ارائه الگوی جدید تخصیص توان در ریزشبکه الکتریکی مجزا از شبکه جهت بهبود بهره‌وری از منابع تولید پراکنده

امیر خالدیان[1]، دانشجوی دکتری، مسعود علی اکبر گلکار[2]، استاد

۱-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی- تهران- ایران
akhaledian@mail.kntu.ac.ir –

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی- تهران- ایران
golkar@kntu.ac.ir –

چکیده: در این مقاله، الگوی جدیدی از تخصیص توان بین منابع تولید پراکنده در ریزشبکه جزیره ای ارائه می شود. با توجه به وجود منابع دارای تاخیر در تولید توان نظیر پیل سوختی، با استفاده از ساختار کنترل توان معرفی شده می‌توان توانایی ریزشبکه برای مواجهه با انواع سناریوهای تغییر بار را افزایش داد. روش جدید نیاز به بکارگیری از ذخیره‌سازهای انرژی نظیر باتری‌ها و سوپرخازن‌ها در کنار منابع دارای تاخیر زمانی در تولید توان را که در روش های پیشین متداول است، مرتفع می سازد و بهره‌وری از منابع و ظرفیت موجود در ریزشبکه را ارتقا می بخشد. با استفاده از مکانیزم معرفی شده، تغییر بار در ریزشبکه به طور خودکار تشخیص داده شده وکنترل کننده در طول زمان گذرای منبع تا رسیدن به حد توان مطلوب وارد عمل می شود. همچنین کنترل-کننده های ولتاژ و جریان استفاده شده در کنار کنترل‌کننده توان، موجب پاسخ گذاری مطلوب ریزشبکه در شرایط تغییر آنی در بارسیستم می شوند. به منظور ارزیابی الگوی پیشنهادی، ریزشبکه نمونه شبیه سازی و مورد آزمایش قرار می گیرد. نتایج شبیه-سازی به خوبی نشان دهنده بهبود تخصیص توان و حفظ پایداری فرکانسی در ریزشبکه است. در نهایت با انجام مقایسه فنی و اقتصادی، برتری روش پیشنهادی نسبت به روش متداول پیشین کنترل توان در ریزشبکه نشان داده خواهد شد.

واژه های کلیدی: تولید پراکنده، تخصیص توان، ریزشبکه جزیره ای، کنترل کننده ولتاژ و جریان.

تاریخ ارسال مقاله :۱۳۹۴/۰۸/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۰۵/۰۵

نام نویسنده‌ی مسئول : مسعود علی اکبر گلکار

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]

۱- مقدمه

رشد روز افزون بکارگیری از منابع تولید پراکنده انرژی، افق های جدیدی را پیش روی سیستم توزیع انرژی الکتریکی قرار داده است. سودآوری بهره برداری از منابع تجدید پذیر برق نظیر بادی و خورشیدی و یا منابع با سوخت غیر فسیلی مانند پیل سوختی و بیوماس توجه به این اشکال تولید انرژی را اجتناب ناپذیر ساخته است [۱-۴]. ایجاد شبکه های توزیع فعال در کنار تمرکززدایی از تولید از دیگر پیامدهای ساختار جدید شبکه های الکتریکی است. مفهوم ریزشبکه الکتریکی نیز در این ساختار جدید شکل گرفته است که بیانگر مجموعه از منابع تولید پراکنده و بارهای الکتریکی با قابلیت عملکرد مجزا از شبکه سراسری است [۵].

ریزشبکه ها بسته به نوع طراحی آن ها می توانند به شبکه سراسری متصل شوند و در ارتقای پارامترهای کیفیت توان و یا فروش انرژی در چهارچوب بازار برق مشارکت داشته باشند [۶, ۷]. در عملکرد جزیره‌ای ریزشبکه، منابع موجود وظیفه تامین انرژی را به عهده دارند. در این حالت عملکرد تولید کننده ها باید به گونه ای کنترل گردد که توان مورد نیاز بار بین منابع توزیع شود؛ به طوری که این تخصیص توان با توجه به ظرفیت منابع صورت گیرد و باعث اضافه بار نگردد. از طرف دیگر پایداری ریزشبکه نیز باید حفظ شود [۸].

کنترل دروپ روش مرسوم تخصیص توان در ریزشبکه است. این روش مانند خط مخابراتی از فرکانس و ولتاژ ریزشبکه اطلاعات دریافت می کند و بدون استفاده از بستر های فیزیکی مخابراتی در بین واحد-های تولیدی، توان بار را بین منابع تولید انرژی تقسیم می کند. وظیفه کنترل کننده دروپ عملکرد بصورت گاورنر وسیستم تحریک ژنراتور سنکرون است. در این کنترل کننده با استفاده از مشخصه های دروپ، ولتاژ و فرکانس مرجع برای هر تولید کننده تعیین می شود [۹, ۱۰].

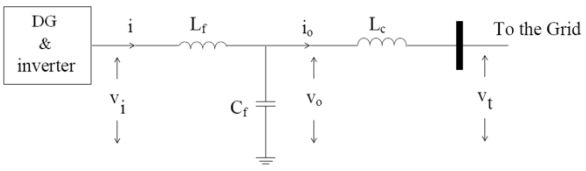
به دلیل ظرفیت محدود تولید در ریزشبکه های جزیره ای و نبود پشتیبانی از شبکه بالادست، منابع باید انعطاف پذیری بالایی در پاسخگویی به تغییرات بار داشته باشند. در غیر این صورت پایداری ریزشبکه بسیار شکننده خواهد بود. در شرایطی که منابع مبتنی بر مبدل های الکترونیک قدرت، قابلیت کنترل پذیری سریع را در اختیار ریزشبکه قرار می دهند، نبود ظرفیت کافی برای تامین تغییرات لحظه-ای توان بار به عنوان یک چالش جدی مطرح است [۱۱, ۱۲].

منابعی مانند پیل سوختی و میکروتوربین به دلیل دارا بودن فعل و انفعالات مکانیکی و سیستم سوخت رسانی دارای تاخیر نسبی در تولید توان هستند. عمدتا از ذخیره سازهای انرژی مانند باتری و سوپرخازن برای بهبود دینامیک این منابع استفاده می شود که به دلیل هزینه‌بر بودن این روش چندان مقرون به صرفه نیست [۱۳, ۱۴]. در حالت دیگر، تولیدکننده های دارای دینامیک بصورت ترکیبی (هیبرید) در کنار منابع سریعتر مانند بادی و خورشیدی استفاده می-شوند که وجود عدم قطعیت در باد و تابش خورشید قابلیت اطمینان چنین سیستم هایی را کاهش می دهد [۱۵, ۱۶].

در این مقاله یک ساختار جدید برای بهبود تخصیص توان بین منابع تولید پراکنده در ریزشبکه جزیره ای ارائه شده است. در این ساختار توان تخصیص یافته به منابع دارای تاخیر زمانی در تولید توان به نحوی است که بدون بهره گیری از ذخیره سازها و تحمیل هزینه اضافه، توازن تولید و مصرف به خوبی برقرار می گردد. روش پیشنهادی به خوبی پایداری فرکانسی ریزشبکه را در انواع حالات تغییر بار حفظ می کند و دارای مکانیزم تشخیص زمان تغییر بار است. در بخش دوم مقاله، کنترل مرسوم دروپ شرح داده می شود. مشخصه دروپ ارائه شده در بخش سوم توضیح داده می شود و در بخش چهارم نتایج اعمال روش جدید روی یک ریزشبکه نمونه بررسی می گردد. در نهایت نتایج بدست آمده از مقاله در بخش پنجم ارائه می گردد.

۲- تخصیص توان بین منابع در ریزشبکه

در این مطالعه ریزشبکه در حالت مجزا از شبکه سراسری در نظر گرفته می شود. بنابراین تولید کننده ها علاوه بر عهده دار بودن تامین کلیه توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز، باید ولتاژ و فرکانس را نیز در محدوده مجاز حفظ کنند. در شکل (۱) یک منبع تولید پراکنده نشان داده شده است که با مبدل الکترونیک قدرت متصل به شبکه است. با صرفنظر از دینامیک ورودی اینورترها، ورودی بصورت منبع dc ایده آل در نظر گرفته می شود. در عمل تغذیه dc مربوط به تولید کننده ها دارای نوسان بوده و نیازمند این است که با مبدل های dc به dc تنظیم شده و به اینورتر متصل شود [۱۷].



شکل (۱): منبع تولید پراکنده متصل به شبکه

فیلتر L_fC_f سه فاز در خروجی اینورتر نصب می شود. وظیفه خازن فیلتر علاوه برایجاد استحکام ولتاژی در گره‌ی متصل شده، فراهم نمودن مسیری با امپدانس کم برای جریانات هارمونیکی ناشی از کلیدزنی اینورتر است. در غیر این صورت جریانات هارمونیکی تولیدی منبع وارد بار شده و برای بارهای حساس ایجاد مشکل می کند [۱۸]. اندوکتانس اتصال دهنده L_c نیز پیوستگی جریان را حفظ می کند. به جهت سادگی در پیاده سازی اهداف کنترلی، کمیت های مربوط به هر اینورتر در مختصات dq0 و بصورت مقادیر ثابت در قاب گردان بیان می شود.

برای منبع تولید پراکنده شکل (۱) توان های اکتیو وراکتیو لحظه‌ای با استفاده از روابط (۱) و (۲) از مقادیر ولتاژ (v_o) و جریان (i_o) خروجی بدست می آیند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]

$$p = v_{od}i_{od} + v_{oq}i_{oq} \quad (۱)$$

$$q = v_{od}i_{oq} - v_{oq}i_{od} \quad (۲)$$

با عبور این مقادیر از یک فیلتر پایین گذر با فرکانس قطع ω_f توان های اکتیو وراکتیو با توجه به فرمول های (۳) و (۴) محاسبه می-شوند که به نوعی مقدار متوسط مقادیر توان های لحظه‌ای هستند.

$$P = \frac{\omega_f}{s+\omega_f}p \quad (۳)$$

$$Q = \frac{\omega_f}{s+\omega_f}q \quad (۴)$$

در کنترل کننده مرسوم دروپ، مقدار سرعت زاویه ای لحظه‌ای مربوط به قاب گردان هر تولید کننده از فرمول (۵) بدست می آید که وابسته به توان اکتیو تولیدی منبع است. در این رابطه ω_{nom} مقدار نامی فرکانس است که در سیستم ۵۰ هرتز برابر ۳۱۴ رادیان بر ثانیه خواهد بود. m ضریب دروپ توان اکتیو است و میزان تاثیر گذاری توان اکتیو روی فرکانس را تعیین می کند.

$$\omega = \omega_{nom} - mP \quad (۵)$$

ولتاژ مرجع لحظه ای از فرمول (۶) بدست می آید که وابسته به مقدار توان راکتیو خروجی تولید کننده است. در این رابطه V_{nom} مقدار نامی ولتاژ مرجع در راستای محور d است. مقدار مرجع ولتاژ تولید کننده در راستای محور q قاب مختصات گردان برابر با صفر در نظر گرفته می شود ($v_{oq}^* = 0$). از این رو مقدار نامی ولتاژ مرجع برابر ماکزیمم مقدار ولتاژ فاز است. n نیز ضریب دروپ توان راکتیو است.

$$v_{od}^* = V_{nom} - nQ \quad (۶)$$

در ریزشبکه جزیره‌ای مقادیر توان اکتیو و راکتیو تولیدی منابع با توجه به تغییرات بار ثابت نیست. بر خلاف شبکه سراسری برق که دارای کنترل کننده یکپارچه مرکزی برای تنظیم تولید منابع است، در ریزشبکه با کنترل کننده دروپ، توان تولیدی بر حسب نیاز تعیین می‌شود. در نتیجه ولتاژ و فرکانس مرجع هر تولید کننده بر اساس فرمول‌های (۵) و (۶) پیوسته در حال تغییر هستند.

ولتاژ هر تولید کننده دارای ماهیتی محلی (local) است. اما فرکانس منابع نمی تواند مانند ولتاژ بسته به محل قرار گیری تولید-کننده در باس های مختلف متفاوت باشد. این نکته در تعیین مقدار توان تولیدی منابع با توجه به توان درخواستی بار، نقش اساسی را ایفا می کند و سبب می گردد که فرکانس خروجی منابع ماهیت جامع (global) پیدا کند. برای درک مناسب تر این مفهوم فرمول (۷) ارائه شده است.

$$\omega_g = \omega_{nom_i} - m_i P_i = \begin{cases} \omega_1 = \omega_{nom_1} - m_1 P_1 \\ \omega_2 = \omega_{nom_2} - m_2 P_2 \\ \vdots \\ \omega_n = \omega_{nom_n} - m_n P_n \end{cases} \quad (۷)$$

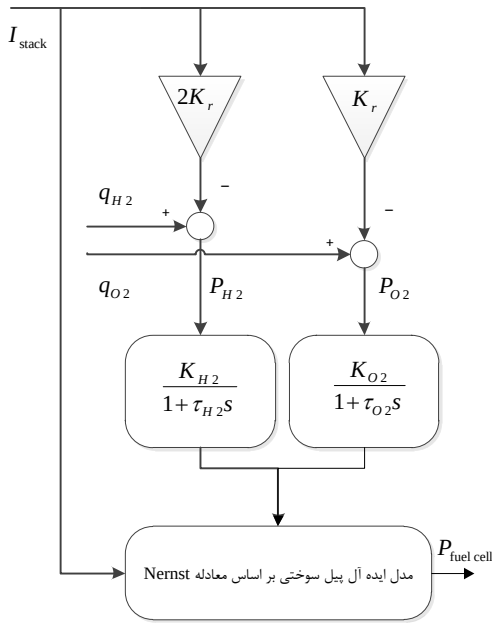
در این رابطه ω_g فرکانس جامع ریزشبکه است. بر اساس فرمول (۷) و پس از تعیین m یا همان ضریب دروپ توان اکتیو برای هر منبع، توان خروجی آن به شکلی خواهد بود که منجر به داشتن فرکانس خروجی برابر با سایر منابع می شود. این همگرایی فرکانسی به سرعت در تنظیم توان خروجی منابع صورت می گیرد.

ضریب دروپ توان اکتیو هر منبع براساس ظرفیت تولید بهینه آن در فرکانس نامی تعیین می گردد. حال با توجه به اینکه برخی از منابع مانند پیل سوختی و میکرو توربین دارای تاخیر زمانی در تولید توان و رسیدن به حد نامی هستند، بر اساس مشخصه دروپ ارائه شده در فرمول (۷) پایداری فرکانسی ریزشبکه در حضور این منابع با مشکل مواجه می گردد. برای حل این مشکل دروپ پیشنهادی در این مقاله ارائه شده است که در بخش سوم شرح داده می شود.

۳- روش پیشنهادی برای تخصیص توان در ریزشبکه

هدف این مقاله ارائه الگوی جدید تخصیص توان در ریزشبکه دارای منابع با تاخیر زمانی در تولید توان است. از این رو پیل سوختی به عنوان منبع دارای دینامیک در این مطالعه مد نظر قرار گرفته است. پیل سوختی از سه بخش سیستم سوخت رسانی، تولید الکتریسیته و مبدل الکترونیک قدرت تشکیل شده است. بخش سوم به دلیل بهره-گیری از سیستم اینورتری دارای عملکرد سریع است و عمده دینامیک پیل سوختی به دلیل دو بخش اول است [۱۹, ۲۰].

مدل دینامیکی پیل سوختی به صورت شکل (۲) بیان می شود [۲۱]. در این ساختار، K_r ثابت مدل سازی، I_{stack} جریان و $P_{fuel\ cell}$ توان خروجی پیل سوختی است. همچنین q_{H2} و q_{O2} میزان ورود، P_{H2} و P_{O2} میزان فشار، K_{H2} و K_{O2} ثابت مولار دریچه و τ_{H2} و τ_{O2} ثابت زمانی عبور هیدروژن و اکسیژن است.



شکل (۲): مدل دینامیکی پیل سوختی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]

مدل ایده آل و استاتیکی پیل سوختی بر اساس معادله Nernst بیان می شود که در این جا از ذکر جزئیات آن پرهیز شده است [۲۱]. با توجه به مدل ارائه شده و دینامیک پیل سوختی در پاسخگویی به تغییرات بار، روش تخصیص توان به شیوه جدیدی در این مقاله ارائه شده است که منجر به بهره وری بیشتر از ظرفیت تولید توان در ریزشبکه شده و نیاز به استفاده از ذخیره ساز انرژی در کنار پیل سوختی را نیز مرتفع می سازد. روش پیشنهادی مبتنی بر تحلیل رفتار این منبع تولید پراکنده انرژی در مواجهه با تغییرات پله ای بار است و کنترل مرسوم دروپ بر مبنای این تحلیل اصلاح و بهبود داده می شود.

دروپ پیشنهادی برای منابع به نحوی است که در مدت زمان رسیدن توان پیل سوختی از حد فعلی به حد مطلوب، تامین انرژی فراهم نشده بارهای الکتریکی به عهده منابع با دینامیک سریع خواهد بود. به عبارت دیگر نیاز به نصب ظرفیت پشتیبان برای جبران دینامیک پیل سوختی نظیر باتری، سوپرخازن و دیگر ذخیره سازها برطرف می شود. این کار با مدیریت تخصیص انرژی بین منابع در ریزشبکه با ظرفیت نصب شده موجود انجام می شود.

دینامیک پیل سوختی به معادله دروپ متناظر آن اعمال می شود که ساختار آن در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل t_{ch} زمان تغییر بار و m_1 ضریب دروپ پیل سوختی قبل از تغییر بار الکتریکی است. در لحظه اول وقوع تغییر بار ضریب دروپ به m_1' افزایش می یابد. تعیین این مقادیر پس از هر تغییر بار بر اساس اصولی است که در ادامه می آید.

تعیین زمان تغییر بار با در نظر گرفتن روند تغییر جریان منابع امکانپذیر است. در این میان منابع با پاسخگویی سریعتر به تغییرات بار گزینه مناسب تری برای مانیتور کردن جریان خروجی هستند. برای تشخیص تغییر بار که در محدوده پاسخ دهی دینامیکی پیل سوختی تغییری عمده به حساب می آید، دو شرط ذکر شده در فرمول (۸) و (۹) باید برآورده گردد.

$$|i_{rms}^{DG}(t) - I_{rms}^{DG}(t)| > limit \quad (۸)$$

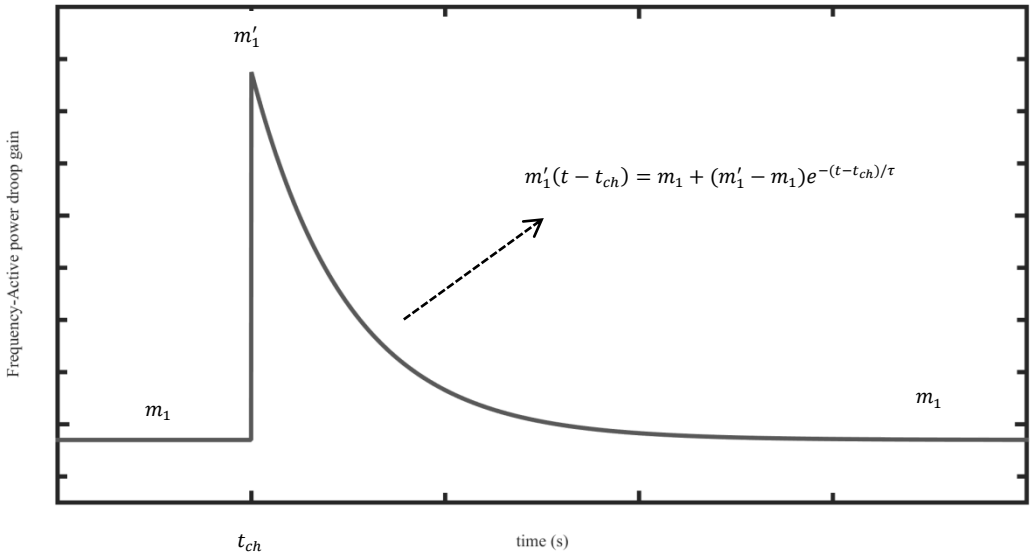
$$|i_{rms}^{DG}(t-\Delta t) - I_{rms}^{DG}(t-\Delta t)| \le limit \quad (۹)$$

در نامعادلات (۸) و (۹)، i_{rms}^{DG} جریان موثر منبع تولید پراکنده انرژی مورد نظر و I_{rms}^{DG} مقدار متوسط آن طی چند ثانیه قبل است که بر اساس اصل ذوزنقه از رابطه (۱۰) بدست می آید [۲۳]. تئوری این اصل بر پایه عبور مقدار لحظه ای جریان از سیستم پسفاز مرتبه اول با ثابت زمانی T_1 است. $limit$ حد تعیین شده برای تغییرات جریان است که درصدی از جریان متوسط خواهد بود. در زمان عبور از حد معین، کنترل کننده پیشنهادی وارد عمل می شود.

$$I_{rms}^{DG}(t) = \frac{T_1.I_{rms}^{DG}(t-\Delta t)+\Delta t.i_{rms}^{DG}(t)}{T_1+\Delta t} \quad (۱۰)$$

مقایسه دو جریان موثر و متوسط آن در بازه زمانی مناسب در شرط اول نشان دهنده تغییرات توان مورد نیاز بار است. شرط دوم جدید بودن این تغییر را نشان می دهد که با بررسی جریان در بازه زمانی گذشته (Δt) انجام می شود. برآورده شدن همزمان این دو شرط منجر به اعمال کنترل کننده جدید در لحظه آغازین تغییر بار می شود. بدین ترتیب از اعمال مکرر کنترل کننده در شرایط گذرای پیل سوختی تا رسیدن به حالت پایدار پرهیز می شود.

به منظور حفظ پایداری فرکانسی ریزشبکه m_1' باید به گونه ای انتخاب شود که پس از تغییر بار توان تخصیص یافته به پیل سوختی برابر توان آن در لحظه ی قبل از تغییر بار باشد. بدین منظور معادلات (۱۱) و (۱۲) باید برقرار باشد که در آن P'_{demand} کل توان درخواستی بار و P_i' توان واحد تولید پراکنده i ام در شرایط جدید است. بدین ترتیب ضریب دروپ شناور پیل سوختی به صورت متغیر با زمان بوده و با معادله (۱۳) قابل بیان است.



شکل (۳): مشخصه دروپ پیشنهادی برای منبع دارای تاخیر زمانی در تولید توان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]

$$\sum_{i=1}^{n} P_i' = P'_{demand} \quad (۱۱)$$

$$m_1' P_1' = m_2 P_2' = m_3 P_3' = \cdots = m_n P_n' \quad (۱۲)$$

$$m_1'(t - t_{ch}) = m_1 + (m_1' - m_1) e^{-(t-t_{ch})/\tau} \quad (۱۳)$$

ضریب دروپ معرفی شده در فرمول (۱۳) مختص منبع دارای دینامیک است و سایر منابع با ضریب ثابت از پیش تعیین شده عمل می کنند. همچنین ثابت زمانی τ با توجه به مدت زمان رسیدن توان پیل سوختی از مقدار صفر تا مقدار ماکزیمم تعیین می‌شود.

با توجه به وجود چندین منبع با پاسخ سریع در ریزشبکه، فراهم نمودن توان تامین نشده در شرایط گذرا به این منابع (با نسبت ضریب دروپ آن ها) واگذرا می شود. به منظور حفظ پایداری گذرای سیستم از کنترل کننده های پیوسته ولتاژ و جریان در کنار کنترل دروپ پیشنهادی استفاده می‌شود.

کنترل کننده پیوسته ولتاژ و جریان در ادامه کنترل کننده توان قرار دارند و در شکل (۴) ساختار مربوط به آن نشان داده شده است. خروجی کنترل کننده توان، یعنی ولتاژ (v_{od}^*) و فرکانس (ω) مرجع به عنوان ورودی به کنترل کننده ولتاژ داده شده می شود. همچنین مقادیر ولتاژ و جریان خروجی اینورتر و منبع تولید پراکنده نیز به عنوان ورودی اعمال می شوند. خروجی کنترل کننده ولتاژ نیز به عنوان ورودی به کنترل کننده جریان داده می شود. این کنترل‌کننده-ها مجزا کننده کوپل دینامیکی مولفه های d و q در متغیرهای ولتاژی و جریانی هستند و از کنترل کننده تناسبی- انتگرالی (PI) بهره می-برند.

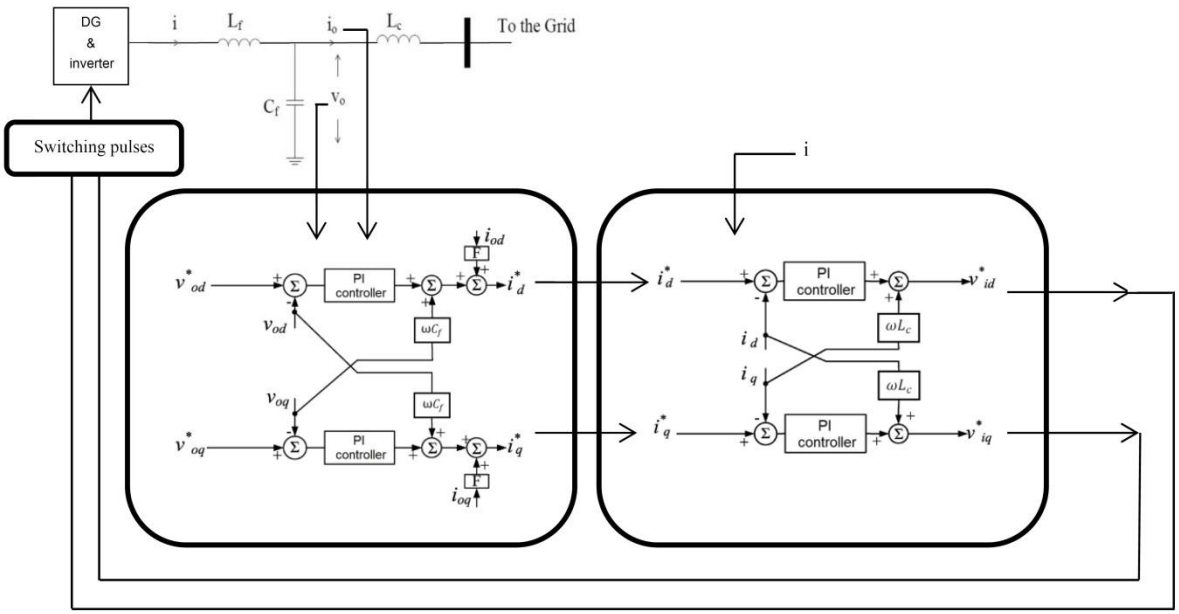
بخش پیش خور (feed forward) در کنترل کننده ولتاژ و جریان برای بهبود عملکرد گذرا مورد استفاده قرار می گیرد. این کنترل کننده می تواند پاسخ گذاری مطلوبی را در شرایط تغییر آنی در بارسیستم ایجاد کند.

به دلیل دارا بودن بخش انتگرال گیر، کنترل کننده PI تضمین کننده خطای حالت ماندگار صفر است. نکته قابل توجه این است که این امر در حالت فرکانس صفر در قاب مرجع سنکرون برای مقادیر مرجع و متغیرهای سیستم که متناظر با فرکانس اصلی در مختصات سه فاز متعادل است صدق می کند. از این رو برای بارهای خطی متعادل تنظیم ولتاژ حالت ماندگار مطلوب خواهد بود.

در سیستم کنترلی معرفی شده نیازی به دانستن مدل دقیق بار نیست؛ زیرا با بهره گیری از کنترل کننده پیش خور در کنترل کننده ولتاژ و جریان، می توان تغییرات دینامیکی بار را از مبدل منبع ولتاژ مجزا نمود. وظیفه دیگر کنترل کننده پیش خور جدا کردن وابستگی بین متغیرهای کنترلی محور d و q است. به ترتیب که در حلقه کنترل ولتاژ، جریان خروجی محور d توسط ولتاژ مرجع ورودی محورd کنترل می شود و از ولتاژ محور q تاثیر نمی پذیرد . همین استدلال را برای متغیرهای کنترلی متناظر در کنترل کننده جریان نیز می توان بیان کرد.

۴- پیاده سازی و تحلیل نتایج

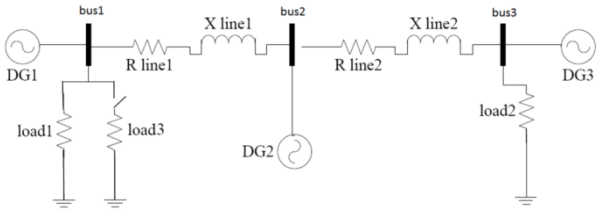
برای نشان دادن عملکرد کنترل کننده پیشنهادی جهت تخصیص توان، یک ریزشبکه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است که ساختار آن در شکل (۵) نشان داده شده است. همچنین پارامترهای مربوط به اجزای ریزشبکه در جدول (۱) ارائه شده است. در ریزشبکه نمونه، فرض شده است که ظرفیت همه منابع یکسان است و از این رو ضرایب دروپ حالت ماندگار آن ها مشابه است.



شکل (۴): کنترل کننده های پیوسته ولتاژ و جریان

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]



شکل (۵): ساختار ریزشبکه نمونه مورد آزمایش

جدول (۱): پارامترهای اجزای ریزشبکه نمونه مورد آزمایش

L_f	1.35 mH	C_f	50 µF
L_c	0.35 mH	ω_f	31.41 rad/s
n	1.3×10^{-3}	m	9.4×10^{-5}
x_{line1}	0.1 Ω	r_{line1}	0.23 Ω
x_{line2}	0.58 Ω	r_{line2}	0.35 Ω

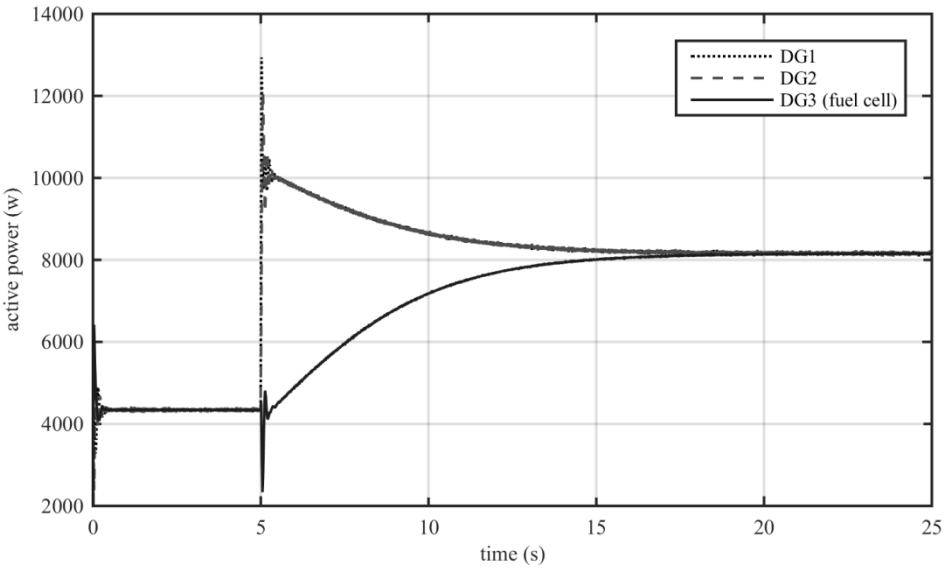
دو بار load1 و load2 بارهای الکتریکی ثابت ریزشبکه اند که از ابتدا متصل به شبکه هستند. بار load3 در یک زمان نامعین وارد مدار می شود. ژنراتورهای DG1 و DG2 منابع با پاسخ دهی سریع به تغییرات بار هستند که توانایی پوشش دادن شرایط گذرای سیستم را دارند. منبع DG3 پیل سوختی و دارای تاخیر زمانی در رسیدن به توان مطلوب تولیدی است.

ریزشبکه معرفی شده در دو حالت بررسی شده است؛ یکبار با کنترل کننده مرسوم دروپ و بار دیگر در شرایط استفاده از مشخصه شناور دروپ معرفی شده در این مقاله. مبدا زمان از یک حالت پایدار ریزشبکه انتخاب شده است. شکل (۶) توان تولیدی سه منبع تولید انرژی در ریزشبکه با کنترل کننده پیشنهادی در شرایط وقوع تغییر آنی در بار مصرفی را نشان می دهد. توان خروجی منابع نشان دهنده عملکرد مطلوب الگوی جدید معرفی شده در تخصیص توان است. همچنین به منظور مقایسه فنی ساختار جدید با کنترل دروپ که روش مرسوم تخصیص توان در مقالات و مطالعات پیشین است، فرکانس منابع تولید پراکنده ریزشبکه در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷) و بر اساس معادله (۷)، پایداری فرکانسی شبکه پس از وقوع تغییر بار مختل می‌شود. علت این امر ناتوانی منبع دارای دینامیک در تامین انرژی مصرفی مورد نیاز است. فرکانس سایر منابع نیز بعلت عدم توازن تولید و مصرف دچار ناپایداری می شود.

در شرایط گذرا بر اساس ضریب دروپ حالت ماندگار یکسان فرض شده برای منابع، توان مورد نیاز بار به طور مساوی بین منابع تقسیم می شود. از آن‌جا که پیل سوختی توانایی تامین توان تخصیص یافته توسط کنترل کننده را ندارد، همگرایی فرکانسی ایجاد نمی شود و سیستم از نقطه پایدار دور می گردد.

با استفاده از کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله، پس از وقوع تغییر بار درسیستم، توان پیل سوختی رفته رفته افزایش می یابد. به این ترتیب که بلافاصله پس از تغییر بار، عدم توازن تولید و مصرف با روش ارائه شده در مقاله تشخیص داده می شود. توان اختصاص یافته به پیل سوختی در لحظه اول پس از تغییر بار برابر مقدار آن قبل از تغییر بار تنظیم می شود. این اختصاص توان، کم کم افزایش می یابد که این افزایش متناسب با ثابت زمانی منبع در تولید توان است. در نهایت تولید منبع به مقدار مطلوب می‌رسد. شکل (۸) فرکانس منابع تولید پراکنده ریزشبکه را با استفاده از الگوی جدید تخصیص توان نشان می دهد.

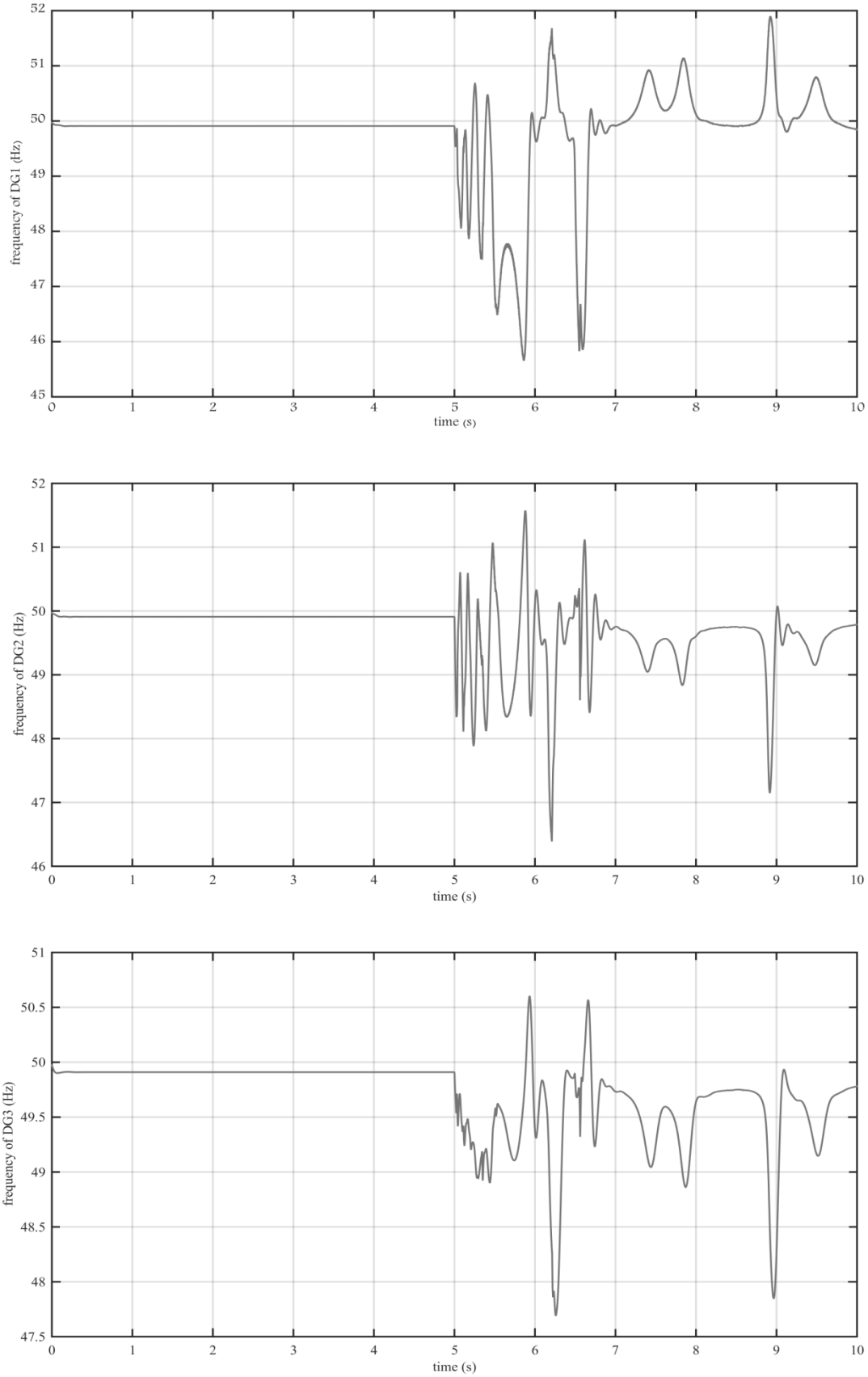
مزیت روش پیشنهادی در آن است که پیل سوختی با جهش توان تخصیصی مواجه نمی شود و پایداری فرکانسی ریزشبکه حفظ می‌شود. الگوریتم پیشنهادی برای پله های کاهشی در توان بار هم عملکرد مطلوبی دارد. از سوی دیگر با جبران کمبود توان مورد نیاز بار در لحظات گذرای توان پیل سوختی توسط سایر منابع، نیاز به نصب ظرفیت اضافه که تنها در زمان محدود فعال است از بین می رود.



شکل (۶): توان تولیدی سه منبع تولید انرژی در ریزشبکه با کنترل کننده پیشنهادی در شرایط تغییر آنی بار

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

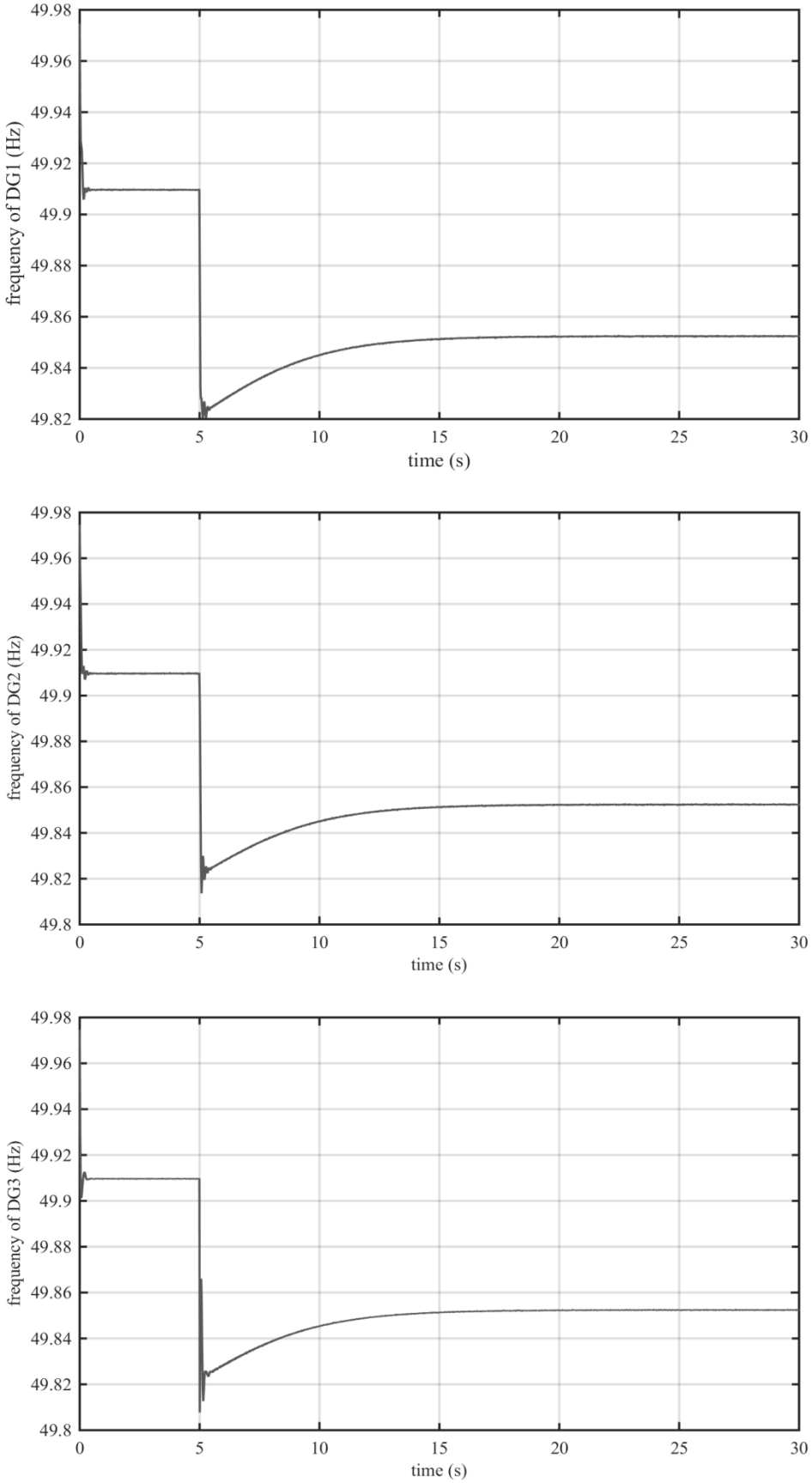
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]



شکل (۷): ناپایداری فرکانسی سه منبع تولید پراکنده ریزشبکه با کنترل کننده مرسوم تخصیص توان در شرایط تغییر آنی بار و با حضور منبع دارای دینامیک درتولید انرژی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]



شکل (۸): فرکانس منابع تولید پراکنده در ریزشبکه با کنترل کننده پیشنهادی تخصیص توان در شرایط تغییر آنی بار و با حضور منبع دارای دینامیک در تولید انرژی

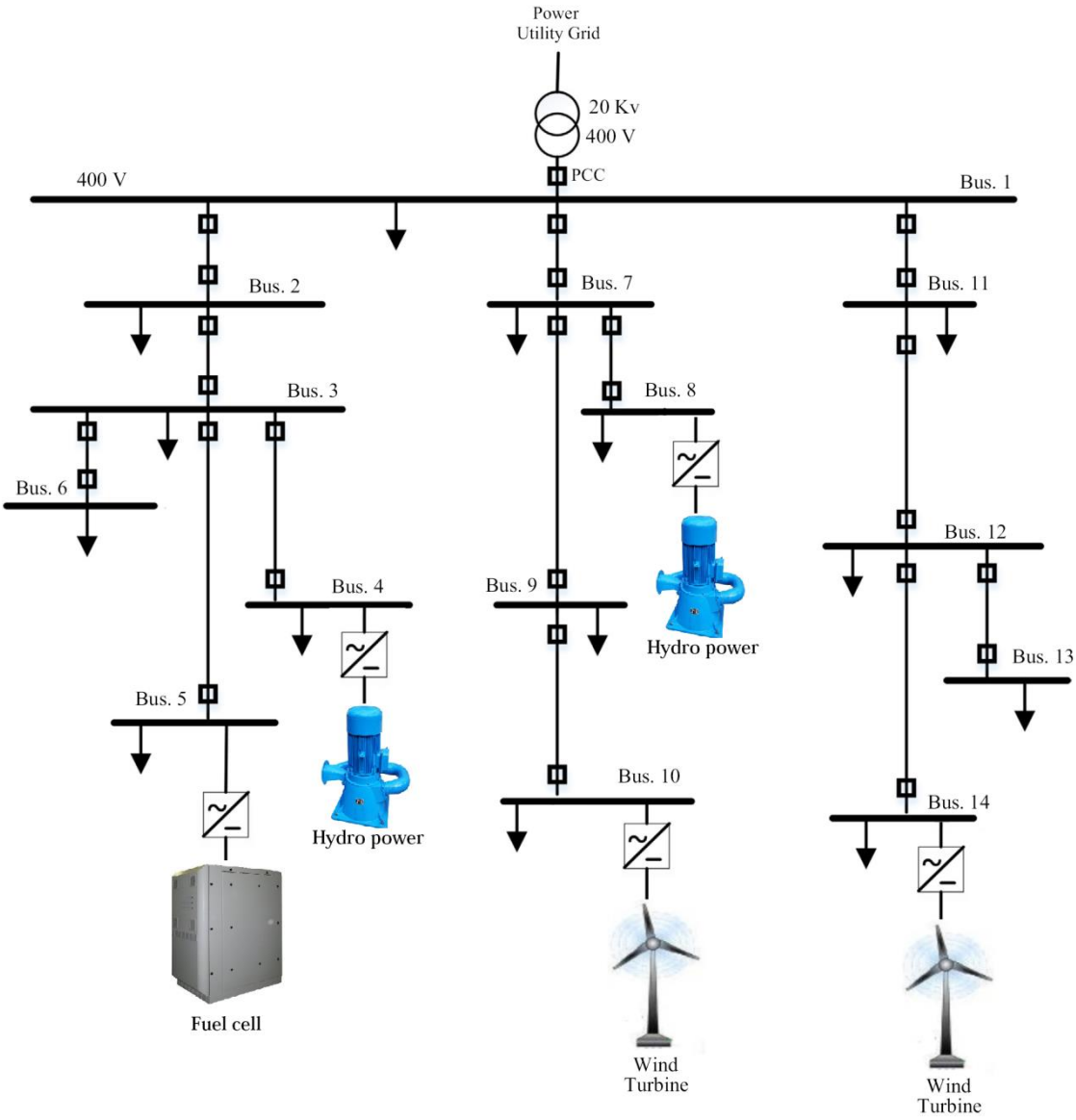
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]

برای اطمینان از کارایی روش تخصیص توان پیشنهادی در این مقاله در ریزشبکه های بزرگتر و همچنین ارزیابی سودمندی اقتصادی آن در مقایسه با ساختار متداول وپیشین تخصیص توان، الگوی معرفی شده بر روی یک ریزشبکه ۱۴ باسه که در شکل (۹) نشان داده شده است پیاده‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفته است. این شبکه دارای ۵ منبع تولید پراکنده ۳۰ کیلووات است که شامل دو واحد برق‌آبی (hydro)، دو واحد از نوع توربین بادی و یک پیل سوختی می شود. شبکه مورد بررسی در نقطه اتصال (PCC) توسط کلید مجزا کننده از شبکه بالادست جدا شده و بصورت جزیره‌ای عمل می کند.

بار الکتریکی شبکه برای یک روز معین بر حسب ساعت در شکل (۱۰) نشان داده شده است. بار پایه که بصورت حداقل بار شبکه در طول ۲۴ است به میزان ۸۵ کیلووات است. در ساعات اوج مصرف پیک بار تا ۱۳۵ کیلووات افزایش می یابد. با توجه به ظرفیت ۱۵۰ کیلووات نصب شده، ۱۵ کیلووات میزان ظرفیت رزرو خواهد بود. به دلیل اینکه کارکرد بهینه توربین بادی در نقطه استحصال توان ماکزیمم (MPPT) است، تامین بار پایه بر عهده دو واحد بادی و یک واحد برق‌آبی با توان تولیدی ثابت گذاشته شده است. پیل سوختی و واحد برق‌آبی دیگر تغییرات بار ریزشبکه از بار پایه تا بار پیک را دنبال می کنند.

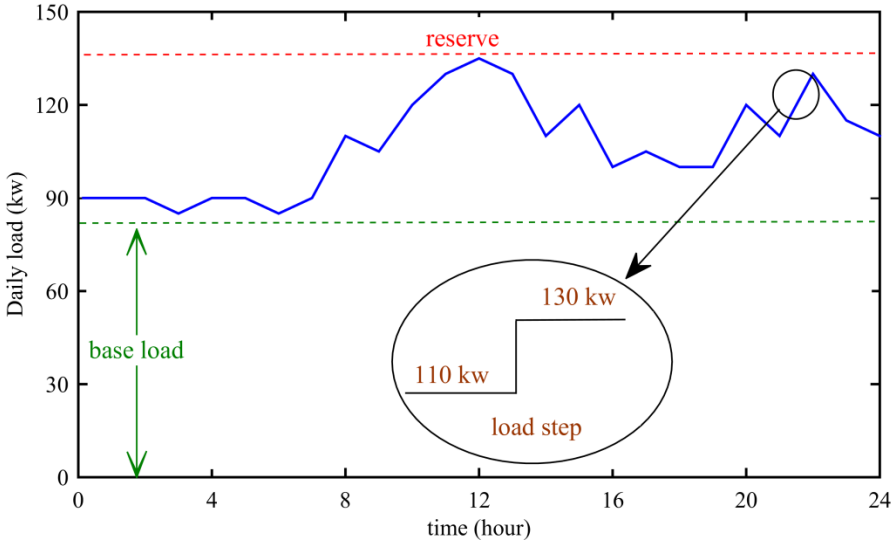
به منظور ارزیابی روش ارائه شده در دنبال کردن بار، نحوه تخصیص توان در یک پله بار ۲۰ کیلووات بررسی شده است. همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود این افزایش بار در ساعت ۲۲ رخ داده است. توان تخصیص یافته بین منابع در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



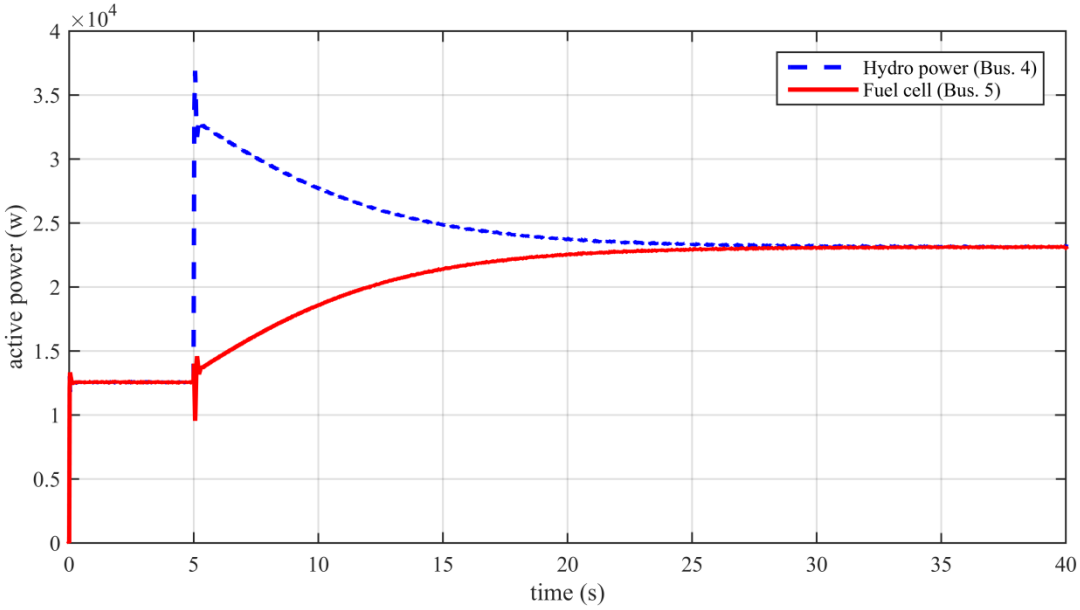
شکل (۹): ریزشبکه ۱۴ باسه مورد مطالعه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]



شکل (۱۰): مجموع بار الکتریکی روزانه برای شبکه نشان داده شده در شکل (۹)



شکل (۱۱): تخصیص توان بین منابع برای تغییر بار ۲۰ کیلووات در ریزشبکه

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود، دو منبع تولید پراکنده برق‌آبی در باس ۴ و پیل سوختی در باس ۵ که تغییرات بار را دنبال می‌کنند، هر یک ۱۰ کیلووات از تامین بار را بر عهده دارند. با توجه به دینامیک کند پیل سوختی و پله قابل توجه تغییر بار، این منبع بعد از زمان تقریبی ۲۰ ثانیه به توان تولیدی مطلوب خواهد رسید. با درنظر گرفتن ضریب دروپ شناور معرفی شده در معادله (۱۳) شاهد پاسخ‌گویی مناسب به تغییر بار توسط منبع برق‌آبی در طول زمان گذرای سیستم هستیم.

در مقالات متعددی استفاده از سیستم ذخیره‌ساز برای جبران نوسانات توان واحدهای تولید پراکنده و حفظ پایداری فرکانسی شبکه مورد توجه قرار گرفته است [۲۴-۲۶]. بر اساس نتایج شبیه سازی‌های ارائه شده، روش ابداعی در این مقاله به لحاظ فنی دارای کارکرد مشابه با روش های پیشین به لحاظ تخصیص مناسب توان بین واحدهای تولید پراکنده و حفظ پایداری فرکانسی ریزشبکه است. در واقع مزیت روش جدید در برابر ساختارهای پیشین حذف ذخیره ساز است. در ادامه سودآوری اقتصادی ناشی از عدم استفاده از سیستم ذخیره‌ساز برای شبکه مورد مطالعه نشان داده شده است.

هزینه‌های استفاده از باتری شامل هزینه نصب و بهره‌برداری است. از آنجا که باتری‌ها دارای عمر محدود و نیازمند تعویض دوره‌ای هستند، در یک بازه زمانی هزینه های فوق بطور متناوب تکرار می‌شود. از سوی دیگر فروش باتری‌های اسقاطی جهت بازیافت نیز در محاسبات

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]

لحاظ شده است. بر این اساس می توان با فرض یک بازه زمانی ۱۰ ساله و با فرض عمر ۲ سال برای هر باتری، هزینه استفاده از سیستم ذخیره ساز را بر اساس روابط زیر بیان کرد.

$$(\$) = (C * I * N) / \eta \quad \text{هزینه نصب} \qquad (۱۴)$$

$$(\$) = (O * I * T) / \eta \quad \text{هزینه بهره‌برداری} \qquad (۱۵)$$

$$(\$) = (S * I * N) / \eta \quad \text{درآمد فروش جهت بازیافت} \qquad (۱۶)$$

در این روابط I ظرفیت نصب شده بر حسب کیلووات، C هزینه نصب هر کیلووات از باتری برابر ۳۰۰ دلار بر کیلووات، N تعداد باتری‌های تعویض شده، O هزینه بهره‌برداری هر کیلووات باتری برابر ۳۰ دلار بر کیلووات، S درآمد حاصل از فروش هر کیلووات باتری اسقاطی برابر ۳ دلار بر کیلووات، T دوره زمانی مورد مطالعه و η بازده هر باتری است [۲۴]. با در نظر گرفتن بازه زمانی ۱۰ ساله مورد مطالعه و عمر متوسط ۲ سال برای هر باتری، تعداد باتری های تعویض شده ۵ عدد خواهد بود. باتری ها از نوع سربی- اسیدی با بازده ۸۰ درصد در نظر گرفته می شود. همچنین ظرفیت حداقلی ذخیره ساز با توجه به بیشترین تغییر پله‌ای رخ داده در بار الکتریکی مصرفی و برابر ۲۰ کیلووات است.

روش پیشنهادی تنها هزینه دارا بودن ظرفیت رزرو ۱۵ کیوواتی را متحمل می شود که این میزان برای منبع برق‌آبی برابر ۱۴۰۰۰ دلار است. از آنجا که این منبع دارای عمر متوسط بالای ۲۰ سال است، هزینه بهره برداری و بازیافت در مورد آن لحاظ نمی شود. مجموع محاسبات هزینه‌ای جهت بهبود دینامیک پاسخگویی به تغییرات بار در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): مقایسه سودمندی اقتصادی روش پیشنهادی با ساختار مرسوم تخصیص توان (کنترل دروپ و استفاده از باتری)

روش پیشنهادی	استفاده از باتری	هزینه جهت جبران دینامیک منابع
۱۴۰۰۰	۳۷۵۰۰	هزینه نصب ($)
-	۷۵۰۰	هزینه بهره برداری ($)
-	-۳۷۵	بازیافت ($)
۱۴۰۰۰	**۴۴۶۲۵**	**مجموع**

با در نظر گرفتن روابط (۱۴) تا (۱۶)، هزینه استفاده از ذخیره‌ساز برای ریزشبکه مورد مطالعه برابر ۴۴۶۲۵ دلار خواهد بود. با اعمال الگوی جدید تخصیص توان ارائه شده در این مقاله، مقدار قابل توجهی از این هزینه کاسته شده و در عین حال به لحاظ فنی کیفیت توان در ریزشبکه در حد مطلوب حفظ خواهد شد.

۵- نتیجه گیری

با توجه به وجود منابع دارای تاخیر در تولید توان، ساختار جدیدی برای تخصیص توان بین تولید کننده ها در ریزشبکه ارائه شده است. در روش‌های مرسوم از ذخیره سازهای انرژی در کنار منابع دارای دینامیک مانند پیل سوختی استفاده می کنند؛ اما در روش پیشنهادی با اصلاح ساختار تخصیص توان، از ظرفیت نصب شده برای جبران تاخیر زمانی منابع در پاسخگویی به تغییرات بار بهره گرفته شده است. به این ترتیب بهره‌وری از ظرفیت موجود در ریزشبکه ارتقا یافته و به دلیل عدم استفاده از ذخیره ساز در هزینه صرفه جویی شده است. با اعمال روش تشخیص خودکار تغییر بار در ریزشبکه، کنترل کننده پیشنهادی در شرایط گذرا وارد عمل می‌شود و دینامیک تخصیص توان را بهبود می دهد. همچنین ضریب دروپ شناور اعمال شده به منابع با پاسخدهی کند به نحوی است که پس از تغییر بار دچار جهش در توان تخصیصی نمی شوند. برای حفظ پایداری گذرای سیستم از کنترل-کننده های پیوسته ولتاژ و جریان در کنار کنترل کننده توان استفاده شده است. با اعمال روش جدید روی دو ریز شبکه آزمایشی، کارایی آن در تخصیص مناسب توان و حفظ پایداری فرکانسی نشان داده شده است. از سوی دیگر محاسبات اقتصادی نشان دهنده کاهش قابل توجه هزینه انجام شده جهت بهبود دینامیک پاسخگویی به تغییرات بار در ساختار پیشنهادی در مقایسه با ساختار پیشین است.

مراجع

[1] M. Glinkowski, J. Hou, and G. Rackliffe, *"Advances in Wind Energy Technologies in the Context of Smart Grid,"* Proceedings of the IEEE, vol. 99, pp. 1083-1097, 2011.

[2] M. Thomson and D. G. Infield, *"Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems,"* Renewable Power Generation, IET, vol. 1, pp. 33-40, 2007.

[3] J. I. San Martín, I. Zamora, J. J. San Martín, V. Aperribay, and P. Eguia, *"Hybrid fuel cells technologies for electrical microgrids,"* Electric Power Systems Research, vol. 80, pp. 993-1005, 2010.

[4] T. Srinivas and B. V. Reddy, *"Hybrid solar–biomass power plant without energy storage,"* Case Studies in Thermal Engineering, vol. 2, pp. 75-81, 2014.

[5] R. H. Lasseter, *"MicroGrids,"* in Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, 2002, pp. 305-308 vol.1.

[6] M. Niu, W. Huang, J. Guo, and L. Su, *"Research on economic operation of grid-connected microgrid,"* Power System Technology, vol. 34, pp. 38-42, 2010.

[7] S. Mizani and A. Yazdani, *"Optimal design and operation of a grid-connected microgrid,"* in Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE, 2009, pp. 1-6.

[8] F. Katiraei, M. Iravani, and P. W. Lehn, *"Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process,"* Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 248-257, 2005.

[9] E. Barklund, N. Pogaku, M. Prodanović, C. Hernandez-Aramburo, and T. C. Green, *"Energy management in autonomous microgrid using stability-constrained droop control of inverters,"* Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 2346-2352, 2008.

[10] C. Li, E. A. Coelho, M. S. Firoozabadi, J. C. V. Quintero, and J. M. Guerrero, *"Active Power Regulation based on Droop for AC Microgrid,"* in IEEE 10th International

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]

Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives.

[11] R. R. Kolluri, I. Mareels, T. Alpcan, M. Brazil, J. de Hoog, and D. Thomas, *"Power sharing correction in angle droop controlled inverter interfaced microgrids,"* in Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE, 2015, pp. 1-5.

[12] R. Majumder, *"Some aspects of stability in microgrids,"* Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 3243-3252, 2013.

[13] M. Uzunoglu and M. Alam, *"Dynamic modeling, design, and simulation of a combined PEM fuel cell and ultracapacitor system for stand-alone residential applications,"* Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 21, pp. 767-775, 2006.

[14] A. A. Moghaddam, A. Seifi, T. Niknam, and M. R. A. Pahlavani, *"Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source,"* Energy, vol. 36, pp. 6490-6507, 2011.

[15] M. He, S. Murugesan, and J. Zhang, *"Multiple timescale dispatch and scheduling for stochastic reliability in smart grids with wind generation integration,"* in INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE, 2011, pp. 461-465.

[16] J. Park, W. Liang, J. Choi, A. El-Keib, M. Shahidehpour, and R. Billinton, *"A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator,"* in Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES'09. IEEE, 2009, pp. 1-6.

[17] N. Hur, J. Jung, and K. Nam, *"A fast dynamic DC-link power-balancing scheme for a PWM converter-inverter system,"* Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 48, pp. 794-803, 2001.

[18] J. Kim, J. Choi, and H. Hong, *"Output LC filter design of voltage source inverter considering the performance of controller,"* in Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on, 2000, pp. 1659-1664.

[19] J. Padullés, G. W. Ault, and J. R. McDonald, *"An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation,"* Journal of Power Sources, vol. 86, pp. 495-500, 2000.

[20] R. M. Kamel and B. Kermanshahi, *"Design and implementation of models for analyzing the dynamic performance of distributed generators in the micro grid part I: micro turbine and solid oxide fuel cell,"* Scientia Iranica Transaction D: Computer Science and Engineering, vol. 17, pp. 47-58, 2010.

[21] K. Mammar and A. Chaker, *"Fuzzy logic-based control of power of PEM fuel cell system for residential application."* Leonardo J. Sci, vol. 14, pp. 147-166, 2009.

[22] S. W. Cha, W. Colella, and B. P. Fritz, *"Fuel cell fundamentals."* New York: John Wiley & Sons, 2006.

[23] K. E. Brenan, S. L. Campbell, and L. Petzold, *"Numerical solution of Initial-Value Problems in Differential-Algebraic equations."* Philadelphia, PA: SIAM, 1995.

[24] A. O. Walid, M. Kazerani, and M. M. A. Salama. "Investigation of methods for reduction of power fluctuations generated from large grid-connected photovoltaic systems." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 26.1 (2011): 318-327.

[25] P. Hasanpor Divshali, A. Alimardani, S. H. Hosseinian and M. Abedi, "Decentralized Cooperative Control Strategy of Microsources for Stabilizing Autonomous VSC-Based Microgrids," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 4, pp. 1949-1959, 2012.

[26] M. R. Aghamohammadi, and H. Abdolahinia. "A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded microgrid." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 54 (2014): 325-333.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-24]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.11.1]