



## تنظیم هماهنگ PSS ها و TCSC با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید مزرعه بادی

محمد هادی توفیقی<sup>1</sup>، احسان بیات<sup>2</sup>، نادر مرتضوی<sup>3</sup>

<sup>1</sup> کارشناسی ارشد برق قدرت، دانشگاه آزاد علوم تحقیقات تهران  
m.hadi.tofighi@gmail.com

<sup>2</sup> کارشناسی ارشد برق قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان  
ehsanbayat1990@gmail.com

<sup>3</sup> کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشکده فنی و برق دانشگاه آزاد لاهیجان  
n.mortzavi@gmail.com

### چکیده

با کاهش منابع سوخت های فسیلی و افزایش آلودگی محیط زیست، استفاده از انرژی های 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 تامین بخشی از توان سیستم کاملاً مساعد می باشد. اما توان تولیدی مزرعه بادی وابسته به سرعت باد بوده و این عدم قطعیت در تولید موجب افزایش نگرانی ها در مورد اتصال این منابع به سیستم و بهره برداری از آنها شده است. از این رو در این مقاله تنظیم هماهنگ PSS ها و TCSC با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید مزرعه بادی با استفاده از روش PCM ارائه شده است. روش PCM بر پایه چند جمله ای های متعامد استوار می باشد که یک مدل خطی از خروجی مطلوب فراهم می آورد. با تغییر مداوم نقطه کار ناشی از تغییرات توان خروجی مزرعه بادی، پارامترهای تجهیزات کنترلی باید دوباره و بر اساس شرایط بهره برداری جدید تنظیم گردند. بدین منظور از الگوریتم ژنتیک و مدل های تقریبی به دست آمده برای توابع چگالی احتمال مقادیر ویژه بحرانی از روش PCM استفاده شده است. به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، از سیستم 4 ماشین 14 شینه IEEE استفاده شده است.

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، عدم قطعیت، مزرعه بادی، PSS، TCSC

### 1. مقدمه

مدل سازی و تحلیل سیستم های بزرگ، غیر خطی و پویایی مانند سیستم های قدرت همواره با چالش های زیادی روبه رو بوده است. روش های زیادی برای کاهش سختی های ناشی از پیچیدگی، اندازه مدل یک سیستم قدرت واقعی و عدم قطعیت های موجود در سیستم ارائه شده است ولی عدم قطعیت در مدل یک سیستم قدرت ناشی از عوامل خاصی است که در تمام سیستم های دینامیکی بزرگ مطرح نیست. برای مثال می توان به عدم قطعیت ناشی از تولید، عدم قطعیت ناشی از بار و عدم قطعیت ناشی از بهره برداری اشاره کرد. با وجود خاص بودن عدم قطعیت ها در سیستم قدرت، می توان 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. 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 ویژه ای در تأمین توان یافته اند. اگر سطح نفوذ مزارع بادی کم باشد، تأثیر ژنراتورهای توربین های بادی در پایداری سیستم قدرت قابل ملاحظه نخواهد بود (Kling, 2003). از سوی دیگر، زمانی که سطح نفوذ مزارع بادی نسبتاً زیاد بوده و این منابع انرژی جایگزین نیروگاه های معمول شوند، عملکرد سیستم قدرت تحت تأثیر قرار خواهد گرفت (Gallardo, 2007). در حقیقت، خصوصیات دینامیکی سیستم قدرت بر اساس خصوصیات و تعامل بین ژنراتورهای متصل به شبکه مشخص می گردد. اگر توربین های بادی به تدریج جایگزین ژنراتورهای مرسوم شوند، آن گاه بهره برداری و کنترل سیستم قدرت از جنبه های متفاوتی مانند حفاظت، کنترل فرکانس، پایداری گذرا و پایداری سیگنال کوچک می تواند تحت تأثیر قرار گیرد (Kling, 2003) و (Chen, 2005). با افزایش میزان استفاده از این منابع، چالش های زیادی در مورد نحوه بهره برداری 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 پیش بینی رفتار باد در یک ناحیه دشوار بوده و حتی در صورت استفاده از اطلاعات گذشته نمی توان پیش بینی دقیقی برای سرعت باد در هر ساعت انجام داد. در چنین شرایطی که توان تولیدی مزرعه بادی به طور پیوسته در حال تغییر است، مدل سازی آن به صورت سرعت ثابت با یک توان خروجی ثابت، صحیح نبوده و موجب ایجاد خطای زیادی در شبیه سازی ها خواهد شد. از این رو باید با استفاده از روش های 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 می رسد روش مونت کارلو است (Billinton, 1984). اما این روش تحلیل برای یک سیستم قدرت با عدم قطعیت های متفاوت، نیازمند هزاران تکرار از شبیه سازی ها خواهد بود. روش های موجود برای کاهش مرتبه سیستم، به سادگی قادر به افزایش سرعت هزاران شبیه سازی به طور عملی نیستند. برخی از روش های پیچیده تحلیل مونت کارلو، قادر به کاهش تعداد شبیه سازی های مورد نیاز است اما این کاهش نیز تا حد مشخصی امکان پذیر خواهد بود، زیرا به ازای هر حالت باید یک شبیه سازی اجرا گردد و نمی توان از شبیه سازی یکسانی برای یافتن نتایج برای چندین حالت استفاده کرد. مطالعاتی در زمینه تحلیل پایداری سیگنال کوچک با در نظر گرفتن عدم قطعیت های موجود در سیستم صورت گرفته است. در (J. L. Rueda, 2009) پایداری سیگنال کوچک سیستم با در نظر گرفتن عدم قطعیت توأم تولید و تقاضا و به کمک روش مونت کارلو و در (L. Meiyang, 2009) تأثیر عدم قطعیت بار بر پایداری سیگنال کوچک با روش مونت کارلو تحلیل شده است. از طرفی دیگر در (C. Wang, 2010) 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 مدل سازی عدم قطعیت در سیستم قدرت در (J. Liang, 2012) انجام شده است.

راه حل پیشنهادی مبتنی بر یک تکنیک نسبتاً جدید می باشد که بر پایه مدل چند جمله ای که رابطه بین پارامتر دارای عدم قطعیت و خروجی مطلوب را می سازد، استوار است. روش  $PCM^1$  نتایج دقیقی را برای خروجی های مطلوب با استفاده از تعداد کمی از شبیه سازی ها تولید می کند. مقدمات این روش در (Tatang, 1995) ارائه و سپس در (Webster, 1996) ایده اصلی آن گسترش داده شد و علاوه بر این به طور مفصل در (Lesieutre, 2004) مورد مطالعه قرار گرفته است.

سیستم قدرت یک سیستم پویا بوده که خصوصیات دینامیکی آن مدام در حال تغییر می باشد. 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 کنترل کننده سیستم قدرت به طور هماهنگ انجام شده است. در (مهر، 1395) ترکیب  $PSS^2$  فازی

<sup>1</sup> - Probabilistic Collocation Method

<sup>2</sup> - Power System Stabilizer

بهینه شده با TLBO<sup>3</sup> و کنترل کننده TCSC<sup>4</sup> H<sub>∞</sub> برای کاهش نوسانات سیگنال کوچک در محدوده ای گسترده استفاده شده است و نیز در (Erlich, 2005) از روند تنظیم بر پایه بهینه سازی غیر خطی برای حداقل کردن اثر متقابل میان ادوات FACTS<sup>5</sup> و PSS استفاده شده است. در (دلوری, 1393) تنظیم بهینه پایدار کننده سیستم قدرت با استفاده از روش بهینه سازی مبتنی بر تدریس یادگیری استفاده شده است. در (Ehsan BAYAT, 2015) مقایسه روش های مختلف برای تنظیم پایدار کننده سیستم قدرت ارائه شده است. و در (Ehsan BAYAT H. D., 2015) ارزیابی عملکرد پایدار کننده های سیستم قدرت با استفاده از بهینه سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری در یک سیستم چند ماشینه مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله، روشی احتمالاتی بر پایه الگوریتم ژنتیک به منظور تنظیم هماهنگ تجهیزات کنترلی استفاده شده است.

## 2. تحلیل عدم قطعیت به روش PCM

تحلیل عدم قطعیت وابسته به مطالعه توابعی به شکل زیر است (Hockenberry, 2000)

$$v = h(z) \quad (1)$$

که  $h$  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 می باشد. هدف تحلیل عدم قطعیت، مشخص کردن عدم قطعیت در پارامترهای  $v$  است که ناشی از عدم قطعیت در پارامترهای  $z$  است. در عمل  $h$  می تواند مجموعه ای از توابع پیچیده (برای مثال معادلات دینامیکی سیستم قدرت) و بردارهای  $z$  و  $v$  می توانند شامل تعداد زیادی از پارامترها باشند (Hockenberry, 2000). 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 مرسوم ترین روش به منظور تحلیل عدم قطعیت در سیستم قدرت روش مونت کارلو می باشد که به دلایل ذکر شده، استفاده از آن روش با مشکلاتی همراه خواهد بود. بنابراین در این مقاله از روش PCM به منظور مدل سازی عدم قطعیت ناشی از تولید مزرعه بادی استفاده شده است.

روش PCM یک روش مدل سازی چند جمله ای می باشد. خروجی مطلوب به صورت چندجمله ای از پارامتر نامعلوم سیستم، توصیف می شود. بعد از این که این مدل مشخص شد، روش مونت کارلو را می توان به مدل چند جمله ای اعمال کرد. مشکل روش مونت کارلو این است که یافتن هر مدل تقریبی از نقطه نظر محاسباتی و زمانی هزینه بر می باشد زیرا این روش، شبیه سازی های مجزایی برای سیستم ارائه می دهد.

## 3. کلیات روش پیشنهادی

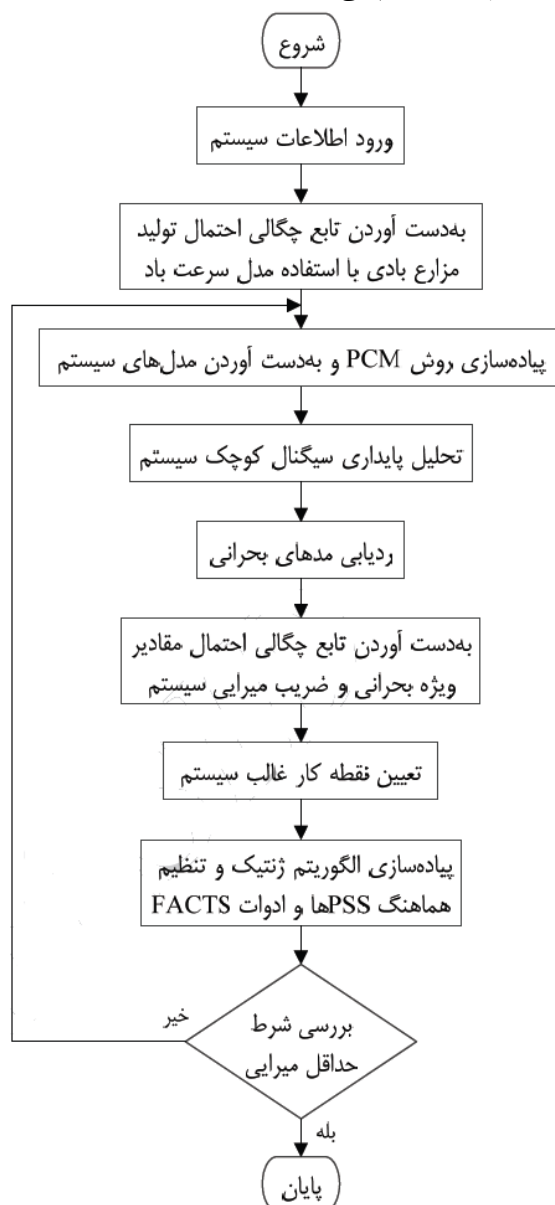
برای انجام شبیه سازی در گام نخست باید ابعاد مختلف سیستم شناسایی شده و نقاط ضعف و قوت دینامیکی سیستم مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. از این رو بعد از شناسایی و ارزش دهی شرایط اولیه سیستم، یک بار پایداری سیگنال کوچک سیستم بدون در نظر گرفتن مزارع بادی بررسی شده و نقاط ضعف سیستم و خصوصیات دینامیکی آن به دست می آید و در مرحله بعد، مزارع بادی نیز در سیستم در نظر گرفته می شوند. 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 تاثیر عدم قطعیت آنها بر سیستم شبیه سازی کرد. بدین منظور به کمک روش PCM یک تقریب چندجمله ای خطی از مقادیر ویژه بحرانی و ضریب میرایی سیستم به منظور مدل سازی تاثیر عدم قطعیت در تولید مزارع بادی بر پایداری سیگنال کوچک سیستم به دست آورده می شود. شایان ذکر است در تحلیل پایداری سیگنال کوچک، تمام مقادیر ویژه مورد بررسی قرار نگرفته و فقط مقادیر ویژه بحرانی بررسی می شوند. اکنون که تاثیر عدم قطعیت تولید در مزارع بادی بر روی مقادیر ویژه سیستم به دست آمد، سعی می شود که پایداری

<sup>3</sup> - Teaching-Learning Based Optimization

<sup>4</sup> - Thyristor Controlled Series Compensator

<sup>5</sup> - Flexible AC Transmission System

سیگنال کوچک سیستم بهبود داده شود. اما نکته ای 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 بهینه سازی که تابع هدف آن حداکثرسازی میرایی نوسانات سیستم می باشد، تنظیم می گردند. برای حل مسأله بهینه سازی فوق از الگوریتم ژنتیک استفاده شده و روند ارائه شده در شکل 1 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 می باشند، در بخش بعدی آورده شده است.



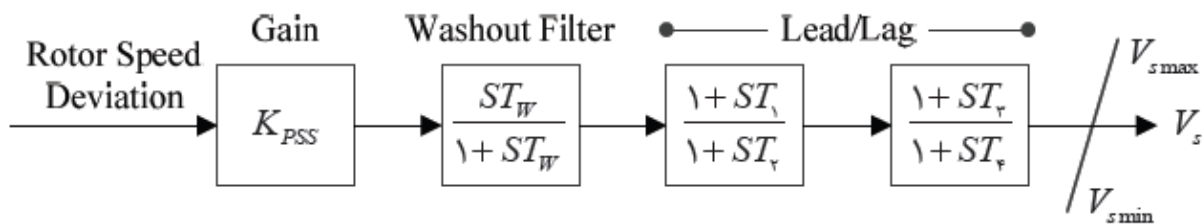
شکل 1: نمودار الگوریتم پیشنهادی

#### 4. جزئیات روش پیشنهادی

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

#### 4-1. مدل پایدارساز سیستم قدرت

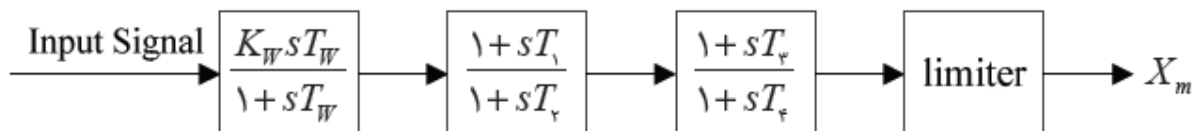
PSS یک بلوک کنترلی اضافی می باشد که به منظور بهبود پایداری به سیستم اضافه می گردد (Pai, 1998). در حقیقت این بلوک به AVR<sup>6</sup> افزوده شده و از سیگنال های پایدارساز فیدبک مانند سرعت محور، فرکانس پایانه و یا توان به منظور تغییر سیگنال ورودی به AVR استفاده می کند. همان طور که در شکل 2 دیده می شود، هر PSS از سه بلوک دیگرام ساخته شده است. بلوک اول، بلوک بهره پایدارساز با بهره ثابت  $K_{PSS}$  و ثابت های زمانی  $T_i$  می باشد که میزان میرایی را مشخص می کند، بلوک دوم، فیلتر پاک ساز بوده که به عنوان یک فیلتر بالاگذر عمل می کند و بلوک آخر، جبران ساز فاز، میزان پیش فاز مطلوب به منظور جبران پس فاز ایجاد شده بین ورودی AVR و گشتاور الکتریکی ژنراتور را تأمین می کند. در عمل، دو یا تعداد بیشتری از بلوک های مرتبه اول به منظور تأمین پس فاز مطلوب استفاده می شود.



شکل 2: تابع تبدیل مدل PSS

#### 2-4. مدل TCSC

TCSC یکی از انواع مهم ادوات FACTS است که امکان تغییر امپدانس مشخصه ظاهری خطوط انتقال را به گونه ای فراهم می کند که شارش توان از مسیر قراردادی صورت گیرد. ساختار TCSC در شکل 3 نشان داده شده (Abido, 2003) که شامل یک فیلتر پاک ساز با بهره ثابت  $K_W$ ، یک جبرانگر دینامیکی و یک محدودکننده می باشد. فیلتر پاک ساز به منظور جلوگیری از پاسخ کنترل کننده به بخش dc سیگنال ورودی استفاده می شود. جبرانگر دینامیکی شامل دو (یا بیشتر) بلوک پیش فاز- پس فاز به منظور تأمین ویژگی های پس فاز-پیش فاز ضروری سیستم می باشد و در نهایت از محدودکننده به منظور بهبود پاسخ کنترل کننده به اغتشاشات بزرگ در سیگنال ورودی استفاده می شود.



شکل 3: تابع تبدیل TCSC

#### 3-4. تنظیم هماهنگ PSS ها و ادوات FACTS

روش های طراحی معمول مانند روند حل مجزا یا پیوسته سری، به طور دقیق نمی تواند تعامل بین کنترل کننده ها را در نظر بگیرد. در حالی که تنظیم هماهنگ می تواند تعامل معکوسی را که ممکن است این ادوات کنترلی بر عملکرد یکدیگر داشته باشند، کاهش دهد. تابع هدف تنظیم هم زمان پارامترها به طور کلی بهینه سازی عملکرد میرایی سیستم است و این امر نیازمند بهینه سازی هماهنگ پارامترهای TCSC و PSS ها به منظور حداکثرسازی میرایی تمام مدهای نوسانی می باشد. بدین منظور، تابع هدف به شکل مجموعی از ضرایب میرایی شرایط کار مختلف طبق معادله (2) تعریف می شود. مجموعه قیود شامل محدوده پارامترها به همراه شرایط بهره برداری برای یک حداقل ضریب میرایی مشخص می باشد. بنابراین مسأله طراحی را می توان به شکل زیر فرمول بندی کرد (C. Y. Chung, 2004).

$$\max F = \sum_{j=1}^n \zeta_j \quad (2)$$

<sup>6</sup> - Automatic Voltage Regulator

که  $\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}}$  ضریب میرایی و  $n$  تعداد کل مقادیر ویژه بحرانی است که شامل مدهای بین ناحیه ای،

محلی، تحریک کننده و مدهای مربوط به سایر کنترل کننده ها می باشد. از میان مقادیر ویژه غالب، فقط آنهایی که ضریب میرایی کمتر از 0.05 دارند در روند بهینه سازی در نظر گرفته می شوند. هدف از بهینه سازی، انتقال تمام مقادیر ویژه در نظر گرفته شده به سمت چپ محور موهومی و در نتیجه حداکثرسازی ضریب میرایی تا حد امکان می باشد. قیود مسأله به شکل زیر خواهند بود (Erlich, 2005) و (Kundur, 1994).

$$\begin{aligned} K_{ii_{\min}} \leq K_{ji} \leq K_{ii_{\max}} \\ \zeta_{\min} \leq (\zeta_i)_i \end{aligned} \quad (3)$$

مسأله مطرح شده در معادلات (2) و (3)، یک مسأله بهینه سازی پیچیده با یک تابع هدف ضمنی است که به ارزیابی مقادیر ویژه یک ماتریس بزرگ وابسته می باشد و حل این مسأله با استفاده از روش های معمول بسیار مشکل است. در این مقاله برای تنظیم TCSC و PSS ها به طور هماهنگ از روش الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. علاوه بر این، به منظور مقابله با خاصیت غیر خطی سیستم قدرت، محدوده خاصی از شرایط بهره برداری سیستم برای بررسی عملکرد تنظیمات به دست آمده از بهینه سازی، به کمک شبیه سازی زمانی مطالعه می گردند.

#### 4-4. ردیابی مدهای بحرانی

تحت شرایط متعدد بهره برداری تصادفی، ضروری است مدها به صورت پیوسته ردیابی شوند. بنابراین، حصول اطمینان از شرکت مدهای بحرانی در دینامیک زاویه روتور ژنراتور در طی شرایط بهره برداری مختلف ضروری به نظر می رسد. از این رو محاسبات ردیابی مدهای بحرانی می تواند از ایجاد ناهماهنگی در تحلیل احتمالاتی مقادیر ویژه جلوگیری کند و به همین خاطر یک بار در شرایط بهره برداری پایه، مقادیر ویژه بحرانی سیستم و بردار ویژه راست آن محاسبه می گردد. سپس به ازای هر توان خروجی مزرعه بادی که موجب یک نقطه کار جدید می شود، یک بار تحلیل پایداری سیگنال کوچک انجام شده و مقادیر ویژه بحرانی و بردار ویژه راست آنها به دست می آید (Ajjarapu, 2007). در محاسبات ردیابی مدهای بحرانی، مدهایی که بر اساس حالت پایه و مدهایی که بر اساس شرایط بهره برداری متفاوت محاسبه شده اند، در صورتی با یکدیگر یکسان بوده و نوع آنها یکسان است که (1) مکان مقادیر غالب بردار ویژه راست در هر دو حالت یکسان باشد و (2) نرم مرتبه 2 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 می دهد.

#### 4-5. 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 بهره برداری قرار می گیرند. 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 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 معادله (4) می توان تابع چگالی احتمال ضریب میرایی به ازای هر کدام از مقادیر ویژه را به دست آورد. معادله (4) اصلاح شده معادله (2) معرفی شده در بخش 3-4 برای محاسبه ضریب میرایی می باشد.

$$\zeta_{\text{eig}-i}(P) = \frac{-\text{real}(\hat{Y}_{\text{eig}-i}(P))}{\sqrt{\text{real}(\hat{Y}_{\text{eig}-i}(P))^2 + \text{img}(\hat{Y}_{\text{eig}-i}(P))^2}} \quad (4)$$

با محاسبه میانگین و انحراف معیار توابع چگالی احتمال، به منظور دست یابی به توان با احتمال وقوع بالا، یک ضریب وزنی مطابق معادله (5) تعریف می شود. طبق معادله (5)،  $\alpha_i$  نسبت ضریب میرایی تابع چگالی احتمال مقدار ویژه  $\lambda_i$  نسبت به

$\zeta_{\min}$ ، حداقل ضریب میرایی مجاز می باشد. در حقیقت  $\alpha_i$  نشان دهنده میزان تأثیر هر کدام از مدهای بحرانی در ناپایداری سیستم می باشد.

$$\alpha_i = \frac{|\zeta_{\text{mean}-i}|}{\zeta_{\min}} \quad (5)$$

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 می گردد، محاسبه می شود. بنابراین  $N$  توان به دست می آید که این توان ها 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 می باشد، بنابراین به کمک معادله (6) توان خروجی مزرعه بادی که بالاترین احتمال وقوع در کل سیستم را دارد، محاسبه می شود.

$$P_{\text{wind-mp}} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot P_{\text{mean}-i}}{N} \quad (6)$$

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

#### 4-6. مدل سازی سرعت باد و توان خروجی مزرعه بادی

مطالعات نشان می دهند که به طور معمول سرعت باد از توزیع ویبال تبعیت می کند (C. Wang, 2010) و معادله (7) توزیع ویبال را که یک توزیع تجمعی می باشد، نشان می دهد.  $k$ ، پارامتر شکل،  $c$ ، پارامتر اندازه توزیع و  $x$  معرف سرعت و  $y$  خروجی مطلوب است.

$$y = f(x|c, k) = kc^{-k}x^{k-1} \exp\left(-\frac{x}{c}\right)^k \quad (7)$$

برای مدل سازی ژنراتورهای توربین های بادی مزرعه بادی از مدل DFIG معرفی شده در (L. Meiyuan, 2009) استفاده شده است. رابطه بین سرعت باد و توان مکانیکی خروجی در معادله (8) آورده شده است.

$$P_{m-\text{wind}} = \begin{cases} 0 & V_w \leq V_{\text{cut-in}} \\ 0.5\rho A_{wt} C_p(\beta, \lambda) V_w^3 & V_{\text{cut-in}} \leq V_w \leq V_{\text{rated}} \\ P_r & V_{\text{rated}} \leq V_w \leq V_{\text{cut-out}} \\ 0 & V_w \geq V_{\text{cut-out}} \end{cases} \quad (8)$$

که در آن  $P_m$  توان مکانیکی به دست آمده از باد،  $\rho$  چگالی هوا،  $C_p$  ضریب بازدهی توربین،  $\lambda$  ضریب سرعت  $A_{wt} = \pi R^2$ ، فضای که روتور توربین بادی پوشش می دهد،  $R$  شعاع روتور  $V_w$  سرعت باد و  $\beta$  زاویه پیچشی پره می باشد.  $V_{\text{cut-in}}$  سرعتی است که توربین شروع به تولید توان می کند،  $V_{\text{cut-out}}$  سرعتی است که توربین تولید توان را متوقف می کند و  $V_{\text{rated}}$  سرعتی است که به ازای آن، توان مکانیکی خروجی توربین بادی برابر با مقدار نامی خود،  $P_r = 0.5\rho A_{wt} C_p(\beta, \lambda) V_{\text{rated}}^3$  می باشد. بعد از یافتن توان خروجی یک ژنراتور توربین بادی می توان توان خروجی مزرعه بادی را به کمک معادله (9) به دست آورد.

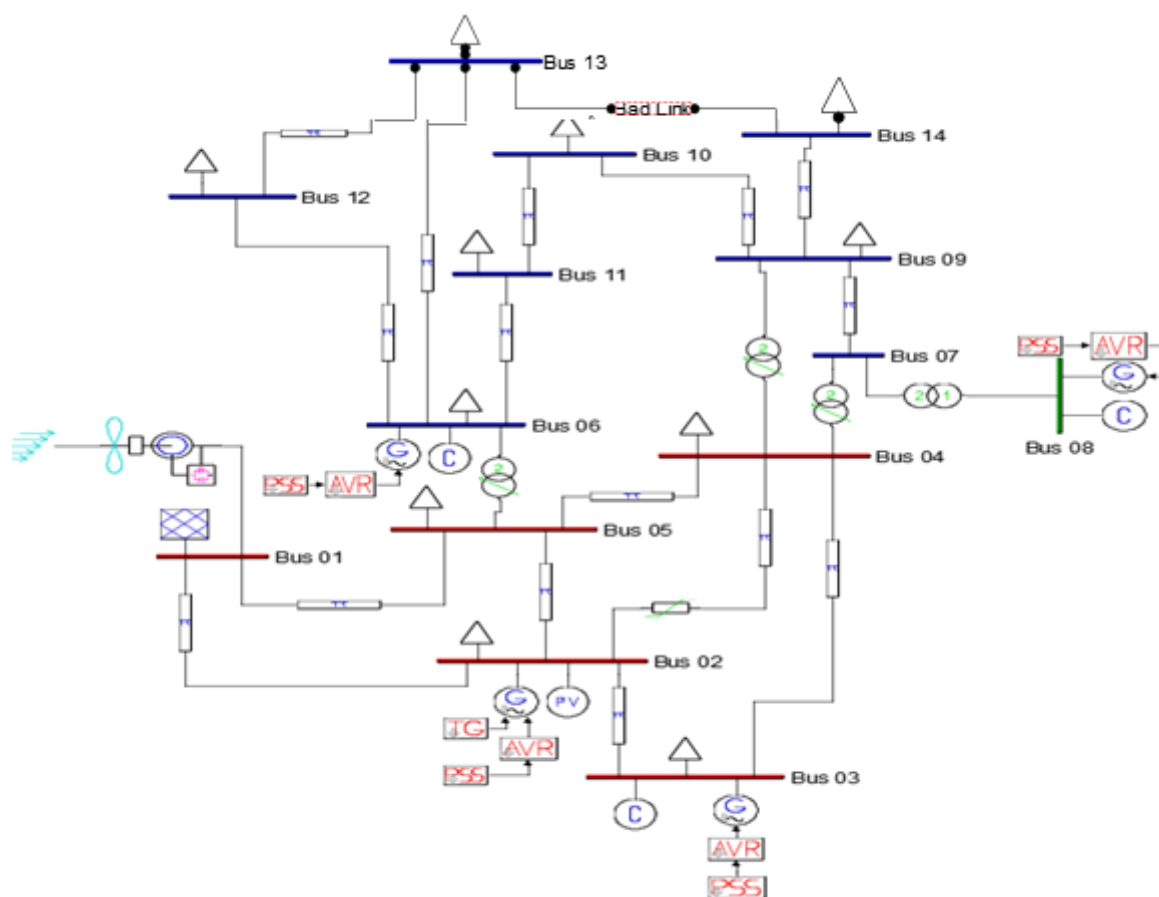
$$P_{WF} = f_{we} N_{WT} P_{WT} \quad (9)$$

$P_{WF}$  توان اکتیو مزرعه بادی،  $N_{WT}$  تعداد توربین های بادی مزرعه و  $f_{we}$  ضریب تضعیف می باشد. در یک مزرعه بادی که تعداد زیادی توربین وجود دارد، باد با یک سرعت یکسان به تمام توربین های برخورد نمی کند و قطعا توربین هایی که در

ابتدای مسیر باد قرار دارند، سرعت بیشتری را نسبت به توربین های انتهای مزرعه دریافت خواهند کرد. از این رو از ضریب  $f_{we}$  به منظور لحاظ کردن اثر این مسأله استفاده می شود (L. Meiyuan, 2009).

### 5. شبیه سازی و مطالعات عددی

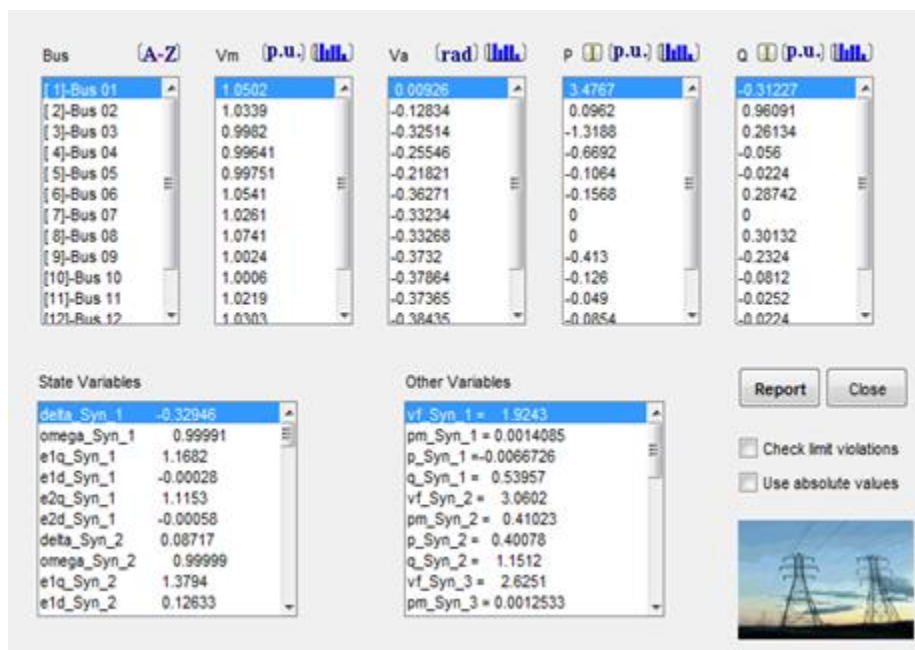
به منظور نشان دادن کارایی، روش پیشنهادی بر روی سیستم 4 ماشینه 14 شینه IEEE پیاده سازی شده است. شکل 4 نشان دهنده سیستم 4 ماشینه 14 شینه در محیط برنامه MATLAB می باشد. در باس شماره یک توربین بادی دیفیگ با توزیع بادی از نوع ویبال در نظر گرفته شده و در خطوط بین باس دو و باس چهار یک جبران ساز TCSC قرار داده شده است.



شکل 4: سیستم 4 ماشینه 14 شینه

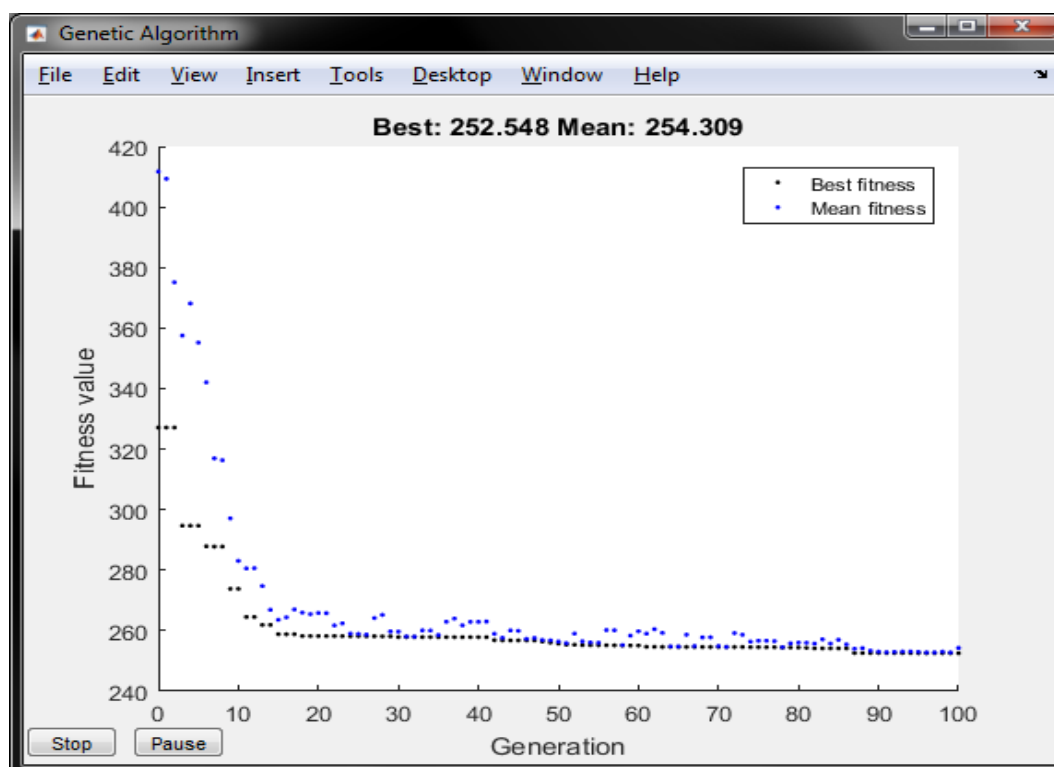
طبق معادله (9) و با ضریب تضعیف 0.8 توان کل مزرعه بادی برابر با 384 مگاوات بوده و ظرفیت کل سیستم 4721 مگاوات است. و در حالت عادی نقطه کار حاصل سیستم از پخش بار و توان و ولتاژ و زاویه باس ها بصورت آورده شده در شکل 5 است.





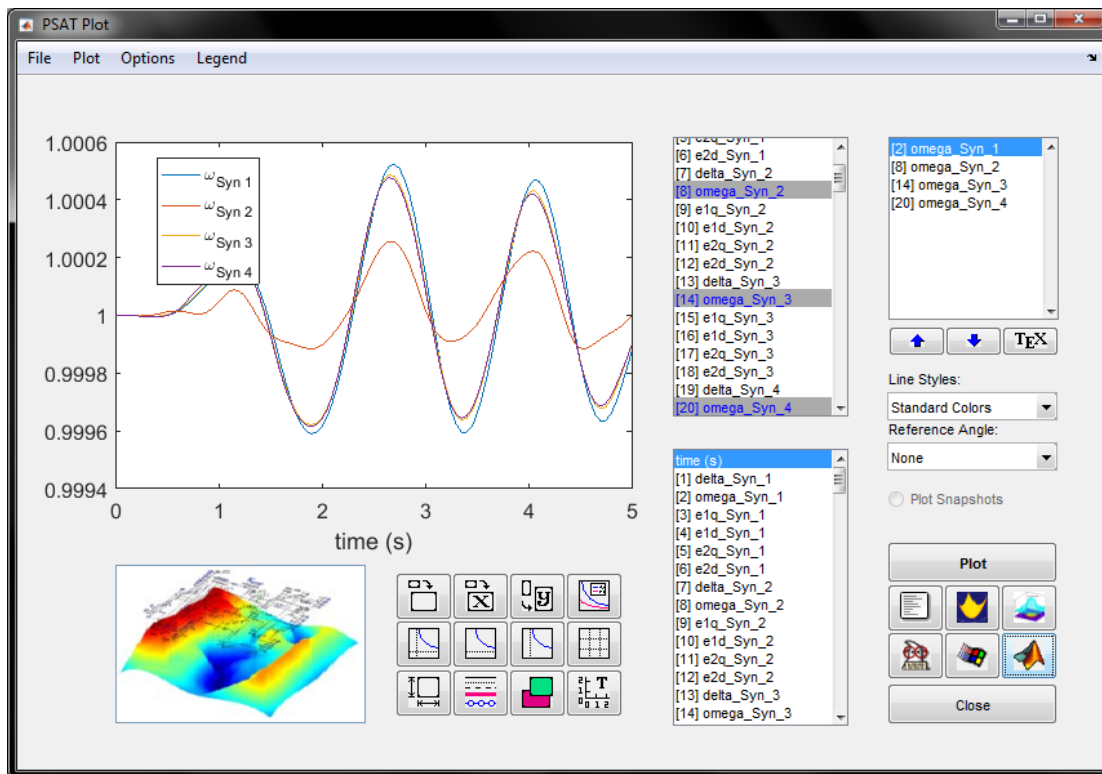
شکل 5: توان و ولتاژ و زاویه باس ها در حالت عادی

حال با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید مزارع بادی طبق فلوجارت پیشنهادی ارائه شده در بخش 3 لازم است مدهای بحرانی در مقادیر ویژه را تشخیص داده و سپس تنظیمات پایدار ساز PSS و TCSC را با الگوریتم ژنتیک در جهت پایداری بهتر بهینه کرد، که 32 پارامتر در شبکه 4 ماشینه بایستی بهینه شوند. نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک بصورت شکل 6 است.



شکل 6: نمودار همگرایی الگوریتم ژنتیک

پس از بهینه سازی پارامترها نمودار تغییرات سرعت ژنراتورها به صورت شکل 7 می باشد.



شکل 7: نمودار تغییرات سرعت ژنراتورها

می توان بردار PCM را برای 5 مقدار ویژه بحرانی به همراه مقدار واریانس و انحراف معیار و بردار ضرایب  $Y_p$  برای مرتبه دلخواه PCM نمایش داد. برای مثال برای  $n_{PCM}=2$  نتایج بصورت شکل 8 است.

$Y_p =$

Columns 1 through 2

```
-1.8646e-05 - 8.8132e-07i    0.014738 + 0.00074316i
-1.7283e-06 - 7.1314e-08i    0.0012657 - 4.6054e-05i
1.7081e-05 + 3.7472e-05i    -0.015015 - 0.032156i
-8.5307e-06 - 8.7666e-06i    0.0082869 + 0.011378i
-1.6349e-05 - 3.2088e-05i    0.01189 + 0.025742i
```

Column 3

```
-3.1443 - 0.11499i
-1.1471 + 0.054087i
2.2755 + 6.8557i
-2.6395 - 2.4198i
-2.796 - 3.8442i
```

normc =

```
0.10201    0.0017184    0.28167    0.24136    0.41501
```

stdx =

```
0.13039    0.016923    0.21667    0.20057    0.263
```

varx =

```
0.017002    0.0002864    0.046945    0.040227    0.069168
```

شکل 8: 5 مقدار ویژه بحرانی به همراه مقدار واریانس و انحراف معیار و بردار ضرایب  $Y_p$

## 6. نتیجه گیری

در این مقاله روشی احتمالاتی بر پایه روش PCM و چند جمله ای های خطی در حضور مزرعه بادی و در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید مزرعه بادی ارائه شد. روش پیشنهادی قابلیت تعیین وضعیت پایداری سیستم به ازای توان های خروجی مختلف مزرعه بادی را دارد و تأثیر عدم قطعیت ناشی از توان خروجی مزرعه بادی را به صورت توابع چگالی احتمال خطی مدل سازی می کند. به منظور بهبود عملکرد دینامیکی سیستم، روشی بر پایه توابع چگالی احتمال و تعیین نقطه کار غالب به منظور تنظیم هماهنگ PSS ها و TCSC ارائه شد. نتایج شبیه سازی کارایی و مناسب بودن روش پیشنهادی را نشان می دهند.

## 7. مراجع

1. Abido, Y. L.-M. (2003). Optimal multi-objective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms. *IEEE Trans. Power System*, 1125-1132.
2. Ajjarapu, D. Y. (2007). Critical eigenvalues tracing for power system analysis via continuation of invariant subspaces and projected Arnoldi method. *IEEE Trans. Power Syst*, 324-332.
3. Billinton, R. (1984). *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*. Plenum Press.
4. C. Wang, e. a. (2010). Modeling analysis in power system small signal stability considering uncertainty of wind generation. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 25-29.
5. C. Y. Chung, L. W. (2004). Generation rescheduling methods to improve power transfer capability constrained by small signal stability. *IEEE Trans. Power Syst*, 530-534.
6. Chen, Z. (2005). Issues of connecting wind farms power systems. *IEEE Conf. and Exhibition Asia and Pacific*.
7. Ehsan BAYAT, H. D. (2015). Comparison of Different Techniques For Tuning of Power System Stabilizer. *Cumhuriyet University Faculty of Science Science Journal (CSJ)*, 1-10.
8. Ehsan BAYAT, H. D. (2015). Performance Evaluation of power system stabilizers Using Teaching Learning Based Optimization of a Multi-Machine System. *Cumhuriyet University Faculty of Science*, 1-7.
9. Erlich, L. J. (2005). Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems. *IEEE Trans on Power Systems*, 294-300.
10. Gallardo, P. L. (2007). Contribution of variable-speed wind farms to damping of power system oscillations . *IEEE Power Tech*, 1-5.
11. Hockenberry, J. R. (2000). Evaluation of Uncertainty in Dynamic, Reduced Order Power System Models. *Massachusetts Institute of Technology*.
12. J. L. Rueda, D. G. (2009). Assessment and enhancement of small signal stability considering uncertainties. *IEEE Trans. Power System*, 198-207.
13. J. Liang, G. K. (2012). Wide-area measurement based dynamic stochastic optimal power flow control for smart grids with high variability and uncertainty. *IEEE Trans* , 59-69.
14. Kling, J. S. (2003). The impact of large scale wind power generation on power system oscillations. *Electric Power Systems Research*, 9-20.
15. Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. the EPRI Power System Engineering Series Ed.
16. L. Meiyuan, M. J. (2009). Uncertainties analysis of load models in small signal stability. *Conf. Sustainable Power Generation and Supply*, 6-7.
17. Lesieutre, J. R. (2004). Evaluation of uncertainty in dynamic simulations of power system models: the probabilistic collocation method . *IEEE Trans. on Power Systems*, 1483-1491.
18. Pai, P. S. (1998). *Power System Dynamics and Stability* . Prentice Hall, Upper Saddle River.

19. Tatang, M. A. (1995). Direct Incorporation of Uncertainty in Chemical and Environmental Systems. Massachusetts Institute of Technology.
20. Webster, M. (1996). Application of the probabilistic collocation method for an uncertainty analysis of a simple ocean model. joint program on the Science and Policy of Global change.
21. دلآوری، ا. ب. (1393). تنظیم بهینه پایدار کننده سیستم قدرت با استفاده از روش بهینه سازی مبتنی بر تدریس - یادگیری. نخستین همایش ملی دستاوردهای نوین در مهندسی برق، 9-1.
22. مهر، م. ه. (1395). طراحی PSS فازی بهینه شده با TLBO و کنترل کننده TCSC  $H_{\infty}$  برای کاهش نوسانات سیگنال کوچک در محدوده ای گسترده. کنفرانس بین المللی مهندسی برق، 15-1.