



### ۰۴۱۳۵ استفاده از روش امپدانس مجازی قابل تنظیم جهت تقسیم توان

## راکتیو در ریزشبکه های جزیره ای

منیر اشرفی، مهدی بانزاد

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

دانشگاه صنعتی شاهرود

علی اکبرزاده کلات، علی دستفان

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

دانشگاه صنعتی شاهرود

### ۱. مقدمه

در سیستم‌های توان الکتریکی سنتی سهم واحدهای تولید پراکنده<sup>۱</sup> افزایش قابل توجهی یافته است. در میان ساختارهای تولید پراکنده متعدد در دسترس، ریزشبکه<sup>۲</sup> بیشترین انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان را برای سیستم‌های توان مهیا می‌کند. یک ریزشبکه می‌تواند در دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه عمل کند. معمولاً منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر با عملکرد موازی برای تغذیه بارهای بحرانی در قالب یک ریزشبکه جزیره‌ای ساماندهی می‌شوند. در حالت جزیره‌ای هدف از کنترل رسیدن به تقسیم صحیح توان است و هر واحد تولید پراکنده باید توانایی تغذیه بار کل متناسب با ظرفیت توان خود را داشته باشد [۱].

روشی که عمدتاً برای کنترل تقسیم توان در ریزشبکه جزیره‌ای دارای اینورترهای با عملکرد موازی استفاده می‌شود، کنترل افقی<sup>۳</sup> بر اساس مشخصه‌های افقی ژنراتورهای رایج بدون نیاز به ارتباط و هماهنگی در میان واحدهای تولید پراکنده است. در کنترل تقسیم توان در ریزشبکه، کنترل افقی نسبت به روش‌های دیگر راحت‌تر و قابل‌اعتمادتر است [۲].

چکیده — یک روش رایج برای کنترل تقسیم توان در ریزشبکه‌های جزیره‌ای روش افقی متداول است. اما به دلیل افت ولتاژ متفاوت روی امپدانس خطوط واحدهای تولید پراکنده، تقسیم توان راکتیو در ریزشبکه با استفاده از این روش به طور صحیح انجام نمی‌شود. لذا برای حل این چالش روش امپدانس مجازی پیشنهاد شده است و این مقاله با استفاده از روش امپدانس مجازی عملکرد روش افقی متداول و در نتیجه صحت تقسیم توان راکتیو و به دنبال آن جریان چرخشی را بهبود می‌بخشد. به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی، یک ریزشبکه جزیره‌ای نمونه در محیط PSCAD/EMTDC شبیه‌سازی می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش امپدانس مجازی قابل تنظیم پیشنهادی قادر است با بهبود روش افقی متداول علاوه بر تقسیم صحیح توان راکتیو در شرایط عملکرد معین ریزشبکه، تقسیم توان را با در نظر گرفتن تغییرات بار به صورت صحیح محقق سازد.

واژه‌های کلیدی — ریزشبکه جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر، تقسیم توان راکتیو، روش افقی متداول، امپدانس مجازی قابل تنظیم.

<sup>1</sup> Distributed Generation (DG)

<sup>2</sup> Microgrid

<sup>3</sup> Droop Control

## ۲.۲. روش افی متداول

طبق رابطه (۱) و (۲)، توان حقیقی لحظه ای  $p$  و توان راکتیو لحظه ای  $q$  سه فاز با استفاده از ولتاژ و جریان خروجی محورهای  $\alpha\beta$  در مرجع ساکن محاسبه می شوند [۶].

$$p = 1/5(v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta}) \quad (۱)$$

$$q = 1/5(v_{\beta}i_{\alpha} - v_{\alpha}i_{\beta}) \quad (۲)$$

که  $v_{\alpha}$ ،  $v_{\beta}$ ،  $i_{\alpha}$ ،  $i_{\beta}$  به ترتیب ولتاژ و جریان خروجی محورهای  $\alpha$  و  $\beta$  در مرجع ساکن هستند.

هر یک از توان های لحظه ای محاسبه شده در بالا شامل مؤلفه های ac و dc هستند. بخش dc، شامل توان های حقیقی و راکتیو متوسط است که از عبور توان های حقیقی و راکتیو لحظه ای از فیلترهای پایین گذر با فرکانس  $\omega_{LPF}$  طبق روابط (۳) و (۴) به دست می آید [۶].

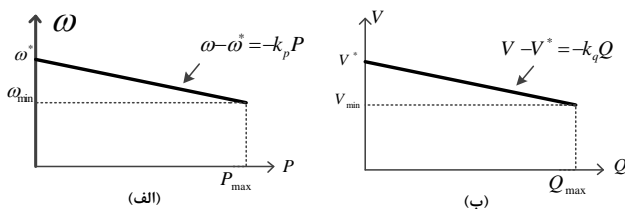
$$P = 1/5[\omega_{LPF} / (\omega_{LPF} + s)](v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta}) \quad (۳)$$

$$Q = 1/5[\omega_{LPF} / (\omega_{LPF} + s)](v_{\beta}i_{\alpha} - v_{\alpha}i_{\beta}) \quad (۴)$$

که  $P$  و  $Q$  به ترتیب توان های حقیقی و راکتیو متوسط هستند. در کنترل کننده محلی، کنترل افی مسئول تطبیق دامنه و فرکانس ولتاژ مرجع مطابق توان های حقیقی و راکتیو متوسط و در نتیجه کنترل تقسیم توان بین واحدها است. کنترل کننده های افی  $P-\omega$  و  $Q-V$  به ترتیب به صورت روابط (۵) و (۶) تعریف می شوند [۳].

$$\omega - \omega^* = -k_p P \quad (۵)$$

$$V - V^* = -k_q Q \quad (۶)$$



شکل ۱: مشخصه های افی الف:  $P-\omega$ ، ب:  $Q-V$ .

که  $\omega$  و  $V$  به ترتیب فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی مرجع را ارائه می کنند، و  $\omega^*$  و  $V^*$  به ترتیب فرکانس و دامنه ولتاژ نامی،  $k_p$  و  $k_q$  به ترتیب

درحالی که تقسیم صحیح توان حقیقی می تواند به واسطه روش افی فرکانس-توان حقیقی ( $P-\omega$ ) به دست آید اما تقسیم توان راکتیو با استفاده از روش افی دامنه ولتاژ-توان راکتیو ( $Q-V$ ) به دلیل عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه به خوبی انجام نمی شود [۳]. لذا در این مقاله روش امپدانس مجازی قابل تنظیم جهت اصلاح روش افی متداول و تحقق تقسیم صحیح توان راکتیو و همچنین کاهش جریان چرخشی از طریق جبران عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه پیشنهاد می شود.

در ادامه مقاله؛ بخش ۲ کنترل افی متداول را ارائه می کند، در بخش ۳ به مفهوم روش امپدانس مجازی و کنترل پیشنهادی آن می پردازد. برای ارزیابی روش پیشنهادی تحلیل نتایج شبیه سازی در بخش ۴ بیان می گردد.

## ۲. تقسیم توان با کنترل افی متداول

### ۲.۱. مقدمه

به طور کلی واحدهای تولید پراکنده فرکانس حالت دائمی یکسان دارند، بنابراین تقسیم توان حقیقی توسط  $P-\omega$  به صورت صحیح انجام می شود. برخلاف فرکانس، کنترل دامنه ولتاژ به خاطر عدم تطبیق افت ولتاژ روی امپدانس خطوط واحدهای تولید پراکنده پیچیده است. درحالی که توان حقیقی به فرکانس وابسته است، تقسیم توان راکتیو توسط  $Q-V$  وابسته به دامنه ولتاژ واحدهای تولید پراکنده است. لذا با در نظر گرفتن افت ولتاژ خط، انحراف ولتاژ واحدهای تولید پراکنده به دلیل افت ولتاژهای متفاوت روی امپدانس های متفاوت خطوط موجب تفاوت نسبت تقسیم توان راکتیو با نسبت افی شود که تقسیم نادرست توان راکتیو نامیده می شود [۱، ۲].

روش های متعددی برای بهبود صحت تقسیم توان راکتیو توسط روش افی پیشنهاد شده است که یکی از این روش ها روش امپدانس مجازی است که به تقلید از امپدانس فیزیکی اما بدون اتصال فیزیکی پیشنهاد می شود [۳، ۴].

لازم به ذکر است که در این مقاله کنترل محلی منابع تولید پراکنده شامل کنترل افی و کنترل امپدانس مجازی در مرجع ساکن انجام می شود لذا تبدیل کلارک برای تبدیل متغیرها بین قاب مرجع abc و  $\alpha\beta$  اتخاذ می شود. بنابراین لازم است ولتاژ خازن و جریان سه فاز اندازه گیری شده در خروجی اینورتر به سیگنال های معادل در قاب مرجع  $\alpha\beta$  تبدیل شوند [۵].

بنابراین از رابطه (۹) وضعیت تقسیم توان راکتیو واحدها به صورت رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{k_{q2}}{k_{q1}} \xrightarrow{k_{q1}=k_{q2}} Q_1 = Q_2 \quad (10)$$

که  $Q_1$  و  $Q_2$  به ترتیب توان راکتیو خروجی،  $k_{q1}$  و  $k_{q2}$  به ترتیب ضرایب افتی Q-V واحدهای تولید پراکنده ۱ و ۲ هستند. از این رو واحدهای تولید پراکنده در تقسیم توان راکتیو نسبت ظرفیت‌های خود را تمکین می‌کنند [۲، ۸].

حال با در نظر گرفتن افت ولتاژ خط، ولتاژ  $V_L$  به صورت رابطه (۱۱) و معادله افتی برای دو واحد موازی به صورت رابطه (۱۲) می‌شود.

$$V_1 - V_{Line1} = V_2 - V_{Line2} \quad (11)$$

$$V^* - k_{q1}Q_1 - V_{Line1} = V^* - k_{q2}Q_2 - V_{Line2} \quad (12)$$

بنابراین با انجام محاسبات و مرتب‌سازی رابطه (۱۲) و انجام محاسبات رابطه (۱۳) و سپس رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$k_{q1}Q_1 + V_{Line1} = k_{q2}Q_2 + V_{Line2} \quad (13)$$

$$k_{q1}Q_1 = k_{q2}Q_2 + \Delta V_{Line} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)،  $\Delta V_{Line}$  معرف اختلاف دامنه افت ولتاژ خطوط است.

با تقسیم طرفین رابطه (۱۴) بر عبارت  $k_{q1}Q_2$ ، رابطه (۱۵) برای بیان وضعیت تقسیم توان راکتیو واحدها حاصل می‌شود.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{k_{q2}}{k_{q1}} + \frac{\Delta V_{Line}}{k_{q1}Q_2} \xrightarrow{k_{q1}=k_{q2}=k_q} \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\Delta V_{Line}}{k_q Q_2} \quad (15)$$

لذا طبق رابطه (۸)،  $\Delta V_{Line}$  را می‌توان به صورت رابطه (۱۶) بیان کرد.

$$\Delta V_{Line} = V_{Line1} - V_{Line2} = \frac{(R_1 P_1 - R_2 P_2) + (X_1 Q_1 - X_2 Q_2)}{V^*} \quad (16)$$

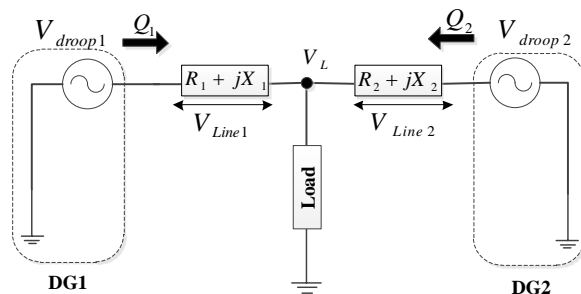
که  $X_1, X_2, R_1, R_2$  به ترتیب راکتانس و مقاومت خطوط ۱ و ۲ هستند.

با توجه به رابطه (۱۵) و (۱۶) می‌توان دریافت که تقسیم توان راکتیو با استفاده از کنترل افتی متداول به درستی انجام نمی‌شود، زیرا افت ولتاژ، پارامترهای دیگر شامل ولتاژ مرجع و ولتاژ عملکرد حداقل را تحت تأثیر

ضرایب افتی P-Q و Q-V هستند. شکل‌های ۱-الف و ۱-ب به ترتیب مشخصه‌های افتی P-Q و Q-V را نشان می‌دهند.

### ۲.۳. تقسیم توان راکتیو

شکل ۲ مدار معادل یک ریزشبهک جزیره‌ای با دو واحد تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر را نشان می‌دهد.



شکل ۲: مدار معادل ریزشبهک با دو واحد تولید پراکنده.

با استفاده از روش افتی P-Q و Q-V ولتاژ مرجع ( $V_{droop}$ ) واحد تولید پراکنده با فرکانس و دامنه دلخواه به صورت رابطه (۷) ایجاد می‌شود.

$$V_{droop} = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (V)$$

مشخصه افتی Q-V بر اساس اختلاف ولتاژ بین باس محلی و خروجی واحد تولید پراکنده است. برای یک خط مختلط با مقاومت R و راکتانس X، افت ولتاژ خط که با  $V_{line}$  مشخص شده، می‌تواند به صورت یک تابع خطی از توان راکتیو خروجی واحد تولید پراکنده طبق رابطه (۸) تقریب زده شود [۷].

$$V_{line} = V_{droop} - V_L \square \frac{R \times P + X \times Q}{V^*} \quad (8)$$

بنابراین طبق رابطه (۸) به دلیل تفاوت در امپدانس‌های خطوط افت ولتاژ روی امپدانس‌های خطوط نیز متفاوت است که این موجب تقسیم نادرست توان راکتیو می‌شود [۷].

بدون در نظر گرفتن افت ولتاژ خط، ولتاژ باس محلی با ولتاژ خروجی واحدهای تولید پراکنده تقریب زده می‌شود که در نتیجه دامنه ولتاژ واحدهای تولید پراکنده با عملکرد موازی در ریزشبهک با یکدیگر برابرند یعنی:  $V_{droop1} = V_{droop2}$ . از این رو معادله افتی (رابطه (۶)) برای دو واحد موازی در شکل ۲ می‌تواند به صورت رابطه (۹) بیان شود.

$$V^* - k_{q1}Q_1 = V^* - k_{q2}Q_2 \quad (9)$$

روی امپدانس مجازی و مدل امپدانس مجازی در مرجع  $\alpha - \beta$  را می‌توان مستقیماً از جریان خط با استفاده از روابط (۱۷) - (۲۳) تعیین نمود [۱۱].

$$\delta V_{\alpha\beta} = Z_v \times i_{o,\alpha\beta} \quad (17)$$

$$\delta V_{\alpha\beta} = (R_v + jX_v) \times i_{o,\alpha\beta} \quad (18)$$

$$\delta V_{\alpha} + j\delta V_{\beta} = (R_v + jX_v) \times (i_{o,\alpha} + ji_{o,\beta}) \quad (19)$$

$$\delta V_{\alpha} + j\delta V_{\beta} = (R_v - X_v)i_{o,\beta} + j(R_v + X_v)i_{o,\alpha} \quad (20)$$

$$\delta V_{\alpha} = (R_v - X_v)i_{o,\beta} \quad (21)$$

$$\delta V_{\beta} = (R_v + X_v)i_{o,\alpha} \quad (22)$$

$$Z_v = \begin{bmatrix} R_v & -X_v \\ X_v & R_v \end{bmatrix} \quad (23)$$

در این مقاله برای کنترل پخش توان راکتیو به صورت صحیح، امپدانس مجازی به دو روش ثابت و قابل تنظیم کنترل می‌شود. در روش اول که مبتنی بر امپدانس مجازی ثابت است، با استفاده از اطلاعات مربوط به امپدانس خطوط که معمولاً هم به راحتی در دسترس نیستند [۳]، می‌توان امپدانس مورد نیاز برای تحقق تقسیم صحیح توان راکتیو را طبق رابطه (۲۳) تعیین نمود. اما در روش دوم که مبتنی بر امپدانس مجازی قابل تنظیم است، امپدانس مجازی می‌تواند بدون نیاز به اطلاعات گسترده در مورد مشخصات خطوط با استفاده از افت ولتاژ مجازی و با هدف فراهم نمودن تقسیم صحیح توان راکتیو تنظیم شود.

در مقایسه با روش اول (امپدانس مجازی ثابت) انتظار می‌رود، در روش دوم (امپدانس مجازی قابل تنظیم) امپدانس مجازی به گونه‌ای کنترل شود که ریزشبهه بتواند به تغییرات اعمالی در ریزشبهه نظیر تغییر در بار را برای تحقق تقسیم صحیح توان راکتیو پاسخ دهد و در صحت تقسیم توان راکتیو خللی ایجاد نشود، و به عبارتی کنترل کننده نسبت به این تغییرات مقاوم باشد. در شکل ۴ روش امپدانس مجازی قابل تنظیم با کنترل مولفه مقاومت و راکتانس امپدانس مجازی محقق می‌شود.

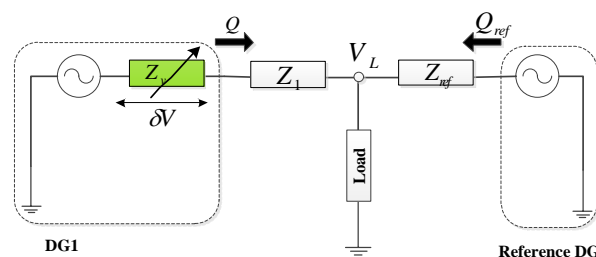
با توجه به شکل ۴ این کنترل کننده شامل یک انتگرال گیر با بهره قابل کنترل  $m$  است که با در نظر گرفتن واحد مرجع  $(Q_{ref})$ ، واحدهای دیگر توان راکتیو آن را به عنوان مرجع دنبال می‌کند و متغیر امپدانس مجازی  $n_v$  تنظیم می‌شود.

قرار می‌دهد. همچنین با توجه به رابطه (۱۶) می‌توان دریافت که با کنترل امپدانس خطوط می‌توان  $\Delta V_{Line}$  و متعاقباً تقسیم توان راکتیو را کنترل کرد و از این روش امپدانس مجازی پیشنهاد می‌شود [۲, ۷].

در ریزشبهه جزیره‌ای عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه منابع تولید پراکنده می‌تواند موجب جاری شدن جریان‌های چرخشی در بین اینورترها شود و ممکن است منابع تولید پراکنده دچار اضافه جریان شوند. بنابراین حداقل کردن جریان چرخشی امری مهم و ضروری به شمار می‌رود [۷, ۹].

### ۳. روش امپدانس مجازی قابل تنظیم پیشنهادی

ابتدا در این قسمت روش بهبود صحت تقسیم توان راکتیو مبتنی بر امپدانس مجازی ارائه می‌شود. امپدانس مجازی با هدف بهبود صحت تقسیم توان راکتیو در ریزشبهه توسط کنترل ولتاژ، از طریق انتخاب مقدار امپدانس مجازی مناسب استفاده می‌شود. شکل ۳ موقعیت فرضی امپدانس مجازی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: مدار معادل ریزشبهه برای پیاده‌سازی امپدانس مجازی.

در این مقاله با انتخاب منابع تولید پراکنده با امپدانس خط تغذیه بزرگ تر به عنوان واحد مرجع یعنی با فرض  $Z_1 < Z_2$  در ریزشبهه شکل ۲، برای تحقق تقسیم صحیح توان راکتیو، امپدانس مجازی باید به گونه‌ای طراحی شود که شرط  $Z_1 + Z_v \approx Z_{ref}$  برقرار شود و عدم تطبیق امپدانس جبران شود. که  $Z_v$  و  $Z_{ref}$  به ترتیب امپدانس مجازی و مرجع هستند.

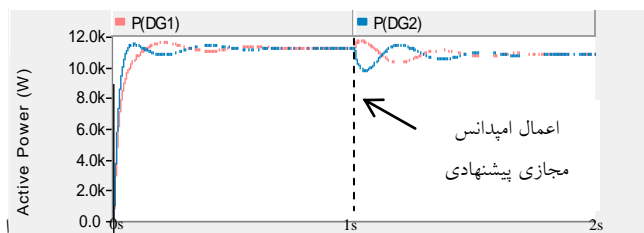
افت ولتاژ مجازی از ولتاژ مرجع حاصل از روش افتی ( $V_{droop}$ ) برای تحقق امپدانس مجازی کم می‌شود [۲]. برای تقلید اثر یک سلف واقعی، از جریان خط برای محاسبه افت ولتاژ روی امپدانس مجازی ( $\delta V$ ) فیدبک گرفته می‌شود و سپس از ولتاژ مرجع ایجاد شده توسط کنترل کننده‌های توان برای تولید ولتاژ مرجع نهایی اینورتر ( $V_{ref}$ ) کاسته می‌شود [۷, ۱۰].

تحقق امپدانس مجازی با افت ولتاژ مجازی صورت می‌گیرد [۲, ۳]. مدل‌سازی امپدانس مجازی نیز در مرجع ساکن انجام می‌شود. افت ولتاژ

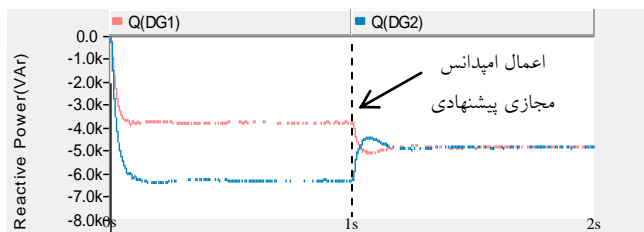
### ۴.۱. مورد الف: روش امپدانس مجازی قابل تنظیم

شکل ۶-الف تا ۶-ج عملکرد روش افی متداول و امپدانس مجازی قابل تنظیم را نشان می‌دهند. در فاصله زمانی اول (۰ تا ۱ ثانیه) صرفاً روش افی متداول و در فاصله زمانی دوم (۱ تا ۲ ثانیه) روش امپدانس مجازی نیز اعمال می‌شود.

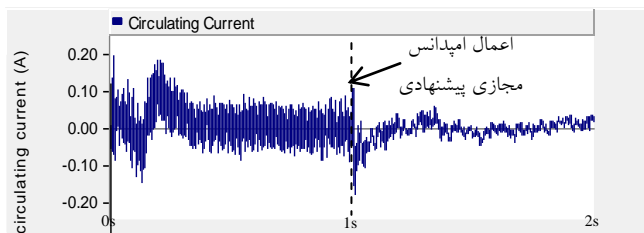
با توجه به شکل ۶-الف، تقسیم توان حقیقی همواره با استفاده از روش افی  $P-Q$  به صورت صحیح انجام می‌شود و هر دو واحد به میزان برابری در تغذیه توان حقیقی بار سهیم هستند.



الف



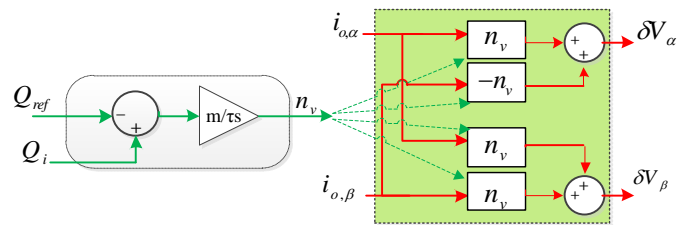
ب



ج

شکل ۶: الف: تقسیم توان حقیقی، ب: تقسیم توان راکتیو، ج: جریان چرخشی.

از شکل ۶-ب به وضوح مشخص است که با استفاده از روش افی  $Q-V$  در فاصله زمانی اول توان راکتیو دو واحد تولید پراکنده مساوی نیستند و به عبارتی تقسیم توان راکتیو به صورت نادرست انجام می‌شود. در حالی که از فاصله زمانی دوم مشاهده می‌شود که به محض اعمال روش امپدانس مجازی قابل تنظیم تقسیم صحیح توان راکتیو محقق می‌شود.



شکل ۴: تنظیم متغیر امپدانس مجازی.

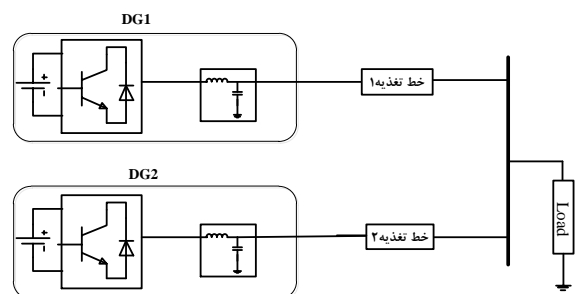
بنابراین توسط این کنترل‌کننده مقدار مقاومت و راکتانس مجازی طبق رابطه (۲۴) برای فراهم نمودن تقسیم صحیح توان راکتیو در شرایط مختلف حاکم در ریزشبهه دارای مقداری متغیر است.

$$n_v = \frac{m}{\tau S} (Q_1 - Q_{ref}) \quad (24)$$

که  $Q_1 - Q_{ref}$  بیانگر خطای توان راکتیو است. با توجه به رابطه (۲۴)، با تنظیم مناسب پارامتر  $m$  خطای توان راکتیو قابل کنترل است. در واقع، مقدار  $n_v$  یک پارامتر کنترلی اضافی و انعطاف‌پذیر جهت برآورده ساختن استفاده از قالب

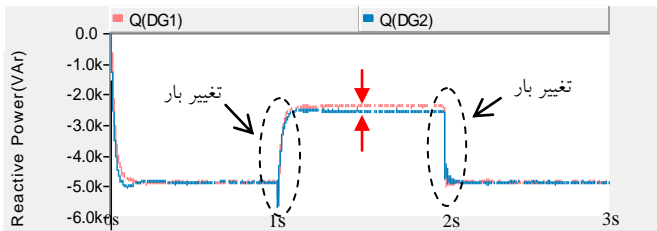
### ۴. شبیه سازی

روش کنترل پیشنهادی توسط شبیه‌سازی یک ریزشبهه جزیره‌ای نمونه مانند شکل ۵ در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC ارزیابی می‌شود. ریزشبهه شبیه‌سازی شده متشکل از دو واحد تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر یکسان با خطوط تغذیه متفاوت و یک بار در باس مشترک است.



شکل ۵: ریزشبهه مورد شبیه‌سازی.

مشخصات واحدهای تولید پراکنده تحت شبیه‌سازی در جدول ۲ داده شده است. با وجود منابع با ظرفیت توان یکسان، منابع تولید پراکنده باید به طور مساوی در تقسیم توان حقیقی و راکتیو بار شرکت کنند.



شکل ۸: تقسیم توان راکتیو در روش امپدانس مجازی ثابت.

بنابراین در مقایسه با روش امپدانس مجازی ثابت، با استفاده از روش امپدانس مجازی قابل تنظیم، سیستم کنترلی قادر است با تنظیم متغیر امپدانس مجازی در شکل ۷-ج تغییرات بار را به منظور تحقق تقسیم صحیح توان راکتیو دنبال کند.

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از امپدانس مجازی قابل تنظیم پیشنهادی، اثر عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه بر صحت تقسیم توان راکتیو جبران شد. در نتیجه تقسیم توان راکتیو توسط منابع متعدد بهبود یافت و همچنین جریان چرخشی در میان منابع کاهش یافت. با توجه به شبیه‌سازی‌ها با اعمال روش امپدانس مجازی ثابت و قابل تنظیم تقسیم توان راکتیو صحیحی حاصل شد. در حالی که روش امپدانس مجازی قابل تنظیم، به منظور تحقق تقسیم صحیح توان راکتیو، امپدانس مجازی را برای پاسخ به تغییر بار تنظیم کرد اما روش امپدانس مجازی ثابت نسبت به تغییر بار مقاوم نبود و تقسیم صحیح توان راکتیو از بین رفت. در نتیجه روش امپدانس مجازی قابل تنظیم نسبت به روش امپدانس مجازی ثابت منعطف‌تر است.

## ضمیمه

جدول ۲: مشخصات ریزشبهه مورد مطالعه

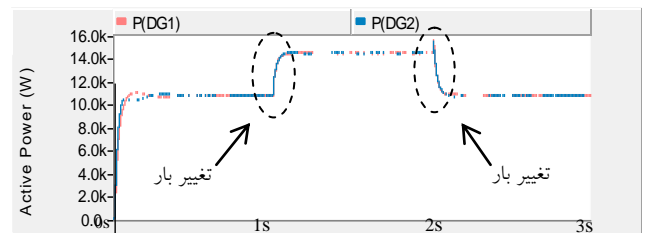
| مشخصات ریزشبهه     |                    |
|--------------------|--------------------|
| سلف فیلتر LCL      | ۱/۸ میلی هانری     |
| خازن فیلتر LCL     | ۲۵ میکرو فاراد     |
| فرکانس سوئیچ زنی   | ۱۰ کیلو هرتز       |
| فرکانس نامی        | ۵۰ هرتز            |
| ولتاژ منبع ورودی   | ۶۵۰ ولت            |
| ولتاژ نامی         | ۴۰۰ ولت            |
| مشخصات خطوط        |                    |
| خط تغذیه ۱         | $0.5 + j1.256$ اهم |
| خط تغذیه ۲         | $0.2 + j0.785$ اهم |
| مشخصات کنترل کننده |                    |
| ضریب افتی ولتاژ    | $1e-4$ ولت بر وار  |
| ضریب افتی فرکانس   | $5e-4$ هرتز بر وات |

با توجه به شکل ۶-ج روش پیشنهادی با حذف عدم تطبیق ولتاژ حاصل شده از عدم تطبیق امپدانس خطوط تغذیه می‌تواند هم زمان با بهبود تقسیم توان راکتیو جریان چرخشی بین منابع را نیز کاهش دهد.

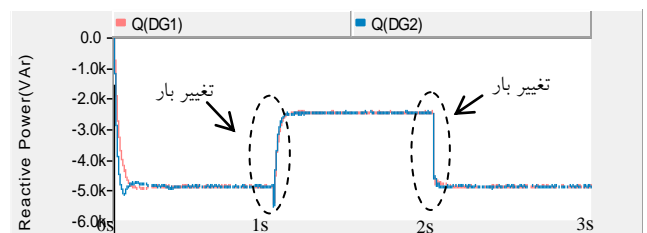
## ۴.۲. مورد ب: تغییر بار

هدف از این قسمت بررسی اثر تغییر بار بر عملکرد تقسیم توان راکتیو در روش امپدانس مجازی قابل تنظیم است. به این منظور، مقاومت و راکتانس بار به ترتیب به مقدار ۰/۵ و ۰/۳۱۴ اهم کاهش داده می‌شوند.

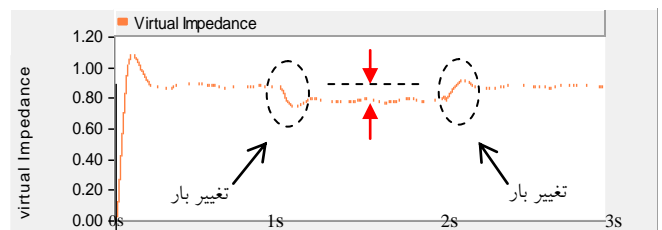
شکل‌های ۷-الف و ۷-ج عملکرد روش امپدانس مجازی قابل تنظیم را در حضور تغییر بار در فاصله زمانی ۱ تا ۲ ثانیه نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۷-ب با اعمال تغییر بار در ثانیه ۱ تقسیم توان راکتیو به صورت صحیح ادامه می‌یابد در صورتی که طبق شکل ۸ (روش امپدانس مجازی ثابت)، با وجود اینکه روش امپدانس مجازی ثابت فعال است اما با تغییر بار در فاصله زمانی ۱ تا ۲ ثانیه، تقسیم مساوی توان راکتیو از بین می‌رود.



الف



ب



ج

شکل ۷: الف: تقسیم توان حقیقی، ب: تقسیم توان راکتیو، ج: متغیر امپدانس مجازی در روش امپدانس مجازی قابل تنظیم.

|                    |              |
|--------------------|--------------|
| امپدانس مجازی ثابت | ۰/۴+j۱/۶ اهم |
| بهره انتگرال گیر   | ۰/۰۱۵        |

### منابع

- [۱] Y. Zhu, F. Zhuo, F. Wang, B. Liu, R. Gou, and Y. Zhao, "A Virtual Impedance Optimization Method for Reactive Power Sharing in Networked Microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, pp. 2890-2904, 2016.
- [۲] C. Dou, Z. Zhang, D. Yue, and M. Song, "Improved Droop Control based on Virtual Impedance and Virtual Power Source in Low-Voltage Microgrid," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, pp. 1046-1054, 2016.
- [۳] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, "Accurate Reactive Power Sharing in an Islanded Microgrid Using Adaptive Virtual Impedances," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 1605-1617, 2015.
- [۴] 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 Transactions on Smart Grid*, vol. PP, pp. 1-13, 2016.
- [۵] M. A. A.-S. Suleiman M. Sharkh, Georgios I. Orfanoudakis, Babar Hussain *Power Electronic Converters for Microgrids: Wiley-IEEE Press*, 20۱۴
- [۶] Y. Han, P. Shen, X. Zhao, and J. M. Guerrero, "An Enhanced Power Sharing Scheme for Voltage Unbalance and Harmonics Compensation in an Islanded Microgrid," 2016.
- [۷] R. Moslemi and J. Mohammadpour, "Accurate Reactive Power Control of Autonomous Microgrids Using an Adaptive Virtual Inductance Loop," *Electric Power Systems Research*, vol. 129, pp. 142-149, 2015.
- [۸] H. Mahmood, D. Michaelson, and J. Jiang, "Reactive Power Sharing in Islanded Microgrids Using Adaptive Voltage Droop Control," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 3052-3060, 2015.
- [۹] Y. Chen, J. M. Guerrero, Z. Shuai, Z. Chen, L. Zhou, and A. Luo, "Fast Reactive Power Sharing, Circulating Current and Resonance Suppression for Parallel Inverters Using Resistive-Capacitive Output Impedance," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, pp. 5524-5537, 2016.
- [۱۰] H. Nikos, "Intelligent Local Controllers," in *Microgrids: Architectures and Control*, ed: Wiley-IEEE Press, 2014.
- [۱۱] Y. W. Li and C.-N. Kao, "An Accurate Power Control Strategy for Power-Electronics-Interfaced Distributed Generation Units Operating in a Low-Voltage Multibus Microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, pp. 2977-2988, 2009.