

بهبود پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه‌های جزیره‌ای با افزودن گزینشی ضرایب دینامیکی به مشخصه کنترل افتی تعدادی از منابع اینورتری

مرتضی منصوری تکان‌تپه^۱، دانشجوی دکتری؛ محسن حمزه^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران- تهران- ایران- mansourimrtz@ut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران- تهران- ایران- mohsenhamzeh@ut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، استفاده از ضرایب دینامیکی گزینشی در مشخصه کنترل افتی تعدادی از منابع اینورتری در بهبود پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه‌های جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر بررسی می‌شود؛ هدف از این کار رسیدن به یک بهبود قابل قبول در پایداری سیگنال کوچک ریز شبکه‌ها با انتخاب کمترین تعداد ممکن از منابع اینورتری به منظور استفاده از ضرایب دینامیکی کنترل افتی در آن‌ها است. ابتدا معادلات حالت جامع ریز شبکه‌های جزیره‌ای مبتنی بر منابع اینورتری بر اساس معادلات خطی سازی شده‌ی آن‌ها محاسبه می‌شود. سپس با در نظر گرفتن یک ریز شبکه‌ی نمونه، با استفاده از تحلیل حساسیت بر روی قطب‌های فرکانس پایین کم‌میرای این ریز شبکه، آن دسته از منابع اینورتری مشخص می‌شود که بتوان صرفاً با افزودن ضرایب دینامیکی به مشخصه کنترل افتی این منابع، میرایی نوسان‌های توان منابع ریز شبکه را به شکل قابل توجهی بهبود داد. برای ارزیابی تأثیر ضرایب دینامیکی گزینشی، یک شبیه‌سازی از ریز شبکه‌ی مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار PLECS فراهم شده است.

واژه‌های کلیدی: پایداری سیگنال کوچک، تحلیل حساسیت، تحلیل مقادیر ویژه، تقسیم توان، ریز شبکه‌ی جزیره‌ای، ضرایب دینامیکی، کنترل افتی مستقیم، منبع اینورتری کنترل ولتاژ.

Improvement of Small Signal Stability of Islanded Microgrids by Adding the Selective Dynamic Droop Gains

Morteza Mansouri Takantape¹, PhD student; Mohsen Hamzeh², Assistant Professor

1- School of Electrical and Computer Engineering- Faculty of Engineering- University of Tehran- Tehran- Iran- mansourimrtz@ut.ac.ir

2- School of Electrical and Computer Engineering- Faculty of Engineering- University of Tehran- Tehran- Iran- mohsenhamzeh@ut.ac.ir

Abstract: In this paper, the improvement of small signal stability of islanded inverter-based microgrids by selective dynamic gains of droop are discussed. An acceptable improvement must be reached by using the possible minimum number of voltage source inverters in order to adding the proper dynamic gains to their droop characteristic. First, using the linearized equations of inverter-based islanded microgrids, a state-space equation of islanded microgrids is presented. Then, a microgrid test system is considered and a sensitivity analysis is applied to its low-frequency eigenvalues with a low damping factor. Using the sensitivity analysis, the more effective voltage source inverters are identified such that the addition of proper dynamic gains only to their droop characteristic can increase the damping of low-frequency power oscillations of microgrid. A simulation study is carried out in order to verify the effectiveness of selective dynamic gains of droop in PLECS software.

Keywords: Droop method, dynamic gains of droop, eigenvalue analysis, islanded microgrid, power-sharing, sensitivity analysis, small signal stability, voltage source inverter.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵ و ۱۳۹۷/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۱۸

نام نویسنده مسئول: محسن حمزه

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۱- مقدمه

با وجود آن‌که منابع انرژی تجدیدپذیر سهم کمی از کل تولیدات برق را به خود اختصاص داده‌است، ولی شتاب استفاده از این منابع نسبت به روش‌های قدیمی بسیار بیشتر است. به عنوان مثال در کشور آمریکا فقط در طی سال ۲۰۰۱ معادل ۴۰ درصد به ظرفیت برق بادی افزوده شده‌است، هم‌چنین در اروپا چشم‌اندازی برای تولید ۱۵۰۰۰۰ مگاوات برق بادی تا سال ۲۰۲۰ وجود دارد [۱]. در ایران نیز قرار است در پایان برنامه‌ی ششم تا ۵ درصد از برق مورد نیاز کشور از منابع تجدیدپذیر تأمین شود [۲]. منابع انرژی تجدیدپذیر مفهوم تولیدات پراکنده را گسترش داده‌است. به طور کلی تولیدات پراکنده به معنای حضور منابع تولید انرژی الکتریکی اعم از تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در شبکه‌ی برق است. در آمریکای شمالی با وجود آن‌که در حال حاضر به دلایل اقتصادی در عمل توان تجدیدپذیر قابل توجهی به خریداران تحویل داده نمی‌شود، ولی چشم‌انداز بسیار خوبی در این زمینه وجود دارد [۳].

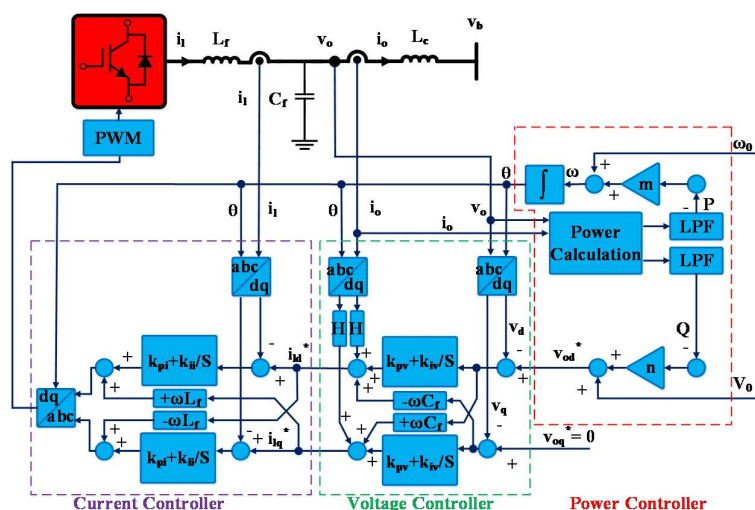
آن دسته از منابع تولید پراکنده (DGها) از جمله سیستم‌های فتوولتائیک^۲ و ولتاژ خروجی آن‌ها dc است، با مبدل واسط اینورتری به شبکه‌ی سراسری متصل می‌شود. منابع اینورتری هم‌چنین می‌توانند در شرایط جزیره‌ای کنترل ولتاژ و فرکانس را برعهده گیرند [۴]. یک ریزشبه در واقع یک شبکه در مقیاس کوچک است که در آن، تولیدات پراکنده سهم عمده‌ای از تولید انرژی را دارد. علاوه بر این، یک ریزشبه در صورتی که به شکل مناسبی کنترل شود، می‌تواند انعطاف‌پذیری، کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم قدرت را افزایش دهد [۵]. زمانی که دو یا تعداد بیشتری از منابع کنترل ولتاژ اینورتری^۳ هم‌زمان در یک ریزشبه جزیره‌ای فعال باشد، لازم است که یک الگوریتم تقسیم توان، بین آن‌ها اجرا شود [۶]. تقسیم توان در ریزشبه‌های جزیره‌ای به طور کلی به دو صورت متمرکز و غیرمتمرکز انجام می‌شود. به سبب مزایای روش غیرمتمرکز کنترل افقی مستقیم^۴؛ از جمله قابلیت اطمینان بالای آن، عمدتاً از این روش برای تقسیم توان بین منابع یک ریزشبه جزیره‌ای استفاده می‌شود [۴]. در مطالعات گذشته، با استفاده از تحلیل حساسیت^۵ بر روی مقادیر ویژه‌ی معادله‌ی حالت ریزشبه، تأثیرپذیری بالای قطب‌های غالب فرکانس پایین ریزشبه به متغیرهای حالت کنترل افقی نشان داده شده‌است [۷، ۸]. در تحقیقات انجام شده بیان شده‌است که افزایش ضریب استاتیکی موجود در کنترل افقی باعث ناپایدار شدن ریزشبه می‌شود [۹]. مرجع [۱۰] با حفظ مزیت محلی بودن روش کنترل افقی، با افزودن ضرایب دینامیکی (عبارت‌هایی از مشتق توان) به مشخصه کنترل افقی منابع اینورتری پایداری سیگنال کوچک ریزشبه را بهبود داده‌است. بر این اساس در بسیاری از مطالعات، از این ضرایب استفاده شده‌است [۱۱-۱۵]. با این حال، تأثیر افزودن این ضرایب در مشخصه کنترل افقی یک منبع بر نوسان‌های توان سایر منابع دیده نشده‌است. هم‌چنین امکان استفاده از این ضرایب به صورت گزینشی در منابع اینورتری بررسی نشده‌است. به دلایل و محدودیت‌های فنی و اقتصادی استفاده از ضرایب دینامیکی در مشخصه کنترل افقی تمامی منابع ریزشبه همواره میسر نیست. بنابراین باید آن دسته از منابع

اینورتری که متغیرهای حالت آن‌ها نقش قابل توجهی در حرکت قطب‌های کم‌میرای ریزشبه دارند، شناسایی شوند تا با اصلاح مشخصه افقی آن‌ها میرایی مطلوبی برای نوسان‌های توان حاصل شود. در این مقاله، سعی شده‌است با تشخیص منابع مناسب و اعمال عبارت‌های مشتقی به کنترل افقی آن‌ها، تاحدامکان تعداد منابع اینورتری لازم برای بهبود پایداری سیگنال کوچک ریزشبه کاهش یابد. بدین منظور ابتدا معادلات حالت ریزشبه‌های جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر با استفاده از خطی‌سازی معادلات آن حول نقطه‌ی کار محاسبه شده‌است. سپس، یک ریزشبه جزیره‌ای ولتاژ متناوب با سطح ولتاژ سه فاز ۴۰۰ ولت، شامل چهار منبع اینورتری و سه بار محلی در نظر گرفته شده‌است. در مرحله‌ی بعد، با انجام تحلیل حساسیت بر روی مقادیر ویژه‌ی غالب این ریزشبه، موثرترین متغیرهای حالت در حرکت قطب‌های با میرایی کم مشخص شده‌است. بامشخص شدن این متغیرهای حالت، ضرایب دینامیکی مناسبی به مشخصه کنترل افقی منابع مربوطه افزوده شده‌است تا پایداری سیگنال کوچک کل ریزشبه (یا میرایی نوسان‌های توان منابع آن ریزشبه) به حد قابل قبولی برسد. هم‌چنین نشان داده شده‌است که باتوجه به نتایج تحلیل حساسیت ممکن است لازم باشد ضرایب دینامیکی به مشخصه کنترل افقی همه منابع افزوده شود.

سایر بخش‌های مقاله به صورت زیر است؛ در بخش ۲، روابط کنترل افقی مستقیم و ضرایب دینامیکی آن نشان داده شده‌است. در بخش ۳، مدل‌سازی ریزشبه‌های جزیره‌ای مبتنی بر اینورتر ارائه شده‌است. در بخش ۴، رابطه مورد استفاده در تحلیل حساسیت بیان شده‌است و در بخش ۵، با در نظر گرفتن یک ریزشبه‌ی جزیره‌ای نمونه و تحلیل حساسیت بر روی مقادیر ویژه‌ی غالب آن به بهبود پایداری سیگنال کوچک این ریزشبه پرداخته شده‌است. هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی و جمع‌بندی به ترتیب در بخش‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌است.

۲- تقسیم توان با روش کنترل افقی مستقیم و افزودن ضرایب دینامیکی به آن

در یک ریزشبه‌ی جزیره‌ای مبتنی بر منابع اینورتری، وظیفه‌ی کنترل ولتاژ و فرکانس برعهده‌ی همه یا تعدادی از منابع اینورتری است. بنابراین باید این منابع به صورت یک منبع ولتاژ عمل کنند. بدین منظور لازم است حلقه‌ی کنترلی آن‌ها به صورت کنترل ولتاژ باشد. هم‌چنین برای افزایش پایداری کنترل ولتاژ یک حلقه‌ی داخلی کنترل جریان نیز به سیستم کنترلی این منابع افزوده می‌شود. معمولاً به منظور ساده‌تر شدن پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌ها از قاب dq استفاده می‌شود. بدین ترتیب که سیگنال‌های کنترلی ابتدا از قاب abc به قاب dq منتقل می‌شود و بعد از انجام مراحل کنترلی بار دیگر به قاب abc بر می‌گردد. مزیت این کار در این است که در قاب dq ، کنترل‌کننده‌ی تناسبی-انتگرالی^۶ جایگزین کنترل‌کننده رزونانسی^۷ می‌شود. حلقه‌های کنترلی ولتاژ و جریان یک منبع اینورتری کنترل ولتاژ در شکل ۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱: حلقه‌های کنترلی یک منبع اینورتری کنترل ولتاژ در ریزشکته جزیره‌ای.

اینورتری است. زیرنویس «0» به مقادیر بی‌باری اشاره می‌کند. از سیگنال $\theta = \int \omega dt$ در سیستم کنترلی به‌عنوان زاویه تبدیل‌های dq/abc استفاده می‌شود و سیگنال V نیز مرجع محور d کنترل‌کننده ولتاژ را می‌سازد. همچنین m و n ضرایب استاتیکی کنترل اف‌تی خوانده می‌شوند که از روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$m = \Delta\omega / P_{\max} \quad (3)$$

$$n = \Delta V / Q_{\max} \quad (4)$$

که در آن‌ها $\Delta\omega$ و ΔV به‌ترتیب افت فرکانس مجاز در توان حقیقی بیشینه و دامنه ولتاژ خروجی مجاز در توان موهومی بیشینه است. نمودار بلوکی واحد تقسیم توان براساس کنترل اف‌تی در شکل ۱ و به‌همراه کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان نشان داده شده‌است.

در حالت دائمی به‌دلیل یکسان بودن فرکانس در همه نقاط ریزشکته، توان حقیقی بارها مطابق رابطه (۵) با نسبت عکس ضرایب استاتیکی DGها و به شکل ایده‌آل بین آن‌ها تقسیم می‌شود؛ بدین ترتیب خطای تقسیم توان حقیقی صفر می‌شود.

$$P_1 / P_2 = m_2 / m_1 \quad (5)$$

$$Q_1 / Q_2 = n_2 / n_1 \quad (6)$$

از طرف دیگر به علت ناهمگونی امپدانس‌های خطوط و وجود بارهای محلی، خطایی در تقسیم توان راکتیو ایجاد می‌شود [۱۸]. برای کاهش این خطا، می‌توان ضریب n را افزایش داد. علاوه بر این به‌دلیل کم‌تربودن توان‌های نامی برخی DGها، m مربوط به آن‌ها افزایش می‌یابد. در هر دو مورد فوق با افزایش m ، برخی از مودهای ریزشکته به سمت محور موهومی حرکت کرده و ضریب میرایی آن‌ها کاهش می‌یابد و چه بسا ممکن است موجب ناپایداری سیستم شود [۲۰-۱۸].

وجود یک فیلتر پایین‌گذر (مطابق شکل ۱) در واحد تقسیم توان (در اینجا کنترل اف‌تی)، عامل اصلی ایجاد قطب‌های فرکانس پایین ریزشکته است. افزودن عبارت‌هایی از مشتق توان‌های حقیقی و موهومی

در یک ریزشکته جزیره‌ای باید توان بار متناسب با توان نامی منابع اینورتری بین آن‌ها تقسیم شود. بدین‌منظور از واحد کنترل توان در این منابع استفاده می‌شود. کنترل اف‌تی مستقیم رایج‌ترین روش برای تقسیم توان است. در این روش، فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی منابع اینورتری به‌ترتیب متناسب با توان‌های حقیقی و موهومی کاهش داده می‌شود. این روش با فرض اندوکتانسی بودن خطوط به‌کار می‌رود. از طرف دیگر در ریزشکته‌های ولتاژ پایین که عمدتاً دارای خطوط مقاومتی هستند، می‌توان از کنترل اف‌تی معکوس استفاده کرد. در این روش، فرکانس ولتاژ خروجی منابع اینورتری متناسب با توان موهومی (راکتیو) افزایش و دامنه ولتاژ خروجی نیز متناسب با توان حقیقی کاهش می‌یابد. عمدتاً به‌دلیل کم‌تربودن خطای تقسیم توان در کنترل اف‌تی مستقیم نسبت به کنترل اف‌تی معکوس، از همان کنترل اف‌تی مستقیم در ریزشکته‌های ولتاژ پایین استفاده می‌شود. در چنین شرایطی به‌دلیل مقاومتی بودن خطوط، پایداری سیگنال کوچک ریزشکته مبتنی بر کنترل اف‌تی مستقیم کاهش می‌یابد. بنابراین مطابق شکل ۱، سلف تزویجی به خروجی فیلتر LC منابع اینورتری افزوده می‌شود تا اثر متقابل توان‌های حقیقی و موهومی به‌ترتیب بر مشخصه اف‌تی ولتاژ و فرکانس کاهش یافته و وضعیت پایداری ریزشکته بهتر شود [۱۵]. ضمناً می‌توان این سلف را به‌صورت مجازی در حلقه کنترلی منابع اینورتری قرار داد. در این مقاله از روش کنترل اف‌تی مستقیم برای تقسیم توان و سلف تزویج در خروجی منابع اینورتری برای افزایش حاشیه پایداری ریزشکته استفاده شده‌است.

روابط کنترل اف‌تی مستقیم در هر منبع اینورتری به‌صورت زیر است [۱۷]:

$$\omega = \omega_0 - m(P) \quad (1)$$

$$V = V_0 - n(Q) \quad (2)$$

که در آن ω ، V ، P و Q به‌ترتیب مقادیر مرجع فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی منبع اینورتری و توان‌های حقیقی و موهومی منبع

باتوجه به استفاده از قاب dq در سیستم کنترلی منابع اینورتری، معادلات تمام اجزای ریزشبه در قاب dq نوشته می‌شود. مرجع قاب dq برای هریک از منابع اینورتری ابتدا زاویه‌ی ولتاژ خروجی آن منبع (زاویه‌ی ولتاژ خازن فیلتر LC در شکل ۱) در نظر گرفته می‌شود، سپس با استفاده از ماتریس تبدیل رابطه (۹) به یک مرجع مشترک قراردادی که در اینجا زاویه‌ی ولتاژ خروجی یکی از منابع اینورتری است، منتقل می‌شود. معادلات خطوط و بارها نیز مستقیماً در همان مرجع مشترک نوشته می‌شود. رابطه انتقال معادلات از یک مرجع dq به مرجع دیگر برابر است با:

$$x_{iDQ} = \begin{pmatrix} \cos \delta_i & -\sin \delta_i \\ \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{pmatrix} x_{idq} \quad (9)$$

که در آن x_i و δ_i به ترتیب متغیرهای حالت i امین اینورتر و زاویه بین مرجع آن اینورتر با مرجع مشترک است. همچنین DQ و dq به ترتیب اندیس‌های مربوط به مرجع مشترک و مرجع محلی هر منبع اینورتری است. در این مقاله به جهت اختصار، روابط حاکم بر کنترل‌کننده‌ها، فیلتر خروجی DGها، خطوط و بارها آورده نشده و صرفاً شکل کلی معادلات حالت بیان شده است.

۳-۱- معادلات اینورتر و فیلتر خروجی

باتوجه به شکل ۱ و معادلات حاکم بر کنترل‌کننده‌ها و فیلتر خروجی، متغیرهای حالت یک منبع اینورتری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta x_{DGi} = \begin{bmatrix} \Delta \delta_i & \Delta P_i & \Delta Q_i & \Delta \lambda_{v_{dqi}} \\ \Delta \lambda_{C_{dqi}} & \Delta i_{ldqi} & \Delta v_{odqi} & \Delta i_{odqi} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

که در آن i اندیس DG، Δ نماد تغییرات سیگنال کوچک هر یک از متغیرها، δ_i زاویه‌ی بین مرجع i امین DG و مرجع مشترک، P_i و Q_i ، به ترتیب توان‌های حقیقی و موهومی در خروجی i امین DG و i_{ldqi} و v_{odqi} به ترتیب شامل دو مؤلفه‌ی d و q از جریان سلف سمت اینورتر، ولتاژ خازن فیلتر خروجی و جریان سلف تزویج در خروجی i امین DG است. همچنین دو متغیر $\lambda_{v_{dqi}}$ و $\lambda_{C_{dqi}}$ که هر کدام شامل دو مؤلفه‌ی d و q است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

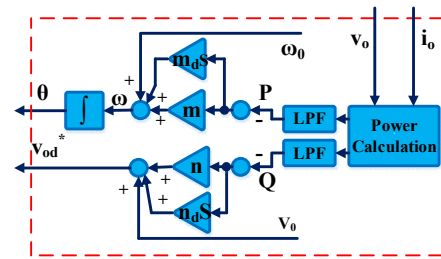
$$\lambda_{v_{dqi}} = \left[\int (v_{odqi}^* - v_{odqi}) dt \right] \quad (11)$$

$$\lambda_{C_{dqi}} = \left[\int (i_{odqi}^* - i_{odqi}) dt \right] \quad (12)$$

که «*» نماد سیگنال‌های مرجع کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان است. براساس ماتریس متغیرهای حالت تعریف‌شده در (۱۰)، معادلات حالت زیر برای هر کدام از DGها به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{DGi} \end{bmatrix} = A_{DGi} \begin{bmatrix} \Delta x_{DGi} \end{bmatrix} + B_{DGi} \begin{bmatrix} \Delta v_{bdqi} \end{bmatrix} + B_{i\omega_{com}} \begin{bmatrix} \Delta \omega_{com} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_i \\ \Delta i_{odqi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{DG\omega_i} \\ C_{DGc_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{DGi} \end{bmatrix} \quad (14)$$



شکل ۲: نمودار بلوکی واحد کنترل افی به همراه ضرایب دینامیکی در یک منبع اینورتری کنترل ولتاژ.

به توابع کنترل افی موجب افزایش پایداری این قطب‌های فرکانس پایین می‌شود [۱۰]. این کار با اصلاح هم‌زمان مشخصه کنترل افی همه DGها و به صورت روابط زیر انجام می‌شود:

$$\omega = \omega_0 - m(P) - m_d \frac{dP}{dt} \quad (7)$$

$$V = V_0 - n(Q) - n_d \frac{dQ}{dt} \quad (8)$$

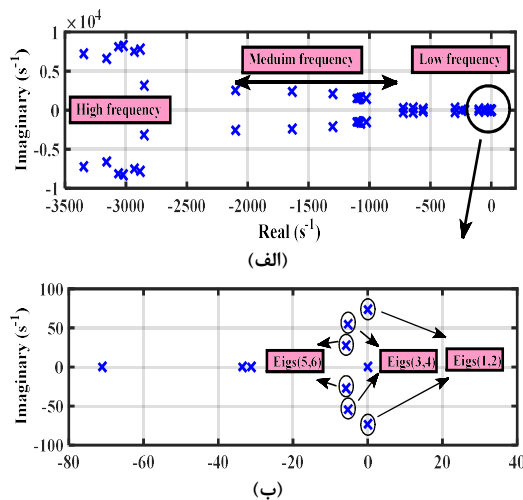
که m_d و n_d ضرایب دینامیکی نامیده می‌شوند. نمودار بلوکی کنترل افی به همراه ضرایب دینامیکی در شکل ۲ نشان داده شده است. با داشتن ضرایب دینامیکی، این سؤال مطرح می‌شود که آیا در ریز- شبکه‌های موجود که دارای حلقه‌ی کنترل افی هستند، لازم است برای بهبود پایداری ریزشبه، ضرایب دینامیکی را به مشخصه کنترل افی همه DGها افزود یا می‌توان با انجام این کار فقط در برخی از DGها تاحدزیادی به هدف موردنظر رسید. آنالیز حساسیت معیاری مهم برای پی‌بردن به پارامترهای تعیین‌کننده در جابه‌جایی مطلوب یک مقدار ویژه است. اگر بعد از انجام آنالیز حساسیت بر روی قطب‌های فرکانس پایین، متغیرهای حالت تعدادی از DGها نقش مؤثری در حرکت دادن این قطب‌ها داشته باشد، در این صورت کافی است ضرایب دینامیکی را فقط به مشخصه کنترل افی این DGها افزود. برای انجام آنالیز حساسیت ابتدا باید معادله‌ی حالت ریزشبه تشکیل و مقادیر ویژه‌ی آن محاسبه شوند. در بخش بعدی نحوه‌ی تشکیل معادله‌ی حالت سیستم شرح داده می‌شود.

۳- مدل‌سازی ریزشبه به منظور انجام مطالعات پایداری سیگنال کوچک

یکی از مهم‌ترین روش‌های مطالعه‌ی پایداری سیگنال کوچک یک سیستم، خطی‌سازی معادلات آن سیستم حول نقطه‌ی کار و محاسبه‌ی معادلات حالت آن است [۱۶]. تفکیک معادلات حالت یک ریزشبه به معادلات حالت هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن از جمله منابع، خطوط و بارها روش قاعده‌مندی است که در [۸] تشریح شده است. از آنجاکه منابع اینورتری موجود در ریزشبه‌ها پاسخ زمانی بسیار کوچکی دارند، دینامیک خطوط و بارها نیز در مدل‌سازی کل سیستم ریزشبه لحاظ شده است [۸]. در این مقاله، خطوط و بارها به صورت امپدانسی مدل شده است.

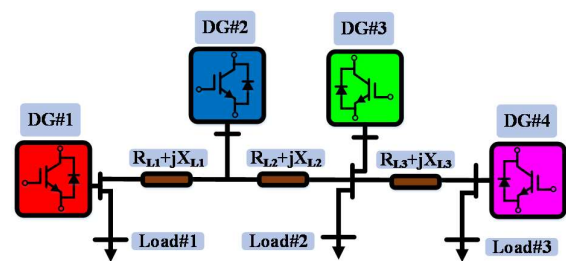
بالین‌حال، به‌دلیل خطای تقسیم توان بهتر روش کنترل اُفتی مستقیم نسبت به روش کنترل اُفتی معکوس، مطابق معمول سایر مطالعات، در این مقاله نیز از روش نخست برای تقسیم توان بین منابع استفاده شده‌است. در عوض برای افزایش پایداری ریزشبه، از سلف تزویج در خروجی منابع اینورتری استفاده شده‌است. ضرایب استاتیکی کنترل اُفتی منابع اینورتری نیز با فرض اُفت فرکانس مجاز 0.3% و اُفت ولتاژ مجاز 4% محاسبه شده‌است. هم‌چنین در مواردی که ضرایب دینامیکی در مشخصه کنترل اُفتی به‌کار رفته‌است، مقدار مناسب این ضرایب با افزایش تدریجی آن‌ها و مشاهده حرکت مقادیر ویژه به‌دست آمده‌است. لازم به ذکر است که برای به‌دست‌آوردن قطب‌های سیستم، مقادیر ویژه ریزشبه مورد مطالعه در نرم‌افزار Matlab محاسبه شده‌است.

همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، افزایش ضرایب استاتیکی کنترل اُفتی موجب ناپایداری ریزشبه می‌شود. با توجه به رابطه (۵)، کاهش توان نامی منابع اینورتری موجب افزایش ضرایب استاتیکی کنترل اُفتی می‌شود. بنابراین در این مقاله، ریزشبه تحت مطالعه در طی دو سناریو براساس تفاوت توان نامی منابع اینورتری بررسی می‌شود. در سناریو ۱، توان نامی دو منبع اینورتری ۱ و ۲ برابر $5 kW$ و توان نامی دو منبع دیگر برابر $10 kW$ در نظر گرفته می‌شود. در سناریو ۲ نیز توان نامی همه منابع اینورتری برابر با $10 kW$ خواهد بود.



(ج)

شکل ۴: قطب‌های ریزشبه تحت مطالعه در سناریو ۱، زمانی که ضرایب دینامیکی به مشخصه کنترل اُفتی هیچ‌کدام از منابع اینورتری افزوده نشده‌است. (الف) قطب‌های مهم و (ب) قطب‌های فرکانس پایین. (ج) قطب‌های فرکانس پایین در سه نقطه کار مختلف.



شکل ۳: نمودار شماتیک ریزشبه‌ای جزیره‌ای تحت مطالعه‌ی مبتنی بر روش کنترل اُفتی مستقیم.

$$\Delta x_{MG} = \begin{bmatrix} \Delta x_{DG}^T & \Delta i_{LineDQ}^T & \Delta i_{LoadDQ}^T \end{bmatrix}^T \quad (27)$$

$$\dot{\Delta x}_{MG} = A_{MG} \Delta x_{MG} \quad (28)$$

شکل کلی ماتریس A_{MG} برای ریزشبه‌های جزیره‌ای مبتنی بر کنترل اُفتی مستقیم در مراجع [۶ و ۸] نشان داده‌است. با داشتن این ماتریس و محاسبه‌ی مقادیر ویژه‌ی آن (قطب‌ها یا مودهای سیستم)، می‌توان به تحلیل پایداری سیگنال کوچک ریزشبه پرداخت.

۴- تحلیل حساسیت

با استفاده از تحلیل حساسیت می‌توان سهم مشارکت هر یک از متغیرهای حالت یک سیستم را در تغییر محل یک قطب سیستم محاسبه کرد [۷]. ضریب مشارکت p_{ki} که در رابطه (۲۹) نمایش داده شده‌است، به‌صورت حساسیت i امین مقدار ویژه (λ_i) به k امین عنصر از درایه‌های قطری ماتریس حالت (a_{kk}) تعریف می‌شود. ضریب مشارکت با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۶]:

$$p_{ki} = \frac{d\lambda_i}{da_{kk}} = \frac{\varphi_{ki} \psi_{ik}}{\sum_{k=1}^n \varphi_{ki} \psi_{ik}} \quad (29)$$

که در آن φ_{ki} و ψ_{ik} به ترتیب درایه‌های a_{ki} و a_{ik} از ماتریس‌های حاوی بردارهای ویژه‌ی سمت چپ و راست و n تعداد کل متغیرهای حالت سیستم است.

۵- ریزشبه تحت مطالعه و تحلیل مقادیر ویژه‌ی آن

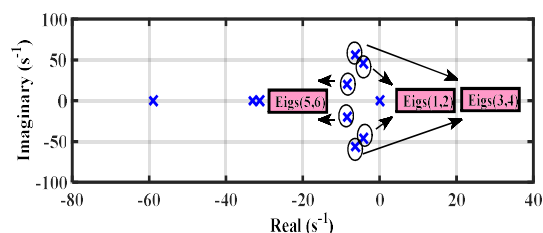
به‌منظور انجام تحلیل مقادیر ویژه، یک ریزشبه‌ی جزیره‌ای مبتنی بر کنترل اُفتی با سطح ولتاژ سه فاز ۴۰۰ ولت، مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده‌است. این ریزشبه شامل چهار منبع کنترل ولتاژ با حلقه‌های کنترلی شکل ۱، دو بار امپدانس با توان‌های نامی $17 kW$ و $8 kW$ هر دو با ضریب توان 0.9 و یک بار امپدانس دیگر با توان نامی $1/3 kW$ و با ضریب توان 0.69 است. هم‌چنین در ریزشبه، خطوطی با طول‌های ۵۰۰، ۶۰۰ و ۲۰۰ متر با مشخصات کابل‌های $1-0.6 kV$ شرکت کابل ابهر (پیوست) در نظر گرفته شده‌است. امپدانس این خطوط عمدتاً مقاومتی است و به نظر می‌رسد، از منظر پایداری ریزشبه بهتر است از روش کنترل اُفتی معکوس برای تقسیم توان بین منابع استفاده شود.

جدول ۱: ضرایب مشارکت متغیرهای حالت ریزشکته تحت مطالعه در سناریو ۱ برحسب پریونیت (از بقیه ضرایب صرف نظر شده‌است).

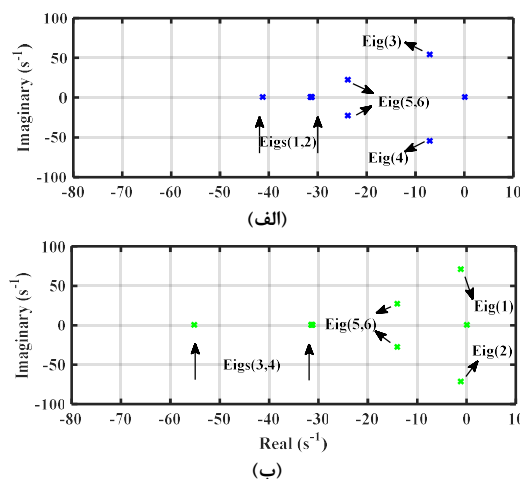
حالت‌ها	Eigs (1, 2)	Eigs (3, 4)	Eigs (5, 6)
ΔP_1	0.139	0.023	0.183
ΔQ_1	0.029	-----	0.102
$\Delta \delta_2$	0.543	-----	-0.053
ΔP_2	0.351	-0.004	0.055
ΔQ_2	0.059	-----	0.031
$\Delta \delta_3$	-0.071	0.410	0.128
ΔP_3	0.027	0.297	0.021
ΔQ_3	-0.013	0.037	0.013
$\Delta \delta_4$	0.025	0.079	0.349
ΔP_4	-----	0.199	0.105

صفر بوده و تغییر نمی‌کند. بنابراین یک قطب ریزشکته در مبدأ مختصات قرار می‌گیرد و در تمامی حالت‌های ریزشکته وجود خواهد داشت. همچنین به‌منظور نشان دادن تأثیر نقطه کار بر پایداری سیستم، قطب‌های فرکانس پایین ریزشکته به‌ازای سه نقطه کار مختلف در شکل ۴ (ج) رسم شده‌است. این سه نقطه کار مختلف شامل بار نامی، ۱۲۰٪ بار نامی و ۸۰٪ بار نامی است. باتوجه به این شکل، اگرچه با کاهش توان بار، قطب‌های فرکانس پایین اندکی به سمت ناپایداری متمایل شده اند، اما این جابه‌جایی چندان قابل ملاحظه نیست. بنابراین تغییرات نقطه کار تأثیر زیادی بر پایداری ریزشکته مورد مطالعه نداشته‌است.

براساس جدول ۱، متغیرهای حالت DGهای (۱ و ۲) نقش اصلی را در جابه‌جایی زوج قطب‌های (۱ و ۲) دارد. بنابراین کافی است که ضرایب دینامیکی مناسب فقط به مشخصه کنترل افقی همین DGها اضافه شود که نتیجه‌ی آن در شکل ۵ (الف) به‌صورت قطب‌های آبی‌رنگ به نمایش گذاشته شده‌است. شکل ۵ (الف) به‌خوبی نشان می‌دهد که بهبود کنترل افقی DGهای (۱ و ۲)، زوج قطب‌های (۱ و ۲) را به مکانی روی محور حقیقی، با میرایی بیشتر از ۳۰ منتقل کرده‌است. به‌عبارت دیگر، اگر قطب‌ها به‌صورت $S_{1,2} = -\delta_{1,2} \pm j\omega_{1,2}$ باشد، در این صورت $\delta_{1,2} > 30$ است. اگر ضرایب دینامیکی به‌جای DGهای (۱ و ۲)، در مشخصه کنترل افقی DGهای (۳ و ۴) قرار داده شود، قطب‌های سبز رنگ شکل ۵ (ب) به‌دست می‌آید که اثر قابل توجهی در بهبود پایداری



شکل ۶: قطب‌های غالب ریزشکته نمونه در سناریو ۲، زمانی که ضرایب دینامیکی به مشخصه کنترل افقی هیچ کدام از منابع اینورتری افزوده نشده‌است.



شکل ۵: حرکت قطب‌های فرکانس پایین ریزشکته نمونه زمانی که ضرایب دینامیکی فقط به مشخصه کنترل افقی (الف) DGهای (۱ و ۲) و (ب) DGهای (۳ و ۴) افزوده شده‌است (در سناریو ۱).

۵-۱- سناریو ۱

قطب‌های حائز اهمیت ریزشکته در سناریو ۱ در شکل ۴ (الف) نشان داده شده‌است. مطابق شکل ۴ (الف)، مقادیر ویژه سیستم به سه دسته کلی فرکانس بالا، متوسط و پایین تقسیم شده‌است. نمای بزرگ‌شده‌ی مقادیر ویژه‌ی فرکانس پایین نیز در شکل ۴ (ب) نشان داده شده‌است. هرکدام از زوج قطب‌های مزدوج، به همه یا تعدادی از متغیرهای حالت مرتبط است. متغیرهای حالت مربوط به کنترل افقی منابع اینورتری دارای ضرایب مشارکت بزرگی در قطب‌های فرکانس پایین هستند. اگر در این بین، دو زوج قطب حساس که نقش مهمی در پایداری سیستم دارد، به‌طور عمده فقط به متغیر حالت تعدادی از DGها بستگی داشته‌باشد، در این صورت می‌توان به‌جای همه DGها، صرفاً با افزودن عبارت‌های دینامیکی به مشخصه کنترل افقی DGهای مربوطه، وضعیت پایداری سیستم را به‌طور قابل قبولی بهبود داد. بنابراین انتخاب DGهای مناسب برای اصلاح مشخصه کنترل افقی براساس همان ضرایب مشارکت انجام می‌شود. ممکن است با انجام تحلیل حساسیت، همانند آن‌چه در سناریو ۱ بررسی خواهد شد، زوج قطبی دارای میرایی پایین‌تری نسبت به سایرین باشد، در این صورت به‌طور قابل قبولی می‌توان برای بهبود پایداری کل سیستم صرفاً به متغیرهای حالت DGهایی توجه کرد که دارای ضریب مشارکت بزرگ‌تری در آن قطب‌ها هستند. ازطرفی اگر چندین زوج قطب فرکانس پایین سیستم، موقعیت نسبتاً مشابهی در صفحه مختلط داشته‌باشند، و متغیرهای حالت همه منابع اینورتری ضرایب مشارکت بزرگی در این قطب‌ها داشته‌باشند (همانند سناریو ۲)، در این صورت، باید کنترل افقی همه منابع به عبارت‌های دینامیکی مجهز شود. مطابق شکل ۴ (ب)، زوج قطب‌های (۱ و ۲) به‌طور بارزی پایداری ریزشکته را تحت تأثیر قرار داده و لازم است ضریب میرایی آن‌ها افزایش یابد. لازم به ذکر است که قطب موجود در مبدأ مختصات در شکل ۴ (ب)، مربوط به منبع اینورتری مرجع (مرجع مشترک قاب dq) است؛ زیرا زاویه‌ی $\theta = \int \omega dt$ برای این منبع اینورتری در تمامی لحظات برابر

جدول ۲: ضرایب مشارکت متغیرهای حالت ریزشبه
تحت‌مطالعه در سناریو ۲ برحسب پریونیت (از بقیه ضرایب
صرف‌نظر شده‌است).

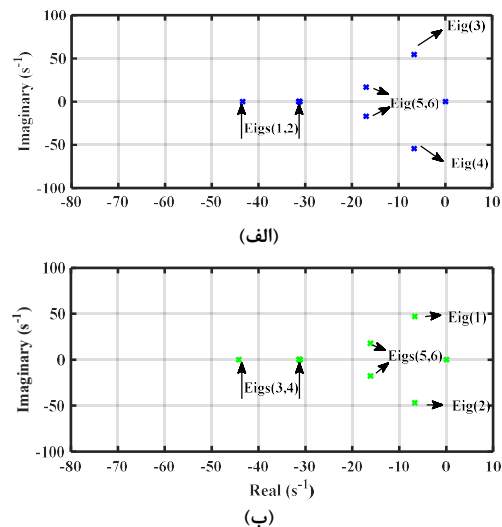
حالت‌ها	$Eigs(1, 2)$	$Eigs(3, 4)$	$Eigs(5, 6)$
ΔP_1	0.130	0.006	0.164
ΔQ_1	0.030	-----	0.091
$\Delta \delta_2$	0.433	0.081	-0.049
ΔP_2	0.257	0.060	0.025
ΔQ_2	0.070	-----	0.015
$\Delta \delta_3$	0.048	0.259	0.170
ΔP_3	0.009	0.317	0.051
ΔQ_3	-----	0.020	0.029
$\Delta \delta_4$	-0.030	0.176	0.312
ΔP_4	0.058	0.154	0.116

انجام شود، درغیراین‌صورت، اصلاح جداگانه واحدکنترل اف‌تی آن‌ها، نتیجه مطلوبی نخواهدداشت.

۶- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی نتایج تحلیل مقادیر ویژه، یک شبیه‌سازی از ریزشبه نمونه در محیط نرم‌افزار PLECS فراهم شده‌است. در این مطالعه، زمان شبیه‌سازی‌ها برابر ۱/۸ ثانیه درنظرگرفته شده و برای مشاهده نوسان‌های توان از دو اغتشاش کوچک در زمان‌های $t_1=0.1\text{ sec}$ و $t_2=1.0\text{ sec}$ استفاده شده‌است که به‌ترتیب شامل ۱۰ درصد افزایش در بار ۱ و ۲۰ درصد کاهش در بار ۲ است.

نتایج شبیه‌سازی سناریو ۱ در شکل‌های ۸ (الف)-(و) نشان داده شده‌است. در حالت کنترل اف‌تی ساده و بدون استفاده از ضرایب دینامیکی، نوسان توان‌های حقیقی DGهای (۱ و ۲) و (۳ و ۴) به‌ترتیب در شکل‌های ۸ (الف) و (ب) به نمایش گذاشته شده‌است، در این حالت، نوسانات شدیدی مخصوصاً در توان حقیقی DGهای (۱ و ۲) دیده می‌شود. همچنین قسمت‌های (ج) و (د) از شکل ۸ نشان می‌دهد که افزودن ضرایب دینامیکی به مشخصه کنترل اف‌تی DGهای (۱ و ۲) نوسان‌ها را به خوبی میرا کرده‌است. مطابق شکل‌های ۸ (ه) و (و) نیز، با افزودن ضرایب دینامیکی به مشخصه کنترل اف‌تی DGهای (۳ و ۴) علی‌رغم کاهش دامنه نوسانات توان DGهای (۳ و ۴) و افزایش میرایی آن‌ها، هنوز نوسانات DGهای (۱ و ۲) به‌خوبی میرا نمی‌شود، بنابراین در مجموع افزودن عبارت‌های دینامیکی به DGهای (۱ و ۲) تأثیر بهتری دارد. در شکل‌های ۹ (الف)-(ج)، نوسان توان راکتیو DGها مطابق سناریو ۱ نشان داده شده‌است. شکل ۹ (الف)، مربوط به حالت بدون ضرایب دینامیکی است و شکل‌های ۹ (ب) و (ج) به‌ترتیب مربوط به زمانی است که ضرایب دینامیکی فقط در مشخصه کنترل اف‌تی DGهای (۱ و ۲) و (۳ و ۴) به کار رفته‌است. در این شکل‌ها نیز به‌خوبی واضح است که افزودن ضرایب دینامیکی صرفاً به مشخصه کنترل اف‌تی DGهای (۱ و

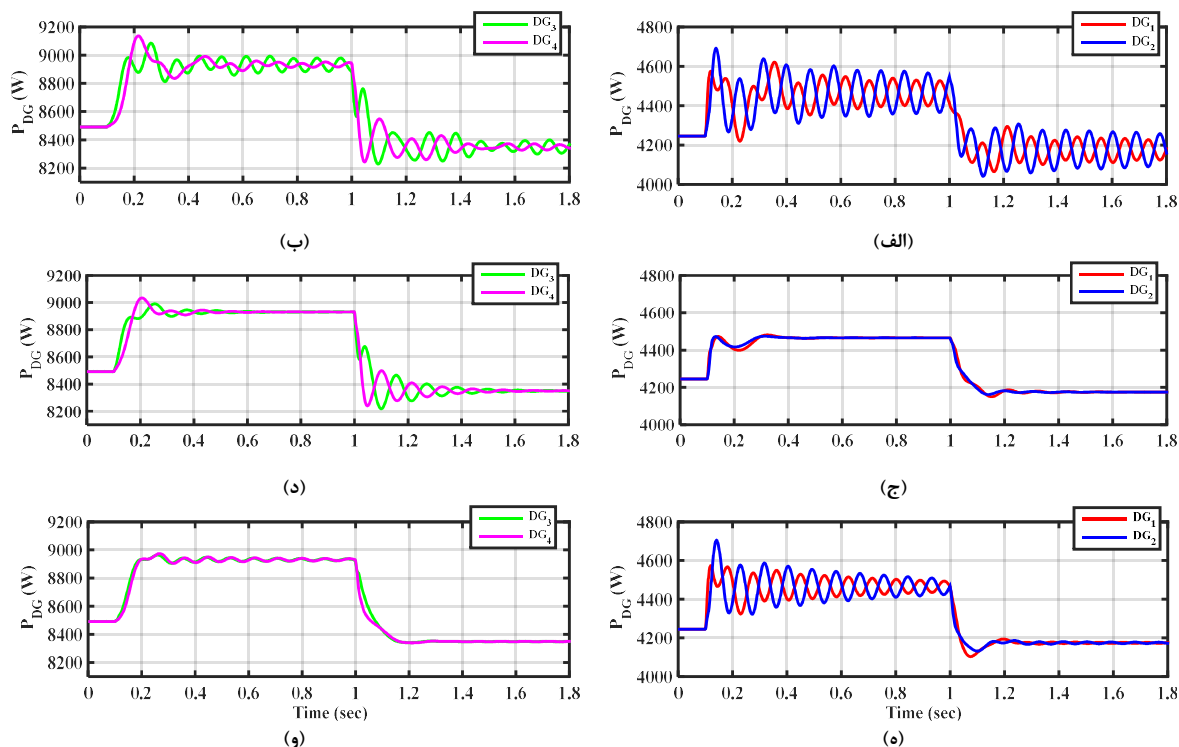


شکل ۷: حرکت قطب‌های فرکانس پایین ریزشبه‌ی تحت‌مطالعه زمانی که ضرایب دینامیکی فقط به مشخصه کنترل اف‌تی (الف) DGهای (۱ و ۲) و (ب) DGهای (۳ و ۴) افزوده شده‌است (در سناریو ۲).

کلی ریزشبه ایجاد نمی‌کند، زیرا ضریب میرایی زوج قطب‌های (۱ و ۲) تغییر نمی‌کند.

۵-۲- سناریو ۲

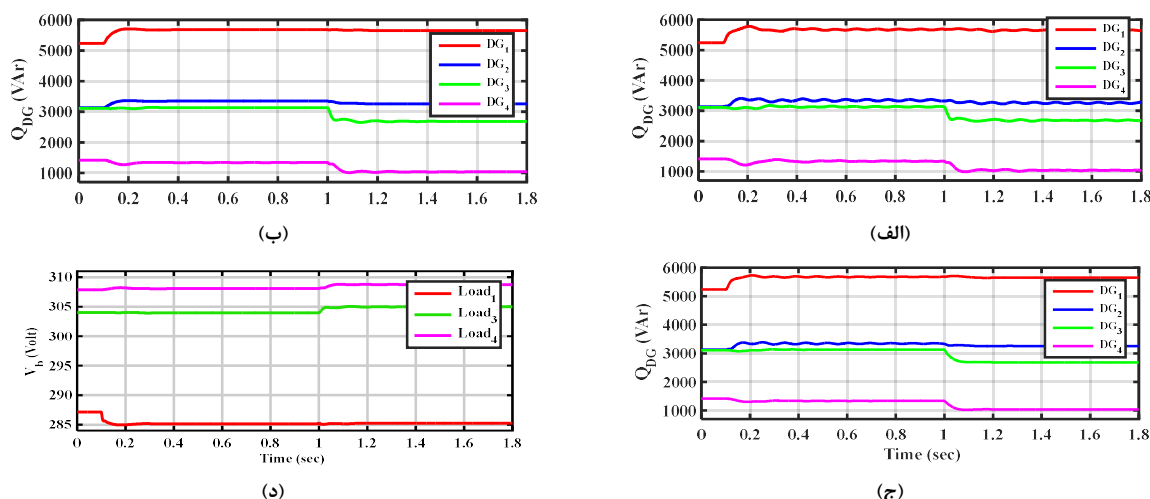
در شکل ۶ مکان قطب‌های فرکانس پایین ریزشبه در سناریو ۲ نشان داده شده‌است. جدول ۲ نتیجه تحلیل حساسیت را برای این حالت ارائه می‌کند. براساس جدول ۲، زوج قطب‌های (۱ و ۲)، (۳ و ۴) و (۵ و ۶) موجود در شکل ۶ به‌ترتیب به متغیرهای حالت DGهای (۱ و ۲)، (۳ و ۴) و (۵ و ۶) حساسیت بیشتری دارد. دو زوج قطب (۱ و ۲) و (۳ و ۴) نسبت میرایی کم‌تری داشته و به محور موهومی نزدیک‌ترند، بنابراین حرکت دادن آن‌ها به سمت چپ صفحه مختلط، تأثیر قابل‌توجهی در بهبود پایداری سیگنال کوچک سیستم خواهدداشت. اما این دو زوج قطب در مجموع به متغیرهای حالت کنترل اف‌تی همه DGها وابستگی دارند، بنابراین لازم است عبارت‌های دینامیکی به کنترل‌کننده اف‌تی همه DGها افزوده شود. مطابق شکل ۷ (الف)، با تصحیح مشخصه کنترل اف‌تی DGهای (۱ و ۲)، قطب‌های آبی‌رنگ به‌دست آمده‌است. شکل ۷ (الف) نشان می‌دهد که زوج قطب‌های (۱ و ۲) به سمت چپ محور موهومی حرکت کرده‌است، به‌طوری که بر روی محور حقیقی صفحه مختلط منتقل شده‌است و میرایی آن بزرگ‌تر از ۳۰ است ($\delta_{1,2} > 30$). درمقابل، قطب‌های (۳ و ۴) تغییر موقعیت چندانی نداشته‌است. به‌طور مشابه، قطب‌های حاصل از اصلاح کنترل اف‌تی DGهای (۳ و ۴) با رنگ سبز در شکل ۷ (ب) مشخص شده‌است. مشاهده می‌شود که قطب‌های (۳ و ۴) بهبود یافته ولی قطب‌های (۱ و ۲) تقریباً ثابت مانده‌است. نتیجه ی نهایی این است که برای بهبود پایداری سیگنال کوچک کل ریزشبه، به ناچار باید اصلاح مشخصه کنترل اف‌تی همه DGهای به‌طور هم‌زمان



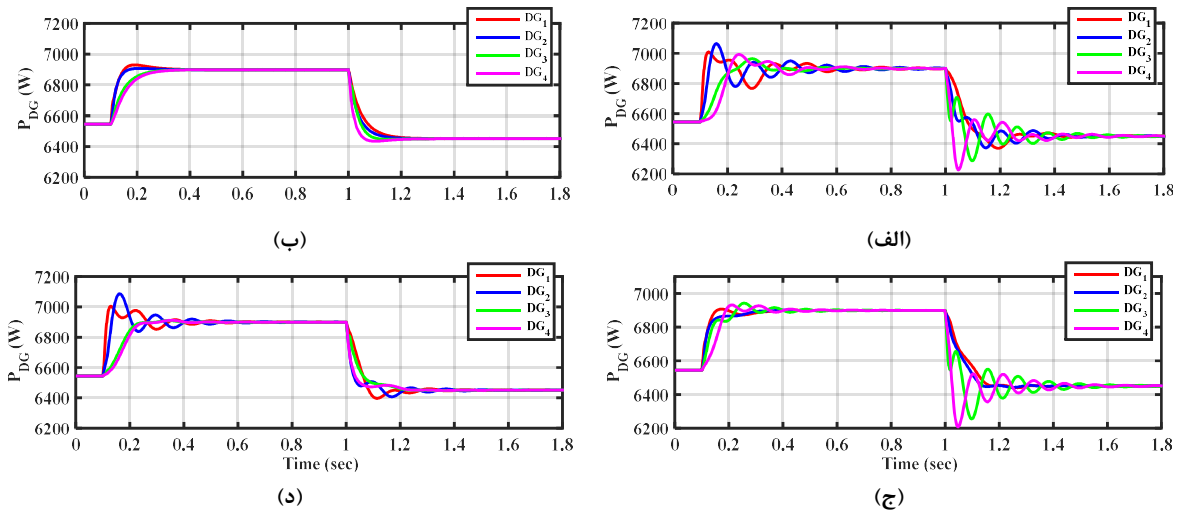
شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی سناریو ۱. (الف) و (ب) به ترتیب نوسان توان حقیقی DGهای (۱ و ۲) و (۳ و ۴) زمانی که کنترل افقی تمامی منابع بدون ضرایب دینامیکی استفاده شده‌است، (ج) و (د) به ترتیب نوسان توان حقیقی DGهای (۱ و ۲) و (۳ و ۴) زمانی که ضرایب دینامیکی فقط در مشخصه کنترل افقی DGهای (۱ و ۲) استفاده شده‌است و (ه) و (و) به ترتیب نوسان توان حقیقی DGهای (۱ و ۲) و (۳ و ۴) زمانی که ضرایب دینامیکی فقط در مشخصه کنترل افقی DGهای (۳ و ۴) استفاده شده‌است.

است. این نتایج با نتایج تحلیل حساسیت سناریو ۱ مطابقت دارد. لازم به ذکر است که صرف‌نظر از مسائل پایداری دینامیکی، کنترل افقی قادر است توان حقیقی را باتوجه به رابطه (۵) به شکل دقیقی بین منابع تقسیم کند (شکل ۸). این در حالی است که باتوجه به شکل‌های ۹

(۲) کافی است تا میرایی نوسان‌های توان راکتیو را تا حد قابل قبولی افزایش دهد. در صورتی که ضرایب دینامیکی به مشخصه کنترل افقی DGهای (۳ و ۴) افزوده شود، نتیجه به‌خوبی حالت قبل نخواهد بود. زیرا در این حالت، میرایی نوسان‌های توان DGهای (۱ و ۲) نسبتاً پایین



نکل ۹: نتایج شبیه‌سازی سناریو ۱: نوسان توان راکتیو DGها زمانی که (الف) کنترل افقی تمامی منابع بدون ضرایب دینامیکی استفاده شده‌است، (ب) ضرایب دینامیکی فقط در مشخصه کنترل افقی DGهای (۱ و ۲) استفاده شده‌است و (ج) ضرایب دینامیکی فقط در مشخصه کنترل افقی DGهای (۳ و ۴) استفاده شده‌است و (د) دامنه ولتاژ شین‌های بار.

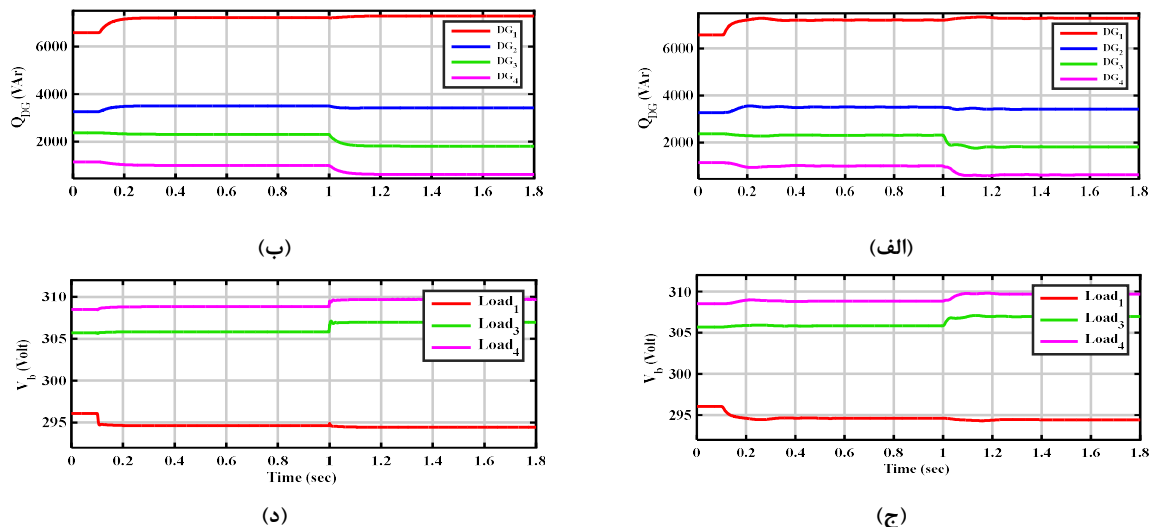


شکل ۱۰: نتایج شبیه‌سازی سناریو ۲؛ نوسان توان حقیقی منابع اینورتری ریزشبه مورد مطالعه زمانی که (الف) در کنترل افتی هیچ منبع اینورتری از ضرایب دینامیکی استفاده نشده است، (ب) ضرایب دینامیکی در مشخصه کنترل افتی تمامی منابع اینورتری به کار رفته است، (ج) ضرایب دینامیکی فقط در مشخصه کنترل افتی DGهای (۱ و ۲) استفاده شده است و (د) ضرایب دینامیکی فقط در مشخصه کنترل افتی

ناشی از رابطه ولتاژ کنترل افتی است که از طریق روش‌هایی از قبیل افزودن حلقه امیدانس مجازی قابل جبران است.

در شکل‌های ۱۰ (الف)-(د)، نتایج شبیه‌سازی سناریو ۲ نشان داده شده است. شکل‌های ۱۰ (الف) و (ب) به ترتیب نوسان توان حقیقی منابع اینورتری را نشان می‌دهد، زمانی که مشخصه افتی تمامی منابع اینورتری بدون ضرایب دینامیکی و با آن‌ها استفاده شده است. شکل‌های ۱۰ (ج) و (د) نیز به ترتیب مربوط به زمانی است که ضرایب دینامیکی صرفاً در مشخصه افتی منابع (۱ و ۲) و (۳ و ۴) استفاده شده است. مطابق شکل ۱۰ (ج)، افزودن ضرایب دینامیکی صرفاً به مشخصه کنترل افتی منابع

(الف)-(ج)، تقسیم توان راکتیو بین منابع تولید پراکنده (رابطه (۶)) با خطای نسبتاً زیادی مواجه شده است. به عبارت دیگر از آنجاکه در سناریو ۱ توان نامی منابع ۳ و ۴ دو برابر توان‌های نامی هر یک از منابع ۱ و ۲ در نظر گرفته شده است، انتظار بر این است که در شکل‌های ۹ (الف)-(ج) توان راکتیو تولیدی منابع ۳ و ۴ با یکدیگر یکسان بوده و دو برابر توان راکتیو منابع ۱ و ۲ باشد که این امر با خطای زیادی انجام شده است. در شکل ۹ (د)، دامنه ولتاژ فاز شین‌های بار در حالت افزوده شدن ضرایب دینامیکی به کنترل افتی منابع ۱ و ۲ نشان داده شده است. طبق این شکل، مقدار ولتاژ شین‌ها کمتر از مقدار نامی (۳۱۱ ولت) است. این امر



شکل ۱۱: نتایج شبیه‌سازی سناریو ۲؛ (الف) و (ج) به ترتیب، نوسان توان راکتیو DGها و دامنه ولتاژ فاز شین‌های بار زمانی که در کنترل افتی هیچ منبع اینورتری از ضرایب دینامیکی استفاده نشده است و (ب) و (د) به ترتیب، نوسان توان راکتیو DGها و دامنه ولتاژ فاز شین‌های بار زمانی که ضرایب دینامیکی در مشخصه کنترل افتی تمامی DGها استفاده شده است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بحث بهبود نوسان‌های فرکانس پایین توان در ریزشبه‌های جزیره‌ای مبتنی بر روش کنترل اکتیو مستقیم پرداخته شده است. افزودن عبارتهایی از مشتق توان‌های حقیقی و موهومی به روابط کنترل اکتیو، موجب افزایش قابل توجه میرایی نوسان‌های فرکانس پایین توان ریزشبه می‌شود. در این مقاله، پیشنهاد شده است که به جای افزودن ضرایب دینامیکی به کنترل کننده اکتیو تمامی منابع اینورتری، این کار صرفاً بر روی تعدادی از آن‌ها انجام شود. بدین منظور ابتدا باید یک تحلیل حساسیت بر روی قطب‌های غالب فرکانس پایین ریزشبه انجام داد و متغیرهای حالت مؤثر را در آن قطب‌ها شناسایی کرد. در صورتی که متغیرهای حالت مربوط به مشخصه اکتیو تعدادی از منابع اینورتری دارای ضرایب مشارکت بزرگی در قطب‌های کم‌میرا باشد، می‌توان صرفاً با افزودن عبارتهای دینامیکی به مشخصه اکتیو آن منابع، میرایی قطب‌های کم‌میرا را به شکل قابل توجهی بهبود داد. روش پیشنهادی می‌تواند در ریزشبه‌هایی که از قبل دارای کنترل کننده‌های اکتیو بهبود یافته نبوده و یا قرار است تعدادی از منابع جدید به آن ریزشبه افزوده شود، به کار رفته و هزینه‌های احتمالی را کاهش دهد.

(۱ و ۲) اگرچه میرایی نوسان‌های توان این دو منبع را به شکل قابل توجهی بهبود می‌دهد، اما تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نوسان‌های توان دو منبع دیگر ندارد. این نتیجه کاملاً با نتیجه شکل ۷ (الف) هماهنگ است. همچنین به طور مشابه، مطابق شکل ۱۰ (د)، افزودن ضرایب دینامیکی صرفاً در مشخصه اکتیو منابع (۳ و ۴) میرایی نوسان‌های توان این دو منبع را بالا می‌برد، اما تأثیر قابل توجهی بر نوسان‌های توان دو منبع دیگر ندارد. این نتیجه نیز مطابق با نتیجه شکل ۷ (ب) است. بنابراین تنها زمانی می‌توان میرایی نوسان‌های توان تمامی منابع را بهبود داد که ضرایب دینامیکی مناسب به مشخصه کنترل اکتیو تمامی آن‌ها افزوده شود. شکل‌های ۱۱ (الف) و (ب)، نوسان توان راکتیو منابع را در سناریو ۲ به ترتیب در حالتی که ضرایب دینامیکی در مشخصه کنترل اکتیو منابع به کار نرفته است و زمانی که در تمامی آن‌ها از ضرایب دینامیکی استفاده شده است، نشان می‌دهد. تأثیر ضرایب دینامیکی به خوبی در نوسان‌های توان راکتیو نیز قابل مشاهده است. مطابق این دو شکل، توان‌های راکتیو منابع که بایستی همگی در این سناریو یکسان باشند، اختلاف قابل توجهی با یکدیگر دارند. البته این موضوع از خصوصیات روش کنترل اکتیو است و آن نیز از افت ولتاژ نامتقارن شین‌ها ناشی می‌شود. در شکل‌های ۱۱ (ج) و (د)، دامنه ولتاژ شین‌های بار مطابق دو حالت مذکور نشان داده شده است.

پیوست

- ماتریس‌های ضرایب معادلات (۱۳) و (۱۴) (صفحه بعد).
- پارامترهای فیلتر خروجی منابع اینورتری کنترل ولتاژ

$L_f = 1.35 \text{ mH}$	$R_f = 0.1 \Omega$	$L_c = 0.35 \text{ mH}$	$R_c = 0.03 \Omega$
$C_f = 50 \mu\text{F}$			

- پارامترهای کنترلی منابع اینورتری در حالتی که تمامی آن‌ها دارای توان نامی 10 kW هستند.

$k_{pv} = 0.05$	$k_{iv} = 390$	$k_{pi} = 10.5$	$k_{ii} = 16000$
$H = 0.75$	$\omega_c = 30$	$m = 9.4 \times 10^{-5}$	$n = 2.29 \times 10^{-3}$
$m_d = 3.01 \times 10^{-6}$	$n_d = 7.33 \times 10^{-5}$		

- مشخصات کابل‌های مورد استفاده در خطوط ریزشبه مورد مطالعه که باتوجه به ولتاژ نامی و حداکثر جریان عبوری از آن‌ها انتخاب شده‌اند.

Cu/PVC/PVC	Type1: 3×16 RM	Type2: 3×25 RM
Voltage	0.6-1 kV	0.6-1 kV
AC resistance (Ω/km)	1.38	0.87
Reactance (Ω/km)	0.087	0.086

- امپدانس خطوط (کابل‌ها)، طول و سایز آن‌ها (همه کابل‌ها از نوع Cu/PVC/PVC / UNARMoured / 0.6-1 kV انتخاب شده‌اند).

Line	Length (m)	Type	Impedance (Ω)
Z_{12}	500	3×25 / RM	$0.435 + j0.043$
Z_{23}	600	3×25 / RM	$0.522 + j0.047$
Z_{34}	200	3×16 / RM	$0.276 + j0.017$

$$A_{DG_i(13 \times 13)} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_i + m_{d_i} \omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.5m_{d_i} \omega_c I_{oq_i} & -1.5m_{d_i} \omega_c I_{od_i} & -1.5m_{d_i} \omega_c V_{oq_i} & 1.5m_{d_i} \omega_c V_{od_i} \\ 0 & -\omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.5\omega_c I_{od_i} & 1.5\omega_c I_{oq_i} & 1.5\omega_c V_{od_i} & 1.5\omega_c V_{oq_i} \\ 0 & 0 & -\omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.5\omega_c I_{oq_i} & -1.5\omega_c I_{od_i} & 1.5\omega_c V_{oq_i} & -1.5\omega_c V_{od_i} \\ 0 & -n_i + n_{d_i} \omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{DG_i}(4,10) & a_{DG_i}(4,11) & a_{DG_i}(4,12) & a_{DG_i}(4,13) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{DG_i}(6,2) & 0 & K_{iv} & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & a_{DG_i}(6,10) & a_{DG_i}(6,11) & a_{DG_i}(6,12) & a_{DG_i}(6,13) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{iv} & 0 & 0 & 0 & -1 & \omega_{nl} C_{f_i} & -K_{pv} & 0 & H \\ 0 & a_{DG_i}(8,2) & a_{DG_i}(8,3) & \frac{K_{iv} K_{pi}}{L_{f_i}} & 0 & \frac{K_{ii}}{L_{f_i}} & 0 & \frac{-K_{pi} - R_{f_i}}{L_{f_i}} & -\omega_o - \omega_{nl} & a_{DG_i}(8,10) & a_{DG_i}(8,11) & a_{DG_i}(8,12) & a_{DG_i}(8,13) \\ 0 & 0 & a_{DG_i}(9,3) & 0 & \frac{K_{iv} K_{pi}}{L_{f_i}} & 0 & \frac{K_{ii}}{L_{f_i}} & -\omega_o + \omega_{nl} & \frac{-K_{pi} - R_{f_i}}{L_{f_i}} & a_{DG_i}(9,10) & a_{DG_i}(9,11) & a_{DG_i}(9,12) & a_{DG_i}(9,13) \\ 0 & 0 & a_{DG_i}(10,3) & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{f_i}} & 0 & a_{DG_i}(10,10) & a_{DG_i}(10,11) & a_{DG_i}(10,12) & a_{DG_i}(10,13) \\ 0 & 0 & a_{DG_i}(11,3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{f_i}} & a_{DG_i}(11,10) & a_{DG_i}(11,11) & a_{DG_i}(11,12) & a_{DG_i}(11,13) \\ a_{DG_i}(12,1) & 0 & a_{DG_i}(12,3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{DG_i}(12,10) & a_{DG_i}(12,11) & a_{DG_i}(12,12) & a_{DG_i}(12,13) \\ a_{DG_i}(13,1) & 0 & a_{DG_i}(13,3) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{DG_i}(13,10) & a_{DG_i}(13,11) & a_{DG_i}(13,12) & a_{DG_i}(13,13) \end{bmatrix}$$

$$B_{DG_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{-1}{L_C} \cos(\delta_i) & \frac{-1}{L_C} \sin(\delta_i) \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{L_C} \sin(\delta_i) & \frac{-1}{L_C} \cos(\delta_i) \end{bmatrix}_{2 \times 13}^T$$

$$B_{i\omega com} = [-1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times 13}^T$$

$$C_{DG_i} = \begin{bmatrix} -I_{od_i} \sin(\delta_i) - I_{oq_i} \cos(\delta_i) & 0 & \dots & 0 & \cos(\delta_i) & -\sin(\delta_i) \\ I_{od_i} \cos(\delta_i) - I_{oq_i} \sin(\delta_i) & 0 & \dots & 0 & -\sin(\delta_i) & \cos(\delta_i) \end{bmatrix}_{2 \times 13}$$

$$C_{DG\omega_i} = \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_i + m_{d_i} \omega_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.5m_{d_i} \omega_c I_{oq_i} & -1.5m_{d_i} \omega_c I_{od_i} & -1.5m_{d_i} \omega_c V_{oq_i} & 1.5m_{d_i} \omega_c V_{od_i} \end{bmatrix}_{1 \times 13} ; i=1 \right\}$$

برخی از درایه‌های ماتریس $A_{DG_i(13 \times 13)}$

$a_{DG_i}(4,10) = -1 - 1.5n_{d_i} \omega_c I_{od_i}$	$a_{DG_i}(4,11) = -1.5n_{d_i} \omega_c I_{oq_i}$	$a_{DG_i}(4,12) = -1.5n_{d_i} \omega_c V_{od_i}$
$a_{DG_i}(4,13) = -1.5n_{d_i} \omega_c V_{oq_i}$	$a_{DG_i}(6,2) = K_{pv}(-n_i + n_{d_i} \omega_c)$	$a_{DG_i}(6,10) = K_{pv}(-1 - 1.5n_{d_i} \omega_c I_{od_i})$
$a_{DG_i}(6,11) = -\omega_{nl} C_{f_i} - 1.5K_{pv} n_{d_i} \omega_c I_{oq_i}$	$a_{DG_i}(6,12) = H - 1.5K_{pv} n_{d_i} \omega_c V_{od_i}$	$a_{DG_i}(6,13) = -1.5K_{pv} n_{d_i} \omega_c V_{oq_i}$
$a_{DG_i}(8,2) = K_{pi} K_{pv}(-n_i + n_{d_i} \omega_c) / L_{f_i}$	$a_{DG_i}(8,10) = -1 / L_{f_i} + K_{pi} K_{pv}(-1 - 1.5n_{d_i} \omega_c I_{od_i}) / L_{f_i} + I_{lq_i}(1.5m_{d_i} \omega_c I_{oq_i})$	
$a_{DG_i}(8,3) = (-m_i + m_{d_i} \omega_c) I_{lq_i}$	$a_{DG_i}(8,11) = -\omega_{nl} C_{f_i} K_{pi} / L_{f_i} + K_{pi} K_{pv}(-1.5n_{d_i} \omega_c I_{oq_i}) / L_{f_i} + I_{lq_i}(-1.5m_{d_i} \omega_c I_{od_i})$	
$a_{DG_i}(8,12) = K_{pi} H / L_{f_i} + K_{pi} K_{pv}(-1.5n_{d_i} \omega_c V_{od_i}) / L_{f_i} + I_{lq_i}(-1.5m_{d_i} \omega_c V_{oq_i})$	$a_{DG_i}(9,3) = (m_i - m_{d_i} \omega_c) I_{ld_i}$	
$a_{DG_i}(8,13) = K_{pi} K_{pv}(-1.5n_{d_i} \omega_c V_{oq_i}) / L_{f_i} + I_{lq_i}(1.5m_{d_i} \omega_c V_{od_i})$	$a_{DG_i}(9,10) = \omega_{nl} C_{f_i} K_{pi} / L_{f_i} - I_{ld_i}(1.5m_{d_i} \omega_c I_{oq_i})$	
$a_{DG_i}(9,11) = (-1 - K_{pi} K_{pv}) / L_{f_i} - I_{ld_i}(-1.5m_{d_i} \omega_c I_{od_i})$	$a_{DG_i}(9,12) = -I_{ld_i}(-1.5m_{d_i} \omega_c V_{oq_i})$	$a_{DG_i}(10,3) = (-m_i + m_{d_i} \omega_c) V_{oq_i}$
$a_{DG_i}(9,13) = K_{pi} H / L_{f_i} - I_{ld_i}(1.5m_{d_i} \omega_c V_{od_i})$	$a_{DG_i}(10,10) = V_{oq_i}(1.5m_{d_i} \omega_c I_{oq_i})$	$a_{DG_i}(10,11) = \omega_o + V_{oq_i}(-1.5m_{d_i} \omega_c I_{od_i})$
$a_{DG_i}(10,13) = V_{oq_i}(1.5m_{d_i} \omega_c V_{od_i})$	$a_{DG_i}(11,3) = (m_i - m_{d_i} \omega_c) V_{od_i}$	$a_{DG_i}(11,10) = -\omega_o + V_{od_i}(1.5m_{d_i} \omega_c I_{oq_i})$
$a_{DG_i}(11,11) = -V_{od_i}(-1.5m_{d_i} \omega_c I_{od_i})$	$a_{DG_i}(11,12) = -V_{od_i}(-1.5m_{d_i} \omega_c V_{oq_i})$	$a_{DG_i}(11,13) = -1 / C_{f_i} - V_{od_i}(1.5m_{d_i} \omega_c V_{od_i})$
$a_{DG_i}(12,1) = -(V_{bD_i} \sin(\delta_i) / L_{C_i} + V_{bQ_i} \cos(\delta_i))$	$a_{DG_i}(12,3) = (-m_i + m_{d_i} \omega_c) I_{oq_i}$	$a_{DG_i}(12,10) = 1 / L_{C_i} + I_{oq_i}(1.5m_{d_i} \omega_c I_{oq_i})$
$a_{DG_i}(12,11) = I_{oq_i}(-1.5m_{d_i} \omega_c I_{od_i})$	$a_{DG_i}(12,12) = -R_{C_i} / L_{C_i} - I_{oq_i}(1.5m_{d_i} \omega_c V_{oq_i})$	$a_{DG_i}(12,13) = \omega_o + I_{oq_i}(1.5m_{d_i} \omega_c V_{od_i})$
$a_{DG_i}(13,1) = (V_{bD_i} \cos(\delta_i) + V_{bQ_i} \sin(\delta_i)) / L_{C_i}$	$a_{DG_i}(13,3) = (m_i - m_{d_i} \omega_c) I_{od_i}$	$a_{DG_i}(13,10) = -I_{od_i}(1.5m_{d_i} \omega_c I_{oq_i})$
$a_{DG_i}(13,11) = 1 / L_{C_i} - I_{od_i}(-1.5m_{d_i} \omega_c I_{od_i})$	$a_{DG_i}(13,12) = -\omega_o - I_{od_i}(-1.5m_{d_i} \omega_c V_{oq_i})$	
$a_{DG_i}(13,13) = -R_{C_i} / L_{C_i} - I_{od_i}(1.5m_{d_i} \omega_c V_{od_i})$		

مراجع

- inverters in distributed generation systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1205-1213, Sept. 2004.
- [11] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho and J. M. Guerrero, "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 2427-2451, March 2017.
- [12] A. U. Krismanto, N. Mithulananthan and A. Lomi, "Dynamic droop control in microgrid for stability enhancement considering RES variation," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Torino, 2017, pp. 1-6.
- [13] J. M. Guerrero, J. Matas, L. Garcia de Vicuna, M. Castilla and J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 994-1004, April 2007.
- [14] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T. L. Lee and P. C. Loh, "Advanced control architectures for intelligent microgrids-part I: decentralized and hierarchical control," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1254-1262, April 2013.
- [15] Y. A. R. I. Mohamed and E. F. El-Saadany, "Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 6, pp. 2806-2816, Nov. 2008.
- [16] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw- Hill, 1994.
- [17] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziaargyriou and A. Dimeas, "Microgrids management," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, May-June 2008.
- [18] M. Eskandari, L. Li and M. H. Moradi, "Decentralized Optimal Servo Control System for Implementing Instantaneous Reactive Power Sharing in Microgrids," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 2, pp. 525-537, April 2018.
- [19] Y. Wang; X. Wang; F. Blaabjerg; Z. Chen, "Small-signal stability analysis of inverter-fed power systems using component connection method," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, March 2017.
- [20] R. Majumder, B. Chaudhuri, A. Ghosh, R. Majumder, G. Ledwich and F. Zare, "Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 2, pp. 796-808, May 2010.
- [1] S. Rahman, "Going green - the growth of renewable energy," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 99, no. 6, pp. 16-18, Nov.-Dec. 2003.
- [2] <http://www.satba.gov.ir/fa/aboutorganization/introduction/history>.
- [3] M. Olken, "Distributing the load: distributed resources bring generation close to home," in *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 4-6, May-June 2004.
- [۴] سید عباس صارمی حصاری، محسن حمزه و احمد سالم‌نیا، «بهبود عملکرد دینامیکی و استاتیکی سیستم تقسیم توان در ریزشکته‌ها در حالت جزیره‌ای»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۲۳۳-۲۴۳، سال ۱۳۹۵.
- [5] I. Y. Chung, W. Liu, D. A. Cartes, E. G. Collins and S. I. Moon, "Control methods of inverter-interfaced distributed generators in a microgrid system," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 3, pp. 1078-1088, May-june 2010.
- [6] A. Kahrobaeian and Y. A. R. I. Mohamed, "Analysis and mitigation of low-frequency instabilities in autonomous medium-voltage converter-based microgrids with dynamic loads," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 1643-1658, April 2014.
- [7] N. Bottrell, M. Prodanovic and T. C. Green, "Dynamic stability of a microgrid with an active load," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 11, pp. 5107-5119, Nov. 2013.
- [8] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 613-625, Mar. 2007.
- [۹] امین رنجبران، و محمود عبادیان، «ارائه روش کنترلی به منظر تنظیم دقیق ولتاژ بار و تقسیم دقیق توان‌های اکتیو و راکتیو ریزشکته»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۳، صفحات ۱۰۴۷-۱۰۵۸، سال ۱۳۹۶.
- [10] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuna, J. Matas, M. Castilla and J. Miret, "A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel

زیر نویس‌ها

⁵ Sensitivity Analysis⁶ Proportional Integral (PI)⁷ Proportional Resonance (PR)¹ Distributed Generators (DGs)² Photovoltaic (PV)³ Voltage Source Inverters (VSIs)⁴ Conventional Droop