

## طراحی کنترل کننده محلی توان برای منابع پراکنده اینورتری در ریز شبکه های جزیره ای

محمد صادقیان<sup>۱،۲</sup> ، دانش آموخته کارشناسی ارشد، بهادر فانی<sup>۲،۳</sup>، دانشیار، ایمان صادق خانی<sup>۲،۳</sup>، استادیار، غضنفر شاهقلیان<sup>۲،۳</sup>، دانشیار

۱- شرکت برق منطقه ای اصفهان، اصفهان، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریز شبکه های هوشمند، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

m.sadeghiyan@sel.iaun.ac.ir

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

b.fani@pel.iaun.ac.ir, sadeghkhani@pel.iaun.ac.ir, shahgholian@iaun.ac.ir

**چکیده:** تسهیم توان میان واحدهای تولید پراکنده در ریز شبکه ها معمولاً با استفاده از مشخصه های افتی توان حقیقی - فرکانس و توان راکتیو - ولتاژ انجام می شود. با وجود برتری هایی از جمله سهولت اجرا و عدم نیاز به ساختارهای مخابراتی، عدم توانایی در تسهیم مناسب توان راکتیو از نقاط ضعف این نوع کنترل کننده است. در این مقاله یک روش اصلاح بر مبنای تغییر عرض از مبدأ مشخصه افتی ولتاژ بررسی می شود. در این روش، کنترل اولیه ای منابع پراکنده اینورتری با استفاده از مشخصه های افتی مرسوم صورت می پذیرد. در ادامه با ایجاد یک نوسان کوچک در توان حقیقی و ایجاد تزویج موقت بین توان های حقیقی و راکتیو، خطای تسویه توان راکتیو برای هر واحد مشخص می شود. بر این اساس، فرم اصلاح - شده کنترل کننده با ایجاد تغییر مناسب دامنه ولتاژ خروجی، توان راکتیو تولیدی هر واحد را اصلاح می کند. به علت نیاز به اجرای همزمان این فرآیند در تمام واحدهای تولید پراکنده و مشکلات استفاده از کنترل کننده مركزی و ارتباط مخابراتی، یک روش فعال ساز محلی در این مقاله پیشنهاد شده است. طرح پیشنهادی براساس تغییرات قابل ملاحظه توان راکتیو عمل کرده و اجرای کامل مراحل روش اصلاح مشخصه افتی و فعال سازی مجدد آن را برای پاسخگویی به تغییرات توان ریز شبکه را تضمین می نماید. نتایج مطالعات در ریز شبکه تست فشار ضعیف مؤید کارآیی فعال ساز پیشنهادی است.

**واژه های کلیدی:** تولید پراکنده، ریز شبکه های جزیره ای، مشخصه های افتی، تسهیم توان راکتیو، اینورتر منبع ولتاژ.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۳/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۸

نام نویسنده مسئول: غضنفر شاهقلیان

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

## ۱- مقدمه

کanal مخابراتی سریع، پایداری سیستم را حفظ کرده و در عین حال پارامترهای حالت دائمی از جمله شاخص‌های کیفیت توان و تسهیم مناسب توان بین منابع را در حد مطلوب حفظ کند، کار پیچیده‌ای می‌نماید. در مقاله [۱۲] با در نظر گرفتن ماهیت مشخصه‌های افتی مرسوم، ایده کنترل افتی زاویه‌ی توان مطرح شده است. در این طرح زاویه‌ی ولتاژ منابع پراکنده براساس یک مرجع زمانی مشترک و تعمیم یافته در کل ریزشبکه تنظیم شده و به عنوان جایگزین پارامتر فرکانس در معادلات افتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه ایجاد ارتباط توان‌های خروجی منابع با دامنه و زاویه ولتاژ آنها، منجر به تسهیم بار میان این منابع با تغییرات بسیار کم فرکانس می‌شود. ضرایب مشخصه‌های افتی در این کنترل کننده بر اساس حفظ تنظیم ولتاژ ریزشبکه انتخاب شده و از طرفی به دلیل نبود محدودیت تغییرات فرکانس، امکان تعیین این ضرایب در بازه‌ی بزرگ‌تری نسبت به حالت معمول وجود دارد. البته نیاز به وجود ارتباط مخابراتی سریع و مطمئن برای اندازه‌گیری زاویه ولتاژ طبق مرجع مشترک، قابلیت اطمینان این روش را کاهش می‌دهد. ضمن اینکه سنکرون نبودن کنترل کننده‌ی منابع باعث ایجاد اختلاف در فرکانس منابع می‌شود که به مرور منجر به خروج از محدوده‌ی زاویه ولتاژ پایدار و در نهایت ناپایداری ریزشبکه خواهد شد.

در نظر گرفتن ارتباط توان حقيقی با فرکانس و توان راکتیو با اندازه‌ی ولتاژ در ساختار مشخصه‌های افتی معمول، باعث تزویج متقابل این دو توان در ریزشبکه‌هایی با امپدانس خطوط مقاومتی-سلفی شده و کنترل آن‌ها را به یکدیگر وابسته می‌کند. برای رفع این مشکل، در مقاله [۱۴] روش تبدیل قاب مجازی پیشنهاد شده است که با استفاده از یک ماتریس انتقال خطی، توان‌های حقيقی P و راکتیو Q به ترتیب به توان‌های مجازی P' و Q' تبدیل می‌شوند به‌طوری که P' با زاویه انتقال توان و Q' با دامنه ولتاژ به صورت مستقل از هم کنترل می‌شوند. این روش رفتار گذراي سیستم را بهبود و پایداری آن را افزایش می‌دهد. البته در این ساختار کنترلی، ثابت زمانی کنترل کننده‌ی توان حقيقی و راکتیو بر تنظیم فرکانس و ولتاژ تأثیر می‌گذارد و در صورت وجود تفاوت در توان تزربیقی به شبکه و با ناهمانگی امپدانس فیدر واحدهای DG، زاویه‌ی تبدیل آن‌ها متفاوت شده و قاب‌های مرجع از حالت سنکرون خارج می‌شود [۱۵].

در مراجع [۱۶] و [۱۷] به‌منظور کاهش خطای تسهیم توان راکتیو ناشی از اختلاف امپدانس فیدر، با استفاده از حلقه‌ی فیدبک جریان، خروجی واحدهای DG به یک امپدانس سلفی مجازی مجهز می‌شود. بدین ترتیب افت ولتاژ حاصل از خروجی در کنترل کننده‌ی تمامی واحدها یکسان خواهد بود. استفاده از روش امپدانس مجازی همچنین می‌تواند با اصلاح شیب مشخصه‌های افتی، منجر به کاهش خطای تسهیم توان راکتیو شود. با اجرای روش فوق در مقاله [۱۸]، شیب مشخصه‌ی ولتاژ به‌طور مناسب اصلاح شده است؛ در نتیجه، هم‌زمان با تغییر مطلوب توان راکتیو خروجی هر واحد DG، پایداری شبکه نیز

هم‌زمان با گسترش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و اهمیت تأمین پایدار نیاز مصرف کنندگان و از طرفی لزوم رعایت اصول حفظ محیط زیست، به کارگیری منابع تولید پراکنده<sup>۱</sup> (DG) به‌دلیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان تأمین کننده‌ی اصلی انرژی اولیه، در کانون توجه قرار گرفته است [۲، ۱]. از آنجایی که این واحدهای DG معمولاً به واسطه مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه توزیع متصل می‌شوند، ارائه راهکارهای جدید و مناسب کنترلی می‌تواند امکان استفاده از آن منابع را با کمیت و کیفیت بالاتر فراهم سازد [۴، ۳]. مجموعه‌ای از واحدهای تولید پراکنده که به صورت هماهنگ با یکدیگر کار می‌کنند، مفهوم ریزشبکه را ایجاد می‌نمایند [۵، ۶]. این مجموعه به عنوان تأمین کننده‌ی توان بخشی از بارهای شبکه تعریف می‌شود و می‌تواند کیفیت توان و پایداری شبکه را تا حد قابل توجه‌ای بهبود بخشد. ریزشبکه‌ها در شرایط عادی معمولاً در حالت متصل به شبکه کار می‌کنند؛ ولی در موقع بحرانی مانند وقوع خطا در شبکه اصلی، با تأمین توان بخشی از بارها به خصوص بارهای مهم، به فعالیت خود در حالت جزیره‌ای ادامه می‌دهند [۸، ۷].

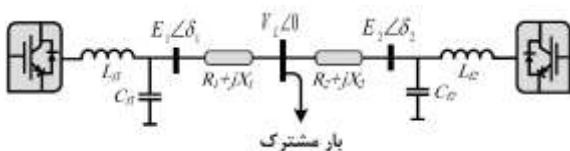
عملکرد صحیح یک ریزشبکه در حالت کاری جزیره‌ای بر اساس استاندارد IEEE 1547.4 مشخص شده است و مطابق با آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۹]. به‌منظور رعایت قیود کیفیت توان، حفظ تعادل میان تولید و مصرف و جلوگیری از اضافه بار شدن منابع در حالت جزیره‌ای، باید تقاضای بار به‌طور متناسب میان واحدهای DG ریزشبکه تسهیم گردد. پیاده‌سازی این امر معمولاً با کنترل محلی منابع و با استفاده از کنترل کننده‌های افتی توان حقیقی-فرکانس (P-Q) و توان راکتیو-ولتاژ (Q-E) انجام می‌شود [۱۰]. به‌دلیل سراسری بودن کمیت فرکانس، توان حقیقی به‌طور صحیح میان منابع تسهیم شده و در واقع هر منبع متناسب با ظرفیت خود در تأمین توان حقیقی بار مشارکت می‌کند. در حالی که ارتباط توان راکتیو با دامنه ولتاژ خروجی در این کنترل کننده، تسهیم این توان را وابسته به امپدانس فیدرها کرده است. به دلیل متفاوت بودن امپدانس خطوط یک ریزشبکه، مشخصه‌ی افتی مرسوم Q-E قادر به تسهیم مناسب توان راکتیو میان منابع نیست [۱۱].

به‌منظور رفع مشکلات تسهیم بار ریزشبکه ناشی از استفاده از مشخصه‌های افتی مرسوم، راهکارهای متفاوتی پیشنهاد شده است [۱۲]. در صورت انتخاب روش کنترل محلی در کنترل ریزشبکه، دست‌یابی به اهداف کنترلی مورد نظر در حالت جزیره‌ای و جلوگیری از تداخل آنها هماهنگی بین منابع تولید نیاز است. از طرف دیگر ایجاد این هماهنگی باید بدون استفاده از کanal مخابراتی صورت پذیرد تا مزایای کنترل محلی حفظ شود؛ اما به دلیل کوچک بودن و کمتر بودن تعداد منابع ریزشبکه و ویژگی‌های خاص ریزشبکه نسبت به شبکه‌های قدرت مرسوم، دست‌یابی به کنترل کننده‌ای که بتواند بدون استفاده از

برای آغاز فرآیند اصلاح مشخصه افتی اختصاص یافته است. عملکرد فعال‌ساز پیشنهادی در یک ریزشبکه تست فشار ضعیف مورد ارزیابی قرار گرفته و با روش کنترل مرکزی مقایسه می‌شود. در نهایت نتایج حاصل از این مقاله در قسمت پنجم ارائه می‌شوند.

## ۲- اصول کنترلی افتی مرسوم

شکل (۱) یک ریزشبکه جزیره‌ای ساده شامل دو منبع پراکنده مبتنی بر اینورتر و یک بار مشترک خطی را نشان می‌دهد. در این ریزشبکه واحدهای DG توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت به باس مشترک<sup>۲</sup> (PCC) متصل شده‌اند و خروجی آن‌ها به فیلتر LC مجهز است تا هارمونیک‌های جریان و ولتاژ حاصل از کلیدزنی فرکانس بالای اینورترها حذف شوند. معمولاً منابع انرژی تجدیدپذیر و باتری‌ها منبع تأمین کننده‌ی انرژی اولیه‌ی این واحدها هستند که به‌دلیل خارج بودن از بحث این مقاله و سادگی کار، می‌توان آن‌ها را با استفاده از منابع DC با ولتاژ ثابت مدل کرد.



شکل (۱): نمودار تک خطی یک ریزشبکه‌ی جزیره‌ای

با در نظر گرفتن مدار معادل شکل (۱) می‌توان توان حقیقی و راکتیو تولیدی هر DG را با صرف‌نظر کردن از مقاومت خطوط مطابق (۱) و (۲) محاسبه نمود.

$$Q_i = \frac{E_i V_l \cos \delta_i - V_l^2}{X_i} \quad (1)$$

$$P_i = \frac{E_i V_l \sin \delta_i}{X_i} \quad (2)$$

که در روابط بالا  $E_i$  دامنه ولتاژ خروجی اینورتر،  $V_L$  دامنه ولتاژ باس مشترک،  $X_i$  امپدانس فیدر و  $\delta_i$  زاویه ولتاژ خروجی مبدل است. از این معادلات نتیجه می‌شود که توان حقیقی  $P$  وابسته به تغییرات  $\delta$  و توان راکتیو  $Q$  وابسته به دامنه ولتاژ  $E$  هستند. با توجه به ارتباط فرکانس زاویه‌ای ولتاژ  $\omega$  و زاویه بردار ولتاژ  $\delta$  طبق معادله (۳) و عدم توانایی در اندازه‌گیری محلی زاویه توان و از طرفی سهولت اندازه‌گیری فرکانس زاویه‌ای، در معادلات این پلارامتر جایگزین زاویه ولتاژ می‌شود. بنابراین مشخصه‌های افتی P- $\omega$  و Q-E بدست می‌آیند که در شکل (۲) و معادلات (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند:

$$\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} \quad (3)$$

$$\omega = \omega_0 - m_p \cdot P \quad (4)$$

$$E = E_0 - n_q \cdot Q \quad (5)$$

بهبود می‌یابد. اما اصلاح کنترل منابع با استفاده از امپدانس مجازی، به‌دلیل وابستگی زیاد به تپولوژی ریزشبکه، پاسخگویی محدودی در قبال تغییرات بار دارد.

در مراجع [۱۹] و [۲۰] روش اصلاح مشخصه افتی با جایجا کردن عرض از مبدأ مشخصه افتی ولتاژ تحت عنوان روش جبران همزمان توان راکتیو پیشنهاد شده است که در آن با تغییر دامنه ولتاژ هر واحد، تسهیم مطلوب توان راکتیو انجام می‌شود. به‌دلیل اجرای این طرح در چند مرحله، نیاز به تغییر همزمان مشخصه‌های کنترلی واحدهای DG در شرایط مختلف و همچنین نیاز به فعالیت هماهنگ این واحدهای، در این روش از یک کنترل کننده‌ی مرکزی به همراه ارتباط مخابراتی با پهنهای باند کم برای ارتباط با کنترل کننده‌ی محلی واحدهای DG استفاده شده است. وابستگی این روش به عملکرد صحیح کنترل کننده‌ی مرکزی و ارتباط مخابراتی، قابلیت اعتماد آن را کاهش و هزینه اجرای آن را افزایش داده است.

به‌منظور بهبود روش اصلاح مشخصه افتی با جایجا کردن عرض از مبدأ مشخصه افتی ولتاژ و رفع وابستگی به ارتباط مخابراتی، در این مقاله یک روش محلی جهت تشخیص آغاز فرآیند اصلاح بر اساس تغییرات نقطه‌ی کار منابع پیشنهاد شده است. در این روش یک واحد پایش توان خروجی برای تمامی واحدهای DG در نظر گرفته شده است که به کمک آن، ویژگی اتصال و راهاندازی منابع حفظ و قابلیت پاسخگویی روش در قبال تغییر بارهای ریزشبکه ایجاد می‌شود. این مکانیزم وظیفه تشخیص موقعیت مناسب جهت آغاز فرآیند اصلاح مشخصه‌های کنترلی بر اساس میزان نوسانات به وجود آمده در خروجی اینورترها و صدور فرمان آغاز فرآیند اصلاح عرض از مبدأ مشخصه افتی ولتاژ در مواقعی که توان راکتیو خروجی منابع دچار افزایش و یا کاهش قابل توجهی می‌شود، فعالیت مکانیزم تشخیص فرآیند اصلاح آغاز شده و زمان مناسب برای آغاز فرآیند اصلاح عرض از مبدأ مشخصه افتی ولتاژ مرسوم تعیین می‌گردد.

مهمنترین ویژگی‌های روش پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- در روش پیشنهادی از هیچ لینک مخابراتی یا زمان‌سنجی برای تشخیص آغاز فرآیند اصلاح و اجرای آن استفاده نشده است و زمان آغاز فرآیند به صورت محلی و به طور جداگانه برای هر منبع مشخص می‌شود.
- روش پیشنهادی در برابر تغییر نقاط کار منابع که ممکن است در اثر تغییر بار، ورود منابع جدید و یا تعویض حالت کاری ریزشبکه به وجود آمده باشد، عملکرد مقاومی دارد و موجب تسهیم ایده‌آل توان راکتیو میان منابع می‌شود.

ادامه این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است. در بخش‌های دوم و سوم به ترتیب اصول کنترل افتی مرسوم و کنترل افتی اصلاح شده مبتنی بر تغییر عرض از مبدأ مشخصه افتی ولتاژ در ریزشبکه‌های جزیره‌ای ارائه می‌شود. بخش چهارم به ارائه فعل ساز محلی پیشنهادی

تناسب آرایش شبکه و اندازه‌ی امپدانس فیدر خود، تغذیه‌ی توان بار را در سطح مشخصی بر عهده خواهد گرفت. همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، با افزایش توان حقیقی و توان راکتیو تولیدی منبع و با متناسب با شبکه مشخصه افتی، به ترتیب فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی منبع اینورتری نسبت به مقدار نامی خود کاهش می‌یابد. اما مسئله‌ی تسهیم توان در مشخصه‌ی فرکانس و مشخصه‌ی ولتاژ با شرایط متفاوتی روپرداخت است.

به تناسب میزان توان حقیقی کشیده شده از هرمنبع، فرکانس یا به تعبری زاویه ولتاژ منابع نسبت به یکدیگر دارای اختلاف خواهد بود. بدین صورت که ولتاژ منابع با فرکانس بالاتر نسبت به منابع با فرکانس پایین‌تر پیش‌فاز بوده و با توجه به رابطه (۲)، این پیش‌فازی منجر به افزایش تولید در منبع با تولید توان کمتر می‌شود. با توجه به اینکه در حالت دائمی فرکانس تمامی منابع به مقدار یکسانی می‌رسد و از طرفی وجود ارتباط میان فرکانس و زاویه ولتاژ طبق رابطه (۳)، زاویه ولتاژ منابع مختلف نسبت به یکدیگر به سرعت تغییر کرده و این روند نهایتاً منجر به یکسان شدن توان حقیقی تولیدی واحدهای DG و تسهیم ایده‌آل این توان در ریزشبکه می‌شود. اما به علت اینکه افت ایجاد شده در دامنه ولتاژ منابع تحت تأثیر امپدانس‌های متفاوت فیدر منابع اندازه‌ی متفاوتی خواهد داشت، دامنه ولتاژ خروجی واحدهای DG برابر نبوده و در نتیجه توان راکتیو به درستی بین منابع تسهیم نمی‌شود.

لازم به ذکر است که هرچند در این مقاله مبنای اثبات روابط مرتبط به این بحث با فرض شبکه از نوع سلفی غالب انتخاب شده است، اما زمانی که ریزشبکه بصورت غالب مقاومتی درنظر گرفته شود، از مشخصه‌های افتی معکوس جهت تضعیف تزویج میان کنترل توان‌های حقیقی و راکتیو استفاده می‌شود [۲۱، ۲۲].

### ۳- اصول کنترل افتی اصلاح شده با تغییر عرض از مبدأ مشخصه ولتاژ

این بخش به توضیح عملکرد اصول کنترل کننده افتی اصلاح شده با هدف اصلاح تسهیم توان راکتیو اختصاص یافته است. این کنترل کننده قادر است در ریزشبکه‌های جزیره‌ای با پیکربندی‌های مختلف تسهیم توان میان منابع را به صورت قابل قبولی انجام دهد. این روش در دو مرحله اجرا می‌شود که در ادامه شرح داده می‌شود.

#### ۳-۱- تقسیم توان با مشخصه‌های افتی معمول

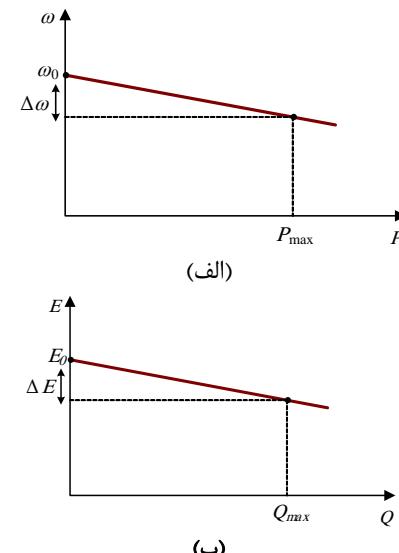
در این روش تسهیم توان اولیه میان منابع ریزشبکه تا زمان دریافت سیگنال فرمان با استفاده از مشخصه‌های افتی مرسوم انجام می‌شود. این حالت منجر به مشارکت صحیح منابع در تأمین توان حقیقی بار با رسیدن به سطح تولید مطلوب  $P_{des}$  و از طرف دیگر تسهیم نامناسب توان راکتیو می‌شود. فرض کنید که توان راکتیو تولیدی هر منبع در تأمین کنند. با فرض یکسان بودن توان نامی منابع، هر واحد DG به شرایط تسهیم ایده‌آل توان راکتیو برابر با  $Q_{des}$  باشد؛ به دلیل استفاده

در این معادلات  $E_0$  و  $\omega_0$  مقادیر نامی ولتاژ و فرکانس منابع و ضرایب  $m_p$  و  $n_q$  به ترتیب شبکه مشخصه ولتاژ و فرکانس هستند. این ضرایب براساس روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند.

$$m_p = \frac{\Delta\omega_{\max}}{P_{\max}} \quad (6)$$

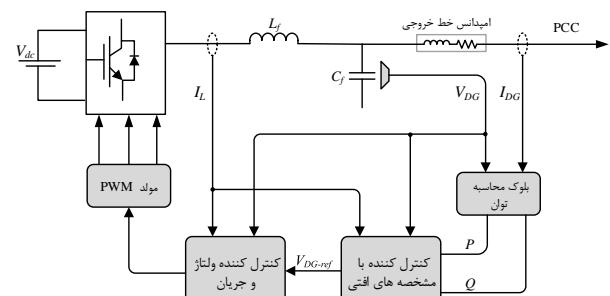
$$n_q = \frac{\Delta E_{\max}}{Q_{\max}} \quad (7)$$

که در آن  $P_{\max}$  و  $Q_{\max}$  حداقل توان حقیقی و راکتیو قابل تولید در هر واحد DG و  $\Delta E_{\max}$  و  $\Delta\omega_{\max}$  حداقل تغییرات مجاز فرکانس و ولتاژ منابع ریزشبکه نسبت به مقدار نامی خود است.



شکل (۲): (الف) مشخصه افتی  $P-\omega$  و (ب) مشخصه افتی  $Q-E$

روش معمول کنترل محلی منابع، پیاده‌سازی کنترل کننده در مختصات سنترون بوده که در آن پارامترهای مختلف شبکه متعادل در حالت دائمی به صورت  $dC$  در می‌آیند و در نتیجه می‌توان از کنترل-کننده‌های PI برای کنترل منبع استفاده کرد. در شکل (۳) ساختار کنترلی منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر با کنترل کننده افتی نشان داده شده است.



شکل (۳): ساختار داخلی کنترل کننده در منابع مبتنی بر اینورتر

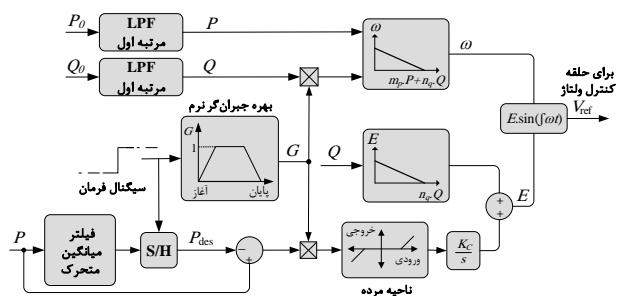
از آنجایی که عملکرد ریزشبکه در حالت جزیره‌ای مدنظر است، انتظار می‌رود که واحدهای DG بتوانند با ریزشبکه را به نحو مطلوب تأمین کنند. با فرض یکسان بودن توان نامی منابع، هر واحد DG به

داشته است، کاهش یافته و توان حقیقی منبعی که توان راکتیو تولید آن کمتر از  $Q_{des}$  بوده است، افزایش می‌یابد. تغییرات به وجود آمده در توان حقیقی منابع باعث می‌شود تا مقدار توان راکتیو خروجی آنها به تناسب جمله اضافه شده به مشخصه‌ی ولتاژ رابطه‌ی (۹) دستخوش تغییراتی شود؛ بدین ترتیب که بر اساس جهت نوسان ایجاد شده در توان حقیقی، انتگرال جمله‌ی ( $P - P_{des}$ ) می‌تواند منجر به افزایش و یا کاهش عرض از مبدأ مشخصه‌ی ولتاژ شود. این امر به طور مستقیم میزان توان راکتیو خروجی منابع را تحت تأثیر قرار خواهد داد. تغییر مذکور در توان راکتیو منجر به کاهش انحراف توان حقیقی از مقدار  $P_{des}$  ناشی از جمله‌ی ( $m_p \cdot P + n_q \cdot Q$ ) می‌شود و این روند به مرور باعث همگرا شدن توان حقیقی تولیدی منابع به سمت مقدار مطلوب  $P_{des}$  و کاهش تأثیرگذاری جمله انتگرالی ( $P - P_{des}$ ) خواهد شد. در نهایت توان راکتیو تولیدی همه منابع با هم برابر (در حالت پریونیت) و به مقدار مطلوب  $Q_{des}$  می‌رسد.

همانطور که در شکل (۴) دیده می‌شود، مقادیر  $P$  و  $Q$  پس از عبور از فیلترهای پایین‌گذر، در مشخصه‌های افتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مرجع آغاز به کار روش اصلاح مشخصه، دریافت سیگنال فرمان است. در حقیقت توانهای  $P$  و  $Q$  در شرایط کاری مختلف به عنوان ورودی‌های مشخصه‌های افتی مرسوم و یا اصلاح شده مورد استفاده قرار می‌گیرند و متأثر از تغییرات مشخصه‌های افتی، تغییراتی در ولتاژ مرجع اینورتر ( $V_{ref}$ ) و به تبع آن در توان خروجی واحداً حاصل می‌شود.

بهمنظور جلوگیری از نوسانات شدید توان و بالازدگی<sup>۵</sup> جریان، از ضریب بهره‌ی جبران‌گر  $G$  در مسیر اعمال سیگنال فرمان استفاده می‌شود. عدم وجود تغییرات توان حقیقی در طول اجرای مرحله دوم، یکی از شروط اثربخش بودن اجرای روش اصلاح مشخصه افتی است. اجرای هرچه سریع‌تر مراحل این روش، احتمال مواجه با تغییرات بزرگ توان حقیقی در مدت زمان اجرای آن را کاهش می‌دهد که تنظیم مناسب ضریب  $K_C$  تأثیر بهسزایی در زمان اختصاص یافته برای اجرای این روش دارد. هرچند باید توجه شود که اجرای بسیار سریع این متابع می‌تواند باعث کاهش دقت و ایجاد نوسانات شدید در خروجی منابع شود که اهمیت تنظیم صحیح ضرایب انتگرال گننده را نشان می‌دهد. هم‌چنین با استفاده از یک بلوک محدودساز قبل از واحد انتگرال‌گیر، تأثیر تغییرات کوچک توان حقیقی محدود می‌شود. وظیفه‌ی نمونه‌برداری و ذخیره‌ی کمیت  $P_{des}$  در این مجموعه بر عهده‌ی بلوک نمونه‌بردار و ذخیره‌کننده موجود در کنترل کننده محلی هر یک از منابع است که محل قرارگیری آن در شکل (۴) نشان داده شده است. ذخیره‌سازی مقدار صحیح  $P_{des}$  در این بلوک وابسته به زمان دریافت سیگنال فرمان بوده که این موضوع عملکرد صحیح واحد تولید سیگنال آغاز فرآیند را می‌طلبید. بر همین اساس و بدلیل آنکه اندازه‌ی  $P_{des}$  در تغییرات مراحل بعدی فرآیند اصلاح کنترل کننده کاملاً تأثیرگذار است، باید زمان ارسال سیگنال فرمان به درستی رعایت شود.

از مشخصه افتی مرسوم، برخی از منابع دارای تولید توان راکتیو کمتر از  $Q_{des}$  و برخی دیگر دارای تولید توان راکتیو بیشتر از  $Q_{des}$  خواهند بود. در این مرحله کمیت  $P_{des}$  در کنترل کننده‌ی هر واحد محاسبه و ذخیره می‌شود تا در مرحله دوم فرآیند اصلاح تسهیم توان حقیقی استفاده قرار گیرد. کمیت ذخیره شونده‌ی مذکور با عبور توان حقیقی خروجی DG از یک فیلتر محاسبه می‌شود که با هدف حفظ پایداری سیستم، این فیلتر دارای فرکانس قطع پایین‌تری نسبت به فیلتر پایین‌گذر<sup>۳</sup> (LPF) استفاده شده برای محاسبه‌ی توان ورودی مشخصه‌های افتی است که در شکل (۴) نشان داده شده است. با استفاده از واحدهای نمونه‌بردار و ذخیره‌کننده<sup>۴</sup> (S/H)، نمونه‌گیری از  $P_{des}$  می‌شود و مقدار ذخیره شده‌ی آن تا زمان دریافت سیگنال فرمان دائم‌آیینه می‌شود. به محض دریافت سیگنال فرمان که مصادف با پایان مرحله اول است، روند به روزرسانی متوقف شده و آخرین نمونه از این کمیت ذخیره و تا زمان تغییر وضعیت بعدی به عنوان خروجی بلوک نمونه‌بردار و ذخیره‌کننده در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۴): ساختار کنترل افتی اصلاح شده [۱۹]

### ۲-۳- بهبود تسهیم توان راکتیو با اصلاح مشخصه‌های افتی

در این مرحله از روش، از مشخصه‌های افتی زیر برای تسهیم توان میان منابع ریزشبکه استفاده می‌شود [۱۹] :

$$\omega = \omega_0 - (m_p \cdot P + n_q \cdot Q) \quad (8)$$

$$E = E_0 - n_q \cdot Q + \left( \frac{K_C}{s} \right) \cdot (P - P_{des}) \quad (9)$$

که ضریب بهره‌ی انتگرال‌گیر است و برای تمامی واحدها با اندازه‌ی یکسان در نظر گرفته می‌شود. این مشخصه‌های جدید منجر به ایجاد تزویج موقت میان توان حقیقی و راکتیو، ایجاد نوسان در توان حقیقی منابع با هدف تغییر اندازه‌ی آن نسبت به مقدار  $P_{des}$  و همچنین اصلاح مقدار توان راکتیو خروجی هر منبع با افزودن یک جمله‌ی انتگرالی به مشخصه‌ی ولتاژ آن می‌شوند. بدلیل وجود خطای تسهیم توان راکتیو، عبارت  $Q$  برای هر منبع مقدار متفاوتی دارد و بدلیل سراسری  $n_q$  برای  $Q$  هر منبع مقدار متفاوتی دارد. بروزگتر از مقدار مطلوب  $Q_{des}$  که در مرحله‌ی قبل توان راکتیو تولیدی بروزگتر از مقدار مطلوب  $P_{des}$  بودن فرکانس، توان حقیقی منابع متناسب با پارامتر اضافه شده در رابطه‌ی (۸) دچار نوسان می‌شود تا عبارت  $(m_p \cdot P + n_q \cdot Q)$  در تمامی منابع یکسان شود و برابری فرکانس همه منابع مطابق رابطه‌ی (۸) پابرجا بماند. جهت تغییرات  $P$  بدین گونه است که توان حقیقی منبعی که در مرحله‌ی قبل توان راکتیو تولیدی بروزگتر از مقدار مطلوب

آغاز، در زمان‌های مشخصی از طرف کنترل کننده‌ی مرکزی و از طریق مسیر مخابراتی با پهنای باند کوتاه برای کلیه‌ی منابع ارسال می‌شود. مزیت این روش اطمینان از شرکت تمامی منابع در فرآیند اصلاح کنترل کننده و همچنین هم‌زمانی آغاز مراحل مختلف روش اصلاح مشخصه در همه‌ی منابع است. اشکال این روش نیاز به استفاده از ارتباط مخابراتی برای ارتباط کنترل کننده‌ی مرکزی با کنترل کننده‌ی سایر منابع است؛ چرا که از دست دادن این ارتباط مخابراتی به معنای عدم کارکرد کنترل کننده خواهد بود. لذا پیش‌بینی یک روش پشتیبان و یا تجهیز روش مذکور به یک ارتباط مخابراتی با قابلیت اطمینان بالا می‌تواند تا حد زیادی نقص بیان شده را پوشش دهد؛ هرچند که این امر هزینه اجرای طرح را افزایش می‌دهد.

#### ۴- روش محلی پیشنهادی برای آغاز فرآیند اصلاح مشخصه‌های افتی

در این مقاله در راستای افزایش قابلیت اطمینان کنترل کننده افتی اصلاحی، یک مکانیزم فعال‌ساز طراحی شده است که بدون نیاز به ارتباط مخابراتی، به صورت کاملاً محلی و بدون تحمیل هزینه اضافی می‌تواند سیگنال آغاز فرآیند اصلاح کنترل کننده افتی منابع را تولید و صادر نماید. عملکرد این روش بدین صورت است که توان راکتیو خروجی تمامی منابع پایش شده و در صورت تجاوز تغییر توان از سطح آستانه‌ی تعریف شده در ریزشکه، فرآیند اصلاح مشخصه در تمامی منابع آغاز خواهد شد. شکل (۵) نحوه کارکرد واحد فعال‌ساز پیشنهادی را نشان می‌دهد. این واحد فعال‌ساز به گونه‌ای طراحی شده است که نسبت به راماندازی<sup>۶</sup> ریزشکه، تغییر وضعیت ریزشکه از حالت کاری متصل به شبکه به حالت کاری جزیره‌ای، بروز تغییرات ناگهانی بار و یا نصب و راهاندازی واحدهای DG واکنش نشان داده و می‌تواند روش اصلاح تسهیم توان را به نحو مطلوب فعال سازد. بدليل نیاز به هم‌زمانی آغاز مراحل روش اصلاح و احتمال تشخیص غیر همزمان تغییر توان ریزشکه توسط واحدهای DG به خصوص واحدهایی که در فواصل دورتری از مرکز ریزشکه قرار دارند، توان حقیقی مطلوب  $P_{des}$  پس از تأخیر زمانی مشخصی ذخیره شده تا فرآیند اصلاح به درستی اجرا شود. براین اساس، فرآیند اصلاح بالا صله پس از تشخیص تغییر در منابع آغاز خواهد شد بلکه با استفاده از واحدهای تأخیر زمان<sup>۷</sup> با تنظیمات مناسب، آغاز و پایان به موقع مراحل روش اصلاح مشخصه تعیین می‌شود. بدین ترتیب پایان مرحله‌ی نخست روش مذکور پس از نشست نوسانات توان خواهد بود تا اولاً تمامی منابع تغییر توان ایجاد شده را تشخیص دهند و ثانیاً مقادیر صحیح توان حقیقی و راکتیو وارد فرآیند اصلاح کنترل کننده افتی شوند.

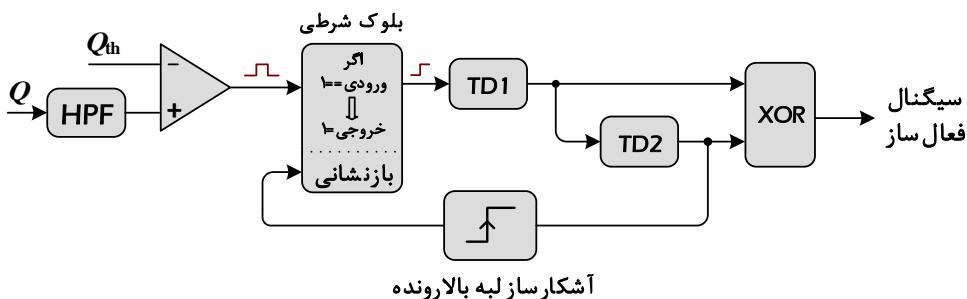
#### ۳-۳- استراتژی آغاز به کار فرآیند اصلاح کنترل کننده

با توجه به ساختار چندمرحله‌ای روش اصلاح مشخصه افتی و نیاز به تکرار فرآیند اصلاح مشخصه‌ها پس از وقوع تغییرات قابل توجه در ریزشکه، استفاده از یک ساختار مطمئن به منظور فعال‌سازی و اجرای مراحل مختلف کنترل کننده‌ی پیشنهادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در واقع در انتخاب مکانیزمی که برای شروع و اجرای کامل فرآیند اصلاح و اجرای مجدد آن درنظر گرفته می‌شود باید دو اصل اساسی زیر لحاظ و پیاده‌سازی آن‌ها تضمین شود: نخست اطمینان از عملکرد کنترل کننده‌ی پیشنهادی در تمامی منابع موجود در ریزشکه و دوم رعایت هم‌زمانی اجرای مراحل فرآیند اصلاح.

مشارکت تمامی منابع در اجرای فرآیند و به عبارتی اجرای صحیح مراحل روش پیشنهادی در آن‌ها از این جهت حائز اهمیت است که در صورت عدم وجود و مشارکت حتی یکی از منابع در فرآیند اصلاح کنترل کننده، اصلاح مشخصه در سایر منابع هم با اشتباه همراه خواهد شد. دلیل این موضوع را می‌توان در نوع ساختار الگوریتم پیشنهادی جست‌وجو کرد؛ چرا که در مرحله‌ی تغییر مشخصه‌ی فرکانس که نیاز به برقراری تعادل میان فرکانس ( $m_p.P+n_q.Q$ ) با عبارت ( $m_p.P+n_q.Q$ ) است، چنانچه منبعی کماکان با کنترل کننده‌ی قبلی یعنی مشخصه‌ی مرسوم فرکانس کار کند، منبای تولید توان حقیقی در این منبع با دیگر منابع متفاوت خواهد بود؛ بنابراین با توجه به مشخص بودن نیاز توان حقیقی ریزشکه و لزوم حفظ تعادل میان تولید و مصرف توان، تغییر توان حقیقی در منابع کمتر و با بیشتر از حد مورد نیاز انجام می‌شود. این روند می‌تواند ادامه‌ی فرآیند اصلاح و فعالیت کنترل کننده‌ی منابع را دچار اختلال نماید. بر این اساس اگر اصلاح کنترل کننده‌ی منابع را از منابع آغاز نشود، اصلاح مشخصه در سایر منابع و تسهیم توان در ریزشکه به درستی انجام نمی‌شود.

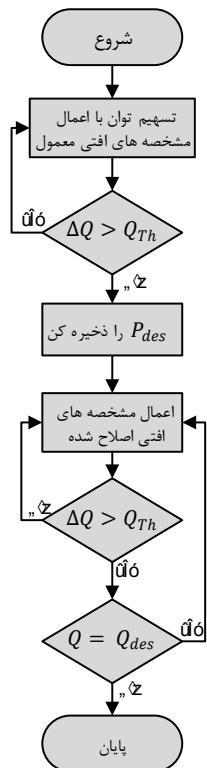
نکته‌ی دیگر، لزوم هم‌زمانی ورود کلیه‌ی منابع به پروسه‌ی اصلاح مشخصه است. نخستین مرحله از روند اصلاح مشخصه کنترلی منابع، استفاده از مشخصه‌های افتی مرسوم در کنترل کننده‌ی آن‌هاست. در انتهای این مرحله کلیه‌ی منابع توان حقیقی یکسان  $P_{des}$  را تولید می‌کنند که این مقدار در بلوک نمونه‌بردار و ذخیره‌کننده مربوطه ذخیره شده و در مرحله‌ی بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حال اگر یک یا چند منبع مشخصه‌ی فرکانسی خود را زودتر از دیگر منابع تغییر دهند، در اثر تغییراتی که در میزان توان تولیدی هر منبع نسبت به مجموع توان حقیقی تولید شده در ریزشکه به وجود خواهد آمد، مقدار  $P_{des}$  دیگری برای منابعی که با تأخیر وارد فرآیند اصلاح می‌شوند، ذخیره خواهد شد. در نتیجه‌ی این عدم هم‌زمانی، اصلاح کنترل کننده در تمامی منابع با خطأ همراه خواهد شد. لذا لازم است تا مکانیزم درنظر گرفته شده برای فعال‌سازی کنترل کننده‌ی پیشنهادی، شروع هم‌زمان این فرآیند در تمامی منابع را تضمین کند.

فعال‌سازی فرآیند اصلاح مشخصه افتی به کمک روش کنترل-کننده‌ی مرکزی صورت می‌پذیرد<sup>۸</sup>. در این روش سیگنال فرمان



شکل (۵): ساختار واحد تولیدکننده سیگنال آغاز فرآیند اصلاح مشخصه افتی

اصلاح مجدد وضعیت تسهیم بار، بالافاصله پس از high شدن خروجی واحد تأخیر زمانی شماره ۲ (TD2) که همزمان با پایان فرآیند اصلاح تسهیم بار در مرتبه اول است، یک سیگنال برای بازنشانی<sup>۷</sup> وضعیت تسهیم بار در سطح  $Q_{th}$  دارد. در واقع از این زمان به بعد در صورت ایجاد نوسان توان بزرگ‌تر از سطح  $Q_{th}$ ، مشابه روند قبلی سیگنال فرمان جهت بهروزرسانی همزمان واحدهای نمونه‌بردار و ذخیره‌کننده و اصلاح کنترل کننده منابع تولید می‌شود. ساختار کلی و ترتیب اجرای مراحل طرح پیشنهادی این مقاله در قالب فلوچارت شکل (۶) ارائه شده است.



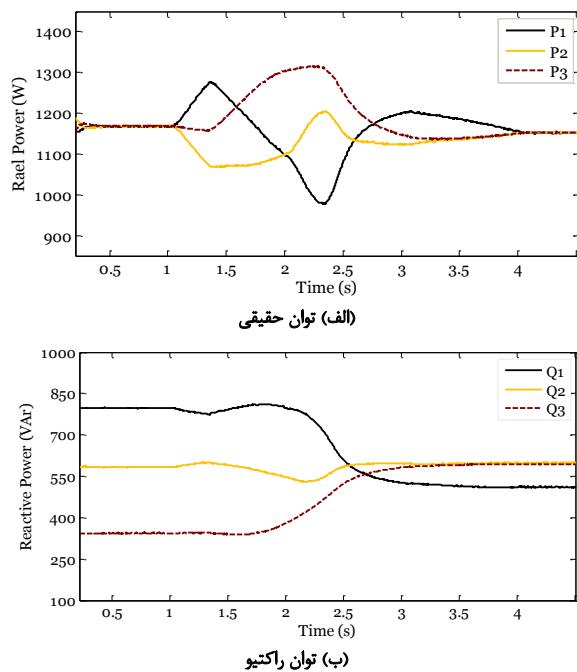
شکل (۶): فلوچارت کنترل کننده پیشنهادی

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت به بررسی عملکرد روش اصلاح مشخصه افتی در دو حالت استفاده از کنترل کننده مرکزی و استفاده از فعال ساز محلی

از آنجایی که هرگونه تغییر قابل توجه در توان حقیقی به صورت خودکار توسط مشخصه‌ی فرکانس پاسخ داده می‌شود و نیاز به اجرای فرآیند اصلاح در مقابل تغییرات به وجود آمده در توان را کنیو شبه که به وجود می‌آید، سیگنال  $Q$  به عنوان مرجع تصمیم‌گیری آغاز فرآیند و ورودی واحد تولیدکننده سیگنال فرمان در نظر گرفته می‌شود. سیگنال فعال ساز، خروجی نهایی این واحد بوده که یک سیگنال فرمان منطقی با مقدار صفر یا یک است. استفاده از فیلتر بالاگذر<sup>۸</sup> (HPF) بدین خاطر است که تنها تغییرات بزرگی که در توان خروجی منبع رخداده است، آشکار شوند چرا که اصولاً اصلاح تسهیم بار در ریزشبکه‌ها در ازای تغییرات کوچک بار ضرورت چندانی ندارد. همچنین سطح آستانه‌ی  $Q_{th}$  بنابر شرایط ریزشبکه، سطح مورد نیاز نوسانات توان را مشخص کند. مطابق روش پیشنهادی در شرایط راهاندازی ریزشبکه، منابع در مقطع نخست با استفاده از مشخصه‌های افتی مرسوم کنترل می‌شوند. همزمان سیگنال  $Q$  وارد واحد تولید سیگنال فعال ساز شده و پس از عبور از فیلتر بالاگذر با سطح آستانه‌ی  $Q_{th}$  مقایسه می‌شود. از آنجایی که در لحظه راهاندازی سیگنال  $Q$  دارای نوسانات بزرگی است، مقدار آن از  $Q_{th}$  تجاوز کرده و سیگنال ۱ به بلوک شرطی ارسال می‌شود. با تصویب شرط اعمال شده در بلوک شرطی، در خروجی این بلوک سیگنال فعال ساز به صورت دائمی صادر می‌شود که از آن برای تکمیل مراحل روش اصلاح کنترل کننده و همچنین پایان کار مکانیزم فعال ساز در مقطع راهاندازی ریزشبکه استفاده می‌گردد.

به منظور رفع نگرانی از احتمال وجود تفاوت در زمان تشخیص تغییر توان و جلوگیری از ناهماهنگی در صدور فرمان شروع فرآیند، واحد تأخیر زمانی شماره ۱ (TD1) با ایجاد یک وقفه در ارسال سیگنال فعال ساز، آغاز فرآیند اصلاح و اجرای تغییر در مشخصه‌های کنترلی را تا زمان نشست نوسانات اولیه به تأخیر می‌اندازد. با توجه به اینکه تحریک واحدهای نمونه‌بردار و ذخیره‌کننده و همچنین واحد جبران‌گر  $G$ ، نیاز به تزریق سیگنال‌های high و low دارد، به کمک گیت‌های XOR و واحدهای تأخیر زمانی ۱ و ۲ با تنظیمات صحیح، سیگنال فعال ساز در زمان‌های مناسب ارسال خواهد شد. در نتیجه مقدار صحیح کمیت  $P_{des}$  محاسبه و ذخیره شده و اصلاح مشخصه‌های کنترلی در زمان مناسب انجام می‌شوند. با هدف فراهم کردن شرایط لازم جهت پاسخگویی به تغییرات بعدی ایجادشده در توان ریزشبکه و



شکل (۶): عملکرد روش اصلاح مشخصه افتی مجهز به کنترل کننده مرکزی با لحاظ کردن تأخیر  $0.15$  ثانیه در شروع فرآیند اصلاح برای واحد  $۱$ .

در حالت بعدی شرایط سختتری در نظر گرفته شده که در آن واحد  $۱$  به علت از دست رفتن ارتباط مخابراتی، مشارکتی در فرآیند اصلاح مشخصه ندارد. شکل (۶) توان حقیقی و توان راکتیو خروجی واحدهای ریزشبکه را در این شرایط نشان می‌دهد. به دلیل عدم ذخیره‌ی مقادیر صحیح توان حقیقی و راکتیو برای استفاده در مرحله‌ی اصلاح کنترل کننده، خطای تسهیم توان راکتیو خروجی منبع  $۱$  بسیار زیاد است. توان حقیقی واحدها بعد از اعوجاج‌هایی با دامنه‌ی بزرگ به وضعیت مطلوب خود بازگشته است. دلیل این امر به ماهیت کنترل کننده بازمی‌گردد؛ چرا که همان‌گونه که قبلاً اشاره شد به علت ناهمانگی در مشخصه‌ی مرجع تعیین‌کننده توان منابع و لزوم حفظ تعادل تولید و مصرف توان، هر چقدر که کنترل کننده عرض از مبدأ مشخصه Q-E را تغییر دهد، تولید توان حقیقی به  $P_{des}$  نمی‌رسد و بنابراین اصلاح مشخصه Q-E به درستی صورت نمی‌پذیرد. علاوه بر این اگر محدود کننده خروجی کنترل کننده شکل (۶) حذف گردد، از دست رفتن ارتباط مخابراتی حتی می‌تواند منجر به ناپایداری ریزشبکه شود.

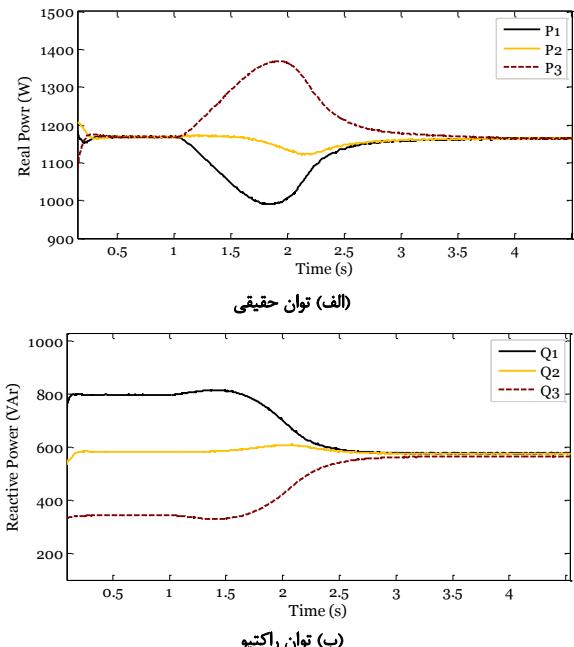
## ۵-۲- اصلاح مشخصه افتی با فعال ساز محلی پیشنهادی

این بخش به بررسی کارآیی روش اصلاح مشخصه افتی با استفاده از فعال ساز محلی پیشنهادی اختصاص یافته است. بدین منظور از نسخه اصلاح شده ریزشبکه‌ی تست فشار ضعیف ارائه شده در [۲۳] که نمودار تک خطی آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است، استفاده می‌شود.

پیشنهادی پرداخته می‌شود. برای انجام این مطالعات از محیط نرم افزار سیمولینک متلب استفاده شده است.

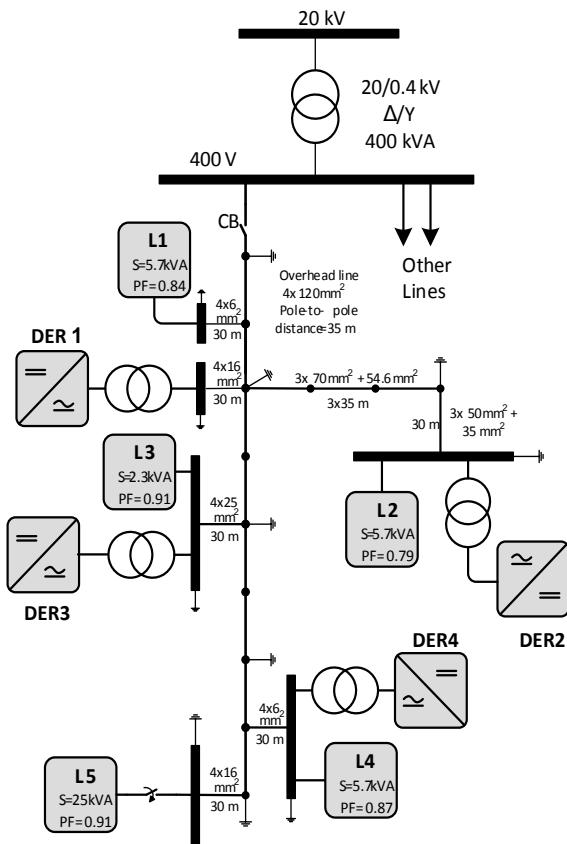
## ۵-۱- اصلاح مشخصه افتی با کنترل کننده مرکزی

بررسی عملکرد مکانیزم فعال‌ساز مرکزی و مشخصه افتی اصلاحی، به کمک ریزشبکه نمونه معرفی شده در مرجع [۱۹] که ریزشبکه‌ای با سه منبع DG است، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با توجه به تنظیمات انجام شده، سیگنال فرمان از طرف کنترل کننده مرکزی در زمان  $۱$  ثانیه صادر می‌شود و پس از آن اصلاح تسهیم توان مطابق فرآیند شکل (۷) در تمامی واحدها آغاز شده و در زمان  $۳/۵$  ثانیه به پایان می‌رسد. شکل (۷) توان حقیقی و توان راکتیو خروجی منابع ریزشبکه را نشان می‌دهد که مؤید کارآیی روش اصلاح مشخصه در دست‌یابی به تسهیم ایده‌آل توان است.



شکل (۷): عملکرد روش اصلاح مشخصه افتی مجهز به کنترل کننده مرکزی

در گام بعد مشکلات حاصل از کاربرد کنترل کننده مرکزی و ارتباط مخابراتی بررسی می‌شوند. ابتدا فرض می‌شود که واحد شماره‌ی  $۱$  با  $۰.۱۵$  ثانیه تأخیر وارد فرآیند اصلاح مشخصه می‌شود. وجود این تأخیر به علت استفاده از ارتباط مخابراتی در ساختار کنترلی امکان پذیر است. توان‌های حقیقی و راکتیو خروجی منابع در این حالت در شکل (۷) نشان داده شده است. با مقایسه نتایج این شکل با شکل (۶) مشاهده می‌شود که بر اثر اعمال این تأخیر، تسهیم توان راکتیو مطابق انتظار انجام نشده است و از طرف دیگر، توان حقیقی منابع نیز با سرعت کمتر و نوسانات شدیدتری به وضعیت تسهیم ایده‌آل خود بازگشته‌اند.

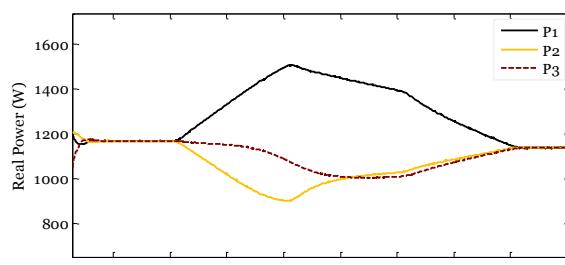


شکل (۱۰): نمودار تک خطی ریزشبکه تست فشار ضعیف

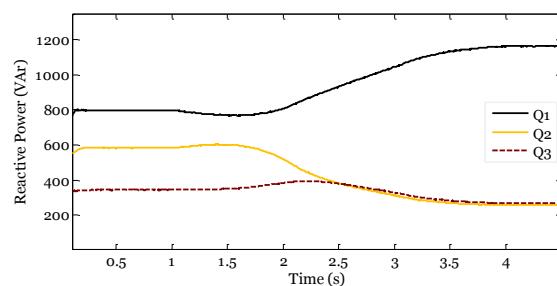
جدول (۲): مشخصات کنترل کننده منابع ریزشبکه شکل (۱۰)

مقادیر	پارامتر
۵۰ Hz	فرکانس نامی $f_n$
۱۰۰ $\mu F$	خازن فیلتر $c_f$
۱ mH	اندوکتانس فیلتر $L_f$
۰.۰۱ $\Omega$	اندوکتانس فیلتر $R_f$
۴۵۰۰ Hz	فرکانس کلیدزنی $f$
۰.۳ Hz	ماکریزم انحراف فرکانس مجاز $\Delta f$
۰.۰۵ pu	ماکریزم انحراف ولتاژ مجاز $\Delta V$

از همین رو تولید توان حقیقی به مقدار مطلوب  $P_{des}$  در حالی که توان راکتیو خروجی هر واحد بسته به اندازه امپدانس فیدر آن، مقدار متفاوتی دارد. در همین حال به علت نوسانات بزرگی که در راهنمایی ریزشبکه به وقوع می‌پیوندد، فعالیت مکانیزم فعل ساز فرآیند اصلاح کنترل کننده آغاز می‌شود، اما تنظیمات واحدهای تأخیر زمان به نحوی بوده که علیرغم نشست نوسانات اولیه‌ی توان و دست‌بایان به توان حقیقی  $P_{des}$ ، فرمان آغاز فرآیند در زمانی نزدیک به  $0.045$  ثانیه صادر می‌شود. شروع به کار روش اصلاح مشخصه در لحظه  $0.045$  ثانیه با ایجاد نوسان در توان حقیقی همراه است که در شکل (۱۱-الف) قابل مشاهده است. پس از آن با اجرای فرآیند اصلاح و با توجه به یکسان بودن طرفیت واحدهای رسانیدن توان تولیدی همه واحدهای به سطح مطلوب  $P_{des}$  و  $Q_{des}$  تمهیم مطلوب توان در ریزشبکه برقرار و کارآیی روش پیشنهادی تأیید می‌شود. در گام بعد، بار شماره ۵ در لحظه



(الف) توان حقیقی



(ب) توان راکتیو

شکل (۹): عملکرد روش اصلاح مشخصه افتی مجهز به کنترل کننده مرکزی در صورت عدم مشارکت واحد ۱ در فرآیند اصلاح

این سیستم یک ریزشبکه‌ای جزیره‌ای شامل بارهای متغیر و منابع تولیدپراکنده مبتنی بر اینورتر است که بر پستر یک شبکه توزیع با پارامترهای استاندارد شکل گرفته است [۲۴]. بارهای این مجموعه (L1-L4) با ضریب توانهای مختلف هستند تا شرایط جامعه برای این مطالعه درنظر گرفته شده باشد. همچنین بنابر مقتضیات و اهداف این مقاله، واحدهای تولید پراکنده این ریزشبکه (DER1-DER4) با ظرفیت‌های برابر  $12/5$  کیلووات در فرآیند شبیه‌سازی مشارکت داده می‌شوند. اطلاعات مربوط به بارها و خطوط این شبکه در نمودار تک خطی شکل (۱۰) و جدول (۱) و مشخصات کنترل کننده واحدهای تولید در جدول (۲) ارائه شده است.

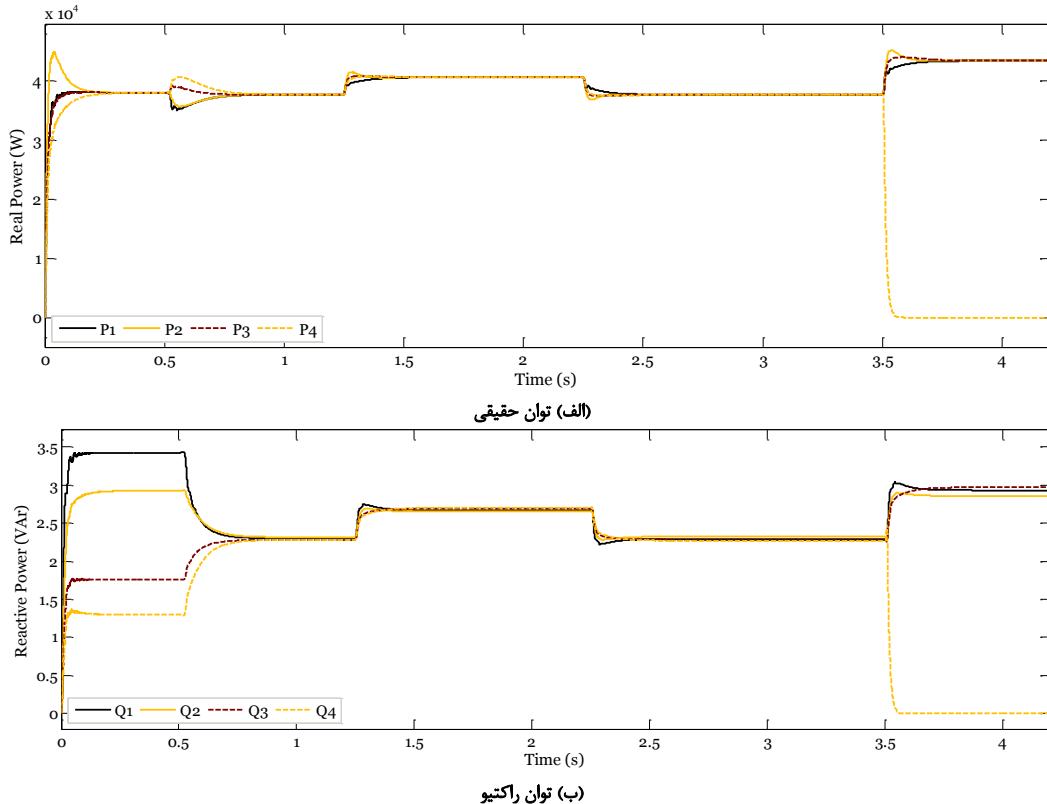
در شکل (۱۱) وضعیت تسهیم توان بار میان واحدهای این ریزشبکه در شرایط مختلف نشان داده شده است. در مقطع راهنمایی ریزشبکه، میزان مشارکت هر یک از واحدهای در تأمین تقاضای توان بارها براساس قواعد مشخصه‌های افتی معمول خواهد بود.

جدول (۱): مشخصات خطوط ریزشبکه شکل (۱۰) [۲۳]

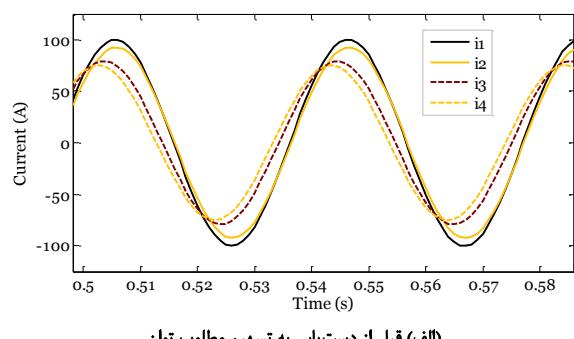
نوع مسیر	$Z_1$ ( $\Omega/km$ )	$Z_0$ ( $\Omega/km$ )
خط هوایی	$0.284 + j 0.0825$	$1.136 + j 0.417$
خط هوایی	$0.497 + j 0.0861$	$2.387 + j 0.447$
کابل	$0.462 + j 0.0764$	$2.04 + j 0.421$
کابل	$0.87 + j 0.0805$	$3.48 + j 0.409$
کابل	$1.38 + j 0.0828$	$5.52 + j 0.418$
کابل	$3.41 + j 0.0963$	$13.64 + j 0.472$

مؤید کارآیی روش پیشنهادی در ارسال سیگنال فرمان به مشخصه افتی اصلاح شده با هدف تسهیم توان حقیقی و راکتیو در این حالت است.

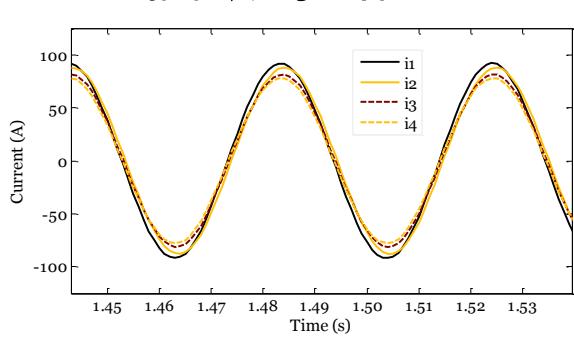
۱/۲۵ ثانیه به ریزشبکه اضافه و در لحظه ۲/۲۵ ثانیه قطع می‌شود. مشاهده می‌شود که این تغییرات در تمامی واحدها تشخیص داده شده و به صورت همزمان و هماهنگ به آن پاسخ داده می‌شود. در نهایت در زمان ۳/۵ ثانیه واحد ۴ از ریزشبکه خارج می‌شود که نتایج شبیه‌سازی



شکل (۱۱): عملکرد روش اصلاح مشخصه افتی مجهر به فعال ساز محلی پیشنهادی در ریزشبکه تست فشار ضعیف



در شکل (۱۲) جریان خروجی فاز a واحدها در بازه‌های زمانی متفاوت مطالعه فوق نشان داده است. مقایسه این جریان‌ها در شرایط عدم تسهیم مناسب بار با مقطع اعمال روش پیشنهادی نشان می‌دهد که علاوه بر نزدیک شدن دامنه‌ی این جریان‌ها به دلیل یکسان شدن توان خروجی واحدها، اختلاف فاز آن‌ها هم تا حد زیادی کاهش یافته که نشانه کاهش جریان‌های گردشی میان منابع است.



شکل (۱۲): جریان خروجی منابع ریزشبکه تست فشار ضعیف هنگام استفاده از روش اصلاح مشخصه افتی مجهر به فعال ساز محلی پیشنهادی

## ۶- نتیجه‌گیری

حفظ ریزشبکه جزیره‌ای در شرایط پایدار مستلزم اجرای یک روش کنترلی مطمئن و دقیق به منظور تسهیم مناسب توان میان واحدهای تولید پراکنده است. در این مقاله ابتدا روش اصلاح کنترل کننده با رویکرد اصلاح عرض از مبدأ مشخصه افتی مرسوم ولتاژ و تغییر نقطه کار واحدهای DG مبتنی بر اینورتر به منظور بهبود دقت تسهیم توان راکتیو مورد بررسی قرار گرفت. این روش با ایجاد تزویج موقت توان حقیقی و راکتیو، خطای تسهیم توان راکتیو را مشخص و با اصلاح مشخصه ولتاژ مرسوم و تغییر دامنه ولتاژ، تولید توان راکتیو منابع جریان می‌کند. اثربخش بودن روش پیشنهادی با اجرای همزمان مراحل اصلاح کنترل کننده در منابع ریزشبکه به دست می‌آید.

- [10] Bidram, A., Davoudi, A., "Hierarchical structure of microgrids control system", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 1693-1976, 2012.
- [11] Khani, K., Shahgholian, G., "Analysis and optimization of frequency control in isolated microgrid with double-fed induction-generators based wind turbine", Journal of International Council on Electrical Engineering, vol. 9, no. 1, pp. 24-37, 2019.
- [12] Han, Y., Shen, P., Zhao, X., Guerrero, J.M., "An enhanced power sharing scheme for voltage unbalance and harmonics compensation in an islanded AC microgrid", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 31, no. 3, pp. 1037-1050, 2016.
- [13] Majumder, R., Ledwich, G., Ghosh, A., "Droop control of converterinterfaced microsources in rural distributed generation", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2768-2778, 2010.
- [14] He, J., Li, Y.W., Guerrero, J.M., Blaabjerg, F., Vasquez, J.C., "An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme", IEEE Trans. on Power Electron., vol. 28, no. 11, pp. 5272-5282, 2013.
- [15] Han, H., Hou, X., Yang, J., Wo, J., Su, M., Guerrero, J.M., "Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 7, no. 1, pp. 200-215, 2016.
- [16] Zhang, H., Kim, S., Sun, Q., Zhou, J. "Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Accurate Reactive Power Sharing Based on Consensus Control in Microgrids", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 8, no. 4, pp. 1749-1761, 2016.
- [17] Mousavi, S.Y., Jalilian, A., Savaghebi, M., Guerrero, J.M., "Autonomous control of current-and voltage-controlled DG interface inverters for reactive power sharing and harmonics compensation in islanded microgrids", IEEE Trans. on Power Electronics., vol. 33, no. 11, pp. 9375-86, 2018.
- [18] Li, Y.W., Kao, C.N., "An accurate power control strategy for power electronics-interfaced distributed generation units operation in a low voltage multibus microgrid", IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 12, pp. 2977-2988, 2009.
- [19] He, J.W., Li, Y.W., "An enhanced microgrid load demand sharing strategy", IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 9, pp. 3984-3995, 2012.
- [20] Saghafi, H., Karshenas, H.R., "Power sharing improvement in standalone migrogrids with decentralized control strategy", Electric Power Compn. Systm, vol. 42, no. 12, pp. 1278-1288, 2014.
- [21] Zhang, H., Kim, S., Sun, Q., Zhou, J., "Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 8, no. 4, pp. 1749-1761, 2017.
- [22] Wang, X., Li, Y.W., Blaabjerg, F., Loh, P.C., "Virtual-impedance-based control for voltage-source and current-source converters", IEEE Trans. on Power Electron, vol. 30, no. 12, pp. 7019-7037, 2015.
- [23] Papathanassiou, S., Hatzigyriou, N. D., Strunz, K., "A benchmark low voltage microgrid network", in Proc. CIGRE Symp. Power Syst. Dispersed Gener., Athens, Greece, pp. 1-8., 2005.
- [24] Golsorkhi, M.S., Lu, D.D.C., "A control method for inverter-based islanded microgrids based on V-I droop characteristics", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 30, no. 3. pp. 1196-1204, 2014.

به منظور حذف کامل نیاز به ارتباط مخابراتی و بطرف کردن نگرانی-های مربوط به بروز تأخیر و یا قطع این نوع ارتباط، در این مقاله یک مکانیزم فعال ساز محلی طراحی شده است. طرح پیشنهادی براساس پایش نوسانات توان راکتیو خروجی منبع، نیاز به صدور سیگنال فرمان فعال ساز را تشخیص می‌دهد. صدور سیگنال فعال ساز بهصورت محلی علاوه بر بهبود دقت عملکرد، افزایش قابلیت اعتماد طرح اصلاح کنترل کننده افتی را به دنبال خواهد داشت. مکانیزم پیشنهادی با وقوع هرگونه تغییر در ریزشبکه شامل راهاندازی ریزشبکه، تغییر حالت عملکرد از وضعیت کاری متصل به شبکه‌ی سراسری به وضعیت کاری جزیره‌ای، ورود یا خروج واحدهای DG و تغییرات ناگهانی بار از خود واکنش نشان داده و با فعل سازی روش اصلاح مشخصه، منجر به تسهیم ایده‌آل توان در منابع ریزشبکه می‌شود.

## مراجع

- [1] روزبهی، ش.، مرادی، م.ح.، "بهینه سازی عملکرد واحدهای تولید پراکنده در یک بازار رقابتی با ترکیب تئوری بازی و الگوریتم تکاملی"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال: ۵، شماره: ۹، ص: ۱۱۲-۱۲۲، بهار و تابستان ۱۳۹۵
- [2] Luo, L., Gu, W., Zhang, X., Cao, G., Wang, W., Zhu, G., You, D., Wu, Z., "Optimal siting and sizing of distributed generation in distribution systems with PV solar farm utilized as STATCOM (PV-STATCOM)", Applied Energy, Vol. 210, pp. 1092-1100, Jan. 2018.
- [3] Rokrok, E., Shafie-Khah, M., Catalão, J.P., "Review of primary voltage and frequency control methods for inverter-based islanded microgrids with distributed generation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 3225-3235, 2018.
- [4] Wang, K., Yuan, X., Geng, Y., Wu, X., "A Practical Structure and Control for Reactive Power Sharing in Microgrid", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 1880-1888, 2017.
- [5] Sadeghkhan, I., Hamedani Golshan, M.E., Guerrero, J.M., Mehrizi-Sani, A., "A current limiting strategy to improve fault ride-through of inverter interfaced autonomous microgrids", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 8, no. 5, pp. 2138-2148, Sep. 2017.
- [6] اکبری، م.، گلکار، م.ع.ا.، مقدس تفرشی، س.م.، "کنترل ولتاژ و فرکانس در یک میکروشبکه‌ی AC/DC مستقل"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال: ۲، شماره: ۳، ص: ۱۰-۱۸، بهار و تابستان ۱۳۹۲
- [7] Karimi, H., Shahgholian, G., Fani, B., Sadeghkhan, I., Moazzami, M., "A protection strategy for inverter interfaced islanded microgrids with looped configuration", Electrical Engineering, vol. 101, no. 3, pp. 1059-1073, 2019.
- [8] شاهقلیان، غ.، فانی، ب.، کیوانی، ب.، کریمی، ح.، معظمی، م.، "بهبود تسهیم توان راکتیو با استفاده از اصلاح مشخصه‌های افتی در ریزشبکه‌های خودگردان"، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، سال: ۹، شماره: ۳، ص: ۶۴-۷۱، پاییز ۱۳۹۸
- [9] Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems, IEEE Standard 1547.4, 2011.

### زیرنویس‌ها

1. Distributed Generation
2. Point of Common Coupling
3. Low Pass Filter
4. Sample and Hold Units
5. Overshoot
6. Startup
7. Time Delay Unit
8. High Pass Filter
9. Reset