توربین فشار ضعیف (LP) و توربین فشار قوی (HP) با استفاده از شبکه عصبی

Fig. (23): Torque between the low pressure turbines and high-pressure turbine (LP, HP) using neural network

عصبی با کنترل کننده مناسب به خوبی می‌توانند نوسانات را کاهش دهند و همانطور که در بالا توضیح داده شد عملکرد کنترل کننده فازی از الگوریتم بهینه‌سازی PSO بهتر است، اما در کنترل نوسانات سرعت

جدول (۲): اطلاعات به دست آمده از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی
Table (2): Information obtained from the results of the simulation

گشتاور LP-HP(pu) (در زمان t=6s)	گشتاور GEN-LP(pu) (در زمان t=6s)	گشتاور LP-HP(pu) (در زمان t=3s)	گشتاور GEN-LP(pu) (در زمان t=3s)	
۰/۶	۰/۸	۱/۱	۱/۴	کنترل کننده فازی
۰/۷	۱/۲	۱/۲۵	۲/۲	الگوریتم بهینه‌سازی PSO
۰/۷	۱	۰/۷۵	۱/۱۲	شبکه عصبی

ادامه جدول (۲): اطلاعات به دست آمده از مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی

گشتاور LP-HP(pu) (در زمان t=10s)	گشتاور GEN-LP(pu) (در زمان t=10s)	گشتاور LP-HP(pu) (در زمان t=8s)	گشتاور GEN-LP(pu) (در زمان t=8s)	
۰/۲۵	۰/۵۵	۰/۴	۰/۶	کنترل کننده فازی
۰/۳	۰/۶	۰/۵	۰/۹	الگوریتم بهینه‌سازی PSO
۰/۵۵	۰/۸	۰/۶	۰/۹	شبکه عصبی

شرایط سخت ثابت، کنترل کننده فازی برتر از PSO بر اساس CDC عمل می‌کند. با استفاده از داده‌های به دست آمده از مدل سیستم، شبکه عصبی طراحی و آموزش داده شد. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی پیداست شبکه عصبی برای کاهش نوسان‌های زیر سنکرون عملکرد خوبی داشته است و موفق عمل کرده است.

پی‌نوشت:

1. Sub_Synchronous Resonance
2. Flexible AC Control Transmission System
3. Power System Stabilizer
4. Static Var Compensator
5. Thyristor Control Series Capacitor
6. Distributed Static Series Compensator
7. Series Synchronous Static Compensator
8. Particle Swarm Optimization

۸- نتیجه‌گیری

با حضور خازن ثابت به عنوان جبران‌ساز خط در سیستم قدرت فرکانس تشدید شبکه‌ی الکتریکی زیر سنکرون شده و ممکن است با فرکانس‌های پیچشی روتور تداخل کند و باعث بروز SSR شود. برای کاهش و میرایی نوسانات زیر سنکرون از کنترل کننده مناسب باید استفاده گردد. در حالتی که از کنترل کننده مناسب استفاده نمی‌شود دامنه نوسان‌های گشتاور الکتریکی افزایش می‌یابد و به چندین برابر مقدار نامی خودش می‌رسد. چنانچه گشتاور با روش مناسبی کنترل نشود می‌تواند به محور روتور آسیب برساند. اما چنانچه از DSSC به عنوان جبران‌ساز به همراه کنترل کننده فازی، الگوریتم بهینه‌سازی PSO و شبکه عصبی استفاده شود مشاهده می‌شود که شبکه در برابر SSR ایمن می‌شود. کنترل کننده فازی می‌تواند تا حد زیادی پایداری سیستم را بهبود و نوسان‌ها را پس از چند ثانیه میرا کند. بنابراین، در

References

- [1] R. Pillay Carpanen, B.S. Rigby, "A contribution to modelling and analysis of SSSC-based power flow controls and their impact on SSR", Electric Power Systems Research, Vol. 88, pp. 98–111, July 2012.
- [2] M.R. Alizadeh Pahlavani, H.A. Mohammadpour, "Damping of sub-synchronous resonance and low-frequency power oscillation in a series-compensated transmission line using gate-controlled series capacitor", Electric Power Systems Research, Vol. 81, No. 2, pp. 308–317, Feb. 2011.
- [3] G. Shahgholian, E. Haghjoo, A. Seifi, I. Hassanzadeh, "The improvement DSTATCOM to enhance the quality of power using fuzzy-neural controller", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 2, No. 6, pp. 3-16, Summer 2011 (in Persian).

- [4] S.M. Abd-Elazim, E.S. Ali, "Synergy of particle swarm optimization and bacterial foraging for TCSC damping controller design", WSEAS Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 74-84, April 2013.
- [5] A. Shoulaie, M. Bayati-Poudeh, G. Shahgholian, "Damping torsional torques in turbine-generator shaft by novel PSS based on genetic algorithm and fuzzy logic", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 3-10, Summer 2011. (in Persian).
- [6] Z., Amini, A., Kargar, "Reduction of sub-synchronous resonance using DSSC", Proceeding of the Intelligent Systems Conference, 2014.
- [7] D. Rai, S.O. Faried, G. Ramakrishna, A.A. Edris, "An SSSC-based hybrid series compensation scheme capable of damping subsynchronous resonance", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, pp.531-540, April 2012.
- [8] J. Khazaie, M. Mokhtari, M. Khalilyan, D. Nazarpour, "Sub-synchronous resonance damping using distributed static series compensator (DSSC) enhanced with fuzzy logic controller", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 43, No. 1, pp. 80-89, Dec. 2012.
- [9] D. Rai, S.O. Faried, G. Ramakrishna, A.A. Edris, "An SSSC-based hybrid series compensation scheme capable of damping subsynchronous resonance", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, pp. 531-540, April 2012 (doi: 10.1109/TPWRD.2011.2175253)
- [10] Z. Amini, A. Kargar, "Reduction of sub-synchronous resonance using artificial neural network", International Journal Multidisciplinary Sciences and Engineering, Vol. 4, No. 10, pp. 6-9, Nov. 2013.
- [11] IEEE SSR Working Group, "Second benchmark model for computer simulation of of subsynchronous resonance", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 5, pp. 1057 – 1066, May 1985.
- [12] R.G. Farmer, "Second benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance IEEE subsynchronous resonance working group of the dynamic system performance subcommittee power system engineering committee", IEEE Power Engineering Review, Vol. PER-5, No. 5, May 1985.
- [13] P. Fajri, S. Afsharnia, D. Nazarpour, M.A. Tavallaei, "Modeling simulation and group control of distributed static series compensators", American J. of Engineering and Applied Sciences, Vol. 1, No. 4, pp. 347-357, 2008.
- [14] D. Divan, "Distributed intelligent power networks—A new concept for improving T&D system utilization and performance", Proceeding of the IEEE/TDC, pp. 1-6, New Orleans, La, USA, April 2005.
- [15] M. Rauls, "Analysis and design of high frequency co-axial winding transformers", MS Thesis, US: University of Wisconsin Madison, 1992.
- [16] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible ac transmission system", Wiley-IEEE Press, 2000.
- [17] C.C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, March/April 1990.
- [18] M.S. Widyana, "On the effect of AVR gain on bifurcations of subsynchronous resonance in power systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32, No. 6, pp. 656-663, July 2010.
- [19] B.S. Nagabhushana, H.S. Chandrasekharaiah, "Analysis of SSR using artificial neural network", Proceeding of the IEEE/ISAP, pp. 416-420, Orlando, FL, Jan./Feb. 1996.