



# Technovations in Electrical Engineering & Green Energy System

Research Article

(2022) 1(1):13-35

## Improvement of Conventional Droop Methods Performance During the Fault Occurrence in an Islanded Micro-Grid Using the Concept of Virtual Impedance

Sobhan Tahanzadeh<sup>1</sup>, M.Sc, Farshad Zandi<sup>1</sup>, M.Sc, Bahador Fani<sup>2</sup>, Associate Professor, Matin Dashtipour<sup>1</sup> M.Sc Student, Ehsan Adib<sup>3</sup>, Associate Professor, Esmaeel Rokrok<sup>4</sup>, Associate Professor

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>2</sup> Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>3</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

<sup>4</sup> Engineering Department, Lorestan University, Lorestan, Iran

### Abstract:

Most Micro-Sources (MSs) are interfaced to a Micro-Grid (MG) using power electronics converters. Therefore, a MG can be envisioned as a group of parallel converters. A well-known method to control a group of parallel converters in the decentralized control structure in a MG is to use frequency and voltage droop characteristics. A problem associated with conventional droop characteristics is that reactive power is not always properly shared among MSs which may lead to converter overloading. The nature of conventional droop characteristics is linear. Therefore, these characteristics do not have a sufficient degree of freedom to function properly in nonlinear conditions, such as the occurrence of short circuit faults. Most of proposed methods in the literature are limited to specific MG structures or need extensive information of grid. For this purpose, in this paper, a new power control strategy based on a decentralized method for autonomous micro-grid consisting of voltage source inverters is presented. The control strategy based on voltage and frequency droop control methods. In the proposed method, conventional droop characteristics are corrected by using virtual impedance loop to adjusting the y-intercept of conventional curves. The proposed approach also improves voltage regulation both under normal micro-grid conditions and when faults occur.

**Keywords:** Conventional droop method, Islanded micro-grid, Reactive power sharing, Voltage regulation, Short circuit Fault.

**Received:** 18 March 2022

**Revised:** 6 May 2022

**Accepted:** 8 June 2022

**Corresponding Author:** Dr. Esmaeel Rokrok, rokrok.e@lu.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.691006>





## فناوری‌های نوین در مهندسی برق و سیستم انرژی سبز

## بهبود عملکرد روش‌های اف‌تی متداول هنگام وقوع خطا در یک ریزشبکه‌ی جزیره‌ای با استفاده از مفهوم امپدانس مجازی

سبحان طحان زاده<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، فرشاد زندی<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد، بهادر فانی<sup>۲</sup>، دانشیار، متین دشتی پور<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد، احسان ادیب<sup>۳</sup>، دانشیار، اسماعیل رک‌رک<sup>۴</sup>، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۴- گروه برق دانشکده فنی و مهندسی برق، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

**چکیده:** اکثر ریزمنابع از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت به ریزشبکه متصل می‌شوند. بنابراین، ریزشبکه می‌تواند به عنوان یک گروه از مبدل‌های موازی در نظر گرفته شود. یک روش شناخته شده برای کنترل گروهی از مبدل‌های موازی در ساختار کنترل غیر متمرکز در یک ریزشبکه‌ی جزیره‌ای، استفاده از مشخصه‌های اف‌تی فرکانس و ولتاژ است. مشکل استفاده از مشخصه‌های اف‌تی معمول این است که تقسیم توان راکتیو متناسب با ظرفیت ریزمنابع میان آن‌ها انجام نمی‌شود. این موضوع ممکن است منجر به اضافه بار شدن مبدل‌ها گردد. ماهیت مشخصه‌های اف‌تی مرسوم خطی است. بنابراین این مشخصه‌ها درجه‌ی آزادی کافی برای عملکرد مناسب در شرایط غیرخطی همچون وقوع خطای اتصال کوتاه را ندارند. راه‌حل‌های ارائه شده برای این مشکل عمدتاً محدود به ریزشبکه‌های با ساختار خاص بوده و یا نیازمند دانستن اطلاعات وسیع از شبکه می‌باشد. به همین منظور در این مقاله یک استراتژی جدید کنترل توان مبتنی بر روش غیرمتمرکز برای یک ریزشبکه خودگردان متشکل از منابع ولتاژ اینورتری ارائه شده است. استراتژی کنترل پیشنهادی بر پایه‌ی روش‌های اف‌تی معمول بنا نهاده شده است. در روش پیشنهادی مشخصه‌های اف‌تی معمول از طریق تنظیم عرض از مبدأ و با استفاده از حلقه‌ی امپدانس مجازی به گونه‌ای اصلاح می‌گردند که نسبت به تغییرات نقطه‌ی کار منابع موجود در ریزشبکه به صورت وقتی و به سرعت پاسخ داده و منجر به تقسیم توان اکتیو و راکتیو ایده‌آل گردند. همچنین رویکرد پیشنهادی منجر به بهبود تنظیم ولتاژ هم در شرایط عادی ریزشبکه و هم در هنگام وقوع خطا می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** روش اف‌تی معمول، ریزشبکه جزیره‌ای، تقسیم توان راکتیو، تنظیم ولتاژ، خطای اتصال کوتاه

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۷

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

نویسنده‌ی مسئول: دکتر اسماعیل رک‌رک، rokrok.e@lu.ac.ir

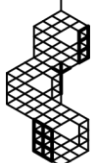
DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2022.691006>



با ورود منابع تولید پراکنده به سیستم‌های توزیع، مفهوم ریزشبکه<sup>۱</sup> در حوزه سیستم‌های انرژی الکتریکی مطرح شده است. یک ریزشبکه مجموعه‌ای از منابع انرژی پراکنده به ویژه منابع تجدیدپذیر شامل واحدهای تولید پراکنده و ادوات ذخیره‌کننده انرژی، بارهای محلی<sup>۲</sup>، بسترهای ارسال و دریافت اطلاعات<sup>۳</sup>، سیستم‌های کنترل نظارتی برای مدیریت عملکرد منابع، شبکه و بارهای مشترک<sup>۴</sup> است که در بستر یک سیستم توزیع شکل گرفته و به عنوان یک مجموعه قابل کنترل از دید شبکه‌ی اصلی عمل می‌کند [1]. ریزشبکه می‌تواند در حالت اتصال به شبکه مورد بهره‌برداری قرار گیرد یا به علت وقوع خطا در شبکه بالادست یا بصورت از پیش برنامه‌ریزی شده در حالت خودگردان<sup>۵</sup> (حالت جزیره‌ای<sup>۶</sup>) عمل نماید. قابلیت جزیره‌ای شدن ریزشبکه و عملکرد خودگردان آن بسیار بر اهمیت می‌باشد. این قابلیت سبب می‌شود تأمین انرژی بارهای حساس موجود در ریزشبکه در شرایط قطعی شبکه امکان‌پذیر شود که این مسئله باعث بهبود قابلیت اطمینان برای مصرف‌کنندگان داخل ریزشبکه می‌گردد [۲]. در یک ریزشبکه جزیره‌ای دو روش کنترلی عمده وجود دارد: روش کنترل متمرکز و روش کنترل غیر متمرکز یا کنترل محلی. در روش کنترل متمرکز یک کنترل‌کننده مرکزی با دریافت اطلاعات مختلف از شبکه، سیگنال‌های کنترلی لازم را تولید و به منابع ارسال می‌کند. در این روش هر چند دستیابی به اهداف کنترلی به شکل آسان‌تری فراهم می‌گردد، اما به علت نیاز به ساختار مخابراتی با پهنای باند وسیع و با دقت عملکرد بالا، هزینه تمام شده‌ی سیستم افزایش می‌یابد. بنابراین، هنگامی که فاصله فیزیکی قابل توجه بین واحدهای تولید پراکنده وجود دارد و ایجاد ساختار مخابراتی با پهنای باند وسیع بین آن‌ها غیرعملی است، مدیریت توان مبتنی بر کنترل‌های محلی منابع اهمیت پیدا می‌کند. استراتژی مدیریت توان محلی بر اساس تکنیک‌های اکتیو/ولتاژ که در آن عمل تقسیم توان بین منابع فقط با استفاده از سیگنال‌های محلی آنها انجام می‌گیرد، پایه‌ریزی شده است. در روش کنترل اکتیو معمول، تقسیم توان بین منابع بصورت حلقه باز انجام می‌گیرد. بدین معنی که منابع بدون اطلاع از توان‌های تولیدی یکدیگر، براساس مشخصه‌های اکتیو خود، در تأمین تقاضای بار مشارکت می‌کنند. در این روش سیگنال فرکانس به عنوان یک لینک ارتباطی مجازی بین منابع سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد و بر اساس آن تقاضای توان حقیقی بین منابع تقسیم می‌شود. در شرایط ماندگار که فرکانس در کل سیستم ثابت می‌شود، تقسیم توان حقیقی بین منابع با استفاده از مشخصه‌های اکتیو معمول فرکانس می‌تواند منجر به نتایج مطلوب گردد [۳]. اما در شرایط گذرا، فرکانس منابع سیستم متفاوت است و مشخصه‌های اکتیو معمول فرکانس لزوماً منجر به تقسیم توان حقیقی گذرای مناسب بین منابع نخواهد شد. این موضوع برای پاسخ گذرای تقسیم توان راکتیو نیز صادق است. پاسخ کنترل‌کننده‌های توان منابع در دوره گذرای پس از وقوع اختلال، به نوع اختلال و مکان منبع بستگی دارد و ممکن است قابل قبول نباشد. علیرغم بدون نقص به نظر رسیدن روش کنترلی اکتیو معمول در نگاه اول، مطالعات و بررسی‌های انجام شده حاکی از وجود برخی مشکلات اساسی در استفاده از این روش می‌باشد. این روش کنترل اساساً برای منابعی با خاصیت سلفی غالب طراحی شده است و در شبکه‌های ولتاژ پایین که دارای خاصیت مقاومتی می‌باشند، قادر به تقسیم مناسب توان راکتیو با دقت مناسب نیست. دلیل این امر تزویج میان توان‌های حقیقی و راکتیو خروجی منابع تولید پراکنده در این شرایط می‌باشد. علاوه بر آن، نابرابری و عدم تقارن در امپدانس خطوط که امری رایج در شبکه‌های توزیع می‌باشد و همچنین امپدانس خروجی منابع تولید پراکنده، کنترل دقیق توان راکتیو در حالت متصل به شبکه را تحت تأثیر قرار داده و تقسیم توان راکتیو در حالت جزیره‌ای را نیز با مشکلاتی مواجه می‌سازد. مشکل اساسی دیگر کنترل اکتیو مرسوم، ناتوانی آن در تقسیم بارهای غیرخطی و بارهای نامتعادل در هنگام وقوع خطای اتصال کوتاه می‌باشد [۴].

راهکارهای متعددی برای رفع این مشکل و بهبود تقسیم توان در ریزشبکه‌های جزیره‌ای ارائه شده است. در این میان روش‌هایی بر اساس تنظیم شیب یا عرض از مبدأ مشخصه‌های اکتیو ارائه شده‌اند. استفاده از این روش‌ها هر چند مزیت‌های مشخصه‌های اکتیو معمول از قبیل عدم نیاز به ارتباط مخابراتی و اطلاع از پارامترهای ریزشبکه و همچنین افزایش قابلیت اطمینان ریزشبکه را به دنبال دارند، لیکن معمولاً دارای الگوریتم‌های پیچیده‌ی محاسباتی بوده و در حضور بارهای غیرخطی عملکرد مطلوبی از خود نشان نمی‌دهند. این روش‌ها معمولاً برای استفاده در ریزشبکه‌ها با مقیاس بزرگ مناسب نبوده و توانایی کنترل تقسیم توان راکتیو در شرایط وقوع خطا را ندارد. دیگر روش‌هایی که به منظور بهبود تقسیم توان راکتیو در ریزشبکه‌های جزیره‌ای ارائه شده‌اند روش‌های مبتنی بر امپدانس مجازی هستند. استفاده از امپدانس مجازی در سیستم کنترل ریزشبکه می‌تواند مزیت‌های زیر را به همراه داشته باشد:

- کنترل پخش بار در ریزشبکه





- قابلیت گذر از خطا و اغتشاش در ریزش شبکه و حفظ پایداری حین وقوع خطا
- جبران عدم تعادل هارمونیکی
- کنترل و تنظیم امیدانس خروجی منابع و بهبود تقسیم بار میان منابع تولید پراکنده

دلایل و شکل بکارگیری امیدانس مجازی در ریزش شبکه‌ها تا حدودی دارای تنوع است. در مرجع [۴] به منظور تسهیم ایده‌آل توان راکتیو و بهبود پایداری در ریزش شبکه‌های جزیره‌ای روشی مبتنی بر امیدانس مجازی مختلط وفقی پیشنهاد شده است. امیدانس مجازی پیشنهادی از دو ترم مقاومتی و سلفی تشکیل شده است. ترم مقاومتی امیدانس مجازی به منظور تعدیل افت ولتاژ ایجاد شده در خروجی مشخصه‌ی  $E - Q$  از طریق تنظیم شیب مشخصه‌ی  $\Delta R_p - P$  پیشنهادی بدست می‌آید. برای تنظیم شیب مشخصه‌ی  $\Delta R_p - P$  از یک حلقه‌ی کنترلی انتگرالی استفاده شده است. ترم سلفی امیدانس مجازی با هدف افزایش خاصیت سلفی سیستم و کاهش تزویج کنترل توان اکتیو و راکتیو زاویه‌ی جریان خروجی منابع را تنظیم می‌کند. در این روش از یک لینک مخابراتی با پهنای باند کم به منظور ارسال اطلاعات باس مرجع به کنترل کننده‌ی محلی هر ریزمنبع برای تنظیم امیدانس مجازی استفاده شده است.

در مراجع [۵، ۶] یک استراتژی کنترلی مبتنی بر ترکیب کنترل اجماع و امیدانس مجازی وفقی برای تسهیم ایده‌آل توان راکتیو میان واحد های تولید پراکنده‌ی یک ریز شبکه ارائه شده است. در مرجع [۵] همچنین بوسیله‌ی مکانیزم بازیابی ولتاژ، مقدار ولتاژ خروجی منابع نیز در محدوده‌ی مجاز نگاه داشته می‌شود. در این روش با استفاده از متد کنترل اجماع پارامتری بعنوان خطای تقسیم توان راکتیو، بر اساس اطلاعات مربوط به هر منبع و همسایه‌های آن در گراف جهت دار معادل سیستم محاسبه می‌شود. خطای تقسیم توان راکتیو محاسبه شده توسط متد کنترل اجماع، ناشی از اختلاف ترم مقامتی و ترم سلفی امیدانس خطوط ارتباطی منابعی است که در همسایگی یکدیگر قرار دارند. برای محاسبه‌ی مقدار امیدانس مجازی، اختلاف خطای تقسیم توان راکتیو محاسبه شده و توان راکتیو تولیدی هر منبع به یک کنترل کننده‌ی  $PI$  وارد شده و در حالت دایمی ترمی برای اصلاح امیدانس مجازی وفقی استخراج می‌شود. در واقع این ترم مشخص می‌کند چه مقدار از افت ولتاژ روی امیدانس خطوط مربوط به قسمت مقاومتی و چه میزان مرتبط با قسمت راکتانس آن است. سپس بر اساس آن ترم مقاومتی و سلفی امیدانس مجازی تعیین می‌گردد.

در مراجع [۳، ۷، ۸] روشی جهت اصلاح مشخصه‌ی افتی ولتاژ و با هدف دستیابی به تسهیم ایده‌آل توان راکتیو در ریزش شبکه‌هایی با ساختار دلخواه ارائه شده است. در این استراتژی از مشخصه‌های افتی معمول یعنی مشخصه‌ی توان اکتیو-فرکانس و توان راکتیو-ولتاژ به منظور کنترل توان منابع استفاده می‌شود. لذا تسهیم توان حقیقی بصورت ایده‌آل در ریزش شبکه صورت می‌گیرد. زیرا توان اکتیو با فرکانس سیستم در یک مشخصه قرار داشته و از آنجایی که فرکانس یک پارامتر سراسری در سیستم است و به سرعت در سراسر ریزش شبکه منتشر می‌شود، تسهیم ایده‌آل برای توان حقیقی حاصل می‌گردد. اما در یک ریزش شبکه با ساختار دلخواه استفاده از مشخصه‌ی افتی توان راکتیو-ولتاژ با خطا همراه خواهد بود. این خطا در زمان‌هایی معین تشخیص داده شده و از طریق اصلاح عرض از مبدأ مشخصه‌ی افتی ولتاژ از بین رفته و تسهیم ایده‌آل توان راکتیو نیز در ریزش شبکه حاصل می‌شود. کلیدهای منابع موجود در ریزش شبکه باید بصورت همزمان فرآیند اصلاح مشخصه را انجام دهند تا تسهیم ایده‌آل توان راکتیو صورت گیرد. لذا این روش نیازمند یک کانال مخابراتی با پهنای باند کم برای ارسال یک سیگنال هماهنگ کننده جهت آغاز فرآیند اصلاح مشخصه به کلیدهای منابع است. در مرجع [۹] به منظور کاهش خطای تقسیم توان راکتیو عرض از مبدأ مشخصه‌ی افتی ولتاژ معمول طی مراحل متوالی کاهش می‌یابد که منجر به افت ولتاژ در خروجی اینورترها می‌شود برای غلبه بر این مشکل مکانیزم بازیابی ولتاژ بکار رفته است تا تضمین شود که همواره ولتاژ در محدوده‌ی مجاز خود باقی می‌ماند. اجرای این روش نیازمند لینک مخابراتی با پهنای باند کوتاه میان ریزمنابع و ذخیره‌سازی اطلاعات استراتژی افتی ولتاژ در هر مرحله می‌باشد. در مرجع [۱۰] یک مشخصه‌ی غیرخطی برای تقسیم توان راکتیو پیشنهاد شده است. در مشخصه‌ی پیشنهادی سعی شده است افزایش دقت تقسیم توان راکتیو و بهبود پروفیل ولتاژ محقق شود. بدین منظور مشخصه‌ی پیشنهادی دارای دو قسمت عمده است: ۱- تبدیل مشخصه‌ی افتی ولتاژ معمول به یک مشخصه‌ی غیرخطی به منظور یکسان سازی نقطه‌ی کار منابع و کاهش خطای تقسیم توان راکتیو ۲- مکانیزم بازیابی ولتاژ از طریق تزریق سیگنال متناسب با توان حقیقی تولیدی منابع. در این روش با

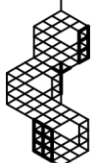




وجود دستیابی به تقسیم توان ایده‌آل و تنظیم ولتاژ مناسب، تنظیم و محاسبه‌ی پارامترهای مشخصه‌ی غیرخطی پیشنهادی کار پیچیده‌ای است که پیاده‌سازی روش پیشنهادی را غیرعملی می‌کند. در [۱۱] یک استراتژی کنترلی بر اساس مقاومت مجازی به منظور بهبود تقسیم توان راکتیو در حضور بارهای غیرخطی و نامتقارن ارائه شده است. در این روش با استفاده از اندازه‌گیری توان بار محلی، کنترل‌کننده‌ی امپدانس مجازی طراحی و پیاده‌سازی می‌گردد. سپس کلیه‌ی پارامترهای مربوط به این کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با هدف حداقل کردن خطای موجود در تقسیم توان راکتیو در ریزشبه بصورت *Offline* بهینه‌سازی می‌شوند. استفاده از روش پیشنهادی [۱۱] در صورت قطعی بار و یا فیدر سبب ناپایداری شبکه می‌گردد. این مسأله باعث ایجاد محدودیت‌های عملی در استفاده از این روش می‌شود. در [۱۲] تنظیم امپدانس مجازی برای جبران اختلاف افت ولتاژ بر روی فیدر منابع مختلف بوسیله‌ی لینک مخابراتی دو طرفه و یک واحد کنترل‌کننده‌ی مرکزی تحت عنوان *EMS* صورت می‌پذیرد. در این روش اطلاعات مربوط به توان راکتیو لحظه‌ای هر منبع از طریق لینک مخابراتی به واحد *EMS* ارسال می‌شود. *EMS* سهم توان راکتیو هر واحد را بر اساس توان نامی آن منبع و بار موجود در ریزشبه محاسبه کرده و آن را بصورت یک سیگنال کنترلی به منبع ارسال می‌کند. به دنبال آن هر واحد از توان راکتیو دریافتی از *EMS* بعنوان مرجعی برای تولید امپدانس مجازی استفاده می‌کند. در این استراتژی مقدار توان راکتیو مرجع برای هر واحد با توجه به مجموع بار راکتیو موجود در شبکه محاسبه شده و تحت تأثیر نوسانات گذرای توان راکتیو حین فرآیند تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده، قرار نمی‌گیرد. بنابراین مقدار این توان تا زمانی که مجموع بار راکتیو موجود در شبکه تغییر کند، ثابت است. هنگامی که امپدانس مجازی به ازای مقدار مشخصی از بار راکتیو در شبکه تعیین شد، تسهیم ایده‌آل توان راکتیو تا زمانی که بار موجود در شبکه تغییر نکرده است، حتی در صورت بروز اختلال در لینک مخابراتی، بدرستی صورت می‌گیرد. برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی در [۱۲] نیازی به اطلاع از امپدانس فیدرها نمی‌باشد. استفاده از روش ارائه شده در [۱۲] می‌تواند خطای تقسیم توان راکتیو را فارغ از مقدار و نوع بار موجود در ریزشبه و نسبت  $X/R$  آن، به نحو موثری کاهش دهد. اما استفاده از این روش می‌تواند مشکلاتی نیز برای سیستم ایجاد کند. از معایب استفاده از این استراتژی کنترلی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- وجود یک سیستم کنترل‌کننده‌ی مرکزی تحت عنوان *EMS* و وابستگی سیستم کنترلی تمامی واحدها به آن می‌تواند سبب کاهش قابلیت اطمینان ریزشبه و افزایش هزینه‌های تولید، نصب و راه‌اندازی شود.
- پیاده‌سازی این روش نیاز به استفاده از لینک مخابراتی دو طرفه برای ارسال اطلاعات مربوط به توان راکتیو تولیدی به واحد *EMS* و دریافت مقدار توان راکتیو مرجع از این واحد کنترل‌کننده‌ی مرکزی، دارد. وجود لینک مخابراتی دو طرفه در سیستم می‌تواند سبب افزایش هزینه‌های نصب سیستم کنترلی گردد.
- در صورت گسترش و پیچیدگی سیستم تعیین ضرایب مربوط به کنترل‌کننده‌های محلی مشکل بوده و این امر سبب ایجاد محدودیت‌هایی در استفاده‌ی عملی از این روش می‌گردد.

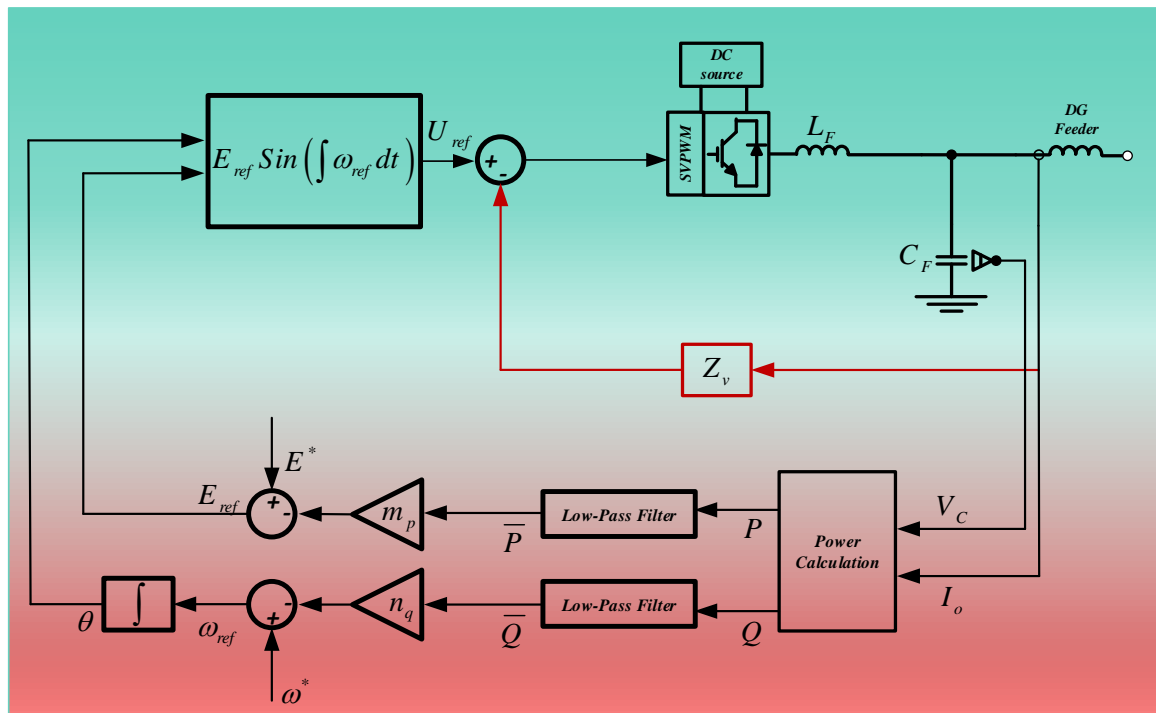
با وجود روش‌های متعدد پیشنهاد شده در زمینه‌ی بهبود تقسیم توان راکتیو، تسهیم ایده‌آل توان راکتیو در حالت وقوع خطا کمتر مورد توجه قرار گرفته است. وقوع خطا در یک ریزشبه‌ی جزیره‌ای سبب ایجاد اضافه جریان برای منابع و همچنین عدم تعادل ولتاژ می‌شود. هنگام وقوع خطا در ریزشبه منابع پراکنده که غالباً مبتنی بر اینورتر هستند، قادر به تغذیه جریان بزرگ خطا نیستند. علت این امر محدودیت جریان قابل تحمل توسط سوئیچ‌های نیمه‌رسانا است [۱۳]. این مسأله سبب می‌شود تا راهکارهایی برای محدودسازی جریان منابع اینورتری در شرایط وقوع خطا بکارگیری شود. محدودسازی جریان منابع اینورتری در حالت وقوع خطا سبب اختلال در سیستم حفاظت شده و می‌تواند اثرات نامطلوبی را به دنبال داشته باشد [۱۴]. همچنین روش‌های ارائه شده برای تقسیم توان راکتیو نظیر استراتژی‌های استفاده شده در [۳، ۶] معمولاً عملکرد استراتژی تقسیم بار و امکان بازیابی سیستم را بعد از وقوع خطا و جدا شدن یک یا چند منبع از سیستم مورد بررسی قرار داده‌اند. در صورتی که خروج یک یا چند منبع توسط سیستم حفاظت ریزشبه می‌تواند موجب اضافه بار سایر منابع و آسیب به سوئیچ‌های نیمه‌رسانا شود. به منظور بهره‌گیری از مزایای روش مدیریت توان غیر متمرکز، و در عین حال بهینه‌سازی تقریبی عملکرد ریزشبه از نظر مسائل فنی و اقتصادی که در واقع مزیت اصلی روش‌های مدیریت توان متمرکز است، مشخصه‌های افتی مبتنی بر مفهوم امپدانس مجازی برای کنترل توان ریزشبه پیشنهاد می‌گردد. از مزیت‌های برجسته‌ی استفاده از مشخصه‌های مذکور می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:



- با توجه به تعداد پارامتر قابل انتخاب بیشتر در مشخصه‌های پیشنهادی (تعداد درجات آزادی بیشتر) نسبت به مشخصه‌های اف‌تی معمول، علاوه بر جلوگیری از اضافه بار منابع می‌توان به اهداف دیگری همچون کاهش توان راکتیو گردش بین منابع و همزمان بهبود تنظیم ولتاژ در باس‌های ریزشبکه دست یافت.
- از آنجایی که کنترلرهای سطح بالاتر ریزشبکه به طور کلی برای تنظیم دینامیکی نقطه کار انرژی به کار می‌روند، پاسخ دینامیکی مشخصه‌های دارای حلقه امیدانس مجازی با خروجی اف‌تی می‌تواند یک ویژگی مطلوب از دید سطوح کنترل بالاتر بمنظور دستیابی به نقطه کار انرژی ایده‌آل تلقی شود.
- امکان دستیابی به باند فرکانس طبیعی و محدوده‌ی ولتاژ مجاز مستقل از کنترلرهای سطوح بالاتر در ریزشبکه‌های ایزوله (ریموت)، که به دلیل محدودیت‌های اقتصادی و جغرافیایی بسترهای مخابراتی برای پیاده‌سازی سطح دوم و یا سوم کنترل ریزشبکه وجود ندارد.

در این مقاله یک استراتژی جدید کنترل توان مبتنی بر روش غیرمتمرکز برای یک ریزشبکه خودگردان متشکل از منابع ولتاژ اینورتری ارائه شده است. استراتژی کنترل پیشنهادی بر پایه‌ی روش‌های اف‌تی معمول بنا نهاده شده است. در روش پیشنهادی مشخصه‌های اف‌تی معمول از طریق تنظیم عرض از مبدأ و با استفاده از حلقه‌ی امیدانس مجازی به گونه‌ای اصلاح می‌گردند که نسبت به تغییرات نقطه‌ی کار منابع موجود در ریزشبکه به صورت اف‌تی و به سرعت پاسخ داده و منجر به تقسیم توان اکتیو و راکتیو ایده‌آل گردند. همچنین رویکرد پیشنهادی منجر به بهبود تنظیم ولتاژ هم در شرایط عادی ریزشبکه و هم در هنگام وقوع خطا می‌شود. ساختار مقاله به صورت زیر پیکربندی شده است:

در قسمت ۲، مفهوم امیدانس مجازی شرح و بسط داده شده است. در قسمت ۳، مدیریت سیستم کنترلی منابع در شرایط وقوع خطا بررسی شده و علت عدم تقسیم توان راکتیو توسط مشخصه‌های اف‌تی در شرایط وقوع خطا بیان شده است. قسمت ۴، روش‌های مختلف برای ایجاد لینک مخابراتی میان منابع موجود در ریزشبکه بررسی شده است. در نهایت در قسمت ۵ روش پیشنهادی بر مبنای امیدانس مجازی به منظور بهبود مشخصه‌ی اف‌تی ولتاژ از طریق لینک مخابراتی یک‌طرفه با پهنای باند کم میان منابع همسایه ارائه شده و جزئیات آن به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و صحت‌سنجی روش پیشنهادی و نتیجه‌گیری به ترتیب در قسمت‌های ۶ و ۷ قابل مشاهده هستند.



شکل (۱): بلوک دیاگرام کنترلی یک واحد DG با بکارگیری روش امیدانس مجازی



## ۲- مفهوم امپدانس مجازی

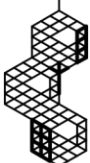
از روش امپدانس مجازی به منظور بهبود تقسیم توان راکتیو، کاهش تزویج میان کنترل توان اکتیو و راکتیو و همچنین بهبود پایداری ریزشبه استفاده می‌شود. استفاده از امپدانس مجازی در واقع اضافه کردن بخشی به سیستم کنترلی منابع است به گونه‌ای که سبب می‌شود کنترل کننده افت ولتاژی مجازی را در شبکه ببیند که بصورت واقعی وجود ندارد. به منظور عملکرد صحیح امپدانس مجازی باید اطلاعات لحظه‌ای ریزشبه در دسترس باشد به گونه‌ای که کنترل کننده بتواند مقدار بهینه‌ی امپدانس مجازی را با شرایط لحظه‌ای شبکه تطبیق دهد. ساختار کنترلی به منظور پیاده‌سازی روش امپدانس مجازی متداول بصورت شکل (۱) می‌باشد. طرح کنترلی نشان داده شده در شکل (۱) بر اساس مشخصه‌ی افتی معمول فرکانس و ولتاژ بنا شده است. بدین صورت که ولتاژ و جریان خروجی ریزمنبع وارد بلوک محاسبه‌ی توان (*Power Calculation*) شده و در این بخش ابتدا توان‌های حقیقی و راکتیو لحظه‌ای محاسبه می‌شوند، سپس طرح کنترلی کننده بر اساس معادلات افتی فرکانس و ولتاژ پیاده‌سازی می‌شوند. ورودی معادلات افتی فرکانس و ولتاژ مقدار متوسط توان اکتیو و راکتیو می‌باشد به همین دلیل از یک فیلتر پایین‌گذر (*Low-Pass Filter*) برای متوسط‌گیری از توان حقیقی و راکتیو استفاده می‌شود. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، از طریق ضرب جریان خروجی اندازه‌گیری شده‌ی ریزمنبع در مقدار طراحی شده برای امپدانس مجازی ( $Z_{ref}$ )، مقدار افت ولتاژ مجازی بدست می‌آید. پس از اعمال مقدار افت ولتاژ مجازی به خروجی مشخصه افتی ولتاژ، فرکانس و ولتاژ مرجع در خروجی این مشخصه‌ها تولید می‌شوند. که در نهایت این دو مقدار مرجع، سیگنال مرجع  $U_{ref}$  را تولید خواهند کرد. سیگنال  $U_{ref}$ ، سیگنال مرجع را برای اینورتر تولید می‌کند. اگر منابع موجود در ریزشبه در نقطه‌ی کار یکسان ( $\omega_0$  و  $E_0$ ) فعالیت کنند، تسهیم توان اکتیو و راکتیو بصورت ایده‌آل میان منابع حاصل می‌شود. از طرفی امپدانس تونن ریزشبه از دید پایانه خروجی هر ریزمنبع متفاوت است. این تفاوت ممکن است به دلایل زیر بوجود آید:

- تفاوت امپدانس فیدر خروجی هر ریزمنبع تا باس مشترک
- عدم تقارن شبکه
- وجود بارهای محلی متفاوت در خروجی هر ریزمنبع
- تغییرات بار مشترک و محلی

اختلاف امپدانس تونن در خروجی هر ریزمنبع مانع از همگرایی نقاط کار و تقسیم توان راکتیو ایده‌آل میان منابع می‌شود. با تنظیم مناسب امپدانس مجازی برای هر واحد می‌توان اختلاف امپدانس تونن خروجی میان ریزمنابع را تعدیل نمود. لیکن بارهای مشترک و محلی و همچنین نسبت  $X/R$  شبکه ممکن است تغییر کند. بنابراین نیاز است مقدار طراحی شده برای امپدانس مجازی با تغییرات ایجاد شده در سیستم بروز شود.

## ۳- مدیریت خطا در یک ریزشبه‌ی مبتنی بر اینورتر

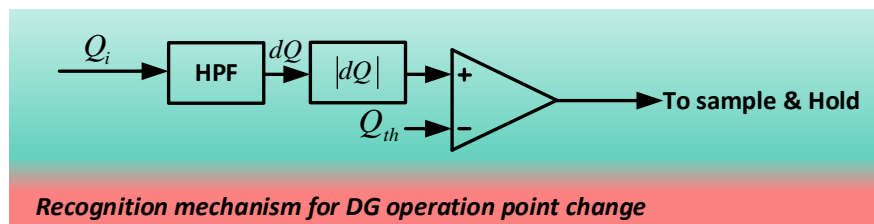
در اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه قدرت از مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده می‌شود. در شرایط عادی این مبدل‌ها توان اکتیو تولیدی منبع پراکنده را به شبکه تزریق می‌کنند. در شرایط وقوع خطا در شبکه، کنترل‌کننده‌ی منابع باید به اغتشاش رخ داده، واکنش مناسب داده و اثرات نامطلوب را در سمت شبکه کاهش دهد. به دلیل ظرفیت حرارتی پایین اینورترهای موجود در ریزشبه، تجاوز ولتاژ و جریان اینورترها از مقادیر مجاز به کلیدهای نیمه‌هادی آن‌ها آسیب جدی می‌رساند. در نتیجه طراحی روش‌های کنترلی مناسب برای گذر از حالت خطا اهمیت ویژه‌ای دارد. چالش دیگر در حالت وقوع خطا این است که منابع مبتنی بر اینورتر کمکی به آشکارسازی خطا نمی‌کنند. زیرا این نوع از منابع در زمان اتصال کوتاه جریان خطای زیادی تولید نمی‌کنند. جریان خطای محدود منابع پراکنده مبتنی بر اینورتر می‌تواند منجر به عدم عملکرد صحیح سیستم حفاظت شبکه که عمدتاً بر مبنای جریان زیاد پیاده‌سازی شده است، شود. از موارد ذکر شده کاملاً مشخص است که در ریزشبه‌های مبتنی بر اینورتر به علت مشخصه‌ی خاص منابع اینورتری و عدم ارتباط با پارامترهای شبکه‌ی توزیع در حالت جزیره‌ای، متفاوت بودن انواع پیکربندی شبکه، تفاوت در توپولوژی‌های مخابراتی و سطوح مختلف سیستم کنترل منابع، مشکلاتی در زمینه آشکارسازی حالت خطا و مدیریت جریان و ولتاژ در طی فرآیند خطا و پس از رفع آن



وجود دارد که در سایر سیستم‌ها وجود ندارد. در طرح مدیریت خطا در یک ریزشبهه‌ی مبتنی بر منابع اینورتری اهداف زیر دنبال می‌شوند:

- آشکارسازی خطا
- حفظ تنظیم ولتاژ
- حفظ اتصال منابع در طی فرآیند خطا

وقوع خطای اتصال کوتاه از دید سیستم کنترل محلی منابع به مانند یک بارگذاری سنین غیرخطی تلقی می‌شود. این در حالی است که سیستم کنترل فرکانس و ولتاژ منابع پراکنده بر اساس مشخصه‌های خطی افتی مرسوم عمل می‌کنند. از طرفی به دلیل اینکه در این مشخصه‌های خطی، درجات آزادی برای تحقق دادن به اهداف کنترلی کم است، دستیابی همزمان به اهداف کنترلی مختلف از جمله تقسیم توان ایده‌آل و بهبود تنظیم ولتاژ خواسته‌ای به ظاهر متناقض به نظر می‌رسد. در مد عملکردی متصل به شبکه، می‌توان از رله‌های جریان بزرگ متداول به منظور آشکارسازی خطا استفاده کرد. زیرا در این حالت جریان جاری شده از سمت شبکه آنقدر بزرگ هست که توسط این نوع از رله‌ها تشخیص داده شود. چالش اساسی در مد عملکردی جزیره‌ای رخ می‌دهد. از آنجایی که به طور معمول در هنگام خطا جریان‌های ادوات الکترونیک قدرت محدود می‌شود، امکان استفاده از رله‌های جریان زیاد وجود ندارد. در حالت جزیره‌ای روش‌هایی مبتنی بر افت دامنه ولتاژ در هنگام وقوع خطا برای آشکارسازی خطا استفاده می‌شود [۱۵-۱۷]. عیب این روش‌ها احتمال عملکرد اشتباه هنگام وقوع هر افت ولتاژی در ریزشبهه (غیر از وقوع خطا) است. هنگامی که اغتشاشی در ریزشبهه رخ می‌دهد، توان اکتیو و راکتیو تولیدی منابع در واکنش به این اغتشاش تغییر خواهند کرد. در واقع وقوع هر نوع اغتشاشی در ریزشبهه فرآیندی است که منجر به تغییر نقطه‌ی کار منابع می‌شود. تغییرات نقطه‌ی کار منابع را بسته به اغتشاش رخ داده می‌توان به دو نوع بزرگ و کوچک تقسیم بندی کرد. در حالت کلی فرآیندهای کلیدزنی بارهای مشترک و محلی، نصب و راه‌اندازی منبع جدید در ریزشبهه، جدا شدن منابع از سیستم، تغییر حالت عملکرد ریزشبهه از مد متصل به شبکه به مد خودگردان و برعکس و وقوع خطای اتصال کوتاه موجب تغییر نقطه‌ی کار منابع می‌شوند. در این بین حالت گذرای ناشی از اتصال یا قطع یک ریزمنبع، تعویض حالت عملکرد ریزشبهه و وقوع خطای اتصال کوتاه بطور قابل توجهی شدید و دارای سرعت میرایی پایین‌تری نسبت به حالت گذرای تغییرات ناگهانی بار است [۳]. بنابراین وقوع خطای اتصال کوتاه موجب تغییرات بزرگ در نقطه‌ی کار منابع می‌شود. بر همین اساس می‌توان تغییرات بزرگ نقطه‌ی کار منابع را مبنایی برای آشکارسازی خطای اتصال کوتاه در حالت جزیره‌ای قرار داد.



شکل (۲): مکانیزم تشخیص تغییر نقطه‌ی کار منابع

### ۳-۱- مکانیزم تشخیص تغییر نقطه‌ی کار منابع

تشخیص وقوع اغتشاش توسط سیگنال تصمیم‌گیری به دلیل استفاده از لینک مخابراتی و کنترل‌کننده‌ی سطح سوم ریزشبهه موجب کاهش قابلیت اعتماد روش کنترلی می‌شود. از طرفی منبع می‌تواند به صورت هوشمند و بر اساس استراتژی محلی، زمان تغییر نقطه‌ی کار منابع و انجام عملیات اصلاح مشخصه افتی را تشخیص دهد. انجام فرآیند اصلاح مشخصه فقط زمانی که تغییر نسبتاً بزرگی در بار یا ساختار ریزشبهه ایجاد شود، لازم است. در صورتی که چنین اتفاقاتی در ریزشبهه رخ دهد، نقطه کار مشخصه‌های  $P - \omega$  و  $E - Q$  جابجا می‌شود که منجر به تغییر سطح توان‌های خروجی منابع می‌گردد. با توجه به اینکه فقط اصلاح مشخصه  $E - Q$  مدنظر می‌باشد، به نظر می‌رسد که در نظر گرفتن تغییرات توان راکتیو خروجی معیار مناسبی جهت تشخیص تغییر نقطه‌ی کار منابع باشد. در زمان‌هایی که توان راکتیو خروجی هر منبع دچار افزایش و یا کاهش قابل توجه می‌شود، شیب منحنی تغییرات توان راکتیو





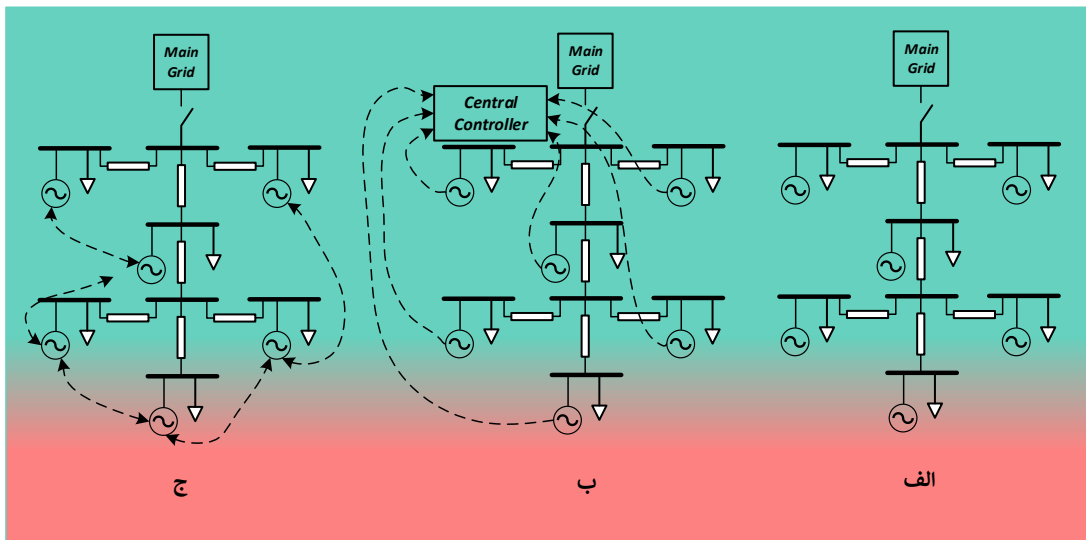
بطور ناگهانی و به مقدار زیادی تغییر می‌کند. از این ویژگی می‌توان برای تعیین تغییرات بزرگ نقطه‌ی کار منابع به صورت محلی استفاده کرد.

ساختار شکل (۲) جهت پیاده‌سازی تشخیص تغییر نقطه‌ی کار هر منبع و آغاز فرآیند اصلاح مشخصه‌ی افتی ولتاژ معمول پیشنهاد شده است. مطابق شکل (۲) توان راکتیو خروجی هر منبع ابتدا از یک فیلتر بالاگذر عبور داده می‌شود تا مقدار متوسط آن حذف شده و فقط تغییرات جزئی آن ( $dQ$ ) مدنظر قرار گیرد. به منظور اینکه هم افزایش و هم کاهش بار (سطح توان) در شبکه تحت پوشش قرار گیرد، از خروجی فیلتر مذکور قدرمطلق گرفته شده و سپس با یک سطح آستانه قابل تنظیم، مورد مقایسه قرار می‌گیرد. شرط آغاز فرآیند اصلاح، بزرگتر بودن اندازه تغییرات جزئی توان راکتیو ( $|dQ|$ ) از این سطح آستانه است. خروجی مکانیزم پیشنهادی که به صورت صفر و یک است، دستور نمونه‌برداری و ذخیره‌ی خروجی مشخصه‌ی افتی ولتاژ محاسبه شده در کنترلر محلی را برای استفاده در کنترلر پیشنهادی - به شکل (۵) نگاه شود - صادر می‌کند. در این صورت حتی زمانی که لینک مخابراتی ارسال‌کننده سیگنال ولتاژ خروجی مشخصه‌ی افتی دارای تأخیر است و یا تخریب شده باشد، خللی در عملکرد استراتژی اصلاح مشخصه بوجود نیامده و فقط در مواقع لزوم (تغییر نقطه‌ی کار منابع) فرآیند اصلاح انجام خواهد گرفت. همچنین می‌توان با تنظیم مقدار سطح آستانه در مقادیر کوچک و بزرگ، تغییرات کوچک و بزرگ نقطه‌ی کار منابع را از یکدیگر تمیز داد. بنابراین اگر نیاز باشد استراتژی کنترلی پیشنهادی فقط در هنگام وقوع خطا به سیستم کنترل توان منابع اضافه شود، می‌توان با قرار دادن سطح آستانه در مقادیر بزرگتر، اغتشاش دارای گذرای شدید از جمله خطای اتصال کوتاه را آشکار کرد.

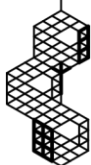
#### ۴- پروتکل‌های مخابراتی رایج بین منابع تولید پراکنده

در سال‌های اخیر سیستم کنترل ریزشکه‌ها از حالت کنترل متمرکز خارج شده و به سمت کنترل غیرمتمرکز و پراکنده سوق داده شده است. علت این امر را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

- رشد سریع منابع تولید پراکنده مبتنی بر انرژی‌های پاک مانند سیستم‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی
  - کاهش هزینه‌ی تولید منابع ذخیره‌کننده‌ی انرژی به واسطه پیشرفت تکنولوژی تولید آن‌ها
  - پیشرفت تجهیزات کنترلی و مخابراتی و امکان کنترل منابع تولید پراکنده بصورت چند عاملی<sup>۷</sup>
- استراتژی‌های موجود برای کنترل ریزشکه‌ها در حالت جزیره‌ای از نظر ارتباط مخابراتی به سه دسته‌ی زیر تقسیم می‌شوند [۱۸]:
- سیستم کنترل کاملاً پراکنده
  - سیستم کنترل مرکزی یا متمرکز
  - معماری پراکنده مبتنی بر سیستم‌های چند عاملی



شکل (۳): پروتکل‌های مخابراتی معمول در ریزشکه‌ی جزیره‌ای (الف): پراکنده، (ب): متمرکز، (ج): نیمه متمرکز مبتنی بر سیستم‌های چند عاملی



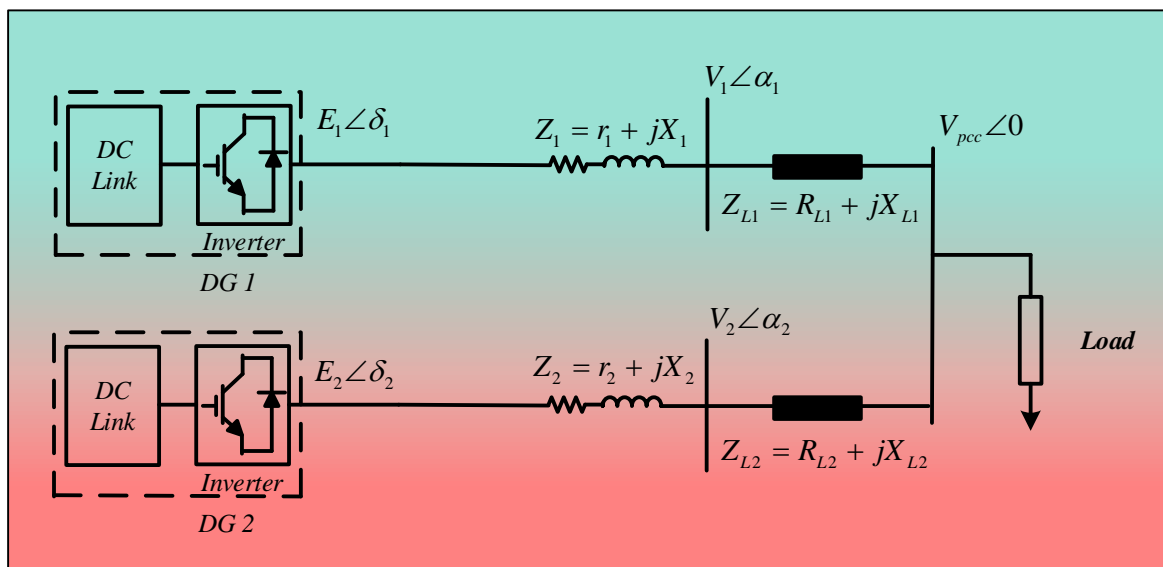
در شکل (۳) ساختار سیستم‌های کنترلی ذکر شده برای یک ریزشبکه‌ی نمونه نشان داده شده است. در سیستم‌های کنترلی پراکنده - همانند مشخصه‌های آفتی معمول - سیستم کنترلی هر منبع به صورت جداگانه و بر مبنای اندازه‌گیری‌های محلی عمل کرده و هیچ گونه ارتباط مخابراتی با سایر منابع ندارد. همانگونه که ذکر شد این روش کنترلی به دلیل عدم دسترسی منابع به اطلاعات یکدیگر از عملکرد مطلوبی در بهبود تقسیم توان راکتیو و همچنین در شرایط حضور بارهای غیرخطی و هارمونیک برخوردار نیست. در سیستم کنترل مرکزی یا متمرکز سهم توان تولیدی هر منبع از مجموع توان مورد نیاز شبکه، از طریق یک کنترل کننده‌ی مرکزی محاسبه شده و از طریق لینک مخابراتی به کنترل کننده‌ی محلی منابع ارسال می‌گردد. برای پیاده‌سازی این روش باید از لینک مخابراتی دوطرفه استفاده گردد. زیرا محاسبات انجام شده در واحد کنترل مرکزی از طریق اطلاعات دریافتی از اندازه‌گیری‌های محلی منابع صورت می‌پذیرد. لذا باید ابتدا اطلاعات منبع از طریق لینک مخابراتی به واحد کنترل مرکزی از طریق اطلاعات دریافتی از اندازه‌گیری‌های محلی منابع از همان مسیر دریافت گردد. استفاده از این روش نیازمند لینک مخابراتی دوطرفه و حجم زیادی از اطلاعات از قبیل اطلاعات مربوط به منابع و بارهای سیستم بوده که باید از طریق لینک مخابراتی ارسال شوند. این امر سبب افزایش هزینه‌های نصب و راه‌اندازی سیستم و همچنین کاهش قابلیت اطمینان ریزشبکه می‌شود. این روش در ریزشبکه‌هایی با مقیاس بزرگتر و تعداد منابع و بارهای بیشتر بدلیل تمرکز اطلاعات می‌تواند سبب بروز مشکلات امنیتی در کنترل ریزشبکه گردد.

در روش پیشنهادی از یک پروتکل مخابراتی بهینه شده استفاده شده است. این پروتکل در دسته‌ی کاملاً پراکنده جای می‌گیرد. با این تفاوت که لینک مخابراتی بکار گرفته شده در آن یک طرفه و پهنای باند آن بسیار کوچک است. همچنین هر منبع فقط با منبع همسایه خود در بالادست در ارتباط است. در این پروتکل هیچ مسأله بهینه‌سازی وجود ندارد و پیاده‌سازی آن بسیار ساده است. در قسمت بعدی روش پیشنهادی همراه با پروتکل مخابراتی آن معرفی شده است.

## ۵- سیستم کنترلی پیشنهادی

همانگونه که مطرح شد، بکارگیری مشخصه‌ی آفتی معمول ولتاژ غالباً به تقسیم ایده‌آل توان راکتیو میان منابع منجر نمی‌شود. علت این امر اختلاف میان امپدانس فیدر متصل به منابع و در نتیجه اختلاف افت ولتاژ روی فیدر متصل به منابع است. همچنین تزویج میان کنترل توان اکتیو و راکتیو نیز می‌تواند سبب اختلال در عملکرد مشخصه‌ی آفتی معمول ولتاژ گردد. شکل (۴) ریزشبکه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مطابق این شکل ریزشبکه دارای دو منبع اینورتری با ظرفیت مشابه است که به صورت موازی یک بار مشترک را تغذیه می‌کنند.

می‌توان رابطه‌ی مشخصه‌ی آفتی ولتاژ را برای منابع موجود در ریزشبکه‌ی مورد مطالعه به صورت زیر نوشت [۱۹]:



شکل (۴): ریزشبکه‌ی جزیره‌ای شامل دو واحد DG



$$E_i = E_0 - n_q (Q_i - Q_0), i = 1, 2 \quad (1)$$

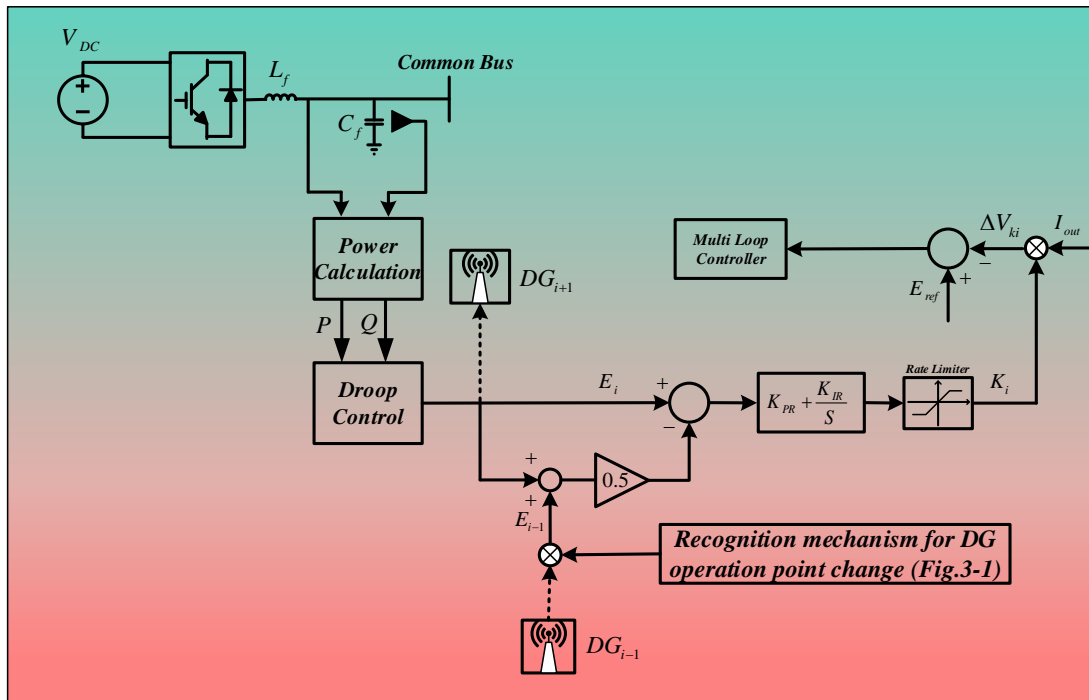
در این رابطه  $E_i$  خروجی مشخصه افقی منبع  $i$  ام،  $E_0$  ولتاژ نامی منابع،  $Q_i$  توان راکتیو خروجی منبع  $i$  ام و  $n_q$  شیب مشخصه افقی ولتاژ است که در ریزش شبکه‌ی مورد مطالعه برای هر دو منبع دارای مقداری یکسان می‌باشد. تفاضل خروجی مشخصه افقی منبع شماره‌ی یک و منبع شماره‌ی دو را می‌توان بصورت رابطه‌ی (۲) نوشت:

$$E_1 - E_2 = n_q (Q_2 - Q_1) \quad (2)$$

همانگونه که در این رابطه مشاهده می‌شود میان اختلاف خروجی مشخصه افقی منابع و خطای تقسیم توان راکتیو نسبت مستقیم وجود دارد. در صورتی که خروجی مشخصه افقی دو منبع با هم برابر باشد مطابق رابطه‌ی (۲) خطای تقسیم توان راکتیو برابر با صفر شده و توان راکتیو به نسبت برابر میان منابع تقسیم می‌شود. لذا برابر شدن خروجی مشخصه افقی به عنوان هدف اصلی استراتژی پیشنهادی مطرح می‌شود. شکل (۵) بلوک دیاگرام روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانگونه که مطرح شد اساس روش پیشنهادی مبتنی بر همگرایی خروجی مشخصه‌های افقی منابع می‌باشد. بنابراین کنترل‌کننده‌ی امیدانس مجازی پیشنهادی به منظور دستیابی به تقسیم توان راکتیو ایده‌آل و جلوگیری از ایجاد اضافه بار روی منابع پراکنده موجود در ریزش شبکه، به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که خروجی مشخصه افقی هر منبع در نهایت برابر با پارامتر  $E$  شود.  $E$  میانگین خروجی مشخصه افقی دو منبع همسایه بوده و از طریق رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود:

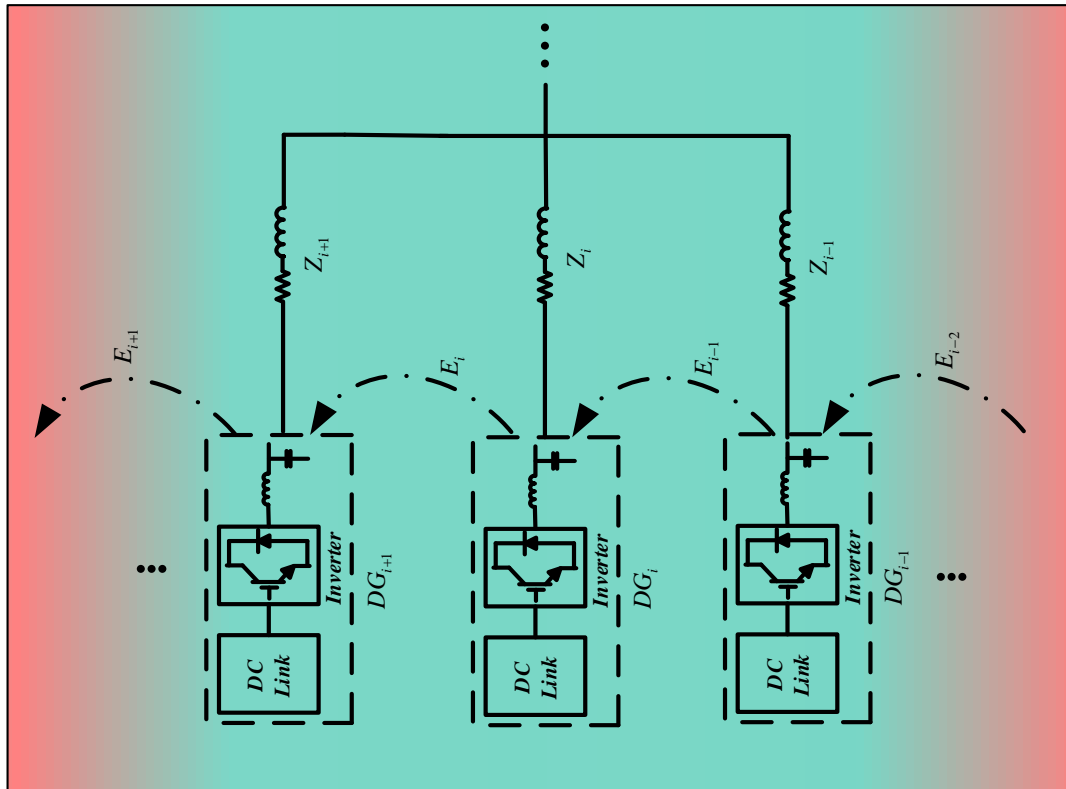
$$E = \frac{E_i + E_{i-1}}{2} \quad (3)$$

در این رابطه  $E_i$  خروجی مشخصه افقی منبع  $i$  ام و  $E_{i-1}$  خروجی مشخصه افقی همسایه‌ی منبع  $i$  ام است. همانگونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود هر منبع تنها با منابع همسایه دارای ارتباط مخابراتی بوده و مقدار خروجی مشخصه افقی ولتاژ خود را از طریق یک لینک مخابراتی یک طرفه با پهنای باند کم به منبع همسایه ارسال می‌کند. همچنین برای محاسبه‌ی پارامتر  $E$  خروجی مشخصه افقی منبع قبل را نیز دریافت می‌کند.



شکل (۵): بلوک دیاگرام روش پیشنهادی برای منبع  $i$  ام





شکل (۶): پروتکل مخابراتی بکار رفته در استراتژی پیشنهادی

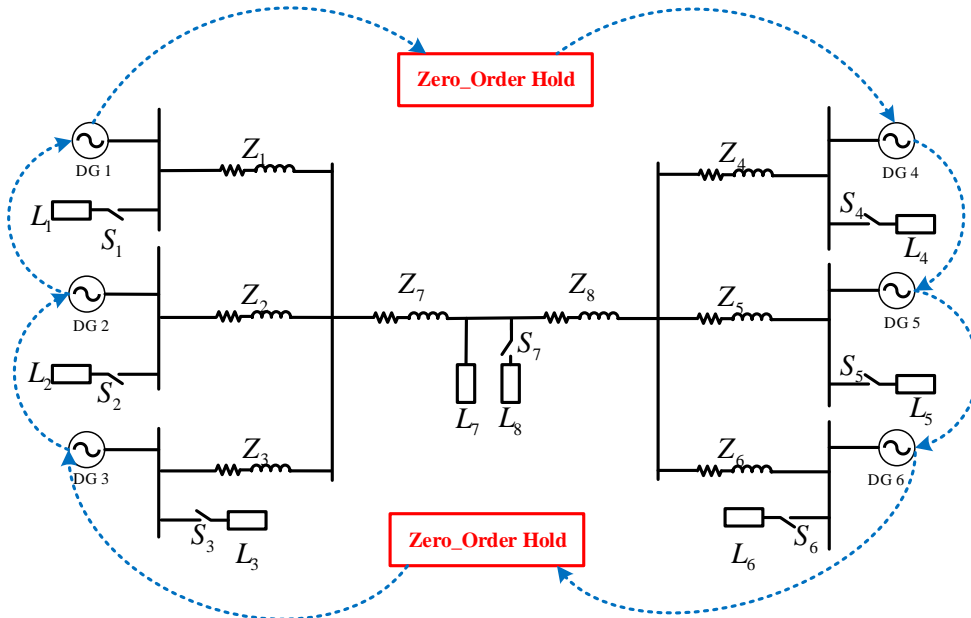
مطابق شکل (۵) اختلاف  $E_i$  و  $E$  وارد یک کنترل‌کننده  $PI$  می‌شود. خروجی کنترل‌کننده  $PI$  پارامتر امیدانس مجازی مورد نظر است که با ضرب در جریان خروجی اینورتر، افت ولتاژ مجازی مطلوب را ایجاد می‌کند. پس از تشخیص تغییر در نقطه‌ی کار منابع توسط مکانیزم ارایه شده در شکل (۲) خروجی مشخصه‌ی اف‌تی منبع تغییر کرده و پارامتر  $K_i$  بعنوان امیدانس مجازی به صورت وقتی تغییر داده شده و سبب صفر شدن اختلاف  $E_i$  و  $E$  می‌شود. از آنجایی که هر منبع تنها با منبع همسایه ارتباط دارد، این دینامیک بصورت پله‌ای در کل ریزشبکه گسترش یافته و سبب می‌شود پس از رسیدن به حالت دائمی، خروجی مشخصه‌ی اف‌تی کلیه‌ی منابع به میانگین مقادیر خروجی مشخصه‌های اف‌تی همگرا گردد. در این صورت تقسیم ایده‌آل توان راکتیو میان کلیه‌ی منابع موجود در ریزشبکه حاصل می‌شود. میزان ولتاژ مجازی تزریق شده به پایانه‌ی منابع توسط حلقه‌ی امیدانس مجازی موجب می‌شود که خروجی مشخصه‌ی اف‌تی ولتاژ منابع همواره در محدوده‌ی مجاز باقی بماند و موجب تضمین تنظیم ولتاژ مطلوب خواهد شد. در شکل (۶) توپولوژی پروتکل مخابراتی پیشنهادی قابل مشاهده است. همان‌گونه که در شکل (۶) می‌توان دید، ارتباط بین منابع از طریق لینک مخابراتی یک‌طرفه برقرار شده است. هر منبع فقط با منبع بالادست که در همسایگی آن قرار دارد، ارتباط دارد. تنها پارامتری که از طریق لینک مخابراتی منتقل می‌شود، خروجی مشخصه‌ی اف‌تی ولتاژ در کنترلر توان منابع است. بنابراین احتیاجی به لینک مخابراتی با پهنای باند وسیع برای اجرای روش پیشنهادی نیست. اگر فرض کنیم مسأله‌ی بهینه‌سازی جاری بین منابع، ردیابی و محاسبه‌ی رابطه‌ی (۳) باشد، در این صورت حل مسأله‌ی مذکور به دور از پیچیدگی خاصی در کنترلر توان منابع به صورت محلی انجام خواهد شد. بنابراین پیاده‌سازی روش پیشنهادی از لحاظ عملی پیچیدگی سایر روش‌ها را نخواهد داشت.

## ۶- نتایج شبیه‌سازی

بمنظور بررسی صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی در این فصل در دستیابی به تسهیم ایده‌آل توان راکتیو بین منابع، کارایی آن از طریق شبیه‌سازی ریزشبکه‌ی نمونه معرفی شده در شکل (۷) مورد بررسی قرار گرفته است. این ریزشبکه دارای شش منبع مبتنی بر اینورتر با ظرفیت مشابه می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۷) قابل مشاهده است، اندازه‌ی ولتاژ خروجی مشخصه‌ی اف‌تی ولتاژ هر منبع از طریق یک لینک مخابراتی یک‌طرفه به کنترل‌کننده‌ی محلی منابع در همسایگی ارسال شده است. به منظور مدل کردن تأخیر لینک



مخابراتی از بلوک *Zero-Order Hold* استفاده شده است. در این صورت سیگنال ارسالی توسط لینک مخابراتی همواره دارای تأخیر زمانی است [۴]. اطلاعات مربوط به بارها، خطوط ارتباطی و پارامترهای کنترلی منابع در جدول جدول (۱) قابل مشاهده می‌باشد. ساختار کنترلی هر یک از منابع اینورتری در شکل (۵) نشان داده شده است. به منظور ایجاد امکان مقایسه بین روش کنترل افقی معمول و استراتژی پیشنهادی، تمامی سناریوهای شبیه‌سازی با هر دو روش کنترل افقی و استراتژی پیشنهادی پیاده‌سازی شده است.



شکل (۷): پیکربندی ریزشکته‌ی مورد مطالعه در شبیه‌سازی

جدول (۱): پارامترهای سیستم مورد مطالعه در شبیه‌سازی‌ها

پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی	208V
ولتاژ لینک DC	400V
فیلتر	$R_f=0.15\Omega, C_f=45\mu F, L_f=1.5mH,$
فرکانس کلیدزنی اینورتر	4500 KHz
نسبت X/R سیستم	1.66
شیب مشخصه‌ی افقی فرکانس	0.000167 Rad/(Sec. W)
شیب مشخصه‌ی افقی ولتاژ	0.00174 V/VAr
بارها	$L_1=L_3=L_4=L_6=10+j2.5\ \Omega$ $L_2=L_5=L_8=5+j1.25\ \Omega$ $L_7=2.5+j1.25\ \Omega$
امپدانس خطوط	$Z_1=0.03+j0.05$ $Z_2=Z_7=Z_8=0.06+j0.1$ $Z_3=Z_6=0.09+j0.15$ $Z_4=0.18+j0.3$ $Z_5=0.27+j0.45$

#### ۶-۱- وقوع خطای اتصال کوتاه

سناریوی شبیه‌سازی این قسمت در دو بخش طراحی شده است. بخش اول مربوط به عملکرد روش‌های کنترلی افقی مرسوم و روش پیشنهادی در هنگام وقوع خطای اتصال کوتاه است و بخش دوم تغییر نقطه‌ی کار منابع در اثر کلیدزنی بارهای محلی در هنگام وقوع خطا را بررسی می‌کند.





در این قسمت بمنظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در برابر وقوع خطا، در  $t = 3$  ثانیه در سیستم مورد مطالعه یک خطای تکفاز به زمین در فیدر متصل به منبع ۳ اتفاق افتاده است. بعد از گذشت سه ثانیه از وقوع خطا در  $t = 6$  خطا برطرف شده است. در این مدت زمان فرض شده است که وقوع خطای اتصال کوتاه توسط رله‌های حفاظتی به درستی تشخیص داده نشده است. بنابراین در این مدت خطای مورد نظر ایزوله نشده و بدیهی است در چنین شرایطی منابعی که در نزدیکی خطای اتصال کوتاه حضور دارند نیز از مدار جدا نخواهند شد. بنابراین در این شرایط عملکرد سیستم کنترل ولتاژ و فرکانس منابع باید به گونه‌ای باشد که علاوه بر تغذیه جریان خطا، از اضافه بار شدن منابع جلوگیری کند. بدین ترتیب در لحظات وقوع خطا همه منابع به فعالیت خود ادامه می‌دهند و لزومی برای جدا شدن از شبکه وجود نخواهد داشت. بدین ترتیب پس از برطرف شدن خطا نیازی به نصب، راه‌اندازی و سنکرون‌سازی مجدد منبع جدا شده نیز وجود نخواهد داشت. شکل‌های (۸) و (۹) نحوه‌ی تسهیم توان اکتیو و راکتیو را قبل، در حین و بعد از خطا به ترتیب با اجرای روش افتی معمول و روش پیشنهادی نمایش می‌دهند. همانگونه که در شکل (۸) قابل مشاهده است، تسهیم توان اکتیو و راکتیو در حین خطا میان منابع بطور مطلوب انجام نمی‌پذیرد. در واقع در زمان حضور خطا در سیستم، منابعی که در نزدیکی خطا هستند ( $DG_1, DG_2, DG_3$ )، انحراف فرکانس و ولتاژ بزرگی را تجربه کرده‌اند. این انحراف بزرگ باعث خطای تقسیم توان اکتیو و راکتیو قابل توجهی بین منابع شده است. در منبع سوم که نزدیکترین واحد به محل وقوع خطاست، بیشترین جابجایی نقطه کار رخ داده است. به طوری که امکان بازبایی پارامتر سراسری فرکانس بوجود نیامده است. در واقع به دلیل انحراف شدید ولتاژ، استراتژی افتی معمول قادر به تغذیه‌ی جریان خطا نخواهد بود. در واقع استراتژی خطی افتی مرسوم قادر به تغذیه‌ی بارهای (جریان‌های) غیرخطی نخواهد بود. بدیهی است که اگر خطای اتصال کوتاه مدت زمان بیشتری در مدار باقی بماند، انحراف فرکانس ایجاد شده گسترش می‌یابد و به دلیل تزویجی که بین کنترل توان اکتیو و راکتیو وجود دارد، سیستم به سمت ناپایداری و از دست رفتن تمامی منابع پیش خواهد رفت. اما همانگونه که در شکل (۹) قابل مشاهده است، توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی منابع همگرا شده و منابع واکنشی با دینامیک مناسب‌تری به وقوع خطا داشته و دامنه حالت گذرا به خوبی محدود شده است. بنابراین عملکرد روش تسهیم توان پیشنهادی در حین وقوع خطای اتصال کوتاه که باعث تغییر بزرگ در نقطه‌ی کار منابع شده است، مطلوب گزارش می‌شود. همچنین در شکل (۹-ج) نشان داده شده است که ولتاژ خروجی مشخصه افتی ولتاژ منابع در محدوده‌ی مجاز ( $E_0 - 20\% E_n \leq E_{Droop} \leq E_0 + 20\% E_n$ ) باقی مانده است.

در بخش دوم سناریوی شبیه‌سازی، عملکرد استراتژی پیشنهادی در هنگامی بررسی می‌شود که خطای اتصال کوتاه در سیستم باقی مانده و همزمان نقطه‌ی کار منابع بر اثر کلیدزنی بارهای محلی تغییر خواهد کرد. در این سناریو خطای اتصال کوتاه تکفاز به زمین در بازه زمانی  $3^s \leq t \leq 9^s$  در فیدر متصل به منبع سوم اتفاق افتاده است. به دلیل نزدیکی منبع شماره ۳ به محل وقوع خطا بار محلی آن ( $L_3$ ) در لحظه‌ی  $t = 6$  ثانیه از شبکه خارج شده است. در همین لحظه یک فرآیند کلیدزنی بار محلی در فیدر متصل به منبع پنجم اتفاق افتاده و بار  $L_5$  از مدار جدا شده است. در چنین شرایطی کنترل‌کننده منابع می‌بایست علاوه بر واکنش مناسب به تغییر نقطه‌ی کار منابع در مقابل خطای اتصال کوتاه، به تغییر نقطه‌ی کار ناشی از فرآیند کلیدزنی بارهای محلی نیز پاسخ مناسبی دهند. در واقع در این سناریو به طور هم‌زمان تغییرات بزرگ و کوچک نقطه‌ی کار منابع اتفاق افتاده است. شکل (۱۰) نتایج حاصل از شبیه‌سازی این سناریو را نمایش می‌دهد. در شکل‌های (۱۰-الف)، (۱۰-ب) و (۱۰-ج) به ترتیب همگرایی توان اکتیو منابع، توان راکتیو منابع و خروجی مشخصه افتی کنترلی آن‌ها در همه حالات مشاهده می‌شود. بنابراین عملکرد استراتژی پیشنهادی در مقابل تغییرات خطی و تغییرات غیرخطی نقطه‌ی کار منابع مطلوب گزارش می‌شود.

## ۲-۶- تغییر نسبت $X/R$

زمانی که شبکه به صورت غالب مقاومتی باشد، توان اکتیو عمدتاً به ولتاژ و توان راکتیو عمدتاً به فرکانس وابسته است. به همین دلیل در این شرایط پیشنهاد می‌شود جهت تضعیف تزویج میان کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو از مشخصه‌های معکوس  $E - P$  و  $\omega - Q$  استفاده گردد [۲۰، ۲۱]. با استفاده از این مشخصه‌ها تسهیم توان راکتیو که با فرکانس در یک مشخصه قرار دارد، بطور معمول به صورت ایده‌آل انجام می‌شود ولی در مورد توان اکتیو به علت تفاوت افت ولتاژ روی امیدانس خروجی منابع، تسهیم ایده‌آل حاصل نخواهد شد. در واقع بکارگیری استراتژی‌های افتی مرسوم در شبکه‌های سلفی و مقاومتی نیازمند تغییر در ساختار کنترلر محلی منابع با توجه به نسبت  $X/R$  شبکه است. این موضوع در شبکه‌های واقعی که ساختار آن‌ها بطور مداوم در حال توسعه و تغییر است،





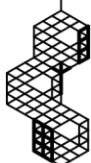


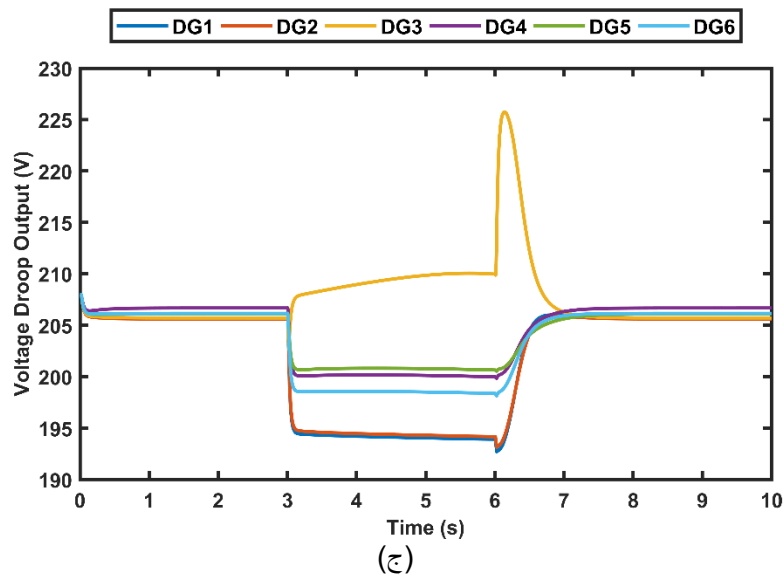
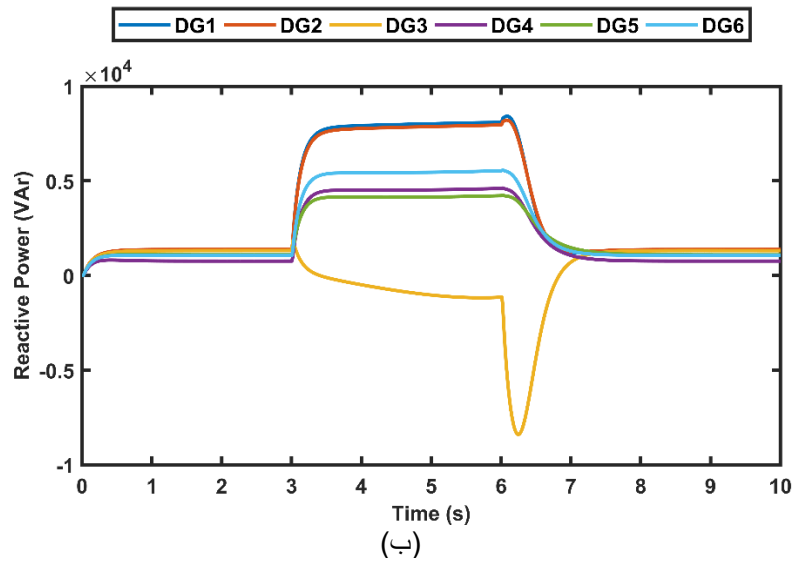
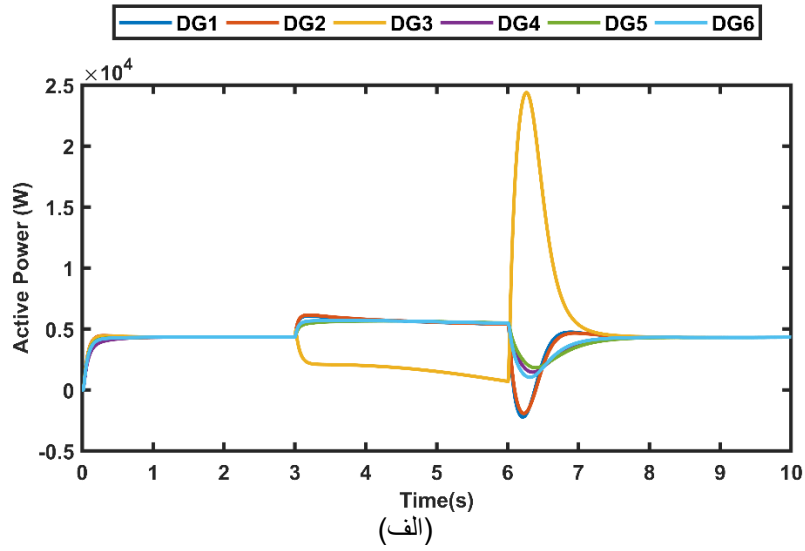
موجب کاهش قابلیت اطمینان روش کنترلی خواهد شد. جهت بررسی دینامیک پاسخ روش پیشنهادی، برای شرایط مختلف شبکه از نظر نسبت  $X/R$ ، قسمت مقاومتی امیدانس خطوط سیستم مورد مطالعه‌ی شکل (۷)، چهار برابر گشته تا سیستم مورد آزمایش به یک شبکه با خاصیت مقاومتی غالب تبدیل شود. در این سناریو نیز یک فرآیند کلیدزنی مدل شده است. بدین ترتیب که در لحظه‌ی  $t = 5$  ثانیه بار محلی  $L_8$  توسط کلید  $S_7$  از فیدر متصل به منبع سوم جدا شده است. شکل (۱۱) و (۱۲) توان اکتیو و خروجی مشخصه‌ی افقی منابع اینورتری را در طی فرآیند شبیه‌سازی به ترتیب با بکارگیری مشخصه‌ی افقی مرسوم و الگوریتم پیشنهادی نمایش می‌دهند. همانگونه که در شکل (۱۲) قابل مشاهده است با کاهش نسبت  $X/R$  خطوط ( $X/R = 0.4$ )، همچنان الگوریتم پیشنهادی دارای دقت تقسیم توان اکتیو و راکتیو بالایی است. این در حالی است که هنگامی که استراتژی افقی معمول بکار گرفته شده است، دینامیک پاسخ توان‌های اکتیو و راکتیو بسیار کندتر از زمانی است که روش پیشنهادی اجرا شده است. همچنین خطای تقسیم توان راکتیو قابل توجهی بین منابع بوجود آمده است. در شکل (۱۱-ب) می‌توان مشاهده کرد که توان راکتیو خروجی  $DG_4$  پس از فرآیند کلیدزنی دارای مقادیر منفی شده است. این موضوع نشان می‌دهد که این منبع خود به یک مصرف‌کننده‌ی توان راکتیو تبدیل شده است. همانطور که قبل‌تر بیان شد با کاهش نسبت  $X/R$  شبکه تزویج بین کنترل توان اکتیو و راکتیو افزایش می‌یابد. در نتیجه خطای تقسیم توان راکتیو علاوه بر اختلاف امیدانس خطوط، وابستگی شدیدی به مقدار ایده‌آل توان اکتیو تولیدی منابع دارد. این در حالی است که در یک شبکه با خاصیت مقاومتی توان اکتیو با پارامتر محلی ولتاژ در ارتباط است. لذا با اجرای مشخصه‌ی افقی فرکانس مرسوم، مقدار توان اکتیو تولیدی منابع در نقطه‌ی کار ایده‌آل همگرا نشده است. این موضوع باعث افزایش چشمگیر خطای تقسیم توان راکتیو به دلیل افزایش خاصیت تزویج شده و منبع پنجم را به یک مصرف‌کننده‌ی توان راکتیو تبدیل کرده است. بر اساس نتایج حاصل از این سناریو می‌توان گفت الگوریتم پیشنهادی در برابر تغییرات نقطه‌ی کار منابع حاصل از تغییر در ساختار و ثوبولوژی شبکه نیز عملکرد مقاوم و مناسبی از نقطه‌نظر تقسیم توان دارد.

### ۳-۶- بررسی اثر تأخیر در لینک مخابراتی

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی از یک لینک مخابراتی یکطرفه با پهنای باند کم استفاده شده است. در این بخش اثر تأخیر در ارسال اطلاعات توسط لینک مخابراتی، بر روی دقت تسهیم توان اکتیو و راکتیو مورد بررسی قرار می‌گیرد. سناریوی استفاده شده در این بخش بصورت زیر است:

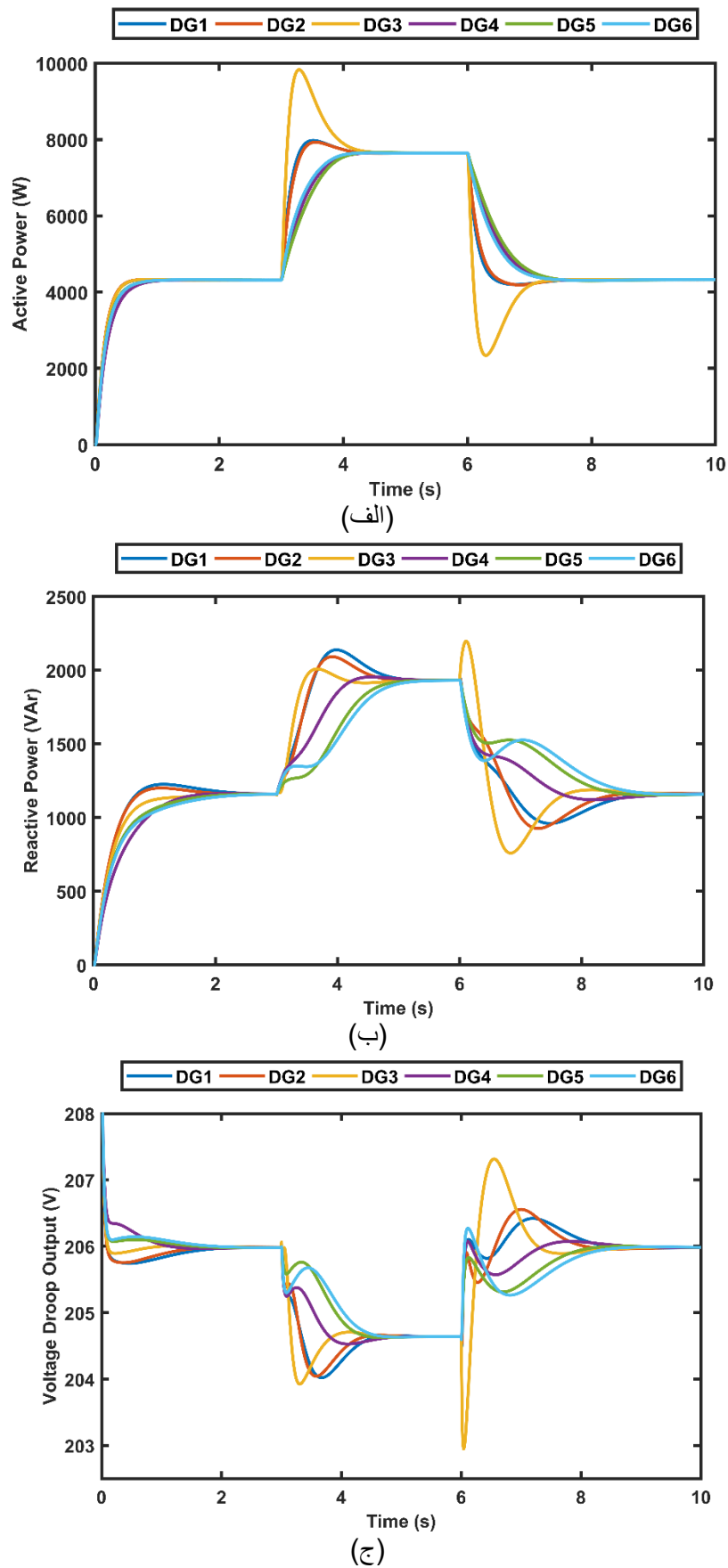
در این قسمت تأخیرات لحظه‌ای متفاوت در ارسال اطلاعات به کنترل‌کننده‌ی محلی هر منبع، در نظر گرفته شده است. به این منظور در زمان  $t=3$  برای منابع ۱ تا ۶ به ترتیب  $0.2$ ،  $0.3$ ،  $0.4$ ،  $0.2$ ،  $0.1$  و  $0.1$  ثانیه تأخیر در دریافت اطلاعات مورد نیاز از منبع همسایه در نظر گرفته شده است. مطابق شکل (۱۳) هیچگونه اغتشاش لحظه‌ای در توان اکتیو و راکتیو منابع در اثر تأخیر بوجود آمده مشاهده نمی‌شود، در واقع تأخیر در عملکرد لینک مخابراتی در مقابل دینامیک عملکرد حلقه‌ی امیدانس مجازی انتگرالی که به صورت پلکانی تکمیل می‌شود، قابل صرف‌نظر کردن است. تأخیر بوجود آمده بلافاصله توسط حلقه‌های کنترلی جبران شده و از طریق برابری خروجی مشخصه‌ی افقی منابع، مقادیر توان راکتیو آن‌ها به مقدار ایده‌آل تسهیم شده بازمی‌گردد. با بررسی نتایج بدست آمده می‌توان گفت روش پیشنهادی نسبت به تأخیر در لینک مخابراتی مقاوم بوده و دارای عملکرد مطلوبی می‌باشد.





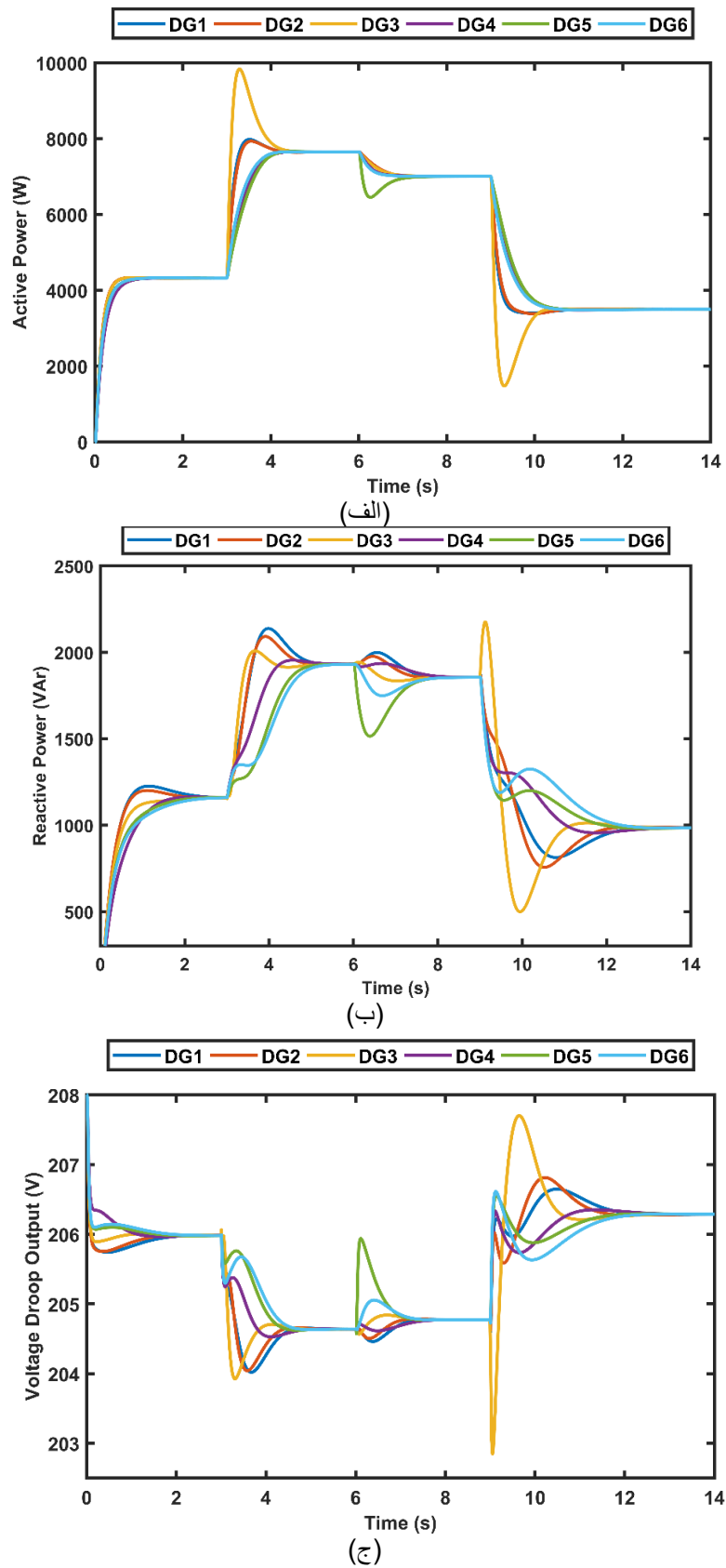
شکل (۸): نتایج حاصل از شبیه‌سازی خطای تک‌فاز به زمین. با بکارگیری استراتژی اف‌تی معمول. الف: توان اکتیو، ب: توان راکتیو، ج: خروجی مشخصه اف‌تی ولتاژ





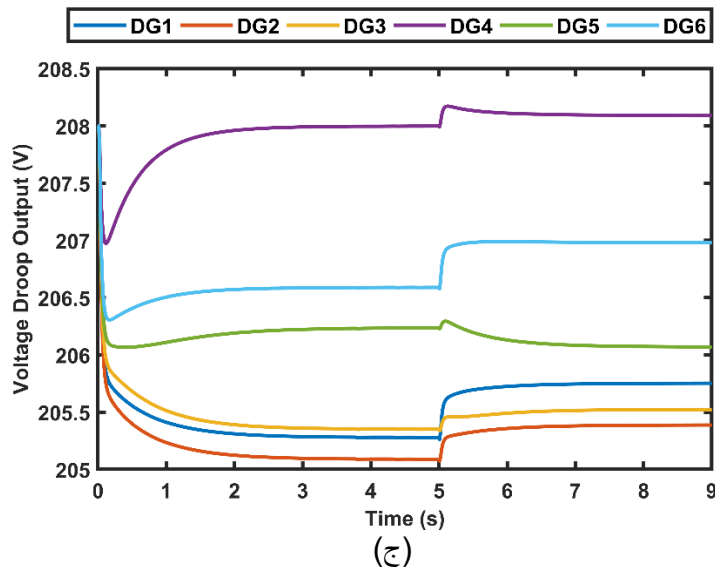
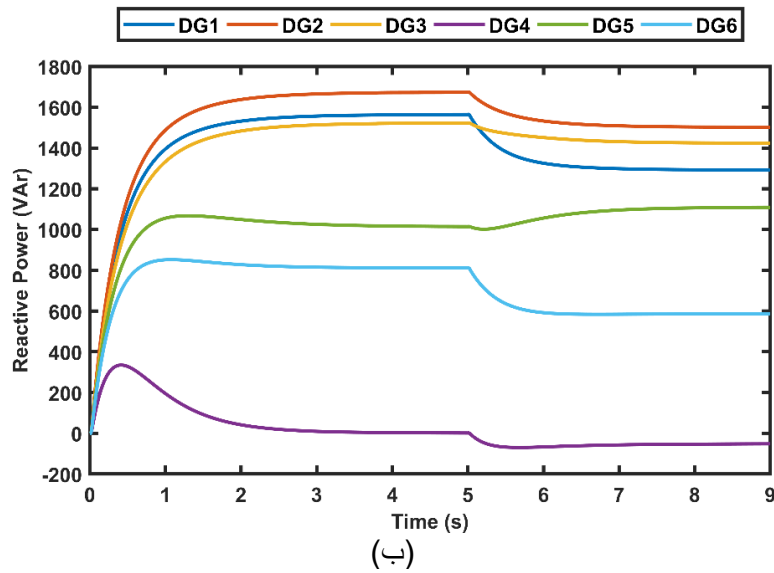
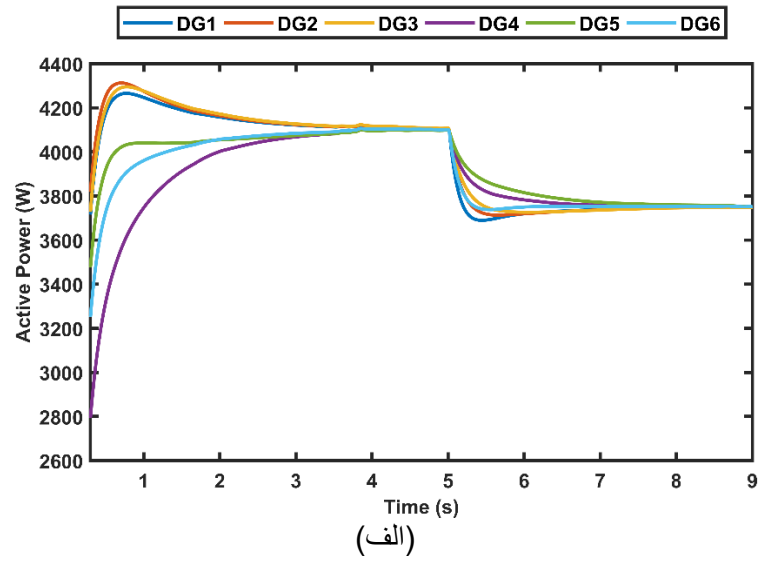
شکل (۹): نتایج حاصل از شبیه‌سازی خطای تکفاز به زمین. با بکارگیری استراتژی پیشنهادی. الف: توان اکتیو، ب: توان راکتیو، ج: خروجی مشخصه افتی ولتاژ





شکل (۱۰): اثر تغییر نقطه کار در زمان حضور خطای اتصال کوتاه با اجرای الگوریتم پیشنهادی. الف: توان اکتیو، ب: توان راکتیو، ج: خروجی مشخصه اکتی ولتاژ

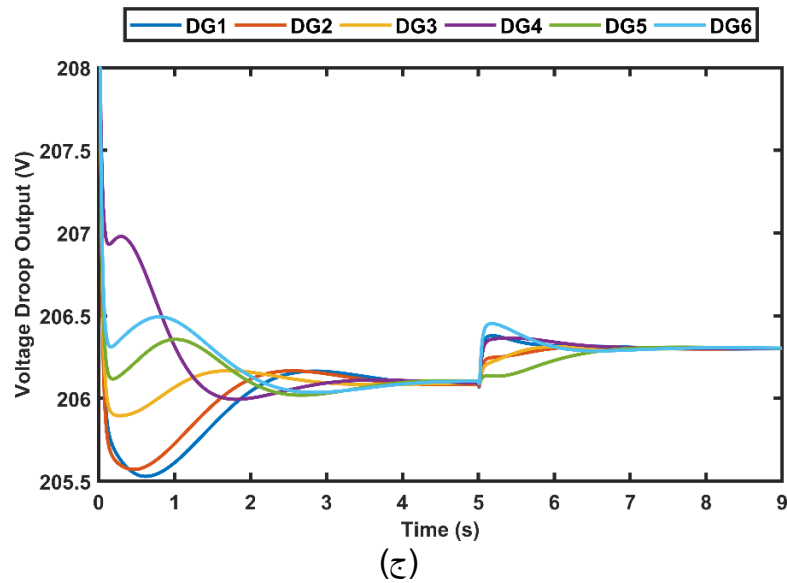
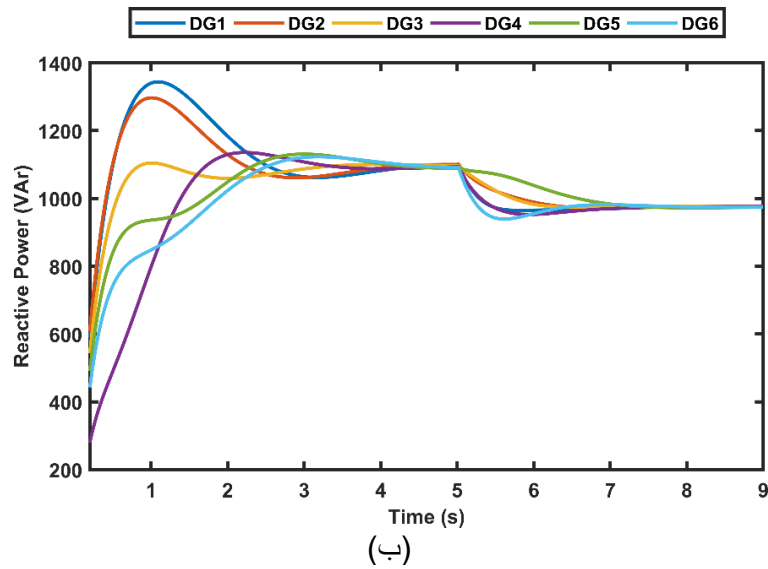
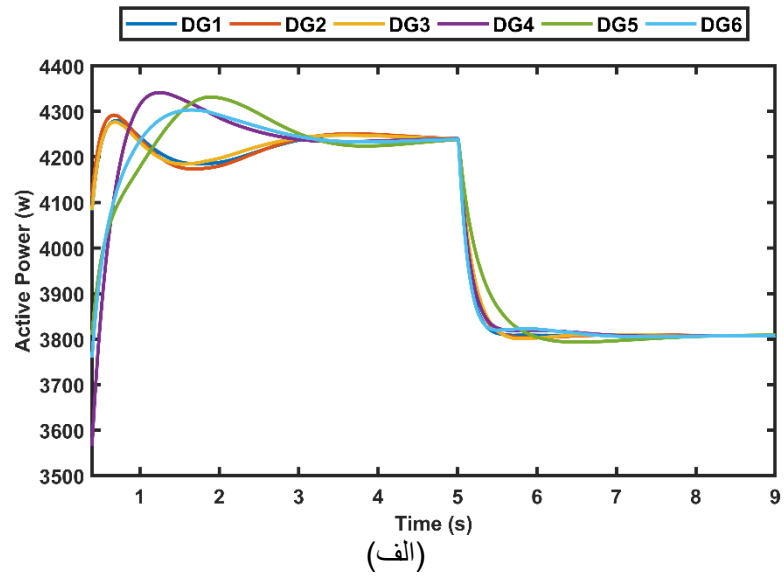




شکل (۱۱): نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم مورد مطالعه با نسبت  $X/R = 0.4$  با اجرای کنترل افتی مرسوم. الف: توان اکتیو، ب:

توان راکتیو، ج: خروجی مشخصه افتی ولتاژ



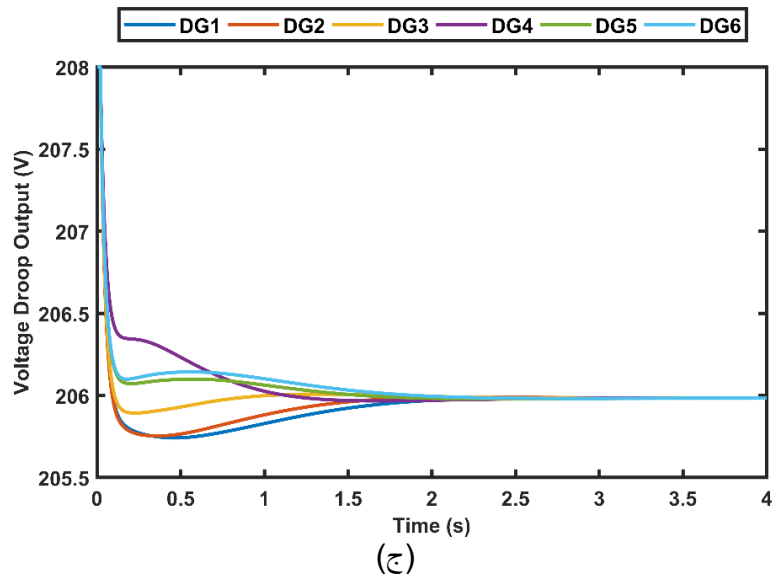
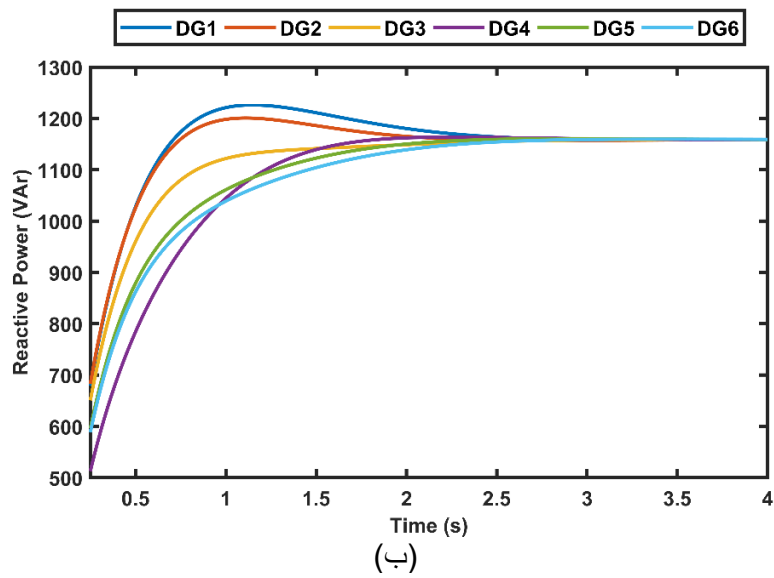
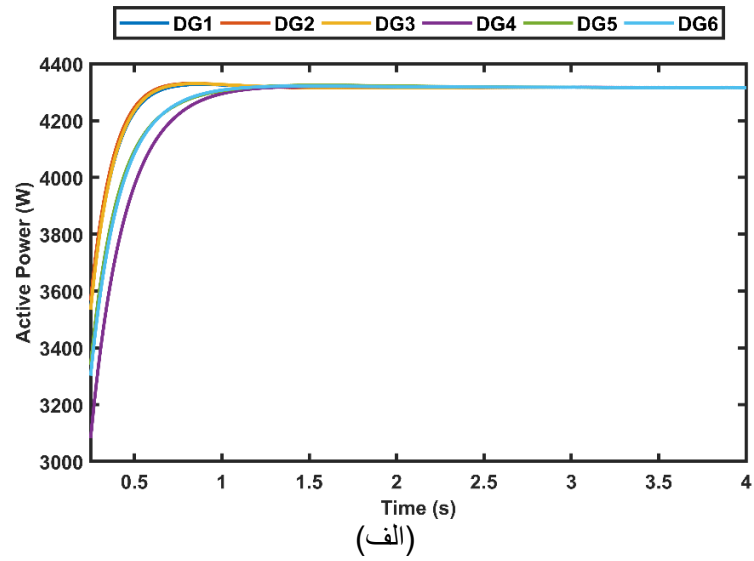


شکل (۱۲): نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه با نسبت  $X/R = 0.4$  با اجرای کنترل پیشنهادی. الف: توان اکتیو، ب:

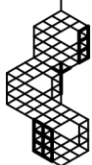
توان راکتیو، ج: خروجی مشخصه اف‌تی ولتاژ







شکل (۱۳): اثر تأخیر در لینک مخابراتی بر عملکرد کنترل پیشنهادی. الف: توان اکتیو، ب: توان راکتیو، ج: خروجی مشخصه افتی ولتاژ





## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهبود تقسیم توان راکتیو در ریزشبکه‌های جزیره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. مدیریت خطا در ریزشبکه‌ی مبتنی بر اینورتر مورد بحث و بررسی قرار گرفت. روش امیدانس مجازی به عنوان روشی مناسب برای بهبود عملکرد تقسیم توان در ریزشبکه معرفی شده و انواع پروتکل‌های مخابراتی برای ارتباط میان سیستم کنترلی منابع معرفی شده و در نهایت روش پیشنهادی بر مبنای امیدانس مجازی و پروتکل مخابراتی پراکنده مبتنی بر سیستم‌های چند عاملی معرفی گردید. در روش پیشنهادی اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه‌ی امیدانس مجازی - که همان ولتاژ خروجی مشخصه‌ی اکتی و ولتاژ منبع است - از طریق یک پروتکل مخابراتی پراکنده و یک طرفه با پهنای باند کم، از هر منبع به منبع همسایه ارسال می‌شود. سپس از طریق یک کنترل کننده‌ی  $PI$  و تنظیم وفقی امیدانس مجازی برای کلیه‌ی منابع مقدار خروجی مشخصه‌ی اکتی کلیه‌ی منابع در مقدار بهینه همگرا شده و تسهیم ایده‌آل توان راکتیو حاصل می‌شود. اغتشاشات بوجود آمده در ریزشبکه به دو دسته تقسیم شدند. دسته‌ی اول منجر به تغییرات کوچک نقطه‌ی کار منابع و دسته‌ی دوم تغییرات بزرگ آن را موجب می‌شوند. در بررسی‌های انجام شده خطای اتصال کوتاه در دسته‌ی دوم جای گرفت. مکانیزمی برای تشخیص تغییرات نقطه‌ی کار منابع و آشکارسازی خطا معرفی شد. کارآمدی روش پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی مورد مشاهده و ارزیابی قرار گرفت.

## مراجع

- [1] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Cañizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saadifard, R. Palma-Behnke, and N. D. Hatziargyriou, "Trends in microgrid control," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [2] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, "Microgrids management," *IEEE power and energy magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, 2008, doi: 10.1109/MPE.2008.918702.
- [3] B. Fani, F. Zandi, and A. Karami-Horestani, "An enhanced decentralized reactive power sharing strategy for inverter-based microgrid," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 98, pp. 531-542, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.12.023.
- [4] F. Zandi, B. Fani, I. Sadeghkhan, and A. Orakzadeh, "Adaptive complex virtual impedance control scheme for accurate reactive power sharing of inverter interfaced autonomous microgrids," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 22, pp. 6021-6032, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5123.
- [5] J. Schiffer, T. Seel, J. Raisch, and T. Sezi, "Voltage Stability and Reactive Power Sharing in Inverter-Based Microgrids With Consensus-Based Distributed Voltage Control," *IEEE Trans. Contr. Sys. Techn.*, vol. 24, no. 1, pp. 96-109, 2016, doi: 10.1109/TCST.2015.2420622.
- [6] H. Zhang, S. Kim, Q. Sun, and J. Zhou, "Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1749-1761, 2017, doi: 10.1109/TSG.2015.2506760.
- [7] J. He and Y. W. Li, "An enhanced microgrid load demand sharing strategy," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 9, pp. 3984-3995, 2012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2190099.
- [8] M. Kosari and S. H. Hosseinian, "Decentralized reactive power sharing and frequency restoration in islanded microgrid," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2901-2912, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2621033.
- [9] H. Han, Y. Liu, Y. Sun, M. Su, and J. M. Guerrero, "An improved droop control strategy for reactive power sharing in islanded microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 6, pp. 3133-3141, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2332181.
- [10] F. Zandi, B. Fani, and A. Golsorkhi, "A visually driven nonlinear droop control for inverter-dominated islanded microgrids," *Electrical Engineering*, pp. 1-16, 2020, doi: 10.1007/s00202-020-00942-7.
- [11] Y. Zhu, F. Zhuo, F. Wang, B. Liu, R. Gou, and Y. Zhao, "A virtual impedance optimization method for reactive power sharing in networked microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 4, pp. 2890-2904, 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2450360.





- [12] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, "Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 3, pp. 1605-1617, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2314721.
- [13] I. Sadeghkhani, M. E. H. Golshan, A. Mehrizi-Sani, J. M. Guerrero, and A. Ketabi, "Transient monitoring function-based fault detection for inverter-interfaced microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2097-2107, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2606519.
- [14] K. O. Oureilidis and C. S. Demoulias, "A Fault Clearing Method in Converter-Dominated Microgrids With Conventional Protection Means," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 6, pp. 4628-4640, 2016, doi: 10.1109/tpel.2015.2476702.
- [15] H. Al-Nasseri and M. Redfern, "A new voltage based relay scheme to protect micro-grids dominated by embedded generation using solid state converters," *19th International Conference Electricity Distribution*, pp. 1-4, 2007.
- [16] H. Al-Nasseri and M. Redfern, "Harmonics content based protection scheme for micro-grids dominated by solid state converters," *12th International Middle-East Power System Conference*, pp. 50-56, 2008, doi: 10.1109/MEPCON.2008.4562361.
- [17] S. M. Brahma, "Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1545-1553, 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2106146.
- [18] T. Morstyn, B. Hredzak, and V. G. Agelidis, "Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3652-3666, 2016, doi:10.1109/TSG.2016.2637958.
- [19] E. Rokrok and M. E. H. Golshan, "Adaptive voltage droop scheme for voltage source converters in an islanded multibus microgrid," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 4, no. 5, pp. 562-578, 2010, doi: 10.1049/iet-gtd.2009.0146.
- [20] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuna, M. Castilla, and J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 994-1004, 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.892621.
- [21] Q.-C. Zhong, "Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1281-1290, 2013, doi: 10.1109/TIE.2011.2146221.

زیر نویس ها

- 
- <sup>1</sup> Micro-Grid
  - <sup>2</sup> Local loads
  - <sup>3</sup> Communication Links
  - <sup>4</sup> Common Loads
  - <sup>5</sup> Autonomous
  - <sup>6</sup> Islanding
  - <sup>7</sup> Multi Agent

