

طراحی پایدارساز مد لغزشی پیش‌بین گسسته تحت شبکه به منظور حذف نوسانات فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت با جغرافیای پراکنده

احسان بی‌جامی^۱، دانشجوی دکتری؛ ملیحه مغفوری فرسنگی^۲، استاد

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان - ایران - e.bijami@eng.uk.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان - ایران - mmaghfoori@uk.ac.ir

چکیده: رشد سریع پیشرفت‌های تکنولوژی و فناوری‌های ارتباطی از یک سو و نیز توسعه و پراکندگی جغرافیایی فرآیندهای صنعتی از سوی دیگر، استفاده از سیستم‌های کنترل تحت شبکه را در کنترل سیستم‌ها با جغرافیای پراکنده اجتناب‌ناپذیر نموده‌است. در این سیستم‌ها ارتباط بین اجزای کنترلی از طریق یک شبکه مخابراتی برقرار می‌گردد که به دلیل شرایط غیرایده‌آل شبکه مخابراتی، مشکلاتی مانند گم‌شدن بسته‌های اطلاعات و تأخیر زمانی، به‌عنوان مشکلات ذاتی این سیستم‌ها، مطرح می‌شود که می‌تواند منجر به عملکرد نامناسب و حتی ناپایداری کل سیستم گردد. در این مقاله یک ساختار کنترل مد لغزشی پیش‌بین گسسته تحت شبکه جدید به منظور پایدارسازی نوسانات فرکانس پایین یک شبکه قدرت تحت شبکه با جغرافیای پراکنده پیشنهاد شده‌است. روش پیشنهادی شامل دو مرحله است. ابتدا یک تابع سوئیچینگ مد لغزشی جدید به منظور طراحی پایدارساز مد لغزشی پیشنهاد و سپس یک الگوریتم پیش‌بین جدید به منظور جبران رفتار غیرایده‌آل شبکه مخابراتی، شامل تأخیر القاشده از سوی شبکه و گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی ارائه شده‌است. به منظور نشان‌دادن قابلیت و توانایی روش پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی یک سیستم قدرت نمونه ۵-ناحیه-۱۶ ماشین و در حضور دو نوع خطای سه‌فاز و تک‌فاز ارائه شده‌است. همچنین، به منظور انجام مقایسه، یک پایدارساز تحت شبکه با ساختار پیش‌فاز-پس‌فاز طراحی شده‌است. نتایج شبیه‌سازی قابلیت و برتری روش پیشنهادی را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: کنترل تحت شبکه، کنترل مد لغزشی، پایدارساز سیستم قدرت، نوسانات فرکانس پایین.

Design of Networked Discrete Predictive Sliding Mode Stabilizer for Damping Low Frequency Oscillations in Geographically Distributed Power Systems

E. Bijami¹, Ph.D Student; M. Maghfoori Farsangi², Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: e.bijami@eng.uk.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, Email: mmaghfoori@uk.ac.ir

Abstract: The rapid growth of technological advances and communication technologies, and also the development and geographical dispersion of industrial processes have made the use of networked control systems in controlling geographically distributed systems inevitable. In these systems, communication between controlling components is established through a telecommunications network, due to non-ideal communication network conditions, some problems such as packet dropouts and time delays are raised as inherent problems of these systems, which can lead to inappropriate performance and even the entire system becomes unstable. In this paper, a new networked discrete predictive sliding mode control structure is proposed in order to stabilize low frequency oscillations in smart grid with geographically distributed network. The proposed method consists of two steps. First a new sliding mode switching function is proposed to design a sliding mode stabilizer and then, a predictive control algorithm is proposed to compensate the non-ideal behavior of the communication network, including network latency and packet loss. In order to demonstrate the capability of the proposed method, some numerical studies have been carried out on a 5-area 16-machine system in the presence of three-phase and single-phase faults. Also, in order to make a comparison, a conventional networked stabilizer with lead-lag structure is designed. Simulation results show the capability and superiority of the proposed method.

Keywords: Networked control systems, sliding mode control, power system stabilizer, low frequency oscillations.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۸/۲۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱/۲۰

نام نویسنده مسئول: ملیحه مغفوری فرسنگی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمان - بلوار ۲۲ بهمن - میدان پژوهش - دانشگاه شهید باهنر کرمان - بخش مهندسی برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر توسعه دانش شبکه و تکنولوژی ارتباطات و نیز پیچیده و گسترده شدن فرآیندهای صنعتی منجر به پیدایش زمینه جدیدی در علم کنترل تحت‌عنوان سیستم‌های کنترل تحت‌شبکه یا NCS^۱ گردیده است. سیستم‌های کنترل تحت‌شبکه سیستم‌هایی هستند که معمولاً اجزای آن با فاصله از یکدیگر توزیع شده‌اند و ارتباط و انتقال اطلاعات بین اجزای کنترلی شامل کنترل‌کننده، حسگر و عملگر از طریق شبکه‌های ارتباطی برقرار می‌گردد [۱]. امروزه به‌علت مزایایی همچون کاهش هزینه و حجم سیم‌کشی، سهولت عیب‌یابی و انعطاف‌پذیری بالا، استفاده از NCS در کنترل سیستم‌های ابعاد وسیع نظیر سیستم‌های اتوماسیون صنعتی و شبکه‌های الکتریکی که از نظر جغرافیایی پراکنده‌اند بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

سیستم‌های قدرت الکتریکی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین سیستم‌های ساخت بشر شناخته می‌شوند که دارای اجزای گوناگونی در یک گستره وسیع جغرافیایی می‌باشند. از طرفی با گسترش شبکه‌های قدرت، مسئله پایداری سیستم قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. توانایی سیستم قدرت در حفظ پایداری، تا حد زیادی بر میراکردن نوسان‌های الکترومکانیکی به‌وسیله کنترل‌کننده‌های موجود روی سیستم قدرت استوار می‌باشد. یک راه‌حل برای میراکردن نوسانات الکترومکانیکی، مجهز کردن ژنراتور به کنترل‌کننده‌ای می‌باشد که یک سیگنال تکمیلی در ورودی ولتاژ مرجع در تنظیم‌کننده اتوماتیک ولتاژ وارد کند. این کنترل‌کننده‌ها تحت‌عنوان پایدارساز سیستم قدرت (PSS^۲) شناخته می‌شوند. همچنین استفاده از ادوات FACTS راه‌حل دیگری جهت از بین بردن این نوسانات می‌باشد. جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو^۳ (SVC) از جمله این ادوات می‌باشد که می‌توان با طراحی یک کنترل‌کننده مکمل برای آن پایداری سیستم را افزایش و کارایی این ادوات را بهبود بخشید [۲]. امروزه، با توجه به گسترده‌گی اجزای شبکه قدرت و نیز ظهور سیستم‌های اندازه‌گیری ناحیه گسترده (WAMS)، که شامل سیستم‌های اندازه‌گیری دیجیتال و مدرن (مانند واحد اندازه‌گیری فاز (PMU^۴)) و سیستم‌های جدید مخابراتی (مانند شبکه‌های مبتنی بر فیبر نوری) می‌باشند، امکان پایش و کنترل تحت‌شبکه سیستم‌های قدرت با گستره وسیع جغرافیایی فراهم شده است [۳]. اما استفاده از شبکه‌های مخابراتی در سیستم‌های قدرت باعث به‌وجود آمدن چالش‌های جدیدی در طراحی کنترل‌کننده‌های میراکنده تحت‌شبکه، همچون تأخیر القاشده از سوی شبکه و یا ازدست‌رفتن بسته‌های اطلاعاتی می‌شود که می‌تواند منجر به عملکرد نامناسب و حتی ناپایداری کل سیستم گردد [۴].

در سال‌های اخیر استراتژی‌های کنترلی متنوعی به‌منظور طراحی پایدارسازهای تحت‌شبکه به‌منظور حذف نوسانات فرکانس پایین سیستم‌های قدرت با جغرافیای پراکنده پیشنهاد شده است. اما در اغلب آن‌ها شبکه مخابراتی ایده‌آل در نظر گرفته شده و از اثر تأخیر شبکه

مخابراتی و نیز پدیده گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی صرف‌نظر شده است. در این بین روش‌های کنترلی معدودی نیز ارائه شده است که طراحی میراکنده تحت‌شبکه را در حضور رفتار غیرایده‌آل شبکه مخابراتی انجام داده‌اند [۵-۱۸]. در [۵] یک کنترل‌کننده مقاوم SVC برای سیستم قدرت تحت‌شبکه ارائه شده است. در این مقاله اثر تأخیر زمانی شبکه مخابراتی با استفاده از تقریب پاد و تقریب خطی کسری به‌صورت یک نامعینی مدل‌سازی شده است. همچنین در طراحی کنترل‌کننده از روش حساسیت مرکب H_{∞} و تبدیل مسئله به یک نامساوی خطی ماتریسی (LMI) استفاده شده است که با بزرگ‌شدن ابعاد سیستم حل شدن LMI به‌دست‌آمده تضمین شده نمی‌باشد. ضمن این‌که استفاده از تقریب فوق اثر تأخیر را به‌طور کامل در نظر نمی‌گیرد. نویسندگان مقاله در [۶] روشی مبتنی بر منطق فازی و هماهنگی حذف بار و تولید، به‌منظور میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای یک سیستم قدرت ناحیه گسترده ارائه نموده‌اند. در این مقاله نیز تأخیر کانال مخابراتی با استفاده از تقریب پاد در طراحی کنترل‌کننده لحاظ شده است. همچنین، اثر تأخیر صرفاً در سیگنال ورودی در نظر گرفته شده است و از تأخیر موجود در کانال مخابراتی خروجی صرف‌نظر شده است. لذا شرایط واقعی یک سیستم کنترل تحت‌شبکه در نظر گرفته نشده است. در [۷] یک کنترل‌کننده میراساز ابعاد وسیع مبتنی بر LMI ارائه شده است. در روش مذکور اثر تأخیر کانال مخابراتی صرفاً در خروجی در نظر گرفته شده است. همچنین جبران‌سازهای تأخیر با پارامتر ثابت در نظر گرفته شده‌اند که با توجه به ماهیت متغیر و تصادفی بودن اندازه تأخیر محافظه‌کاری روش افزایش یافته است. نویسندگان مقاله در [۸]، یک کنترل‌کننده LQG تحت‌شبکه به‌منظور میرانمودن نوسانات فرکانس پایین یک سیستم قدرت ابعاد وسیع ارائه نموده‌اند. در این مقاله صرفاً پدیده گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی مدنظر قرار گرفته و از اثر تأخیر کانال مخابراتی صرف‌نظر شده است. در [۹] نیز یک پایدارساز توزیع‌شده تحت‌شبکه در حضور تأخیر القاشده از سوی شبکه ارائه شده است. در مقاله مذکور نیز کانال مخابراتی صرفاً در سمت کنترل‌کننده در نظر گرفته شده است. همچنین، نویسندگان مقاله در [۱۰]، با استفاده از روشی مبتنی بر تابع لیاپانوف و نامساوی خطی ماتریسی به طراحی کنترل‌کننده ادوات FACTS تحت‌شبکه برای یک سیستم قدرت نمونه با شبکه مخابراتی غیرایده‌آل پرداخته‌اند. ساختار کنترل‌کننده استفاده‌شده از نوع پیش‌فاز-پس‌فاز با بهره‌های ثابت می‌باشد که با استفاده از یک LMI تعیین می‌شوند. ساختار ثابت کنترل‌کننده و عدم اطمینان از قابل‌حل بودن LMI به‌دست‌آمده، در صورت افزایش ابعاد سیستم، از جمله مشکلات روش مذکور می‌باشند. در [۱۱] یک روش تطبیقی به‌منظور جبران اثر تأخیر شبکه مخابراتی در یک سیستم قدرت تحت‌شبکه پیشنهاد شده است. در این مقاله نیز از اثر گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی صرف‌نظر شده و نیز تأخیر شبکه مخابراتی صرفاً در کانال ورودی در نظر گرفته شده است. همچنین، در [۱۲] روش دیگری مبتنی بر تابع لیاپانوف و نامساوی

طراحی شده‌است. نوآوری‌های مقاله به‌طور خلاصه به شرح زیر می‌باشد:

- ارائه یک ساختار جدید کنترل مد لغزشی پیش‌بین گسسته تحت شبکه با تابع سوئیچینگ جدید و تحلیل پایداری کنترل کننده طراحی شده به منظور کنترل سیستم‌های با جغرافیای پراکنده در حضور رفتار غیرایده‌آل شبکه مخابراتی.
 - در نظر گرفتن رفتار غیرایده‌آل شبکه در هر دو کانال مخابراتی ورودی و خروجی کنترل کننده تحت شبکه و ارائه یک فرآیند پیش‌بین جدید به منظور جبران این رفتار.
 - استفاده از روش پیشنهادی در جهت پایداری سازی نوسانات فرکانس پایین یک شبکه قدرت تحت شبکه نمونه.
- ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده‌است. در بخش دوم به مدل سازی ریاضی سیستم قدرت تحت شبکه پرداخته شده‌است. در بخش سوم ابتدا طراحی و تحلیل پایداری کنترل کننده تحت شبکه پیشنهادی ارائه و سپس فرآیند پیش‌بین پیشنهادی به منظور جبران رفتار غیرایده‌آل شبکه مخابراتی مطرح می‌شود. بخش چهارم نیز به طراحی پایدارساز سیستم قدرت با استفاده از روش پیشنهادی اختصاص یافته و نتیجه گیری مقاله در فصل پنجم ارائه شده‌است.

۲ مدل سازی ریاضی سیستم قدرت تحت شبکه

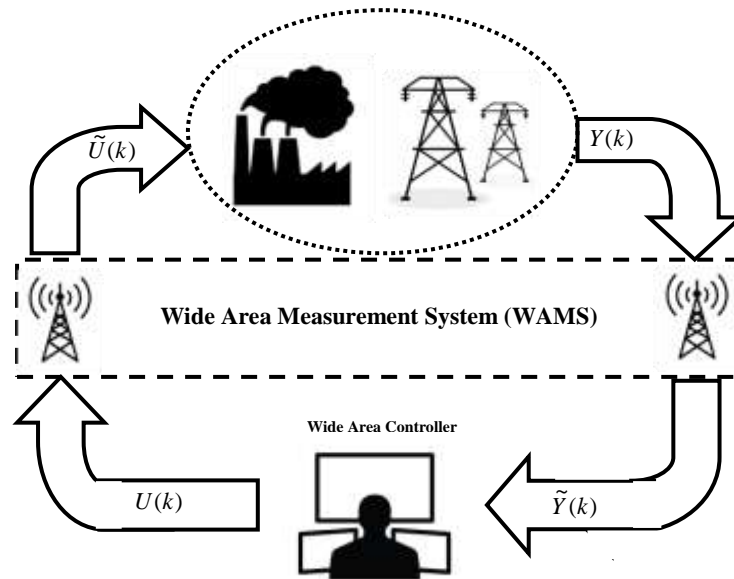
در این بخش به مدل سازی سیستم قدرت تحت شبکه مخابراتی با رفتار غیرایده‌آل پرداخته می‌شود. شکل ۱ شمای کلی یک سیستم قدرت به هم پیوسته تحت شبکه را نشان می‌دهد. که در آن سیگنال‌های به ترتیب سیگنال‌های خروجی اندازه‌گیری شده و سیگنال‌های خروجی تأخیر یافته ناشی از شبکه مخابراتی می‌باشند. همچنین به ترتیب سیگنال‌های کنترلی تولید شده توسط مرکز کنترل و تأخیر یافته آن‌ها می‌باشند.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، اطلاعات مربوط به سیستم قدرت از طریق سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده به کنترل کننده می‌رسد. سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده مفهوم جدیدی است که در سال‌های اخیر به ادبیات سیستم قدرت اضافه شده‌است. این سیستم ترکیبی است از سیستم‌های اندازه‌گیری دیجیتال و مدرن (مانند واحد اندازه‌گیری فاز) و سیستم‌های جدید مخابراتی (مانند شبکه‌های مبتنی بر فیبر نوری) که امکان پایش و کنترل سیستم‌های قدرت را در گستره وسیع جغرافیایی فراهم می‌کند. در حالت کلی می‌توان سیستم ابعاد وسیع را به صورت یک سیستم گسسته چند ورودی-چند خروجی غیرخطی زیر توصیف نمود [۱۹]:

خطی ماتریسی به منظور طراحی پایدارساز سیستم قدرت در حضور تأخیر چندگانه سیستم قدرت پیشنهاد شده‌است. کنترل چندمتغیره مبتنی بر نامساوی خطی ماتریسی نیز روش دیگری است که نویسندگان مقاله در [۱۳] برای طراحی پایدارساز مقاوم یک سیستم قدرت تحت شبکه پیشنهاد نموده‌اند. در این مقالات نیز علاوه بر مشکل اشاره شده برای [۱۰]، صرفاً اثر تأخیر کانال مخابراتی در ورودی در نظر گرفته شده و پدیده گم شدن بسته‌های اطلاعاتی بررسی نشده‌است. کنترل پیش‌بین تحت شبکه روش دیگری است که به منظور حذف نوسانات فرکانس پایین سیستم قدرت تحت شبکه در [۱۶-۱۴] پیشنهاد شده‌است. در این مقالات از کنترل پیش‌بین تعمیم یافته^۲ برای طراحی پایدارساز و کنترل کننده مکمل SVC تحت شبکه استفاده شده‌است و صرفاً اثر تأخیر در خروجی مدنظر قرار گرفته و از اثر گم شدن بسته‌های اطلاعاتی صرف نظر شده‌است. در [۱۷] نیز یک کنترل کننده فازی تحت شبکه برای میراسازی نوسانات سیستم قدرت ناحیه گسترده طراحی شده‌است. در این مقاله جبران تأخیر شبکه مخابراتی با انتقال زمانی توابع عضویت فازی خروجی انجام شده‌است. فرض ثابت بودن تأخیر و قوانین فازی از جمله معایب روش فوق می‌باشند. همچنین اثر پدیده گم شدن بسته‌های اطلاعاتی بررسی نشده‌است. در [۱۸] یک کنترل کننده توزیع شده با در نظر گرفتن ساختار شبکه مخابراتی برای میراسازی نوسانات یک سیستم قدرت ناحیه گسترده پیشنهاد شده‌است. در این مقاله برای هر ژنراتور یک کنترل کننده محلی لحاظ و کانال‌های مخابراتی خروجی ایده‌آل در نظر گرفته شده‌اند. هزینه بر بودن، به علت تعدد کنترل کننده‌ها و فرض ایده‌آل بودن کانال مخابراتی خروجی از مشکلات این روش می‌باشند.

با توجه به موارد ذکر شده، در این مقاله یک کنترل مد لغزشی پیش‌بین گسسته تحت شبکه جدید به منظور طراحی میراکننده نوسانات فرکانس پایین سیستم‌های قدرت تحت شبکه، با در نظر گرفتن رفتار غیرایده‌آل شبکه مخابراتی، شامل تأخیر شبکه و گم شدن بسته‌های اطلاعاتی، پیشنهاد شده‌است. روش کنترلی پیشنهادی شامل دو بخش کنترل کننده مد لغزشی و جبران ساز تأخیر شبکه و گم شدن بسته‌های اطلاعاتی می‌باشد. در این راستا ابتدا یک کنترل کننده مد لغزشی گسسته با پیشنهاد یک سطح سوئیچینگ جدید برای سیستم قدرت تحت شبکه طراحی شده و سپس با استفاده از یک فرآیند پیش‌بین جدید ورودی‌های آینده کنترلی پیش‌بینی و در نتیجه اثر رفتار غیرایده‌آل شبکه مخابراتی جبران می‌شود. در این مقاله، برخلاف کارهایی که تاکنون انجام شده‌است، رفتار غیرایده‌آل شبکه در هر دو کانال ورودی و خروجی کنترل کننده در نظر گرفته شده‌است. به منظور نشان دادن قابلیت و توانایی روش پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی یک سیستم قدرت ۵-ناحیه-۱۶ ماشینه و با در نظر گرفتن شرایط کاری مختلف ارائه شده‌است. همچنین، به منظور انجام مقایسه، یک پایدارساز تحت شبکه با ساختار پیش‌فاز-پس‌فاز

$$\begin{aligned} y[k+1] &= g(y[k], y[k-1], \dots, y[k-m_y], \\ &u[k], u[k-1], \dots, u[k-m_u]) \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۱: سیستم قدرت هوشمند تحت شبکه.

ماتریس $\theta(k)$ اصطلاحاً شبه‌مشتق جزئی^۶ نامیده می‌شود. همچنین می‌توان سیستم (۱) را به فرم فضای حالت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{aligned} x[k+1] &= Ax[k] + B\Delta u[k] \\ \Delta y[k] &= C[k]x[k] \end{aligned} \quad (6)$$

که در آن:

$$x[k] = [\Delta u[k-1], \Delta u[k-2], \dots, \Delta u[k-m]]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0_{m \times m(m-1)} & 0_{m \times m} \\ \underbrace{I_{m(m-1) \times m(m-1)}}_m & 0_{m(m-1) \times m} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} I_{m \times m} & 0_{m \times m(m-1)} \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} \theta[k-1] & 0_{m \times m(m-1)} \end{bmatrix}$$

که $I_{m \times m}$ ماتریس همانی و $0_{m \times m}$ ماتریس صفر $m \times m$ می‌باشند. همچنین $\theta_i = (\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{im})$ و $\|\theta(k)\| \leq b$ می‌باشد [۱۹]. شکل ۲ ساختار سیستم قدرت تحت شبکه با کنترل کننده پایدار ساز را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل مشخص است، کنترل کننده تحت شبکه پیشنهادی شامل یک کنترل کننده مد لغزشی جهت محاسبه سیگنال ورودی و یک تخمین گر به منظور پیش‌بینی ورودی‌های کنترلی آینده سیستم می‌باشد. همچنین، بین حسگرها و کنترل کننده و نیز بین کنترل کننده و محرک کانال‌های مخابراتی غیرایده‌آل واقع شده‌اند که به ترتیب دارای تأخیر پیش‌خور $\tau^{sc}[k]$ و تأخیر پس‌خور $\tau^{ca}[k]$

که در آن $g(\cdot)$ یک تابع غیرخطی نامعلوم می‌باشد. همچنین $y[k] \in R^m$ و $u[k] = [y_1[k], y_2[k], \dots, y_m[k]]^T$ و نیز $u[k] = [u_1[k], u_2[k], \dots, u_m[k]]^T$ که m_y و m_u به ترتیب مرتبه خروجی $y[k]$ و ورودی $u[k]$ می‌باشند.

فرض می‌شود مشتقات جزئی $g(\cdot)$ نسبت به ورودی کنترل $u[k]$ پیوسته بوده و سیستم به‌طور کلی لپشیتز است، یعنی به‌ازای هر k و $\Delta u[k] \neq 0$ وجود دارد $\|\Delta y[k+1]\| \leq b \|\Delta u[k]\|$ که در آن:

$$\begin{aligned} \Delta y[k+1] &= y[k+1] - y[k] \\ &= [\Delta y_1[k+1], \Delta y_2[k+1], \dots, \Delta y_m[k+1]]^T \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta u[k] &= u[k] - u[k-1] \\ &= [\Delta u_1[k], \Delta u_2[k], \dots, \Delta u_m[k]]^T \end{aligned} \quad (3)$$

که b یک پارامتر ثابت می‌باشد. چنانچه m مشخص باشد، آن‌گاه ماتریس $\theta[k]$ که $\|\theta[k]\| \leq b$ ، نرم ۲ ماتریسی را نشان می‌دهد و وجود دارد به‌گونه‌ای که اگر $\Delta u[k] \neq 0$ ، آنگاه می‌توان سیستم (۱) را به فرم مدل دینامیکی خطی زیر نوشت:

$$\Delta y[k+1] = \theta[k] \Delta u[k] \quad (4)$$

که در آن:

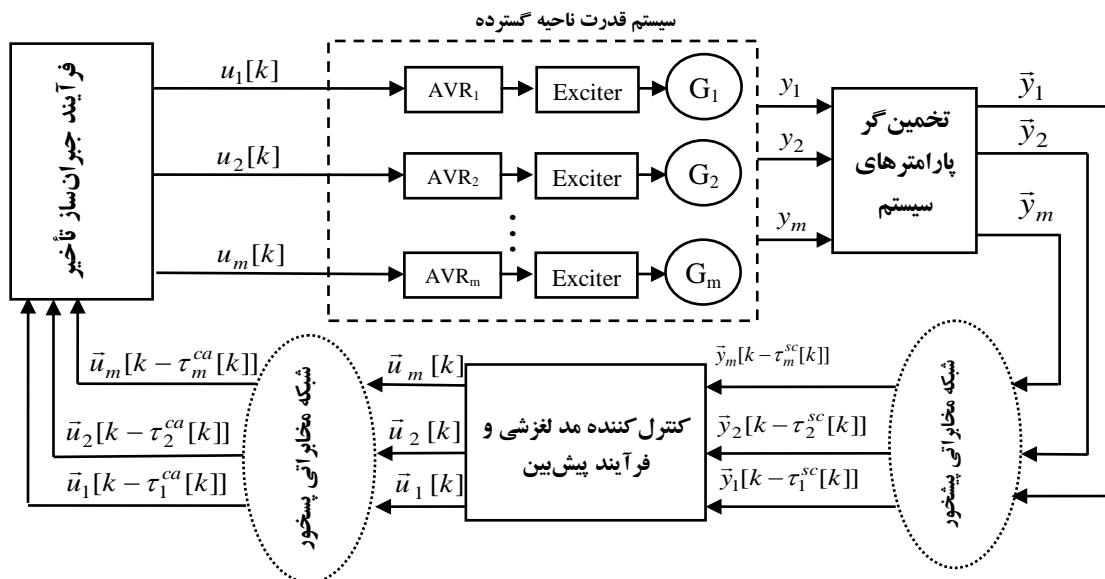
$$\theta[k] = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \dots & \theta_{1m} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \dots & \theta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \theta_{m1} & \theta_{m2} & \dots & \theta_{mm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

- حسگرها سنکرون با ساعت بوده، به‌صورت دوره‌ای از خروجی سیستم نمونه‌برداری کرده و برای کنترل‌کننده ارسال می‌کنند.

می‌باشند که $\tau^{sc}[k] = [\tau_1^{sc}[k], \tau_2^{sc}[k], \dots, \tau_m^{sc}[k]]$ و نیز $\tau^{ca}[k] = [\tau_1^{ca}[k], \tau_2^{ca}[k], \dots, \tau_m^{ca}[k]]$ می‌باشند.

ساختار شکل ۲ با در نظر گرفتن فرض‌های مهم زیر تعریف

شده‌است:



شکل ۲: ساختار سیستم قدرت ناحیه گسترده تحت شبکه با کنترل‌کننده پایدارساز.

$\tau^{sc}[k]$ القاشده از سوی شبکه مواجه شود، آن‌گاه تأخیر کانال پیش‌خور به صورت $\tau^{sc}[k] = \tau^{sc}[k] + p_k T$ مدل می‌شود که در آن دوره T نمونه‌برداری است. بنابراین تأخیر پیش‌خور $\tau^{sc}[k]$ و تأخیر پس‌خور $\tau^{ca}[k]$ در دو کانال دربرگیرنده هر دو پدیده گم‌شدن بسته و تأخیر در انتقال شبکه می‌باشند.

۳ طراحی کنترل‌کننده تحت شبکه

برای تحقق ساختار کنترل تحت شبکه مد لغزشی پیش‌بین پیشنهادی، واحد کنترل از دو بخش تشکیل شده‌است:

- کنترل‌کننده اصلی مد لغزشی
- تخمین‌گر پارامتر

که در ادامه به توضیح و تشریح چگونگی طراحی هر بخش پرداخته می‌شود.

۳-۴ طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی

کنترل مد لغزشی یک تکنیک کنترلی ساده و درعین حال مقاوم است. تحت این روش کنترلی حالت‌های سیستم به زیرمجموعه مشخصی از فضای حالت با دینامیک پایدار مجبوس می‌شوند تا سیستم حلقه بسته به رفتار دینامیکی مطلوب دست یابد. این روش کنترلی به علت مزایایی چون تحقق آسان، پاسخ سریع، حالت گذرای خوب و مقاوم‌بودن در برابر نامعینی‌های مدل سیستم و اعوجاج‌های خروجی، به سرعت مورد توجه محققین قرار گرفته و مقالات متعددی در بهبود تکنیک‌ها و ارائه کاربردهای عملی از این روش به چاپ رسیده است. طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی در دو مرحله انجام می‌گیرد:

- کنترل‌کننده به صورت رویداد محور^۱ عمل کرده، به محض رسیدن داده از حسگرها، سیگنال کنترل را محاسبه و برای عملگر ارسال می‌کند. تأخیر محاسبه سیگنال کنترل ناچیز فرض می‌شود.

- عملگر به صورت رویداد محور عمل می‌کند.

- تأخیرهای القاشده از سوی کانال مخابراتی در روابط $0 \leq \tau_i^{ca}[k] \leq \tau_{i\max}^{ca}$ و $0 \leq \tau_i^{sc}[k] \leq \tau_{i\max}^{sc}$ که $(i=1,2,\dots,m, k=1,2,\dots)$ به ترتیب حداکثر تأخیر القاشده از سوی شبکه مخابراتی در کانال نام پیش‌خور و پس‌خور می‌باشند.

در بسیاری از شبکه‌های مخابراتی این احتمال وجود دارد که بسته‌های اطلاعاتی خارج از ترتیبی که فرستاده شده‌اند، درگیرنده دریافت شوند. در این مقاله داده‌ها به صورت بسته‌ای ارسال شده و به هر بسته یک مهر زمانی زده می‌شود. هر کنترل‌کننده و محرک یک بافر دارد که آخرین بسته رسیده را تا رسیدن بسته جدیدتر در خود نگه می‌دارد. زمانی که یک بسته می‌رسد مهر زمانی آن با مهر بسته موجود در بافر مقایسه شده تنها در صورتی که جدیدتر از بسته موجود باشد، بافر به‌روز می‌شود. در غیر این صورت از آن بسته صرف نظر می‌شود. بدین طریق همواره از آخرین اطلاعات ممکن جهت ساختن فرمان کنترلی استفاده می‌شود. در نتیجه تنزل از عملکرد مطلوب کاهش می‌یابد.

توجه ۱: گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی در دو کانال را می‌توان به صورت یک تأخیر به تأخیر پیش‌خور $\tau^{sc}[k]$ و تأخیر پس‌خور $\tau^{ca}[k]$ اضافه نمود. به این صورت که چنانچه کانال پیش‌خور با p_k گم‌شدن پشت‌سرهم بسته و تأخیر در انتقال متغیر با زمان

که $Pinv(\cdot)$ ماتریس معکوس تعمیم‌یافته است. لذا ورودی $u[k]$ سیستم به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u[k] = u[k-1] + \Delta u[k] \quad (14)$$

۴-۳ تحلیل پایداری

به منظور بررسی پایداری کنترل‌کننده پیشنهادی دو قضیه زیر ارائه می‌گردد:

قضیه ۱ [۲۰]: سیستم گسسته (۶) را در نظر بگیرید. اگر قانون دسترسی به صورت $s[k+1] = (1-qT)s[k] - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k])$ انتخاب شود و دوره نمونه‌برداری T و پارامترهای طراحی q و ε به گونه‌ای طراحی شوند که نامساوی‌های $q > 0, 1 - qT > 0$ و $\varepsilon > 0$ برآورده شوند، آن‌گاه قانون کنترلی مد لغزشی طراحی شده پایدار بوده و هر حالت اولیه‌ای به صفحه لغزشی می‌رسد (اثبات در [۲۰]).

قضیه ۲: برای سیستم (۱)، با فرض $y_d[k] = \bar{r} = cte$ ، اگر $\lambda > 0$ و $\gamma > 0$ ، آن‌گاه برای سیستم حلقه بسته زیر برقرار است:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\bar{r} - y[k]) = \bar{0} \quad (15)$$

اثبات: بردار خطا را به صورت $\bar{e}[k] = \bar{r} - y[k]$ در نظر بگیرید. در لحظه $k+1$ و با توجه به رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \bar{e}[k+1] &= \bar{r} - y[k+1] \\ &= (\bar{r} - y[k]) - C[k+1]x[k+1] \\ &= \bar{e}[k] - C[k+1][Ax[k] + B\Delta u[k]] \end{aligned}$$

در ادامه با جایگذاری رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \bar{e}[k+1] &= \bar{e}[k] - C[k+1]Ax[k] - C[k+1]B[C[k+1]B]^{-1} \\ &\quad \{ (y_d[k+1] - y[k]) - (\lambda + \gamma)^{-1}[(1-qT)s[k] - \\ &\quad \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k]) + \gamma(y_d[k] - y[k])] - C[k+1]Ax[k] \} \\ &= \bar{e}[k] - C[k+1]Ax[k] - \{ \bar{e}[k] - (\lambda + \gamma)^{-1}[(1-qT)s[k] \\ &\quad - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k]) + \gamma \bar{e}[k]] \} - C[k+1]Ax[k] \\ &= (\lambda + \gamma)^{-1}[(1-qT)s[k] - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k]) + \gamma \bar{e}[k]] \\ &= \frac{\gamma}{\lambda + \gamma} \bar{e}[k] + \frac{(1-qT)s[k] - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k])}{\lambda + \gamma} \end{aligned}$$

اکنون با توجه به این‌که $\lambda > 0$ ، $\gamma > 0$ و نیز $\lim_{k \rightarrow \infty} s[k] = \bar{0}$

و $0 < \frac{\gamma}{\lambda + \gamma} < 1$ ، لذا $\lim_{k \rightarrow \infty} \bar{e}[k] = \bar{0}$ ، بنابراین اثبات کامل می‌شود.

۴-۳ جبران تأخیر القایی شبکه و از دست‌دادن بسته‌های اطلاعاتی

به منظور جبران اثر تأخیر القاشده از سوی شبکه مخابراتی و نیز از دست‌رفتن بسته‌های اطلاعاتی از یک تخمین‌گر به منظور پیش‌بینی ورودی‌های آینده به کنترل‌کننده استفاده شده‌است که شامل دو بخش تخمین‌گر پارامتر و بخش پیش‌بینی است.

گام اول: ایجاد یک صفحه لغزشی مناسب با دینامیک داخلی پایدار
گام دوم: تولید فرمان کنترلی به گونه‌ای که با هر شرایط اولیه، حالت سیستم حلقه بسته را در زمان محدود به سمت سطح لغزشی آورده و همواره آن را تا حد ممکن به صفحه لغزشی نزدیک نگه دارد.
اکنون با توجه به فضای حالت (۶)، تعریف می‌شود:

$$\bar{e}[k] = y_d[k] - y[k] \quad (8)$$

که $y_d[k] = [y_{d1}[k], y_{d2}[k], \dots, y_{dm}[k]]^T$ سیگنال مطلوب خروجی است.

در این مقاله تابع سوئیچینگ مد لغزشی جدیدی به صورت زیر پیشنهاد می‌شود.

$$s[k] = \alpha \bar{e}[k] + \beta \Delta \bar{e}[k] \quad (9)$$

که $\beta > 0, \alpha > 0$ ضرایب وزنی و $\Delta \bar{e}[k] = \bar{e}[k] - \bar{e}[k-1]$ می‌باشد. سطح سوئیچینگ پیشنهادی دارای جمله $\Delta \bar{e}[k]$ می‌باشد که به عنوان یک جمله تصحیح برای بهبود سرعت همگرایی و کاهش پدیده چترینگ^۱ به کار رفته است. لازم به ذکر است که انتخاب ضرایب وزنی $\beta > 0, \alpha > 0$ تأثیر به‌سزایی در بهبود عملکرد و کاهش پدیده چترینگ تابع سوئیچینگ پیشنهادی دارد. با ترکیب روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} s[k+1] &= \alpha \bar{e}[k+1] + \beta \Delta \bar{e}[k+1] \\ &= (\alpha + \beta) \bar{e}[k+1] - \beta \bar{e}[k] \\ &= (\alpha + \beta) \{ y_d[k+1] - y[k+1] \} - \beta \{ y_d[k] - y[k] \} \\ &= (\alpha + \beta) \{ y_d[k+1] - y[k] - C[k+1]x[k+1] \} - \\ &\quad \alpha \{ y_d[k] - y[k] \} \end{aligned} \quad (10)$$

همچنین، قانون رسیدن به صفحه لغزشی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$s[k+1] = (1-qT)s[k] - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k]) \quad (11)$$

که T دوره نمونه‌برداری و q و ε پارامترهای طراحی بوده و باید به گونه‌ای طراحی شوند که نامساوی‌های $q > 0, 1 - qT > 0$ و $\varepsilon > 0$ برآورده شوند [۲۰]. نامساوی $1 - qT > 0$ برای تضمین این خصوصیت است که با شروع از هر حالت اولیه‌ای مسیر حالت سیستم در یک زمان محدود به صورت یکنواخت به صفحه لغزشی رسیده و از آن عبور کند و بدین معنا می‌باشد که انتخاب T محدود می‌باشد.
با جایگذاری رابطه (۱۱) در (۱۰) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} C[k+1]x[k+1] &= (y_d[k+1] - y[k]) - (\alpha + \beta)^{-1} \\ &\quad \{ (1-qT)s[k] - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k]) + \beta(y_d[k] - y[k]) \} \end{aligned} \quad (12)$$

سیس با ترکیب روابط (۶) و (۱۲) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \Delta u[k] &= Pinv([C[k+1]B]^{-1}) \{ (y_d[k+1] - y[k]) - \\ &\quad (\alpha + \beta)^{-1} \{ (1-qT)s[k] - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k]) + \\ &\quad \beta(y_d[k] - y[k]) \} \} - C[k+1]Ax[k] \} \end{aligned} \quad (13)$$

$$s[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] = (\alpha + \beta) \{y_d[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1] - y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] - \gamma \{y_d[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] - y[k - \hat{\tau}^{sc}[k]]\} \quad (20)$$

$$u[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] = u[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + \Delta u[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta u[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] &= [\hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]]B]^{-1} \{y_d[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 2] - y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] - (\alpha + \beta)^{-1} \{ (1 - qT) s[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]]) + \beta (y_d[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1] - y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]]) - \hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] [A^2 x[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + ABu[k - \hat{\tau}^{sc}[k]]] \} \end{aligned} \quad (22)$$

درحالتی که $\hat{\tau}^{sc}[k] \geq 2$ ، پیش‌بینی ورودی به کنترل کننده از لحظه $k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 2$ تا k به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \Delta y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] &= \hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] x[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \\ &= \hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] [A^i x[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + \Delta u[k - \hat{\tau}^{sc}[k]]] \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \sum_{h=1}^{i-1} A^h B + B \Delta u[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + (i-1)] & \\ y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] &= y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + (i-1) | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + \Delta y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} s[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] &= (\alpha + \beta) \{y_d[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i] - y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] - \beta \{y_d[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + (i-1)] - y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + (i-1) | k - \hat{\tau}^{sc}[k]]\} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \Delta u[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] &= [\hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]]B]^{-1} \{y_d[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + (i+1)] - y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] - (\alpha + \beta)^{-1} \{ (1 - qT) s[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]]) + \beta (y_d[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i] - y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]]) - \hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] [A^{i+1} x[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + \sum_{h=1}^{i-1} A^h B + AB \Delta u[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + (i-1)] \} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} u[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] &= u[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + (i-1) | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + \Delta u[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + i | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \end{aligned} \quad (27)$$

که $i = 2, \dots, \hat{\tau}^{sc}[k]$

اکنون سیگنال کنترل در لحظه k به دست آمده است.

بخش تخمین‌گر: با توجه به [۲۱، ۱۹]، مقادیر تخمینی $C[k]$ در رابطه (۶) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آیند.

$$\hat{C}[k] = \hat{C}[k-1] + [y[k] - y[k-1] - \hat{C}[k-1]x[k-1]] \times \frac{ax^T[k-1]}{b + x^T[k-1]x[k-1]} \quad (16)$$

که $b > 0$ نرخ یادگیری و $a > 0$ پارامتری است که تغییرات بردار شبه‌گرادیان را محدود می‌کند. لذا تخمین‌گر با استفاده از رابطه (۱۶)، $C[k]$ و بهره $\hat{C}[k]$ را تخمین می‌زند.

روند کار به این صورت است که حسگر نام بسته اطلاعات شامل $\bar{y}_i[k] = [y_i[k], y_i[k-1], \dots, y_i[k - \tau_{i \max}^{sc}]]^T$ و $\Gamma[k] = [\hat{C}[k], \hat{C}[k-1], \dots, \hat{C}[k - \tau_{\max}^{sc}]]^T$ ، $(i = 1, 2, \dots, m)$ و $U(k) = [u[k-1], u[k-2], \dots, u[k - \tau_{\max}^{sc}]]^T$ و τ_{\max}^{sc} اعدادی طبیعی بوده و $k - \tau_{i \max}^{sc} > 0$ و $k - \tau_{\max}^{sc} > 0$ می‌باشد، را با یک برچسب زمانی به کنترل کننده ارسال می‌کند. از این طریق تخمین‌گر پارامتر تضمین می‌کند که علی‌رغم تأخیرهای متوالی، همه خروجی‌های سیستم برای محاسبه سیگنال کنترلی در دسترس قرار دارند.

بخش پیش‌بینی: به منظور تشریح نحوه عملکرد سیستم پیش‌بین پیشنهادی، فرض کنید حسگرها اندازه‌گیری‌های خود را با تأخیر $\tau^{sc}[k] = [\tau_1^{sc}[k], \tau_2^{sc}[k], \dots, \tau_m^{sc}[k]]$ می‌کنند. لذا در لحظه k (در کنترل کننده)، بردار تأخیر $\tau^{sc}[k] = [\tau_1^{sc}[k], \tau_2^{sc}[k], \dots, \tau_m^{sc}[k]]$ با مقایسه لحظه کنونی با مهر زمانی بسته ارسال شده، مشخص می‌شود. بنابراین کنترل کننده بسته اطلاعات ارسال شده توسط حسگر در لحظه k را به صورت زیر دریافت می‌کند:

$$P_{k-\tau^{sc}[k]} = [Y[k - \tau^{sc}[k]], \Gamma[k - \tau^{sc}[k]], U[k - \tau^{sc}[k]]]^T \quad (17)$$

فرض کنید $\hat{\tau}^{sc} = \max\{\tau_1^{sc}[k], \tau_2^{sc}[k], \dots, \tau_m^{sc}[k]\}$ با توجه به (۶)، (۱۳)، (۱۴) و (۱۶) و استفاده از اطلاعات رسیده از فیدبک (۱۷) برای پیش‌بینی اطلاعات لحظه بعدی روابط زیر برقرار می‌باشند:

$$\begin{aligned} \Delta y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] &= \hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] x[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \\ &= \hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] [Ax[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + B \Delta u[k - \hat{\tau}^{sc}[k]]] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] &= y[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + \Delta y[k - \hat{\tau}^{sc}[k] + 1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \end{aligned} \quad (19)$$

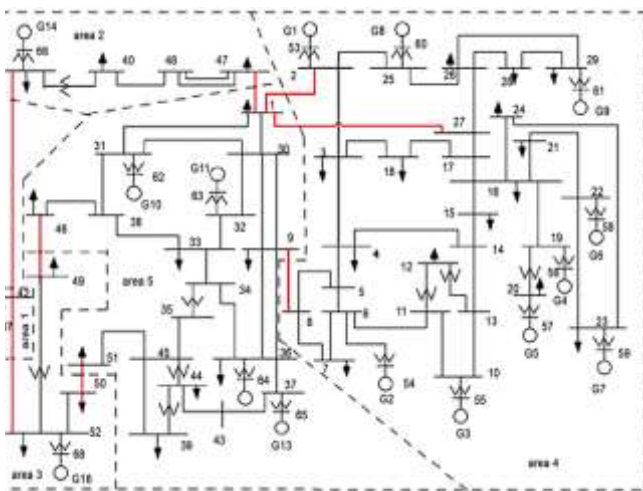
$$u[k] = [u_1[k], u_2[k], \dots, u_m[k]]^T \quad (33)$$

روند طراحی روش پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- ۱ - محاسبه مقادیر تخمینی $C[k]$ با استفاده از رابطه (۶).
- ۲ - محاسبه ورودی پیش‌بینی شده به کنترل کننده و نیز سیگنال کنترلی بعد از اعمال تأخیر کانال مخابراتی پیش‌خور با استفاده از روابط (۲۱) - (۲۲) و (۲۶) - (۲۷).
- ۳ - محاسبه سیگنال کنترلی در کانال مخابراتی پس‌خور و بعد از اعمال تأخیر کانال مخابراتی پس‌خور با استفاده از روابط (۳۱) - (۳۲).
- ۴ - اعمال جبران‌ساز تأخیر بین کنترل کننده و محرک و به دست آوردن سیگنال کنترلی اعمالی به سیستم با استفاده از رابطه (۳۳).

۴ شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این قسمت، به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی برای یک سیستم قدرت ۵-ناحیه-۱۶-ماشینه ارائه شده است. شکل ۳ دیاگرام تک‌خطی این سیستم قدرت را نشان می‌دهد که شامل ۶۸ بآس و ۸۶ خط می‌باشد و نواحی آن با استفاده از خط‌چین جدا شده‌اند. همچنین خطوط ارتباط دهنده بین نواحی به صورت خطوط قرمز رنگ مشخص شده‌اند. اطلاعات کامل مربوط به این سیستم در مرجع [۲۲] آمده است.



شکل ۳: سیستم قدرت ۵ ناحیه‌ای-۱۶ ماشین.

در این مقاله به منظور بهبود پایداری سیستم، یک پایدارساز سیستم قدرت تحت شبکه طراحی و بر روی ماشین ۹ جایگذاری می‌شود [۲۳، ۲۴]. همچنین با توجه به [۲۵]، یک SVC با ظرفیت ۵۴۶ MVar در باس ۱ قرار داده و یک کنترل کننده مکمل تحت شبکه برای آن طراحی می‌گردد. لازم به ذکر است که تغییرات سرعت روتور ماشین‌ها به عنوان سیگنال اندازه‌گیری شده از طریق کانال مخابراتی به ورودی پایدارساز تحت شبکه (ورودی PSS) ارسال می‌شود. به علاوه، توان اکتیو خط ۲۷-۱ به عنوان دیگر سیگنال اندازه‌گیری شده در نظر

همچنین برای کانال مخابراتی بین کنترل کننده و محرک که دارای تأخیر $\tau^{ca} = [\tau_1^{ca}[k], \tau_2^{ca}[k], \dots, \tau_m^{ca}[k]]$ می‌باشد، می‌توان روند مشابهی را دنبال نمود. لذا مجدداً فرض کنید $\hat{\tau}^{ca} = \max\{\tau_1^{ca}[k], \tau_2^{ca}[k], \dots, \tau_m^{ca}[k]\}$. بنابراین ورودی کنترلی پیش‌بینی شده برای لحظه $k+1$ تا $k + \hat{\tau}^{ca}$ به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} \Delta y[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \\ = \hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] [A^{z+\hat{\tau}^{sc}} x[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + u[k - \hat{\tau}^{sc}[k]]] \\ + \sum_{h=1}^{z+\hat{\tau}^{sc}(k)-1} A^h B + B \Delta u[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + (z + \hat{\tau}^{sc}[k] - 1) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} y[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \\ = y[k + (z-1) | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + \Delta y[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} s[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \\ = (\alpha + \beta) \{y_d[k+z] - y[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]]\} \\ - \beta \{y_d[k+z-1] - y[k+z-1 | k - \hat{\tau}^{sc}[k]]\} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \Delta u[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \\ = [\hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] B]^{-1} \{ (y_d[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + (z+1) - y[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \\ - (\alpha + \beta)^{-1} \{ (1-qT) s[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] - \varepsilon T \operatorname{sgn}(s[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]]) \\ + \beta (y_d[k+z] - y[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]]) \} \\ - \hat{C}[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] (A^{z+\hat{\tau}^{sc}[k]+1} x[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + \end{aligned} \quad (31)$$

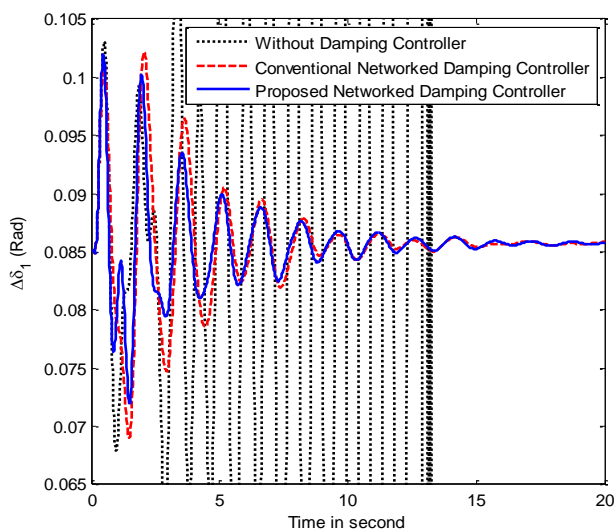
$$\begin{aligned} u[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \sum_{h=1}^{z+\hat{\tau}^{sc}[k]-1} A^{h+1} B + AB \Delta u[k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + (z + \hat{\tau}^{sc}[k] - 1) \} \\ u[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \\ = u[k + (z-1) | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] + \Delta u[k+z | k - \hat{\tau}^{sc}[k]] \end{aligned} \quad (32)$$

که $z = 1, 2, \dots, \tilde{\tau}^{ca}$.

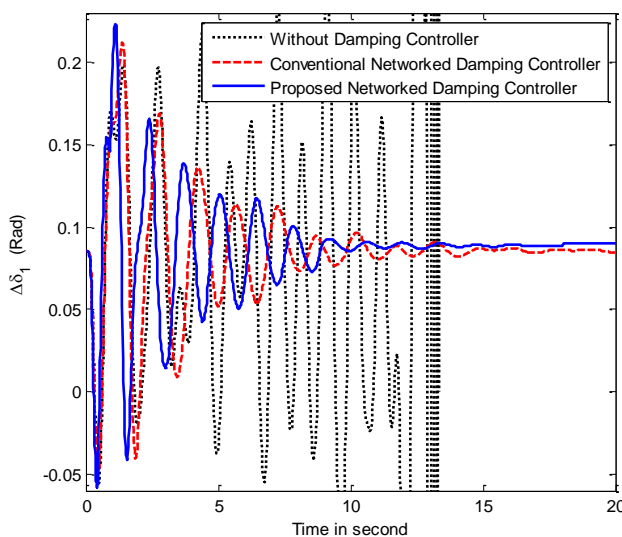
بنابراین $\bar{u}_i = [u_i[k], u_i[k+1], \dots, u_i[k + \tilde{\tau}^{sc}[k]]]^T$ ($i = 1, 2, \dots, m$) در سمت کنترل کننده مهر زمانی خورده و به صورت یک بسته اطلاعاتی از کانال i به محرک ارسال می‌شود.

لازم به ذکر است که یک جبران‌ساز تأخیر در سمت محرک قرار داده می‌شود تا آخرین دنباله کنترل را ذخیره نماید و نیز تأخیر $\tau^{ca}[k]$ را در کانال پیش‌خور را جبران نماید. ابتدا جبران کننده، تأخیر $\tau^{ca}[k] = [\tau_1^{ca}[k], \tau_2^{ca}[k], \dots, \tau_m^{ca}[k]]^T$ را از طریق مقایسه مهر زمانی بسته‌ها با زمان فعلی محاسبه می‌کند. سپس جبران‌ساز سیگنال کنترلی برای هر کانال i ($i = 1, 2, \dots, m$) را طبق اطلاعات دریافتی و تأخیر $\tau^{ca}[k]$ تعیین می‌کند. بنابراین ورودی کنترلی سیستم به صورت زیر می‌شود.

به‌منظور ارزیابی بهتر، نتایج حاصل از عملکرد سیستم در مقابل خطاهای تک‌فاز و سه‌فاز با زمین در باس ۲۶ و خط ۲۶-۲۹، با روش پیشنهادی و نیز روش ارائه‌شده در [۱۰] در شکل‌های ۴-۵ نشان داده شده‌است. شکل‌های ۴-۵ زاویه ژنراتور ۱ را نسبت به زاویه ژنراتور مرجع (ژنراتور ۱۳) به ترتیب، در حضور خطای تک‌فاز به زمین و سه‌فاز به زمین نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، درحالی‌که کانال مخابراتی ایده‌آل بوده و دارای پدیده تأخیر شبکه و گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی نمی‌باشد، هر دو روش عملکرد مناسبی دارند. اما روش پیشنهادی مد لغزشی پیش‌بین تحت‌شبکه، عملکرد و مشخصات پاسخ گذرای بهتری نسبت به کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز تحت‌شبکه در میرا کردن نوسانات بین ناحیه‌ای سیستم قدرت مورد مطالعه دارد.



شکل ۴: زاویه ژنراتور ۱ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، پس از اعمال خطای تک‌فاز با زمین در سیستم قدرت تحت‌شبکه با کانال مخابراتی ایده‌آل.



شکل ۵: زاویه ژنراتور ۱ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، پس از اعمال خطای سه‌فاز با زمین در سیستم قدرت تحت‌شبکه با کانال مخابراتی ایده‌آل.

گرفته و به ورودی کنترل‌کننده تحت‌شبکه مکمل SVC اعمال می‌شود [۲۳، ۲۴].

همچنین، به‌منظور انجام مقایسه روش طراحی پایدارساز تحت‌شبکه با ساختار پیش‌فاز-پس‌فاز ارائه‌شده در [۱۰] پیاده‌سازی و به سیستم تحت مطالعه اعمال شده‌است. محل قرارگیری کنترل‌کننده‌ها مشابه حالت قبل می‌باشد. در ادامه به‌منظور نشان دادن اثر رفتار غیرایده‌آل کانال مخابراتی و نیز قابلیت و توانایی روش پیشنهادی، مطالعات عددی در دو حالت ایده‌آل و غیرایده‌آل بودن کانال مخابراتی و در شرایط عملکردی مختلف ارائه شده‌است.

۴-۴-۴ نتایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن کانال مخابراتی ایده‌آل در مسیر پیش‌رو و پس‌رو

در این حالت فرض می‌شود کانال مخابراتی بین حسگر و کنترل‌کننده و نیز بین کنترل‌کننده و محرک ایده‌آل بوده و پدیده گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی و نیز تأخیر القاشده از سوی شبکه رخ نمی‌دهد.

$$\tau^{ca}[k] = 0 \text{ و } \tau^{sc}[k] = 0$$

به عبارت دیگر $\tau^{ca}[k] = 0$ و $\tau^{sc}[k] = 0$. در طراحی کنترل‌کننده و محاسبه سیگنال کنترلی پارامترهای α ، q و β به ترتیب برابر 0.12 ، 0.276 و 0.171 در نظر گرفته شده‌اند. همچنین پارامترهای a و b در رابطه (۱۶) به ترتیب 0.22 و 0.91 لحاظ شده‌اند. به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادی، عملکرد پایدارسازهای طراحی شده در حضور خطای تک‌فاز و سه‌فاز به زمین مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در این راستا یک بار خطای تک‌فاز و بار دیگر خطای سه‌فاز به مدت 50 میلی‌ثانیه در باس ۲۶ و خط ۲۶-۲۹ به سیستم اعمال و سیستم برای مدت 20 ثانیه شبیه‌سازی می‌شود.

جدول ۱ وضعیت بدترین مدهای نوسانی بین ناحیه‌ای سیستم حلقه بسته تحت‌شبکه مخابراتی ایده‌آل را در حضور کنترل‌کننده‌های میراساز طراحی شده نشان می‌دهد. منظور از بدترین مد نوسانی، مدی است که به محور موهومی در صفحه مختلط نزدیک‌تر بوده و بیش‌ترین سهم را در ایجاد نوسانات دارد. همان‌طور که از جدول ۱ مشاهده می‌گردد، کنترل‌کننده‌های تحت‌شبکه (پایدارساز و کنترل‌کننده مکمل SVC) طراحی شده مدهای نوسانی ناپایدار را به سمت چپ محور موهومی انتقال داده و پایداری سیستم را بهبود داده‌اند.

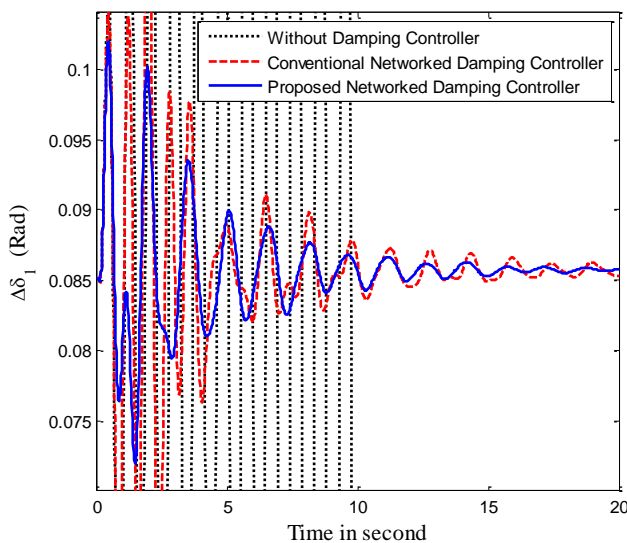
جدول ۱: بدترین مد نوسانی بین ناحیه‌ای، فرکانس و نسبت میرایی در حضور شبکه مخابراتی ایده‌آل و کنترل‌کننده‌های طراحی شده.

شرایط عملکرد	روش	بدترین مد نوسانی	فرکانس (Hz)	نسبت میرایی
اعمال خطای تک‌فاز	بدون کنترل‌کننده	$0.087 \pm 4/732i$	0.753	-0.17
	پیش‌فاز-پس‌فاز تحت‌شبکه	$-1/382 \pm 4/403i$	0.700	0.299
	مدل‌غزشی پیش‌بین تحت‌شبکه	$-1/455 \pm 4/543i$	0.723	0.305
اعمال خطای سه‌فاز	بدون کنترل‌کننده	$0.099 \pm 4/203i$	0.668	-0.23
	پیش‌فاز-پس‌فاز تحت‌شبکه	$-1/012 \pm 4/661i$	0.741	0.212
	مدل‌غزشی پیش‌بین تحت‌شبکه	$-1/249 \pm 4/515i$	0.718	0.266

۰/۰۲۶	۰/۶۸۷	۰/۱۱۲±۴/۳۲۰i	بدون کنترل کننده	اعمال هم‌زمان
۰/۱۱۷	۰/۶۸۶	-۰/۵۱۲±۴/۳۱۳i	پیش‌فاز-پس‌فاز تحت شبکه	خطای سه‌فاز و خارج شدن خط
۰/۲۲۴	۰/۶۸۴	-۰/۹۸۹±۴/۲۹۹i	مدل‌غزشی پیش‌بین تحت شبکه	۴۶-۴۹

همچنین نتایج حاصل از عملکرد سیستم در حضور شبکه مخابراتی غیرایده‌آل و سه شرایط عملکردی مختلف اشاره شده در شکل‌های ۱۱-۶ آورده شده است. شکل‌های ۷-۶ به ترتیب، زاویه ژنراتورهای ۱ و ۹ را نسبت به ژنراتور مرجع و در حضور خطای تک‌فاز به زمین و شکل‌های ۸-۹ نیز به ترتیب زاویه ژنراتورهای ۱ و ۹ را نسبت به ژنراتور مرجع در حضور خطای سه‌فاز به زمین را نشان می‌دهند.

همچنین، شکل‌های ۱۰-۱۱ نتایج مربوط به اعمال هم‌زمان خطای سه‌فاز و خارج شدن خط از شبکه را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود، روش مد لغزشی پیش‌بین تحت شبکه پیشنهادی عملکرد و مشخصات پاسخ‌گذاری بسیار بهتری نسبت به کنترل کننده پیش‌فاز-پس‌فاز تحت شبکه در میرا کردن نوسانات فرکانس پایین سیستم قدرت مورد مطالعه دارد.



شکل ۶: زاویه ژنراتور ۱ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، پس از اعمال خطای تک‌فاز با زمین در سیستم قدرت تحت شبکه با کانال مخابراتی غیرایده‌آل.

در مطالعات مربوط به میرا کردن نوسانات سیستم قدرت، اعمال خطا بر روی خطوط ارتباط دهنده نواحی برای بررسی رفتار کنترل کننده حائز اهمیت است. لذا در ادامه عملکرد کنترل کننده‌های میرا ساز طراحی شده در مقابل اعمال یک خطای سه‌فاز در خط ارتباطی بین نواحی ۴ و ۵ بررسی می‌شود.

۴۴ ختایج شبیه‌سازی با در نظر گرفتن کانال مخابراتی غیرایده‌آل در مسیر پیش‌رو و پس‌رو

در این حالت فرض می‌شود کانال مخابراتی بین حسگر و کنترل کننده و نیز بین کنترل کننده و محرک به ترتیب دارای تأخیر تصادفی و پدیده گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی به صورت $0 < \tau^{sc}[k] \leq 10$ و $0 < \tau^{ca}[k] \leq 10$ می‌باشد. همچنین، پارامترهای طراحی مشابه حالت قبل در نظر گرفته شده‌اند.

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، عملکرد پایدار سازهای طراحی شده در سه شرایط کاری مختلف مورد آزمایش قرار می‌گیرد:

- حالت ۱: اعمال خطای تک‌فاز به زمین در باس ۲۶ و خط ۲۶-۲۹.
- حالت ۲: اعمال خطای سه‌فاز در باس ۲۶ و خط ۲۶-۲۹.
- حالت ۳: اعمال هم‌زمان یک خطای سه‌فاز در باس ۲۶ و خط ۲۹-۲۶ و نیز خارج شدن خط ۴۶-۴۹ از شبکه.

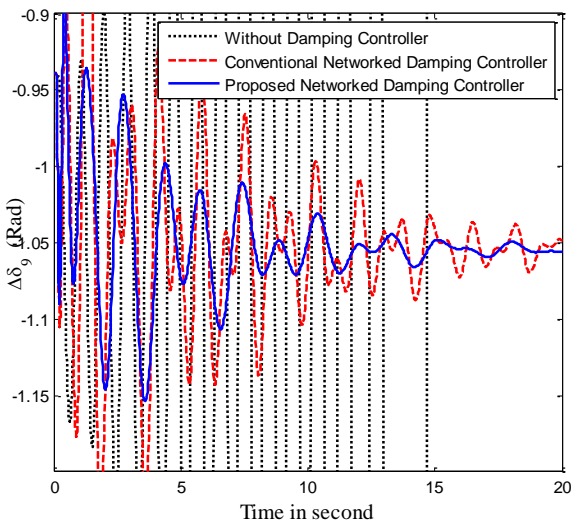
در این راستا، برای شرایط عملکردی ۱ و ۲ به ترتیب یک خطای تک‌فاز و یک خطای سه‌فاز را به مدت ۵۰ میلی‌ثانیه در باس ۲۶ و خط ۲۶-۲۹ به سیستم اعمال و سیستم برای مدت ۲۰ ثانیه شبیه‌سازی می‌شود. همچنین در حالت سوم یک خطای سه‌فاز به مدت ۵۰ میلی‌ثانیه در باس ۲۶ و خط ۲۶-۲۹ به سیستم اعمال و به طور هم‌زمان خط ۴۶-۴۹ از شبکه خارج شده و سیستم برای مدت ۲۰ ثانیه شبیه‌سازی می‌شود.

جدول ۲ وضعیت بدترین مدهای نوسانی بین ناحیه‌ای سیستم حلقه بسته تحت شبکه مخابراتی غیرایده‌آل را در شرایط متفاوت و در حضور کنترل کننده‌های میرا ساز طراحی شده نشان می‌دهد. منظور از بدترین مد نوسانی، مدی است که به محور موهومی در صفحه مختلط نزدیک تر بوده و بیشترین سهم را در ایجاد نوسانات دارد.

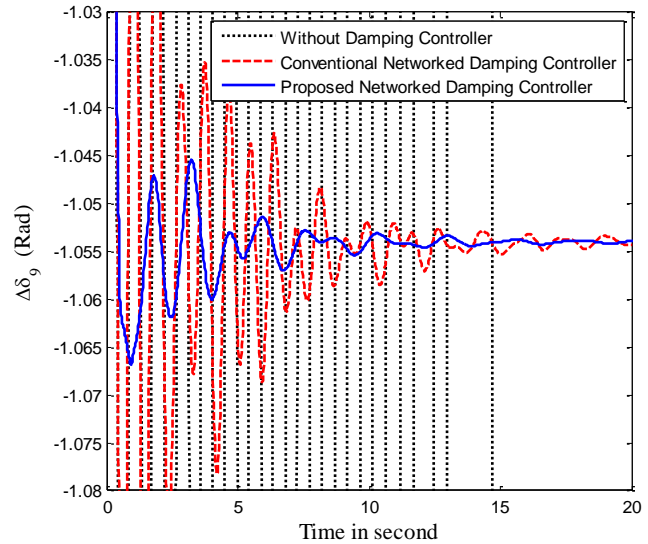
همان‌طور که از جدول ۲ مشاهده می‌گردد، در حالتی که شبکه مخابراتی دارای رفتار غیرایده‌آل می‌باشد، میرا کننده طراحی شده با روش پیشنهادی عملکرد بسیار مناسب‌تری در انتقال مدهای نوسانی ناپایدار به سمت چپ محور موهومی و بهبود پایداری سیستم داشته است.

جدول ۲: بدترین مد نوسانی بین ناحیه‌ای، فرکانس و نسبت میرایی در حضور شبکه مخابراتی غیرایده‌آل و کنترل کننده‌های طراحی شده.

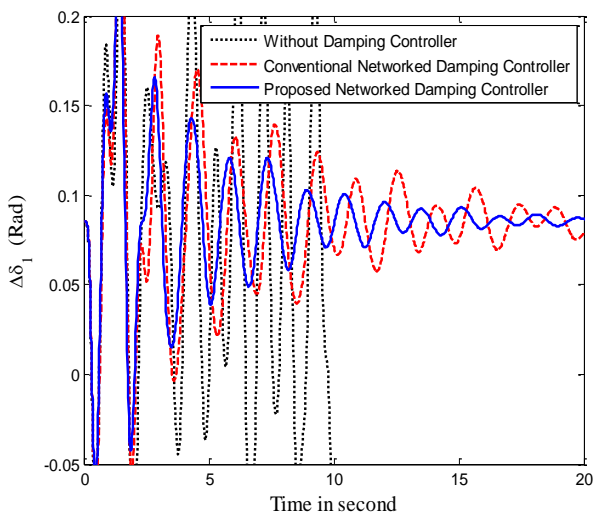
نسبت میرایی	فرکانس (Hz)	بدترین مد نوسانی	روش	شرایط عملکرد
-۰/۰۱۷	۰/۷۵۳	۰/۰۸۷±۴/۷۳۲i	بدون کنترل کننده	بدون کنترل کننده
۰/۱۹۳	۰/۶۹۹	-۰/۸۶۵±۴/۳۹۶i	پیش‌فاز-پس‌فاز تحت شبکه	اعمال خطای تک‌فاز
۰/۲۸۰	۰/۶۶۴	-۱/۲۱۹±۴/۱۷۷i	مدل‌غزشی پیش‌بین تحت شبکه	مدل‌غزشی پیش‌بین تحت شبکه
-۰/۰۲۳	۰/۶۶۸	۰/۰۹۹±۴/۲۰۳i	بدون کنترل کننده	بدون کنترل کننده
۰/۱۴۸	۰/۶۸۳	-۰/۶۴۳±۴/۲۹۳i	پیش‌فاز-پس‌فاز تحت شبکه	اعمال خطای سه‌فاز
۰/۲۲۸	۰/۶۸۴	-۱/۰۰۹±۴/۳۰۰i	مدل‌غزشی پیش‌بین تحت شبکه	مدل‌غزشی پیش‌بین تحت شبکه



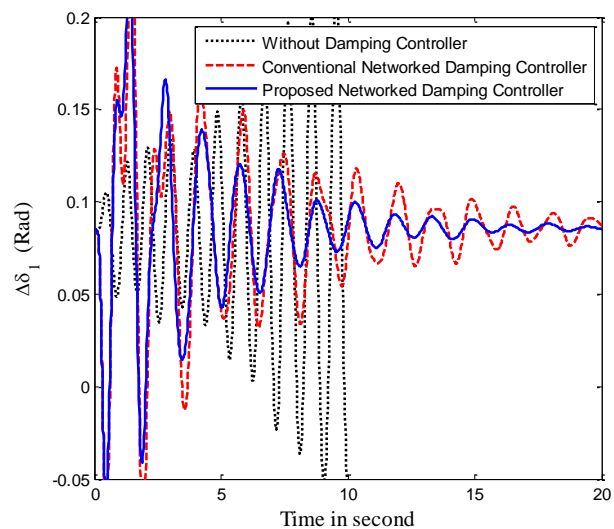
شکل ۹: زاویه ژنراتور ۹ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، پس از اعمال خطای سه‌فاز با زمین در سیستم قدرت تحت شبکه با کانال مخابراتی غیرایده‌آل.



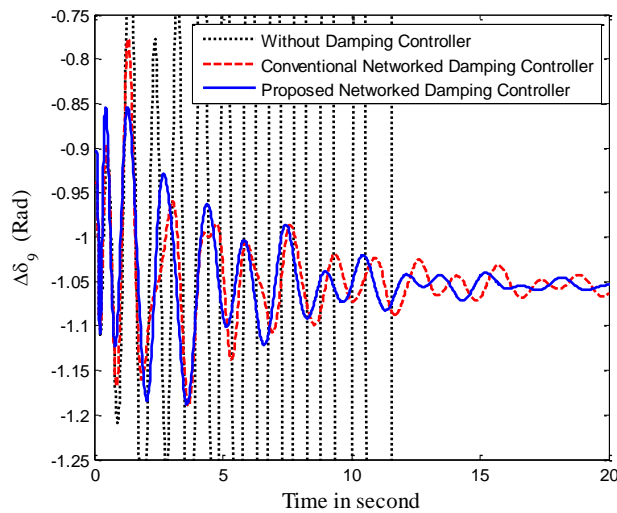
شکل ۷: زاویه ژنراتور ۹ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، پس از اعمال خطای تک‌فاز با زمین در سیستم قدرت تحت شبکه با کانال مخابراتی غیرایده‌آل.



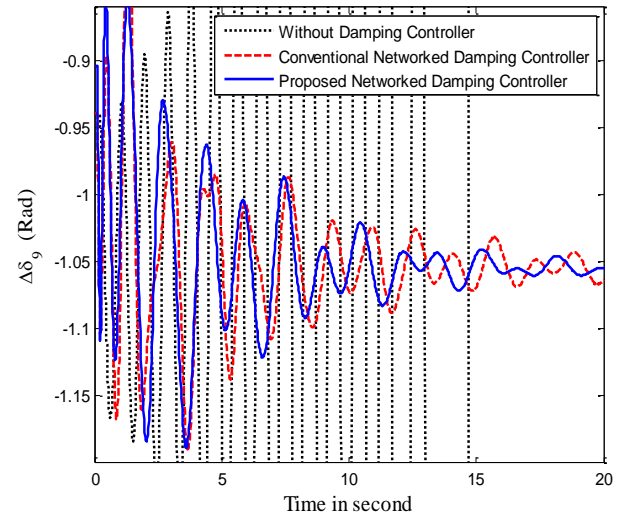
شکل ۱۰: زاویه ژنراتور ۱ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، پس از اعمال هم‌زمان خطای سه‌فاز و خارج شدن خط ۴۹-۴۶ از سیستم قدرت تحت شبکه با کانال مخابراتی غیرایده‌آل.



شکل ۸: زاویه ژنراتور ۱ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، پس از اعمال خطای سه‌فاز با زمین در سیستم قدرت تحت شبکه با کانال مخابراتی غیرایده‌آل.



شکل ۱۳: زاویه ژنراتور ۹ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، پس از اعمال خطای سه‌فاز در خط ارتباط‌دهنده نواحی ۴ و ۵ در سیستم قدرت تحت شبکه با کانال مخابراتی غیرایده‌آل.



شکل ۱۱: زاویه ژنراتور ۹ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، پس از اعمال هم‌زمان خطای سه‌فاز و خارج شدن خط ۴۶-۴۹ از سیستم قدرت تحت شبکه با کانال مخابراتی غیرایده‌آل.

$$PI_1 = \sum_{i=1}^m \int_{t=0}^{t=t_{sim}} (\Delta\delta_i)^2 dt \quad (32)$$

$$PI_2 = \sum_{i=1}^m \int_{t=0}^{t=t_{sim}} (\Delta\delta_i)^2 dt \quad (33)$$

که در روابط فوق m تعداد ژنراتورها و t_{sim} زمان شبیه‌سازی است. مقدار کمتر این دو شاخص نشان‌دهنده عملکرد بهتر سیستم از نظر زمان نشست و بالازدگی می‌باشد [۲]. جدول ۳ مقادیر به‌دست‌آمده برای روش تحت شبکه پیشنهادی و روش تحت شبکه ارائه‌شده در [۱۰] را برای شرایط مختلف نشان می‌دهد.

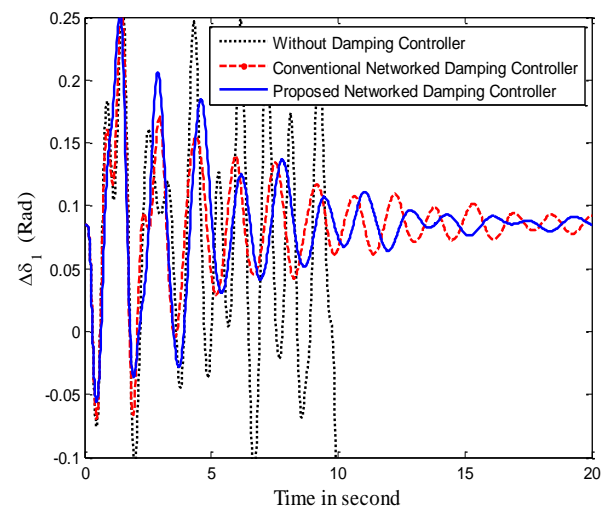
جدول ۳: مقادیر به‌دست‌آمده برای دو شاخص PI_1 و PI_2 .

کنترل‌کننده	شبکه مخابراتی	نوع خطا	PI_1	PI_2
روش ارائه‌شده در [۱۰]	ایده‌آل	اعمال خطای تک‌فاز به زمین	۰/۹۹۷	۰/۸۹۶
		اعمال خطای سه‌فاز به زمین	۱/۱۳۴	۱/۰۱۴
	غیرایده‌آل	اعمال خطای تک‌فاز به زمین	۱/۴۳۴	۱/۳۹۸
		اعمال خطای سه‌فاز به زمین	۱/۵۰۲	۱/۴۸۸
		خارج شدن خط ۴۶-۴۹	۱/۶۳۳	۱/۵۵۸
		اعمال خطای سه‌فاز به زمین در خط ۸-۹	۱/۵۲۸	۱/۵۱۲
مد لغزشی پیش‌بین پیشنهادی	ایده‌آل	اعمال خطای تک‌فاز به زمین	۰/۸۱۷	۰/۸۰۲
		اعمال خطای سه‌فاز به زمین	۰/۹۹۱	۰/۹۱۴
	غیرایده‌آل	اعمال خطای تک‌فاز به زمین	۱/۲۷۸	۱/۲۰۹
		اعمال خطای سه‌فاز به زمین	۱/۳۵۱	۱/۲۶۴
		خارج شدن خط ۴۶-۴۹	۱/۴۱۶	۱/۳۰۳
		اعمال خطای سه‌فاز به زمین در خط ۸-۹	۱/۳۷۲	۱/۲۹۸

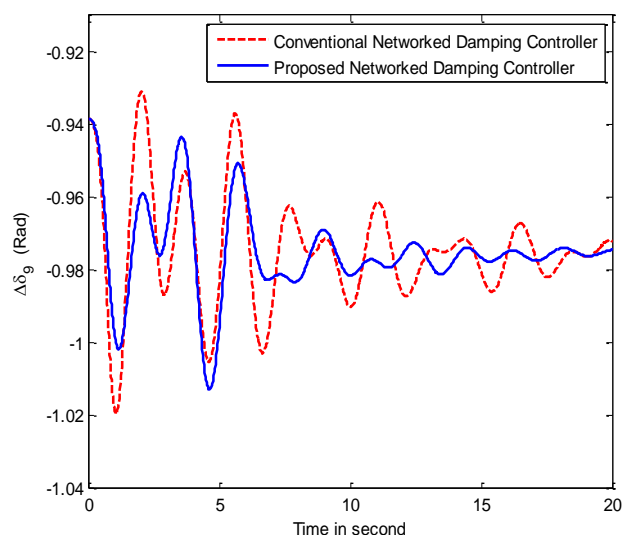
همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، روش مد لغزشی پیش‌بین تحت شبکه پیشنهادی عملکرد مناسب‌تری داشته است.

برای این منظور یک خطای سه‌فاز به مدت ۵۰ میلی‌ثانیه در خط ارتباطی ۸-۹ به سیستم اعمال و سیستم برای مدت ۲۰ ثانیه شبیه‌سازی می‌شود. شکل‌های ۱۲-۱۳ به ترتیب، زاویه ژنراتورهای ۱ و ۹ را نسبت به ژنراتور مرجع و در حضور خطای سه‌فاز به زمین را نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود، عملکرد میراساز تحت شبکه پیشنهادی در میرا کردن نوسانات فرکانس پایین سیستم قدرت مورد مطالعه، در مقایسه با روش ارائه‌شده در [۱۰]، بهتر می‌باشد.

در ادامه، به منظور ارزیابی بهتر و مقایسه کمی روش پیشنهادی و روش ارائه‌شده در [۱۰]، دو شاخص عملکرد زیر در نظر گرفته می‌شود:



شکل ۱۲: زاویه ژنراتور ۱ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، پس از اعمال خطای سه‌فاز در خط ارتباط‌دهنده نواحی ۴ و ۵ در سیستم قدرت تحت شبکه با کانال مخابراتی غیرایده‌آل.



شکل ۱۵: زاویه ژنراتور ۹ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، به‌ازای تغییر ثابت اینرسی ژنراتورها در سیستم تحت‌شبکه با کانال مخابراتی غیرایده‌آل.

همچنین به‌منظور انجام یک مقایسه، نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از یک پایدارساز تحت‌شبکه کلاسیک با ساختار پیش‌فاز-پس‌فاز مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده قابلیت برتری روش پیشنهادی، از نظر عملکرد و مشخصات پاسخ‌گذاری سیستم می‌باشند. کنترل‌کننده پیشنهادشده در این مقاله علی‌رغم داشتن مزایای متعدد همچون حذف اثر تأخیر و گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی، مقاوم‌بودن در برابر تغییر پارامترهای سیستم و اغتشاش‌های گوناگون و پیاده‌سازی آسان، دارای معایبی همچون وابسته‌بودن به باند بالایی تأخیر القاشده از سوی شبکه و تعدد پارامترهای طراحی کنترل‌کننده می‌باشد.

مراجع

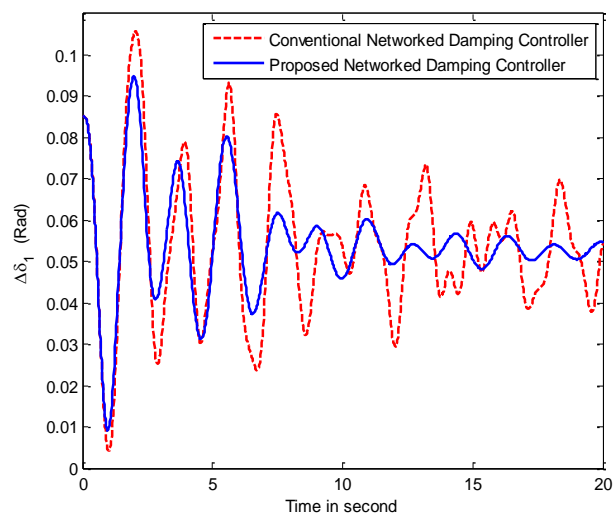
- [1] Y. Tipsuwan, M. Chow, "Control methodologies in networked control systems," Control Engineering Practice, vol. 11, no. 10, pp.1099–1111, 2003.
- [2] E. Bijami; J. Askari; M. M. Farsangi, "Design of stabilising signals for power system damping using generalised predictive control optimised by a new hybrid shuffled frog leaping algorithm", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, no. 10, pp. 1036 – 1045, 2012.
- [3] M. Yigit, V. C.Gungor, G. Tuna, M. Rangoussi, E. Fadel, "Power line communication technologies for smart grid applications: a review of advances and challenges", Computer Networks, vol. 70, pp. 366–383, 2014.

[۴] محسن بحرینی، طاهره بینازاده، ملیحه مغفوری فرسنگی و جعفر زارعی، «پایدارسازی تصادفی زمان-محدود توسط فیدبک خروجی برای سیستم کنترل تحت‌شبکه با رویکرد سیستم‌های پرش مارکوف»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحات ۲۵–۳۵، ۱۳۹۵.

[۵] سعید ابادری، مجتبی برخوردار یزدی و عباس عرب‌دردری، «طراحی کنترل‌کننده مقاوم SVC مبتنی بر WAMS با در نظر

۴۴ بررسی مقاوم‌بودن کنترل‌کننده پیشنهادی در برابر تغییر پارامترهای سیستم

به‌منظور بررسی مقاوم‌بودن روش پیشنهادی در برابر تغییر پارامترهای سیستم، ثابت اینرسی ژنراتورها را به میزان ۱۰ درصد تغییر داده و مجدداً عملکرد سیستم، تحت‌شبکه مخابراتی غیرایده‌آل، بررسی می‌شود. مشخصات شبکه همانند بخش قبل در نظر گرفته شده‌است. شکل‌های ۱۴–۱۵ به‌ترتیب نتایج به‌دست‌آمده برای زاویه ژنراتورهای ۱ و ۹ نسبت به ژنراتور مرجع (ژنراتور ۱۳) را نشان می‌دهند. همان‌طورکه از شکل‌های مذکور مشاهده می‌شود روش پیشنهادی تقاوم بهتری در برابر تغییر پارامترهای سیستم، نسبت به کنترل‌کننده تحت‌شبکه ارائه‌شده در [۱۰] دارد.



شکل ۱۴: زاویه ژنراتور ۱ نسبت به زاویه ژنراتور ۱۳، به‌ازای تغییر ثابت اینرسی ژنراتورها در سیستم تحت‌شبکه با کانال مخابراتی غیرایده‌آل.

۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش کنترل تحت‌شبکه گسسته جدید مبتنی بر کنترل مد لغزشی و یک الگوریتم پیش‌بین برای طراحی میراکننده‌های نوسانات فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت تحت‌شبکه ارائه شد. در روش ارائه‌شده از کنترل مد لغزشی با یک تابع سوئیچینگ جدید به‌همراه یک فرآیند پیش‌بین جدید برای جبران رفتار غیرایده‌آل شبکه مخابراتی، شامل تأخیر القاشده از سوی شبکه و گم‌شدن بسته‌های اطلاعاتی استفاده شده‌است. به‌منظور ارزیابی توانایی و قابلیت روش پیشنهادی، نتایج شبیه‌سازی بر روی یک سیستم تست ۵-ناحیه-۱۶ ماشین و با اعمال خطای گوناگون به سیستم موردبررسی قرار گرفت.

- Communication Delays”, IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-8, 2010.
- [16] W. Yao, L. Jiang, J. Y. Wen, S. J. Cheng, Q. H. Wu, “Networked predictive control based wide-area supplementary damping controller of SVC with communication delays compensation”, IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), pp. 1-5, 2013.
- [17] M. Mokhtari, F. Aminifar, D. Nazarpour, S. Golshannavaz, “Wide-Area power oscillation damping with a fuzzy controller compensating the continuous communication delays”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1997 – 2005, 2013.
- [18] J. Liu, A. Gusrialdi, S. Hirche, A. Monti, “Joint controller-communication topology design for distributed wide-area damping control of power systems”, Proceedings of the 18th world congress the international federation of automatic control, pp. 519-525, 2011
- [19] S.T Jin, ‘*On model free learning adaptive control and application*’, Ph.D. dissertation, Beijing Jiaotong University, Beijing, 2008.
- [20] W. Gao, Y. Wang, A. Homaifa, “Discrete-time variable structure control systems”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 42, no. 2, pp. 117–122, 1995.
- [21] Y.C. Feng, D.L. Shi, “Model free adaptive predictive control for main stream pressure system of power plant”, Energy Procedia, International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems, vol. 17, pp. 1682 - 1688, 2012.
- [22] J. Chow, “*Power System Toolbox: A Set of Coordinated m-Files for Use with MATLAB*”, ON, Canada: Cherry Tree Scientific Software, 1997.
- [23] M. Khaleghi, M. M. Farsangi, H. Nezamabadi-Pour, K.Y. Lee, “Pareto-optimal design of damping controllers using modified artificial immune algorithm”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), vol. 41, no. 2, pp. 240-250, 2011.
- [24] M. M. Farsangi, Y. H. Song, K.Y. Lee, “Choice of FACTS device control inputs for damping interarea oscillations”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 2, pp. 1135-1143, 2004..
- [25] M. M Farsangi, H. Nezamabadi-pour, Y. H. Song, K. Y. Lee, “Placement of SVCs and selection of stabilizing signals in power systems”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 3, pp.1061-1071, 2007.
- گرفتن نامعینی تأخیر زمانی سیگنال‌های راه دور»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۴، صفحات ۱-۱۲، ۱۳۹۴.
- [۶] سعید تیمورزاده، فرخ امینی‌فر و مجید صنایع‌پسند، «میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای: طرح گسترده هماهنگی حذف بار و تولید مبتنی بر منطق فازی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحات ۳۹-۴۸، ۱۳۹۶.
- [7] S. Wang, X. Meng, T. Chen, ‘Wide-Area control of power systems through delayed network communication’, IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 20, no. 2, pp. 495 – 503, 2012.
- [8] A. K. Singh, R.Singh, B. C. Pal, ‘Stability analysis of networked control in smart grids’, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 381 – 390, 2015
- [9] H. Wu, K. S. Tsakalis, G. T. Heydt, “Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design, IEEE Transaction on Power Systems, vol. 19, no. 4, pp. 1935-1941, 2004.
- [10] W. Yao, L. Jiang, J. Wen, Q. H. Wu, S. Cheng, “Wide-area damping controller of FACTS devices for inter-area oscillations considering communication time delays, IEEE Transaction on Power Systems, vol. 29, no. 1, pp. 318-329, 2014.
- [11] L. Cheng, G. Chen, W. Gao, F. Zhang, ‘Adaptive time delay compensator (ATDC) design for wide-area power system stabilizer’, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 6, pp. 2957- 2966, 2014.
- [12] J. Li, Z. Chen, D. Cai, W. Zhen, Q. Huang, “Delay-dependent stability control for power system with multiple time-delays”, IEEE Transaction on Power Systems, vol. 31, no. 3, pp. 2316-2326, 2016.
- [13] V. Vesely, T. N. Quang, “Robust power system stabilizer via networked control system”, Journal of Electrical Engineering, vol. 62, no. 5, pp. 286–291, 2011.
- [14] W. Yao, L. Jiang, J. Wen, Q. Wu, S. Cheng, “Wide-area damping controller for power system interarea oscillations: A networked predictive control approach”, IEEE Transaction on Control Systems Technology, vol. 23, no. 1, pp. 27-36, 2017.
- [15] W. Yao, L. Jiang, Q. H. Wu, J. Y. Wen, S. J. Cheng, “Design of Wide-Area Damping Controllers Based on Networked Predictive Control Considering

زیرنویس‌ها

- 1 Networked Control Systems (NCS)
- 2 Power System Stabilizer (PSS)
- 3 Static Var Compensator (SVC)
- 4 Wide-Area Measurement System
- 5 Phase Measurement Unit (PMU)
- 6 Generalized Predictive Control (GPC)
- 7 Pseudo Partial Derivative (PPD).
- 8 Event-driven
- 9 Chattering