



Wireless Reactive Power Sharing Control for Islanded Microgrids based on Adaptive Virtual Impedance

Sana Sadeghi^{1*}, Alireza Jahangiri²

¹ Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

² Department of electrical engineering, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:
Original Research

Received: 2025.11.05
Revised: 2025.12.16
Accepted: 2026.02.08

Keyword:

Islanded Microgrid
Wireless Control
Reactive Power Sharing
VSI Inverter
Droop Control
Impedance Estimation
Adaptive Virtual Impedance

***Corresponding Author:**

Sana Sadeghi
Email: s-sadeghi@tvu.ac.ir

ABSTRACT

To solve the reactive power sharing problem by droop control, many solutions based on wireless mode have been proposed. In the existing methods, the reactive power sharing error during load changes or other system parameters is not effectively resolved. In this paper, a wireless reactive power sharing method based on impedance estimation and adaptive virtual impedance for islanded microgrid is presented. In this method, the line impedance of each inverter is estimated based on the adaptive virtual impedance and used in the reactive power sharing process. In general, it can be said that the proposed method, in addition to having high speed, accuracy and resistance to system changes in reactive power sharing, has a faster response speed during load changes in transient mode compared to previous methods. MATLAB/Simulink simulation has been used to prove the practicality of this method.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Due to increasing environmental concerns, there is an increasing interest in using renewable energy sources such as photovoltaic cells and small wind turbines. These energy sources, especially in island microgrids, play an important role in providing sustainable energy. One of the main challenges in these systems is to effectively share reactive power without the need for complex communications.

In recent years, various methods have been proposed for sharing reactive power in island microgrids. For example, the use of common droop and virtual impedance features has been investigated to improve the accuracy of reactive power sharing in distributed resources. Other research has examined the progress and challenges of reactive power control in microgrids. Some research has also addressed the use of distributed optimization techniques for controlling and managing reactive power in microgrids.

As a key tool in droop control, the virtual impedance method can simultaneously improve the stability control and accurate power sharing. In this paper, a wireless reactive power sharing method is proposed, which proposes an adaptive virtual impedance control for the islanded state of the microgrid. The proposed method is not only accurate but also has a fast performance in reactive power sharing. Compared with the communication-based methods, the proposed method has the same high accuracy, while its response to load changes is much faster than other accurate methods.

Methodology

In this paper, virtual impedance is used to adapt the line impedance difference, which can be expressed as follows:

$$Z_{vir} = Z_{ref} - Z_{est} \quad (1)$$

Where Z_{vir} and Z_{est} are the virtual impedance and the estimated impedance, respectively. Z_{ref} is the reference value of the compensation impedance that we have applied to each inverter by default.

According to the circuit rules, if no current is drawn from the inverter line impedance, the voltage at both ends of the line is equal, i.e. the voltage amplitude and phase of the PCC point are known for each inverter (we have the voltage and phase of the PCC point). When each inverter is at rated load, the rated current is drawn from the PCC point. Initially, the PCC point will have a rated voltage with a zero phase angle. We consider this value to be equal to the rated voltage of the grid with a zero phase angle for each inverter.

$$R_{in} + jX_{in} = \frac{V_n \angle \delta_n - V_{pcc} \angle 0}{I_n \angle \theta_n} \quad (2)$$

From equation (2) and the current measurement of each inverter, the line impedance values R_{est} and X_{est} of each inverter are obtained, which are the estimated physical resistance and reactance

of the line, respectively. Considering that the microgrid is not always at rated load and the voltage that we assumed to be constant for each inverter may be wrong, we initially start the microgrid with rated load to reach the rated voltage with zero phase angles at the PCC point.

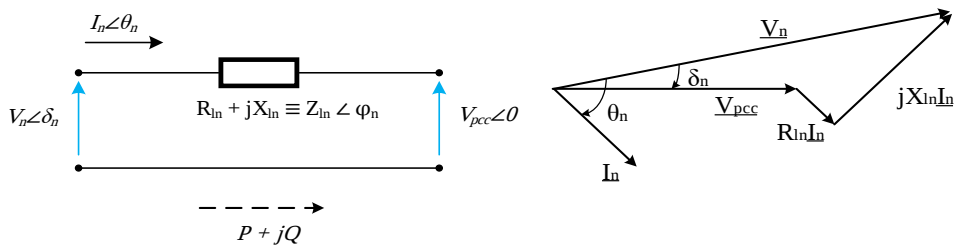


Figure 1. (a) Circuit power diagram, (b) Power vector diagram

Results and discussion

A microgrid model is simulated to demonstrate the proposed method. As mentioned earlier, the simulated microgrid consists of two inverters with the same rated power and a linear load. The two inverters share the load equally. The control parameters are given in Table (1).

Table 1. Droop Control Parameters

$L_f = 1.5 \text{ mH}; C_f = 55 \text{ } \mu\text{F}$	LC Filter	Inverter	$U_{RMS} = 311 \text{ V}$	Nominal Voltage	microgrid
2 kW; 1.5 kVar	Nominal Power		2 kW; 1.5 kVar	Nominal Load	
$L_1 = 1 \text{ mH}; R_1 = 0.1 \Omega$	Line 1 Impedance		$k_p = 1e-5 \text{ Rad}/(\text{Sec} \cdot \text{W})$	Frequency Droop Slope	
$L_2 = 1.5 \text{ mH}; R_2 = 0.15 \Omega$	Line 2 Impedance		$k_q = 1e-3 \text{ V/Var}$	Voltage Droop Slope	
$X_{vir} = 0.314 \Omega; R_v = 0.2 \Omega$	Virtual reference impedance				

The system performance using the proposed droop control technique is shown in Figure (2). Initially, inverter 1 feeds the load

alone. At time $t = 0.2 \text{ s}$, inverter 2 enters the circuit and both inverters supply the load power. At this moment, both inverters are at the nominal load, which is the conventional droop control. As can be seen in Figure (2), the active power is always well divided. Also, this controller has a small transient effect on the active power division among the inverters, but the reactive power has a significant error due to the line impedance mismatch. At time $t = 1 \text{ s}$, the adaptive virtual impedance block is activated and after the transient passes, the reactive power is well divided and the reactive power division error has decreased to zero after the block activation.

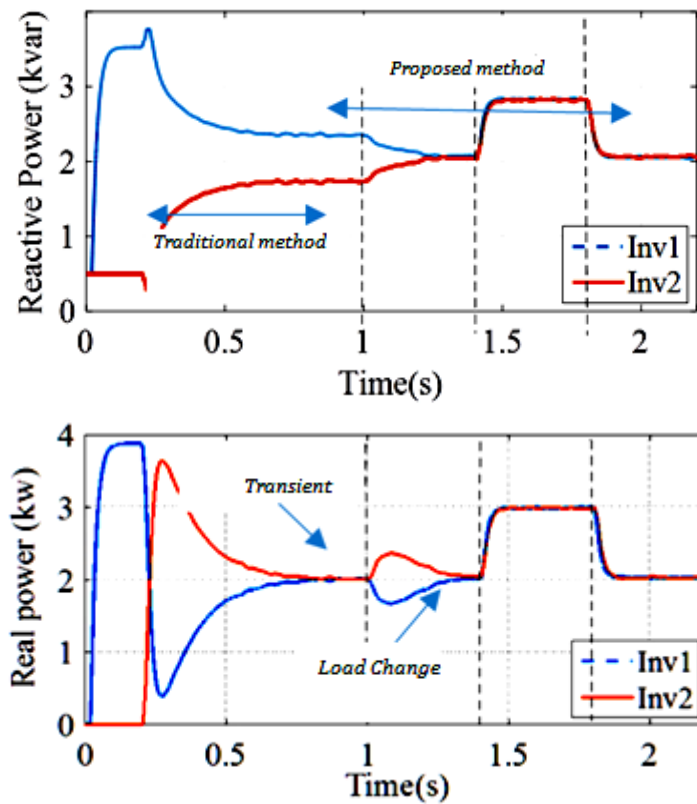


Figure 2. Inverter output power; (a): active power, (b): reactive power.

Conclusion

In this study, a novel strategy for wireless reactive power sharing in islanded microgrids was presented, which is based on line impedance estimation and adaptive virtual impedance. In the first step, the line impedance estimation method was used to facilitate the virtual impedance control process and improve the accuracy of network modeling. Then, the droop control structure based on adaptive virtual impedance was introduced to ensure accurate and proportional reactive power sharing between distributed generation sources. The results of the analysis and performance evaluation showed that the simultaneous use of impedance estimation and adaptive virtual impedance leads to reactive power sharing with high response speed and appropriate accuracy. In addition, due to the adaptive feature of the controller, the proposed method is resistant to frequency changes caused by load changes and exhibits a performance similar to the steady state even in transient conditions. Accordingly, it can be concluded that the proposed strategy has a high capability to increase dynamic stability, improve reactive power coordination, and enhance reliability in islanded microgrids.



کنترل بی سیم تقسیم توان راکتیو در ریز شبکه های جزیره ای بر مبنای امپدانس مجازی تطبیقی

ثنا صادقی^{*۱}، علیرضا جهانگیری^۲

۱- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۲- گروه برق، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۹

کلید واژگان:

ریز شبکه جزیره‌ای

کنترل بی‌سیم

تقسیم توان راکتیو

اینورتر-VSI

دروپ کنترل

تخمین امپدانس

امپدانس مجازی تطبیقی

برای حل مسئله تقسیم توان راکتیو توسط دروپ کنترل، راه‌حل‌های بسیاری بر مبنای حالت بی سیم ارائه شده است. در روش‌های موجود خطای تقسیم توان راکتیو در زمان تغییر بار یا دیگر پارامترهای سیستم به طور مؤثر برطرف نمی‌گردد. در این مقاله یک روش تقسیم توان راکتیو بی سیم بر مبنای تخمین امپدانس و امپدانس مجازی تطبیقی برای ریز شبکه جزیره‌ای ارائه شده است. در این روش امپدانس خط هر اینورتر بر مبنای امپدانس مجازی تطبیقی تخمین و در فرآیند تقسیم توان راکتیو مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور کلی می‌توان گفت روش پیشنهادی علاوه بر دارا بودن سرعت، دقت بالا و مقاومت در برابر تغییرات سیستم در تقسیم توان راکتیو، سرعت پاسخ سریعتری در زمان تغییرات بار در حالت گذرا نسبت به روش‌های پیشین دارد. از شبیه‌سازی متلب/سیمولینک برای اثبات عملی بودن این روش استفاده شده است.

*نویسنده مسئول: ثنا صادقی

پست الکترونیکی:

s-sadeghi@tvu.ac.ir



مقدمه

با توجه به افزایش نگرانی‌ها درباره محیط‌زیست، تمایل به استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر مانند سلول‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی کوچک افزایش یافته است. این منابع انرژی، به‌ویژه در ریز شبکه‌های جزیره‌ای، نقش مهمی در تأمین انرژی پایدار ایفا می‌کنند. یکی از چالش‌های اصلی در این سیستم‌ها، تقسیم توان راکتیو به‌صورت مؤثر و بدون نیاز به ارتباطات پیچیده است [۱].

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای تقسیم توان راکتیو در ریز شبکه‌های جزیره‌ای پیشنهاد شده است. به‌عنوان مثال، مرجع [۱]. استفاده از ویژگی‌های دروپ مشترک و امپدانس مجازی را برای بهبود دقت تقسیم توان راکتیو در منابع توزیع شده برر سی کرده‌اند. مرجع [۲]. در تحقیقی جامع، پی‌شرفت‌ها و چالش‌های کنترل توان راکتیو در ریز شبکه‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. برخی پژوهش‌ها نیز به استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی توزیع‌شده برای کنترل و مدیریت توان راکتیو در ریز شبکه‌ها پرداخته‌اند. به‌عنوان نمونه، مرجع [۳]. چارچوبی بهینه‌سازی توزیع‌شده برای کنترل و مدیریت ریز شبکه‌ها ارائه داده‌اند که بر تقسیم توان راکتیو و بازبایی بار تمرکز دارد. در زمینه کنترل توان راکتیو با استفاده از امپدانس مجازی، مرجع [۴]. کنترل نقطه کارکرد بیشینه با استفاده از امپدانس مجازی اصلاح‌شده را برای مدیریت توان راکتیو در سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه پیشنهاد کرده‌اند.

افزایش واحدهای DG^۱ همچنین چند مسئله نظیر رزونانس سیستم، تداخل حفاظتی و غیره را به وجود می‌آورند. برای غلبه بر این چالش‌ها، مفهوم ریز شبکه پیشنهاد شده است که می‌تواند کنترل هماهنگ و انعطاف‌پذیر بین واحدهای تولید پراکنده را فراهم کند و نقش مهمی در شبکه‌های هوشمند آینده ایفا نماید [۵]. ریز شبکه‌ها می‌توانند به دو صورت متصل به شبکه و جزیره‌ای عمل کنند و هنگامی که به‌درستی مدیریت شوند، مصرف‌کنندگان از توان الکتریکی باکیفیت بالا بهره‌مند می‌شوند. با این حال، ریز شبکه‌ها غالباً با چالش‌هایی نظیر کنترل پایداری، کنترل توان و مدیریت انرژی مواجه هستند [۶].

در ریز شبکه‌های جزیره‌ای، بار مصرفی باید به‌صورت صحیح بین واحدهای DG تقسیم شود، به‌گونه‌ای که توان خروجی هر واحد نهایتاً به توان نامی خود برسد. معمولاً در روش دروپ کنترل، فرکانس و دامنه ولتاژ اینورترها از طریق شیب‌های دروپ تنظیم می‌شود تا تقسیم توان ریز شبکه در حالت غیرمتمرکز به‌درستی انجام گیرد [۷]. اگرچه کنترل فرکانس دروپ می‌تواند تسهیم توان اکتیو دقیقی را فراهم کند، اما کنترل ولتاژ دروپ معمولاً هنگامی که امپدانس خطوط یا فیدرها با هم یکسان نباشد نتایج نامناسبی در تقسیم توان راکتیو به همراه دارد. برای بهبود تقسیم توان راکتیو به‌صورت دقیق در دروپ کنترل، تکنیک‌های زیادی بر مبنای حالت بی‌سیم توسعه داده شده است. در مرجع [۸]، خطای تقسیم توان راکتیو با استفاده از تزریق هارمونیک جریان کاهش یافته است، اما این روش بسته به ساختار شبکه ممکن است کیفیت ولتاژ خروجی و جریان خط را تحت تأثیر قرار دهد.

^۱ Distribution Generation

روش امپدانس مجازی به عنوان یک ابزار کلیدی در دروپ کنترل، می تواند کنترل پایداری و تقسیم دقیق توان را به طور همزمان بهبود دهد. راهکارهای جامعی بر اساس مفهوم امپدانس مجازی در مراجع [۹؛ ۱۰]. ارائه شده است.

در مرجع [۱۱]، تمرکز بر عدم تطابق مشخصه خروجی هر واحد DG بوده است، درحالی که عدم تطابق در مدارهای خارجی بررسی نشده است. در مرجع [۱۲]، خطای توان راکتیو با اصلاح پارامترهای دروپ کنترل کاهش یافته است، اما این روش قبل از شروع عملکرد نیازمند پردازش تخمین دو مرحله ای می باشد.

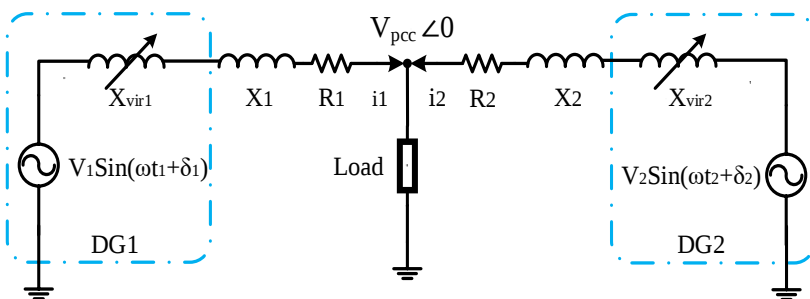
در [۱۳] یک استراتژی کنترلی برای بهبود روش امپدانس مجازی تطبیقی پیشنهاد گردیده است. در استراتژی کنترلی پیشنهادی، افت ولتاژ روی امپدانس خروجی واحدهای تولید پراکنده که به دلیل استفاده از امپدانس مجازی افزایش یافته، جبران می شود و ولتاژ تغذیه بار در مقدار نامی تنظیم می گردد. روش کنترلی پیشنهادی، علاوه بر حفظ مزایای استفاده از امپدانس مجازی تطبیقی نظیر تقسیم مناسب توان های اکتیو و راکتیو بین واحدهای تولید پراکنده و کاهش جریان گردشی، افت ولتاژ ایجاد شده در امپدانس خروجی جبران می شود. مرجع [۱۴] یک استراتژی کنترلی دیگر برای بهبود دقت اشتراک توان راکتیو میان واحدهای تولید پراکنده ریز شبکه های جزیره ای پیشنهاد داده است. روش کنترل پیشنهادی مبتنی بر تزریق جریان راکتیو گذرا برای اصلاح ولتاژ مرجع تولیدی روش کنترل افی می باشد. خطای اشتراک توان راکتیو با تغییر ولتاژ مرجع کاهش می یابد در [۱۵] امپدانس مجازی برای جبران عدم تطابق خط انتقال استفاده شده است. اگرچه حالت بی سیم باعث افزایش انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان سیستم می شود، اما به تنهایی نمی تواند تقسیم توان راکتیو دقیق و رضایت بخش را به ویژه در شرایط تغییر بار تضمین کند. درواقع، بدون دسترسی به اطلاعات خارجی، تقسیم توان راکتیو برای هر واحد DG مشکل است؛ بنابراین، بسیاری از روش های ارتباطی برای حمایت از دروپ کنترل توسعه یافته اند. شایان ذکر است که ایجاد ارتباط در قالب روش نظیر به نظیر در دروپ کنترل نمی تواند تأثیر قابل توجهی داشته باشد. در مراجع [۱۶؛ ۱۷]، روش های ارتباط داخلی برای تقسیم دقیق توان راکتیو به کار گرفته شده اند، اما عملکرد این روش ها به محل نصب هر واحد DG وابسته است. در مراجع [۱۸؛ ۱۹]، استراتژی تقسیم توان راکتیو به صورت ارتباط یک طرفه پیاده سازی شده است، اما این روش نیازمند هم زمان سازی می باشد. با توجه به ارتباط بین کنترل مرکزی، ریز شبکه و هر واحد DG، روش دیگری با عنوان کنترل لایه دوم (تکنیک کنترل ثانویه) پیشنهاد شده است [۲۰؛ ۲۱]. این روش کنترلی قادر به دنبال کردن سریع تغییرات بار نیست و تغییر بار در حین پردازش حالت گذرا بر عملکرد آن تأثیر خواهد گذاشت. روش ارتباطی همچنین در مراجع [۲۲؛ ۲۳] برای تسهیل تخمین امپدانس خط به کار گرفته شده است. سپس امپدانس برای امپدانس مجازی تنظیم می شود، اما این تخمین برای خطوط بلند مناسب نیست [۲۴]. در مرجع [۲۵]، تخمین امپدانس خط نیز مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه این روش به بهبود تقسیم توان راکتیو کمک می کند، اما تزریق هارمونیک با فرکانس بالا یا پایین در این روش می تواند کیفیت شکل موج ولتاژ خروجی و جریان خط را تحت تأثیر قرار دهد و در نتیجه THD^۱ افزایش یابد. روش امپدانس مجازی تطبیقی که در آن از اندازه گیری جریان خط استفاده می شود، می تواند تقسیم توان راکتیو دربار محلی را به خوبی انجام دهد [۲۶]. با این حال، برای مدیریت توان ریز شبکه، امپدانس خط پس از نصب هر واحد DG باید به صورت جداگانه اندازه گیری شده و

^۱ Total Harmonic Distortion

دوباره در تنظیمات کنترلی اعمال شود، به این معنی که پارامترهای خط از قبل باید مشخص باشند. در مرجع [۲۷]، ولتاژ نقطه PCC تخمین زده شده است، اما خطای تقسیم توان راکتیو بین واحدهای DG قابل توجه است. برای ریز شبکه‌های دارای باس، ارتباط اضافی لازم نیست، اما بدون دسترسی به اطلاعات خارجی، روش‌های بی سیم موجود نمی‌توانند عملکرد رضایت‌بخشی در تقسیم توان راکتیو فراهم کنند. در این مقاله یک روش بی سیم تقسیم توان راکتیو ارائه شده که کنترل امپدانس مجازی تطبیقی را برای حالت جزیره‌ای ریز شبکه پیشنهاد می‌دهد. روش پیشنهاد شده نه تنها دقیق است بلکه عملکرد سریعی در تقسیم توان راکتیو دارد. در مقایسه با روش‌های بر مبنای ارتباط، روش ارائه شده همان دقت بالا را دارد. در حالی که پاسخ آن به تغییر بار نسبت به روش‌های دقیق دیگر بسیار سریع تر است. برای افزایش دقت تقسیم توان راکتیو در کنترل امپدانس مجازی، مفهوم تخمین امپدانس (از روی تخمین ولتاژ PCC دربار نامی) نیز پیشنهاد شده است که می‌تواند عدم تطابق امپدانس خط انتقال هر واحد DG به نقطه مشترک را جبران کند. در بخش ۲ دروپ کنترل متداول توضیح داده شده است. امپدانس مجازی تطبیقی و همچنین تخمین امپدانس در بخش ۳ توضیح داده شده است. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی ارائه شده و نتیجه‌گیری در بخش ۵ آورده شده است.

دروپ کنترل متداول در ریز شبکه

شکل (۱) ساختار یک ریز شبکه، شامل ترکیبی از دو واحد DG و یک بار را نشان می‌دهد، هر واحد DG توسط یک اینورتر به شبکه متصل شده است. اینورترها از طریق خط خودشان به نقطه مشترک متصل شده‌اند. تمرکز ما در این مقاله بر روی کنترل (مؤلفه اصلی) توان اکتیو و راکتیو در شرایط بار خطی است. ریز شبکه می‌تواند با کنترل استاتیک سوئیچ در نقطه PCC از شبکه اصلی جدا یا متصل شود.



شکل ۱. ساختار ریز شبکه

در حالت متصل به شبکه، ولتاژ ریز شبکه توسط شبکه اصلی تعیین می‌شود. مسئله تقسیم توان می‌تواند به سادگی با تکنیک ردیابی توان حل شود. وقتی ریز شبکه در حالت جزیره‌ای قرار می‌گیرد، تقسیم توان بستگی به هماهنگی بین واحدهای DG دارد. واحدهای DG می‌توانند توسط دروپ توان اکتیو-فرکانس (P-f) و توان راکتیو-دامنه ولتاژ (Q-V) مطابق روابط (۱) و (۲) کنترل شوند:

$$f - f_0 = -k_p (P - P_0) \quad (1)$$

^۱ Point of Common Coupling

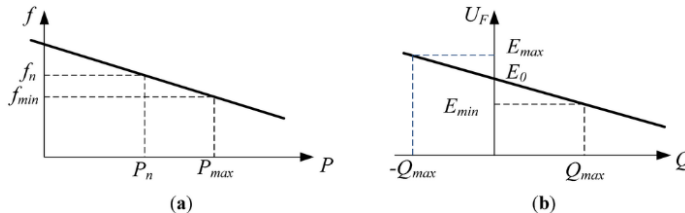
$$V - V_0 = -k_q(Q - Q_0) \quad (2)$$

که f_0 و V_0 مقدار اولیه فرکانس و دامنه ولتاژ هر DG است. P و Q توان اندازه گیری شده اکتیو و راکتیو بعد از فیلتر پایین گذر مرتبه اول، k_p و k_q شیب دروپ توان اکتیو و راکتیو است که می تواند به صورت تئوری از طریق روابط (۳) و (۴) تعیین شود:

$$k_p = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{P_{\max}} \quad (3)$$

$$k_q = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{Q_{\max}} \quad (4)$$

که $\{V_{\max}, V_{\min}\}$ و $\{f_{\max}, f_{\min}\}$ مرز فرکانس و دامنه ولتاژ ریز شبکه هستند. $P_{\max}$ و $Q_{\max}$ ظرفیت توان اکتیو و راکتیو هر واحد DG است. با استخراج فرکانس و ولتاژ از روابط (۱) و (۲) مقدار لحظه ای مرجع ولتاژ به دست می آید. با توجه به شکل (۲) می توان نتیجه گرفت با V و f یکسان هرچه شیب دروپ کمتر باشد توان خروجی بیشتری می توان از اینورتر دریافت کرد. با فرکانس یکسان بین DG ها دروپ کنترل P - f می تواند توان اکتیو را به سادگی تقسیم کند اما دروپ کنترل Q - V همیشه دارای خطای تقسیم توان راکتیو (ناشی از عدم تطبیق ولتاژ خروجی هر اینورتر به دلیل یکسان نبودن امپدانس خط) است.



شکل ۲. دروپ کنترل فرکانس، (b) دروپ کنترل ولتاژ [۱۲]

امپدانس مجازی

امپدانس مجازی تطبیقی

در این مقاله امپدانس مجازی برای تطبیق اختلاف امپدانس خط استفاده شده که می تواند به صورت رابطه ۵ بیان شود:

$$Z_{vir} = Z_{ref} - Z_{est} \quad (5)$$

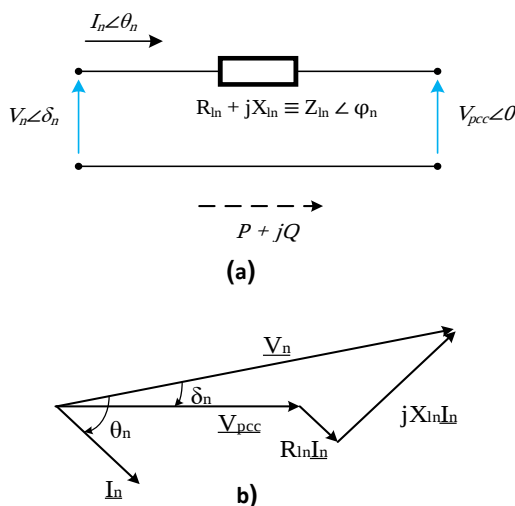
که Z_{vir} و Z_{est} به ترتیب مقدار امپدانس مجازی و امپدانس تخمین زده شده است. Z_{ref} مقدار مرجع امپدانس جبران سازی است که به طور پیش فرض به هر اینورتر اعمال کرده ایم.

محاسبه تخمین امپدانس خط

طبق قواعد مداری، اگر از امپدانس خط اینورتر جریانی کشیده نشود، ولتاژ دو سر خط برابر است، یعنی دامنه ولتاژ و فاز نقطه PCC برای هر اینورتر معلوم است (ولتاژ و فاز نقطه PCC را داریم) هنگامی که هر اینورتر در بار نامی باشد، از نقطه PCC جریان نامی کشیده می شود. در ابتدا نقطه PCC ولتاژ نامی با زاویه صفر خواهد داشت. این مقدار را برای هر اینورتر برابر با مقدار ولتاژ نامی شبکه با زاویه فاز صفر در نظر می گیریم با توجه به شکل (۳) به رابطه ۶ می رسیم:

$$R_{in} + jX_{in} = \frac{V_n \angle \delta_n - V_{pcc} \angle 0}{I_n \angle \theta_n} \quad (6)$$

از رابطه (۶) و اندازه گیری جریان هر اینورتر، مقدار R_{est} و X_{est} امپدانس خط هر اینورتر به دست می آید که به ترتیب مقاومت و راکتانس فیزیکی تخمین زده شده خط هستند. با توجه به اینکه ریز شبکه همیشه در بار نامی نیست و ولتاژی که برای هر اینورتر ثابت فرض کرده بودیم ممکن است اشتباه باشد، ریز شبکه را در ابتدا با بار نامی راه اندازی می کنیم تا در نقطه PCC به ولتاژ نامی با زاویه فاز صفر برسیم.

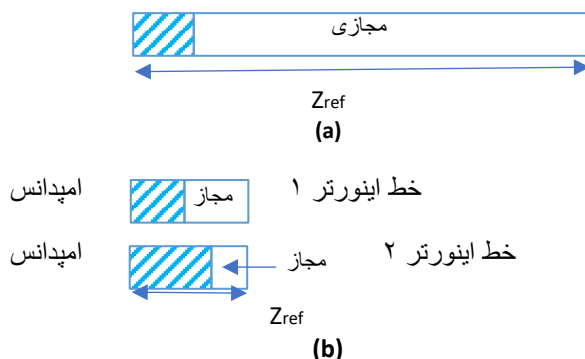


شکل ۳. (a) دیاگرام توان مداری، (b) دیاگرام توان برداری

رگولاسیون ولتاژ

در روش امپدانس مجازی متداول، مقدار امپدانس مجازی خیلی بیشتر از امپدانس واقعی در نظر گرفته می شود تا عدم تطابق امپدانس خط در مقابله با امپدانس مجازی ناچیز باشد تا خاصیت سلفی خط بلند (انتقال) برای دروپ $P-f$ و $Q-V$ افزایش یابد [۸] که این امر خود باعث افت ولتاژ شدید و بدتر شدن رگولاسیون ولتاژ

می شود. این موضوع به خوبی در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل، قسمت هاشور خورده، امپدانس واقعی را نشان می دهد.



شکل ۴. (a) امپدانس مجازی متداول، (b) امپدانس مجازی تطبیقی

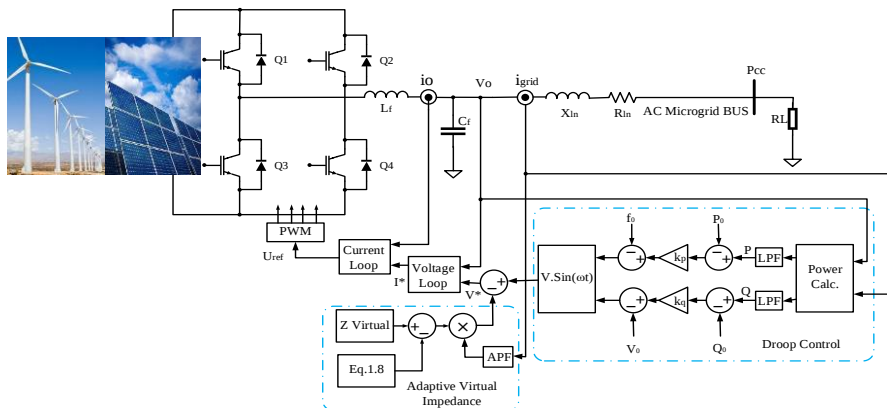
اما روش امپدانس تطبیقی، مقدار خطای عدم تطابق را جبران می کند در نتیجه افت ولتاژ کمتری نسبت به حالت قبل خواهیم داشت و رگولاسیون بهبود پیدا می کند.

کنترل امپدانس مجازی، عملکرد هر DG را یکسان خواهد کرد. به دلیل عملکرد یکسان، هر DG می تواند توان راکتیو را به طور دقیق تقسیم کند اما قبل از اینکه امپدانس مجازی کار کند تخمین امپدانس لازم است. از طریق این روش می توان امپدانس تخمین زده را در قسمت امپدانس مجازی قرارداد تا امپدانس مجازی تطبیقی به دست آید. همان طور که دیده می شود امپدانس کل دو اینورتر برابر می شود. در این حالت ممکن است امپدانس مجازی مقادیر منفی نیز داشته باشد.

روش ارائه شده افزایش کارایی در اشتراک توان راکتیو را در پی خواهد داشت. توپولوژی مدار در شکل (۵) نشان داده شده است. در این توپولوژی LPF^۱ برای فراهم کردن مؤلفه اصلی توان و همچنین برای سادگی محاسبات استفاده شده است. فیلتر APF^۲ یک فیلتر تمام گذر با دامنه یک و فاز ۹۰ درجه است که جریان پس فاز سلف را شبیه سازی می کند. در حالت پایدار هر اینورتر، اطلاعات جریان را برای محاسبه تخمین امپدانس هر ماژول استفاده می کند که عدم تطابق امپدانس هر خط را منعکس می کند. در حالی که امپدانس مجازی برای جبران عدم تطابق منعکس شده به کار برده شده، خطای تقسیم توان راکتیو به خوبی برطرف شده است. هنگامی که بار تغییر می کند امپدانس مجازی تطبیقی به سرعت به این تغییر پاسخ می دهد.

^۱ Low Pass Filter

^۲ Active Power Filter



شکل ۵. توپولوژی امیدانس مجازی تطبیقی پیشنهادی

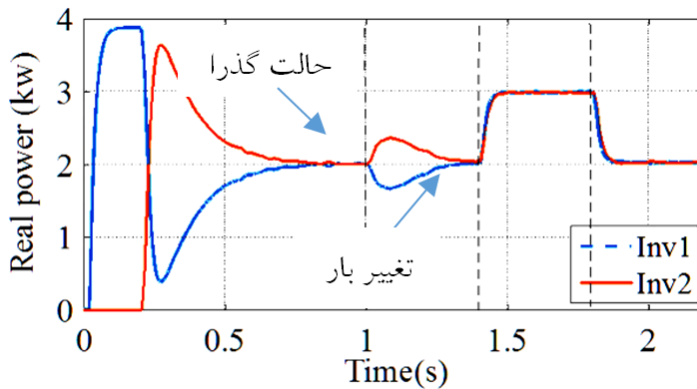
نتایج شبیه‌سازی

مدل یک ریز شبکه درمتلب/سیمولینک برای اثبات روش ارائه شده شبیه سازی شده است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است ریز شبکه شبیه سازی شده، از دو اینورتر با توان نامی یک‌سان و یک‌بار خطی تشکیل شده است. دو اینورتر بار را به‌طور مساوی تقسیم می‌کنند. پارامترهای کنترلی در جدول (۱) آورده شده است.

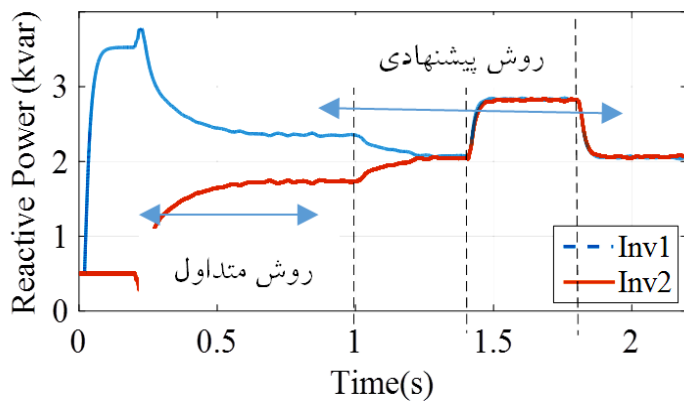
جدول ۱. پارامترهای دروپ کنترل

پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی	$U_{RMS} = 311 \text{ V}$
فرکانس نامی	$f = 50 \text{ Hz}$
بار نامی	$2 \text{ kW}; 1.5 \text{ kVar}$
شیب دروپ فرکانس	$k_p = 1e-5 \text{ Rad}/(\text{Sec} \cdot W)$
شیب دروپ ولتاژ	$k_q = 1e-3 \text{ V/Var}$
ثابت زمانی فیلتر پایین‌گذر	0.0032 Sec
فیلتر LC	$L_f = 1.5 \text{ mH}; C_f = 55 \mu F$
اینورتر توان نامی	$2 \text{ kW}; 1.5 \text{ kVar}$
اینورتر توان نامی حداکثر	$4 \text{ kW}; 3 \text{ kVar}$
امپدانس خط ۱	$L_1 = 1 \text{ mH}; R_1 = 0.1 \Omega$
امپدانس خط ۲	$L_2 = 1.5 \text{ mH}; R_2 = 0.15 \Omega$
امپدانس مجازی مرجع	$X_{vir} = 0.314 \Omega; R_V = 0.2 \Omega$

عملکرد سیستم با استفاده از تکنیک دروپ کنترل پیشنهاد شده در شکل‌های (۶) تا (۹) نشان داده شده است. در ابتدا اینورتر ۱ بار را به‌تنهایی تغذیه می‌کند. در زمان $t = 0.2 \text{ s}$ اینورتر ۲ وارد مدار شده و هر دو اینورتر توان بار را تأمین می‌کنند. در این لحظه هر دو اینورتر در بار نامی هستند که از دروپ کنترل متداول استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۶-a) دیده می‌شود، توان اکتیو همیشه به‌خوبی تقسیم می‌شود همچنین شکل (۶-a) نشان می‌دهد که این کنترلر اثر کوچک‌گذاری در تقسیم توان اکتیو در بین اینورترها گذاشته است؛ اما در شکل (۶-b) می‌بینیم که توان راکتیو به دلیل عدم تطابق امپدانس خط دارای خطای قابل توجه ۷۰ درصد می‌باشد. در زمان $t=1\text{s}$ بلوک امپدانس مجازی تطبیقی فعال‌شده است و بعد از گذشت حالت گذرا، توان راکتیو به‌خوبی با خطای کمتر از ۵ درصد تقسیم می‌شود و خطای تقسیم توان راکتیو بعد از فعال‌سازی بلوک تقریباً به صفر کاهش پیدا کرده است. در این لحظه هر اینورتر مقدار R و L تخمین زده‌شده را در حافظه‌ی خود ذخیره می‌کنند تا هر موقع لازم شد از آن استفاده کند که در شکل (۷) نشان داده‌شده است. پس‌از آن دیگر لزومی ندارد که اینورترها در بار نامی باشند. هر گاه اینورترها به بار نامی رسیدند و تقسیم توان به‌خوبی صورت گرفت مقدار R و L ذخیره می‌شود. بعد از مدتی در زمان بار $t=1.4\text{s}$ از $2\text{kw}/1.5\text{kvar}$ به $3\text{kw}/2.25\text{kvar}$ افزایش پیدا می‌کند که در این حالت توان راکتیو نیز به‌خوبی تقسیم‌شده است.

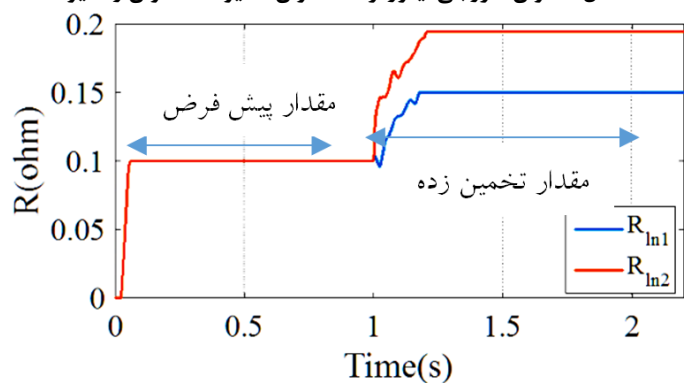


(a)

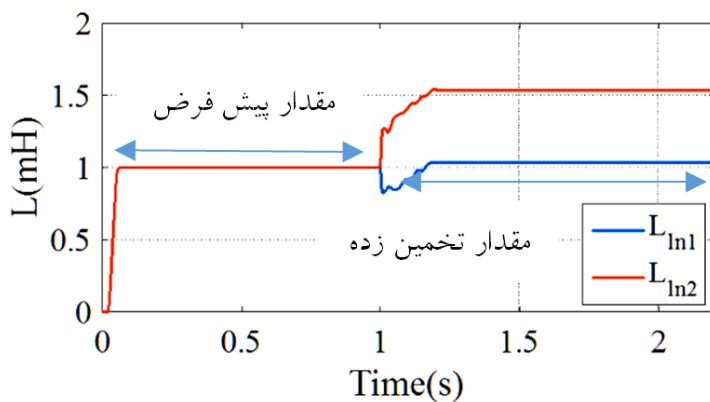


(b)

شکل ۶. توان خروجی اینورتر، (a): توان اکتیو، (b): توان راکتیو



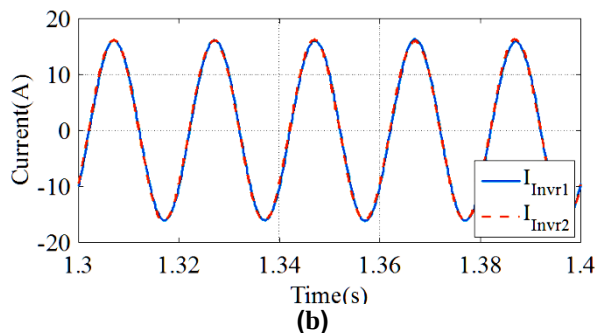
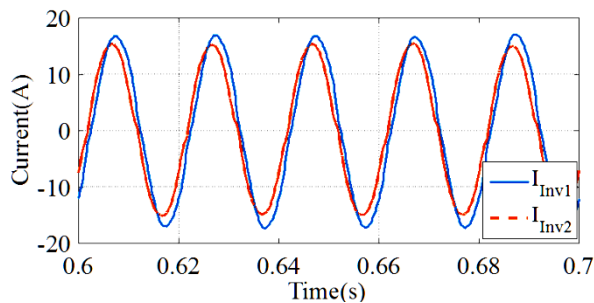
(a)



(b)

شکل ۷. پارامترهای تخمین زده شده، (a): مقاومت، (b): سلف

جریان هر اینورتر در شکل (۸) نشان داده شده است در شکل (۸-a) دامنه و فاز جریان‌ها یکسان نیست اما بعد از فعال‌سازی بلوک امپدانس مجازی تطبیقی در شکل (۸-b) در اثر عملکرد روش ارائه‌شده تقریباً یکسان شده است. هنگامی که بار تغییر می‌کند تقسیم توان راکتیو با توجه به کنترل تطبیقی امپدانس مجازی به‌طور دقیق حفظ می‌شود.

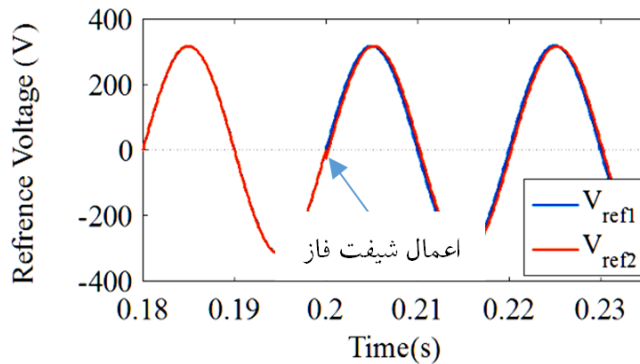


شکل ۸. جریان خروجی اینورتر، (a): قبل از فعال‌سازی کنترل تطبیقی، (b): بعد از فعال‌سازی کنترل تطبیقی

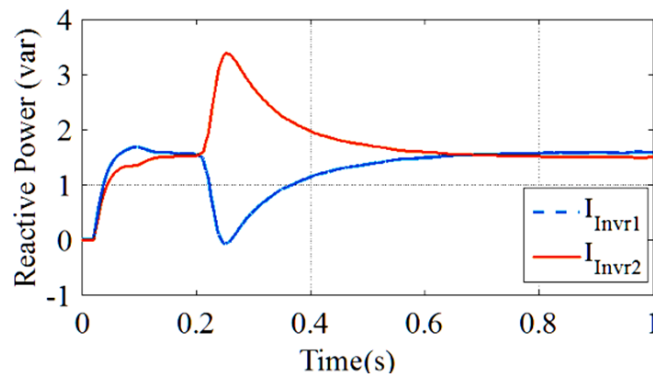
شیفت مرجع‌های سینوسی

در دروپ کنترل با توجه به شیب مشخصه‌ها اگر اینورتری بی‌بار باشد، فرکانس آن افزایش پیدا کرده و بالطبع زاویه فاز آن نیز افزایش می‌یابد.

از آنجایی که ممکن است مرجع‌ها در درازمدت اختلاف‌فاز پیدا کنند، در شبیه‌سازی دیگری مرجع‌های سینوسی ولتاژ یکی از اینورترها را تعدماً ۵ درجه شیفت داده‌ایم تا اثرات آن را در تقسیم توان راکتیو مشاهده کنیم. همان‌طور که در شکل (۹-a) نشان داده شده است. در زمان $t = 0.2$ s مرجع سینوسی ولتاژ اینورتر اول ۵ درجه شیفت داده‌شده و در شکل (۹-b) می‌بینیم که توان راکتیو بعد از گذشت چند سیکل و عبور از حالت گذرا دوباره به‌خوبی بین اینورترها تقسیم می‌شود. تغییر فاز مرجع در این شبیه‌سازی به عنوان یک اغتشاش یا نویز تلقی می‌شود. به عبارت دیگر بر اساس شکل ۹ روش پیشنهادی نسبت به تغییرات پایدار و گذرا در تمامی متغیرهای سیستم از مقاومت خوبی برخوردار می‌باشد که از دیدگاه حساسیت به نویز در کاربرد عملی این روش بسیار حائز اهمیت می‌باشد.



(a)



(b)

شکل ۹. (a): شیفت مرجع ولتاژ، (b): حالت گذرای توان راکتیو

از محدودیت‌های روش پیشنهادی میتوان به میزان اختلاف امپدانس خطوط و قدرت تخمین درست آن اشاره نمود. به عبارت دیگر در اختلاف امپدانس‌های بالای ۵۰ درصد روش پیشنهادی ممکن است دارای خطا در تقسیم توان راکتیو باشد. همچنین در مطالعه حاضر تنها دو اینورتر به عنوان نمونه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش تعداد منابع روش پیشنهادی دارای محدودیت تخمین صحیح امپدانس همه خطوط خواهد شد که به عنوان یک زمینه تحقیقاتی میتواند قابل توجه باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک استراتژی نوین برای تقسیم توان راکتیو بی سیم در ریز شبکه‌های جزیره‌ای مبتنی بر تخمین امپدانس خط و امپدانس مجازی تطبیقی ارائه گردید. در گام نخست، از روش تخمین امپدانس خط به منظور تسهیل فرایند کنترل امپدانس مجازی و بهبود دقت مدل سازی شبکه استفاده شد. سپس، ساختار کنترل دروپ مبتنی بر امپدانس مجازی تطبیقی معرفی گردید تا تقسیم دقیق و متناسب توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده تضمین شود. نتایج تحلیل و ارزیابی عملکرد نشان داد که استفاده هم‌زمان از تخمین امپدانس و امپدانس مجازی تطبیقی موجب دستیابی به تقسیم توان راکتیو با سرعت بالا و دقت مناسب می‌گردد.

افزون بر این، به دلیل ویژگی تطبیقی کنترل کننده، روش پیشنهادی در برابر تغییرات فرکانس ناشی از تغییر بار مقاوم بوده و حتی در شرایط گذرا نیز عملکردی مشابه حالت پایدار از خود نشان می دهد. بر این اساس، می توان نتیجه گرفت که استراتژی پیشنهادی از قابلیت بالایی برای افزایش پایداری دینامیکی، بهبود هماهنگی توان راکتیو و ارتقای قابلیت اطمینان در ریز شبکه های جزیره ای برخوردار است. در ادامه این پژوهش می توان بهینه سازی طراحی کنترلرهای حلقه ولتاژ و جریان اینورتر در امپدانس های مختلف شبکه و مجازی با شاخص های عملکردی متفاوت را مورد بررسی قرار داد.

References

- [1] Hossain, M. I., Anonto, H. Z., Rohan, A. I., Shufian, A., & Ghosh, D. K. (2025). Optimizing power distribution and stability in islanded microgrids with wind energy integration using enhanced droop and virtual impedance control. *Results in Engineering*, 27, 106970. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106970>
- [2] Yang, H., Sun, Z., Wang, H., Wang, Y., Zhu, M., Guo, L., Zhou, G., & Lyu, H. (2025). Adaptive Virtual Impedance Droop Control of Parallel Inverters for Islanded Microgrids. *Sensors*, 25(16), 5166. <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/16/5166>
- [3] Sun, W., Lin, X., Huang, L., Mu, D., & Zhang, H. (2024). Distributed sliding mode control for reactive power sharing in an islanded microgrid. *Electric Power Systems Research*, 231, 110342. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110342>
- [4] Ma, J., & Wang, H. (2025). Adaptive Virtual Complex Impedance-Based Power Sharing Control Scheme for Islanded Microgrids. *IET Smart Grid*, 8(1), e70014. <https://doi.org/10.1049/stg2.70014>
- [5] Zamani, M. A., Sidhu, T. S., & Yazdani, A. (2011). A Protection Strategy and Microprocessor-Based Relay for Low-Voltage Microgrids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(3), 1873-1883. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2120628>
- [6] Uddin, M., Mo, H., Dong, D., Elsayah, S., Zhu, J., & Guerrero, J. M. (2023). Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. *Energy Strategy Reviews*, 49, 101127. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>
- [7] Mohammed, N., Lashab, A., Ciobotaru, M., & Guerrero, J. M. (2023). Accurate Reactive Power Sharing Strategy for Droop-Based Islanded AC Microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(3), 2696-2707. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3167141>
- [8] Li, Y., & Li, Y. R. (2011). Power Management of Inverter Interfaced Autonomous Microgrid Based on Virtual Frequency-Voltage Frame. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2, 30-40. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2095046>
- [9] Pham, M. D., & Lee, H. H. (2019, 1-3 Nov. 2019). Adaptive Virtual Impedance Control Method for Accurate Reactive Power Sharing and Circulating Current Suppression in Islanded Microgrid. 2019 IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems (SCEMS 2019), <https://doi.org/10.1109/SCEMS201947376.2019.8972636>
- [10] Kumar, S., Premkumar, M., Giri, J., Sharma, S. S., Hasnain, S. M. M., Sathish, T., & Zairov, R. (2025). Exploring the spectrum: A comprehensive review of control methods in microgrid systems. *Results in Engineering*, 28, 105470. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105470>
- [11] Xiao, J., Wang, L., Bauer, P., & Qin, Z. (2023). Virtual Impedance Control for Load Sharing and Bus Voltage Quality Improvement in Low Voltage AC Microgrid.

- IEEE Transactions on Smart Grid, 15(3), 2447-2458. <https://doi.org/10.1109/TSG.2023.3325620>
- [12] Khan, M. H., Zulkifli, S. A., Tutkun, N., Ekmekci, I., & Burgio, A. (2024). Decentralized Virtual Impedance Control for Power Sharing and Voltage Regulation in Islanded Mode with Minimized Circulating Current. Electronics, 13(11), 2142. <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/11/2142>
- [13] Sabzevari, K. (2023). Improving Reactive Power Sharing in Islanded Microgrid with Transient Reactive Current Injection. Karafan Journal, 20(3), 393-417. <https://doi.org/10.48301/kssa.2023.395017.2536>
- [14] Sabzevari, K. (2021). Improving the Performance of the Adaptive Virtual Impedance Method in the Island Microgrid. Karafan Journal, 18(3), 115-135. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.130680>
- [15] Pathak, G., Singh, B., & Panigrahi, B. K. (2024). Utility Interactive Renewable Microgrid with Backup Power Functionality. IETE Journal of Research, 70(4), 4333-4344. <https://doi.org/10.1080/03772063.2023.2194282>
- [16] Pham, X. H. (2024). Power Control of Parallel Inverters in Microgrid. VNUHCM Journal of Engineering and Technology, 7(3), 2299-2312. <https://doi.org/10.32508/stdjet.v7i3.1080>
- [17] Ding, M., Tao, Z., Hu, B., Tan, S., & Yokoyama, R. (2024). Parallel Operation Strategy of Inverters Based on an Improved Adaptive Droop Control and Equivalent Input Disturbance Approach. Electronics, 13(3), 486. <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/3/486/>
- [18] Escobar, E. D., Betancur, D., & Isaac, I. A. (2024). Optimal Power and Battery Storage Dispatch Architecture for Microgrids: Implementation in a Campus Microgrid. Smart Grids and Sustainable Energy, 9(2), 27. <https://doi.org/10.1007/s40866-024-00210-8>
- [19] Mahmood, H., Michaelson, D., & Jiang, J. (2015). Accurate Reactive Power Sharing in an Islanded Microgrid Using Adaptive Virtual Impedances. IEEE Transactions on Power Electronics, 30(3), 1605-1617. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2314721>
- [20] Zong, S., Lyu, Y., & Wang, C. (2023). Control strategy of multiple interlinking converters for low-voltage hybrid microgrid based on adaptive droop. Energy Reports, 9, 721-731. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.177>
- [21] Aluko, A., Buraimoh, E., Oni, O. E., & Davidson, I. E. (2022). Advanced Distributed Cooperative Secondary Control of Islanded DC Microgrids. Energies, 15(11), 3988. <https://doi.org/10.3390/en15113988>
- [22] Zhang, Z., Gao, S., Zhong, C., & Zhang, Z. (2023). Accurate Active and Reactive Power Sharing Based on a Modified Droop Control Method for Islanded Microgrids. Sensors, 23(14), 6269. <https://doi.org/10.3390/s23146269>
- [23] Baharizadeh, M., Golsorkhi, M. S., & Savaghebi, M. (2023). Secondary control with reduced communication requirements for accurate reactive power sharing in AC microgrids. IET Smart Grid, 6(6), 638-652. <https://doi.org/10.1049/stg2.12127>
- [24] Wan, X., & Wu, J. (2022). Distributed Hierarchical Control for Islanded Microgrids Based on Adjustable Power Consensus. Electronics, 11(3), 324. <https://doi.org/10.3390/electronics11030324>
- [25] Widanagama Arachchige, L., & Ediriweera, S. (2023). Adaptive Droop Controller for Energy Management of Islanded AC Microgrids. <https://doi.org/10.1109/MERCon60487.2023.10355428>

- [26] Yang, J., Jin, X., Wu, X., Chen, M., & Agelidis, V. (2017). A Wireless Power Sharing Control Strategy for Hybrid Energy Storage Systems in DC Microgrids. *Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society*, 32, 135-144.
<https://dgjxb.ces-transaction.com/EN/Y2017/V32/I10/135>
- [27] Arise, N., Saiteja, M., Siddu, V., Kavya, V., & Vijay, M. (2024). Optimized control strategy for a three-phase grid connected inverter using PI controller and DQ frame. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, 13, 790.
<https://doi.org/10.11591/ijape.v13.i4.pp790-797>