

تحلیل احتمالاتی پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت و تنظیم هماهنگ PSSها و TCSC با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید مزرعه بادی

هادی احمدی و حسین سیفی

در این مقاله، تمرکز بر روی عدم قطعیت ناشی از تولید در سیستم قدرت است.

از میان منابع تولید توان در سیستم قدرت، منابع تولید پراکنده و به خصوص مزارع بادی جایگاه ویژه‌ای در تأمین توان یافته‌اند. اگر سطح نفوذ مزارع بادی کم باشد، تأثیر ژنراتورهای توربین‌های بادی در پایداری سیستم قدرت قابل ملاحظه نخواهد بود [۱]. از سوی دیگر، زمانی که سطح نفوذ مزارع بادی نسبتاً زیاد بوده و این منابع انرژی جایگزین نیروگاه‌های معمول شوند، عملکرد سیستم قدرت تحت تأثیر قرار خواهد گرفت [۲]. در حقیقت، خصوصیات دینامیکی سیستم قدرت بر اساس خصوصیات و تعامل بین ژنراتورهای متصل به شبکه مشخص می‌گردد. اگر توربین‌های بادی به تدریج جایگزین ژنراتورهای مرسوم شوند، آن گاه بهره‌برداری و کنترل سیستم قدرت از جنبه‌های متفاوتی مانند حفاظت، کنترل فرکانس، پایداری گذرا و پایداری سیگنال کوچک می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد [۱] و [۳]. با افزایش میزان استفاده از این منابع، چالش‌های زیادی در مورد نحوه بهره‌برداری از سیستم قدرت در حضور آنها ایجاد شده است. آنچه در مورد مزارع بادی اهمیت دارد، دقت به این مسأله است که میزان تولید توان مزارع بادی وابسته به سرعت باد بوده و عدم قطعیت آن وابسته به یک عامل خارجی است. بنابراین پیش‌بینی رفتار باد در یک ناحیه دشوار بوده و حتی در صورت استفاده از اطلاعات گذشته نمی‌توان پیش‌بینی دقیقی برای سرعت باد در هر ساعت انجام داد. در چنین شرایطی که توان تولیدی مزرعه بادی به طور پیوسته در حال تغییر است، مدل‌سازی آن به صورت سرعت ثابت با یک توان خروجی ثابت، صحیح نبوده و موجب ایجاد خطای زیادی در شبیه‌سازی‌ها خواهد شد. از این رو باید با استفاده از روش‌های تحلیل عدم قطعیت، مدلی را برای عدم قطعیت توان تولیدی و تأثیر آن بر دینامیک سیستم و به خصوص میرایی مدهای نوسانی بحرانی به دست آورد.

هرگاه قرار باشد عدم قطعیتی مدل شود، اولین روشی که به ذهن می‌رسد روش مونت کارلو است [۴] اما این روش تحلیل برای یک سیستم قدرت با عدم قطعیت‌های متفاوت، نیازمند هزاران تکرار از شبیه‌سازی‌ها خواهد بود. روش‌های موجود برای کاهش مرتبه سیستم، به سادگی قادر به افزایش سرعت هزاران شبیه‌سازی به طور عملی نیستند. برخی از روش‌های پیچیده تحلیل مونت کارلو، قادر به کاهش تعداد شبیه‌سازی‌های مورد نیاز است اما این کاهش نیز تا حد مشخصی امکان‌پذیر خواهد بود، زیرا به ازای هر حالت باید یک شبیه‌سازی اجرا گردد و نمی‌توان از شبیه‌سازی یکسانی برای یافتن نتایج برای چندین حالت استفاده کرد. مطالعاتی در زمینه تحلیل پایداری سیگنال کوچک با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در سیستم صورت گرفته است. در [۵] پایداری سیگنال کوچک سیستم با در نظر گرفتن عدم قطعیت توأم تولید و تقاضا و به

چکیده: با کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش آلودگی محیط زیست، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر روز به روز در حال افزایش است. از سوی دیگر، وقوع تجدید ساختار در صنعت برق موجب حضور هرچه بیشتر منابع تولید پراکنده در بازار برق رقابتی شده و در چنین شرایطی، فضا برای حضور مزارع بادی و تأمین بخشی از توان سیستم کاملاً مساعد می‌باشد. اما توان تولیدی مزرعه بادی وابسته به سرعت باد بوده و این عدم قطعیت در تولید موجب افزایش نگرانی‌ها در مورد اتصال این منابع به سیستم و بهره‌برداری از آنها شده است. از این رو در این مقاله روشی احتمالاتی برای مطالعه پایداری سیگنال کوچک سیستم با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید مزارع بادی با استفاده از روش PCM ارائه شده است. روش PCM بر پایه چندجمله‌ای‌های متعامد استوار می‌باشد که یک مدل خطی از خروجی مطلوب فراهم می‌آورد. با تغییر مداوم نقطه کار ناشی از تغییرات توان خروجی مزرعه بادی، پارامترهای تجهیزات کنترلی باید دوباره و بر اساس شرایط بهره‌برداری جدید تنظیم گردند. بدین منظور از الگوریتم ژنتیک و مدل‌های تقریبی به دست آمده برای توابع چگالی احتمال مقادیر ویژه بحرانی از روش PCM استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، از دو سیستم ۱۰ ماشینی و ۱۶ ماشینی IEEE استفاده شده است.

کلید واژه: الگوریتم ژنتیک، پایداری سیگنال کوچک، عدم قطعیت، مزرعه بادی، PSS، TCSC.

۱- مقدمه

مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌های بزرگ، غیر خطی و پویایی مانند سیستم‌های قدرت همواره با چالش‌های زیادی روبه‌رو بوده است. روش‌های زیادی برای کاهش سختی‌های ناشی از پیچیدگی، اندازه مدل یک سیستم قدرت واقعی و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم ارائه شده است ولی عدم قطعیت در مدل یک سیستم قدرت ناشی از عوامل خاصی است که در تمام سیستم‌های دینامیکی بزرگ مطرح نیست. برای مثال می‌توان به عدم قطعیت ناشی از تولید، عدم قطعیت ناشی از بار و عدم قطعیت ناشی از بهره‌برداری اشاره کرد. با وجود خاص بودن عدم قطعیت‌ها در سیستم قدرت، می‌توان ادعا کرد که میزان اعتبار مدل یک سیستم قدرت خاص به اطلاعات و شناخت از پارامترهای دارای عدم قطعیت و امکان دستیابی به اطلاعات مطمئن از سیستم قدرت وابسته است.

این مقاله در تاریخ ۲۸ آذر ماه ۱۳۹۱ دریافت و در تاریخ ۲۲ شهریور ماه ۱۳۹۲ بازنگری شد.

هادی احمدی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: hadi.ahmadi@modares.ac.ir).

حسین سیفی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: seifi_ho@modares.ac.ir).

را می‌توان با استفاده از ترکیبی از معادلات دیفرانسیل مرتبه اول به فضای حالت انتقال داد [۱۷]

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (۳)$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u \quad (۴)$$

۳- تحلیل عدم قطعیت به روش PCM

تحلیل عدم قطعیت وابسته به مطالعه توابعی به شکل زیر است [۱۸]

$$v = h(z) \quad (۵)$$

که بردار خصوصیات توابع مدل مورد مطالعه، $z = [z_1, z_2, \dots]^T$ بردار متغیرهای ورودی و $v = [v_1, v_2, \dots]^T$ بردار متغیرهای خروجی می‌باشد. هدف تحلیل عدم قطعیت، مشخص کردن عدم قطعیت در پارامترهای v است که ناشی از عدم قطعیت در پارامترهای z است. در عمل h می‌تواند مجموعه‌ای از توابع پیچیده (برای مثال معادلات دینامیکی سیستم قدرت) و بردارهای z و v می‌توانند شامل تعداد زیادی از پارامترها باشند [۱۸].

از نقطه نظر تئوری احتمالات، تحلیل عدم قطعیت شامل تعیین تابع چگالی احتمال بردار خروجی v بوده و ناشی از تابع h و تابع چگالی احتمال بردارهای ورودی z است. همان طور که اشاره شد مرسوم‌ترین روش به منظور تحلیل عدم قطعیت در سیستم قدرت روش مونت کارلو می‌باشد که به دلایل ذکر شده، استفاده از آن روش با مشکلاتی همراه خواهد بود. بنابراین در این مقاله از روش PCM به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت ناشی از تولید مزرعه بادی استفاده شده است.

روش PCM یک روش مدل‌سازی چندجمله‌ای می‌باشد. خروجی مطلوب به صورت چندجمله‌ای از پارامتر نامعلوم سیستم، توصیف می‌شود. بعد از این که این مدل مشخص شد، روش مونت کارلو را می‌توان به مدل چندجمله‌ای اعمال کرد. مشکل روش مونت کارلو این است که یافتن هر مدل تقریبی از نقطه نظر محاسباتی و زمانی هزینه‌بر می‌باشد زیرا این روش، شبیه‌سازی‌های مجزایی برای سیستم ارائه می‌دهد. اگر تابع $g(x)$ را بتوان به شکل قابل قبول و دقیق با $\bar{g}(x)$ مدل کرد، آن گاه تعداد نامحدودی از نمونه‌های $\bar{g}(x_i)$ را می‌توان محاسبه کرد زیرا در هر تکراری که چندجمله‌ای مشخص می‌گردد، هیچ شبیه‌سازی انجام نمی‌شود. در حقیقت، فقط شبیه‌سازی‌های ضروری برای یافتن چندجمله‌ای به کار می‌روند که این موضوع نقطه قوت روش PCM است [۱۹].

فرض کنید که x پارامتر نامعلوم سیستم، $f(x)$ تابع چگالی احتمال این پارامتر و $g(x)$ خروجی مطلوب باشد. در این حالت داریم

$$\bar{g}(x) = \bar{g}_0 + \bar{g}_1 x + \dots + \bar{g}_n x^n \quad (۶)$$

g'_n ها مقادیر ثابت هستند. پارامترهای مدل را می‌توان با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف به ازای x_i های مختلف و همچنین با استفاده از الگوریتم کم‌ترین مربعات تعیین کرد. $\bar{g}(x)$ را می‌توان به کمک چندجمله‌ای‌های متعام نرمال بدون از دست دادن عمومیت آن به شکل زیر نشان داد که در آن $\bar{g}(x)$ از مرتبه $n-1$ می‌باشد

$$\bar{g}(x) = g_0 h_0(x) + g_1 h_1(x) + \dots + g_{n-1} h_{n-1}(x) \quad (۷)$$

مجموعه خطی از روابط زیر را می‌توان با مشخص کردن g_n حل کرد

$$\begin{bmatrix} g(x_1) \\ \vdots \\ g(x_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{n-1}(x_1) & \dots & h_1(x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n-1}(x_n) & \dots & h_1(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_{n-1} \\ \vdots \\ g_0 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

کمک روش مونت کارلو و در [۶]، تأثیر عدم قطعیت بار بر پایداری سیگنال کوچک با روش مونت کارلو تحلیل شده است. از طرفی دیگر در [۷] عدم قطعیت تولید مزارع بادی و تأثیر آن بر پایداری سیگنال کوچک به کمک روش مونت کارلو بررسی شده است. همچنین، مطالعات دیگری در زمینه مدل‌سازی عدم قطعیت در سیستم قدرت در [۸] انجام شده است.

راه حل پیشنهادی مبتنی بر یک تکنیک نسبتاً جدید می‌باشد که بر پایه مدل چندجمله‌ای که رابطه بین پارامتر دارای عدم قطعیت و خروجی مطلوب را می‌سازد، استوار است. روش PCM^۱ نتایج دقیقی را برای خروجی‌های مطلوب با استفاده از تعداد کمی از شبیه‌سازی‌ها تولید می‌کند که این روش برای اولین بار در مطالعات تغییرات جهانی آب و هوا معرفی شد. مقدمات این روش در [۹] ارائه و سپس در [۱۰] ایده اصلی آن گسترش داده شد. این روش برای یک مثال از سیستم قدرت در [۱۱] استفاده شده و علاوه بر این به طور مفصل در [۱۲] مورد مطالعه قرار گرفته است.

سیستم قدرت یک سیستم پویا بوده که خصوصیات دینامیکی آن مدام در حال تغییر می‌باشد. بنابراین برای این که بتوان پایداری چنین سیستم بزرگی را تأمین کرد، باید تجهیزات کنترلی بر عملکرد سیستم نظارت داشته و اصلاحات کنترلی لازم به سیستم اعمال شوند. راهکارهای متفاوتی برای بهبود و کنترل پایداری سیگنال کوچک سیستم وجود دارد و مطالعات زیادی در زمینه تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده سیستم قدرت به طور هماهنگ انجام شده است. در [۱۳] از روند تنظیم بر پایه بهینه‌سازی غیر خطی برای حداقل کردن اثر متقابل میان ادوات FACTS^۲ و PSS^۳ استفاده شده است. روش تنظیم بر پایه مدل غیر خطی، دینامیک پیچیده سیستم قدرت را به خصوص در حین خطاهای بحرانی در نظر می‌گیرد [۱۴] هر چند روش‌های بر پایه شبیه‌سازی غیر خطی نیازمند زمان بیشتری نسبت به روش‌های خطی می‌باشند [۱۵]. بنابراین در عمل، استفاده از روش‌های بر پایه تحلیل مدال بسیار رایج‌تر هستند. همچنین به منظور تنظیم هماهنگ پارامترهای ادوات TCSC^۴ و PSSها از روش الگوریتم ژنتیک [۱۶] استفاده شده است. در این مقاله، روشی احتمالاتی بر پایه الگوریتم ژنتیک به منظور تنظیم هماهنگ تجهیزات کنترلی استفاده شده است.

۲- تحلیل پایداری سیگنال کوچک

سیستم قدرت یک سیستم دینامیکی می‌باشد که با استفاده از معادلات دیفرانسیل جبری که ترکیبی از معادلات جبری غیر خطی است، معرفی می‌گردد. سیستم قدرت را می‌توان با استفاده از مجموعه‌ای از n معادله دیفرانسیل غیر خطی مرتبه اول که به طور هم‌زمان و با هم حل می‌شوند، توصیف کرد که شکل ماتریسی آن به صورت زیر خواهد بود [۱۷]

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (۱)$$

$$y = g(x, u) \quad (۲)$$

در تحلیل پایداری سیگنال کوچک به منظور خطی‌سازی معادلات سیستم، فرض می‌شود اغتشاشات به اندازه کافی کوچک هستند و بدین ترتیب معادلات را می‌توان حول نقطه کار اولیه خطی کرد. یک سیستم دینامیکی

1. Probabilistic Collocation Method
2. Flexible AC Transmission System
3. Power System Stabilizer
4. Thyristor Controlled Series Compensator

مزارع بادی بر پایداری سیگنال کوچک سیستم به دست آورده می‌شود. شایان ذکر است در تحلیل پایداری سیگنال کوچک، تمام مقادیر ویژه مورد بررسی قرار نگرفته و فقط مقادیر ویژه بحرانی بررسی می‌شوند. اکنون که تأثیر عدم قطعیت تولید در مزارع بادی بر روی مقادیر ویژه سیستم به دست آمد، سعی می‌شود که پایداری سیگنال کوچک سیستم بهبود داده شود. اما نکته‌ای که باید مد نظر قرار گیرد این است که در صورتی که پارامترهای این تجهیزات کنترلی به طور مجزا از هم تنظیم شوند، ممکن است تأثیر منفی بر عملکرد کنترلی یکدیگر داشته باشند. بنابراین پارامترهای این تجهیزات به طور هماهنگ و طی یک مسأله بهینه‌سازی که تابع هدف آن حداکثرسازی میرایی نوسانات سیستم می‌باشد، تنظیم می‌گردند. برای حل مسأله بهینه‌سازی فوق از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و روند ارائه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. جزئیات ساختار دینامیکی PSS و TCSC که تجهیزات کنترلی مورد استفاده در این مقاله به منظور تأمین میرایی و پایداری سیگنال کوچک سیستم می‌باشند، در بخش بعدی آورده شده است.

۵- جزئیات روش پیشنهادی

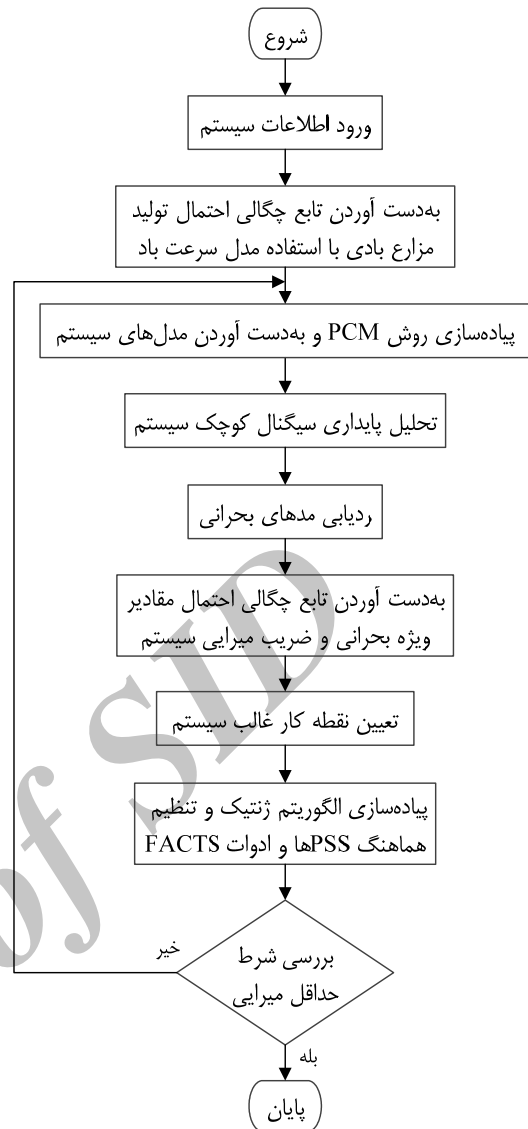
در این بخش مطابق الگوریتم مطرح شده در بخش ۴، جزئیات روش پیشنهادی شامل مدل پایدارساز سیستم قدرت، مدل TCSC، تنظیم هماهنگ PSSها و TCSC، ردیابی مدهای بحرانی، تعیین نقطه کار غالب سیستم و مدل‌سازی سرعت باد و توان خروجی مزرعه بادی ارائه شده است.

۵-۱ مدل پایدارساز سیستم قدرت

PSS یک بلوک کنترلی اضافی می‌باشد که به منظور بهبود پایداری به سیستم اضافه می‌گردد [۲۰]. در حقیقت این بلوک به AVR افزوده شده و از سیگنال‌های پایدارساز فیدبک مانند سرعت محور، فرکانس پایانه و یا توان به منظور تغییر سیگنال ورودی به AVR استفاده می‌کند. همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، هر PSS از سه بلوک دیاگرام ساخته شده است. بلوک اول، بلوک بهره پایدارساز با بهره ثابت K_{PSS} و ثابت‌های زمانی T_i می‌باشد که میزان میرایی را مشخص می‌کند، بلوک دوم، فیلتر پاک‌ساز بوده که به عنوان یک فیلتر بالاگذر عمل می‌کند و بلوک آخر، جبران‌ساز فاز، میزان پیش‌فاز مطلوب به منظور جبران پس‌فاز ایجاد شده بین ورودی AVR و گشتاور الکتریکی ژنراتور را تأمین می‌کند. در عمل، دو یا تعداد بیشتری از بلوک‌های مرتبه اول به منظور تأمین پس‌فاز مطلوب استفاده می‌شود.

۵-۲ مدل TCSC

TCSC یکی از انواع مهم ادوات FACTS است که امکان تغییر امپدانس مشخصه ظاهری خطوط انتقال را به گونه‌ای فراهم می‌کند که شارش توان از مسیر قراردادی صورت گیرد. ساختار TCSC در شکل ۳ نشان داده شده [۲۱] که شامل یک فیلتر پاک‌ساز با بهره ثابت K_{IV} ، یک جبرانگر دینامیکی و یک محدودکننده می‌باشد. فیلتر پاک‌ساز به منظور جلوگیری از پاسخ کنترل‌کننده به بخش dc سیگنال ورودی استفاده می‌شود. جبرانگر دینامیکی شامل دو (یا بیشتر) بلوک‌های پیش‌فاز-پس‌فاز به منظور تأمین ویژگی‌های پس‌فاز-پیش‌فاز ضروری سیستم می‌باشد و در نهایت از محدودکننده به منظور بهبود پاسخ کنترل‌کننده به اغتشاشات بزرگ در سیگنال ورودی استفاده می‌شود.

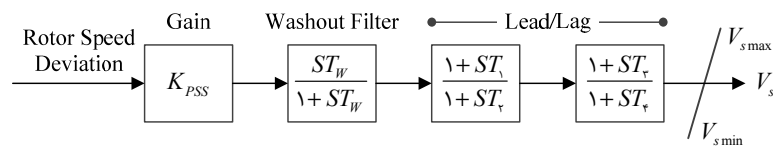


شکل ۱: روند نامی الگوریتم پیشنهادی.

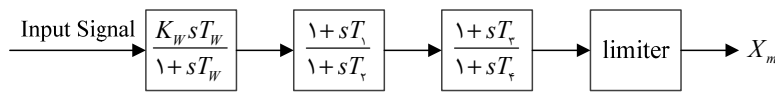
این رابطه بیان می‌کند که اگر $g(x)$ یک چندجمله‌ای از مرتبه پایین‌تر یا مساوی $2n-1$ باشد، امید ریاضی که با استفاده از $\bar{g}(x)$ محاسبه شده است، دقیق بوده و در حقیقت برابر با $g \int_A f(x)h(x)dx$ می‌باشد. بنابراین اگر $h(x) = 1$ ، آن گاه امید ریاضی برابر با g بوده و نیازی به محاسبات اضافی نخواهد بود. در پیوست الف مثالی برای توضیح عملکرد روش PCM آورده شده است.

۴- کلیات روش پیشنهادی

برای انجام شبیه‌سازی در گام نخست باید ابعاد مختلف سیستم شناسایی شده و نقاط ضعف و قوت دینامیکی سیستم مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. از این رو بعد از شناسایی و ارزش‌دهی شرایط اولیه سیستم، یک بار پایداری سیگنال کوچک سیستم بدون در نظر گرفتن مزارع بادی بررسی شده و نقاط ضعف سیستم و خصوصیات دینامیکی آن به دست می‌آید و در مرحله بعد، مزارع بادی نیز در سیستم در نظر گرفته می‌شوند. حال باید در ابتدا مدلی برای عدم قطعیت تولید مزارع بادی به دست آورد تا بتوان آنها را در روند تحلیل پایداری سیگنال کوچک و بررسی تأثیر عدم قطعیت آنها بر سیستم شبیه‌سازی کرد. بدین منظور به کمک روش PCM یک تقریب چندجمله‌ای خطی از مقادیر ویژه بحرانی و ضریب میرایی سیستم به منظور مدل‌سازی تأثیر عدم قطعیت در تولید



شکل ۲: تابع تبدیل مدل PSS.



شکل ۳: تابع تبدیل TCSC.

می‌تواند از ایجاد ناهماهنگی در تحلیل احتمالاتی مقادیر ویژه جلوگیری کند و به همین خاطر یک بار در شرایط بهره‌برداری پایه، مقادیر ویژه بحرانی سیستم و بردار ویژه راست آن محاسبه می‌گردد. سپس به ازای هر توان خروجی مزرعه بادی که موجب یک نقطه کار جدید می‌شود، یک بار تحلیل پایداری سیگنال کوچک انجام شده و مقادیر ویژه بحرانی و بردار ویژه راست آنها به دست می‌آید [۲۳].

در محاسبات ردیابی مدهای بحرانی، مدهایی که بر اساس حالت پایه و مدهایی که بر اساس شرایط بهره‌برداری متفاوت محاسبه شده‌اند، در صورتی با یکدیگر یکسان بوده و نوع آنها یکسان است که (۱) مکان مقادیر غالب بردار ویژه راست در هر دو حالت یکسان باشد و (۲) نرم مرتبه ۲ بردار تفاضل دو بردار ویژه راست، به اندازه کافی کوچک باشد. نرم یک بردار یا تابع پیوسته، تابعی است که عددی مثبت موسوم به طول یا اندازه را به هر کدام از بردارهای موجود در یک فضای برداری نسبت می‌دهد. فرض کنید $\rho \geq 1$ باشد، نرم مرتبه P ام به صورت (۱۱) تعریف می‌شود [۲۴]

$$\|X\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (11)$$

۵-۵ تعیین نقطه کار غالب

همان طور که اشاره شد، پارامترهای تجهیزات کنترلی به ازای یک نقطه کار تنظیم شده و به ازای میزان قابل قبولی از خطا برای نقاط کار دیگر مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. اما زمانی که مزرعه بادی در سیستم موجود بوده و تولید توان آن دارای عدم قطعیت باشد، دیگر یک نقطه کار ثابت وجود نخواهد داشت. در چنین شرایطی باید بتوان یک توان خروجی برای مزرعه بادی تعیین کرد که بیشترین احتمال وقوع را داشته باشد. بدین منظور از توابع چگالی احتمال به دست آمده برای مقادیر ویژه بحرانی سیستم استفاده خواهد شد.

با استفاده از توابع چگالی احتمال به دست آمده برای مقادیر ویژه بحرانی و به کمک (۱۲) می‌توان تابع چگالی احتمال ضریب میرایی به ازای هر کدام از مقادیر ویژه را به دست آورد. رابطه (۱۲) اصلاح شده رابطه معرفی شده در بخش ۵-۳ برای محاسبه ضریب میرایی می‌باشد

$$\zeta_{eig-i}(P) = \frac{-\text{real}(\hat{Y}_{eig-i}(P))}{\sqrt{\text{real}(\hat{Y}_{eig-i}(P))^2 + \text{img}(\hat{Y}_{eig-i}(P))^2}} \quad (12)$$

با محاسبه میانگین و انحراف معیار توابع چگالی احتمال، به منظور دستیابی به توان با احتمال وقوع بالا، یک ضریب وزنی مطابق (۱۳) تعریف می‌شود. طبق (۱۳)، نسبت ضریب میرایی تابع چگالی احتمال مقدار ویژه i نسبت به ζ_{\min} ، حداقل ضریب میرایی مجاز می‌باشد. در حقیقت α_i نشان‌دهنده میزان تأثیر هر کدام از مدهای بحرانی در ناپایداری سیستم می‌باشد

۳-۵ تنظیم هماهنگ PSSها و ادوات FACTS

روش‌های طراحی معمول مانند روند حل مجزا یا پیوسته سری، به طور دقیق نمی‌تواند تعامل بین کنترل‌کننده‌ها را در نظر بگیرد. در حالی که تنظیم هماهنگ می‌تواند تعامل معکوسی را که ممکن است این ادوات کنترلی بر عملکرد یکدیگر داشته باشند، کاهش دهد. تابع هدف تنظیم هم‌زمان پارامترها به طور کلی بهینه‌سازی عملکرد میرایی سیستم است و این امر نیازمند بهینه‌سازی هماهنگ پارامترهای TCSC و PSSها به منظور حداکثرسازی میرایی تمام مدهای نوسانی می‌باشد. بدین منظور، تابع هدف به شکل مجموعی از ضرایب میرایی شرایط کار مختلف طبق (۹) تعریف می‌شود. مجموعه قیود شامل محدوده پارامترها به همراه شرایط بهره‌برداری برای یک حداقل ضریب میرایی مشخص می‌باشد. بنابراین مسأله طراحی را می‌توان به شکل زیر فرمول‌بندی کرد [۲۲]

$$\max F = \sum_{j=1}^n \zeta_j \quad (9)$$

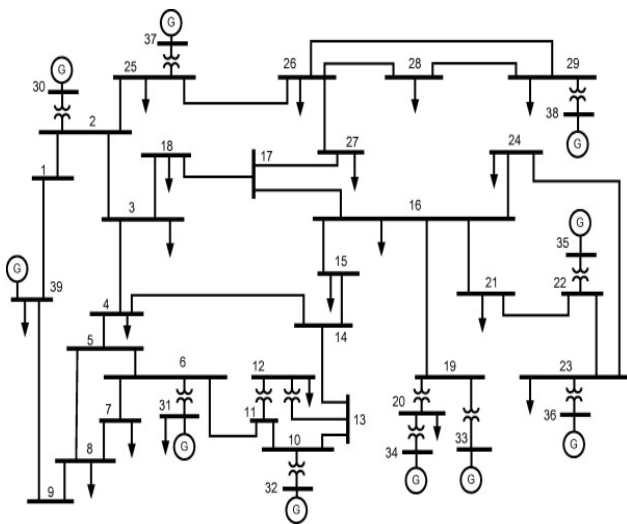
که $\zeta_i = -\sigma_i / \sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}$ ضریب میرایی و n تعداد کل مقادیر ویژه بحرانی است که شامل مدهای بین ناحیه‌ای، محلی، تحریک‌کننده و مدهای مربوط به سایر کنترل‌کننده‌ها می‌باشد. از میان مقادیر ویژه غالب، فقط آنهایی که ضریب میرایی کمتر از ۰/۰۵ دارند در روند بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. هدف از بهینه‌سازی، انتقال تمام مقادیر ویژه در نظر گرفته شده به سمت چپ محور موهومی و در نتیجه حداکثرسازی ضریب میرایی تا حد امکان می‌باشد. قیود مسأله به شکل زیر خواهند بود [۱۳] و [۱۷]

$$\begin{cases} K_{i\min} \leq K_{ii} \leq K_{i\max} \\ \zeta_{\min} \leq (\zeta_j)_i \end{cases} \quad (10)$$

مسأله مطرح‌شده در (۹) و (۱۰)، یک مسأله بهینه‌سازی پیچیده با یک تابع هدف ضمنی است که به ارزیابی مقادیر ویژه یک ماتریس بزرگ وابسته می‌باشد و حل این مسأله با استفاده از روش‌های معمول بسیار مشکل است. در این مقاله برای تنظیم TCSC و PSSها به طور هماهنگ از روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. علاوه بر این، به منظور مقابله با خاصیت غیر خطی سیستم قدرت، محدوده خاصی از شرایط بهره‌برداری سیستم برای بررسی عملکرد تنظیمات به دست آمده از بهینه‌سازی، به کمک شبیه‌سازی زمانی مطالعه می‌گردند.

۴-۵ ردیابی مدهای بحرانی

تحت شرایط متعدد بهره‌برداری تصادفی، ضروری است مدها به صورت پیوسته ردیابی شوند. بنابراین، حصول اطمینان از شرکت مدهای بحرانی در دینامیک زاویه روتور ژنراتور در طی شرایط بهره‌برداری مختلف ضروری به نظر می‌رسد. از این رو محاسبات ردیابی مدهای بحرانی



شکل ۴: نمودار تک‌خطی سیستم ۱۰ ماشین ۳۹ شین.

وجود دارد، باد با یک سرعت یکسان به تمام توربین‌های برخورد نمی‌کند و قطعاً توربین‌هایی که در ابتدای مسیر باد قرار دارند، سرعت بیشتری را نسبت به توربین‌های انتهایی مزرعه دریافت خواهند کرد. از این رو از ضریب f_{we} به منظور لحاظ کردن اثر این مسأله استفاده می‌شود [۶].

۶- شبیه‌سازی و مطالعات عددی

به منظور نشان‌دادن کارایی روش پیشنهادی در سیستم‌های بزرگ و کوچک، دو سیستم کوچک و نسبتاً بزرگ استفاده شده است. همچنین دو سیستم متفاوت از لحاظ پایداری سیگنال کوچک، یکی تک‌ناحیه‌ای (سیستم ۱۰ ماشین) و دیگری یک سیستم چندناحیه‌ای (سیستم ۱۶ ماشین) انتخاب شده تا کارایی روش پیشنهادی در سیستم‌های متفاوت که دارای تعاملات بین ناحیه‌ای و محلی بین ژنراتورها هستند، بررسی گردد. در ابتدا روش پیشنهادی بر روی سیستم ۱۰ ماشین IEEE پیاده‌سازی شده و نتایج به دست آمده از روش PCM با روش مونت کارلو مقایسه خواهد شد. سپس از روش PCM به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت در سیستم ۱۶ ماشین و مطالعه احتمالاتی پایداری سیگنال کوچک سیستم استفاده شده است.

۶-۱- سیستم ۱۰ ماشین

در این بخش عدم قطعیت در تولید مزرعه سیستم ۱۰ ماشین و ۳۹ شین IEEE بررسی می‌گردد [۶]. شکل ۴ نشان‌دهنده نمودار تک‌خطی سیستم ۱۰ ماشین IEEE می‌باشد و یک مزرعه بادی با ۲۴۰ توربین که هر کدام توان نامی برابر با ۲ مگاوات دارند، در شین ۳۶ در نظر گرفته شده و طبق (۱۷) و با ضریب تضعیف ۰/۸، توان کل مزرعه بادی برابر با ۳۸۴ مگاوات بوده و ظرفیت کل سیستم ۴۷۲۱ مگاوات است. در ابتدا با استفاده از روش PCM، مدل عدم قطعیت تولید سیستم به دست می‌آید. ابتدا پایداری سیگنال کوچک سیستم بررسی شده و به کمک تحلیل مدال و با در نظر گرفتن معیار حداقل ضریب میرایی ۰/۰۵، مقادیر ویژه بحرانی محاسبه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که سیستم ناپایدار بوده و دارای ۸ مد بحرانی نوسانی است [۷] و برای پایداری نیاز به تجهیزات کنترلی و پایدارساز خواهد بود.

تابع چگالی احتمال توان خروجی مزرعه بادی به صورت توزیع نرمال و با میانگین و انحراف معیار ۲۱۰/۰۷۹ و ۱۵۳/۷۶ مگاوات با ۸۰۰۰ بار نمونه‌گیری تصادفی از توزیع وییال سرعت باد و به کمک (۱۷) به دست

$$\alpha_i = \frac{|\xi_{mean-i}|}{\xi_{min}} \quad (13)$$

بر اساس میانگین ضرایب میرایی به دست آمده که در حقیقت بالاترین احتمال وقوع را در توزیع چگالی احتمال دارند، توان خروجی مزرعه بادی که این ضریب میرایی به ازای آن تولید می‌گردد، محاسبه می‌شود. بنابراین N توان به دست می‌آید که این توان‌ها همان نقاط با احتمال وقوع بالا به ازای هر کدام از مقادیر ویژه بحرانی هستند. از آنجایی که ناپایداری سیستم ناشی از میرایی نامطلوب مدهای نوسانی می‌باشد، بنابراین به کمک (۱۴) توان خروجی مزرعه بادی که بالاترین احتمال وقوع در کل سیستم دارد، محاسبه می‌شود [۲۵]

$$P_{wind-mp} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot P_{mean-i}}{N} \quad (14)$$

در این حالت P_{mean-i} توان خروجی مزرعه بادی متناسب با میانگین ضریب میرایی مقدار ویژه بحرانی i ام، N تعداد مقادیر ویژه بحرانی و $P_{wind-mp}$ توان خروجی مزرعه بادی با بالاترین احتمال وقوع می‌باشد. طبق این رابطه از ضریب وزنی α_i به منظور تعیین میزان تأثیر هر کدام از مدها در ناپایداری سیستم استفاده شده است.

۶-۵ مدل‌سازی سرعت باد و توان خروجی مزرعه بادی

مطالعات نشان می‌دهند که به طور معمول سرعت باد از توزیع وییال تبعیت می‌کند [۷] و (۱۵) رابطه توزیع وییال را که یک توزیع تجمعی می‌باشد، نشان می‌دهد. k پارامتر شکل، c پارامتر اندازه توزیع وییال، x معرف سرعت و y خروجی مطلوب است

$$y = f(x|c, k) = kc^{-k} x^{k-1} \exp\left(-\frac{k}{c}x\right) \quad (15)$$

برای مدل‌سازی ژنراتورهای توربین‌های بادی مزرعه بادی از مدل DFIG^۱ معرفی شده در [۶] استفاده شده است. رابطه بین سرعت باد و توان مکانیکی خروجی در (۱۶) آورده شده است

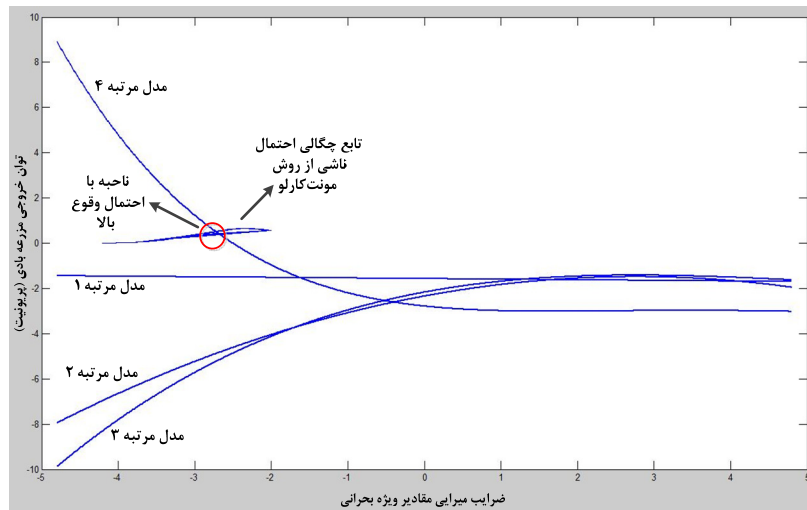
$$P_{m-wind} = \begin{cases} 0 & V_w \leq V_{cut-in} \\ 0.5 \rho A_{wt} C_p(\beta, \lambda) V_r^3 & V_{cut-in} \leq V_w \leq V_{rated} \\ P_r & V_{rated} \leq V_w \leq V_{cut-out} \\ 0 & V_w \geq V_{cut-out} \end{cases} \quad (16)$$

که در آن P_m توان مکانیکی به دست آمده از باد، ρ چگالی هوا، C_p ضریب بازدهی توربین، λ ضریب سرعت نوک، $A_{wt} = \pi R^2$ فضای که روتور توربین بادی پوشش می‌دهد، R شعاع روتور، V_w سرعت باد و β زاویه پیچشی پره می‌باشد. V_{cut-in} سرعتی است که توربین شروع به تولید توان می‌کند، $V_{cut-out}$ سرعتی است که توربین تولید توان را متوقف می‌کند و V_{rated} سرعتی است که به ازای آن، توان مکانیکی خروجی توربین بادی برابر با مقدار نامی خود، $P_r = 0.5 \rho A_{wt} C_p(\beta, \lambda) V_{rated}^3$ می‌باشد. بعد از یافتن توان خروجی یک ژنراتور توربین بادی می‌توان توان خروجی مزرعه بادی را به کمک (۱۷) به دست آورد

$$P_{WF} = f_{we} N_{WT} P_{WT} \quad (17)$$

P_{WF} توان اکتیو مزرعه بادی، N_{WT} تعداد توربین‌های بادی مزرعه و f_{we} ضریب تضعیف می‌باشد. در یک مزرعه بادی که تعداد زیادی توربین

1. Doubly-Fed Induction Generator



شکل ۵: مقایسه نتایج ناشی از روش‌های مونت کارلو و PCM.

جدول ۲: مشخصات مدل‌های به دست آمده از روش PCM و روش مونت کارلو.

روش	امید ریاضی	واریانس	انحراف معیار
روش مونت کارلو	-۲٫۸۳	۰٫۳۷۸	۰٫۶۱۵
PCM	-۱٫۲۳	۰٫۰۰۱	۰٫۰۴۱

از روش مونت کارلو اندکی خطا دارد که البته این امر طبیعی است، زیرا در روش مونت کارلو تعداد اعداد تصادفی بیشتر تولید می‌شود که موجب پراکندگی بیشتری نسبت به تعداد شبیه‌سازی‌های محدود روش PCM خواهد داشت.

از طرف دیگر در شکل ۵ مدل‌های به دست آمده از روش PCM و تابع چگالی احتمال ناشی از روش مونت کارلو رسم شده‌اند. مشاهده می‌شود که فقط مدل مرتبه ۴ تقریب مناسبی از ناحیه با احتمال وقوع بالا ارائه می‌دهد که این نیز تأییدی بر انتخاب درست مدل تقریبی مرتبه ۴ به کمک روش PCM می‌باشد.

در این بخش، مدل تقریبی سیستم با استفاده از دو روش PCM و مونت کارلو و به ازای سیستم ۱۰ ماشین به دست آمد. در حقیقت، هدف از تحلیل و مطالعه این دو سیستم، اعتبارسنجی روش PCM بود. اشاره به این نکته ضروری است که شبیه‌سازی‌های هر دو روش با استفاده از یک رایانه مشابه با مشخصات CPU ۴ (Intel(R) Core (TM) پردازنده ۲٫۶۶ GHz و RAM ۴ GB انجام شده و زمان‌های لازم برای شبیه‌سازی به کمک روش PCM و مونت کارلو برای هر دو سیستم مطابق جدول ۳ می‌باشد.

هر چند تنظیمات به صورت offline انجام می‌گیرد و از لحاظ زمانی محدودیتی وجود ندارد، اما در این مسأله افزایش زمان به منظور افزایش تعداد تکرارها در روند شبیه‌سازی می‌باشد که موجب افزایش خطا گشته و احتمال گیرافتادن در نقاط بهینه محلی را افزایش می‌دهد. در حالی که روش پیشنهادی فقط نقاط با احتمال وقوع بالا را بررسی کرده و تخمین توابع چگالی احتمال را بر اساس این نقاط انجام می‌دهد و در نتیجه تعداد تکرارها در شبیه‌سازی کمتر خواهد شد که از لحاظ امکان ردیابی روند حل مسأله نیز مطلوب‌تر خواهد بود.

۶-۲ سیستم ۱۶ ماشین

در این بخش عدم قطعیت تولید مزرعه بادی بر پایداری سیگنال کوچک، سیستم ۱۶ ماشین IEEE که در محیط نرم‌افزاری MATLAB شبیه‌سازی شده است، بررسی می‌گردد. نمودار تک‌خطی این سیستم

جدول ۱: مشخصات مدل‌های حاصل از روش PCM برای سیستم ۱۰ ماشین.

مرتبه مدل	rssr*	امید ریاضی	واریانس	انحراف معیار
اول	۱٫۴۶۸	-۱٫۴۹	۰٫۱۱۶	۰٫۳۴۱
دوم	۰٫۷۸۳	-۱٫۸۵	۰٫۰۲۴	۰٫۱۵۷
سوم	۰٫۴۲	-۱٫۴۶	۰٫۰۰۲	۰٫۰۰۵
چهارم	۰٫۱۱۳	-۱٫۲۳	۰٫۰۰۱	۰٫۰۴۱
پنجم	۰٫۶۵۷	-۱٫۲۴	۰٫۰۱۹	۰٫۱۳۸

* Relative Sum-Square-Root

آمده است. در این مطالعه، توان خروجی مزرعه بادی به عنوان پارامتر نامعلوم و میرایی کل سیستم به عنوان خروجی مطلوب می‌باشد. در ابتدا مدل تقریبی مرتبه اول محاسبه شده و سپس میزان خطای آن به دست می‌آید. با محاسبه میزان خطا به روش مجموع مربعات ریشه نسبی، مشاهده می‌شود که میزان خطا برابر با ۱٫۴۶۸ می‌باشد که از مقدار مطلوب تعیین شده، ۰٫۱ بیشتر است. بنابراین مدل مرتبه دوم محاسبه شده و این روند آن قدر ادامه می‌یابد تا مدل مطلوب با میزان خطای قابل قبول به دست آید. بعد از انجام روند فوق، مدل مرتبه ۴ با میزان خطای ۰٫۱۱۳۵ به عنوان مدل تقریبی مطلوب به دست آمده و ممان‌های مدل‌های تقریبی در جدول ۱ آورده شده است. ممان‌ها و میزان خطای مربوط به مدل مرتبه پنجم نیز آورده شده و نتایج نشان می‌دهد میزان تطبیق مدل بعد از مرتبه چهارم کاهش یافته و میزان خطا و واریانس نتایج بیشتر می‌گردد.

بار دیگر به کمک روش مونت کارلو تابع چگالی احتمال ضریب میرایی سیستم محاسبه شده و ممان‌ها برای تابع چگالی احتمال به دست می‌آید. نتایج هر دو روش PCM و مونت کارلو در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر ممان‌های به دست آمده از روش مونت کارلو اختلاف زیادی با مقادیر به دست آمده از روش PCM دارند که به دلیل در نظر گرفتن تمام حالت‌های ممکن در شبیه‌سازی مونت کارلو می‌باشد در حالی که روش PCM فقط به دنبال نقاط با احتمال وقوع بالا بوده و تمامی حالت‌ها مدل نمی‌گردد. بنابراین با کنارگذاشتن مقادیر مربوط به نواحی با احتمال وقوع کم، ممان‌های تابع چگالی احتمال در حالت جدید به دست می‌آید.

بر اساس نتایج مشاهده می‌شود که در مدل به دست آمده از هر دو روش، امید ریاضی تقریباً مشابه بوده و اختلاف بسیار جزئی دارند ولی واریانس مدل به دست آمده از روش PCM نسبت به نتیجه به دست آمده

جدول ۳: زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی‌ها در هر دو روش PCM و مونت کارلو.

شبکه	زمان با روش PCM (دقیقه)	تعداد شبیه‌سازی در روش PCM	زمان با روش مونت کارلو (دقیقه)	تعداد شبیه‌سازی در روش مونت کارلو
۱۰ ماشین	۱۱	۳۲	۱۷۰	۶۰۰۰

جدول ۴: مشخصات مدل‌های به دست آمده از روش PCM.

مد بحرانی	ISSI	امید ریاضی	واریانس	انحراف معیار	مرتب‌بندی مدل
مد اول	$i_{0.05}$	$-1.24 \pm i_{13.19}$	0.001	0.032	۲
مد دوم	$i_{0.14}$	$-1.72 \pm i_{20.04}$	6×10^{-5}	0.007	۳
مد سوم	$i_{0.11}$	$0.824 \pm i_{6.69}$	0.004	0.007	۲

مدل به دست آمده برای مقادیر ویژه سیستم در این حالت به ترتیب مطابق (۱۸) تا (۲۰) می‌باشد

$$\hat{Y}_{eig1}(P) = (-0.0035 + 0.027i)P^2 + (0.074 - 0.059i)P - 0.316 + 3.5i \quad (18)$$

$$\hat{Y}_{eig2}(P) = (-3.55 \times 10^{-5} + 0.0064i)P^2 + (0.016 - 0.07i)P^2 + (-0.01513 + 0.2251i)P - 0.2361 + 3.087i \quad (19)$$

$$\hat{Y}_{eig3}(P) = (0.0019 - 0.14i)P^2 + (0.051 - 0.12i)P - 0.172 + 1.49i \quad (20)$$

بنابراین با استفاده از مدل به دست آمده برای مقادیر ویژه بحرانی می‌توان وضعیت پایداری سیستم را تعیین کرد. به ازای یک مقدار تصادفی از توان خروجی مزرعه بادی و با استفاده از مدل‌های خطی به دست آمده برای مقادیر ویژه بحرانی می‌توان تعیین کرد که ناپایداری سیستم ناشی از کدام مد نوسانی است. برای مثال به ازای توان خروجی ۵ پریونیت (در مبنای ۱۰۰ مگاوات) مزرعه بادی، مقادیر توابع فوق به صورت زیر خواهند بود

$$\hat{Y}_{eig1}(\delta) = -0.314 \pm i_{3.2787}, \quad \zeta_{eig1} = 0.00951 \quad (21)$$

$$\hat{Y}_{eig2}(\delta) = 0.168 \pm i_{3.0045}, \quad \zeta_{eig2} = -0.558 \quad (22)$$

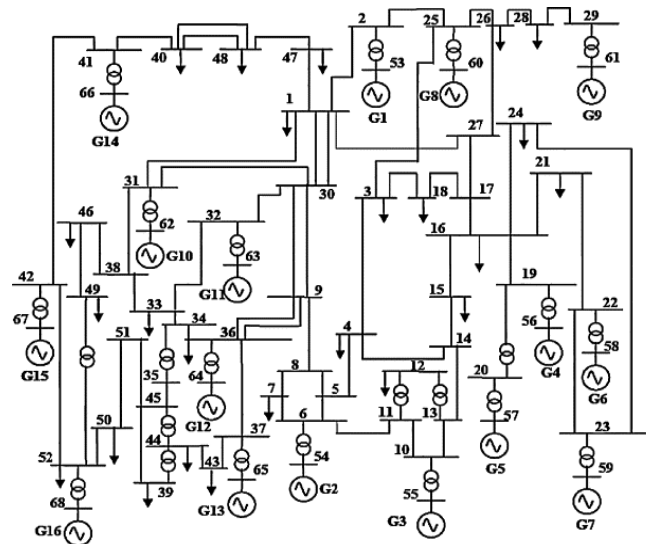
$$\hat{Y}_{eig3}(\delta) = 0.1334 + i_{0.4905}, \quad \zeta_{eig3} = -0.2624 \quad (23)$$

مشاهده می‌شود که مدهای ۲ و ۳ دارای قسمت حقیقی مثبت هستند که باعث ناپایداری سیستم می‌شوند اما از آنجایی که سیستم قدرت یک سیستم پویا می‌باشد که مدام در حال تغییر است، ممکن است مدهای نوسانی بر اساس تغییرات تولید مزارع بادی در سیستم ایجاد شوند که در حالت پایه این مدها جزء مدهای بحرانی نبوده‌اند. بنابراین تابع چگالی احتمال ضریب میرایی محاسبه می‌شود تا در صورت بروز چنین حالتی، تأثیر این مدهای نوسانی نیز در تنظیم ادوات کنترلی در نظر گرفته شوند. مدل تقریبی به دست آمده از روش PCM برای ضریب میرایی سیستم مطابق (۲۴) خواهد بود

$$\hat{Y}_{damp}(P) = 0.02632P^2 - 0.0407P^2 + 0.185P^2 - 0.5054P + 1.0191 \quad (24)$$

که به ازای توان خروجی ۵ پریونیت مزرعه بادی مقدار آن برابر خواهد بود با

$$\hat{Y}_{damp}(\delta) = -0.3254 \quad (25)$$



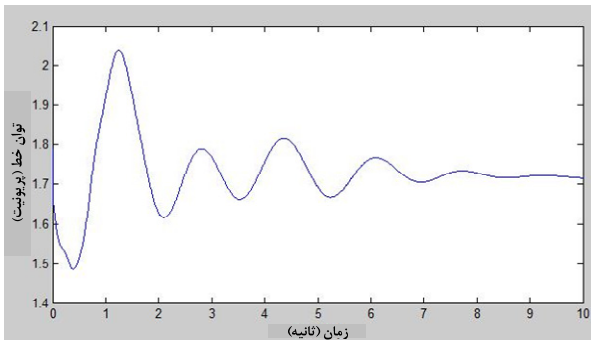
شکل ۶: نمودار تک‌خطی سیستم ۱۶ ماشین.

در شکل ۶ نشان داده شده و مکان نیروگاه بادی در فاصله ۵۰ کیلومتری از مکان اتصال به شبکه و در شین ۶۲ در نظر گرفته شده است. مزرعه بادی دارای ۴۰ ژنراتور توربین بادی می‌باشد و ژنراتورهای توربین‌های بادی به نحوی طراحی شده‌اند که بتوانند ۲ مگاوات توان تحویل دهند. بنابراین توان نامی نیروگاه بادی ۸۰۰ مگاوات و حداکثر توان اکتیو قابل تولید توسط تولید نیروگاه مطابق (۱۷) برابر با ۶۴۰ مگاوات بوده و ظرفیت کل سیستم ۱۴۸۵۲ مگاوات می‌باشد. سرعت باد به صورت لحظه‌ای و به کمک یک توزیع ویبال با پارامترهای $c=10$ و $k=1.5$ مدل شده است. بنابراین خروجی نیروگاه نیز یک توان ثابت نبوده و متناسب با سرعت باد در حال تغییر است که یک توزیع نرمال با میانگین 198.4067 مگاوات و انحراف معیار 168.0968 مگاوات می‌باشد.

در ابتدا تحلیل مدال برای سیستم ۱۶ ماشین در حالی که پایدارساز سیستم قدرت بر روی ژنراتورهای ۱ تا ۱۲ و TCSC بین شین‌های ۵۰ و ۵۱ نصب می‌باشد، انجام می‌شود. فرض می‌شود که PSSها از قبل بر اساس ضرایب مشارکت بر روی ژنراتورها و TCSC با استفاده از روش مانده‌ها بر روی خطوط نصب شده‌اند. تحلیل پایداری سیگنال کوچک سیستم نشان می‌دهد که سیستم در حالت پایه بدون حضور مزرعه بادی در سیستم و بر اساس تنظیمات موجود برای پارامترهای PSSها و TCSC، پایدار می‌باشد و دارای میرایی مطلوبی است ولی با مطالعه پایداری سیگنال کوچک سیستم در حضور مزارع بادی و مدل‌سازی عدم قطعیت تولید این منابع، مشاهده می‌شود که عدم قطعیت تولید مزرعه بادی موجب ایجاد مدهای نوسانی در سیستم و ناپایداری می‌گردد.

به طور کلی سیستم دارای ۳ مد بحرانی است. بنابراین باید مدل تقریبی سه مقدار ویژه بحرانی و مدل تقریبی ضریب میرایی مقادیر ویژه بحرانی به کمک روش PCM به دست آید. بدین ترتیب چندجمله‌ای‌های متعامد را ابتدا طبق تابع توزیع چگالی احتمال توان خروجی مزرعه بادی به دست آورده و طبق روند پیشنهادی و محاسبه خطا به ازای مدل‌های مرتبه‌های مختلف، بهترین حالت که بیشترین تطابق را دارد به دست می‌آید.

بعد از محاسبه چندجمله‌ای‌های متعامد، مدل‌های تقریبی از مرتبه اول تشکیل می‌گردد و سپس میزان خطا و ممان‌ها محاسبه می‌گردد. در جدول ۴ مدل‌های به دست آمده برای مقادیر ویژه بحرانی و ممان‌های آنها نشان داده شده است. مدل‌ها با فرض حداکثر خطا 10^{-5} برای قسمت حقیقی و حداکثر خطا 0.5 برای قسمت موهومی مقادیر ویژه به دست آمده‌اند.



شکل ۸: توان عبوری از خط واصل بین شین‌های ۵۰ و ۵۱.

جدول ۵: مشخصات توابع چگالی احتمال ضرایب میرایی مقادیر ویژه بحرانی.

مقدار ویژه	میانگین	انحراف معیار	ضریب وزنی (α_i)
مقدار ویژه ۱	-۰٫۲۱۷	۰٫۰۰۳	۴٫۳۴
مقدار ویژه ۲	-۰٫۱۹۶	۰٫۰۳۱	۳٫۹۳
مقدار ویژه ۳	-۰٫۱۶۳	۰٫۰۰۰۹	۳٫۲۶

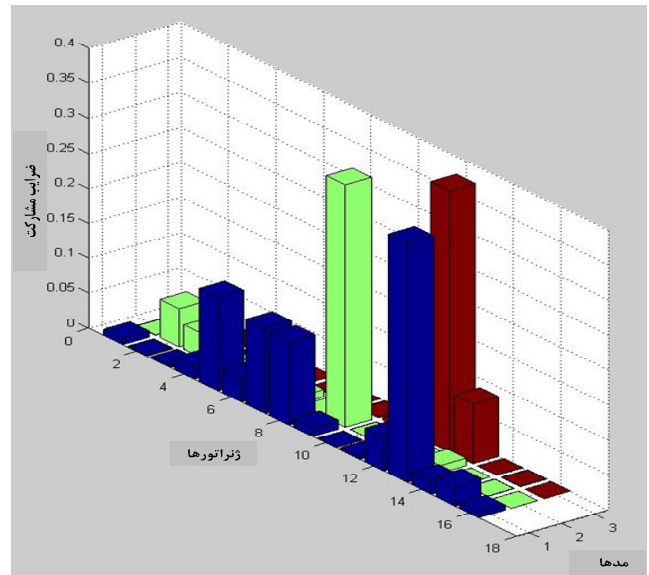
اولین گام در بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک، تعیین تعداد جمعیت اولیه و طول هر رشته می‌باشد که انتخاب جمعیت اولیه یک فرایند تجربی است و رابطه‌ای دقیق برای تعیین آن وجود ندارد. در اینجا تعداد جمعیت اولیه برابر با ۱۰۰ کروموزوم انتخاب شده و از آنجایی که باید بهره سیزده PSS و یک TCSC تنظیم گردد، طول هر کروموزوم برابر با ۱۱۲ بیت انتخاب شده که ۸ بیت به هر کدام از پارامترها اختصاص داده شده است.

اکنون برای شروع فرایند بهینه‌سازی یک عدد تصادفی برای تمام پارامترهای مطلوب PSSها در بازه بین ۱ تا ۱۰ و بین ۱۰ تا ۱۰۰ برای TCSC تولید می‌شود. دلیل انتخاب این بازه این است که محدوده معمول بهره پایدارسازها و TCSC در این بازه می‌باشد [۱۸]. سپس پایداری سیگنال کوچک سیستم بررسی شده و تابع هدف (۱۶) محاسبه می‌شود. این روند ۱۰۰ بار تکرار می‌شود تا جمعیت اولیه تولید گردد. حال باید شرط توقف الگوریتم بررسی شود و در صورتی که شرط برقرار باشد، الگوریتم پایان خواهد یافت.

برای تشخیص زمان توقف الگوریتم شیوه‌های مختلفی وجود دارد که در اینجا از روش فاصله برازندگی استفاده شده است. بدین ترتیب که فاصله برازندگی بهترین فرد جمعیت از متوسط برازندگی‌ها در نظر گرفته می‌شود که در این حالت باید از مقدار مشخصی کوچک‌تر باشد. در اینجا فرض شده است که تفاضل این دو مقدار باید از ۰٫۱ کمتر باشد و همچنین با استفاده از تابع برازندگی و به کمک روش انتخاب چرخ رولت، فرایند انتخاب صورت می‌گیرد. فرایند انتخاب برای ۷۰٪ از جمعیت نسل موجود صورت گرفته و بر روی ۲۰٪ از جمعیت، فرایند نخبه‌گزینی و ۱۰٪ دیگر، فرایند مهاجرت صورت خواهد گرفت. حال ۷۰ فرد از جمعیت اولیه انتخاب شده که بر روی ۶۰ فرد از این جمعیت انتخاب‌شده ترکیب یکنواخت و بر روی ۱۰ فرد دیگر، جهش باینری انجام می‌شود.

با اعمال (۱۹) بر روی توابع چگالی احتمالی مقادیر ویژه بحرانی، توابع چگالی احتمال ضرایب میرایی به ازای هر کدام از مقادیر ویژه به دست می‌آید. اکنون با استفاده از روابط به دست آمده می‌توان میانگین و انحراف معیار توابع چگالی احتمال ضرایب میرایی را به ازای هر کدام از مقادیر ویژه بحرانی به دست آورد که در جدول ۵ آورده شده است.

در نهایت با میانگین‌گیری از رابطه به دست آمده، توان خروجی مزرعه بادی با بالاترین احتمال وقوع محاسبه می‌گردد. نتایج به دست آمده در جدول ۶ آورده شده است.



شکل ۷: میانگین ضرایب مشارکت مدهای بحرانی سیستم در حضور مزرعه بادی.

مجموع ضرایب میرایی مقادیر ویژه بحرانی به ازای توان خروجی ۵ پرینیت مزرعه بادی برابر با ۰٫۳۰۸۶- می‌باشد که تقریباً برابر با مقدار به دست آمده از تابع چگالی احتمال ضریب میرایی است که این بدان معنی است که مد نوسانی دیگری در سیستم وجود ندارد. بنابراین مشاهده می‌شود که می‌توان به کمک توابع چگالی احتمال به دست آمده پایداری سیستم و وضعیت مقادیر ویژه بحرانی سیستم را تعیین کرد. با تکرار روند فوق برای سیستم ۱۰ ماشین، روابط مشابهی با (۱۸) تا (۲۵) به دست می‌آید که در پیوست ب آمده است.

با تحلیل نتایج به دست آمده برای پایداری سیگنال کوچک در حضور مزرعه بادی مشاهده می‌شود که ۳ مد نوسانی جدید در سیستم ایجاد می‌شود که موجب ناپایداری سیستم می‌گردد. بنابراین پارامترهای PSSها و TCSC باید دوباره تنظیم شوند تا بتوانند پایداری سیگنال کوچک سیستم را دوباره تأمین کنند. اما قبل از این کار به کمک میانگین ضرایب مشارکت مدهای بحرانی، ژنراتورهایی که بیشترین مشارکت در مدهای نوسانی داشته‌اند، مشخص می‌گردند. ضرایب مشارکت مقادیر ویژه بحرانی سیستم در شکل ۷ آورده شده و مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس نوسانات مدها، تعداد ژنراتورهایی که در هر مد مشارکت می‌کنند کاهش می‌یابد. این موضوع طبیعی است زیرا با افزایش فرکانس مدها از حالت بین‌ناحیه‌ای، مد ۱ به مدهای محلی ۲ و ۳ تغییر ماهیت می‌دهند که این نتیجه با یکی از نتایج به دست آمده در [۲۴] مطابقت دارد.

علاوه بر این با دقت به شکل ۸ دیده می‌شود که ژنراتورهای ۱۳، ۹ و ۱۲ به ترتیب بیشترین مشارکت را در مدهای ۱، ۲ و ۳ داشته‌اند و بنابراین بهترین مکان برای نصب PSSها که بیشترین تأثیر را بر افزایش میرایی و پایداری سیستم داشته باشند، ژنراتورهای ۱۳، ۹ و ۱۲ می‌باشند. ژنراتورهای ۹ و ۱۲ که از قبل مجهز به PSS هستند و باید پارامترهای آنها دوباره تنظیم گردند ولی بر روی ژنراتور ۱۳ بهتر است یک PSS نصب شود تا پایداری سیستم به ازای شرایط بهره‌برداری بیشتری تضمین گردد.

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که عدم قطعیت تولید مزرعه بادی موجب ناپایداری سیستم و ایجاد مدهای نوسانی می‌گردد. با توجه به ناپایداری سیستم در اثر حضور مزرعه بادی و تأثیر عدم قطعیت آن، پارامترهای تجهیزات کنترلی دوباره باید تنظیم گردند تا میرایی مطلوب سیستم تأمین گردد و برای همین از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

جدول ۶: نتایج حاصل برای محاسبه توان خروجی مزرعه بادی با بالاترین احتمال وقوع.

مقدار ویژه	توان خروجی مزرعه بادی (پریونیت)	$\alpha_i P_{mean-i}$
مقدار ویژه ۱	۱,۱۸۶	۵,۱۵۱۹
مقدار ویژه ۲	۰,۱۹۱	۰,۰۷۵۱
مقدار ویژه ۳	۱,۳۴۸۹	۴,۴۰۵۵

جدول ۷: پارامترهای بهینه PSS.

شماره ژنراتور	بهره اولیه	بهره بهینه
۱	۵	۷,۳۲
۲	۵	۷,۶۵
۳	۵	۸,۹۶
۴	۵	۶,۸۶
۵	۵	۶,۸۷
۶	۴	۶,۴۱
۷	۴	۶,۲۷
۸	۲	۸,۷۲
۹	۵	۸,۶۷
۱۰	۵	۹,۲۷
۱۱	۱,۵	۵,۷۸
۱۲	۵	۹,۱۲
۱۳	-۵	۸,۰۳

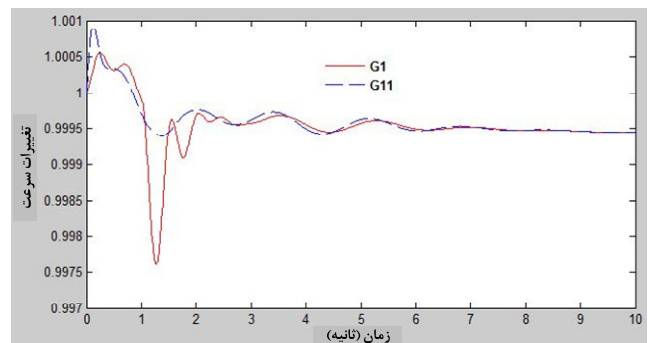
جدول ۸: پارامتر بهینه TCSC.

شماره TCSC	بهره اولیه	بهره بهینه
۱	۵۰	۷۲,۶۵

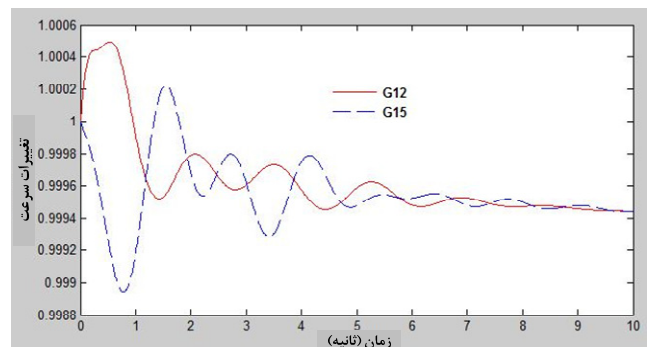
بنابراین مشاهده می‌شود که سیستم با تنظیمات جدید برای PSSها و TCSC قابلیت پایداری در شرایط بهره‌برداری مختلفی را دارد. جزئیات و آزمایشات بیشتری در [۲۵] قابل دسترسی است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی احتمالاتی بر پایه روش PCM و چندجمله‌ای‌های خطی در حضور مزرعه بادی و در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید مزرعه ارائه شد. روش پیشنهادی قابلیت تعیین وضعیت پایداری سیستم به ازای توان‌های خروجی مختلف مزرعه بادی را دارد و تأثیر عدم قطعیت ناشی از توان خروجی مزرعه بادی را به صورت توابع چگالی احتمال خطی مدل‌سازی می‌کند. نتایج نشان می‌دهند حضور مزارع بادی و عدم قطعیت آنها موجب ناپایداری و ایجاد مدهای نوسانی در سیستم می‌گردد. به منظور بهبود عملکرد دینامیکی سیستم، روشی بر پایه توابع چگالی احتمال و تعیین نقطه کار غالب به منظور تنظیم هماهنگ PSSها و TCSC ارائه شد. نتایج نشان می‌دهند که روش ارائه‌شده دقت و سرعت بهتری نسبت به روش‌های مرسوم دارد و همچنین از آنجایی که تخمین مدل‌های خطی در روش پیشنهادی فقط به ازای نقاط با احتمال وقوع بالا انجام می‌شود، مدل دقیق‌تری برای توابع چگالی احتمال مطلوب نسبت به روش‌های دیگر ارائه می‌دهد. کارایی نتایج به دست آمده از این روش به کمک شبیه‌سازی زمانی و یک خطای سه‌فاز بررسی شده و نتایج نشان می‌دهند که پارامترهای تجهیزات کنترلی به طور مناسبی تنظیم شده‌اند.



شکل ۹: تغییرات سرعت ژنراتورهای ۱ و ۱۱.



شکل ۱۰: تغییرات سرعت ژنراتورهای ۱۲ و ۱۵.

با توجه به نتایج به دست آمده در جدول ۶ و با استفاده از (۱۴) توان خروجی مزرعه بادی با احتمال وقوع بالا که موجب ناپایداری سیستم و ایجاد مدهای نوسانی می‌گردد، برابر با ۴,۴۰۵ پریونیت خواهد بود. بنابراین نقطه کار مد نظر برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده به دست آمد. حال، بعد از اجرای الگوریتم فوق نتایج به دست آمده برای پارامترهای PSSها و TCSC در جداول ۷ و ۸ آورده شده است.

بعد از تنظیم هماهنگ PSSها و TCSC حداقل میرایی مطلوب برای سیستم به دست آمده است. از آنجایی که الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک یک روش فراابتکاری می‌باشد، به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی زمانی استفاده شده است.

۶-۳ شبیه‌سازی زمانی بر سیستم ۱۶ ماشین برای اعتبارسنجی

در این بخش به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، شبیه‌سازی زمانی انجام می‌شود. یک خطای سه‌فاز بر روی شین ۳۳ در $t = 1s$ در نظر گرفته شده است که این خطا بعد ۱۰ ms توسط کلیدهای سیستم رفع می‌شود. شین ۳۳ به دلیل نزدیکی به مزرعه بادی و همچنین TCSC نصب‌شده بر روی خط واصل بین شین‌های ۵۰ و ۵۱ انتخاب شده تا عملکرد تجهیزات کنترلی نزدیک محل وقوع خطا و مزرعه بادی به خوبی مشاهده گردد. شکل ۸ توان عبوری از خط واصل بین شین‌های ۵۰ و ۵۱ را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که بعد از وقوع خطا در $t = 1s$ توان انتقالی نوسانی می‌شود ولی بعد از رفع خطا دامنه نوسانات کاهش یافته و کاملاً میرا می‌گردد که نشان‌دهنده تنظیم مناسب پارامترهای TCSC می‌باشد.

همچنین سرعت ژنراتورهای ۱، ۱۱، ۱۲ و ۱۵ که نزدیک‌ترین ژنراتورها به مزرعه بادی می‌باشند در شکل‌های ۹ و ۱۰ آورده شده است. مشاهده می‌شود که دامنه نوسانات سرعت ژنراتورها بعد از وقوع خطا افزایش می‌یابد اما به تدریج میرا شده و به حالت پایدار خود باز می‌گردد.

PCM به دست آمده و ممان‌های حاصل‌شده در هر دو حالت تقریباً یکسان هستند.

ب) روابط حاکم بر سیستم ۱۰ ماشینی

روابط مشابه (۱۸) تا (۲۲) برای سیستم ۱۶ ماشینی، در ادامه برای سیستم ۱۰ ماشینی آورده شده است

$$\hat{Y}_{eig1}(P) = -0.61P^2 + (0.5 - 0.32i)P - 0.121 + 2.015i \quad (8-P)$$

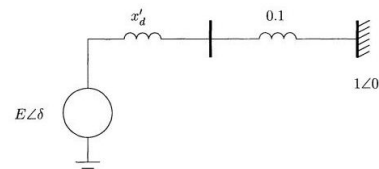
$$\hat{Y}_{eig2}(P) = 0.82P^2 + (-0.0017 + 0.076i)P + 1.34 + 3.99i \quad (9-P)$$

$$\hat{Y}_{eig1}(\delta) = -0.021 \pm i4.327, \quad \zeta_{eig1} = 0.0022 \quad (10-P)$$

$$\hat{Y}_{eig2}(\delta) = 0.542 \pm i2.012, \quad \zeta_{eig2} = 0.043 \quad (11-P)$$

مراجع

- [1] J. Slootweg and W. Kling, "The impact of large scale wind power generation on power system oscillations," *Electric Power Systems Research*, vol. 67, no. 1, pp. 9-20, Oct. 2003.
- [2] P. Ledesma and C. Gallardo, "Contribution of variable-speed wind farms to damping of power system oscillations," in *Proc. IEEE Power Tech*, pp. 190-194, Lausanne, Switzerland, 1-5 Jul. 2007.
- [3] Z. Chen, "Issues of connecting wind farms power systems," in *Proc. IEEE Conf. and Exhibition Asia and Pacific*, 6 pp., 2005.
- [4] R. Billinton, *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*, New York: Plenum Press, 1984.
- [5] J. L. Rueda, D. G. Colome, and I. Erlich, "Assessment and enhancement of small signal stability considering uncertainties," *IEEE Trans. Power System*, vol. 24, no. 1, pp. 198-207, Feb. 2009.
- [6] L. Meiyang, M. Jin, and Z. Y. Dong, "Uncertainties analysis of load models in small signal stability," in *Proc. Int. Conf. Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN'09*, 6 pp., 6-7 Apr. 2009.
- [7] C. Wang, et al., "Modeling analysis in power system small signal stability considering uncertainty of wind generation," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 7 pp., 25-29 Jul. 2010.
- [8] J. Liang, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, "Wide-area measurement based dynamic stochastic optimal power flow control for smart grids with high variability and uncertainty," *IEEE Trans.*, vol. 3, no. 1, pp. 59-69, Mar. 2012.
- [9] M. A. Tatang, *Direct Incorporation of Uncertainty in Chemical and Environmental Systems*, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [10] M. Webster, M. A. Tatang, and G. J. McRae, "Application of the probabilistic collocation method for an uncertainty analysis of a simple ocean model," *Tech. Rep. 4, Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, MIT, Cambridge, MA, Jan. 1996.
- [11] B. C. Lesieutre and J. R. Hockenberry, "Uncertainty analysis of power system simulations and ATC calculations using the probabilistic collocation method," in *Proc. Bulk Power Systems Dynamics and Control IV-Restructuring*, Santorini, Greece, Aug. 1998.
- [12] J. R. Hockenberry and C. Lesieutre, "Evaluation of uncertainty in dynamic simulations of power system models: the probabilistic collocation method," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1483-1491, Aug. 2004.
- [13] L. J. Cai and I. Erlich, "Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 294-300, Feb. 2005.
- [14] J. J. Sanchez-Gasca and J. H. Chow, "Power system reduction to simplify the design of damping controllers for inter-area oscillations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 1342-1349, Aug. 1996.
- [15] P. Pourbeik and M. J. Gibbard, "Simultaneous coordination of power system stabilizers and FACTS device stabilizers in a multi-machine power system for enhancing dynamic performance," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 473-479, May 1998.
- [16] X. Lei, E. N. Lerch, and D. Povh, "Optimization and coordination of damping controls for improving system dynamic performance," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 3, pp. 473-480, Aug. 2001.
- [17] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, the EPRI Power System Engineering Series Ed. New York: McGraw-Hill, 1994.



شکل پ-۱: شمای مداری مدل تک‌ماشینی به شین بی‌نیهایت.

جدول پ-۱: نتایج به دست آمده از روش مونت کارلو و PCM.

روش	واریانس	امید ریاضی	انحراف معیار
PCM	۰.۰۰۰۷	۰.۵۳۱	۰.۰۲۷۵
مدل واقعی	۰.۰۰۰۰۶	۰.۵۳۱	۰.۰۲۶۲

پیوست

الف) مثال تک‌ماشینی به شین بی‌نیهایت با روش PCM

مدل سیستم تک‌ماشینی به شین بی‌نیهایت در شکل پ-۱ نشان داده شده و معادله حاکم بر آن به صورت زیر است [۱۹]

$$\frac{\tau H}{\omega_r} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P \quad (1-P)$$

در این حالت H ثابت اینرسی ژنراتور، ω_r مرجع سرعت زاویه‌ای سیستم، δ زاویه داخلی ژنراتور، P_m توان مکانیکی ورودی به ژنراتور و P توان الکتریکی خروجی ژنراتور می‌باشد.

به این ترتیب می‌توان معادله دیفرانسیل غیر خطی درجه دو را برای توصیف سیستم به شکل زیر به دست آورد

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{377}{10} (P_m - 5.74 \sin \delta) \quad (2-P)$$

برای توضیح این مسأله، توان مکانیکی ورودی به ژنراتور در زمان صفر را از یک پریونیت افزایش داده و فرض شده که بازه زمانی که توان مکانیکی ژنراتور به مقدار یک پریونیت باز می‌گردد، نامعلوم است. به عبارت دیگر توان مکانیکی ورودی یک پالس می‌باشد که بازه زمانی آن نامعلوم است.

مدت زمان τ به عنوان پارامتر نامعلوم با تابع چگالی احتمال زیر توصیف می‌شود

$$f_\tau(\tau) = 0.783e^{-\tau} \quad \text{for } 0.1 \leq \tau \leq 0.2 \quad (3-P)$$

در هر نقطه‌ای خارج از این محدوده، تابع چگالی احتمال برابر با صفر می‌باشد و مقدار حداکثر زاویه داخلی ژنراتور در حین شبیه‌سازی به عنوان خروجی مطلوب g انتخاب شده است. چندجمله‌ای‌های متعامد بر اساس f_τ به شکل زیر می‌باشد

$$h_1(\tau) = 1 \quad (4-P)$$

$$h_2(\tau) = 42.3(\tau - 0.1719) \quad (5-P)$$

$$h_3(\tau) = 16.9(\tau^2 - 0.32\tau + 0.25) \quad (6-P)$$

با استفاده از ریشه‌های $h_i(\tau)$ مدل خطی PCM به شکل زیر محاسبه می‌شود

$$\tilde{g}(\tau) = 0.275h_1(\tau) + 0.53h_2(\tau) = 1.165\tau + 0.3308 \quad (7-P)$$

ممان‌های محاسبه‌شده برای روش PCM و مدل واقعی در جدول پ-۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که تقریب مناسبی توسط روش

هادی احمدی در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را در گرایش قدرت از دانشگاه زنجان و در سال ۱۳۹۱ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت خود را از دانشگاه تربیت مدرس تهران دریافت نمود. نامبرده از سال ۱۳۹۲ مشغول به تحصیل در مقطع دکتری مهندسی برق- قدرت در دانشگاه علم و صنعت ایران می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان شامل پایداری سیستم قدرت، بهره‌برداری سیستم قدرت، دینامیک سیستم‌های قدرت و عدم قطعیت در سیستم قدرت می‌باشد.

حسین سیفی در سال ۱۳۵۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شیراز و در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۶۸ مدارک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق خود را از دانشگاه یومیسست منچستر در کشور انگلستان دریافت نمود. ایشان از سال ۱۳۶۸ تاکنون به‌عنوان مدرس و هیأت علمی در دانشگاه تربیت مدرس به کار مشغول بوده و هم‌اکنون دارای جایگاه استاد تمام می‌باشد. ایشان در این سال‌ها علاوه بر انجام تحقیقات علمی دارای سوابق و مسئولیت‌هایی از جمله رئیس دانشکده مهندسی و معاون پژوهشی دانشگاه بوده‌اند و هم‌اکنون رئیس مرکز ملی مطالعات و برنامه‌ریزی شبکه‌های قدرت می‌باشند. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان موضوعات برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت، بازار برق و دینامیک سیستم‌های قدرت است.

- [18] J. R. Hockenberry, *Evaluation of Uncertainty in Dynamic, Reduced-Order Power System Models*, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [19] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, IEEE Press, Piscataway, NJ, 1994.
- [20] P. Sauer and M. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1998.
- [21] Y. L. Abdel-Magid and M. A. Abido, "Optimal multi-objective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms," *IEEE Trans. Power System*, vol. 18, no. 3, pp. 1125-1132, Aug. 2003.
- [22] C. Y. Chung, L. Wang, F. Howell, and P. Kundur, "Generation rescheduling methods to improve power transfer capability constrained by small signal stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 534-530, Feb. 2004.
- [23] D. Yang and V. Ajjarapu, "Critical eigenvalues tracing for power system analysis via continuation of invariant subspaces and projected Arnoldi method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 324-332, Feb. 2007.
- [24] K. A. Nigim and P. Parker, "Heuristic and probabilistic wind power availability estimation procedures: improved tools for technology and site selection," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 4, pp. 638-648, Apr. 2007.

[۲۵] ه احمدی، بهبود پایداری سیگنال کوچک سیستم با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید مزارع بادی با ظرفیت بالا با تنظیم هماهنگ PSS و TCSC، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۱.

Archive of SID