بهبود پایداری خوشه‌های ریزشبکه‌ها با استفاده از کنترل اینرسی مجازی توسط روش سنتزمیو

محمدرضا قدسی[۱]، علیرضا توکلی*[۲]، امین سامان فر[۳]

۱- گروه مهندسی برق، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران، m.ghodsi95@khoiau.ac.ir
*۲- گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، aa.tavakoli@iau.ac.ir
۳- گروه مهندسی برق، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران، a.samanfar@khoiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۶/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۲۰

چکیده: برای مقابله با چالش سطح نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در برابر عدم‌قطعیت‌ها و به منظور توسعه حلقه کنترل فرکانس‌بار ثانویه، با هدف کاهش تأثیر اغتشاشات و تنظیم ضریب بهره مقاوم نسبت به عدم‌قطعیت‌ها، با استفاده از یک کنترل‌کننده اینرسی مجازی مبتنی بر کنترل مقاوم روش سنتزمیو، جهت کمبود اینرسی در خوشه‌های ریزشبکه جزیره‌ای جریان متناوب انجام شده‌است. اثبات پایداری و عملکرد این روش بر اساس مقدار تکین ساختاریافته صورت می‌گیرد. نتایج آزمایشگاهی سخت افزار در حلقه توسط پردازشگر سیگنال‌های دیجیتال‌سری TMS320F2812 و شبیه‌سازی در محیط نرم افزار MATLAB/SIMULINK عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی را برای توسعه کنترل فرکانس بار سنتی در مقایسه با کنترل اینرسی مجازی ارتقاءیافته و حالت بدون اینرسی، تحت اغتشاشات مختلف تأیید می‌کند که به کارگیری کنترل‌کننده اینرسی مجازی مبتنی بر سنتزمیو، باعث بهبود پایداری خوشه‌های ریزشبکه جزیره‌ای و میرایی نوسانات توان می‌شود و همچنین انحرافات فرکانسی را به میزان قابل توجهی، کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهبود پایداری، خوشه های ریزشبکه، روش سنتزمیو ، ژنراتور سنکرون مجازی، کنترل اینرسی مجازی.

۱- مقدمه

ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه برق متداول، یک سیستم قدرت با میرایی یا اینرسی کم ایجاد کرده‌است، به طوری که یک اغتشاش کوچک می‌تواند سیستم را ناپایدار کند. مبدل‌های الکترونیک قدرت اغلب برای تزریق انرژی تولید شده توسط این منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه برق استفاده می‌شوند و در نتیجه، تأثیر اینورترها به سرعت در حال رشد است. سیستم‌های قدرت سنتی به دلیل وجود اینرسی جنبشی، در برابر ناپایداری مقاوم هستند. تولید پراکنده مبتنی بر اینورترکه قسمت چرخشی ندارند، سیستم را در برابر اغتشاشات آسیب پذیر می‌کنند[۱]. یکی از راه های مؤثر برای غلبه بر این چالش می‌تواند، استفاده از اینرسی مجازی باشد که معمولا توسط کنترل‌کننده ژنراتور سنکرون مجازی(VSG) انجام می‌شود[۲]. از سویی دیگر وظیفه اصلی کنترل‌کننده فرکانس بار، حذف انحراف فرکانس و در نتیجه تنظیم فرکانس سیستم به دنبال اغتشاشات و تغییرات غیرمنتظره است[۳].

در سال‌های اخیر، تحقیقاتی برای بررسی مفهوم کنترل اینرسی مجازی برای مقابله با تأثیرات منفی منابع انرژی تجدیدپذیر در پایداری‌سیستم‌های‌قدرت انجام شده‌است. مطالعات متعدد، ویژگی‌های مختلف کنترل‌کننده ژنراتور سنکرون مجازی را بررسی کرده‌است. معادله چرخش ژنراتور یک جز اساسی در طرح کنترل یک ژنراتور سنکرون مجازی است. در این راستا، تلاش های محققان محدود به تعیین پارامترهای نوسان بهینه مانند ضریب میرایی و اینرسی مجازی است. در [۴]، برای حذف انحراف در فرکانس و ولتاژ، از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات برای بدست آوردن پارامتر ضریب اینرسی و پارامتر میرایی استفاده شده‌است. در [۵]، ثابت اینرسی مجازی با روش منطق فازی محاسبه می‌شود. عیب اصلی تکنیک منطق فازی وابستگی آن به دانش طراح است. بیشتر ژنراتورهای سنکرون مجازی، با روش های کنترلی جداگانه برای توان اکتیو و راکتیو به کار رفته اند[۶]. در [۷]، یک استراتژی کنترل ژنراتور سنکرون مجازی با اینرسی تطبیقی پیشنهاد شده‌است. اگر انحراف فرکانس بیشتر از مقدار تعیین شده‌باشد،

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

اینرسی متناسب با سرعت انحراف فرکانس افزایش می یابد. در [۸]، یک ژنراتور سنکرون مجازی توسط یک استراتژی کنترل بنگ بنگ کنترل می‌شود. مقدار اینرسی مجازی با توجه به میزان انحراف فرکانس روی حداکثر یا حداقل مقدار تنظیم می‌شود. با این حال، روش خاصی برای تعیین حداکثر و حداقل اینرسی مجازی ارائه نشده‌است.

در نتیجه، از آنجا که مبدل سنکرون محدودیت‌های فیزیکی یک ژنراتور سنکرون واقعی را ندارد، پارامترهای تعبیه شده آن را می‌توان به صورت آزاد و بصورت برخط تنظیم کرد[۹،۱۰]. اگرچه همگام‌کننده به پشتیبانی از اینرسی در شرایط ضعیف شبکه کمک می‌کند، اما عیب اصلی آن عدم توانایی تنظیم سرعت پاسخ دینامیکی حلقه توان اکتیو بدون تأثیر بر ویژگی افت فرکانس حالت پایدار است و به عنوان مثال ضریب افت فرکانس باید اصلاح شود که نامطلوب است، زیرا استانداردهای شبکه محلی این ضریب را تعیین می‌کنند[۱۱]. اگر سرعت پاسخ حلقه توان اکتیو قابل تنظیم نباشد، به دنبال خطای یک فاز به زمین در شبکه، همگام کننده نمی‌تواند به موقع افت فرکانس را کنترل کند تا انحرافات فرکانس را مهار کند. سایر طرح های کنترلی ژنراتور سنکرون مجازی این معایب را دارند[۱۲]. در ادبیات، چندین روش برای بهبود سرعت پاسخ دینامیکی از حلقه توان اکتیو پیشنهاد شده‌است. تعدادی از روش ها برای کنترل افتی فرکانس پیشنهاد شده‌است[۱۳]. اگر کنترل افتی فرکانس، مستقیماً در مبدل های سنکرون استفاده شود، باعث ایجاد اثر مخالف بر اتصال بین حلقه توان راکتیو و حلقه توان اکتیو می‌شود. کنترل افتی به طور گسترده در کنترل ریزشبکه ها، استفاده می‌شود. با استفاده از کنترل افتیP-F (فرکانس - توان اکتیو) و کنترل افتی Q-V (ولتاژ - توان راکتیو) پخش توان بین منابع تولید پراکنده انجام می‌شود[۱۴]. کنترل افتی معمولی قادر به افزایش اینرسی ریز شبکه‌ها نیست، در نتیجه ریزشبکه‌های مبتنی بر کنترل افتی معمولاً دارای اینرسی کم هستند و به خطا حساس می‌باشند. ماهیت نوسانی ژنراتور سنکرون مجازی همچنین باعث ایجاد نوسانات در هنگام پخش توان نامناسب توان اکتیو گذرا می‌شود[۱۵]. مشکل اصلی کنترل افتی پخش توان نادرست است که منجر به نابرابری ولتاژ خروجی تولید پراکنده ها ناشی از افت ولتاژ خط نامتقارن می‌شود. در ادبیات، بسیاری از محققان روی این موضوع تمرکز کرده و راه حل های مختلف کنترلی را برای حل آن پیشنهاد کرده اند. یک راه حل جامع این است که عدم تطابق امپدانس خروجی تولید پراکنده‌ها، حذف شود[۱۶]. با این وجود، اگر پخش توان اکتیو براساس نسبت درجه بندی توان نباشد، این راه‌حل قادر به دستیابی دقیق به پخش توان راکتیو نخواهد بود. روشی مبتنی بر جبران افت ولتاژ خط ارائه می‌شود. همچنین، روش های دیگری مانند کنترل افتی ولتاژ تطبیقی[۱۷] پیشنهاد شده‌است. با این حال، این روش‌ها نمی‌توانند خطاهای پخش توان راکتیو را به طور کامل از بین ببرند، همان‌طور که در نتایج آزمایش نشان داده شده‌است. چندین روش برای بهبود پخش توان راکتیو از ارتباطات استفاده کرده‌اند[۱۸]. اشکال اصلی این روش تاخیر در زمان ارتباط و خطای احتمالی ارتباط است. بنابراین، با توجه به این مشکلات، بهتر است مسئله پخش توان راکتیو به روشی کم هزینه و ساده و بدون ارتباطات از راه دور حل شود.

در[۱۹]، نویسندگان مبدل سمت شبکه را برای پشتیبانی از تنظیم فرکانس و ولتاژ اجرا کردند. در [۲۰]، یک کنترل‌کننده اینرسی مجازی با استفاده از روش H_∞ برای بهبود پایداری فرکانسی یک ریزشبکه پیشنهاد شده‌است. در [۲۱،۲۲]، توربین های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه به عنوان یک ژنراتور سنکرون مجازی برای بهبود پاسخ‌های دینامیکی سیستم استفاده می‌شود. در[۲۳] یک کنترل‌کننده اینرسی مجازی سازگار برای افزایش پایداری فرکانسی پیشنهاد شده‌است. برای بهبود پایداری فرکانسی ریزشبکه‌ها، عملکرد غیر مقاوم را می‌توان مهم‌ترین مشکل این روش ها دانست. محققان مختلفی نیز در خصوص کنترل‌کننده‌های مقاوم جهت پایداری ریزشبکه‌ها مقالاتی ارائه کردند[۲۴، ۲۵، ۲۶]. موضوع نفوذ منابع انرژی تجدید پذیر و عدم قطعیت‌ها چالشی دیگر می‌باشد[۲۷].

بیشتر تحقیقات منتشر شده در مورد مطالعه عملکرد کنترل اینرسی مجازی در یک ریزشبکه در مقیاس کوچک گزارش شده‌است و هیچ گزارشی با تمرکز بر کنترل اینرسی مجازی برای یک ریزشبکه در مقیاس بزرگ که شامل تعدادی خوشه است، وجود ندارد. در حالی که یک ریزشبکه واقعی ممکن است از تعدادی خوشه تشکیل شده باشد که هر کدام دارای تعدادی منابع تولید پراکنده با نفوذ بالا هستند. در این حالت ممکن است کنترل‌کننده مجازی به درستی کار نکند و نیاز به طراحی مجدد داشته باشد. برای تنظیم مقاوم و بهینه پارامترهای کنترل‌کننده اینرسی مجازی، از کنترل مقاوم روش سنتزمیو استفاده می‌شود. بنابراین، عدم قطعیت‌های موجود در ریزشبکه را می‌توان به راحتی با روش پیشنهادی برطرف کرد. در ساختار کنترل‌کننده اینرسی مجازی پیشنهادی، هر دو ویژگی پاسخ اینرسی ژنراتور سنکرون مرسوم و دینامیکی سریع مبدل‌های الکترونیک قدرت وجود دارد که این امر منجر به انعطاف پذیری زیاد در طراحی ها می‌شود.

بقیه این مقاله به شرح زیر تنظیم شده‌است. بخش ۲ تئوری طرح پیشنهادی را به صورت خلاصه بیان می‌شود. بخش ۳ افزایش اینرسی در خوشه های ریزشبکه جزیره ای توسط کنترل مقاوم روش سنتزمیو را مورد بحث قرار می دهد. بخش ۴ سیستم آزمون و نتایج شبیه‌سازی و بخش ۵ نتیجه گیری را ارائه می‌دهد.

۲-تئوری طرح پیشنهادی

۲-۱-ژنراتور سنکرون مجازی پایه

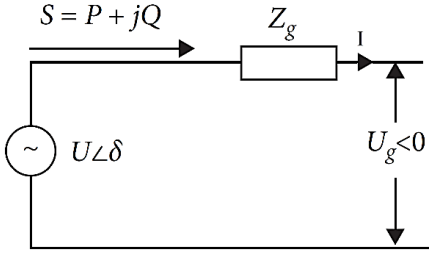
ژنراتور سنکرون مجازی پایه(VSG پایه) رفتار دینامیکی ژنراتورهای سنکرون را تقلید می‌کند تا اینرسی مجازی را به شبکه تزریق نماید. اینرسی از ویژگی ژنراتورهای سنکرون مرسوم است که با جرم فیزیکی دوار سیستم در فرکانس چرخش، متناسب با توان تولیدی مرتبط است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

در صورت بروز تغییرات ناگهانی در بار، به علت جرم چرخان و خاصیت اینرسی روتور، تغییرات فرکانس را مهار کرده و سیستم را پایدار نگه می‌دارد و در طی دوره های گذرا، انرژی جنبشی روتور جهت تعادل توان تولیدی و مصرفی، به شبکه تزریق می‌شود. تولید توان مبتنی بر اینورتر به طور ذاتی فاقد اینرسی است، زیرا شکل موج به طور مصنوعی از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت ایجاد می‌شود. در ادامه مدل‌سازی ژنراتور سنکرون مجازی پایه ارائه شده و تأثیر اینرسی مجازی بر پایداری ریزشبکه مورد بررسی قرار گرفته است. معادله نوسان یک ژنراتور سنکرون شبیه سازی شده توسط حلقه توان اکتیو ژنراتور سنکرون مجازی پایه را می‌توان به صورت معادله(۱) نوشت.

$$P_{in}-P_{out}=J\omega_m\frac{d\omega_m}{dt}+D\left(\omega_m-\omega_n\right) \qquad (۱)$$

توان ورودی (P_{in})، توان خروجی (P_{out}) و سرعت زاویه‌ای نامی (ω_n) می‌باشد. اینورتر به عنوان یک ژنراتور سنکرون مرسوم رفتار می‌کند. سرعت زاویه‌ای روتور مجازی(ω_m) در بلوک کنترل VSG از معادله نوسان، محاسبه می شود. سپس زاویه فاز مکانیکی مجازی(θ) با انتگرال گیری از ω_m به دست می آید و به عنوان فرمان فاز ولتاژ خروجی، به اینورتر داده می شود. اینرسی و ضریب میرایی یک ژنراتور سنکرون سنتی قابل تغییر نمی‌باشند، در صورتی که این ضرایب در ژنراتور سنکرون مجازی، قابل تغییر هستند. از این رو، ضرایب میرایی و اینرسی را می‌توان، برای دستیابی به پاسخ سریع‌تر و پایدارتر مورد استفاده قرار داد. ضریب میرایی و اینرسی یک ژنراتور سنکرون مرسوم قابل تغییر نمی‌باشند، در صورتی که این ضرایب در ژنراتور سنکرون مجازی قابل تغییر هستند. از این رو، ضرایب میرایی و اینرسی را می‌توان برای دستیابی به پاسخ سریع‌تر و پایدارتر مورد استفاده قرار داد. ضریب میرایی(D) بر اساس الزامات بهره برداری شبکه طراحی و ثابت می‌باشد. در این بخش اینرسی مجازی(J) تنها بر خروجی ژنراتور سنکرون مجازی تمرکز دارد. شکل (۱) یک ژنراتور سنکرون مجازی را نشان می دهد که در حالت متصل به شبکه کار می‌کند[۲۸].



شکل (۱): ژنراتور سنکرون مجازی متصل به شبکه[۲۸]

به منظور جداسازی توان، از اندوکتانس مجازی و امپدانس منفی مجازی به طور کلی برای ایجاد امپدانس معادل بین اینورتر و شبکه نزدیک به اندوکتانس خالص(خط القایی) استفاده می‌شود، لذا فرض بر این است که امپدانس خط، القایی است (به عنوان مثال Xg / Rg >>

1) سپس توان اکتیو و توان راکتیو ژنراتور سنکرون مجازی توسط معادله های(۲) و (۳) قابل استخراج می باشند[۲۹]:

$$P=\frac{3U_gU}{X_g} \qquad (۲)$$

$$Q=\frac{3U\left(U_g-U\right)}{X_g} \qquad (۳)$$

شکل (۲) ساختار حلقه توان اکتیو ژنراتور سنکرون مجازی را با استفاده از معادله‌های (۱) و (۳) نشان می دهد. تابع انتقال حلقه بسته از توان اکتیو خروجی به شرح زیر است.

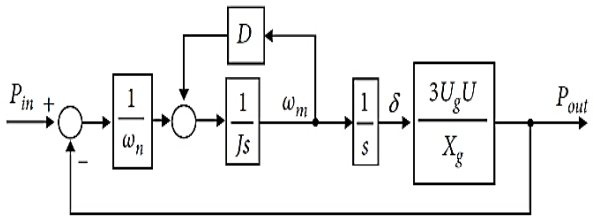
$$G(s)=\frac{P_{out}}{P_{in}}=\frac{\frac{3U_gU}{\omega_mX_gJ}}{s^2+\frac{D}{J}s+\frac{3U_gU}{\omega_mX_gJ}} \qquad (۴)$$

با مقایسه یک سیستم مرتبه دوم معمولی با تابع انتقال داده شده در (۴) ، می‌توان نوشت:

$$\omega=\sqrt{\frac{3U_gU}{\omega_mX_gJ}} \qquad (۵)$$

$$\zeta=D\sqrt{\frac{\omega_mX_g}{12U_gUJ}} \qquad (۶)$$

از (۵) و (۶) نتیجه گرفته می‌شود که اینرسی مجازی با ضریب میرایی و فرکانس طبیعی، نسبت عکس دارد.



شکل (۲): حلقه توان اکتیو ژنراتور سنکرون مجازی[۲۸]

۳-افزایش اینرسی در خوشه‌های ریزشبکه جزیره‌ای توسط کنترل مقاوم روش سنتزمیو

یک کنترل‌کننده‌اینرسی مجازی(VIC) برای افزایش پایداری فرکانسی در خوشه‌های ریزشبکه جزیره‌ای جریان متناوب ارائه می‌شود. هدف از کنترل‌کننده پیشنهادی، بهبود ویژگی های میرایی ریزشبکه مورد مطالعه می‌باشد. مقادیر بهینه و مقاوم پارامترهای کنترل‌کننده اینرسی مجازی با استفاده از یک تکنیک کنترل مقاوم روش سنتزمیو(μ) تنظیم می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

طراحی کنترل اینرسی مجازی بر روی اینورتر سیستم فتوولتاییک در خوشه‌های ۱ و ۳ و پیل سوختی در خوشه ۲ و همچنین طراحی کنترل‌کننده فرکانس بار حلقه ثانویه(ΔP_{SL}) نیز بر روی سیستم دیزل ژنراتور انجام می‌شود. عدم قطعیت پارامتری خوشه‌های ریزشبکه جزیره‌ای، یکی از عواملی است که، عملکرد روش کنترل اینرسی مجازی را به خطر می‌اندازد و ممکن است سبب ناپایداری فرکانسی شود، بنابراین کنترل اینرسی مجازی باید در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم باشد. از این رو، در ساختار کنترل اینرسی مجازی از یک روش کنترلی پیشنهادی (کنترل‌کننده مقاوم روش سنتزمیو) بهره گرفته شده‌است. بخش‌های طراحی کنترل‌کننده در زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.

۳-۱ کنترل‌کننده اینرسی مجازی

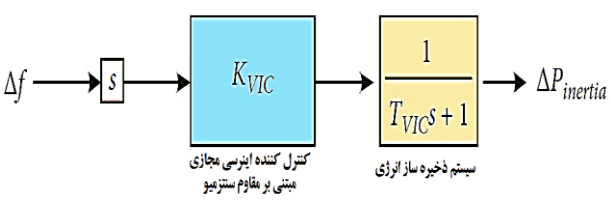
در کنترل اینرسی مجازی، توان منابع تولید پراکنده های مبتنی بر اینورتر توسط، مشتق فرکانس شبکه کنترل می‌شود. بنابراین، فقدان اینرسی اضافی را می‌توان به عنوان یک استراتژی، برای تثبیت چنین سیستم قدرتی در نظر گرفت. معادله (۷) مقدار توان تقلیدشده(P_{emu}) را برای جبران کمبود اینرسی نشان می دهد:

$$P_{emu} = K_{PE}\, f_o \frac{d(\Delta f_i)}{dt} \qquad (۷)$$

توان الکترونیکی(K_{PE})، انحراف فرکانس(Δf_i) و همچنین فرکانس سیستم(f) است. کنترل اینرسی مجازی به عنوان مکملی برای کاهش انحرافات فرکانس در یک شبکه متصل به هم در حضور کنترل فرکانس بار سنتی(LFC) استفاده می شود. کنترل اینرسی مجازی را می‌توان با توجه به مفهوم کنترل مشتق به صورت زیر طراحی کرد:

$$\Delta P_{inertia} = \frac{K_{EVIC}}{1+sT_{EVIC}} \frac{d(\Delta f_i)}{dt} \qquad (۸)$$

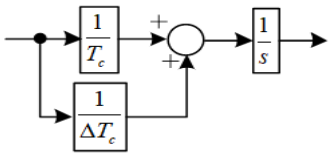
جایی که در آن ثابت زمانی کنترل‌کننده اینرسی مجازی (T_{EVIC}) و ضریب بهره کنترل‌کننده اینرسی مجازی(K_{EVIC}) هستند. شکل(۳) نمودار بلوک کنترل‌کننده اینرسی مجازی را نشان می دهدکه مشتق فرکانس به عنوان ورودی کنترل‌کننده اینرسی مجازی برای کاهش انحراف فرکانس با نفوذ توان تجدیدپذیر یا شرایط بهره‌برداری، انتخاب شده‌است.



شکل (۳) : نمودار بلوک کنترل‌کننده اینرسی مجازی

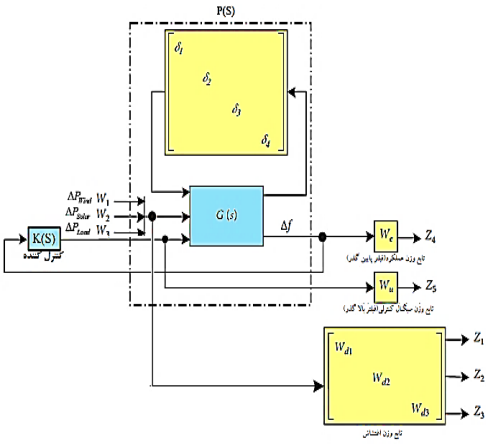
۳-۲- مدل سازی عدم قطعیت ها

عدم‌قطعیت به اختلاف میان پاسخ سیستم نامی، با پاسخ سیستم واقعی اشاره دارد. به طور کلی، عدم قطعیت‌ها به مدل ساختاریافته و مدل بدون‌ساختار طبقه‌بندی می‌شوند عدم‌قطعیت‌های دینامیکی(Δ_i) از نوع بدون ساختار می‌باشند که بر روی دینامیک غیرخطی سیستم تاثیر می‌گذارند و شامل بخش‌های ضربی و جمع‌پذیر هستند. عدم‌قطعیت های پارامتری (δ_i) از نوع ساختاریافته می‌باشند که بر روی پارامترهای سیستم دیده می‌شوند و به مقدار کمتر و بیشتر از یک عدد اشاره دارد. تعاریف متعددی از مدل عدم قطعیت وجود دارد. برای سنتزمیو، یک بلوک اغتشاشی Δ(دلتا) که به عنوان عدم قطعیت بدون ساختارشناخته می‌شود و به عنوان یک اغتشاش دینامیکی جمع پذیر با سیستم درنظر گرفته می‌شود[۳۰]. عدم‌قطعیت ساختاریافته شامل اغتشاش‌های پارامتری نیز به مدل مورد مطالعه اعمال می‌شود. دینامیک سیستم را می‌توان برای خارج کردن بلوک عدم‌قطعیت پارامترهای نامعین با استفاده از مدل LFT بالایی نشان داده شده در شکل ۳-۳۲ استفاده کرد[۳۱].



شکل (۴): استخراج بلوک عدم‌قطعیت پارامترهای نامعین با مدل LFT

در این مقاله، برای ساده سازی تنها چهار پارامتر T_{FC} ، T_t ، T_g ، T_{WTG} در معرض عدم قطعیت ± ۲۵٪ در ناحیه مقادیر نامی خود فرض می‌شوند. شکل (۵) عدم قطعیت بلوک Δ حلقه را برای این چهار بلوک از سیستم ریزشبکه نشان می دهد که T_c ثابت زمانی این بلوک ها و ΔT_c عدم قطعیت آن است. Δf به عنوان خروجی سیستم اندازه گیری انتخاب می شود، و ΔP_{wind} ، ΔP_{pv} و ΔP_L به عنوان سیگنال های اغتشاش شمارش می‌شوند. دینامیک سیستم را می‌توان، برای استخراج نمودار جعبه‌ای سیستم حلقه بسته با عدم قطعیت نشان داده شده در شکل(۵) استفاده‌کرد.



شکل (۵): نمودار جعبه ای سیستم حلقه بسته با بلوک‌های عدم قطعیت

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

بنابراین، از یک پیکربندی استاندارد تبدیل کسری خطی بالا می‌توان برای تنظیم مجدد کل سیستم استفاده کرد. نمودار بلوک حلقه بسته ریزشبکه همراه با عدم قطعیت مورب ساختاریافته رسم شده‌است. در اینجا، عدم قطعیت قطری ۴ × ۴ پارامتری انتخاب شده‌است. تمام بلوک نامعینی ساختاریافته Δ ، را می‌توان به فرم کلی معادله (۹) نشان داد، که شامل عدم‌قطعیت‌های پارامتری(δ_i) و عدم‌قطعیت‌های دینامیکی (Δ_j) است که می‌تواند از دینامیک سیستم استخراج شود.

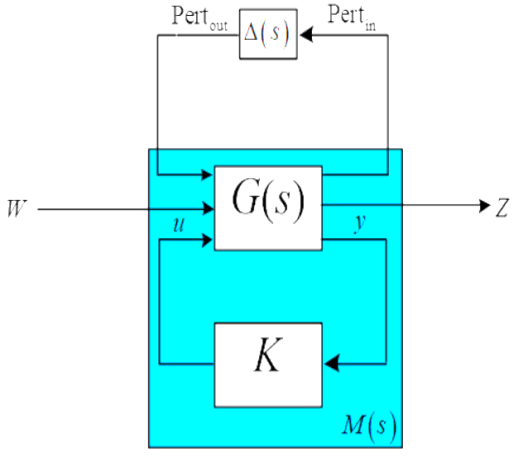
$$\Delta=\left\{\begin{matrix}\text{diag}\left[\delta_1 I_{r1},\ldots,\delta_k I_{rk},\ldots,\Delta_1,\ldots,\Delta_f\right],\\ \delta_i\in C,\Delta_j\in C^{k_i\times k_j}\end{matrix}\right\} \qquad (۹)$$

۳-۳- روش تکرار عددی D-K در حل مسایل عدم قطعیت‌ها

برای تضمین عملکرد مقاوم یک سیستم دینامیکی، از چارچوب مقدار واحد ساختاریافته (کنترل مبتنی بر میو) استفاده می‌شود. برای تعریف تابع سنتزمیو از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\mu_\Delta(M)=\frac{1}{\min\left\{\bar{\sigma}(\Delta):|I-M\Delta|=0,\Delta\in\Delta\right\}} \qquad (۱۰)$$

کل سیستم را می‌توان در یک پیکربندی استاندارد، که به پیکربندی $\Delta-M-K$ معروف است، تنظیم کرد که در شکل (۶) نشان داده شده‌است. در این شکل، w ورودی های اختلال، u سیگنال های کنترلی، z سیگنال‌های عملکرد، y خروجی های اندازه‌گیری شده‌است، $Pert_{in}$ و $Pert_{out}$ سیگنال‌های آشفتگی ورودی و خروجی بلوک نامعلوم هستند.



شماتیک پیکربندی استاندارد Δ-M-K

برای برآوردن شرایط عملکرد مقاوم در سنتز μ، $\|Twz\|_\infty\le 1$ باید برای همه $\Delta\in\Delta_p$، که Δ_p توسط رابطه(۱۷) تعریف می‌شود:

$$\Delta_P:=\left\{\begin{bmatrix}\Delta & 0\\ 0 & \Delta_F\end{bmatrix}:\Delta\in R^{4\times4},\Delta_F\in C^{4\times5}\right\} \qquad (۱۱)$$

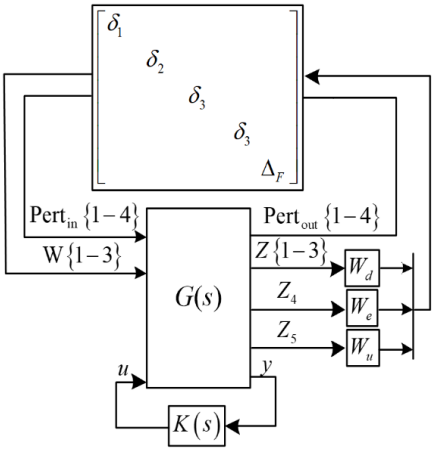
جایی که Δ_p و Δ به ترتیب نشان دهنده الزامات عملکرد و عدم قطعیت هستند. عملکرد مقاوم تضمین می شود، اگر و فقط اگر:

$$\max_{\omega}\ \mu_{\Delta_p}\left(M(s)\right) \qquad (۱۲)$$

روش تحلیلی استاندارد قادر به محاسبه کنترل‌کننده میو بهینه ارائه شده در معادله(۱۲) نیست. بنابراین، معادله(۱۲) را می‌توان با روش عددی به نام تکرار D-K حل کرد[۳۲]. این روش کنترل‌کننده K را با به حداقل رساندن معادله زیر تعیین می‌کند :

$$\min_{K}\left(\min_{D(j\omega)}\left\|D(j\omega)M\left(K(j\omega)\right)D^{-1}(j\omega)\right\|_\infty\right) \qquad (۱۳)$$

با حل تکراری برای D و M کاهش یابد. در اینجا، D یک ماتریس متقارن معین مثبت با ابعاد مناسب است و حداکثر مقدار تکین یک ماتریس($\bar{\sigma}$) را نشان می دهد. برای طراحی کنترل‌کننده مقاوم سنتزمیو، از آرایش تبدیل کسری خطی بالا نشان داده شده در شکل(۷) برای اجرای روش تکرار D-K استفاده می شود.



شکل (۷): نمودار بلوک روش تکرار D-K

۴-۳- مدلسازی عدم قطعیت‌ها

برای طراحی کنترل‌کننده مقاوم روش سنتزمیو، از آرایش تبدیل کسری خطی بالایی(LFT) برای اجرای روش تکرار D-K استفاده می‌شود. در این شکل W_e ، W_u ، $W_{d(1)}$ ، $W_{d(2)}$ ، $W_{d(3)}$ توابع وزن دهی برای بهبود عملکرد مقاوم و پایداری مقاوم هستند. W_1 ، W_2 ، W_3 ورودی-های اختلال هستند. u نشان‌دهنده سیگنال کنترلی است. Z_{1-5} سیگنال‌های عملکرد مطلوب هستند. y خروجی اندازه‌گیری شده‌است. در اینجا توابع وزن‌دهی به صورت زیر انتخاب می‌شوند:

$$W_e=\frac{0.005s^3+0.05s^2+50s+125}{s^3+100s^2+300s+1} \qquad (۱۴)$$

$$W_u=\frac{5s+50}{s^2+3000s+2\times10^4} \qquad (۱۵)$$

$$W_d=0.01I_{3\times3} \qquad (۱۶)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

در معادله بالا I ماتریس یکه یا ماتریس همانی می‌باشد. حاشیه پایداری مناسب حلقه بسته، از توابع وزنی ($w_e \ w_u$) برای نرمالیزه کردن سیگنال کنترل و عملکرد استفاده‌می‌شود.

۳-۵- ارزیابی پایداری مقاوم و عملکرد مقاوم

اثبات پایداری و عملکرد مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده در سیستم، براساس مقدار تکین ساختار یافته یا سنتزمیو(μ) قابل بررسی می‌باشد. شرایط کافی و لازم برای اطمینان از پایداری و عملکرد مقاوم یک سیستم دینامیکی، در حضور نامعینی‌های ساختاریافته را فراهم می‌کند. در واقع هنگامی که یک سیستم حلقه بسته بطورمجانبی پایدار است، هم عملکرد مقاوم و هم پایداری مقاوم برای هر سیستمی با هرگونه عدم قطعیت برآورده می‌شود. با در نظر گرفتن پیکربندی Δ- M، شرط پایداری مقاوم نوشته می‌شود:

$$\Delta^* = \left\{ \Delta(s_0) \in \Delta^*, s_0 \in \mathbb{C}, \mathrm{Re}(s_0) \geq 0 \right\} \quad (۱۷)$$

$$M \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (۱۸)$$

جایی که $F_L(G,K)$ تابع انتقال سیستم حلقه بسته است. برای $\Delta \in \Delta^*$ و $\|\Delta\|_\infty \leq 1$، سیستم حلقه بسته زمانی پایدار است که

$$\sup \mu_\Delta (M_{11}) \leq 1 \quad (۱۹)$$

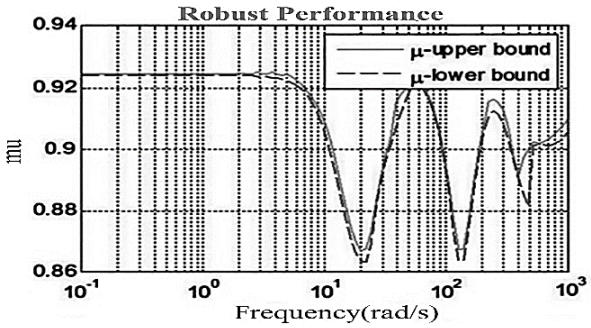
برای عملکرد مقاوم، با در نظر گرفتن پیکربندی Δ- M، می‌توان یم بنویسیم:

$$\Delta_T = \left\{ \begin{bmatrix} \Delta_u & 0 \\ 0 & \Delta_p \end{bmatrix}, \Delta_u \in \Delta^*, \Delta_p \in \mathbb{C} \right\} \quad (۲۰)$$

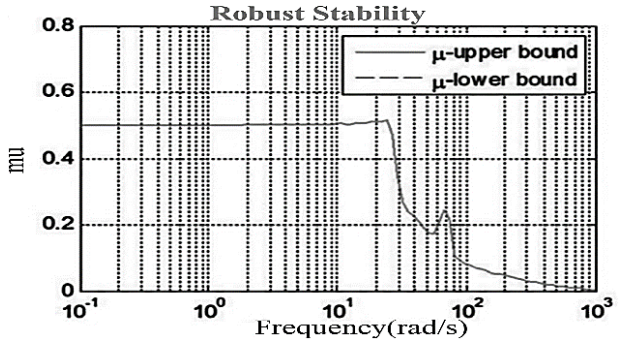
Δp و Δu به ترتیب الزامات عملکرد و عدم قطعیت هستند. برای $\Delta \in \Delta_T$ و $\|\Delta\|_\infty \leq 1$، عملکرد مقاوم سیستم حلقه بسته تضمین می‌شود اگر و فقط اگر

$$\sup \mu_\Delta (M) \leq 1 \quad (۲۱)$$

مقدار تکین ساختاریافته(تغییرات میو) در برابر تغییرات فرکانس با توجه به کران‌های بالا و پایین، مقدار میو برای سیستم حلقه بسته که دارای عدم قطعیت می‌باشد، در شکل(۸) را نشان می دهد. همان‌طور که در شکل دیده‌می‌شود، با توجه به شرط عملکرد مقاوم و پایداری مقاوم که مقدار تکین ساختاریافته، باید کمتر از عدد ۱ باشد، در نمودار شکل(۸) بخش(الف) مقدار تکین ساختاریافته، مقدار ۰/۹۳ بدست آمده است و همچنین شکل(۸) بخش(ب) مقدار تکین ساختاریافته، مقدار ۰/۵ می‌باشد که این مقادیر با توجه به شروط مذکور، اثبات پایداری و عملکرد براساس مقدار تکین ساختاریافته محقق می‌شود. بنابراین طراحی کنترل‌کننده روش سنتزمیو، دارای عملکرد مقاوم و پایداری مقاوم می‌باشد و پارامترهای کنترل‌کننده پیشنهادی، در برابر عدم قطعیت‌های اعمال شده به سیستم، مقاوم می‌باشند.



(الف)



(ب)

شکل (۸): (الف)عملکرد مقاوم. (ب) پایداری مقاوم

۴- سیستم آزمون و نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، ابتدا شبیه سازی در ریزشبکه مورد مطالعه و سپس نتایج طراحی کنترل‌کننده اینرسی مجازی پیشنهادی بخش قبل و میزان اثربخشی آن، مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج عملکرد کنترل‌کننده مقاوم مبتنی بر روش سنتزمیو[1] برای کنترل فرکانس بار در خوشه های ریزشبکه جزیره ای در مقیاس بزرگ آزمایش شده و در مقایسه با کنترل اینرسی مجازی ارتقاء یافته[2] مدل[۳۳] و حالت بدون اینرسی[3]، مورد بررسی قرار می‌گیرد و اثر بخشی آن نشان داده می شود. هدف از این بخش غلبه بر عملکرد نامطلوب کنترل فرکانس بار، در خوشه های ریزشبکه جزیره‌ای و بهبود کارایی مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها و کاهش انحراف فرکانس می‌باشد.

۴-۱- مشخصات ریزشبکه و کنترل‌کننده پیشنهادی

شبیه‌سازی در ریزشبکه مورد مطالعه، برای نشان دادن کارایی کنترل‌کننده مقاوم مبتنی بر روش سنتز، انجام شده‌است. پارامترهای سیستم مورد مطالعه طرح کنترلی، جهت شبیه‌سازی و تست‌های آزمایشگاهی در جدول(۱) نشان داده شده‌است.کنترل‌کننده پیشنهادی در سناریوهای مختلف مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

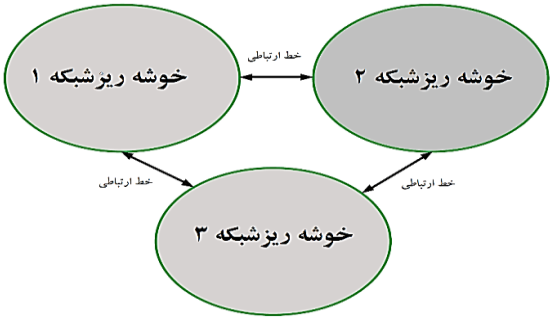
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

جدول (۱): پارامترهای سیستم مورد مطالعه طرح کنترلی[۳۰]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
D (pu/Hz)	0.012	T_{DEG} (s)	2
H (pu/s)	0.1	T_{WTG} (s)	1.5
T_{FC} (s)	4	T_{IN} (s)	0.08
T_{FESS} (s)	0.1	T_{IC} (s)	0.004
T_t	0.4	T_g	0.08
T_{conv}	0.1	P_{FESS}	4
J_{FESS}	2		

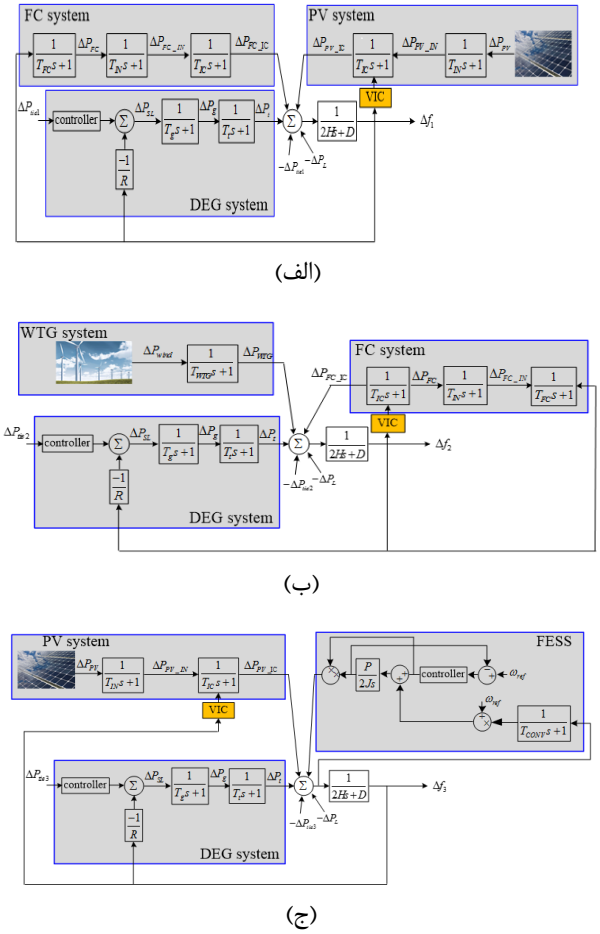
۴-۲- مدل‌سازی خوشه های ریزشبکه چندگانه

تعداد سه خوشه در ریزشبکه، توسط یک خط ارتباطی به یکدیگر متصل می‌باشند. توان تبادل شده بین دو ریزشبکه، به تفاوت در انحرافات فرکانس آن ریزشبکه ها و ضریب گشتاور همگام‌سازی خط ارتباطی بستگی دارد. خوشه‌های هر ریزشبکه، توسط دو خط ارتباطی به یکدیگر متصل هستند و مجموع توان خط ارتباطی دو خوشه، توان تبادلی آن ریزشبکه می‌باشد. شکل(۹) خوشه‌های ریزشبکه به هم پیوسته توسط خطوط ارتباطی را نشان می‌دهد. هر ریزشبکه دارای منابع مختلف تولید پراکنده است و ریزشبکه ها از طریق یک خط ارتباطی به یکدیگر متصل می‌شوند. در اولین ریزشبکه، یک پانل فتوولتاییک(PV)، یک ژنراتور موتور دیزلی(DEG)، یک پیل سوختی(FC) استفاده شده‌است. در ریزشبکه دوم، یک پیل سوختی، یک ژنراتور توربین بادی(WTG) و یک ژنراتور موتور دیزلی وجود دارد. ریزشبکه سوم شامل یک پانل فتوولتاییک، یک سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار(FESS) و یک موتور دیزل ژنراتور است.



شکل (۹): خوشه‌های ریزشبکه به هم پیوسته توسط خطوط ارتباطی

در شکل(۹) مدل دینامیکی خوشه‌های ریزشبکه جزیره‌ای[۳۴] و پارامترهای سیستم مورد مطالعه طرح کنترلی جدول(۱)[۳۰] و همچنین مراحل مدل‌سازی خطوط ارتباطی[۳۵] نشان داده شده است. تغییرات توان ورودی بار در ریزشبکه، با در نظر گرفتن انحراف از مقدار اولیه، ارزیابی می‌شود[۲۲]. به‌دلیل وابستگی توان تولید شده توسط توربین بادی و فتوولتاییک‌ها به شرایط محیطی، آن ها هیچ نقشی در کنترل فرکانس ندارند. بنابراین، کنترل حلقه ثانویه(ΔP_{SL}) به دیزل ژنراتور اعمال می‌شود. از یک طرف، نوسانات فتوولتاییک، توربین بادی و بار و عدم قطعیت در ریزشبکه و از طرفی دیگر، اینرسی کم اینورترها باعث می‌شود که حلقه کنترل فرکانس ثانویه در همه شرایط با موفقیت عمل نکند. برای مقابله با این مشکل، کنترل‌کننده پیشنهادی طراحی شده توسط روش سنتزمیو بر روی اینورتر سلول فتوولتاییک در خوشه‌های ۱ و ۳ و پیل سوختی در خوشه ۲ اعمال می‌شود. مدل دینامیکی خوشه های ریزشبکه در شکل(۱۰) بخش (الف-ج) نشان داده شده‌است که یک کنترل‌کننده انتگرالی-مشتق‌گیر-تناسبی در حلقه کنترل فرکانس ثانویه، استفاده می‌شود.



شکل (۱۰): مدل دینامیکی خوشه های ریزشبکه الف)خوشه ۱ ، ب)خوشه۲، ج)خوشه ۳

توان تبادل شده در هر خوشه (ΔP_{tie}) به صورت معادله(۲۲) تا (۲۴) محاسبه می‌شود:

$$\Delta P_{tie1} = \frac{2\pi T_{12}}{s}\left(\Delta f_1 - \Delta f_2\right) + \frac{2\pi T_{13}}{s}\left(\Delta f_1 - \Delta f_3\right) \quad (۲۲)$$

$$\Delta P_{tie2} = \frac{2\pi T_{21}}{s}\left(\Delta f_2 - \Delta f_1\right) + \frac{2\pi T_{23}}{s}\left(\Delta f_2 - \Delta f_3\right) \quad (۲۳)$$

$$\Delta P_{tie3} = \frac{2\pi T_{31}}{s}\left(\Delta f_3 - \Delta f_1\right) + \frac{2\pi T_{32}}{s}\left(\Delta f_3 - \Delta f_2\right) \quad (۲۴)$$

جایی که T_{ij} ضریب گشتاور همگام‌سازی خط پیوند بین خوشه i و خوشه j است[۳۴].

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

چالش‌های پیش رو، به عنوان سناریوهای مختلف در شبیه‌سازی‌ها لحاظ شده‌است. سپس پاسخ فرکانسی و توان اکتیو با حضور کنترل‌کننده پیشنهادی بررسی شده و تعدادی از سناریوها با تحلیل عددی آنالیز می‌شود که در جدول(۲) شرح سناریوها نشان داده شده‌است.

جدول (۲): سناریوهای مختلف شبیه سازی

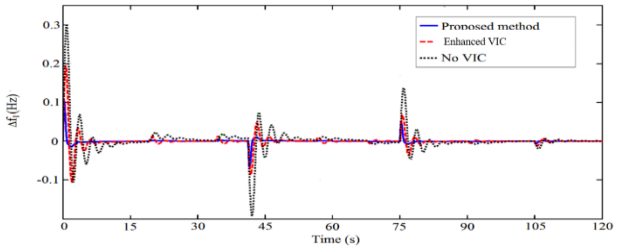
شماره سناریو	شرح سناریو	اغتشاش
۱	سطح نفوذ بالای منابع تولید پراکنده در خوشه های ریزشبکه جداگانه	تغییر فرکانس خوشه
۲	سطح نفوذ بالای منابع تولید پراکنده در خطوط ارتباطی خوشه های ریزشبکه	تغییر توان
۳	نفوذ بالای توان بادی در خوشه های ریزشبکه بصورت مجزا	تغییر فرکانس
۴	اختلال تغییر بار در یک خوشه ریزشبکه جزیره ای(نتایج تجربی)	تغییر بار

۴-۳- سناریو شماره ۱: سطح نفوذ بالای منابع تولید پراکنده در خوشه‌های ریزشبکه جداگانه

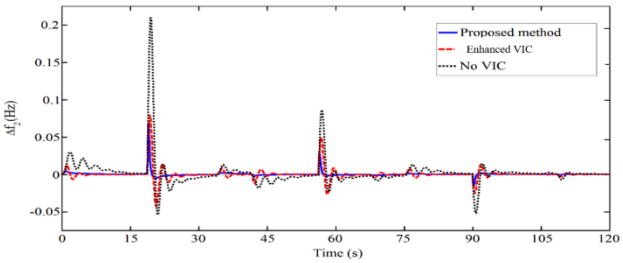
یک ریزشبکه واقعی ممکن است از تعدادی خوشه تشکیل شده باشد که هر کدام دارای تعدادی منابع تولید پراکنده با نفوذ بالا هستند. در این حالت ممکن است کنترل‌کننده مجازی به درستی کار نکند و نیاز به طراحی مجدد داشته باشد. انحراف فرکانس در خوشه ۱تا۳ در شکل‌های(۱۱) تا (۱۳) نشان داده شده‌است.

در سناریوشماره ۱، ابتدا به خوشه های ریزشبکه به صورت جداگانه، اغتشاشی به سیستم وارد می شود و با توجه به اختلالات وارد شده با سطح نفوذ بالای منابع تولید پراکنده، میزان انحراف فرکانس در هر خوشه ریزشبکه به صورت مجزا، نشان داده می شود. انحراف فرکانس خوشه ۱، با توجه به حالت بدون اینرسی که با حداکثر انحراف ۰/۳ هرتز می‌باشد، در مقایسه با حضورکنترل اینرسی مجازی ارتقاء یافته مدل[۳۳] مقدار ۰/۲ هرتز و کنترل‌کننده‌کننده اینرسی مجازی روش سنتزمیو مقدار ۰/۱ هرتز است مقدار زیادی می‌باشد. در خوشه ۲، میزان انحراف فرکانس در حالت بدون کنترل‌کننده ۰/۲ هرتز و در حالت های با کنترل‌کننده ارتقاءیافته ۰/۱ هرتز و کنترل‌کننده‌پیشنهادی مقدار ۰/۰۵ هرتز می‌باشد. در نهایت انحراف فرکانس در خوشه ۳، بدون کنترل‌کننده ۰/۰۳ هرتز ولی به همراه کنترل‌کننده اینرسی ارتقا یافته ۰/۰۱۸ و کنترل‌کننده پیشنهادی ۰/۰۱ هرتز می‌باشد.

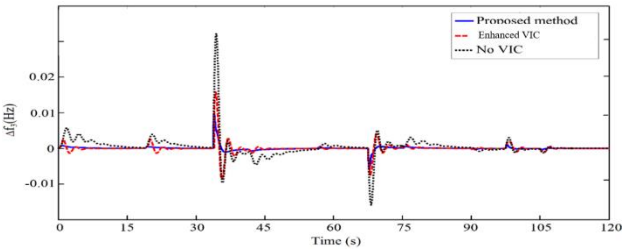
نتایج حاکی از عملکرد مناسب و عالی کنترل‌کننده پیشنهادی در برابر توانایی کاهش انحراف فرکانس، در برابر اغتشاشات را دارد و همچنین نسبت به عدم‌قطعیت‌ها مقاوم می‌باشد.



شکل (۱۱): انحراف فرکانس در خوشه ۱



شکل (۱۲): انحراف فرکانس در خوشه ۲



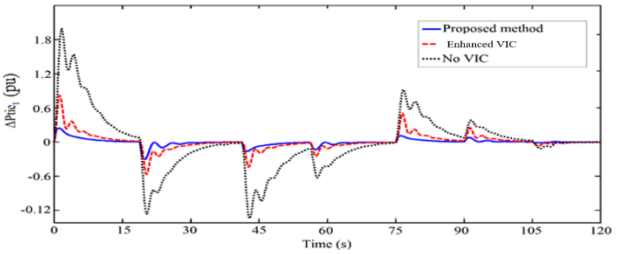
شکل (۱۳): انحراف فرکانس در خوشه ۳

۴-۴- سناریو شماره ۲: سطح نفوذ بالای منابع تولید پراکنده در خطوط ارتباطی خوشه‌های ریزشبکه

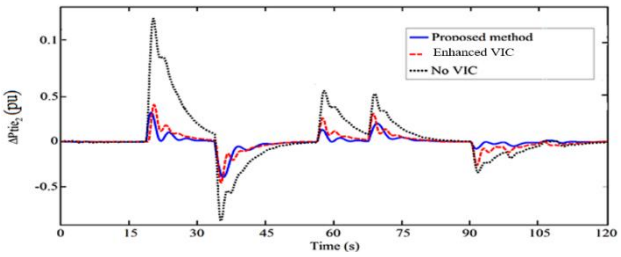
انحراف توان خطوط ارتباطی بین خوشه ۱ و خوشه ۲ در شکل(۱۴) بین خوشه ۲ و خوشه ۳ در شکل(۱۵) و بین خوشه ۱ و خوشه ۳ در شکل(۱۶) نشان داده شده‌است. همانگونه که در سناریو شماره ۲ مشاهده می شود، با ورود اغتشاش به سیستم، انحراف توان که بین خطوط ارتباطی اتفاق می افتد، نشان داده می شود. با توجه به اینکه انحراف توان بین خوشه ۱ و خوشه ۲ ابتدا بدون کنترل‌کننده می‌باشد، در این صورت انحراف توان تا مقدار ۱/۸ پریونیت هم می‌رسد که مقدار زیادی است و با حضورکنترل‌کننده اینرسی مجازی ارتقاءیافته مدل[۳۳] مقدار ۰/۸ پریونیت و کنترل‌کننده کننده اینرسی مجازی روش سنتزمیو ، مقدار ۰/۲ پریونیت می‌باشد، همچنین انحراف توان بین خوشه ۲ و خوشه ۳ مقدار حداکثر، مربوط به حالت بدون کنترل‌کننده است که میزان ۱/۲ پریونیت می‌باشد و نسبت به میزان کنترل‌کننده اینرسی ارتقاء یافته با مقدار ۰/۴ پریونیت و کنترل‌کننده پیشنهادی با مقدار ۰/۳ پریونیت مقدار بسیار زیادی است، در نهایت انحراف توان بین خوشه ۱ و خوشه ۳ بیشترین مقدار مربوط به حالت بدون کنترل‌کننده و با مقدار اوج انحراف توان ۱/۴ پریونیت می‌رسد ولی با حضور کنترل‌کننده ارتقایافته ۰/۴پریونیت و کنترل‌کننده پیشنهادی مقدار ۰/۲ پریونیت را

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

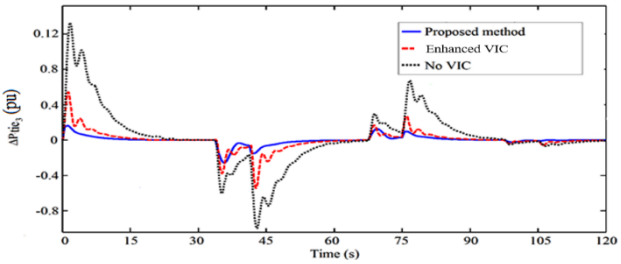
نشان می‌دهد که دامنه نوسانات را به خوبی کنترل می‌کند و سرعت پاسخ گویی بیشتری نسبت به کاهش انحرافات دارد.



شکل (۱۴): انحراف توان خطوط ارتباطی بین خوشه ۱ و خوشه ۲



شکل (۱۵): انحراف توان خطوط ارتباطی بین خوشه ۲ و خوشه ۳

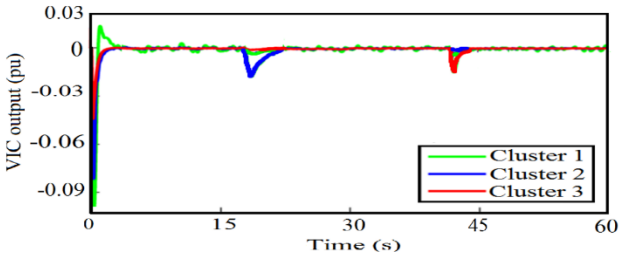


شکل (۱۶): انحراف توان خطوط ارتباطی بین خوشه ۱ و خوشه ۳

جدول(۳) تحلیل عددی روش های مختلف برای سناریو شماره ۲، از نظر زمان نشست، زمان خیز، اضافه جهش و شاخص انتگرال قدرمطلق خطا در زمان(ITAE) را مقایسه می‌کند. از این جدول می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی می‌تواند انحرافات فرکانس را در عرض ۴-۵ ثانیه حذف کرده و دامنه نوسانات را به میزان قابل توجهی کاهش دهد، به این معنی که الزامات کنترل فرکانس ریزشبکه را بهتر برآورده می‌کند. شکل(۱۷) خروجی‌کنترل‌کننده اینرسی مجازی را در هر سه خوشه نشان داده شده‌است.

جدول (۳): تحلیل عددی روش های مختلف برای سناریو شماره ۲

کنترل‌کننده	زمان نشست (s)	زمان خیز (s)	اضافه جهش(%)	ITAE
Proposed method	4.81	1.13	10.33	2.03
Enhanced VIC	9.65	2.06	21.41	4.76



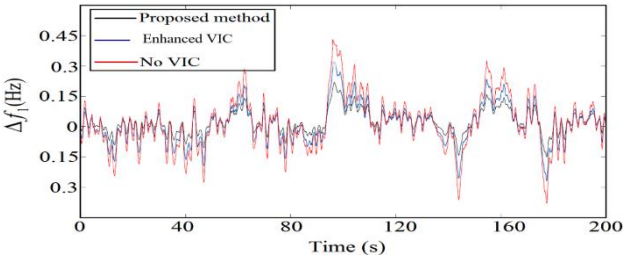
شکل (۱۷): خروجی کنترل‌کننده اینرسی مجازی در سه خوشه

هنگامی که یک پله بار کاهشی در یکی از مناطق رخ می دهد، توان اضافی منجر به انحراف فرکانس مثبت می‌شود یا به عبارت دیگر، فرکانس در خوشه های ریزشبکه افزایش می یابد. برعکس، زمانی که یک پله بار افزایشی در یکی از مناطق رخ می دهد، کمبود توان منجر به انحراف فرکانس منفی در همه خوشه ها می شود یا به عبارت دیگر، فرکانس در خوشه های ریزشبکه کاهش می یابد. در تمام این موارد، کنترل‌کننده باید به سرعت انحراف فرکانس مثبت یا منفی در ریزشبکه را جبران کند. علاوه بر این، کنترل‌کننده باید نوسانات فرکانس را به سرعت خنثی کند و زمان ته نشست فرکانس را کاهش دهد. همان‌طور که در این شکل ها مشاهده می شود، کنترل‌کننده اینرسی مجازی مبتنی بر سنتزمیو پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به ژنراتور سنکرون مجازی ارائه شده در مدل[۳۳] ارائه می دهد، زیرا روش پیشنهادی انحراف فرکانس کمتر، نوسانات فرکانس کمتر و کاهش زمان ته نشست ایجاد می‌کند. انحراف فرکانس در همه خوشه‌ها در محدوده ۰/۱٪ هرتز در حضور روش پیشنهادی است.

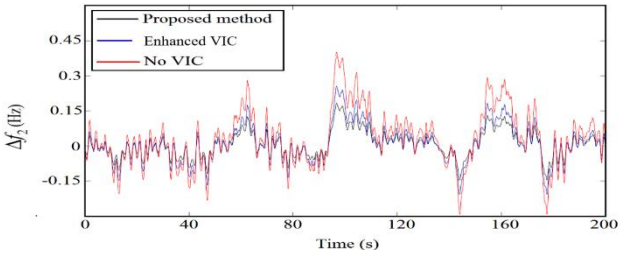
۴-۵- سناریو شماره ۳: نفوذ بالای توان بادی در خوشه‌های ریزشبکه بصورت مجزا

در سناریو شماره ۳ با توجه به سطح بالای نفوذ توان بادی(حدود ۰/۶پریونیت) می‌باشد، در این حالت با توجه به وارد کردن اغتشاشات به خوشه ها به صورت جداگانه، انحراف فرکانس در خوشه ۱ و ۲ و ۳ و عملکرد کنترل‌کننده‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. شکل(۱۸) تا (۲۰) انحراف فرکانس را هر سه خوشه ریزشبکه به صورت مجزا نشان می‌دهد. جدول(۴) می‌دهد که می‌تواند مقایسه دقیقی از، روش های کنترلی بیان کند. همان گونه که مشخص است، کنترل‌کننده اینرسی مجازی روش سنتزمیو ، محدوده انحراف فرکانس خوشه ها را در ۰/۱۵ ± هرتز نگه می دارد. علاوه بر این، هنگامی که از اینرسی مجازی استفاده نمی‌شود، فرکانس ریزشبکه با انحرافات فرکانسی زیاد به مقدار ۰/۴۵ ± به علت کمبود اینرسی نوسان می‌کند.کنترل‌کننده اینرسی مجازی ارتقاء یافته مدل[۳۳] اینرسی کمتری نسبت به کنترل‌کننده اینرسی مجازی پیشنهادی ارائه می‌دهد و انحراف فرکانس آن مقدار ۰/۲۵ ± است. بنابراین، کنترل‌کننده اینرسی مجازی روش سنتزمیو پیشنهادی، بهتر می‌تواند پایداری‌فرکانسی خوشه‌های ریزشبکه اینرسی پایین را حفظ نماید.

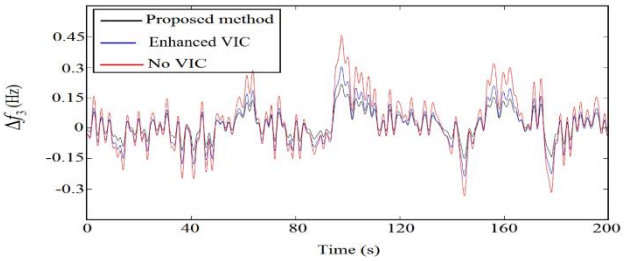
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023



شکل (۱۸): انحراف فرکانس در خوشه ۱



شکل (۱۹): انحراف فرکانس در خوشه ۲



شکل (۲۰): انحراف فرکانس در خوشه ۳

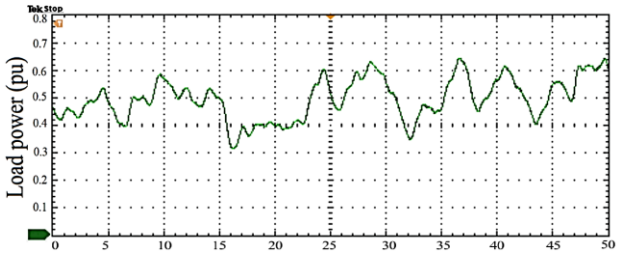
جدول (۴): تحلیل عددی روش های مختلف برای سناریو شماره ۳

کنترل‌کننده	انحراف فرکانس (Hz) خوشه ۱	انحراف فرکانس (Hz) خوشه ۲	انحراف فرکانس (Hz) خوشه ۳
Proposed method	± 0.15	± 0.15	± 0.15
Enhanced VIC	± 0.25	± 0.25	± 0.25
No VIC	± 0.45	± 0.45	± 0.45

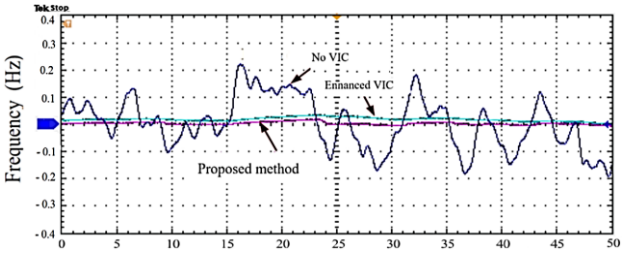
در اینجا، آزمون‌ها و نتایج شبیه سازی و سخت افزاری در حلقه برای تأیید کنترل‌کننده اینرسی مجازی مبتنی بر روش سنتزمیو پیشنهادی استفاده می‌شود. مراحل تست عملی سخت افزار در حلقه که شامل یک شبیه ساز بلادرنگ OP5600 با مراحل زمانی ۲۰ میکروثانیه می‌باشد و همچنین توسط یک کنترل‌کننده پردازندهDSP سری MS320F2812 پیاده‌سازی شده‌است و در MATLAB برنامه‌ریزی شده‌است. آزمایشات تجربی برای نشان دادن عملکرد کنترل‌کننده اینرسی مجازی روش سنتزمیو پیشنهادی استفاده می‌شود.

۴-۶- سناریو شماره ۴: اختلال تغییر بار در یک خوشه ریزشبکه جزیره ای

برای آزمایش تجربی سناریو شماره ۴، نوسان بار به یکی از خوشه‌های ریزشبکه اعمال می‌شود. تقاضای کل توان بار متغیر در شکل(۲۱) نشان داده شده‌است. مقایسه سه نتیجه سخت افرار در حلقه در شکل(۲۲) نشان داده‌شده‌است. روش کنترل اینرسی مجازی ارتقاءیافته مدل[۳۳] در نظر گرفته شده‌است. در این حالت حداکثر انحراف فرکانس حدود ۰/۲۳ هرتز است. برای مورد دوم، بدون کنترل اینرسی با حداکثر انحراف فرکانس حدود ۰/۰۳۷ هرتز را ایجاد می‌کند. در حالت سوم، کنترل‌کننده پیشنهادی حداکثر انحراف فرکانس حدود ۰/۰۱۵ هرتز را ایجاد می‌کند. بنابراین، کنترل‌کننده پیشنهادی دستیابی به فرکانس شبکه نامی را تحت بارهای متغیر تضمین می‌کند.



شکل (۲۱): تغییرات بار تحت آزمون های سخت‌افزار در حلقه



شکل (۲۲): نتایج آزمون سخت افزار در حلقه برای سه حالت کنترل‌کننده

واضح است که وقتی از اینرسی مجازی استفاده نمی‌شود، فرکانس ریزشبکه با انحرافات فرکانس زیاد به دلیل کمبود شدید اینرسی، نوسان می‌کند. اینرسی انحراف فرکانس زمانی که از کنترل‌کننده اینرسی مجازی پیشنهادی استفاده می‌شود بسیار کمتر است، به این معنی که در مقایسه با روش‌های دیگر اینرسی بیشتری ارائه می دهد. بنابراین، کنترل‌کننده اینرسی مجازی کنترل مقاوم روش سنتزمیو پیشنهادی بهتر می‌تواند پایداری فرکانس خوشه‌های ریزشبکه اینرسی پایین را حفظ نماید. در جدول(۵) تحلیل عددی آزمون تجربی برای سناریو شماره۴ نشان داده شده‌است که مقایسه جامع، بین کنترل‌کننده های اینرسی مجازی ارائه می‌دهد. این موضوع روشن است که با توجه به شاخص ITAE، روش پیشنهادی بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد.

جدول (۵): تحلیل عددی آزمون تجربی برای سناریو شماره ۴

کنترل‌کننده	ITAE	نوسانات
Proposed method	2.39	کم
Enhanced VIC	5.98	نسبتا کم
No VIC	33.64	بزرگ

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023

۵-نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی کنترل‌کننده اینرسی مجازی مقاوم روش سنتزمیو در خوشه های ریزشبکه جزیره‌ای جریان متناوب، انجام گرفته است و با توجه به اینکه عوامل مختلفی مانند تغییرات بار، نوسانات سرعت باد، تشعشعات تابش خورشید و سایر اغتشاشات دینامیکی و عدم‌قطعیت‌ها، در شرایط اینرسی پایین و بسیار اندک اینورترها، تاثیر منفی بر عملکرد حلقه کنترل فرکانس بار ثانویه، به خصوص با افزایش نفوذ بالای منابع انرژی تجدید پذیر می‌گذارد و موجب می‌شود سیستم کنترلی دچار عملکرد نامطلوب گردد، در این شرایط استفاده از کنترل اینرسی مجازی موجب بهبود پایداری و افزایش اینرسی ریزشبکه‌ها می‌گردد. کنترل‌کننده اینرسی مجازی روش سنتزمیو با استفاده از یک بهره کنترلی مقاوم نسبت به عدم قطعیت‌های ساختاری، در اغتشاشات و انحرافات فرکانسی، پایداری ریزشبکه ها را بهبود می‌بخشد و باعث افزایش ضریب میرایی از طریق فرمان کنترلی به اینورتر می‌گردد. این کنترل‌کننده پیشنهادی به خوبی و با سرعت بالا می‌تواند، کمبود اینرسی در خوشه‌های ریزشبکه‌ها را جبران نماید. همچنین از روش تکرار عددی D-K، مسئله منیمم‌سازی جهت تنظیم پارامترهای بهینه ضرایب کنترل‌کننده صورت می‌گیرد و اثبات پایداری و عملکرد این روش، براساس مقدار تکین ساختار یافته انجام می‌شود. به منظور برجسته کردن اثربخشی تکنیک کنترل مقاوم روش سنتزمیو برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی، مقایسه ای بین روش پیشنهادی با کنترل‌کننده اینرسی مجازی دیگر نیز انجام شد. در پایان، در خصوص شبیه سازی در حالت‌های مختلف از جمله اغتشاشات تغییرات بار، تغییرات توان تولیدی و تغییرات انحراف فرکانسی و سایر موارد بحث می‌شود، همچنین کنترل‌کننده های پیشنهادی، در یک محیط آزمایشگاهی با ابزارهای مناسب شبیه‌ساز سخت افزاری شبکه قدرت، پیاده سازی و اجرا شده‌است. لازم به ذکر است در این مقاله، هدف بهبود پایداری دینامیکی ریزشبکه در زمان وقوع انواع اغتشاشات می‌باشد که دستیابی به این هدف در نتایج تجربی و شبیه‌سازی به خوبی نشان داده شده‌است.

مراجع

[1] Y. Huang, Y. Wang, C. Li, H. Zhao, Q. Wu, *"Physics Insight of the Inertia of Power Systems and Methods to Provide Inertial Response"*. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 8(2), 559-568, 2022.

[2] M.S. Abid, R. Ahshan, R. AlAbri, A. AlBadi, M. Albadi, *"Multi-objective optimal planning of virtual synchronous generators in microgrids with integrated renewable energy sources"*. IEEE Access, 2023.

[3] R. Asghar, F. Riganti Fulginei, H. Wadood, S. Saeed, *"A Review of Load Frequency Control Schemes Deployed for Wind-Integrated Power Systems"*. Sustainability, 15(10), 8380, 2023.

[4] B. Pournazarian, R. Sangrody, M. Lehtonen, G.B. Gharehpetian, E. Pouresmaeil, *"Simultaneous optimization of virtual synchronous generators parameters and virtual impedances in islanded microgrids"*. IEEE Transactions on Smart Grid, 13(6), 4202-4217, 2022.

[5] T. Kerdphol, M. Watanabe, K. Hongesombut, Y. Mitani, *"Self-adaptive virtual inertia control-based fuzzy logic to improve frequency stability of microgrid with high renewable penetration"*. IEEE Access, 7, 76071-76083, 2020.

[6] O. OborehSnapps, R. Bo, B. She, F.F. Li, H. Cui, *"Improving Virtual Synchronous Generator Control in Microgrids Using Fuzzy Logic Control"*. In 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia) (pp. 433-438). IEEE, 2022.

[7] X. Hou, Y. Sun, X. Zhang, J. Lu, P. Wang, J.M. Guerrero, *"Improvement of frequency regulation in VSG-based AC microgrid via adaptive virtual inertia"*. IEEE Transactions on Power Electronics, 35(2), 1589-1602, 2019.

[8] C. Sun, G. Joos, F. Bouffard, *"Adaptive Coordination for Power and SoC Limiting Control of Energy Storage in an Islanded AC Microgrid With Impact Load,"* in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 35, no. 2, pp. 580-591, 2020.

[9] D. Neupane, N. Poudel, *"Small-signal stability modeling, sensitivity analysis, and parameter optimization of improved virtual synchronous machine based standalone inverter"*. Electric Power Components and Systems, 1-17, 2023.

[10] Y. Li, J. Chen, X. Wang, X. Zhang, X. Zhao, *"Dynamic stability study of grid-connected inverter based on virtual synchronizer under weak grid"*. Energies, 15(19), 7091, 2022.

[11] S. Chen, Y. Sun, H. Han, S. Fu, S. Luo, G. Shi, *"A modified VSG control scheme with virtual resistance to enhance both small-signal stability and transient synchronization stability"*. IEEE Transactions on Power Electronics, 38(5), 6005-6014, 2023.

[12] M. Abuagreb, M.F. Allehyani, B.K. Johnson, *"Overview of virtual synchronous generators: existing projects, challenges, and future trends"*. Electronics, 11(18), 2843, 2022.

[13] X. Hou, Y. Sun, X. Zhang, J. Lu, P. Wang, J.M. Guerrero, *"Improvement of frequency regulation in VSG-based AC microgrid via adaptive virtual inertia"*. IEEE Transactions on Power Electronics, 35(2), 1589-1602, 2020.

[14] Y. Chen, W. Wang, *"A Novel Improved Droop Control for Grid-Supporting Inverter Combined with the Virtual Synchronous Generator Control"*. Journal of Electrical Engineering & Technology, 18(3), 1601-1611, 2023.

[15] D.D. Campoossa, E.A. SanabriaTorres, J.D. VasquezPlaza, O.F. RodriguezMartinez, O.D. GarzonRivera, F. Andrade, *"Novel rotated virtual synchronous generator control for power-sharing in microgrids with complex line impedance"*. Electronics, 12(10), 2156, 2023.

[16] C. Gao, Y. Sun, W. Zheng, W. Wang, *"Transient power equalization control strategy of virtual synchronous generator in isolated island microgrid with heterogeneous power supply"*, PREPRINT (Version 1) available at Research Square, 2023.

[17] M.L. Tenorio, J.Z. Sipion, *"Basic principles for virtual synchronous generator modelling and control"*. International Journal of Engineering Research & Technology. Volume 11, Issue 10, 2022.

[18] C. Zhou, Y. Liao, K. Zhang, X. Xu, J. Liao, *"Virtual inertia based hierarchical control scheme for distributed generations considering communication delay"*. Frontiers in Energy Research, 11, 1135038, 2023.

[19] Y. Zhou, X. Xiong, X. Li, P. Cheng, *"Effects of PLL in the Damping Unit of a Gird-Connected VSG"*. In 2022 IEEE

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC) (pp. 589-593). IEEE, 2022.

[20] M. Ghafouri, U. Karaagac, J. Mahseredjian, I. Kocar, M. Lei, *"Design of a robust and practicable SSI damping controller using H∞ technique for series compensated DFIG-based wind farms"*. Energy Reports, 9, 647-655, 2023.

[21] P. Dahiya, V. Sharma, R. Naresh, *"Optimal sliding mode control for frequency regulation in deregulated power systems with DFIG-based wind turbine and TCSC–SMES"*, Neural Comput Appl 31(7):3039–3056, 2019.

[22] T. Kerdphol, F.S. Rahman, Y. Mitani, M. Watanabe, S. Kufeoglu, *"Robust virtual inertia control of an islanded microgrid considering high penetration of renewable energy"*, IEEE Access 6:625–636, 2018.

[23] T. Kerdphol, F.S. Rahman, M. Watanabe, Y. Mitani, T. Kerdphol, F.S. Rahman, Y. Mitani, *"Synthesis of Robust Virtual Inertia Control"*. Virtual Inertia Synthesis and Control, 203-226, 2021.

[24] Q.L. Lam, D. Riu, A.I. Bratcu, *"Frequency Robust Control Application in Islanded Microgrids Considering Parametric Uncertainties and Distinct Photovoltaic Penetration Rate Scenarios"*. IEEE Access, 2023.

[25] S. Maleki, J., & Tousifian, M.H. Tousifian, *"Robust Frequency Control of Microgrids: A Mixed Virtual Inertia Emulation"*. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2023.

[26] C.I. Ma, X. Jiang, P. Li, J. Liu, *"Offline Computation of the Explicit Robust Model Predictive Control Law Based on Deep Neural Networks"*. Symmetry, 15(3), 676, 2023.

[27] J. Jia, X. Yan, B. Qin, *"Coupling analysis on power-frequency control loops for virtual synchronous generator based on relative gain array and Prony method"*. IET Power Electronics, 2023.

[28] M. Malekpour, A. Kiyoumarsi, M.Gholipour, *"A hybrid adaptive virtual inertia controller for virtual synchronous generators International Transactions on Electrical Energy Systems"*, 31(7), pe12913, 2021.

[29] F. Yao, J. Zhao, X. Li, L. Mao, K. Qu, *"RBF neural network based virtual synchronous generator control with improved frequency stability"*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17(6), 4014-4024, 2020.

[30] H. Bevrani, M.R. Feizi, S. Ataee, *"Robust frequency control in an islanded microgrid: H∞ and μ-synthesis approaches"*, IEEE Transactions on Smart Grid, 7(2), 706-717, 2016.

[31] V. Mihaly, M. Susca, D. Morar, M. Stanese, P. Dobra, *"μ-Synthesis for Fractional-Order Robust Controllers. Mathematics"*, 9(8), 911, 2021.

[32] H. Bevrani, *"Robust power system frequency control"*, Vol. 4. New York: springer, 2014.

[33] M.H. Fini, M.E.H. Golshan, *"Determining optimal virtual inertia and frequency control parameters to preserve the frequency stability in islanded microgrids with high penetration of renewables"*, Electric Power Systems Research, 154, 13-22, 2018.

[34] Z. Rostami, S.N. Ravadanegh, N.T. Kalantari, J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, *"Dynamic modeling of multiple microgrid clusters using regional demand response programs. Energies"*, 13(16), 4050, 2020.

[35] P. Babahajiani, Q. Shafiee, H. Bevrani, *"Intelligent demand response contribution in frequency control of multi-area power systems"*. IEEE Transactions on Smart Grid, 9(2), 1282-1291, 2016.

رزومه



محمد رضا قدسی در اهواز متولد شده‌است (۱۳۶۰). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کاردانی الکتروتکنیک از دانشگاه آزاد اسلامی سما اهواز (۱۳۸۸)، کارشناسی شبکه‌های انتقال و توزیع از دانشگاه علمی کاربردی مجتمع عالی آموز شی و پژوه شی صنعت آب و برق خوز ستان (۱۳۹۱)، کار شنا سی ار شد مهند سی برق قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی بروجرد (۱۳۹۴) و در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی خرم‌آباد (ورودی ۱۳۹۵) مشغول تسویه حساب فارغ التحصیلی است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه کنترل ریزشبکه ها، تولیدات پراکنده، پایداری سیستم‌های قدرت و کنترل ابزاردقیق است و در حال حاضر مدرس(مربی) گروه ابزاردقیق و الکترونیک دانشگاه فنی‌و حرفه‌ای چمران اهواز (ورودی ۱۳۹۵) می‌باشد و اکنون با سمت کارشناس مهندسی و نظارت تجهیزات فشار قوی و ضعیف در گروه مهندسی الکتریک و ابزاردقیق شرکت مدیریت تولید برق اهواز-نیروگاه رامین (استخدام ۱۳۸۲) شاغل است.



علی ر ضا توکلی در اهواز متولد شده‌ا ست (۱۳۶۳). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دان شگاه تهران جنوب (۱۳۸۵)، کار شنا سی ار شد مهند سی برق- قدرت از دان شگاه ازاد دزفول (۱۳۸۸) و دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه شیراز (۱۳۹۵) سپری کرده است. فعالیتهای پژوهشی و علاقهمندی ایشان در زمینه دینامیک سیستمهای قدرت مدرن (شامل ادواتFACTS و خطوط HVDC) و مدلسازی سیستمهای قدرت و کنترل ماشین است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز میباشد.



امین سامان فر در خرم‌آ باد متو لد شده‌است (۱۳۵۷). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه سمنان (۱۳۸۰)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق-قدرت از دان شگاه تربیت مدرس (۱۳۸۳) و دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه لرستان (۱۳۹۷) سپری کرده

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

اســت. فعالیت‌های پژوهشــی و علاقه‌مندی ایشــان در زمینه دینامیک سیستم‌های‌قدرت مدرن (شامل ادوات FACTS و خطوط HVDC) و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در مواجهه با حوادث طبیعی و غیر طبیعی ا ست و در حال حا ضر ا ستادیار گروه برق دا شگاه آزاد ا سلامی واحد خرم‌آباد می‌باشد.

زیرنویس‌ها

[1] Proposed method
[2] Enhanced VIC
[3] No VIC

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Improving the stability of microgrids clusters using virtual inertial control by the Mu-synthesis method

Mohammad Reza Ghodsi[1], Alireza Tavakoli*[2], Amin Samanfar[3]

1- Department of Electrical Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran, m.ghodsi95@khoiau.ac.ir
*2- Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, aa.tavakoli@iau.ac.ir
3- Department of Electrical Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran, a.samanfar@khoiau.ac.ir

Abstract: To deal with the challenge of the level of penetration of renewable energy sources against uncertainties and in order to develop the secondary load frequency control loop, with the aim of reducing the impact of disturbances and adjusting the resistant gain coefficient to uncertainties, using a virtual inertial controller based on the resistant control of the Mu-synthesis method. For the lack of inertia in the islanded microgrid clusters, alternating current has been done. The stability and performance of this method is proved based on the structured singular value. The experimental results of the hardware in the loop by the TMS320F2812 digital signal processor and the simulation in the MATLAB/SIMULINK software environment confirm the performance of the proposed controller for the development of traditional load frequency control in comparison with the enhanced virtual inertial control and inertialess mode, under various disturbances, that the application of the controller The virtual inertia based on Mu-synthesis improves the stability of islanded microgrid clusters and damping of power fluctuations, and also reduces frequency deviations to a significant extent.

Keywords: Microgrid Clusters, Mu-Synthesis Method, Stability Improvement, Virtual Synchronous Generator, Virtual Inertial Control.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 3-Autumn2023