# برنامهریزی تأخیر برای بهبود میرایی نوسان توان در حضور تأخیرهای تصادفی

رسول اصغری<sup>۱</sup>، مربی؛ سید بابک مظفری<sup>۲</sup>، دانشیار؛ تورج امرایی<sup>۲</sup>، دانشیار؛محمد قنبری صباغ<sup>۲</sup>، استادیار ۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد - واحد علوم و تحقیقات تهران - ایران – r\_asghari@iau-tnb.ac.ir ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد - واحد علوم و تحقیقات تهران - ایران – mozafari@srbiau.ac.ir ۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه خواجه نصیر طوسی - تهران - ایران – mozafari@ac-in ۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران شایران - ایران سایران - mozafari@srbiau.ac.ir

چکیده: کارایی محرکها در یک سیستم تأخیر زمانی ممکن است به دلیل تحلیل پایداری محافظه کارانه محدود شود؛ یا این که نتایج بهدست آمده از روشهای بهینه سازی که در پایدارسازی سیستم کنترلی مورد استفاده قرار میگیرند نسبت به وجود تاخیرهای تصادفی غیر قابل اطمینان شود. زمانیکه در حلقه فیدبک یک سیستم کنترل میرایی نوسان توان، (POD)، برای دریافت سیگنالهای راه دور از شبکههای مخابراتی استفاده شود، طبیعتاً یک سیستم کنترل میرایی نوسان توان همراه با تأخیرهای تصادفی <sup>(</sup> (POD) شکل میگیرد. در این مقاله، یک روش جدید طراحی برای بهبود عملکرد سیستم کنترل میرایی نوسان توان همراه با تأخیرهای تصادفی <sup>(</sup> (POD-RD) شکل میگیرد. در این مقاله، یک روش جدید طراحی برای میشود. در گام اول با بهینهسازی حریم طیفی و با فرض مقدار میانگین برای تأخیرهای مخابراتی، مقدار اولیه تأخیر اعمالی به سیگنال کنترلی و نیز میشود. در گام اول با بهینهسازی حریم طیفی و با فرض مقدار میانگین برای تأخیرهای مخابراتی، مقدار اولیه تأخیر اعمالی به سیگنال کنترلی و نیز میشود. در سیگنال کنترل کننده تعیین میشوند. در گام بعد برای درنظر گرفتن اثر تصادفی تاخیرهای مخابراتی، در یک روند تکراری مقدار بهینه مقدار اولیه پارامترهای کنترل کننده تعیین میشوند. در گام بعد برای درنظر گرفتن اثر تصادفی تاخیرهای مخابراتی، در یک روند تکراری مقدار بهینه مقدار اولیه پارامترهای کنترل کننده تعیین میشوند. در این بهینه سازی هدف حداقل کردن مقدار حریم طیفی و گستاور تاخیر در سیگنال کنترلی و نیز پارامترهای بهینه کنترل کننده تعیین میشوند. در این بهینه سازی هدف حداقل کردن مقدار حریم طیفی و گستاور مرتبه دوم حول آن تعریف شده است. امکان سنجی روش پیشنهادی با شبیه سازی و آزمایش بر روی سیستم آزمون چهار ماشینه ارزیابی شده است.

**واژههای کلیدی:** برنامهریزی تأخیر، میراساز نوسان توان، تأخیرهای تصادفی، حریم طیفی.

# Delay Scheduling to Improve Power Oscillation Damping in the Presence of Random Delays

Rasool Asghari<sup>1</sup>; Babak Mozafari, Associate professor<sup>2</sup>; Tuoraj Amraee, Associate professor<sup>3</sup>; Mohammad Ghanbarisabagh, Associate professor<sup>4</sup> 1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran, Email: r\_asghari@iau-tnb.ac.ir 2. Faculty of Electrical and Computer Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran, Email: r\_asghari@iau-tnb.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran, Email: mozafari@srbiau.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of K. N. Toosi, Tehran, , Iran, Email: amraee@kntu.ac.ir 4- Faculty of Electrical Engineering and Computer Sciences, Islamic Azad University North Tehran Branch, Email: m.ghanbarisabagh@iau-tnb.ac.ir

**Abstract:** Using a conservative stability analysis to design a time delay system controller usually cause a devaluation on the actuator performance. In addition, the results obtained considering deterministic stability criteria may not be reliable due to the existence of random delays. Whenever the feedback loop of a power system oscillation damping control system receives remote signals through communication networks, we face a POD system with random delays namely POD-RD system. In this paper, a new design approach to promote the performance of a POD-RD control system is proposed based on the delay scheduling control signal method. This is a two-step method for implementation. In the first step assuming the average value of the communication random delays, the controller's parameters and also delay parameter of the control signal are determined as initial values by minimizing sperctral abscissa of the closed loop system. In the next step, to include impact of the communication random delays, a repetitive procedure is proposed to determine the optimal value of the delay parameter of the control signal and also the controller's parameters. The objective of the optimization model is to minimize the spectral abscissa and the defined second order moment. The feasibility of the proposed method is evaluated by doing a number of simulations on the standard four-machine test system. The results reveal that the method can make a robust performance in the studied system.

Keywords: Delay scheduling, power oscillation damping, random delays, spectral abscissa.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۶ ۱۳۹۶ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶ ، ۱۳۹۷/۰۷/۱۴ و ۱۳۹۷/۰۸/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹ نامانی نویسنده مسئول: ایران – تهران – حصارک – دانشگاه واحد علوم و تحقیقات – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر و مکانیک..

#### ۱– مقدمه

جنبههای اقتصادی در افزایش تبادل توان بین ناحیهای و روند افزایش انرژیهای تجدیدپذیر کاهش میرایی نوسانات بین ناحیهای را به دنبال دارد. در واقع وجود نوسانات بین ناحیهای ظرفیت انتقال توان را محدود می کند. بنابراین برای افزایش امنیت بهرهبرداری شبکه و جلوگیری از هزینههای اضافی لازم است میراسازی نوسانات بین ناحیهای سیستمهای قدرت از روشهای مطمئن و کم هزینه انجام شود [۱]. یک راهحل عملی استفاده از ظرفیت میراسازی ادوات FACTS موجود در شبکه است [۲]. هر چند جایابی مناسب این ادوات می تواند برای بهبود میرایی نوسانات بین ناحیهای موثر واقع شود [۳]، هدف اصلی از نصب آنها كنترل پخشبار است. بنابراین یک راه عملی استفاده از خروجی-هایی با رویت پذیری بالاتر خواهد بود تا به عنوان یک سیگنال تکمیلی به ورودی ادوات میراساز نوسانات بین ناحیهای اعمال شود. از آنجا که رویت پذیری خروجی های غیر محلی نسبت به محلی بیشتر است [۴]، برای تشکیل فیدبک به شبکههای مخابراتی نیاز است. این نیازمندی پدیدههای مخابره شبکهای از قبیل تأخیرهای تصادفی، گمشدن بسته٬ انتقال چند بسته و بی صفی بسته را به دنبال دارد [۵]. از آنجا که یدیدههای گمشدن بسته، بیصفی بسته و انتقال چند بسته را میتوان بهصورت تأخیرهای تصادفی معادل سازی کرد [۶]، طراحی کنترل کننده برای بهبود میرایی نوسان توان در حضور تاخیرهای مخابراتی از اهمیت بالایی برخوردار است. هر چند تحلیل پایداری سیستمهای تاخیری می-تواند به صورت مستقل از تاخیر یا وابسته به تاخیر انجام شود [۷]، پایداری وابسته به تاخیر در سیستمهای کنترل POD-RD به علت محدود بودن مقدار تأخيرهای مخابراتی بيشتر مورد توجه بوده است. نکته قابل توجه آن است که کنترلکنندهای که بر اساس یک معیار وابسته به تاخیر طراحی می شود بیشترین عملکرد میراسازی خود را بدون وجود تاخیر در حلقه بازخورد ارائه میدهد. در حالی که نتایج تجربی [۸] نشان میدهد، مقدار تأخیر در واحدهای سنجش فازوری بهطور متوسط در محدوده هفتاد و یک الی هشتاد میلی ثانیه است. البته، ترافیک یک شبکه فیبر نوری می تواند مقدار محدوده تأخیر را به ۱۷۵ تا ۳۵۰ میلی ثانیه برساند [۹]. از طرفی معیار قضاوت در مورد یک نتیجه پایدارسازی وابسته به تأخیر بر مبنای برخورداری از بیشترین حاشیه تأخير صورت مي گيرد. بنابراين نتيجه كنترل در [١٠ -١٣] ممكن است جنبههای عملکردی سیستم را محدود کند؛ در عوض مسئله کنترلی در این تحقیق بر اساس تحلیل پایداری وابسته به گستره تاخیر ۲ حل می-شود [۱۴]، در واقع طراحی سیستم کنترل POD-RD بگونهای انجام می شود که کنترل کننده بدون وجود تاخیرهای فیدبکی اثر میراسازی ناچیزی از خود نشان میدهد ولی در گستره مشخصی از تاخیرهای فیدبکی علاوه بر آن که نسبت به روشهای موجود می تواند اثر میراسازی بهتری از خود نشان دهد، از حاشیه تاخیر قابلقبولی نیز برخوردار است. از آنجا که انجام تحلیل پایداری مقاوم سیستم کنترل POD-RD با روشهای مستقیم و غیرمستقیم دشوار است، از تبدیل مدل استفاده

می شود. تبدیل مدل، پایداری سیستم را بر اساس پایدارسازی یک سیستم معادل ناپایدارتر نتیجه می گیرد. از تبدیل مدل پاد در [۱۵] از تبدیل مدل نیوتن-لایبنیتس<sup>۸</sup> در [۱۶] و پارامتری نیوتن-لایبنیتس در ۱۸–۱۷] استفاده شده است. در [۱۹] از تبدیل مدل پاد مرتبه یک استفاده شده است، پس از مدلسازی نامعینی تاخیر به صورت تبدیل کسری خطی (LFT) از روش حساسیت مرکب ۲۰ و تبدیل مسئله به حداقل برابر با مرتبه سیستم تحت کنترل است، غالبا از مدل کاهش مرتبه یافته استفاده می شود، بنابراین ممکن است مدهای فرکانس بالا در برابر آشفتگی اندک تاخیرها حساس و به ناپایداری منجر شوند؛ در عوض، این مقاله برای طراحی کنترل کننده مقاوم از جواب کمینه سازی معیاری بر حسب متغیر تصادفی حریم طیفی استفاده می کند.

انجام تحلیل مقاومت سیستم کنترل POD-RD نامعین از اهمیت ویژهای برخوردار است. شرایط پایداری را میتوان بر اساس یک روش لیاپانوف-کراسوفسکی تابعی<sup>۹</sup> یا قضیه رازومیخین ۲۰ به صورت یک LMI پیدا کرد. شرایط پایداری مبتنی بر قضیه رازومیخین بر خلاف روشهای لیاپانوف-کراسوفسکی وابسته به نرخ تغییرات تاخیر نیستند، لذا برای سیستمهای کنترل شبکهای ۲۰ مناسبترند؛ در عوض، شرایط پایداری محافظه کارانهای دارند. شرایط پایداری غیر خطی را میتوان بر اساس روش لیاپانوف-کراسوفسکی پیدا کرد و با استفاده از یک لم کرانهای انتگرالها، پردازش لازم بر روی جملات غیر خطی مشتق تابع لیاپانوف-کراسوفسکی را انجام داد و شرایط پایداری را به صورت LMI تعیین کرد. بنابراین پردازش بعضی از جملات مشتق تابع لیاپانوف-کراسوفسکی ملاحی سیستم کنترل POD نامعین شامل تأخیرهای مخابراتی در [۲۱]. بر اساس قضیه رازومیخین و در [۲۲–۲۵] با یک IMI انجام شده است، بر اساس قضیه رازومیخین و در [۲۲–۲۵] با یک IMI انجام شده است،

در [۲۶–۲۷] پیشنهاد طراحی بر اساس مدل امید ریاضی ارائه شده و کارآمدی روش پیشنهادی نسبت به نوع توزیع احتمال در مقایسه با غیر قابل اعتماد بودن نتیجه پایداری یک LMI نشان داده شده است، با این حال ممکن است توزیعهایی با میانگین یکسان و محدوده غیر یکسان به نتیجه پایداری مشترک منجر شود، یا توزیعهایی با محدوده یکسان و میانگین غیر یکسان منجر به ناپایداری اشتباه شود. این مقاله یک سیستم کنترل POD-RD را همانند شکل ۱ معرفی میکند. واضحترین تفاوت میان سیستم کنترل POD-RD با سایر سیستمهای کنترل POD در نظر گرفتن نامعینی شامل تأخیرهای تصادفی شبکه است. این تاخیردار سیگنال کنترلی در دو گام طراحی میشود. ابتدا، با میانگین سازی حریم طیفی پیدا میشوند. در گام دوم، نامعینیها شامل تأخیرهای شبکه با یک نمونه تصادفی مدانی با برنامهریزی تصادفی حل میشود و از طریق کمینهسازی معیار کوچکترین حریم طیفی تصادفی بهعلاوه جریمه میانگین مجموع مجذور فاصلهها از آن ( گشتاور مرتبه دوم از کوچکترین حریم طیفی تصادفی در این گام)، پارامترهای کنترلکننده ساختار ثابت و T تنظیم میشوند.



مدلسازی مسئله کنترلی در بخش دوم مقاله تشریح می شود، روش تحلیل پایداری در بخش سوم بیان میشود، در بخش چهارم مراحل طراحی کنترل کننده و برنامه بهینه سازی پیشنهادی تشریح میشود، در بخش پنجم مطالعه موردی و شبیهسازیها ارائه میشود و درنهایت دستاوردهای مطالعه و پیشنهادها در بخش ششم آمده است.

# ۲- مدلسازی مسئله کنترلی

ساختار سیستم کنترل POD-RD در شکل ۱ نشان داده شد. خروجی سنسورها شامل ولتاژ باسها، جریان خطوط، متغیرهای حالت در دسترس خواهند بود. در این شکل  $h_i$  نشان دهنده تأخیرهای تصادفی انتقال خروجی i ام سیستم قدرت با ارتباط شبکهای به ورودی کنترل کننده ساختار ثابت و  $p(h_i)$  نشان دهنده توزیع احتمال آن است. N یک نمونه تصادفی با بعد r که r تعداد خروجیهای سیستم قدرت، N یک نمونه تصادفی با بعد r که r تعداد خروجیهای سیستم قدرت، شامل تجهیزاتی از قبیل ادوات FACTS، کالا و سیستم قدرت شامل تجهیزاتی از قبیل ادوات به بلوک سیستم قدرت را میتوان به صورت زیر توصیف کرد:

$$\dot{x}_p(t) = \mathbf{A}_p x_p(t) + \mathbf{B}_p u_p(t)$$
(i)-1)  
$$y_n(t) = \mathbf{C}_n x_n(t)$$
(--)

 $y_p(t) = C_p x_p(t)$  (۱–۰) که در آن،  $u_p(t)$  ورودی،  $y_p(t)$  بردار r بعدی خروجیها و  $u_p(t)$  بردار n بعدی حالتها خواهند بود. بهطورکلی، مدل فضای حالت منسوب به بلوک کنترل کننده را می توان بهصورت زیر بیان کرد:

$$\dot{x}_c(t) = \mathbf{A}_c x_c(t) + \mathbf{B}_c u_c(t)$$
 (J-1)

$$y_c(t) = \mathbf{C}_c x_c(t) + \mathbf{D}_c u_c(t) \tag{(1-1)}$$

که در آن،  $x_c(t)$  بردار m بعدی حالتها،  $u_c(t)$  بردار r بعدی ورودیها و  $y_c(t)$  خروجی کنترل کننده هستند. با توجه به شکل ۱ میتوان نوشت:  $u_c(t) = y_p(t - N)$  (۳–الف)

$$u_p(t) = y_c(t-\tau) \tag{(-7)}$$

معادله فضای حالت سیستم کنترل POD-RD با استفاده از (۳) و جایگذاری در (۱) و (۲) به صورت زیر بازنویسی شود:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}\dot{x}(t) &= \mathbf{A}(k)x(t) + \mathbf{A}_{\tau}x(t-\tau) + \mathbf{A}_{N}x(t-N) \end{aligned} \tag{F} \\ & \overleftarrow{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n \times n} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{m \times m} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \ \mathbf{A}_{\tau} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{B}_{p} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \ \mathbf{A}_{\tau} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{p} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{c} & \mathbf{B}_{c} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{I}_{1 \times 1} \end{bmatrix}, \ \mathbf{A}_{N} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

# ۳- تحلیل پایداری سیستم کنترل POD-RD

 $\lambda$  حاصل جایگذاری حل نامزد  $x(t) = ve^{\lambda t}$  با یک بردار ر و یک اسکار  $\lambda$  در (۴) بهصورت

 $(\lambda \mathbf{E} - \mathbf{A}(k) - \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda \tau} - \mathbf{A}_{N} e^{-\lambda N}) v = 0$  (۵) خلاصه می شود. در اصطلاح به عبارت

$$\begin{split} \mathbf{M}(\lambda) &= \lambda \mathbf{E} - \mathbf{A}(k) - \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda \tau} - \mathbf{A}_{N} e^{-\lambda N} \end{split} \tag{8} \\ & \text{alr un mmetar allows a based on the set of the$$

 $\lambda \mathbf{E} - \mathbf{A}(k) - \mathbf{A}_{\tau}e^{-\lambda\tau} - \mathbf{A}_{N}e^{-\lambda N}| = 0$  (Y) در اصطلاح به بسط دترمینان (Y) معادله مشخصه گویند. این معادله غیرخطی است و بینهایت ریشه دارد. اکنون نمایش دنبالهای از ریشههای معادله مشخصه را بهصورت { $\lambda(k,\tau)$  در نظر بگیرید، شرط لازم و کافی برای پایداری مجانبی (F) بهصورت زیر تعریف میشود:  $\alpha(k,\tau) = \max(Re\{\lambda(k,\tau)\}) < 0, \quad i=1.7... \infty$  (A) که در آن {·}Re{ نشان دهنده قسمت حقیقی دنباله ریشههای (Y) است. در اصطلاح به  $\alpha$  شامل بیشترین مقدار قسمت حقیقی ریشههای معادله مشخصه (Y)، حریم طیفی گفته میشود.

# ۴- برنامه بهینهسازی از دیدگاه نظری

اشاره شد رویکرد ما در طراحی سیستم کنترل POD-RD بر مبنای روش برنامهریزی تأخیری سیگنال کنترلی است. در واقع سیستم کنترل POD-RD به گونه ای طراحی می شود که میرایی کلی آن بدون وجود تأخیر ضعیف خواهد بود؛ در حالیکه با افزایش یافتن تأخیر تا مقدار مشخصی، میرایی کلی آن بهبود و پس از آن کاهش پیدا خواهد کرد. این ایده را ما برای اولین بار در طراحی سیستم کنترل POD-RD پیشنهاد داده ایم؛ حال آنکه روشهای پایدارسازی وابسته به تاخیر در وضعیت بدون تاخیر میتوانند بیشترین شاخص میرایی را ارائه کنند. در ادامه، دو نوع برنامه بهینه سازی که در طراحی از آن استفاده خواهد شد، تشریح می شود:

**گام اول**: هدف در این گام، تشکیل یک نمونه تصادفی از تأخیرهای ارتباط شبکهای خواهد بود. این نمونه تصادفی را میتوان بر اساس تابع scramble.m مطلب تشکیل داد. این تابع میتواند یک نمونه شبه

تصادفی r بعدی تولید کند که هر عضو آن غیر تکراری خواهد بود و اگر برای رسیدن به دقت و اعتماد معینی به افزایش نمونه گیری نیاز باشد، عضوهای قبلی را دست نخورد نگه میدارد.

**گام دوم**: هدف در این گام، پیدا کردن یک طرح کنترل اولیه خواهد au بود. از حل مسئله بهینه سازی زیر برای پیدا کردن پارامترهای k و اوليه استفاده خواهيم كرد:

$$\min_{\tau > 0} \alpha(k, \tau) = \max \operatorname{Re}\{\lambda(k, \tau)\}$$
Subject to: (9)  

$$\left|\lambda \mathbf{E} - \mathbf{A}(k) - \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda \tau} - \mathbf{A}_{N} e^{-\lambda \mu}\right| = 0$$

$$\mu = \int_{0}^{\infty} N \cdot \mathbf{p}(\mathbf{N}) \cdot dN$$
Subject To the set of the s

از آنجا که تعریف تابع هدف حریم طیفی فقط برای یک وضعیت معین انجام پذیر است، بجای N از امید ریاضی آن در تعریف تابع هدف (٩) استفاده می کنیم. به این ترتیب، تحلیل و طراحی سیستم کنترل POD-RD را مى توان با ابزار مقدار ويژه انجام داد.

از آنجا که سرعت جستجو برای یافتن جوابهای هر مسئله بهینهسازی میتواند بر مبنای گرادیان تابع هدف افزایش پیدا کند، در حل مسئله بهینهسازی (۹) از گرادیان زیر استفاده خواهیم کرد:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \alpha}{\partial p} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} \end{bmatrix} = Re \left( \begin{bmatrix} -u^{T} \left( \frac{\partial \mathbf{A}(k)}{\partial k} \right) v \\ \frac{u^{T} (\mathbf{E} + \mu \mathbf{A}_{N} e^{-\lambda_{r}\mu} + \tau \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda_{r}\tau}) v \\ \frac{u^{T} (\lambda_{r} \mathbf{A}_{\tau} e^{-s\tau}) u}{u^{T} (\mathbf{E} + \mu \mathbf{A}_{N} e^{-\lambda_{r}\mu} + \tau \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda_{r}\tau}) v} \end{bmatrix} \right)$$
(1.)  

$$\sum_{\lambda \in \mathcal{L}} \left( \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{i} \sum_{j=1}^{N} \frac{1}{i} \sum_{j=1}^{$$

**اثبات**: حال، فرض کنید λ<sub>r</sub> بهعنوان راست ترین مقدار ویژهی ساده ماتریس مشخصه (۶) است. داریم:

$$\Delta \lambda_{r} \mathbf{E} \boldsymbol{v} + \lambda_{r} \mathbf{E} \Delta = \left( \frac{\partial \mathbf{A}(k)}{\partial k} \Delta \mathbf{k} - \lambda_{r} \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda_{r} \tau} \Delta \tau \right) \boldsymbol{v} + \left( \mathbf{A}(k) + \mathbf{A}_{N} e^{-\lambda_{r} \mu} \right) \mathbf{v} + \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda_{r} \tau} \Delta \boldsymbol{v} - \left( \mu \mathbf{A}_{N} e^{-\lambda_{r} \mu} + \tau \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda_{r} \tau} \right) \boldsymbol{v} \Delta \lambda_{r}$$
(17)

با پیش ضرب کردن (۱۲) در 
$$u^T$$
، و توجه به  $v^{-1}v = u$  و $u^T$  عرب  $u^T(\lambda \mathbf{E} - \mathbf{A}(k) - \mathbf{A}_{ au}e^{-\lambda au})\Delta v = 0$ 

$$u^{T} \left( \frac{\partial \mathbf{A}(k)}{\partial k} \Delta \mathbf{k} - \lambda_{r} \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda_{\tau} \tau} \Delta \tau \right) v$$
  
=  $u^{T} (\mathbf{E} + \mu \mathbf{A}_{N} e^{-\lambda_{\tau} \mu}$   
+  $\tau \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda_{\tau} \tau}) v \Delta \lambda_{r}$  (17)

با توجه به آن که  $\Delta \lambda_r = \Delta \alpha + j \Delta \beta$  است، (۱۳) را می توان به صورت زیر باز نویسی کرد:

$$\Delta \alpha = Real \left( \frac{u^{T} \left( \frac{\partial \mathbf{A}(k)}{\partial k} \Delta \mathbf{k} - \lambda_{r} \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda_{r} \tau} \Delta \tau \right) v}{u^{T} (\mathbf{E} + \mu \mathbf{A}_{N} e^{-\lambda_{r} \mu} + \tau \mathbf{A}_{\tau} e^{-\lambda_{r} \tau}) v} \right)$$
(1f)

رابطه فوق می تواند با در نظر گرفتن مشتق جزئی به شکل (۱۰) باز نویسی شود و اثبات را کامل کند.

توجه: حریم طیفی در یک سیستم تأخیری همانند (۴) تابعی پیوسته در k و  $\tau$  است ولی (۱۰) ممکن است به اجزای مقادیر خاصی از k و  $\tau$  منحصر به فرد نباشد [۲۸]. گرادیان مذکور زمانی منحصر به فرد نیست که قسمت حقیقی مقادیر ویژه تکراری با حریم طیفی برابر هستند. بنابراین، بهینهسازی (۹) را نمی توان از روشهای بهینهسازی توابع مشتق پذیر حل کرد. یک راه کار برای حل این مساله استفاده از روشهای بهینهسازی ترکیبی است. یکی از نرمافزارهای قدرتمند بی شک HANSO است [۲۹]. چون این نرم افزار برای بهینهسازی به مقدار و مشتق تابع هدف در نقاط مشتق پذیر نیاز دارد، بر مبنای توسعه eigAM.m [۳۰]، برنامهنویسی برای محاسبه مقدار و بردار گرادیان تابع هدف در محیط MATLAB صورت گرفته است.

گفته شد، تأخیرهای تصادفی شبکهای در فرایند بهبود میرایی نوسانات بینناحیه ای بسیار با اهمیت هستند و لازم است در مرحله طراحی کنترلکننده در نظر گرفته شوند. بنابراین، برای دستیابی به پایداری مقاوم نیاز به تنظیم k و  $\tau$  است. این موضوع در ادامه بررسی خواهد شد.

**گام سوم**: هدف اولیه در این گام، محاسبه یک متغیر تصادفی بر اساس نمونهی تصادفی N خواهد بود. حال با توجه به مقادیر فعلی k و از قسمت حقیقی راستترین مقدار ویژهی متناظر با هر یک ازauعضوهای N برای تشکیل آماره زیر استفاده می کنیم:

$$f(\mathbf{k},\tau) = \alpha_l + \frac{L}{q} \sum_{i=1}^{q} (\alpha_l - \alpha_i)^2$$
(1 $\Delta$ )

که در آن، q تعداد عضوها، L ضریب جریمه انتخابی،  $\alpha_i$  حریم طیفی متناظر با i امین عضو N و  $\alpha_l$  کمترین مقدار آن هاست.

هدف ثانویه در این گام، تنظیم مناسب پارامترهای k و  $\tau$  برای تضمین مقاومت سیستم کنترل POD-RD خواهد بود که از بهینهسازی (۱۶) برای این استفاده خواهیم کرد: (18) m

$$\inf f(\mathbf{k}, \tau)$$

از آنجا که گرادیان (۱۶) در جستجو برای تعیین جواب سراسری بسیار مهم و اثر گذار است، رابطه زیر ارائه می شود:

$$\Delta f = [1 + 2L(\overline{\alpha} + \alpha_l)]\Delta \alpha_l + 2L\overline{\alpha \Delta \alpha}$$
(17)  

$$\Delta b = [1 + 2L(\overline{\alpha} + \alpha_l)]\Delta \alpha_l + 2L\overline{\alpha \Delta \alpha}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^{q} \alpha_i$$
,  $\overline{\alpha \Delta \alpha} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^{q} (\alpha_i - \alpha_i) \Delta \alpha_i$ 

**گام چهارم**: هدف از این گام تحلیل دقت و اعتماد است. حال، با استفاده از پارامترهای بههنگام شده k و au، با افزایش حجم نمونه تصادفی N (مثلا ۵ برابر q) مشابه سازی مونت کارلو را انجام می دهیم. اگر نتایج پایداری رضایت بخش است پارامترهای k و au را تنظیم می کنیم در غیر اینصورت به گام اول باز گشته و با افزایش q (مثلا دو برابر کردن) و یا تغيير L، مراحل را تا رسيدن به جواب قابل قبول تكرار مي كنيم.

# ۵- نتایج شبیهسازی

در این بخش، روش ارائه شده بر روی یک شبکه نمونه اجرا شده است و نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. شبکه مورد مطالعه در این مقاله سیستم چهار ماشینه بوده و انتخاب اول بیشتر محققان در تحقیقات مشابه بوده است. دادههای این سیستم از [۳۱] گرفته شده و در شکل ۲ نمای تک خطی آن به همراه سیستم کنترل POD-RD پیشنهادی نشان داده شده و یک SVC به ظرفیت ۲۰۰ مگاوار نصب به شین هشتم نصب شده است.

دینامیک مولدها مرتبه شش، سیستم تحریک مرتبه یک و تنظیم-کننده ولتاژ SVC مرتبه یک در نظر گرفته شده است. بنابراین، دینامیکی سیستم آزمایش از مرتبه بیستونه است. معادله مشخصه سیستم حلقه باز بهصورت (۱۸) است:



$$\begin{split} \left| sI - A_p \right| &= s^2(s + 97.69)(s + 97.42)(s + \\ 96.02)(s + 32.48)(s + 32.32)(s + 28.15)(s + \\ 27.03)(s + 26.35)(s + 25.91)(s + 13.80)(s + \\ 13.41)(s + 4.082)(s + 4.179)(s + 3.935)(s + \\ 3.900)(s^2 + 201s + 10120)(s^2 - 0.03743s + \\ 16.150)(s^2 + 1.436s + 49.55)(s^2 + 1.426s + \\ 52.561)(s^2 + 36.32s + 573.8)(s^2 + 36.47s + \\ 721.9) \end{split}$$

ریشههای (۱۸) اشاره به بهرهبرداری ناپایدار دارد و میتوان از قابلیت دستگاه SVC برای پایدارسازی بهره برد. تغییرات زاویه ژنراتورهای دوم و چهارم از طریق ارتباط شبکهای به محل SVC ارسال میشود. ناحیه نامعینی تأخیرهای شبکه در شکل ۳ نشان دادهشده است. حال، روند طراحی سیستم کنترل POD-RD را تشریح خواهیم کرد.

**گام اول**: با استفاده از عملگر scramble.m در مطلب ۱۰۰ نمونه از ناحیه نامعینی شکل ۳ یک بار با فرض توزیع نرمال و یک بار نیز با فرض توزیع یکنواخت برداشته شد و امید ریاضی ۲۵۰ میلی ثانیه محاسبه شد. **گام دوم**: گفته شد که دریافت سیگنال های  $\delta_2(t)$  و  $(t)_4\delta$  از طریق شبکههای مخابراتی به طور میانگین ۲۵۰ میلی ثانیه تاخیر دارد، لذا به پارامترهای ا $h_1$  و  $h_1$  در شکل ۲ می توان عدد ۲/۰ را اختصاص داد.



$$\begin{split} & \frac{\delta_2}{U_p} = \frac{N_1}{D}, \frac{\delta_4}{U_p} = \frac{N_2}{D} \\ & N_1 = 0.0121(s - 245.3)(s + 30.24)(s + 9.91)(s + \\ & 0.65)(s^2 - 4.9s + 49.9)(s^2 + 1.37s + 50.4) \\ & N_2 = -0.00116(s - 118)(s + 8.37)(s^2 - 0.283s + \\ & 15.3)(s^2 + 1.39s + 49)(s^2 + 146s + 8255) \\ & D = (s + 3.97)(s^2 - 0.0457s + 16.03)(s^2 + 26.3s + \\ & 216)(s^2 + 1.38s + 48.72)(s^2 + 1.38s + 51.59) \end{split}$$

طراحی پارامترهای k<sub>1</sub> تا k<sub>1</sub>2 و τ بر مبنای بهینهسازی (۹) انجام شد و



حال به کمک مشابه سازی مونت کارلو به تحلیل مقاومت سیستم آزمایش حلقه بسته پرداخته می شود. برای این منظور تابع چگالی احتمال و فراوانی حریم طیفی در حضور توزیع یکنواخت و نرمال تأخیرهای تصادفی مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. این شکل با ۳۰۰ نمونه تصادفی نتیجه شده است. شکل ۵ نشان می دهد، سیستم حلقه بسته در برابر توزیع یکنواخت و نرمال تأخیرها از پایداری مقاوم برخوردار نیست. لذا برای برخورداری از پایداری مقاوم لازم است پارامترهای k و τ به طور مناسبی تنظیم شوند.

**گام سوم**: بهمنظور دستیابی به پایداری و عملکرد مقاوم سیستم آزمایش در برابر تأخیرهای تصادفی با توزیع یکنواخت و نرمال، تنظیم پارامترهای <sub>4</sub>۱، الی <sub>1</sub>۱۶ و ۲ اولیه بر اساس جواب بهینهسازی (۱۶) انجام

شد و نتیجه بهصورت تابع تبدیل در شکلهای ۶ الی ۱۱ برای چند ضریب جریمه L نشان داده شده است.





شکل ۱۱: نتیجه کنترل با ضریب جریمه ۹ و توزیع نرمال تاخیر گام چهارم: در ادامه سعی ما بر آن است که به کمک مشابهسازی مونت کارلو، استنباطی در مورد پایداری و عملکرد مقاوم حلقه بسته در حضور هر یک از کنترل کنندههای نشان داده شده در شکلهای ۶ الی ۷ به دست آوریم. بنابراین، ۳۰۰ نمونه دو بعدی با استفاده از تابع scramble.m ایجاد شد و در ناحیه نامعینی پارامترهای ۱۱ و ۲۵ به صورت نرمال و یکنواخت توزیع شد. سپس، تابع چگالی احتمال و فراوانی حریم طیفی سیستم حلقه بسته مورد تحلیل قرار گرفت و برای شفاف سازی نتایچ آن در شکلهای ۱۲ الی ۱۵ نشان داده می شود.

شکلهای ۱۲ تا ۱۵ نشان میدهد که رفتار پایداری تصادفی سیستم آزمایش به طور چشم گیری بهبود یافته است. شکل ۱۲ و ۱۳ به ترتیب تابع چگالی احتمال حریم طیفی سیستم آزمایش در برابر توزیع یکنواخت و نرمال h1 و h2 را نشان میدهند، در حالی که طراحی مقاوم بر اساس توزیع یکنواخت h1 و h2 انجام شده است؛ حال آن که شکل ۱۴ و ۱۵ مربوط به طراحی با توزیع نرمال هستند و به ترتیب، مربوط به مشابه سازی مونت کارلو با توزیع نرمال و یکنواخت هستند. این شکلها نشان میدهد که طراحی بر اساس توزیع یکنواخت برای شرایط واقعی





بر مبنای جواب حاصل از توزیع نرمال

با توزیع نرمال مناسب تر خواهد بود؛ حال آن که طراحی بر اساس توزیع نرمال در برابر شرایط واقعی با توزیع یکنواخت نمی تواند عمل کرد طراحی شده را ارائه دهد. با این حال، هر یک از نتایج برای شرایط متناظر می توانند عمل کرد طراحی شده را ارائه دهند.

حال سعی می کنیم شناختی از حساسیت شاخصهای آماری حریم طیفی تصادفی نسبت به ضریب جریمه L پیدا کنیم. برای این منظور جدول ۱ و ۲ که با خلاصهای از دادههای آماری حریم طیفی پر شده است، مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

جدول ۱: شاخصهای توزیع آماری حریم طیفی با توزیع یکنواخت تاخیرهای شبکه در طراحی و مشابهسازی مونت کارلو بر حسب L

L	$\alpha_l$	$\alpha_{max}$	$\overline{(\alpha_l - \alpha_l)^2}$	$\overline{(\alpha_l - \bar{\alpha})^2}$	$\bar{\alpha}$
•	-1/4801	•/4741	۰/۳۲۳۶	•/٣•۶٧	-•/۵۲•A
٣	-•/9YAA	-•/۵۲•V	•/• ٢٨٣	•/•١٨•	-•/४۴٩٧
۶	-•/AYA۵	-•/۵۴۵۵	۰/۰۰۹۵	۰/۰۰۹۵	-•/٧١٢•
٩	-•/٨۵۵٨	-•/ <b>۵</b> ۴•۲۳	٠/٠٠۶٩	•/••*	-•/Y•٣•

جدول ۲: شاخصهای توزیع آماری حریم طیفی با توزیع نرمال تاخیرهای شبکه در طراحی و مشابهسازی مونت کارلو بر حسب L

فاخيرتناي شباطه فارتطراحي والمسابة ساري مولك فارتو براحسب الأ								
L	$\alpha_l$	$\alpha_{max}$	$\overline{(\alpha_l - \alpha_l)^2}$	$\overline{(\alpha_l - \bar{\alpha})^2}$	$\bar{\alpha}$			
•	-1/4222	•/• 1199	٠/١٩٨٣	•/1817	-•/7471			
٣	-1/•787	-•/۵YY٩	•/•۲٩•	•/•177	-•/ <b>λ</b> •۲•			
۶	-•/٩٣٨۶	-•/۶١٣١	•/• ١•۴	۰/۰۱۰۵	-•/YV۵٩			
٩	-•/9174	-•/۶۱۲•	•   • • \$\$	•/•• ٧٧	-•/٧۶٢٢			

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدولهای ۱ و ۲ نتیجه می شود که با افزایش ضریب جریمه L مقدار n افزایش و  $m_{ax}$  کاهش مییابد. به بیان دیگر برای مقادیر بالای L، مقدار n و  $m_{max}$  به میانگین میل خواهند کرد. هر چند این شرایط میتواند سیستم حلقه بسته را از یک میرایی تقریبا ثابت برخوردار کند، چگالی میرایی بالاتر را تخریب کند. حال جدول ۱ را در نظر بگیرید، وقتی مقدار L از سه به شش تغییر میکند ملاحظه میشود که مقدارهای  $m_{ax}$ ، گشتاور مرتبه دوم از nو گشتاور مرتبه دوم از میانگین بهبود مییابند؛ وقتی L از شش به نه تغییر میکند، وضعیت  $m_{ax}$  خراب می شود. لذا بر اساس برازندگی پرتو، ضریب جریمه مناسب L میتواند عدد شش انتخاب شود. لذا، میراند برای دستیابی به عملکرد مقاوم سیستم کنترل کننده آزمایشی پیشنهاد میشود.

# ۶- نتيجه

در این مقاله، عملکرد سیستم کنترل میرایی نوسان توان در برابر تأخیرهای تصادفی فیدبک با روش برنامهریزی تأخیری سیگنال کنترلی بهتر شد. یک روش تحلیل تصادفی با ابزار مقدار ویژه برای چالش تأخیرهای ارتباط شبکهای ارائه شد. مشابهسازی مونتکارلو نشان داد سیستم کنترل POD-RD خطی پیشنهادی نسبت به تأخیرهای تصادفی عملکرد مقاوم دارد. کارآمدی روش به همراه شبیهسازی غیر خطی در

- [15] R. Preece, A. M. Almutairi, O. Marjanovic and J. V. Milanovic, "Damping of inter-area oscillations using WAMS based supplementary controller installed at VSC based HVDC line," IEEE Trond. Power Tech., pp. 1-8, 2011.
- [16] B. Yang and Y. Sun, "Damping Factor Based Delay Margin for Wide Area Signals in Power System Damping Control," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 3501–3502, Aug. 2013.
- [17] B. Yang, and Y. Sun, "IEEE A Novel Approach to Calculate Damping Factor Based Delay Margin for Wide Area Damping Control," IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 6, pp. 3116–3117, Nov. 2014.
- [18] B. Yang and Y. Z. Sun, "A new wide area damping controller design method considering signal transmission delay to damp inter area oscillations in power system," springer, Vol. 21, no. 11, pp. 4193–4198, Nov. 2014.

[۱۹] سعید اباذری، مجتبی برخورداری، عباس عرب دردری، «طراحی کنترل-

کننده مقاوم SVC مبتنی بر WAMS با در نظر گرفتن نامعینی تاخیر

- [20] K. Hirai and Y. Satoh, "Stability of a system with variable time delay," IEEE Trans. Auto. Ctrl, vol. AC-25, no. 3, pp. 552–554, 1980.
- [21] S. Zhang and V. Vittal, "Design of wide-area power system damping controllers resilient to communication failures," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 4, pp. 4292–4300, Nov. 2013
- [22] M. J. Alden and X. Wang, "Robust H<sub>∞</sub> control of time delayed power systems," Systems Science and Control Engineering, Vol. 3, no.1, pp. 253–261, 2015.
- [23] B. P. Padhy, S. C. Srivastava, and N. K. Verma "A Wide-Area Damping Controller considering Network Input & Output Delays and Packet Drop," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 32, no. 1, pp. 166 – 176, Jan. 2017.
- [24] N. T. Anh, L. Vanfretti, J. Driesen, and D. V. Hertem," A Quantitative Method to Determine ICT Delay Requirements for Wide-Area Power System Damping Controllers," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 30, no. 4, pp. 2023 – 2030, July 2015.
- [25] M. Bhadu, N. Senroy, I. N. Kar, and G. N. Sudha, "Robust linear quadratic Gaussian-based discrete mode wide area power system damping controller," IET Gen., Trans., Dist., Vol. 10, no.6, April 2016.
- [26] C. Lu, X. Zhang, X. Wang, and Y. Han, "Mathematical expectation modeling of wide-area controlled power systems with stochastic time delay," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 6, no. 3, pp. 1511–1519, May 2015.
- [27] X. Zhang, C. Lu, X. Xie, and Z. Y. Dong, "Stability Analysis and Controller Design of a Wide-Area Time-Delay System Based on the Expectation Model Method," IEEE Trans. on Smart grid, Vol. 7, no. 1, pp. 520-529, JAN. 2016.
- [28] W. Michiels, "Spectrum-based stability analysis and stabilization of systems described by delay differential algebraic equations," IET Ctrl Theo. App., vol.5, no.16, pp. 572 – 575, Nov. 2011.
- [29] Overton, M. L. in Spectral Analysis, Stability and Bifurcations 351–375 (Wiley-Blackwell, 2014).
- [30] D. Breda, and R. Vermiglio, "Stability of Linear Delay Differential Equations a Numerical Approach with MATLAB," New York Heidelberg Dordrecht London: Springer, 2015.
- [31] P. Kundur, N. Balu, and M. Lauby, Power System Stability and Control, New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 1994.

یک سیستم قدرت چند ناحیهای بزودی ارائه خواهد شد. چون روش پیشنهادی در تحلیل سایر نامعینیهای تصادفی سیستم قدرت قابل اجرا است، این روش برای ادامه تحقیق پیشنهاد میشود.

۷- مراجع

- مهدی، کراری، دینامیک و کنترل سیستمهای قدرت، چاپ اول، ویرایش
   اول، پلی تکنیک تهران، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۸۲.
- [2] E. V. Larsen, J. J. Sanchez-Gasca, and J. H. Chow, "Concepts for design of FACTS controllers to damp power swings," IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 2, pp. 948–956, May 1995.

[۳] داود فاتح، على اكبر مطيع بيرجندي، رضا ابراهيم پور، « افزايش ميرايي

نوسانات سیستم قدرت با جایابی UPFC بر اساس ضریب مانده و مدهای

- [4] X. Xie, J. Xiao, C. Lu, and Y. Han, "Wide-area stability control for damping interarea oscillations of interconnected power systems," IET Gen. Transm. Distrib. vol. 153, no. 5, pp. 507–514, Sep. 2006.
- [5] Y. Ge, Q. G. Chen, M. Jiang, Y. Q. Huang. "Modeling of random delays in networked control systems," Journal of Control Science and Engineering, vol. 2013, Article ID 383415, 2013.
- [6] L. X. Zhang, H. J. Gao, and O. Kaynak, "Network-induced constraints in networked control systems—a survey," IEEE Trans. on Indus. Infor., vol. 9, no. 1, pp. 403–416, 2013.
- [7] W. Michiels and N. S. lulian, Stability and Stabilization of Time-Delay Systems: An Eigenvalue-Based Approach, Philadelphia: SIAM, 2007.
- [8] K. Zhu, M. Chenine, L. Nordstrom, S. Holmstrom, and G. Ericsson, "Design Requirements of Wide-Area Damping Systems Using Empirical Data From a Utility IP Network," IEEE Trans. on Smart Grid, vol.5, pp. 829-838, 2014.
- [9] M. Mokhtari, F. Aminifar, D. Nazarpour, and S. Golshannavaz, "Wide area power oscillation damping with a fuzzy controller compensating the continuous communication delays," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1997–2005, May 2013.
- [10] W. Yao, L. Jiang, Q. Wu, J. Wen, and S. Cheng, "Delaydependent stability analysis of the power system with a wide-area damping controller embedded," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 233–240, Feb. 2011.
- [11] Y. Wei, L. Jiang, W. Jinyu, Q. H. Wu, and C. Shijie, "Wide-area damping controller of FACTS devices for inter-area oscillations considering communication time delays," IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 1, pp. 318–329, Jan. 2014.
- [12] Y. Li, Y. Zhou, F. Liu, Y. Cao, and C. Rehtanz, "Design and Implementation of Delay-Dependent Wide-Area Damping Control for Stability Enhancement of Power Systems," IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 8, no.4, July 2017.
- [13] J. Li, Z. Chen, D. Cai, W. Zhen and Q. Huang, "Delay-Dependent Stability Control for Power System With Multiple Time-Delays," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 3, pp. 2316–2326, May. 2016.
- [14] R. Sipahi, S. I. Niculescu, C.T. Abdallah, W. Michiels and K. Gu, "Stability and stabilization of systems with time-delay limitations and opportunities", IEEE Ctrl. Syst. Mag, vol. 31 no. 1, pp. 38– 65, 2011.

زيرنويسها

- <sup>7</sup> Delay-range stability
- 8 Newton-Leibniz
- <sup>9</sup> Functional Lyapunov-Krasvfsky
- <sup>10</sup> Razvmykhyn
- <sup>11</sup> Networked control systems

- <sup>1</sup> Power Oscillation Damping-Random Delay
- <sup>2</sup> Packet losses
- <sup>3</sup> Multi packet transmission
- <sup>4</sup> Packet disordering
- <sup>5</sup> Delay-independent stability
- <sup>6</sup> Delay-dependent stability