

پایدارساز سیستم قدرت احتمالاتی

فرید کربلایی^۱، استادیار؛ محمد طاهرخانی^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - f_karbalaei@srttu.edu

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران - m.taherkhani@srttu.edu

چکیده: یکی از روش‌های میرا کردن نوسانات فرکانس پایین، به‌کارگیری پایدارساز سیستم قدرت (PSS) می‌باشد. معمولاً تنظیم پارامترهای PSS با روش معین انجام می‌شود. در این روش تعداد محدودی از نقاط کار مختلف در نظر گرفته می‌شود. از این رو، کارایی PSS تنها محدود به همان نقاط کار می‌شود. در این مقاله طراحی PSS به‌ازای رنج وسیعی از تغییرات بار انجام می‌گردد. به این منظور، چند سطح بار مختلف در نظر گرفته می‌شود و به هر سطح بار یک احتمال اختصاص داده می‌شود. سپس برای در نظر گرفتن تغییرات بار در اطراف هر سطح، متناظر با هر سطح بار، یک توزیع احتمال نرمال برای تغییرات بار لحاظ می‌گردد. میانگین هر توزیع نرمال، برابر با مقدار سطح بار متناظر در نظر گرفته می‌شود. واریانس توزیع نیز برابر با درصدی از مقدار میانگین انتخاب می‌گردد. برای بار، دو مدل توان ثابت و امپدانس ثابت لحاظ می‌شود. برای تنظیم پارامترهای PSS، یک مسئله بهینه‌سازی تعریف می‌شود که تابع هدف آن، حداقل کردن احتمال قرار گرفتن مقادیر ویژه در نواحی نامطلوب است. مقایسه نتایج به‌کارگیری PSSهای معین و احتمالاتی در سیستم ۳۹ شینه IEEE نشان می‌دهد که PSS احتمالاتی در برابر تغییرات بار مقاوم‌تر است.

واژه‌های کلیدی: پایداری سیگنال کوچک، پایدارساز سیستم قدرت، نوسانات فرکانس پایین، معادلات فضای حالت، مونت کارلو، الگوریتم ژنتیک.

Probabilistic Power System Stabilizer

F. Karbalaei¹, Assistant Professor; M. Taherkhani², MSc Student

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, Email: f_karbalaei@srttu.edu

2- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran, Email: m.taherkhani@srttu.edu

Abstract: One of the low-frequency oscillation damping methods is to use power system stabilizer (PSS). Setting of PSS parameters is typically performed via certain (deterministic) methods, in which a limited number of different operating points are taken into account. Therefore, PSS performance is limited to the same operating points. In this paper, the design of PSS is performed for a wide range of load changes. In this regard, several different load levels are considered and one possibility is assigned to each load level. Then to consider load variation around each load level, corresponding to each level, a normal probability distribution function is considered for load changes. Mean value of each normal distribution is assumed to be equal to the corresponding value of the load level. Distribution variance is also chosen equal to the percentage of the mean value. Two models of constant power and constant impedance models are used for the loads. To set the parameters of PSS, an optimization problem is defined with the objective function of minimizing the presence probability of eigenvalues in the unsuitable areas. Comparing the results obtained by using certain and probabilistic PSS in the IEEE 39- bus test system shows that the proposed method is more robust to load variations.

Keywords: Small signal stability, power system stabilizer, low frequency oscillations, state space equations, Monte Carlo, genetic algorithm.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۱۹

نام نویسنده مسئول: فرید کربلایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - لویزان - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی، توسعه سیستم‌های قدرت را به دنبال داشته است. بهبود پایداری سیستم قدرت، امروزه به دلیل گسترش اندازه و تنوع سیستم‌های قدرت از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. ناپایداری سیگنال کوچک از مهم‌ترین مسائل سیستم قدرت می‌باشد که از چندین دهه پیش مورد توجه محققین قرار گرفته است. سیستم‌های قدرت همواره در معرض انواع اغتشاشات کوچک و بزرگ قرار دارند که نوسانات الکترومکانیکی را در این سیستم‌ها پدید می‌آورند. اگر دامنه نوسانات از حد معینی تجاوز کند ناپایداری مولد ایجاد می‌شود که این امر در یک شبکه محلی حذف تولید را به همراه خواهد داشت. همچنین در یک شبکه غربالی نیز می‌تواند باعث از دست دادن یک قسمت و یا کل شبکه شود.

تاکنون روش‌های مختلفی برای طراحی پایدارسازی سیستم قدرت ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته معین [۱۱]- [۱] و احتمالاتی [۱۴-۱۲] تقسیم کرد. در روش‌های معین، طراحی PSS با فرض معلوم بودن شرایط سیستم انجام می‌شود و پارامترها با تعریف یک مسئله بهینه‌سازی به دست می‌آیند. به عنوان مثال، تابع هدف در [۶] حداکثر نمودن نسبت میرایی و در [۷] حداقل نمودن انتگرال مربع خطا می‌باشد. در مرجع [۸] نیز تابع هدف به صورت حداقل کردن ضریب میرایی و حداکثر نمودن نسبت میرایی در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۰]، PSS برای سیستم دارای نیروگاه بادی طراحی شده است. در مرجع [۱۱] نیز پارامترهای PSS با استفاده از منطق فازی و توابع لیاپانوف محاسبه گردیده است.

در روش‌های احتمالاتی، نامعینی‌هایی برای سیستم لحاظ می‌گردد. این نامعینی‌ها می‌تواند شامل نامعینی در بار، تولید و یا در خطوط سیستم قدرت باشد. در برخی از روش‌های احتمالاتی، حساسیت میانگین و واریانس ضریب و نسبت میرایی نسبت به پارامترهای PSS محاسبه شده و از آن برای تعیین پارامترها و محل PSS استفاده می‌شود. به این صورت که دو شاخص حساسیت تعریف شده است. با استفاده از شاخص باقی‌مانده که در واقع معادل حساسیت مقدار ویژه نسبت به بهره PSS، در مقدار بهره صفر است، مکان نصب PSS مشخص می‌شود. شاخص دوم برای تعیین پارامترهای PSS استفاده می‌شود. به این ترتیب که به ازای مقادیر مختلف پارامترها، این شاخص محاسبه می‌گردد و پارامترهای مربوط به بهترین مقدار شاخص، انتخاب می‌شوند [۱۷-۱۵].

در مرجع [۱۸] تنها بار به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت، سه شرایط بارگذاری کم، متوسط و زیاد اعمال شده است. در این مرجع، تنها پایداری سیگنال کوچک بررسی شده و پارامترهای PSS تعیین نمی‌گردد اما با استفاده از یک شاخص معرفی شده، به مکان‌یابی PSS می‌پردازد.

در [۱۹] بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو، یک روش احتمالاتی برای بررسی تأثیر عدم قطعیت تولید مزرعه بادی بر پایداری سیگنال

کوچک سیستم قدرت پیشنهاد شده است. به این منظور، یک توزیع نرمال برای سطح تولید مزرعه بادی در نظر گرفته می‌شود و بر اساس آن تابع چگالی احتمال^۲ (PDF) مقادیر ویژه بحرانی تعیین می‌گردد. برای بار سه سطح کم، متوسط و زیاد در نظر گرفته شده و تابع هدفی ترکیبی برای مجموعه سطوح بار لحاظ شده است به گونه‌ای که احتمال وقوع نسبت میرایی بحرانی حداقل گردد.

آنالیز پایداری سیگنال کوچک احتمالاتی^۳ (PSSA) با توجه به تصادفی بودن مقدار باد در [۲۰] انجام شده است. به این منظور از مدل سیگنال کوچک، برای مزرعه بادی با مولد القایی دوسوتغذیه^۴ (DFIG) استفاده می‌گردد. در این مرجع، فقط به بررسی پایداری سیگنال کوچک پرداخته شده و پارامترهای PSS تعیین نمی‌شوند. در [۲۱] تولید مزرعه بادی و بار، نامعین در نظر گرفته شده و از روش فرکانس مرکزی برای یافتن پارامترهای PSS استفاده شده است.

در [۲۲] برای بارها، منحنی‌های کاری روزانه استاندارد شده اختصاص داده شده است. از این منحنی‌ها، ۴۸۰ نمونه برداشته شده و کوواریانس بار تعیین می‌شود. سپس آنالیز مقادیر ویژه احتمالاتی انجام می‌شود. در [۲۳] تنها به بررسی تعداد سیگنال‌های ورودی PSS و اثر آن بر میرایی مدهای بحرانی پرداخته است. به این ترتیب که یک سیگنال محلی^۵ که می‌تواند سرعت یا توان مولد باشد، به همراه یک سیگنال از راه دور^۶ به عنوان ورودی PSS در نظر گرفته می‌شوند. در این مرجع پارامترهای PSS محاسبه نمی‌گردد.

در روش‌های احتمالاتی فوق، یا پارامترهای بهینه PSS محاسبه نمی‌گردد و یا در صورت محاسبه، تأثیر لحاظ کردن نامعینی‌ها در مقایسه با روش‌های معین بررسی نمی‌شود. در این مقاله، پارامترهای PSS احتمالاتی با تعریف یک مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌گردد که تابع هدف آن، حداقل کردن احتمال قرار گرفتن مقادیر ویژه در نواحی نامطلوب است. همچنین پارامترهای PSS با روش معین نیز تعیین می‌شود که مقایسه آن با PSS احتمالاتی، عملکرد بهتر PSS احتمالاتی را در مواجهه با نامعینی‌های بار نشان می‌دهد.

سایر قسمت‌های مقاله به صورت زیر است:

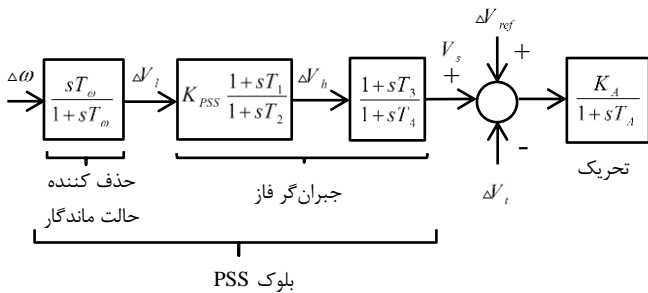
در بخش دوم نحوه محاسبه مقادیر ویژه و همچنین مدل PSS آمده است. در بخش سوم تابع هدف پیشنهادی معرفی شده است. مطالعات موردی و نتایج شبیه‌سازی در بخش چهارم آورده شده است. در نهایت نتیجه‌گیری انجام شده در بخش پنجم آمده است.

۲- شرح مسئله

۲-۱- نحوه محاسبه مقادیر ویژه [۲۴]

در این مطالعه، برای مولد مدل مرتبه ۵ در نظر گرفته شده است. معادلات سیستم شامل معادلات دیفرانسیل و جبری مولدها، معادلات توازن توان شین‌های مولدی و همچنین معادلات توازن توان شین‌های بار می‌شود. روابط (۱) تا (۴)، بیانگر فرم خطی شده این معادلات هستند.

شدن هر PSS، ۳ متغیر به متغیرهای حالت سیستم اضافه می‌گردد. نحوه تنظیم پارامترهای PSS در بخش بعد توضیح داده شده است.



شکل ۱: بلوک پایدار ساز سیستم قدرت

۳- تابع هدف پیشنهادی

در بسیاری از مقالات برای تنظیم پارامترهای PSS، از یک تابع هدف مشابه آنچه که در (۹) نشان داده شده، استفاده می‌شود [۲۶].

$$\text{Min } J = \sum_{j=1}^{np} \sum_{\sigma_{i,j} \geq \sigma_0} [\sigma_0 - \sigma_{i,j}]^2 + a \sum_{j=1}^{np} \sum_{\xi_{i,j} \geq \xi_0} [\xi_0 - \xi_{i,j}]^2 \quad (9)$$

که در آن np تعداد نقاط کار و $\sigma_{i,j}$ قسمت حقیقی i امین مقدار ویژه در j امین نقطه کار است، $\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$ بوده و $\xi_{i,j}$ نسبت میرایی i امین مقدار ویژه در j امین نقطه کار می‌باشد. a ضریب وزنی است و σ_0 و ξ_0 به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مطلوب ضریب میرایی و نسبت میرایی هستند. با توجه به این که امکان پیش‌بینی دقیق بار وجود ندارد، تغییرات بار می‌تواند نقاط کار متعددی را ایجاد کند که در نظر گرفتن تک تک آن‌ها امکان‌پذیر نیست. بر این اساس در این مقاله بارها به‌عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شوند و یک تابع هدف احتمالاتی به‌صورت رابطه (۱۰) معرفی می‌گردد:

$$\text{Min } J = P(\sigma \geq \sigma_0) + aP(\xi \leq \xi_0) \quad (10)$$

که در آن P بیانگر احتمال و a ضریب وزنی است. در بخش اول تابع هدف، حداقل کردن احتمال بیشتر شدن قسمت حقیقی مقادیر ویژه از یک مقدار مشخص مدنظر است. در بخش دوم نیز، حداقل کردن احتمال کمتر شدن نسبت میرایی مقادیر ویژه از یک مقدار مشخص منظور نظر می‌باشد.

تعیین مقادیر احتمال در رابطه (۱۰) با نمونه‌برداری از مقادیر بارها و به‌کارگیری روش مونت کارلو انجام می‌شود. به‌این‌منظور، چند سطح بار مختلف لحاظ می‌گردد و به هر سطح بار یک احتمال اختصاص داده می‌شود. سپس برای در نظر گرفتن تغییرات بار در اطراف هر سطح، متناظر با هر سطح بار، یک توزیع احتمال نرمال برای تغییرات بار لحاظ می‌گردد. میانگین هر توزیع نرمال، برابر با مقدار توان سطح بار متناظر در نظر گرفته می‌شود. واریانس توزیع نیز برابر با درصدی از مقدار میانگین انتخاب می‌گردد. به‌این‌ترتیب، بار هر شین دارای چند توزیع نرمال می‌شود که برای وقوع هر یک از توزیع‌ها نیز یک احتمال اختصاص می‌یابد. توان اکتیو تولیدی مولدها نیز متناسب با مقادیر

$$\Delta \dot{x} = A_1 \Delta x + B_1 \Delta I_g + B_2 \Delta V_g \quad (1)$$

$$0 = C_1 \Delta x + D_1 \Delta I_g + D_2 \Delta V_g \quad (2)$$

$$0 = C_2 \Delta x + D_3 \Delta I_g + D_4 \Delta V_g + D_5 \Delta V_l \quad (3)$$

$$0 = D_6 \Delta V_g + D_7 \Delta V_l \quad (4)$$

که $A_1, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7$ ماتریس‌های قطری بلوکی بوده اما D_4, D_5, D_6, D_7 ماتریس‌های کامل می‌باشند. در این روابط x نشان‌دهنده بردار متغیرهای حالت و I_g و V_g و V_l به ترتیب بیانگر بردار جریان مولدها، زاویه و اندازه ولتاژ مولدها و زاویه و اندازه ولتاژ شین‌های بار می‌باشند. برای تعیین مقادیر ویژه باید متغیرهای جبری حذف گردند. به‌این‌منظور ابتدا با حذف ΔI_g از روابط (۱)، (۲) و (۳) خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 - B_1 D_1^{-1} C_1 & B_2 - B_1 D_1^{-1} C_2 & 0 \\ 0 & K_2 & D_5 \\ 0 & 0 & D_6 & D_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta V_g \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (5)$$

که $K_2 = C_2 - D_3 D_1^{-1} C_1$ و $K_1 = D_4 - D_5 D_1^{-1} D_2$ است. اکنون ماتریس M به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$M = \begin{bmatrix} K_1 & D_5 \\ D_6 & D_7 \end{bmatrix} \quad (6)$$

با به‌کارگیری این ماتریس، متغیرهای جبری به‌صورت زیر حذف می‌شوند:

$$\Delta \dot{x} = A_{sys} \Delta x \quad (7)$$

که عبارت است از:

$$A_{sys} = [A_1 - B_1 D_1^{-1} C_1] - [B_2 - B_1 D_1^{-1} C_2 \quad 0] [M]^{-1} \begin{bmatrix} K_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

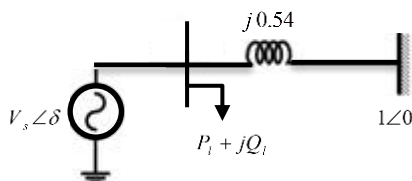
حال مقادیر ویژه سیستم که مقادیر ویژه ماتریس A_{sys} است، محاسبه می‌گردد.

۲-۲ پایدار ساز سیستم قدرت (PSS)

بلوک PSS مطابق شکل ۱ از یک حذف‌کننده حالت ماندگار و یک جبران‌گر فاز تشکیل شده است. حذف‌کننده حالت ماندگار باعث حذف تأثیر PSS در حالت ماندگار سیستم می‌شود. جبران‌گر فاز نیز پیش‌فازی لازم برای ایجاد یک گشتاور میرایی مناسب را فراهم می‌کند.

ورودی PSS معمولاً تغییر سرعت رتور مولد است ($\Delta \omega$). خروجی آن نیز به ورودی سیستم تحریک وارد می‌شود (V_s). ثابت زمانی T_m باید به‌اندازه کافی بزرگ باشد تا سیگنال‌های متناظر با نوسان‌های سرعت بدون تغییر عبور کنند ولی آن‌قدر بزرگ نباشد که به‌هنگام پارگی سیستم، به انحراف نامطلوب مولد منجر شود [۲۵]. در این مقاله مقدار آن برابر با ۱۰ انتخاب می‌گردد. بهره کنترل‌کننده و T_1 تا T_4 ثابت زمانی‌های جبران‌گر فاز می‌باشند. تنظیم پارامترهای PSS شامل انتخاب مقادیر مناسب برای بهره و ثابت زمانی‌ها است. با اضافه

بار متصل به شین مولد، در حالت نامی دارای مقدار $0.1 + j0.1$ pu باشد.



شکل ۲: سیستم قدرت SMIB

به منظور طراحی PSS احتمالاتی، بار به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و سه سطح بار 0.8 ، 1 و 1.2 برابر بار نامی لحاظ می شود. برای این سطوح بار به ترتیب احتمال های 30% ، 40% و 30% اختصاص داده شده است. به منظور در نظر گرفتن تغییرات بار در اطراف هر سطح، به ازای هر سطح بار، یک توزیع احتمال نرمال با میانگین مقدار توان هر سطح بار لحاظ می گردد. واریانس توزیع نیز 15% مقدار میانگین در نظر گرفته می شود. توان تولیدی مولد نیز به تناسب مقدار میانگین توزیع تغییر داده می شود. در حالت معین نیز سه سطح بار 0.8 ، 1 و 1.2 برابر بار نامی لحاظ می گردد اما دیگر تغییرات بار در اطراف هر یک از این سطوح در نظر گرفته نمی شود.

در معادلات پایداری گذرا که دوره مطالعه کوتاه است (در حد یک ثانیه) معمولاً بار به صورت امیدانس ثابت در نظر گرفته می شود. زیرا زمان کافی برای طی فرایندی که منجر به مشخصه توان ثابت شود وجود ندارد. در مطالعات پایداری سیگنال کوچک که دوره مطالعه طولانی تر است، امکان لحاظ کردن مشخصه توان ثابت برای بارها وجود دارد. بر این اساس در تعدادی از مراجع برای مطالعه پایداری سیگنال کوچک، بار به صورت توان ثابت و در تعدادی دیگر امیدانس ثابت در نظر گرفته می شود. در تعدادی نیز هر دو مشخصه مورد بررسی قرار می گیرد [۲۴]. در این مقاله نیز از هر دو مدل بار امیدانس ثابت و توان ثابت استفاده شده است.

برای طراحی PSS های معین و احتمالاتی، توابع هدفی که مورد استفاده قرار می گیرند به صورت روابط (۹) و (۱۰) هستند. در مراجع مختلف، برای حداکثر ضریب میرایی و همچنین حداقل نسبت میرایی مطلوب، مقادیر متفاوتی در نظر گرفته شده است که در این مقاله با توجه به مراجع [۶، ۲۹ و ۳۰] برای آن ها به ترتیب مقادیر 1 و 0.2 لحاظ گردیده است. مقدار ضریب وزنی نیز بر اساس مرجع [۳۱] برابر 2 در نظر گرفته شده است. اکنون به منظور مقایسه عملکرد PSS های معین و احتمالاتی، 1000 سطح بار مختلف انتخاب شده و به ازای هر یک از آن ها مقادیر ویژه محاسبه می گردد. حدود پارامترهای PSS به صورت زیر انتخاب می گردد [۲۴]:

میانگین توزیع ها تغییر داده می شود. به منظور حل مسئله بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده می گردد. الگوریتم ژنتیک در مقایسه با روش های استاندارد بهینه سازی دارای برتری های مهمی می باشد که عبارت است از [۲۷]:

۱. پردازش موازی یکی از مهم ترین برتری های الگوریتم ژنتیک می باشد. به این معنی که در این روش به جای یک متغیر، در یک زمان یک جمعیت به سوی نقطه بهینه حرکت می کند. بنابراین سرعت همگرایی روش بسیار بالا است.
۲. با استفاده از این روش می توان مسائلی را که نسبت به تغییر پارامترهای خود، خوش رفتار نیستند (مثلاً دارای تناوب های زیاد و در نتیجه مینیمم های نسبی زیاد هستند و یا توابعی که به شدت غیر خطی عمل می کنند) با مقیاس خوبی بهینه کرد.
۳. در این روش مشتق پذیر بودن تابع اهمیتی ندارد، در حالی که در بسیاری از روش های دیگر، بهینه سازی بر اساس مشتقات مراتب مختلف تابع صورت می گیرد.

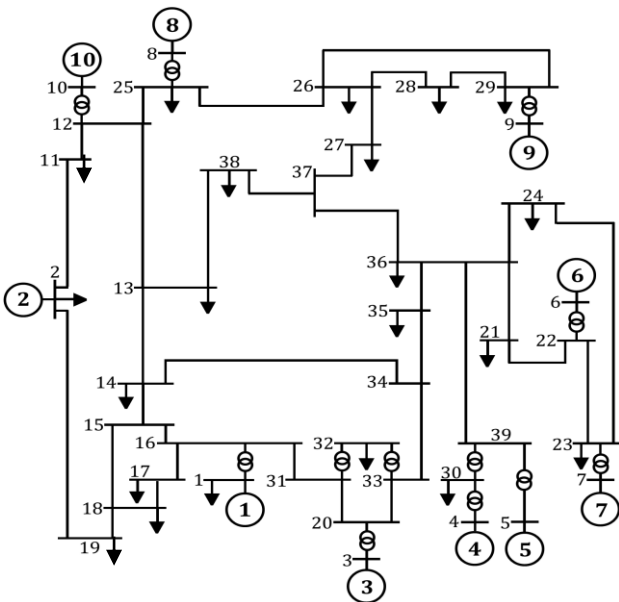
برای هر PSS، 5 پارامتر باید تعیین شود. الگوریتم ژنتیک به این صورت عمل می کند که ابتدا برای هر پارامتر، به طور تصادفی مقادیر مختلفی انتخاب می گردد. این انتخاب، ترکیب های مختلفی از پارامترها را ایجاد می کند که جمعیت اولیه نامیده می شوند. انتخاب پارامترها در محدوده مجاز هر کدام از آن ها انجام می شود. سپس به ازای هر ترکیب از پارامترها، تابع هدف محاسبه می گردد. برای محاسبه تابع هدف، حالت های مختلفی از بار و تولید در نظر گرفته می شود و به ازای هر حالت، مقادیر ویژه محاسبه می گردد. تعداد حالت ها در PSS احتمالاتی برابر 1000 انتخاب شده است. به این معنی که به ازای هر ترکیب از پارامترها، 1000 بار مقادیر ویژه محاسبه می شود و احتمالات مربوطه در تابع هدف، تعیین می گردد. سپس بر اساس مقادیر تابع هدف، تغییراتی در مقادیر پارامترها در محدوده مجاز آن ها ایجاد می شود و ترکیب های جدید مجدداً مورد بررسی قرار می گیرند. این روند تا به دست آوردن ترکیبی که منجر به حداقل مقدار تابع هدف شود، ادامه پیدا می کند.

۴- مطالعه موردی

در این قسمت ابتدا روش پیشنهادی بر روی یک سیستم ساده تک ماشینه اعمال می شود و نتایج آن به طور خلاصه ارائه می گردد. سپس نتایج به کارگیری روش پیشنهادی بر روی سیستم ۳۹ شینه IEEE به طور مفصل و با جزئیات کامل آورده می شود.

۴-۱- سیستم تک ماشینه

سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت (SMIB) مطابق شکل ۲ است. اطلاعات سیستم در مرجع [۲۸] آورده شده است. فرض می گردد



شکل ۳: سیستم قدرت ۳۹ شینه IEEE

توان اکتیو تولیدی مولدها نیز متناسب با مقادیر میانگین توزیع‌ها تغییر داده می‌شود. در حالت معین نیز سه سطح بار ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۷ برابر بار نامی لحاظ می‌گردد اما دیگر تغییرات بار در اطراف هر یک از این سطوح در نظر گرفته نمی‌شود. به منظور تسریع در روند همگرایی الگوریتم ژنتیک، نتایج حاصل از طراحی PSS معین، به‌عنوان جمعیت اولیه برای طراحی PSS احتمالاتی به کار می‌رود. حدود پارامترهای PSS به‌صورت رابطه (۱۱) انتخاب می‌گردد [۲۴].

توابع هدف مورد استفاده برای طراحی PSS‌های معین و احتمالاتی، به‌صورت روابط (۹) و (۱۰) هستند. با استفاده از این توابع هدف، تمامی مقادیر ویژه‌ای که از شرایط مطلوب برخوردار نیستند در جهت پایداری حرکت می‌کنند. پارامترهای محاسبه‌شده از دو روش معین و احتمالاتی برای دو نوع بار توان ثابت و امپدانس ثابت در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول ۲: پارامترهای PSS برای بارهای توان ثابت و امپدانس ثابت در روش معین.

نوع بار	پارامتر					
	T_4	T_3	T_2	T_1	K_{PSS}	
توان ثابت	مولد ۱	۰/۰۸۴۶	۰/۸۷۰۵	۰/۰۷۹۹	۰/۲۰۰۰	۱۰/۹۲۴۴
	مولد ۳	۰/۰۷۸۷	۰/۷۴۱۵	۰/۱۰۵۵	۱/۰۸۰۵	۱۰/۶۷۷۷
	مولد ۴	۰/۱۰۲۹	۰/۸۳۱۸	۰/۱۳۹۳	۰/۲۲۹۷	۳۰/۱۱۴۰
	مولد ۵	۰/۰۵۵۵	۰/۴۳۶۹	۰/۰۴۱۰	۱/۱۸۹۳	۳/۹۲۳۸
	مولد ۶	۰/۰۷۷۸	۰/۲۰۰۰	۰/۰۷۶۱	۰/۵۸۳۱	۱۱/۵۶۰۰
	مولد ۷	۰/۱۴۴۹	۱/۴۹۵۹	۰/۰۳۶۶	۰/۲۰۰۰	۳/۳۵۸۳
	مولد ۸	۰/۱۰۳۴	۰/۶۰۸۸	۰/۰۹۷۷	۰/۲۰۰۰	۵۰/۰۰۰۰
	مولد ۹	۰/۰۷۶۴	۰/۴۱۷۵	۰/۱۴۹۹	۰/۲۶۵۷	۲۶/۷۵۸۹
	مولد ۱۰	۰/۱۳۵۹	۰/۵۶۵۸	۰/۰۳۹۷	۰/۹۰۷۲	۱۶/۶۹۳۲
	امپدانس	مولد ۱	۰/۱۴۹۹	۰/۲۰۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۲۰۰۰
مولد ۲		۰/۱۵۰۰	۰/۵۳۲۹	۰/۱۴۳۳	۱/۰۲۱۰	۴/۳۷۹۰

$$\begin{cases} 0.1 \leq K_{PSS} \leq 50 \\ 0.2 \leq T_1 \leq 1.5 \\ 0.02 \leq T_2 \leq 0.15 \\ 0.2 \leq T_3 \leq 1.5 \\ 0.02 \leq T_4 \leq 0.15 \end{cases} \quad (11)$$

جدول ۱: مقایسه عملکرد PSS‌های معین و احتمالاتی در مواجهه با ۱۰۰۰ سطح بار مختلف.

نوع PSS	نوع بار	تعداد حالت‌های ناپایدار	تعداد حالت‌های با $\xi < 0.2$
معین	توان ثابت	۰	۵۲۳
	امپدانس ثابت	۰	۴۰۵
احتمالاتی	توان ثابت	۰	۵۰۷
	امپدانس ثابت	۰	۳۷۸

جدول ۱ عملکرد دو روش احتمالاتی و معین را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تعداد حالت‌های ناپایدار برای همه موارد برابر صفر است اما در مقایسه حالت‌های با $\xi < 0.2$ ، PSS احتمالاتی عملکرد بهتری دارد. مشاهده می‌شود که به دلیل کوچک بودن شبکه، برتری روش احتمالاتی محسوس نیست اما در بخش بعد نشان داده خواهد شد که در سیستم‌های بزرگ‌تر، برتری روش احتمالاتی قابل توجه است.

۴-۲- سیستم ۳۹ شینه IEEE

نمودار تک‌خطی سیستم ۳۹ شینه IEEE در شکل ۳ نشان داده می‌شود. این سیستم شامل ۱۰ مولد، ۲۱ بار، ۳۴ خط انتقال و ۱۲ ترانسفورماتور است. توان مبنای این سیستم ۱۰۰ مگا ولت‌آمپر، فرکانس نامی ۵۰ هرتز و سطح ولتاژ نامی ۳۴۵ کیلوولت است. در این سیستم، شین شماره ۱، شین مرجع است. این سیستم مدل ساده شده سیستم انتقال ناحیه نیوانگلند^۱ در شمال شرق ایالت متحده آمریکا است. فرض می‌شود که به‌جز مولد شماره ۲، در سایر مولدها PSS وجود دارد. اطلاعات سیستم شامل پارامترهای بارها، خط انتقال، مولد و سیستم تحریک به‌طور کامل در [۳۲] ذکر شده است. نتایج شبیه‌سازی با به‌کارگیری رایانه‌ای با RAM ۱۲ گیگابایت و پردازنده ۷ هسته‌ای ۳/۲ گیگاهرتزی به‌دست آمده است.

در این قسمت نیز برای طراحی PSS احتمالاتی بارها به‌صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. به این منظور سه سطح بار ۰/۸، ۱/۲ و ۱/۷ برابر بار نامی لحاظ می‌گردد. به این سطوح بار به ترتیب احتمال‌های ۳۰، ۴۰ و ۳۰ درصد اختصاص داده می‌شود. سپس برای در نظر گرفتن تغییرات بار در اطراف هر سطح، متناظر با هر سطح بار، یک توزیع احتمال نرمال برای تغییرات بار لحاظ می‌گردد. میانگین هر توزیع نرمال، برابر با مقدار توان سطح بار متناظر در نظر گرفته می‌شود. واریانس توزیع نیز برابر با ۱۵ درصد مقدار میانگین انتخاب می‌گردد. به این ترتیب، بار هر شین دارای چند توزیع نرمال می‌شود که برای وقوع هر یک از توزیع‌ها نیز یک احتمال اختصاص می‌یابد.

افزایش بار مصرفی سیستم می‌شود اما هنگام استفاده از مدل امیدانس ثابت، کاهش ولتاژ موجب کاهش توان مصرفی می‌گردد. افزایش توان مصرفی سبب می‌شود که فرایند انتقال توان از مولدهای کندتر به مولدهای سریع‌تر با حساسیت و دامنه بیش‌تری انجام شود که این موضوع احتمال وقوع ناپایداری را افزایش می‌دهد.

اکنون برای مقایسه‌ای دیگر، تعداد حالات مقادیر ویژه با $0.2 < \xi$ از ۱۰۰۰ نمونه در جدول ۵ آورده شده است. مشاهده می‌گردد که در اینجا هم PSS احتمالاتی عملکرد بهتری دارد. جداول ۴ و ۵ نشان می‌دهند که با به‌کارگیری PSS احتمالاتی، تعداد نقاط کار ناپایدار کاهش می‌یابد. یعنی احتمال این‌که تغییرات بار موجب کاهش عملکرد PSS شود، کمتر می‌گردد. این نتیجه به این علت حاصل شده است که با به‌کارگیری احتمال وقوع ناپایداری در تابع هدف (رابطه (۱۰))، نقاط کار بیش‌تری در طراحی PSS در نظر گرفته می‌شوند.

جدول ۴: مقایسه عملکرد PSSهای معین و احتمالاتی در مواجهه با ۱۰۰۰ سطح بار مختلف.

نوع PSS	نوع بار	تعداد حالت‌های ناپایدار
معین	امیدانس ثابت	۱۶۴
	توان ثابت	۲۱۰
احتمالاتی	امیدانس ثابت	۲۲
	توان ثابت	۱۳۹

جدول ۵: مقایسه تعداد مقادیر ویژه با $0.2 < \xi$ از ۱۰۰۰ نمونه.

نوع PSS	نوع بار	تعداد حالات با $0.2 < \xi$
معین	امیدانس ثابت	۶۱۵
	توان ثابت	۸۵۹
احتمالاتی	امیدانس ثابت	۴۱۹
	توان ثابت	۵۵۷

در این بخش از جعبه‌ابزار PSAT برای شبیه‌سازی زمانی عملکرد PSSهای معین و احتمالاتی استفاده می‌گردد. به‌این‌منظور اتصال کوتاه ۳ فاز در شین‌های مختلف اعمال شده است که همگی عملکرد روش پیشنهادی را نشان می‌دهند اما به دلیل کمبود جا فقط نتایج مربوط به شین‌های ۲۲ و ۶ آورده شده است. علت انتخاب شین‌های ۲۲ و ۶ این است که عملکرد روش پیشنهادی در اتصال کوتاه روی این شین‌ها با وضوح بیشتری قابل مشاهده است. این اتصال کوتاه ۳ فاز در ثانیه ۱ اعمال و در ثانیه ۱/۱ رفع می‌شود. در مراجع مختلف، زمان دوام خطا را معمولاً در حد ۵ یا ۶ سیکل می‌گیرند که حدود ۰/۱ ثانیه می‌شود. به‌کارگیری زمان رفع خطای بزرگ‌تر، شانس وقوع ناپایداری گذرا را افزایش می‌دهد که در این صورت، عملکرد PSS که هدف اصلی به‌کارگیری آن، میرا کردن نوسانات سیگنال کوچک است قابل مشاهده نخواهد بود. به‌همین دلیل زمان دوام خطا در حدی در نظر گرفته می‌شود که بدون وقوع ناپایداری گذرا، نوساناتی در سرعت و زاویه رتور مولدها ایجاد گردد.

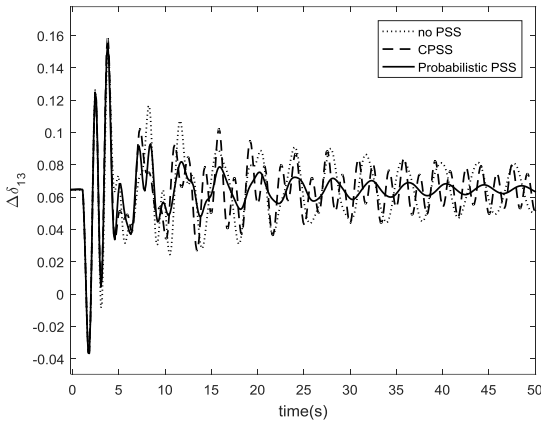
نوع بار	پارامتر	T_4	T_3	T_2	T_1	K_{PSS}
ثابت	مولد ۴	۰/۱۲۴۷	۰/۲۰۰۰	۰/۱۵۰۰	۰/۶۷۶۶	۴۶/۷۵۸۰
	مولد ۵	۰/۱۰۰۸	۰/۲۰۰۰	۰/۰۶۵۷	۰/۲۷۹۲	۴۷/۸۴۹۲
	مولد ۶	۰/۱۲۱۲	۰/۳۰۶۹	۰/۰۵۰۷	۱/۰۰۲۸	۲۹/۴۲۶۶
	مولد ۷	۰/۰۸۶۰	۰/۳۹۰۸	۰/۰۵۹۸	۰/۳۵۴۹	۱۲/۰۱۷۰
	مولد ۸	۰/۰۲۲۷	۰/۶۶۱۰	۰/۰۹۹۹	۰/۸۲۰۹	۱۶/۰۱۵۶
	مولد ۹	۰/۰۷۰۷	۰/۶۶۹۹	۰/۰۴۱۹	۰/۳۶۱۳	۱۰/۳۱۸۵
مولد ۱۰		۰/۰۸۰۱	۰/۲۵۸۳	۰/۰۲۵۰	۰/۷۲۴۶	۸/۳۶۴۴

جدول ۳: پارامترهای PSS برای بارهای توان ثابت و امیدانس ثابت در روش احتمالاتی.

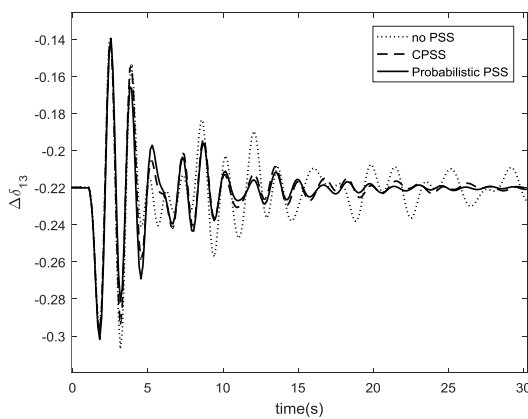
نوع بار	پارامتر	T_4	T_3	T_2	T_1	K_{PSS}
توان ثابت	مولد ۱	۰/۱۴۰۳	۰/۲۰۰۰	۰/۰۷۱۴	۰/۶۶۸۵	۲۸/۶۹۸۵
	مولد ۳	۰/۰۶۰۴	۱/۳۰۱۵	۰/۱۴۷۹	۱/۲۶۰۳	۰/۱۰۰۰
	مولد ۴	۰/۰۷۳۹	۰/۷۴۴۳	۰/۱۴۶۴	۰/۵۱۸۶	۷/۳۶۸۳
	مولد ۵	۰/۱۱۱۲	۱/۳۷۴۵	۰/۱۴۳۵	۰/۳۳۴۵	۹/۳۱۲۷
	مولد ۶	۰/۰۴۶۷	۰/۴۱۷۱	۰/۱۲۹۵	۰/۹۱۳۰	۴۴/۴۰۱۴
	مولد ۷	۰/۰۶۰۹	۰/۲۳۶۸	۰/۰۵۳۹	۰/۶۱۱۹	۲۷/۰۸۸۹
	مولد ۸	۰/۱۲۷۲	۰/۶۶۰۲	۰/۰۸۳۳	۰/۴۸۰۳	۳/۳۵۹۰
	مولد ۹	۰/۱۴۳۱	۰/۵۴۹۶	۰/۰۲۰۰	۰/۲۹۸۸	۴۴/۵۰۴۲
	مولد ۱۰	۰/۰۷۰۲	۰/۳۰۸۹	۰/۰۶۵۵	۱/۳۷۳۰	۱۳/۱۳۴۱
	امیدانس ثابت	مولد ۱	۰/۱۰۰۸	۰/۸۰۴۳	۰/۱۳۵۹	۰/۷۲۷۹
مولد ۳		۰/۱۲۰۷	۰/۵۷۸۸	۰/۰۸۹۱	۱/۳۰۱۸	۲/۳۰۷۵
مولد ۴		۰/۱۵۰۰	۰/۴۵۴۴	۰/۱۴۹۷	۱/۱۲۹۸	۲۴/۲۶۲۹
مولد ۵		۰/۰۴۳۸	۰/۲۰۰۰	۰/۰۹۴۰	۱/۰۲۴۶	۱۵/۵۵۹۲
مولد ۶		۰/۱۰۲۲	۰/۶۶۰۷	۰/۱۴۴۰	۰/۴۹۶۱	۳/۶۴۴۵
مولد ۷		۰/۱۲۳۳	۰/۴۶۶۴	۰/۰۶۴۳	۰/۵۹۴۹	۲۷/۶۶۲۱
مولد ۸		۰/۱۴۴۶	۰/۸۳۴۳	۰/۱۴۲۳	۰/۳۴۲۷	۱۸/۷۱۶۹
مولد ۹		۰/۰۳۲۱	۰/۵۲۰۷	۰/۰۰۶۱	۰/۲۰۰۰	۲۶/۲۵۸۷
مولد ۱۰		۰/۰۲۲۳	۰/۸۵۰۵	۰/۱۵۰۰	۰/۶۴۹۰	۲۴/۲۶۶۸

اکنون به‌منظور مقایسه عملکرد PSSهای معین و احتمالاتی، با فرض نامعین بودن بارها مشابه آن چیزی که در طراحی PSS احتمالاتی به‌کار رفته است، ۱۰۰۰ سطح بار مختلف انتخاب می‌شود و برای هر یک از آن‌ها مقادیر ویژه محاسبه می‌گردد. جدول ۴ تعداد حالت‌های ناپایدار را با به‌کارگیری PSSهای معین و احتمالاتی نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با PSS احتمالاتی، تعداد حالت‌های ناپایدار کاهش قابل توجهی پیدا کرده است. همچنین مشاهده می‌گردد، تعداد وضعیت‌های ناپایدار در هنگام لحاظ کردن بار توان ثابت، نسبت به بار امیدانس ثابت بیشتر است. علت این موضوع که مطابق نتیجه مرجع [۲۴] نیز می‌باشد را این‌گونه می‌توان بیان کرد. در هنگام نوسان سرعت و زاویه بین دو گروه از مولدها، به‌طور طبیعی بار مولدهای کندتر به مولدهای سریع‌تر منتقل می‌گردد که این موضوع به میرا شدن نوسانات کمک می‌کند. افزایش زاویه بین مولدها سبب کاهش ولتاژ در نقاط میانی می‌گردد که این کاهش ولتاژ در هنگام به‌کارگیری مدل توان ثابت برای بارها، موجب افزایش جریان و تلفات و به‌تبع آن

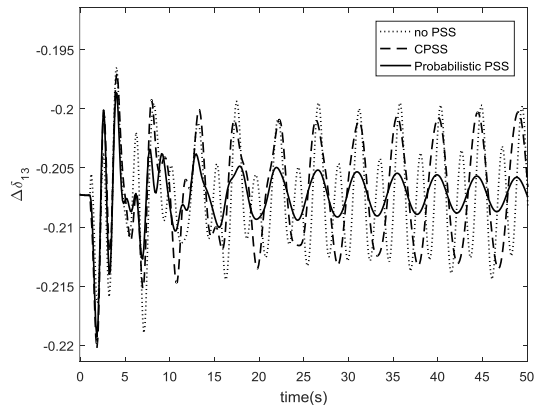
این که توان مولدهای ۳، ۵ و ۸ با افزایش بار ثابت بماند، نشان می دهند. در شکل ۸ بار، توان ثابت بوده و در شکل ۹ بار، امپدانس ثابت است. مشاهده می گردد که با PSS احتمالاتی، میرایی به میزان زیادی بهبود یافته است. اما در حالت بدون PSS و CPSS به سمت ناپایداری حرکت کرده است.



شکل ۶: اختلاف زاویه بین ماشین های ۱ و ۳ برای بار توان ثابت. (بار ۱/۷ برابری)

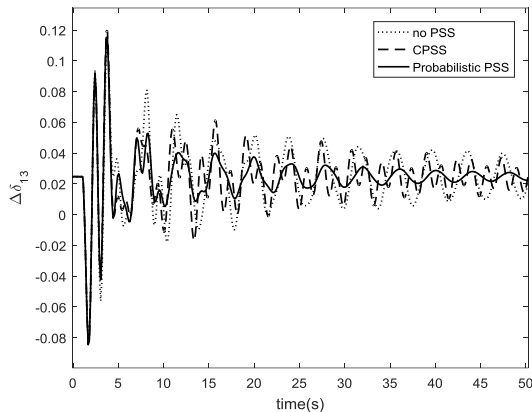


شکل ۷: اختلاف زاویه بین ماشین های ۱ و ۳ برای بار امپدانس ثابت. (بار ۱/۷ برابری)

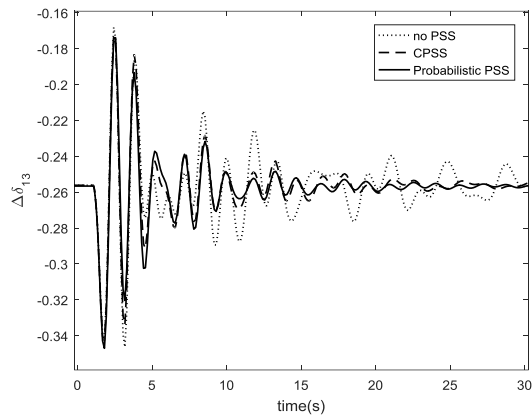


شکل ۸: اختلاف زاویه بین ماشین های ۱ و ۳ برای بار توان ثابت. (بار ۱/۸۵ برابری)

اتصال کوتاه به ازای انواع و سطوح مختلف بار تکرار می گردد. شکل های ۳ تا ۶، مربوط به نتایج اتصال کوتاه بر روی شین ۲۲، و شکل های ۷ و ۸ مربوط به اتصال کوتاه بر روی شین ۶ هستند. به ازای هر نوع و سطح بار، شبیه سازی در حالت های بدون PSS، با PSS معین (CPSS) و با PSS احتمالاتی (PPSS) انجام می شود. شکل های ۴ و ۵ تغییرات اختلاف زاویه بین مولدهای ۱ و ۳ را به ازای سطح بار ۱/۵ برابر بار نامی، نشان می دهند. در شکل ۴ بار، توان ثابت و در شکل ۵ بار، امپدانس ثابت است. مشاهده می گردد که با PSS احتمالاتی، میرایی به صورت ملموسی بهبود یافته است.



شکل ۴: اختلاف زاویه بین ماشین های ۱ و ۳ برای بار توان ثابت. (بار ۱/۵ برابری)



شکل ۵: اختلاف زاویه بین ماشین های ۱ و ۳ برای بار امپدانس ثابت. (بار ۱/۵ برابری)

شکل های ۶ و ۷ تغییرات اختلاف زاویه بین مولدهای ۱ و ۳ را به ازای سطح بار ۱/۷ برابر بار نامی، نشان می دهند. در شکل ۶ بار، توان ثابت و در شکل ۷ بار، امپدانس ثابت است. مشاهده می گردد که با PSS احتمالاتی، میرایی مقدار قابل توجهی بهبود یافته است.

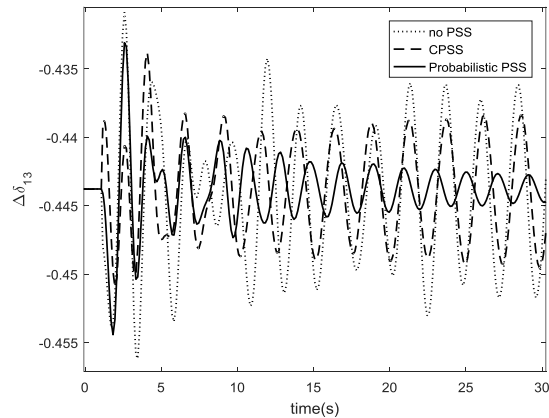
در حالت های قبلی، تولید متناسب با بار تغییر داده شد. در اینجا حالتی بررسی می گردد که در آن توان تولیدی تعدادی از مولدها با افزایش بار ثابت می ماند. شکل های ۸ و ۹ تغییرات اختلاف زاویه بین مولدهای ۱ و ۳ را به ازای سطح بار ۱/۸۵ برابر بار نامی، با فرض

- Machine Power System,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 1, pp. 522-531, 2013.
- [6] Chitara, Dhanraj, K. R. Niazi, Anil Swarnkar, and Nikhil Gupta. “Robust tuning of multimachine power system Stabilizer via Cuckoo Search Optimization Algorithm,” In Power Systems (ICPS), pp. 1-6. IEEE, 2016.
- [7] Jagadeesh, Pothula, and M. Sai Veeraj. “Particle swarm optimization based power system stabilizer for SMIB system,” In Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS), International Conference on, pp. 1-6. IEEE, 2016.
- [8] Islam, Naz Niamul, M. A. Hannan, Hussain Shareef, and Azah Mohamed. “An application of backtracking search algorithm in designing power system stabilizers for large multi-machine system,” Neurocomputing, pp. 175-184, 2017.
- [9] Rahmatian, Meysam, et al. “An approach to improve the pss performance and tuning process considering uncertainty in excitation system model using a novel grouping scheme,” Power System Technology (POWERCON), IEEE, 2016.

[۱۰] غلامرضا صیاد، امین خدابخشیان و رحمت‌الله هوشمند «طراحی پایدارساز سیستم قدرت برای توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی دو تغذیه به روش کلاسیک و الگوریتم ژنتیک»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۳۹، شماره ۱، صفحات ۲۳-۱۳، ۱۳۸۸.

[۱۱] محمد مرادی و امیرحسین ابوالمعصومی، «طراحی پایدارساز غیرخطی فازی برای سیستم‌های قدرت دارای تأخیر زمانی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۲، صفحات ۷۰۹-۶۹۷، ۱۳۹۶.

- [12] Chung, C. Y., K. W. Wang, C. T. Tse, X. Y. Bian, and A. K. David. “Probabilistic eigenvalue sensitivity analysis and PSS design in multimachine systems,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 4, pp. 1439-1445, 2003.
- [13] Wang, K. W., C. Y. Chung, C. T. Tse, and K. M. Tsang. “Probabilistic eigenvalue sensitivity indices for robust PSS site selection,” IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 148, no. 6, pp. 603-609, 2001.
- [14] Tse, C. T., K. W. Wang, C. Y. Chung, and K. M. Tsang. “Parameter optimisation of robust power system stabilisers by probabilistic approach,” IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 147, no. 2, pp. 69-75, 2000.
- [15] C. Y. Chung, K. W. Wang, C. T. Tse, R. Niu, “Power-System Stabilizer (PSS) Design by Probabilistic Sensitivity Indexes (PSIs),” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 3, pp. 688-693, 2002.
- [16] K.W. Wang, C.Y. Chung, C.T. Tse, K.M. Tsang, “Probabilistic eigenvalue sensitivity indices for robust PSS site selection,” IEEE Transmission and Distribution, vol. 148, no. 6, pp. 603 – 609, 2001.
- [17] Tse, C. T., K. W. Wang, C. Y. Chung, and K. M. Tsang. “Robust PSS design considering multi-operating conditions,” In Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies International Conference on, pp. 465-470. IEEE, 2000.
- [18] J.L. Rueda, D.G. Colome, I. Erlich, “Assessment and Enhancement of Small Signal Stability Considering Uncertainties,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 1, pp. 198 – 207, 2009.



شکل ۹: اختلاف زاویه بین ماشین‌های ۱ و ۳ برای بار امیدانس ثابت. (بار ۱/۸۵ برابری)

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر عدم قطعیت در طراحی PSS پرداخته شد و نتایج حاصله با حالت معین مقایسه گردید. از نتایج به‌دست آمده می‌توان اهمیت این نوع طراحی را درک نمود. با به‌کارگیری PSS احتمالاتی برای بار توان ثابت، از ۱۰۰۰ نمونه بار، تعداد نمونه‌های دارای ناپایداری ۱۳۹ عدد بود که این تعداد در حالت معین ۲۱۰ نمونه است. با به‌کارگیری PSS احتمالاتی برای بار امیدانس ثابت، از ۱۰۰۰ نمونه، ۲۲ نمونه ناپایدار بود که این تعداد در حالت معین ۱۶۴ نمونه است. برای بار توان ثابت از ۱۰۰۰ نمونه بار، تعداد نمونه‌های دارای مقادیر ویژه با $\zeta < 0.2$ ، در حالت احتمالاتی ۵۵۷ نمونه بود. درحالی‌که در حالت معین این تعداد به ۸۵۹ نمونه می‌رسد. برای بار امیدانس ثابت از ۱۰۰۰ نمونه بار، تعداد نمونه‌های دارای مقادیر ویژه با $\zeta < 0.2$ ، در حالت احتمالاتی ۴۱۹ نمونه بود درحالی‌که در حالت معین این تعداد ۶۱۵ نمونه است. نتایج شبیه‌سازی زمانی نیز عملکرد PSS احتمالاتی را نسبت به PSS معین نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] E.S. Ali, “Optimization of Power System Stabilizers using BAT search algorithm,” Electrical Power and Energy Systems, vol. 61, pp. 683–690, 2014.
- [2] H. Yassami, A. Darabi, S.M.R. Rafiei, “Power system stabilizer design using Strength Pareto multi-objective optimization approach,” Electric Power Systems Research, vol. 80, no. 7, pp. 838-846, 2010.
- [3] Junbo Zhang, C. Y. Chung, Yingduo Han, “A Novel Modal Decomposition Control and Its Application to PSS Design for Damping Interarea Oscillations in Power Systems,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 4, pp. 2015-2025, 2012.
- [4] D. K. Chaturvedi, O. P. Malik, “Generalized Neuron-Based Adaptive PSS for Multimachine Environment,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 1, pp. 358-366, 2005.
- [5] Sheng-Kuan Wang, “A Novel Objective Function and Algorithm for Optimal PSS Parameter Design in a Multi-

- [25] Kundur, Prabha. "Power system stability and control," Edited by Neal J. Balu, and Mark G. Lauby. Vol. 7. New York: McGraw-hill, 1994.
- [26] Abdel-Magid, Y. L., and M. A. Abido. "Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 3, pp. 1125-1132, 2003.
- [۲۷] مصطفی عباسی کیا، الگوریتم‌های فرا اکتشافی الگوریتم ژنتیک، تهران، کتابخانه وی کیو، ۱۳۸۸.
- [28] Panda, Sidhartha, and Narayana Prasad Padhy. "MATLAB/SIMULINK based model of single-machine infinite-bus with TCSC for stability studies and tuning employing GA," International Journal of Computer Science and Engineering, vol. 1, no. 1, pp. 50-59, 2007.
- [29] Abdel-Magid, Y. L., and M. A. Abido. "Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 3, pp. 1125-1132, 2003.
- [30] Khodabakhshian, Amin, and Reza Hemmati. "Multi-machine power system stabilizer design by using cultural algorithms," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 44, no. 1, pp. 571-580, 2013.
- [31] Yassami, H., A. Darabi, and S. M. R. Rafiei. "Power system stabilizer design using Strength Pareto multi-objective optimization approach", Electric Power Systems Research, vol. 80, no. 7, pp. 838-846, 2010.
- [32] Padiyar, K. R. "Power system dynamics," BS Publ, 2008.
- [19] Ahmadi, H., and H. Seifi. "Probabilistic tuning of Power System Stabilizers considering the wind farm generation uncertainty," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 63, pp. 565-576, 2014.
- [20] Wang, Chen, et al. "Modeling analysis in power system small signal stability considering uncertainty of wind generation," Power and Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1-7, 2010.
- [21] Bian, X. Y., X. X. Huang, K. C. Wong, K. L. Lo, Yang Fu, and S. H. Xuan. "Improvement on probabilistic small-signal stability of power system with large-scale wind farm integration," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 61, pp. 482-488, 2014.
- [22] Wang, Zhen, Deqiang Gan, C. Y. Chung, K. P. Wong, and Chen Shen. "Robust PSS design considering power system contingencies based on a recursive PSO," In Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on, pp. 668-675. IEEE, 2010.
- [23] Konara, A. I., U. D. Annakkage, and Bagen Bagen. "The probabilistic approach to determine the reliability of synchrophasor-based damping controllers," In Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2016 International Conference on, pp. 1-5. IEEE, 2016.
- [24] Sauer, Peter W., and M. A. Pai. "Power system dynamics and stability," Urbana, 1998.

زیر نویس ها

¹ Power System Stabilizer

² Probability Density Function

³ Probabilistic Small Signal Stability Analysis

⁴ Doubly Fed Induction Generator

⁵ Local Signal

⁶ Remote Signal

⁷ Single Machine Infinite Bus

⁸ New England