

کنترل ترکیبی PID-ASMC برای تسهیم دقیق توان فعال و راکتیو در میکروگرید جزیره‌ای با ساختار Master/Slave

سیده ندا نوری^۱، زهره بهشتی پور^{۲*}، طاهره دائمی^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی برق، گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران.

۲ و ۳. استادیار، گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران.

تاریخ دریافت:

۱۴ خردادماه ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش:

۲۴ تیرماه ۱۴۰۵

چکیده

با افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در میکروگریدها، چالش‌های جدی در کنترل ولتاژ، فرکانس و تسهیم توان به‌ویژه در حالت جزیره‌ای ایجاد شده است. این مقاله یک استراتژی کنترل ترکیبی PID-ASMC را در چارچوب ساختار master/slave برای دستیابی به تسهیم دقیق توان فعال و راکتیو بین اینورترهای موازی پیشنهاد می‌کند. کنترل‌کننده پیشنهادی با ترکیب کنترل مقاوم مد لغزشی و قابلیت تنظیم آنالین و انعطاف‌پذیری PID، خطای حالت ماندگار، فراجش و زمان نشست را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و عملکرد مطلوبی در شرایط امپدانس خط ناهمگن و تأخیرهای ارتباطی از خود نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی گسترده در محیط متلب نشان می‌دهد که روش PID-ASMC نسبت به کنترل دروپ مرسوم و کنترل مدل لغزشی معمولی عملکرد به‌مراتب بهتری دارد. این روش خطای تسهیم توان راکتیو را بیش از ۹۵/۸ درصد، انحراف ولتاژ را بیش از ۹۴ درصد و زمان نشست را حدود ۷۶/۸ درصد بهبود می‌بخشد. تحلیل پایداری با تابع لیپانوف نیز پایداری مجانبی سیستم را تأیید می‌کند. نتایج حاکی از کارایی، مقاوم بودن و قابلیت پیاده‌سازی روش پیشنهادی در میکروگریدهای جزیره‌ای مدرن است.

واژه‌های کلیدی: میکروگرید، حالت جزیره‌ای، تسهیم توان، کنترل مد لغزشی تطبیقی، PID-ASMC، کنترل Master/Slave، منابع انرژی تجدیدپذیر.

Hybrid PID–Adaptive Sliding Mode Control for Accurate Active and Reactive Power Sharing in Islanded Microgrids Using a Master/Slave Structure

Seydeh Neda Noori¹, Zohre Beheshtipour^{2*}, Tahereh Daemi³

1. Ph.D student, Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran.

2,3. Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran.

Abstract

The increasing penetration of renewable energy sources in microgrids has created significant challenges in voltage and frequency regulation, especially during islanded operation. This paper proposes a modified PID Adaptive Sliding Mode Control (PID-ASMC) strategy within a master/slave control framework to achieve accurate active and reactive power sharing among parallel inverters. The proposed controller combines the robustness of sliding mode control with the adaptability and fine-tuning capability of PID, effectively reducing steady-state error, overshoot, and settling time while maintaining excellent performance under unequal feeder impedances and communication delays. Extensive simulations in MATLAB demonstrate that the PID-ASMC method significantly outperforms conventional droop control and standard sliding mode controllers. Compared to droop control, the proposed method reduces reactive power sharing error by more than 95.8%, voltage deviation by over 94 %, and settling time by approximately 76.8%. Lyapunov stability analysis confirms the asymptotic stability of the system. The results validate the effectiveness, robustness, and practical applicability of the proposed control strategy for modern islanded microgrids.

Key words: Microgrid, Islanded Mode, Power Sharing, Adaptive Sliding Mode Control, PID-ASMC, Master/Slave Control, Renewable Energy Sources.

۱- مقدمه

افزایش روزافزون تقاضای انرژی در جهان، محدودیت منابع سوخت فسیلی و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر را به یکی از مهم‌ترین محورهای سیاست‌گذاری انرژی تبدیل کرده است [۱]. در این میان، میکروگریدها به عنوان سیستم‌های کوچک و هوشمند تولید و مصرف انرژی، نقش کلیدی در ادغام ایمن و کارآمد منابع پراکنده^۱ (DG) ایفا می‌کنند. این سیستم‌ها قابلیت کار در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای را دارند و می‌توانند کیفیت توان، قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری شبکه را به طور قابل توجهی بهبود بخشند [۲]، [۳]. در حالت جزیره‌ای، میکروگریدها با چالش‌های جدی روبرو هستند. کاهش شدید اینرسی سیستم به دلیل جایگزینی ژنراتورهای سنکرون با اینورترهای مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، باعث حساسیت بالای سیستم به تغییرات بار، نوسانات تولید و اختلالات خارجی می‌شود. علاوه بر این، وجود امپدانس‌های ناهمگن خطوط، بارهای غیرخطی و تأخیرهای ارتباطی در انتقال سیگنال‌های کنترلی، منجر به عدم تعادل در تسهیم توان اکتیو و به‌ویژه توان راکتیو، انحراف ولتاژ و فرکانس، و در موارد شدید، ناپایداری کل سیستم می‌گردد [۴]، [۵]. این مسائل می‌توانند کیفیت توان را برای بارهای حساس کاهش دهند و حتی پایداری دینامیکی میکروگرید را تهدید کنند. تاکنون روش‌های کنترل متنوعی برای مدیریت میکروگریدهای جزیره‌ای پیشنهاد شده است. کنترل دروپ^۲ به دلیل سادگی و عدم نیاز به ارتباط، روشی مرسوم است؛ اما در شبکه‌های فشار ضعیف که امپدانس خروجی بیشتر مقاومتی است، خطاهای قابل توجهی در تسهیم توان راکتیو ایجاد می‌کند [۶]. روش‌های کنترل مرکزی master/slave و کنترل‌های مبتنی بر مد لغزشی^۳ (SMC) عملکرد بهتری نشان داده‌اند، ولی همچنان با مشکلاتی مانند حساسیت به عدم قطعیت پارامترها، وجود فراجهدش و فروجهش زیاد، زمان نشست طولانی و خطای حالت ماندگار مواجه هستند [۷]، [۸]. همچنین، بسیاری از روش‌های پیشنهادی قبلی، اثر تأخیرهای ارتباطی و تغییرات امپدانس خط را به طور کامل در نظر نگرفته‌اند که این موضوع در کاربردهای عملی بسیار حائز اهمیت است. برای غلبه بر محدودیت‌های روش‌های موجود، در این پژوهش یک کنترل‌کننده ترکیبی تطبیقی (PID-ASMC) در چارچوب ساختار کنترل master/slave ارائه شده است. این کنترل‌کننده با بهره‌گیری از کنترل مقاوم و سرعت بالای مد لغزشی، قابلیت تطبیق‌پذیری PID و مکانیسم تنظیم آنلاین ضرایب، عملکردی برتر در شرایط واقعی و چالش‌برانگیز ارائه می‌دهد. کنترل‌کننده پیشنهادی بدون نیاز به اطلاعات دقیق امپدانس خطوط، قادر به تسهیم دقیق توان اکتیو و راکتیو، کاهش نوسانات ولتاژ و فرکانس، و حفظ پایداری سیستم حتی در حضور تأخیرهای ارتباطی و عدم قطعیت‌های پارامتری است. نوآوری اصلی این پژوهش صرفاً ترکیب کنترل‌کننده PID و مد لغزشی نیست، بلکه در طراحی یک ساختار کنترلی تطبیقی جدید نهفته است که شامل سه ویژگی اساسی است:

۱- طراحی یک سطح لغزش جدید مبتنی بر PID که به صورت همزمان خطای لحظه‌ای، انتگرال خطا و مشتق خطا را در سطح لغزش لحاظ می‌کند.
۲- معرفی یک قانون تطبیق آنلاین برای تنظیم بهره‌های کنترل که بدون نیاز به دانستن کران عدم قطعیت‌ها، عملکرد مقاوم کنترل‌کننده را حفظ می‌کند.

۳- استفاده از این کنترل‌کننده در ساختار Master/Slave برای جبران همزمان عدم تطابق امپدانس خطوط، اغتشاشات و تغییرات بار و دستیابی به تسهیم دقیق توان اکتیو و راکتیو.

ساختار مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم مدلسازی ریاضی سیستم میکروگرید ارائه می‌شود. بخش سوم به طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی و اثبات پایداری اختصاص دارد. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با روش‌های مرسوم بررسی می‌شود و در بخش پنجم نتایج مورد بحث قرار خواهد گرفت. در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای کارهای آینده مطرح می‌گردد.

۲- مرور سوابق

با گسترش روزافزون نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های قدرت، کنترل و مدیریت میکروگریدهای جزیره‌ای به یکی از موضوعات کلیدی پژوهش‌های مهندسی قدرت تبدیل شده است. چالش اصلی در این سیستم‌ها، حفظ پایداری ولتاژ و فرکانس و تسهیم دقیق توان اکتیو و راکتیو بین واحدهای تولید پراکنده تحت شرایط مختلف عملیاتی است [۱]، [۵]. روش‌های کنترل پیشنهادی را می‌توان به چهار دسته اصلی تقسیم کرد:

۲-۱- روش‌های کنترل Droop و مشتقات آن

کنترل دروپ به دلیل ساختار ساده و عدم نیاز به ارتباطات مرکزی، پرکاربردترین روش برای تسهیم توان در میکروگریدهای جزیره‌ای است [۶]. با این حال، این روش بر پایه فرض امپدانس خروجی inductive استوار است و در شبکه‌های فشار ضعیف که نسبت مقاومت به راکتانس بالا است، خطای قابل توجهی در تسهیم توان راکتیو ایجاد می‌کند [۱۰]. محققان برای بهبود این روش، تکنیک‌هایی مانند امپدانس مجازی، دروپ بهبودیافته، کنترل ثانویه و افزودن حلقه‌های فازی پیشنهاد کرده‌اند [۱۳]، [۱۶]. با وجود این بهبودها، دقت تسهیم توان راکتیو در شرایط عدم تعادل امپدانس خط و بارهای غیرخطی همچنان محدود باقی مانده است.

۲-۲- روش‌های کنترل مرکزی (Master/Slave)

در ساختار master/slave، یک واحد (معمولاً منبع ذخیره‌ساز یا DG با ظرفیت بالاتر) به عنوان master عمل کرده و ولتاژ و فرکانس مرجع را تعیین می‌کند و سایر واحدها به عنوان slave توان مورد نیاز را تأمین می‌نمایند [۷]، [۱۱]. این روش دقت بالایی در تسهیم توان دارد، اما وابستگی

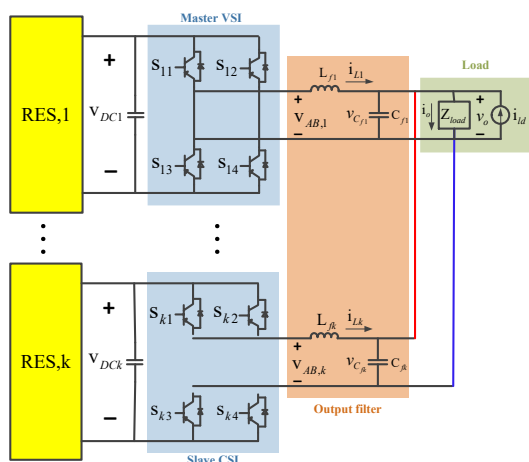
³ Sliding mode control

¹ Distributed Generation

² Droop

۳-مدلسازی سیستم

در این پژوهش، یک میکروگرید جزیره‌ای شامل سه اینورتر موازی مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) مورد بررسی قرار گرفته است. اینورترها از طریق فیدرهایی با امپدانس‌های متفاوت به یک نقطه اتصال مشترک (PCC) متصل شده‌اند و وظیفه تأمین توان مورد نیاز بار مشترک را بر عهده دارند. ساختار کلی سیستم بر اساس کنترل Master-Slave طراحی شده است؛ به‌طوری‌که اینورتر Master وظیفه تنظیم ولتاژ مرجع میکروگرید را بر عهده داشته و اینورترهای Slave با تنظیم جریان خروجی، در تأمین توان بار مشارکت می‌کنند. ساختار هر واحد تولیدی شامل یک منبع ولتاژ DC، یک مبدل پل کامل مبتنی بر کلیدهای قدرت، فیلتر LC خروجی و یک امپدانس فیدر است. در بسیاری از مدل‌های ساده‌شده، امپدانس خطوط اتصال بین اینورترها و PCC نادیده گرفته می‌شود و فرض می‌شود که ولتاژ خازن خروجی تمام اینورترها برابر با ولتاژ PCC است. اگرچه این فرض در شرایط ایده‌آل قابل قبول است، اما در میکروگریدهای واقعی به دلیل وجود مقاومت و اندوکتانس خطوط، افت ولتاژ قابل توجهی ایجاد می‌شود. این افت ولتاژ، به‌خصوص در شرایطی که امپدانس فیدرها متفاوت باشد، باعث ایجاد عدم تعادل در تقسیم توان اکتیو و راکتیو بین اینورترها می‌شود. بنابراین، در این پژوهش اثر امپدانس فیدرها به‌صورت صریح در مدل دینامیکی سیستم لحاظ شده است تا طراحی کنترل‌کننده بر اساس یک مدل واقعی‌تر انجام شود. مدار معادل سیستم در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) مدار معادل میکروگرید جزیره‌ای شامل چندین اینورتر موازی [۲۴]

هر اینورتر از یک منبع DC، پل کامل، فیلتر سلفی/خازنی خروجی و امپدانس خط متصل به بار مشترک تشکیل شده است.

• مدل امپدانس فیدر

برای هر اینورتر k ، رابطه بین ولتاژ خروجی فیلتر و ولتاژ PCC به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_{cf,k} = V_{PCC} + R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} \quad (۱)$$

که در آن $V_{cf,k}$ ولتاژ خازن خروجی اینورتر، V_{PCC} ولتاژ نقطه اتصال

شدید به لینک ارتباطی پایدار و عملکرد صحیح واحد master، نقطه ضعف عمده آن است. در صورت بروز اختلال در ارتباط یا خروج master، پایداری کل سیستم به خطر می‌افتد [۱۲].

۳-۲- روش‌های کنترل مبتنی بر مد لغزشی (SMC)

کنترل مد لغزشی به دلیل مقاومت بالا در برابر عدم قطعیت پارامترها، اختلالات خارجی و تغییرات بار، توجه زیادی را جلب کرده است [۴، ۲۴]. با این وجود، کنترل مد لغزشی کلاسیک دارای مشکل پدیده لرزش (نوسانات فرکانس بالا) و فراجاهش قابل توجه در پاسخ گذرا است. برای رفع این محدودیت‌ها، نسخه‌های تطبیقی (ASMC)، و ترکیبی با کنترل‌کننده‌های هوشمند (مانند فازی یا شبکه عصبی) توسعه یافته‌اند [۲۵، ۲۶]. ساهو (۲۰۲۵) کنترل‌کننده ASMC را برای تنظیم ولتاژ در میکروگرید جزیره‌ای با بارهای خطی، غیرخطی و نامطمئن طراحی کرد و عملکرد بهتری نسبت به PID و Fuzzy-PID نشان داد، اما کنترل همزمان فرکانس و توان راکتیو را به طور کامل پوشش نداد [۲۵]. سان و همکاران (۲۰۲۴) نیز کنترل مد لغزشی توزیع‌شده را برای تسهیم توان راکتیو پیشنهاد کردند که دقت خوبی دارد، اما وابستگی به ارتباطات بین DGها، آن را برای سیستم‌های بزرگ محدود می‌کند [۲۴].

۴-۲- روش‌های پیشرفته دیگر

روش‌های دیگری مانند کنترل پیش‌بینی‌کننده مدل (MPC) [۱۱]، کنترل مرتبه کسری (FOPID) [۱۷]، و کنترل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها در برخی سناریوها عملکرد مناسبی دارند، اما اغلب با پیچیدگی محاسباتی بالا، نیاز به مدل دقیق سیستم، یا حساسیت به تأخیرهای ارتباطی مواجه هستند [۱۵، ۱۸]. علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در سال‌های اخیر، مرور ادبیات نشان‌دهنده وجود شکاف‌های مهم زیر است:

- اکثر روش‌ها در شرایط واقعی شامل امپدانس‌های ناهمگن خط و تأخیرهای ارتباطی، دقت کافی در تسهیم توان راکتیو ندارند.

- تعادل مناسب بین پایداری، سرعت پاسخ، و سادگی پیاده‌سازی هنوز به طور کامل برقرار نشده است.

برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر بهبود روش دروپ یا استفاده مستقل از کنترل مد لغزشی تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش یک ساختار تطبیقی جدید ارائه شده است که سطح لغزش PID، قانون تطبیق ضرایب و ساختار Master/Slave را در یک چارچوب واحد ترکیب می‌کند. این ساختار قادر است بدون نیاز به دانستن دقیق پارامترهای سیستم، عملکرد مقاومی در برابر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات ارائه دهد. این روش با ترکیب مزایای مقاوم بودن کنترل مد لغزشی و انعطاف‌پذیری و دقت تنظیم آنالین PID، عملکردی برتر در کاهش خطای حالت ماندگار، فراجاهش، زمان نشست و مقاومت در برابر تأخیرهای ارتباطی و عدم قطعیت امپدانس ارائه می‌دهد.

$$x = [V_{PCC}, i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}]^T \quad (8)$$

بردار ورودی کنترل نیز شامل سیگنال های مدولاسیون اینورترها است:

$$u = [D_1, D_2, D_3]^T \quad (9)$$

همچنین تغییرات بار و اغتشاشات خارجی به عنوان بردار اختلال در نظر گرفته می شوند:

$$d = i_o \quad (10)$$

پس از مرتب سازی معادلات دینامیکی، مدل فضای حالت سیستم به شکل

زیر بیان می شود:

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + (b + \Delta B)u + (E + \Delta E)d + \psi \quad (11)$$

در این مدل:

ماتریس (A) شامل دینامیک داخلی سیستم، پارامترهای فیلتر LC و اثر امپدانس فیدرها است.

ماتریس (B) ارتباط بین سیگنال های کنترلی PWM و جریان های خروجی اینورترها را نشان می دهد.

ماتریس (E) اثر تغییرات بار بر رفتار سیستم مشخص می کند.

ماتریس های (ΔA)، (ΔB) و (ΔE) عدم قطعیت پارامترهای سیستم و تغییرات مدل را نشان می دهند.

بردار (ψ) شامل اغتشاشات خارجی و خطاهای مدل سازی است.

• امپدانس ناهمگن فیدر

برای ارزیابی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در شرایط واقعی، امپدانس فیدرهای اتصال اینورترها به PCC متفاوت در نظر گرفته شده است:

$$Z_1 = 0.2 + j0.3$$

$$Z_2 = 0.2 + j0.4$$

$$Z_3 = 0.3 + j0.5$$

وجود این اختلاف در امپدانس خطوط باعث می شود هر اینورتر افت ولتاژ متفاوتی را تجربه کند و در نتیجه روش های کنترل متداول با مشکل خطای تقسیم توان راکتیو مواجه شوند. در مدل پیشنهادی، این اثر از طریق روابط (۱)، (۵) و (۷) به صورت مستقیم وارد مدل سیستم شده است. بنابراین، کنترل کننده طراحی شده بر اساس یک مدل دقیق تر قادر خواهد بود اثر امپدانس های ناهمگن فیدر را جبران کرده و تقسیم توان بین واحدهای موازی را بهبود دهد. جدول (۱) مشخصات سیستم مورد مطالعه را نشان می دهد.

جدول (۱) مشخصات سیستم مورد مطالعه	
پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی	۳۸۰ ولت
فرکانس نامی	۵۰ هرتز
فرکانس سوئیچینگ	۸ کیلوهرتز
اندوکتانس فیلتر	۳ میلی هانری
خازن فیلتر	۶۳ میکروفاراد
امپدانس feeder منابع	Z_1, Z_2, Z_3 (ناهمگن)

مشترک، i_k جریان تزریقی اینورتر، R_k و L_k مقاومت و اندوکتانس معادل فیدر هستند. این رابطه نشان می دهد که در حضور امپدانس فیدر، ولتاژ خروجی همه اینورترها الزاماً برابر با ولتاژ PCC نیست و اختلاف آن ها ناشی از افت ولتاژ روی خطوط انتقال است.

• مدل دینامیکی جریان خازن

جریان عبوری از خازن فیلتر خروجی هر اینورتر از رابطه استاندارد خازن بدست می آید:

$$i_{C,k} = C_{f,k} \frac{dv_{cf,k}}{dt}, \text{ for } k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

با جایگذاری رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$i_{C,k} = C_{f,k} \left(\frac{dv_{PCC}}{dt} + R_k \frac{di_k}{dt} + L_k \frac{d^2 i_k}{dt^2} \right) \quad (3)$$

بر اساس این رابطه، دینامیک خازن خروجی تنها تابع تغییرات ولتاژ PCC نیست، بلکه به پارامترهای فیدر نیز وابسته است. این موضوع باعث می شود اثر ناهمگونی خطوط در مدل سیستم حفظ شود.

• تعادل جریان در PCC

با اعمال قانون جریان کیرشهف در نقطه اتصال مشترک، مجموع جریان های تزریقی اینورترها باید برابر با جریان مصرفی بار و جریان خازن های فیلتر باشد:

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_o + i_{C1} + i_{C2} + i_{C3} \quad (4)$$

با جایگذاری رابطه (۳)، معادله دینامیکی ولتاژ PCC به صورت زیر حاصل می شود:

$$\sum_{k=1}^3 C_{f,k} \left(\frac{dv_{PCC}}{dt} + R_k \frac{di_k}{dt} + L_k \frac{d^2 i_k}{dt^2} \right) = \sum_{k=1}^3 i_k - i_o \quad (5)$$

این رابطه نشان دهنده تاثیر مستقیم پارامترهای فیدر بر رفتار دینامیکی ولتاژ سیستم است.

• مدل دینامیکی جریان سلف

مدل دینامیکی سلف فیلتر خروجی هر اینورتر با استفاده از قانون ولتاژ کیرشهف بدست می آید. برای اینورتر k:

$$L_{fk} \frac{di_{L,k}}{dt} = D_k V_{dc,k} - v_{cf,k} \quad (6)$$

که در آن D_k سیگنال PWM، $V_{dc,k}$ ولتاژ لینک DC و L_{fk} اندوکتانس فیلتر خروجی است. با جایگذاری در رابطه (۱) داریم:

$$\frac{di_{L,k}}{dt} = \frac{1}{L_{fk}} \left(D_k V_{dc,k} - V_{PCC} - R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} \right) \quad (7)$$

بنابراین، برخلاف مدل های ساده، جریان خروجی هر اینورتر علاوه بر ولتاژ PCC تحت تاثیر افت ولتاژ ناشی از امپدانس فیدر نیز قرار دارد.

• تعریف فضای حالت

با ترکیب روابط (۵) و (۷)، مدل دینامیکی میکروگرید به فرم فضای حالت تبدیل می شود. بردار حالت سیستم به صورت زیر تعریف می شود:

$$Z_k = R_k + j\omega L_k \quad (13)$$

• خطای ردیابی

برای کنترل ولتاژ و جریان، خطای ردیابی به صورت زیر تعریف می شود:

$$e_v = v_{PCC}^{ref} - v_{PCC} \quad (14)$$

$$e_{iLk} = i_{Lk}^{ref} - i_{Lk} \quad (15)$$

که در آن v_{PCC}^{ref} ولتاژ مرجع نقطه اتصال مشترک، v_{PCC} ولتاژ واقعی PCC، i_{Lk}^{ref} جریان مرجع اینورتر k و i_{Lk} جریان واقعی خروجی اینورتر می باشد. هدف کنترل کننده، همگرایی این خطاها به صفر و تضمین عملکرد پایدار سیستم است. در این پژوهش، سطح لغزشی به صورت ترکیبی و از نوع PID انتخاب شده است تا مزایای کنترل مد لغزشی (مقاومت بالا در برابر عدم قطعیت) با مزایای کنترل PID (کاهش فرایهش، زمان نشست کوتاه و خطای ماندگار کم) ترکیب شود. سطح لغزشی پیشنهادی به شکل زیر است:

$$s(t) = [(s_{v2}, s_{i2}), \dots, (s_{vn}, s_{in})]^T$$

$$= f(e) - f(e_0) + \int_0^t \frac{\partial f}{\partial e^T} J e dt \quad (16)$$

که در آن $f(e)$ ترکیبی از خطای پیگیری به صورت $f(e) = K_p e + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \dot{e}$ می باشد. λ و k_p ضرایب تطبیقی هستند. تابع غیر خطی خطا به صورت زیر تعریف می شود:

$$f(e) = \begin{bmatrix} f(e_1) \\ f(e_2) \\ \vdots \\ f(e_n) \end{bmatrix} \quad (17)$$

که در آن هر مولفه $f(e_i)$ یک تابع پیوسته و مشتق پذیر از خطای متناظر بوده و برای طراحی کنترل کننده از آن در تشکیل سطح لغزش استفاده می شود. همچنین:

$$f(e_0) = f(e(t_0)) \quad (18)$$

بیانگر مقدار اولیه تابع خطا در لحظه شروع فرایند کنترل ($t=t_0$) است و به عنوان مقدار مرجع اولیه در قانون تطبیقی مورد استفاده قرار می گیرد. علاوه بر این، ماتریس ژاکوبین تابع غیرخطی به صورت زیر تعریف می شود:

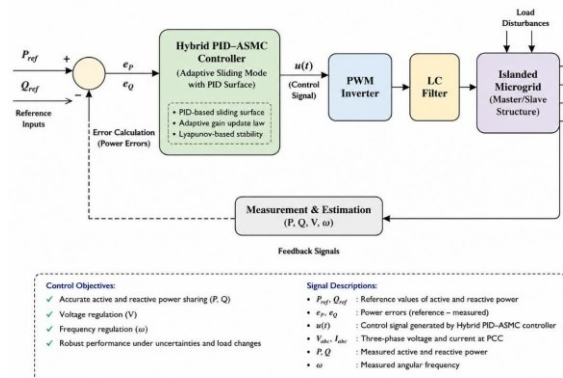
$$J = \frac{\partial f(e)}{\partial e} \quad (19)$$

که مشتقات جزئی تابع $f(e)$ نسبت به بردار خطا را شامل شده و در استخراج قانون کنترل و تحلیل پایداری سیستم مورد استفاده قرار می گیرد. همچنین این سطح، علاوه بر ویژگی های مد لغزشی، رفتار PID را نیز در بر می گیرد. قانون کنترل کلی به صورت زیر است:

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (20)$$

$$u_{eq} = -B_{pn}^{-1} (\dot{x}_{ref} - A_{pn}x - C_{pn}z) \quad (21)$$

این مدل، پایه و اساس طراحی کنترل کننده PID-ASMC را تشکیل می دهد. عدم قطعیت های موجود در ماتریس ها ($\Delta B_{pn}, \Delta A_{pn}$) و بردار اختلال ψ ، لزوم استفاده از کنترل مقاوم و تطبیقی را توجیه می کند. شکل ۲ ساختار حلقه بسته کنترل پیشنهادی را نشان می دهد. هدف اصلی کنترل کننده، تنظیم ولتاژ و فرکانس مرجع و دستیابی به تسهیم دقیق توان اکتیو و راکتیو میان اینورترهای موازی است. کنترل کننده PID-ASMC با استفاده از خطای توان اندازه گیری شده، سیگنال کنترلی ($u(t)$) را تولید کرده و به اینورتر اعمال می کند. خروجی سیستم به صورت پیوسته به کنترل کننده بازخورد داده می شود تا در حضور تغییرات بار و عدم قطعیت های پارامتری، پایداری و عملکرد مطلوب حفظ شود.



شکل (۲) بلوک دیاگرام بسته کنترل پیشنهادی

۳-۱- طراحی کنترل کننده PID-ASMC

در این بخش، یک کنترل کننده ترکیبی PID تطبیقی-مد لغزشی برای تنظیم ولتاژ و جریان میکروگرید جزیره ای ارائه می شود. هدف اصلی کنترل کننده پیشنهادی، تضمین پایداری سیستم، کاهش خطای ردیابی ولتاژ PCC و بهبود تقسیم توان بین اینورترهای موازی در حضور عدم قطعیت های ناشی از امپدانس ناهمگن فیدرها، تغییرات بار و اغتشاشات خارجی است. برخلاف کنترل کننده های مد لغزشی متداول که معمولاً به یک مدل دقیق از سیستم نیاز دارند، ساختار پیشنهادی با استفاده از یک مکانیزم تطبیقی، اثر عدم قطعیت های مدل را تخمین زده و بدون نیاز به دانستن دقیق پارامترهای سیستم، عملکرد مقاوم ارائه می دهد. همچنین با افزودن رفتار PID به سطح لغزشی، مشکلات رایج کنترل SMC مانند چترینگ و خطای ماندگار کاهش می یابد. مدل دینامیکی میکروگرید که در بخش قبل استخراج شد، به صورت زیر بیان می شود:

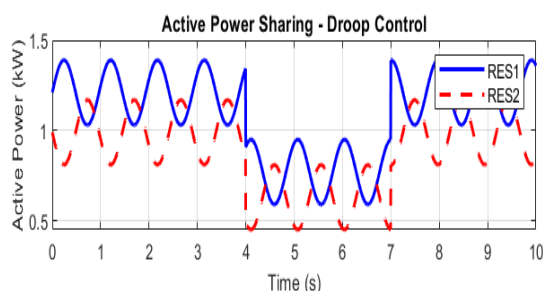
$$\dot{x} = Ax + Bu + Ed + \Delta(x, t) \quad (12)$$

که در آن x بردار حالت شامل ولتاژ PCC و جریان سلفی اینورترها، u بردار سیگنال های کنترلی PWM، d بردار اغتشاشات بار و $\Delta(x, t)$ نشان دهنده مجموع عدم قطعیت پارامتری و دینامیکی سیستم است. عدم قطعیت $\Delta(x, t)$ شامل اثر تغییرات امپدانس خطوط، تغییرات بار، خطاهای مدل سازی و تاخیرهای ارتباطی بین واحدهای کنترل است.

جدول ۲ مقادیر پارامترهای سیستم و ضرایب کنترل کننده PID-ASMC را نشان می دهد.

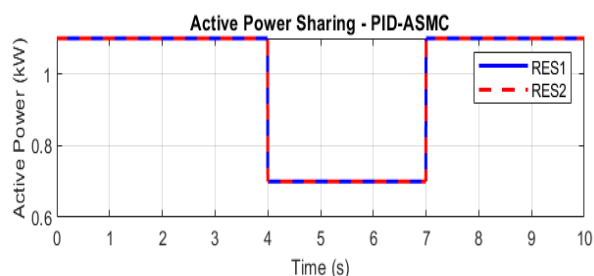
پارامتر	مقدار	توضیحات
ولتاژ نامی	۳۸۰ ولت	فاز به فاز
فرکانس نامی	۵۰ هرتز	-
فرکانس سوئیچینگ	۸ کیلوهرتز	-
اندوکتانس فیلتر (Lf)	۳ میلی هانری	-
خازن فیلتر (Cf)	۶۳ میکروفاراد	-
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	۳ و ۸ و ۱۲	ضرایب سطح لغزش
K_s	۱۸	ضریب متناسب سوئیچینگ
K_i	۱۲	ضریب انتگرال سوئیچینگ
$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$	۰/۵، ۰/۰۸، ۰/۱	ضرایب تطبیقی
بار اکتیو اولیه	۱۰ کیلووات	-
زمان شبیه سازی	۱۰ ثانیه	-

تمامی نتایج ارائه شده در این بخش با استفاده از پارامترهای فوق و مدل حالت فضایی ارائه شده در بخش ۳ بدست آمده است و شبیه سازی ها در محیط متلب انجام شده است. نتایج کنترل کننده پیشنهادی PID-ASMC با کنترل مرسوم دروپ مقایسه شد. در ادامه، تحلیل دقیق هر شکل ارائه می گردد. شکل ۳ توزیع توان اکتیو تحت کنترل دروپ را نشان می دهد.



شکل (۳) توزیع توان اکتیو تحت کنترل دروپ

در این شکل، توزیع توان اکتیو بین دو منبع RES تحت کنترل دروپ نمایش داده شده است. مشاهده می شود که توان اکتیو به صورت تقریبی تقسیم می شود، اما نوسانات قابل توجهی در هر دو منبع وجود دارد. در لحظه تغییرات بار (t=4 و t=7)، پاسخ سیستم کند بوده و فرافروش و فروجهش مشهود است. این نوسانات ناشی از عدم توانایی روش دروپ در جبران سریع امپدانس های متفاوت خط است. شکل ۴ توزیع توان اکتیو تحت کنترل PID-ASMC را نشان می دهد.



شکل (۴) توزیع توان اکتیو تحت کنترل PID-ASMC

$$u_{SW} = -B_{pn}^{-1} \left(\hat{\rho} \operatorname{sign}(s) + K_s s + K_i \int_0^t s(\tau) d\tau \right) \quad (22)$$

ترم $K_s s + K_i \int_0^t s(\tau) d\tau$ در این قانون، عملکرد PID روی سطح لغزشی ایجاد می کند. هدف اصلی از افزودن این ترم ها به منظور کاهش قابل توجه پدیده چترینگ (نوسانات فرکانس بالا)، بهبود دقت حالت ماندگار و حذف خطای باقی مانده در حضور عدم قطعیت های پارامتری، امپدانس خط ناهمگن و تأخیرهای ارتباطی، و ایجاد تعادل مناسب بین سرعت پاسخ دینامیکی و نرمی سیگنال کنترل اعمال شده به اینورتر می باشد. ضرایب (K_s) و (K_i) به صورت آنالین و تطبیقی تنظیم می شوند تا عملکرد کنترل کننده در شرایط عملی مختلف بهینه باقی بماند. این ساختار باعث می شود تا سیگنال کنترل $(u(t))$ بسیار صاف تر از روش های SMC معمولی باشد $\hat{\rho}$ پارامتر تطبیقی است و به صورت آنالین بروزرسانی می شود:

$$\hat{\rho}(t) = \frac{1}{\lambda} \left\| s^T B_{pn}^{-1} \right\|_1 \quad (23)$$

• اثبات پایداری با تابع لیپانوف

برای اثبات پایداری، تابع لیپانوف کاندید به شکل زیر در نظر گرفته شده است:

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{\lambda}_1^2 + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{\lambda}_2^2 + \frac{1}{2\gamma_3} \tilde{\lambda}_3^2 \quad (24)$$

که در آن $\tilde{\lambda}_i = \lambda_i - \hat{\lambda}_i$ خطای پارامترهای تطبیقی است. مشتق زمانی تابع لیپانوف به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\dot{V} = s\dot{s} + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\lambda}_1 \dot{\tilde{\lambda}}_1 + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\lambda}_2 \dot{\tilde{\lambda}}_2 + \frac{1}{\gamma_3} \tilde{\lambda}_3 \dot{\tilde{\lambda}}_3 \quad (25)$$

با جایگذاری کامل $\dot{S}$ از معادلات قبلی سیستم (معادلات ۸ تا ۱۲)، قانون کنترل، اعمال قوانین تطبیقی بروزرسانی $\dot{\lambda}_i$ پس از جمع بندی و حذف ترم های عدم قطعیت و اغتشاش، نتیجه می شود:

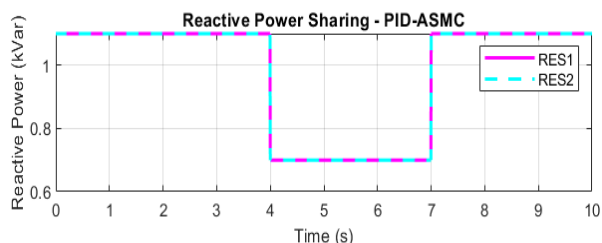
$$\dot{V} \leq -\eta s^2 \leq 0 \quad (26)$$

که $\eta > 0$ است. بنابراین $V > 0$ و $\dot{V} \leq 0$ بوده و طبق قضیه لیپانوف، سیستم پایدار است. با اعمال لم باربالات، $s \rightarrow 0$ و در نتیجه خطای پیگیری $e \rightarrow 0$ به صورت مجانبی همگرا می شود. ارتباط بین ضرایب تطبیقی و عدم قطعیت های سیستم از طریق قانون بروزرسانی آنالین (معادله ۲۳) برقرار شده است، به طوریکه تخمین پارامترها ($\hat{\lambda}$) به طور پویا عدم قطعیت های امپدانس خط، تغییرات بار و تأخیرهای ارتباطی را جبران می کند.

۴-نتایج شبیه سازی

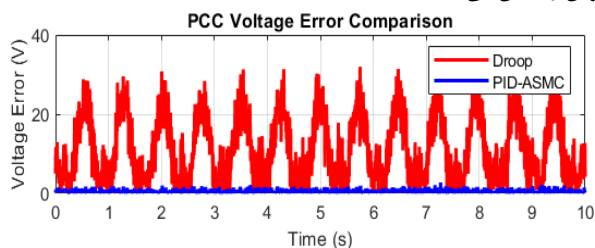
به منظور ارزیابی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی، شبیه سازی سیستم میکروگرید جزیره ای در محیط متلب انجام شد. سیستم شامل دو منبع تولید پراکنده با امپدانس خط ناهمگن است. بار اکتیو در زمان های t=4 ثانیه (کاهش بار) و t=7 ثانیه (افزایش بار) به صورت پله ای تغییر کرد.

توان راکتیو بین دو منبع به شدت ناهموار است و تفاوت قابل توجهی بین منبع ۱ و منبع ۲ مشاهده می‌شود. این خطا به دلیل تأثیر امپدانس‌های متفاوت خط ایجاد شده و حتی پس از تغییرات بار نیز ادامه دارد. چنین عملکردی در کاربردهای واقعی می‌تواند منجر به اضافه‌بار یکی از اینورترها شود. شکل ۸ توزیع توان راکتیو تحت کنترل PID-ASMC را نشان می‌دهد.



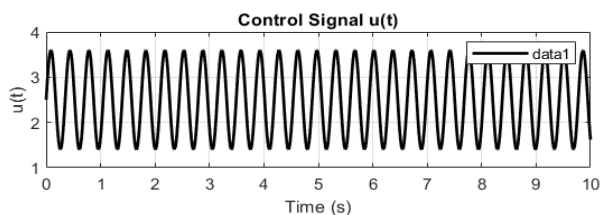
شکل (۸) توزیع توان راکتیو تحت کنترل PID-ASMC

کنترل‌کننده PID-ASMC توانسته است این مشکل را به‌طور مؤثر حل کند. تسهیم توان راکتیو بین دو منبع تقریباً کاملاً برابر و دقیق است. پاسخ به تغییرات بار سریع و بدون نوسانات ماندگار بوده و خطای تسهیم به حداقل رسیده است. این شکل، یکی از برجسته‌ترین دستاوردهای روش پیشنهادی را به نمایش می‌گذارد. شکل ۹ مقایسه خطای ولتاژ نقطه اتصال مشترک در دو روش را نشان می‌دهد.



شکل (۹) مقایسه خطای ولتاژ نقطه اتصال مشترک در دو روش

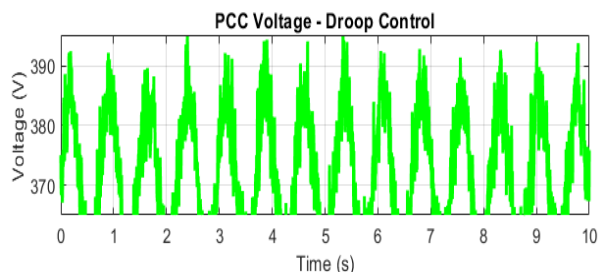
این شکل مقایسه مستقیمی از خطای ولتاژ ارائه می‌دهد. خطای ولتاژ در روش دروپ بسیار بالا (تا ۳۵ ولت) و دارای نوسانات شدید است، در حالی که در روش PID-ASMC خطا به کمتر از ۲ ولت محدود شده است. این کاهش چشمگیر (بیش از ۹۰٪) نشان‌دهنده برتری قابل توجه کنترل‌کننده پیشنهادی، در حفظ کیفیت ولتاژ است. شکل ۱۰ سیگنال کنترل $u(t)$ را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰) سیگنال کنترل $u(t)$

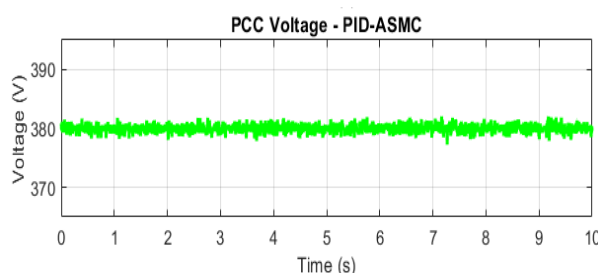
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، سیگنال کنترل $u(t)$ در روش پیشنهادی PID-ASMC بسیار صاف و منظم است و فاقد نوسانات فرکانس بالای (چترینگ) می‌باشد. این در حالی است که روش دروپ معمولاً سیگنال کنترل نوسانی تری تولید می‌کند. بنابراین، عملکرد برتر PID-ASMC در تسهیم توان، تنظیم ولتاژ و سرعت پاسخ، نه تنها با افزایش تلاش کنترلی همراه نبوده، بلکه با سیگنال کنترل نرم‌تر و

این شکل عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد. تسهیم توان راکتیو بین دو منبع به صورت بسیار دقیق و برابر (۵۰٪-۵۰٪) انجام شده است. پاسخ به تغییرات بار بسیار سریع، بدون فراجشش قابل توجه و فاقد نوسانات پایدار است. این شکل به وضوح برتری کنترل‌کننده PID-ASMC را در دقت و سرعت تسهیم توان راکتیو نسبت به روش دوپ نشان می‌دهد. شکل ۵ ولتاژ PCC تحت کنترل دروپ را نشان می‌دهد.



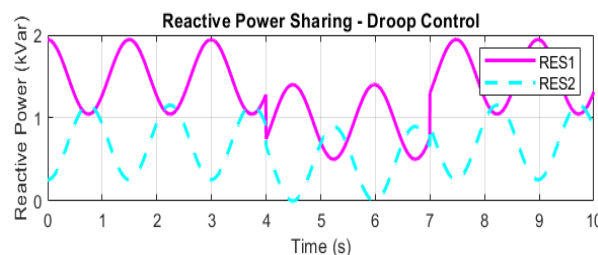
شکل (۵) ولتاژ نقطه اتصال مشترک (PCC) تحت کنترل دروپ

ولتاژ نقطه اتصال مشترک در روش دروپ نوسانات شدید و مستمر با دامنه تقریبی ۲۰ تا ۲۵ ولت را تجربه می‌کند. این نوسانات در تمام طول شبیه‌سازی (به‌ویژه پس از تغییرات بار) ادامه دارد و نشان‌دهنده ضعف این روش در تنظیم ولتاژ تحت شرایط عدم تعادل امپدانس است. چنین نوساناتی می‌تواند کیفیت توان را برای بارهای حساس به شدت کاهش دهد. شکل ۶ ولتاژ نقطه اتصال مشترک تحت کنترل PID-ASMC را نشان می‌دهد.



شکل (۶) ولتاژ نقطه اتصال مشترک تحت کنترل PID-ASMC

در مقابل، ولتاژ نقطه اتصال مشترک تحت کنترل PID-ASMC با دقت بسیار بالا در محدوده ۳۸۰ ولت ثابت مانده است. نوسانات ولتاژ بسیار ناچیز (کمتر از ۲ ولت) بوده و سیستم بلافاصله پس از تغییرات بار به حالت پایدار بازمی‌گردد. این شکل، قابلیت عالی کنترل‌کننده پیشنهادی در تنظیم ولتاژ و ردپایی قوی از مقاومت آن را نشان می‌دهد. شکل ۷ توزیع توان راکتیو تحت کنترل دروپ را نشان می‌دهد.



شکل (۷) توزیع توان راکتیو تحت کنترل دروپ

یکی از مهم‌ترین ضعف‌های کنترل دروپ در شکل (۶) مشهود است. توزیع

مناسب‌تری نیز حاصل شده است. این ویژگی، روش پیشنهادی را برای پیاده‌سازی عملی روی سخت‌افزار واقعی بسیار مناسب می‌سازد. به منظور مقایسه بهتر روش پیشنهادی، یک مقایسه کمی عملکرد بین روش های دروپ و PID-ASMC انجام شده است و نتایج آن در جدول ۲ بیان شده است.

جدول (۲) مقایسه کمی کمی عملکرد بین روش های دروپ و PID-ASMC

شاخص عملکرد	واحد	روش Droop	روش PID-ASMC	Adaptive SMC [24]	درصد بهبود
حداکثر خطای ولتاژ PCC	ولت	۳۵/۲	۱/۸	۰/۴۵	۹۴/۹
میانگین خطای ولتاژ PCC	ولت	۱۸/۶	۰/۹	-	۹۵/۲
حداکثر نوسان توان راکتیو	kVar	۱/۴۵	۰/۰۸	۰/۲۵	۹۴/۵
خطای تسهیم توان راکتیو	درصد	۲۸/۵	۱/۲	۴/۸	۹۵/۸
زمان نشست پس از تغییر بار	ثانیه	۰/۸۲	۰/۱۹	۰/۴۵	۷۶/۸
حداکثر فراجش ولتاژ	درصد	۶/۸	۰/۴۵	۱/۸	۹۳/۴
PCC ولتاژ ITAE	-	۴۲/۳	۳/۸	۱۲/۵	۹۱

نتایج شبیه سازی به طور واضح نشان می دهد که کنترل کننده پیشنهادی PID-ASMC در تمام شاخص های کلیدی عملکرد (دقت تسهیم توان، تنظیم ولتاژ، سرعت پاسخ، کاهش نوسانات و شاخص های یکپارچه خطا) برتری قابل توجهی نسبت به روش مرسوم Droop دارد. برای بررسی برتری روش پیشنهادی نسبت به آخرین دستاوردهای علمی، مقایسه عددی با رفرنس [۲۴] انجام شد. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، کنترل کننده PID-ASMC در شاخص خطای تسهیم توان راکتیو (۱/۲٪) عملکرد به مراتب بهتری نسبت به روش Distributed SMC ارائه شده در [۲۴] دارد. همچنین، زمان نشست (۰/۱۹ ثانیه) و فراجش ولتاژ به طور قابل توجهی کمتر است. این برتری ناشی از ترکیب مکانیسم تطبیقی PID با ساختار مد لغزشی است که هم دقت بالایی فراهم می کند و هم لرزش را به حداقل می رساند.

• تحلیل مقاومت در برابر اغتشاش و عدم قطعیت

یکی از مزایای اصلی کنترل مد لغزشی تطبیقی، مقاومت ذاتی آن در برابر عدم قطعیت های پارامتری، اغتشاشات خارجی و تغییرات بار است. برای بررسی این ویژگی مهم، شبیه سازی ها تحت شرایطی نظیر: تغییرات پله ای بار فعال و راکتیو، اعمال نویز به سیگنال های اندازه گیری سنسورها، در نظر گرفتن تأخیرهای ارتباطی تا ۵۰ میلی ثانیه و تغییرات امپدانس خطوط انجام شد. نتایج شبیه سازی (به ویژه شکل های ۴، ۶، ۸ و ۹) نشان می دهد که کنترل کننده پیشنهادی PID-ASMC حتی در حضور این اغتشاشات، عملکرد بسیار مقامی از خود نشان می دهد. سیستم به سرعت به حالت پایدار بازمی گردد،

نوسانات ولتاژ به حداقل رسیده و دقت تسهیم توان فعال و راکتیو حفظ می شود. این رفتار مقاوم، ناشی از ترکیب مکانیسم تطبیقی PID با ساختار قوی مد لغزشی است که اجازه می دهد سیستم بدون نیاز به مدل دقیق اغتشاشات، عملکرد مطلوبی داشته باشد. این ویژگی، روش پیشنهادی را نسبت به کنترل دروپ مرسوم، بسیار مناسب تر برای کاربردهای واقعی میکروگریدهای جزیره ای می سازد.

۵- بحث

نتایج شبیه سازی به وضوح نشان داد که کنترل کننده پیشنهادی PID-ASMC عملکردی برتر نسبت به روش مرسوم دروپ در تمام جنبه های کلیدی ارائه می دهد. مهم ترین دستاورد این پژوهش، بهبود قابل توجه دقت تسهیم توان راکتیو تحت شرایط امپدانس خط ناهمگن است. در حالی که روش دروپ خطای تسهیم توان راکتیو تا ۲۸/۵ درصد را نشان می دهد، کنترل کننده PID-ASMC این خطا را به کمتر از ۱/۲ درصد کاهش داده است. این بهبود ناشی از مکانیسم تطبیقی PID و پایداری ذاتی مد لغزشی است که اجازه می دهد سیستم بدون نیاز به اطلاعات دقیق امپدانس خطوط، عملکرد مطلوبی داشته باشد. علاوه بر این، نوسانات ولتاژ نقطه اتصال مشترک در روش پیشنهادی به طور چشمگیری کاهش یافته و خطای ولتاژ بیش از ۹۴٪ بهبود یافته است. این موضوع از نظر کیفیت توان و حفاظت از بارهای حساس حائز اهمیت است. سرعت پاسخ سیستم نیز به طور متوسط ۷۶/۸ درصد بهتر شده و شاخص های عملکرد یکپارچه (مانند ITAE) کاهش قابل توجهی داشته اند. مقایسه با مطالعات پیشین ([۱۰]، [۱۲]، [۲۴] و [۲۵]) نشان می دهد که روش پیشنهادی در مقایسه با کنترل های master/slave مرسوم و مد لغزشی ساده، فراجش کمتر، زمان نشست کوتاه تر و مقاومت بالاتری در برابر تغییرات بار و عدم قطعیت های پارامتری دارد. همچنین، سیگنال کنترل صاف و فاقد لرزش شدید، این روش را برای پیاده سازی عملی در اینورترهای واقعی مناسب تر می سازد. با وجود مزایای متعدد، پژوهش حاضر دارای محدودیت هایی نیز هست. شبیه سازی ها عمدتاً در شرایط ایده آل انجام شده و اثرات نویز سنسورها و تأخیرهای ارتباطی طولانی تر نیاز به بررسی بیشتر در مطالعات آینده دارد. علاوه بر این، گسترش سیستم به تعداد بیشتر منابع (بیش از سه اینورتر) و بارهای غیرخطی می تواند موضوعات پژوهشی بعدی باشد. از منظر کاربردی، کنترل کننده PID-ASMC گزینه ای بسیار مناسب برای میکروگریدهای جزیره ای واقعی در مناطق دورافتاده یا سیستم های مبتنی بر انرژی های تجدیدپذیر است، زیرا دقت بالا، سادگی نسبی پیاده سازی و پایداری مناسبی را ارائه می دهد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، یک کنترل کننده ترکیبی تطبیقی PID-ASMC برای کنترل ولتاژ، فرکانس و تسهیم دقیق توان اکتیو و راکتیو در میکروگریدهای جزیره ای با ساختار master/slave ارائه شد. روش پیشنهادی با ترکیب مزایای پایداری کنترل مد لغزشی و انعطاف پذیری تنظیم آنالین PID، قادر

- storage system. *Electric power systems research*, 179, 106079.
- [10] Sedaghati, R., & Shakarami, M. R. (2019). A new sliding mode-based power sharing control method for multiple energy sources in the microgrid under different conditions. *International Journal of Industrial Electronics Control and Optimization*, 2(1), 25-38.
- [11] Chen, T., Abdel-Rahim, O., Peng, F., & Wang, H. (2020). An improved finite control set-MPC-based power sharing control strategy for islanded AC microgrids. *IEEE Access*, 8, 52676-52686.
- [12] Lai, J., & Lu, X. (2020). Nonlinear mean-square power sharing control for ac microgrids under distributed event detection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(1), 219-229.
- [13] Pham, X. H. T. (2020). Power sharing strategy in islanded microgrids using improved droop control. *Electric Power Systems Research*, 180, 106164.
- [14] Yazdani, S., Ferdowsi, M., Davari, M., & Shamsi, P. (2019). Advanced current-limiting and power-sharing control in a PV-based grid-forming inverter under unbalanced grid conditions. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(2), 1084-1096.
- [15] Ding, L., Han, Q. L., & Zhang, X. M. (2018). Distributed secondary control for active power sharing and frequency regulation in islanded microgrids using an event-triggered communication mechanism. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(7), 3910-3922.
- [16] Silva, W. W. A., Oliveira, T. R., & Donoso-Garcia, P. F. (2020). An improved voltage-shifting strategy to attain concomitant accurate power sharing and voltage restoration in droop-controlled DC microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 2396-2406.
- [17] Liang, X., Andalib-Bin-Karim, C., Li, W., Mitolo, M., & Shabbir, M. N. S. K. (2020). Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(1), 46-60.
- [18] Yi, Z., Zhao, X., Shi, D., Duan, J., Xiang, Y., & Wang, Z. (2019). Accurate power sharing and synthetic inertia control for dc building microgrids with guaranteed performance. *IEEE Access*, 7, 63698-63708.
- [19] Nair, D. R., Nair, M. G., & Thakur, T. (2022). A Smart Microgrid System with Artificial Intelligence for Power-Sharing and Power Quality Improvement. *Energies*, 15(15), 5409.
- [20] Eskandari, M., Li, L., Moradi, M. H., Siano, P., & Blaabjerg, F. (2019). Active power sharing and frequency restoration in an autonomous networked microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(6), 4706-4717.
- [21] Shi, K., Cai, X., She, K., Zhong, S., Soh, Y., & Kwon, O. (2022). Quantized memory proportional-integral control of active power sharing and frequency regulation in island microgrid under abnormal cyber attacks. *Applied Energy*, 322, 119540.

به عملکرد مطلوب تحت شرایط واقعی شامل امپدانس‌های ناهمگن خط و تغییرات بار است. نتایج شبیه‌سازی گسترده نشان داد که کنترل‌کننده PID-ASMC نسبت به روش مرسوم دوپ، خطای ولتاژ را تا ۹۴٪ خطای تسهیم توان راکتیو را تا ۹۵/۸ درصد و زمان نشست را تا حدود ۷۶/۸ درصد بهبود می‌بخشد. همچنین، نوسانات سیستم به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و تسهیم توان به صورت دقیق و برابر بین منابع محقق شد. پژوهش حاضر نشان داد که کنترل‌کننده PID-ASMC می‌تواند گزینه‌ای کارآمد، مقاوم و عملی برای مدیریت میکروگریدهای جزیره‌ای مدرن باشد. در کارهای آینده، پیاده‌سازی واقعی و گسترش روش به میکروگریدهای چندپایه و دارای بارهای غیرخطی پیشنهاد می‌شود.

۶-مراجع

- [1] Masood, U., Azeem, M. K., Ahmad, I., & ul Jabbar, A. (2023). Robust adaptive nonlinear control of plugin hybrid electric vehicles for vehicle to grid and grid to vehicle power flow with hybrid energy storage system. *ISA transactions*, 139, 406-424.
- [2] Mobayen, S., Bayat, F., ud Din, S., & Vu, M. T. (2023). Barrier function-based adaptive nonsingular terminal sliding mode control technique for a class of disturbed nonlinear systems. *ISA transactions*, 134, 481-496.
- [3] Zarei, M. S., & Atrianfar, H. (2023). A hierarchical framework for distributed resilient control of islanded AC microgrids under false data injection attacks. *ISA transactions*, 139, 191-204.
- [4] Bina, M. A., Gitizadeh, M., & Mahmoudian, M. (2020). High-accuracy power sharing in parallel inverters in an islanded microgrid using modified sliding mode control approach. *Scientia Iranica*, 27(6), 3128-3139.
- [5] Arfeen, Z. A., Khairuddin, A. B., Larik, R. M., & Saeed, M. S. (2019). Control of distributed generation systems for microgrid applications: A technological review. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(9), e12072.
- [6] Wu, T., Shi, X., Liao, L., Zhou, C., Zhou, H., & Su, Y. (2019). A capacity configuration control strategy to alleviate power fluctuation of hybrid energy storage system based on improved particle swarm optimization. *Energies*, 12(4), 642.
- [7] Zhang, Z., Dou, C., Yue, D., Zhang, B., & Luo, W. (2018). A decentralized control method for frequency restoration and accurate reactive power sharing in islanded microgrids. *Journal of the Franklin Institute*, 355(17), 8874-8890.
- [8] Sepehrzad, R., Moridi, A. R., Hassanzadeh, M. E., & Seifi, A. R. (2021). Intelligent energy management and multi-objective power distribution control in hybrid micro-grids based on the advanced fuzzy-PSO method. *ISA transactions*, 112, 199-213.
- [9] Shen, L., Cheng, Q., Cheng, Y., Wei, L., & Wang, Y. (2020). Hierarchical control of DC micro-grid for photovoltaic EV charging station based on flywheel and battery energy

- [22] Buraimoh, E., Aluko, A. O., Oni, O. E., & Davidson, I. E. (2022). Decentralized Virtual Impedance-Conventional Droop Control for Power Sharing for Inverter-Based Distributed Energy Resources of a Microgrid. **Energies**, 15(12), 4439.
- [23] Liu, B., Liu, Z., Liu, J., An, R., Zheng, H., & Shi, Y. (2019). An adaptive virtual impedance control scheme based on small-AC-signal injection for unbalanced and harmonic power sharing in islanded microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 34(12), 12333-12355.
- [24] W. Sun, X. Lin, L. Huang, D. Mu, and H. Zhang, "Distributed sliding mode control for reactive power sharing in an islanded microgrid," **Electric Power Systems Research**, vol. 231, p. 110342, 2024.
- [25] S. K. Sahoo, "Adaptive sliding mode controller design for islanded microgrid," **Energy Reports**, vol. 11, pp. 4188-4195, 2025.
- [26] C. X. Rosero, F. Rosero, and F. Tapia, "Fully Decentralized Sliding Mode Control for Frequency Regulation and Power Sharing in Islanded Microgrids," **Energies**, vol. 18, no. 20, p. 5495, 2025.
- [27] P. Kumar, S. K. Mallik, and A. K. Verma, "Frequency regulation of EV integrated AC microgrid using fuzzy adaptive exponent PID controller optimized by math-inspired exponential distribution algorithm," **Scientific Reports**, vol. 15, p. 12275, 2025.
- [28] Yang, Y., & Wai, R. J. (2021). Design of adaptive fuzzy-neural-network-imitating sliding-mode control for parallel-inverter system in islanded micro-grid. **IEEE Access**, 9, 56376-56396.