

Using the Voltage Stability Index, P-index to Improve the Voltage Stability in Reactive Power Sharing Among DG Sources in the Islanded Microgrid

Zahra Amini Khoei, Abbas Kargar *, Sayed Yaser Derakhshandeh

¹PhD student, Department of Electrical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, ² Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, ³ Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

E-mails: zahra.amini@stu.sku.ac.ir, kargar@eng.sku.ac.ir*, y_derakhshandeh@eng.sku.ac.ir

* means corresponding author

Abstract

Microgrids in island mode are controlled by active and reactive power control methods of distributed production sources. This paper presents a scheme for sharing reactive power among distributed generation sources in a multi-bus radial microgrid. A common method for sharing and controlling reactive power among distributed generation sources is the common drop method. Since the use of the drop method is due to the different voltage drops that it creates on the impedance of the lines of distributed production units. This causes reactive power to be distributed correctly through this method. As a solution to this problem, this study uses two methods, constant Q and virtual impedance, to share reactive power among distributed generation sources in order to eliminate voltage drop while sharing reactive power. The effect of distributed generation units on voltage regulation can be positive or negative, and this depends on the distribution system, the characteristics of distributed generation units, and their installation location. In this study, it has been tried to share power among distributed generation sources in such a way as to improve the stability of the network voltage, for this purpose, the stability index P-index has been used. Also, the effect of load changes on reactive power distribution among distributed generation sources, voltage profile index and calculation of system losses are also presented. In this article, an island microgrid with 38 IEEE standard buses is used.

Keywords

Reactive power sharing, distributed generation sources, virtual impedance method, voltage profile, losses, stability index P-index

1- Short Paper

Distributed generation (DG) resources have become a potential solution for combining renewable energy sources and energy storage systems. Subsequently, the microgrid concept emerged as a promising approach to effective parallel DG coordination. Compared to traditional transmission systems, the microgrid can be used independently in island operation to regulate voltage and frequency at the point of common connection (PCC). Despite their widespread use, they also have shortcomings such as circulating current and incorrect reactive power sharing, which need to be addressed. An accurate line impedance is required in order to solve possible problems.

2- Proposed Work and Methodology (including comprision, simulation/experimental results and discusion)

Sharing reactive power between distributed generation sources to improve voltage stability. A virtual impedance method and two fixed Qref methods have been used to achieve this goal. Also, it has been attempted to illustrate the improvement of voltage stability along with the sharing of reactive power among sources using the voltage stability index (P-index).

3- Conclusion

In this article, the sharing of reactive power among DG sources using fixed Q and virtual impedance is presented. Also, the voltage stability index is calculated and it is shown that voltage stability is also improved by sharing reactive power among distributed generation sources. And the results of power sharing in both approaches were compared with each other. It was shown that the virtual impedance method Shared the reactive power well among sources according to capacity. Considering the resistance effect in the virtual impedance method, bus voltages with control DG sources and active and reactive power are well sharied among distributed generation sources.

استفاده از شاخص پایداری ولتاژ P-index برای بهبود پایداری ولتاژ در تقسیم توان راکتیو بین منابع DG در ریزشبه جزیره‌ای

زهرا امینی‌خویی

دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

عباس کارگر

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

سید یاسر درخشنده

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

ساختار کنترلی ریزشبه‌ها در حالت جزیره‌ای، مبتنی بر روش‌های کنترل توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده می‌باشد. این مقاله طرحی برای تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده در چند باس ریزشبه شعاعی ارائه می‌دهد. روش رایج برای تقسیم و کنترل توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده، استفاده از روش اُفتی معمولی است. از آنجایی که استفاده از روش اُفتی به دلیل افت ولتاژ متفاوتی که روی امپدانس خطوط واحدهای تولید پراکنده ایجاد می‌کند، باعث می‌شود تقسیم توان راکتیو با این روش به صورت صحیحی بین منابع انجام نشود. برای حل این مشکل در این مقاله از دو روش Q ثابت و روش امپدانس مجازی به عنوان یکی از روش‌های تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده استفاده شده تا ضمن تقسیم توان راکتیو بین منابع، افت ولتاژ را نیز از بین ببرد. تأثیر واحدهای تولید پراکنده بر روی تنظیم ولتاژ می‌تواند مثبت و یا منفی باشد و این امر بستگی به سیستم توزیع، مشخصات واحدهای تولید پراکنده و نیز مکان نصب آن‌ها دارد. در این مطالعه سعی شده است، تقسیم توان بین منابع تولید پراکنده به نحوی انجام شود که پایداری ولتاژ شبکه بهبود یابد به همین منظور از شاخص پایداری P-index استفاده شده است. همچنین تأثیر تغییرات بار بر روی تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده، بررسی شاخص پروفیل ولتاژ و محاسبه تلفات سیستم نیز ارائه شده است. در مقاله حاضر یک ریزشبه جزیره‌ای ۳۸ باس استاندارد IEEE به کار برده شده است.

کلمات کلیدی

تقسیم توان راکتیو، منابع تولید پراکنده، روش امپدانس مجازی، پروفیل ولتاژ، تلفات، شاخص پایداری P-index.

نام نویسنده مسئول: عباس کارگر

ایمیل نویسنده مسئول: kargar@eng.sku.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۹

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴

۱- مقدمه

به شبکه، لازم است در هر زمان نمونه‌برداری به طور بهینه برای تقسیم توان انجام شود که قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری یک ریزشبه را تضمین کند [۵]. چالش برانگیزترین مشکلات مدیریت چندین ریزشبه با تنوع بالای DERها [۶]، استحکام سیستم، کنترل و حفاظت [۷]، عدم قطعیت تامین از DERها به دلیل ماهیت متغیر انرژی تجدیدپذیر [۸] و عدم قطعیت اندازه تقاضا و مکان سیستم ذخیره انرژی است. در [۹] تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو بار بین منابع بر اساس ظرفیت آن‌ها در ریزشبه‌های فشار ضعیف پیشنهاد شده است. در این مطالعه ضریب کنترل اُفتی $Q - V$ به صورت به هنگام اصلاح شده و افت ولتاژ روی امپدانس مجازی هم در نظر گرفته شده است، تا ولتاژ بار بحرانی در مقدار نامی تنظیم شود. همچنین با حلقه کنترل امپدانس مجازی توان‌های اکتیو و راکتیو به طور مجزا از هم کنترل شده و جریان چرخشی بین منابع کاهش یافته است. با به کارگیری حلقه‌های کنترل ولتاژ و جریان توان‌های اکتیو و راکتیو بین منابع تقسیم شده‌اند [۹]. در مقایسه با سیستم‌های انتقال سنتی، ریزشبه

استفاده از منابع تولید پراکنده (DG) به یک راه حل بالقوه برای ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر و سیستم ذخیره انرژی تبدیل شده است. متعاقباً، مفهوم ریزشبه به عنوان یک رویکرد امیدوارکننده برای هماهنگی مؤثر DGهای موازی ظاهر شد [۱]. برای داشتن یک ریزشبه نو، نیاز به هماهنگی سلسله مراتبی با فناوری‌های مختلف برای کنترل و تخمین متغیرها و پارامترهای مختلف در یک محیط واقعی، صرف‌نظر از پیچیدگی انواع و ساختار سیستم است. مدل‌سازی یک ریزشبه و تمایز بین روش‌های کنترل مورد استفاده برای آن اغلب دشوار است [۲]. ریزشبه برای برآوردن نیازهای عملیاتی سیستم و تقسیم ایمن توان با چالش‌های مختلفی مواجه می‌شود [۲]. ریزشبه‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی شبکه برق [۳] را بهبود بخشند و منبع تغذیه دائمی را در کشورهای در حال توسعه فراهم کنند [۴]. ریزشبه در مواجهه با سیستم با چالش‌های متنوعی از جمله تقسیم ایمن توان مواجه می‌شود. در حالت متصل

مبتنی بر VI تطبیقی برای ریزشبه‌های متصل به شبکه و جزیره‌ای در [۳۲] برای ژنراتورهای سنکرون مجازی (VSGs) بر اساس یک کنترل‌کننده ثانویه فازی (FSC) برای دستیابی به افزایش تنظیم ولتاژ و فرکانس و تقسیم توان پیشنهاد شده است. تقسیم توان در یک ریزشبه شعاعی چند شینه جزیره‌ای در [۳۳] مورد بحث قرار گرفته است که گزارش می‌دهد که مقاومت مجازی یا راکتانس به تنهایی برای اطمینان از تقسیم دقیق توان راکتیو کافی است. اکثر پیاده‌سازی‌های ریزشبه امروزی بارها را با منابعی که در مکان‌های مطلوب قرار می‌گیرند ترکیب می‌کنند که امکان جزیره‌بندی را فراهم می‌کنند و سعی می‌کنند از حداکثر انرژی موجود استفاده کنند [۳۴]. در چنین عملیاتی، تولید پایدار و پروفیل ولتاژ برای تامین برق برای مشتریان ضروری است [۳۵]. حضور نسل جدید بارهای الکتریکی و همچنین ادوات اصلاح کننده ضریب قدرت موجود در بارهای الکتریکی، امکان استفاده از مصرف کننده‌های نهایی برای کنترل توان راکتیو و بهبود ولتاژ در شبکه‌های توزیع را فراهم نموده است. در این مقاله، تأثیر حضور منابع تولیدپراکنده ولتاژ ثابت بر کنترل ولتاژ نیز مورد توجه قرار گرفته است [۳۶]. منابع تولید پراکنده با توجه به نوع عملکرد خود در دو مد کنترل توان و ولتاژ کار می‌کنند. جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مدهای کنترل ولتاژ و توان مبدل‌ها تأثیرات مثبتی بر شبکه‌های قدرت دارد [۳۷].

مهم‌ترین نوآوری‌های این مقاله عبارتند از:

- بهبود پایداری ولتاژ و تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده به صورت همزمان در ریزشبه ایزوله. با استفاده از شاخص پایداری ولتاژ (P-index) در ریزشبه سعی شده است تا بهبود پایداری ولتاژ نشان داده شود، برای نشان دادن پایداری ولتاژ از روش تقسیم توان راکتیو بین منابع استفاده شده، که در مقاله حاضر از دو روش Qref ثابت و روش امپدانس مجازی بین منابع تولید پراکنده برای تقسیم توان استفاده شده است.

در بخش ۲ مقاله، روش تقسیم توان راکتیو بین منابع توضیح داده شده است. روش امپدانس مجازی نیز در این قسمت شرح داده شده است. در بخش ۳، سیستم مورد استفاده برای شبیه‌سازی معرفی شده است. بخش ۴ روش‌های مورد استفاده برای تقسیم توان راکتیو را معرفی می‌کند که در این مقاله برای تقسیم توان راکتیو بین منابع استفاده شده است. همچنین در این قسمت کنترل‌کننده‌های روش‌های مورد استفاده نیز معرفی می‌شوند. در نهایت در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

۲- تقسیم توان راکتیو بین منابع DG

الف- تجزیه و تحلیل تقسیم توان راکتیو

از لحاظ تئوری، ضرایب اکتیو به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

به طور متعارف، واحدهای DG می‌توانند کنترل افت فرکانس توان واقعی (P) و کنترل افت توان راکتیو ولتاژ (Q-V) را به صورت روابط زیر به کار گیرند [۱۲].

$$\omega = \omega_0 - m_p P_{DG} \quad (1)$$

$$E = E_0 - n_q Q_{DG} \quad (2)$$

در روابط فوق E_0 مقدار ولتاژ نامی و ω_0 فرکانس زاویه‌ای است. P_{DG} و Q_{DG} به ترتیب مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده هستند. m_p و n_q ضرایب اکتیو هستند، می‌توان این ضرایب را از روابط زیر بدست آورد [۱۲]:

$$m_p = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{P_{max}} \quad (3)$$

$$n_q = \frac{E_{max} - E_{min}}{Q_{max}} \quad (4)$$

می‌تواند به طور مستقل در عملیات جزیره‌ای برای تنظیم ولتاژ و فرکانس در نقطه اتصال مشترک (PCC) استفاده شود [۱۰]. علیرغم استفاده گسترده، نواقصی مانند جریان گردشی و تقسیم توان راکتیو نادرست نیز دارند، که باید برطرف شود [۱۱]. برای برطرف کردن مشکلات احتمالی از روش‌هایی استفاده می‌شود که به امپدانس خط دقیق نیاز دارند. در مراجع [۱۲] و [۱۳] برای حذف وابستگی امپدانس خط، با تنظیم ضریب اکتیو و استفاده از یک روش کنترل اکتیو تطبیقی ارائه شده است. حتی اگر امپدانس خروجی اینورتر به طور مجازی برای دستیابی به تقسیم توان دقیق تنظیم شود، افت ولتاژ بزرگی در بین DGها هنوز در این روش‌ها اجتناب ناپذیر است. در [۱۴] و [۱۵]، خطای تقسیم توان بدون تأثیر بر ولتاژ خروجی DG با ترکیب القایی مجازی و کنترل کننده افت فرکانس کاهش می‌یابد. با این حال، در این روش‌ها تأثیر مقاومت خط تأثیرگذار است، به طوری که عملکرد آن‌ها را نمی‌توان عملکرد آن‌ها را در خط پیچیده تضمین کرد. با این حال، این روش‌ها از تأثیر مقاومت خط غفلت می‌کنند، به طوری که عملکرد آن‌ها را نمی‌توان در امپدانس خط پیچیده تضمین کرد. علاوه بر این، موضوع نوسان توان اکتیو به دلیل مقاومت کنترل نشده در نظر گرفته نشده است [۱۶]. برای بهبود عملکرد تقسیم توان در امپدانس خط پیچیده، مشخصه کنترل افت اصلاح شده در [۱۷]، [۱۸] ارائه شده است. با این حال، شیب اکتیو اصلاح شده به طور قابل توجهی بر پایداری و قابلیت اطمینان ریزشبه تأثیر می‌گذارد [۱۹]. نویسندگان در [۲۰] و [۲۱] این مشکل را با معرفی یک امپدانس مجازی متغیر برای جبران افت ولتاژ ناسازگار در میان DGها حل کرده‌اند. حتی اگر تقسیم توان راکتیو به طور دقیق انجام شود، مشکل نوسان قدرت به اندازه کافی حل نشده است. در [۲۲] و [۲۳] برای بهبود کیفیت ولتاژ، یک مقاومت منفی مجازی برای خنثی کردن اثر مقاومت خط معرفی شده است. اگرچه عملکرد تقسیم توان با افزایش مولفه القایی افزایش می‌یابد، پایداری سیستم به دلیل کاهش ضریب میرایی سیستم کاهش می‌یابد. اخیراً، نویسندگان در [۲۴]، [۲۵] یک امپدانس مجازی تطبیقی مبتنی بر اجماع چند عاملی برای افزایش عملکرد تقسیم توان ارائه کردند. با این حال، روش کنترل اجماع دارای تأخیر ارتباطی طولانی است، و در صورت وجود افت، تقسیم توان اکتیو و راکتیو ضعیف را نشان می‌دهد [۲۶]. برای غلبه بر این مسئله، بهینه‌سازی امپدانس مجازی [۲۷] و تخمین تونن مبتنی بر ولتاژ در [۲۸] ارائه شده است. با این حال، این روش‌ها یک الگوریتم تخمین پیچیده دارند و عملکرد سیستم به بسیاری از متغیرهای کنترلی بستگی دارد. اگرچه در بسیاری از متون در مورد تقسیم توان نادرست بحث شده، هنوز مسائلی وجود دارد که باید بهبود یابند. برای مثال، جبران نوسان توان اکتیو، کاهش جریان در گردش و تقسیم دقیق توان راکتیو بدون توجه به تغییر امپدانس خط، مهم است. جدا از بهبود عملکرد تقسیم توان، امپدانس مجازی ممکن است برای عملکرد بهتر در شرایط غیرخطی، شرایطی مانند تغییر بار، بهبود میرایی نوسانات و افزایش پایداری سیستم نیز استفاده می‌شود [۲۹]. چالش اصلی در روش امپدانس مجازی، تعیین مقدار امپدانس مجازی مورد استفاده است. تغییر در مقدار امپدانس باعث ایجاد مشکلاتی در سیستم می‌شود، بنابراین پیشنهاد می‌شود، از مقدار ثابت یا تطبیقی امپدانس مجازی (VI) استفاده کرد. از آنجایی که شرایط شبکه (بارها و سطوح تولید تجدیدپذیر) به طور مداوم متغیر است، استفاده از یک تکنیک تطبیقی عملکرد بهتری را تضمین می‌کند. یک تکنیک مبتنی بر امپدانس مجازی تطبیقی در [۳۰] نیز پیشنهاد شده است که منجر به جداسازی توان‌های اکتیو و راکتیو شده و تقسیم توان بین منابع را بخوبی انجام داده و انتقال توان از طریق فیدر با بیشترین مقدار نیز انجام شده است. در [۳۱] یک استراتژی کنترل هماهنگ VI برای DGها پیشنهاد می‌کند، که در آن مقاومت مجازی و اندوکتانس به طور همزمان تنظیم می‌شوند تا امپدانس خط نامتناسب را جبران کنند و پایداری با افزایش میرایی برای کل سیستم افزایش می‌یابد. کنترل

جریان مدل می‌شوند. این بلوک‌ها اطلاعات مورد نیاز را ارائه می‌دهند. ریزشبه در ۲۰ کیلو ولت کار می‌کند که یک سطح ولتاژ متوسط است. ظرفیت خط در ۲۰ کیلو ولت ناچیز است. بنابراین، ویژگی مقاومتی و القایی در این شبکه غالب است. با استفاده از $V_b=20\text{kv}$ و $S_b=1\text{MVA}$ مقادیر واحد پارامترها به استاندارد SI منتقل می‌شوند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، پنج منبع DG مورد استفاده در این سیستم شامل فتولتائیک، توربین بادی، دیزل ژنراتور و اینورتری به ترتیب در باس های ۳۴، ۳۶، ۳۵، ۳۷ و ۳۸ قرار دارند.

ج- استراتژی کنترل منابع DGs

یک شماتیک از کنترل منابع DG را می‌توان در شکل ۲ مشاهده کرد. کنترل توان اکتیو به صورت افتی است و از روش‌های زیر برای کنترل توان راکتیو منابع استفاده شده است:

یک ولتاژ V_{ref} به منبع داده می‌شود و از همان ولتاژ پیروی می‌کند و اندازه و مقدار Q تأثیری در مقدار آن ندارد، در روش بعدی کنترل توان راکتیو منبع مورد نظر با استفاده از کنترل دروپ با ضرایب مشخص انجام می‌پذیرد. و در نهایت استفاده از $Q_{regulator}$ و ایجاد Q_{ref} داده شده به منبع انجام می‌گیرد.

۳- روش امپدانس مجازی

توان راکتیو براساس ولتاژ بین DGها تقسیم می‌شود و ولتاژ هر نقطه تعیین کننده توان راکتیو منبع DG مورد نظر است و به دلیل افت ولتاژ روی خطوط ناهمبستگی در تقسیم توان راکتیو منابع DG بوجود می‌آید. یعنی توان راکتیو بر اساس ظرفیت DGها بین آن‌ها تقسیم نمی‌شود. در این مقاله یک تحلیل ریاضی انجام شده و نشان داده با تغییر امپدانس خروجی DG می‌توان توان اکتیو و راکتیو منابع را کنترل کرد. امپدانس مجازی که در این مقاله به صورت خروجی منبع تولید پراکنده بدست می‌آیند (یعنی مقدار افت ولتاژ روی امپدانس مجازی باید به مقادیر ولتاژهای مرجع اضافه شود). در این مقاله از بحث کنترل امپدانس مجازی استفاده کرده برای جبران‌سازی ناهمبستگی در تقسیم توان راکتیو بین منابع DG، یک تحلیل ریاضی انجام داده و نشان داده که با تغییر سلف در یک محدوده‌ای گاهی توان راکتیو افزایش و گاهی توان راکتیو در یک محدوده کاهش می‌یابد. پس برای کنترل توان راکتیو از سلف نمی‌توان استفاده کرد. وابستگی توان راکتیو DG نسبت به r را نشان می‌دهد، به این معنی که هر جایی r را زیاد کنید توان راکتیو DG کم می‌شود و جایی

در رابطه (۳)، ω_{min} و ω_{max} حدود بالا و پایین فرکانس زاویه‌ای ریزشبه هست و P_{max} ماکزیمم توان اکتیو خروجی منبع DG می‌باشد. در رابطه (۴)، E_{min} و E_{max} به ترتیب ماکزیمم و مینیمم اندازه ولتاژ ریزشبه هستند و Q_{max} ماکزیمم توان راکتیو خروجی منبع DG می‌باشد. همانطور که در روابط بالا مشاهده می‌شود، واحدهای DG با ظرفیت بزرگتر با ضرایب افتی قدرت کوچکتر تنظیم می‌شوند. به طوری که وقتی همه واحدهای DG تحت یک فرکانس و ولتاژ یکسان کار می‌کنند، واحد DG با ظرفیت بزرگتر توان خروجی بیشتری را تامین می‌کند. در عمل، به دلیل وجود فرکانس ثابت در بین واحدهای DG، با کنترل افتی $P - \omega$ همیشه می‌توان به تقسیم دقیق توان اکتیو دست یافت. با این حال، از آنجایی که ولتاژهای واحدهای DG به سختی می‌توانند به دلیل عدم تطابق در شبکه یکسان شوند، همیشه در کنترل افتی $Q - V$ مشکلات تقسیم توان راکتیو وجود دارد. به طور معمول، توان اکتیو و راکتیو منتقل شده از یک گره به گره دیگر را می‌توان به صورت روابط زیر بیان کرد [۳۸-۳۹]:

$$P = \frac{U}{R^2 + X^2} (UR - VR \cos \delta + VX \sin \delta) \quad (5)$$

$$Q = \frac{U}{R^2 + X^2} (UX - VX \cos \delta - VR \sin \delta) \quad (6)$$

در روابط بالا R و X به ترتیب مقادیر مقاومت و راکتانس خط تغذیه کننده بین دو گره هستند. U و V مقادیر ولتاژ در دو گره هستند و δ اختلاف زاویه فاز بین دو گره است. با ترکیب روابط (۵) و (۶) معادله زیر بدست می‌آید [۳۸-۳۹]:

$$U_{feeder} \approx \frac{XQ + RP}{E_0} \quad (7)$$

در رابطه (۷) U_{feeder} افت ولتاژ در فیدر واحد DG است، بنابراین ولتاژ خروجی واحد DG را می‌توان به صورت رابطه (۸) محاسبه کرد [۳۸-۳۹]:

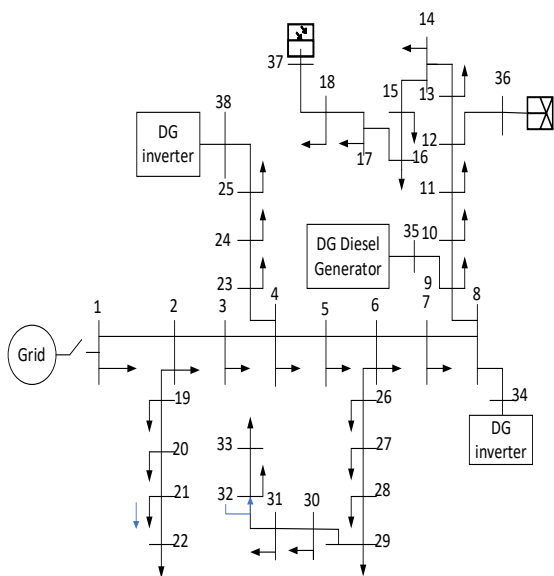
$$U_{DG} = \frac{X(Q_{DG} - Q_{Local}) + R(P_{DG} - P_{Local})}{E_n} + V_T \quad (8)$$

در رابطه فوق U_{DG} و V_T مقادیر ولتاژ خروجی واحد DG و ترمینال فیدر هستند. Q_{Local} و P_{Local} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو بار محلی هستند. از رابطه (۸) مشاهده می‌شود که ولتاژ خروجی واحد DG عمدتاً به سه عامل بستگی دارد: امپدانس فیدر، ولتاژ پایانه فیدر و توان بار محلی.

در ریزشبه‌های مرسوم، تمام واحدهای DG به باس مشترک ac متصل هستند. یعنی هر فیدر ولتاژ ترمینال یکسانی دارد. با داشتن امپدانس فیدر و پارامترهای بار محلی، اساساً می‌توان به تقسیم توان راکتیو دست یافت. زمانی که یک فیدر واحد DG دارای مقدار امپدانس کمتری باشد، منبع DG به دلیل خروجی ولتاژ کمتر، توان راکتیو بیشتری تولید می‌کند یا زمانی که توان بار محلی منبع DG بیشتر است، منبع DG توان راکتیو بیشتری تولید خواهد کرد. معمولاً ارزیابی تقسیم توان راکتیو در ریزشبه شبکه شده به دلیل ساختار پیچیده آن کار ساده‌ای نیست. زیرا ریزشبه‌های شبکه شده ساختار یکپارچه ندارند.

ب- معرفی شبکه نمونه

نمونه ریزشبه مورد مطالعه یک شبکه استاندارد ۳۸ باس IEEE است که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این ریزشبه واحدهای DG می‌توانند به هر باسی متصل شوند و ریزشبه به دو صورت جزیره‌ای و متصل به شبکه می‌تواند کار کند. در حالت متصل به شبکه، از آنجایی که ولتاژ ریزشبه توسط شبکه پشتیبانی می‌شود، مشکلات تقسیم توان با استفاده از تکنیک‌های ردیابی توان به راحتی قابل حل است. در حالی که در حالت جزیره‌ای، تقسیم توان به مشارکت واحدهای متعدد DG متکی است. پارامترهای بارها و خطوط این شبکه از [۴۰] استخراج شده است. باس‌ها توسط بلوک‌های اندازه‌گیری سه فاز ولتاژ و



شکل ۱: نمونه ریزشبه ۳۸ باس مورد مطالعه

روی امپدانس در محور d, q بدست می‌آید و مقادیر جدید U_d, U_q بدست می‌آیند. اگر $s_1=0$ باشد، گویا از روش امپدانس مجازی استفاده نشده است.

۴- پایداری ولتاژ شاخص پیشنهادی: مفاهیم و فرمول‌ها

۴-۱- P-index یک شاخص پایداری ولتاژ

یکی از شاخص‌هایی که اخیراً در سال ۲۰۱۸ معرفی شده شاخص P برای ارزیابی پایداری ولتاژ است [۴۲]. شاخص P با توجه به حساسیت (تغییرات) ولتاژ نسبت به تغییرات توان بار، به صورت زیر تعریف شده است. در این رابطه P_L و V بترتیب توان و ولتاژ باس بار را نشان می‌دهند:

$$P-index = \frac{-2 \frac{P_L}{V} \frac{dV}{dP_L}}{1 - 2 \frac{P_L}{V} \frac{dV}{dP_L}} \quad (10)$$

به لحاظ تئوری حد پایداری ولتاژ جایی که $\frac{dV}{dP_L} \rightarrow \infty$ این شاخص برابر با ۱ خواهد شد. برای محاسبه این شاخص بصورت تعریف شده در یک سیستم n باسه، باید برای هر باس j مقدار dV_j / dP_{Lj} را بدست آورد. این مقدار را می‌توان از ماتریس ژاکوبین سیستم محاسبه کرد. همچنین فرض کنید بار اولیه سیستم در هر باس P_{L0j} و Q_{L0j} باشد و با ضرب این بارها در ضریب بارگذاری b_j بار سیستم در زمان مورد نظر یعنی P_{Lj} و Q_{Lj} بدست می‌آید. پس میزان افزایش بار برابر ΔP_{Lj} و ΔQ_{Lj} خواهد بود. در واقع نشان داده شده که شاخص P در این حالت از روابط زیر قابل محاسبه است:

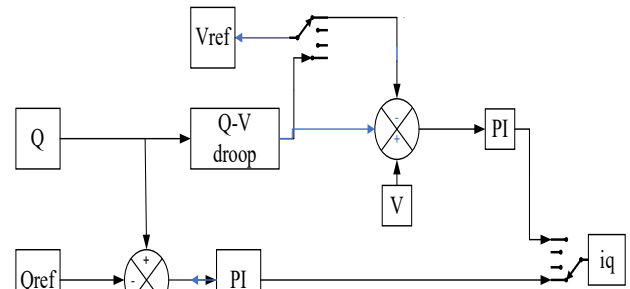
$$P-index_j = \frac{-2 \frac{P_{Lj}}{V_j} \frac{dV_j}{dP_{Lj}}}{1 - 2 \frac{P_{Lj}}{V_j} \frac{dV_j}{dP_{Lj}}} \quad (11)$$

$$P-index = \frac{-2 \frac{\lambda}{V_j} \frac{dV_j}{d\lambda}}{1 - 2 \frac{\lambda}{V_j} \frac{dV_j}{d\lambda}} \quad (12)$$

نکته قابل توجه اینکه این شاخص با فرض مدل‌های مختلف برای بار از جمله امپدانس ثابت، توان ثابت یا جریان ثابت قابل استفاده است و تنها فرض آن ثابت ماندن ضریب توان در باس بار است.

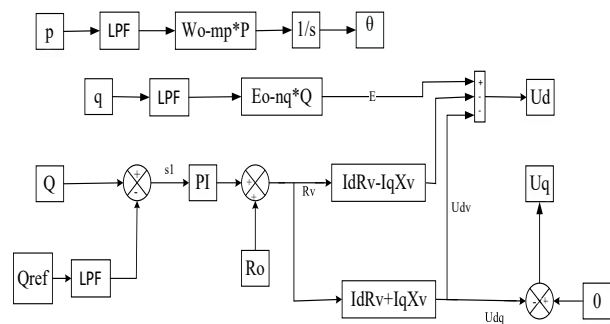
۴-۲- شاخص پروفیل ولتاژ

یکی از مشکلات قابل توجه در شبکه‌های توزیع مسئله نامناسب بودن پروفیل ولتاژ می‌باشد. تأثیر واحدهای تولید پراکنده بر روی تنظیم ولتاژ می‌تواند مثبت و یا منفی باشد و این امر بستگی به سیستم توزیع، مشخصات واحدهای تولید پراکنده و نیز مکان نصب آن‌ها دارد. تأثیر واحدهای تولید پراکنده بر روی تنظیم ولتاژ می‌تواند مثبت و یا منفی باشد و این امر بستگی به سیستم توزیع، مشخصات واحدهای تولید پراکنده و نیز مکان نصب آن‌ها دارد. از آنجایی که ولتاژ یکی از مهمترین معیارها از نقطه نظر کیفیت توان در ارائه خدمات توسط شرکت‌های برق می‌باشد، بنابراین در سال‌های اخیر، با حضور واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، توجه زیادی به بررسی اثر این واحدها بر روی ولتاژ صورت گرفته است. در عمل با بکارگیری واحد تولید پراکنده در پایین یک تنظیم‌گر ولتاژ یا مبدل رنج بار مجهز به جبران‌گر افت خط، عمل تنظیم ولتاژ توسط تنظیم‌گر، دچار مشکل خواهد شد. این کار باعث می‌شود که رنج بهره‌برداری از تولید پراکنده محدود گردد و یا اینکه نیاز به یک برنامه کنترل هماهنگی بین مبدل رنج بار و تولید پراکنده باشد. مسئله مهم دیگر در شبکه‌های توزیع، نامتعادلی ولتاژ در آن‌ها می‌باشد. گرچه ولتاژی که در شبکه انتقال در ترمینال ژنراتورهای تولید برق وجود دارد، کاملاً متعادل



شکل ۲: کنترل منابع DGs

که r را کم کنید توان راکتیو DG زیاد می‌شود در واقع توان راکتیو در همه‌ی محدوده‌ها با r نسبت عکس دارد. واضح است که برای کنترل توان راکتیو منابع تولید پراکنده با کنترل ولتاژ مجازی می‌توان این کار را انجام داد. ولتاژ مجازی در واقع با هدف رساندن توان نامی DGها به توان نامی‌شان کنترل می‌شود. شکل ۳ روش استفاده از امپدانس مجازی را برای تقسیم توان راکتیو بین منابع را نشان می‌دهد [۴۱].



شکل ۳: نحوه پیاده سازی و استفاده از امپدانس مجازی

از افت ولتاژ بر روی امپدانس مجازی استفاده شده است و از مقادیر مرجع، این افت ولتاژ کم شده است. برای محاسبه مقادیر افت ولتاژ، به جریان‌های محور d و q نیاز هست که با اندازه‌گیری بدست می‌آیند و همچنین به مقدار x_v, R_v نیز نیاز هست. با توجه به توضیحاتی که داده شده سلف امپدانس مجازی مقدارش ثابت هست و به عنوان یک پارامتر در نظر گرفته می‌شود ولی مقدار مقاومت R متغیر است که با کنترل مقاومت در واقع توان راکتیو کنترل می‌شود. که مقدار R_v که به عنوان ورودی کنترل امپدانس مجازی وارد می‌شود از یک مقاومت ثابت و از یک خروجی کنترل‌کننده PI بدست آمده که هدف کنترل‌کننده PI رساندن مقدار Q به مقدار مرجع آن (Q_{ref}) است. در رابطه ۹ نحوه محاسبه Q_{ref} آورده شده است.

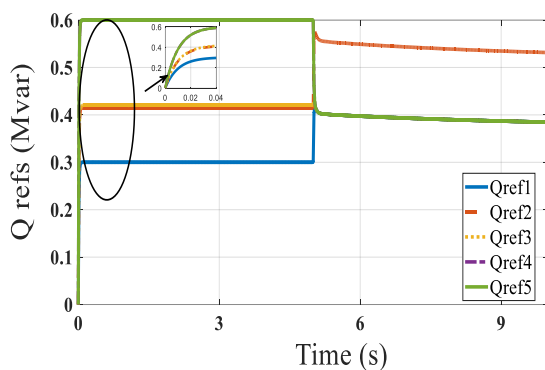
$$Q_{ref,i} = \frac{Q_{ref,i} \sum_{i=1}^n Q_{DG,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{rated,i}} \quad (9)$$

Q_{ref} بر اساس ظرفیت DGها بدست می‌آید. که در رابطه بالا Q_{rated} حداکثر توان راکتیو تولیدی منبع DG است، $\sum_{i=1}^n Q_{DG,i}$ کل توان راکتیو منابع DG شبکه است، $\sum_{i=1}^n Q_{rated,i}$ مجموع ظرفیت توان راکتیو DGهاست. مقدار توان اندازه‌گیری شده توسط DG را با مقدار توان راکتیو مرجع که از رابطه بالا بدست آمده مقایسه می‌شود، اگر $s_1=1$ بود (S_1 فعال کننده بلوک کنترل‌کننده مقاومت مجازی است) خطا وارد کنترل PI می‌شود و خروجی آن ΔR و با R_0 جمع می‌شود و مقاومت مجازی R_v را خواهیم داشت که بر اساس آن افت ولتاژ

نیز محاسبه و آورده شده‌اند. در مقاله حاضر نتایج تقسیم توان راکتیو بین منابع، با تغییر بار نیز نشان داده شده است. اثر تغییر بار بر روی پروفیل ولتاژ و تلفات سیستم نیز بررسی شده است.

در شکل ۴ مقادیر مرجع توان‌های راکتیو منابع آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، توان راکتیو مرجع منابع به صورت Mvar در نمودار رسم شده است.

شکل ۵ الف، نتایج تقسیم توان راکتیو بین منابع DG را نشان می‌دهد. در نمودار حاضر نتایج تقسیم توان راکتیو بین منابع را برای دو حالت بار ثابت و امپدانس مجازی می‌توان مشاهده نمود. در ۵ ثانیه ابتدای شبیه‌سازی تقسیم توان بین منابع با بار ثابت نشان داده شده، همانطور که ملاحظه می‌شود، تقسیم توان بین منابع به خوبی انجام نشده است. از ثانیه ۶ به بعد شبیه‌سازی سیستم، از روش امپدانس مجازی به صورت مقاومتی استفاده شده است، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که تقسیم توان بین منابع در این حالت به خوبی انجام شده و نتایج تقسیم توان بین منابع تولید پراکنده نسبت به روش Q ثابت بهتر شده‌اند. اگر ظرفیت تمامی منابع یکسان در نظر گرفته شده باشد تقسیم توان راکتیو یکسان بین منابع انجام می‌شود، ولی در مقاله حاضر ظرفیت توربین بادی نسبت به منابع دیگر متفاوت در نظر گرفته شده است، بنابراین در نمودار شکل ۵، از ثانیه ۷ به بعد تقسیم توان بین منابع به خوبی انجام شده است.



شکل ۴: مقادیر مرجع توان‌های راکتیو منابع DG

شکل ۵ ب، نمودار مربوط به توان‌های اکتیو منابع DG را در هر دو روش شبیه‌سازی نشان داده است. در شکل حاضر در روش توان ثابت مقادیر توان اکتیو منابع نوسانات داشته است ولی با استفاده از روش امپدانس مجازی توان اکتیو بین منابع به خوبی بدست آمده‌اند. تولید توان‌های اکتیو واحدهای دوم و سوم و چهارم نسبت به واحدهای اول و پنجم بیشتر بوده، که دلیل آن بیشتر بودن ظرفیت آن‌ها نسبت به یکدیگر می‌باشد. بنابراین در روش امپدانس مجازی توان‌های اکتیو و راکتیو بارها به طور دقیق بر اساس ظرفیت واحدها بین آن‌ها تقسیم شده است. مقادیر ولتاژ باس‌های شبکه که منابع تولید پراکنده به آن‌ها متصل هست را در شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد.

نتایج حاصل از پروفیل ولتاژ شین‌های سیستم ۳۸ باس با منابع تولید پراکنده را می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود. شکل ۷ الف، نتایج پروفیل ولتاژ شبکه بدون منابع تولید پراکنده می‌باشد، همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر پروفیل ولتاژ برخی باس‌های شبکه به شدت با نبود مقادیر تولیدی منابع DG تحت تأثیر قرار می‌گیرند و مقادیر غیر قابل قبولی بدست آمده است. شکل ۷ ب، نمودار مربوط به پروفیل ولتاژ شبکه با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده و در نظر گرفتن ظرفیت تولیدی یکسان برای واحدهای DG را نشان می‌دهد. توربین بادی و منبع فتوولتائیک به صورت MPPT کار می‌کنند و نمی‌توان

است، ولی در سطح شبکه‌های توزیع، به دلیل وجود بارهای تکفاز و نیز یکسان نبودن امپدانس خطوط توان، ولتاژ به صورت نامتعادل در می‌آید. چنانچه نامتعادلی از یک حد استاندارد بالا باشد، در این صورت علاوه بر افزایش تلفات سیستم، می‌تواند تأثیرات سوئی را در در بارها داشته باشد. از جمله بارهایی که نامتعادلی ولتاژ تأثیرات جدی بر روی آن‌ها می‌گذارد، بارهای موتوری می‌باشند. اگرچه در طراحی این موتورها وجود کمی نامتعادلی ولتاژ پیش بینی می‌گردد، اما چنانچه نامتعادلی از حدی بالاتر رود، باعث ایجاد جریان‌های نامتعادل خواهد شد که سطح نامتعادل آن‌ها چند برابر نامتعادلی ولتاژ می‌باشد. استفاده تعداد قابل توجهی از واحدهای تولید پراکنده تکفاز در شبکه‌های توزیع، می‌تواند روی نامتعادلی ولتاژ تأثیر مثبت یا منفی داشته باشد. یکی از مزایای انتخاب مکان و اندازه مناسب DG، بهبود پروفیل ولتاژ است. این شاخص انحراف ولتاژ بیشتری از مقدار اسمی (V_{nom}) را نشان می‌دهد. به این ترتیب، هرچه شاخص به صفر نزدیک شود، عملکرد شبکه بهتر است. IVD را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$IVD = \frac{n}{2} \max_{i=2} \left(\frac{|V_{nomi}| - |V_{il}|}{|V_{nomi}|} \right) \quad (13)$$

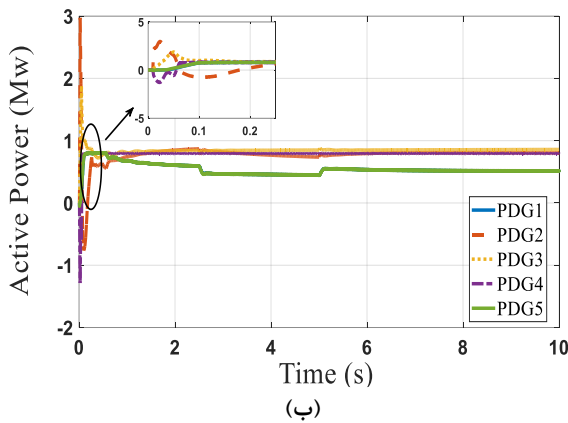
در رابطه (۱۳) n تعداد باس‌هاست. معمولاً محدودیت‌های ولتاژ ($V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$) در یک باس خاص به عنوان محدودیت فنی در نظر گرفته می‌شود و بنابراین مقدار IVD معمولاً کوچک و در محدوده مجاز است. در مقاله حاضر برای اینکه بتوان تلفات سیستم موجود را با منابع تولید پراکنده مشخص شده محاسبه نمود، تعداد واحدهای DG الزامی است که کل تقاضا و تلفات سیستم باید توسط واحدهای DG متصل به سیستم توزیع برآورده شود. انتخاب نوع واحدهای DG این مقاله فرض می‌کند که شبکه توزیع پتانسیلی برای بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر مانند خورشید، باد، زیست توده و غیره دارد و از آنجایی که هدف اصلی بهینه‌سازی اندازه‌ها و پیکربندی مجدد است، مسائل مربوط به نوع DGs در این کار بررسی نشده است. به طور کلی، منابع تجدیدپذیر ژنراتورهای سنکرون را هدایت می‌کنند و منابع مبتنی بر اینورتر در نظر گرفته شده و فرض می‌شود برای توان ثابت و عملیات ضریب توان ثابت کنترل شود. از این‌رو، برای ساده‌سازی، منابع واسط به عنوان منابع مشخص شده و ولتاژهای شین‌ها نیز ۱ پریونیت در نظر گرفته شده‌اند. برای یافتن تلفات در سیستم از پخش بار استفاده شده است. تجزیه و تحلیل پخش بار ریزشکبه برای اطمینان از کفایت منبع تغذیه از DGها و همچنین برای تعیین اینکه آیا پروفیل ولتاژ مورد نیاز حفظ می‌شود، ضروری است. مقادیر طراحی شده برای منابع به‌گونه‌ای هستند که پخش بار شبکه همگرا شود. بنابراین برای مشخص کردن تلفات، باید تولید و مصرف در شبکه مشخص شوند. رابطه ۱۴، محاسبه تلفات را نشان می‌دهد:

$$\sum_{j=1}^{NOL} P_{Loss}(j, v) = \sum_{i=2}^n P_D(i, v) - P_{DG} \quad (14)$$

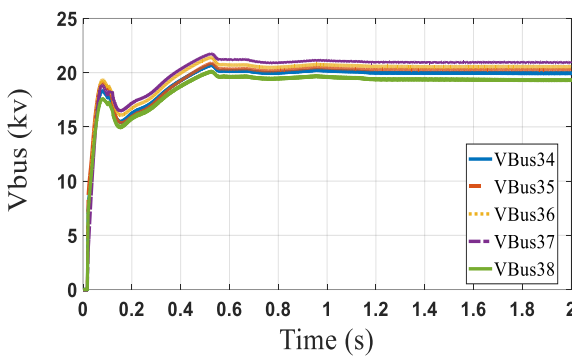
که در آن NOL تعداد خطوط و PDi تقاضای توان بر حسب (Mw) است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

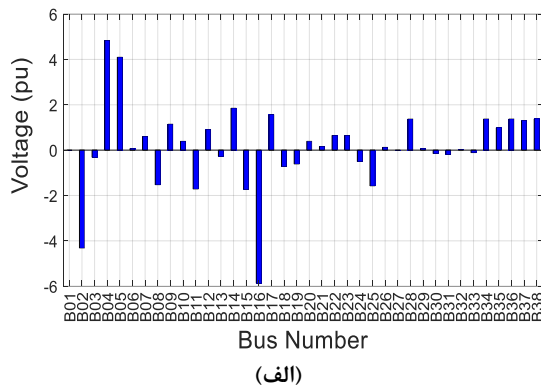
به منظور صحت روش‌های استفاده شده در این مقاله، سیستم تست مطابق شکل ۱ با پنج منبع تولید پراکنده شامل توربین بادی، فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و اینورتری با ظرفیت‌های مشخص استفاده شده است. پارامترهای سیستم مورد مطالعه و بارهای استفاده شده در سیستم مطابق سیستم ۳۸ باس استاندارد انتخاب شده‌اند. در نتایج حاضر برای تقسیم توان راکتیو بین منابع عنوان شده از دو سناریو استفاده شده است. سناریو اول تقسیم توان راکتیو بین منابع با در نظر گرفتن Q ثابت و سناریو دوم تقسیم توان بین منابع با استفاده از روش امپدانس مجازی هست. در ادامه پروفیل ولتاژ شبکه مورد مطالعه و تلفات شبکه



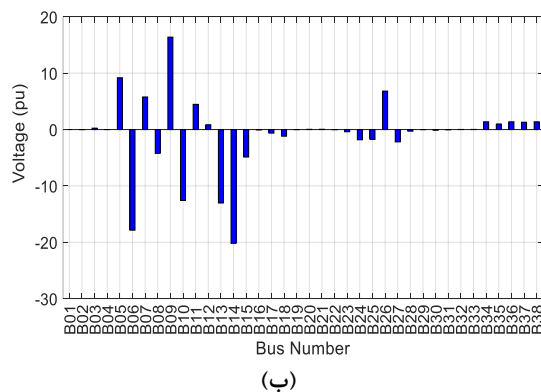
شکل ۵: تقسیم توان بین منابع تولید پراکنده؛ الف: توان راکتیو تولیدی واحدها، ب: توان اکتیو واحدها



شکل ۶: ولتاژ باس‌های متصل به منابع DG

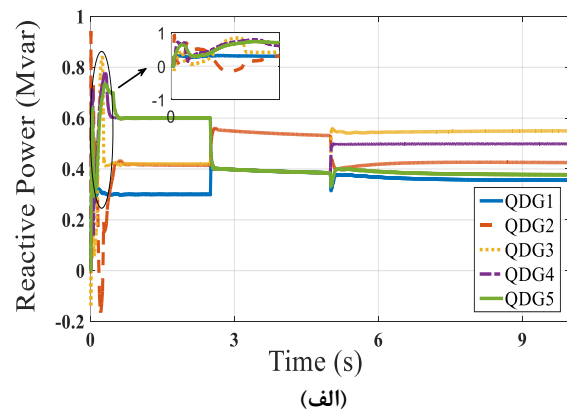


(الف)

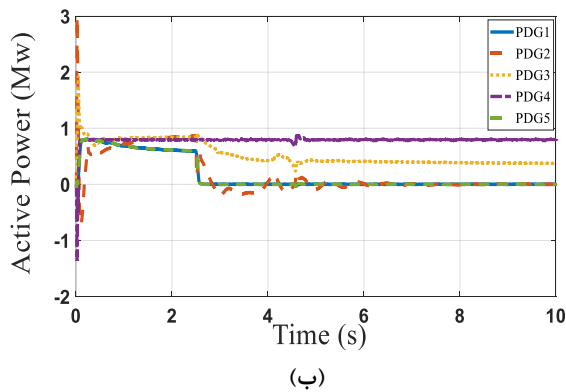


(ب)

ظرفیت آن‌ها را با بقیه منابع یکسان در نظر گرفت. همچنین دیزل ژنراتور نیز از منابعی است که ظرفیت آن باید به صورت مناسب طراحی شود و گونه مقادیر شبکه را و اگر خواهد کرد. در نمودار شکل هم نشان داده شده است که نتایج پروفیل ولتاژ باس‌های ۶، ۹، ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۲۶ به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و مقادیر مناسب نیستند. شکل ۷ ج، مقادیر پروفیل ولتاژ را با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده با ظرفیت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. با تغییر بار در سطوح مختلف سعی شده نتایج تقسیم توان اکتیو و راکتیو منابع تولید پراکنده نشان داده شود و با مقایسه نتایج با یکدیگر بهترین تغییر سطح بار نیز مشخص شده است. همچنین نتایج پروفیل ولتاژ و تلفات شبکه نیز با تغییر بار نشان داده شده‌اند. شکل ۸ الف و ب نتایج مربوط به توان راکتیو و اکتیو منابع DG را با تغییر بار و ۱.۵ برابر شدن آن‌ها را نشان می‌دهد، با توجه به متفاوت بودن ظرفیت منابع تولید پراکنده استفاده شده در شبکه مذکور مشاهده می‌شود که توان راکتیو و اکتیو برخی منابع در حالت Q ثابت منفی شده و توان راکتیو یکی از منابع و همچنین توان اکتیو منبع در حالت کنترل منابع با روش امپدانس مجازی صفر شده است و تقسیم توان اکتیو و راکتیو در این سطح بار به خوبی انجام نشده است. شکل ۹ الف و ب نتایج مربوط به توان راکتیو و اکتیو منابع DG را با ۰.۹ شدن بارها را نشان می‌دهد. با توجه به متفاوت بودن ظرفیت منابع تولید پراکنده استفاده شده در شبکه مذکور مشاهده می‌شود که توان راکتیو و اکتیو برخی منابع در حالت Q ثابت منفی شده و توان راکتیو یکی از منابع و همچنین توان اکتیو منبع در حالت کنترل منابع با روش امپدانس مجازی صفر شده است و تقسیم توان اکتیو و راکتیو در این سطح بار به خوبی انجام نشده است. زمانی که بارها نصف می‌شوند، مقادیر توان‌های راکتیو منابع بسیار کوچک می‌شوند و نمی‌توان تقسیم توان بین منابع را به درستی انجام داد. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان به این نتیجه رسید که به دلیل اینکه منابع DG یکسان نیستند، بنابراین نمی‌توان بدون طراحی مقادیر ظرفیت منابع مقادیر بارها را تغییر داد. و تنها در صورتی تقسیم توان به درستی بین منابع انجام می‌شود که تغییر بارها به صورت صدم درصد و نزدیک بار اصلی صورت گیرد، در غیر اینصورت نتایج خوبی از تقسیم توان حاصل نمی‌شود.

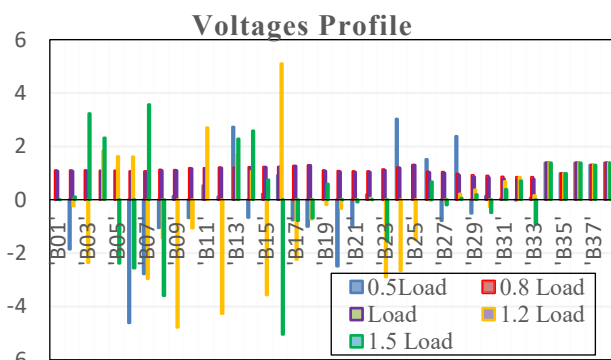


(الف)



شکل ۹: توان راکتیو و اکتیو منابع DG با تغییر بار الف- توان راکتیو منابع با تغییر بار ب- توان اکتیو منابع با تغییر بار

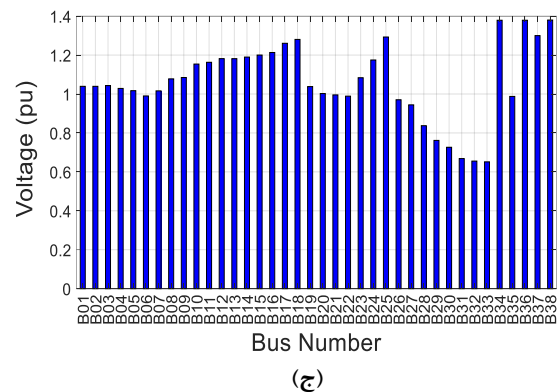
با تغییر بار در سطوح مختلف نتایج زیر برای پروفیل ولتاژ سیستم تحت مطالعه بدست آمده است. نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهد که تغییر به صورت یکباره و کاهش سطح بار به مقادیر نصف یا ۱.۵ برابر شدن بار پروفیل ولتاژ را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهند. به همین علت همانطور که در نمودار شکل مشاهده می‌شود با تغییر بار به میزان ۰.۲ برابر شدن بار مقدار پروفیل ولتاژ یکی از شین‌های سیستم ۵.۱ شده که مقدار غیرقابل قبولی است، و زمانی که بار ۱.۵ برابر شود، با توجه به نمودار بدست آمده مقادیر منفی و بزرگی برای پروفیل ولتاژ بدست آمده است. به عنوان مثال در باس ۱۶ مقدار پروفیل ولتاژ برابر ۵.۰۴- شده است. بنابراین با توجه به نمودار حاضر بهترین نتیجه برای پروفیل ولتاژ تحت بار اولیه سیستم و تغییر بار به میزان حدود ۰.۸ است. رسیدن به نتایج مطلوب برای رسیدن به بهترین تغییر سطح بار با سعی و خطا حاصل می‌شود.



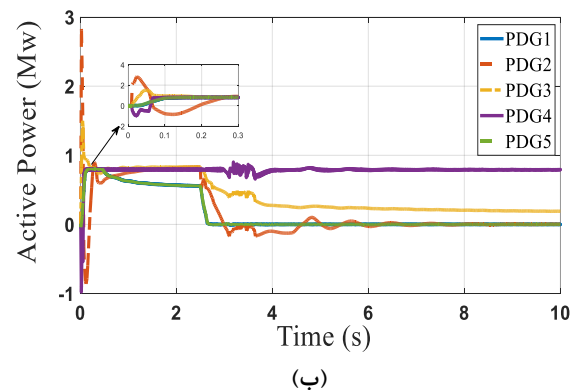
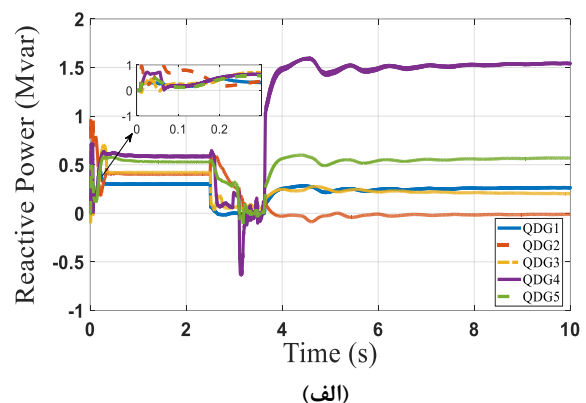
شکل ۱۰: پروفیل ولتاژ شبکه با تغییر سطوح بار مختلف

در جدول ۲ می‌توان نتایج مربوط به تلفات سیستم در سطح بار اولیه و با تغییر بار به مقادیر مختلف را مشاهده کرد. نتایج توان‌های تولیدی و مصرفی و تلفات سیستم برای بار اصلی، نصف بار، ۱.۵ برابر شدن بار، ۰.۸ و ۱.۲ شدن بار محاسبه و در جدول ۲ آورده شده‌اند. همانطور که از نتایج مشخص است با تغییر سریع بار نتایج خوب و درستی بدست نیامده است، و تنها برای سطح بار ۰.۸ نسبتاً نتایج خوبی حاصل شده است.

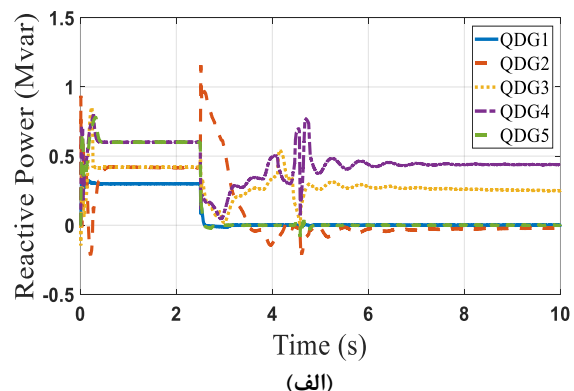
در این بخش از شبیه‌سازی، نتایج مربوط به شاخص P آورده شده است. جدول ۱ مقادیر شاخص پایداری ولتاژ سیستم را نشان می‌دهد برای محاسبه شاخص P از ولتاژ و توان بار و همچنین محاسبه تغییرات ولتاژ نسبت به تغییرات توان بار استفاده شده و نتایج به دست آمده است. می‌توان بیان کرد که مقدار



شکل ۷: پروفیل ولتاژ شبکه مورد مطالعه: الف- بدون منابع DG ب- با حضور منابع DG و یکسان بودن ظرفیت آن‌ها ج- با حضور منابع DG و یکسان نبودن ظرفیت آن‌ها



شکل ۸: توان راکتیو و اکتیو منابع DG با تغییر بار الف- توان راکتیو منابع با تغییر بار ب- توان اکتیو منابع با تغییر بار



روش استفاده شده با یکدیگر مقایسه و نشان داده شد که استفاده از روش امیدانس مجازی به خوبی توان راکتیو بین منابع را با توجه به ظرفیت آن‌ها تقسیم می‌کند. با توجه به در نظر گرفتن اثر مقاومتی در روش امیدانس مجازی ولتاژ باس‌های با منابع DG کنترل و توان اکتیو و راکتیو بین منابع تولید پراکنده به خوبی تقسیم شده‌اند. همچنین در این مطالعه نتایج حاصل از پروفیل ولتاژ و تلفات سیستم نیز برای شبکه ۳۸ باسه محاسبه شده‌اند. همچنین در این مقاله نشان داده شد با تغییر سطح بار تقسیم توان راکتیو و پروفیل ولتاژ و منابع مناسب انتخاب شوند تا در هنگام پخش بار گرفتن از سیستم مقادیر واگرا نشوند و تقسیم توان بین منابع تولید پراکنده به خوبی انجام شود.

شاخص قبل از محاسبه شاخص پایداری در ۵ ثانیه اول مناسب نیست. با این حال، استفاده از امیدانس مجازی باعث بهبود مقدار شاخص می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله تقسیم توان راکتیو بین منابع DG با استفاده از Q ثابت و امیدانس مجازی ارائه گردیده است. و نتایج حاصل از تقسیم توان در هر دو تلفات سیستم به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرند، علت این است که منابع تولید پراکنده استفاده شده در سیستم پیشنهادی متنوع هستند و اگر مقدار بار تغییرات زیاد داشته باشد، پخش بار واگرا می‌شود که نیاز به این هست دوباره طراحی برای سیستم صورت بگیرد تا مقادیر مناسب برای تولید دیزل ژنراتور به دست آید. بنابراین باید بارهای استفاده شده برای سیستم و مقادیر تولیدی

جدول ۱: نتایج P_index سیستم ۳۸ باس

شماره	P_index	شماره	P_index	شماره	P_index	شماره	P_index	شماره	P_index
۲	۰.۴۶۵۳	۹	۰.۵۰۴۴	۱۶	۰.۴۶۰۳	۲۳	۰.۴۹۷۳	۳۰	۰.۵۰۸۹
۳	۰.۴۹۳۴	۱۰	۰.۴۹۳	۱۷	۰.۴۸۰۷	۲۴	۰.۴۹۷۶	۳۱	۰.۵۴۱
۴	۰.۵۰۵۳	۱۱	۰.۴۹۵۸	۱۸	۰.۴۹۳۵	۲۵	۰.۴۹۷۴	۳۲	۰.۵۶۲۳
۵	۰.۵۰۵۶	۱۲	۰.۵۰۵۴	۱۹	۰.۵۱۳۷	۲۶	۰.۵۰۲۴	۳۳	۰.۵۶۱۸
۶	۰.۵۰۶۴	۱۳	۰.۴۹۱۹	۲۰	۰.۵۲۰۴	۲۷	۰.۵۰۴۹		
۷	۰.۴۹۵۳	۱۴	۰.۴۹۲۶	۲۱	۰.۵۴۲۴	۲۸	۰.۵۰۵۴		
۸	۰.۴۹۶	۱۵	۰.۴۹	۲۲	۰.۵۴۴۲	۲۹	۰.۵۰۶۱		

جدول ۲: تلفات سیستم ۳۸ باس با منابع DG

بار	مقدار تلفات شبکه		مقدار مصرف شبکه		مقدار تولید شبکه	
	Ploss_Total	Qloss_Total	Pd_Total	Qd_Total	Pg_Total	Qg_Total
بار اصلی	۲۴۸۲.۷۲ kW	۲۲۲۴.۳۷ kVar	۳۷۱۵ kW	۱۷۷۰ kVar	۶۱۸۳.۱۹ KW	۳۹۸۲.۶۷ kVar
نصف بار اصلی	۳۷۹۲.۸۱۵۱.۴۰ KW	۲۸۶۴۹۹۵۲.۰۷ kVar	۱۷۵۲.۵۰ kW	۸۳۵ kVar	۹۲۲۲۹۰.۰۷ KW	۴۹۷۲۳.۲۳ kVar
۰.۸ بار اصلی	۲۲۶۵.۴۷ kW	۲۰۲۳.۱۳ kVar	۲۹۸۱ kW	۱۴۱۶ kVar	۵۲۴۶.۴۲ KW	۳۴۳۹.۱۰ kVar
۱.۲ بار اصلی	۸۸۸۹۶۴۵.۷۳ kW	۶۱۱۳۵۴۹.۴۲ kVar	۴۴۳۴ kW	۲۵۲۴ kVar	۴۶۴۴۵.۱۹ KW	۵۴۰۷۴.۱۸ kVar
۱.۵ بار اصلی	۵۲۰۴۳۱۷۹.۴۴ kW	۳۸۴۰۴۲۸۳.۸ kVar	۵۵۷۲.۵ kW	۲۶۵۵ kVar	-۵۹۷۰۶۸.۷۹ KW	-۶۹۸۹۸۳.۶ kVar

مراجع

[5] Madiba T, Bansal R, Mbungu N, Bettayeb M, Naidoo R, Siti M. Underfrequency load shedding of microgrid systems: A review. *Int J Model Simul* 2022;42(4):653–79.
 [6] Raya-Armenta JM, Bazmohammadi N, Avina-Cervantes JG, Saez D, Vazquez JC, Guerrero JM. Energy management system optimization in Islanded microgrids: An overview and future trends. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;149:111327.
 [7] Gazizahani FS, Salehi J. Robust design of microgrids with reconfigurable topology under severe uncertainty. *IEEE Trans Sustain Energy* 2017;9(2):559–69.
 [8] Hamid AK, Mbungu NT, Elnady A, Bansal RC, Ismail AA, AlShabi MA. A systematic review of grid-connected photovoltaic and photovoltaic/thermal systems: Benefits, challenges and mitigation. *Energy Environ* 2022. 0958305X221117617.

[1] D. E. Olivares et al., "Trends in microgrid control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, Jul. 2014.
 [2] Nsilulu T. Mbungu a.b, et al., "Control and stimation techniques applied to smart microgrids"(<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113251>),20 23.
 [3] Rodrigues SD, Garcia VJ. Transactive energy in microgrid communities: A systematic review. *Renew Sustain Energy Rev* 2023;171:112999.
 [4] Mbungu NT, Milambo KD, Siti MW, Bansal RC, Naidoo RM, Kamabu TP, et al. Assessing and mapping electricity access patterns in developing country. In: 7th International Conference on Renewable Energy and Conservation (ICREC 2022), November 18-20, 2022, Paris, France.

- [27] Y. Zhu, Q. Fan, B. Liu, and T. Wang, "An Enhanced Virtual Impedance Optimization Method for Reactive Power Sharing in Microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 12, pp. 10390–10402, Dec. 2018.
- [28] A. Raghani, G. Ledwich, and Y. Mishra, "Improved Reactive Power Sharing Among Customers' Inverters Using Online Thévenin Estimates," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 6, pp. 4168–4176, 2019.
- [29] X. Wang, Y. W. Li, F. Blaabjerg, and P. C. Loh, "Virtual-impedancebased control for voltage-source and current-source converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 12, pp. 7019–7037, Dec. 2015.
- [30] S. Chaturvedi, D. Fulwani, and J. M. Guerrero, "Adaptive-sliding-modecontrol based output impedance shaping for ripple management in DC microgrids affected by inverter loads," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 11, no. 4, pp. 2940–2949, Oct. 2020.
- [31] M.-D. Pham and H.-H. Lee, "Effective coordinated virtual impedance control for accurate power sharing in islanded microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 3, pp. 2279–2288, Mar. 2021.
- [32] X. Liang, C. Andalib-Bin-Karim, W. Li, M. Mitolo, and M. N. S. K. Shabbir, "Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 1, pp. 46–60, Jan./Feb. 2021.
- [33] Y. C. C. Wong, C. S. Lim, A. Cruden, M. D. Rotaru, and P. K. Ray, "A consensus-based adaptive virtual output impedance control scheme for reactive power sharing in radial microgrids," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 1, pp. 784–794, Jan./Feb. 2021.
- [34] R. H. Lasseter, Micro-grid: A conceptual solution, in *Proc. 35th Ann. IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, Aachen, Germany, Jun., 2004.
- [35] N. Hatziaegytiou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, Micro-grids, *Proc. IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, Jul. 2007.
- [۳۶] احد عباسی، وحید وحیدی نسب، محمدصادق قاضی زاده، "بررسی "بررسی تأثیر حضور منابع تولید پراکنده ولتاژ ثابت بر کنترل توزیع شده ولتاژ شبکه های هوشمند با بهره گیری از مصرف کنندگان نهایی"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، شماره پیاپی ۷۵، بهار سال ۱۳۹۵، صفحه ۲۷۶–۲۷۵.
- [۳۷] علی کریمی، مجید نیری پور، "رأه یک روش جدید در جایابی بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه های توزیع ایزوله با در نظر گرفتن مدهای کنترل ولتاژ و توان"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۳، شماره پیاپی ۸۱، پاییز سال ۱۳۹۶، صفحه ۱۱۸۳–۱۱۹۳.
- [38] Yang Han; Hong Li., et al, "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017.
- [39] Yixin Zhu1, Baoquan Liu1, et al, "A Virtual Resistance Based Reactive Power Sharing Strategy for Networked Microgrid", 9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, 2015.
- [40] M. M. A. Abdelaziz, H. E. Farag, E. F. El-Saadany and Y. A. R. I. Mohamed, "A Novel and Generalized Three-Phase Power Flow Algorithm for Islanded Microgrids Using a Newton Trust Region Method", *IEEE Transactions on Power Systems*, 28, 1, pp. 190–201, 2013.
- [41] Huaguang Zhang; Sunghyok Kim; Qiuye Sun; Jianguo Zhou Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Accurate Reactive Power Sharing Based on Consensus Control in Microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid* vol. 8, 2017.
- [42] M. Kamel, A. A. Karrar and A. H. Eltom, "Development and Application of a New Voltage Stability Index for On-Line Monitoring and Shedding," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 1231–1241, March 2018.
- [۹] محمود عبادیان، امین رنجبران، "رأه روش کنترلی به منظور تنظیم دقیق ولتاژ بار و تقسیم دقیق توان های اکتیو و راکتیو ریزشکبه"، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۳، شماره پیاپی ۸۱، پاییز سال ۱۳۹۶، صفحه ۱۰۴۷–۱۰۵۸.
- [10] W. Feng, K. Sun, Y. Guan, J. M. Guerrero, and X. Xiao, "Active Power Quality Improvement Strategy for Grid-Connected Microgrid Based on Hierarchical Control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3486–3495, Jul. 2018.
- [11] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, "Control of Power Converters in AC Microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, Nov. 2012.
- [12] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 613–625, Mar. 2007.
- [13] Y. A. R. I. Mohamed and E. F. El-Saadany, "Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 2806–2816, 2008.
- [14] J. M. Guerrero, L. G. De Vicuña, J. Matas, and M. Castilla, "Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters With Wireless Load-Sharing Control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 4, pp. 1126–1135, 2005.
- [15] Y. Sun, X. Hou, J. Yang, H. Han, M. Su, and J. M. Guerrero, "New Perspectives on Droop Control in AC Microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 7, pp. 5741–5745, Jul. 2017.
- [16] H. Sun et al., "Review of Challenges and Research Opportunities for Voltage Control in Smart Grids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 4, pp. 2790–2801, 2019.
- [17] H. Han, Y. Liu, Y. Sun, M. Su, and J. M. Guerrero, "An improved droop control strategy for reactive power sharing in islanded microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 6, pp. 3133–3141, 2015.
- [18] L. Lin, H. Ma, and Z. Bai, "An Improved Proportional LoadSharing Strategy for Meshed Parallel Inverters System with Complex Impedances," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 9, pp. 7338–7351, 2017.
- [19] J. He and Y. W. Li, "An enhanced microgrid load demand sharing strategy," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 9, pp. 3984–3995, 2012.
- [20] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, "Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 3, pp. 1605–1617, Mar. 2015.
- [21] F. Zandi, B. Fani, I. Sadeghkhani, and A. Orakzadeh, "Adaptive complex virtual impedance control scheme for accurate reactive power sharing of inverter interfaced autonomous microgrids," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 22, pp. 6021–6032, 2018.
- [22] H. Cai, X. He, J. Shi, H. Zhao, and P. Zhang, "Power decoupling strategy based on 'virtual negative resistor' for inverters in low-voltage microgrids," *IET Power Electron.*, vol. 9, no. 5, pp. 1037–1044, 2016.
- [23] Z. Chen, X. Pei, M. Yang, and L. Peng, "An Adaptive Virtual Resistor (AVR) Control Strategy for Low-Voltage Parallel Inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 1, pp. 863–876, Jan. 2019.
- [24] Q. Sun, R. Han, H. Zhang, J. Zhou, and J. M. Guerrero, "A Multiagent-Based Consensus Algorithm for Distributed Coordinated Control of Distributed Generators in the Energy Internet," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 3006–3019, Nov. 2015.
- [25] H. Zhang, S. Kim, Q. Sun, and J. Zhou, "Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Accurate Reactive Power Sharing Based on Consensus Control in Microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1749–1761, 2017.
- [26] M. H. Cintuglu, T. Youssef, and O. A. Mohammed, "Development and application of a real-time testbed for multiagent system interoperability: A case study on hierarchical microgrid control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 1759–1768, 2018.