



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 16, No. 3, 2025
pp. 81-98
Research Paper

An Online Method for Estimating Physical and Virtual Inertia in Power Systems Using Ambient Data

Alireza Kaveh Yazdi¹, Mohammadreza Mazidi Sharafabadi², Davood Aboutorabi Zarchi³, Alireza Sedighi⁴

¹ Department of electrical engineering, Yazd university, Yazd, Iran

² Department of electrical engineering, Yazd university, Yazd, Iran

³ Department of electrical engineering, Yazd university, Yazd, Iran

⁴ Department of electrical engineering, Yazd university, Yazd, Iran

Abstract:

This paper presents a novel model for the simultaneous estimation of physical and virtual inertia in power systems under normal operating conditions. Physical inertia is derived from synchronous generators, while renewable energy sources provide virtual inertia through appropriate control strategies. The proposed model utilizes data recorded by Phasor Measurement Units (PMUs), which offer precise and real-time information about the state of the power network. Using the ssest system identification method in MATLAB, the frequency response functions of both generators and renewable sources are extracted. These functions form the basis for calculating and estimating physical and virtual inertia in different areas of the power system. To evaluate the accuracy and effectiveness of the proposed method, the IEEE 39-bus standard test system is employed. All simulations are conducted in DIgSILENT, and the resulting data are imported into MATLAB for final analysis. The results of extensive studies show that the proposed method, while being robust to noise, can estimate the system inertia accurately, rapidly, and reliably.

Keywords: Inertia Estimation, Physical Inertia, Virtual Inertia, System Identification (ssest), Phasor Measurement Units (PMUs), Renewable Energy Sources, Synchronous Generators.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/isee.2025.145270.1739>

ارائه یک روش آنالین به منظور تخمین اینرسی فیزیکی و مجازی در سیستم قدرت با

استفاده از داده‌های محیطی

علیرضا کاوه یزدی^۱، محمد رضا مزیدی شرف آبادی^{۲*}، داوود ابوترابی زارچی^۳، علیرضا صدیقی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران

arkaveh99@stu.yazd.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران

mrmazidi@yazd.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران

d.abootorabi@yazd.ac.ir

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران

sedighi@yazd.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک مدل جدید برای تخمین هم‌زمان اینرسی فیزیکی و اینرسی مجازی در سیستم‌های قدرت تحت شرایط بهره‌برداری عادی ارائه شده است. اینرسی فیزیکی ناشی از ژنراتورهای سنکرون است و اینرسی مجازی به کمک منابع انرژی تجدیدپذیر با بهره‌گیری از راهکارهای کنترلی مناسب ایجاد می‌شود. در مدل پیشنهادی، از داده‌های ثبت‌شده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری (PMU) استفاده شده است که اطلاعاتی لحظه‌ای و دقیق از وضعیت شبکه فراهم می‌کنند. سپس، با استفاده از روش شناسایی سیستم ssest در محیط نرم‌افزار MATLAB، توابع پاسخ فرکانسی مربوط به ژنراتورها و منابع تجدیدپذیر استخراج می‌شوند. این توابع مبنای محاسبه و تخمین مقدار اینرسی فیزیکی و مجازی در نواحی مختلف سیستم قدرت خواهند بود. به منظور ارزیابی دقت و کارایی روش پیشنهادی، شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE به عنوان سیستم تست استفاده شده است. کلیه شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory انجام و داده‌های حاصل برای تحلیل نهایی وارد نرم‌افزار MATLAB شده‌اند. نتایج حاصل از مطالعات متعدد نشان می‌دهد این روش، ضمن مقاومت مناسب در برابر نویز، قادر است مقدار اینرسی سیستم را به صورت دقیق، سریع و قابل‌اعتماد تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی: تخمین اینرسی، اینرسی فیزیکی و مجازی، شناسایی سیستم ssest، واحدهای اندازه‌گیری فازوری، منابع تجدیدپذیر، ژنراتورهای سنکرون.

۱- مقدمه

منابعی مانند انرژی خورشیدی، بادی و پیل‌های سوختی که از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند، نقشی فزاینده در تأمین انرژی ایفا می‌کنند [۱]. با این حال، گسترش استفاده از این منابع به کاهش سهم ژنراتورهای سنکرون در شبکه منجر شده است؛ ژنراتورهایی که به واسطه جرم چرخان خود دارای اینرسی فیزیکی زیاد و انرژی جنبشی جالب توجهی هستند و نقشی حیاتی در پایداری دینامیکی سیستم ایفا می‌کنند [۲]. در مقابل، منابع

با افزایش روزافزون نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت، این منابع به عنوان راه‌حلی مؤثر و پایدار برای مقابله با بحران جهانی انرژی مطرح شده‌اند. در سال‌های اخیر، منابع تجدیدپذیر به سرعت در حال جایگزینی با روش‌های متداول تولید برق بوده‌اند و سهم آنها در تولید انرژی الکتریکی به طور پیوسته در حال افزایش است.

تجدیدپذیر متصل به شبکه از طریق مبدل‌ها فاقد این اینرسی فیزیکی هستند و بنابراین، در پاسخ دینامیکی سیستم قدرت مشارکت مؤثری ندارند [۳].

در سیستم‌های قدرت با نفوذ زیاد منابع انرژی تجدیدپذیر، کاهش اینرسی فیزیکی ممکن است به کاهش توانایی سیستم در واکنش سریع و مؤثر به اغتشاشات و در نتیجه، تضعیف میرایی نوسانات فرکانس منجر شود. در چنین شرایطی، افت اینرسی به افزایش نرخ تغییرات فرکانس^۱ (RoCoF) و انحراف بیشتر فرکانس از مقدار مرجع، شامل بیشینه یا کمینه فرکانس، پس از بروز اختلال منجر خواهد شد. افزون بر این، وابستگی تولید انرژی تجدیدپذیر به شرایط آب‌وهوایی موجب نوسانات در میزان تولید و در نتیجه، تغییر در تعداد ژنراتورهای سنکرون در حال بهره‌برداری می‌شود. این مسأله چالش‌هایی را در زمینه برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های قدرت ایجاد می‌کند [۴].

با کاهش مداوم منابع دارای اینرسی فیزیکی در سیستم قدرت، راهکارهایی برای مقابله با چالش‌های ناشی از افت اینرسی پیشنهاد شده‌اند. یکی از این روش‌ها بهره‌برداری از تعدادی ژنراتور سنکرون با بارگذاری سبک به موازات استفاده گسترده از منابع تجدیدپذیر است. این رویکرد اگرچه می‌تواند اینرسی کافی را در هنگام عدم تعادل توان فراهم کند، به دلیل نیاز به ذخیره انرژی جنبشی زیاد در رتور ژنراتورها، با محدودیت‌های اقتصادی مواجه است [۵]. رویکرد دیگر استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند چرخ‌طیارها، باتری‌ها و ابرخازن‌ها با به‌کارگیری راهبردهای کنترلی مناسب برای جبران انحرافات فرکانس است. این ذخیره‌سازها به دلیل واکنش سریع به تغییرات فرکانسی در شبکه، مورد توجه قرار گرفته‌اند. کنترل منابع ذخیره‌ساز انرژی و سایر منابع تجدیدپذیر برای پشتیبانی از پایداری فرکانسی به طور کلی تحت عنوان «اینرسی مجازی»^۲ یا «اینرسی مصنوعی»^۳ شناخته می‌شود [۶، ۷]. اینرسی مجازی در واقع نوعی پاسخ کنترلی است که به منابع مبتنی بر مبدل اجازه می‌دهد با شبیه‌سازی رفتار دینامیکی ژنراتور سنکرون، نقش اینرسی فیزیکی مورد نیاز برای پایداری فرکانسی سیستم را تقلید کنند. در این روش، کنترل‌کننده مبدل با

لندازه‌گیری فرکانس لحظه‌ای شبکه و نرخ تغییر آن، میزان توان اکتیو تزریقی یا برداشت‌شده را به صورت لحظه‌ای تنظیم می‌کند تا با تغییرات فرکانس مقابله شود [۸].

افزودن اینرسی مجازی به شبکه قدرت به متغیر شدن مقدار کل اینرسی سیستم در طول زمان منجر می‌شود. این ویژگی متغیر زمانی اینرسی اهمیت توجه به پایداری دینامیکی و قابلیت اطمینان شبکه را افزایش می‌دهد. در نتیجه، برای بهره‌برداری ایمن و پایدار از سیستم‌های قدرت مدرن که با کاهش و تغییرات لحظه‌ای در میزان اینرسی مواجه هستند، برآورد و پایش دقیق اینرسی و همچنین، ارزیابی عملکرد پاسخ فرکانسی سیستم ضروری خواهد بود. دانش پیشینی از مقدار اینرسی در سیستم قدرت می‌تواند نقشی مهم در طراحی و اجرای راهبردهای کنترلی مناسب ایفا کند و امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای مدیریت نوسانات فرکانسی را فراهم آورد. به طور خاص، آگاهی از سطوح لحظه‌ای اینرسی در شبکه به اپراتورهای سیستم قدرت این امکان را می‌دهد تا پیش از وقوع اختلال یا بلافاصله پس از آن، تصمیم‌های کنترلی و عملیاتی مؤثری را برای حفظ پایداری فرکانسی اتخاذ کنند.

دستیابی به آگاهی لحظه‌ای و مداوم از مقدار اینرسی سیستم قدرت، با توسعه و به‌کارگیری سامانه‌های اندازه‌گیری فازوری (PMU)^۴ امکان‌پذیر شده است [۹]. در چارچوب روش‌های تخمین اینرسی، اینرسی سیستم به عنوان یک پارامتر ناشناخته تلقی می‌شود که باید از طریق فرایندهای تخمین پارامتر یا شناسایی سیستم برآورد شود. روش‌های ارائه‌شده در مراجع برای تخمین اینرسی را می‌توان از دو دیدگاه طبقه‌بندی کرد: نخست، بر اساس افق زمانی تخمین (مانند تخمین لحظه‌ای یا میان‌مدت) و دوم، بر اساس دامنه یا رویکرد روش (مانند استفاده از داده‌های محلی یا گسترده). مقایسه این روش‌ها در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه شده است. علاوه بر این، یک دسته‌بندی رایج دیگر تقسیم‌بندی روش‌های تخمین اینرسی به دو گروه اصلی است: روش‌های مبتنی بر مدل^۵ و روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری یا داده‌محور^۶ [۹].

سیستم تخمین زده شده است. این روش روی داده‌های واقعی از جزایر هاوایی آزمایش شده و نتایج نشان‌دهنده خطای میانگین ۲ تا ۸ درصد در تخمین اینرسی کل سیستم است. در مرجع [۱۲]، با استفاده از تزریق سیگنال‌های کم‌دامنه تست به یک سیستم قدرت و اندازه‌گیری فرکانس، مجموع اینرسی مجازی و فیزیکی کل سیستم تخمین زده شده است. در مرجع [۱۳]، دو روش مبتنی بر یادگیری ماشین شامل شبکه کانولوشنی بازگشتی طولانی^۹ و شبکه کانولوشنی گراف^{۱۰} برای تخمین اینرسی با استفاده از داده‌های محیطی توسعه داده شده‌اند. هر دو روش بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده آموزش داده شده و روی یک شبکه ۲۴ باسه IEEE آزمایش شده‌اند و به دقت تخمین اینرسی ۹۷ تا ۹۸ درصد دست یافته‌اند. در مرجع [۱۴]، از روش تجزیه تطبیقی تجربی جمعی حالت ذاتی^{۱۱} برای تخمین اینرسی در شرایط کاری عادی پیشنهاد شده است. این روش با داده‌های واقعی واحدهای اندازه‌گیری فازوری در نواحی مختلف آمریکا بررسی شده و نتایج نشان‌دهنده دقت زیاد آن در تخمین اینرسی کل است. در مرجع [۱۵]، روشی مبتنی بر شبکه‌های عصبی کانولوشنی به منظور تخمین اینرسی فیزیکی و مجازی در یک سیستم قدرت پیشنهاد شده است. مقدار اینرسی هر ناحیه به صورت محلی و از طریق آموزش آفلاین شبکه تخمین زده می‌شود، در حالی که وزن‌های شبکه به صورت آنلاین به‌روزرسانی می‌شوند.

در این مقاله، روشی نوین برای تخمین اینرسی سیستم قدرت ارائه می‌شود که بر پایه داده‌های استخراج‌شده از عملکرد عادی سیستم در زمان بهره‌برداری طراحی شده است. روش پیشنهادی قادر است اینرسی یک ژنراتور سنکرون، اینرسی ناحیه‌ای از یک شبکه قدرت، اینرسی کل سیستم و همچنین، اینرسی مجازی ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت را با دقتی مناسب تخمین بزند. در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر در چند جنبه کلیدی قابل بیان است. نخست آنکه، روش ارائه‌شده قادر است اینرسی فیزیکی ژنراتورهای سنکرون و اینرسی مجازی ناشی از منابع تجدیدپذیر مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت را به صورت هم‌زمان و در شرایط بهره‌برداری عادی شبکه تخمین



شکل (۱): طبقه‌بندی رویکردهای تخمین اینرسی

در این مقاله، برای تخمین اینرسی سیستم قدرت، از رویکردی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های محیطی استفاده شده است. با توسعه سامانه‌های اندازه‌گیری گسترده و بهره‌گیری از فناوری موقعیت‌یاب جهانی، امکان ثبت داده‌های اندازه‌گیری شده در مقیاس وسیع و به صورت هم‌زمان در زمان واقعی فراهم شده است. این قابلیت بستری مناسب برای اجرای برنامه‌های نظارت و کنترل گسترده در شبکه قدرت فراهم می‌آورد. بر این اساس، راهبردهایی متعدد برای تخمین اینرسی با استفاده از داده‌های حاصل از PMUها ارائه شده‌اند. داده‌های محیطی ثبت‌شده توسط PMUها بازتاب‌دهنده پاسخ‌های فرکانسی سیستم در قالب سری‌های زمانی هستند که از نوسانات ناشی از عدم قطعیت‌های موجود در بارها و تولید منابع انرژی تجدیدپذیر ناشی می‌شوند. این ویژگی داده‌ها امکان تخمین دقیق‌تر رفتار دینامیکی و در نتیجه، برآورد اینرسی لحظه‌ای سیستم را فراهم می‌کند [۹]. روش‌های مبتنی بر داده‌های محیطی نه فقط برای تخمین اینرسی کل سیستم قدرت توسعه یافته‌اند، بلکه امکان برآورد اینرسی در سطح شینه‌ها و نواحی مختلف سیستم را نیز فراهم کرده‌اند. این رویکردها معمولاً با بهره‌گیری از مدل پاسخ ضربه^۷ و داده‌های ثبت‌شده در شرایط بهره‌برداری عادی، بدون نیاز به اعمال اختلال مصنوعی، اینرسی سیستم را تخمین می‌زنند.

در مرجع [۱۰]، مدلی بر پایه شبکه عصبی کانولوشنی زمان-سری^۸ برای تخمین اینرسی منطقه‌ای پیشنهاد شده است. ورودی‌ها شامل داده‌های فرکانس و توان در گذر زمان هستند. مدل در برابر نویز و تأخیر ارتباطی مقاوم است و عملکردی خوب در شبکه‌های AC/DC ترکیبی دارد. در مرجع [۱۱]، با استفاده از داده‌های محیطی فرکانس، اینرسی

مؤلفه اینرسی فیزیکی و اینرسی مجازی را به صورت دقیق و مقاوم در برابر نویز اندازه‌گیری، تخمین می‌زند. در قسمت ۳، شبیه‌سازی و نتایج به دست آمده از آن ارائه می‌شود. در نهایت، در قسمت ۴، نتیجه‌گیری و پیشنهادها برای ادامه کار بیان می‌شوند.

جدول (۱): مقایسه رویکردهای تخمین اینرسی مبتنی بر مدل و

مبتنی بر اندازه‌گیری

طبقه‌بندی روش‌های تخمین	مدت زمان تخمین	معایب
تخمین اینرسی مبتنی بر مدل [۱۶]	چند ثانیه تا چند ده ثانیه	۱- وابسته به مدل‌سازی و اغتشاشات بزرگ ۲- مخصوص تخمین اینرسی ژنراتورهای سنکرون ۳- مشکلات ناشی از عدم قطعیت پارامترها
تخمین اینرسی مبتنی بر اندازه‌گیری با استفاده از داده‌های اغتشاشات بزرگ [۱۷، ۱۸]	چند ثانیه	۱- دشواری در تخمین نرخ تغییرات فرکانس ۲- عدم تمایز پاسخ اینرسی و پاسخ اولیه ۳- وابسته به اغتشاشات بزرگ ۴- استفاده از فرکانس ترمینال ژنراتور به عنوان یک واسط برای محاسبه سرعت رتور ژنراتور
تخمین اینرسی مبتنی بر اندازه‌گیری با استفاده از داده‌های محیطی [۱۹، ۲۰]	چند دقیقه	۱- استفاده از فرکانس ترمینال ژنراتور به عنوان یک واسط برای محاسبه سرعت رتور ژنراتور ۲- آسیب‌پذیر نسبت به نویز اندازه‌گیری

جدول (۲): مقایسه رویکردهای تخمین اینرسی با توجه به افق

زمانی

روش	توضیحات/کاربرد	معایب
آفلاین	تکنیک‌های تخمین اینرسی وابسته به داده‌های گذشته سیستم هنگام وقوع اغتشاشات بزرگ در شبکه [۲۱، ۲۲]	• اندازه اغتشاش باید مشخص باشد. • زمان وقایع باید مشخص باشد. • خطا در محاسبه نرخ تغییرات فرکانس، به دلیل

بزند؛ در حالی که بیشتر پژوهش‌های پیشین فقط یکی از این دو مؤلفه را بررسی کرده‌اند یا به داده‌های حاصل از اغتشاشات بزرگ متکی بوده‌اند. دوم آنکه، در این پژوهش از داده‌های محیطی ثبت شده توسط واحدهای اندازه‌گیری فازوری بهره گرفته شده است. این ویژگی باعث می‌شود بدون نیاز به اعمال اغتشاش مصنوعی یا ایجاد تغییر عمدی در بار شبکه، بتوان مقدار اینرسی سیستم را در زمان واقعی برآورد کرد. چنین رویکردی روش حاضر را برای کاربردهای عملی در مراکز کنترل و پایش شبکه بسیار مناسب می‌کند. در نهایت، استفاده از معیار آماری مقاوم انحراف میانه مطلق (MAD) برای حذف داده‌های پرت و افزایش دقت محاسبات، به همراه تحلیل اثر منابع دارای اینرسی مجازی (مانند باتری مجهز به کنترل کننده اینرسی مجازی)، از دیگر ویژگی‌های متمایز این مطالعه نسبت به پژوهش‌های پیشین است.

بنابراین، نوآوری‌های این پژوهش را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

• تخمین هم‌زمان اینرسی فیزیکی و مجازی: در این

پژوهش برای نخستین بار روشی ارائه شده است که می‌تواند هر دو نوع اینرسی فیزیکی (ناشی از ژنراتورهای سنکرون) و اینرسی مجازی (ایجاد شده توسط منابع مبتنی بر مبدل) را به طور هم‌زمان و دقیق در شرایط بهره‌برداری عادی شبکه تخمین بزند.

• استفاده از داده‌های محیطی بدون نیاز به اغتشاش

مصنوعی: روش پیشنهادی از داده‌های واقعی و محیطی ثبت شده توسط PMUها استفاده می‌کند و برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین، نیازی به اعمال اغتشاشات بزرگ یا تست‌های ضربه‌ای ندارد؛ بنابراین، ایمن‌تر، کم‌هزینه‌تر و قابل استفاده در شرایط واقعی بهره‌برداری است.

• مقاومت زیاد در برابر نویز: در این پژوهش، برای

حذف داده‌های پرت و افزایش دقت تخمین در حضور نویز، از شاخص آماری مقاوم انحراف میانه مطلق استفاده شده که در مطالعات مشابه کمتر به کار رفته است.

در ادامه این مقاله، در قسمت ۲، روش پیشنهادی به طور کامل معرفی خواهد شد. این روش با اتکا بر داده‌های محیطی ثبت شده از سیستم تحت بهره‌برداری نرمال، هر دو

پژوهش سیستم قدرت را به چند ناحیه مجزا تقسیم می‌کند و با پایش رفتار دینامیکی میان تغییرات توان اکتیو و فرکانس در هر ناحیه، مقدار اینرسی مؤثر آن ناحیه را برآورد می‌کند. این رویکرد امکان نظارت محلی و هدفمند بر رفتار دینامیکی شبکه و افزایش دقت در تصمیم‌گیری‌های کنترلی را فراهم می‌کند.

۱-۲- مدل‌سازی دینامیکی سیستم قدرت

به منظور بررسی و شناسایی دینامیک سیستم قدرت در چارچوب روش پیشنهادی، تحلیل یک مدل نظری ساده اما دقیق از رابطه بین توان اکتیو و فرکانس می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد. در این بخش، مدلی پایه از دینامیک فرکانس ارائه شده است که هدف از آن تسهیل در تحلیل داده‌ها برای شناسایی ساختار دینامیکی مدنظر است. در بازه زمانی کوتاه پس از وقوع یک عدم تعادل در توان، رفتار دینامیکی بین توان اکتیو و فرکانس را می‌توان با استفاده از معادله نوسان توصیف کرد [۲۷]. برای ژنراتور آم، معادله کلاسیکی که در سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$\frac{df_i}{dt} = \frac{P_{iM} - P_{iE}}{2H_i S_{in}} f_n \quad (1)$$

که در آن، P_{iM} توان مکانیکی خروجی ماشین است، در حالی که P_{iE} توان بار الکتریکی متصل به آن، f_i فرکانس الکتریکی، H_i ثابت اینرسی، S_{in} توان ظاهری و f_n فرکانس نامی سیستم در حالت پایدار است.

به عنوان یک تقریب، می‌توان شکل معادل این معادله را برای کل یک ناحیه یا حتی کل سیستم قدرت نیز به کار برد. در این حالت، از فرکانس تجمعی ناحیه‌ای استفاده می‌شود و رفتار دینامیکی سیستم بلافاصله پس از وقوع یک اختلال بار در ناحیه با نسخه‌ای تجمیع‌شده از معادله نوسان قابل توصیف خواهد بود. این مدل پایه‌ای مبنای تحلیل داده‌های اندازه‌گیری‌شده و شناسایی مدل دینامیکی اینرسی در ادامه مطالعه خواهد بود:

$$\frac{df_j}{dt} = \frac{P_{jM} - P_{jE}}{M_j} = \Delta P_j / M_j \quad (2)$$

روش	توضیحات/کاربرد	معایب
		نویز، بر دقت تأثیر می‌گذارد. • امکان تخمین پیوسته وجود ندارد.
آنلاین	گونه‌ای از تکنیک‌های تخمین اینرسی که از اندازه‌گیری‌های زمان واقعی شبکه به عنوان ورودی برای تخمین‌ها استفاده می‌کنند [۱۹، ۲۰، ۲۳].	• عدم دقت به دلیل خطاهای اندازه‌گیری • برای تخمین‌های آنلاین با توجه به زمان طولانی در اجرای محاسبات، به دلیل مدل شبکه‌های بزرگ، غیرعملی است.
مبتنی بر پیش‌بینی	گونه‌ای از تکنیک‌های تخمین اینرسی که مقدار اینرسی آینده سیستم را برای برآورد پاسخ فرکانس شبکه پیش‌بینی می‌کنند [۲۴، ۲۵]	• چالش‌هایی برای گنجاندن سهم اینرسی از طرف تقاضا در پیش‌بینی وجود دارند. • محدود به پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت • دقت پیش‌بینی تحت تأثیر تغییرات آب‌وهوا و نویز در اندازه‌گیری‌هاست.

۲- روش پیشنهادی برای تخمین اینرسی با

استفاده از داده‌های محیطی

در این قسمت، روشی برای تخمین اینرسی نواحی مختلف سیستم قدرت با بهره‌گیری از اندازه‌گیری‌های فرکانس و توان اکتیو به‌دست‌آمده از واحدهای اندازه‌گیری فازی ارائه شده است. یکی از نگرانی‌های اصلی اپراتورهای سیستم‌های انتقال ارزیابی دقیق اینرسی مؤثر سیستم با نواحی مختلف آن به منظور تعیین زمان در دسترس برای استقرار پاسخ مناسب در برابر اختلالات شبکه است [۲۶]. اینرسی مؤثر به عنوان رابطه‌ای بین تغییر در تعادل توان (ورودی یا خروجی) و نرخ تغییرات فرکانس در یک ناحیه تعریف می‌شود و مفهومی معادل اینرسی کلاسیک ناشی از جرم چرخان ژنراتورهای سنکرون دارد. در تعبیر متعارف، اینرسی فیزیکی ناشی از انرژی جنبشی موجود در رتور ژنراتورهای سنکرون است که در برابر تغییرات ناگهانی فرکانس از سیستم محافظت می‌کند. روش پیشنهادی در این

$$f_{COI} = \frac{\sum_i^N H_i S_{in} f_i}{\sum_i^N H_i S_{in}} \quad (3)$$

که در آن، f_i فرکانس تمام N گرهی است که آن ناحیه را تشکیل می‌دهند و توسط اینرسی هر گره وزن‌دهی می‌شوند (گره‌هایی که فرض می‌شود فاقد اینرسی هستند، به طریقی مؤثر حذف می‌شوند). در این روش، از یک فرکانس ناحیه تجمعی استفاده می‌کنیم که ساده‌شده مرکز فرکانس اینرسی است. فرکانس ناحیه j به عنوان میانگین وزنی فرکانس‌های اندازه‌گیری‌شده ارزیابی می‌شود:

$$f_j = \frac{\sum_i^{N_j} \omega_i f_i}{\sum_i^{N_j} \omega_i} \quad (4)$$

که در آن، f_i ها فرکانس‌های N_j گرهی است که در ناحیه j اندازه‌گیری می‌شوند. وزن‌ها بر اساس تجزیه و تحلیل سیستم و انتخاب سیگنال‌های فرکانسی انتخاب می‌شوند که توزیع کلی اینرسی را در هر ناحیه منعکس می‌کنند. در ساده‌ترین حالت، تمام گره‌هایی که فرض می‌شود مقداری اینرسی دارند، به طور مساوی وزن‌گذاری می‌شوند. هنگامی که PMUها در سیستم نصب می‌شوند، معمولاً برای اندازه‌گیری جریان خطوط انتقال و به دنبال آن، نظارت بر ژنراتورها، تنظیم می‌شوند. اگر جریان بین نواحی تعریف شود و بیشتر ژنراتورهایی که در کنترل فرکانس اولیه مشارکت دارند قابل نظارت باشند، می‌توان تغییرات بار را تقریب زد. فرض اصلی این است که وقتی تغییرات کوچک در طول زمان در نظر گرفته شوند، تغییرات در بار و تولید به اندازه کافی به یکدیگر نزدیک هستند؛ بنابراین، تغییرات بار در ناحیه j تقریباً برابر خواهد بود با:

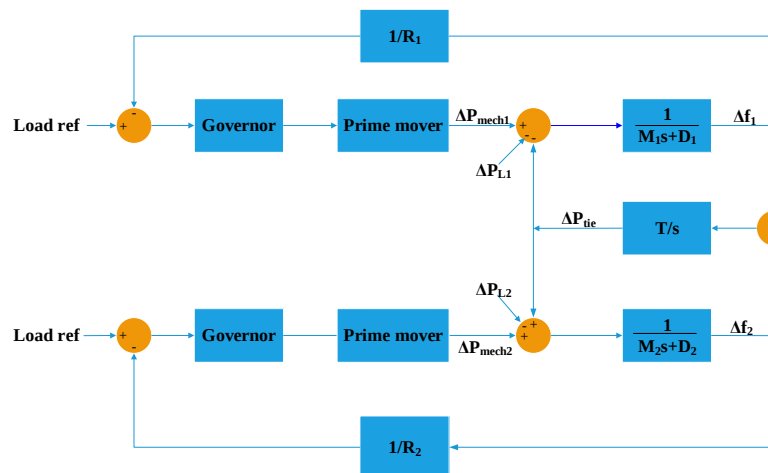
$$\Delta P_{Lj} \cong \sum_i \Delta P_{Gji} + \sum_k \Delta P_{Tjk} \quad (5)$$

که در آن، ΔP_{Gji} تغییر در توان خروجی ژنراتور j امین ژنراتور (یا گروهی از ژنراتورهای) شرکت‌کننده در کنترل فرکانس اولیه در ناحیه j و ΔP_{Tjk} تغییرات توان انتقال‌یافته از k امین به j امین ناحیه است. همه تغییرات با توجه به اولین مقدار در سری زمانی ارزیابی می‌شوند، یعنی $\Delta P = 0$ در $t = 0$.

در مدل پیشنهادی، برای ساده‌سازی تحلیل دینامیک نوسان، اینرسی مؤثر یک ناحیه به عنوان ضریب تناسب بین نرخ تغییرات فرکانس تجمعی $\frac{df_j}{dt}$ و تغییرات توان ΔP_j در نظر گرفته شده است. زمانی که یک سیستم قدرت به تعدادی ناحیه مناسب تقسیم می‌شود، می‌توان از یک سیستم کنترلی برای شناسایی و مدل‌سازی دینامیک بین فرکانس و توان اکتیو استفاده کرد. در این مدل، در طول دوره‌های زمانی که نقاط تنظیم ژنراتور تغییر نمی‌کند، می‌توان فرض کرد مدل سیستم دارای تغییرات بار به عنوان ورودی و انحراف فرکانس به عنوان خروجی است. این فرض به این معناست که می‌توان تغییرات بار در ناحیه‌های مختلف سیستم را به عنوان ورودی سیستم در نظر گرفت و انحرافات فرکانس را به عنوان خروجی آن.

اگر داده‌های اندازه‌گیری کافی از جمله فرکانس و توان اکتیو در دسترس باشند، می‌توان مدلی را از دینامیک مشاهده‌شده بین ورودی‌ها و خروجی‌ها به دست آورد. در این مدل، از داده‌های اندازه‌گیری‌شده برای تطابق و شبیه‌سازی رفتار سیستم در برابر تغییرات بار و تولید توان استفاده می‌شود. به این ترتیب، با تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده و استفاده از تکنیک‌های شناسایی سیستم، می‌توان مدلی دقیق از دینامیک ناحیه‌ها و تأثیر آنها بر فرکانس سیستم به دست آورد. این مدل می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار سیستم در شرایط مختلف و بهینه‌سازی عملکرد سیستم قدرت در برابر نوسانات فرکانسی و تغییرات بار استفاده شود.

به منظور مدل‌سازی دینامیک یک ناحیه از سیستم قدرت، معمولاً از مفهوم مرکز فرکانس اینرسی^{۱۲} استفاده می‌شود [۲۸]. مرکز فرکانس اینرسی نمایانگر یک فرکانس معادل برای ناحیه مدنظر است که تأثیر اینرسی ژنراتورهای مختلف را در نظر می‌گیرد و به صورت یک میانگین وزنی از فرکانس ژنراتورها، متناسب با اینرسی آنها، تعریف می‌شود. این فرکانس تجمعی به عنوان نماینده رفتار دینامیکی کل ناحیه به کار گرفته می‌شود و برای تحلیل پاسخ دینامیکی سیستم در برابر اغتشاشات، در فرایند شناسایی سیستم و تخمین اینرسی، نقش کلیدی ایفا می‌کند. رابطه محاسبه مرکز فرکانس اینرسی به صورت زیر بیان می‌شود:



شکل (۲): یک سیستم قدرت دونا حیه ای که توسط خط انتقال به هم متصل شده اند.

۲-۲- تخمین اینرسی کل سیستم قدرت

با توجه به موارد مطرح شده در بخش (۲-۱)، برای تخمین اینرسی کل سیستم قدرت مورد مطالعه ابتدا باید سیگنال‌های مورد نیاز برای فرایند تخمین، یعنی تغییرات توان اکتیو و فرکانس کل سیستم قدرت، محاسبه شوند.

برای محاسبه تغییرات توان اکتیو معادل سیستم قدرت مورد مطالعه از رابطه (۵) استفاده شده است. برای این منظور، تمام سیستم قدرت مورد به عنوان یک ناحیه در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، مقدار توان تبدیلی بین نواحی برابر صفر خواهد بود. با این تفسیر، مقدار تغییرات توان سیستم قدرت برابر مجموع تغییرات توان تمامی ژنراتورهای موجود در سیستم خواهد بود؛ بنابراین، با به دست آوردن تغییرات توان سیستم قدرت، نوبت به محاسبه فرکانس سیستم قدرت و تغییرات آن می‌رسد. برای این کار، از رابطه (۴) استفاده شده است و با توجه به توضیحات موجود در بخش (۲-۱)، مقادیر ضریب وزن‌گذاری (ω_i) برای تمامی ژنراتورها برابر و مساوی یک در نظر گرفته شده‌اند تا سیگنال فرکانس کل سیستم قدرت به دست آید و با حذف میانگین از آن، سیگنال تغییرات فرکانس برای کل سیستم قدرت حاصل شود.

پس از شناسایی مدل‌های تقریبی که دینامیک بین تغییرات بار و تغییرات فرکانس را توصیف می‌کند، همچنان لازم است اینرسی مؤثر هر ناحیه از سیستم قدرت تعیین

به منظور شناسایی دینامیک بین تغییرات بار و انحرافات فرکانس ناشی از آن، نظارت بر سیستم برای یک دوره به اندازه کافی طولانی ضروری است. پس از یک اختلال، پاسخ اینرسی در فرکانس را می‌توان در چند ثانیه اول مشاهده کرد، در حالی که پاسخ کنترل اولیه (گاورنر) در بازه زمانی ده ثانیه صورت می‌گیرد. می‌توان فرض کرد برای ثبت تغییرات کافی در سیستم، باید دست‌کم یک دوره زمانی بین ۱ تا ۲ دقیقه رعایت شود، اما این دوره نباید بیش از ۱۰ دقیقه باشد. در عمل، دوره‌های اندازه‌گیری ۲ تا ۶ دقیقه اعمال شده‌اند.

هنگام انتخاب دوره‌های اندازه‌گیری دو نکته اصلی وجود دارند که باید در نظر گرفته شوند. اولاً، این دوره‌ها باید هر زمانی که کنترل خودکار تولید (AGC) عمل می‌کند یا هر تغییری در نقطه تنظیم ژنراتور انجام می‌شود را حذف کنند. یک راه ساده برای رسیدگی به این موضوع این است که زمان لازم برای اجرای این اقدامات در نظر گرفته و یک بافر زمان برای وقوع اثرات مربوط لحاظ شود (برای مثال، ۶۰ تا ۹۰ ثانیه). ثانیاً، توصیه می‌شود دوره‌های اندازه‌گیری زمانی شروع شوند و پایان یابند که در آنها، نرخ تغییرات فرکانس ناحیه (یعنی df/dt یا $ROCOF$) از صفر می‌گذرد. این کار به منظور بهبود کارایی الگوریتم شناسایی سیستم انجام می‌شود. اجرای این کار حتی با اندازه‌گیری‌های آغشته به نویز $ROCOF$ از PMUها نسبتاً ساده است [۳۳].

شود. در این مقاله، به منظور مدل‌سازی رفتار دینامیکی هر ژنراتور، از روش شناسایی سیستم بهره گرفته شده است. برای این منظور، از جعبه‌ابزار شناسایی سیستم در نرم‌افزار MATLAB و روش تخمین مدل فضای حالت با استفاده از تابع $ssest^{13}$ استفاده شده است. این روش، مدل فضای حالت سیستم را بر اساس داده‌های حوزه زمان و فرکانس تخمین می‌زند و امکان استخراج پارامترهایی مانند اینرسی مؤثر را فراهم می‌کند.

برای درک فرایند تعیین اینرسی مؤثر، می‌توان یک سناریوی ساده را در نظر گرفت. در صورتی که یک واحد تولیدی فاقد گاورنر یا سیستم کنترل فرکانس باشد، پاسخ دینامیکی آن در برابر اغتشاشات توان صرفاً تحت تأثیر ویژگی‌های اینرسی فیزیکی آن خواهد بود. در چنین شرایطی، می‌توان رفتار دینامیکی بین تغییرات توان ورودی و انحراف فرکانس را با یک مدل مرتبه اول تقریب زد:

$$H(s) = \frac{1}{Ms + D} = \frac{1/M}{s + D/M} \quad (6)$$

که در آن، M اینرسی مؤثر و D وابستگی فرکانس بار است [۲۹]. این مدل ساده امکان توصیف پاسخ گذرای فرکانس را در برابر یک تغییر ناگهانی در بار فراهم می‌کند و در نتیجه، تعیین پارامترهای مدل مانند اینرسی مؤثر را تسهیل می‌کند. استفاده از این نوع مدل، به ویژه در مراحل اولیه تحلیل یا در سیستم‌هایی با ساختار ساده و داده‌های محدود، روشی کارآمد برای تخمین اولیه اینرسی محسوب می‌شود. علاوه بر این، چنین مدلی می‌تواند مبنایی برای توسعه و ارزیابی مدل‌های دقیق‌تر در تحلیل نواحی پیچیده‌تر شبکه قدرت باشد.

پاسخ ضربه واحد این سیستم توصیف شده با مدل مرتبه اول توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$h(t) = \frac{1}{M} \exp\left(-\frac{D}{M}t\right) \quad (7)$$

واضح است، بلافاصله پس از اغتشاش، در $t = 0$ ، پاسخ ضربه برابر معکوس اینرسی مؤثر است. به طور

دقیق‌تر، پاسخ اولیه سیستم به اختلال بار همان چیزی است که به عنوان اینرسی مؤثر در نظر گرفته می‌شود. این بدان معناست که اینرسی هر ناحیه را می‌توان با مقدار پاسخ ضربه واحد آن در $t = 0$ تعیین کرد.

یکی از ویژگی‌های کلیدی روش ارائه شده تولید چندین تخمین اینرسی از یک بازه زمانی مشخص از داده‌های اندازه‌گیری شده است. با استفاده از الگوریتم شناسایی فضای حالت $ssest$ در نرم‌افزار MATLAB، مدل‌هایی مختلف با مراتب متفاوت تخمین زده می‌شوند که هر کدام یک مقدار مجزا برای اینرسی مؤثر ناحیه ارائه می‌کنند. این مجموعه تخمین‌ها می‌تواند مبنایی برای محاسبه یک مقدار نهایی از طریق میانگین‌گیری باشد. با این حال، به دلیل وجود مدل‌های ضعیف یا ناکارآمد که ممکن است مقادیر غیرواقعی و خارج از محدوده فیزیکی برای اینرسی ارائه دهند، غربال‌گری و حذف این مقادیر نامعتبر پیش از محاسبه مقدار نهایی ضروری است. برای انجام این کار، استفاده از معیارهای آماری مقاوم پیشنهاد می‌شود. در این مطالعه، از انحراف میلنه مطلق به عنوان یک معیار آماری قوی و مبتنی بر میانه برای شناسایی و حذف داده‌های پرت استفاده شده است. این روش به طور مؤثر از تأثیر مقادیر دورافتاده بر تخمین نهایی جلوگیری می‌کند و دقت فرایند ارزیابی اینرسی مؤثر را افزایش می‌دهد [۳۰، ۳۱]:

$$s_{MAD}(X) = c \operatorname{med}(|X - \operatorname{med}(X)|) \quad (8)$$

که در آن، $\operatorname{med}(X)$ نشان‌دهنده میانه یک نمونه مانند X و c عبارتی است که برای دستیابی به سازگاری با انحراف استاندارد یک توزیع خاص معرفی شده است. برای هر مقدار x_i که برای آن مقدار پرت در نظر گرفته شود، مطابق معیار زیر کنار گذاشته می‌شود:

$$\frac{|x_i - \operatorname{med}(X)|}{s_{MAD}(X)} > k \quad (9)$$

ضریب برش k در رابطه با c و توزیع فرضی انتخاب می‌شود. اگر توزیع نرمال در نظر گرفته شود، c مقدار $1/4826$ را می‌گیرد و ضریب k را می‌توان برای بازه ۹۵

هستند. داده‌های هم‌زمان PMU شامل فرکانس لحظه‌ای و توان اکتیو، ورودی اصلی مدل تخمین اینرسی هستند و دقت آنها تأثیری مستقیم بر صحت نتایج دارد؛ از این رو، مکان‌یابی PMUها باید به گونه‌ای طراحی شود که این باس‌ها تحت پوشش اندازه‌گیری دقیق قرار گیرند. گفتنی است، نصب PMU در تمامی باس‌های سیستم قدرت ۳۹ باس استاندارد IEEE الزامی نیست؛ زیرا در برخی از نقاط می‌توان مقادیر مورد نیاز را از طریق تخمین بر پایه مدل شبکه و داده‌های اندازه‌گیری‌شده از سایر باس‌ها به دست آورد. این رویکرد موجب کاهش هزینه نصب PMUها و در عین حال، حفظ قابلیت مشاهده کامل سیستم می‌شود. بر اساس مطالعات انجام‌شده، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مکان‌یابی PMU بر مبنای پارامترهای شبکه می‌تواند هم قابلیت مشاهده سیستم را افزایش دهد و هم کارایی تخمین اینرسی و میرایی سیستم را بهبود بخشد [۳۵].

۲-۳- مراحل شبیه‌سازی

پیش از انجام فرایند تخمین اینرسی به روش شناسایی سیستم، باید مراحل به منظور استخراج داده‌های مناسب از شبکه تحت بررسی انجام شوند. برای این منظور، ابتدا شبکه استاندارد ۳۹ شینه IEEE در محیط DigSILENT مدل‌سازی شد. در این مرحله، با اعمال یک اغتشاش کوچک بر روی بارهای سیستم، داده‌های مربوط به فرکانس و توان اکتیو ژنراتورهای سنکرون استخراج شدند. شبیه‌سازی‌ها با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه و بازه زمانی ۳۰۰ ثانیه انجام شدند؛ به طوری که هر اجرای شبیه‌سازی کمتر از ۱۵ ثانیه زمان محاسباتی بر روی سیستم استفاده‌شده نیاز داشت. در گام بعد، داده‌های خروجی نرم‌افزار DigSILENT در قالب فایل‌های CSV به نرم‌افزار MATLAB منتقل شدند. داده‌ها پس از پیش‌پردازش شامل فیلترگذاری Butterworth مرتبه ششم، کاهش نرخ نمونه‌برداری از ۱۰۰ هرتز به ۱۰ هرتز و حذف میانگین، وارد فرایند تخمین اینرسی شدند. برای هر ناحیه از سیستم، مدل فضای حالت با استفاده از تابع ssest از جعبه‌ابزار شناسایی سیستم MATLAB استخراج شد.

درصد روی ۲ و برای بازه ۹۹ درصد روی ۳ تنظیم کرد [۳۱].

گفتنی است، هرچند پایدارساز سیستم قدرت (PSS)^{۱۴} و جبران‌ساز الکترونیک قدرت (FACTS)^{۱۵} نقشی مهم در بهبود پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت دارند [۳۲]، بر عملکرد اینرسی مجازی منابع مبتنی بر مبدل تأثیری غیرمستقیم دارند. در واقع، PSS با تزریق سیگنال کنترلی به ژنراتورها نوسانات زاویه‌ای را کاهش می‌دهد و باعث می‌شود منابع با اینرسی مجازی فرصت بیشتری برای پاسخ به تغییرات فرکانس شبکه داشته باشند. از سوی دیگر، جبران‌سازهای FACTS با تثبیت ولتاژ و کنترل توان راکتیو، نوسانات توان اکتیو را کاهش می‌دهند و RoCoF را تعدیل می‌کنند. ترکیب این ابزارها با منابع دارای اینرسی مجازی می‌تواند پاسخ دینامیکی سیستم را بهبود و پایداری فرکانسی را افزایش دهد [۳۳]؛ بنابراین، در مطالعه حاضر، فقط اثر اینرسی مجازی منابع مبتنی بر مبدل بررسی شده و عملکرد PSS و جبران‌سازها در مدل لحاظ نشده است و نتایج حاصل بازتاب‌دهنده اثرات خالص اینرسی مجازی بدون تأثیرات مکمل این ابزارهای کنترلی است.

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

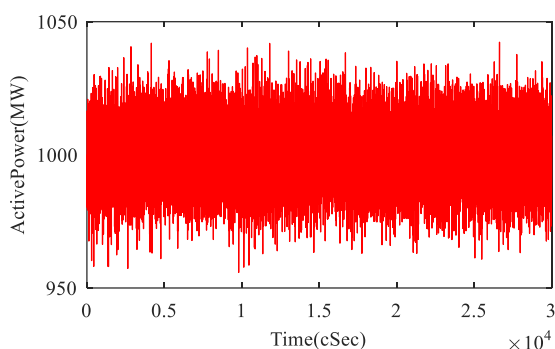
۱-۳- سیستم قدرت مورد مطالعه

در این قسمت، نتایج به‌کارگیری روش ssest برای تخمین ثابت اینرسی ارائه می‌شود. در این مقله، روش پیشنهادی برای تخمین ثابت اینرسی با استفاده از روش تشخیص مدل سیستم و تخمین فضای حالت مدل ژنراتور بر روی سیستم قدرت ۳۹ باس IEEE ارزیابی شده است. سیستم قدرت ۳۹ باس استاندارد IEEE یک سیستم قدرت دارای ۱۰ ژنراتور، ۱۹ عدد بار، ۳۴ عدد خط انتقال و ۱۲ عدد ترانسفورماتور است که سطح ولتاژ اسمی آن ۳۴۵ کیلوولت و فرکانس نامی آن ۶۰ هرتز در نظر گرفته شده است [۳۴].

در روش پیشنهادی، تخمین اینرسی بر پایه تحلیل تغییرات توان اکتیو و تغییرات فرکانس در باس‌هایی انجام می‌شود که منابع اینرسی فیزیکی یا مجازی به آنها متصل

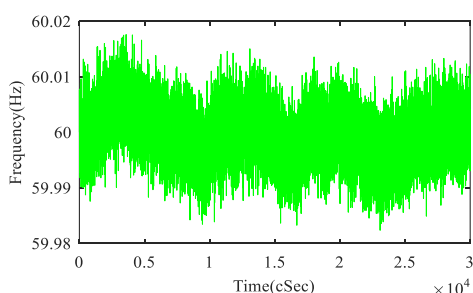


شکل (۳): فلوچارت روش پیشنهادی



شکل (۴): شکل موج توان اکتیو ژنراتور شماره ۱ پس از

اعمال الگوی بار تصادفی



شکل (۵): شکل موج فرکانس ژنراتور شماره ۱ پس از اعمال

الگوی بار تصادفی

کل فرایند تخمین اینرسی برای ۱۰ ژنراتور سنکرون و یک منبع اینرسی مجازی در MATLAB در مجموع حدود ۴۲ ثانیه طول کشید. به طور میانگین، زمان مورد نیاز برای تخمین اینرسی هر واحد (ژنراتور یا منبع مجازی) حدود ۳ تا ۴ ثانیه بود. این نتایج نشان می‌دهد روش پیشنهادی از نظر محاسباتی بسیار سریع است و قابلیت اجرای آن به صورت آنالاین وجود دارد. با توجه به زمان جمع‌آوری داده‌ها توسط PMUها (در حد میلی‌ثانیه) و زمان پردازش در MATLAB، کل فرایند از مرحله ثبت داده تا تخمین نهایی اینرسی کمتر از یک دقیقه زمان نیاز دارد.

به منظور تقسیم سیستم قدرت مورد مطالعه به نواحی مختلف، هر کدام از ژنراتورهای موجود در سیستم قدرت مورد مطالعه به عنوان یک گره منفرد و یک ناحیه مجزا در نظر گرفته شده‌اند و بنابراین، سیگنال‌های ورودی و خروجی هر ناحیه برابر تغییرات توان اکتیو و تغییرات فرکانس هر ژنراتور هستند. مسأله اصلی در فرایند تخمین اینرسی این است که در حین کارکرد عادی سیستم قدرت نمی‌توان به راحتی پاسخ اینرسی سیستم را از پاسخ کنترل‌کننده‌های موجود در سیستم متمایز کرد. به همین دلیل، برای عبور از این چالش در این مقاله از یک اغتشاش ریز برای تغییر بارهای موجود در سیستم قدرت و در نتیجه آن، تغییر فرکانس و توان اکتیو تولیدی ژنراتورها استفاده شده است تا بارها از حالت ثابت خارج شوند و حالت دینامیکی به خود بگیرند [۹، ۲۷]. به منظور عدم دخالت گاورنرهای موجود در سیستم قدرت یادشده، گاورنرهای دارای deadband فرکانس با مقدار ۰/۰۰۸ پریونیت در نظر گرفته شده‌اند. نتایج این فرایند در جدول (۳) آورده شده است. گفتنی است، کلیه شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌ها بر روی رایانه‌ای با مشخصات پردازنده Intel Core i7-12700H با فرکانس ۲/۳ گیگاهرتز و ۱۲ هسته با رم ۱۶ گیگابایت انجام شده‌اند.

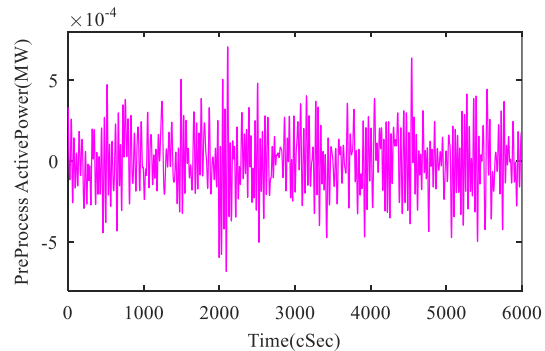
واقع توسط PMUها جمع آوری می‌شوند، ممکن است داده‌های به دست آمده حاوی مقداری نویز باشند. به همین دلیل، برای آنکه فرایند تخمین به واقعیت نزدیک‌تر شود، به سیگنال استخراج شده مقداری نویز اضافه و مجدداً فرایند تخمین تکرار می‌شود.

در این مقاله، برای اضافه کردن نویز به سیگنال‌ها از روش ایجاد نویز طراحی شده با نسبت سیگنال به نویز استفاده شده است [۳۶] و با توجه به اینکه نسبت سیگنال به نویز واحدهای اندازه‌گیری فازوری در سیستم قدرت معمولاً برابر 20 dB است، فرایند شناسایی با چهار مقدار SNR برای بررسی نویز تکرار شده است که نتایج آن به شرح جدول (۴) است.

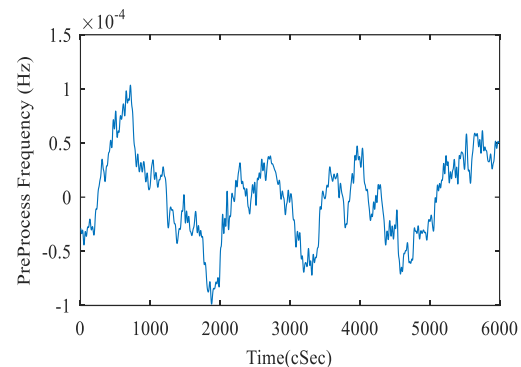
جدول (۴): مقادیر اینرسی تخمین زده شده ژنراتورهای سیستم قدرت مورد مطالعه در حضور نویز

ثابت اینرسی واقعی	SNR (20dB)	SNR (15dB)	SNR (10dB)	SNR (5dB)	genN
۵	۵/۵	۵/۵۷۷	۵/۷۰۳	۶/۷۴۸	G1
۴/۳۲۹	۵/۰۳۶	۵/۴۸۴	۶/۸۱۳	۱۰/۱۸۷	G2
۴/۴۷۵	۵/۲۵۹	۵/۳۱۴	۵/۹۰۹	۷/۲۳۳	G3
۳/۵۷۵	۴/۳۶۴	۵/۶۶۷	۷/۰۵۹	۸/۲۶۸	G4
۴/۳۳۳	۵/۹۵۴	۶/۸۴۷	۸/۱۲۳	۱۱/۰۸	G5
۴/۳۵	۵/۱۴۴	۵/۵۵۸	۶/۵۴۷	۷/۶۷۹	G6
۳/۷۷۱	۴/۴۲۲	۴/۸۹۱	۵/۲۱۳	۶/۹	G7
۳/۴۷۱	۴/۰۷۱	۴/۶۴۴	۵/۸۵۲	۶/۵۹۳	G8
۳/۴۵	۴/۳۰۹	۴/۷۴۶	۵/۳۹۵	۷/۰۱۴	G9
۴/۲	۴/۸۸۹	۵/۶۷۱	۵/۸۸	۸/۱۷۵	G10

پس از اضافه کردن نویز به سیگنال‌های استخراج شده و محاسبه مقادیر ثابت اینرسی ژنراتورهای مختلف، نوبت به محاسبه خطای محاسبات می‌رسد. برای محاسبه خطا در این حالت، از شاخص جذر میانگین مربعات خطای نسبی استفاده شده است. برای هر کدام از مقادیر SNR مقدار خطا محاسبه و نتایج در شکل (۸) آورده شده است.



شکل (۶): نتایج اعمال اقدامات پیش پردازش بر روی داده‌های توان اکتیو



شکل (۷): نتایج اعمال اقدامات پیش پردازش بر روی داده‌های فرکانس

جدول (۳): مقدار اینرسی واحدهای نیروگاهی در اثر اعمال فرایند شناسایی سیستم

شماره ژنراتور	ثابت اینرسی واقعی	ثابت اینرسی تخمین زده شده	خطای تخمین (%)
G1	۵	۵/۰۸۲۴	۱/۶۵
G2	۴/۳۲۹	۴/۳۵۷۴	۰/۶۶
G3	۴/۴۷۵	۴/۵۸۱۱	۲/۳۷
G4	۳/۵۷۵	۳/۶۱۴۳	۱/۱
G5	۴/۳۳۳	۴/۳۹۷۸	۱/۵
G6	۴/۳۵	۴/۳۷۱۷	۰/۵
G7	۳/۷۷۱	۳/۸۵۷۵	۲/۳
G8	۳/۴۷۱	۳/۴۸۰۳	۰/۲۷
G9	۳/۴۵	۳/۴۲۲۶	۰/۸
G10	۴/۲	۴/۲۰۰۴	۰/۰۱

۳-۳- بررسی تأثیر نویز بر روی داده‌های

استخراج شده

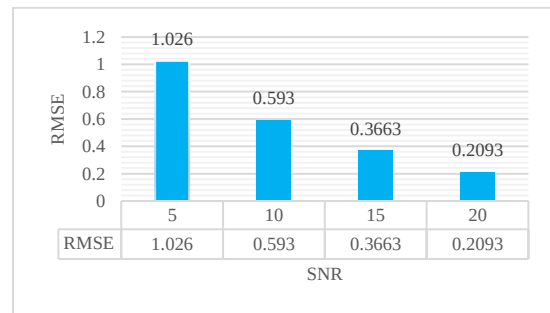
از آنجا که داده‌های استخراج شده از ژنراتورها در دنیای

در شکل (۹)، ضریب K_{vi} بهره کنترل‌کننده اینرسی مجازی و در واقع، ثابت اینرسی ذخیره‌ساز و Δf انحراف فرکانس است. گفتنی است، Δf همان مقدار $\Delta\omega$ است [۳۸].

پس از شبیه‌سازی باتری، باید آن را به شبکه مورد مطالعه اضافه کرد. برای این کار، باتری توسط یک عدد ترانسفورماتور افزایشده به باس شماره ۱۶ سیستم قدرت ۳۹ باسه اضافه شده است. موقعیت این باتری‌ها بر اساس نیاز به مشاهده اثرات اینرسی مجازی تعیین شده و جنبه طراحی بهینه یا اقتصادی در نظر گرفته نشده است. در کنترل‌کننده اینرسی مجازی، مقدار ثابت اینرسی برابر ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. پس از اتصال باتری به شبکه، مانند قبل شبکه شبیه‌سازی می‌شود و علاوه بر سیگنال‌های فرکانس و توان اکتیو ژنراتورها، سیگنال‌های فرکانس و توان اکتیو باتری نیز استخراج می‌شوند تا در فرایند تخمین اینرسی مجازی حاصل از اضافه‌کردن باتری از آنها استفاده شود.

پس از استخراج داده‌های فرکانس و توان اکتیو ژنراتورها و باتری‌ها، مشابه روند متداول برای ژنراتورهای سنکرون، مقادیر ثابت اینرسی ژنراتورهای سنکرون و باتری تخمین زده می‌شوند. از آنجا که تخمین اینرسی مجازی بر پایه داده‌های محیطی انجام می‌شود، فقط به اطلاعات فرکانسی در محدوده فرکانس پایین نیاز است. اثرات نویز با فرکانس بالاتر می‌تواند دقت تخمین را کاهش دهد؛ بنابراین، با طراحی و اعمال فیلترهای پایین‌گذر مناسب بر داده‌های محیطی، می‌توان مؤلفه‌های فرکانس پایین مورد نیاز برای تخمین اینرسی مجازی را جدا کرد [۳۹]. این رویکرد امکان محاسبه دقیق‌تر اینرسی مجازی حتی در حضور نویز را فراهم می‌کند و دقت روش‌های تخمین را بهبود می‌بخشد.

نتایج تخمین ثابت اینرسی باتری و سایر ژنراتورهای سنکرون در حضور باتری در جدول (۵) بیان شده است. مشاهده می‌شود منبع تجدیدپذیر اضافه‌شده به شبکه نه فقط باعث کاهش اینرسی نشده است، بلکه با اضافه‌کردن اینرسی مجازی به شبکه، به عدم ناپایداری شبکه در برابر اغتشاشات کمک خواهد کرد.

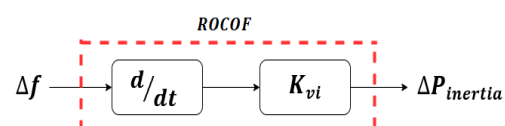


شکل (۸): مقادیر خطای RMSE برای محاسبات انجام‌شده در حضور نویز

۴-۳- افزودن باتری به عنوان ذخیره‌ساز دارای اینرسی مجازی به شبکه مورد مطالعه

رفتار دینامیکی منابع تجدیدپذیر متصل از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت (مانند نیروگاه‌های بادی و خورشیدی) از دیدگاه اینرسی مجازی، معادل رفتار باتری مجهز به حلقه کنترل اینرسی مجازی است. بر این اساس، در شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE، یک باتری با کنترل‌کننده اینرسی مجازی به عنوان نماینده‌ای از منابع تجدیدپذیر مبتنی بر مبدل در نظر گرفته شده است تا بتوان پاسخ فرکانسی سیستم و دقت روش تخمین اینرسی را ارزیابی کرد [۳۷].

ساختار کنترلی اینرسی مجازی در شکل (۸) نشان داده شده است. مفهوم اصلی کنترل اینرسی مجازی، کنترل مشتقی است که نرخ تغییرات فرکانس را برای افزودن یک مقدار توان اکتیو اضافی با توجه به ست‌پوینت تنظیم‌شده در طول حوادث احتمالی محاسبه می‌کند. در نتیجه، سیستم کنترل اینرسی مجازی به گونه‌ای به شبکه کمک می‌کند که گویی منابع تجدیدپذیر مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت دارای اینرسی مشابه ژنراتورهای سنکرون هستند؛ بنابراین، سیستم کنترل اینرسی مجازی از مشخصه اینرسی ژنراتورهای سنکرون تقلید و به افزایش اینرسی کل شبکه کمک می‌کند و پایداری فرکانس را بهبود می‌بخشد [۳۸].



شکل (۹): کنترل‌کننده اینرسی مجازی

جدول (۵): مقادیر اینرسی واقعی و تخمین زده شده ژنراتورهای

سنکرون در حضور باتری

شماره ژنراتور	ثابت اینرسی واقعی	ثابت اینرسی تخمین زده شده	خطای تخمین (%)
G1	۵	۴/۹۸۵۱	۰/۳
G2	۴/۳۲۹	۴/۳۷۸۴	۱/۱۴
G3	۴/۴۷۵	۴/۴۵۰۴	۰/۵۵
G4	۳/۵۷۵	۳/۵۸۸۶	۰/۳۸
G5	۴/۳۳۳	۴/۳۵۵۹	۰/۵۳
G6	۴/۳۵	۴/۳۳۲۳	۰/۴۱
G7	۳/۷۷۱	۳/۸۶۴۰	۲/۵
G8	۳/۴۷۱	۳/۵۰۴۰	۰/۹۵
G9	۳/۴۵	۳/۴۰۹۶	۱/۱۷
G10	۴/۲	۴/۱۵۰۳	۱/۱۸
Battery	۲۰	۲۰/۳۸۶۵	۱/۹۳

داده استفاده شده و زمان اجرای الگوریتم هستند. نتایج نشان می دهد روش پیشنهادی به ویژه در معیار ریشه میانگین مربعات خطا عملکردی بهتر نسبت به روش های مرجع ارائه می دهد. هرچند روش پیشنهادی نسبت به روش استفاده شده در مرجع [۱۵] به طول داده و زمان محاسبات بیشتری بیشتری نیاز دارد، این تفاوت قابل ملاحظه نیست و همچنان می توان با توجه به دقت بیشتر روش پیشنهادی، از آن در تخمین آنالین اینرسی سیستم قدرت استفاده کرد.

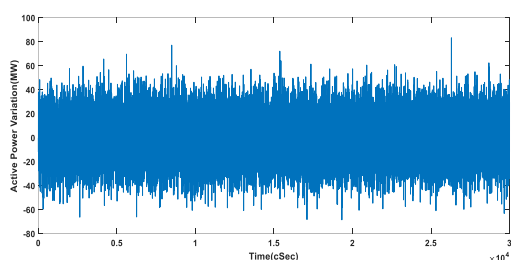
جدول (۶): مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با دو روش

موجود برای تخمین اینرسی

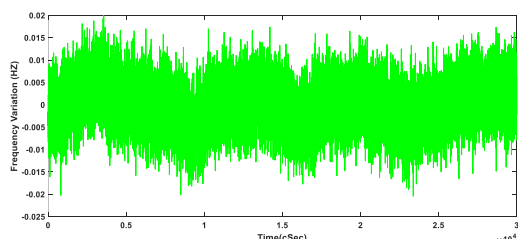
مدت زمان اجرای الگوریتم (ثانیه)	طول داده استفاده شده (ثانیه)	خطای تخمین (%)	روش استفاده شده
۹۰	۲۴۰	۱۶	مرجع [۲۶]
۴	۲۰	۵	مرجع [۱۵]
۱۵	۶۰	۰/۹۱۱	پیشنهادی

۶-۳- تخمین اینرسی کل سیستم قدرت

شکل موج های تغییرات توان اکتیو و تغییرات فرکانس برای کل سیستم قدرت مورد مطالعه به صورت شکل های (۱۰) و (۱۱) است.



شکل (۱۰): شکل موج تغییرات توان اکتیو برای کل سیستم قدرت مورد مطالعه



شکل (۱۱): شکل موج تغییرات فرکانس برای کل سیستم قدرت مورد مطالعه

تفکیک اینرسی فیزیکی و اینرسی مجازی از دید یک ناظر در یک نقطه مانیتورینگ مشخص به صورت مستقیم امکان پذیر نیست؛ زیرا هر دو نوع اینرسی اثر خود را به شکل کاهش نرخ تغییر فرکانس و کاهش دامنه نوسانات فرکانس نشان می دهند. با این حال، با تحلیل پاسخ گذرای سیستم، می توان اثرات اینرسی فیزیکی و مجازی را تا حدودی از هم تمییز داد؛ پاسخ لحظه ای اولیه اغتشاش ها عمدتاً ناشی از اینرسی مکانیکی ژنراتورهای سنکرون است، در حالی که پاسخ های بعدی که با تأخیر و بر اساس الگوریتم های کنترلی منابع مبتنی بر مبدل ظاهر می شوند، نمایانگر اینرسی مجازی هستند [۴۰]. این رویکرد امکان تحلیل تفکیکی اثرات هر نوع اینرسی و ارزیابی کارایی منابع مجازی در بهبود پایداری فرکانس را فراهم می کند.

۵-۳- ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی با

روش های دیگر تخمین اینرسی

برای سنجش کارایی روش پیشنهادی، نتایج آن با نتایج دو روش مرجع از ادبیات مقایسه شد که پیش تر روی شبکه آزمایشی مشابه (IEEE 39-bus) اعمال شده اند. روش های مرجع در جدول (۶) با روش پیشنهادی به موازات هم قرار داده شده اند تا امکان مقایسه کمی و کیفی فراهم شود. معیارهای مقایسه شامل ریشه میانگین مربعات خطا، طول

مطالعه در حالت کار عادی سیستم تخمین می‌زند.

۷-۳- تأثیر اینرسی مجازی بر رفتار دینامیکی

سیستم

برای بررسی تأثیر حضور ذخیره‌سازها و منابع انرژی تجدیدپذیر بر اینرسی کلی سیستم و رفتار دینامیکی آن در شرایط وقوع خطا، از نتایج مطالعه ارائه شده در مقاله بر روی سیستم استاندارد ۳۹ شینه IEEE استفاده می‌شود. منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند نیروگاه‌های بادی و خورشیدی) و ذخیره‌سازهای انرژی (مانند باتری‌ها) از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند و با بهره‌گیری از کنترل‌کننده‌های اینرسی مجازی، رفتار دینامیکی ژنراتورهای سنکرون را شبیه‌سازی می‌کنند. در این مطالعه، یک باتری مجهز به کنترل‌کننده اینرسی مجازی به باس شماره ۱۶ متصل شده است (جدول ۵). نتایج نشان می‌دهد اینرسی مجازی ارائه شده توسط باتری نه فقط از کاهش اینرسی کلی سیستم جلوگیری می‌کند، بلکه آن را افزایش می‌دهد؛ برخلاف منابع تجدیدپذیر بدون کنترل اینرسی مجازی که به دلیل فقدان اینرسی فیزیکی، اینرسی سیستم را کاهش می‌دهند. به طور خاص، ثابت اینرسی باتری ۲۰ ثانیه تنظیم شده است و نتایج (جدول ۵) تأیید می‌کند اینرسی مجازی به طور مؤثر به اینرسی کلی افزوده می‌شود و مقاومت سیستم در برابر تغییرات ناگهانی فرکانس (مانند نرخ تغییرات فرکانس یا RoCoF) را بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، حضور این منابع با کنترل‌کننده اینرسی مجازی، پاسخ دینامیکی سیستم را در برابر اغتشاشات به طرز جالب توجه ارتقا می‌دهد. شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نرخ تغییرات فرکانس (df/dt) را در پاسخ به یک اغتشاش کوچک بار نشان می‌دهند و به ترتیب حالات بدون و با حضور باتری را مقایسه می‌کنند. در شکل (۱۲) (بدون اینرسی مجازی)، df/dt بلافاصله پس از اغتشاش در زمان $t=10$ ثانیه به پیک منفی حدود ۰/۰۶ رسیده است و به سرعت به صفر بازمی‌گردد که بیانگر RoCoF بالا و پاسخ دینامیکی کندتر است. در مقابل، شکل (۱۳) (با حضور باتری)، پیک df/dt را به حدود ۰/۰۰۴ کاهش می‌دهد و با ایجاد پاسخ نوسانی

پس از به دست آمدن سیگنال‌های تغییرات توان اکتیو و فرکانس، برای تخمین ثابت اینرسی کل سیستم، سیگنال‌ها را به فرایند تخمین می‌دهیم و ثابت اینرسی را توسط الگوریتم به دست می‌آوریم. با این کار، مقدار ثابت اینرسی کل سیستم قدرت مورد مطالعه برابر ۴/۷۱۲۱ خواهد شد. در صورتی که با استفاده از رابطه (۱۰)، ثابت اینرسی کل سیستم قدرت را با استفاده از مقادیر نامی ماشین‌ها به دست آوریم، مقدار ثابت اینرسی آن برابر ۴/۵۷۷۲ خواهد شد:

$$H_{tot} = \frac{\sum_{i=1}^N H_i S_{in}}{\sum_{i=1}^N S_{in}} \quad (10)$$

مشاهده می‌شود مقدار اینرسی تخمین زده شده دارای خطای کمی نسبت به مقدار واقعی خود است. در صورتی که از رابطه خطای نسبی برای محاسبه خطای تخمین استفاده کنیم، خواهیم داشت:

$$E = \frac{PREDICTED - ACTUAL}{ACTUAL} \times 100$$

$$E = \frac{4.7121 - 4.5772}{4.5772} \times 100 = 2.94\%$$

حال، برای بررسی کارایی روش، تأثیر نویز اندازه‌گیری را نیز در نظر می‌گیریم. برای این کار، به سیگنال‌های تغییرات توان اکتیو و فرکانس به دست آمده در قبل، نویز کنترل شده با نسبت سیگنال به نویز را با مقادیر $SNR=5, 10, 15, 20$ اضافه می‌کنیم و نتایج تخمین برای مقادیر SNR بیان شده به دست خواهد آمد:

جدول (۷): مقادیر ثابت اینرسی تخمین زده شده برای کل

سیستم قدرت در حضور نویز

SNRdB	ثابت اینرسی تخمین زده شده	خطای تخمین (%)
۵	۷/۲۲۲۱	۵۷/۷۸
۱۰	۵/۲۱۵۸	۱۳/۹۵
۱۵	۴/۷۶۶۱	۴/۱۳
۲۰	۴/۶۸۱۵	۲/۲۷۹

مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی برای تخمین اینرسی کل سیستم قدرت نیز از کارایی زیادی برخوردار است و مقدار اینرسی کل سیستم قدرت را نیز با دقتی خوب با استفاده از سیگنال‌های به دست آمده از سیستم قدرت مورد

ژنراتورهای سنکرون و افزایش روزافزون منابع تولید انرژی تجدیدپذیر که عمده‌تاً بر پایه مبدل‌های الکترونیک قدرت طراحی شده‌اند، مفهوم اینرسی در سیستم‌های قدرت دچار تحول شده و آگاهی از مقدار آن اهمیتی روزافزون یافته است. برخلاف تعریف کلاسیک که اینرسی را معادل مقاومت در برابر تغییر سرعت اجسام دوار (مانند روتور ژنراتورهای سنکرون) در نظر می‌گرفت، در شرایط کنونی، اینرسی به عنوان معیاری برای پایداری سیستم در برابر انحرافات فرکانس ناشی از اغتشاشات تعریف می‌شود. در نتیجه، منابع مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت، مانند سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها، نیز نقشی مؤثر در تأمین اینرسی (به ویژه اینرسی مجازی) ایفا می‌کنند.

بر اساس موارد بررسی‌شده در این مقاله، می‌توان نتایج زیر را جمع‌بندی کرد:

الف) روش پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم شناسایی سیستم ssest است و از داده‌های محیطی استخراج‌شده از عملکرد عادی سیستم قدرت برای تخمین مدل فضای حالت استفاده می‌کند. پس از شناسایی مدل فضای حالت، با محاسبه تابع تبدیل متناظر و پاسخ ضربه آن، مقدار اینرسی مؤثر سیستم به دست می‌آید.

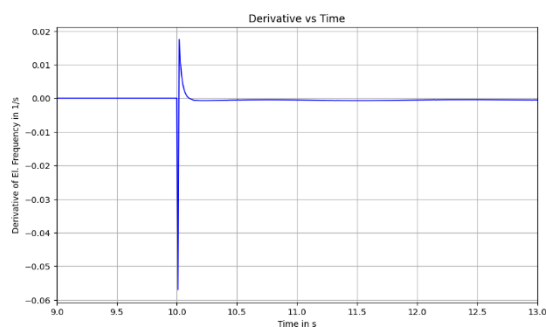
ب) این روش از مقاومت زیادی در برابر نویز برخوردار است و حتی در شرایط وجود نویز اندازه‌گیری نیز قادر است با دقتی مناسب مقدار اینرسی سیستم را تخمین بزند.

پ) در نهایت، استفاده از یک ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر مبدل الکترونیک قدرت برای تزریق اینرسی مجازی در سیستم به عنوان گام تکمیلی این مطالعه بررسی شد. نتایج نشان داد اتصال این ذخیره‌ساز نه فقط موجب تضعیف اینرسی سیستم نمی‌شود، بلکه با طراحی مناسب کنترل‌کننده اینرسی مجازی، امکان تخمین دقیق اینرسی مجازی و بهبود عملکرد دینامیکی سیستم نیز فراهم می‌شود.

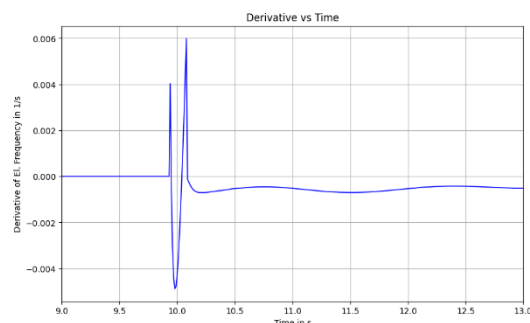
مراجع

- [1] P. Makolo, R. Zamora, T.-T. Lie, "The role of inertia for grid flexibility under high penetration of variable renewables-A review of challenges and solutions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 147, p. 111223, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111223>

ملایم‌تر و میرایی سریع‌تر، دامنه انحرافات را به طرزی چشمگیر محدود می‌کند. این بهبود به دلیل پاسخ لحظه‌ای کنترل‌کننده اینرسی مجازی (شکل ۹) است که با اندازه‌گیری df/dt و تنظیم توان اکتیو، نوسانات فرکانس را کاهش می‌دهد. همچنین، استفاده از فیلترهای پایین‌گذر برای حذف نویز و مؤلفه‌های فرکانس بالا دقت تخمین اینرسی مجازی را افزایش می‌دهد و پایداری فرکانسی را تقویت می‌کند. تحلیل پاسخ گذرا نشان می‌دهد اینرسی مجازی به ویژه در فازهای بعدی پاسخ به اغتشاش (پس از پاسخ اولیه اینرسی فیزیکی) نقش کلیدی ایفا می‌کند و با هماهنگی بهتر بین اینرسی فیزیکی و مجازی، به کاهش نوسانات و بهبود میرایی سیستم کمک می‌کند [۴۰]. در مجموع، افزودن ذخیره‌سازها و منابع تجدیدپذیر مجهز به کنترل‌کننده اینرسی مجازی نه فقط اینرسی کلی سیستم را افزایش می‌دهد، بلکه رفتار دینامیکی آن را در برابر اغتشاشات بهبود می‌بخشد و پایداری فرکانسی را به طور مؤثر تقویت می‌کند.



شکل (۱۲): نرخ تغییرات فرکانس سیستم بدون حضور اینرسی مجازی



شکل (۱۳): نرخ تغییرات فرکانس سیستم بدون حضور اینرسی مجازی

۴- نتیجه‌گیری

با کاهش سهم واحدهای تولید متداول مبتنی بر

- Physical Equation and Its Practice on Hawaii Islands," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 39, No. 6, pp. 6948–6959, 2024.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2024.3382672>
- [12] A. M. Brambilla, D. del Giudice, D. Linaro, F. Bizzarri, "Electric power-system's global-inertia estimation", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 160, p. 110135, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.110135>
- [13] M. Tuo, X. Li, "Machine learning assisted inertia estimation using ambient measurements", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 59, No. 4, pp. 4893–4903, 2023.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3269732>
- [14] W. Hua, D. Li, Y. Mi, "Power system inertia estimation during normal operation using adaptive ensemble empirical mode decomposition", *Electric Power Systems Research*, Vol. 241, p. 111305, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111305>
- [15] A. Poudyal, U. Tamrakar, R. D. Trevizan, R. Fournay, R. Tonkoski, T. M. Hansen, "Multiarea inertia estimation using convolutional neural networks and federated learning", *IEEE Systems Journal*, Vol. 16, No. 4, pp. 6401–6412, 2021.
<https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3134599>
- [16] T. Benšić, T. Varga, M. Barukčić, S. Križanić, V. JerkovićŠtil, "Identification of Inertia Constant from Induction Motor Load Transient", In 2019 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), IEEE, pp. 55–60, 2019.
<https://doi.org/10.1109/CANDOEPE47959.2019.9111041>
- [17] T. Benšić, T. Varga, M. Barukčić, S. Križanić, V. JerkovićŠtil, "Identification of Inertia Constant from Induction Motor Load Transient", In 2019 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), IEEE, pp. 55–60, 2019.
- [18] D. Zografos, M. Ghandhari, "Power system inertia estimation by approaching load power change after a disturbance", In 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1–5, 2017.
<https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8273824>
- [19] J. Zhang, H. Xu, "Online identification of power system equivalent inertia constant", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 10, pp. 8098–8107, 2017.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2698414>
- [20] F. Zeng, J. Zhang, G. Chen, Z. Wu, S. [2] A. Fathi, Q. Shafiee, H. Bevrani, "Robust frequency control of microgrids using an extended virtual synchronous generator", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 33, No. 6, pp. 6289–6297, 2018.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2850880>
- [3] F. Milano, F. Dörfler, G. Hug, D. J. Hill, G. Verbič, "Foundations and challenges of low-inertia systems", In 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), IEEE, pp. 1–25, 2018.
<https://doi.org/10.23919/PSCC.2018.8450880>
- [4] M. M. Haque, P. Wolfs, "A review of high PV penetrations in LV distribution networks: Present status, impacts and mitigation measures", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 62, pp. 1195–1208, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.025>
- [5] R. Shankar, P. Kundur, "Power system stability and control II", New York, McGraw-Hill Books, p. 581, 1994. <https://ttr.ir/1o29rt>
- [6] J. Fang, H. Li, Y. Tang, F. Blaabjerg, "Distributed power system virtual inertia implemented by grid-connected power converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 10, pp. 8488–8499, 2017.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2785218>
- [7] M. F. M. Arani, E. F. El-Saadany, "Implementing virtual inertia in DFIG-based wind power generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 2, pp. 1373–1384, 2012.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2207972>
- [8] R. Eriksson, N. Modig, K. Elkington, "Synthetic inertia versus fast frequency response: a definition", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, No. 5, pp. 507–514, 2018.
<https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2017.0370>
- [9] B. Tan, J. Zhao, M. Netto, V. Krishnan, V. Terzija, Y. Zhang, "Power system inertia estimation: Review of methods and the impacts of converter-interfaced generations", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 134, p. 107362, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107362>
- [10] B. Liu, M. Zhou, Z. Zhang, Z. Wu, G. Li, G. Li, "Estimating area inertia of power systems with a high share of RES using deep learning", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 172, p. 111105, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111105>
- [11] H. Li, S. You, Z. Jiang, J. Tan, A. Hoke, J. Liu, and Y. Liu, "Ambient-Frequency-Data Based System-Level Inertia Estimation Using

- Z. Sun, and L. Wang, "Data-driven estimation of inertia for multiarea interconnected power systems using dynamic mode decomposition," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, Vol. 17, No. 4, pp. 2686–2695, 2021.
<https://doi.org/10.1109/TII.2020.2998074>
- [30] C. Leys, C. Ley, O. Klein, P. Bernard, L. Licata, "Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median", *Journal of Experimental Social Psychology*, Vol. 49, No. 4, pp. 764–766, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013>
- [31] P. J. Rousseeuw, C. Croux, "Alternatives to the median absolute deviation", *Journal of the American Statistical association*, Vol. 88, No. 424, pp. 1273–1283, 1993.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1993.10476408>
- [32] N. M. Ibrahim, E. A. El-said, H. E. Attia, B. A. Hemade, "Enhancing power system stability: An innovative approach using coordination of FOPID controller for PSS and SVC FACTS device with MFO algorithm", *Electrical Engineering*, Vol. 106, No. 3, pp. 2265–2283, 2024.
<https://doi.org/10.1007/s00202-023-02051-7>
- [33] M. A. Prakasa, I. Robandi, A. Borghetti, M. R. Djalal, W. Himawari, "Coordinated design of power system stabilizer and virtual inertia control using modified Harris Hawk optimization for improving power system stability", *IEEE Access*, 2024.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3522291>
- [34] M. A. Rahman, G. K. Venayagamoorthy, "Dishonest Gauss-Newton method-based power system state estimation on a GPU", *Advances in Electric Power and Energy: Static State Estimation*, pp. 455–474, 2020.
<https://doi.org/10.1109/PSC.2016.7462826>
- [35] M. Elimam, Y. J. Isbeih, M. S. El Moursi, K. Elbassioni, K. H. Al Hosani, "Novel optimal PMU placement approach based on the network parameters for enhanced system observability and wide area damping control capability", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 36, No. 6, pp. 5345–5358, 2021.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3076576>
- [36] M. D. Sacchi, "Adding noise with a desired signal-to-noise ratio", *Signal Analysis and Imaging Group*, University of Alberta.
https://sites.ualberta.ca/~msacchi/SNR_Def.pdf
- [37] M. Li, W. Huang, N. Tai, D. Duan, "Virtual inertia control of the virtual synchronous generator: A review", *arXiv preprint arXiv:2109.07590*, 2021.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.07590>
- [38] T. Kerdphol, F. S. Rahman, Y. Mitani, M. Huang, Y. Liang, "Online estimation of power system inertia constant under normal operating conditions", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 101426–101436, 2020.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997728>
- [21] P. Wall, F. Gonzalez-Longatt, V. Terzija, "Estimation of generator inertia available during a disturbance", In *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, IEEE, pp. 1–8, 2012.
<https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6344755>
- [22] P. Wall, V. Terzija, "Simultaneous estimation of the time of disturbance and inertia in power systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, No. 4, pp. 2018–2031, 2014.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2306062>
- [23] R. K. Panda, A. Mohapatra, S. C. Srivastava, "Online estimation of system inertia in a power network utilizing synchrophasor measurements", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 35, No. 4, pp. 3122–3132, 2019.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2958603>
- [24] J. Chang, Y. Du, X. Chen, E. G. Lim, K. Yan, "Forecasting based virtual inertia control of PV systems for islanded micro-grid", In *2019 29th Australasian universities power engineering conference (AUPEC)*, IEEE, pp. 1–6, 2019.
<https://doi.org/10.1109/AUPEC48547.2019.211843>
- [25] P. Du, J. Matevosyan, "Forecast system inertia condition and its impact to integrate more renewables", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 2, pp. 1531–1533, 2017.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2662318>
- [26] W. Li, P. Du, N. Lu, "Design of a new primary frequency control market for hosting frequency response reserve offers from both generators and loads", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 5, pp. 4883–4892, 2017.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2674518>
- [27] K. Tuttelberg, J. Kilter, D. Wilson, K. Uhlen, "Estimation of power system inertia from ambient wide area measurements", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 33, No. 6, pp. 7249–7257, 2018.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2843381>
- [28] P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power system control and stability", *John Wiley & Sons*, 2008.
https://www.academia.edu/download/105870031/Power_Systems_Control_and_Stability_2nd.pdf
- [29] D. Yang, B. Wang, G. Cai, Z. Chen, J. Ma,

Systems, Vol. 38, No. 2, pp. 1795–1798, 2022.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3229869>

[40] M. Liu, J. Chen, F. Milano, "On-line inertia estimation for synchronous and non-synchronous devices", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 36, No. 3, pp. 2693–2701, 2020.

<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3037265>

Watanabe, S. K. Küfeoğlu, "Robust virtual inertia control of an islanded microgrid considering high penetration of renewable energy", IEEE Access, Vol. 6, pp. 625–636, 2017.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2773486>

[39] B. Tan, J. Zhao, "Data-driven time-varying inertia estimation of inverter-based resources", IEEE Transactions on Power

¹ Rate of change of frequency (RoCoF)

² Virtual inertia

³ Synthetic inertia

⁴ Phasor measurement unit

⁵ Model-Based

⁶ Measurement-Based

⁷ Impulse Response

⁸ TS-ResNet

⁹ Long-recurrent convolutional neural (LRCN)

¹⁰ Graph convolutional neural (GCN)

¹¹ Adaptive ensemble empirical mode decomposition (AEEMD)

¹² Center of Inertia Frequency

¹³ Estimate state-space model using time-domain or frequency-domain data

¹⁴ Power System Stabilizer (PSS)

¹⁵ Flexible AC Transmission System (FACTS)