میراسازی نوسانات زیرسنکرون به‌کمک طراحی کنترل‌کننده فازی-عصبی برای مبدل DFIG

رضا هاشمی[۱]، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ ایمان پورفر[۲]، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر – دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور - دزفول - ایران - Hashemi.elec@gmail.com
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی جندی‌شاپور - دزفول - ایران - Pourfar@jsu.ac.ir

چکیده: تشدید زیرسنکرون (SSR[۱]) معمولاً در مزارع بادی متصل به خط انتقال جبران شده‌سری اتفاق می‌افتد. در این مقاله یک کنترل‌کننده فازی عصبی با توجه به‌روش جدید میراسازی نوسانات زیر سنکرون توسط مبدل‌های ژنراتورهای القایی از دوسوتغذیه (DFIG[۲])، طراحی می‌شود. با استفاده از بهره بلوک میرایی کنترل‌کننده زیرسنکرون (SSRDC[۳]) به‌دست‌آمده در حالات مختلف، کنترل‌کننده فازی-عصبی به‌روش سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS[۴]) آموزش داده شده و بر روی سیستم پیاده‌سازی می‌شود. کنترل‌کننده فازی-عصبی طراحی‌شده موجب کاهش دامنه فراجهش و زمان نشست میرایی می‌شود و سبب بهبود پاسخ میراسازی نوسانات می‌گردد. از تحلیل مانده‌ها برای تشخیص نوع سیگنال‌ها و محل اعمال آن و از دیاگرام مکان هندسی برای طراحی بهره بلوک کنترل میرایی زیرسنکرون استفاده می‌شود. ناپایداری مود زیر سنکرون به‌وسیله تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی حوزه زمان نشان داده می‌شود. برای مطالعه از سیستم استاندارد تست IEEE شماره یک استفاده‌شده و شبیه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تشدید زیرسنکرون، ژنراتور القایی از دو سو تغذیه، خود تحریکی ناشی از ژنراتورهای القایی، تحلیل مقادیر ویژه، کنترل‌کننده فازی-عصبی

Damping Sub-synchronous Oscillations by Designing Neuro-Fuzzy Controller for DFIG Convertor

R. Hashemi[1], MSc Student; I. Pourfar[2], Assistant Professor

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Jundi-shapur University of Technology, Dezful, Iran,
Email: Hashemi.elec@gmail.com
Faculty of Electrical and Computer Engineering, Jundi-shapur University of Technology, Dezful, Iran,
Email: Pourfar@jsu.ac.ir

Abstract: Sub-synchronous resonance usually occurs at the wind farms that connected to series compensated transmission lines. At this paper, a neuro fuzzy controller is designed for the new method of damping sub-synchronous oscillations using doubly-fed induction generator (DFIG) convertors. The adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) approach is used to train the proposed neuro fuzzy controller according to the various values of the SSR damping controller (SSRDC) gain. It is shown that using the designed neuro fuzzy controller improve the performance of the damping controller and decrease the overshoot and settling time of the oscillations. The appropriate input signal for SSRDC and the optimum point to apply the output signal identified according to the residue-based analysis in the system and its gain is determined based on the root-locus diagrams. instability due to SSR is shown by modal analysis and time domain simulations. The IEEE first benchmark model is used in this study and simulations are done using MATLAB.

Keywords: Sub-synchronous resonance, doubly-fed induction generator, induction generator effect, eigenvalue analysis, neuro-fuzzy controller

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۴
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴
نام نویسنده مسئول: ایمان پورفر
نشانی نویسنده مسئول: ایران - دزفول - روبه‌روی پایگاه چهارم شکاری - دانشگاه صنعتی جندی شاپور - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

انرژی باد نسبت به سایر انرژی‌ها به‌دلیل پاک بودن، قیمت ارزان و تجدیدپذیر بودن توسعه بیش‌تری یافته است. توربین‌های بادی با تبدیل انرژی مکانیکی باد به انرژی الکتریکی، می‌توانند برق موردنیاز قسمتی از شبکه را تأمین کنند. کاهش هزینه‌ی ساخت توربین‌های بادی و بهبود عملکردی آن، باعث توجه بیش‌تر سرمایه‌گذران به احداث مزارع بادی شده است. امروزه در میان انواع فنّاوری توربین‌های بادی، ژنراتورهای القایی از دوسوتغذیه به‌دلیل کاهش تنش مکانیکی، از بین بردن آلودگی صوتی و قابلیت کنترل‌پذیری توان اکتیو و راکتیو توسط مبدل‌های پشت‌به‌پشت بین استاتور متصل به شبکه و روتور ژنراتور القایی، موارد استفاده بیش‌تری پیدا کرده‌اند [۱]. در سال ۲۰۱۵ حدود ۱/۶ درصد انرژی کل جهان از طریق انرژی باد تأمین شده است و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۲۰ حدود ۱۲ درصد انرژی کل دنیا از طریق توان باد تأمین گردد [۲]. با توجه به این افزایش سطح تولید توان در مزارع بادی، دو راه‌حل کلی برای شبکه‌های انتقال می‌توان در نظر گرفت، اولی ساخت و ایجاد خط انتقال جدید و دومی افزایش ظرفیت خطوط انتقالی که قبلاً احداث شده‌اند. ایجاد خط انتقال جدید از نظر اقتصادی بسیار پرهزینه است؛ بنابراین از روش دوم یعنی افزایش ظرفیت انتقال به‌کمک جبران‌سازی سری (بانک‌های خازنی) استفاده می‌شود [۳]. برای انتقال انرژی مزارع بادی می‌توان از خطوط ولتاژ بالای AC یا خطوط ولتاژ بالای DC استفاده نمود. مطالعات نشان می‌دهد که انتقال توان با استفاده از خطوط ولتاژ بالای AC برای فاصله‌های بالای ۲۵۰ کیلومتر ارزان‌تر است، اگر از خازن جبران‌شده سری استفاده شود [۴]. شرکت ABB طی تحقیقاتی نشان داد که هزینه افزایش انتقال توان یک خط انتقال موجود از ۱۳۰۰ مگاوات به ۲۰۰۰ مگاوات با استفاده از جبران‌ساز سری ۹۰٪ کم‌تر از احداث یک خط انتقال جدید است [۵]. خازن سری معمولاً در وسط خط انتقال برای کاهش راکتانس بین بار و منبع قرار می‌گیرد و باعث افزایش ماکزیمم توان قابل‌انتقال و کاهش تلفات می‌گردد. در این شبکه الکتریکی، خازن جبران‌شده سری می‌تواند باعث ایجاد تشدید زیرسنکرون شود [۶]. طبق گزارش کمیته‌ی مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک (IEEE) در سال ۱۹۸۵، نوسانات زیر سنکرون به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۷]:

رزونانس زیرسنکرون شرایطی از یک سیستم قدرت است که در آن شرایط، شبکه الکتریکی با یک توربین ژنراتور در یک یا چند فرکانس طبیعی از سیستم ترکیبی که کم‌تر از فرکانس سنکرون شبکه است، تبادل انرژی می‌کنند. تشدید زیرسنکرون به دو دسته حالت گذرای تشدید زیرسنکرون (TA[۵]) و حالت ماندگار تشدید زیرسنکرون تقسیم می‌شود. حالت گذرای تشدید زیرسنکرون حین اغتشاشات در شبکه (مانند خطای سه‌فاز به زمین) به وجود می‌آید. در خطوط انتقال سری فرکانس نوسانات برابر فرکانس تشدید شبکه است که اگر این فرکانس نزدیک یکی از فرکانس‌های طبیعی شفت ژنراتور باشد، گشتاور بزرگی به وجود خواهد آورد. این گشتاور به‌طور مستقیم به نسبت اندازه نوسانات جریان وابسته است و می‌تواند موجب اِیجاد نوسانات پیچشی شدیدی در محل ژنراتور و توربین گردد. تا به امروز هیچ گزارشی مبنی بر آسیب شفت توسط حالت گذرای تشدید زیرسنکرون ارائه نشده است [۲، ۸]. حالت ماندگار تشدِید زیرسنکرون به دو دسته تقسیم می‌شود، اولی خودتحریکی ناشی از ژنراتور القایی که از مقاومت منفی در فرکانس زیرسنکرون به وجود آمده و دیگری تداخل پیچشی (TI[۶]) ناشی از تبادل انرژی بین توربین و شبکه LC است. در توربین-ژنراتورهای بادی، شفت واسط بین توربین-ژنراتور است. مدل مکانیکی تک‌جرمه نمی‌تواند نوسانات الکترومکانیکی و پیچشی شفت را پیش‌بینی کند. ازاین‌رو شفت واسط توربین-ژنراتور باید حداقل به‌صورت دو جرمِ مدل شود تا این نوسانات در سیستم ظاهر شوند [۹]. این نوسانات در صورت عدم محافظت به‌موقع سیستم الکتریکی، نوسانات نامیرایی در سیستم به وجود می‌آید که سبب آسیب رساندن به قسمت‌هایی از توربین‌های بادی، خط انتقال و ناپایداری کل شبکه می‌شود [۶]. اخیراً دو رویداد مربوط به SSR در مزارع بادی متصل به خط انتقال جبران‌شده رخ داده است. اولین حادثه، در اکتبر سال ۲۰۰۹ در سیستم شورای قابلیت اطمینان برق جنوب تگزاس (ERCOT[۷]) به‌صورت خطای تک‌فاز به زمین در خط انتقال جبران‌شده ۳۴۵-kV به ظرفیت ۴۸۵-MW اتفاق افتاد. بعد از خطا و پاک‌سازی آن، توربین بادی به خط انتقالی با سطح جبران‌سازی ۵۰٪ متصل شد، افزایش‌ولتاژ و تشدید زیرسنکرون بین کنترل‌کننده ژنراتور توربین‌های بادی و خازن سری خط انتقال باعث آسیب رساندن به تجهیزات گردید. تحلیل اولیه تداخل کنترلی بین کنترل‌کننده توربین بادی DFIG و خازن سری را نشان می‌دهد که باعث ایجاد نوسانات ولتاژ نامیرا گردیده است [۱۰]. حادثه دوم در جنوب‌غرب مینه‌سوتا اتفاق افتاد که مزرعه بادی دارای توربین‌های DFIG به ظرفیت ۱۵۰–MW متصل به خط انتقال سری با سطح جبران‌سازی اولیه ۶۰٪ که با تغییر این سطح جبران‌سازی، نوسانات زیرسنکرون افزایش یافت. گزارش این حادثه تداخل کنترلی بین کنترل‌کننده توربین بادی DFIG و خازن سری را نشان می‌دهد [۱۱].

میراسازی نوسانات زیرسنکرون معمولاً به کمک سیستم انتقال انعطاف‌پذیر جریان متناوب (FACTS[۸]) مانند خازن سری کنترل‌شده با تریستور (TCSC[۹])، خازن سری کنترل‌شده با گیت (GCSC[۱۰])، جبران‌ساز وار استاتیکی (SVC[۱۱]) و جبران‌ساز سنکرون استاتیکی (STATCOM[۱۲]) انجام می‌شود [۱۲، ۱۳]. روش دیگر، استفاده از مبدل‌های توان در توربین‌های بادی است که تنها برای توربین‌هایی که دارای مبدل کنترلی هستند، کاربرد دارد [۱۶-۱۴]. کنترل مبدل‌ها راه‌حلی ارزان‌قیمت نسبت به تجهیزات میراسازی گران‌قیمتی مانند ادوات FACTS است. با توجه به اینکه ژنراتور القایی از دوسوتغذیه دارای مبدل توان بین روتور و استاتور متصل به شبکه است، قابلیت میراسازی نوسانات زیرسنکرون با اضافه کردن یک سیگنال کنترلی کمکی را دارند. این سیگنال می‌تواند سیگنال محلی مانند ولتاژ باس، جریان خط انتقال، سرعت روتور، توان اکتیو یا راکتیو ژنراتور و غیره باشد. مبدل توان در DFIG شامل مبدل سمت شبکه (GSC[۱۳]) و مبدل سمت روتور (RSC[۱۴])

است که با یک لینک DC به هم متصل شده‌اند [۱۳]. ساختار مبدل سمت شبکه شبیه STATCOM است و قابلیت میراسازی نوسانات زیرسنکرون را دارد. تفاوت بین STATCOM و GSC در میزان میراسازی نوسانات است [۱۵]. استفاده از کنترل مبدل برای میراسازی نوسانات زیرسنکرون در مزارع بادی توسط خانم فن و همکارانش مطرح شد [۱۵]. در این مقالات تنها قسمت‌هایی از مبدل‌های DFIG مورد بررسی قرار گرفت [۱۴، ۱۵]. آقای محمدپور و همکارش در مقاله‌ی بسیار کامل و جامع تمامی قسمت‌های مبدل DFIG را با سه سیگنال محلی سرعت روتور، توان اکتیو خط انتقال و ولتاژ خازن سری خط انتقال به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده SSRDC مورد بررسی قرار دادند. ایشان نشان دادند که از سیگنال روتور و توان خط انتقال برای میراسازی نوسانات زیرسنکرون به‌عنوان سیگنال ورودی کنترل‌کننده نمی‌توان استفاده کرد. همچنین، تمامی نقاط کنترل‌کننده سمت شبکه زمانی که از ولتاژ خازن خط انتقال استفاده می‌شود، برای اعمال SSRDC مناسب است [۱۶].

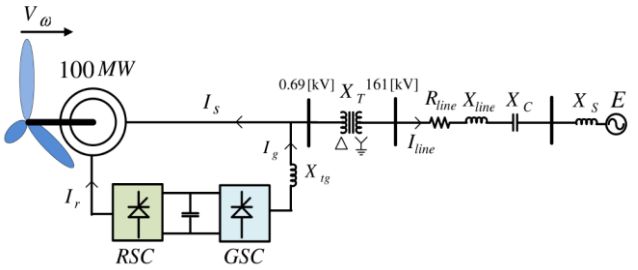
در سیستم موردمطالعه سرعت باد و سطح جبران‌سازی به‌عنوان ورودی سیستم ممکن است به‌طور مرتب تغییر کند؛ بنابراین در هر مرحله نیاز به طراحی بهره کنترل‌کننده میرایی زیرسنکرون از طریق دیاگرام مکان هندسی است که نویسندگان مقالات قبلی، در کار خود تنها یک‌بار تغییر در شرایط سیستم را در نظر گرفتند. پژوهش حاضر ادامه‌دهنده کار دو نویسنده قبل بوده و با اضافه کردن کنترل‌کننده فازی عصبی تمامی حالت‌های سیستم را پیش‌بینی می‌کند و با پایدار نگه‌داشتن سیستم، پاسخ میراسازی را بهبود می‌بخشد. همچنین، سیگنال جریان خط انتقال به‌عنوان سیگنال کنترل ورودی جدید به تمام نقاط مبدل اعمال کرده و نتایج بیان می‌گردد. برای این کار ابتدا اجزای سیستم موردمطالعه را مدل‌سازی کرده و سپس مقادیر ویژه سیستم حول نقطه تعادل‌اش به دست می‌آید. به‌کمک جدول عامل مشارکت مودهای سیستم تشخیص داده می‌شود. از هر دو روش تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی حوزه زمان برای نشان دادن ناپایداری مود زیرسنکرون استفاده می‌شود. از تحلیل مانده‌ها برای تشخیص سیگنال مناسب و محل اعمال و از دیاگرام مکان هندسی برای طراحی بهره کنترل‌کننده میرایی زیرسنکرون استفاده می‌شود. به‌کمک بهره‌های به‌دست‌آمده در حالت مختلف، یک کنترل‌کننده فازی-عصبی برای تمامی حالت‌های سیستم طراحی و پیاده‌سازی می‌شود.

در بخش دوم نحوه‌ی مدل‌سازی کلی مزرعه بادی دارای ژنراتور القایی از دوسوتغذیه متصل به خط انتقال سری بیان می‌شود و ناپایداری مود زیر سنکرون به کمک تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی حوزه زمان نشان داده می‌شود. در بخش سوم نحوه انتخاب سیگنال و طراحی کنترل‌کننده برای سیگنال جریان خط انتقال و ولتاژ خازن سری خط انتقال بیان می‌شود. در بخش چهارم نحوه طراحی کنترل‌کننده فازی-عصبی و نتایج شبیه‌سازی آن نشان داده شده و درنهایت در بخش پنجم نتیجه حاصل از این مطالعه بیان می‌گردد.

۲- مدل‌سازی اجزای سیستم موردمطالعه

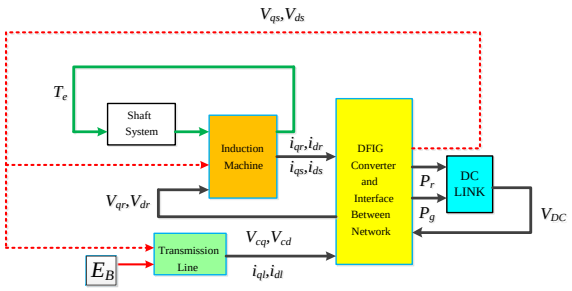
۲-۱- سیستم قدرت موردمطالعه

سیستم موردمطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است که یک مزرعه بادی دارای ژنراتور القایی از دوسوتغذیه به یک خط انتقال سری جبران‌شده در سیستم تست استاندارد شماره یک IEEE (FBM[۱۵]) متصل می‌شود [۱۷]. در این سیستم، مزارع بادی DFIG دور از ساحل با توان 100MW (به‌صورت ۵۰ واحد توربین بادی با توان 2MW) به یک باس بی‌نهایت با ولتاژ 161kV به‌صورت سری با خط انتقال قرارگرفته است.



شکل ۱: دیاگرام تک‌خطی سیستم موردمطالعه

در این سیستم از مدل مرتبه ۶ برای ژنراتور القایی، مدل مرتبه ۳ برای سیستم دو جرمی شفت توربین بادی، مدل مرتبه ۴ برای خط انتقال الکتریکی، مدل مرتبه ۴ برای مبدل سمت شبکه، مدل مرتبه ۴ برای مبدل سمت روتور و مدل مرتبه یک برای بیان مدل‌سازی لینک DC استفاده شده است، جزئیات مدل‌سازی به‌طور کامل در مرجع [۱۳، ۱۸] بیان شده است. ماتریس فضای حالت اجزای سیستم، به‌طور خلاصه در پیوست ۱ بیان شده است. با اتصال اجزای شبکه به یکدیگر، یک سیستم مرتبه ۲۲ خواهیم داشته که مطالعات روی این سیستم انجام می‌شود. شکل ۲ بلوک دیاگرام و نحوه ارتباط کلی سیستم موردمطالعه را نشان می‌دهد. مقادیر پارامتر سیستم در پیوست ۲ بیان شده است.



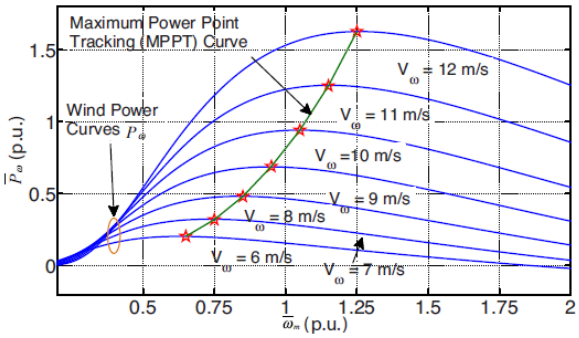
شکل ۲: نحوه ارتباط کلی اجزای سیستم موردمطالعه

۲-۲- مدل‌سازی دینامیک توربین بادی

گشتاور تولیدی باد بر روی شفت توربین که از طریق سرعت باد (V_ω) ایجاد می‌شود، از رابطه زیر می‌توان به دست آورد [۱۳]:

$$T_\omega = \frac{P_\omega}{\omega_m} = \frac{0.5\rho\pi R^2 C_p V_\omega^2}{\omega_m} \qquad (۱)$$

P_ω توان باد (W)، T_ω گشتاور باد ($N.m$)، ρ چگالی هوا ($Kg.m^{-3}$)، R شعاع روتور توربین‌های بادی (m)، ω_m سرعت مکانیکی زاویه (Rad/s) است. زاویه پیچشی برابر صفر و شعاع روتور برابر ۲۰۰ فوت در نظر گرفته شده است. برای به دست آوردن ماکزیمم توان تولیدی در مزارع DFIG از روش ردیابی حداکثر توان (MPPT[۱۶]) استفاده می‌شود. در شکل ۳ توان باد به‌ازای سرعت شافت توربین برحسب پریونیت برای سرعت‌های متفاوت با منحنی ردیابی حداکثر توان نشان داده شده است. در این نمودار به‌ازای سرعت‌های مختلف باد، توان مرجع و سرعت مناسب به دست می‌آید [۱۳].



شکل ۳: توان مکانیکی به‌ازای سرعت روتور برای سرعت‌های متفاوت باد

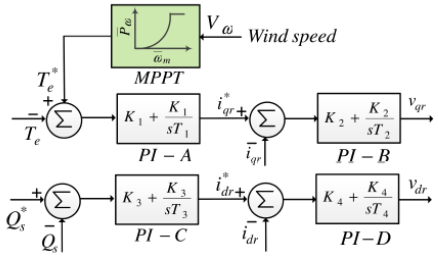
در شکل ۳ در یک سرعت باد مشخص، توان خروجی توربین در یک مقدار سرعت روتور خاص که سرعت بهینه نامیده می‌شود، به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. جدول ۱ نشان‌دهنده سرعت شفت روتور و توان مکانیکی به‌ازای چندین سرعت مختلف با توجه به شکل ۳ است.

جدول ۱: سرعت روتور و توان مکانیکی با توجه به شکل ۶

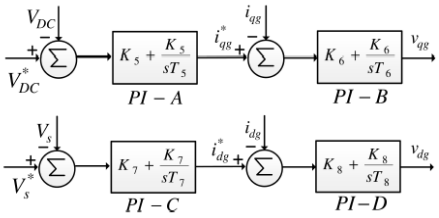
$V_\omega(m/s)$	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
$\omega_m(p.u)$	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۹۵	۱/۰۵	۱/۱۵	۱/۲۵
$P_m(p.u)$	۰/۳۲	۰/۴۹	۰/۶۹	۰/۹۵	۱/۲۵	۱/۶
$T_m(p.u)$	۰/۴۳	۰/۵۸	۰/۷۳	۰/۹	۱/۰۹	۱/۲۸

۲-۳- مدل‌سازی کنترل‌کننده DFIG

امروزه تکنیک‌های متعددی با درجه پیچیدگی متفاوت جهت کنترل توان و گشتاور ماشین القایی مطرح شده است. رایج‌ترین روش‌ها عبارت‌اند از روش‌های کنترل اسکالر که بیش‌تر در کنترل ماشین القایی در وضعیت موتوری به‌کار می‌روند، روش کنترل برداری (VC[۱۷])، روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC[۱۸]) و روش کنترل مستقیم توان (DPC[۱۹]) که پرکاربردترین روش‌ها برای کنترل ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) است که کلیه این روش‌ها، مبتنی بر جهت‌یابی شار استاتور و یا روتور می‌باشند [۱۹، ۲۰]. کنترل‌کننده‌های DFIG به دو قسمت کنترل‌کننده سمت روتور و کنترل‌کننده سمت استاتور تقسیم می‌شود. در این مقاله از روش VC استفاده‌شده که کنترل‌کننده‌های GSC و RSC هرکدام ۴ متغیر حالت به سیستم اضافه می‌کند. کنترل‌کننده سمت روتور مطابق شکل ۴ گشتاور الکتریکی و توان راکتیو را تنظیم می‌کند و کنترل‌کننده سمت شبکه مطابق شکل ۵ ولتاژ لینک DC و ولتاژ ترمینال ژنراتور القایی را تنظیم می‌کند. مبدل سمت شبکه و روتور ایده‌آل (تلفات کلید زنی نداریم) در نظر گرفته می‌شود و قابلیت عبور توان و پهنای باند نامحدود را دارند و می‌توانند توان را بدون ذخیره کردن انرژی انتقال دهند. پهنای باند نامحدود بدین معنی که فرکانس کلید زنی بالا و عملکرد به‌اندازه کافی سریع در مقایسه با سایر قسمت‌های سیستم را دارد. در تحقیق حاضر توان راکتیو را ثابت و برابر صفر (برای کار در ضریب قدرت واحد) در نظر گرفته می‌شود [۱۸].



شکل ۴: کنترل‌کننده سمت روتور



شکل ۵: کنترل‌کننده سمت شبکه

جدول ۲: مقادیر حالت ماندگار متغیرهای سیستم به‌ازای سطح‌جبران سازی ۳۰٪ و سرعت باد ۷ متربرثانیه

i_{qs0}	-۰/۶۰۱۲	ω_{r0}	۰/۷۵۰۰
i_{ds0}	۰/۰۲۷۳	T_{tg0}	۰/۴۳۰۰
i_{d0s0}	۰/۰۰۰۰	i_{q0s0}	۰/۰۰۰۰
i_{qr0}	۰/۶۳۱۷	i_{ql0}	۰/۹۲۵۸
i_{dr0}	۰/۳۳۲۹	i_{ds0}	-۰/۰۵۳۳
ω_{m0}	۰/۷۵۰۰	V_{qc0}	۰/۰۲۰۰
V_{dc0}	۰/۳۴۷۲	i_{qg0}^*	۰/۳۲۴۵
V_{qr0}	۰/۳۶۷۷	i_{dg0}^*	-۰/۰۲۵۹
V_{dr0}	-۰/۰۴۴۰	V_{qg0}	۱/۴۱۵۸
i_{qr0}^*	۰/۶۳۱۷	V_{dg0}	-۰/۱۶۲۱
i_{dr0}^*	۰/۳۳۲۹	V_{DC0}	۱۲۰۰

۲-۴- به‌دست آوردن نقاط تعادل سیستم

نقطه تعادل نقاطی هستند که در آن نقاط، کلیه مشتقات X_1 تا X_n هم‌زمان صفر می‌شود. این نقاط مکان‌هایی با سرعت صفر را بر روی مسیر حالت (مجموعه نقاطی که به‌وسیله حالت سیستم به هنگام حرکت سیستم در فضای حالت رسم می‌شود) تعریف می‌کند [۲۱]. اگر سیستم خطی باشد، تنها یک نقطه تعادل داریم

اما اگر سیستم غیرخطی باشد، ممکن است بیش از یک نقطه تعادل داشته باشیم. با قرار دادن مشتق‌های متغیر حالت برابر صفر و حل معادلات غیرخطی می‌توان نقاط تعادل سیستم مرتبه ۲۲ را به‌دست آورد. جدول ۲ نقاط تعادل به‌دست‌آمده به‌ازای سطح جبران‌سازی ۳۰٪ و سرعت باد ۷ متربرثانیه را نشان می‌دهد.

۲-۵- مقادیر ویژه سیستم

فضای حالت کلی سیستم مدل‌شده حول نقطه تعادل‌اش (با توجه به سرعت باد و سطح‌جبران سازی) به‌کمک دستور linmod در متلب استخراج می‌شود [۲۲]. از روی فضای حالت کلی سیستم، ۲۲ مقدار مقادیر ویژه با توجه به مرتبه سیستم به دست می‌آید. جدول ۳ نشان‌دهنده مقادیر ویژه سیستم به‌ازای سطح جبران‌سازی ۷۵٪ و سرعت باد ۷ متربرثانیه است. از λ_1 تا λ_{12} مودهای مختلط سیستم و از λ_{13} تا λ_{22}مودهای غیرنوسانی سیستم می‌باشند. مود $\lambda_{1,2}$ را مود زیرسنکرون، $\lambda_{3,4}$ مود فوق‌سنکرون، $\lambda_{5,6}$مود الکترومکانیکی، $\lambda_{7,8}$ مود شفت سیستم، $\lambda_{9,10}$مود فرکانس بالای سیستم و $\lambda_{11,12}$ مود کنترل‌کننده سیستم نام‌گذاری می‌شود. مقادیر حقیقی تمامی مودها به‌جز مود زیرسنکرون منفی است و ناپایداری این مود را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مقادیر ویژه سیستم به ازای جبران‌سازی ۷۵٪ و سرعت باد ۷ متربرثانیه

مقادیر ویژه	مود	مقادیر ویژه	مود
-۹۱/۸۵	λ_{15}	**+۰/۲۷۴**±j۱۲۳/۲۴	$\lambda_{1,2}$
-۰/۵۰۰	λ_{16}	-۶/۰۹۴۴±j۶۲۶/۲۹	$\lambda_{3,4}$
-۰/۰۱۹	λ_{17}	-۹/۳۴۵۶±j۹۸/۸۶	$\lambda_{5,6}$
-۰/۰۰۲	λ_{18}	-۱/۱۷۲۷±j۵/۷۹۷۲	$\lambda_{7,8}$
-۲۰/۹۷	λ_{19}	-۳۵۷/۸±j۲۱۸۹/۲	$\lambda_{9,10}$
-۱۹/۹۲	λ_{20}	-۰/۰۵۴±j۰/۳۰۲۱	$\lambda_{11,12}$
-۰/۰۰۰	λ_{21}	-۴۴۸۹/۶	λ_{13}
-۰/۰۰۰	λ_{22}	-۱۰۹/۵	λ_{14}

۲-۶- عامل مشارکت

تشخیص مودها به کمک عامل مشارکت انجام می‌شود، عامل مشارکت اندازه‌گیری نسبت مشارکت هر متغیر حالت در هر مود (مقادیر ویژه) سیستم را فراهم می‌کند. اندازه عامل مشارکت متغیر حالت j^{th} در مود i^{th} در سیستم به‌صورت زیر است [۱۴]:

$$P_{ji} = \frac{|\psi_{ji}||\phi_{ij}|}{\sum_{k=1}^{n}|\psi_{jk}||\phi_{kj}|} \qquad (۲)$$

که در آن P_{ji} ضریب مشارکت، n تعداد متغیرهای حالت، ψ و ϕبردار ویژه راست و چپ است. در جدول ۴ عامل مشارکت بزرگ‌تر در هر ستون پررنگ‌تر شده که میزان تأثیر متغیرهای حالت بر روی هر مود را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه متغیرهای حالت کنترل‌کننده سمت شبکه و سمت روتور (هشت متغیر حالت) تاثیری بر مودهای زیرسنکرون، فوق‌سنکرون، الکترومکانیکی و شفت سیستم ندارد، در جدول ۴ از آوردن آن صرف‌نظرکرده‌ایم.

جدول ۴: ضرایب مشارکت سیستم به ازای سطح جبران‌سازی ۷۵٪ و سرعت باد ۷ متربرثانیه

متغیر حالت	مود زیر سنکرون ($\lambda_{1,2}$)	مود فوق سنکرون ($\lambda_{3,4}$)	مود الکترومکانیکی ($\lambda_{5,6}$)	مود شفت سیستم ($\lambda_{7,8}$)
محور q جریان استاتور-i_{qs}	**۰/۲۶۴**	**۰/۲۱۶**	**۰/۲۴۵**	۰/۰۰۲
محور d جریان استاتور-i_{ds}	**۰/۱۹۰**	**۰/۱۶۰**	**۰/۲۱۳**	**۰/۰۱۹**
محور صفر جریان استاتور-i_{0s}	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
محور q جریان روتور-i_{qr}	**۰/۲۵۸**	**۰/۲۰۱**	**۰/۲۸۵**	۰/۰۰۳
محور d جریان روتور-i_{dr}	**۰/۱۸۶**	**۰/۱۴۹**	**۰/۲۵۲**	۰/۱۲۴
محور صفر جریان روتور-i_{0r}	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
محور q ولتاژ خازن سری خط انتقال-v_{cq}	۰/۰۲۱	۰/۰۵۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
محور d ولتاژ خازن سری خط انتقال-v_{cd}	۰/۰۲۳	۰/۰۶۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۱
محور q جریان خط انتقال-i_{lq}	۰/۰۲۷	۰/۰۷۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
محور d جریان خط انتقال-i_{ld}	۰/۰۲۷	۰/۰۷۵	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
سرعت توربین-ω_m	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۸۳
سرعت روتور-ω_r	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	**۰/۳۸۵**
گشتاور بین دو جرم-T_{tg}	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	**۰/۳۷۷**
ولتاژ لینک DC مبدل‌ها-V_{DC}	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

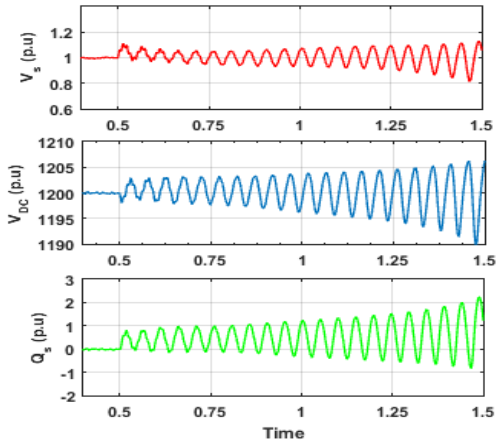
طبق جدول ۴ مود $\lambda_{7,8}$ به سرعت روتور (ω_r) و گشتاور مکانیکی بین دو جرم (T_{tg}) وابسته است و آن را مود شفت سیستم می‌نامند. مود $\lambda_{5,6}$ به جریان‌های روتور و استاتور وابسته است، یعنی به قسمت الکتریکی ژنراتور وابسته است. با توجه به جدول ۱ به‌ازای سرعت باد ۷ متربرثانیه فرکانس سرعت شفت برابر ۰/۷۵ پریونیت یا ۴۵ هرتز است؛ بنابراین محدوده مکمل فرکانس سرعت شفت توربین باید نزدیک فرکانس الکترومکانیکی سیستم باشد. با توجه به قسمت موهومی مودها تنها مود ۹/۳۴۵۶±j۹۸/۸۶- در محدوده این فرکانس (۹۸/۸۶÷۲π)=۴۴/۳۱-۶۰) قرار می‌گیرد، این فرکانس با فرکانس شفت توربین یعنی ۴۵ هرتز منطبق است (در جدول ۱ مقدار سرعت شفت توربین در سرعت ۷ متربرثانیه برابر ۰/۷۵ پریونیت یا ۴۵ هرتز است). به‌دلیل اینکه این مود هم به

قسمت مکانیکی (سرعت شفت توربین) و هم به قسمت الکتریکی (جریان‌های روتور و استاتور) مربوط است، آن را مود الکترومکانیکی می‌نامند. فرکانس طبیعی (f_n) سیستم برابر است با [۶]:

$$f_n = f_s \sqrt{\frac{K \times X_c}{\Sigma X}} \qquad (۳)$$

K سطح جبران‌سازی، ΣX راکتانس دیده‌شده از شین بی‌نهایت و X_c راکتانس خازن خط انتقال است. طبق رابطه (۳) و جایگذاری پارامترهای سیستم در سطح جبران‌سازی ۷۵٪، فرکانس طبیعی برابر ۴۰/۲۸ هرتز به دست می‌آید. مکمل فرکانس طبیعی مود زیرسنکرون برابر ۱۹/۶۲ و مکمل فرکانس طبیعی مود فوق‌سنکرون برابر ۹۹/۷۲ است؛ بنابراین به‌ترتیب $\lambda_{1,2}$ و $\lambda_{3,4}$ در محدوده مود زیرسنکرون و فوق‌سنکرون قرار می‌گیرد.

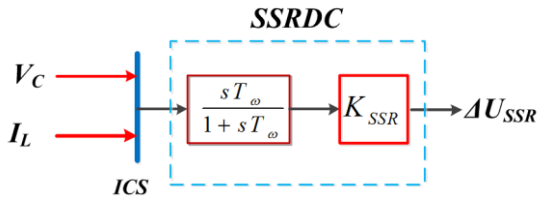
شکل ۶ نشان‌دهنده ولتاژ استاتور ژنراتور (V_S)، ولتاژ لینک DC (V_{DC}) و توان راکتیو (Q_S) برای زمانی که سرعت باد ۷ متربرثانیه و سطح جبران‌سازی در لحظه ۰/۵ ثانیه از ۲۵٪ به ۷۵٪ می‌رسد. همان‌طور که از شکل مشخص است در لحظه راه‌اندازی سیستم پایدار است و در لحظه ۰/۵ ثانیه با افزایش سطح جبران‌سازی، سیستم ناپایدار می‌شود و خودتحریکی ناشی از ژنراتور القایی (IG) رخ می‌دهد. علت این نوسانات این است که در شروع شبیه‌سازی سیستم برای سطح جبران‌سازی کم سیستم در ناحیه پایدار قرار دارد و با یک اغتشاش کوچک، سیستم در ناحیه دیگری قرار می‌گیرد که مود زیرسنکرون ناپایدار است.



شکل ۶: ولتاژ استاتور ژنراتور (V_S)، ولتاژ خازن لینک DC (V_{DC}) و توان راکتیو (Q_S) برای سرعت باد ۷ متربرثانیه و تغییر سطح‌جبران سازی

۲-۷- طراحی کنترل‌کننده و نحوه انتخاب سیگنال

بلوک دیاگرام SSRDC را می‌توان به‌صورت شکل ۷ نشان داد، این بلوک شامل یک فیلتر واش اوت (بالاگذر) و یک بهره کنترل‌کننده است. بهره پایدارساز K_{SSR} مقدار میرایی ایجادشده را تعیین می‌کند و وظیفه فیلتر واش اوت حذف اثر تغییرات فرکانس پایین در ورودی کنترل‌کننده است. مقدار T_ω معمولاً بین ۱ تا ۲۰ ثانیه است که در این مقاله T_ω برابر ۵ ثانیه انتخاب می‌شود [۶].



شکل ۷: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده میرایی زیر سنکرون

کنترل‌پذیری سیستم نقش بسیار مهمی در طراحی‌ها دارد. با توجه به اینکه سیستم ما کاملاً کنترل‌پذیر است، بنابراین با طراحی یک بهره ساده کنترلی می‌توان بر روی تمامی مودهای سیستم تأثیر گذاشت. پس به‌کمک این بلوک بدون اینکه پایداری سایر مودهای سیستم کاهش یا ناپایدار شوند، می‌توان مود زیرسنکرون را پایدار کرد. مطابق شکل ۸ و شکل ۹ به‌ترتیب خروجی کنترل‌کننده میرایی زیرسنکرون به جمع‌کننده‌های مبدل سمت روتور (از A_{RSC} تا F_{RSC}) و سمت شبکه (از A_{GSC} تا F_{GSC}) به‌ازای سیگنال‌های ورودی جریان خط انتقال و ولتاژ خازن سری اضافه می‌کنیم. بهترین سیگنال و محل اعمال آن را به‌کمک آنالیز مانده‌ها تشخیص داده می‌شود. اگر فرض کنیم تابع تبدیل حلقه باز سیستمی که دارای یک قطب است به‌صورت زیر باشد [۱۶]:

$$G_a(s) = \frac{R_i}{S - \lambda_i} \qquad (۴)$$

که R_i مانده مقدار ویژه i ام است و از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$R_i = C\,\phi_i\,\psi_i\,B \qquad (۵)$$

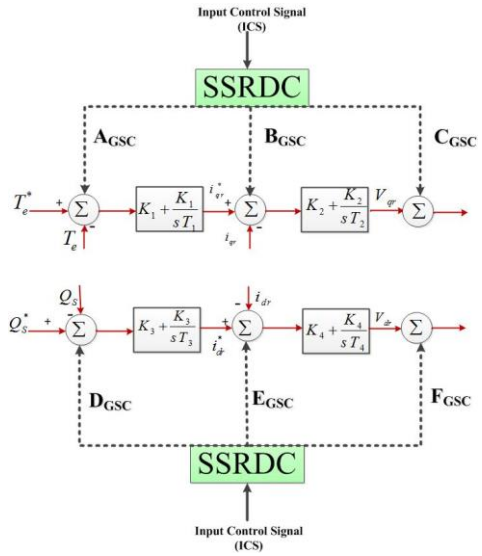
ϕ_i و ψ_i مقادیر ویژه سمت راست و چپ هستند. تابع حلقه بسته سیستم با فیدبک منفی K_{SSR} به‌صورت زیر است [۱۶]:

$$G_{ca}(s) = \frac{G_a(s)}{1 + kG_a(s)} = \frac{R_i}{s - \lambda_a + k_{SSR} R_i} \qquad (۶)$$

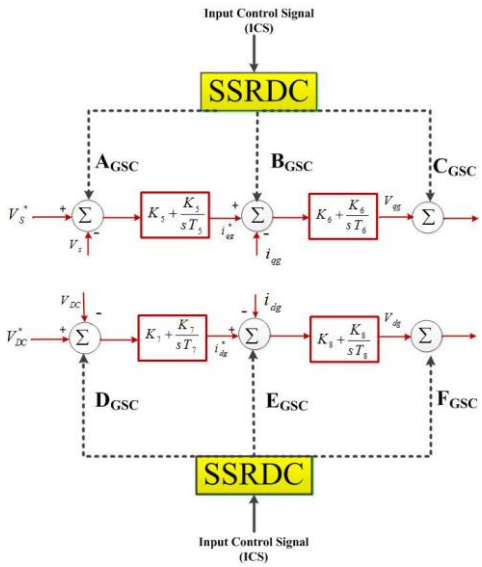
با به دست آوردن ریشه مخرج تابع تبدیل حلقه بسته و انتقال ریشه تابع تبدیل حلقه باز به سمت چپ، اختلاف مقدار ویژه دو تابع حلقه بسته و حلقه باز به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta\lambda = -K_{SSR} R_i \qquad (۷)$$

رابطه (۷) تأثیر مانده‌ها بر روی ریشه حلقه بسته سیستم را نشان می‌دهد. اگر اندازه مانده‌ها بزرگ باشد، بهره کوچک‌تری برای سیستم کنترل فیدبک موردنیاز است. از تحلیل مانده در این تحقیق برای تشخیص نوع سیگنال محلی و محل مناسب اعمال آن استفاده می‌شود.



شکل ۸: کنترل‌کننده سمت روتور

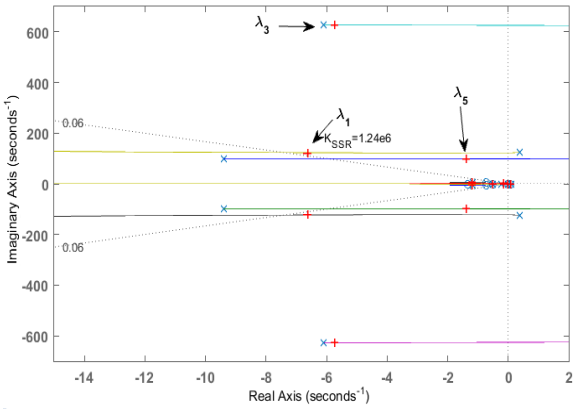


شکل ۹: کنترل‌کننده سمت استاتور

۳- تحلیل و طراحی SSRDC

۳-۱- سیگنال جریان خط انتقال به‌عنوان ورودی SSRDC

جدول ۵ نشان‌دهنده اندازه و زاویه مانده مودهای زیرسنکرون، فوق‌سنکرون، الکترومکانیکی و شفت سیستم هنگامی‌که جریان خط انتقال به‌عنوان سیگنال کنترل ورودی انتخاب شده و بلوک کنترلی SSRDC به نقاط مختلف کنترل‌کننده سمت روتور (از A_{RSC} تا F_{RSC}) و سمت استاتور (از A_{GSC} تا F_{GSC}) اعمال می‌شود. با توجه به جدول ۵ نقاط A_{RSC}، B_{RSC} و D_{RSC} مقدار مانده‌های مود زیرسنکرون بسیار کوچکی دارند، بنابراین به بهره بسیار بزرگی برای انتقال مود زیرسنکرون به سمت چپ موردنیاز است. همچنین، زاویه مود SSR مخالف سایر مودها است؛ بنابراین ممکن است در این نقاط با بهره بسیار بالا، سایر مودهای سیستم ناپایدار یا پایداری آن‌ها کاهش یابد. شکل ۱۰ دیاگرام مکان هندسی را برای زمانی که جریان خط انتقال به‌عنوان سیگنال ورودی به A_{RSC} اعمال می‌شود. در این مقاله علامت × قطب‌های حلقه باز و علامت + قطب‌های حلقه بسته سیستم را در دیاگرام مکان هندسی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید مود SSR در حلقه باز ناپایدار است و به‌کمک کنترل‌کننده SSRDC و بهره K_{SSR}=۱/۲۴e+۰۶ مود زیرسنکرون با نسبت میرایی ۶٪ به سمت چپ صفحه منتقل می‌شود؛ اما پایداری مود فوق‌سنکرون و الکترومکانیکی کاهش می‌یابد، علت آن این است که طبق جدول ۵ علامت مانده مود زیرسنکرون مخالف علامت مود فوق‌سنکرون و مود الکترومکانیکی است. با توجه به اینکه اندازه مانده مود الکترومکانیکی بزرگ‌تر است، بنابراین افزایش بهره باعث کاهش پایداری بیش‌تر این مود می‌شود. برای نقاط B_{RSC} و D_{RSC} هم رسم دیاگرام مکان هندسی ناپایداری را نشان می‌دهد که از آوردن نمودارهای مکان هندسی در این حالت صرف‌نظر کرده‌ایم.

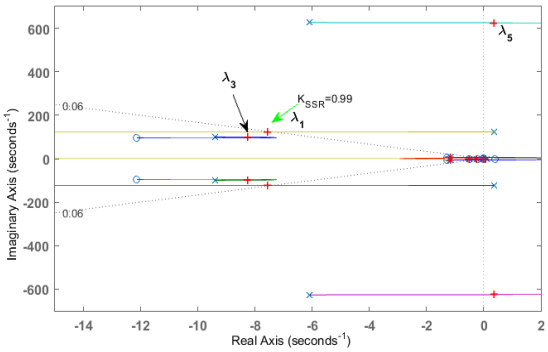


شکل ۱۰: دیاگرام مکان هندسی جریان خط به‌عنوان سیگنال کنترلی ورودی به A_{RSC}

برای سایر نقاط کنترل‌کننده سمت روتور و سمت شبکه اگر جریان خط انتقال را به‌عنوان ورودی SSRDC انتخاب کنیم، بهره کوچک‌تری برای انتقال مود زیرسنکرون از سمت راست صفحه به سمت چپ صفحه نسبت به حالت قبلی نیاز دارد، زیرا مانده‌های آن‌ها بزرگ‌تر است. با پایداری مود زیرسنکرون، ممکن است پایداری مود فوق سنکرون، مود الکترومکانیکی و مود شفت سیستم کاهش یا کلاً ناپایدار شود، چون مطابق جدول ۵ پلاریته مانده زیرسنکرون مخالف پلاریته سایر مودها است. به‌عنوان‌مثال طبق جدول ۵ اگر از نقطه E_{RSC} به‌عنوان سیگنال کنترل ورودی استفاده کنیم، با توجه به اینکه علامت مانده مود فوق‌سنکرون و مود الکترومکانیکی، منفی است، امکان کاهش پایداری یا ناپایداری این مود وجود دارد. به‌کمک دیاگرام مکان هندسی حالت ورودی E_{RSC} را در شکل ۱۱ بررسی می‌کنیم. همان‌طور که مشاهده می‌کنید، مود زیرسنکرون پایدار شده ولی پایداری مود الکترومکانیکی کاهش و مود فوق‌سنکرون کاملاً ناپایدار می‌شود.

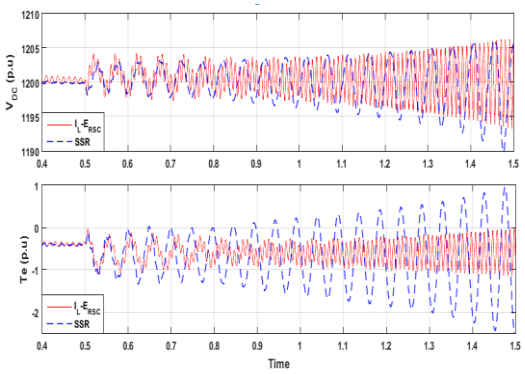
حال به‌کمک بهره طراحی‌شده در دیاگرام مکان هندسی (KSSR=۰/۹۹) و اضافه کردن بلوک دیاگرام SSRD به سیستم

موردمطالعه، تأثیر جریان خط انتقال به‌عنوان سیگنال ورودی به ERSC را در میراسازی نوسانات زیرسنکرون (IL-ERSC) و شبیه‌سازی حوزه زمان را در شکل ۱۲ مشاهده می‌کنیم. در ۰/۲۵ ثانیه اول بعد از لحظه ۰/۵ ثانیه، نوسانات سیستم میرا می‌شود، اما بعد از ۰/۷۵ ثانیه، نوسانات ناپایدار دیگری در سیستم ظاهر می‌شود.



شکل ۱۱: دیاگرام مکان هندسی جریان خط به‌عنوان سیگنال کنترلی ورودی به E_{RSC}

فرکانس این نوسان در محدوده فرکانس مود فوق‌سنکرون است که با توجه به دیاگرام مکان هندسی شکل ۱۱ که مود فوق‌سنکرون ناپایدار می‌شود، صحت و درستی عملکرد کنترل‌کننده را تائید می‌کند. درنتیجه جریان خط انتقال سیگنال کنترلی مناسبی برای هیچ‌کدام از نقاط مبدل سمت شبکه و سمت روتور نیست.



شکل ۱۲: شکل موج ولتاژ خازن لینک DC (V_{DC}) و گشتاور الکتریکی (T_e) زمانی که جریان خط انتقال به‌عنوان سیگنال کنترلی ورودی به E_{RSC}

جدول ۵: تحلیل مانده مودهای سیستم در سرعت باد ۷ متربرثانیه و سطح جبران‌سازی ۷۵٪ زمانی که جریان خط انتقال به کنترل‌کننده میرایی زیرسنکرون اعمال می‌شود

I_L as ICS	مود زیر سنکرون	مود فوق سنکرون	مود الکترومکانیکی	مود شفت
A_{RSC}	۴/۹۹e-۰۶ ∠ ۲۹/۳۳°	۲/۵۸۰e-۰۷ ∠ -۱۷۷/۶۸°	۵/۸۰۸e-۰۶ ∠ -۱۵۴/۲۹°	۳/۳۵-۰۸ ∠ ۵۲/۷۱۹°
B_{RSC}	۰/۰۰۴۹ ∠ ۲۰/۰۸۵°	۰/۰۰۲۵۷ ∠ ۱۷۵/۸۵°	۰/۰۵۵۹۴ ∠ -۱۶۵/۳۷°	۹/۱۳۶e-۰۵ ∠۱۰/۴۹°
C_{RSC}	۴۸۶/۵۵ ∠-۱۵۰/۳۷°	۲۴/۷۵۶ ∠ ۷/۳۳°	۵۵۸/۴۱∠۲۶/۰۳۴°	۰/۲۳۳۵۸∠ -۱۰۲/۹۸°
D_{RSC}	۵/۳۸۶e-۰۶ ∠ -۹۷/۴۱°	۲/۲۰۱۱e-۰۷∠ ۷۶/۹۴°	۵/۹۶۷e-۰۶ ∠ ۸۶/۴۲°	۳/۹۱e-۰۷ ∠ -۱۳۰/۳۷°
E_{RSC}	۰/۰۵۱۱۸ ∠ ۱۰۰/۶°	۰/۰۷۹۱۸ ∠ -۹۹/۴°	۰/۰۵۷۲۸۸ ∠ -۸۶/۴۲°	۰/۰۰۰۵۹ ∠ ۱۴۲/۳۴°
F_{RSC}	۴۸۷/۶۵∠ -۶۱/۳۹°	۲۴/۱۰۶ ∠ ۸۶/۲۸°	۵۴۹/۴۸ ∠ ۱۱۵/۹۰°	۰/۹۳۳۴∠ ۵۵/۰۶°
A_{GSC}	۰/۰۸۹۷۷∠ ۱۲/۵۳°	۰/۰۷۲۹۵ ∠ -۱۶۶/۵۶°	۰/۰۰۲۵۸ ∠ -۱۱/۹۶°	۴/۰۷۶e-۰۵ ∠ ۶۵/۶۷°
B_{GSC}	۰/۸۹۷۷ ∠ ۱۲/۷۶°	۰/۷۲۹۵ ∠ -۱۶۶/۵°	۰/۰۲۵۸۷ ∠ -۱۱/۶۸°	۰/۰۰۰۴۱۳ ∠ ۷۰/۴۳°
C_{GSC}	۰/۰۶۹۵۴ ∠ ۵۱/۸۲°	۰/۷۲۱۴ ∠ -۱۵۴/۴۳°	۰/۰۱۹۲ ∠ ۳۶/۰۸°	۲/۴۹e-۰۵ ∠ ۱۶۸/۳۰°
D_{GSC}	۰/۷۸۸۹۵ ∠ ۵/۰۶°	۰/۶۵۱۱ ∠ ۱۶۹/۳۷°	۰/۰۶۵۴ ∠ -۱۷۷/۴۰°	۰/۰۰۰۸۷ ∠ -۱۲۳/۹۶°
E_{GSC}	۷/۸۸۹ ∠ ۵/۲۳°	۶/۵۱۱ ∠ ۱۶۹/۴۲°	۱/۰۵۵ ∠ -۱۷۷/۷۷°	۰/۰۰۸۸ ∠ -۱۱۹/۲۰°
F_{GSC}	۶/۱۱ ∠ ۴۴/۲۹°	۶/۴۴ ∠ ۱۷۸/۵۰°	۰/۷۸۳ ∠ -۱۳۴/۴۰°	۰/۰۰۰۵۳ ∠-۲۱/۲۹°

۳-۲- سیگنال ولتاژ خازن خط انتقال به‌عنوان ورودی SSRDC

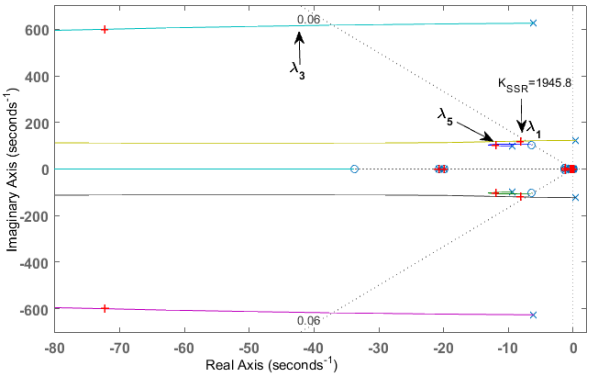
جدول ۶ نشان‌دهنده اندازه و زاویه مانده مودهای زیرسنکرون، فوق‌سنکرون، الکترومکانیکی و شفت سیستم هنگامی‌که ولتاژ خازن خط انتقال به‌عنوان سیگنال کنترل اعمال می‌شود. با توجه به جدول ۶ نقاط A_{RSC} و D_{RSC} مقدار مانده‌های مود زیرسنکرون بسیار کوچک است، بنابراین به بهره بسیار بزرگی برای انتقال مود زیرسنکرون به‌سمت چپ موردنیاز است. همچنین، زاویه پلاریته مود زیرسنکرون مخالف مود الکترومکانیکی (در مورد A_{RSC} زاویه مود شفت هم پلاریته مخالف دارد) است؛ بنابراین انتظار داریم با افزایش بهره مود زیرسنکرون، مود الکترومکانیکی ناپایدار یا پایداری آن‌ها کاهش یابد. برای نقاط B_{RSC}، C_{RSC}، E_{RSC} و F_{RSC} اگر ولتاژ خازن انتقال به‌عنوان ورودی SSRDC انتخاب شود، بهره کوچک‌تری برای انتقال مود زیرسنکرون از سمت راست صفحه به‌سمت چپ صفحه نسبت به حالت قبلی موردنیاز است، زیرا مانده‌های آن‌ها بزرگ‌تر است. ولی با توجه مخالف بودن پلاریته مود

زیرسنکرون و الکترومکانیکی، ممکن است با افزایش بهره مود الکترومکانیکی ناپایدار یا پایداری آن کاهش یابد. درنتیجه هیچ‌کدام از نقاط مبدل سمت روتور برای سیگنال کنترل ورودی ولتاژ خازن مناسب نمی‌باشند.

جدول ۶: تحلیل مانده مودهای سیستم در سرعت باد ۷ متربرثانیه و سطح جبران‌سازی ۷۵٪ زمانی که ولتاژ خازن سری خط انتقال به کنترل‌کننده میرایی زیرسنکرون اعمال می‌شود

V_C as ICS	مود زیر سنکرون	مود فوق سنکرون	مود الکترومکانیکی	مود شفت
A_{RSC}	۲/۸۳۵e-۰۶∠ -۲۸/۷°	۱/۵۰۸e-۰۷ ∠ -۴/۳۸۹°	۳/۰۰۴e-۰۶ ∠ ۱۵۲/۵۱°	۱/۳۴۲e-۰۸ ∠ ۵۸/۴۸°
B_{RSC}	۰/۰۲۸۰۰ ∠ -۱۹/۴۶۵°	۰/۰۰۱۵۰۷ ∠ -۶/۲۱°	۰/۰۲۸۹۳ ∠ ۱۶۳/۵۹°	۳/۶۵e-۰۵ ∠ -۴/۷۳°
C_{RSC}	۲۷۶/۳۱ ∠ -۱۵۰/۹۹°	۱۴/۴۷ ∠ -۱۷۴/۷۳°	۲۸۸/۸ ∠ ۲۷/۸۱۶°	۰/۰۹۳۴۵∠-۹۷/۲۱۹°
D_{RSC}	۳/۰۵e-۰۶ ∠-۹۸/۰۱°	۱/۲۸۶e-۰۷ ∠ -۱۰۵/۱۲°	۳/۰۸۶۴e-۰۶ ∠ ۷۲/۶۱۶°	۱/۵۶۷e-۰۷ ∠ -۱۲۴/۶°
E_{RSC}	۰/۰۲۹۰۶∠ ۹۹/۹۷°	۰/۰۰۱۲۸۴ ∠ ۷۸/۵۳۴°	۰/۰۲۹۶۲۸ ∠ -۸۴/۸۶°	۰/۰۰۰۲۳۸ ∠۱۴۸/۱°
F_{RSC}	۲۷۶/۹۳ ∠ -۶۲/۰۱°	۱۴/۰۹ ∠ -۹۵/۷۸°	۲۸۷/۲۸ ∠ ۱۱۷/۶۸°	۰/۳۷۳۴ ∠ ۶۰/۸۲۷°
A_{GSC}	۰/۰۰۵۰۹ ∠ ۱۱/۹۱°	۰/۰۴۲۴۶ ∠ ۱۱/۳۷°	۰/۰۰۱۳۳ ∠ ۱۰/۱۸°	۱/۶۳۱e-۰۵ ∠ ۷۱/۴۳°
B_{GSC}	۰/۰۵۰۹۸ ∠ ۱۲/۱۴°	۰/۴۲۶۴ ∠ ۱۱/۴۲۲°	۰/۰۱۳۳۸ ∠ ۹/۰۹°	۰/۰۰۰۱۶۵ ∠ ۷۶/۲۰°
C_{GSC}	۰/۰۳۹۴۹ ∠ ۵۱/۲۰°	۰/۴۲۱۷ ∠ ۲۰/۵۰°	۰/۰۰۹۹۳ ∠ ۳۷/۸۶°	۹/۹۸۴e-۰۶ ∠ ۱/۱۷۴°
D_{GSC}	۰/۴۴۸۰ ∠ ۴/۳۸۶°	۰/۳۸۰۶ ∠ ۱۲/۶۹°	۰/۰۵۴۵ ∠ -۲۶/۱۷°	۰/۰۰۰۳۴ ∠ -۱۱۸/۲۰°
E_{GSC}	۴/۴۸۰۲ ∠ ۴/۶۱°	۳/۸۰۶۳ ∠ ۱۲/۶۴°	۰/۵۴۵۸ ∠-۱۷۹/۵۵°	۰/۰۰۳۵۳ ∠ -۱۱۳/۴°
F_{GSC}	۳/۴۷۰۴ ∠ ۴۳/۶۷°	۳/۷۶۴۴ ∠ ۳/۵۶°	۰/۴۰۵۱ ∠ -۱۳۲/۶°	۰/۰۰۰۲۱ ∠-۱۵/۵۳°

از نقاط A_{GSC} تا C_{GSC} مطابق جدول ۶ پلاریته تمامی مودها مشابه مود زیرسنکرون است؛ بنابراین با افزایش پایداری مود زیرسنکرون، پایداری سایر مودهای سیستم افزایش پیدا می‌کند. شکل ۱۳ نشان‌دهنده دیاگرام مکان هندسی به نقطه A_{GSC} به‌ازای سیگنال کنترل ورودی ولتاژ خازن خط انتقال است. به‌ازای بهره K_{SSR}=۱۹۴۵/۸ مود زیرسنکرون با نسبت میرایی ۶٪ پایدار و سایر مودهای سیستم پایدارتر می‌شوند.



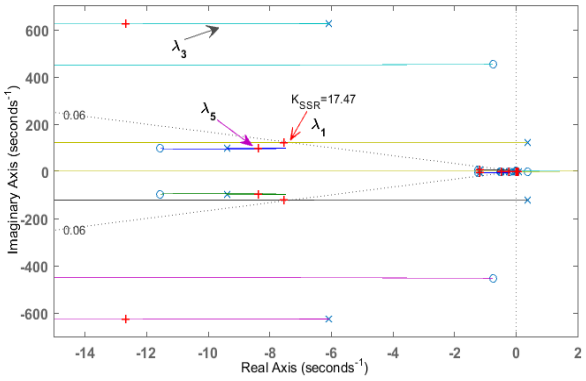
شکل ۱۳: دیاگرام مکان هندسی ولتاژ خازن سری خط انتقال به‌عنوان سیگنال کنترلی ورودی به A_{RSC}

از نقاط D_{GSC} تا F_{GSC} مطابق جدول ۶ پلاریته تمامی مودها به‌جز مود الکترومکانیکی و مود شفت سیستم، مشابه مود زیرسنکرون است. با توجه به اینکه اندازه مانده مود الکترومکانیکی و شفت سیستم در مقایسه با اندازه مانده مود زیرسنکرون و فوق‌سنکرون کوچک است؛ بنابراین افزایش پایداری مود زیرسنکرون، تاثیری بر پایداری سایر مودها نداشته و قابل‌چشم‌پوشی باشد. اندازه مانده‌ها در نقاط D_{GSC} تا F_{GSC} نسبت به نقاط از A_{GSC} تا C_{GSC} بیش‌تر است. درنتیجه به بهره کنترل‌کننده کوچک‌تری برای پایداری سیستم نیاز است.

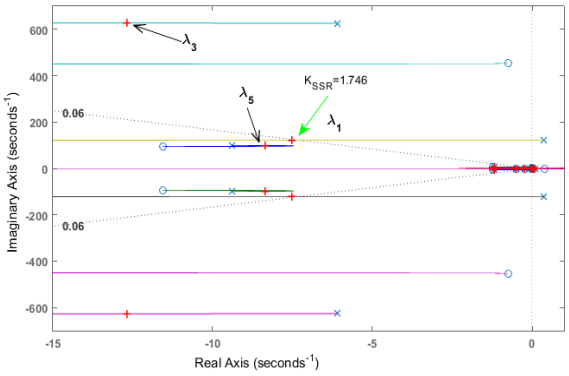
شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نشان‌دهنده دیاگرام مکان هندسی به نقاط D_{GSC}، E_{GSC} و F_{GSC} به‌ازای سیگنال کنترل ورودی ولتاژ خازن خط انتقال است.

شکل ۱۷ نشان‌دهنده حالت نوسانات زیر سنکرون (SSR) و میراسازی نوسانات زیر سنکرون به‌کمک سیگنال کمکی اضافه‌شده به EGSC (خط توپر) است. این شکل موج، صحت و درستی عملکرد کنترل‌کننده طراحی‌شده و روش مورداستفاده را نشان می‌دهد.

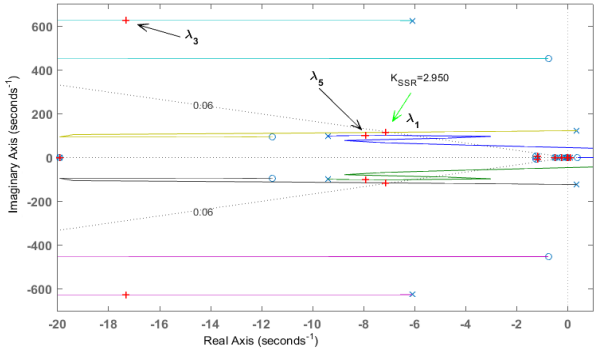
شکل ۱۸ نشان‌دهنده مقایسه سیگنال‌های DGSC، EGSC و FGSC زمانی که ولتاژ خازن به‌عنوان سیگنال کنترل ورودی اعمال می‌شوند. شکل موج‌ها تقریباً مشابه و نزدیک به‌هم است، اما با توجه به اینکه EGSC بهره کم‌تری لازم دارد، مناسب‌تر است.



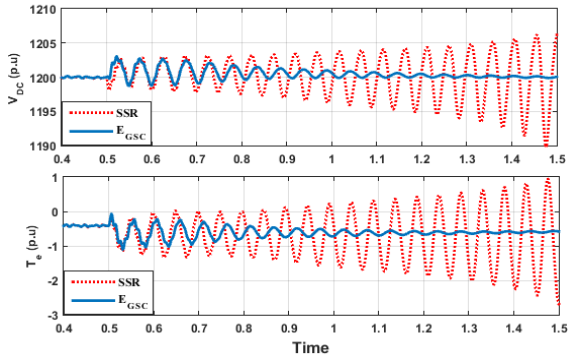
شکل ۱۴: دیاگرام مکان هندسی ولتاژ خازن سری خط انتقال به‌عنوان سیگنال کنترلی ورودی به D_{RSC}



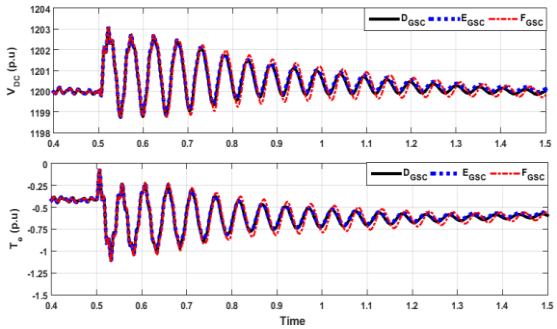
شکل ۱۵: دیاگرام مکان هندسی ولتاژ خازن سری خط انتقال به‌عنوان سیگنال ورودی کنترلی به E_{RSC}



شکل ۱۶: دیاگرام مکان هندسی ولتاژ خازن سری خط انتقال به‌عنوان سیگنال کنترلی ورودی به F_{RSC}



شکل ۱۷: شکل موج ولتاژ خازن لینک DC (VDC) و گشتاور الکتریکی (Te) برای نوسانات و میراسازی تشدید زیرسنکرون زمانی که ولتاژ خازن به‌عنوان سیگنال کنترل ورودی به محل EGSC



شکل ۱۸: مقایسه ولتاژ خازن لینک DC (VDC) و گشتاور الکتریکی (Te) برای سه حالت DGSC و EGSC و FGSC بهازای ولتاژ خازن به‌عنوان سیگنال کنترل ورودی

۴- طراحی کنترل‌کننده فازی عصبی

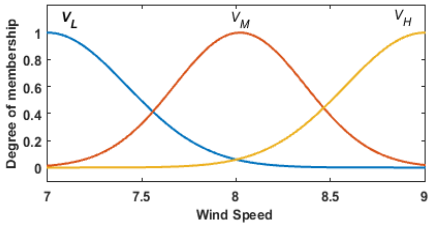
تئوری مجموعه فازی، یک روش نظام‌مند محاسباتی برای بحث در مورد اطلاعات روان‌شناختی فراهم می‌آورد. این تئوری برمبنای محاسبات عددی بر روی مقادیر تولیدشده توسط تابع عضویت برای هر یک از متغیرهای زبان‌شناختی عمل می‌نماید. علاوه بر آن، انتخاب قواعد if-then فازی، جز اصلی سیستم استنتاج فازی (FIS[۲۰]) را تشکیل می‌دهد. به‌کمک این قواعد، می‌توان به‌شکل موثرتری تخصص یک انسان را در زمینه‌ی خاص مدل نمود. مشکلات مربوط به پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های فازی ازجمله نبودن روشی استاندارد برای تبدیل دانش انسانی یا نتایج آزمایش‌ها به قواعد فازی و همچنین مشکل تنظیم مؤثر و مناسب پارامترهای توابع عضویت، سبب مطرح‌شدن سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (انفیس) گردیده است [۲۳].

انفیس روشی برای روند مدل‌سازی فازی به‌منظور آموزش اطلاعات یک مجموعه مهیا می‌کند تا پارامترهای تابع عضویت به‌گونه‌ای در نظر گرفته شوند که سیستم استنتاج فازی بهترین نگاشت بین اطلاعات ورودی و خروجی باشد. مدل فازی بکاربرده‌شده در انفیس مدل سوگینو است که برای آموزش قوانین و در تشکیل سیستم فازی به‌طور عددی بسیار مناسب است. همان‌طور که می‌دانید، در سیستم‌های فازی سوگینو قسمت آنگاه قوانین ترکیب خطی از متغیرهای زبانی است که با ضرایب ثابتی قرار دارند [۲۴].

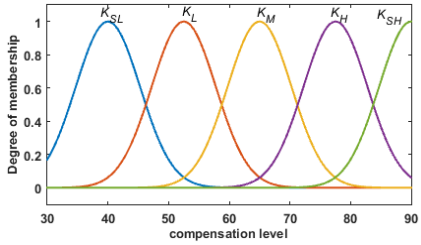
کنترل‌کننده‌های فازی دیگر نیازی به تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده ندارد. این مزیت باعث می‌شود که سیستم بتواند با تغییر شرایط، به‌خوبی عمل کند و رفتار مناسبی در جهت میرایی نوسانات داشته باشد [۲۵]. با توجه به نتایج قسمت ۳-۲، ولتاژ خازن سری خط انتقال دارای بهترین عملکرد و نقطه E_{GSC} با توجه به کم‌تر بودن بهره آن نسبت به سایر نقاط محل مناسب‌تری است. درنتیجه به‌کمک سیگنال محلی ولتاژ خازن سری خط انتقال به‌عنوان ورودی SSRDC در نقطه E_{GSC} و به دست آوردن بهره در چند حالت مختلف (به‌ازای سرعت باد و سطح جبران‌سازی متفاوت)، برای آموزش انفیس و طراحی کنترل‌کننده فازی عصبی استفاده می‌شود. مراحل طراحی کنترل‌کننده فازی به‌صورت زیر است:

- خطی‌کردن سیستم غیرخطی موردمطالعه به‌کمک دستور linmod در متلب
- به دست آوردن میزان بهره بلوک کنترل‌کننده میرایی زیرسنکرون به‌ازای سرعت باد و سطح جبران‌سازی به‌کمک دیاگرام مکان هندسی
- تعیین ورودی و خروجی کنترل‌کننده و بارگذاری داده‌های به‌دست‌آمده در مرحله دوم در برنامه انفیس
- تعیین تعداد و شکل توابع عضویت ورودی
- آموزش انفیس
- استفاده از کنترل‌کننده فازی-عصبی طراحی‌شده در شبیه‌سازی و مشاهده نتایج

در این کار سرعت باد و سطح جبران‌سازی به‌عنوان دو ورودی کنترل‌کننده فازی-عصبی استفاده شده است. برای سرعت باد مطابق شکل ۱۷ از ۳ تابع عضویت گوسی شکل برای سرعت کم (V_L)، متوسط (V_M) و زیاد (V_H) باد استفاده می‌شود. برای سطح جبران‌سازی مطابق شکل ۱۸ از ۵ تابع عضویت گوسی شکل برای سطوح خیلی کم (K_{SL})، کم (K_L)، متوسط (K_M)، زیاد (K_H) و خیلی زیاد (K_{SH}) جبران‌سازی استفاده می‌شود.

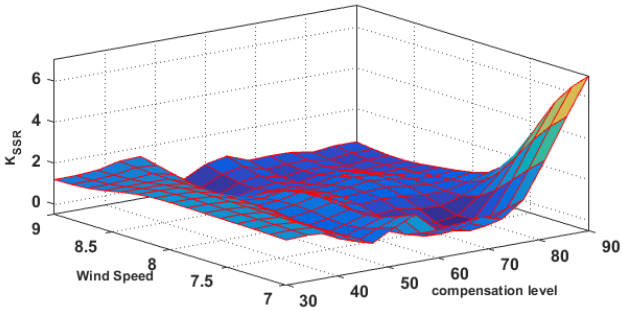


شکل ۱۷: تابع عضویت سرعت باد



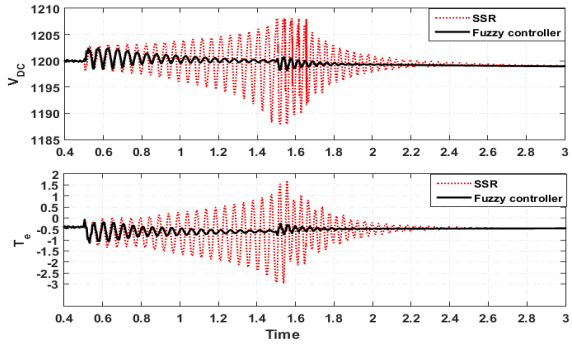
شکل ۱۸: تابع عضویت سطح جبران سازی

شکل ۱۹ رویه قوانین فازی-عصبی کنترل‌کننده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود رفتار بهره‌های بلوک کنترل میرایی زیرسنکرون برای سطح جبران‌سازی و سرعت باد خطی نیستند، بنابراین کنترل‌کننده فازی-عصبی رفتار غیرخطی خواهد داشت.



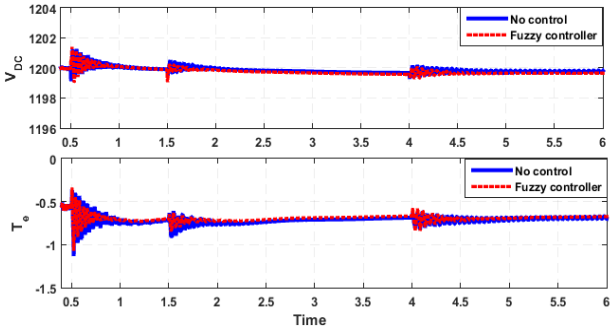
شکل ۱۹: رویه قوانین فازی-عصبی کنترل‌کننده

در مرحله بعد، کنترل‌کننده فازی-عصبی طراحی‌شده را بر روی سیستم موردمطالعه تست کرده و قابلیت میراسازی نوسانات زیرسنکرون را مشاهده می‌کنیم. شکل ۲۰ نشان‌دهنده شکل موج ولتاژ لینک DC و گشتاور الکتریکی برای سرعت ۷ متربرثانیه باد و سطح جبران‌سازی اولیه ۲۵٪ است که در لحظه ۰/۵ و ۱/۵ ثانیه این سطح جبران‌سازی به‌ترتیب به ۷۵٪ و ۵۰٪ افزایش پیدا می‌کند. خطوط نقطه‌چین پاسخ سیستم بدون کنترل میرایی زیرسنکرون و خطوط توپر سیستم با کنترل‌کننده فازی-عصبی را نشان می‌دهد. به‌کمک کنترل‌کننده فازی-عصبی در لحظه ۰/۵ ثانیه، سیستم ناپایدار را پایدار کرده و در لحظه ۱/۵ ثانیه دامنه نوسانات (فراجهش) و زمان نشست را به‌سرعت کاهش دادیم.



شکل ۲۰: شکل موج ولتاژ خازن لینک DC (V_{DC}) و گشتاور الکتریکی (T_e) با و بدون کنترل‌کننده فازی-عصبی در سرعت ۷ متربرثانیه و سطح جبران‌سازی متغیر

شکل ۲۱ نشان‌دهنده شکل موج ولتاژ لینک DC و گشتاور الکتریکی برای سرعت ۸ متربرثانیه باد و سطح جبران‌سازی اولیه ۲۵٪ است که در لحظه ۰/۵ و ۲/۵ و ۴ ثانیه این سطح جبران‌سازی به‌ترتیب به ۵۵٪ و ۶۵٪ و ۸۰٪ افزایش می‌دهیم. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنید به‌کمک کنترل‌کننده فازی-عصبی دامنه نوسانات (فراجهش) و زمان نشست به‌سرعت کاهش یافته و سرعت میرایی نوسانات بهبود می‌یابد.



شکل ۲۱: شکل موج ولتاژ خازن لینک DC (V_{DC}) و گشتاور الکتریکی (T_e) با و بدون کنترل‌کننده فازی-عصبی در سرعت ۸ متر بر ثانیه و سطح جبران سازی متغیر

۵- نتیجه

در این مقاله به‌کمک طراحی یک بلوک میرایی زیرسنکرون اضافه‌شده به مبدل‌های DFIG با قابلیت پیش‌بینی حالت‌های مختلف سیستم، نوسانات ناشی از تشدید زیرسنکرون را در خط انتقال سری از بین برده شد. در این روش تغییرات ولتاژ خازن سری و جریان خط انتقال به‌عنوان سیگنال کنترل ورودی انتخاب شد. با اعمال جریان خط انتقال به‌عنوان ورودی سیگنال کنترلی، مود فوق‌سنکرون و مود الکترومکانیکی (گاهی هر دو باهم) ناپایدار می‌شدند؛ بنابراین با جریان خط نمی‌توان نوسانات زیرسنکرون را از بین برد. به‌کمک سیگنال خازن اعمالی به تمام نقاط

کنترل‌کننده سمت شبکه، میراسازی را می‌توان انجام داد. در این حالت نقاط D_{GSC} تا F_{GSC} نسبت به نقاط A_{GSC} تا C_{GSC} به بهره کم‌تری نیاز دارند. کم‌ترین بهره مربوط به نقطه E_{GSC} است که با به‌دست آوردن این بهره در شرایط متفاوت باد و سطح جبران‌سازی مختلف، کنترل‌کننده فازی عصبی به‌روش انفیس آموزش و طراحی شد. کنترل‌کننده فازی-عصبی طراحی‌شده موجب کاهش دامنه فراجهش و زمان نشست میرایی می‌شود و سبب بهبود پاسخ سیستم می‌شود. درستی و صحت عملکرد کنترل‌کننده در تغییر مرتب سطح جبران‌سازی با توجه به نتایج شبیه‌سازی اثبات شده است.

پیوست ۱

مدل‌سازی ماشین القایی

اگر جریان استاتور و روتور DFIG به‌عنوان متغیر حالت انتخاب شود و ولتاژ استاتور و روتور DFIG به‌عنوان ورودی انتخاب شود، معادلات ماشین القایی در قاب مرجع dq برمبنای پریونیت به‌صورت زیر است:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} = A_{DFIG}\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} + B_{DFIG}\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \\ v_{0r} \end{bmatrix}$$

$$(A_{DFIG} = -\omega_b G^{-1} F) \ \& \ (B_{DFIG} = \omega_b G^{-1})$$

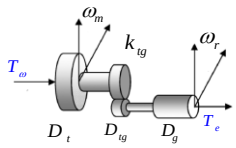
$$G = \begin{bmatrix} X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 & 0 \\ 0 & X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ X_M & 0 & 0 & X_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & 0 & X_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X_{lr} \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} R_s & \frac{\omega_e}{\omega_b} X_{ss} & 0 & 0 & \frac{\omega_e}{\omega_b} X_M & 0 \\ -\frac{\omega_e}{\omega_b} X_{ss} & R_s & 0 & -\frac{\omega_e}{\omega_b} X_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} X_M & 0 & R_r & \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} X_{rr} & 0 \\ -\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} X_M & 0 & 0 & -\frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} X_{rr} & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

در معادلات بالا i_{qs}، i_{ds}، i_{qr}، i_{dr} به‌ترتیب جریان محور dq استاتور و روتور، V_{qs}، V_{ds}، V_{qr}، V_{dr} به‌ترتیب ولتاژ محور dq استاتور و روتور، X_{ls} راکتانس نشتی استاتور X_{lr} راکتانس نشتی روتور ، X_M راکتانس مغناطیسی، X_{SS} راکتانس استاتور ($X_{SS}=X_{ls}+X_M$)، X_{rr} راکتانس روتور ($X_{rr}=X_{lr}+X_M$)، R_r مقاومت روتور ، R_s مقاومت استاتور، ω_r فرکانس چرخش روتور برحسب رادیان‌برثانیه ، $\omega_b=2\pi f_s$ فرکانس مبنا برحسب رادیان‌برثانیه، ω_e فرکانس چرخش قاب سنکرون روتور برحسب رادیان‌برثانیه است. به‌دلیل تعادل سیستم، مولفه‌ی توالی صفر ولتاژ استاتور و روتور را برابر صفر قرار می‌دهیم.

مدل‌سازی شفت سیستم

در این مقاله شفت توربین‌های بادی به‌صورت مدل دو جرمی مطابق در نظر گرفته شده که جرم اول بیان‌کننده توربین با سرعت پایین و جرم دوم بیان‌کننده روتور با سرعت بالا در ژنراتور است..



مدل دو جرمی توربین بادی

با نوشتن معادلات نوسان برای هر جرم، معادله فضای حالت شفت سیستم برحسب پریونیت به‌صورت معادله زیر به دست می‌آید:

$$\dot{X}_{shaft} = \begin{bmatrix} \frac{(-D_t - D_{tg})}{2H_t} & \frac{D_{tg}}{2H_t} & \frac{-1}{2H_t} \\ \frac{D_{tg}}{2H_g} & \frac{(-D_t - D_{tg})}{2H_g} & \frac{1}{2H_g} \\ k_{tg}\,\omega_b & -k_{tg}\,\omega_b & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ \omega_r \\ T_{tg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_\omega}{2H_t} \\ \frac{T_e}{2H_g} \\ 0 \end{bmatrix}$$

که در آن ω_m سرعت شفت توربین، ω_r سرعت روتور ژنراتور، T_ω گشتاور ورودی باد، T_e گشتاور الکتریکی ژنراتور، T_{tg} گشتاور داخلی بین سیستم دوجرمه، D_t و D_g ضریب میرایی توربین و ژنراتور، D_{tg} ضریب میرایی بین توربین و ژنراتور، K_{tg} سختی پیچشی (سختی محور) بین توربین و ژنراتور برحسب $(\frac{pu}{rad})$، H_g و H_t ثابت لختی ژنراتور و توربین است.

مدل‌سازی خط انتقال

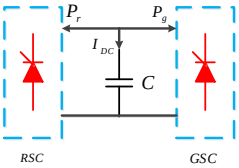
خط انتقال را می‌توان به‌صورت یک مدار RLC سری در نظر گرفت. جریان خط انتقال و ولتاژ خازن ثابت را می‌توان به‌عنوان متغیر حالت انتخاب نموده و با نوشتن معادلات در قاب dq ماتریس فضای حالت خط انتقال برحسب پریونیت به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{X}_{Tline} = \begin{bmatrix} \frac{-R_L}{X_L} & -\omega_e & \frac{-1}{X_L} & 0 \\ \omega_e & \frac{-R_L}{X_L} & 0 & \frac{-1}{X_L} \\ X_C & 0 & 0 & -\omega_e \\ 0 & X_C & \omega_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ql} \\ i_{dl} \\ v_{ql} \\ v_{dl} \end{bmatrix} + \omega_b \begin{bmatrix} \frac{(v_{qs} - E_{Bq})}{X_L} \\ \frac{(v_{ds} - E_{Bd})}{X_L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

i_{dl} و i_{ql} جریان محور dq خط انتقال، V_{dl} و V_{ql} ولتاژ محور dq خازن سری خط انتقال، R_L امپدانس خط انتقال، X_L راکتانس خط انتقال، X_C راکتانس خازن سری خط انتقال، E_{bq} و E_{bd} ولتاژ شین بی‌نهایت روی قاب dq است. با توجه به اینکه سیستم متعادل در نظر گرفته می‌شود، توالی صفر ولتاژ خازن و جریان خط انتقال برابر صفر است.

مدل‌سازی لینک DC

مدل دینامیکی خازن لینک DC بین دو مبدل الکترونیک قدرت با زدن یک KCL در گره بالای خازن مبدل مطابق شکل، به‌صورت رابطه زیر به‌دست می‌آید:



مبدل پشت‌به‌پشت بین شبکه و روتور

$$-CV_{DC}\frac{dV_{DC}}{dt}=P_r+P_g$$

توان اکتیو مبدل سمت روتور P_r و توان اکتیو مبدل سمت شبکه Pg از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$P_r=0.5(V_{qr}\,i_{qr}+V_{dr}\,i_{dr})$$
$$P_g=0.5(V_{qg}\,i_{qg}+V_{dg}\,i_{dg})$$

پیوست ۲

پارامترهای سیستم انتقال برحسب پریونیت (طبق سیستم محک IEEE شماره یک)

R_L	X_L	X_T	X_{sys}
۰/۰۲	۰/۵۰	۰/۱۴	۰/۰۶

پارامترهای DFIG

Base Power	۲ *MW*	۱۰۰ *MW*
Base Voltage	۶۹۰ V	۶۹۰ V
R_s	۰/۰۰۴۸۸ p.u	۰/۰۰۴۸۸ p.u
R_r	۰/۰۰۵۴۹ p.u	۰/۰۰۵۴۹ p.u
X_m	۳/۹۵۲۷۹ p.u	۳/۹۵۲۷۹ p.u
X_{lr}	۰/۰۹۹۵ p.u	۰/۰۹۹۵ p.u
X_{ls}	۰/۰۹۲۳۱ p.u	۰/۰۹۲۳۱ p.u
X_{tg}	۰/۳ p.u (۰/۱۸۹ mH)	۰/۳ p.u (۰/۱۸۹ ÷۵۰ mH)
DC-Link Voltage	۱۲۰۰ *V*	۱۲۰۰ *V*
DC-Link Capacitor	۱۴۰۰ *μF*	۵۰×۱۴۰۰ *μF*

پارامترهای شفت سیستم

H_t	H_g	D_{tg}	K_{tg}	D_t	D_g
۴/۲۹	۰/۹	۱/۵	۰/۱۵	۰/۰۰	۰/۰۰

پارامترهای کنترل‌کننده DFIG

K_1	۰/۰۰۰۱	T_1	۰/۰۵۰۰
K_2	۰/۰۰۰۱	T_2	۰/۰۰۵۰
K_3	۰/۰۰۰۱	T_3	۰/۰۲۵۰
K_4	۰/۰۰۰۱	T_4	۰/۰۰۲۵
K_5	۰/۱۰۰۰	T_5	۰/۰۵۰۰
K_6	۱/۰۰۰	T_6	۱۰۰/۰
K_7	۰/۱۰۰۰	T_7	۰/۰۵۰۰
K_8	۱/۰۰۰	T_8	۱۰۰/۰

مراجع

[1] R. R. Londero, C. d. Affonso and J. P. Vieira, "Long-Term Voltage Stability Analysis of Variable Speed Wind Generators," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 439-447, Jan. 2015.

[2] V.B. Virulkar and G.V. Gotmare, "Sub-synchronous resonance in series compensated wind farm: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, no. 1, pp. 1010-1029, Mar. 2016.

[3] A. E. Leon and A. J. Solsona, "Sub-Synchronous interaction damping control for DFIG wind turbines," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.30, no.1, pp.419-428, Jan. 2015.

[4] S. M. Muyeen, R. Takahashi and J. Tamura, "Operation and control of HVDC-connected offshore wind farm," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 30–37, Apr. 2010.

[5] *Series compensation: boosting transmission capacity*, http://www.abb.com/FACTS.

[6] P. Kundur, *Power Systems Stability and Control*, New McGraw-Hill, 1994.

[7] IEEE SSR Working Group, "Terms, definitions and symbols for subsynchronous oscillations," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 6, pp. 1326-1334, June 1985.

[8] H. Ghasemi, G. B. Gharehpetian, S. A. Nabavi-Niaki and J. Aghaei, "Overview of sub synchronous resonance analysis and control in wind turbines" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, no. 1, pp. 234-243, Nov. 2013.

[۹] محسن رحیمی و محمد رضا اسماعیلی، «طراحی کنترل کننده توان و بهبود میرایی نوسانات پیچشی در توربین بادی DFIG-710 kW نصب شده در سایت بینالود»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۶، صفحه ۱۳۴-۱۲۳، زمستان ۱۳۹۵.

[10] J. Adams, C. Carter and S. H. Huang, "ERCOT experience with sub-synchronous control interaction and proposed remediation," *in Proceedings of IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo.*, pp. 1-5, 2012.

[11] K. Narendra, D. Fedirchuk, R. Midence, N. Zhang, A. Mulawarman, P Mysore and V .Sood, "New microprocessor based relay tomonitor andprotect power systems against sub-harmonics," *in Proceedings of IEEE Elect.Power and Energy Conf. (EPEC'11)*, pp. 438-443, 2011.

[12] H. A. Mohammadpour and E. Santi, "Sub-synchronous resonance analysis in DFIG-based wind farms: mitigation methods - TCSC, GCSC, and DFIG controllers - Part II," *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1-8, 2014.

[13] H. A. Mohammadpour and E. Santi, "Modeling and Control of Gate-Controlled Series Capacitor Interfaced with a DFIG-Based Wind Farm," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no .2, pp. 1022-1033, Feb. 2015.

[14] L. Fan, C. Zhu, Z. Miao and M. Hu, "Modal analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a series compensated network," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1010-1020, Dec. 2011.

[15] L. Fan and Z. Miao, "Mitigating SSR using DFIG-based wind generation," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 3, pp. 349-358, Jul. 2012.

[16] H. A. Mohammadpour and E. Santi, "SSR Damping Controller Design and Optimal Placement in Rotor-Side and Grid-Side Converters of Series-Compensated DFIG-

Based Wind Farm," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 388-399, Apr. 2015.

[17] IEEE Committee Report, "First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-96, no. 5, pp. 1565-1572, Sep. 1977.

[18] L. Fan, R. Kavasseri, Z. Miao and C. Zhu, "Modeling and simulation of a DFIG based wind turbine for SSR," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2073-2082, Oct. 2010.

[19] J. Arbi, M. J. B. Ghorbal, I. Slama-Belkhodja and L. Charaabi, "Direct virtual torque control for doubly fed induction generator grid connection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4163-4173, Oct. 2009.

[20] R. Datta and V. T. Ranganathan, "Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 3, pp. 390-399, May 2001.

[21] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1997.

[22] *Mathworks. (2015) User's Guide*, www.mathworks.com/help

[23] J. S. R. Jang, C. T. Sun and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing a Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice-Hall, 1997.

[24] A. Lak, D. Nazarpour, and H. Ghahramani, "Novel methods with fuzzy logic and ANFIS controller based SVC for damping sub-synchronous resonance and low-frequency power oscillation," *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)*, Tehran, Iran, pp. 450-455, May 2012.

[۲۵] سعید اباذری و صادق قائدی، «بهبود پایداری دینامیکی به روش کنترل فازی در سیستم‌های قدرت چندماشینه با کاربرد TCSC»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۲، صفحه ۹-۱، تابستان ۱۳۹۴.

زیرنویس‌ها

۱ Sub-synchronous resonance

۲ Doubly-fed induction generator

۳ SSR damping controller

۴ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

۵ Torque amplification

۶ Torsional interaction

۷ Electric reliability council of Texas

۸ Flexible ac transmission system

۹ Thyristor controlled series capacitor

۱۰ Gate controlled series capacitor

۱۱ Static var compensator

۱۲ Static synchronous compensator

۱۳ Grid side converter

۱۴ Rotor side converter

۱۵ First benchmark model

۱۶ Maximum power point tracking

۱۷ Vector control

۱۸ Direct torque control

۱۹ Direct power control

20 Fuzzy inference system