

# بهبود پایداری سیستم قدرت مبتنی بر جبران سازی سری استاتیکی مجهز به کنترل کننده پیش بین مقاوم

محمد حسن مرادی<sup>۱</sup> فرهاد امیری<sup>۲</sup>

۱- استاد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه بوعلی سینا- همدان- ایران

[mh\\_moradi@yahoo.co.uk](mailto:mh_moradi@yahoo.co.uk)

۲- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه بوعلی سینا - همدان- ایران

[f.amiri94@basu.ac.ir](mailto:f.amiri94@basu.ac.ir)

**چکیده:** نوسانات فرکانس پایین، پایداری سیستم قدرت را به خطر می اندازد و سبب کاهش ظرفیت خطوط انتقال می شود. در سیستم قدرت از ادوات FACTS و پایدارساز (PSS) برای بهبود پایداری استفاده می شود، جبران ساز سری استاتیکی (SSSC) یکی از مهمترین ادوات FACTS است. در این مقاله به میرا کردن نوسانات فرکانس پایین با جبران ساز سری استاتیکی مجهز به کنترل کننده پیش بین مقاوم در سیستم قدرت تک ماشین پرداخته شده است. کنترل کننده پیش بین مقاوم از نامساوی ماتریس خطی (LMI) برای بهینه کردن تابع هدف و در نهایت بدست آوردن سیگنال کنترلی استفاده می کند. به منظور بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، شبیه سازی در چند سناریو با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مختلف سیستم قدرت و اغتشاشات مختلف انجام گرفته است. جبران ساز سری استاتیکی مجهز به کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده پیش بین مقاوم) نسبت به جبران ساز سری استاتیکی مبتنی به کنترل کننده PI فازی، جبران ساز سری استاتیکی مبتنی PI که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده و جبران ساز سری استاتیکی مبتنی بر کنترل کننده پیش فاز-پس فاز فازی بهینه، از لحاظ مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترها و اغتشاشات، سرعت پاسخ، کاهش فروجهش و کاهش فراجاهش دارای عملکرد مطلوبتری است. شبیه سازی بر اساس نرم افزار متلب انجام شده است.

**واژه های کلیدی:** جبران ساز سری استاتیکی، کنترل کننده پیش بین مقاوم، نامعادلات ماتریس خطی، تغییر پارامترها

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.291

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۰۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۶

نام نویسنده ی مسئول: محمد حسن مرادی

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - همدان - خیابان مدرس - دانشگاه بوعلی سینا - دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه

افزایش جمعیت، رشد روز افزون شهرنشینی و صنعتی شدن شهرها نیاز به افزایش توان در سیستم قدرت دارد، که باعث پیچیده شدن سیستم قدرت از لحاظ کنترلی و مدیریتی می شود، همچنین سیستم قدرت را با چالش کاهش سطح پایداری استاتیکی، دینامیکی و گذرا روبرو می کند. بنابراین نیاز به راه حل هایی برای بهره برداری مناسب از تجهیزات به منظور افزایش ظرفیت توان انتقالی در سیستم با توجه به حد حرارتی خطوط و افزایش انعطاف پذیری شبکه انتقال به منظور توانایی تغییر سریع ساختار شبکه در مقابله با اغتشاشات و تغییرات پیش بین شده توان دارد. مهندسان در صنعت برق در سال ۱۹۹۰ در کمیته <sup>۱</sup> (EPRI) ایده انعطاف پذیری در سیستم های انتقال توان به وسیله ادوات فکت <sup>۲</sup> (FACTS) را مطرح کردند. ادوات FACTS نسبت به ساخت خطوط انتقال جدید دارای هزینه پایین تر، راحتی نصب و جذابیت های محیط زیستی هستند [۳-۱]. ادوات FACTS به دو دسته تقسیم بندی می شوند: (۱) ادوات FACTS بر پایه ترستور کنترل می شوند، (۲) ادوات FACTS که بر پایه مبدل منبع ولتاژ کنترل می شوند. ادوات FACTS نسبت به سیستم های مکانیکی اجازه کنترل سریعتر سیستم را می دهد. پایداری در سیستم قدرت بسیار حیاتی است، یکی از مهم ترین مسائلی که در بحث پایداری سیستم قدرت به آن پرداخته می شود، میرایی نوسانات است، از ادوات FACTS برای میرایی نوسانات سیستم قدرت از طریق کنترل توان اکتیو جاری شده در خط انتقال می توان استفاده کرد. روش های مختلفی برای میرایی نوسانات سیستم قدرت در حضور ادوات فکت به کار برده شده است [۴،۵].

در [۶] از جبران ساز استاتیکی VAR برای میرایی موهای نوسانی الکترومکانیکی استفاده شده است. در [۷] به مقایسه بین خازن سری قابل کنترل و SVC برای میرایی نوسانات مود الکترومکانیکی پرداخته شده است. در [۸،۹] از جبران ساز سری استاتیکی <sup>۳</sup> (SSSC) برای میرایی مودهای نوسانی الکترومکانیکی استفاده شده است. در [۱۰] از SSSC برای محدود کردن جریان خطا و پایداری سیستم قدرت استفاده شده است. در [۱۱] از روش تابع انرژی گذرا برای پایداری سیستم قدرت با حضور SSSC استفاده شده است. در [۱۲] از کنترل غیرخطی برای طراحی SSSC در سیستم قدرت استفاده شده است. در [۱۳] به میرا کردن نوسانات فرکانس پایین در سیستم قدرت در حضور SSSC به کمک کنترل کننده PI فازی پرداخته شده است. در [۱۴] به آنالیز پایداری گذرا با استفاده از SSSC برای میرایی نوسانات سیستم قدرت دونا حیه ای پرداخته شده است. در [۱۵] به آنالیز افتادگی ولتاژ در سیستم قدرت به وسیله ادوات FACTS پرداخته شده است. در [۱۶] به طراحی هماهنگ SSSC و پایدار ساز سیستم قدرت برای میرایی نوسانات سیستم قدرت چند ناحیه ای پرداخته شده است. در [۱۷] به طراحی کنترل کننده عصبی-فازی برای SSSC به

منظور بهبود پایداری نوسانات یک توربین بادی متصل به سیستم قدرت چندماشینه استفاده شده است. در [۱۸] به طراحی کنترل عصبی-فازی تطبیق پذیر بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه <sup>۴</sup> (MOPSO) برای SSSC به منظور بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت چند ناحیه ای پرداخته شده است. در [۱۹] به بهبود پایداری مزرعه بادی از SSSC و یک SVC پرداخته شده است. در [۲۰] از فیلتر کالمن برای تشخیص و کاهش رزونانس با SSSC استفاده شده است. در پژوهش های ذکر شده به بررسی عدم قطعیت پارامترهای سیستم قدرت و تاثیر این عدم قطعیت در طراحی ادوات FACTS مجهز به کنترل کننده پرداخته نشده است. در [۲۱]، SSSC مجهز به کنترل کننده PI که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده پرداخته شده است. در [۲۲]، SSSC مجهز به کنترل کننده پیش فاز-پس فاز فازی بهینه شده با الگوریتم نهنگ اصلاح شده برای بهبود نوسانات سیستم قدرت پرداخته شده است.

در این مقاله به میرا کردن نوسانات فرکانس پایین با SSSC مجهز به یک کنترل پیش بین مقاوم <sup>۵</sup> (RMPC) در سیستم قدرت تک ماشینه <sup>۶</sup> (SIMB) پرداخته شده است. کنترل کننده پیشنهادی (کنترل پیش بین مقاوم) از نامساوی ماتریس خطی <sup>۷</sup> (LMI) برای بهینه کردن تابع هدف و در نهایت بدست آوردن سیگنال کنترلی استفاده می کند. به منظور بررسی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، شبیه سازی در چند سناریو با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای و اغتشاشات بار صورت گرفته است. SSSC مجهز به کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده پیش بین مقاوم) نسبت به SSSC مجهز به کنترل کننده های PI فازی [۱۳]، که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده [۲۱] و کنترل کننده پیش فاز-پس فاز فازی بهینه [۲۲] از لحاظ مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترها و اغتشاشات، سرعت پاسخ، کاهش فروجهش و کاهش فراجاهش دارای عملکرد مطلوبتری است. شبیه سازی بر اساس نرم افزار متلب انجام شده است. مقاله شامل: مدلسازی سیستم قدرت، طراحی کنترل کننده پیش بین مقاوم، شبیه سازی و نتایج است.

## ۲- مدلسازی سیستم قدرت

### ۲-۱- جبران ساز سری استاتیکی در سیستم قدرت تک ماشینه

شکل (۱) نحوه قرار گرفتن SSSC در سیستم قدرت تک ماشینه باس بینهایت را نشان داده شده است. در شکل (۱)،  $X_T$ : راکتانس ترانسفورماتور،  $X_L$ : راکتانس خطوط انتقال،  $V_t$ : ولتاژ باس ژنراتور،  $V_b$ : ولتاژ باس بی نهایت است. SSSC متشکل از یک منبع ولتاژ سنکرون است که مطابق با شکل (۱) سری با خط انتقال قرار می گیرد.

در جبران ساز سری استاتیکی (SSSC)،  $X_{SCT}$ : راکتانس نشتی ترانسفورماتور،  $V_{INV}$ : ولتاژ تزریق شده سری به خط،  $C_{DC}$ : ظرفیت خازن DC،  $V_{DC}$ : ولتاژ DC سمت اولیه مبدل،  $m$ : دامنه مدولاسیون

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} [\Delta P_m - \Delta P_e - D \times \Delta \omega] \quad (2)$$

$$\dot{\Delta E_{fd}} = \frac{-K_A \times K_s}{T_A} \times \Delta \delta - \frac{K_A \times K_6}{T_A} \times \Delta E_q + \frac{K_A}{T_A} \times \Delta V_2 \quad (3)$$

$$- \frac{K_A \times K_{vm}}{T_A} \times \Delta m - \frac{K_A \times K_{vDC}}{T_A} \times \Delta V_{DC} - \frac{1}{T_A} \times \Delta E_{fd}$$

$$\dot{\Delta E_q} = \frac{-K_A}{T_{d0}} \times \Delta \delta + \frac{1}{T_{d0}} \times \Delta E_{fd} - \frac{K_{qDC}}{T_{d0}} \times \Delta V_{DC} \quad (4)$$

$$- \frac{K_{qm}}{T_{d0}} \times \Delta m - \frac{K_3}{T_{d0}} \times \Delta E_q$$

$$\dot{\Delta V_{DC}} = K_{DCm} \times \Delta m - K_8 \times \Delta E_q + K_7 \times \Delta \delta - K_9 \times \Delta V_{DC} \quad (5)$$

$$\dot{\Delta P_e} = K_1 \times \Delta \delta + K_{pDC} \times \Delta V_{DC} + K_2 \times \Delta E_q + K_{pm} \times \Delta m \quad (6)$$

در روابط (۱) تا (۶)،  $\Delta \delta$ : تغییرات زاویه روتور ژنراتور سنکرون،  $\Delta \omega$ : تغییرات سرعت زاویه ای روتور ( $\frac{rad}{sec}$ )،  $\Delta P_m$ : تغییرات توان خروجی توربین،  $\Delta P_e$ : تغییرات توان ژنراتور،  $M$ : اینرسی،  $D$ : ضریب میرایی،  $\Delta E_q$ : تغییرات ولتاژ داخلی ژنراتور،  $\Delta E_{fd}$ : تغییرات ولتاژ سیم پیچ تحریک،  $\Delta m$ : سیگنال تولیدی توسط کنترل کننده پیشنهادی برای SSSC،  $K_A$ : بهره سیم پیچ تحریک،  $T_A$ : ثابت زمانی سیم پیچ تحریک و  $T_{d0}$ : ثابت زمانی مدار باز است.

### ۳- طراحی کنترل کننده پیش بین مقاوم:

#### ۳-۱- هدف طراحی

هدف از طراحی کنترل کننده (کنترل پیش بین مقاوم) در این مقاله، میرا کردن نوسانات فرکانس پایین سیستم قدرت با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای سیستم قدرت و اغتشاشات وارد بر سیستم قدرت است. دامنه مدولاسیون SSSC که با شاخص  $m$  نشان داده شده است، یک سیگنال کنترلی ( $\Delta m$ ) برای میرا کردن بهتر نوسانات فراهم می کند.

#### ۳-۲- مدل فضای حالت سیستم قدرت با در نظر

##### گرفتن SSSC

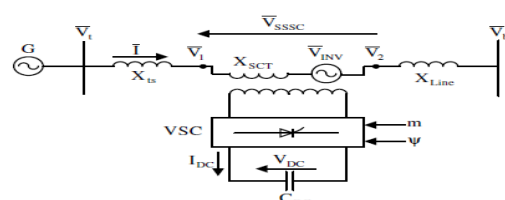
ابتدا مدل فضای حالت پیوسته سیستم قدرت با جبران ساز سری استاتیکی (SSSC) به وسیله روابط (۷) و (۸) نشان داده شده است. سپس با روش گسسته سازی اولر، معادلات فضای حالت سیستم را از حالت پیوسته (روابط (۷)، (۸)) به فرم گسسته به وسیله رابطه (۹) تبدیل شده است. در رابطه (۹)،  $T_s$  (زمان نمونه برداری) برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

#### ۳-۳- کنترل پیش بین مقاوم

##### ۳-۳-۱- کنترل پیش بین مدل (MPC)

در کنترل کننده پیش بین مدل، با حداقل کردن یک تابع هزینه، سیگنال کنترلی بدست می آید. مقادیر سیگنال کنترلی در افق کنترل

مربوط به ولتاژ تزریق شده سری  $\psi$ : زاویه فاز مربوط به ولتاژ تزریق شده سری است [۴،۵]. ولتاژ خروجی در SSSC همزمان با کنترل زمان هدایت سویچ های واقع در مبدل منبع ولتاژ صورت می گیرد و تحت هر شرایطی با تنظیم ولتاژ SSSC توان خط انتقال کنترل می گردد. توان مورد نیاز در SSSC برای تبادل با سیستم مطابق شکل (۱) از طریق یک خازن که در سمت DC مبدل قرار دارد تامین می شود. در صورتی که منبع DC توان لازم برای تامین انرژی را داشته باشد، می توان ولتاژ تزریق شده به خط ( $V_{INV}$ ) را از نظر زاویه و فاز کنترل کرد. بنابراین SSSC قادر است با خط توان اکتیو و راکتیو با سیستم مبادله کند، اگر تنها هدف مبادله توان راکتیو با سیستم باشد، اندازه منبع کوچک است و وجود یک خازن جهت عملکرد یک مبدل کافی است. در جبران سازی توان راکتیو به وسیله SSSC تنها اندازه ولتاژ قابل کنترل است، چون بردار ولتاژ تزریق شده عمود بر جریان خط است و ولتاژ تزریق شده سری به خط می تواند ۹۰ درجه عقب تر یا جلوتر از جریان باشد و در نتیجه عملکرد SSSC شبیه یک راکتور سری یا خازن سری قابل کنترل است. تفاوت آن با خازن سری در این است که ولتاژ تزریق شده به وسیله SSSC به جریان خط مربوط نمی باشد و می توان آن را به طور مستقل کنترل نمود و بنابراین در حالت پرباری و کم باری می توان موثر واقع شود. با توجه به اینکه SSSC می تواند ولتاژ خازنی یا سلفی در خط تولید کند، بنابراین می توان، توان خط را افزایش یا کاهش داد و شرایط مطلوبتری برای میرا سازی نوسانات به وجود آورد. عملکرد SSSC بر مبنای تکنیک مدولاسیون پهنای باند  $PWM^8$  صورت گرفته است [۱۰،۱۳،۲۱].



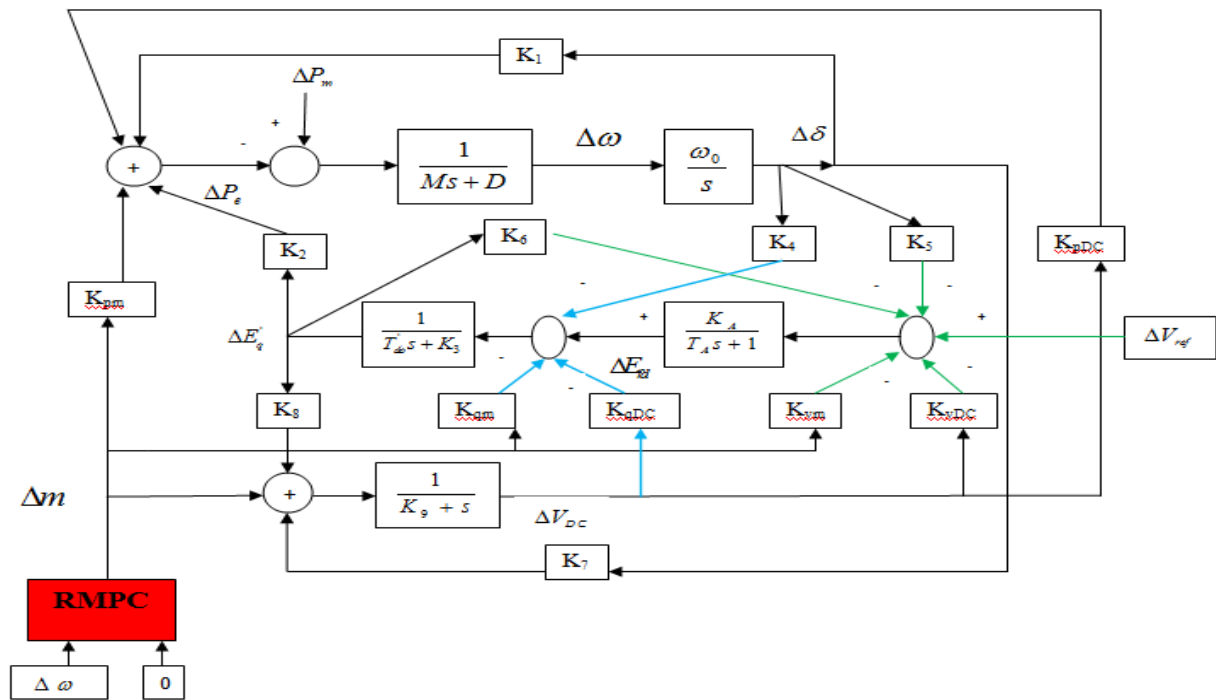
شکل (۱): ساختار SSSC در سیستم قدرت تک ماشینه متصل به باس بی نهایت [۱۳،۲۱]

#### ۲-۲- مدل سیستم قدرت با جبران سازی سری

##### استاتیکی (SSSC)

به منظور آنالیز نوسانات سیستم قدرت از مدل سیگنال کوچک استفاده شده است. مدل سیگنال کوچک سیستم قدرت تک ماشینه متصل به باس بی نهایت با در نظر گرفتن کنترل کننده برای SSSC به وسیله مدل هفرون فیلیپس در شکل (۲) نشان داده شده است. با خطی کردن معادلات دینامیکی غیرخطی به خطی حول نقطه کار، معادلات سیستم قدرت به صورت رابطه (۱) تا (۶) نشان داده شده است [۱۳،۱۴].

$$\dot{\Delta \delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (1)$$



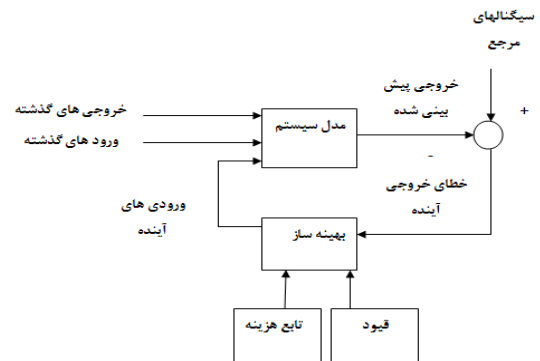
شکل (۲): مدل هفرون-فیلیپس سیستم تک ماشین متصل به باس بینهایت با SSSC

$$[y] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_{DC} \end{bmatrix} \quad (8)$$

طوری تعیین می‌شوند که خروجی سیستم در آینده بر روی افق معین، مسیر مرجع تعیین شده را دنبال کند. برای این منظور باید تابع هزینه، که عموماً به صورت مربع انحراف متغیرهای کنترل شونده از مقدار مطلوب و مجموع مربعات سیگنال‌های کنترلی در نظر گرفته می‌شود، حداقل شود. شکل (۳) ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین را نشان می‌دهد [۲۶-۲۳].

### ۳-۲-۳- تبدیل کنترل‌کننده پیش‌بین مدل به کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم

در رابطه (۱۰) فرم معادلات فضای حالت سیستم قدرت به شکل گسسته نشان داده شده است، رابطه (۱۱) تابع هدف کنترل‌کننده پیش‌بین مدل است. در رابطه (۱۱)،  $J(k)$ : تابع هزینه در لحظه  $k$ ،  $N_2$ : افق پیش‌بینی بالایی،  $Q$ : ضریب وزن‌دهی،  $R$ : ضریب وزن و  $u(k+i)$ : سیگنال کنترلی است. کنترل‌کننده (کنترل پیش‌بین مقاوم) برای SSSC در سیستم قدرت باید طوری طراحی شود که هم در برابر اغتشاشات بار و هم در مقابل عدم قطعیت پارامترها (عدم قطعیت در اینرسی سیستم قدرت) مقاوم باشد. بنابراین ابتدا در مسئله کنترل پیش‌بین مدل باید عدم قطعیت را وارد کرد، برای در نظر کردن گرفتن عدم قطعیت، از عدم قطعیت چند وجهی که در رابطه (۱۲) بیان شده است، استفاده شده است.



شکل (۳): ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین مدل [۲۴، ۲۳]

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_{DC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_1 & -D & -K_2 & 0 & -K_{pDC} \\ M & M & M & 0 & M \\ -K_4 & 0 & -K_3 & 1 & -K_{dDC} \\ T_{do} & T_{do} & T_{do} & T_{do} & T_{do} \\ -K_A K_3 & 0 & -K_A K_6 & -1 & -K_A K_{vDC} \\ T_A & T_A & T_A & T_A & T_A \\ K_7 & 0 & K_8 & 0 & -K_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_{DC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_{pm} \\ M \\ -K_{qm} \\ M \\ -K_A K_{vm} \\ T_A \\ K_{DCm} \end{bmatrix} \Delta m \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta(k+1) \\ \Delta\omega(k+1) \\ \Delta E_q'(k+1) \\ \Delta E_{fd}(k+1) \\ \Delta V_{DC}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_s\omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_1T_s}{M} & (1-\frac{DT_s}{M}) & \frac{-K_2T_s}{M} & 0 & \frac{-K_{pDC}T_s}{M} \\ \frac{-K_4T_s}{T_{do}} & 0 & (1-\frac{K_3T_s}{T_{do}}) & \frac{T_s}{T_{do}} & \frac{-K_{dDC}T_s}{T_{do}} \\ \frac{-K_AK_5T_s}{T_A} & 0 & \frac{-K_AK_6T_s}{T_A} & (1-\frac{T_s}{T_A}) & \frac{-K_AK_{vDC}T_s}{T_A} \\ K_7T_s & 0 & K_8T_s & 0 & (1-K_9T_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta(k) \\ \Delta\omega(k) \\ \Delta E_q'(k) \\ \Delta E_{fd}(k) \\ \Delta V_{DC}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-K_{pm}T_s}{M} \\ \frac{-K_{qm}T_s}{M} \\ \frac{-K_AK_{vm}T_s}{T_A} \\ \frac{K_{DCm}T_s}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta m(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\min_j j(k) \quad (11)$$

$$u(k+i), i=1, 2, \dots, N_2$$

$$j(k) = \sum_{i=0}^{N_2} (x(k+i)^T Q_1 x(k+i) + u(k+i)^T R u(k+i))$$

مدل چند وجهی است. محدودیت بر روی ورودی سیستم به صورت رابطه (۲۴) قرار داده شده است. که با استفاده از نامساوی ماتریسی تبدیل به رابطه (۲۵) شده است. محدودیت بر روی خروجی سیستم به صورت رابطه (۲۶) قرار داده شده است. که با استفاده از نامساوی ماتریسی تبدیل به رابطه (۲۷) شده است. اثبات روابط (۱۰) تا (۲۷) در مراجع [۲۷-۳۰] آورده شده است.

$$\Omega = Co\{[A_1, B_1], [A_2, B_2], \dots, [A_L, B_L]\} \quad (13)$$

$$\min_{u(k+i), i=1, 2, \dots, N_2} \max_{[A(k+i), B(k+i)] \in \Omega} j_{\infty}(k) \quad (14)$$

$$u(k+i) = Fx(k+i) \quad (15)$$

$$j_{\infty} < V(x(k)) \quad (16)$$

$$V(x(k)) = x^T(k) P x(k) \quad (17)$$

$$V(x(k+i+1|k)) - V(x(k+i|k)) \quad (18)$$

$$< -(x(k+i|k)^T Q_1 x(k+i|k) + u(k+i|k)^T R u(k+i|k)) \quad (19)$$

$$\min_{u(k+i), i=1, \dots, N_2} V(x(k)) \quad (20)$$

$$\min_{x^T(k) P x(k) \leq \eta} \eta \quad (21)$$

$$\min_{\gamma, Q, Y} \gamma \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & x^T(k) \\ x(k) & Q \end{bmatrix} \geq 0 \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} Q & Q A_j^T + Y^T B_j^T & Q Q_1^{\frac{1}{2}} & Y^T R^{\frac{1}{2}} \\ A_j Q + B_j Y & Q & 0 & 0 \\ Q_1^{\frac{1}{2}} Q & 0 & \eta I & 0 \\ \frac{1}{R^2} Y & 0 & 0 & \eta I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (24)$$

$$j=1, 2, \dots, L$$

$$\|u(k+i|k)\|_2 \leq u_{\max} \quad (25)$$

$$[A(k) \ B(k)] \in \Omega \quad (12)$$

$A(k), B(k)$  ماتریس دینامیکی متغیر با زمان هستند، در یک مجموعه محدب  $\Omega$  شامل تمام احتمالات برای  $A(k), B(k)$  وجود دارد که در رابطه (۱۳) بیان شده است. بنابراین تابع هدف مسئله کنترل پیش‌بین با وارد کردن عدم قطعیت به شکل رابطه (۱۴) است. هدف در مسئله کنترل پیش‌بین مقاوم این است که ضرایب  $F$  در رابطه (۱۵) را به گونه ای پیدا شود که در یک افق پیش‌بین بی‌نهایت تابع هزینه (رابطه (۱۴)) را کمینه کند، با بدست آوردن سیگنال کنترلی  $F$  آن به فرآیند اعمال می‌شود، خروجی اندازه‌گیری شده و مسئله بهینه‌سازی دوباره حل می‌شود، برای اینکه مسئله کمینه (min) بر روی بیشینه (max) حالت عدم قطعیت امکان‌پذیر باشد برای رابطه (۱۱) یک کران بالا به صورت تابع لیپانوف در رابطه (۱۶) تعریف شده است. رابطه (۱۷) تعریف تابع لیپانوف است. با توجه به رابطه (۱۶) و (۱۷) اگر ماتریس  $P$  پیدا شود که از تابع هزینه بزرگتر باشد برای کلیه حالت‌های عدم قطعیت در ماتریس  $P$  لحاظ شده است برای اینکه تابع لیانوف پایدار شود باید  $V(k+1) - V(k) < 0$  باشد و  $P > 0$  باشد، بنابراین با فرض رابطه (۱۸)، اگر طرف چپ رابطه (۱۸) را از  $i=0$  تا  $i=\infty$  با هم جمع کنیم، از طرف چپ،  $-V(x(k))$  و طرف راست،  $-j_{\infty}$  بدست می‌آید. در نهایت منجر به رابطه (۱۹) می‌شود و در نهایت برای تابع هزینه کران بالا پیدا شده است. بنابراین رابطه (۱۹) به یک تابع لیپانوف مربعی که به طور ضمنی عدم قطعیت‌های سیستم را در ذات خودش دارد تبدیل شد، با تعریف یک کران بالا برای رابطه (۱۹)، رابطه (۲۰) حاصل شده است. رابطه (۲۱) اصلاح شده رابطه (۲۰) با در نظر گرفتن قیود برای حل مسئله کنترل پیش‌بین مقاوم است. برای حل مسئله قیود رابطه (۲۱) به صورت نامساوی ماتریس خطی با استفاده از schur complement به صورت رابطه (۲۲) درآورده شده است. همچنین شرط پایداری تابع لیپانوف به وسیله رابطه (۲۳) نشان داده شده است. در رابطه (۲۳)،  $L$  تعداد گوشه در

در سناریو اول به بررسی اغتشاشات وارد بر سیستم قدرت با در نظر گرفتن SSSC مجهز به کنترل کننده پیشنهادی و سایر کنترل کننده های مختلف پرداخته شده است. در سناریو دوم به بررسی اغتشاشات وارد بر سیستم قدرت همراه با تغییر پارامترهای سیستم (تغییر اینرسی (M) به میزان ۳۰٪) با در نظر گرفتن SSSC مجهز به کنترل کننده پیشنهادی و سایر کنترل کننده های مختلف پرداخته شده است. در سناریو سوم به بررسی اغتشاشات وارد بر سیستم قدرت همراه با تغییر پارامترهای سیستم قدرت (تغییر اینرسی (M) به میزان ۳۰٪) با در نظر گرفتن SSSC مجهز به کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده پیش بین مقاوم) با SSSC مجهز به کنترل کننده PI فاز [۱۳] و کنترل کننده PI که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده [۲۱]، مقایسه شده است. در سناریو چهارم اغتشاشات به صورت پله ای و شدید به سیستم قدرت اعمال شده اند و به مقایسه SSSC مجهز به کنترل کننده های مختلف پرداخته شده است. در سناریو پنجم و ششم به مقایسه SSSC مبتنی بر کنترل کننده پیشنهادی و SSSC مبتنی بر کنترل کننده پیش فاز-پس فاز فاز بهینه با الگوریتم اصلاح شده نهنگ [۲۲] و SSSC مبتنی بر کنترل کننده پیش فاز-پس فاز فاز بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات [۲۲] پرداخته شده است.

سناریو (۱): در این سناریو ابتدا مطابق شکل (۲) و بر اساس داده های سیستم قدرت (پیوست) و جبرانسازی سری استاتیکی (SSSC) اغتشاشی به اندازه  $\Delta P_m = 10\%$  در زمان  $t = 5 \text{ sec}$  در سیستم قدرت روی داده شده است. در شکل (۵) تغییرات سرعت زاویه ای روتور بر حسب زمان و بر اساس کنترل کننده های مختلف نشان داده شده است، بر این اساس SSSC مجهز به کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده پیش بین مقاوم) نسبت به SSSC مجهز به کنترل کننده PI فاز [۱۳] و PI که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده [۲۱] از لحاظ سرعت پاسخ، کاهش فروجهش و کاهش فراجهش دارای عملکرد مطلوبتری است.

سناریو (۲): در این سناریو مطابق شکل (۲) و بر اساس داده های سیستم قدرت (پیوست) و جبرانسازی سری استاتیکی (SSSC) اغتشاشی به اندازه  $\Delta P_m = 10\%$  در  $t = 5 \text{ sec}$  در سیستم قدرت با در نظر گرفتن تغییر پارامترها (افزایش در پارامتر M به میزان ۳۰٪) روی داده شده است. شکل (۶) تغییرات سرعت زاویه ای روتور بر حسب زمان و بر اساس کنترل کننده های مختلف نشان داده شده است، بر این اساس SSSC مجهز به کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده پیش بین مقاوم) نسبت به SSSC مجهز به کنترل کننده PI فاز [۱۳] و PI که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده [۲۱] از لحاظ مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترها و اغتشاشات، سرعت پاسخ، کاهش فروجهش و کاهش فراجهش دارای عملکرد مطلوبتری است.

سناریو (۳): در این سناریو مطابق شکل (۲) و بر اساس داده های سیستم قدرت (پیوست) و جبرانسازی سری استاتیکی (SSSC) اغتشاشی به اندازه  $\Delta P_m = 10\%$  در زمان  $t = 5 \text{ sec}$  در سیستم

$$\begin{bmatrix} u_{\max}^2 I & Y \\ Y^T & Q \end{bmatrix} \geq 0 \quad (25)$$

$$\|y(k+i|k)\|_2 \leq y_{\max} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} Q & (A_j Q + B_j Y)^T C^T \\ C(A_j Q + B_j Y)^T C^T & Q \end{bmatrix} \geq 0 \quad (27)$$

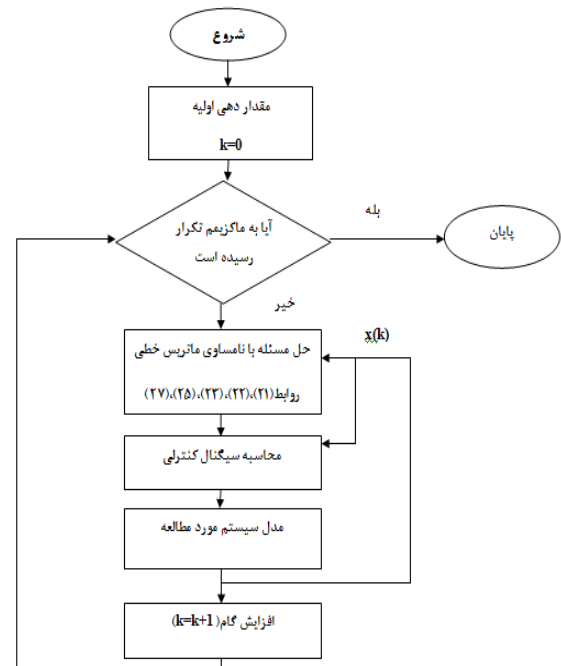
$j = 1, 2, \dots, L$

### ۴-۳- طراحی روش کنترلی پیش بین مقاوم برای مسئله

- (۱) بدست آوردن معادلات فضای حالت پیوسته سیستم
  - (۲) تبدیل فضای حالت پیوسته سیستم به فضای حالت گسسته با استفاده از روش تقریبی اوایلر
  - (۳) مینیمم کردن رابطه (۲۱) تحت قیود (رابطه (۲۲)، رابطه (۲۳)، رابطه (۲۵)، رابطه (۲۷)) (متغیرهای مسئله  $(Y, Q, \gamma)$ )
  - (۴) بدست آوردن سیگنال کنترلی  $F = YQ^{-1}$  و اعمال آن به سیستم.
- فلوچارت روش پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است.

### ۴-۴- شبیه سازی

به منظور مقایسه SSSC مجهز به کنترل کننده پیش بین مقاوم در مسئله بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت با SSSC مجهز به سایر کنترل کننده های مختلف، شبیه سازی در متلب شش سناریو انجام شده است.



شکل (۴): فلوچارت روش پیشنهادی

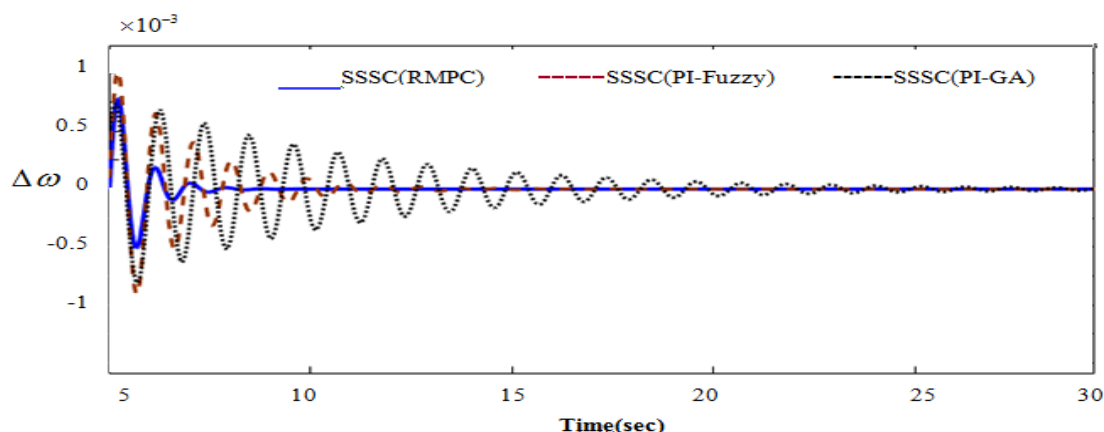


بهینه شده [۲۱] دارای حداکثر فراجش کمتر، حداکثر فروجهش کمتر و زمان نشست سریعتری است. در سناریو (۲)، کنترل کننده پیشنهادی با توجه به عدم قطعیت پارامترها و همچنین اغتشاشات، نوسانات سرعت زاویه‌ای روتور را سریعتر میرا کرده است و SSSC مجهز به کنترل کننده‌های دیگر [۱۳، ۲۱] میرا نشده‌اند. در سناریو (۳)، کنترل کننده پیشنهادی با توجه به عدم قطعیت پارامترها و همچنین اغتشاشات، نوسانات سرعت زاویه‌ای روتور را سریعتر میرا کرده است و SSSC مجهز به کنترل کننده‌های دیگر [۱۳، ۲۱] در زمانهای بسیار بیشتر میرا شده‌اند.

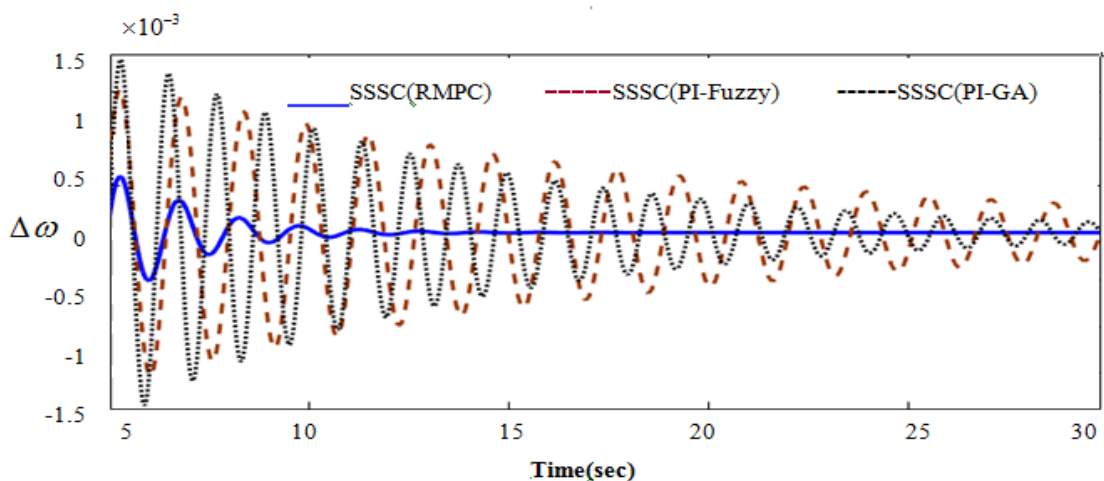
سناریو (۴): در این سناریو ابتدا مطابق شکل (۲) بر اساس داده‌های سیستم قدرت (پیوست) و جبرانسازی سری استاتیکی (SSSC)، اغتشاشات شدیدی مطابق شکل (۸) در سیستم قدرت بدون در نظر گرفتن تغییر پارامتر روی داده است. شکل (۹) تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب زمان و بر اساس کنترل کننده‌های مختلف نشان داده شده است، بر این

قدرت با در نظر تغییر پارامترها (کاهش در پارامتر  $M$  به میزان ۳۰٪) روی داده است. شکل (۷) تغییرات سرعت زاویه روتور بر حسب زمان و بر اساس کنترل کننده‌های مختلف نشان داده شده است، بر این اساس SSSC مجهز به کنترل کننده پیشنهادی (کنترل کننده پیش‌بین مقاوم) نسبت به SSSC مجهز به کنترل کننده PI فاز [۱۳] و PI که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده [۲۱] از لحاظ مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترها و اغتشاشات، سرعت پاسخ، کاهش فروجهش و کاهش فراجش دارای عملکرد مطلوبتری است.

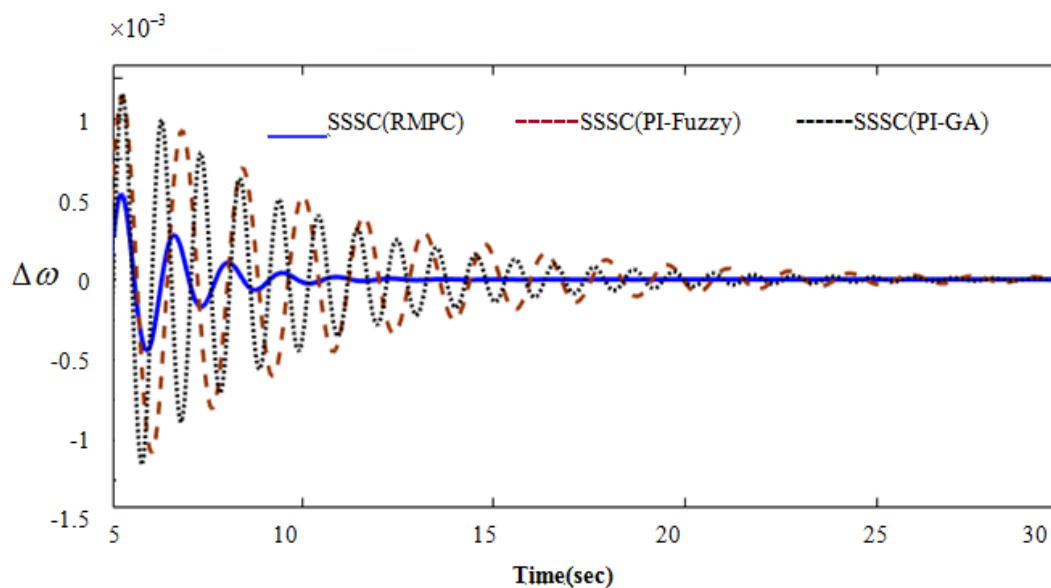
جدول (۱) نتایج سه سناریو بر اساس کنترل کننده‌های مختلف را نشان داده است. بر اساس جدول (۱) و سناریو (۱)، SSSC مجهز به کنترل کننده پیش‌بین مقاوم نسبت به SSSC مجهز به کنترل کننده PI فاز [۱۳] و PI که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده [۲۱] دارای حداکثر فراجش کمتر، حداکثر فروجهش کمتر و زمان نشست سریعتری است، در سناریو (۲) و (۳) مطابق جدول (۱) و با توجه به عدم قطعیت پارامتر سیستم قدرت ( $M$  به میزان  $\pm 30\%$ ) SSSC مجهز به کنترل کننده پیش‌بین مقاوم نسبت به SSSC مجهز به کنترل کننده PI فاز [۱۳] و PI که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک



شکل (۵): تغییرات سرعت زاویه روتور بر حسب زمان (سناریو (۱))



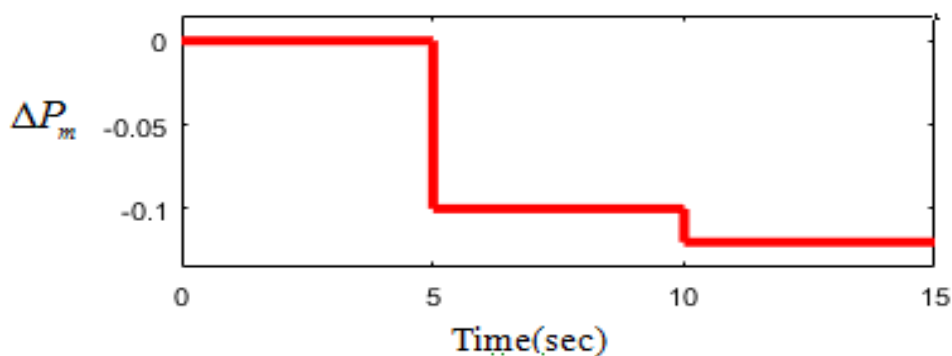
شکل (۶): تغییرات سرعت زاویه روتور بر حسب زمان (سناریو (۲))



شکل (۷): تغییرات سرعت زاویه روتور بر حسب زمان (سناریو (۳))

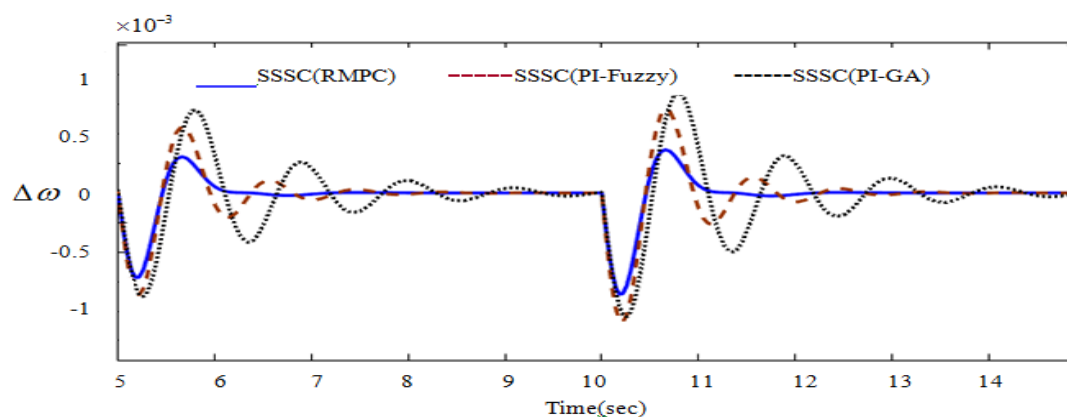
جدول (۱): نتایج شبیه سازی SSSC مجهز به کنترلرهای مختلف

SSSC مجهز به کنترل کننده های تکمیلی	سناریو (۱)			سناریو (۲)			سناریو (۳)		
	حداکثر فراجهش	حداکثر فروجهش	زمان نشست (ثانیه)	حداکثر فراجهش	حداکثر فروجهش	زمان نشست (ثانیه)	حداکثر فراجهش	حداکثر فروجهش	زمان نشست (ثانیه)
کنترل کننده پیش بین مقاوم (RMPC)	۰/۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۵	۲/۹۴	۰/۰۰۰۵	-۰/۰۰۰۳	۶/۳۵	۰/۰۰۰۴۲	-۰/۰۰۰۳۷	۵/۷۸
PI فازی	۰/۰۰۱۰	-۰/۰۰۰۹	۷/۳۶	۰/۰۰۱۲	-۰/۰۰۱۰	-	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۱۱	۲۴/۸۳
PI بهینه شده با الگوریتم ژنتیک (GA)	۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۷	۲۴/۷۶	۰/۰۰۱۵	-۰/۰۰۱۵	-	۰/۰۰۱۱	-۰/۰۰۱۲	۲۳/۹۲



شکل (۸): تغییرات بار (سناریو (۴))





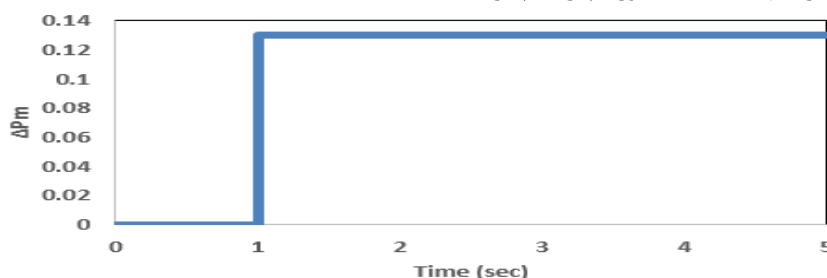
شکل (۹): تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب زمان (سناریو (۴))

[۲۲]، از لحاظ سرعت پاسخ، کاهش فروجهش و کاهش فراجاهش دارای عملکرد مطلوبتری است.

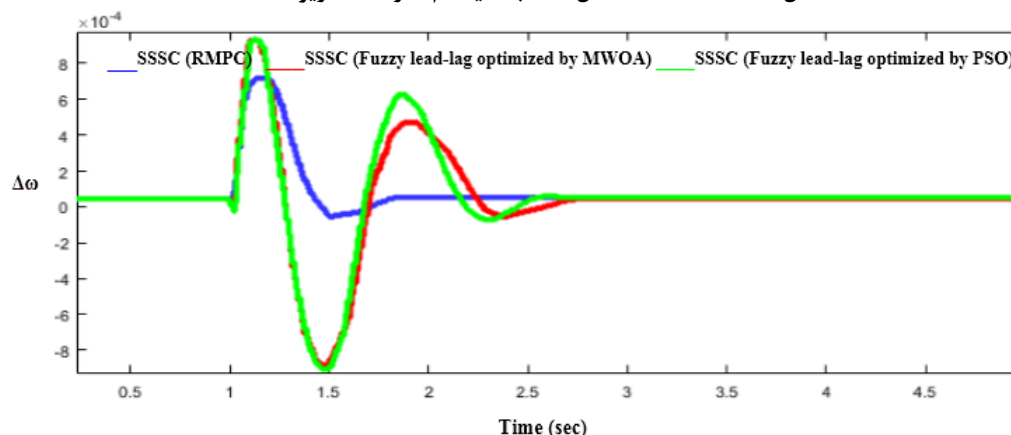
سناریو (۶): در این سناریو اغتشاشی پله‌ای مطابق شکل (۱۲) در سیستم قدرت روی داده است. در شکل (۱۳) تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور در سیستم قدرت بر حسب زمان و بر اساس کنترل‌کننده‌های مختلف نشان داده شده است، بر این اساس SSSC مجهز به کنترل‌کننده پیشنهادی (کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم) نسبت به SSSC مبتنی بر کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز فازی بهینه شده با الگوریتم اصلاح شده نهنگ [۲۲] و SSSC مبتنی بر کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز فازی بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات [۲۲]، از لحاظ سرعت پاسخ، کاهش فروجهش و کاهش فراجاهش دارای عملکرد مطلوبتری است.

اساس SSSC مجهز به کنترل‌کننده پیشنهادی (کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم) نسبت به SSSC مجهز به کنترل‌کننده PI فازی و PI که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده از لحاظ سرعت پاسخ، کاهش فروجهش و کاهش فراجاهش دارای عملکرد مطلوبتری است.

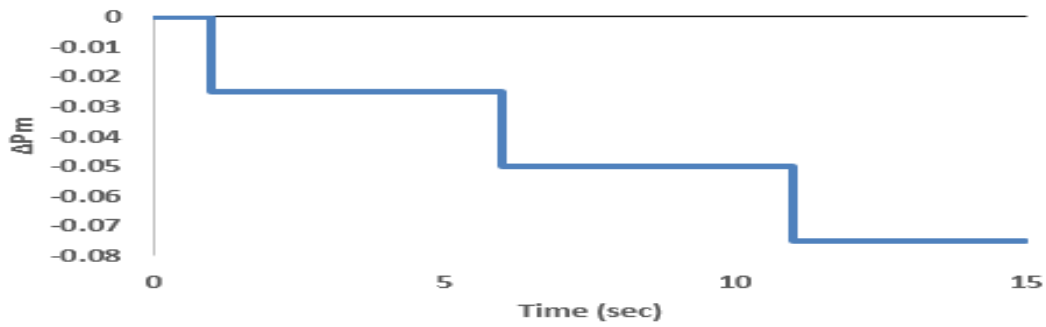
سناریو (۵): در این سناریو ابتدا مطابق شکل (۲) و بر اساس داده‌های سیستم قدرت (پیوست) و جبرانسازی سری استاتیکی (SSSC) اغتشاشی مطابق شکل (۱۰) در سیستم قدرت روی داده است. در شکل (۱۱) تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب زمان و بر اساس کنترل‌کننده‌های مختلف نشان داده شده است، بر این اساس SSSC مجهز به کنترل‌کننده پیشنهادی (کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم) نسبت به SSSC مبتنی بر کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز فازی بهینه شده با الگوریتم اصلاح شده نهنگ [۲۲] و SSSC مبتنی بر کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز فازی بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات



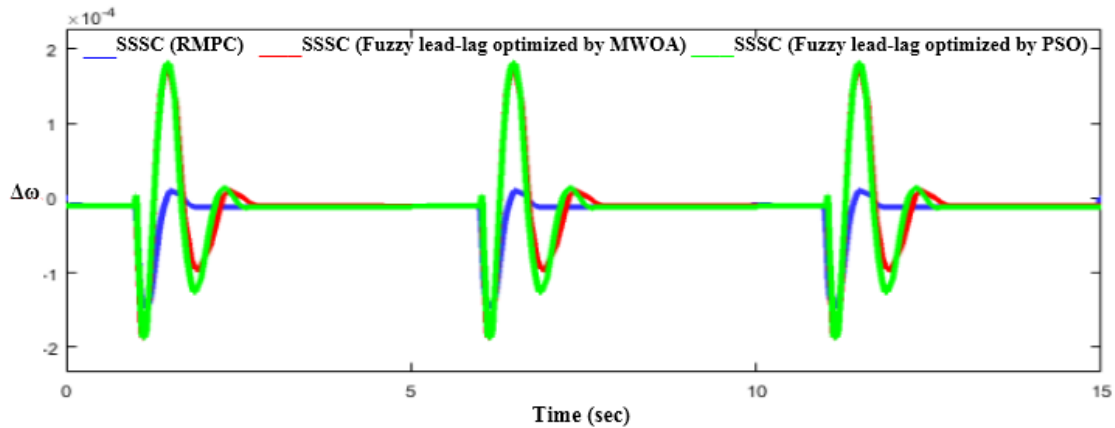
شکل (۱۰): اغتشاشات اعمال شده به سیستم قدرت (سناریو (۵))



شکل (۱۱): تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب زمان (سناریو (۵))



شکل (۱۲): اغتشاشات اعمال شده به سیستم قدرت (سناریو (۶))



شکل (۱۳): تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور بر حسب زمان (سناریو (۶))

پیوست:

مشخصات سیستم قدرت مورد مطالعه [۲۱]:

متغیر	مقدار	متغیر	مقدار
M	$6 \frac{MJ}{MVA}$	$P_e$	$8 pu$
D	0	$Q_e$	$0.144 pu$
$T'_{d0}$	$5.044 s$	$V_b$	$1 pu$
$X_d$	$0.1 pu$	m	6
$X_q$	$0.06 pu$	$K_1$	1.9014
$X'_d$	$0.025 pu$	$K_2$	0.6735
$f_0$	$60 Hz$	$K_3$	1.1429
$\omega_0$	$2\pi f_0$	$K_4$	0.0498
$K_A$	5	$K_5$	-0.0127
$T_A$	0.005	$K_6$	0.9517
$K_7$	-0.1759	$K_{pDC}$	0.0244
$K_8$	0.302	$K_{qDC}$	0.806
$K_9$	0.00014	$K_{vDC}$	-0.0035
$K_{qm}$	0.0354	$K_{vm}$	-0.008
$K_{DCm}$	-0.4255	$K_{pm}$	0.0839

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به میرا کردن نوسانات فرکانس پایین با جبرانسازی سری استاتیکی (SSSC) بر اساس کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم در سیستم قدرت تک ماشین (SIMB) پرداخته شد. سیگنال تولیدی توسط کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم به عنوان سیگنال کنترلی برای میرا کردن نوسانات سیستم قدرت مورد استفاده قرار گرفته است. از کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم بر اساس نامعادلات ماتریس خطی (LMI) برای بهینه کردن تابع هدف و در نهایت بدست آوردن سیگنال کنترلی استفاده شد. شبیه‌سازی در چند سناریو با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای و اغتشاشات بار صورت گرفت و با توجه به نتایج شبیه‌سازی بر اساس سناریوهای مختلف در متلب، SSSC مجهز به کنترل‌کننده پیشنهادی (کنترل‌کننده پیش‌بین مقاوم) نسبت به SSSC مجهز به کنترل‌کننده PI فازی، SSSC مجهز به کنترل‌کننده PI که ضرایب آن با الگوریتم ژنتیک بهینه شده و SSSC مبتنی بر کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز فازی بهینه، از لحاظ مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترها و اغتشاشات، سرعت پاسخ، کاهش فروجهش و کاهش فراجهش دارای عملکرد مطلوب‌تری است.

## مراجع

- & SSSC", 2013 International Mutli-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s), pp. 200-206, 2013.
- [16] Falehi, A. D., Rostami, M., & Doroudi, A., "Coordinated Design of PSSs and SSSC-based Damping Controller based on GA Optimization Technique for Damping of power system Multi-Mode Oscillations", In 2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, pp. 199-204). IEEE, 2011.
- [17] Truong, D. N., Tran, Q. C., Tran, P. N., & Thi, M. N., "ANFIS Damping Controller Design for SSSC to Improve Dynamic Stability of a Grid Connected Wind Power Systems. In 2018 International Conference on System Science and Engineering, pp. 1-5, IEEE, 2018.
- [18] Falehi, A. D., & Mosallanejad, A., "Neoteric HANFISC-SSSC based on MOPSO Technique Aimed at Oscillation Suppression of Interconnected Multi-Source Power Systems", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 7, pp. 1728-1740, 2016.
- [19] Wang, L., & Truong, D. N., "Comparative Stability Enhancement of PMSG-based Offshore Wind Farm Fed to An SG-based Power System using An SSSC and An SVec", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 2, pp. 1336-1344, 2012.
- [20] Rajaram, T., Muneappa, J., Xu, Y., "Kalman Filter Based Detection and Mitigation of Subsynchronous Resonance with SSSC", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.32, No. 2, pp. 1400-1409, 2017.
- [21] G.hanbari, M., Sharaf, A. M., Shariatmadar, S. M., Poudeh, M. B., "A hybrid PSS-SSSC GA-Stabilization Scheme for Damping Power System Small Signal Oscillations", Electrical Power and Energy Systems, pp. 337-344, 2016.
- [22] Sahu, P. R., Hota, P. K., & Panda, S., "Modified whale optimization algorithm for coordinated design of fuzzy lead-lag structure-based SSSC controller and power system stabilizer", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 29, No. 4, 2019.
- [23] Razavi, S., & Smailzadeh, M., "Boiler-Turbine System predictive Controller Design", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol. 13, No. 2, pp. 141-152, 2016.
- [24] Amiri, F., & Hatami, A., "A model predictive control method for load-frequency control in islanded microgrids", Computational Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 8, No. 1, pp. 9-24, 2017.
- [25] Ehsani, M., Saeidi, M., Radmanesh, H., & Abrishamifar, A., "Comparisons between Generalized Predictive Control and Linear Controllers in Multi-Input DC-DC Boost Converter", International Journal of Industrial Electronics, Control and Optimization, Vol. 3, No. 1, pp. 27-34, 2020.
- [26] Amiri, F., & Moradi, M. H., "Designing a Fractional Order PID Controller for a Two-Area Micro-Grid under Uncertainty of Parameters", Iranian Journal of Energy, Vol. 20, No. 4, pp. 49-78, 2018.
- [27] Kothare, M. V., Balakrishnan, V., & Morari, M., "Robust Constrained Model Predictive Control using Linear Matrix Inequalities", Automatica, Vol. 32, No. 10, pp. 1361-1379, 1996.
- [28] Wu, F., "LMI-based Robust Model Predictive Control and its Application to An Industrial CSTR Problem", Journal of Process Control, Vol.11, pp. 649-659, 2001.
- [29] Guo, X., Ren, H. P., & Li, J., "Robust Model-Predictive Control for a Compound Active-Clamp Three-Phase Soft-Switching PFC Converter Under Unbalanced Grid Condition", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 3, pp. 2156-2166, 2017.
- [1] Salehian, S. M., Hasanvand. H., Mozafari, B., "A Robust FACTS Damping Controller Design to Mitigate Inter area Oscillations in a Multi-machine Power System", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 14, No. 4, pp. 119-128, 2018.
- [2] Dehghani, M., Nikraves, S. K. Y., & Karrari, M., "Decentralized Robust Power System Stabilizer Design", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 4, No. 1, 36-43, 2007.
- [3] Amiri, F., Hatami, A., "Nonlinear Load frequency control of isolated microgrid using fractional order PID based on hybrid craziness-based particle swarm optimization and pattern search", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 17, No. 2, 2018.
- [4] Younesi, A., Shayeghi, H., Akbari, A., & Hashemi, Y., "Design of PSS3B stabilizer using KH Algorithm and Q-Learning for damping Low-frequency Oscillations in SMIB", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 69-77, 2017.
- [5] M. Eladany, M., Eldesouky, "Power system transient stability: An algorithm for assessment and enhancement based on catastrophe theory and FACTS devices", IEEE Access, vol.6, pp. 26424-26437, 2018.
- [6] Noroozian, M., and Anderson, G., "Damping of Power System Oscillations by Controllable Components", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, PP. 2046-2054, 1994.
- [7] Angquist, L., Lundin, B., & Samuelsson, J., "Power Oscillation Damping using Controlled Reactive Power Compensation between Series and Shunt Approaches", IEEE Transactions on Power systems, Vol. 8, No. 2, pp. 687-700, 1993.
- [8] Haque, M. H., "Determination of Additional Damping Provided by a SSSC through Evaluation of Rate of Dissipation of Transient Energy", 2004 International Conference on Power System Technology-POWERCON, Singapore, pp. 1942-1947, 2004.
- [9] Kumkratug, P., & Haque, M. H., "Improvement of Stability Region and Damping of a Power System by using SSSC", In 2003 IEEE Power Engineering Society General, Vol. 3. IEEE, 2003.
- [10] Duangkamol, K., Mitani, Y., Tsuji, K., & Hojo, M., "Fault current limiting and power system stabilization by static synchronous series compensator", In PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings, Vol. 3, pp. 1581-1586, IEEE, 2000.
- [11] Kumkratug, P., and Laohachi, P., "Direct Method for Transient Stability Assessment of a Power System with a SSSC", Journal of Computers, Vol. 2, No. 8, pp. 77-82, 2007.
- [12] Poshtan, M., Singh, B. N., & Rastgoufard, P., "A Nonlinear Control Method for SSSC to Improve Power System Stability", In 2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems, pp. 1-7, IEEE, 2006.
- [13] Zenk, H., & Akpinar, A. S., "PI, PID and Fuzzy Logic Controlled SSSC Connected to a Power Transmission Line, Voltage Control Performance Comparison", In 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, pp. 1493-1497, IEEE, 2013.
- [14] Rohal, M., "Application of SSSC based Power Oscillation Damping Controller for Transient Stability Enhancement of Multimachine System for Unsymmetrical Faults", In 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON), pp. 1-6, IEEE, 2014.
- [15] Baby, A., Thomas, J. Tibin, J., "Analysis of Voltage Collapse in the Kerala power grids using SVC, UPFC

[30] Liu, Y., Lei, H., Wu, Z., & Zhang, D., "A Robust Model Predictive Control Approach for Post-Disaster Relief Distribution", Computers & Industrial Engineering, Vol. 135, pp. 1253-1270, 2019.

## زیر نویس ها

<sup>1</sup> Electric Power Research Institute.

<sup>2</sup> Flexible AC Transmission System

<sup>3</sup> Static Synchronous Series Compensator

<sup>4</sup> Multi-Object Particle Swarm Algorithm

<sup>5</sup> Robust Model Predictive Control

<sup>6</sup> Single-Machine Power System Connected to Infinite Bus

<sup>7</sup> Linear Matrix Inequalities

<sup>8</sup> Pulse Width Modulation

