



# Improving the Performance of the Adaptive Virtual Impedance Method in the Island Microgrid

Kiomars Sabzevari<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

## ARTICLE INFO

**Received:** 01.03.2021

**Revised:** 04.30.2021

**Accepted:** 05.17.2021

### Keyword:

Fault control  
Active and reactive power distribution  
Voltage regulation  
Adaptive virtual impedance  
Circulating current

### \*Corresponding Author:

Kiomars Sabzevari

**Email:**

k.sabzevari52@gmail.com

## ABSTRACT

One of the main challenges in island microgrids is the distribution of reactive power between distributed generation sources. The use of adaptive virtual impedance has been introduced as a method of improving the distribution of reactive power between distributed generation sources. Although the use of adaptive virtual impedance improves the reactive power distribution between the distributed generation sources and reduces the circulating current, it causes a voltage drop and the output voltage range of the distributed generation unit is reduced. In this paper, a control strategy for improving the adaptive virtual impedance method is proposed. In the proposed control strategy, the voltage drop across the output impedance of the distributed generation units is compensated due to the use of increased virtual impedance, and the load supply voltage is adjusted to the nominal value. The proposed control method, in addition to maintaining the advantages of using adaptive virtual impedance such as appropriate distribution of active and reactive capacities between distributed generation units and reducing circulating current, compensates for the voltage drop in the output impedance. In the proposed method, the output reference voltage of the drop control method is adjusted within the allowable range in proportion to the load change. To evaluate performance and efficiency, the proposed control method is implemented on an island microgrid consisting of two distributed generation units. The simulation results show the performance and efficiency of the proposed method.





شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۲۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



## بهبود عملکرد روش امپدانس مجازی تطبیقی در ریزشبکه جزیره‌ای

کیومرث سبزواری<sup>\*۱</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
یکی از معضلات اصلی در ریزشبکه‌های جزیره‌ای، تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده می‌باشد. استفاده از امپدانس مجازی تطبیقی به‌عنوان یکی از راهکارهای بهبود تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده معرفی شده است. اگرچه استفاده از امپدانس مجازی تطبیقی سبب بهبود تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده و کاهش جریان گردشی می‌شود اما سبب ایجاد افت ولتاژ شده و دامنه ولتاژ خروجی واحد تولیدی پراکنده کاهش می‌یابد. در این مقاله، 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 می‌شود و ولتاژ تغذیه بار در مقدار نامی تنظیم می‌گردد. روش کنترلی پیشنهادی، علاوه بر حفظ مزایای استفاده از امپدانس مجازی تطبیقی نظیر تقسیم مناسب توان‌های اکتیو و راکتیو بین واحدهای تولید پراکنده و کاهش جریان گردشی، افت ولتاژ ایجاد شده در امپدانس خروجی جبران می‌شود. در روش پیشنهادی ولتاژ مرجع تولیدی روش کنترل اکتیو متناسب با تغییر بار، در محدوده مجاز تنظیم می‌شود. برای ارزیابی عملکرد و کارایی، روش کنترلی پیشنهادی، روی یک ریزشبکه جزیره‌ای شامل دو واحد تولید پراکنده اجرا شد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده عملکرد و کارایی مناسب روش پیشنهادی می‌باشد.	دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۱۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷
	<b>کلید واژگان:</b> کنترل اکتیو تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو تنظیم ولتاژ امپدانس مجازی تطبیقی جبران گردشی
	<b>*نویسنده مسئول:</b> کیومرث سبزواری <b>پست الکترونیکی:</b> <a href="mailto:k.sabzevari52@gmail.com">k.sabzevari52@gmail.com</a>



## مقدمه

در سال‌های اخیر، ریزشکبه‌ها، شامل منابع تولید پراکنده (DG)<sup>۱</sup>، دستگاه‌های ذخیره انرژی و به دلیل پایداری، ایمنی و قابلیت اطمینان بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌طور کلی ریزشکبه، بهره‌وری منابع تولید پراکنده (مانند سلول‌های خورشیدی، پیل سوختی، میکروتوربین، CHP و غیره) را افزایش می‌دهد تا فرصت‌های بیشتری برای هماهنگی DG‌های مختلف از طریق برابری (تولید گرما و برق) ایجاد کند [۱-۳].

ریزشکبه‌ها می‌توانند به شبکه اصلی قدرت متصل گردند یا به‌طور جزیره‌ای بهره‌برداری شوند. هر دو حالت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای نیاز به سیستم‌های کنترل خاصی دارند. در حالت متصل به شبکه اصلی، سیستم کنترل به‌گونه‌ای است که مقادیر مشخصی از توان اکتیو و راکتیو به شبکه تزریق کند. در این حالت ولتاژ و فرکانس توسط شبکه اصلی کنترل می‌شود. در حالت جزیره‌ای، سیستم کنترل باید ولتاژ و فرکانس را در محدوده مجاز نگه دارد، توان را به‌طور مناسب بین منابع تقسیم کند و پایداری سیستم را حفظ نماید [۴-۶]. به‌منظور تحقق این اهداف از دو رویکرد کنترل متمرکز و کنترل غیرمتمرکز استفاده می‌شود. در کنترل غیرمتمرکز یا محلی، هریک از منابع تولید پراکنده، به‌صورت مستقل کنترل می‌شوند [۷]. درحالی‌که در کنترل متمرکز با استفاده از ارتباط مخابراتی اطلاعات موردنیاز به مرکز کنترل ارسال و پس از پردازش در کنترل منابع به‌کار گرفته می‌شوند [۸؛ ۹].

در زمینه کنترل ریزشکبه‌های جزیره‌ای، روش‌های کنترلی گوناگونی ارائه شده است. پرکاربردترین روش، کنترل اکتیو است [۱۰]. روش کنترل اکتیو مرسوم، اساساً برای منابع متصل به خطوط انتقال با خاصیت سلفی طراحی شده است. در شبکه‌های ولتاژ پایین که دارای خاصیت مقاومتی می‌باشند، این روش کنترلی موفق به تقسیم مناسب توان (مخصوصاً توان راکتیو) با دقت مناسب نمی‌شود علاوه‌بر آن نابرابری و عدم تقارن در امپدانس خطوط که مسئله‌ای رایج در شبکه‌های توزیع می‌باشد و همچنین برابر نبودن امپدانس خروجی منابع تولید پراکنده، کنترل دقیق توان راکتیو در حالت متصل به شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و تقسیم توان راکتیو در حالت جزیره‌ای را نیز با مشکلاتی مواجه می‌سازد [۱۱؛ ۱۲]. از دیگر مشکلات روش کنترل اکتیو وجود جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده است. جریان گردشی باعث افزایش تلفات، اشغال ظرفیت واحدهای تولید پراکنده و کاهش کارایی کنترل اکتیو می‌گردد. در [۱۳؛ ۱۴] مفهوم امپدانس مجازی برای اصلاح روش اکتیو پیشنهاد شده است. استفاده از امپدانس مجازی، خاصیت سلفی خط را افزایش می‌دهد؛ در نتیجه تزویج میان توان‌های اکتیو و راکتیو به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تضعیف می‌گردد. هرچند که امپدانس مجازی موجب اصلاح عملکرد روش اکتیو می‌شود ولی قادر به حذف جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده موازی نمی‌باشد. در [۱۵؛ ۱۶] ایده امپدانس مجازی تطبیقی برای اصلاح روش امپدانس مجازی ارائه شده است. در این روش بر کاهش جریان گردشی، مقدار امپدانس مجازی ثابت نیست بلکه مقدار آن هر لحظه طوری تغییر می‌کند که نابرابری امپدانس خطوط بین منابع تولید پراکنده را از بین ببرد و جریان گردشی را کاهش دهد. با وجود مزایای روش امپدانس مجازی، استفاده از آن سبب افزایش افت ولتاژ روی امپدانس خروجی منابع تولید پراکنده می‌شود. افزایش افت ولتاژ باعث کاهش کیفیت توان، به دلیل کاهش ولتاژ باس‌های تغذیه‌کننده بارهای متصل به ریزشکبه می‌گردد.

<sup>1</sup> Distributed Generation

<sup>2</sup> Droop control

در این مقاله به منظور جبران افت ولتاژ ناشی از به کارگیری امیدانس مجازی تطبیقی یک روش کنترلی اصلاحی ارائه شده است. در روش کنترلی پیشنهادی ولتاژ مرجع مورد استفاده در کنترل افی مرسوم طوری تنظیم می شود تا همواره ولتاژ باسی که منبع تولید پراکنده به آن متصل است در مقدار تعیین شده تثبیت گردد.

### سیستم کنترلی مبتنی بر امیدانس مجازی

شکل (۱) مدار معادل یک مبدل منبع ولتاژ که از طریق امیدانس خط  $Z e^{j\theta} = R + jX$  به باس تغذیه بار متصل شده است را نشان می دهد. توان اکتیو و راکتیو تحویلی به باس به صورت زیر به دست می آیند.

$$P = \frac{V_s^2}{Z} \cos \theta - \frac{V_s V_L}{Z} \cos(\theta + \delta) \quad (1)$$

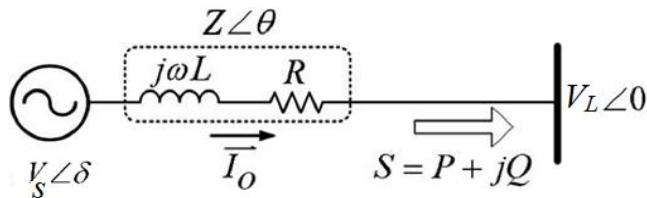
$$Q = \frac{V_s^2}{Z} \sin \theta - \frac{V_s V_L}{Z} \sin(\theta + \delta) \quad (2)$$

اگر فرض شود امیدانس خط کاملاً اندوکتیو است  $\theta=90^\circ$  و اختلاف زاویه بین ولتاژ منبع و باس تغذیه،  $\delta$  کوچک باشد، آن گاه روابط (۱) و (۲) به صورت زیر ساده می شوند:

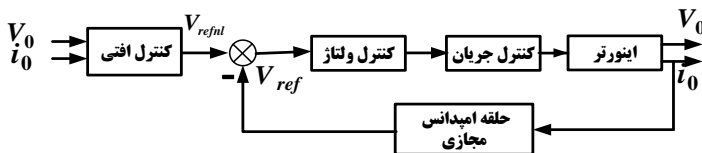
$$P = \frac{V_s V_L}{Z} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X} - \frac{V_s V_L}{X} \cos \delta \quad (4)$$

روابط (۳) و (۴) نشان دهنده وجود یک رابطه قوی بین توان اکتیو و فرکانس و همچنین بین توان راکتیو و ولتاژ است. روابط (۳) و (۴) اساس روش کنترل افی مرسوم را تشکیل می دهد؛ بنابراین برای عملکرد صحیح روش کنترل افی، امیدانس خط باید سلفی باشد.



شکل ۱. مدار معادل یک مبدل منبع ولتاژ متصل به باس تغذیه بار



شکل ۲. سیستم کنترل DG با استفاده از امپدانس مجازی

برای افزایش خاصیت سلفی و همچنین از بین بردن نابرابری امپدانس خروجی منابع تولید پراکنده موازی از امپدانس مجازی استفاده می‌شود. بلوک دیاگرام سیستم کنترل منبع تولید پراکنده در حالت جزیره‌ای در شکل (۲) نشان داده شده است. با تنظیم امپدانس مجازی، استفاده شده در سیستم کنترل منبع تولید پراکنده، ولتاژ مبنا مطابق رابطه زیر تغییر داده می‌شود [۱۶].

$$V_{ref} = V_{refnl} - Z_D(s) \cdot i_0 \quad (۵)$$

که در آن  $Z_D(s)$  امپدانس مجازی،  $V_{ref}$  ولتاژ مرجع خروجی کنترل افتی در حضور حلقه امپدانس مجازی و  $V_{refnl}$  ولتاژ مرجع در حالت بدون بار می‌باشد.

مقدار امپدانس مجازی برای شرایط ماندگار ریزشیکه و به‌ازای یک مقدار خاص امپدانس خروجی منبع تولید پراکنده و امپدانس خط به‌دست می‌آید. در صورتی که امپدانس خط و امپدانس خروجی منبع تولید پراکنده در اثر شرایط محیطی و عملکرد ریزشیکه تغییر کند، تعیین یک مقدار خاص برای امپدانس مجازی نمی‌تواند اهداف موردنظر را به‌طور مناسب برآورده سازد. همان‌طور که از شکل (۲) و همچنین رابطه (۵) مشخص می‌باشد، حلقه امپدانس مجازی باعث کاهش ولتاژ مرجع ورودی به بلوک کنترل ولتاژ می‌شود.

### سیستم کنترلی مبتنی بر امپدانس مجازی تطبیقی

در شرایطی که مقدار بارهای ریزشیکه تغییر کنند و امپدانس خروجی واحدهای تولید پراکنده یا امپدانس خطوط متصل‌کننده واحدها به باس‌های تغذیه برابر نباشند، روش کنترلی مبتنی بر امپدانس مجازی با مقدار ثابت نمی‌تواند جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده را به‌طور مؤثر کاهش دهد. برای اصلاح عملکرد روش امپدانس مجازی، ایده امپدانس مجازی تطبیقی ارائه شده است. براساس این ایده مقدار امپدانس مجازی ثابت نمی‌باشد و مقدار آن با توجه به وضعیت ریزشیکه و اهداف کنترلی موردنظر مانند تقسیم مناسب توان راکتیو و کاهش جریان گردشی بین منابع تولید پراکنده تغییر می‌یابد.

امپدانس مجازی تطبیقی  $Z_D^*(s)$  مطابق رابطه (۶)، از دو قسمت ثابت و متغیر تشکیل شده است. قسمت ثابت همان امپدانس مجازی متداول  $Z_D(s)$  می‌باشد که مقدار آن برابر  $LDO$  در نظر گرفته می‌شود. قسمت متغیر بر اساس الگوریتم نشان داده شده در شکل (۳) چنان تغییر می‌کند که جریان گردشی کاهش یابد.

$$Z_D^*(s) = Z_D(s) + \frac{1}{s} h(i_H) \cdot \Delta Z \quad (۶)$$

$\Delta Z$  تعیین‌کننده مقدار تغییر قسمت متغیر امپدانس مجازی تطبیقی می‌باشد و  $h(i_H)$  در هر مرحله از تکرار با توجه به مقدار جریان گردشی  $i_H$  می‌تواند یکی از مقادیر ۰، ۱- و ۱ باشد (شکل ۳). اگر جریان گردشی توسط DG ایجاد شود مقدار  $h(i_H)$  برابر ۱ و در نتیجه مقدار امپدانس مجازی تطبیقی افزایش می‌یابد. اگر جهت جریان گردشی برعکس گردد، مقدار  $h(i_H)$ ، ۱- در نظر گرفته می‌شود و امپدانس مجازی کاهش می‌یابد. در صورتی که جریان

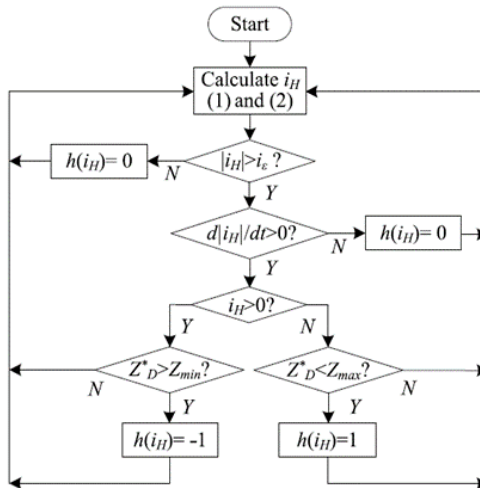
گردشی از حد مجاز،  $i_e$ ، کمتر باشد مقدار  $h(i_H)$  صفر می‌شود. در این الگوریتم  $Z_{min}$  و  $Z_{max}$  به ترتیب کمینه و بیشینه مقدار مجاز امیدانس مجازی تطبیقی تعریف شده است.

برای محاسبه جریان گردشی بین واحدهای تولید پراکنده موازی یکی از منابع تولید پراکنده به‌عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود و جریان گردشی دیگر واحدها به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

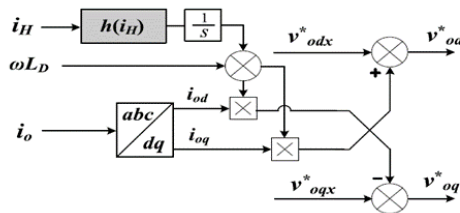
$$i_{Hi} = k_i \cdot i_{unit} - i_{oi} \quad (7)$$

$$i_{unit} = \frac{\sum_{i=1}^n i_{oi}}{\sum_i^n k_i} \quad (8)$$

در روابط فوق،  $i_{Hi}$  جریان گردشی منبع تولید پراکنده  $i$ ام،  $k_i$  نسبت ظرفیت نامی منبع تولید پراکنده  $i$ ام به ظرفیت نامی منبع تولید پراکنده مبنا و  $i_{oi}$  جریان خروجی منبع تولید پراکنده  $i$ ام می‌باشد. دیاگرام کنترل امیدانس مجازی تطبیقی در قاب dq در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳. الگوریتم تعیین  $h(i_H)$  [۱۶]



شکل ۴. دیاگرام کنترلی امیدانس مجازی تطبیقی

## استراتژی کنترلی پیشنهادی

هرچند در روش کنترلی امپدانس مجازی تطبیقی مقدار امپدانس مجازی متغیر است ولی همچنان مطابق رابطه (۵) باعث کاهش ولتاژ مرجع می‌گردد. کاهش ولتاژ مرجع به نوبه خود سبب کاهش ولتاژ در باس متصل به DG،  $V_o$  در شکل (۵) و همچنین کاهش ولتاژ در باس مشترک،  $V_{pcc}$  می‌شود.

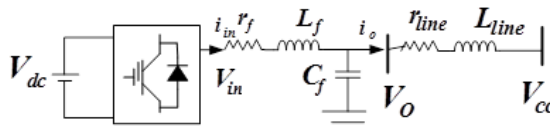
با استفاده از مدار معادل تونن ولتاژ در باس متصل به DG از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۳]:

$$V_o = G(s)V_{ref} - Z_o(s).i_o \quad (9)$$

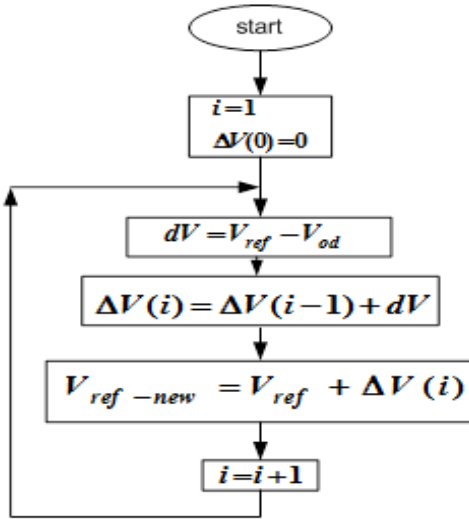
در رابطه فوق  $G(s)$  بهره ولتاژ سیستم کنترل حلقه بسته و  $Z_o(s)$  امپدانس معادل تونن از دید باس متصل به DG می‌باشد. در فرکانس اصلی اندازه  $G(s)$  برابر واحد و فاز آن صفر است و  $Z_o(s)$  به واسطه استفاده از امپدانس مجازی رفتاری کاملاً اندوکتیو دارد.

در این مقاله برای جبران افت ولتاژ،  $\Delta V = V_{ref} - V_o$  الگوریتم شکل (۶) پیشنهاد می‌شود. مطابق الگوریتم پیشنهادی اختلاف ولتاژ بین  $V_{ref}$  و  $V_o$  به دست آمده و این مقدار به  $V_{ref}$  قبلی اضافه می‌شود. در نتیجه ولتاژ مرجع روش کنترل افی متناسب با میزان افت ولتاژ تغییر می‌یابد. بدین ترتیب مقدار ولتاژ در باس متصل به DG در مقدار تعیین شده به عنوان ولتاژ مرجع تثبیت می‌گردد.

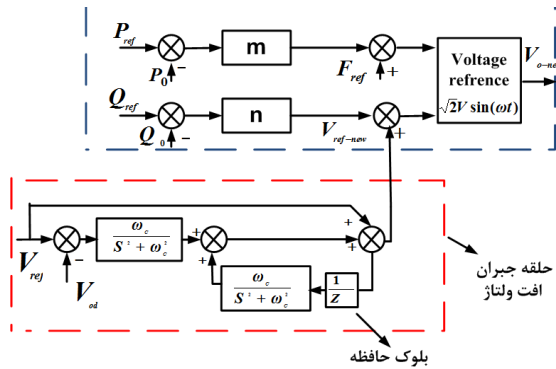
نحوه اجرای الگوریتم پیشنهادی برای جبران افت ولتاژ در شکل (۷) نشان داده شده است. پارامترهای  $n$ ،  $m$  به ترتیب ضرایب توان اکتیو و راکتیو روش افی متداول و  $\omega_c$  فرکانس قطع فیلتر پایین گذر می‌باشند. مطابق شکل (۷) در هر لحظه، افت ولتاژ حاصل از اختلاف بین ولتاژ مرجع با ولتاژ خروجی باس متصل به DG (در محور  $d$ ) به دست می‌آید و با استفاده از یک بلوک حافظه با افت ولتاژ قبلی جمع می‌شود و افت ولتاژ نهایی به مقدار ولتاژ مرجع اضافه می‌گردد. علت استفاده از فیلتر پایین گذر حذف هارمونیک‌های فرکانس بالا در ولتاژ  $V_{od}$  می‌باشد. همچنین علت استفاده از فیلتر پایین گذر دوم در حلقه مربوط به بلوک حافظه، جلوگیری از افزایش خطای ناشی از وجود هارمونیک‌های باقی مانده در خروجی فیلتر اول است.



شکل ۵. مدار معادل یک واحد تولید پراکنده متصل به باس



شکل ۶. الگوریتم جبران افت ولتاژ



شکل ۷. بلوک دیاگرام روش افی اصلاح شده

### پایداری سیستم و تعیین محدوده مجاز امیدانس مجازی تطبیقی

مقدار بیشینه امیدانس مجازی، با توجه به پایداری سیستم به دست می آید. برای به دست آوردن مقدار بیشینه امیدانس مجازی، ابتدا مدل سیگنال کوچک سیستم به دست می آید. مدل سیگنال کوچک واحد تولید پراکنده در پیوست ۱ آمده است. مقادیر ویژه ماتریس AS رفتار سیستم را نشان می دهد.

مقادیر ویژه سیستم وقتی مقدار امیدانس مجازی از مقدار 1mH تا 15mH در صورتی که مقدار اندوکتانس خارجی برابر 6mH باشد در شکل (۸) نشان داده شده است. همان طور که مشخص است با افزایش امیدانس مجازی مقادیر ویژه به سمت محور موهومی حرکت می کنند و وقتی که  $L_f = 7.8mH$  باشد. مقادیر ویژه در ناحیه ناپایدار قرار می گیرند و سیستم نوسانی می شود و در صورتی که مقدار اندوکتانس خارجی به 20mH افزایش یابد مقادیر ویژه هیچ وقت وارد ناحیه ناپایدار نمی شوند؛ بنابراین در صورتی که اندوکتانس خارجی زیاد باشد می توان نتیجه گرفت در صورت تغییرات اندوکتانس مجازی، سیستم ناپایدار نمی شود. مقدار امیدانس مجازی با توجه به اندوکتانس خارجی و



حاشیه پایداری انتخاب می‌شود. توصیه می‌شود مقدار امپدانس مجازی، کوچک‌تر از امپدانس خارجی انتخاب شود تا محدوده تنظیم زیادی برای عملکرد پایدار داشته باشد.

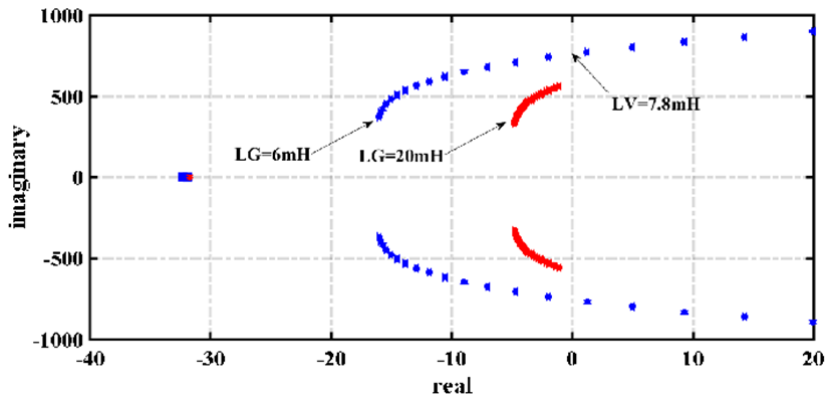
با در نظر گرفتن 20 درصد حاشیه پایداری، مقدار بیشینه امپدانس مجازی را  $Z_{\max}=2\Omega$  در نظر می‌گیریم. مقدار کمینه امپدانس مجازی با توجه به مقادیر مقاومت و راکتانس خط انتقال و تأمین شرایط دی‌کوپلینگ توان‌های اکتیو و راکتیو برای عملکرد صحیح روش کنترل اف‌تی، تعیین می‌شود.

$$X_{line} + X_V \gg r_{line}$$

در این مقاله با توجه به مقادیر مقاومت و راکتانس خط انتقال، مقدار کمینه امپدانس مجازی  $Z_{\min}=0.8\Omega$  در نظر می‌گیریم.

با توجه به مکان هندسی ریشه‌ها، سیستم پیشنهادی پایدار می‌باشد و در مقایسه با روش‌های کنترلی ارائه شده در مراجع [۱] و [۳] که از لینک مخابراتی و ارتباط فیزیکی بین واحدها برای کنترل واحدهای تولید پراکنده استفاده شده است، سیستم کنترلی پیشنهادی نیازی به لینک مخابراتی ندارد و پایداری آن تضمین شده است. در مرجع [۱] از سیستم مدیریت انرژی دوسطحی برای کنترل توان واحدهای تولید پراکنده و پخش بار استفاده شده است. سطح داخلی سیستم مدیریت انرژی از ارتباط فیزیکی واحدهای تولید پراکنده هر ریزشکه برای کنترل و تقسیم توان بین واحدهای تولید پراکنده و سطح خارجی سیستم مدیریت انرژی از لینک مخابراتی برای پخش توان بین ریزشکه‌ها استفاده کرده است. در صورت قطع لینک مخابراتی، سیستم مدیریت انرژی قادر به کنترل توان بین ریزشکه‌ها نمی‌شود و امکان ناپایداری سیستم در اثر اضافه‌بار واحدهای تولید پراکنده وجود دارد.

در مرجع [۳] به منظور تقسیم دقیق توان راکتیو و بهبود عملکرد روش کنترل اف‌تی مرسوم از دو عملکرد کاهش خطا و بازیابی ولتاژ استفاده شده است. عملکرد کاهش خطای تقسیم توان راکتیو با اصلاح معادله  $Q-E$  روش کنترل اف‌تی و ارسال سیگنال‌های همگام‌سازی انجام می‌شود. برای این کار توسط باند با پهنای کم، سیگنال‌های همگام‌سازی برای واحدهای تولید پراکنده ارسال می‌گردد. عملکرد کاهش تقسیم توان، سبب کاهش ولتاژ خروجی واحد تولید پراکنده می‌شود و به منظور جلوگیری از کاهش ولتاژ خروجی از روش بازسازی ولتاژ استفاده می‌شود. در این روش نیز اگر به هر دلیلی لینک مخابراتی قطع گردد سیستم کنترل قادر به عملکرد مناسب نمی‌باشد و احتمال ناپایداری ریزشکه وجود دارد.



شکل ۸. مکان هندسی ریشه‌ها

### شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی روش کنترل پیشنهادی از ریزشبهه شکل (۹) استفاده شده است. پارامترهای ریزشبهه در جدول (۱) آورده شده است. در این ریزشبهه ابتدا بار شماره ۱ به ریزشبهه متصل می‌شود و سپس در لحظه  $t=250\text{ms}$  بار شماره ۲ به ریزشبهه اضافه می‌شود. برای نشان‌دادن کارایی روش کنترل پیشنهادی، شبیه‌سازی ریزشبهه در چهار حالت زیر انجام شده است.

۱. سیستم کنترلی با روش افتری مرسوم

۲. سیستم کنترلی با امیدانس مجازی مرسوم

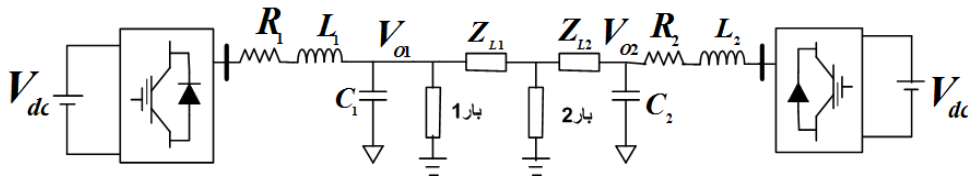
۳. سیستم کنترلی با امیدانس مجازی تطبیقی

۴. سیستم کنترلی با روش افتری پیشنهادی.

ظرفیت توان دو منبع تولید پراکنده، متفاوت در نظر گرفته شده است و ظرفیت توان DG2، ۱.۵ برابر ظرفیت توان DG1 در نظر گرفته شده است. اندازه بارهای متصل به ریزشبهه به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{بار شماره ۱: } P(L1)=50\text{KW} \quad Q(L1)=10\text{KVAR}$$

$$\text{بار شماره ۲: } P(L2)=100\text{KW} \quad Q(L2)=10\text{KVAR}$$



شکل ۹. مدار معادل ریزشبهه مورد مطالعه [۱۶]

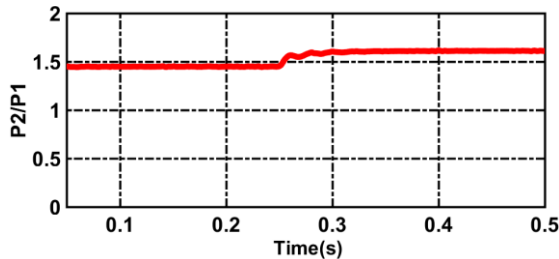
جدول ۱. پارامترهای ریزشبهه

پارامتر	مقدار	واحد
$C_f$	۱۰۰	mF
$L_f$	۲/۲۷	mH
$r_f$	۰/۰۱	$\Omega$
$r_G$	۰/۱	$\Omega$
$V_{DC}$	۷۰۰	V
$f_s$	۱۸۰۰	Hz
$V_{rated}$	۳۹۱	V
$\omega_0$	۳۱۴	rad/s
$\omega_c$	۳۱/۴۱	rad/s
$m_p$ (DG1)	۰/۰۰۰۰۰۰۰۶	
$n_q$ (DG1)	۰/۰۰۰۱۳	
$m_p$ (DG2)	۰/۰۰۰۰۰۰۰۴	
$n_q$ (DG2)	۰/۰۰۰۰۸۶۷	
$P_{DG2}/P_{DG1}$	۱/۵	
$L_D$ (DG1)	۴/۸	mH

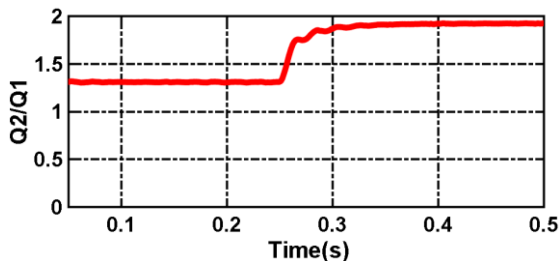
واحد	مقدار	پارامتر
mH	۶	$L_G$ (DG1)
mH	۳/۲	$L_D$ (DG2)
mH	۴	$L_G$ (DG2)

### شبیه‌سازی ریزشبه با روش کنترل افتی متداول

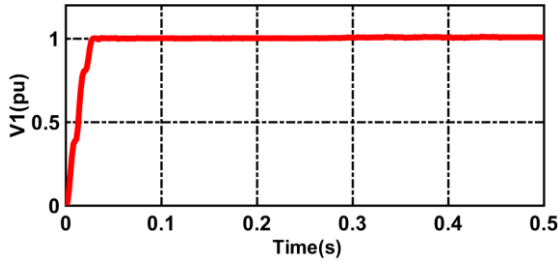
نتایج شبیه‌سازی سیستم در شکل‌های (۱۰) الی (۱۴) نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان می‌دهد که ولتاژ خروجی دو DG در محدوده مجاز می‌باشد. مطابق شکل (۱۰) توان اکتیو تقریباً به نسبت ۱/۵ بین دو DG تقسیم می‌شود ولی طبق شکل (۱۱) توان راکتیو بین دو منبع به‌طور دقیق تقسیم نشده است. در زمان  $t=0s$  تا  $t=0.2s$  بار شماره ۱ به ریزشبه متصل می‌باشد. در این فاصله نسبت DG1 به DG2 توان راکتیو بیشتری تحویل می‌دهد. در لحظه  $t=0.25s$  بار شماره ۲ به ریزشبه وصل می‌شود و در این وضعیت DG2 توان بیشتری تحویل می‌دهد؛ بنابراین نسبت ۱/۵ در تقسیم توان راکتیو به‌دست نمی‌آید و همچنین جریان گردشی بین دو منبع زیاد می‌باشد.



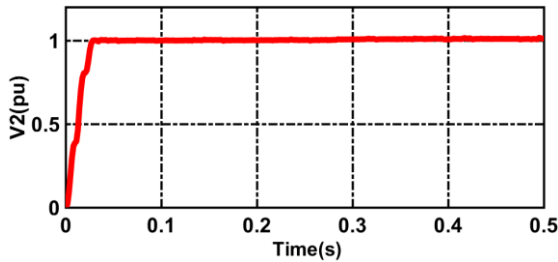
شکل ۱۰. نسبت توان اکتیو DG2 به DG1



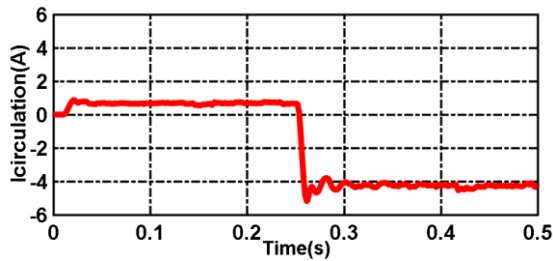
شکل ۱۱. نسبت توان راکتیو DG2 به DG1



شکل ۱۲. ولتاژ خروجی DG1



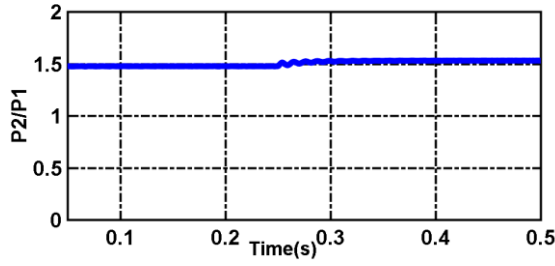
شکل ۱۳. ولتاژ خروجی DG2



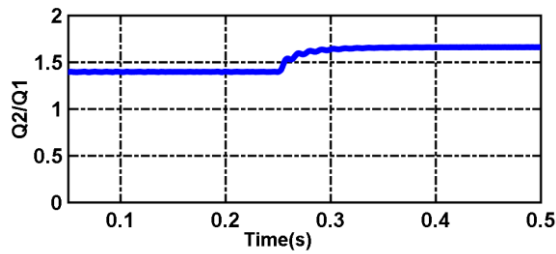
شکل ۱۴. جریان گردش بین DG1 و DG2

### شبیه‌سازی ریزشکه با حلقه کنترل امیدانس مجازی

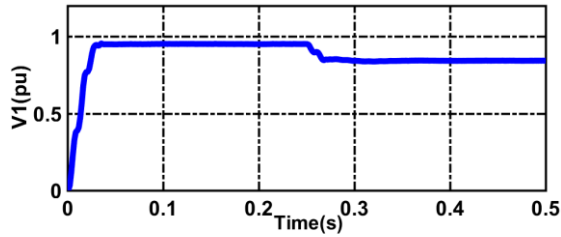
نتایج شبیه‌سازی سیستم در شکل‌های (۱۵) الی (۱۹) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از امیدانس مجازی، سبب کاهش جریان گردشی و تقسیم بهتر توان‌های اکتیو و راکتیو بین دو DG می‌شود ولی مطابق شکل (۱۷ و ۱۸) با اضافه‌شدن بار شماره (۲) ولتاژ خروجی هر دو DG کاهش می‌یابد و افت ولتاژ زیاد می‌شود.



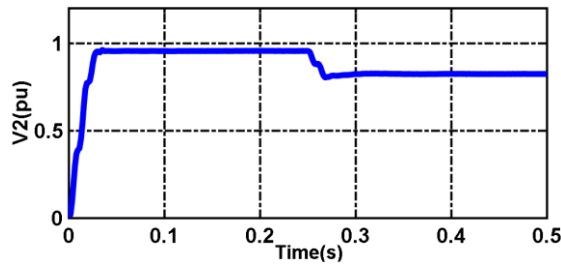
شکل ۱۵. نسبت توان اکتیو DG2 به DG1



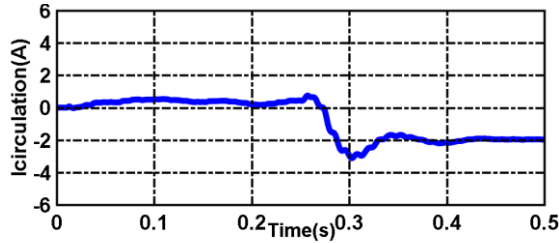
شکل ۱۶. نسبت توان راکتیو DG2 به DG1



شکل ۱۷. ولتاژ خروجی DG1



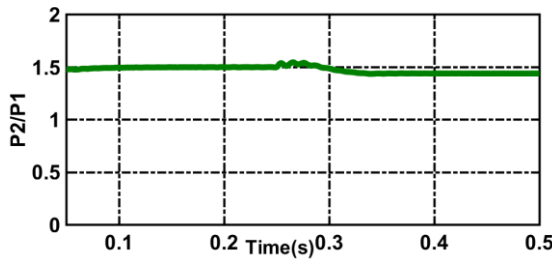
شکل ۱۸. ولتاژ خروجی DG2



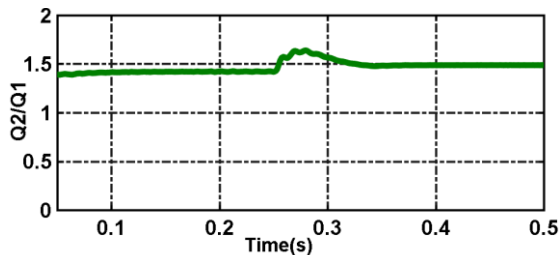
شکل ۱۹. جریان گردشی بین DG1 و DG2

### شبیه‌سازی سیستم با امیدانس مجازی تطبیقی

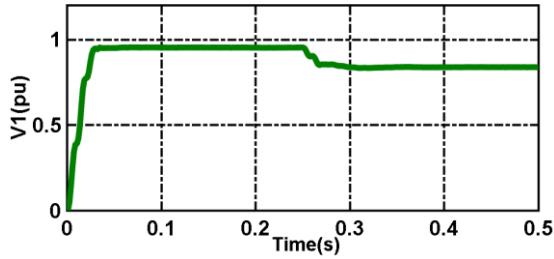
نتایج شبیه‌سازی سیستم در شکل‌های (۲۰) الی (۲۵) نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی در این مرحله نشان می‌دهد تقسیم توان اکتیو و راکتیو نسبت به مراحل قبل بهتر شده است. توان اکتیو و راکتیو DG2 تقریباً به نسبت موردنظر یعنی ۱/۵ برابر DG1 می‌باشد. ولی همان‌طور که از شکل‌های (۲۱ و ۲۲) مشخص است، ولتاژ خروجی هر دو DG از مقدار مجاز کمتر می‌باشد و با افزایش بار ولتاژ خروجی واحدها کاهش می‌یابد.



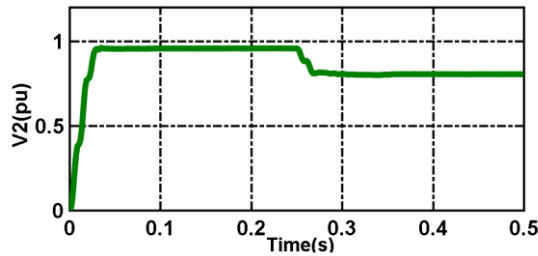
شکل ۲۱. نسبت توان اکتیو DG2 به DG1



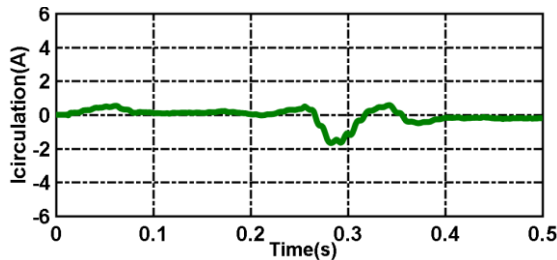
شکل ۲۲. نسبت توان راکتیو DG2 به DG1



شکل ۲۳. ولتاژ خروجی DG1



شکل ۲۴. ولتاژ خروجی DG2

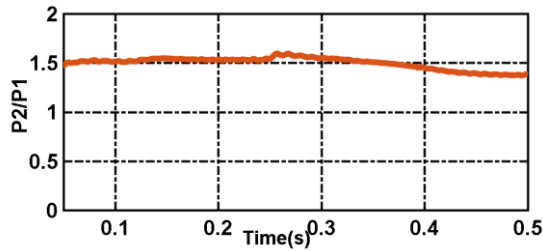


شکل ۲۵. جریان گردشی بین DG1 و DG2

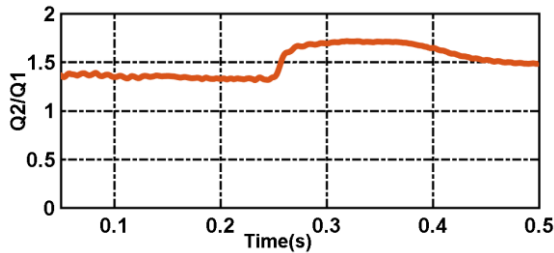
### شبیه‌سازی سیستم با روش کنترل اکتیو پیشنهادی

نتایج شبیه‌سازی سیستم در شکل‌های (۲۶) الی (۳۱) نشان داده شده است. مطابق شکل (۲۶) و (۲۷) توان اکتیو و راکتیو متناسب با ظرفیت دو واحد تولید پراکنده (ظرفیت واحد شماره ۲ یک‌ونیم برابر ظرفیت واحد شماره ۱ می‌باشد) بین هر دو واحد تقسیم شده است. هرچند برای یک لحظه کوتاه در اثر تغییر بار نسبت توان راکتیو تولیدی دو واحد متناسب با ظرفیت واحدها نمی‌باشد ولی این وضعیت گذراست و سریع نسبت توان‌ها به مقدار یک‌ونیم می‌رسد. مطابق شکل‌های (۲۸) و (۲۹) ولتاژ خروجی DG1 در مقدار ۱ پریونیت و ولتاژ خروجی DG2 در مقدار ۰/۹۷ پریونیت تثبیت می‌شود. بنابراین در روش کنترل پیشنهادی ولتاژ خروجی واحدها در محدود مجاز تثبیت می‌گردند. همچنین مطابق شکل (۳۰) سیستم کنترل پیشنهادی قادر به کاهش جریان گردشی بین واحدها می‌گردد. تغییرات امپدانس مجازی تطبیقی استفاده شده در این مقاله در شکل (۳۱) آمده است. همان‌طور که مشخص است مقدار امپدانس مجازی بین مقدار بیشینه و کمینه تغییر می‌کند و مقدار آن به‌طور عکس با جریان گردشی تناسب دارد. با افزایش بار در  $t=0.25s$  جریان گردشی افزایش می‌یابد؛ بنابراین امپدانس مجازی نیز زیاد می‌شود تا

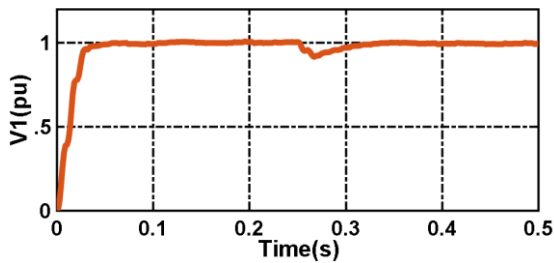
جریان گردشی را محدود کند. در صورتی که جریان گردشی از حد مجاز کمتر باشد، مقدار امیدانس مجازی ثابت می‌ماند و مقدار آن به یک مقدار مشخص همگرا می‌شود.



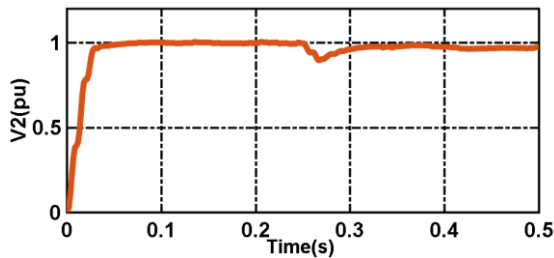
شکل ۲۶. نسبت توان اکتیو DG1 به DG2



شکل ۲۷. نسبت توان راکتیو DG1 به DG2

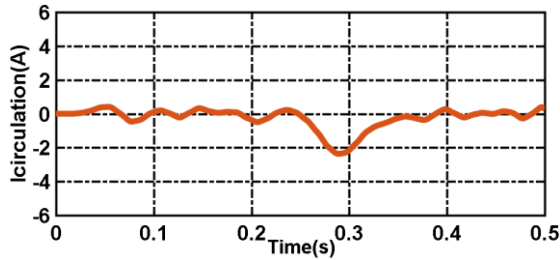


شکل ۲۸. ولتاژ خروجی DG1

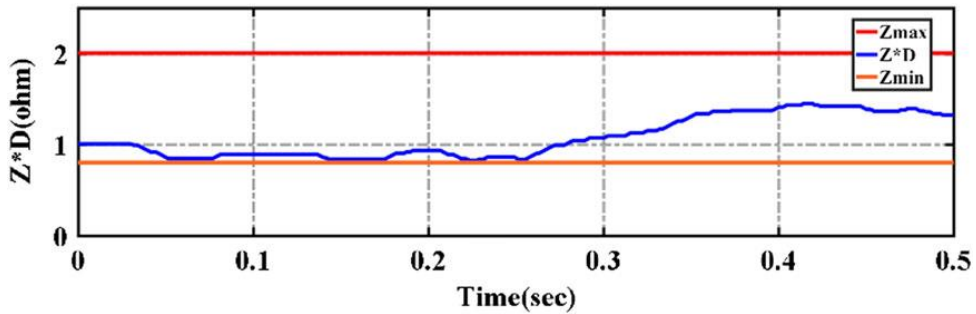


شکل ۲۹. ولتاژ خروجی DG2





شکل ۳۰. جریان گردشی بین DG1 و DG2



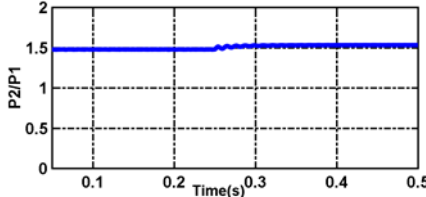
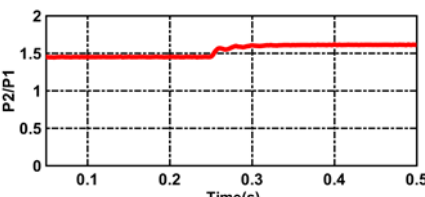
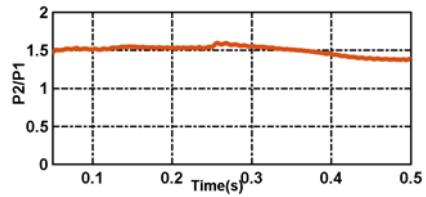
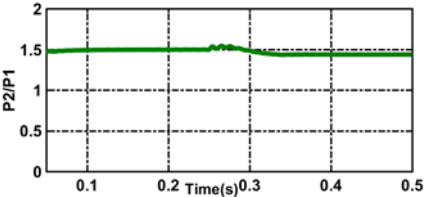
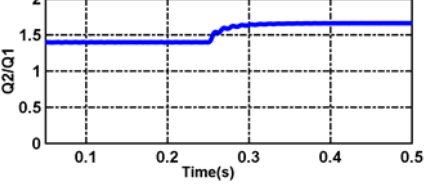
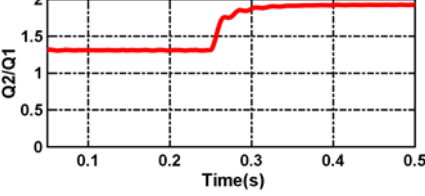
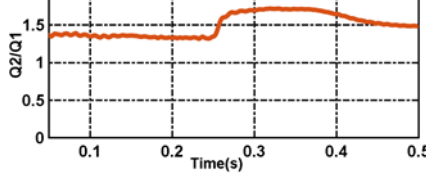
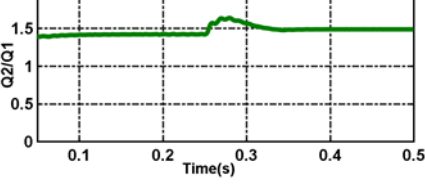
شکل ۳۱. مقادیر امپدانس تطبیقی

جدول ۲. نتایج عددی شبیه‌سازی ریز شبکه

$t \geq 0/5s$					$t << 0/25s$					
$I_H$	$V_2$	$V_1$	$\frac{Q_2}{Q_1}$	$\frac{P_2}{P_1}$	$I_H$	$V_2$	$V_1$	$\frac{Q_2}{Q_1}$	$\frac{P_2}{P_1}$	
۴.۸	۱	۱	۱/۹	۱/۶	۱	۱	۱	۱/۳	۱/۴۴	۱
۲	-۰/۸۲	-۰/۸۴	۱/۶۵	۱/۶۱	-۰/۵	-۰/۹۵	-۰/۹۵	۱/۴	۱/۴۷	۲
-۰/۲	-۰/۸	-۰/۸۳	۱/۴۸	۱/۴۳	-۰/۱	-۰/۹۵	-۰/۹۵	۱/۴۱	۱/۴۹	۳
-۰/۵	-۰/۹۶۸	۱	۱/۵۵	۱/۴۲	-۰/۵	۱	۱	۱/۴	۱/۵	۴

در جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی در چهار حالت فوق نشان داده شده است. در این جدول، مقادیر متوسط نسبت توان واحد دوم به واحد اول، مقدار متوسط ولتاژ خروجی هر دو DG و جریان گردشی بین واحدها در دو وضعیت قبل و بعد از اضافه‌شدن بار دوم آورده شده است. همچنین در جدول (۳) نسبت‌های توان اکتیو و راکتیو هر دو منبع تولید پراکنده در چهار روش کنترلی نشان داده شده است. مقادیر به‌دست‌آمده برای چهار حالت شبیه‌سازی ۱- روش افی مرسوم ۲- روش امپدانس مجازی مرسوم ۳- روش امپدانس مجازی تطبیقی ۴- روش افی پیشنهادی، در جدول (۲) و جدول (۳) نشان می‌دهد که روش کنترل پیشنهادی افت ولتاژ ناشی از امپدانس مجازی را جبران کرده و جریان کاهشی را نیز در حد قابل‌قبولی کاهش داده است. توان‌های اکتیو و راکتیو تقریباً با نسبت موردنظر و متناسب با ظرفیت واحدهای تولید پراکنده بین آنها تقسیم شده است.

جدول ۳. مقایسه نتایج شبیه‌سازی نسبت‌های توان اکتیو و راکتیو در چهار روش

	
<p>تصویر ۳-۱۶. نسبت توان اکتیو واحدها در روش امیدانس مجازی ثابت</p>	<p>تصویر ۳-۱۱. نسبت توان اکتیو واحدها در روش کنترل افی</p>
	
<p>تصویر ۳-۲۶. نسبت توان اکتیو واحدها در روش کنترلی پیشنهادی</p>	<p>تصویر ۳-۲۱. نسبت توان اکتیو واحدها در روش امیدانس مجازی تطبیقی</p>
	
<p>تصویر ۳-۱۷. نسبت توان راکتیو واحدها در روش امیدانس مجازی ثابت</p>	<p>تصویر ۳-۱۲. نسبت توان راکتیو واحدها در روش کنترل افی</p>
	
<p>تصویر ۳-۱۷. نسبت توان راکتیو واحدها در روش کنترلی پیشنهادی اول</p>	<p>تصویر ۳-۲۲. نسبت توان راکتیو واحدها در روش امیدانس مجازی تطبیقی</p>

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش کنترلی پیشنهاد شده است که برای جبران افت ولتاژ ناشی از امیدانس مجازی ولتاژ مرجع خروجی روش افی اصلاح می‌شود. اصلاح ولتاژ مرجع طوری می‌باشد که ولتاژ مرجع خروجی روش افی پیشنهادی

هر لحظه و به‌ازای تغییرات بار برابر مقدار ولتاژ مرجع خروجی روش اف‌تی در حالت بدون بار باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد روش پیشنهادی به‌خوبی می‌تواند افت ولتاژ ناشی از امیدانس مجازی تطبیقی را جبران کند و مقدار ولتاژ خروجی DGها را در محدوده مجاز تنظیم کند و همچنین توان‌های اکتیو و راکتیو بین DGها را تقریباً مطابق ظرفیت هر واحد، تقسیم کند. در روش پیشنهادی در مقایسه با روش کنترل اف‌تی متداول جریان گردشی نیز کاهش یافته است. با توجه به مکان هندسی ریشه‌ها، سیستم پیشنهادی، پایدار می‌باشد. در مقایسه با روش‌های کنترلی ارائه شده در مراجع [۱] و [۳] که از لینک مخابراتی و ارتباط فیزیکی بین واحدها برای کنترل واحدهای تولید پراکنده استفاده شده است، سیستم کنترلی پیشنهادی، نیازی به لینک مخابراتی ندارد و پایداری آن تضمین شده است.

## References

- [1] Ahmadi, S. E., & Rezaei, N. (2020). A new isolated renewable based multi microgrid optimal energy management system considering uncertainty and demand response. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105760. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105760>
- [2] Pan, H., Teng, Q., & Wu, D. (2020). MESO-based robustness voltage sliding mode control for AC islanded microgrid. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 6(2), 83-93. <https://doi.org/10.23919/CJEE.2020.000013>
- [3] Zhang, S., Chen, C., Dong, L., Li, Y., Zhao, J., Nian, H., & Kong, L. (2019, May 21-24). An Enhanced Droop Control Strategy for Accurate Reactive Power Sharing in Islanded Microgrids. 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8881692>
- [4] Bouzid, A. E. M., Sicard, P., Chaoui, H., Cheriti, A., Sechilariu, M., & Guerrero, J. M. (2019). A novel Decoupled Trigonometric Saturated droop controller for power sharing in islanded low-voltage microgrids. *Electric Power Systems Research*, 168, 146-161. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.11.016>
- [5] Pannala, S., Patari, N., Srivastava, A. K., & Padhy, N. P. (2020). Effective Control and Management Scheme for Isolated and Grid Connected DC Microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(6), 6767-6780. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3015819>
- [6] Yang, Q., Jiang, L., Zhao, H., & Zeng, H. (2018). Autonomous Voltage Regulation and Current Sharing in Islanded Multi-Inverter DC Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 6429-6437. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2712658>
- [7] Arbolea, P., Gonzalez-Moran, C., Coto, M., Falvo, M. C., Martirano, L., Sbordone, D., Bertini, I., & Pietra, B. D. (2015). Efficient Energy Management in Smart Micro-Grids: ZERO Grid Impact Buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 1055-1063. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2392071>
- [8] Savaghebi, M., Jalilian, A., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2012). Secondary Control Scheme for Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(2), 797-807. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2181432>
- [9] Shafiee, Q., Guerrero, J. M., & Vasquez, J. C. (2014). Distributed Secondary Control for Islanded Microgrids—A Novel Approach. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(2), 1018-1031. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2259506>
- [10] Bidram, A., & Davoudi, A. (2012). Hierarchical Structure of Microgrids Control System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1963-1976. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2197425>

- [11] Han, H., Liu, Y., Sun, Y., Su, M., & Guerrero, J. M. (2015). An Improved Droop Control Strategy for Reactive Power Sharing in Islanded Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(6), 3133-3141. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2332181>
- [12] Tuladhar, A., Hua, J., Unger, T., & Mauch, K. (2000). Control of parallel inverters in distributed AC power systems with consideration of line impedance effect. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1), 131-138. <https://doi.org/10.1109/28.821807>
- [13] Guerrero, J. M., Luis Garcia de, V., Matas, J., Castilla, M., & Miret, J. (2005). Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(4), 1126-1135. <https://doi.org/10.1109/TIE.2005.851634>
- [14] He, J., & Li, Y. W. (2011). Analysis, Design, and Implementation of Virtual Impedance for Power Electronics Interfaced Distributed Generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(6), 2525-2538. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2168592>
- [15] Li, Y. W., & Kao, C. (2009). An Accurate Power Control Strategy for Power-Electronics-Interfaced Distributed Generation Units Operating in a Low-Voltage Multibus Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(12), 2977-2988. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2022828>
- [16] Zhang, M., Du, Z., Lin, X., & Chen, J. (2015). Control Strategy Design and Parameter Selection for Suppressing Circulating Current Among SSTs in Parallel. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(4), 1602-1609. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2402835>

پیوست:

مدل سیگنال کوچک:

مدل کامل سیگنال کوچک DG شامل کنترل افقی، کنترل امیدانس مجازی، کنترل ولتاژ و جریان و فیلتر، در زیر نشان داده شده است [۱۶].

$$A_P = \begin{bmatrix} -\omega_c & 0 \\ 0 & -\omega_c \end{bmatrix} \quad c_P = \begin{bmatrix} 0 & -n \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_P = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \omega_c I_{od} & \omega_c I_{oq} & \omega_c U_{od} & \omega_c U_{oq} \\ 0 & 0 & -\omega_c I_{od} & \omega_c I_{oq} & \omega_c U_{od} & -\omega_c U_{oq} \end{bmatrix}$$

$$D_P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega L_v \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega L_v & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_V = 0, \quad A_c = 0, \quad B_{V1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_{C1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_{V2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C_V = \begin{bmatrix} K_{1i} & 0 \\ 0 & K_{1i} \end{bmatrix}$$

$$D_{V1} = \begin{bmatrix} K_{1P} & 0 \\ 0 & K_{1P} \end{bmatrix} \quad D_{V2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -K_{1P} & -\omega C_f & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \omega C_f & -K_{1P} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_{C1} = \begin{bmatrix} K_{2P} & 0 \\ 0 & K_{2P} \end{bmatrix} \quad D_{C2} = \begin{bmatrix} -K_{2P} & -\omega L_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_f & -K_{2P} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} \frac{-r_f}{L_f} & \omega & \frac{-1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega & \frac{-r_f}{L_f} & 0 & \frac{-1}{L_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega & \frac{-1}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega & 0 & 0 & \frac{-1}{C_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_G} & 0 & \frac{-r_G}{L_G} & \omega \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_G} & -\omega & \frac{-r_G}{L_G} \end{bmatrix}$$

$$B_{01} = \begin{bmatrix} 1/L_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_f & 1/L_f & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$A_S = \begin{bmatrix} A_P & 0 & 0 & B_P \\ B_{V1}C_P & A_V & 0 & B_{V2} + B_{V1}D_P \\ B_{C1}D_{V1}C_P & B_{C1}C_V & A_C & B_{C1}D_{V2} + B_{C2} + B_{C1}D_{V1}D_P \\ B_{01}D_{C1}D_{V1}C_P & B_{01}D_{C1}C_V & B_{01}C_C & A_0 + B_{01}(D_{C1}D_{V2} + D_{C2} + D_{C1}D_{V1}D_P) \end{bmatrix}$$

پارامترها و مقادیر شرایط اولیه برای مطالعه پایداری در جدول زیر ارائه شده است:

Parameters	Value	Parameters	Value
$U_{dk}$	۷۰۰ ولت	$K_{2i}$	۳۳۳
$\omega_C$	۳۱/۴ rad/s	$\omega$	۳۱/۴ rad/s
$K_{1p}$	۱۱۵	$U_{dq}$	۱۶۲ ولت
$K_{1i}$	۲۰۵۹۴۴	$I_{od}$	۱۹/۷ آمپر
$K_{2p}$	۰/۰۵۷۷	$I_{oq}$	۱۵/۶ آمپر
$I_{id}$	۲۷ کیلو آمپر	$U_{od}$	۸۱۱۰ ولت
$I_{iq}$	۹۳ کیلو آمپر	$U_{oq}$	۹۰ ولت