

تقسیم توان راکتیو در اینورترهای موازی و بهبود پایداری اینورترهای موازی در ریزشبه AC شامل بارهای اکتیو

علی خالوئی خوزانی^۱ محسن رحیمی^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه کاشان-کاشان- ایران

alikhalooui@yahoo.com

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه کاشان-کاشان- ایران

mrahimi@kashanu.ac.ir

چکیده: سیستم تحت مطالعه در این مقاله یک ریزشبه AC شامل اینورترهای موازی است که یک بار مستقل را تغذیه می‌کند. این مقاله شامل دو بخش اصلی است. در بخش اول، روش کنترل افقی مرسوم، برای دستیابی به تقسیم توان راکتیو دقیق بین اینورترهای موازی ریزشبه AC مستقل از شبکه، توسعه و بهبود داده می‌شود، بطوریکه روش پیشنهادی در تمامی شرایط اعم از برابر بودن یا نبودن امپدانس خطوط می‌تواند عمل تقسیم توان راکتیو بین اینورترهای موازی را بدرستی انجام دهد. در بخش دوم مقاله، با توجه به گسترش استفاده از بارهای اکتیو در ریزشبه‌های امروزی، تحلیل پاسخ ریزشبه شامل اینورترهای موازی در حضور بارهای اکتیو مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر عواملی همچون پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ باس DC بار اکتیو و مقدار توان بار اکتیو بر پایداری ریزشبه آزموده می‌شود. در ادامه بخش دوم نیز به بهبود پایداری کل سیستم از طریق اصلاح حلقه‌های کنترلی اینورترهای موازی سمت تولید پرداخته می‌شود. در پایان هر یک از دو بخش اصلی مقاله، نتایج شبیه‌سازی سیستم در محیط متلب-سیمولینک برای ارزیابی هر چه بهتر روش‌های پیشنهادی و تحلیل‌های انجام شده، آورده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ریزشبه AC، اینورترهای موازی، کنترل افقی، تقسیم توان راکتیو، بارهای اکتیو، پایداری

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.2.61

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

نام نویسنده مسئول: دکتر محسن رحیمی

نشانی نویسنده مسئول: ایران-کاشان-کیلومتر ۶ بلوار قطب راوندی-دانشگاه کاشان-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر با توجه به افزایش حجم تقاضای توان الکتریکی توسط مصرف‌کنندگان و عدم قابلیت تولید توان بیشتر توسط نیروگاه‌های سنتی و همچنین مسائل زیست‌محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها، منابع تولید پراکنده به عنوان راه‌حلی کارآمد مورد توجه قرار گرفته است. این منابع انرژی معمولاً منابع تجدیدپذیری همچون سلول‌های سوختی، زیست‌توده، زمین‌گرایی، خورشیدی، بادی و میکروتوربین‌ها می‌باشند و از آنجایی که ولتاژ خروجی در این منابع انرژی ولتاژ DC و یا ولتاژ AC تنظیم‌نشده است و به علت عدم قطعیتی که در منابع تجدیدپذیر وجود دارد، مبدل‌های الکترونیک قدرت برای کنترل توان تولیدی این منابع به کار گرفته می‌شوند. معمولاً برای دستیابی به ظرفیت‌های بالا ضمن داشتن قابلیت اطمینان بالا در سیستم و تعمیر و نگهداری بهتر و علی‌الخصوص در مواقعی که هیچ اتصالی با شبکه وجود ندارد، این منابع انرژی را در کنار هم قرار می‌دهند و اینورترهای به کار گرفته شده به صورت موازی با یکدیگر بارهای مستقل را تغذیه می‌کنند [۱]. با موازی شدن اینورترها با یکدیگر دو چالش اساسی در سیستم به وجود می‌آید. یکی از این چالش‌ها بحث تقسیم دقیق توان راکتیو میان اینورترها و دومین چالش بحث پایداری اینورترهای موازی در حضور بارهای اکتیو می‌باشد. در واقع برای آن که سهم تمامی اینورترهای موازی شده در تامین توان مصرفی بار متناسب با ظرفیت آن‌ها باشد، روش‌های کنترلی متنوعی به کار گرفته می‌شود. از این میان روش کنترل افی به دلیل آن که نیازی به خطوط ارتباطی میان اینورترهای موازی نداشته و صرفاً از اطلاعات اندازه‌گیرهای محلی استفاده می‌کند، از جمله روش‌هایی است که در بسیاری از مقالات مطرح شده است [۵-۲]. مسئله‌ای که در استفاده از روش کنترل افی وجود دارد آن است که در این روش با نابرابر شدن امپدانس خروجی اینورترها تقسیم توان راکتیو به درستی انجام نمی‌پذیرد لذا برای دستیابی به تقسیم توان دقیق می‌بایست به بهبود این روش پرداخت. مطالعات زیادی در زمینه تقسیم دقیق توان راکتیو در شرایط نابرابری امپدانس خطوط انجام گرفته که از جمله آن‌ها می‌توان به مرجع [۶] اشاره نمود. در این مرجع از مفهوم اندوکنانس مجازی منفی و منبع توان مجازی برای حل این مسئله استفاده شده است. همچنین در مقاله [۷] دیده می‌شود که با استفاده از افزودن یک امپدانس مجازی و یک حلقه‌ی جبران‌ساز ولتاژ، ولتاژ نقطه‌ی اتصال مشترک را در یک محدوده‌ی مشخص حفظ می‌نماید و بدین وسیله مسئله تقسیم توان راکتیو را حل می‌نماید. مرجع [۸] با بهبود روش کنترل افی مرسوم و جبران افت ولتاژ فیدر، اثر نابرابری امپدانس فیدرها را بر طرف و یک کنترل ثانویه نیز برای محدود کردن انحراف متغیرهایی نظیر فرکانس در بازه‌ی مجاز پیشنهاد نموده است. مرجع [۹] با استفاده از مفهوم امپدانس مجازی، امپدانس معادل فیدر را به صورت سلفی درآورده تا کوپلاژ بین توان‌ها از بین برود و کنترلی تطبیقی برای تنظیم امپدانس مجازی به کمک

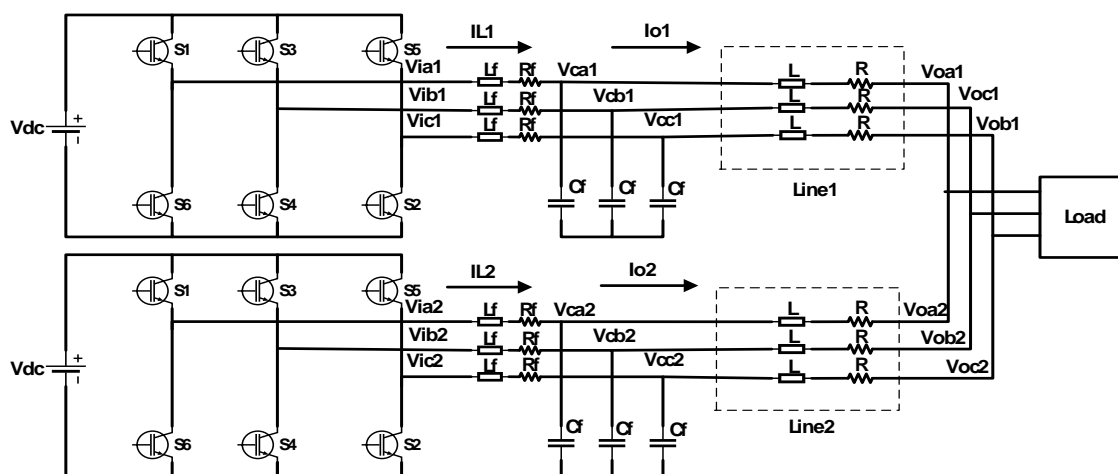
توان راکتیو اندازه‌گیری شده طراحی شده است که در این حالت نیازی به پارامترهای فیدر نمی‌باشد ولی ارتباط مخابراتی بین واحدها لازم می‌باشد. روشی که از آن بتوان چه در حالت متصل به شبکه و چه در حالت جزیره‌ای ریزشبکه‌ها استفاده نمود در [۱۰] آمده است. روشی که در این مقاله پیشنهاد شده است استفاده از کنترل افی به همراه یک حلقه‌ی کنترل ثانویه می‌باشد که وظیفه‌ی این حلقه محاسبه‌ی مقادیر مرجع توان حقیقی و راکتیو ورودی به کنترل افی می‌باشد. از دیگر مقالاتی که از مفهوم امپدانس مجازی برای کنترل تقسیم توان دقیق در اینورترهای موازی استفاده نموده است، می‌توان به [۱۵-۱۱] اشاره نمود. در واقع آنچه که میان این مقالات تفاوت ایجاد می‌کند وجود یا عدم وجود ارتباط مخابراتی بین واحدها، نیاز یا عدم نیاز به پارامترهای خط و چگونگی به دست آوردن مقدار امپدانس مجازی می‌باشد. در مرجع [۱۶] یک کنترل غیرمترکز و سلسله‌مراتبی برای تقسیم دقیق توان راکتیو بین اینورترهای موازی ارائه شده است بدین ترتیب که در لایه‌ی کنترلی اول به بهبود ضریب افی هر واحد متناسب با امپدانس فیدر مربوط به آن پرداخته می‌شود و در لایه‌ی کنترلی ثانویه تنظیم ولتاژ خروجی در نظر گرفته می‌شود. همچنین مرجع [۱۷] از یک ساختار سلسله‌مراتبی متشکل از کنترل افی بهبودیافته در سطح اولیه برای دستیابی به تقسیم توان بهتر و یک کنترل‌کننده ثانویه توزیع شده برای کاهش هر چه بیشتر خطای تقسیم توان و بازیابی ولتاژ به مقدار نامی استفاده می‌نماید. در [۱۸] نیز روشی مبتنی بر جریان چرخشی لحظه‌ای به منظور دستیابی به تسهیم دقیق توان راکتیو و جریان‌های هارمونیک‌ی ارائه شده است. با وجود تنوع روش‌های پیشنهادی در زمینه تقسیم توان، در مقاله حاضر سعی شده است تا روشی ارائه شود که ضمن ایجاد تقسیم دقیق توان راکتیو، دقت سایر کمیت‌های سیستم از جمله دامنه و فرکانس ولتاژها، تقسیم توان حقیقی و... حفظ شود و دارای سادگی در پیاده‌سازی باشد. از آن جایی که در روش کنترل افی تقسیم توان حقیقی با نابرابر شدن امپدانس خروجی اینورترها برهم نمی‌خورد و دقت خود را حفظ می‌نماید لذا مشخصه افی توان حقیقی - فرکانس به همان صورت مرسوم در روش کنترل افی باقی خواهد ماند اما در مورد مشخصه توان راکتیو - ولتاژ این گونه نیست. سازوکار روش پیشنهادی بدین صورت است که در ابتدا با تخمین ولتاژ باس مشترک v_{bus} (ولتاژ انتهای خط) و مقایسه آن با مقداری مرجع، مقدار مرجعی برای توان راکتیو به دست آورده خواهد شد سپس با توجه به این مقدار مرجع و مقدار توان راکتیو اندازه‌گیری شده برای هر اینورتر، مقدار مرجع حلقه کنترل ولتاژ برای هر اینورتر به صورت مستقل محاسبه می‌شود. در این صورت تقسیم توان راکتیو دقیقی در همه شرایط برای سیستم فراهم می‌آید که نتایج شبیه‌سازی و جزئیات این روش در بخش ۲ به صورت کامل آورده شده است. از چالش تقسیم توان راکتیو که بگذریم بحث پایداری در حضور بارهای اکتیو به میان می‌آید. در ریزشبکه‌های امروزی برخلاف شبکه‌های معمول سنتی، بارهای تغذیه‌شونده توسط

تقسیم توان راکتیو بین اینورترهای موازی تغذیه‌کننده بار مستقل پرداخته می‌شود و یک روش کارا و موثر برای تقسیم دقیق توان راکتیو بین اینورترهای موازی ارائه می‌شود. در ادامه در بخش دوم مقاله، به کنترل و بهبود پایداری اینورترهای موازی تغذیه‌کننده بار اکتیو پرداخته می‌شود. بارهای اکتیو دارای سیستم کنترل حلقه بسته بوده و همان رفتار بارهای توان ثابت را دارند و به لحاظ سیگنال کوچک به مثابه مقاومت منفی رفتار کرده و باعث کاهش حاشیه پایداری و حتی ناپایداری در ریزشبه می‌شوند. بنابراین، در ابتدای بخش دوم، تاثیر عواملی همچون پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ بار اکتیو و میزان توان بار اکتیو بر پایداری ریزشبه آزموده شده و در ادامه به بهبود پایداری کل سیستم از طریق اصلاح حلقه‌های کنترلی اینورترهای موازی سمت تولید پرداخته می‌شود. در پایان هر بخش، نتایج شبیه‌سازی سیستم تحت مطالعه در محیط متلب-سیمولینک (Matlab-Simulink) آورده می‌شود.

۲- کنترل اینورترهای موازی

شکل (۱) پیکربندی سیستم پیشنهادی در این مطالعه شامل دو اینورتر سه‌فاز موازی را نشان می‌دهد. هر یک از اینورترهای موازی از طریق خط انتقالی توان را به بار متصل شده می‌رسانند. هدف کنترلی در این سیستم تامین ولتاژ مناسب در دو سر بار ضمن تقسیم توان متناسب میان هر یک از اینورترهاست. به جهت دستیابی به این هدف از میان روش‌های گوناگون، روش کنترل افنی را به جهت عدم نیاز به خطوط ارتباطی میان اینورترها و عملکرد صرفا بر اساس اطلاعات اندازه‌گیرهای محلی انتخاب کرده و در ادامه به مرور و بررسی آن پرداخته خواهد شد.

مبدل‌های الکترونیک قدرت (نظیر لامپ‌های LED و سیستم‌های درایو-موتور) با هدف به دست آوردن کارایی بسیار بالاتر برای بهبود استفاده از انرژی، به شدت رواج پیدا کرده‌اند. این نوع از بارها به واسطه دینامیکی که دارند میرایی سیستم را کاهش داده و می‌توانند سیستم را ناپایدار سازند. تحلیل نحوه پاسخگویی سیستم به ازای تغییر در پارامترهای مختلف از پر اهمیت‌ترین موضوعاتی است که می‌تواند نقاط کار پایدار و ناپایدار را برای سیستم به دست آورد. در این راستا مطالعاتی مانند آنچه در [۱۹-۲۳] آورده شده انجام شده است. در این مقالات با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه سیستم، تاثیر تعدادی از پارامترهای سیستم بر پایداری را به دست آورده‌اند و یا در [۲۴] مشاهده می‌شود که نویسنده پایداری سیستم را از منظر واحد سنکرون‌سازی که در بارهای اکتیو مورد استفاده قرار می‌گیرد و بار اکتیو را در هر لحظه سنکرون با شبکه متصل به آن نگه می‌دارد، بررسی نموده است. مرجع [۲۵] به بیان راهکار کنترلی برای حفظ تعادل توان تولیدی و مصرفی و حفظ دامنه و فرکانس ولتاژ خروجی ریزشبه در محدوده مجاز پرداخته و در آن به موضوع ناپایداری‌های احتمالی ناشی از حضور بار اکتیو اشاره‌ای نشده است. مرجع [۲۶] نیز به بیان حفظ تعادل توان میان تولید و مصرف از طریق ایجاد تغییر در کنترل افنی پرداخته است. در [۲۷] دیده می‌شود که راهکارهایی همچون اضافه کردن یک المان پسیو به سیستم قدرت و یا تغییر و اصلاح حلقه‌های کنترلی به جهت بهبود پایداری سیستم شامل بارهای اکتیو ارائه شده است. نکته‌ای که در مورد تمامی این مقالات وجود دارد این است که هیچ یک از آن‌ها تاثیر دو پارامتر مهم پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ بار اکتیو و توان بار اکتیو و در نتیجه محدوده پایداری سیستم به ازای تغییرات این دو پارامتر را بررسی ننموده‌اند. بنابراین مقاله حاضر دارای دو بخش اصلی است. در بخش اول، به بحث



شکل (۱): ساختار ریزشبه شامل اینورترهای موازی تغذیه‌کننده بار مستقل

۱-۲- مروری بر روش کنترل افتی

شکل (۲) مدل هر اینورتر از دید مولفه‌ی هارمونیک اصلی در حالت ماندگار را نشان می‌دهد. توان مختلطی که از هر اینورتر خارج شده و به سمت بار جاری می‌شود برابر است با:

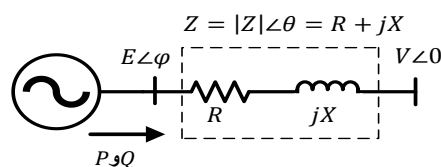
$$S = P + jQ \quad (1)$$

که P و Q به ترتیب توان‌های حقیقی و راکتیو بوده و از روابط (۲) و (۳) به دست می‌آیند.

$$P = \frac{EV}{|Z|} \cos(\theta - \varphi) - \frac{V^2}{|Z|} \cos \theta \quad (2)$$

$$Q = \frac{EV}{|Z|} \sin(\theta - \varphi) - \frac{V^2}{|Z|} \sin \theta \quad (3)$$

که V و E به ترتیب دامنه ولتاژ خروجی اینورتر و دامنه ولتاژ باس مشترک (باس متصل به بار)، φ زاویه توان، Z و θ دامنه و فاز امپدانس خروجی می‌باشند.



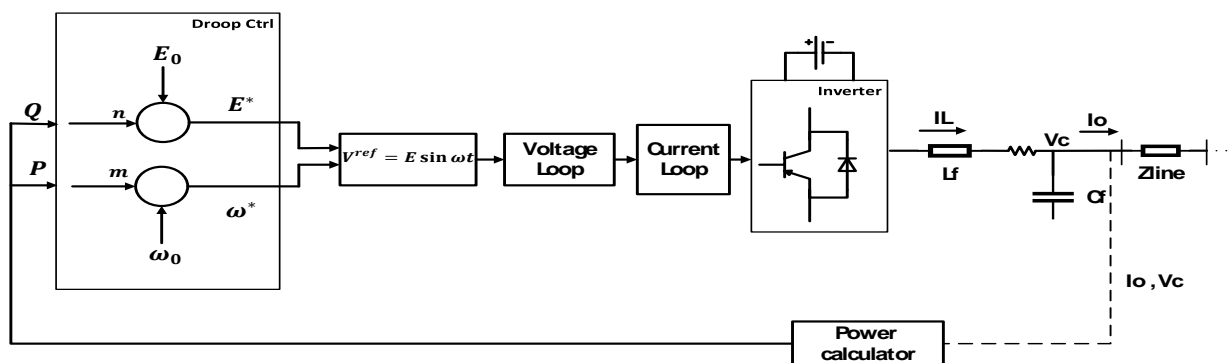
شکل (۲): مدار معادل یک اینورتر در حالت ماندگار

در حالت کلی امپدانس خروجی هر اینورتر ممکن است ماهیتی سلفی، مقاومتی، خازنی، سلفی-مقاومتی و یا خازنی-مقاومتی داشته باشد و این موضوع در بحث تقسیم توان بین اینورترها اثرگذار بوده و باید مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعه به دلیل مولفه‌ی سلفی غالب امپدانس خطوط و نیز اندوکتانس بزرگ فیلتر خروجی اینورتر، می‌توان ماهیت امپدانس خروجی را سلفی در نظر گرفت و روابط افتی را برای این حالت مطابق با (۴) و (۵) به دست آورد. روابط افتی متناسب با سایر حالت‌ها در مرجع [۳] آورده شده است.

$$\omega^* = \omega_0 - mP \quad (4)$$

$$E^* = E_0 - nQ \quad (5)$$

که ω_0 و E_0 فرکانس و ولتاژ نامی، ω^* و E^* فرکانس و دامنه ولتاژ مرجع اینورتر و m و n ضرایب افتی می‌باشند. از روی ω^* و E^* خروجی روابط افتی، مقدار مرجع برای حلقه کنترل ولتاژ هر یک از اینورترها به دست آمده و در حالت کلی بلوک دیاگرام کنترل هر یک از اینورترها در ساختار موازی را می‌توان مطابق شکل (۳) نشان داد. حلقه‌های داخلی کنترل ولتاژ و جریان مورد استفاده در شکل (۳) به سادگی و با نوشتن روابط KVL و KCL در خروجی هر یک از اینورترها قابل استخراج می‌باشند لذا از آوردن روابط و حلقه‌های مربوطه در این قسمت صرف نظر شده است.



شکل (۳): دیاگرام کلی کنترل هر یک از اینورترهای موازی

خواهد خورد. لذا در ادامه به تغییر و بهبود روش کنترلی مورد استفاده پرداخته خواهد شد.

۲-۲- روش کنترل افتی بهبود یافته

از آن جایی که تقسیم توان حقیقی همواره و تحت هر شرایطی دقیق و متناسب با ظرفیت اینورترها انجام می‌شود لذا از همان مشخصه افتی

مطابق یافته‌های سایر مقالات و همچنین شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در این مقاله در بکارگیری روش کنترل افتی در خطوط با امپدانس سلفی که در آن تقسیمات توان حقیقی و راکتیو بر طبق دو مشخصه $P-f$ و $Q-V$ انجام می‌گیرد، دیده می‌شود که توان حقیقی سیستم همواره به صورت متناسبی میان اینورترها تقسیم می‌شود اما در مورد توان راکتیو این موضوع صادق نیست و با نابرابر شدن امپدانس خروجی اینورترهای موازی، تقسیم توان راکتیو بین آن‌ها نیز بر هم

برای تخمین ولتاژ انتهای خط (ولتاژ باس مشترک) با توجه به شکل (۱) و با مشخص بودن مقادیر ولتاژ ابتدای خط و جریان خط از طریق اندازه‌گیرهای ولتاژ و جریان و با دانستن پارامترهای خط انتقال مربوط به هر اینورتر (مقادیر سلف و مقاومت کل خط) از روابط زیر که در حوزه $\alpha\beta$ بیان شده‌اند استفاده می‌شود:

$$v_{bus\alpha} = v_{c\alpha} - R_{line} i_{o\alpha} - \frac{L_{line}}{\omega_b} \frac{di_{o\alpha}}{dt} \quad (10)$$

$$v_{bus\beta} = v_{c\beta} - R_{line} i_{o\beta} - \frac{L_{line}}{\omega_b} \frac{di_{o\beta}}{dt} \quad (11)$$

در روابط فوق $v_{c\alpha}$ و $v_{c\beta}$ ولتاژهای ابتدای خط یا ولتاژهای خروجی اینورترها و $i_{o\alpha}$ و $i_{o\beta}$ جریان‌های عبوری از خط می‌باشند در نتیجه:

$$v_{bus} = \sqrt{v_{bus\alpha}^2 + v_{bus\beta}^2} \quad (12)$$

با فرض این که $i_{o\alpha}$ و $i_{o\beta}$ به صورت سینوسی با فرکانس اصلی و به فرم (۱۳) و (۱۴) باشند:

$$i_{o\alpha} = I \cos \omega t \quad (13)$$

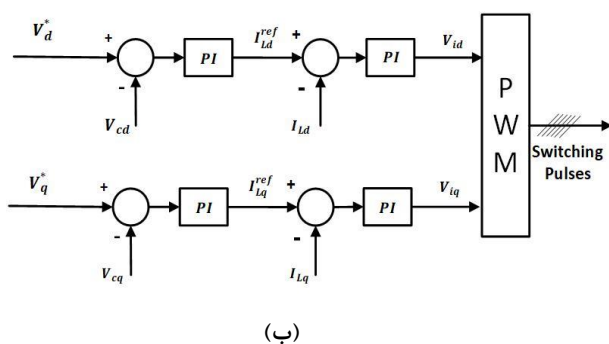
$$i_{o\beta} = I \sin \omega t \quad (14)$$

با توجه به (۱۳) و (۱۴) خواهیم داشت:

$$\frac{L_{line}}{\omega_b} \frac{di_{o\alpha}}{dt} = -\overline{L_{line}} \overline{\omega} i_{o\beta} \quad (15)$$

$$\frac{L_{line}}{\omega_b} \frac{di_{o\beta}}{dt} = \overline{L_{line}} \overline{\omega} i_{o\alpha} \quad (16)$$

با جایگذاری (۱۵) و (۱۶) در (۱۰) و (۱۱) می‌توان عبارات شامل مشتقات جریان را با $-\overline{L_{line}} \overline{\omega} i_{o\beta}$ و $\overline{L_{line}} \overline{\omega} i_{o\alpha}$ جایگزین کرد و ولتاژ انتهای خط هر اینورتر (ولتاژ بار) را به دست آورد.



(ب)

P-f مرسوم و به همان شکل برای کنترل سیستم استفاده می‌شود و فقط به اصلاح مشخصه افتی توان راکتیو و ولتاژ پرداخته می‌شود. در روش پیشنهادی در ابتدا ولتاژ باس مشترک v_{bus} (ولتاژ انتهای خط) را تخمین زده و مقدار به دست آمده را با یک مقدار مرجعی که عددی در حدود ۰٫۹۵ پریونیت برای آن قابل قبول است، مقایسه کرده و مطابق رابطه (۶) مقدار مرجع توان راکتیو برای هر اینورتر محاسبه می‌گردد. یعنی:

$$Q^* = \frac{1}{n} (v_{bus}^* - v_{bus}) \quad (6)$$

که v_{bus}^* و v_{bus} به ترتیب ولتاژ تخمینی انتهای خط انتقال و ولتاژ مرجع آن می‌باشد.

حال با توجه به این مقدار مرجع و مقدار توان راکتیو اندازه‌گیری شده برای هر اینورتر و سپس عبور آن از یک کنترل‌کننده PI مقدار مرجع حلقه کنترل ولتاژ هر اینورتر به صورت رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$V_{ref} = E \sin \omega t \quad (7)$$

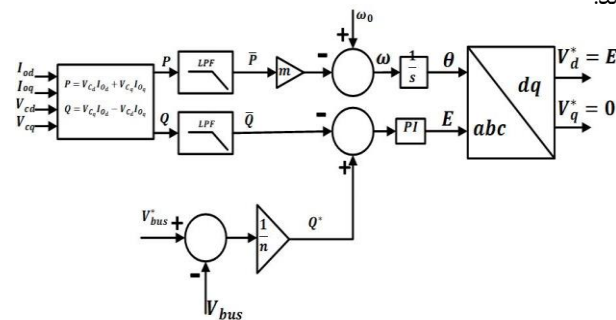
در شکل (۴) بلوک دیگران این روش و حلقه‌های کنترلی اینورترهای سمت تولید آورده شده است.

از آن جایی که مطابق شکل (۴-ب) کنترل سیستم در حوزه dq انجام می‌پذیرد، با استفاده از تبدیل پارک مقادیر مرجع ولتاژ هر اینورتر مطابق روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید:

$$V_d^* = E \quad (8)$$

$$V_q^* = 0 \quad (9)$$

مطابق شکل (۴-الف) آرگومان تبدیل پارک برای اینورتر ۱ و ۲ حاصل انتگرال گرفتن از $\omega_{1,2}^* \omega_b$ بوده که مطابق رابطه (۴) به دست آمده اند.



(الف)

شکل (۴): (الف): بلوک دیگران روش کنترل افتی بهبود یافته برای تقسیم دقیق توان راکتیو بین اینورترهای موازی، (ب): حلقه‌های کنترل مولفه‌های d و q اینورترهای موازی

۳-۲- مطالعات شبیه‌سازی تقسیم توان راکتیو بین

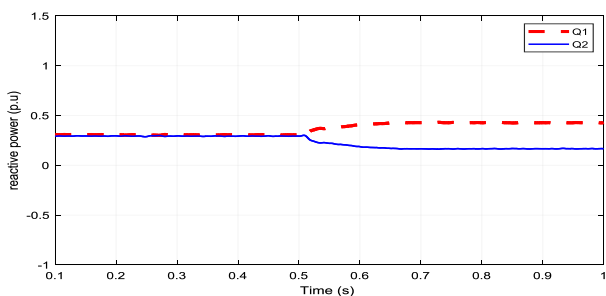
اینورترهای موازی با روش‌های مرسوم و بهبودیافته

برای مطالعه رفتار سیستم شکل (۱) در حالات مختلف دو اینورتر ۲۵ کیلو ولت آمپر به صورت موازی با هم در نظر گرفته شده‌اند که بار پسیو سلفی-مقاومتی با توانی معادل ۳۰ کیلو ولت آمپر و ضریب توان ۰/۸۵ را تغذیه می‌نمایند. تمامی مشخصات سیستم مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است. در این مطالعه نتایج مربوط به ولتاژها، جریان‌ها و توان‌ها در مقیاس پریونیت نمایش داده شده‌اند.

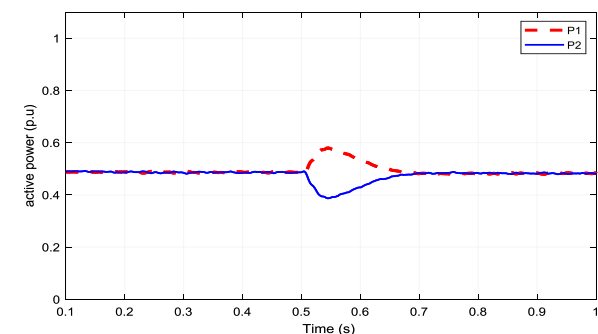
همان طور که از شکل (۵) مشخص است در هنگامی که امپدانس خروجی و ظرفیت هر دو اینورتر کاملاً یکسان است تقسیم توان حقیقی و راکتیو به صورت کاملاً دقیق و برابر با استفاده از همان روش اکتی مرسوم انجام می‌شود اما به محض نابرابر شدن امپدانس خروجی دو اینورتر و ۲ برابر شدن امپدانس خط اینورتر دوم در لحظه $t=0/5$ ثانیه، مشاهده می‌شود که با وجود آن که ظرفیت هر دو اینورتر همچنان یکسان است، توان راکتیو خروجی دو اینورتر و در نتیجه جریان خروجی هر یک از آن‌ها مقداری متفاوت شده و تقسیم دقیقی بین آن‌ها انجام نگرفته است. با اعمال روش کنترل اکتی بهبود یافته با ضرایب تناسبی و انتگرالی برابر با ۰/۱ و ۱۵ برای کنترل‌کننده PI مربوطه هنگامی که این نابرابری در امپدانس خروجی در سیستم وجود دارد، مطابق شکل (۶) مشاهده می‌شود که تقسیم توان راکتیو به صورت درست و دقیق انجام شده بدون آن که تقسیم توان حقیقی برهم بخورد و یا افت ولتاژی در خروجی اینورترها به وجود آید که این خود نشان از موثر بودن روش پیشنهادی است. همچنین برای تعیین نحوه پاسخگویی سیستم به تغییرات ناگهانی بار در لحظه $t=0/5$ ثانیه مقدار بار را به ۴۷ کیلو ولت آمپر با همان ضریب توان رسانده‌ایم. مشاهده می‌شود که سیستم در چنین شرایط پایداری خود را به صورت کامل حفظ نموده است.

جدول (۱): مشخصات سیستم مورد مطالعه

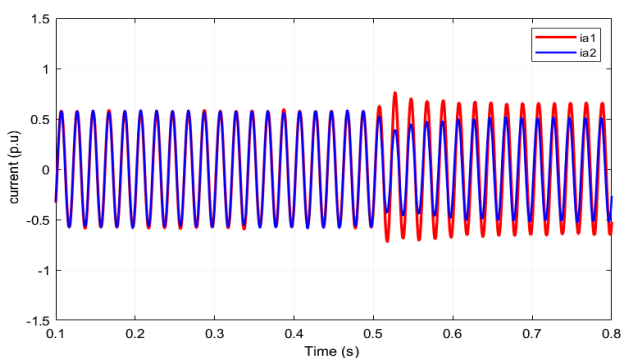
	پارامترها	مقادیر
پارامترهای اینورترها	S_n	25KVA
	V_n	380V(RMS L-L)
	f_n	50Hz
	V_{dc}	800V
	L_f/R_f	4mH/0.068Ω
	C_f	44μF
	L_{line}/R_{line}	0.264mH/0.1642Ω
پارامترهای بلوک‌های کنترلی	f_{sw}	2500Hz
	m	0.6rad/p.u
	n	0.05
	K_{pi}	1.74
	K_{ii}	27.33
	K_{pv}	0.32
	K_{iv}	402
	LPF freq	50Hz



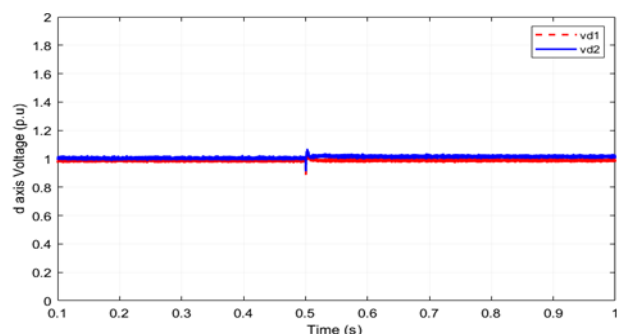
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۵): نتایج شبیه‌سازی به روش کنترل اکتی مرسوم و با دو برابر کردن امپدانس خط اینورتر دوم در لحظه ۰/۵ ثانیه،

(الف): تقسیم توان راکتیو، (ب): تقسیم توان حقیقی، (ج): جریان خروجی اینورترها، (د): ولتاژ خروجی اینورترها

۳- کنترل اینورترهای موازی در حضور بار اکتیو

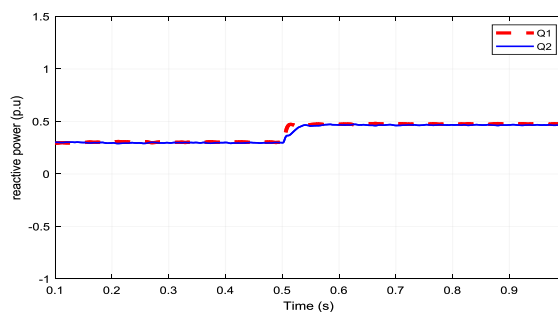
مستقل

در بخش قبل، کنترل اینورترهای موازی در حضور بارهای پسیو و در شرایط مختلف حاکم بر سیستم مورد مطالعه قرار گرفت. اما از آن جایی که در ریزشبه‌های امروزی بارهای تغذیه‌شونده تنها بارهای پسیو نبوده و بارهای اکتیو در بیشتر موارد جایگزین این بارها شده‌اند، در نظر گرفتن بارهای اکتیو در مطالعات مربوط به سیستم از اهمیت بالایی برخوردار است. در زیر ساختار بارهای اکتیو بررسی شده و رفتار سیستم در حضور آن‌ها مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

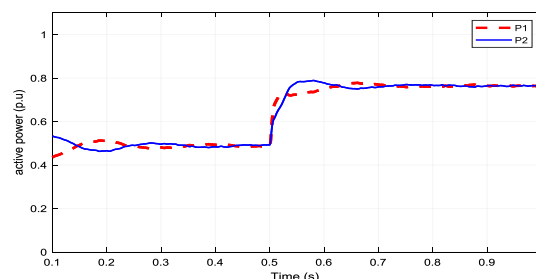
۳-۱- بار اکتیو

بارهای اکتیو شامل تجهیزاتی همچون درایوهای ماشین، مبدل‌های DC به AC و مبدل‌های DC-DC با حلقه‌های کنترلی سریع می‌باشند که به آن بارهای توان ثابت نیز گفته می‌شود. در ریزشبه‌های AC، یک یکسوساز اکتیو به همراه حلقه کنترل ولتاژ سمت DC که ولتاژ باس DC را در مقدار مشخصی ثابت نگه می‌دارد، به صورت یک بار اکتیو توان ثابت عمل می‌کند که از آن با نام یکسوساز اکتیو نیز یاد می‌شود. یکسوسازهای اکتیو معمولاً علاوه بر حلقه‌ی تنظیم ولتاژ، دارای یک حلقه‌ی کنترل جریان نیز می‌باشند. این دو حلقه‌ی کنترل ولتاژ و جریان، دارای پهنای باندی در رنج فرکانسی حلقه‌های کنترل ولتاژ و جریان اینورترهای سمت تولید می‌باشند. همچنین از دید سیگنال کوچک تمامی بارهای توان ثابت رفتاری شبیه به یک مقاومت افزایشی منفی از خود نشان می‌دهند. این بدان معناست که با کاهش ولتاژ، جریان افزایش یافته و با افزایش ولتاژ جریان کاهش می‌یابد تا توان در مقدار ثابتی باقی بماند. همه‌ی این ویژگی‌ها عاملی است که به موجب آن میرایی سیستم کاهش می‌یابد و در نتیجه سیستم را به سمت ناپایداری سوق می‌دهد. در شکل (۷) ساختار کلی یک یکسوساز اکتیو نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) قابل مشاهده است، بارهای اکتیو در سمت AC خود نیازمند یک فیلتر برای تضعیف هارمونیک‌های ناشی از کلیدزنی می‌باشند. در انتخاب مرتبه و طراحی پارامترهای فیلتر، استفاده از فیلترهای مرتبه بالاتر در تجهیزات توان بالا رایج‌تر است. غالباً در این موارد از فیلترهای LC و یا LCL استفاده می‌شود. فیلترهای LCL تضعیف بالاتری ضمن کوچک‌تر شدن مقادیر المان‌ها فراهم می‌سازند. در هر صورت با بهره‌گیری از هر کدام از این فیلترها برای تضعیف فرکانس‌های کلیدزنی، می‌بایست حلقه‌ی کنترل جریان به صورت مناسب طراحی گردد [۲۱].

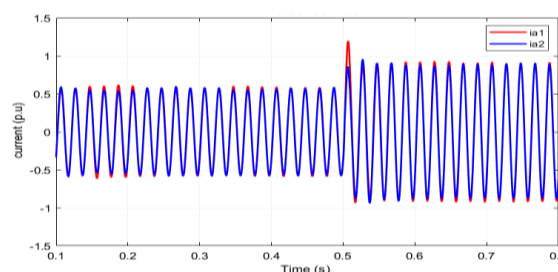
همچنین مطابق شکل (۷) برای سنکرون ماندن بار اکتیو با ریزشبه و اینورترهای سمت تولید، از یک حلقه قفل‌شونده فاز (PLL) استفاده می‌شود. PLL زاویه‌فاز ولتاژ ریزشبه را استخراج کرده و فرکانس آن را ردیابی می‌نماید. استفاده از PLLها از روش‌های رایج برای ردیابی



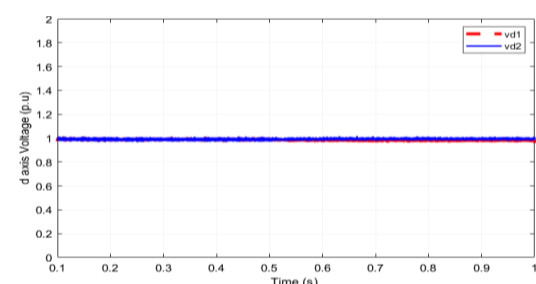
(الف)



(ب)



(ج)

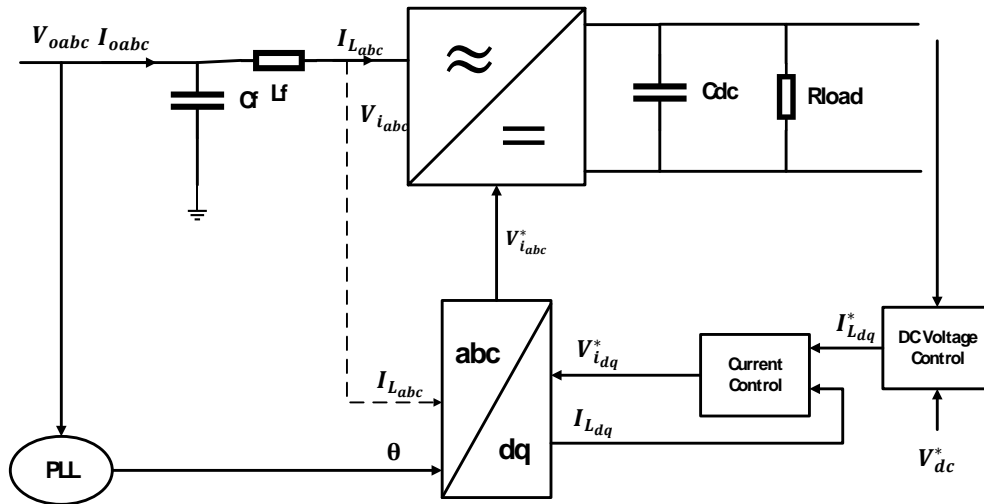


(د)

شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی به روش کنترل اف‌تی بهبودیافته در شرایط دو برابر بودن امپدانس خط اینورتر دوم و تغییر ناگهانی بار در لحظه ۰/۵ ثانیه،

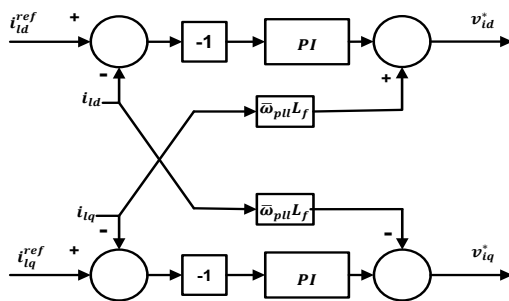
(الف): تقسیم توان راکتیو، (ب): تقسیم توان حقیقی، (ج): جریان خروجی اینورترها، (د): ولتاژ خروجی اینورترها

فاز می‌باشد که البته این روش خالی از مشکلات نیست چرا که PLLها قابل قبول به اندازه کافی سریع نیستند [۲۴]. خود اثر منفی بر عملکرد کنترلی سیستم می‌گذارند و در رنج دقت



شکل (۷): ساختار کلی یک یکسوساز اکتیو

بنابراین حلقه‌های کنترل جریان مطابق شکل (۸) به دست می‌آید.



شکل (۸): حلقه‌های کنترل جریان بار اکتیو

حلقه کنترل ولتاژ باس DC در یکسوسازهای اکتیو از نوشتن رابطه تبادل توان در یکسوساز قابل استخراج می‌باشد. رابطه تبادل توان برای

خازن لینک DC یکسوساز اکتیو به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{3}{2}(v_{od}i_{ld} + v_{oq}i_{lq}) - P_{loss} = C_{dc}v_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} + P_{load} \quad (21)$$

که در آن P_{load} و P_{loss} به ترتیب توان تلف شده در یکسوساز اکتیو و توان مصرفی بار سمت DC می‌باشند.

با توجه به آن که مقدار مرجع جریان محور q برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود، اثر این جریان در تولید توان از بین رفته و توان ورودی تنها از جریان محور d ناشی می‌شود.

با توجه به شکل (۷) به منظور استخراج حلقه کنترل جریان در بارهای اکتیو می‌بایست رابطه KVL را در ورودی یکسوساز مطابق رابطه (۱۷) در حوزه پیرونیست نوشت:

$$v_{oabc} = R_f i_{labc} + \frac{L_f}{\omega_b} \frac{di_{labc}}{dt} + v_{iabc} \quad (17)$$

که v_{oabc} ولتاژ ریزشیکه، v_{iabc} ولتاژ یکسوساز در سمت AC و i_{labc} جریان بار اکتیو می‌باشد و جهت آن مطابق شکل (۷) وارد شونده به یکسوساز می‌باشد.

با انتقال رابطه (۱۷) از دستگاه سه فاز abc به دستگاه dq چرخان منطبق بر PLL خواهیم داشت:

$$v_{odq} = R_f i_{ldq} + \frac{L_f}{\omega_b} \frac{di_{ldq}}{dt} + \bar{\omega}_{pll} L_f i_{lq} + v_{idq} \quad (18)$$

دقت شود که در دستگاه dq منطبق بر PLL، زاویه محور d با محور α ، θ_{pll} بوده و سرعت دستگاه چرخان ω_{pll} می‌باشد. رابطه (۱۸) را می‌توان به دو رابطه (۱۹) و (۲۰) تجزیه نمود.

$$v_{od} = R_f i_{ld} + \frac{L_f}{\omega_b} \frac{di_{ld}}{dt} - \bar{\omega}_{pll} L_f i_{lq} + v_{id} \quad (19)$$

$$v_{oq} = R_f i_{lq} + \frac{L_f}{\omega_b} \frac{di_{lq}}{dt} + \bar{\omega}_{pll} L_f i_{ld} + v_{iq} \quad (20)$$

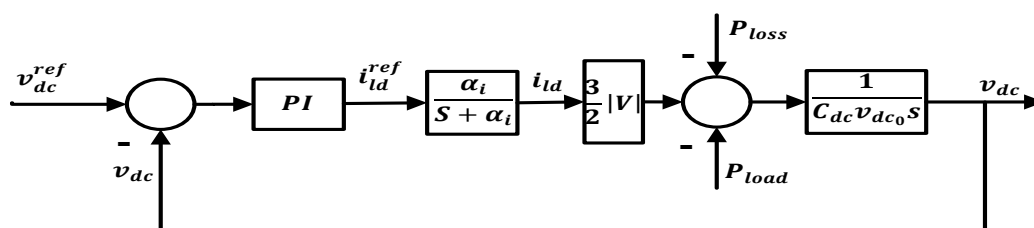
حال با در نظر گرفتن یکسوساز اکتیو شکل (۷) به عنوان بار برای اینورترهای موازی سمت تولید در شکل (۱)، ساختار مورد مطالعه در این قسمت مشخص می‌شود که در ادامه نحوه عملکرد چنین سیستمی مورد بررسی قرار می‌گیرد. توجه شود که کنترل اینورترهای موازی مشابه قبل و به روش کنترل اکتیو می‌باشد.

مطابق شکل (۱۰) اصلاح می‌گردد. لزوم استفاده از فیلتر بالاگذر آن است که مدهای فرکانس بالا سبب ناپایداری سیستم در حضور بار اکتیو شده و لذا در فرکانس پایه نیازی به اعمال مقاومت مجازی بر سیستم نمی‌باشد.

از طرفی در رابطه (۲۱) حاصل ضرب v_{dc} در مشتق آن دیده می‌شود که معادله را به یک معادله دیفرانسیل غیرخطی تبدیل می‌کند لذا می‌بایست این رابطه حول نقطه کار خطی‌سازی شود که فرم خطی شده آن به صورت (۲۲) خواهد بود.

$$\frac{3}{2} (V |\Delta i_{ld}|) - \Delta P_{loss} = C_{dc} v_{dc0} \frac{d v_{dc}}{dt} + \Delta P_{load} \quad (22)$$

که در آن منظور از v_{dc0} مقدار v_{dc} در نقطه کار می‌باشد و $|V|$ اندازه ولتاژ را نشان می‌دهد. با توجه به رابطه‌ی خطی شده (۲۲) حلقه کنترل ولتاژ باس DC مطابق شکل (۹) خواهد شد.



شکل (۹): حلقه کنترل ولتاژ باس DC مربوط به یکسوساز اکتیو

گین R_{iv} حلقه مقاومت مجازی تشکیل می‌شود. این حلقه به حلقه‌های کنترل ولتاژ اینورترهای سمت شبکه اضافه شده و حلقه‌های کنترلی عملکرد حلقه مقاومت مجازی بدین صورت است که با افزایش جریان خط، مقدار مرجع ولتاژ خروجی اینورتر کوچک‌تر شده و با این افزایش در جریان خط مخالفت می‌نماید و به عکس در صورت کاهش جریان خط مقدار مرجع ولتاژ بیشتر شده و از کاهش در جریان جلوگیری به عمل می‌آید.

۳-۳- مطالعات شبیه‌سازی مربوط به تحلیل و بهبود

پایداری اینورترهای موازی تغذیه‌کننده بار اکتیو

برای مطالعه رفتار سیستم، دو اینورتر موازی با ظرفیتی معادل ۲۵ کیلو ولت آمپر که بار اکتیوی را تغذیه می‌کنند در نظر گرفته می‌شود. مشخصات اینورترها مطابق جدول (۱) می‌باشد و مشخصات مربوط به بار اکتیو در جدول (۲) آورده شده است. شبیه‌سازی سیستم یک‌بار با حضور روش پیشنهادی و بار دیگر بدون حضور روش پیشنهادی و به ازای دو حالت زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

الف) تغییرات توان بار به ازای یک پهنای‌بند ثابت برای حلقه کنترل ولتاژ باس DC یکسوساز اکتیو

ب) تغییرات پهنای‌بند حلقه کنترل باس DC به ازای یک مقدار ثابت برای توان بار

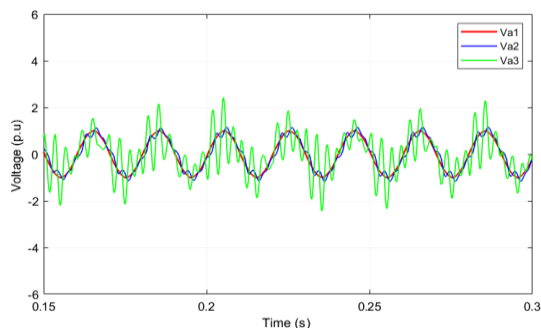
۳-۲- بهبود پایداری سیستم

روش‌های جبران ناپایداری ناشی از بارهای اکتیو، با افزودن المان‌های پسیوی همچون مقاومت، سلف و خازن به سیستم قدرت و یا به وسیله‌ی تغییر و بهبود در حلقه‌های کنترل مبدل سمت منبع یا بار شکل می‌گیرند. افزودن المان‌های پسیو به سیستم (در غالب مدارهای RC و RL موازی یا سری با فیلتر خروجی اینورتر و یا فیلتر ورودی یکسوساز بار) به منظور افزایش میرایی سیستم و در نتیجه‌ی آن بهبود پایداری سیستم، با وجود سادگی در اجرا و پیاده‌سازی، بازده سیستم را کاهش می‌دهد چرا که توان تلف شده در سیستم به دلیل اضافه شدن یک المان پسیو بیشتر می‌گردد. همچنین افزودن یک المان پسیو، به خصوص افزودن خازن‌ها، هزینه بر می‌باشد و از نظر اقتصادی به صرفه نیست. برای اجتناب از این مسائل می‌توان با تغییر و بهبود حلقه‌های کنترلی مبدل سمت منبع و یا بار و افزودن امپدانس مجازی، اثر میرایی سیستم را افزایش داد بدون آن که تلفاتی بر سیستم تحمیل شود [۲۸]. در ادامه به تشریح روش پایداری‌سازی مبتنی بر افزودن مقاومت مجازی و بهبود حلقه‌های کنترل مبدل سمت منبع پرداخته می‌شود.

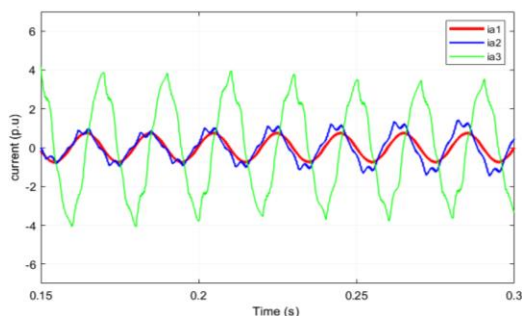
۳-۲-۱- مقاومت مجازی سمت منبع

در روش مقاومت مجازی از جریان‌های خط یعنی i_{od} و i_{oq} فیدبک گرفته شده و پس از عبور از یک فیلتر بالاگذر و ضرب شدن در یک

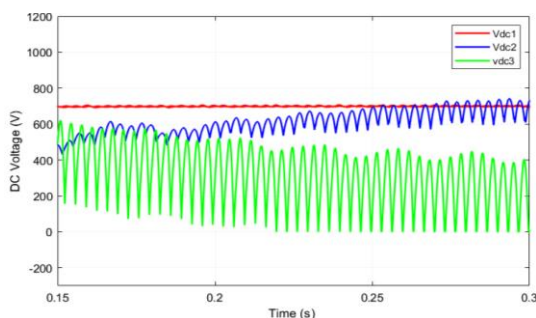
قرمز رنگ). افزایش توان به مقدار ۴۶ کیلو وات باعث ایجاد نوسان در ولتاژ باس DC و خارج شدن ولتاژ دو سر بار اکتیو و جریان هر یک از اینورترهای سمت تولید از حالت سینوسی شده (منحنی آبی رنگ) و با رسیدن توان بار به مقدار ۵۰ کیلو وات، هر یک از اینورترها در ظرفیت حداکثری خود قرار می‌گیرند و سیستم کاملاً ناپایدار می‌شود (منحنی سبز رنگ).



(الف)



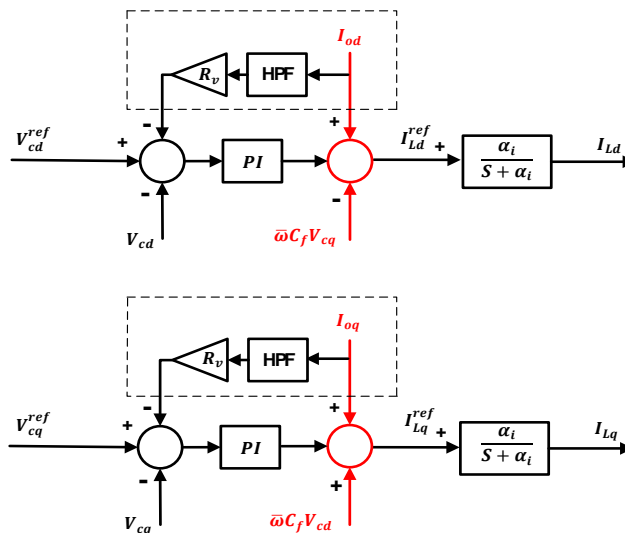
(ب)



(ج)

شکل (۱۱): شبیه‌سازی سیستم به ازای پهنای باند حلقه ولتاژ باس DC معادل ۴۴ هرتز و توان بار برابر ۳۵، ۴۶ و ۵۰ کیلو وات به ترتیب با رنگ‌های قرمز، آبی و سبز،

(الف) شکل موج ولتاژ دو سر بار اکتیو، (ب) جریان خط انتقال اینورترهای تولید و (ج) ولتاژ باس DC یکسوساز اکتیو



شکل (۱۰): حلقه‌های بهبود یافته ولتاژ خروجی اینورترهای سمت تولید با فیدبک از جریان‌های خط

جدول (۲): مشخصات مربوط به یکسوساز اکتیو

پارامترهای بار اکتیو	V_{dc}	700V
	L_f/R_f	2.5mH/0.04Ω
	C_f	66μF
	C_{dc}	400μF
	R_{load}	>=9.8Ω
پارامترهای بلوک‌های کنترلی بار اکتیو	K_{pi}	1.74
	K_{ii}	27.33
	K_{pll}	0.5
	K_{ipll}	75
	α_i	400Hz
	ω_{npll}	25Hz
	ξ	0.5

۳-۳-۱- بررسی تاثیر مقدار توان بار اکتیو بر پاسخ‌های ریزشکه بدون روش پایدار ساز پیشنهادی

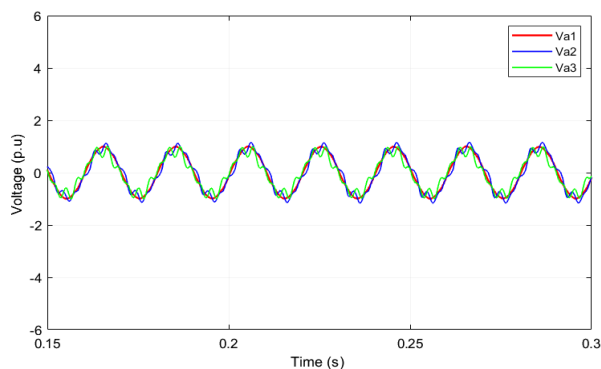
در شکل (۱۱) پاسخ سیستم به ازای پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ باس DC معادل ۴۴ هرتز و برای توان‌های ۳۵، ۴۶ و ۵۰ کیلو وات آورده شده است. در این حالت پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ باس DC چیزی حدود $\frac{1}{9}$ پهنای باند حلقه داخلی کنترل جریان یکسوساز اکتیو می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که با وجود کوچک انتخاب شدن پهنای باند، با افزایش توان بار، پایداری سیستم کاهش یافته و افزایش توان از یک حدی بیش‌تر منجر به ناپایداری کامل سیستم شده است. دیده می‌شود زمانی که توان بار ۳۵ کیلو وات انتخاب شده است، ولتاژ دو سر بار کاملاً سینوسی بوده و ولتاژ باس DC با دقت زیادی مقدار مرجع خود را دنبال نموده است (منحنی

۳-۳-۲- بررسی تاثیر مقدار پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ

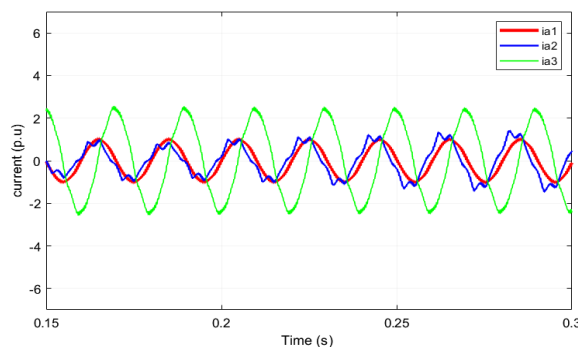
بار اکتیو بر پاسخ های ریزش بکه بدون روش پایدار ساز

پیشنهادی

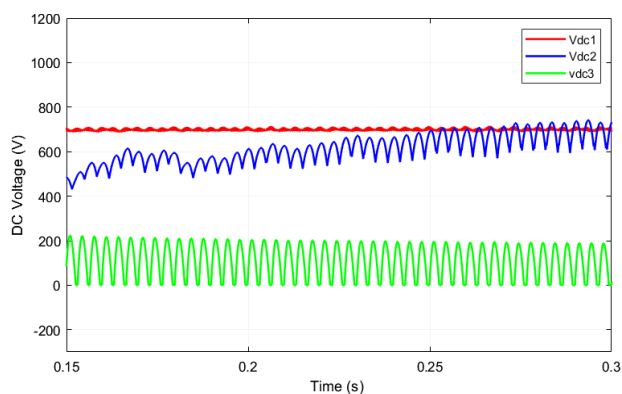
در این حالت توان بار اکتیو برابر با ۴۶KW در نظر گرفته شده و پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ باس DC تغییر داده می شود. به این صورت که برای پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ باس DC یکسوساز مقادیر ۴۰، ۴۴ و ۵۰ هرتز که به ترتیب چیزی در حدود $\frac{1}{10}$ ، $\frac{1}{9}$ و $\frac{1}{8}$ پهنای باند حلقه داخلی کنترل جریان یکسوساز اکتیو می باشد، در نظر گرفته می شود. چنانچه در شکل (۱۲) دیده می شود، عملکرد سیستم در پهنای باند ۴۰ هرتز پایدار و مناسب بوده و ولتاژی کاملا سینوسی در دو سر بار ایجاد شده و ولتاژ باس DC در مقدار مرجع ۷۰۰ ولت تثبیت شده است (منحنی قرمز رنگ). افزایش پهنای باند به مقدار ۴۴ هرتز نوساناتی را در ولتاژ باس DC ایجاد نموده و باعث ایجاد هارمونیک هایی در ولتاژ دو سر بار و جریان خروجی هر یک از اینورترهای سمت تولید شده است (منحنی آبی رنگ). همچنین تغییر پهنای باند کنترل ولتاژ باس DC به مقدار ۵۰Hz، سیستم را به طور کامل ناپایدار کرده به طوری که ولتاژ باس DC به شدت از مقدار مرجع خود فاصله گرفته و در حول ولتاژی تقریباً برابر با ۱۰۰ ولت نوساناتی با دامنه نوسان نسبتاً زیاد ظاهر می شود (منحنی سبز رنگ).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۲): شبیه سازی سیستم به ازای بار اکتیو با توان ۴۶KW و پهنای باند معادل با ۴۰، ۴۴ و ۵۰ هرتز (به ترتیب با رنگ های قرمز، آبی و سبز) برای حلقه کنترل ولتاژ باس DC بار اکتیو،

(الف) شکل موج ولتاژ دو سر بار اکتیو، (ب) جریان خط انتقال اینورترهای سمت تولید و (ج) ولتاژ باس DC بار اکتیو

در حالت کلی و با توجه به نتایج مطالعه سیستم به ازای دو حالت قبل می توان چنین بیان نمود که با افزایش هر چه بیشتر پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ باس DC یکسوسازهای اکتیو، پایداری سیستم به ازای توان های کوچکتر بار میسر می شود و حتی در برخی موارد بزرگ انتخاب شدن این پهنای باند سیستم را کاملاً ناپایدار می سازد. لذا برای داشتن سیستمی پایدار در گستره وسیع تری از توان های بار و هر چه نزدیک تر به ظرفیت نامی سیستم ناگزیر به کار کردن در پهنای باندهای کوچک هستیم که این موضوع خود مشکلاتی نظیر کند شدن پاسخ سیستم را به دنبال خواهد داشت.

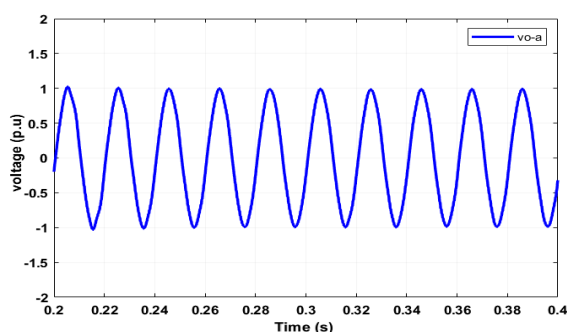
۳-۳-۳- بررسی پاسخ های ریزش بکه در حضور بار اکتیو

با روش پایدار ساز پیشنهادی

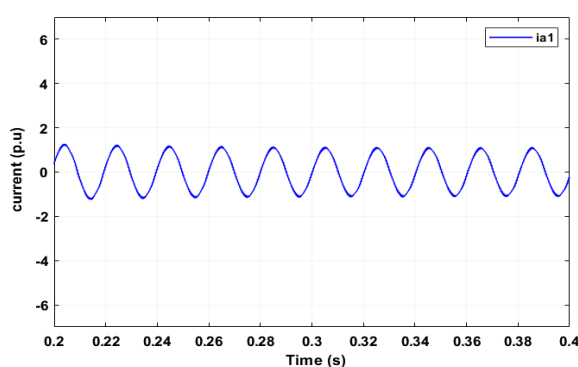
برای ارزیابی روش پیشنهادی در بخش ۳-۲-۱، در این قسمت به شبیه سازی سیستم تحت مطالعه شامل بار اکتیو با اعمال روش پایدار ساز پیشنهادی پرداخته می شود. پاسخ های سیستم تحت مطالعه به ازای پهنای باند ۴۴ هرتز برای حلقه کنترل ولتاژ باس DC و توان بار ۵۰ کیلو وات در شکل (۱۳) نشان داده شده اند. با مقایسه شکل های (۱۰) و (۱۳) واضح است که با اعمال روش پایدار ساز پیشنهادی در توان نامی و با فرکانس فیلتر بالا گذر در حدود $rad/s 500$ و $R_v = 0.2 pu$ ، سیستم به طور کامل پایدار شده و ولتاژ باس DC بار اکتیو در مقدار ۷۰۰ ولت تثبیت شده است. از مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل های (۱۱) و (۱۳) مشهود است که نوسانات ولتاژ باس DC، پس از اعمال حلقه مقاومت مجازی به صورت کامل از بین رفته و شکل موج های ولتاژ و جریان نیز به

بین اینورترهای موازی میسر گردید. در ادامه عملکرد ریزشبه شامل اینورترهای موازی در شرایطی که بار سیستم یک بار اکتیو توان ثابت باشد، مورد ارزیابی قرار گرفت. دیده شد که افزایش توان بار اکتیو یا افزایش پهنای باند حلقه کنترل ولتاژ باس DC بار اکتیو چگونه می‌تواند منجر به کاهش حاشیه پایداری سیستم گردد و در پایان روش مقامت مجازی برای افزایش پایداری سیستم پیشنهاد و اثربخشی آن مورد ارزیابی قرار گرفته شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که نوسانات ولتاژ باس DC در حضور بار اکتیو، پس از اعمال حلقه مقاومت مجازی به صورت کامل از بین رفته و شکل موج‌های ولتاژ و جریان نیز به صورت کاملا سینوسی و فاقد هرگونه هارمونیک در ورودی بار ظاهر شده‌اند.

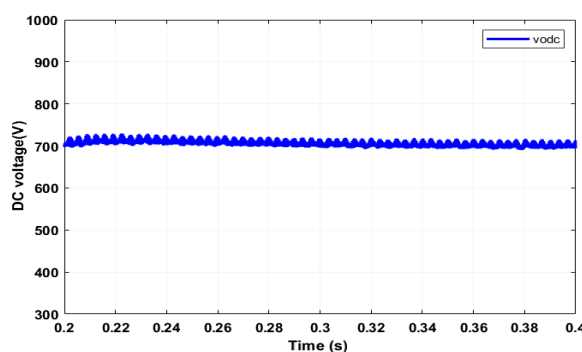
صورت کاملا سینوسی و فاقد هرگونه هارمونیک در ورودی بار ظاهر شده‌اند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۳): شبیه‌سازی سیستم به ازای بار اکتیو با توان ۵۰KW و پهنای باند معادل ۴۴ هرتز برای حلقه کنترل ولتاژ باس DC بار اکتیو،
(الف) شکل موج ولتاژ دو سر بار اکتیو، (ب) جریان خط انتقال اینورترهای سمت تولید و (ج) ولتاژ باس DC بار اکتیو

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله دارای دو بخش است. در بخش اول هدف کنترل اینورترهای موازی سمت تولید برای تقسیم متناسب توان راکتیو بین آن‌ها می‌باشد. در این راستا رابطه افتی ولتاژ-توان راکتیو به گونه‌ای تغییر داده شد که با تخمین ولتاژ دو سر بار امکان تقسیم دقیق توان راکتیو

مراجع

- [1] H. Cai, R. Zhao and H. Yang, "Study on Ideal Operation Status of Parallel Inverters", in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 6, pp. 2964-2969, Nov. 2008.
- [2] R. S. Kushwah and G. R. Walke, "Parallel Operation of Inverters with Droop Control of Voltage and Frequency", 2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET), Mumbai, pp. 1-5, 2018.
- [3] Q. Zhong and Y. Zeng, "Universal Droop Control of Inverters with Different Types of Output Impedance", in IEEE Access, vol. 4, pp. 702-712, 2016.
- [4] 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.
- [5] D. C. Raj and D. N. Gaonkar, "Frequency and voltage droop control of parallel inverters in microgrid", 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC), Kolkata, pp. 407-411, 2016.
- [6] C. Dou, Z. Zhang, D. Yue and M. Song, "Improved Droop Control Based on Virtual Impedance and Virtual Power Source in Low-Voltage Microgrid", in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 4, pp. 1046-1054, 2017.
- [7] L. Zheng, C. Zhuang, J. Zhang and X. Du, "An Enhanced Droop Control Scheme for Islanded Microgrids", International Journal of Control and Automation, vol. 8, no. 4, pp. 63-74, 2015.
- [8] S. Zhang et al., "An Enhanced Droop Control Strategy for Accurate Reactive Power Sharing in Islanded Microgrids", 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, pp. 2352-2356, 2019.
- [9] X. Bai, H. Miao and C. Zeng, "Improved Droop Control Strategy for Reactive Power Sharing of Parallel Inverters in Low-Voltage Microgrid", 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, pp. 2538-2543, 2019.
- [10] L. Lei, M. A. Elgendy, N. Wade and S. Ethni, "Power Sharing Between Parallel Inverters by Using Droop Control with a Secondary Control Loop", 2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Xi'an, China, pp. 653-658, 2019.

- Sustainable Energy Technologies, Singapore, pp. 279-284, 2008.
- [24] M. A. Hassan, "Dynamic Stability of an Autonomous Microgrid Considering Active Load Impact with a New Dedicated Synchronization Scheme", in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 5, pp. 4994-5005, Sept.
- [25] G. Ding, S. Zhang, Qingzhi Jian, F. Gao and Xingong Cheng, "Coordinate control of distributed generation and active power electronics loads in islanding microgrid", 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), Kaohsiung, pp. 1581-1585, 2017.
- [26] T. L. Vandoorn, B. Renders, L. Degroote, B. Meersman and L. Vandevelde, "Active Load Control in Islanded Microgrids Based on the Grid Voltage", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, no. 1, pp. 139-151, March 2011.
- [27] M. AL-Nussairi, R. Bayindir, P. Sanjeevikumar, L. Mihet-Popa and S. Pierluigi, "Constant Power Loads (CPL) with Microgrids: Problem Definition, Stability Analysis and Compensation Techniques", Energies 10, no. 10: 1656, 2017.
- [28] M. Céspedes, T. Beechner, L. Xing and J. Sun, "Stabilization of constant-power loads by passive impedance damping", 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Palm Springs, CA, pp. 2174-2180, 2010.
- [11] B. Wang, S. Liu and Y. Zhang, "Reactive power sharing control based on voltage compensation strategy in microgrid", 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), Dalian, pp. 10745-10750, 2017.
- [12] J. M. Guerrero, Luis Garcia de Vicuna, J. Matas, M. Castilla and J. Miret, "Output Impedance Design of Parallel-Connected UPS Inverters with Wireless Load-Sharing Control", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 4, pp. 1126-1135, Aug. 2005.
- [13] Gu. Herong, W. Deyu, Sh. Hong, Z. Wei and G. Xiao-Qiang, "New Power Sharing Control for Inverter-Dominated Microgrid Based on Impedance Match Concept", The Scientific World Journal, vol. 2013, 2013.
- [14] S. Y. Altahir, Xiangwu Yan and Xinxin Liu, "A power sharing method for inverters in microgrid based on the virtual power and virtual impedance control", 2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Cadiz, pp. 151-156, 2017.
- [15] R. AN, Z. LIU, J. LIU and S. WANG, "A Communication-independent Reactive Power Sharing Scheme with Adaptive Virtual Impedance for Parallel Connected Inverters", 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), Niigata, pp. 3692-3697, 2018.
- [16] R. Zhao, X. He, H. Xin, Z. Wang and K. P. Wong, "A decentralized and hierarchical reactive power sharing control strategy for DGs parallel operation in an islanded microgrid", 10th International Conference on Advances in Power System Control, Operation & Management (APSCOM 2015), Hong Kong, pp. 1-6, 2015.
- [۱۷] بابایی، محمدجواد. رضوانی، محمد. نوری شیرازی، عبدالرضا. یوسفی، برزو. "کنترل متوسط‌گیری ثانویه توزیع‌شده زمان محدود برای تنظیم ولتاژ و تقسیم توان ریز شبکه‌های AC"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیستم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۲.
- [۱۸] لرزاده، ایمان. عسکریان ابیانه، حسین. ثواقبی، مهدی. "کنترل سلسله مراتبی برای تسهیم دقیق توان راکتیو و جریان های هارمونیک در ریز شبکه های جزیره ای براساس کنترل جریان چرخشی لحظه‌ای"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۵.
- [19] J. Chen and J. Chen, "Stability Analysis and Parameters Optimization of Islanded Microgrid with Both Ideal and Dynamic Constant Power Loads", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 4, pp. 3263-3274, April 2018.
- [20] N. Bottrell and T. C. Green, "Modeling microgrids with active loads", 2012 IEEE 13th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Kyoto, pp. 1-8, 2012.
- [21] 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.
- [22] S. Rezaee, M. Moallem, J. Wang and A. A. Radwan, "Dynamic Modeling and Stability Analysis of Converter-based Three-phase AC Microgrids with Active Loads", 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Vancouver, BC, Canada, pp. 81-86, 2019.
- [23] D. P. Ariyasinghe and D. M. Vilathgamuwa, "Stability analysis of microgrids with constant power loads", 2008 IEEE International Conference on