طراحی کنترل‌کننده محلی توان برای منابع پراکنده اینورتری در ریزشبکه‌های جزیره‌ای

محمد صادقیان[۱،۲] ، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، بهادر فانی[۲،۳]، دانشیار، ایمان صادق‌خانی[۲،۳]، استادیار، غضنفر شاهقلیان[۲،۳]، دانشیار

۱- شرکت برق منطقه‌ای اصفهان، اصفهان، ایران
۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
m.sadeghiyan@sel.iaun.ac.ir
۳- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
b.fani@pel.iaun.ac.ir, sadeghkhani@pel.iaun.ac.ir, shahgholian@iaun.ac.ir

چکیده: **تسهیم توان میان واحدهای تولید پراکنده در ریزشبکه‌ها معمولاً با استفاده از مشخصه‌های افتی توان حقیقی-فرکانس و توان راکتیو-ولتاژ انجام می‌شود. با وجود برتری‌هایی از جمله سهولت اجرا و عدم نیاز به ساختارهای مخابراتی، عدم توانایی در تسهیم مناسب توان راکتیو از نقاط ضعف این نوع کنترل‌کننده است. در این مقاله‌ی یک روش اصلاح برمبنای تغییر عرض از مبدأ مشخصه افتی ولتاژ بررسی می‌شود. در این روش، کنترل اولیه‌ی منابع پراکنده اینورتری با استفاده از مشخصه‌های افتی مرسوم صورت می‌پذیرد. در ادامه با ایجاد یک نوسان کوچک در توان حقیقی و ایجاد تزویج موقت بین توان‌های حقیقی و راکتیو، خطای تسهیم توان راکتیو برای هر واحد مشخص می‌شود. بر این اساس، فرم اصلاح-شده‌ی کنترل‌کننده با ایجاد تغییر مناسب دامنه ولتاژ خروجی، توان راکتیو تولیدی هر واحد را اصلاح می‌کند. به‌علت نیاز به اجرای همزمان این فرآیند در تمام واحدهای تولید پراکنده و مشکلات استفاده از کنترل‌کننده‌ی مرکزی و ارتباط مخابراتی، یک روش فعال‌ساز محلی در این مقاله پیشنهاد شده است. طرح پیشنهادی براساس تغییرات قابل‌ملاحظه‌ی توان راکتیو عمل کرده و اجرای کامل مراحل روش اصلاح مشخصه افتی و فعال‌سازی مجدد آن را برای پاسخگویی به تغییرات توان ریزشبکه را تضمین می‌نماید. نتایج مطالعات در ریزشبکه تست فشار ضعیف مؤید کارآیی فعال‌ساز پیشنهادی است.**

واژه های کلیدی: **تولید پراکنده، ریزشبکه‌ی جزیره‌ای، مشخصه‌های افتی، تسهیم توان راکتیو، اینورتر منبع ولتاژ.**

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۳/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۱۰/۱۸

نام نویسنده‌ی مسئول: غضنفر شاهقلیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]

۱- مقدمه

همزمان با گسترش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و اهمیت تأمین پایدار نیاز مصرف‌کنندگان و از طرفی لزوم رعایت اصول حفظ محیط زیست، به‌کارگیری منابع تولید پراکنده[1] (DG) به‌دلیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان تأمین‌کننده‌ی اصلی انرژی اولیه، در کانون توجه قرارگرفته است [۲،۱]. ازآنجایی‌که این واحدهای DG معمولاً به واسطه مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه توزیع متصل می‌شوند، ارائه‌ی 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 به‌صورت هماهنگ با یکدیگر کار می‌کنند، مفهوم ریزشبکه را ایجاد می‌نمایند [۶،۵]. این مجموعه به‌عنوان تأمین‌کننده‌ی 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 مواقع بحرانی مانند وقوع خطا در شبکه‌ی 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 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 کنترل‌کننده‌های افتی توان حقیقی-فرکانس (P-ω) 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. درحالی‌که ارتباط توان راکتیو با دامنه ولتاژ خروجی در این کنترل‌کننده، 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 کانال 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 کنترل‌کننده‌ای که بتواند بدون استفاده از کانال 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 [۱۳] 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 به‌عنوان 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 کنترل‌کننده بر اساس حفظ تنظیم ولتاژ ریزشبکه انتخاب شده و از طرفی به‌دلیل 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 کنترل‌کننده‌ی منابع باعث ایجاد اختلاف در فرکانس منابع می‌شود که به‌مرور منجر به خروج از محدوده‌ی زاویه ولتاژ پایدار و در نهایت ناپایداری ریزشبکه خواهد شد.

در نظر گرفتن ارتباط توان حقیقی 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 حقیقی P و راکتیو Q به ترتیب به توان‌های مجازی P' و Q' تبدیل می‌شوند به‌طوری که P' با زاویه‌ی انتقال توان و Q' با دامنه ولتاژ به‌صورت مستقل از هم کنترل می‌شوند. این روش رفتار گذرای سیستم را بهبود و پایداری آن را افزایش می‌دهد. البته در این ساختار کنترلی، ثابت زمانی کنترل‌کننده‌ی توان حقیقی و راکتیو بر تنظیم فرکانس و ولتاژ تأثیر می‌گذارد و در صورت وجود تفاوت در توان تزریقی به شبکه و یا ناهماهنگی 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 کنترل‌کننده‌ی 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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]

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

در مراجع [۱۹] و [۲۰] روش اصلاح مشخصه افتی با جابجا کردن عرض از مبدأ مشخصه‌ی 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 واحدها، در این روش از یک کنترل‌کننده‌ی مرکزی به همراه ارتباط مخابراتی با پهنای باند کم برای ارتباط با کنترل‌کننده‌ی محلی واحدهای DG استفاده شده است. وابستگی این روش به عملکرد صحیح کنترل‌کننده‌ی مرکزی و ارتباط مخابراتی، قابلیت اعتماد آن را کاهش و هزینه اجرای آن را افزایش داده است.

به‌منظور بهبود روش اصلاح مشخصه افتی با جابجا کردن عرض از مبدأ مشخصه‌ی 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 به‌وجود آمده در خروجی اینورترها و صدور فرمان آغاز فرآیند اصلاح را برعهده دارد. بدین ترتیب در مواقعی که توان راکتیو خروجی منابع دچار افزایش و یا کاهش قابل توجه‌ای می‌شود، فعالیت مکانیزم تشخیص فرآیند اصلاح آغاز شده و زمان مناسب برای آغاز فرآیند اصلاح عرض از مبدأ مشخصه افتی ولتاژ مرسوم تعیین می‌گردد.

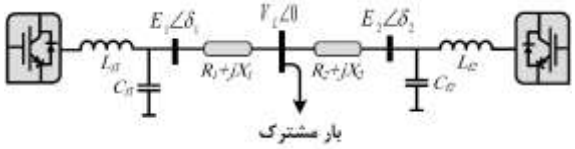
مهمترین ویژگی‌های روش پیشنهادی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- 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 فعال‌ساز محلی پیشنهادی 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 اینوتر و یک بار مشترک خطی را نشان می‌دهد. در این ریزشبکه واحدهای DG توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت به باس مشترک[۲] (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.

$$Q_i = \frac{E_i V_l \cos\delta_i - V_l^2}{X_i} \quad (۱)$$

$$P_i = \frac{E_i V_L}{X_i} \sin\delta_i \quad (۲)$$

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

$$\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt} \quad (۳)$$

$$\omega = \omega_0 - m_p \cdot P \quad (۴)$$

$$E = E_0 - n_q \cdot Q \quad (۵)$$

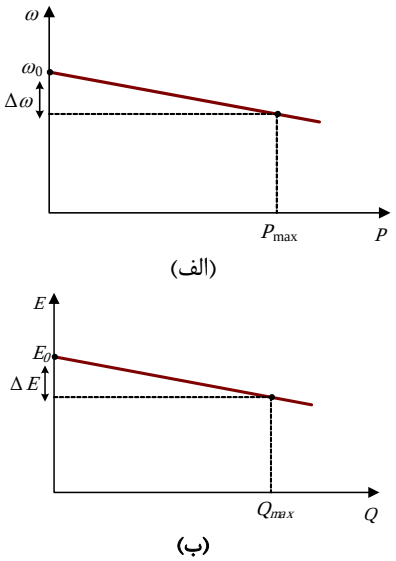
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]

در این معادلات E_0 و ω_0 مقادیر نامی ولتاژ و فرکانس منابع و ضرایب n_q و m_p به ترتیب شیب مشخصه‌ی ولتاژ و فرکانس هستند.این ضرایب براساس روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند.

$$m_p = \frac{\Delta\omega_{\max}}{P_{\max}} \qquad (۶)$$

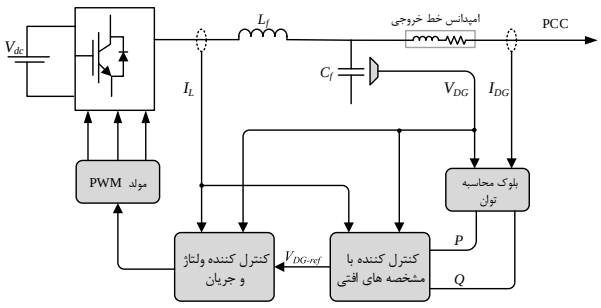
$$n_q = \frac{\Delta E_{\max}}{Q_{\max}} \qquad (۷)$$

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



شکل (۲): (الف) مشخصه‌ی افتی P-ω و (ب) مشخصه‌ی افتی Q-E

روش معمول کنترل محلی منابع، پیاده‌سازی کنترل‌کننده در مختصات سنکرون بوده که در آن پارامترهای مختلف شبکه‌ی متعادل در حالت دائمی به‌صورت 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 کنترل‌کننده افتی نشان داده شده است.



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

از آنجایی که عملکرد ریزشبکه‌ی در حالت جزیره‌ای مدنظر است، انتظار می‌رود که واحدهای DG بتوانند بار ریزشبکه را به نحو مطلوب تأمین کنند. با فرض یکسان بودن توان نامی منابع، هر واحد DG به تناسب آرایش شبکه و اندازه‌ی امپدانس فیدر خود، تغذیه‌ی توان بار را در سطح مشخصی برعهده خواهد گرفت. همان‌طور که در شکل (۲) ملاحظه می‌شود، با افزایش توان حقیقی و توان راکتیو تولیدی منبع و با متناسب با شیب مشخصه‌ی افتی، به ترتیب فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی منبع اینورتری نسبت به مقدار نامی خود کاهش می‌یابد. اما مسأله‌ی تسهیم توان در مشخصه‌ی فرکانس و مشخصه‌ی ولتاژ با شرایط متفاوتی روبرو است.

به تناسب میزان توان حقیقی کشیده شده از هرمنبع، فرکانس یا به تعبیری 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 باتوجه 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 زاویه‌ی ولتاژ طبق رابطه (۳)، زاویه‌ی 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 دامنه‌ی 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 زمانی‌که ریزشبکه بصورت غالب مقاومتی درنظر گرفته شود، از مشخصه‌های افتی معکوس جهت تضعیف تزویج میان کنترل توان‌های حقیقی و راکتیو استفاده می‌شود [۲۲،۲۱].

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

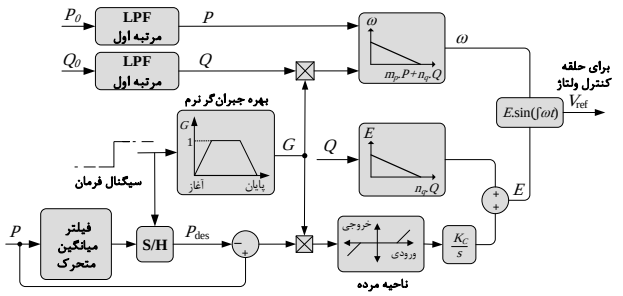
این بخش به توضیح عملکرد اصول کنترل‌کننده‌ی افتی اصلاح شده با هدف اصلاح تسهیم توان راکتیو اختصاص یافته است. این کنترل‌کننده قادر است در ریزشبکه‌های جزیره‌ای با پیکربندی‌های مختلف تسهیم توان میان منابع را به‌صورت قابل‌قبولی انجام دهد. این روش در دو مرحله اجرا می‌شود که در ادامه شرح داده می‌شود.

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 شرایط تسهیم ایده‌آل توان راکتیو برابر با Q_{des} باشد؛ به دلیل استفاده

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]

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 کنترل‌کننده‌ی هر واحد محاسبه و ذخیره می‌شود تا در مرحله‌ی دوم فرآیند اصلاح تسهیم توان مورد 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[3] (LPF) استفاده شده برای محاسبه‌ی توان ورودی مشخصه-های افتی است که در شکل (۴) نشان داده شده است. با استفاده از واحدهای نمونه‌بردار و ذخیره‌کننده[4] (S/H)، نمونه‌گیری از P_{des} انجام می‌شود و مقدار ذخیره شده‌ی آن تا زمان دریافت سیگنال فرمان دائماً به‌روزرسانی می‌شود. به محض دریافت سیگنال فرمان که مصادف با پایان مرحله اول است، روند به‌روزرسانی متوقف شده و آخرین نمونه از این کمیت ذخیره و تا زمان تغییر وضعیت بعدی به‌عنوان خروجی بلوک نمونه‌بردار و ذخیره‌کننده در نظر گرفته می‌شود.



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

۳-۲- 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]:

$$\omega=\omega_0-(m_p\cdot P+n_q\cdot Q) \quad (۸)$$

$$E=E_0-n_q\cdot Q+\left(\frac{K_C}{s}\right)\cdot\left(P-P_{des}\right) \quad (۹)$$

که K_C ضریب بهره‌ی انتگرال‌گیر است و برای تمامی واحدها با اندازه‌ی یکسان درنظر 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. به‌دلیل وجود خطای تسهیم توان راکتیو، عبارت $n_q.Q$ برای هر منبع مقدار متفاوتی دارد و به‌دلیل سراسری بودن فرکانس، توان حقیقی منابع متناسب با پارامتر اضافه شده در رابطه‌ی (۸) دچار نوسان می‌شود تا عبارت $(m_p.P+n_q.Q)$ 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 بزرگتر از مقدار مطلوب Q_{des} داشته است، کاهش یافته و توان حقیقی منبعی که توان راکتیو تولید آن کمتر از Q_{des} بوده است، افزایش می‌یابد. تغییرات به‌وجود آمده در توان حقیقی منابع باعث می‌شود تا مقدار توان راکتیو خروجی آنها به تناسب جمله‌ی 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 به‌طور 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 $(m_p.P + n_q.Q)$ می‌شود و این روند به‌مرور 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 به‌کار 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 اصلاح‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرند و متأثر از تغییرات مشخصه‌های افتی، تغییراتی در ولتاژ مرجع اینورتر (V_{ref}) و به تبع آن در توان خروجی واحدها حاصل می‌شود.

به‌منظور جلوگیری از نوسانات شدید توان و بالازدگی[5] جریان، از ضریب بهره‌ی جبران‌گر G در مسیر اعمال سیگنال فرمان استفاده می-شود. 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 اختصاص‌یافته برای اجرای این روش دارد. هرچند باید توجه شود که اجرای بسیار سریع این فرآیند می‌تواند باعث کاهش دقت و ایجاد نوسانات شدید در خروجی منابع شود که اهمیت تنظیم صحیح ضرایب کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده‌ی 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 می‌طلبد. بر همین اساس و به‌دلیل آنکه اندازه‌ی P_{des} در تغییرات مراحل بعدی فرآیند اصلاح کنترل‌کننده کاملاً تأثیرگذار است، باید زمان ارسال سیگنال فرمان به‌درستی رعایت شود.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]

۳-۳- استراتژی آغاز به کار فرآیند اصلاح کنترل‌کننده

با توجه به ساختار چندمرحله‌ای روش اصلاح مشخصه افتی و نیاز به تکرار فرآیند اصلاح مشخصه‌ها پس از وقوع تغییرات قابل‌توجه در ریزشبکه، استفاده از یک ساختار مطمئن به‌منظور فعال‌سازی و اجرای مراحل مختلف کنترل‌کننده‌ی 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 کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی در تمامی منابع موجود در ریزشبکه 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 ورود و مشارکت حتی یکی از منابع در فرآیند اصلاح کنترل‌کننده، 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 (ω_0) با عبارت ($m_p.P+n_q.Q$) است، چنانچه منبعی کماکان با کنترل‌کننده‌ی قبلی یعنی مشخصه‌ی مرسوم فرکانس کار کند، مبنای تولید توان حقیقی در این منبع با دیگر منابع متفاوت خواهد بود؛ بنابراین با توجه به مشخص بودن نیاز توان حقیقی ریزشبکه و لزوم حفظ تعادل میان تولید و مصرف توان، تغییر توان حقیقی در منابع کمتر و یا بیشتر از حد مورد نیاز انجام می‌شود. این روند می‌تواند ادامه‌ی فرآیند اصلاح و فعالیت کنترل‌کننده‌ی منابع را دچار اختلال نماید. بر این اساس اگر اصلاح کنترل‌کننده حتی در یکی از منابع آغاز نشود، اصلاح مشخصه در سایر منابع و تسهیم توان در ریزشبکه 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 کنترل‌کننده‌ی 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 ریزشبکه به‌وجود خواهد آمد، مقدار P_{des} دیگری برای منابعی که با تأخیر وارد فرآیند اصلاح می‌شوند، ذخیره خواهد شد. در نتیجه‌ی این عدم هم‌زمانی، اصلاح کنترل‌کننده در تمامی منابع با خطا همراه خواهد شد. لذا لازم است تا مکانیزم درنظر گرفته شده برای فعال‌سازی کنترل‌کننده‌ی پیشنهادی، شروع هم‌زمان این فرآیند در تمامی منابع را تضمین کند.

فعال‌سازی فرآیند اصلاح مشخصه افتی به کمک روش کنترل-کننده‌ی مرکزی صورت می‌پذیرد [۱۹]. در این روش سیگنال فرمان آغاز، در زمان‌های مشخصی از طرف کنترل‌کننده‌ی مرکزی و از طریق مسیر مخابراتی با پهنای باند کوتاه برای کلیه‌ی منابع ارسال می‌شود. مزیت این روش اطمینان از مشارکت تمامی منابع در فرآیند اصلاح کنترل‌کننده و همچنین هم‌زمانی آغاز مراحل مختلف روش اصلاح مشخصه در همه‌ی منابع است. اشکال این روش نیاز به استفاده از ارتباط مخابراتی برای ارتباط کنترل‌کننده‌ی مرکزی با کنترل‌کننده‌ی سایر منابع است؛ چرا که از دست دادن این ارتباط مخابراتی به معنای عدم کارکرد کنترل‌کننده 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.

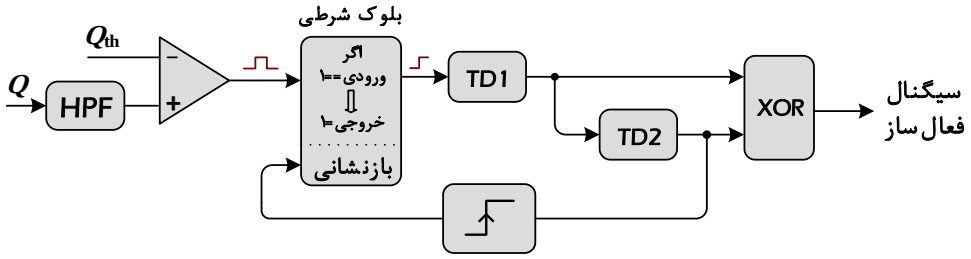
۴- روش محلی پیشنهادی برای آغاز فرآیند اصلاح مشخصه‌های افتی

در این مقاله در راستای افزایش قابلیت اطمینان کنترل‌کننده افتی اصلاحی، یک مکانیزم فعال‌ساز طراحی شده است که بدون نیاز به ارتباط مخابراتی، به‌صورت کاملاً محلی و بدون تحمیل هزینه‌ی اضافی می‌تواند سیگنال آغاز فرآیند اصلاح کنترل‌کننده‌ی 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 تعریف‌شده در ریزشبکه، فرآیند اصلاح مشخصه در تمامی منابع آغاز خواهد شد. شکل (۵) نحوه‌ی کارکرد واحد فعال‌ساز پیشنهادی را نشان می‌دهد. این واحد فعال‌ساز به‌گونه‌ای طراحی شده است که نسبت به راه‌اندازی[۶] ریزشبکه، تغییر وضعیت ریزشبکه 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 به‌نحو مطلوب فعال سازد. به‌دلیل نیاز به هم‌زمانی آغاز مراحل روش اصلاح و احتمال تشخیص غیر همزمان تغییر توان ریزشبکه توسط واحدهای DG به خصوص واحدهایی که در فواصل دورتری از مرکز ریزشبکه قرار دارند، توان حقیقی مطلوب P_{des} پس از تأخیر زمانی مشخصی ذخیره شده تا فرآیند اصلاح به‌درستی اجرا شود. براین اساس، فرآیند اصلاح بلافاصله پس از تشخیص تغییر در منابع آغاز نخواهد شد بلکه با استفاده از واحدهای تأخیر زمان[۷] با تنظیمات مناسب، آغاز و پایان به‌موقع 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 کنترل‌کننده افتی شوند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]

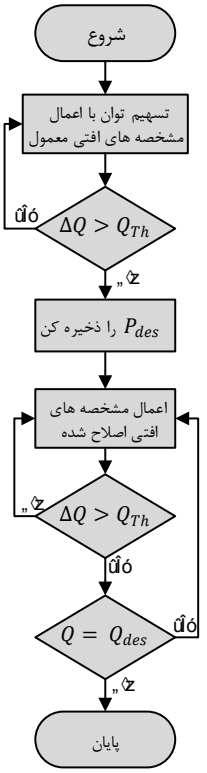


آشکارساز لبه بالارونده

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

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 قبال تغییرات به وجود آمده در توان راکتیو شبکه به وجود می‌آید، سیگنال Q به عنوان مرجع تصمیم‌گیری آغاز فرآیند و ورودی واحد تولیدکننده‌ی سیگنال فرمان در نظر گرفته می‌شود. سیگنال فعال‌ساز، خروجی نهایی این واحد بوده که یک سیگنال فرمان منطقی با مقدار صفر یا یک است. استفاده از فیلتر بالاگذر[۶] (HPF) بدین خاطر است که تنها تغییرات بزرگی که در توان خروجی منبع رخ می‌دهد، 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 فعال‌ساز 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 فعال‌ساز به‌صورت دائمی صادر می‌شود که از آن برای تکمیل مراحل روش اصلاح کنترل‌کننده و همچنین پایان کار مکانیزم فعال‌ساز در مقطع راه‌اندازی ریزشبکه استفاده می‌گردد.

به‌منظور 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 فعال‌ساز، 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 فعال‌ساز در زمان‌های مناسب ارسال خواهد شد. در نتیجه مقادیر 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 اصلاح مجدد وضعیت تسهیم بار، بلافاصله پس از high شدن خروجی واحد تأخیر زمانی شماره ۲ (TD2) که همزمان با پایان فرآیند اصلاح تسهیم بار در مرتبه‌ی اول است، یک سیگنال برای بازنشانی[۷] وضعیت بلوک شرطی ارسال می‌شود. درواقع 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 کنترل‌کننده منابع تولید می‌شود. ساختار کلی و ترتیب اجرای مراحل طرح پیشنهادی این مقاله در قالب فلوچارت شکل (۶) ارائه شده است.



شکل (۶): فلوچارت کنترل‌کننده پیشنهادی

۵- نتایج شبیه‌سازی

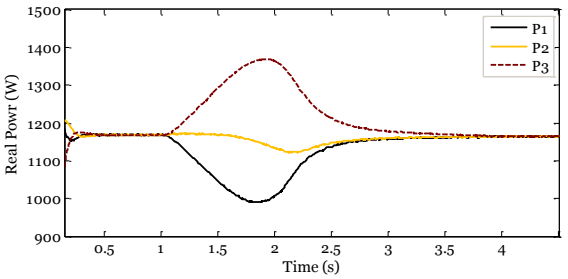
در این قسمت به بررسی عملکرد روش اصلاح مشخصه افتی در دو حالت استفاده از کنترل‌کننده مرکزی و استفاده از فعال‌ساز محلی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]

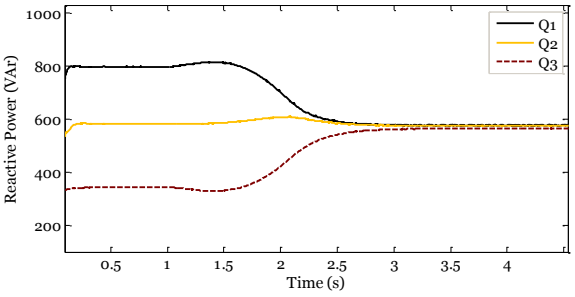
پیشنهادی پرداخته می‌شود. برای انجام این مطالعات از محیط نرم افزار سیمولینک متلب استفاده شده است.

۵-۱- اصلاح مشخصه افتی با کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده‌ی مرکزی در زمان ۱ ثانیه صادر می‌شود و پس از آن اصلاح تسهیم توان مطابق فرآیند شکل (۴) 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.



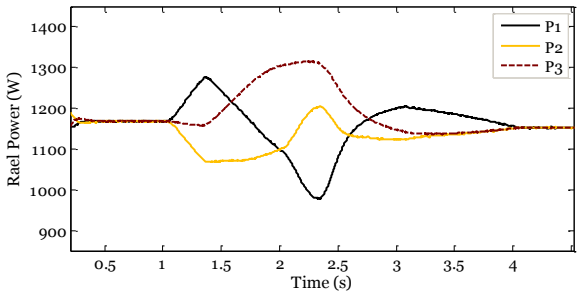
(الف) توان حقیقی



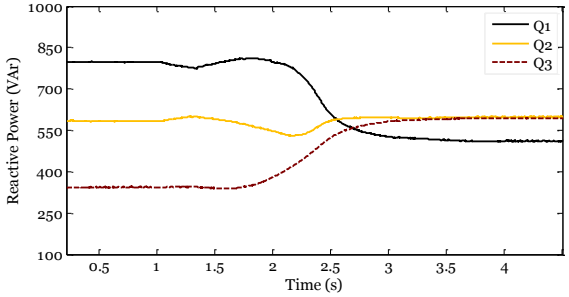
(ب) توان راکتیو

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

در گام بعد مشکلات حاصل از کاربرد کنترل‌کننده 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 امکان‌پذیر است. توان‌های حقیقی و راکتیو خروجی منابع در این حالت در شکل (۸) نشان داده شده است. با مقایسه نتایج این شکل با شکل (۷) 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.



(الف) توان حقیقی



(ب) توان راکتیو

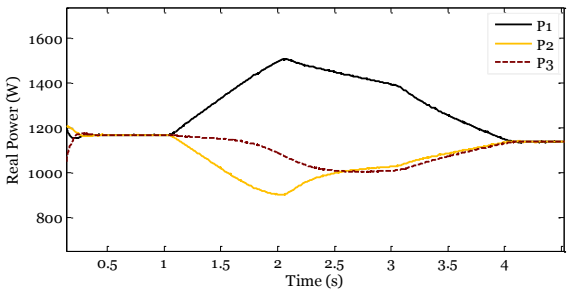
شکل (۸): عملکرد روش اصلاح مشخصه افتی مجهز به کنترل‌کننده مرکزی با لحاظ کردن تأخیر ۰/۱۵ ثانیه در شروع فرآیند اصلاح برای واحد ۱.

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 (۹) 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 کنترل‌کننده، 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 کنترل‌کننده بازمی‌گردد؛ چرا که همان‌گونه که قبلاً اشاره شد به علت ناهماهنگی در مشخصه‌ی مرجع تعین‌کننده‌ی توان منابع و لزوم حفظ تعادل تولید و مصرف توان، هر چقدر که کنترل‌کننده 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 کنترل‌کننده شکل (۴) حذف گردد، از دست رفتن ارتباط مخابراتی حتی می‌تواند منجر به ناپایداری ریزشبکه شود.

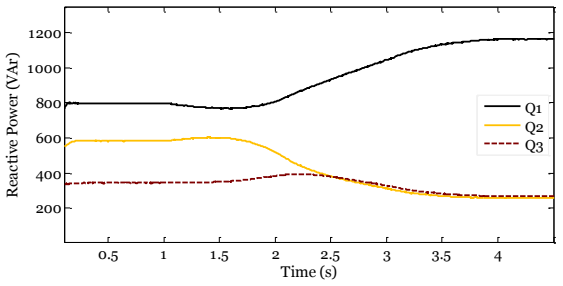
۵-۲- اصلاح مشخصه افتی با فعال‌ساز محلی پیشنهادی

این بخش به بررسی کارآیی روش اصلاح مشخصه افتی با استفاده از فعال‌ساز 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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]



(الف) توان حقیقی



(ب) توان راکتیو

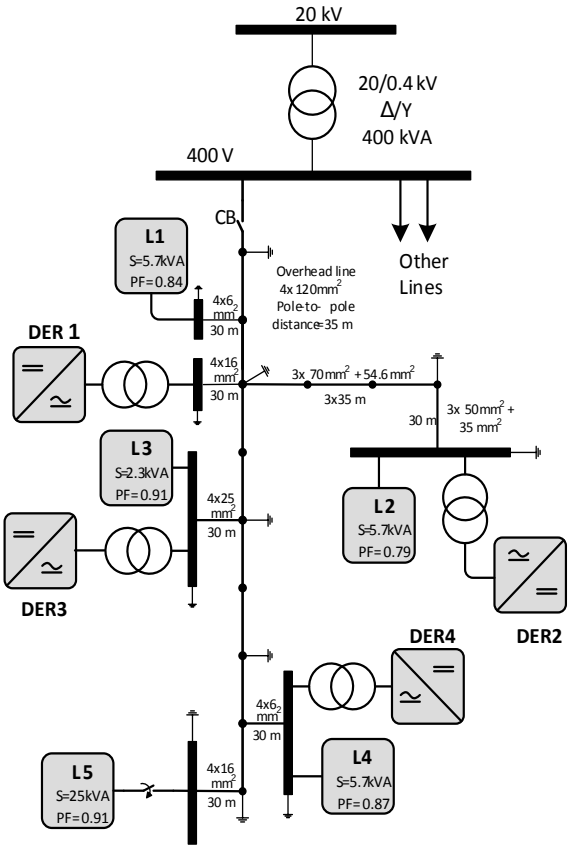
شکل (۹): عملکرد روش اصلاح مشخصه افتی مجهز به کنترل‌کننده مرکزی درصورت عدم مشارکت واحد ۱ در فرآیند اصلاح

این سیستم یک ریزشبکه‌ی جزیره‌ای شامل بارهای متنوع و منابع تولیدپراکنده مبتنی بر اینورتر است که بر بستر یک شبکه توزیع با پارامترهای استاندارد شکل گرفته است [۲۴]. بارهای این مجموعه (L1-L4) با ضریب توان‌های مختلف هستند تا شرایط جامع‌تری برای این مطالعه درنظر گرفته شده باشد. همچنین بنابر مقتضیات و اهداف این مقاله، واحدهای تولید پراکنده این ریزشبکه (DER1-DER4) با ظرفیت‌های برابر ۱۲/۵ کیلووات در فرایند شبیه‌سازی مشارکت داده می‌شوند. اطلاعات مربوط به بارها و خطوط این شبکه در نمودار تک خطی شکل (۱۰) و جدول (۱) و مشخصات کنترل‌کننده 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 راه‌اندازی ریزشبکه، میزان مشارکت هر یک از واحدها در تأمین تقاضای توان بارها براساس قواعد مشخصه‌های افتی معمول خواهد بود.

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

نوع مسیر	Z_0 (Ω/km)	Z_1 (Ω/km)
خط هوایی 4x120 mm² AL XLPE	1.136 + j 0.417	0.284 + j 0.0825
خط هوایی 3 x 70 mm² AL XLPE + 54.6mm² AAAC	2.387 + j 0.447	0.497 + j 0.0861
کابل 3 x 50mm² AL XLPE + CU 35mm²	2.04 + j 0.421	0.462 + j 0.0764
کابل 4 x 25mm² CU	3.48 + j 0.409	0.87 + j 0.0805
کابل 4 x 16mm² CU	5.52 + j 0.418	1.38 + j 0.0828
کابل 4 x 6mm² CU	13.64 + j 0.472	3.41 + j 0.0963



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

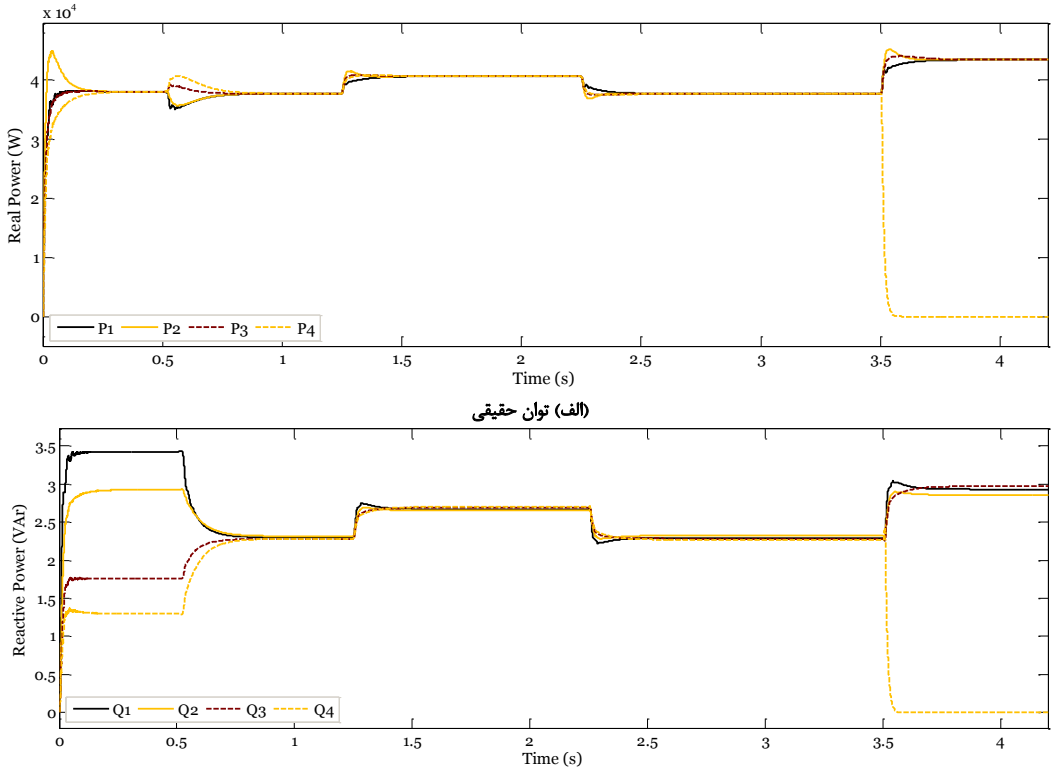
جدول (۲): مشخصات کنترل‌کننده منابع ریزشبکه شکل (۱۰)

پارامتر	مقدار
فرکانس نامی f_n	50 Hz
خازن فیلتر c_f	100 μF
اندوکتانس فیلتر L_f	1 mH
اندوکتانس فیلتر R_f	0.01 Ω
فرکانس کلیدزنی f	4500 Hz
ماکزیمم انحراف فرکانس مجاز Δf	0.3 Hz
ماکزیمم انحراف ولتاژ مجاز ΔV	0.05 pu

از همین رو تولید توان حقیقی به مقدار مطلوب P_{des} می‌رسد؛ 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 راه‌اندازی ریزشبکه به وقوع می‌پیوندد، فعالیت مکانیزم فعال‌ساز فرآیند اصلاح کنترل‌کننده آغاز می‌شود، اما تنظیمات واحدهای تأخیر زمان به نحوی بوده که علیرغم نشست نوسانات اولیه‌ی توان و دست‌یابی به توان حقیقی P_{des}، فرمان آغاز فرآیند در زمانی نزدیک به ۰/۴۵ ثانیه صادر می‌شود. شروع به کار روش اصلاح مشخصه در لحظه ۰/۴۵ 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 ظرفیت واحدها، با رسیدن توان تولیدی همه واحدها به سطح مطلوب Q_{des} و P_{des}، تسهیم مطلوب توان در ریزشبکه برقرار و کارآیی روش پیشنهادی تأیید می‌شود. در گام بعد، بار شماره ۵ در لحظه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]

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 به‌صورت هم‌زمان و هماهنگ به آن پاسخ داده می‌شود. در نهایت در زمان ۳/۵ ثانیه واحد ۴ از ریزشبکه خارج می‌شود که نتایج شبیه‌سازی مؤید کارآیی روش پیشنهادی در ارسال سیگنال فرمان به مشخصه افتی اصلاح‌شده با هدف تسهیم توان حقیقی و راکتیو در این حالت است.

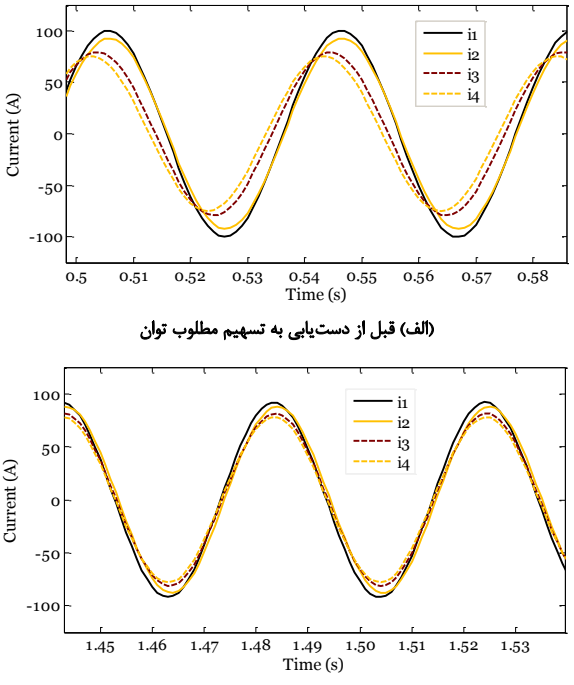


(الف) توان حقیقی

(ب) توان راکتیو

شکل (۱۱): عملکرد روش اصلاح مشخصه افتی مجهز به فعال‌ساز محلی پیشنهادی در ریزشبکه تست فشار ضعیف

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



(الف) قبل از دست‌یابی به تسهیم مطلوب توان

(ب) پس از دست‌یابی به تسهیم مطلوب توان

شکل (۱۲): جریان خروجی منابع ریزشبکه تست فشار ضعیف هنگام استفاده از روش اصلاح مشخصه افتی مجهز به فعال‌ساز 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 کنترل‌کننده با رویکرد اصلاح عرض از مبدأ مشخصه‌ی 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 جبران می‌کند. اثربخش بودن روش پیشنهادی با اجرای هم‌زمان مراحل اصلاح کنترل‌کننده در منابع ریزشبکه به‌دست می‌آید.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]

به منظور حذف کامل نیاز به ارتباط مخابراتی و برطرف کردن نگرانی-های مربوط به بروز تأخیر و یا قطع این نوع ارتباط، در این مقاله یک مکانیزم فعال‌ساز محلی طراحی شده است. طرح پیشنهادی براساس پایش نوسانات توان راکتیو خروجی منبع، نیاز به صدور سیگنال فرمان فعال‌ساز را تشخیص می‌دهد. صدور سیگنال فعال‌ساز به‌صورت محلی علاوه بر بهبود دقت عملکرد، افزایش قابلیت اعتماد طرح اصلاح کنترل‌کننده 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 فعال‌سازی روش اصلاح مشخصه، منجر به تسهیم ایده‌آل توان در منابع ریزشبکه می‌شود.

مراجع

[۱] 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] Sadeghkhani, 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.

[۶] 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., Sadeghkhani, I., Moazzami, M., "*A protection strategy for inverter interfaced islanded microgrids with looped configuration*", Electrical Engineering, vol. 101, no. 3, pp. 1059-1073, 2019.

[۸] 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.

[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, YW., Guerrero, JM., Blaabjerg, F., Vasquez, JC., "*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, SY., Jalilian, A., Savaghebi, M., Guerrero, JM., "*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., Hatziargyriou, 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.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]
[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]

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

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1398.8.3.6.1]

[DOI: 10.29252/ieijqp.8.3.47]