

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

محمد رضا قدسی<sup>۱</sup>، علیرضا توکلی\*<sup>۲</sup>، امین سامان فر<sup>۳</sup>

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

پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۲۰

دریافت: ۱۴۰۲/۶/۳۰

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

**واژه‌های کلیدی:** بهبود پایداری، خوشه‌های ریزشکه، روش سنتزمیو، ژنراتور سنکرون مجازی، کنترل اینرسی مجازی.

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تحقیقاتی برای بررسی مفهوم کنترل اینرسی مجازی برای مقابله با تأثیرات منفی منابع انرژی تجدیدپذیر در پایداری سیستم‌های قدرت انجام شده است. مطالعات متعدد، ویژگی‌های مختلف کنترل کننده ژنراتور سنکرون مجازی را بررسی کرده است. معادله چرخش ژنراتور یک جز اساسی در طرح کنترل یک ژنراتور سنکرون مجازی است. در این راستا، تلاش‌های 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 شده است. 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 روش‌های کنترلی جداگانه برای توان اکتیو و راکتیو به کار رفته اند [۶]. در [۷]، یک استراتژی کنترل ژنراتور سنکرون مجازی با اینرسی تطبیقی پیشنهاد شده است. اگر انحراف فرکانس بیشتر از مقدار تعیین شده باشد،

ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه برق متداول، یک سیستم قدرت با میرایی یا اینرسی کم ایجاد کرده است، 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 اینورتر که قسمت چرخشی ندارند، سیستم را در برابر اغتشاشات آسیب پذیر می‌کنند [۱]. یکی از راه‌های مؤثر برای غلبه بر این چالش می‌تواند، استفاده از اینرسی مجازی باشد که معمولاً توسط کنترل کننده ژنراتور سنکرون مجازی (VSG) انجام می‌شود [۲]. از سویی دیگر وظیفه اصلی کنترل کننده فرکانس بار، حذف انحراف فرکانس و در نتیجه تنظیم فرکانس سیستم به دنبال اغتشاشات و تغییرات غیرمنتظره است [۳].

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 کنترل کننده اینرسی مجازی با استفاده از روش  $\infty H$  برای بهبود پایداری فرکانسی یک ریزشبهک پیشنهاد شده است. در [۲۱، ۲۲]، توربین های بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوسو تغذیه به عنوان یک ژنراتور سنکرون مجازی برای بهبود پاسخ های دینامیکی سیستم استفاده می شود. در [۲۳] یک کنترل کننده اینرسی مجازی سازگار برای افزایش پایداری فرکانسی پیشنهاد شده است. برای بهبود پایداری فرکانسی ریزشبهک ها، عملکرد غیر مقاوم را می توان مهم ترین مشکل این روش ها دانست. محققان مختلفی نیز در خصوص کنترل کننده های مقاوم جهت پایداری ریزشبهک ها مقالاتی ارائه کردند [۲۴، ۲۵، ۲۶]. موضوع نفوذ منابع انرژی تجدید پذیر و عدم قطعیت ها چالشی دیگر می باشد [۲۷].

بیشتر تحقیقات منتشر شده در مورد مطالعه عملکرد کنترل اینرسی مجازی در یک ریزشبهک در مقیاس کوچک گزارش شده است و هیچ گزارشی با تمرکز بر کنترل اینرسی مجازی برای یک ریزشبهک در مقیاس بزرگ که شامل تعدادی خوشه است، وجود ندارد. در حالی که یک ریزشبهک 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 کنترل کننده مجازی به درستی کار نکند و نیاز به طراحی مجدد داشته باشد. برای تنظیم مقاوم و بهینه پارامترهای کنترل کننده اینرسی مجازی، از کنترل مقاوم روش سنتز میو استفاده می شود. بنابراین، عدم قطعیت های موجود در ریزشبهک را می توان به راحتی با روش پیشنهادی برطرف کرد. در ساختار کنترل کننده اینرسی مجازی پیشنهادی، هر دو ویژگی پاسخ اینرسی ژنراتور سنکرون مرسوم و دینامیکی سریع مبدل های الکترونیک قدرت وجود دارد که این امر منجر به انعطاف پذیری زیاد در طراحی ها می شود.

بقیه این مقاله به شرح زیر تنظیم شده است. بخش ۲ تئوری طرح پیشنهادی را به صورت خلاصه بیان می شود. بخش ۳ افزایش اینرسی در خوشه های ریزشبهک جزیره ای توسط کنترل مقاوم روش سنتز میو را مورد بحث قرار می دهد. بخش ۴ سیستم آزمون و نتایج شبیه سازی و بخش ۵ نتیجه گیری را ارائه می دهد.

## ۲- تئوری طرح پیشنهادی

### ۲-۱- ژنراتور سنکرون مجازی پایه

ژنراتور سنکرون مجازی پایه (VSG پایه) رفتار دینامیکی ژنراتورهای سنکرون را تقلید می کند 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.

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

در نتیجه، از آنجا که مبدل سنکرون محدودیت های فیزیکی یک ژنراتور سنکرون واقعی را ندارد، پارامترهای تعبیه شده آن را می توان به صورت آزاد و بصورت برخط تنظیم کرد [۹، ۱۰]. اگرچه همگام کننده به پشتیبانی از اینرسی در شرایط ضعیف شبکه کمک می کند، 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 می کنند [۱۱]. اگر سرعت پاسخ حلقه توان اکتیو قابل تنظیم نباشد، به دنبال خطای یک فاز به زمین در شبکه، همگام کننده نمی تواند 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 شده است. تعدادی از روش ها برای کنترل افتی فرکانس پیشنهاد شده است [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 می شود. کنترل افتی به طور گسترده در کنترل ریزشبهک ها، استفاده می شود. با استفاده از کنترل افتی P-F (فرکانس - توان اکتیو) و کنترل افتی Q-V (ولتاژ - توان راکتیو) پخش توان بین منابع تولید پراکنده انجام می شود [۱۴]. کنترل افتی معمولی قادر به افزایش اینرسی ریزشبهک ها نیست، در نتیجه ریزشبهک های مبتنی بر کنترل افتی معمولاً دارای اینرسی کم هستند و به خطا حساس می باشند. ماهیت نوسانی ژنراتور سنکرون مجازی همچنین باعث ایجاد نوسانات در هنگام پخش توان نامناسب توان اکتیو گذرا می شود [۱۵]. مشکل اصلی کنترل افتی پخش توان نادرست است که منجر به نابرابری ولتاژ خروجی تولید پراکنده ها ناشی از افت ولتاژ خط نامتقارن می شود. 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 پراکنده ها، حذف شود [۱۶]. با این وجود، اگر پخش توان اکتیو براساس نسبت درجه بندی توان نباشد، این راه حل قادر به دستیابی دقیق به پخش توان راکتیو نخواهد بود. روشی مبتنی بر جبران افت ولتاژ خط ارائه می شود. همچنین، روش های دیگری مانند کنترل افتی ولتاژ تطبیقی [۱۷] پیشنهاد شده است. با این حال، این روش ها نمی توانند خطاهای پخش توان راکتیو را به طور کامل از بین ببرند، همان طور که در نتایج آزمایش نشان داده شده است. چندین روش برای بهبود پخش توان راکتیو از ارتباطات استفاده کرده اند [۱۸]. اشکال اصلی این روش تاخیر در زمان

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

$$P = \frac{3U_g U}{X_g} \quad (2)$$

$$Q = \frac{3U(U_g - U)}{X_g} \quad (3)$$

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.

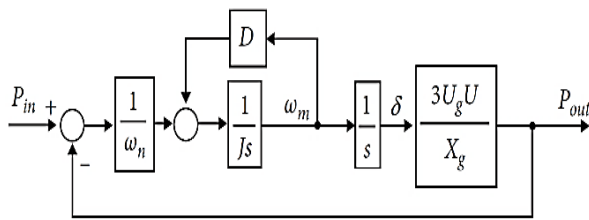
$$G(s) = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\frac{3U_g U}{\omega_m X_g J}}{s^2 + \frac{D}{J}s + \frac{3U_g U}{\omega_m X_g J}} \quad (4)$$

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

$$\omega = \sqrt{\frac{3U_g U}{\omega_m X_g J}} \quad (5)$$

$$\zeta = D \sqrt{\frac{\omega_m X_g}{12U_g UJ}} \quad (6)$$

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



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

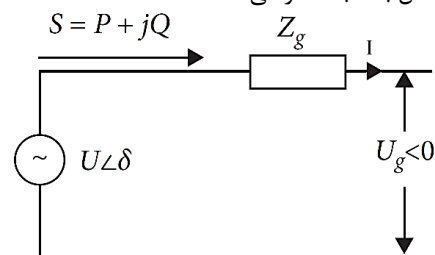
### ۳- افزایش اینرسی در خوشه‌های ریزشبکه جزیره‌ای توسط کنترل مقاوم روش سنتزمیو

یک کنترل کننده اینرسی مجازی (VIC) برای افزایش پایداری فرکانسی در خوشه‌های ریزشبکه جزیره‌ای جریان متناوب ارائه می شود. هدف از کنترل کننده پیشنهادی، بهبود ویژگی های میرایی ریزشبکه مورد مطالعه می باشد. مقادیر بهینه و مقاوم پارامترهای کنترل کننده اینرسی مجازی با استفاده از یک تکنیک کنترل مقاوم روش سنتزمیو ( $\mu$ ) تنظیم می شود.

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 می دارد و در طی دوره های گذرا، انرژی جنبشی روتور جهت تعادل توان تولیدی و مصرفی، به شبکه تزریق می شود. تولید توان مبتنی بر اینورتر به طور ذاتی فاقد اینرسی است، زیرا شکل موج به طور مصنوعی از طریق مبدل های الکترونیک قدرت ایجاد می شود. در ادامه مدل سازی 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 می توان به صورت معادله (۱) نوشت.

$$P_{in} - P_{out} = J \omega_m \frac{d\omega_m}{dt} + D(\omega_m - \omega_n) \quad (1)$$

توان ورودی ( $P_{in}$ )، توان خروجی ( $P_{out}$ ) و سرعت زاویه ای نامی ( $\omega_n$ ) می باشد. اینورتر به عنوان یک ژنراتور سنکرون مرسوم رفتار می کند. سرعت زاویه ای روتور مجازی ( $\omega_m$ ) در بلوک کنترل VSG از معادله نوسان، محاسبه می شود. سپس زاویه فاز مکانیکی مجازی ( $\theta$ ) با انتگرال گیری از  $\omega_m$  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 نمی باشند، در صورتی که این ضرایب در ژنراتور سنکرون مجازی، قابل تغییر هستند. از این رو، ضرایب میرایی و اینرسی را می توان، برای دستیابی به پاسخ سریع تر و پایداری مورد استفاده قرار داد. ضریب میرایی و اینرسی یک ژنراتور سنکرون مرسوم قابل تغییر نمی باشند، در صورتی که این ضرایب در ژنراتور سنکرون مجازی قابل تغییر هستند. از این رو، ضرایب میرایی و اینرسی را می توان برای دستیابی به پاسخ سریع تر و پایداری مورد استفاده قرار داد. ضریب میرایی (D) بر اساس الزامات بهره برداری شبکه طراحی و ثابت می باشد. 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 می کند [۲۸].

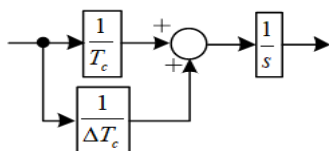


شکل (۱): ژنراتور سنکرون مجازی متصل به شبکه [۲۸]

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 می شود، لذا فرض بر این است که امپدانس خط، القایی است (به عنوان مثال  $X_g / R_g \gg$ )

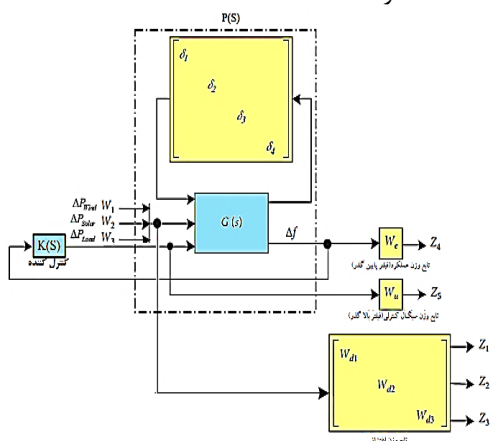
### ۳-۲- مدل سازی عدم قطعیت ها

عدم قطعیت به اختلاف میان پاسخ سیستم نامی، با پاسخ سیستم واقعی اشاره دارد. به طور کلی، عدم قطعیت‌ها به مدل ساختاریافته و مدل بدون ساختار طبقه‌بندی می‌شوند عدم قطعیت‌های دینامیکی ( $\Delta_i$ ) از نوع بدون ساختار می‌باشند که بر روی دینامیک غیرخطی سیستم تاثیر می‌گذارند و شامل بخش‌های ضربی و جمع‌پذیر هستند. عدم قطعیت‌های پارامتری ( $\Delta_i$ ) 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 سنتزیمو، یک بلوک اغتشاشی  $\Delta$  (دلتا) که به عنوان عدم قطعیت بدون ساختار شناخته می‌شود و به عنوان یک اغتشاش دینامیکی جمع پذیر با سیستم در نظر گرفته می‌شود [۳۰]. عدم قطعیت ساختاریافته شامل اغتشاش‌های پارامتری نیز به مدل مورد مطالعه اعمال می‌شود. دینامیک سیستم را می‌توان برای خارج کردن بلوک عدم قطعیت پارامترهای نامعین با استفاده از مدل LFT بالایی نشان داده شده در شکل ۳-۲۲ استفاده کرد [۳۱].



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

در این مقاله، برای ساده سازی تنها چهار پارامتر  $T_g$ ،  $T_i$ ،  $T_{FC}$  در  $T_{WTG}$  در معرض عدم قطعیت  $\pm 25\%$  در ناحیه مقادیر نامی خود فرض می‌شوند. شکل (۵) عدم قطعیت بلوک  $\Delta$  حلقه را برای این چهار بلوک از سیستم ریزشبه نشان می‌دهد که  $T_c$  ثابت زمانی این بلوک‌ها و  $\Delta T_c$  عدم قطعیت آن است. به عنوان خروجی سیستم اندازه گیری انتخاب می‌شود، و  $\Delta P_{wind}$ ،  $\Delta P_{pv}$  و  $\Delta P_L$  به عنوان سیگنال‌های اغتشاش شمارش می‌شوند. دینامیک سیستم را می‌توان، برای استخراج نمودار جعبه‌ای سیستم حلقه بسته با عدم قطعیت نشان داده شده در شکل (۵) استفاده کرد.



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

طراحی کنترل اینرسی مجازی بر روی اینورتر سیستم فتولتائیک در خوشه‌های ۱ و ۳ و پیل سوختی در خوشه ۲ و همچنین طراحی کنترل کننده فرکانس بار حلقه ثانویه ( $\Delta P_{SL}$ ) نیز بر روی سیستم دیزل ژنراتور انجام می‌شود. عدم قطعیت پارامتری خوشه‌های ریزشبه 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 (کنترل کننده مقاوم روش سنتزیمو) بهره گرفته شده‌است. بخش‌های طراحی کنترل کننده در زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.

### ۳-۱ کنترل کننده اینرسی مجازی

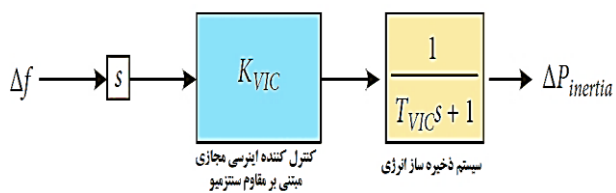
در کنترل اینرسی مجازی، توان منابع تولید پراکنده های مبتنی بر اینورتر توسط، مشتق فرکانس شبکه کنترل می‌شود. بنابراین، فقدان اینرسی اضافی را می‌توان به عنوان یک استراتژی، برای تثبیت چنین سیستم قدرتی در نظر گرفت. معادله (۷) مقدار توان تقلیدشده ( $P_{emu}$ ) را برای جبران کمبود اینرسی نشان می‌دهد:

$$P_{emu} = K_{PE} f_o \frac{d(\Delta f_i)}{dt} \quad (7)$$

توان الکترونیکی ( $K_{PE}$ )، انحراف فرکانس ( $\Delta f_i$ ) و همچنین فرکانس سیستم ( $f_o$ ) 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 می‌شود. کنترل اینرسی مجازی را می‌توان با توجه به مفهوم کنترل مشتق به صورت زیر طراحی کرد:

$$\Delta P_{inertia} = \frac{K_{EVIC}}{1 + sT_{EVIC}} \frac{d(\Delta f_i)}{dt} \quad (8)$$

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



شکل (۳): نمودار بلوک کنترل کننده اینرسی مجازی

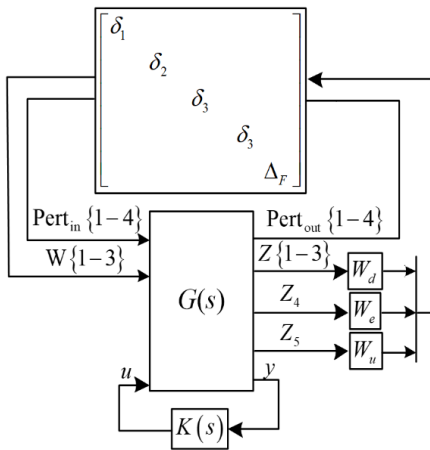
جایی که  $\Delta_p$  و  $\Delta$  به ترتیب نشان دهنده الزامات عملکرد و عدم قطعیت هستند. عملکرد مقاوم تضمین می شود، اگر و فقط اگر:

$$\max_{\omega} \mu_{\Delta_p}(M(s)) \quad (12)$$

روش تحلیلی استاندارد قادر به محاسبه کنترل کننده میوه بهینه ارائه شده در معادله (۱۲) نیست. بنابراین، معادله (۱۲) را می توان با روش عددی به نام تکرار D-K حل کرد [۳۲]. این روش کنترل کننده K را با به حداقل رساندن معادله زیر تعیین می کند :

$$\min_K \left( \min_{D(j\omega)} \|D(j\omega)M(K(j\omega))D^{-1}(j\omega)\|_{\infty} \right) \quad (13)$$

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 کنترل کننده مقاوم سنتز میوه، 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 کنترل کننده مقاوم روش سنتز میوه، از آرایش تبدیل کسری خطی بالایی (LFT) برای اجرای روش تکرار D-K استفاده می شود. در این شکل  $W_d(3)$ ،  $W_d(2)$ ،  $W_d(1)$ ،  $W_u$ ،  $W_e$ ،  $W_3$ ،  $W_2$ ،  $W_1$  توابع وزن دهی برای بهبود عملکرد مقاوم و پایداری مقاوم هستند. ورودی-های اختلال هستند.  $u$  نشان دهنده سیگنال کنترلی است.  $Z_{1-5}$  سیگنال‌های عملکرد مطلوب هستند.  $y$  خروجی اندازه‌گیری شده است. در اینجا توابع وزن دهی به صورت زیر انتخاب می شوند:

$$W_e = \frac{0.005s^3 + 0.05s^2 + 50s + 125}{s^3 + 100s^2 + 300s + 1} \quad (14)$$

$$W_u = \frac{5s + 50}{s^2 + 3000s + 2 \times 10^4} \quad (15)$$

$$W_d = 0.01I_{3 \times 3} \quad (16)$$

بنابراین، از یک پیکربندی استاندارد تبدیل کسری خطی بالا می توان برای تنظیم مجدد کل سیستم استفاده کرد. نمودار بلوک حلقه بسته ریزشبهه همراه با عدم قطعیت مورب ساختاریافته رسم شده است. در اینجا، عدم قطعیت قطری  $4 \times 4$  پارامتری انتخاب شده است. تمام بلوک نامعینی ساختاریافته  $\Delta$ ، را می توان به فرم کلی معادله (۹) نشان داد، که شامل عدم قطعیت‌های پارامتری ( $\delta_i$ ) و عدم قطعیت‌های دینامیکی ( $\Delta_j$ ) است که می تواند از دینامیک سیستم استخراج شود.

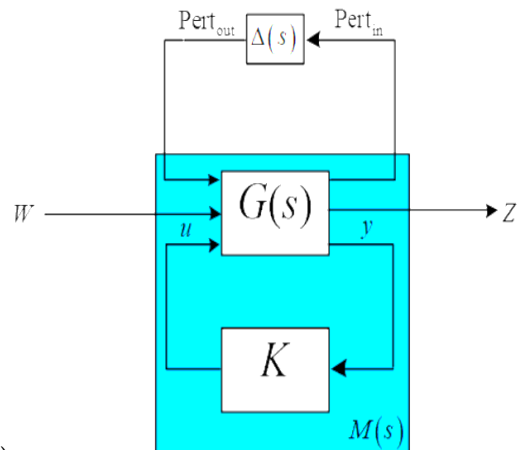
$$\Delta = \left\{ \begin{array}{l} \text{diag} [\delta_1 I_{r_1}, \dots, \delta_k I_{r_k}, \dots, \Delta_1, \dots, \Delta_f], \\ \delta_i \in C, \Delta_j \in C^{k_j \times k_j} \end{array} \right\} \quad (9)$$

### 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 میوه) استفاده می شود. برای تعریف تابع سنتز میوه از معادله زیر استفاده می شود:

$$\mu_{\Delta}(M) = \frac{1}{\min \{ \bar{\sigma}(\Delta) : |I - M\Delta| = 0, \Delta \in \Delta \}} \quad (10)$$

کل سیستم را می توان در یک پیکربندی استاندارد، که به پیکربندی  $\Delta$ - $M$ - $K$  معروف است، تنظیم کرد که در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شکل، ورودی های اختلال،  $u$  سیگنال های کنترلی،  $Z$  سیگنال های عملکرد،  $y$  خروجی های اندازه گیری شده است،  $Pert_{in}$  و  $Pert_{out}$  سیگنال های آشفتگی ورودی و خروجی بلوک نامعلوم هستند.



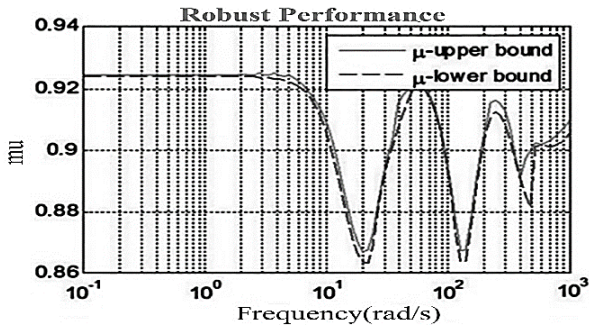
(۶):

شماتیک پیکربندی استاندارد  $\Delta$ - $M$ - $K$

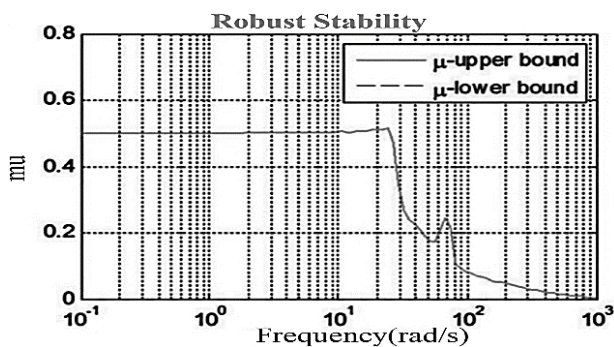
برای برآوردن شرایط عملکرد مقاوم در سنتز  $\mu$ ،  $\|Twz\|_{\infty} \leq 1$  باید برای همه  $\Delta \in \Delta_p$ ، که  $\Delta_p$  توسط رابطه (۱۷) تعریف می شود:

$$\Delta_p := \left\{ \begin{bmatrix} \Delta & 0 \\ 0 & \Delta_F \end{bmatrix} : \Delta \in R^{4 \times 4}, \Delta_F \in C^{4 \times 5} \right\} \quad (11)$$

طراحی کنترل‌کننده روش سنتز میو، 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 شبیه‌سازی در ریزشبه 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 سنتز میو<sup>۱</sup> برای کنترل فرکانس بار در خوشه‌های ریزشبه جزیره‌ای در مقیاس بزرگ آزمایش شده و در مقایسه با کنترل اینرسی مجازی ارتقاء یافته<sup>۲</sup> مدل [۳۳] و حالت بدون اینرسی<sup>۳</sup>، مورد بررسی قرار می‌گیرد و اثر بخشی آن نشان داده می‌شود. هدف از این بخش غلبه بر عملکرد نامطلوب کنترل فرکانس بار، در خوشه‌های ریزشبه جزیره‌ای و بهبود کارایی مقاوم در برابر عدم قطعیت‌ها و کاهش انحراف فرکانس می‌باشد.

#### ۴-۱- مشخصات ریزشبه و کنترل‌کننده پیشنهادی

شبیه‌سازی در ریزشبه 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.

در معادله بالا I ماتریس یک یا ماتریس همانی می‌باشد. حاشیه پایداری مناسب حلقه بسته، از توابع وزنی ( $W_e$   $W_u$ ) برای نرمالیزه کردن سیگنال کنترل و عملکرد استفاده می‌شود.

#### ۳-۵- ارزیابی پایداری مقاوم و عملکرد مقاوم

اثبات پایداری و عملکرد مقاوم کنترل‌کننده طراحی شده در سیستم، براساس مقدار تکین ساختار یافته یا سنتز میو ( $\mu$ ) 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 بطور مجانبی پایدار است، هم عملکرد مقاوم و هم پایداری مقاوم برای هر سیستمی با هرگونه عدم قطعیت برآورده می‌شود. با در نظر گرفتن پیکربندی  $M-\Delta$ ، شرط پایداری مقاوم نوشته می‌شود:

$$\Delta^* = \{ \Delta(s_0) \in \Delta^*, s_0 \in \mathcal{C}, \text{Re}(s_0) \geq 0 \} \quad (17)$$

$$M \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (18)$$

جایی که  $F_L(G, K)$  تابع انتقال سیستم حلقه بسته است. برای

$$\Delta \in \Delta^* \text{ و } \|\Delta\|_\infty \leq 1 \text{، سیستم حلقه بسته زمانی پایدار است که}$$

$$\sup \mu_\Delta(M_{11}) \leq 1 \quad (19)$$

برای عملکرد مقاوم، با در نظر گرفتن پیکربندی  $M-\Delta$ ، می‌توانیم

بنویسیم:

$$\Delta_T = \left\{ \begin{bmatrix} \Delta_u & 0 \\ 0 & \Delta_p \end{bmatrix}, \Delta_u \in \Delta^*, \Delta_p \in \mathcal{C} \right\} \quad (20)$$

$\Delta_p$  و  $\Delta_u$  به ترتیب الزامات عملکرد و عدم قطعیت هستند. برای

$$\Delta \in \Delta_T \text{ و } \|\Delta\|_\infty \leq 1 \text{، عملکرد مقاوم سیستم حلقه بسته تضمین می-}$$

شود اگر و فقط اگر

$$\sup \mu_\Delta(M) \leq 1 \quad (21)$$

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 می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، 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

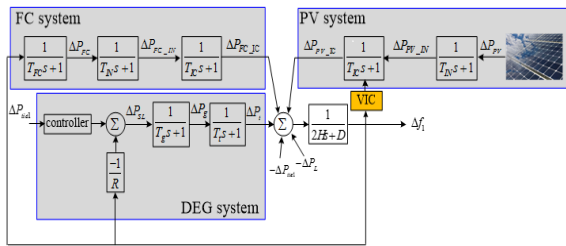
باعث می‌شود که حلقه کنترل فرکانس ثانویه در همه شرایط با موفقیت عمل نکند. برای مقابله با این مشکل، کنترل‌کننده پیشنهادی طراحی شده توسط روش سنتز میو بر روی اینورتر سلول فتولتاییک در خوشه‌های ۱ و ۳ و پیل سوختی در خوشه ۲ اعمال می‌شود. مدل دینامیکی خوشه‌های ریز شبکه در شکل (۱۰) بخش (الف-ج) نشان داده شده است که یک کنترل‌کننده انتگرالی-مشتق‌گیر-تناسبی در حلقه کنترل فرکانس ثانویه، استفاده می‌شود.

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

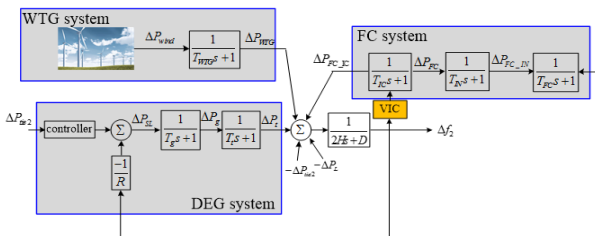
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$D$ (pu/Hz)	0.012	$T_{DEG}$ (s)	2
$H$ (pu/s)	0.1	$T_{WTG}$ (s)	1.5
$T_{FC}$ (s)	4	$T_{IN}$ (s)	0.08
$T_{FESS}$ (s)	0.1	$T_{IC}$ (s)	0.004
$T_t$	0.4	$T_g$	0.08
$T_{conv}$	0.1	$P_{FESS}$	4
$J_{FESS}$	2		

## ۴-۲- مدل‌سازی خوشه‌های ریز شبکه چندگانه

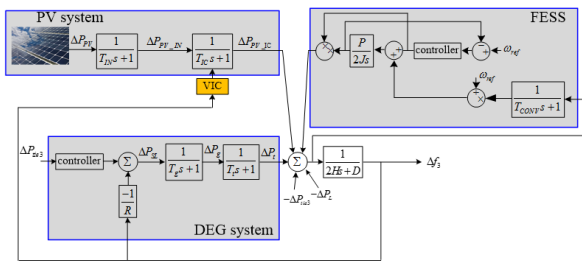
تعداد سه خوشه در ریز شبکه، توسط یک خط ارتباطی به یکدیگر متصل می‌باشند. توان تبادل شده بین دو ریز شبکه، به تفاوت در انحرافات فرکانس آن ریز شبکه‌ها و ضریب گشتاور همگام‌سازی خط ارتباطی بستگی دارد. خوشه‌های هر ریز شبکه، توسط دو خط ارتباطی به یکدیگر متصل هستند و مجموع توان خط ارتباطی دو خوشه، توان تبدیلی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



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۰): مدل دینامیکی خوشه‌های ریز شبکه (الف) خوشه ۱، (ب) خوشه ۲، (ج) خوشه ۳

توان تبادل شده در هر خوشه  $(\Delta P_{tie})$  به صورت معادله (۲۲) تا

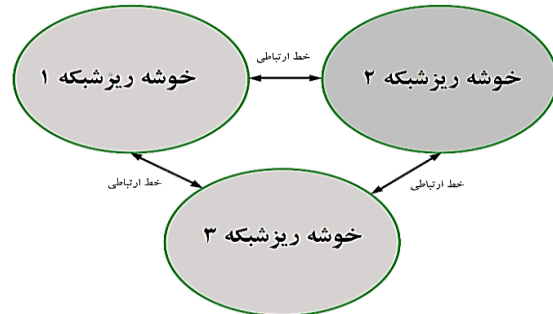
(۲۴) محاسبه می‌شود:

$$\Delta P_{tie1} = \frac{2\pi T_{12}}{s} (\Delta f_1 - \Delta f_2) + \frac{2\pi T_{13}}{s} (\Delta f_1 - \Delta f_3) \quad (22)$$

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

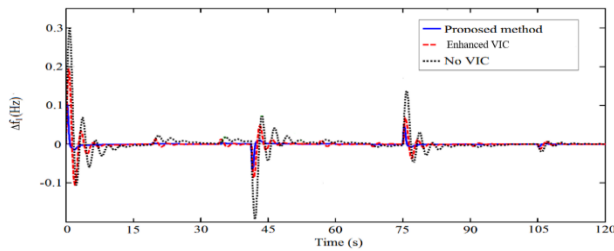
$$\Delta P_{tie3} = \frac{2\pi T_{31}}{s} (\Delta f_3 - \Delta f_1) + \frac{2\pi T_{32}}{s} (\Delta f_3 - \Delta f_2) \quad (24)$$

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

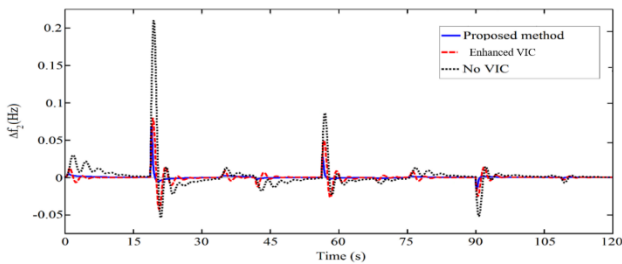


شکل (۹): خوشه‌های ریز شبکه به هم پیوسته توسط خطوط ارتباطی

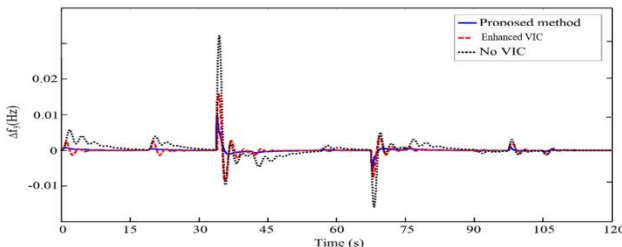
در شکل (۹) مدل دینامیکی خوشه‌های ریز شبکه جزیره‌ای [۳۴] و پارامترهای سیستم مورد مطالعه طرح کنترلی جدول (۱) [۳۰] و همچنین مراحل مدل‌سازی خطوط ارتباطی [۳۵] نشان داده شده است. تغییرات توان ورودی بار در ریز شبکه، با در نظر گرفتن انحراف از مقدار اولیه، ارزیابی می‌شود [۲۲]. به دلیل وابستگی توان تولید شده توسط توربین بادی و فتولتاییک‌ها به شرایط محیطی، آن‌ها هیچ نقشی در کنترل فرکانس ندارند. بنابراین، کنترل حلقه ثانویه  $(\Delta P_{SL})$  به دیزل ژنراتور اعمال می‌شود. از یک طرف، نوسانات فتولتاییک، توربین بادی و بار و عدم قطعیت در ریز شبکه و از طرفی دیگر، اینرسی کم اینورترها



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 شده است. 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 کنترل کننده می باشد، در این صورت انحراف توان تا مقدار  $1/8$  پریونیت هم می رسد که مقدار زیادی است و با حضور کنترل کننده اینرسی مجازی ارتقاء یافته مدل [۳۳] مقدار  $0/8$  پریونیت و کنترل کننده اینرسی مجازی روش سنتز میو، مقدار  $0/2$  پریونیت می باشد، همچنین انحراف توان بین خوشه ۲ و خوشه ۳ مقدار حداکثر، مربوط به حالت بدون کنترل کننده است که میزان  $1/2$  پریونیت می باشد و نسبت به میزان کنترل کننده اینرسی ارتقاء یافته با مقدار  $0/4$  پریونیت و کنترل کننده پیشنهادی با مقدار  $0/3$  پریونیت مقدار بسیار زیادی است، در نهایت انحراف توان بین خوشه ۱ و خوشه ۳ بیشترین مقدار مربوط به حالت بدون کنترل کننده و با مقدار اوج انحراف توان  $1/4$  پریونیت می رسد ولی با حضور کنترل کننده ارتقاء یافته  $0/4$  پریونیت و کنترل کننده پیشنهادی مقدار  $0/2$  پریونیت را

چالش های پیش رو، به عنوان سناریوهای مختلف در شبیه سازی ها لحاظ شده است. سپس پاسخ فرکانسی و توان اکتیو با حضور کنترل کننده پیشنهادی بررسی شده و تعدادی از سناریوها با تحلیل عددی آنالیز می شود که در جدول (۲) شرح سناریوها نشان داده شده است.

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

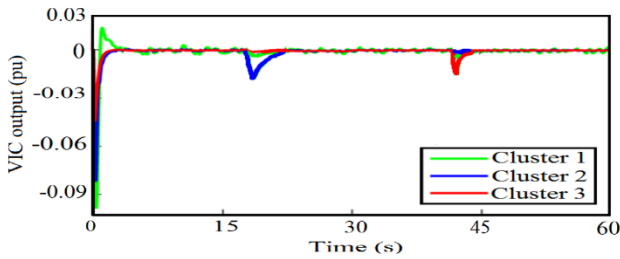
##### پراکنده در خوشه های ریزشبکه جداگانه

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 کنترل کننده مجازی به درستی کار نکند و نیاز به طراحی مجدد داشته باشد. انحراف فرکانس در خوشه ۱ تا ۳ در شکل های (۱۱) تا (۱۳) نشان داده شده است.

در سناریو شماره 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  $0/3$  هرتز می باشد، در مقایسه با حضور کنترل اینرسی مجازی ارتقاء یافته مدل [۳۳] مقدار  $0/2$  هرتز و کنترل کننده اینرسی مجازی روش سنتز میو مقدار  $0/1$  هرتز است مقدار زیادی می باشد. در خوشه ۲، میزان انحراف فرکانس در حالت بدون کنترل کننده  $0/2$  هرتز و در حالت های با کنترل کننده ارتقاء یافته  $0/1$  هرتز و کنترل کننده پیشنهادی مقدار  $0/05$  هرتز می باشد. در نهایت انحراف فرکانس در خوشه ۳، بدون کنترل کننده  $0/03$  هرتز ولی به همراه کنترل کننده اینرسی ارتقا یافته  $0/018$  و کنترل کننده پیشنهادی  $0/01$  هرتز می باشد.

نتایج حاکی از عملکرد مناسب و عالی کنترل کننده پیشنهادی در برابر توانایی کاهش انحراف فرکانس، در برابر اغتشاشات را دارد و همچنین نسبت به عدم قطعیت ها مقاوم می باشد.





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

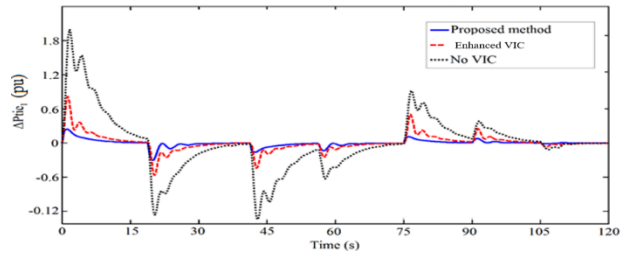
هنگامی که یک پله بار کاهشی در یکی از مناطق رخ می‌دهد، توان اضافی منجر به انحراف فرکانس مثبت می‌شود یا به عبارت دیگر، فرکانس در خوشه‌های ریزشبکه افزایش می‌یابد. برعکس، زمانی که یک پله بار افزایشی در یکی از مناطق رخ می‌دهد، کمبود توان منجر به انحراف فرکانس منفی در همه خوشه‌ها می‌شود یا به عبارت دیگر، فرکانس در خوشه‌های ریزشبکه کاهش می‌یابد. 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 ته‌نشست فرکانس را کاهش دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده اینرسی مجازی مبتنی بر سنتزمیو پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به ژنراتور سنکرون مجازی ارائه شده در مدل [۳۳] ارائه می‌دهد، زیرا روش پیشنهادی انحراف فرکانس کمتر، نوسانات فرکانس کمتر و کاهش زمان ته‌نشست ایجاد می‌کند. انحراف فرکانس در همه خوشه‌ها در محدوده ۰/۱٪ هرگز در حضور روش پیشنهادی است.

#### ۴-۵- سناریو شماره ۳: نفوذ بالای توان بادی در

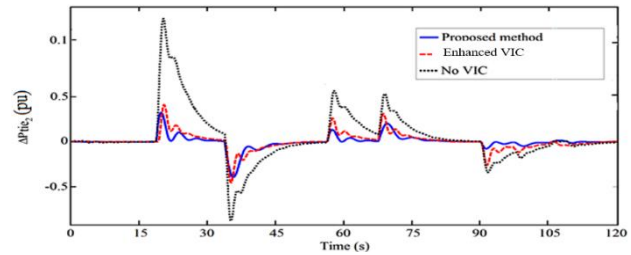
#### خوشه‌های ریزشبکه بصورت مجزا

در سناریو شماره ۳ با توجه به سطح بالای نفوذ توان بادی (حدود ۰/۶ پریونیت) می‌باشد، در این حالت با توجه به وارد کردن اغتشاشات به خوشه‌ها 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، روش‌های کنترلی بیان کند. همان‌گونه که مشخص است، کنترل‌کننده اینرسی مجازی روش سنتزمیو، محدوده انحراف فرکانس خوشه‌ها را در ۰/۱۵ ± هرگز ننگه می‌دارد. 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 پایداری فرکانسی خوشه‌های ریزشبکه اینرسی پایین را حفظ نماید.

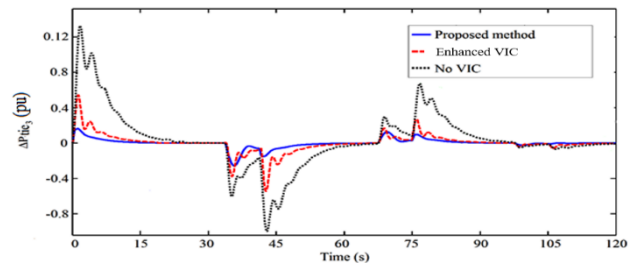
نشان می‌دهد که دامنه نوسانات را به خوبی کنترل می‌کند و سرعت پاسخ‌گویی بیشتری نسبت به کاهش انحرافات دارد.



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



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



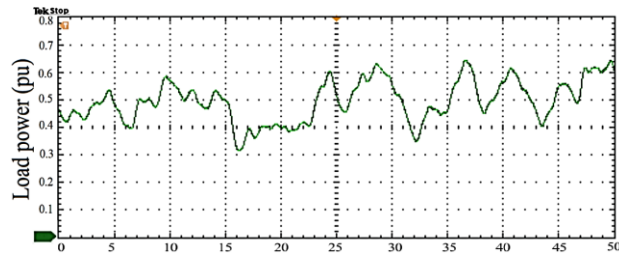
شکل (۱۶): انحراف توان خطوط ارتباطی بین خوشه ۱ و خوشه ۳

جدول (۳) تحلیل عددی روش‌های مختلف برای سناریو شماره ۲، از نظر زمان نشست، زمان خیز، اضافه‌جهش 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) خروجی کنترل‌کننده اینرسی مجازی را در هر سه خوشه نشان داده شده است.

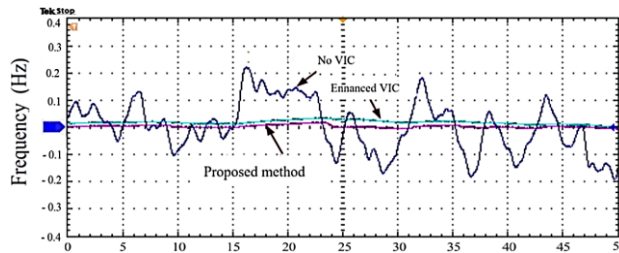
جدول (۳): تحلیل عددی روش‌های مختلف برای سناریو شماره ۲

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

داده شده‌است. مقایسه سه نتیجه سخت افرار در حلقه در شکل (۲۲) نشان داده شده‌است. روش کنترل اینرسی مجازی ارتقاء یافته 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 ۰/۳۷ هرتز را ایجاد می‌کند. در حالت سوم، کنترل کننده پیشنهادی حداکثر انحراف فرکانس حدود ۰/۱۵ هرتز را ایجاد می‌کند. بنابراین، کنترل کننده پیشنهادی دستیابی به فرکانس شبکه نامی را تحت بارهای متغیر تضمین می‌کند.



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

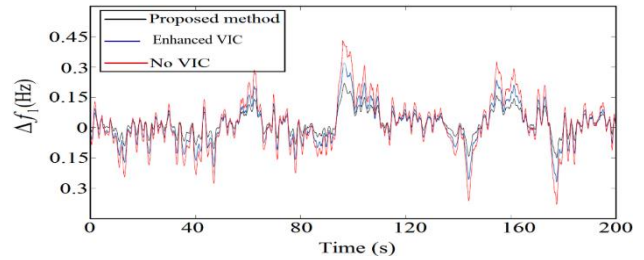


شکل (۲۲): نتایج آزمون سخت افزار در حلقه برای سه حالت کنترل کننده

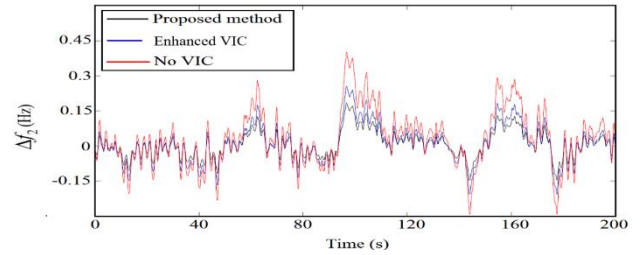
واضح است که وقتی از اینرسی مجازی استفاده نمی‌شود، فرکانس ریزش شبکه با انحرافات فرکانس زیاد به دلیل کمبود شدید اینرسی، نوسان می‌کند. اینرسی انحراف فرکانس زمانی که از کنترل کننده اینرسی مجازی پیشنهادی استفاده می‌شود بسیار کمتر است، به این معنی که در مقایسه با روش‌های دیگر اینرسی بیشتری ارائه می‌دهد. بنابراین، کنترل کننده اینرسی مجازی کنترل مقاوم روش سنتزیمو پیشنهادی بهتر می‌تواند پایداری فرکانس خوشه‌های ریزش شبکه اینرسی پایین را حفظ نماید. در جدول (۵) تحلیل عددی آزمون تجربی برای سناریو شماره ۴ نشان داده شده‌است که مقایسه جامع، بین کنترل کننده 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

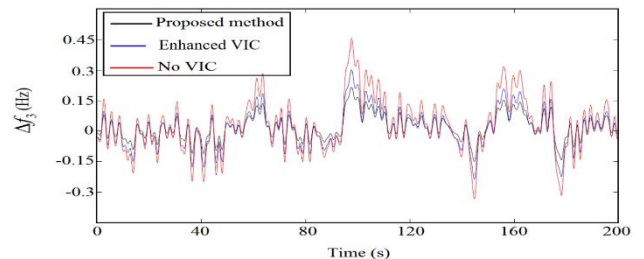
نوسانات	ITAE	کنترل کننده
کم	2.39	Proposed method
نسبتا کم	5.98	Enhanced VIC
بزرگ	33.64	No VIC



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

کنترل کننده	انحراف فرکانس ۱ خوشه (Hz)	انحراف فرکانس ۲ خوشه (Hz)	انحراف فرکانس ۳ خوشه (Hz)
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 کنترل کننده اینرسی مجازی مبتنی بر روش سنتزیمو 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 کنترل کننده پردازنده DSP سری MS320F2812 پیاده‌سازی شده‌است و در MATLAB برنامه‌ریزی شده‌است. آزمایشات تجربی برای نشان دادن عملکرد کنترل کننده اینرسی مجازی روش سنتزیمو پیشنهادی استفاده می‌شود.

#### ۴-۶- سناریو شماره ۴: اختلال تغییر بار در یک خوشه ریزش شبکه جزیره ای

برای آزمایش تجربی سناریو شماره ۴، نوسان بار به یکی از خوشه‌های ریزش شبکه اعمال می‌شود. تقاضای کل توان بار متغیر در شکل (۲۱) نشان

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، طراحی کنترل کننده اینرسی مجازی مقاوم روش سنتز میو در خوشه های ریز شبکه جزیره ای 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 عدم قطعیت‌ها، 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 ریز شبکه‌ها می‌گردد. کنترل کننده اینرسی مجازی روش سنتز میو با استفاده از یک بهره کنترلی مقاوم نسبت به عدم قطعیت‌های ساختاری، در اغتشاشات و انحرافات فرکانسی، پایداری ریز شبکه‌ها را بهبود می‌بخشد و باعث افزایش ضریب میرایی از طریق فرمان کنترلی به اینورتر می‌گردد. این کنترل کننده پیشنهادی به خوبی و با سرعت بالا می‌تواند، کمبود اینرسی در خوشه‌های ریز شبکه‌ها را جبران نماید. همچنین از روش تکرار عددی D-K، مسئله منیوم سازی جهت تنظیم پارامترهای بهینه ضرایب کنترل کننده صورت می‌گیرد و اثبات پایداری و عملکرد این روش، بر اساس مقدار تکین ساختار یافته انجام می‌شود. به منظور برجسته کردن اثربخشی تکنیک کنترل مقاوم روش سنتز میو برای پشتیبانی از پاسخ اینرسی، مقایسه ای بین روش پیشنهادی با کنترل کننده 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 کنترل کننده های پیشنهادی، در یک محیط آزمایشگاهی با ابزارهای مناسب شبیه ساز سخت افزاری شبکه قدرت، پیاده سازی و اجرا شده است. لازم به ذکر است در این مقاله، هدف بهبود پایداری دینامیکی ریز شبکه در زمان وقوع انواع اغتشاشات می‌باشد که دستیابی به این هدف در نتایج تجربی و شبیه سازی به خوبی نشان داده شده است.

## 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 Grid-Connected VSG". In 2022 IEEE

*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 شده است (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 آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق خوزستان (۱۳۹۱)، کارشناسی ارشد مهندسی 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 ریزشکبه‌ها، تولیدات پراکنده، پایداری سیستم‌های قدرت و کنترل ابزار دقیق است و در حال حاضر مدرس (مربی) گروه ابزار دقیق و الکترونیک دانشگاه فنی و حرفه‌ای چمران اهواز (ورودی ۱۳۹۵) می‌باشد و اکنون با سمت کارشناس مهندسی و نظارت تجهیزات فشار قوی و ضعیف در گروه مهندسی الکترونیک و ابزار دقیق شرکت مدیریت تولید برق اهواز-نیروگاه رامین (استخدام ۱۳۸۲) شاغل است.



**علی رضا توکلی** در اهواز متولد شده است (۱۳۶۳). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تهران جنوب (۱۳۸۵)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه آزاد 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 ادوات FACTS 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 سامان‌فر** در خرم‌آباد متولد شده است (۱۳۵۷). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-الکترونیک از دانشگاه سمنان (۱۳۸۰)، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تربیت مدرس (۱۳۸۳)

و دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه لرستان (۱۳۹۷) سپری کرده

*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  $H_\infty$  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. Kiyoumars, 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. Ataei, "Robust frequency control in an islanded microgrid:  $H_\infty$  and  $\mu$ -synthesis approaches", *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 706-717, 2016.
- [31] V. Mihaly, M. Susca, D. Morar, M. Stanese, P. Dobra, " $\mu$ -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

است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه دینامیک سیستم‌های قدرت مدرن (شامل ادوات FACTS و خطوط HVDC) و تاب‌آوری سیستم‌های قدرت در مواجهه با حوادث طبیعی و غیر طبیعی است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد می‌باشد.

## زیر نویس‌ها

---

<sup>1</sup> Proposed method

<sup>2</sup> Enhanced VIC

<sup>3</sup> No VIC

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

Mohammad Reza Ghodsi<sup>1</sup>, Alireza Tavakoli<sup>\*2</sup>, Amin Samanfar<sup>3</sup>

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.