



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 12, No. 3, 2021
Research Paper

Preventing of Bifurcation Consequences in VSI-Dominated Micro-grids Using Virtual Impedance Theory

Babak Keyvani,¹ Bahador Fani^{*1}, Ghazanfar Shahgholian¹

¹ Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract:

Conventional droop-based techniques have widely been used in controlling Voltage Source Inverter (VSI) based on distributed generation units within a Micro-Grid (MG). Despite the simplicity and high reliability of the controller, the low-inertia nature of VSIs threatens the system stability against probable disturbances. Thus, from the stability viewpoint, it is essential to carefully monitor the system operating point to determine the stable region of the parameters affecting the micro-grid stability. To this end, a complete dynamic model for an inverter-based micro-grid has been derived. According to this model, states affecting the dominant eigenvalues of the system are identified using eigenvalues analysis and modal analysis. Then, bifurcation theory is used to predict the parameter stability margin and identify the type of bifurcation. In this paper, by introducing a bifurcation index, the appropriate virtual impedance X/R ratio is selected from the viewpoint of both small-signal analysis and bifurcation analysis. Finally, a multi-objective optimization framework is presented to prevent such a problem in parallel to other operational goals.

Keywords: Virtual Impedance, Bifurcation Theory, Stability, Conventional Droop-based Techniques, Islanded Inverter Micro-grid.



2252-083X/ © 2021 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/isee.2020.122341.1358>

جلوگیری از وقوع انشعاب در ریزشبه‌های اینورتری خودگردان با استفاده از تکنیک

امپدانس مجازی

بابک کیوانی^۱، بهادر فانی^{*}، غضنفر شاهقلیان^۱

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

babak.keyvani.b@gmail.com, b.fani@pel.iaun.ac.ir, shahgolian@iaun.ac.ir

چکیده: روش‌های افتی معمول به‌طور گسترده در ساختار کنترل واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر اینورترهای منبع ولتاژ در یک ریزشبه استفاده می‌شوند. با وجود سادگی و قابلیت اطمینان بالای این کنترل‌کننده‌ها، اینرسی کم اینورترهای منبع ولتاژ، پایداری سیستم را در برابر اغتشاشات احتمالی تهدید می‌کند؛ بنابراین، از منظر پایداری، دنبال کردن نقطه کار سیستم برای تعیین منطقه پایدار پارامترهای مؤثر بر پایداری ریزشبه ضروری است. بدین منظور در مقاله حاضر، پس از استخراج یک مدل فضای حالت کامل برای ریزشبه اینورتری، با استفاده از تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه و آنالیز مدال، حالت‌های مؤثر بر مقادیر ویژه غالب سیستم شناسایی می‌شوند. سپس با استفاده از آنالیز انشعابات، محدوده پایدار پارامتر مؤثر بر پایداری ریزشبه و نوع انشعاب ناشی از تغییر آن تعیین می‌شود. در ادامه، اثر امپدانس مجازی بر حاشیه پایداری پارامتری ریزشبه اینورتری بررسی شده است. در این مقاله، با معرفی یک شاخص انشعابات، نسبت X/R مناسب برای امپدانس مجازی از منظر تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک و انشعابات، انتخاب شده است. در نهایت، ساختار بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شد تا به موازات جلوگیری از وقوع انشعاب در سیستم، سایر اهداف عملیاتی نیز لحاظ شوند.

واژه‌های کلیدی: امپدانس مجازی، تئوری انشعابات، پایداری، روش‌های افتی معمول، ریزشبه اینورتری جزیره‌ای

۱- مقدمه

منابع پراکنده و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، مفهوم ریزشبه به‌عنوان مجموعه‌ای از واحدهای تولید پراکنده و بارهای نزدیک به آنها برای تولید و دریافت توان در مقیاس کوچک مطرح شده است. ریزشبه‌ها می‌توانند به دلایل از پیش برنامه‌ریزی شده یا به علت وقوع خطا در شبکه بالادست، از شبکه اصلی جدا شوند و به‌صورت جزیره‌ای به فعالیت خود ادامه دهند. قابلیت جزیره‌ای شدن ریزشبه سبب می‌شود تأمین انرژی بارهای حساس موجود در ریزشبه در شرایط قطعی شبکه امکان‌پذیر شود. این مسئله باعث بهبود قابلیت اطمینان برای مصرف‌کنندگان داخل ریزشبه می‌شود [۲].

در حالت عملکرد جزیره‌ای به‌منظور کنترل ولتاژ، کنترل فرکانس، تنظیم توان خروجی منابع متناسب با نیاز شبکه و نیز تسهیم بار بین منابع، به‌کارگیری یک استراتژی کنترل

با افزایش مشکلات زیست‌محیطی و نیاز به استفاده از انرژی پاک، منابع تجدیدپذیر به‌صورت منابع تولید پراکنده (DG) در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی استفاده شده‌اند. به‌طور معمول، این منابع مستقیماً اتصال‌پذیر به شبکه نیستند و از اینورترهای منبع ولتاژ (VSI) برای تبدیل خروجی آنها به فرم مطلوب استفاده می‌شود [۱]. به‌منظور کنترل هماهنگ

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۲۴

نام نویسنده مسئول: بهادر فانی

نشانی نویسنده مسئول: ایران، اصفهان، نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، دانشکده برق

متأثر باشد [۹,۱۰]. به عبارت دیگر، در ریزشبه‌های اینورتری، مدهای فرکانس پایین منابع عمدتاً با حلقه‌های کنترل توان تعیین می‌شوند. این مدهای نوسانی با میرایی کم باعث ایجاد نوسانات فرکانس پایین در مؤلفه اصلی ولتاژ و جریان‌های خروجی منابع می‌شود و ممکن است باعث تحریک دینامیک‌های ناپایدار سیستم شود [۹]؛ بنابراین، پیش‌بینی ناحیه پایدار پارامترهای مؤثر بر عملکرد دینامیکی سیستم و افزایش حاشیه پایداری آن بسیار حائز اهمیت است.

تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک، روش متداول برای بررسی پایداری سیستم‌های غیرخطی تحت مجموعه‌ای از ساختارهای پارامتری مشخص است [۱۱,۱۲]؛ با این حال وقتی پارامترهای سیستم تغییر می‌کنند، نقطه تعادل مطابق با آن تغییر می‌کند و از مقدار خطی سازی شده از پیش تعیین شده منحرف می‌شود [۱۳-۱۵]؛ بنابراین، استفاده از آنالیز سیگنال کوچک برای محاسبه محدوده پایدار پارامترها روش کارآمدی نیست.

یکی از روش‌های به‌کاررفته در تحلیل پایداری سیستم‌های دینامیکی در حضور تغییر پارامتر، روش تعقیب است که در تئوری انشعابات مطرح می‌شود [۱۶]. در روش تعقیب، در یک نقطه کار (نقطه تعادل) مشخص از یک سیستم دینامیکی، یک یا چند پارامتر از سیستم به‌طور پیوسته تغییر داده می‌شود و نحوه تغییر مقادیر ویژه در نقاط کار جدید دنبال می‌شود. بسته به محل قرارگرفتن این مقادیر در صفحه اعداد مختلط، انشعابات مختلفی در سیستم رخ می‌دهد [۱۷,۱۸]. در [۱۹] از تئوری انشعابات برای پیش‌بینی یک منطقه ناپایدار فرکانس پایین در مدل‌های منبع ولتاژ سه فاز (VSC) استفاده می‌شود که در حالت متصل به شبکه کار می‌کنند. همچنین در مرجع [۲۰] با استفاده از آنالیز انشعابات، پاسخ گذرای VSC‌های سه فاز تحت کمبودهای ولتاژ شبکه مطالعه شده است.

این مقاله محدوده پایدار پارامترهای مؤثر بر دینامیک‌های با میرایی کم یک ریزشبه اینورتری را در حالت عملکرد جزیره‌ای بر مبنای تئوری انشعابات بررسی می‌کند. بدین منظور، ابتدا یک مدل دینامیکی کامل برای ریزشبه اینورتری شامل مدل منابع پراکنده، خطوط و بارها

محلی مناسب در VSI‌ها ضروری است [۳]. برای دستیابی به این اهداف، با فرض سلفی بودن شبکه به‌طور گسترده از روش‌های کنترل افقی معمول، یعنی روش افقی معمول فرکانس - توان حقیقی و روش افقی معمول ولتاژ - توان راکتیو، استفاده شده است. علت استفاده از روش‌های افقی معمول این است که این استراتژی‌ها قابلیت کنترل محلی را فراهم می‌سازند و بدون نیاز به لینک‌های مخابراتی برای برقراری ارتباط بین منابع، قابلیت به‌کارگیری در هر دو حالت عملکرد ریزشبه را دارند [۴,۵]؛ البته استفاده از این روش‌ها در ریزشبه‌های ولتاژ پایین به علت اینکه فیدرهای توزیع ممکن است همیشه خاصیت سلفی نداشته باشند، باعث ایجاد محدودیت‌هایی در ریزشبه می‌شوند؛ از جمله ایجاد تزویج بین توان‌های حقیقی و راکتیو منابع در شرایط X/R کم و تقسیم نامناسب توان راکتیو بین منابع به علت افت ولتاژ خطوط [۶].

به‌کارگیری واسط‌های الکترونیک قدرت (VSI‌ها) با وجود اینکه به عملکرد انعطاف‌پذیر منابع در برآورده کردن نیازهای کار دائم ریزشبه خودگردان منجر می‌شود، به دلیل اینرسی فیزیکی ناچیزشان، چنانچه یک مکانیسم کنترل مناسب اجرا نشده باشد، سیستم را بالقوه در معرض نوسان حاصل از اختلالات شبکه قرار می‌دهد [۷,۸]؛ بنابراین، مسئله پایداری، یکی از نگرانی‌های عمده در عملکرد قابل اطمینان ریزشبه‌ها به‌خصوص در حالت عملکرد جزیره‌ای آنهاست؛ با این حال مسئله پایداری ریزشبه در حالت عملکرد متصل به شبکه اصلی، موضوع با اهمیتی نیست؛ زیرا بیشتر دینامیک‌های سیستم به علت ساینز نسبتاً کوچک ریزمنابع با شبکه بالادست دیکته می‌شوند.

در ساختار کنترل‌کننده توان منابع، برای ایجاد فاصله زمانی کافی بین حلقه‌های کنترل توان و جریان و نیز دستیابی به سیگنال‌های با کیفیت توان بالا، با عبور مقادیر لحظه‌ای توان از فیلترهای پایین‌گذر با پهنای باند کم، از مقادیر متوسط توان‌های اکتیو و راکتیو در مشخصه‌های افقی استفاده می‌شود. استفاده از مقادیر متوسط توان باعث می‌شود پاسخ کنترل‌کننده‌های افقی متداول برای تقسیم توان بین منابع، نسبتاً کند باشد؛ بنابراین، کنسبودن پاسخ باعث می‌شود دینامیک‌های سیستم به‌شدت از مقادیر ضرایب افقی

بخش دوم مقاله، ساختار سیستم کنترل منابع اینورتری تشریح می‌شود. در بخش سوم، مدل فضای حالت و مدل خطی سازی شده کامل یک ریزشبهک استخراج می‌شود. در بخش چهارم، ضمن معرفی انواع انشعابات، با استفاده از تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه و تئوری انشعابات، وضعیت پایداری سیستم و نوع انشعاب ناشی از تغییر پارامتر تعیین می‌شود. در بخش پنجم، با معرفی یک شاخص برای سنجش انشعاب، امیدانس مجازی مناسب برای افزایش حاشیه پایداری پارامتری سیستم بدون نیاز به تغییر استراتژی کنترلی انتخاب می‌شود. همچنین به منظور بهبود تسهیم توان راکتیو، مقدار بهینه امیدانس مجازی با استفاده از یک مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌شود. در نهایت، در بخش ششم، نتایج حاصل از این مطالعه ارائه می‌شوند.

۲- ساختار کنترلی اینورتر

در شکل (۱)، بلوک دیاگرام یک VSI که با فیلتر LC و سلف تزویج به ریزشبهک متصل شده، به همراه کنترل‌کننده‌های مربوطه نشان داده شده است. با توجه به شکل، ساختار کنترلی اینورتر از دو بخش حلقه کنترل خارجی توان و حلقه کنترل داخلی شامل حلقه‌های کنترل ولتاژ و کنترل جریان تشکیل می‌شود. در حلقه کنترل توان به منظور حفظ ولتاژ و فرکانس در محدوده مقادیر از پیش تعیین شده و افزایش قابلیت اطمینان ریزشبهک‌های اینورتری در حالت عملکرد جزیره‌ای، از یک کنترل‌کننده محلی در هر DG استفاده می‌شود [۲۲، ۲۳]. هماهنگی بین کنترل‌کننده‌های محلی مطابق معادلات (۱) و (۲)، با روش‌های افتری فرکانس - توان حقیقی و ولتاژ - توان راکتیو در حلقه کنترل توان به دست می‌آید.

$$\omega_i = \omega_0 - m_{pi} P_i \quad (1)$$

$$v_{oi}^* = V_{ni} - n_{qi} Q_i \quad (2)$$

در این روابط m_{pi} و n_{qi} به ترتیب ضرایب افتری توان اکتیو و راکتیو هر واحد DG هستند. ω_i فرکانس زاویه‌ای DG i ام و ω_0 فرکانس نامی سیستم ($2\pi \times 50 \text{ rad/s}$) است. v_{oi}^* اندازه ولتاژ مرجع خروجی از کنترل‌کننده توان را

استخراج می‌شود، سپس برای انتخاب پارامترهای انشعاب، با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه و آنالیز مدال، حالت‌هایی شناسایی می‌شوند که بیشترین تأثیر را بر مدهای غالب ریزشبهک مطالعه شده دارند. در ادامه با استفاده از آنالیز انشعابات، نوع انشعاب ناشی از تغییر پارامتر انشعاب تعیین می‌شود.

با توجه به وابستگی زیاد روش‌های افتری به امیدانس خطوط متصل به منابع، می‌توان با ایجاد خاصیت سلفی یا مقاومتی از طریق تغییر مقادیر امیدانس خطوط، بر محدودیت‌های ناشی از تزویج میان توان‌های حقیقی و راکتیو منابع و مشکلات پایداری در زمان عملکرد جزیره‌ای ریزشبهک‌ها غلبه کرد [۲۱]. یکی از روش‌های پیشنهادی برای بهبود عملکرد ریزشبهک‌ها، استفاده از امیدانس مجازی در ساختار استراتژی کنترل افتری منابع است. در مقاله حاضر، اثر انواع مختلف امیدانس مجازی بر پایداری ریزشبهک‌های دارای آشفتنی در امیدانس خطوط بررسی می‌شود. بدین منظور برای بررسی اثر مدهای غالب بر حاشیه پایداری سیستم، شاخصی برای انشعابات تعریف می‌شود. به منظور افزایش حاشیه پایداری پارامتری سیستم، با مقایسه پایداری ریزشبهک از منظر سیگنال کوچک و انشعابات، امیدانس مجازی مناسب انتخاب می‌شود. در نهایت، به منظور کاهش خطای تسهیم توان راکتیو هم‌زمان با افزایش حاشیه پایداری ریزشبهک، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقدار بهینه امیدانس مجازی با استفاده از یک مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌شود. در مجموع، ویژگی‌های این مقاله به صورت زیر بیان می‌شوند:

- بررسی پدیده انشعابات در ریزشبهک‌های مبتنی بر منابع اینورتری به دنبال فرآیند تنظیم پارامترهای افتری؛
 - اجتناب از وقوع انشعاب در سیستم با روش امیدانس مجازی؛
 - مقایسه اثر نسبت X/R امیدانس مجازی از منظر انشعابات و سیگنال کوچک بر پایداری ریزشبهک؛
 - طراحی و بهینه‌سازی یک تابع چندهدفه به منظور تسهیم مناسب توان راکتیو هم‌زمان با جلوگیری از وقوع انشعاب در سیستم.
- ادامه مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است. در

۳-۱- مدلسازی DG مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژ

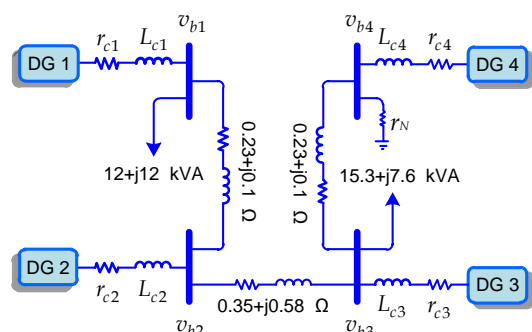
یک ریزشبه به‌طور معمول از بیش از یک DG تشکیل می‌شود؛ بنابراین، هر یک از واحدهای DG در دستگاه مرجع dq خودش مدل می‌شود. به علت وجود اختلاف فاز در بین دستگاههای مرجع dq برای DGهای مختلف، دستگاه مرجع یکی از منابع، دستگاه مرجع مشترک (DQ) در نظر گرفته می‌شود. در مدلسازی، دینامیک‌های سایر DGها با معادله (۳) به دستگاه مرجع مشترک منتقل می‌شوند.

$$[f_{DQ}] = \begin{bmatrix} \cos(\delta_i) & -\sin(\delta_i) \\ \sin(\delta_i) & \cos(\delta_i) \end{bmatrix} [f_{dq}] \quad (3)$$

در این رابطه، δ_i زاویه دستگاه مرجع منبع پراکنده ام نسبت به دستگاه مرجع مشترک است که به‌صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_{com} \quad (4)$$

در این رابطه، ω_{com} فرکانس زاویه‌ای دستگاه مرجع مشترک است. در مدلسازی، با فرض جایگزینی منابع پراکنده با منابع ولتاژ dc ایدئال، از دینامیک‌های باس dc صرف‌نظر می‌شود [۹]؛ بنابراین، تنها معادلات حالت اینورترها و کنترل‌کننده‌های آنها بررسی می‌شود.



شکل (۲): دیاگرام تک‌خطی ریزشبه مطالعه شده

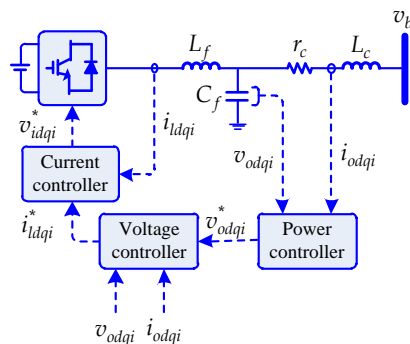
کنترل‌کننده توان با به‌کارگیری تکنیک‌های افتی در معادلات (۱) و (۲)، فرکانس کار ω_i را برای اینورتر پل و مقدار مرجع ولتاژ v_{od}^* و v_{oq}^* را برای کنترل‌کننده ولتاژ تهیه می‌کند. استراتژی کنترل ولتاژ برای هر DG، اندازه ولتاژ خروجی را در امتداد محور d دستگاه مرجع خودش

نمایش می‌دهد و ولتاژ نامی سیستم (V_{ni}) است. P_i و Q_i مقادیر متوسط توان‌های حقیقی و راکتیو اندازه‌گیری شده در خروجی DGها هستند.

کنترل‌کننده ولتاژ وظیفه تنظیم ولتاژ خروجی اینورتر v_o را به عهده دارد. در این کنترل‌کننده برای کاهش خطای ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده نسبت به مقدار ولتاژ مرجع تولیدشده توسط واحد کنترل توان، از یک کنترل‌کننده PI ساده استفاده می‌شود [۲۳]. به‌طور معمول در ساختار کنترل منابع برای افزایش پایداری داخلی، افزایش کیفیت توان و جلوگیری از اضافه‌بار شدن سیستم، یک حلقه کنترل جریان به کار می‌رود. مشابه کنترل‌کننده ولتاژ، در این کنترل‌کننده نیز برای تنظیم جریان خروجی اینورتر از یک کنترل‌کننده PI استاندارد استفاده می‌شود. کنترل‌کننده جریان، اختلاف جریان عبوری از سلف فیلتر با مرجع جریان محاسبه‌شده توسط کنترل‌کننده ولتاژ را به حداقل می‌رساند. خروجی این کنترل‌کننده، سیگنال ولتاژ ورودی به اینورتر است.

۳-۲ مدل دینامیکی ریزشبه

شکل (۲) دیاگرام تک‌خطی یک ریزشبه اینورتری خودگردان ۴ باسه $380V$ و $50Hz$ شامل ۴ منبع پراکنده (DG1~DG4)، ۲ بار ($L1 \sim L2$) و ۳ خط را نمایش می‌دهد. در این ساختار هر منبع به‌وسیله یک امیدانس تزویج $Z_c (0.03+j0.11 \Omega)$ به باس محلی خود متصل شده است. مشخصات سایر عناصر ریزشبه در جدول (۱) داده شده است. هدف از این بخش، استخراج مدل دینامیکی ریزشبه اینورتری در قالب سه ماژول DG مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژ، خطوط و بارها در دستگاه مرجع dq است.



شکل (۱): بلوک دیاگرام منبع اینورتری

کمکی تعریف شده برای کنترل کننده های PI در حلقه کنترل ولتاژ و جریان اند. k_{pvi} , k_{ivi} , k_{pci} و k_{ici} به ترتیب بهره های تناسبی و انتگرالی کنترل کننده های PI در حلقه های کنترل ولتاژ و جریان اند.

جدول (۱): پارامترهای سیستم مطالعه شده

| پارامتر | مقدار |
|------------------------|---|
| فیلتر | $r_f = 0.1 \Omega, L_f = 1.35 \text{ mH}, C_f = 50 \mu\text{F}$ |
| فرکانس قطع | $\omega_c = 31.41 \text{ rad/s}$ |
| شیب مشخصه افقی فرکانس | $m_{p1} = m_{p2} = 9.4 \times 10^{-5}$ $m_{p3} = m_{p4} = 12.5 \times 10^{-5}$ |
| شیب مشخصه افقی ولتاژ | $n_{q1} = n_{q2} = 1.3 \times 10^{-3}$ $n_{q3} = n_{q4} = 1.5 \times 10^{-3}$ |
| پارامترهای کنترل کننده | $k_{pvi} = k_{pv2} = 0.1,$ $k_{ivi1} = k_{iv2} = 420,$ $k_{pvi3} = k_{pvi4} = 0.05,$ $k_{ivi3} = k_{ivi4} = 390,$ $k_{pci1} = k_{pci2} = 15,$ $k_{ici1} = k_{ici2} = 20000,$ $k_{pci3} = k_{pci4} = 10.5,$ $k_{ici3} = k_{ici4} = 16000$ |

معادلات دیفرانسیل فیلتر LC خروجی و اندوکتانس تزویج در روابط (۱۲) تا (۱۴) تعریف شده اند.

$$\frac{di_{ldqi}}{dt} = -\frac{r_f}{L_f} i_{ldqi} - j \omega_n i_{ldqi} + \frac{1}{L_f} (v_{idqi}^* - v_{odqi}) \quad (12)$$

$$\frac{dv_{odqi}}{dt} = -j \omega_n v_{odqi} + \frac{1}{C_f} (i_{ldqi} - i_{odqi}) \quad (13)$$

$$\frac{di_{odqi}}{dt} = -\frac{r_c}{L_c} i_{odqi} - j \omega_n i_{odqi} + \frac{1}{L_c} (v_{odqi} - v_{bdqi}) \quad (14)$$

معادلات (۴) تا (۱۴)، مدل دینامیکی هر DG را از مرتبه ۱۳ تشکیل می دهد. با خطی سازی معادلات دیفرانسیل غیرخطی DG حول نقطه تعادل آن، مدل سیگنال کوچک هر DG در دستگاه مرجع مشترک DQ به صورت زیر نمایش داده می شود.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{Inv,i} \end{bmatrix} = A_{Inv,i} \begin{bmatrix} \Delta x_{Inv,i} \end{bmatrix} + B_{Inv,i} \begin{bmatrix} \Delta v_{bDQ,i} \end{bmatrix} + B_{i\omega_{com}} \Delta \omega_{com} \quad (1-15)$$

قرار می دهد [۲۳]؛ بنابراین:

$$\begin{cases} v_{odi}^* = v_{oi}^* = V_{ni} - n_{qi} Q_i \\ v_{oqi}^* = 0 \end{cases} \quad (5)$$

با اندازه گیری مؤلفه های ولتاژ و جریان خروجی اینورتر v_{odqi} و i_{odqi} ، دینامیک های غیرخطی کنترل کننده های توان منبع پراکنده i ام به فرم زیر نوشته می شود [۹].

$$\frac{dP_i}{dt} = \omega_c (p_i - P_i) \quad (6)$$

$$\frac{dQ_i}{dt} = \omega_c (q_i - Q_i) \quad (7)$$

در این روابط، $p_i = v_{odi} i_{odi} + v_{oqi} i_{oqi}$ و $q_i = v_{odi} i_{oqi} - v_{oqi} i_{odi}$ مؤلفه های لحظه ای توان حقیقی و راکتیو هستند. در ساختار کنترل منابع اینورتری، به منظور دستیابی به کیفیت توان بالا و ایجاد اختلاف زمانی کافی میان پاسخ حلقه کنترل توان و ولتاژ و جریان، از یک فیلتر پایین گذر با فرکانس قطع ω_c در کنترل کننده توان استفاده می شود.

در حلقه های کنترل ولتاژ و جریان داخلی، از تنظیم کننده های تناسبی - انتگرالی استاندارد (PI) استفاده شده است. در فرآیند مدلسازی، به منظور تفکیک حلقه های کنترل ولتاژ و جریان در راستای محور d و q از مؤلفه های تزویج عرضی استفاده می شود. معادلات فضای حالت و معادلات خروجی این کنترل کننده ها عبارت اند از [۸]:

$$\frac{d\varphi_{dq i}}{dt} = (v_{odi}^* - v_{odi}) + j (v_{oqi}^* - v_{oqi}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} i_{ldqi}^* &= [(v_{odi}^* - v_{odi})(k_{pvi} + \frac{k_{ivi}}{s}) + F_i i_{odi} \\ &\quad - \omega_n C_{fi} v_{oqi}] + j [F_i i_{odi} - \omega_n C_{fi} v_{odi} + \\ &\quad (v_{oqi}^* - v_{oqi})(k_{pvi} + \frac{k_{ivi}}{s})] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{d\gamma_{dq i}}{dt} = (i_{ldi}^* - i_{ldi}) + j (i_{lqi}^* - i_{lqi}) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} v_{idqi}^* &= [(i_{odi}^* - i_{odi})(k_{pci} + \frac{k_{ici}}{s}) - \omega_n L_{fi} i_{lqi}] \\ &\quad + j [\omega_n L_{fi} i_{ldi} + (i_{lqi}^* - i_{lqi})(k_{pci} + \frac{k_{ici}}{s})] \end{aligned} \quad (11)$$

در این روابط، $\varphi_{dq i}$ و $\gamma_{dq i}$ به ترتیب متغیرهای حالت

ضمیمه ارائه شده‌اند.

۳-۳- مدل یکپارچه ریزشکبه اینورتری

به منظور ادغام مدل‌های به دست آمده از زیرسیستم‌ها در یک مدل یکپارچه برای ریزشکبه، مطابق شکل (۲) برای محاسبه ولتاژهای گره‌ای از مقاومت مجازی بزرگ (r_N) در باس‌ها استفاده می‌شود [۹]. استفاده از این مقاومت باعث می‌شود سیستم به یک سیستم خودگردان تبدیل شود. رابطه ولتاژ گره‌ای برای یک ریزشکبه شامل s منبع پراکنده، n خط، p بار و m گره عبارت است از:

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{bDQ} \\ \Delta i_{lineDQ} \end{bmatrix} = R_N (M_{Inv} \begin{bmatrix} \Delta i_{oDQ} \\ \Delta i_{LoadDQ} \end{bmatrix} + M_{Net} \begin{bmatrix} \Delta i_{LoadDQ} \end{bmatrix}) \quad (21)$$

در معادله بالا ماتریس R_N یک ماتریس قطری از مرتبه $(2m \times 2m)$ با عناصر r_N است. ماتریس‌های M_{Inv} ، M_{Net} و M_{Load} براساس پیکربندی سیستم تعریف می‌شوند و نقاط اتصال منابع، خطوط و بارها را به گره‌های شبکه ترسیم می‌کنند. ماتریس M_{Inv} از مرتبه $(2m \times 2s)$ و ماتریس M_{Load} از مرتبه $(2m \times 2p)$ به ترتیب نقاط اتصال اینورتر و بار را بر روی گره‌های شبکه مشخص می‌کنند. ماتریس M_{Net} از مرتبه $(2m \times 2n)$ خطوط متصل‌کننده گره‌ها را ترسیم می‌کند.

با ترکیب معادلات دینامیکی VSI، خطوط و بارها، مدل کامل یک ریزشکبه به صورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{Inv} \\ \Delta \dot{i}_{lineDQ} \\ \Delta \dot{i}_{LoadDQ} \end{bmatrix} = A_{sys} \begin{bmatrix} \Delta x_{Inv} \\ \Delta i_{lineDQ} \\ \Delta i_{LoadDQ} \end{bmatrix} \quad (22)$$

که در این رابطه $[\Delta x_{Inv}]$ از حالت‌های همه اینورترهای ریزشکبه تشکیل شده است. $[\Delta i_{line}]$ و $[\Delta i_{Load}]$ از ترکیب همه حالت‌های خطوط و بارها تشکیل شده‌اند. تعداد متغیرهای حالت برای هر اینورتر، خط و بار به ترتیب برابر ۱۳، ۲ و ۲ است؛ بنابراین، برای ریزشکبه جزیره‌ای شکل (۲)، مرتبه ماتریس حالت سیستم (A_{sys}) ، 62×62 است. ماتریس حالت سیستم ریزشکبه اینورتری در بخش ضمیمه ارائه شده است.

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_i \\ \Delta i_{oDQi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{Inv, \omega_i} \\ c_{Inv, c_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{Inv, i} \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

که در این روابط

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{Inv, i} \end{bmatrix} = [\Delta \delta_i \ \Delta P_i \ \Delta Q_i \ \Delta \varphi_{dqi} \ \Delta \gamma_{dqi} \ \Delta i_{ldqi} \ \Delta v_{odqi} \ \Delta i_{odqi}]^T \quad (16)$$

در این روابط، نماد Δ مقدار سیگنال کوچک متغیرهای حالت است و زیرنویس‌های D و Q مؤلفه‌های محور d و q یک متغیر را در قاب مرجع مشترک نشان می‌دهد. ماتریس‌های $A_{Inv, i}$ ، $B_{i \omega_{com}}$ ، $B_{Inv, i}$ ، C_{Inv, c_i} و C_{Inv, ω_i} ماتریس‌های ضرایب‌اند که از نوشتن معادلات DG به فرم ماتریسی به دست می‌آیند و در بخش ضمیمه ارائه شده‌اند.

۳-۲- مدلسازی خطوط و بارها

مشابه با روابط فیلتر LC، با استفاده از قوانین کیرشهف، رابطه ریاضی جریان خط نام متصل بین باس‌های k و j (مدل شده با امیدانس سری) و معادله دینامیکی جریان بار RL متصل به باس نام به صورت روابط زیر در دستگاه مرجع مشترک DQ استخراج می‌شوند.

$$\frac{di_{lineDQi}}{dt} = -\frac{r_{linei}}{L_{linei}} i_{lineDQi} - j \omega_i i_{lineDQi} + \frac{1}{L_{linei}} (v_{bkDQ} - v_{bjDQ}) \quad (17)$$

$$\frac{di_{LoadDQi}}{dt} = -\frac{R_{Loadi}}{L_{Loadi}} i_{LoadDQi} - j \omega_i i_{LoadDQi} + \frac{1}{L_{Loadi}} v_{bDQi} \quad (18)$$

با خطی‌سازی معادلات (۱۷) و (۱۸) حول نقطه تعادل سیستم، مدل سیگنال کوچک معادلات فضای حالت خطوط و بار به صورت روابط زیر به دست می‌آید.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{i}_{lineDQi} \end{bmatrix} = A_{linei} \begin{bmatrix} \Delta i_{lineDQi} \end{bmatrix} + B_{1linei} \begin{bmatrix} \Delta v_{bDQi} \end{bmatrix} + B_{2linei} \Delta \omega_{com} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{i}_{LoadDQi} \end{bmatrix} = A_{Loadi} \begin{bmatrix} \Delta i_{LoadDQi} \end{bmatrix} + B_{1Loadi} \begin{bmatrix} \Delta v_{bDQi} \end{bmatrix} + B_{2Loadi} \Delta \omega_{com} \quad (20)$$

ماتریس ضرایب در معادلات خطوط و بارها در بخش

مرحله تشکیل می‌شود. ابتدا بر مبنای مدل خطی‌سازی‌شده در بخش ۳، با استفاده از ماتریس مشارکت و تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه، پارامترهای مؤثر بر پایداری دینامیکی در حالت عملکرد دائمی سیستم انتخاب می‌شوند. سپس با استفاده از روش تعقیب، نوع انشعاب و نمای فاز سیستم به‌ازای تغییر پارامترها استخراج می‌شود.

۴-۱- تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه

در مرحله اول فرآیند تحلیل پایداری، مقادیر ویژه و ضرایب مشارکت برای انتخاب پارامترهای مؤثر بر پایداری دینامیکی ریزشبه در حالت عملکرد دائم آن بررسی شده‌اند. پارامترهای انتخاب‌شده در این بخش، پارامتر انشعاب در مرحله بعدی در نظر گرفته می‌شوند. مطابق اطلاعات به‌دست‌آمده در بخش ۳، مدل دینامیکی ریزشبه به‌دست‌آمده از ترکیب معادلات دینامیکی VSIها، خطوط و بارهای ریزشبه، به‌صورت رابطه زیر نمایش داده می‌شود.

$$\dot{x} = f(x, \alpha) \quad (23)$$

در این رابطه، x متغیرهای حالت و α پارامترهای سیستم‌اند.

برای به دست آوردن نقطه کار در شرایط عملکرد پایدار سیستم، سمت چپ معادلات (۲۳) برابر صفر قرار داده می‌شود و از حل این معادلات، نقطه کار سیستم مطابق نتایج جدول (۲) استخراج می‌شود. با خطی‌سازی مدل دینامیکی سیستم حول نقطه تعادل پایدار به‌دست‌آمده، ماتریس حالت سیستم (A_{sys}) ، مطابق با رابطه (۲۲) به دست می‌آید. باید در نظر داشت در زمان آغاز به کار ریزشبه، کل سیستم، پایدار است و به‌خوبی در محدوده عملیاتی نامی خود کار می‌کند. شکل (۳) طیف مقادیر ویژه ریزشبه مطالعه‌شده را در نقطه پایدار نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که از این شکل مشاهده می‌شود به‌جز یک مقدار ویژه در مبدأ صفحه s ، مابقی مقادیر ویژه سیستم در نیم‌صفحه چپ صفحه واقع شده‌اند. این مقدار ویژه صفر ناشی از زاویه توان منبع اینورتری شماره ۱ (δ_1) است که به‌عنوان زاویه چارچوب مرجع مشترک ریزشبه انتخاب شده است.

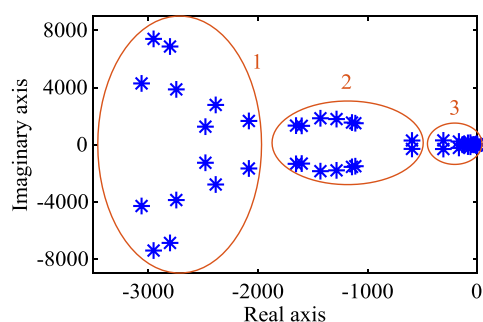
مطابق شکل (۳)، با توجه به فاصله مقادیر ویژه سیستم

۴- آنالیز پایداری ریزشبه اینورتری با استفاده از تئوری انشعابات

به علت ماهیت غیرخطی سیستم ریزشبه، مطالعه پایداری دینامیکی چنین سیستم‌هایی از منظر غیرخطی حائز اهمیت است. تئوری انشعابات، ابزاری قدرتمند برای بررسی رفتار سیستم‌های دینامیکی غیرخطی است. این تئوری اساساً رفتار دینامیکی سیستم را به‌ازای تغییرات پارامترهای آن مطالعه می‌کند. به عبارت دیگر، انشعاب زمانی رخ می‌دهد که تغییرات پیوسته یک پارامتر باعث ایجاد یک تغییر ناگهانی در رفتار سیستم می‌شود [۲۴].

انشعاب هاپف، مرز عمده پایداری محلی در سیستم‌های قدرت الکتریکی است. وقتی انشعاب هاپف رخ می‌دهد، یک جفت مقدار ویژه مختلط روی محور موهومی قرار می‌گیرند. وقوع انشعاب هاپف باعث رفتار نوسانی در سیستم ریزشبه می‌شود. این انشعاب، زیر بحرانی یا فوق بحرانی است. در انشعاب هاپف زیر بحرانی، ناحیه جذب نقطه تعادل پایدار با یک سیکل حد ناپایدار محدود می‌شود و زمانی که پارامتر به سمت مقدار بحرانی خود حرکت می‌کند، دامنه این سیکل حد کوچک‌تر می‌شود و با عبور پارامتر از نقطه بحرانی از بین می‌رود؛ بنابراین، در حالت زیر بحرانی، منطقه پایدار تعریف‌شده با آنالیز سیگنال کوچک ممکن است سیکل‌های حد ناپایدار داشته باشد. در انشعاب هاپف فوق بحرانی، نقطه تعادل پایدار با یک سیکل حد پایدار با دامنه کوچک جایگزین می‌شود. به عبارت دیگر، این انشعاب، سیکل‌های حد پایدار در منطقه ناپایدار (تعریف‌شده با آنالیز سیگنال کوچک) دارد؛ بنابراین، در این شرایط منطقه پایدار خطی حتی برای انحرافات بزرگ‌تر نیز پایدار است.

به‌طور معمول برای یک در ریزشبه در حال کار، تعیین مقدار بحرانی پارامترها برای پیش‌بینی حاشیه پایداری با توجه به وضعیت فعلی آن استفاده می‌شود که این کار برای برنامه‌ریزی آنلاین پارامترهای کنترلی مفید است؛ بنابراین، با تغییر پارامترهای به‌دست‌آمده در محدوده مجاز حاصل از آنالیز سیگنال کوچک، احتمال وقوع انشعاب وجود دارد. مطالعه پایداری یک ریزشبه با تئوری انشعابات از دو



شکل (۳): مقادیر ویژه ماتریس حالت سیستم مطالعه شده

جدول (۲): نقاط کار پایدار سیستم مطالعه شده

| متغیر حالت | مقدار |
|----------------|--------------------------------|
| $P (W)$ | [۵۱۰۳, ۵۱۰۳, ۳۸۳۸, ۳۸۳۸] |
| $Q (Var)$ | [۵۶۹۷, ۳۷۹۱, ۴۷۹۰, ۳۰۷۶] |
| δ | [۰, -۰/۰۰۱۸, -۰/۰۰۶۳, -۰/۰۰۸۴] |
| $v_o (V)$ | [۳۷۲/۶, ۳۷۵/۱, ۳۷۲/۸, ۳۷۵/۴] |
| $i_o (A)$ | [۲۰/۵۳, ۱۶/۹۴, ۱۶/۴۶, ۱۳/۱] |
| $i_{Load} (A)$ | [۳۲/۷۷, ۳۲/۸۱] |

جدول (۳): مقادیر ویژه و آنالیز مشارکت

| مدهای غالب | مقدار | ضریب مشارکت (%) |
|-----------------|---------------------|--|
| $\lambda_{۱,۲}$ | $-۶/۵۷ \pm j ۵۴/۷۷$ | $\delta_1(۱۶/۹), P_1(۱۵), \delta_2(۲۳), P_2(۲۱)$ |
| $\lambda_{۳,۴}$ | $-۸/۲۶ \pm j ۴۵/۶۴$ | $P_3(۱۵), \delta_3(۴۳), P_4(۲۱)$ |
| $\lambda_{۵,۶}$ | $-۱۳/۹ \pm j ۱۶/۹۴$ | $P_5(۱۲), P_6(۶), \delta_4(۲۰), P_7(۸), \delta_5(۲۸), P_8(۱۴)$ |

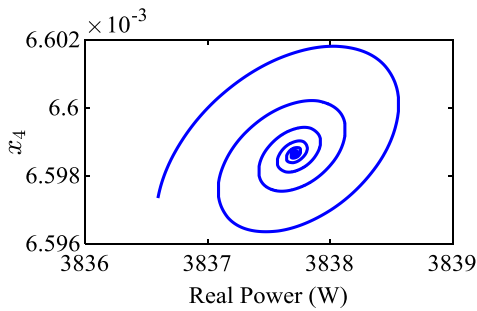
۴-۲- تجزیه و تحلیل انشعابات

در ریزشکبه‌های اینورتری با برنامه‌ریزی بهره‌های افقی، توان ریزشکبه در شرایط مختلف کار آن تنظیم می‌شود. مطابق با نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه و مُدال در بخش ۱-۴، دینامیک‌های سیستم به شدت از بهره افقی فرکانس متأثرند؛ بنابراین، در این بخش، بهره افقی فرکانس منبع اول (m_{p1}) به عنوان پارامتر انشعاب انتخاب شده است. شکل (۴) مکان هندسی مقادیر ویژه غالب ریزشکبه مطالعه شده را به ازای افزایش مقدار m_{p1} نشان می‌دهد. با توجه به شکل، با افزایش مقدار m_{p1} مقادیر ویژه غالب سیستم مطالعه شده به تدریج به سمت محور موهومی حرکت می‌کنند؛ اما تنها مقادیر ویژه مختلط $\lambda_{۱,۲}$ برای مقادیر m_{p1} بزرگ‌تر از $۲۹/۹۴۴۸ \times ۱۰^{-۵}$ از محور موهومی عبور می‌کند. مطابق تعریف، این اتفاق منطبق بر شرایط وقوع انشعاب

از محور موهومی و حقیقی می‌توان آنها را به سه دسته تقسیم کرد. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد مقادیر ویژه فرکانس پایین نزدیک به محور موهومی، مهم‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین مدها برای پایداری سیستم‌اند؛ در حالی که مدهای نزدیک محور حقیقی بر میرایی سیستم تأثیر می‌گذارند [۲۵]. در این سیستم، مقادیر ویژه غالب نزدیک به محور موهومی در دسته ۳ قرار دارند و تغییر آنها می‌تواند به سادگی باعث ناپایداری سیستم شود؛ بنابراین، شناسایی متغیرهای حالتی مؤثر بر مقادیر ویژه غالب سیستم اهمیت زیادی دارد. بر اساس این، چگونگی ارتباط پارامترهای سیستم با متغیرهای حالت مؤثر بر پایداری دینامیکی ریزشکبه بررسی می‌شود. به طور معمول برای تعیین رابطه بین متغیرهای حالت و مقادیر ویژه، ضرایب مشارکت سیستم محاسبه می‌شود. ضریب مشارکت، میزان مشارکت نسبی متغیر حالت k ام در مقدار ویژه λ_m و برعکس است. با فرض اینکه u_{ij}^T و v_{ij} به ترتیب بردارهای ویژه چپ و بردارهای ویژه راست مرتبط با مقدار ویژه λ سیستم‌اند، ضریب مشارکت مد λ_m و متغیر حالت j ام عبارت است از:

$$p_{ij} = \frac{|u_{ij}^T v_{ij}|}{\sum_{k=1}^N |u_{kj}^T v_{kj}|} \quad (۲۴)$$

با استفاده از رابطه (۲۴)، ضرایب مشارکت مربوط به ۳ جفت مد غالب سیستم مطالعه شده (مدهای فرکانس پایین با میرایی کم) با مقدار بیشتر از ۰.۵٪ در جدول (۳) لیست شده‌اند؛ به طوری که از این جدول مشاهده می‌شود مشارکت‌کنندگان اصلی در مدهای غالب ریزشکبه، دینامیک‌های ناشی از کنترل‌کننده‌های توان حقیقی و زاویه دستگاه مرجع منابع‌اند. همچنین نتایج جدول نشان می‌دهند حالت‌های ناشی از کنترل‌کننده‌های توان حقیقی منابع مختلف به طور هم‌زمان بر هر سه جفت مد مختلط غالب تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین، بین منابع مختلف، تداخل دینامیکی وجود دارد و رفتار دینامیکی یک منبع، مستقل از سایر منابع ریزشکبه نیست.



شکل (۵): نمای فاز سیستم به ازای $m_p = 9/4 \times 10^{-5}$

۵- امیدانس مجازی

در ریزشبه‌های اینورتری با عملکرد جزیره‌ای، با فرض سلفی‌بودن شبکه (امپدانس خروجی واحدهای تولید پراکنده) از روش‌های افتی معمول برای تنظیم توان حقیقی و توان راکتیو استفاده می‌شود؛ اما در حالت کلی، فرض سلفی‌بودن همواره صادق نیست؛ زیرا امیدانس خروجی این منابع به استراتژی کنترلی آنها نیز وابسته است. به‌علاوه امیدانس فیدرهای سیستم توزیع ممکن است همیشه سلفی نباشند. در این شرایط، استفاده از کنترل‌کننده‌های افتی معمول باعث ایجاد محدودیت‌هایی مثل ایجاد تزویج بین توان حقیقی و توان راکتیو منابع، تقسیم‌نشدن مناسب توان راکتیو بین منابع و ایجاد مدهایی با میرایی ضعیف در سیستم می‌شود [۲۶، ۲۷].

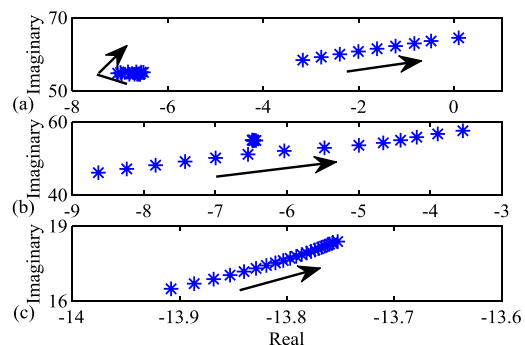
وجود تزویج بین توان‌های حقیقی و راکتیو به کاهش حاشیه پایداری و همچنین کاهش کیفیت پاسخ دینامیکی سیستم در قالب نوسانی شدن پاسخ همراه با میرایی ضعیف منجر می‌شود؛ بنابراین، برای تضعیف تزویج بین توان‌های حقیقی و راکتیو در این ریزشبه‌ها از امیدانس مجازی از جنس سلفی خالص استفاده می‌شود. همچنین در ریزشبه‌های با خاصیت مقاومتی غالب برای تنظیم توان حقیقی و توان راکتیو، با تغییر استراتژی کنترلی از مشخصه‌های معکوس (E-P) و (Q-D) استفاده می‌شود [۲۸-۳۰]. در این نوع ریزشبه‌ها برای مقاومتی‌تر کردن شبکه و تضعیف تزویج میان توان‌های حقیقی و راکتیو از امیدانس مجازی از جنس مقاومتی خالص استفاده می‌شود.

هایف است.

شکل (۵) نمای فاز سیستم را در یک همسایگی از نقطه تعادل و در شرایط کار حالت دائمی سیستم مطالعه‌شده به‌ازای ضریب افتی فرکانس m_p برابر با $9/4 \times 10^{-5}$ نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵)، نمای فاز در این حالت به‌صورت نوسانی میراثونده به نقطه تعادل نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر، نقطه تعادل یک کانون پایدار است. با افزایش مقدار m_p در $26/32 \times 10^{-5}$ مقادیر ویژه $\lambda_{1,2}$ به سمت محور موهومی حرکت می‌کنند و با وجود اینکه نقطه تعادل هنوز به‌صورت خطی پایدار است، مطابق شکل (۶) مسیر فاز سیستم به‌صورت کندتر به سمت نقطه تعادل حرکت می‌کند.

با تغییر ضریب افتی فرکانس به‌عنوان پارامتر انشعاب، در مقدار $m_p = m_p^* = 29/9448 \times 10^{-5}$ یک جفت از مقادیر ویژه سیستم روی محور موهومی قرار می‌گیرد. در این شرایط، $\lambda_{1,2} = \pm j64/4768$ است و سایر مقادیر ویژه در سمت چپ محور موهومی اند؛ در نتیجه، سیستم ریزشبه به‌ازای $m_p = m_p^*$ در معرض انشعاب هایف قرار می‌گیرد. در این حالت، نقطه تعادل به‌صورت غیرخطی پایدار بوده و به‌صورت توپولوژیکی با کانون هم‌ارز است. در صورت عبور m_p از مقدار m_p^* سیستم به‌صورت نوسانی پایدار می‌شود و مطابق شکل (۷) نقطه تعادل با یک سیکل حد پایدار جایگزین می‌شود.

قسمت حقیقی یک مقدار ویژه مختلط، میرایی سیستم را توصیف می‌کند و بخش موهومی آن فرکانس زاویه‌ای نوسانات را نشان می‌دهد؛ بنابراین، در هنگام وقوع انشعاب هایف، سیستم مطالعه‌شده نامیراست و فرکانس نوسانات پریودیک آن حدود $64/4768$ (rad/s) خواهد بود.



شکل (۶): ردیابی مدهای غالب سیستم به‌ازای افزایش m_p

در معادله (۲۲) متفاوت است.

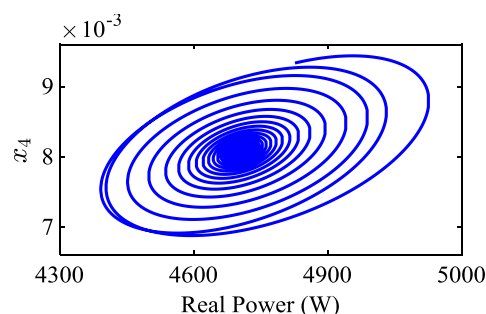
۵-۱- تأثیر نسبت X_v/R_v امپدانس مجازی بر

پایداری و وقوع انشعابات

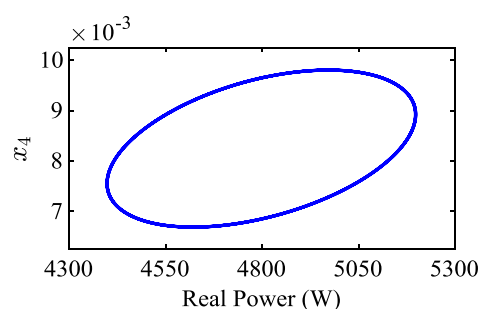
امپدانس خط، یکی از عوامل موثر بر پایداری ریزشبه‌های اینورتری با استراتژی‌های افنی متداول است. مرجع [۳۱] نشان داده است امپدانس بین منابع، تأثیر عمده‌ای بر پایداری دارد. به عبارت دیگر، سیستم‌های با منابع نزدیک به یکدیگر در معرض مشکلات پایداری‌اند؛ بنابراین، با توجه به ساختار هر ریزشبه، ممکن است امپدانس خط بین منابع متفاوت باشد که این مسئله بر حاشیه پایداری سیستم موثر است. روش امپدانس مجازی با تنظیم امپدانس خروجی منابع، ضمن تغییر خاصیت خط، اختلاف افت ولتاژ روی امپدانس خطوط متصل به منابع مختلف را جبران می‌کند؛ بنابراین، استفاده از حلقه امپدانس مجازی مناسب باعث می‌شود فاصله الکتریکی خطوط زیادتر شود.

سیستم انتخاب‌شده برای مطالعه در این مقاله، دارای آشفتگی در نسبت X/R خطوط است. یعنی امپدانس خط بین باس‌های ۲ و ۳ دارای خاصیت سلفی غالب و سایر خطوط دارای خاصیت مقاومتی غالب‌اند؛ بنابراین، برای تعیین بهینه نسبت X_v/R_v امپدانس مجازی، محدوده وسیعی برای تغییرات آن در نظر گرفته شده و تحلیل مقادیر ویژه در این محدوده انجام شده است. همچنین به منظور بررسی اثر امپدانس مجازی بر وقوع انشعاب در اثر تغییر پارامتر، مقدار شیب مشخصه افنی فرکانس نیز در محدوده وسیعی تغییر یافته است. در حالت اول، مقدار ضریب افنی فرکانس برابر $9/4 \times 10^{-5}$ در نظر گرفته شده است. در حالت دوم، ضریب افنی فرکانس روی مقدار بحرانی $29/9448 \times 10^{-5}$ تنظیم شده است که از تحلیل انشعابات به دست آمد. در مرحله آخر، m_p برابر 47×10^{-5} در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده، در جداول (۴) تا (۱۰) مشاهده می‌شوند. در جداول ذکرشده، $\lambda_{1,2}$ ، $\lambda_{3,4}$ و $\lambda_{7,8}$ مقادیر ویژه غالب ریزشبه‌اند که بیشترین تأثیر را در وقوع انشعابات خواهند داشت و به منظور افزایش حاشیه پایداری سیستم باید در ناحیه D شکل با شیب ± 0.5 قرار



شکل (۶): نمای فاز سیستم به ازای $m_p = 26/32 \times 10^{-5}$

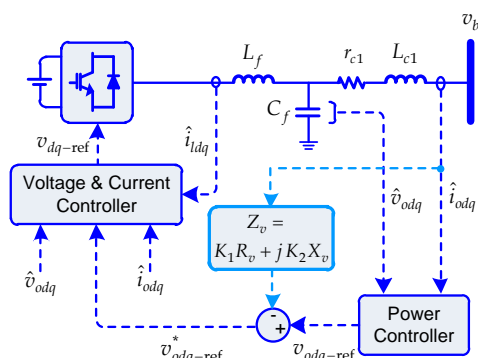


شکل (۷): نمای فاز سیستم با وقوع انشعاب هاپف

روش‌های فوق برای کاهش تزویج میان توان حقیقی و توان راکتیو در ریزشبه‌هایی با نسبت X/R متفاوت در خطوط موثر نیستند؛ بنابراین، در چنین شبکه‌هایی از امپدانس مجازی مختلط شامل ترم‌های مقاومتی و سلفی به صورت $Z_v = R_v + jX_v$ در ساختار کنترل منابع (بدون نیاز به تغییر استراتژی کنترل افنی) استفاده می‌شود. شکل (۸) بلوک دیاگرام یک DG را با حضور حلقه امپدانس مجازی در ساختار کنترل آن نشان می‌دهد. مطابق شکل (۸)، با اضافه‌شدن امپدانس مجازی در حلقه کنترل توان، مقدار مرجع برای کنترل‌کننده ولتاژ، $v_{odq-ref}^*$ ، از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$v_{odq-ref i}^* = v_{odq-ref} - Z_v \hat{i}_{odq} \quad (25)$$

در غیاب امپدانس مجازی، ولتاژ خروجی کنترل‌کننده توان ($v_{odq-ref}$) با مقدار مرجع ولتاژ ورودی به حلقه کنترل ولتاژ ($v_{odq-ref}^*$) برابر است. درخور ذکر است پیاده‌سازی امپدانس مجازی با رابطه (۲۵) در ساختار کنترل منابع ریزشبه، سبب اضافه‌شدن ترم‌های جدید به معادلات (۸) و (۹) در کنترل‌کننده ولتاژ می‌شود؛ بنابراین، ماتریس حالت سیستم با حضور امپدانس مجازی، با ماتریس حالت سیستم



شکل (۸): بلوک دیاگرام DG با حلقه امیدانس مجازی

جداول (۵) و (۶) نتایج حاصل از تحلیل مقادیر ویژه ریزشبهه مطالعه شده را در شرایط استفاده از امیدانس مجازی از نوع مقاومتی خالص نشان می دهند. جدول (۷) نتایج حاصل از تحلیل مقادیر ویژه ریزشبهه مطالعه شده را در شرایط استفاده از امیدانس مجازی از نوع مقاومتی غالب نشان می دهد.

با توجه به جدول (۵)، به ازای مقدار مقاومت $\Omega = 0.35$ شاخص پایداری سیستم و نسبت میرایی مدهای غالب در مقایسه با وضعیتی بهبود یافته که از امیدانس مجازی در سیستم استفاده نشده است (به جدول ۴ نگاه کنید)؛ با این حال، مطابق جدول (۵)، با افزایش ضریب افتی فرکانس سیستم به مقدار $m_p = 29/9448 \times 10^{-5}$ با وجود بهبود شاخص BI نسبت به شرایط مشابه در جدول (۴)، مقادیر ویژه غالب $\lambda_{1,2}$ سیستم از محدوده میرایی ± 0.5 خارج و به محور موهومی نزدیک شده است؛ بنابراین، استفاده از مقدار $\Omega = 0.35$ به عملکرد پذیرفتنی کنترل کننده امیدانس مجازی از نظر جلوگیری از وقوع انشعابات منجر نمی شود.

جدول (۶) نتایج آنالیز مقادیر ویژه سیستم را به ازای $\Omega = 0.5$ نشان می دهد. با مقایسه نتایج جدول (۵) و (۶)، افزایش مقاومت مجازی باعث بهبود نسبی شاخص پایداری (SI)، شاخص انشعاب (BI) و نسبت میرایی (ξ_i) مدهای غالب سیستم شده است؛ با این حال، در این شرایط نیز به ازای حداکثر مقدار ضریب افتی فرکانس، نسبت میرایی مقادیر ویژه $\lambda_{1,2}$ سیستم به مقدار $\xi_i = 0.1520$ کاهش یافته است و این مدها از محدوده مجاز میرایی خارج شده اند؛ به طوری که نشان داده شد اگرچه افزایش مقاومت مجازی باعث جلوگیری از وقوع انشعاب می شود، هم زمان به

گیرند؛ بنابراین، نسبت میرایی (ξ_i) هر یک از مدهای ذکر شده، رابطه (۲۶)، یک پارامتر مهم در تعیین بهینه مقدار امیدانس مجازی است. به عبارت دیگر، هرچه نسبت میرایی به صفر نزدیک تر باشد، سیستم به مرز ناپایداری، نزدیک تر و هرچه به ۱ نزدیک تر باشد، سیستم پایدارتر است.

$$\xi_i = \frac{-\text{Re}(\lambda_i)}{\sqrt{(\text{Re}(\lambda_i))^2 + (\text{Im}(\lambda_i))^2}} \quad (26)$$

در جداول (۴) تا (۱۰)، SI شاخص پایداری سیگنال کوچک سیستم، مطابق معادله (۲۷) نمایش داده شده است [۳۲]. این رابطه با محاسبه میانگین نسبت های میرایی کل سیستم، وضعیت پایداری کلی سیستم را در حالت های مختلف عملکرد نشان می دهد؛ با این حال، این شاخص پایداری نمی تواند به صورت خاص، اثر مقادیر ویژه غالب مؤثر بر وقوع انشعاب در سیستم را نشان دهد؛ بنابراین، به منظور بررسی تأثیر مقادیر ویژه غالب بر حاشیه پایداری در شرایط مختلف عملکرد سیستم (به ازای مقادیر مختلف m_p و نسبت های متفاوت X_v/R_v شاخص انشعابات BI، به صورت رابطه (۲۸) تعریف می شود. در این رابطه، به کارگیری یک تابع نمایی که توان آن بخش حقیقی مقادیر ویژه است، هرچه مقادیر ویژه از محور موهومی دورتر شوند، تأثیر آنها بر شاخص انشعاب کاهش می یابد. به عبارت دیگر، با افزایش حاشیه پایداری، شاخص انشعاب کوچک تر می شود. همچنین می توان با هدف افزایش وزن مقادیر ویژه مؤثر بر وقوع انشعابات (مدهای نزدیک به محور موهومی)، شیب تابع نمایی را افزایش داد ($l \geq 1$). در رابطه (۲۹)، ΔV_i انحراف ولتاژ باس نام را از مقدار مطلوب آن نشان می دهد.

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i}{n} \quad (27)$$

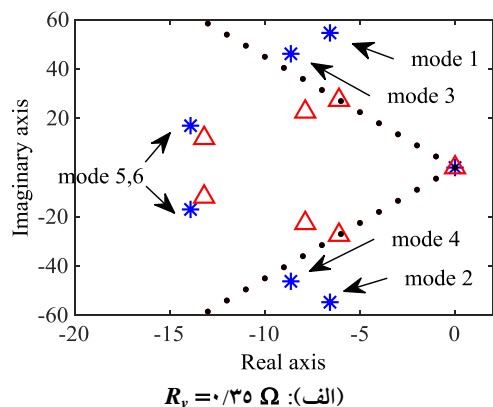
$$BI = \frac{\sum_{i=1}^n \xi_i e^{l \sigma_i}}{n} \quad (28)$$

$$\Delta V_i = |V_i - V_i^{ideal}| \quad (29)$$

در معادلات بالا $\sigma_i = \text{Re}(\lambda_i)$ قسمت حقیقی مقدار ویژه نام (λ_i) سیستم است. V_i اندازه ولتاژ در باس نام و V_i^{ideal} مقدار مطلوب آن است.

می‌شود، بهبود یافته است؛ درحالی‌که در این شرایط شاخص انشعاب نشان از نزدیک شدن جزئی مقادیر ویژه غالب سیستم به سمت محور موهومی (نسبت به حالت سلفی خالص) دارد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند استفاده از امیدانس مجازی سلفی غالب به افزایش نسبت میرایی مدهای غالب منجر شده است؛ بنابراین، تنظیم امیدانس مجازی به صورت سلفی غالب، هم براساس تحلیل سیگنال کوچک و هم از نظر احتمال وقوع انشعاب، نسبت به دیگر مقادیر امیدانس مجازی، مقدار مناسب‌تری است.

شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) به ترتیب طیف مقادیر ویژه غالب ریزشکبه را در حالت استفاده تنها از کنترل افقی و با حضور امیدانس مجازی (مقاومتی خالص با مقدار Ω $R_p = 0.35$ و سلفی غالب به صورت $\Omega = 0.2 + j0.5$) در سیستم کنترل منابع به‌ازای $m_p = 9/4 \times 10^{-5}$ نشان می‌دهند. با توجه به شکل (۹-الف)، استفاده از امیدانس مجازی مقاومتی خالص باوجود اینکه باعث انتقال مقادیر ویژه غالب ریزشکبه به داخل محدوده میرایی شده، نتوانسته است آنها را به اندازه کافی از مرز پایداری دور کند تا حاشیه پایداری کافی را برای جلوگیری از وقوع انشعاب در سیستم ایجاد کند. این درحالی است که مطابق شکل (۹-ب)، استفاده از امیدانس مجازی سلفی غالب در مقایسه با حالتی که روش افقی معمول به‌تنهایی استفاده می‌شود، باعث شد است مقادیر ویژه غالب ریزشکبه به اندازه کافی از محور موهومی دور شوند؛ بنابراین، با استفاده از امیدانس مجازی سلفی غالب، از وقوع انشعاب در سیستم به‌ازای تغییر پارامترهای افقی فرکانس جلوگیری می‌شود.



افزایش انحراف ولتاژ منجر می‌شود؛ در نتیجه، استفاده از یک مقاومت مجازی بزرگ‌تر، راه‌حل مناسبی برای جلوگیری از وقوع انشعاب نیست.

جدول (۷) نتایج حاصل از تحلیل مقادیر ویژه سیستم را به‌ازای امیدانس مجازی مقاومتی غالب به صورت $\Omega = 0.2 + j0.5$ نمایش می‌دهد. مطابق نتایج جدول (۷)، استفاده از امیدانس مقاومتی غالب در مقایسه با امیدانس مقاومتی خالص باعث افزایش شاخص پایداری، شاخص انشعاب و نسبت میرایی مدهای غالب ریزشکبه شده است. در این حالت نیز همچنان به‌ازای حداکثر مقدار ضریب افتی فرکانس، مدهای $\lambda_{1,2}$ از محدوده D شکل خارج می‌شوند و موجب افزایش احتمال وقوع انشعابات در سیستم خواهند شد؛ در نتیجه، به‌کارگیری امیدانس مجازی با خاصیت مقاومتی خالص و غالب، حاشیه پایداری مناسب را به‌ازای مقادیر مختلف ضریب افقی فرکانس تضمین نکرده است.

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه سیستم مطالعه شده به‌ازای امیدانس مجازی سلفی خالص با مقادیر $X_p = 0.2 \Omega$ و $X_p = 0.5 \Omega$ به ترتیب در جداول (۸) و (۹) آمده‌اند. مطابق نتایج حاصل از این جداول، با تنظیم امیدانس مجازی به صورت سلفی خالص، شاخص انشعاب (BI) نسبت به حالتی که از امیدانس مجازی مقاومتی (خالص و غالب) استفاده می‌شود، بهبود چشمگیری یافته است. به عبارت دیگر، امیدانس مجازی سلفی خالص باعث دورتر شدن مقادیر ویژه غالب از محور موهومی و کاهش احتمال وقوع انشعاب به‌ازای بازه وسیع‌تری از m_p شده است. این درحالی است که از مقایسه نتایج جداول (۸) و (۹) با جدول (۷) مشاهده می‌شود شاخص پایداری (SI) در حالت استفاده از امیدانس مجازی سلفی خالص، تضعیف شده است؛ بنابراین، از نقطه نظر سیگنال کوچک، استفاده از امیدانس مجازی مقاومتی غالب و از دید انشعابات، استفاده از امیدانس مجازی سلفی خالص ارجحیت دارد.

جدول (۱۰) نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه ریزشکبه را به‌ازای امیدانس مجازی سلفی غالب به صورت $\Omega = 0.2 + j0.5$ نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، به‌ازای این مقدار امیدانس مجازی، شاخص پایداری سیستم نسبت به حالتی که از امیدانس مجازی سلفی خالص استفاده

افزایش حاشیه پایداری و جلوگیری از وقوع انشعاب، باید مقادیر ترم سلفی و مقاومتی امیدانس مجازی شوند.

۳-۵- بهینه‌سازی امیدانس مجازی

تعیین مقادیر بهینه ترم سلفی و مقاومتی امیدانس مجازی با هدف دستیابی به حداکثر دقت تقسیم توان، براساس یک مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌شوند. در این مسئله، توان اکتیو گردشی، جریان گردشی بین منابع و اختلاف اندازه ولتاژ باس متصل به منبع نسبت به مقدار مطلوب آن، معیارهای بهینه‌سازی مطابق با روابط (۳۱) الی (۳۳) در نظر گرفته شده‌اند. نزدیک‌تر بودن مقادیر این شاخص‌ها به صفر نشان‌دهنده عملکرد مناسب‌تر حلقه کنترل ولتاژ و حلقه امیدانس مجازی است.

$$J_1 = \frac{2}{N_s(N_s-1)} \sum_{k=1}^{N_s} \sum_{i=k+1}^{N_s} \left| \frac{P_k}{P_k^n} - \frac{P_i}{P_i^n} \right| \quad (31)$$

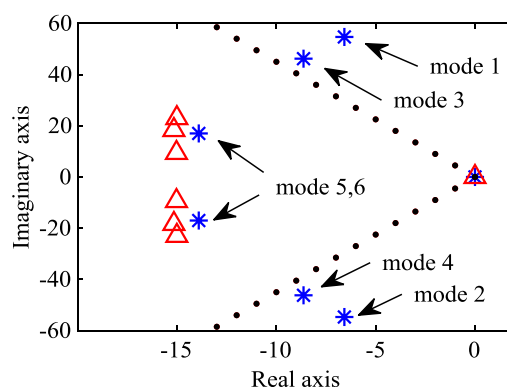
$$J_2 = \frac{2}{N_s(N_s-1)} \sum_{k=1}^{N_s} \sum_{i=k+1}^{N_s} \left| \frac{i_k}{i_k^n} - \frac{i_i}{i_i^n} \right| \quad (32)$$

$$J_3 = \frac{1}{N_{LB}} \sum_{i=1}^{N_{LB}} |V_i - V_i^{ideal}| \quad (33)$$

در روابط بالا N_{LB} نشان‌دهنده تعداد باس‌های بار است. توان اکتیو خروجی و ظرفیت نامی تولید توان اکتیو منبع k ام به ترتیب با P_k و P_k^n نشان داده شده است. شاخص J_2 مشابه با شاخص J_1 تعریف شده است. با ترکیب وزندار شاخص‌های J_1 ، J_2 و J_3 یک شاخص چندمنظوره برای ارزیابی عملکرد طرح حلقه کنترل ولتاژ پیشنهادی به دست می‌آید. شاخص چندمنظوره، J به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\min J = w_1 J_1 + w_2 J_2 + w_3 J_3 \quad (34)$$

ضرایب وزنی w_1 ، w_2 و w_3 اهمیت شاخص‌های J_1 ، J_2 و J_3 را در شاخص J مشخص می‌کنند. شاخص J به عنوان تابع هدف مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در مشخصه‌های کنترلی به کار گرفته شده، از روش‌های اکتیو فرکانس و ولتاژ معمول برای تقسیم توان حقیقی و راکتیو بین منابع استفاده شده است. در این روش، توان حقیقی به نسبت ظرفیت اسمی منابع بین آنها تقسیم می‌شود. شیب مشخصه‌های اکتیو ω -P منابع براساس حداکثر افت فرکانس



$$Z_v = 0.2 + j0.5 \Omega \quad (ب)$$

شکل (۹): مدهای غالب بدون (*)/با (Δ) حضور امیدانس مجازی

۲-۵- نتایج شبیه‌سازی

شکل (۱۰) خروجی توان راکتیو و توان حقیقی منابع ریزشبهه مطالعه شده را به‌ازای مقادیر جدول (۱) نشان می‌دهد. از شکل (۱۰-الف) مشاهده می‌شود تنها با حضور کنترل اکتیو متداول در $0 \leq t < 1/5$ s، پاسخ سیستم قبل از رسیدن به حالت دائمی، نوساناتی گذرا را تجربه می‌کند. در این شرایط، خطای حالت دائم تسهیم توان راکتیو در محدوده $\pm 9\%$ قرار دارد. مقدار خطای تسهیم توان راکتیو برای هر منبع از رابطه (۳۰) محاسبه می‌شود [۳۳].

$$Q_{e,i} = \frac{Q_i}{Q_{n,i}} - \frac{\sum_{k=1}^{N_s} Q_k}{\sum_{k=1}^{N_s} Q_{n,k}} \quad (30)$$

در این رابطه، $Q_{e,i}$ خطای تسهیم توان راکتیو منبع i ام است. Q_i و $Q_{n,i}$ به ترتیب توان راکتیو خروجی و نامی DG i ام هستند. N_s تعداد منابع ریزشبهه را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۱۰-الف)، پس از اضافه‌شدن حلقه امیدانس مجازی سلفی غالب با مقدار $Z_v = 0.2 + j0.5 \Omega$ (به‌دست‌آمده از جدول (۱)) به سیستم کنترل منابع در $s \geq 1/5$ $t \geq 1/5$ $t < 2/5$ s)، نوسان گذرای سیستم کاهش یافته و خطای تسهیم توان راکتیو در حالت دائم در محدوده $\pm 7\%$ قرار گرفته است. اگرچه به‌کارگیری امیدانس مجازی سلفی غالب در ساختار کنترل منابع باعث بهبود پایداری و جلوگیری از وقوع انشعاب در سیستم می‌شود، در این شرایط، میزان خطای تسهیم توان راکتیو همچنان بالاست؛ بنابراین، به‌منظور افزایش دقت تسهیم توان راکتیو هم‌زمان با

جدول (۱۱): مقادیر بهینه امیدانس مجازی

| | K_1 | K_2 | Z_v |
|--------|---------|---------|-----------------|
| منبع ۱ | ۰/۷۰۷۳۰ | ۰/۸۴۸۷۶ | ۰/۱۴۱۵+j ۰/۴۲۴۴ |
| منبع ۲ | ۰/۴۰۸۴۵ | ۰/۴۹۰۱۴ | ۰/۰۸۲+j ۰/۲۴۵ |
| منبع ۳ | ۰/۹۴۳۵۰ | ۱/۱۳۲۲۰ | ۰/۱۸۸۷+j ۰/۵۶۶۱ |
| منبع ۴ | ۰/۵۵۰۲۵ | ۰/۶۶۰۳۰ | ۰/۵۵۰۲+j ۰/۶۶۰۳ |

شکل (۱۰-ب) خروجی توان حقیقی منابع را به‌ازای کنترل افتی متداول ($0 \leq t < 1/5$ s)، استفاده از امیدانس مجازی سلفی غالب با مقدار $Z_v = 0/2 + j0/5 \Omega$ در سیستم کنترل منابع ($1/5 \leq t < 2/5$ s) و استفاده از امیدانس مجازی سلفی غالب با مقادیر بهینه مطابق مقادیر جدول (۱۱) (در محدوده $2/5 \leq t < 4$ s) نشان می‌دهد با توجه به این شکل، استفاده از امیدانس مجازی باعث کاهش نوسانات گذرای ناشی از استفاده از روش کنترل افتی معمول شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در ریزشکبه‌های کنترل‌شده با روش‌های افتی به دلیل اینرسی کم اینورترهای منبع ولتاژ، تغییر پارامترهای سیستم به ناپایداری ریزشکبه منجر می‌شود. در مقاله حاضر، یک مدل فضای حالت کامل برای بررسی رفتار دینامیکی ریزشکبه‌های اینورتری استخراج شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز مقادیر ویژه و مدال نشان می‌دهد بهره‌های افتی در کنترل‌کننده‌های توان منابع، بیشترین تأثیر را بر پایداری سیستم دارند. با استفاده از تئوری انشعابات، نشان داده شد افزایش ضریب افتی فرکانس به وقوع انشعاب هاپف فوق بحرانی در سیستم منجر می‌شود. به سبب اینکه امیدانس خط، یکی از عوامل موثر بر پایداری ریزشکبه‌های اینورتری با استراتژی‌های افتی متداول است، در این مقاله به منظور افزایش حاشیه پایداری پارامتری سیستم، از یک حلقه امیدانس مجازی در ساختار کنترل منابع استفاده می‌شود و با معرفی یک شاخص انشعاب، انواع امیدانس مجازی از منظر سیگنال کوچک و انشعابات مقایسه می‌شود. نتایج حاصل از این مقایسه نشان می‌دهند استفاده از امیدانس مجازی مختلط شامل ترم‌های مقاومتی و سلفی (از جنس سلفی غالب) در شبکه‌هایی با نسبت X/R متفاوت در خطوط، می‌تواند بدون نیاز به تغییر استراتژی کنترل افتی

پذیرفته‌شده در ریزشکبه، ظرفیت اسمی منابع و مقدار بحرانی به‌دست‌آمده از آنالیز انشعابات تعیین می‌شود؛ بنابراین، ضریب m_{pi} در فرآیند بهینه‌سازی معلوم فرض می‌شود. به همین صورت، شیب مشخصه افتی ولتاژ معمول براساس ظرفیت تولید توان راکتیو منابع و حداکثر انحراف ولتاژ قابل قبول برای شبکه تعیین می‌شود. قیود مسئله بهینه‌سازی به‌صورت معادلات (۳۵) تا (۳۷) تعریف می‌شوند.

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (35)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (36)$$

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}$$

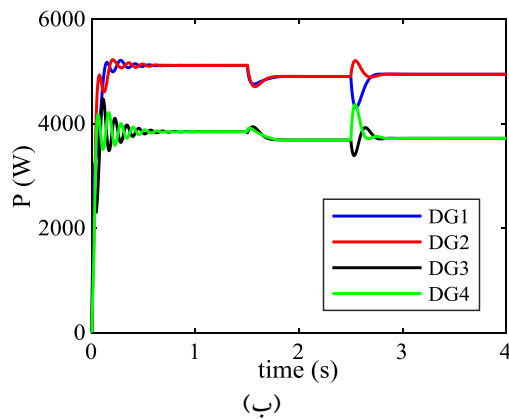
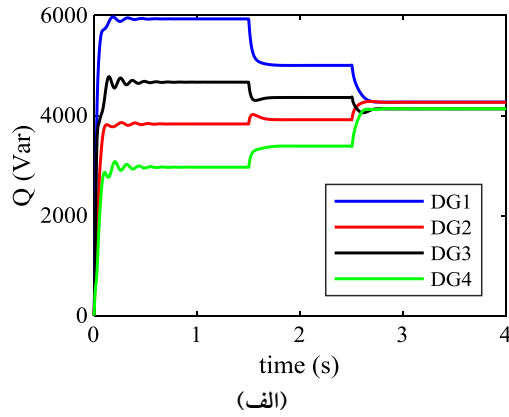
$$0 \leq K_1 \leq 1 \quad (37)$$

$$0 \leq K_2 \leq 1.2$$

معادله (۳۵) محدوده پذیرفتنی دامنه ولتاژ را نشان می‌دهد. قیود تولید طبق معادله (۳۶) برای اجتناب از اضافه‌بار شدن ژنراتورها در نظر گرفته می‌شود. در نهایت برای تعیین مقدار بهینه امیدانس مجازی، ضرایب K_1 و K_2 به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی به ترم‌های حقیقی و موهومی در رابطه (۲۵) اضافه می‌شوند ($Z_v = K_1 R_v + j K_2 X_v$). مقادیر حدی این ضرایب در رابطه (۳۷) با توجه به نسبت X/R شبکه انتخاب می‌شوند.

در این مقاله برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. جدول (۱۱)، مقادیر ضرایب K_1 و K_2 و همچنین مقادیر امیدانس مجازی بهینه هر منبع را نشان می‌دهد که از حل مسئله بهینه‌سازی به دست آمده‌اند. شکل (۱۰-الف) در محدوده زمانی $2/5 \leq t < 4$ s، خروجی توان راکتیو منابع ریزشکبه را به‌ازای استفاده از مقادیر بهینه امیدانس مجازی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌ازای این مقدار از ضرایب K_1 و K_2 ، تسهیم توان راکتیو به‌صورت مناسب حاصل شده است. مطابق رابطه (۳۰)، خطای تسهیم توان راکتیو در ریزشکبه به‌ازای مقادیر بهینه امیدانس مجازی در محدوده $\pm 0/14$ قرار دارد؛ بنابراین، با به‌کارگیری امیدانس مجازی سلفی غالب با مقدار بهینه در ساختار کنترل منابع پراکنده، علاوه بر جلوگیری از احتمال وقوع انشعاب در ریزشکبه، توان راکتیو نیز به‌طور مناسب بین منابع تقسیم شده است.

معمول، با دورکردن مقادیر ویژه غالب از محور موهومی، مقدار بهینه ترم‌های مقاومتی و سلفی امپدانس مجازی با هدف افزایش حاشیه پایداری سیستم از وقوع انشعاب جلوگیری کرد. در پایان، با حل یک مسئله بهینه‌سازی، هدف کاهش خطای تسهیم توان راکتیو تعیین شد.



شکل (۱۰): (الف) توان راکتیو و (ب) توان حقیقی منابع

جدول (۴): بدون حضور امپدانس مجازی

| $X_v = 0, R_v = 0$ | | | | | | | |
|-----------------------------|--|--|---|--|--------|---------------------|-------------------|
| $m_{p1} = m \times 10^{-5}$ | $\lambda_{1,2}$ | $\lambda_{3,4}$ | $\lambda_{5,6}$ | $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \Delta V_4$ | SI | BI $\times 10^{-6}$ | وضعیت مقادیر ویژه |
| 9.4 | $-6.5729 \pm j54.7703$ ($\xi = 0.1192$) | $-8.2682 \pm j45.6428$ ($\xi = 0.1782$) | $-13.9009 \pm j16.9386$ ($\xi = 0.6344$) | 0, 0, 0, 0 | 0.3908 | 6.5422 | روی مرز |
| 29.9448 | $0 \pm j64.4768$ ($\xi = 0$) | $-6.4443 \pm j55.0777$ ($\xi = 0.1162$) | $-13.7557 \pm j20.7010$ ($\xi = 0.5534$) | 0, 0, 0, 0 | 0.3795 | 123.17 | خارج محدوده |

جدول (۵): با حضور امیدانس مجازی مقاومتی خالص

| $X_p = 0, R_p = 0.35$ | | | | | | | |
|-----------------------------|---|---|--|--|--------|---------------------|-------------------|
| $m_{p1} = m \times 10^{-5}$ | $\lambda_{1,2}$ | $\lambda_{3,4}$ | $\lambda_{5,6}$ | $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \Delta V_4$ | SI | $BI \times 10^{-6}$ | وضعیت مقادیر ویژه |
| 9.4 | -6.1020 $\pm j27.4069$ ($\xi = 0.2173$) | -7.8757 $\pm j22.6421$ ($\xi = 0.3285$) | -13.1922 $\pm j11.9043$ ($\xi = 0.7424$) | 6.988, 5.770, 5.835, 4.635 | 0.7081 | 20.087 | روی مرز |
| 29.9448 | -4.5632 $\pm j32.0077$ ($\xi = 0.1411$) | -6.064 $\pm j27.4415$ ($\xi = 0.2158$) | -12.7814 $\pm j15.3208$ ($\xi = 0.6406$) | 7.666, 6.3102, 6.029, 4.954 | 0.6986 | 62.394 | خارج محدوده |
| 47 | -2.5774 $\pm j37.8581$ ($\xi = 0.0679$) | -6.0563 $\pm j27.4481$ ($\xi = 0.2155$) | -12.6255 $\pm j15.8156$ ($\xi = 0.6239$) | 8.015, 6.460, 6.095, 5.055 | 0.6956 | 185.78 | خارج محدوده |

جدول (۶): با حضور امیدانس مجازی مقاومتی خالص

| $X_p = 0, R_p = 0.5$ | | | | | | | |
|-----------------------------|---|---|--|--|--------|---------------------|-------------------|
| $m_{p1} = m \times 10^{-5}$ | $\lambda_{1,2}$ | $\lambda_{3,4}$ | $\lambda_{5,6}$ | $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \Delta V_4$ | SI | $BI \times 10^{-6}$ | وضعیت مقادیر ویژه |
| 9.4 | -7.4646 $\pm j21.7760$ ($\xi = 0.3243$) | -8.9759 $\pm j19.4584$ ($\xi = 0.4572$) | -13.0995 $\pm j9.5570$ ($\xi = 0.8079$) | 9.862, 8.149, 8.379, 6.656 | 0.7156 | 8.0418 | داخل محدوده |
| 29.9448 | -6.3929 $\pm j26.1044$ ($\xi = 0.2379$) | -7.4199 $\pm j21.7857$ ($\xi = 0.3224$) | -12.6205 $\pm j12.8315$ ($\xi = 0.7012$) | 11.563, 8.771, 8.550, 7.036 | 0.7049 | 18.936 | روی مرز |
| 47 | -4.8314 $\pm j31.4235$ ($\xi = 0.1520$) | -7.4134 $\pm j21.7893$ ($\xi = 0.3221$) | -12.4532 $\pm j13.1875$ ($\xi = 0.6866$) | 12.260, 9.0, 8.628, 7.172 | 0.7016 | 46.195 | خارج محدوده |

جدول (۷): با حضور امیدانس مجازی مقاومتی غالب

| $X_p = 0.2, R_p = 0.5$ | | | | | | | |
|-----------------------------|---|--|--|--|--------|---------------------|-------------------|
| $m_{p1} = m \times 10^{-5}$ | $\lambda_{1,2}$ | $\lambda_{3,4}$ | $\lambda_{5,6}$ | $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \Delta V_4$ | SI | $BI \times 10^{-6}$ | وضعیت مقادیر ویژه |
| 9.4 | -9.2019 $\pm j21.6440$ ($\xi = 0.3913$) | -10.4122 $\pm j17.2437$ ($\xi = 0.5169$) | -13.5125 $\pm j8.8715$ ($\xi = 0.8359$) | 9.899, 8.378, 8.416, 6.864 | 0.7173 | 0.5356 | داخل محدوده |
| 29.9448 | -8.125 $\pm j26.722$ ($\xi = 0.2909$) | -9.1593 $\pm j21.6626$ ($\xi = 0.3894$) | -13.1565 $\pm j12.1103$ ($\xi = 0.7358$) | 11.122, 9.076, 8.643, 7.257 | 0.7065 | 1.0642 | داخل محدوده |
| 47 | -6.7386 $\pm j32.4940$ ($\xi = 0.2031$) | -9.1514 $\pm j21.6687$ ($\xi = 0.3891$) | -13.0437 $\pm j12.4485$ ($\xi = 0.7234$) | 11.718, 9.302, 8.730, 7.391 | 0.7032 | 2.0811 | خارج محدوده |

جدول (۸): با حضور امیدانس مجازی سلفی خالص

| $X_p = 0.2, R_p = 0$ | | | | | | | |
|-----------------------------|--|--|--|--|--------|---------------------|-------------------|
| $m_{p1} = m \times 10^{-5}$ | $\lambda_{1,2}$ | $\lambda_{3,4}$ | $\lambda_{5,6}$ | $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \Delta V_4$ | SI | $BI \times 10^{-6}$ | وضعیت مقادیر ویژه |
| 9.4 | -14.4298 $\pm j35.0996$ ($\xi = 0.3802$) | -14.7092 $\pm j29.3312$ ($\xi = 0.4483$) | -14.6628 $\pm j14.0718$ ($\xi = 0.7215$) | 3.974, 3.425, 3.2175, 2.6832 | 0.6769 | 0.02289 | داخل محدوده |
| 29.9448 | -13.0973 $\pm j45.1514$ ($\xi = 0.2786$) | -14.4327 $\pm j35.180$ ($\xi = 0.3796$) | -14.6772 $\pm j17.2370$ ($\xi = 0.6483$) | 3.523, 3.9421, 3.448, 2.934 | 0.6691 | 0.03386 | داخل محدوده |
| 47 | -11.8450 $\pm j55.3112$ ($\xi = 0.2094$) | -14.4297 $\pm j35.2045$ ($\xi = 0.3793$) | -14.6986 $\pm j17.7076$ ($\xi = 0.6387$) | 3.532, 4.059, 3.506, 2.999 | 0.6666 | 0.06464 | خارج محدوده |

جدول (۹): با حضور امیدانس مجازی سلفی خالص

| $X_p = 0.5, R_p = 0$ | | | | | | | |
|-----------------------------|--|--|--|--|--------|---------------------|-------------------|
| $m_{p1} = m \times 10^{-5}$ | $\lambda_{1,2}$ | $\lambda_{3,4}$ | $\lambda_{5,6}$ | $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \Delta V_4$ | SI | BI $\times 10^{-6}$ | وضعیت مقادیر ویژه |
| 9.4 | -15.4145 $\pm j23.6229$ ($\xi = 0.5453$) | -15.4839 $\pm j19.00$ ($\xi = 0.6317$) | -15.1718 $\pm j10.1408$ ($\xi = 0.8314$) | 9.611, 8.594, 7.863, 6.841 | 0.6833 | 0.01454 | داخل محدوده |
| 29.9448 | -14.9480 $\pm j32.7320$ ($\xi = 0.4154$) | -15.4080 $\pm j23.7575$ ($\xi = 0.5441$) | -15.2404 $\pm j12.7361$ ($\xi = 0.7673$) | 8.195, 9.893, 8.482, 7.476 | 0.6741 | 0.01406 | داخل محدوده |
| 47 | -14.5855 $\pm j41.1151$ ($\xi = 0.3343$) | -15.4076 $\pm j23.7759$ ($\xi = 0.5438$) | -15.2578 $\pm j12.9855$ ($\xi = 0.7615$) | 8.150, 10.187, 8.635, 7.636 | 0.6713 | 0.01460 | داخل محدوده |

جدول (۱۰): با حضور امیدانس مجازی سلفی غالب

| $X_p = 0.5, R_p = 0.2$ | | | | | | | |
|-----------------------------|--|--|--|--|--------|---------------------|-------------------|
| $m_{p1} = m \times 10^{-5}$ | $\lambda_{1,2}$ | $\lambda_{3,4}$ | $\lambda_{5,6}$ | $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \Delta V_4$ | SI | BI $\times 10^{-6}$ | وضعیت مقادیر ویژه |
| 9.4 | -14.5485 $\pm j21.9647$ ($\xi = 0.5522$) | -14.7892 $\pm j17.2628$ ($\xi = 0.6506$) | -14.8998 $\pm j8.5024$ ($\xi = 0.8685$) | 10.339, 9.193, 8.414, 7.321 | 0.7019 | 0.02641 | داخل محدوده |
| 29.9448 | -13.9129 $\pm j29.9738$ ($\xi = 0.4210$) | -14.5319 $\pm j22.0212$ ($\xi = 0.5508$) | -14.9198 $\pm j11.3550$ ($\xi = 0.7958$) | 9.547, 10.363, 8.978, 7.930 | 0.6920 | 0.03031 | داخل محدوده |
| 47 | -13.3475 $\pm j37.6579$ ($\xi = 0.3341$) | -14.5283 $\pm j22.0374$ ($\xi = 0.5504$) | -14.9252 $\pm j11.6182$ ($\xi = 0.7891$) | 9.678, 10.642, 9.126, 8.0928 | 0.6889 | 0.03588 | داخل محدوده |

ضمایم

با توجه به معادلات فضای حالت زیربخش‌های مختلف اینورتر Δm ، ماتریس‌های ضرایب معادله دینامیکی اینورتر به صورت روابط زیر به دست می‌آیند [۹].

$$B_{INVi} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \frac{-\cos \delta_0}{L_{ci}} & \frac{-\sin \delta_0}{L_{ci}} \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\sin \delta_0}{L_{ci}} & \frac{-\cos \delta_0}{L_{ci}} \end{bmatrix}_{2 \times 13}$$

$$B_{iocom} = [-1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times 13}^T$$

$$C_{INV \ o i} = \begin{cases} [0 \ -m_{pi} \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times 13} & i = 1 \\ [0 \ \dots \ 0]_{1 \times 13} & i \neq 1 \end{cases}$$

$$C_{INV \ c i} = \begin{bmatrix} -I_{odi} \sin \delta_0 & 0 & \dots & 0 & \cos \delta_0 & -\sin \delta_0 \\ -I_{oqi} \cos \delta_0 & 0 & \dots & 0 & \sin \delta_0 & \cos \delta_0 \\ I_{odi} \cos \delta_0 & 0 & \dots & 0 & \sin \delta_0 & \cos \delta_0 \\ -I_{oqi} \sin \delta_0 & 0 & \dots & 0 & \cos \delta_0 & -\sin \delta_0 \end{bmatrix}_{2 \times 13}$$

ماتریس‌های ضرایب در معادله دینامیکی خطوط عبارت‌اند از:

$$A_{NET\ i} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{line\ i}}{L_{line\ i}} & \omega_0 \\ -\omega_0 & -\frac{r_{line\ i}}{L_{line\ i}} \end{bmatrix}$$

$$B_{1NET\ i} = \begin{bmatrix} \dots & \frac{1}{L_{line\ i}} & 0 & \dots & \frac{-1}{L_{line\ i}} & 0 & \dots \\ \dots & 0 & \frac{1}{L_{line\ i}} & \dots & 0 & \frac{-1}{L_{line\ i}} & \dots \end{bmatrix}_{2 \times 2m}$$

$$B_{2NET\ i} = \begin{bmatrix} I_{lineQi} \\ -I_{lineDi} \end{bmatrix}$$

به‌طور مشابه، ماتریس‌های ضرایب در معادله دینامیکی بارها عبارت‌اند از:

$$A_{Load\ i} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{Load\ i}}{L_{Load\ i}} & \omega_0 \\ -\omega_0 & -\frac{r_{Load\ i}}{L_{Load\ i}} \end{bmatrix}$$

$$B_{1Load\ i} = \begin{bmatrix} \dots & \frac{1}{L_{Load\ i}} & 0 & \dots \\ \dots & 0 & \frac{1}{L_{Load\ i}} & \dots \end{bmatrix}_{2 \times 2m}$$

$$B_{2Load\ i} = \begin{bmatrix} I_{LoadQi} \\ -I_{LoadDi} \end{bmatrix}$$

ماتریس معادله حالت یک ریزشبه‌ی اینورتری شامل n خط و m گره به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود که s اینورتر و p بار به آن متصل است.

$$A_{sys} = \begin{bmatrix} A_{INV} + B_{INV} R_N M_{INV} C_{INVc} & B_{INV} R_N M_{NET} & B_{INV} R_N M_{Load} \\ B_{1NET} R_N M_{INV} C_{INVc} + B_{2NET} C_{INV\omega} & A_{NET} + B_{1NET} R_N M_{NET} & B_{1NET} R_N M_{Load} \\ B_{1Load} R_N M_{INV} C_{INVc} + B_{2Load} C_{INV\omega} & B_{1Load} R_N M_{NET} & A_{Load} + B_{1Load} R_N M_{Load} \end{bmatrix}$$

ماتریس ضرایب متغیرهای حالت اینورتر نام در معادله (۱-۱۵)، A_{INVi} عبارت است از:

$$A_{INVi} = \begin{bmatrix} A_{Pi} & 0 & 0 & B_{Pi} \\ B_{V\ 2i} C_{Pvi} & 0 & 0 & B_{V\ 2i} \\ B_{C\ 1i} D_{V\ 1i} C_{Pvi} & B_{C\ 1i} C_{Vi} & 0 & B_{C\ 1i} D_{V\ 2i} + B_{C\ 2i} \\ B_{LCLi} D_{C\ 1i} D_{V\ 1i} C_{Pvi} + & & & A_{LCLi} + \\ B_{LCL2i} [T_{Vi}^{-1} \ 0 \ 0] + & B_{LCLi} D_{C\ 1i} C_{Ci} & B_{LCLi} C_{Ci} & B_{LCLi} (D_{C\ 1i} D_{V\ 2i} + D_{C\ 2i}) \\ B_{LCL3i} C_{Poi} & & & \end{bmatrix}_{13 \times 13}$$

- microgrid with multiple VSG units", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 9, No. 2, pp. 1462-1471, March 2018.
- [16] Y. A. Kuznetsov, "Elements of applied bifurcation theory", Springer, New York, 1997.
- [17] M. Huang, Y. Peng, C. K. Tse, Y. Liu, X. Zha, "Bifurcation and large signal stability analysis of three-phase voltage-source converters under grid voltage dips," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 32, No. 11, pp. 8868-8879, Nov. 2017.
- [18] T. S. Sreeram, D. K. Dheer, S. Doolla, S. Singh, "Hopf bifurcation analysis in droop controlled islanded microgrids", *Inter. Journal Elect. Power Energy Syst.*, Vol. 90, pp. 208-224, Sep. 2017.
- [19] M. Huang, C. K. Tse, S. C. Wong, C. Wan, X. Ruan, "Low-frequency Hopf bifurcation and its effects on stability margin in three-phase PFC power supplies connected to non-ideal power grid," *IEEE Trans. on Circuits and Syst. I – Regular Papers*, Vol. 60, No. 12, pp. 3328-3340, Dec. 2013.
- [20] M. Huang, Y. Peng, C. K. Tse, Y. Liu, and X. Zha, "Bifurcation and large signal stability analysis of three-phase voltage-source converters under grid voltage dips," *IEEE Trans. on Power Electron.*, Vol. 32, No. 11, pp. 8868-8879, Nov. 2017.
- [21] X. Wang, Y. W. Li, F. Blaabjerg, and P. C. Loh, "Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 12, pp. 7019-7037, Dec. 2015.
- [22] G. Shahgholian, B. Fani, M. Moazami, B. Keyvani, H. Karimi, "Improve the reactive power sharing by uses to modify droop characteristics in autonomous microgrids ", *Energy Engineering & Management*, Vol. 9, No. 3, pp. 64-71, Oct. 2019.
- [23] A. Bidram, and A. Davoudi, "Hierarchical structure of microgrids control system", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 3, No. 4, pp. 1963-1976, Dec. 2012.
- [24] G. Revel, A. E. Leon, D. M. Alonso, J. L. Muiola, "Bifurcation analysis on a multimachine power system model", *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, Vol. 57, No. 4, pp. 937-949, Apr. 2010.
- [25] M. Rasheduzzaman, J. Mueller, J. W. Kimball, "An accurate small signal model of inverter-dominated islanded microgrids using reference frame", *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, Vol. 2, No. 4, pp. 1070-1080, Dec. 2014.
- [26] J. W. He, Y. W. Li, "Analysis, design, and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 47, No. 6, pp. 2525-2538, Nov 2011
- [27] H. Mahmood, D. Michaelson, J. Jiang, "Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 3, pp. 1605-1617, March 2015.
- [3] J. M. Guerrero, J. C. Vásquez, J. Matas, M. Castilla, L. G. de Vicuña, M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids – A general approach toward standardization", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 58, No. 1, pp. 158-172, Jan. 2011.
- [4] Y. A.-R. I. Mohamed, E. F. El-Saadany, "Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 23, No. 6, pp. 2806-2816, Nov. 2008.
- [5] M. Sadeghian, B. Fani, "Advanced localized reactive power sharing in microgrids", *Electric Power Systems Research*, Vol. 151, pp. 136-148, Oct. 2017.
- [6] F. Zandi, B. Fani, I. Sadeghkhani, A. Orakzadeh, "Adaptive complex virtual impedance control scheme for accurate reactive power sharing of inverter interfaced autonomous microgrids", *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 12, No. 22, pp. 6021-6032, Dec. 2018.
- [7] R.-F. Yuan, Q. Ai, X. He, "Research on dynamic load modelling based on power quality monitoring system", *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 7, No. 1, pp. 46-51, Jan. 2013.
- [8] K. Yu, Q. Ai, S. Wang, J. Ni, T. Lv, "Analysis and optimization of droop controller for microgrid system based on small-signal dynamic model", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 7, No. 2, pp. 695-705, March 2016.
- [9] N. Pogaku, M. Prodanovic, T. C. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid", *IEEE Trans. on Power Electro.*, Vol. 22, No. 2, pp. 613-625, March 2007.
- [10] X. Tang, W. Deng, Z. Qi, "Investigation of the dynamic stability of microgrid", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 29, No. 2, pp. 698-706, March 2014.
- [11] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, M. Savaghebi, J. Eloy-Garcia, R. Teodorescu, "Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 60, No. 4, pp. 1271-1280, 2013.
- [12] S. Leitner, M. Yazdani, A. Mehrizi-Sani, A. Muetze, "Small- signal stability analysis of an inverter-based microgrid with internal model-based controllers", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 9, No. 5, pp. 5393-5402, Sep. 2018.
- [13] A. Aderibole, H. H. Zeineldin, M. Al Hosani, "A critical assessment of oscillatory modes in multi-microgrids comprising of synchronous and inverter based distributed generation", *IEEE Trans. Smart Grid*, Vol. 10, No. 3, pp. 3320-3330, May 2019.
- [14] Y. Wang, X. Wang, F. Blaabjerg, and Z. Chen, "Harmonic instability assessment using state-space modeling and participation analysis in inverter-fed power systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 1, pp. 806-816, Jan. 2017.
- [15] J. Alipoor, Y. Miura, T. Ise, "Stability assessment and optimization methods for

- generators in distribution network on small signal stability margin and network loss", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 88, pp. 108–118, 2017.
- [32] D. Mondal, A. Chakrabarti, A. Sengupta, "Optimal placement and parameter setting of SVC and TCSC using PSO to mitigate small signal stability problem", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 42, No. 1 pp. 334–340, Nov. 2012.
- [33] M. S. Golsorkhi, D. D. C. Lu, "A control method for inverter-based islanded microgrids based on V-I droop characteristics", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 30, No. 3, pp. 1196–1204, June 2015.
- [28] Y. Zhu, F. Zhuo, F. Wang, B. Liu, R. Gou, Y. Zhao, "A virtual impedance optimization method for reactive power sharing in networked microgrid", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 4, pp. 2890-2904, April 2016.
- [29] Y. Sun, X. Hou, J. Yang, H. Han, M. Su, J. M. Guerrero, "New perspectives on droop control in AC microgrid", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 64, No. 7, pp. 5741-5745, July 2017.
- [30] A. Orakzadeh, B. Fani, F. Zandi, M. Moazzami, "Improved reactive power sharing in islanded micro grids using adaptive virtual impedance", *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 13-26, 2019.
- [31] D. K. Dheer, S. Doolla, S. Bandyopadhyay, J. M. Guerrero, "Effect of placement of droop based