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

محمدرضا قدسی ، علیرضا توکلی *۲، امین سامان فر

m.ghodsi95@khoiau.ac.ir ، گروه مهندسی برق، واحد خرم آباد، انشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران، aa.tavakoli@iau.ac.ir *۲- گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، a.samanfar@khoiau.ac.ir ۳- گروه مهندسی برق، واحد خرم آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم آباد، ایران، ۱۴۰۲/۹/۲۰ دریافت: ۱۴۰۲/۶/۳۰

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 می گیرد. نتایج آزمایشگاهی سخت افزار در حلقه توسط پردازشگر سیگنالهای دیجیتالسری2012 2812 و شبیهسازی در محیط نرم افزار آمایشگاهی سخت افزار در حلقه توسط کنترلکننده پیشنهادی را برای توسعه کنترل فرکانس بار سنتی در مقایسه با کنترل اینرسی مجازی ار تقاءیافته و حالت بدون اینرسی، تحت اغتشاشات مختلف تأیید می کند که به کارگیری کنترل کننده اینرسی مجازی مبتنی بر سنتزمیو، باعث بهبود پایداری خوشههای ریزشبکه جزیرهای و میرایی نوسانات توان می شود و همچنین انحرافات فرکانسی را به میزان قابل توجهی، کاهش می دهد.

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 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].

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 کنترل کننده 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 فازی محاسبه میشود. عیب اصلی تکنیک منطق فازی وابستگی آن به دانش طراح است. بیشتر ژنراتورهای سنکرون مجازی، با روش های فازی محاسبه میشود. این 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،

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 می توان به صورت آزاد و بصورت برخط تنظیم کرد[۹،۱۰]. اگرچه همگامکننده به پشتیبانی از اینرسی در شرایط ضعیف شبکه کمک میکند، اما عیب اصلى أن عدم توانايي تنظيم سرعت پاسخ ديناميكي حلقه توان اكتيو بدون تأثیر بر ویژگی افت فرکانس حالت پایدار است و به عنوان مثال ضريب افت فركانس بايد اصلاح شود كه نامطلوب است، زيرا 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 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 شدهاست. تعدادی از روش ها برای کنترل افتی فرکانس پیشنهاد شدهاست[١٣]. اگر کنترل افتی فرکانس، مستقیماً در مبدل های سنكرون استفاده شود، باعث ايجاد اثر مخالف بر اتصال بين حلقه توان راکتیو و حلقه توان اکتیو می شود. کنترل افتی به طور گسترده در کنترل ریزشبکه ها، استفاده می شود. با استفاده از کنترل افتیP-F (فرکانس -توان اكتيو) و كنترل افتى Q-V (ولتار - توان راكتيو) پخش توان بين منابع توليد پراكنده انجام مىشود[١۴]. كنترل افتى معمولى قادر به افزایش اینرسی ریز شبکهها نیست، در نتیجه ریزشبکههای مبتنی بر کنترل افتی معمولاً دارای اینرسی کم هستند و به خطا حساس مىباشند. ماهيت نوسانى ژنراتور سنكرون مجازى همچنين باعث ايجاد 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 خروجي توليد پراكنده ها ناشي از افت ولتاژ خط نامتقارن مي 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 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 نمی توانند خطاهای پخش توان راکتیو را به طور کامل از بین ببرند، همان طور 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 ارائه کردند[۴۲، 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 کنترل کننده مجازی به درستی کار نکند و نیاز به طراحی مجدد داشته باشد. برای تنظیم مقاوم و بهینه پارامترهای کنترل کننده بنابراین، عدم قطعیتهای موجود در ریزشبکه را میتوان به راحتی با پیشنهادی بر طرف کرد. در ساختار کنترل کننده اینرسی مجازی پیشنهادی، هر دو ویژگی پاسخ اینرسی ژنراتور سنکرون مرسوم و پیشنهادی، هر دو ویژگی پاسخ اینرسی ژنراتور سنکرون مرسوم و 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 می شود. 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 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 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.

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.

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

توان ورودی (P_{in})، توان خروجی (P_{out}) و سرعت زاویه ای نامی میباشد. اینورتر به عنوان یک ژنراتور سنکرون مرسوم رفتار ($heta_n$) می کند. سرعت زاویه ای روتور مجازی ($artheta_m$) در بلوک کنترل VSG از معادله نوسان، محاسبه می شود. سپس زاویه فاز مکانیکی مجازی(heta) با انتگرال گیری از $arPhi_m$ 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 ميرايي(D) بر اساس الزامات بهره برداري شبكه طراحي و ثابت ميباشد. 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].



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

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

$$P = \frac{3U_g U}{X_g} \tag{(7)}$$

$$Q = \frac{3U(U_s - U)}{X_g} \tag{(7)}$$

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.

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

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

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

$$\zeta = D \sqrt{\frac{\omega_m X_g}{12U_g U J}} \tag{9}$$

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 جزیره ای 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(µ) تنظیم می شود.

طراحی کنترل اینرسی مجازی بر روی اینورتر سیستم فتوولتاییک در خوشههای ۱ و ۳ و پیل سوختی در خوشه ۲ و همچنین طراحی کنترل کننده فرکانس بار حلقه ثانویه (ΔP_{SL}) نیز بر روی سیستم دیزل ژنراتور انجام میشود. عدم قطیعت 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 (کنترل کننده مقاوم روش سنتزمیو) بهره گرفته شدهاست. بخشهای طراحی کنترل کننده در زیر مورد بحث قرار میگیرد.

۲-۱ 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 (۲) مقدار توان تقلیدشده(P_{emu}) را برای جبران کمبود اینرسی نشان می دهد:

$$P_{emu} = K_{PE} f_o \frac{d\left(\Delta f_i\right)}{dt} \tag{Y}$$

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:

$$\Delta P_{inertia} = \frac{K_{EVIC}}{1 + sT_{EVIC}} \frac{d\left(\Delta f_i\right)}{dt} \tag{A}$$

 (T_{EVIC}) 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 می دهدکه 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 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 پارامتری نیز به مدل مورد مطالعه اعمال میشود. دینامیک سیستم را میتوان برای خارج کردن بلوک عدمقطعیت پارامترهای نامعین با استفاده از مدل LFT استفاده کرد[T1].



LFT در این مقاله، برای ساده سازی تنها چهار پارامترهای نامعین با مدل T_{g} ، T_{t} ، T_{FC} بار ی در این مقاله، برای ساده سازی تنها چهار پارامتر یامی خود فرض در این مقاله، برای عدم قطعیت ± ۲۵٪ در ناحیه مقادیر نامی خود فرض می شوند. 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_{pv} ، ΔP_{wind} و ΔP_{L} به عنوان خروجی سیستم اندازه گیری انتخاب می شود، و ΔP_{pv} ، ΔP_{wind} و انتخاب می شود، و می موند. دینامیک سیستم را می توان، برای استخراج اغتشاش شمارش می شوند. دینامیک سیستم را عدم قطعیت نشان داده شده در شمودار 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

بنابراین، از یک پیکربندی استاندارد تبدیل کسری خطی بالا می توان برای تنظیم مجدد کل سیستم استفاده کرد. نمودار بلوک حلقه بسته ریز شبکه همراه با عدم قطعیت مورب ساختاریافته رسم شدهاست. در اینجا، عدم قطعیت قطری 4×4 پارامتری انتخاب شدهاست. تمام بلوک نامعینی ساختاریافته Δ ، را می توان به فرم کلی معادله (۹) نشان داد، که شامل عدم قطعیتهای پارامتری (δ_i) و عدم قطعیتهای دینامیکی (Δ_j) است که می تواند از دینامیک سیستم استخراج شود.

$$\Delta = \begin{cases} \operatorname{diag} \left[\delta_1 I_{r_1}, \dots, \delta_k I_{r_k}, \dots, \Delta_1, \dots, \Delta_f \right], \\ \delta_i \in C, \Delta_j \in C^{k_i \times k_j} \end{cases}$$
(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 میو) استفاده میشود. برای تعریف تابع سنتزمیو از معادله زیر استفاده میشود:

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

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، $P_{ert_{in}}$ سیگنالهای عملکرد، Y خروجی های اندازهگیری شدهاست، $P_{ert_{in}}$ سیگنالهای آشفتگی ورودی و خروجی بلوک نامعلوم هستند.



 Δ -M-K شماتیک پیکربندی استاندارد

برای برآوردن شرایط عملکرد مقاوم در سنتز μ ، $1 \ge \infty$ اTwz باید برای همه $\Delta \in \Delta_p$ ، که Δ_p توسط رابطه(۱۷) تعریف می شود:

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

جایی که $\displaystyle \Delta_p \, \, {
m d}_p$ و Δ به ترتیب نشان دهنده الزامات عملکرد و عدم

قطعیت هستند. عملکرد مفاوم تصمین می شود، اگر و فقط اگر:
$$\max_{\omega} \ \mu_{\Delta_{P}}\left(M\left(s\right)\right)$$
(۱۲)

روش تحلیلی استاندارد قادر به محاسبه کنترل کننده 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 کنترل کننده K را با به حداقل رساندن معادله زیر تعیین میکند :

$$\min_{K} \left(\min_{D(j\omega)} \left\| D(j\omega) M(K(j\omega)) D^{-1}(j\omega) \right\|_{\infty} \right)$$
(17)

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 $(\overline{\sigma})$ را نشان می دهد. برای طراحی کنترل کننده مقاوم سنتزمیو، از آرایش تبدیل کسری خطی بالا نشان داده شده در شکل(Y) برای اجرای روش تکرار D-K استفاده می شود.



شکل (۷): نمودار بلوک روش تکرار D-K

۳-۴- مدلسازی عدم قطعیتها

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

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

$$W_u = \frac{5s + 50}{s^2 + 3000s + 2 \times 10^4} \tag{10}$$

$$W_d = 0.01I_{3\times 3} \tag{19}$$

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 کنترل کننده 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:

$$\Delta^* = \left\{ \Delta\left(s_0\right) \in \Delta^*, s_0 \in \mathcal{C}, \operatorname{Re}\left(s_0\right) \ge 0 \right\}$$
(17)

$$M\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$$
(1A)

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

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

$$\Delta_{T} = \left\{ \begin{bmatrix} \Delta_{u} & 0 \\ 0 & \Delta_{p} \end{bmatrix}, \Delta_{u} \in \Delta^{*}, \Delta_{p} \in \mathbb{C} \right\}$$
(7.)

و Δu و Δu به ترتیب الزامات عملکرد و عدم قطعیت هستند. برای Δp و $\Delta u = \Delta p$ و $\Delta \in \Delta_r$ ، $\|\Delta\|_{0} \le \Delta \in \Delta_T$ ، عملکرد مقاوم سیستم حلقه بسته تضمین می شود اگر و فقط اگر (M) sup $\mu_{\Lambda}(M) \le 1$

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. همان طور که در شکل دیدهمی شود، 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 ۵/۰ میباشد که این مقادیر با توجه به شروط مذکور، اثبات پایداری و

مقاوم می باشد و پارامترهای کنترل کننده پیشنهادی، در برابر عدم قطعیتهای اعمال شده به سیستم، مقاوم میباشند. formance 0.94 µ-upper bound 0.92 E 0.9 0.88 0.86 10-1 10⁰ 10¹ 10² 10 Frequency(rad/s) (الف) **Robust Stability** 0.8 µ-upper bound µ-lower bound 0.6 貫 0.4 0.2 0 10¹ 10⁷ Frequency(rad/s) 10-1 10⁰ 10 (ب) شكل (۸): (الف)عملكرد مقاوم. (ب) پايداري مقاوم

طراحی کنترل کننده روش سنتزمیو، دارای عملکرد مقاوم و پایداری

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^۱ برای کنترل فرکانس بار در خوشه های ریزشبکه جزیره ای در مقیاس بزرگ آزمایش شده و در مقایسه با کنترل اینرسی مجازی ارتقاء یافته^۲ مدل[۳۳] و حالت بدون اینرسی⁷، 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 می گیرد.

6,	<i>c, ,,</i>	· · ·	
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
2	$T_{DEG}(\mathbf{s})$	0.012	D (pu/Hz)
1.5	$T_{WTG}(s)$	0.1	<i>H</i> (pu/s)
0.08	$T_{IN}(s)$	4	$T_{FC}(s)$
0.004	$T_{IC}(s)$	0.1	$T_{FESS}(s)$
0.08	T_{g}	0.4	T_t
4	P_{FESS}	0.1	T_{conv}
		2	J_{FESS}

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

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 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)[۳۳] 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 می شود که حلقه کنترل فرکانس ثانویه در همه شرایط با موفقیت عمل نکند. برای مقابله با این مشکل، کنترل کننده پیشنهادی طراحی شده توسط روش سنتزمیو بر روی اینورتر سلول فتوولتاییک در خوشههای ۱ و ۳ و پیل سوختی در خوشه ۲ اعمال می شود. مدل دینامیکی خوشه های ریز شبکه در شکل(۱۰) بخش (الف-ج) نشان داده شدهاست که یک کنترل کننده انتگرالی-مشتق گیر-تناسبی در حلقه کنترل فرکانس ثانویه، استفاده می شود.











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

توان تبادل شده در هر خوشه (ΔP_{iie}) توان تبادل شده در هر خوشه ((ΔP_{iie}) محاسبه می شود:

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

$$\Delta P_{iie2} = \frac{2\pi T_{21}}{s} \left(\Delta f_2 - \Delta f_1 \right) + \frac{2\pi T_{23}}{s} \left(\Delta f_2 - \Delta f_3 \right) \quad (\Upsilon\Upsilon)$$

$$\Delta P_{iie3} = \frac{2\pi T_{31}}{s} \left(\Delta f_3 - \Delta f_1 \right) + \frac{2\pi T_{32}}{s} \left(\Delta f_3 - \Delta f_2 \right) \quad (\text{TF})$$

جایی که T_{ij} ضریب گشتاور همگامسازی خط پیوند بین خوشه i و خوشه j , خوشه j

چالشهای 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.

-		
اغتشاش	شرح سناريو	شمارہ سناریو
تغییر فرکانس خوشه	سطح نفوذ بالای منابع تولید پراکنده در خوشه های ریزشبکه جداگانه	١
تغيير توان	سطح نفوذ بالای منابع تولید پراکنده در خطوط ارتباطی خوشه های ریزشبکه	٢
تغيير فركانس	نفوذ بالای توان بادی در خوشه های ریزشبکه بصورت مجزا	٣
تغيير بار	اختلال تغییر بار در یک خوشه ریزشبکه جزیره ای(نتایج تجربی)	۴

سازى	شبيه	مختلف	سناريوهاي	:(٢)	جدول
------	------	-------	-----------	------	------

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 ۱، با توجه به حالت بدون اینرسی که با حداکثر انحراف فرکانس میباشد، در مقایسه با حضورکنترل اینرسی مجازی ارتقاء یافته مدل [۳۳] مقدار ۲/۰ هرتز و کنترلکنندهکننده اینرسی مجازی روش سنتزمیو مقدار ۱/۰ هرتز است مقدار زیادی میباشد. در خوشه ۲، میزان انحراف فرکانس در حالت بدون کنترلکننده کننده اینرسی مجازی روش کانترلکننده ارتقاءیافته ۱/۰ هرتز و کنترلکننده بینرل مقدار با کنترلکننده ارتقاءیافته ۱/۰ هرتز و کنترلکننده بینرسی در خوشه ۳، بدون با کنترلکننده ارتقاءیافته ۱/۰ هرتز و کنترلکننده اینرسی راتقا یافته کنترلکننده اینرسی ارتقا یافته ۱/۰ هرتز و کنترلکننده اینرسی در خوشه ۳، بدون کنترلکننده اینرسی در حالت بدون کنترلکنده میباشد. در خوشه ۳، بدون

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 عدمقطعیتها مقاوم میباشد.



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 ارتباطى اتفاق مى افتد، نشان داده مى شود. با توجه به اينكه انحراف توان بین خوشه ۱ و خوشه ۲ ابتدا بدون کنترلکننده میباشد، در این صورت انحراف توان تا مقدار ۱/۸ پریونیت هم می رسد که مقدار زیادی است و با حضور کنترل کننده اینرسی مجازی ارتقاءیافته مدل [۳۳] مقدار ۸/۰ پریونیت و کنترلکننده کننده اینرسی مجازی روش سنتزمیو ، مقدار ۰/۲ پریونیت می باشد، همچنین انحراف توان بین خوشه ۲ و خوشه ۳ مقدار حداکثر، مربوط به حالت بدون کنترل کننده است که میزان ۱/۲ پریونیت میباشد و نسبت به میزان کنترل کننده اینرسی ارتقاء یافته با مقدار ۰/۴ پریونیت و کنترل کننده 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 کنترل کننده و با مقدار اوج انحراف توان ۱/۴ پریونیت میرسد ولی با حضور کنترل کننده ارتقایافته ۴/۰ پریونیت و کنترل کننده پیشنهادی مقدار ۰/۲ پریونیت را نشان میدهد که دامنه نوسانات را به خوبی کنترل میکند و سرعت پاسخ گویی بیشتری نسبت به کاهش انحرافات دارد.











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

ITAE	اضافه جهش(%)	زمان خيز (s)	زمان نشست (8)	كنترلكننده
2.03	10.33	1.13	4.81	Proposed method
4.76	21.41	2.06	9.65	Enhanced VIC



شکل (۱۷): خروجی کنترل کننده 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، کنترل کننده باید به سرعت انحراف فرکانس مثبت یا منفی در ریزشبکه را جبران کند. علاوه بر این، کنترل کننده باید نوسانات فرکانس را به سرعت خنثی کند و زمان ته نشست فرکانس را کاهش دهد. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود، کنترل کننده 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 ۰/۰٪ هرتز در حضور روش فرکانس در همه خوشهها در محدوده ۰/۰٪ هرتز در حضور روش

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 ۶/۰ پریونیت) 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 کنترل کننده های مختلف در نظر گرفته می شود. 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 كنترلى بيان كند. همان گونه كه مشخص است، كنترل كننده اينرسي مجازی روش سنتزمیو ، محدوده انحراف فرکانس خوشه ها را در ۱۵/۰ ± هرتز نگه می دارد. علاوه بر این، هنگامی که از اینرسی مجازی استفاده نمی شود، فرکانس ریز شبکه 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.



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

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

در اینجا، آزمونها و نتایج شبیه سازی و سخت افزاری در حلقه برای تأیید کنترل کننده 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 کنترل کننده پردازنده DSP سری MS320F2812 پیادهسازی شدهاست و در MATLAB برنامهریزی شدهاست. آزمایشات تجربی برای نشان دادن عملکرد کنترل کننده 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 داده شده است. روش کنترل اینرسی مجازی ارتقاءیافته مدل [۳۳] در نظر گرفته شده است. در این حالت حداکثر انحراف فرکانس حدود ۲۲/۰ هرتز است. برای مورد دوم، بدون کنترل اینرسی با حداکثر انحراف فرکانس حدود ۲۰۳۷ هرتز را ایجاد میکند. در حالت سوم، کنترل کننده پیشنهادی حداکثر انحراف فرکانس حدود ۱۵ /۰۰ هرتز را ایجاد میکند. بنابراین، کنترل کننده پیشنهادی دستیابی به فرکانس شبکه نامی را تحت بارهای متغیر تضمین میکند.



واضح است که وقتی از اینرسی مجازی استفاده نمی شود، فرکانس ریز شبکه با انحرافات فرکانس زیاد به دلیل کمبود شدید اینرسی، نوسان می کند. اینرسی انحراف فرکانس زمانی که از کنترل کننده اینرسی مجازی پیشنهادی استفاده می شود بسیار کمتر است، به این معنی که در مقایسه با روش های دیگر اینرسی بیشتری ارائه می دهد. بنابراین، کنترل کننده اینرسی مجازی کنترل مقاوم روش سنتزمیو پیشنهادی بهتر می تواند پایداری فرکانس خوشه های ریز شبکه اینرسی پایین را حفظ نماید. در جدول(۵) تحلیل عددی آزمون تجربی برای سناریو شماره ۴ نشان داده شده است که مقایسه جامع، بین کنترل کننده های اینرسی مجازی ارائه می دهد. این موضوع روشن است که با توجه به شاخص ITAE، روش پیشنهادی بهترین عملکرد را ارائه می دهد.

۴	شماره	سناريو	تجربي براي	عددى آزمون	تحليل	ېدول (۵):
---	-------	--------	------------	------------	-------	-----------

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

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

۵-نتیجهگیری

در این مقاله، طراحی کنترل کننده 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 كنترل فركانس 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 می گردد. کنترل کننده 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 کنترل کننده پیشنهادی به خوبی و با سرعت بالا می تواند، کمبود اینرسی در خوشههای ریزشبکهها را جبران نماید. همچنین از روش تکرار عددی D-K، مسئله منيممسازى جهت تنظيم پارامترهاى بهينه ضرايب کنترلکننده صورت می گیرد و اثبات پایداری و عملکرد این روش، براساس مقدار تكين ساختار يافته انجام مى شود. 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 می شود، 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

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 فنی و حرفهای چمران اهواز (ورودی ۱۳۹۵) می باشد 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 رضا توکلی در اهواز متولد شدها ست (۱۳۶۳). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق-قدرت از دانشگاه تهران جنوب (۱۳۸۵)، کار شنا سی ار شد مهند سی برق-قدرت از دانشگاه 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.



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∞ 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 powerfrequency 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

است. فعالیتهای پژوهشی و علاقهمندی ایشان در زمینه دینامیک سیستمهایقدرت مدرن (شامل ادوات FACTS و خطوط HVDC) و تاب آوری سیستمهای قدرت در مواجهه با حوادث طبیعی و غیر طبیعی است و در حال حا ضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم آباد می باشد.

زيرنويسها

¹ Proposed method

²Enhanced VIC

³ No VIC

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

Mohammad Reza Ghodsi¹, Alireza Tavakoli^{*2}, Amin Samanfar³

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.