

کنترل عدم تعادل ولتاژ در ریز شبکه جزیره‌ای شامل واحدهای کنترل شده ولتاژ و جریان

پیام پوروحدانی^۱ علیرضا جلیلیان^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

ppoorvahdani@gmail.com

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- قطب علمی اتوماسیون و بهره برداری از سامانه های قدرت

دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران- ایران

jalilian@iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله، کنترل اینورترهای واسط منابع تولید پراکنده به منظور بهسازی کیفیت توان در ریز شبکه‌ها با تاکید بر عدم تعادل ولتاژ مد نظر قرار گرفته است. کنترل این مبدل‌ها به نحوی هماهنگ شده است که منابع تولید پراکنده متناسب با توان نامی و با توجه به ظرفیت مازاد خود در جبران سازی عدم تعادل ولتاژ مشارکت نمایند. ساختارهای کنترلی ارائه شده در این مقاله به دو دسته مبدل کنترل شده ولتاژ و کنترل شده جریان دسته بندی شده‌اند. واحدهای کنترل شده ولتاژ با استفاده از امیدانس مجازی خازنی به جبران سازی عدم تعادل ولتاژ کمک می کنند، در حالی که در واحدهای کنترل شده جریان یک حلقه ادمیتانس مجازی پیشنهاد شده است که بر اساس ظرفیت باقی مانده اینورتر در جبران سازی عدم تعادل ولتاژ مشارکت می کند. همچنین، برای تقسیم توان راکتیو، روش های کنترل افتی و افتی معکوس به ترتیب برای واحدهای کنترل شده ولتاژ و جریان استفاده می شود که در آن ضرایب افتی با در نظر گرفتن ظرفیت محدود این اینورترها و توان نامتعادل تنظیم می شوند. نتایج شبیه سازی به دست آمده بیانگر عملکرد موثر ساختار کنترل پیشنهادی در مراحل مختلف می باشد.

واژه های کلیدی: منابع تولید پراکنده، ریز شبکه، کنترل غیر متمرکز، جبران سازی عدم تعادل ولتاژ، اشتراک توان راکتیو

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.61

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۳/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۶

نام نویسنده ی مسئول: دکتر علیرضا جلیلیان

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران - تهران - نارمک - خیابان دانشگاه - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده ی برق

۱- مقدمه

حفظ شاخص‌های کیفیت توان در یک سطح قابل قبول و مناسب در شبکه‌های در حال تحول یک امر بسیار مهم و ضروری است. بنابراین بهبود کیفیت توان، یکی از اهداف اصلی شبکه‌های برق آینده می‌باشد. با این وجود، معرفی فناوری‌های شبکه هوشمند به طور فزاینده‌ای به شبکه‌های برق پیچیده منجر خواهد شد که دارای سطح نفوذ قابل توجهی از منابع انرژی توزیع‌شده، سیستم‌های نظارت هوشمند، سیستم‌های ارتباطی و کنترلی و ترکیب منابع مختلف است. از این رو دستیابی به کیفیت توان مناسب در این شرایط یکی از مواردی است که باید در بهره‌برداری و کنترل شبکه، مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. در این راستا، ریزشبکه به عنوان بخشی از معماری شبکه توزیع جدید در داخل مفهوم شبکه هوشمند در راستای رفع نواقص فنی و اقتصادی سیستم‌های تولید پراکنده و تحقق استفاده از این منابع تحت شرایط قابلیت اطمینان بالا و کیفیت توان مناسب مطرح شده است که مزایای مختلفی همچون: بهبود بهره‌وری انرژی، به حداقل رساندن مصرف انرژی کلی، کاهش اثرات زیست محیطی، افزایش قابلیت اطمینان منبع تغذیه، کاهش تلفات و کنترل ولتاژ را فراهم می‌کند [۱].

مطالعات ابتدایی در زمینه بهبود کیفیت توان در ریزشبکه‌ها عمدتاً بر روی بهبود کیفیت ولتاژ ترمینال DGها متمرکز بوده است. برای غلبه بر این مشکلات و بهبود کیفیت توان ریزشبکه، ادوات به‌ساز کیفیت توان مانند فیلترهای قدرت فعال سری می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. اما نصب این ادوات اضافی برای هر یک از واحدها در ریزشبکه هزینه‌بر است و توجیه اقتصادی ندارد. همچنین نصب این دستگاه‌ها می‌تواند پایداری ریزشبکه را به خطر بیندازد و یا مشکلات رزونانس را افزایش دهد. از طرف دیگر قابلیت بهبود شاخص‌های کیفیت توان بخصوص شاخص‌های عدم تعادل و هارمونیک ولتاژ را می‌توان با کنترل مناسب اینورترهای واسط تولید پراکنده در ریزشبکه بدست آورد [۲]. از این رو، استفاده از قابلیت مبدل‌های واسط منابع تولید پراکنده جهت بهبود کیفیت توان برای کاهش استفاده از دستگاه‌های به‌ساز کیفیت توان در ریزشبکه مورد توجه قرار گرفته است. ساختارهای کنترلی بررسی شده در مراجع مختلف عمدتاً به دو دسته غیرمتمرکز و سلسله مراتبی تقسیم می‌شوند. در مراجع [۳، ۴] کنترل عدم تعادل ولتاژ به صورت غیرمتمرکز با استفاده از داده‌های محلی مورد توجه قرار گرفته است، به طور مثال در [۴] برای جبران‌سازی نامتعادلی ولتاژ به صورت مستقل یک حلقه جبران‌سازی به سیستم کنترل پایه منابع تولید پراکنده اضافه شده است. با تفکیک مولفه‌های توالی مثبت و منفی ولتاژ و جریان و محاسبه توان راکتیو توالی منفی، جبران‌سازی مولفه منفی ولتاژ با ایجاد مرجع جبران‌سازی ولتاژ صورت می‌گیرد. همچنین، توزیع توان نیز بین مبدل‌ها بسته به ظرفیت آنها با محاسبه توان‌های اکتیو و راکتیو توالی مثبت مولفه اصلی انجام می‌شود. در [۵] نیز به منظور جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ، یک حلقه کنترل تطبیقی مبتنی بر الگوریتم فازی عصبی به

ساختار کنترل مبدل منبع ولتاژ اضافه شده است. حلقه کنترلی اضافه شده، مرجع جریانی متناسب با ضریب عدم تعادل ولتاژ ایجاد می‌کند به طوری که این مرجع، به خروجی کنترل‌کننده ولتاژ اضافه می‌شود تا جریان مرجع اصلاح شده را برای حلقه درونی کنترل‌کننده جریان تنظیم کند.

همان‌طور که پیشتر ذکر شد، برای بهبود کیفیت توان ریزشبکه می‌توان از کنترل سلسله مراتبی استفاده کرد. این ساختار شامل سه سطح اولیه، ثانویه و ثالثیه می‌باشد که معمولاً از کنترل سلسله مراتبی دو سطحی برای جبران‌سازی استفاده می‌شود. سطح اولیه، متشکل از کنترل افتی کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان و امپدانس مجازی، برای تقسیم توان‌های اکتیو و راکتیو توالی مثبت مولفه اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد و سطح ثانویه برای بازیابی ولتاژ و فرکانس و همچنین بهبود کیفیت توان استفاده می‌شود. در [۶] از ساختار کنترل سلسله مراتبی دو سطحی برای جبران‌سازی هارمونیک‌های ولتاژ استفاده شده است. سطح اولیه ترکیبی از کنترل‌کننده‌های منابع تولید پراکنده شامل کنترل توان، کنترل‌کننده‌های ولتاژ و جریان و امپدانس مجازی می‌باشد. کنترل‌کننده ثانویه جهت جبران‌سازی در نقطه اتصال مشترک طراحی شده است. سیگنال جبران‌سازی حاصل که در سطح کنترل ثانویه بدست می‌آید با استفاده از لینک‌های ارتباطی بین نقطه اتصال مشترک و واحدهای تولید پراکنده به کنترل سطح اولیه فرستاده می‌شود.

در [۷] یک کنترل سلسله مراتبی دو سطحی شامل کنترل اولیه و ثانویه برای افزایش کیفیت ولتاژ در باس بارهای حساس با در نظر گرفتن محدودیت‌های کیفیت ولتاژ باس بارهای غیر حساس مورد بررسی قرار گرفته است. در سطح اولیه، کنترل‌کننده افتی مسئول کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبکه است. وظیفه سطح ثانویه افزایش شاخص‌های کیفیت ولتاژ در باس بار حساس به سطح مشخص شده با ارسال سیگنال‌های کنترلی مناسب به سطح اولیه می‌باشد. شایان ذکر است که بهبود شاخص‌های کیفیت توان در باس بار حساس می‌تواند به کاهش این شاخص‌ها در باس بارهای غیر حساس منجر شود. اگر چه باس بارهای غیر حساس محدودیت کیفیت ولتاژ باس بارهای حساس را ندارند، اما حفظ کیفیت توان این باس بارها در محدوده مجاز آنها ضروری می‌باشد. از این رو، در [۸] یک طرح کنترل سلسله مراتبی سه سطحی به منظور جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ پیشنهاد شده است. دلیل استفاده از کنترل ثالثیه آن است که اگر هدف کاهش ولتاژ توالی منفی در چند باس باشد، کنترل ثانویه به تنهایی قادر به انجام این کار نخواهد بود. بنابراین، در این مرجع با ایجاد حلقه کنترل ثالثیه، یک بهینه‌سازی سراسری برای تمام باس‌ها جهت دستیابی به یک جبران‌سازی مناسب به طوری که استاندارد نامتعادلی ولتاژ در تمام باس‌ها رعایت شود، انجام شده است. در [۹] این موضوع بسط داده شده است و علاوه بر جبران‌سازی نامتعادلی ولتاژ، هارمونیک‌ها نیز در نظر گرفته شده‌اند.

۲- ساختار کنترل محلی ریزشبكة

شکل (۱)، راهبرد کنترل محلی پیشنهادی برای اینورتر واسط منابع تولید پراکنده در یک ریزشبكة شامل واحدهای کنترل‌شده ولتاژ و جریان را نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد، بسته به ماهیت واحدهای تولید پراکنده از نظر قابل برنامه‌ریزی بودن و یا غیر قابل برنامه‌ریزی بودن آن، مبدل‌های واسط می‌توانند به عنوان واحدهای کنترل‌شده ولتاژ و یا جریان در یک ریزشبكة بکار روند. به منظور کنترل مشکلات کیفیت توان در واحدهای کنترل‌شده ولتاژ، از طریق تزریق ولتاژ، عمل جبران‌سازی انجام می‌گیرد در حالی که در مبدل‌های کنترل‌شده جریان این کار توسط تزریق جریان انجام می‌شود. طبقه قدرت این شکل شامل محرک اولیه، اینورتر و فیلتر LCL می‌باشد. در ادامه جزئیات مربوط به سیستم کنترل واحدهای کنترل‌شده ولتاژ و جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- مبدل کنترل‌شده ولتاژ

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در واحد VCM کنترل‌کننده ولتاژ، مراجع تولید شده توسط کنترل‌کننده توان و امپدانس مجازی را دنبال کرده و مرجع برای کنترل‌کننده جریان تولید می‌کند. خروجی کنترل‌کننده جریان به قاب abc منتقل شده و سپس بر V_{dc} به منظور ارائه مرجع ولتاژ سه فاز برای مدولاسیون پهنای پالس تقسیم می‌شود. در نهایت، بلوک مدولاسیون پهنای پالس کلیدزنی اینورتر را بر اساس این مرجع کنترل می‌کند.

۳-۱- کنترل توان اکتیو و راکتیو

با در نظر گرفتن یک واحد تولید پراکنده سه فاز که از طریق امپدانس $Z < \theta$ به ریزشبكة متصل شده است، توان‌های توالی مثبت مولفه اصلی اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه توسط DG با استفاده از روابط زیر قابل بیان هستند [۱۵]:

$$P^+ = 3 \cdot \left[\frac{E \cdot V}{Z} \cos \phi - \frac{V^2}{Z} \right] \cos \theta + 3 \cdot \frac{E \cdot V}{Z} \sin \phi \sin \theta \quad (۱)$$

$$Q^+ = 3 \cdot \left[\frac{E \cdot V}{Z} \cos \phi - \frac{V^2}{Z} \right] \sin \theta - 3 \cdot \frac{E \cdot V}{Z} \sin \phi \cos \theta \quad (۲)$$

در این روابط، E اندازه ولتاژ توالی مثبت مولفه اصلی هر فاز DG، V اندازه ولتاژ فاز شبکه و ϕ زاویه بین E و V می‌باشند.

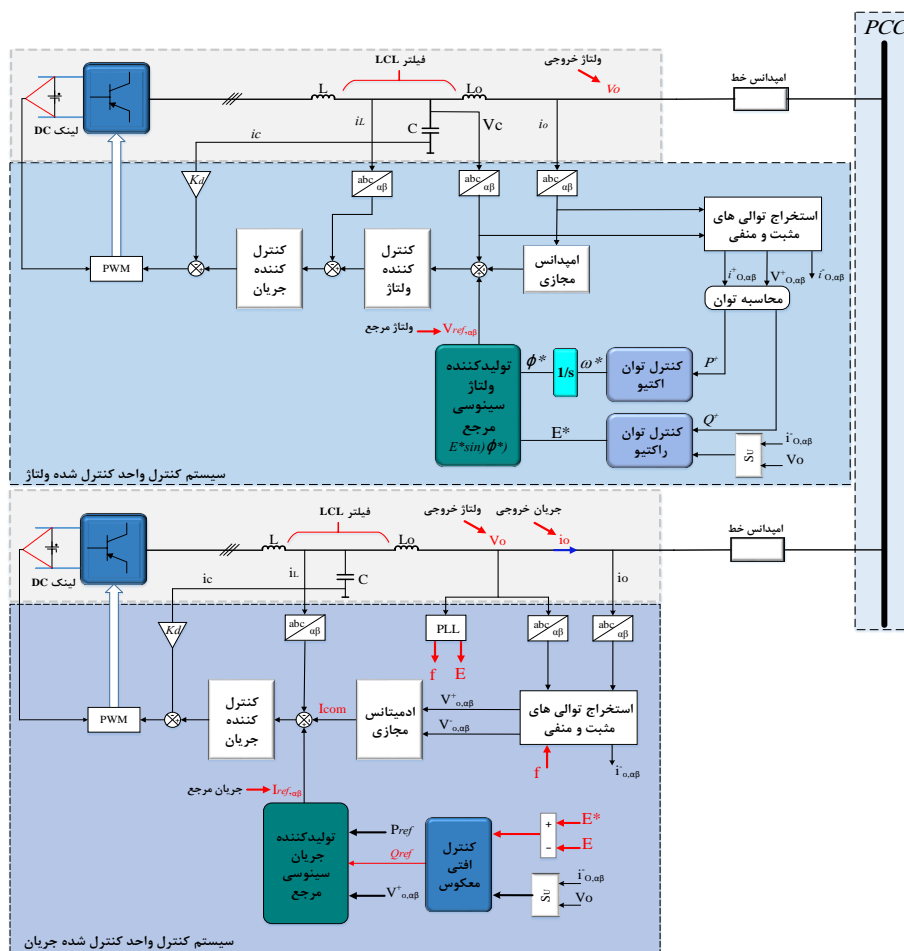
حال با فرض یک سیستم عمدتاً القایی و با توجه به اینکه معمولاً مقدار ϕ کوچک است، بنابراین $\sin \phi \approx \phi$ و $\cos \phi \approx 1$ می‌باشد و در نتیجه P^+ و Q^+ تقریباً مستقل بوده و با روابط زیر بیان می‌شوند [۱۵]:

$$P^+ \approx 3 \cdot \frac{E \cdot V}{X} \phi \quad (۳)$$

$$Q^+ \approx 3 \cdot \frac{V}{X} (E - V) \quad (۴)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تمامی طرح‌های کنترلی بررسی شده، شامل واحدهای کنترل ولتاژ می‌باشند. در صورتی که در یک ریزشبكة به دلیل وجود منابع انرژی تجدیدپذیر مانند توربین بادی و سیستم فتوولتائیک منابع با دو حالت کنترل ولتاژ و جریان وجود دارد. در منابعی مانند فتوولتائیک که مطلوب آن است بیشترین توان ممکن از آنها دریافت شود در حالت کنترل‌شده جریان کنترل می‌شوند، در حالی که منابع دیگر در حالت کنترل ولتاژ کنترل می‌شوند که این منابع ولتاژ و فرکانس کاری ریزشبكة را در حالت جزیره‌ای فراهم می‌آورند [۱۰]. بنابراین، در نظر گرفتن منابع مختلف با حالت‌های کاری متفاوت در ریزشبكة امری ضروری می‌باشد. در این راستا، در مراجع [۱۱، ۱۲] یک استراتژی اشتراک توان اکتیو و راکتیو ارائه شده است که می‌تواند به طور مستقیم بر روی اینورترهای کنترل جریان اعمال شود. مبدل‌های کنترل ولتاژ با کنترل اکتی متداول کنترل می‌شوند در حالی که یک طرح کنترل اکتی معکوس برای مشارکت واحدهای کنترل جریان در سیستم کنترل این واحدها پیشنهاد شده است. با این حال، در این مراجع کنترل هماهنگ واحدهای کنترل ولتاژ و جریان تنها به منظور اشتراک توان‌های اکتیو و راکتیو بین منابع صورت گرفته و مباحث مربوط به کیفیت توان مد نظر قرار نگرفته است. برای این منظور، در مرجع [۱۳] یک کنترل هماهنگ از واحدهای کنترل جریان و ولتاژ با در نظر گرفتن یک حلقه جبران‌سازی هارمونیک برای کاهش هارمونیک‌های ولتاژ پیشنهاد شده است، به طوری که حلقه کنترل هارمونیک، برای پیاده‌سازی در هر دو واحد کنترل ولتاژ و جریان مستقیماً سیگنال مدولاسیون اینورتر را تنظیم می‌کند. با این حال، برای تقسیم سهم جبران‌سازی هر یک از واحدها مطابق با ظرفیت نامی‌شان، یک حلقه بالانس‌کننده در نظر گرفته شده است، که می‌تواند باعث پیچیده‌تر شدن سیستم کنترل شود. در [۱۴] نیز بحث مشابهی با کنترل واحدهای کنترل جریان به منظور جبران‌سازی هارمونیک‌های ولتاژ در یک ریزشبكة متصل به شبکه صورت گرفته است.

در این مقاله، یک روش کنترل غیرمتمرکز جهت جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ در یک ریزشبكة جزیره‌ای که شامل واحدهای کنترل ولتاژ و جریان می‌باشد، پیشنهاد شده است. در واحدهای کنترل ولتاژ حلقه امپدانس مجازی خازنی در توالی منفی برای جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، یک حلقه ادمیتانس مجازی در واحدهای کنترل جریان پیشنهاد شده است تا مرجع جریان این واحدها را جهت جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ اصلاح کند. علاوه بر این، طرح کنترل اکتی و اکتی معکوس ارائه شده در مراجع [۱۱] و [۱۷] با هدف مشارکت واحدهای کنترل جریان در تامین توان راکتیو با در نظر گرفتن توان نامتعادل در تعیین ضرایب اکتی و اکتی معکوس مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت، اثربخشی روش پیشنهاد شده توسط نتایج شبیه‌سازی حاصل از سه اینورتر متصل شده موازی تحت بارهای متعادل و نامتعادل با استفاده از نرم افزار MATLAB/SIMULINK تحلیل و بررسی شده است.



شکل (۱): ساختار کنترل محلی پیشنهادی ریزشبهه جزیره‌ای شامل واحدهای کنترل شده ولتاژ و جریان

عملکرد این کنترل کننده‌ها، رفتار آنها در سیستم کنترل شکل (۱) بررسی خواهد شد. همان طور که می‌دانیم، برای تعیین پارامترهای کنترل کننده‌های ولتاژ و جریان نیاز به نمودار بد تابع تبدیل حلقه بسته سیستم کنترل داریم، بر این اساس، نمودار بلوکی سیستم کنترل شکل (۱) را رسم کرده و با تحلیل نمودار بد صحت عملکرد این کنترل کننده‌ها در ردیابی مراجع ولتاژ و جریان را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

$$G_V(s) = K_{pV} + \frac{K_{rV}s}{s^2 + (\omega^*)^2} \quad (7)$$

$$G_I(s) = K_{pI} + \frac{K_{rI}s}{s^2 + (\omega^*)^2} \quad (8)$$

نمودار بلوکی سیستم کنترل واحد VCM شکل (۱) را می‌توان به صورت شکل (۲) رسم نمود. همان طور که مشاهده می‌شود یک حلقه اضافی با بهره K_d جهت میراسازی در سیستم کنترل در نظر گرفته شده است. دلیل استفاده از این حلقه، مشکلات مربوط به فیلتر LCL می‌باشد. این فیلتر علیرغم مزایایی که فراهم می‌آورد، می‌تواند مسائلی مانند رزونانس در مبدل‌ها بوجود آورد. به همین دلیل استفاده از روش‌های میراسازی غیرقابل اجتناب خواهد بود.

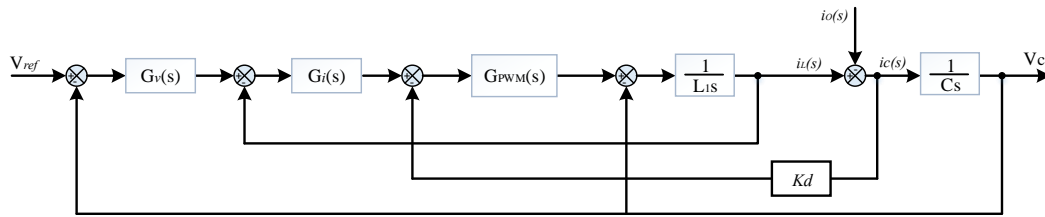
$$\phi^* = \phi_0 - (m_p P^+ + m_I \int P^+ dt) \quad (5)$$

$$E^* = E_0 - n_p Q^+ \quad (6)$$

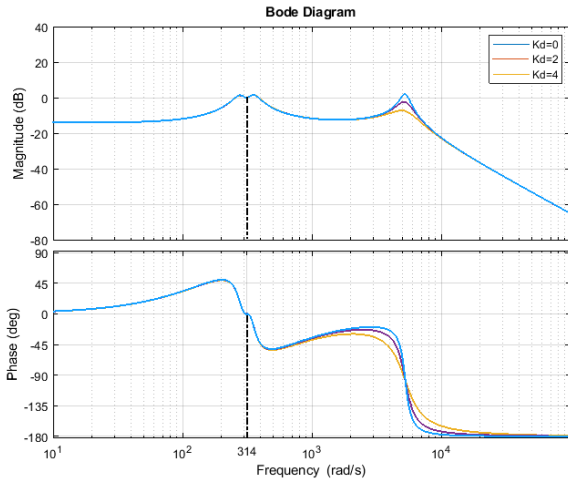
در این روابط E_0 و ω_0 به ترتیب مقادیر نامی فرکانس زاویه‌ای و دامنه ولتاژ خروجی، ϕ_0 زاویه فاز نامی، E^* و ϕ^* مقادیر مرجع زاویه فاز ولتاژ و دامنه ولتاژ هستند، m_p و m_I به ترتیب ضریب تناسبی توان اکتیو و راکتیو و ضریب انتگرالی توان اکتیو را مشخص می‌کنند. در حقیقت، رابطه (۵) به صورت یک کنترل کننده تناسبی-مشتقی برای فرکانس عمل می‌نماید که ضریب مشتقی آن به بهبود رفتار دینامیکی کنترل توان کمک می‌کند. همچنین با توجه به روابط (۵) و (۶) هیچ عبارت انتگرالی برای کنترل فرکانس و دامنه ولتاژ در نظر گرفته نمی‌شود، چون وقتی ریزشبهه در حالت جزیره‌ای کار می‌کند، استفاده از عبارت انتگرالی می‌تواند منجر به ناپایداری شود. برای محاسبه توان‌های اکتیو و راکتیو از تئوری توان راکتیو لحظه‌ای استفاده شده است که جزئیات مربوط به آن در مرجع [۴] قابل مشاهده می‌باشد.

۳-۲- کنترل کننده‌های ولتاژ و جریان

کنترل کننده‌های رزونانسی بیان شده در روابط (۷) و (۸) در شکل (۱) مورد استفاده قرار گرفته است. در اینجا برای تعیین صحت



شکل (۲): نمودار بلوکی سیستم کنترل واحد VCM



شکل (۳): نمودار بد تابع تبدیل حلقه بسته واحد VCM

که ملاحظه می‌شود اندازه و زاویه فاز $G_{CCM}(s)$ در فرکانس 50 Hz (314 rad/s) به ترتیب برابر یک و صفر می‌باشد و این یعنی مرجع جریان به خوبی دنبال خواهد شد.

۳-۳- حلقه امپدانس مجازی

به منظور کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو توالی مثبت مولفه اصلی فرض می‌شود که سیستم الکتریکی عمدتاً سلفی است. بر این اساس، اندوکتانس مجازی در فرکانس اصلی اضافه می‌شود تا امپدانس خروجی DG را سلفی‌تر کند. همچنین اضافه کردن مقاومت مجازی به میرا سازی نوسانات سیستم کمک می‌کند. به طور کلی، با طراحی مناسب امپدانس مجازی، کارایی کنترل‌کننده‌های توان افزایش می‌یابد [۱۵]. همچنین با اضافه شدن شاخه‌های هارمونیکی و توالی منفی از امپدانس مجازی برای کنترل این مولفه‌ها استفاده می‌شود.

در این مقاله، حلقه امپدانس مجازی در توالی مثبت برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده‌های اکتیو و راکتیو و از شاخه توالی منفی جهت کنترل عدم تعادل ولتاژ استفاده شده است. ساختار کلی بلوک امپدانس مجازی در شکل (۶) نشان داده شده است، که شامل ساختار القایی-مقاومتی برای مولفه توالی مثبت مولفه اصلی و بخش خازنی-مقاومتی برای مولفه‌های توالی منفی جریان است. همانطور که مشاهده می‌شود، مولفه‌های جریان خروجی اینورتر در قاب ساکن ($i_{o_{\alpha\beta}}$) به بلوک امپدانس مجازی وارد می‌شود. هر مولفه به زیر بلوک مربوطه خود اعمال می‌شود. در نهایت، خروجی این زیر بلوک‌ها با یکدیگر جمع شده و به عنوان مرجع به ورودی کنترل‌کننده ولتاژ اعمال می‌شوند.

برای تعیین تابع تبدیل حلقه بسته سیستم کنترل، از قاعده میسون استفاده شده است. بنابراین، با فرض یک سیستم خطی، خروجی $V_c(s)$ و ورودی $V_{ref}(s)$ را در نظر گرفته و سایر ورودی‌ها را صفر در نظر می‌گیریم. اکنون تابع تبدیل حلقه بسته $G_{VCM}(s)$ به صورت زیر قابل استخراج می‌باشد:

$$G_{VCM}(s) = \frac{G_v(s)G_i(s)G_{PWM}(s) \cdot \frac{Z_c}{Z_{L_1}}}{1 + G_v(s)G_i(s)G_{PWM}(s) \cdot \frac{Z_c}{Z_{L_1}} + G_i(s) \cdot \frac{G_{PWM}(s)}{Z_{L_1}} + K_d \cdot \frac{G_{PWM}(s)}{Z_{L_1}} + \frac{Z_c}{Z_{L_1}}} \quad (9)$$

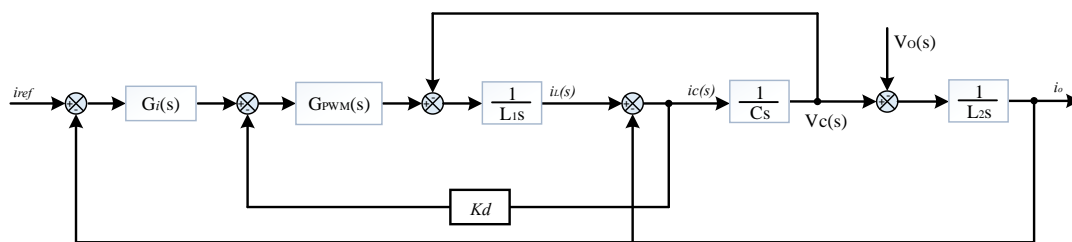
که در آن $Z_c = \frac{1}{Cs}$ و $Z_{L_1} = L_1s$ و $G_{PWM} = 1$ می‌باشد.

نمودار بد $G_{VCM}(s)$ در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود اندازه و زاویه فاز تابع تبدیل حلقه بسته در فرکانس 50 Hz (314 rad/s) به ترتیب برابر یک و صفر می‌باشد و این بیانگر آن است که مرجع ولتاژ به خوبی دنبال می‌شود. همچنین، در فرکانس رزونانس فیلتر LCL، به ازای $K_d = 0$ یک مقدار پیک وجود دارد. با تنظیم مناسب بهره K_d ، این مقدار کاهش یافته به طوری که احتمال وقوع مشکلاتی مانند تشدید در فرکانس رزونانس فیلتر کم خواهد شد. با این وجود، انتخاب مقادیر بزرگ برای K_d خود می‌تواند باعث ایجاد یک رزونانس اضافی شود [۲۰]. بر این اساس، مقدار $K_d = 2$ برای میراسازی در نظر گرفته شده است.

تحلیل مشابهی برای بررسی عملکرد سیستم کنترل واحد CCM قابل بیان است. جزئیات مربوط به این واحد در بخش‌های آتی آمده است، ولی برای حفظ یکپارچگی مطالب، تحلیل نمودار بد تابع تبدیل حلقه بسته آن در این بخش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. شکل (۴) نمودار بلوکی سیستم کنترل واحد CCM را نشان می‌دهد. در اینجا هدف تعیین تابع تبدیل حلقه بسته جریان خروجی (i_o) نسبت به جریان مرجع (i_{ref}) می‌باشد تا با رسم نمودار بد آن، مقدار مناسب برای پارامترهای کنترل‌کننده جریان جهت دنبال کردن دقیق مرجع جریان تولید شده، انتخاب شود. با استفاده از قاعده میسون تابع تبدیل حلقه بسته $G_{CCM}(s)$ به صورت رابطه (۱۰) بدست می‌آید.

$$G_{CCM}(s) = \frac{G_i(s)G_{PWM}(s) \cdot \frac{Z_c}{Z_{L_1}Z_{L_2}}}{1 + G_i(s)G_{PWM}(s) \cdot \frac{Z_c}{Z_{L_1}Z_{L_2}} + \frac{Z_c}{Z_{L_1}} + \frac{Z_c}{Z_{L_2}} + K_d \cdot \frac{G_{PWM}(s)}{Z_{L_1}}} \quad (10)$$

نمودار بد $G_{CCM}(s)$ در شکل (۵) قابل مشاهده می‌باشد. همان طور



شکل (۴): نمودار بلوکی سیستم کنترل واحد CCM

۴- مبدل کنترل شده جریان

شکل (۱) ساختار کنترل پیشنهادی یک واحد کنترل جریان را برای جبران سازی عدم تعادل ولتاژ و مشارکت در تامین توان راکتیو نشان می‌دهد. اینورتر رابط از طریق یک فیلتر LCL متصل می‌شود. کنترل جریان خروجی به وسیله کنترل کننده تناسبی رزونانسی که در بخش-های قبلی مورد بررسی قرار گرفت، انجام می‌شود. در ادامه بلوک‌های سیستم کنترل این واحد مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- کنترل توان اکتیو و راکتیو

مشارکت واحدهای CCM در به اشتراک گذاری توان‌های اکتیو و راکتیو با استفاده از کنترل اکتیو معکوس مطابق با شکل (۸) و به صورت زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$Q = \frac{1}{n_r} (E_0 - E_g) \quad (13)$$

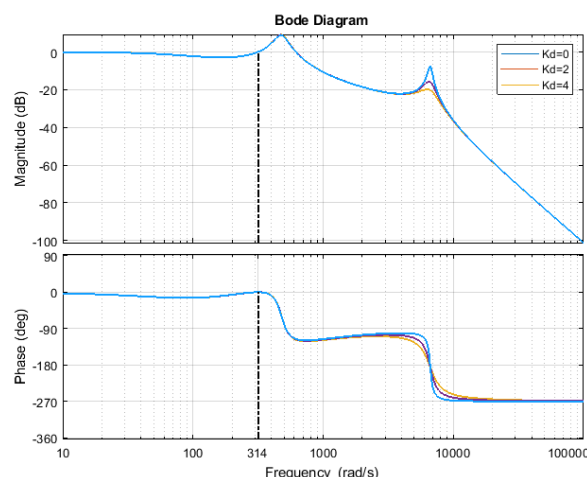
$$P = \frac{1}{m_r} (\omega_0 - \omega_g) \quad (14)$$

در این روابط ω_g و E_g به ترتیب نشان‌دهنده فرکانس زاویه‌ای ریزشبهه و ولتاژ موثر در نقطه اتصال واحدهای CCM می‌باشند. همچنین، P و Q توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی این واحدها و m_r و n_r ضرایب اکتیو معکوس هستند. این واحدها معمولاً توان مرجعی را که توسط سیستم‌های ردیابی حداکثر نقطه توان استخراج می‌شود، ارائه می‌دهند. از این رو فرض می‌شود که $P = P_{max}$ می‌باشد. بدین ترتیب کنترل اکتیو معکوس در معادله (۱۴) برای واحدهای CCM عمل نمی‌کند و مقدار P_{max} به ریزشبهه تزریق می‌شود و مابقی توان اکتیو بار، توسط واحدهای VCM تامین می‌گردد.

با چشم‌پوشی از افت ولتاژ، اشتراک توان راکتیو در میان واحدهای کنترل شده جریان و ولتاژ می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$\frac{Q_i}{Q_j} = \frac{n_j}{n_i} \quad (15)$$

که در آن n_i و n_j نشان‌دهنده ضرایب اکتیو و اکتیو معکوس توان راکتیو واحدهای کنترل ولتاژ نام و کنترل جریان نام است. در این مقاله تغییراتی در معیار تعیین مقدار ضرایب n_i و n_j در رابطه (۱۵) جهت مشارکت واحدهای کنترل ولتاژ و جریان در تامین توان راکتیو با در نظر گرفتن توان نامتعادل داده خواهد شد که در ادامه آمده است.

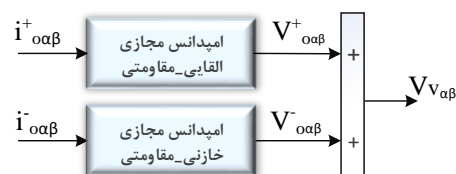


شکل (۵): نمودار بد تابع تبدیل حلقه بسته واحد CCM

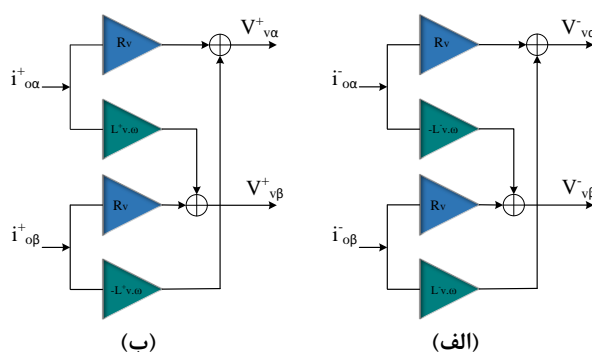
روش ایجاد امپدانس مجازی القایی-مقاومتی و خازنی-مقاومتی در قاب $\alpha\beta$ برای توالی‌های مثبت و منفی در شکل (۷) نشان داده شده است که در آن R_v و L_v مقادیر مقاومت و اندوکتانس مجازی و ω فرکانس سیستم می‌باشند. بنابراین، روابط (۱۱) و (۱۲) بیانگر امپدانس مجازی خروجی شکل (۶) می‌باشد [۱۸]:

$$V_{v\alpha} = R_v^+ i_{o\alpha}^+ - \omega L_v^+ i_{o\beta}^+ + R_v^- i_{o\alpha}^- + \omega L_v^- i_{o\beta}^- \quad (11)$$

$$V_{v\beta} = R_v^+ i_{o\beta}^+ + \omega L_v^+ i_{o\alpha}^+ + R_v^- i_{o\beta}^- - \omega L_v^- i_{o\alpha}^- \quad (12)$$



شکل (۶): ساختار کلی حلقه امپدانس مجازی [۱۸]



شکل (۷): امپدانس مجازی (الف) توالی مثبت، (ب) توالی منفی [۱۸]

$$n_r = n_p = \frac{\Delta E}{Q_{max}} = \frac{\Delta E}{\sqrt{S_n^2 - P^2 - S_U^2}} \quad (20)$$

که در آن، ΔE نشان‌دهنده حداکثر انحراف مجاز دامنه ولتاژ است.

با جایگزینی این معادله در رابطه (۱۳)، توان راکتیو تزریقی واحدهای کنترل جریان را می‌توان با رابطه (۲۱) بیان کرد:

$$Q = \frac{1}{n_r} (E_0 - E_g) = \frac{\sqrt{S_n^2 - P^2 - S_U^2}}{\Delta E} (E_0 - E_g) \quad (21)$$

همانطور که در معادله (۲۱) و شکل (۸-ب) مشاهده می‌شود، واحد CCM می‌تواند به انحراف دامنه ولتاژ ($E^* - E_g$) پاسخ دهد. اگر انحراف ولتاژ بالا باشد، واحد بیشتر در جبران‌سازی توان راکتیو مشارکت می‌کند. اگر ظرفیت باقیمانده اینورتر به صفر برسد، با توجه به رابطه (۲۱)، شیب افقی معکوس نشان داده شده در شکل (۸-ب) صفر خواهد شد و واحد نمی‌تواند در جبران‌سازی توان راکتیو مشارکت کند. اگر توان اکتیو واحد پایین باشد و در جبران‌سازی عدم تعادل مشارکت نکند، جبران‌سازی توان راکتیو به حداکثر مقدار خود افزایش خواهد یافت و n_r در رابطه (۲۱) کاهش می‌یابد. این باعث افزایش شیب افقی معکوس و در نتیجه افزایش مشارکت توان راکتیو خواهد شد. اکنون با توجه به مطالب فوق و رابطه (۲۱)، معادله (۱۵) می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$\frac{Q_i}{Q_j} = \frac{\sqrt{S_{n,i}^2 - P_i^2 - S_{U,i}^2}}{\sqrt{S_{n,j}^2 - P_j^2 - S_{U,j}^2}} \quad (22)$$

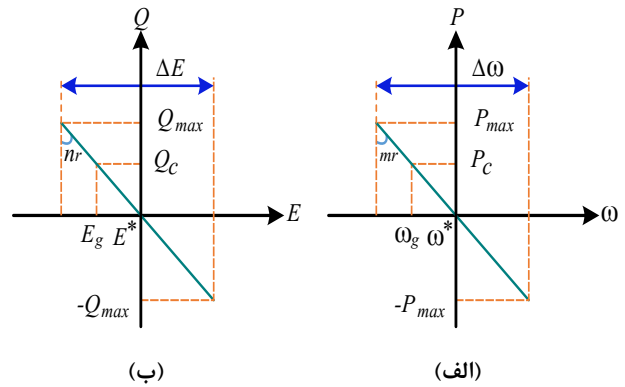
این یک وضعیت مطلوب در تامین توان راکتیو ریزشبهه جزیره‌ای می‌باشد، زیرا واحدی که توان اکتیو و نامتعادل بیشتری تولید کند، مشارکت کمتری در تامین توان راکتیو خواهد داشت و واحدی که کمتر در جبران‌سازی عدم تعادل شرکت کرده و توان اکتیو کمتری نیز تولید کند، سهم بیشتری در تولید توان راکتیو خواهد داشت.

لازم به ذکر است که طبق شکل (۱)، دامنه ولتاژ (E) با مقدار مرجع آن (E^*) مقایسه می‌شود و توان راکتیو مرجع بر اساس کنترل افقی معکوس مطابق با رابطه (۲۱) تولید شده و جریان مرجع برای تزریق توان اکتیو و راکتیو بر اساس معادلات زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\begin{bmatrix} I_{ref,\alpha} \\ I_{ref,\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{01,\alpha} & V_{01,\beta} \\ V_{01,\beta} & -V_{01,\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (23)$$

۳-۴- حلقه ادمیتانس مجازی

نمودار بلوکی ادمیتانس مجازی پیشنهادی در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، ضریب عدم تعادل ولتاژ با مقدار مجاز خود که توسط VUF^* نشان داده شده است، مقایسه می‌شود و سپس به یک بلوک باند مرده اعمال می‌شود تا وقتی که VUF کمتر از VUF^* است، اینورتر در جبران‌سازی عدم تعادل مشارکت نکند. کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی برای تنظیم مقدار



شکل (۸): کنترل افقی معکوس واحدهای کنترل جریان (الف) مشخصه توان اکتیو (ب) مشخصه توان راکتیو [۱۱]

۲-۴- جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ و توان راکتیو

در یک شبکه نامتعادل، مولفه‌های منفی جریان و ولتاژ می‌توانند ظرفیت اینورترها را اشغال کنند. ظرفیت هر اینورتر (S) شامل سه جزء به شرح زیر می‌باشد [۱۶] و [۱۹]:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + S_U^2 = S_1^2 + S_U^2 \quad (16)$$

$$S_U = V_o \sqrt{i_{o\alpha}^{-2} + i_{o\beta}^{-2}} \quad (17)$$

در این روابط S_1 و S_U به ترتیب توان ظاهری مولفه اصلی و نامتعادل را نشان می‌دهند در حالی که $i_{o\beta}^{-2}$ و $i_{o\alpha}^{-2}$ جریان توالی منفی خروجی DG می‌باشد.

در این مقاله، افزایش کیفیت توان توسط واحدهای کنترل جریان نسبت به جبران‌سازی توان راکتیو اولویت بیشتری دارد. به عبارت دیگر، هنگامی که ظرفیت نامی اینورتر به عنوان S_n تعریف می‌شود، ابتدا ظرفیت مازاد اینورتر ($\sqrt{S_n^2 - P^2}$) به جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ اختصاص داده می‌شود، آنگاه پس از محاسبه توان نامتعادل (S_U)، ظرفیت باقی‌مانده ($\sqrt{S_n^2 - P^2 - S_U^2}$) برای جبران‌سازی توان راکتیو در نظر گرفته می‌شود. از این رو، طبق مطالب فوق، حداکثر توان راکتیو تزریقی توسط واحدهای کنترل جریان و ولتاژ می‌تواند در حالت بدون در نظر گرفتن توان نامتعادل و با در نظر گرفتن آن و اولویت جبران‌سازی با عدم تعادل ولتاژ به ترتیب به صورت زیر بیان شود:

$$Q_{max} = \sqrt{S_n^2 - P^2} \quad (18)$$

$$Q_{max} = \sqrt{S_n^2 - P^2 - S_U^2} \quad (19)$$

رابطه (۱۹) نشان می‌دهد که پشتیبانی از توان راکتیو، علاوه بر ظرفیت نامی اینورتر و P ، به S_U نیز وابسته می‌باشد. برای در نظر گرفتن ظرفیت باقی‌مانده اینورترها، ضریب کنترل افقی و افقی معکوس توان راکتیو، که به ترتیب در روابط (۶) و (۱۳) بیان می‌شوند، در اینجا با توجه به رابطه (۲۰) پیشنهاد شده‌اند تا بر اساس ظرفیت موجود برای پشتیبانی از توان راکتیو محاسبه شوند:

جدول (۲): پارامترهای سیستم کنترل ریزشبهه تحت مطالعه

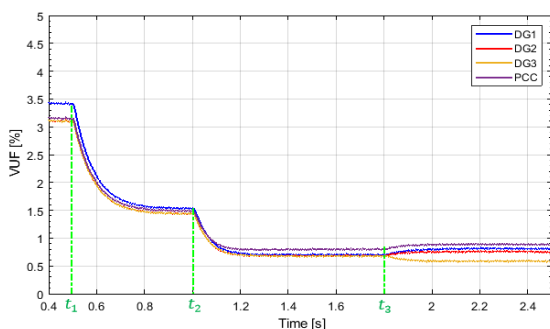
امپدانس و ادمیتانس مجازی			
VUF^*	R_v^+	$L_v^+(mH)$	$L_v^-(mH)$
۰/۰/۷	۱	۱	۱/۸
کنترل افقی توان اکتیو			
m_p	m_l	E_0	ω_0
۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۱	۳۲۵	$۲\pi 50$
کنترل کننده ولتاژ		کنترل کننده جریان	
K_{pV}	K_{rV}	K_{pI}	K_{rI}
۰/۳۵	۲۵	۰/۷	۵۰۰

۶- نتایج شبیه‌سازی

برای ارزیابی نحوه اشتراک توان و مشارکت در جبران‌سازی، دو مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است که حالت اول بدون در نظر گرفتن ظرفیت محدود اینورتر و برای ارزیابی مناسب حلقه‌های جبران‌سازی می‌باشد و حالت دوم با در نظر گرفتن ظرفیت محدود اینورتر و توان نامتعادل و تاثیر آن بر نحوه جبران‌سازی می‌باشد.

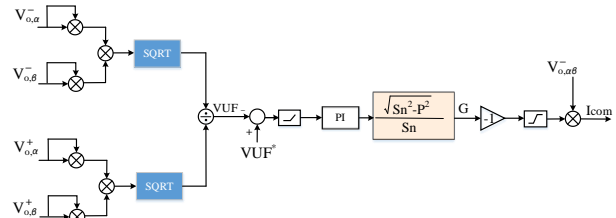
۶-۱- حالت اول: بدون در نظر گرفتن ظرفیت محدود اینورتر و توان نامتعادل

برای ارزیابی ساده‌تر، فرض می‌شود که واحد کنترل ولتاژ ۲۰۰۰ W و واحدهای کنترل جریان ۱۰۰۰ W توان مورد نیاز بار را تولید می‌کنند. در ابتدا امپدانس خطوط یکسان می‌باشد اما در لحظه $t_3 = 1.8s$ امپدانس بین DG_3 و PCC برای ارزیابی بیشتر سیستم کنترل تحت شرایط مختلف به دو برابر مقدار بیان شده در جدول (۲) افزایش می‌یابد. جبران‌سازی عدم تعادل در $t_1 = 0.5s$ و $t_2 = 1s$ به ترتیب پس از فعال‌سازی حلقه امپدانس مجازی و ادمیتانس مجازی آغاز می‌شود. تغییرات VUF واحدها در اثر جبران‌سازی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در اثر فعال‌سازی حلقه‌های جبران‌سازی، مقادیر VUF به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد. در این حالت، واحدهای تولید پراکنده به مانند یک فیلتر فعال از طریق ایجاد یک مسیر امپدانس پایین برای عبور جریان‌های توالی منفی عمل می‌کنند. شکل‌های (۱۲-۱۵) نیز ولتاژهای سه‌فاز PCC و خروجی DGها را قبل و بعد از جبران‌سازی نشان می‌دهند.



شکل (۱۱) تغییرات VUF واحدها و نقطه اتصال مشترک

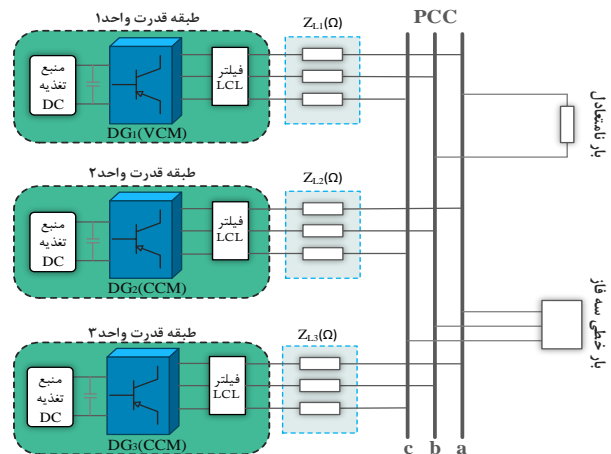
ادمیتانس مجازی جهت حفظ عدم تعادل ولتاژ در مقدار VUF^* استفاده شده است [۲۲]. سهم جبران‌سازی عدم تعادل در واحدهای کنترل جریان با استفاده از بهره $\sqrt{S_n^2 - P^2} / S_n$ بدست می‌آید تا هر واحد مطابق با ظرفیت باقی‌مانده خود در جبران‌سازی شرکت کند. در نهایت، مقدار ادمیتانس مجازی با ولتاژ توالی منفی ($V_{\alpha\beta}^-$) در قاب $\alpha\beta$ ضرب می‌شود تا $I_{ref, \alpha\beta}$ برای اصلاح جریان مرجع تولید شود.



شکل (۹): حلقه ادمیتانس مجازی جهت جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ

۵- ریزشبهه تحت مطالعه

طرح کلی ریزشبهه نمونه مورد مطالعه شامل اینورترهای کنترل‌شده جریان و ولتاژ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در این شکل Z_{L1} ، Z_{L2} و Z_{L3} به ترتیب امپدانس خطوط واحدهای اول، دوم و سوم می‌باشند. ظرفیت نامی DGها به ترتیب برابر $S_{n1} = 3000VA$ ، $S_{n2} = 1500VA$ و $S_{n3} = 1500VA$ است. پارامترهای سیستم‌های قدرت و کنترل در جداول (۱) و (۲) آورده شده‌اند.

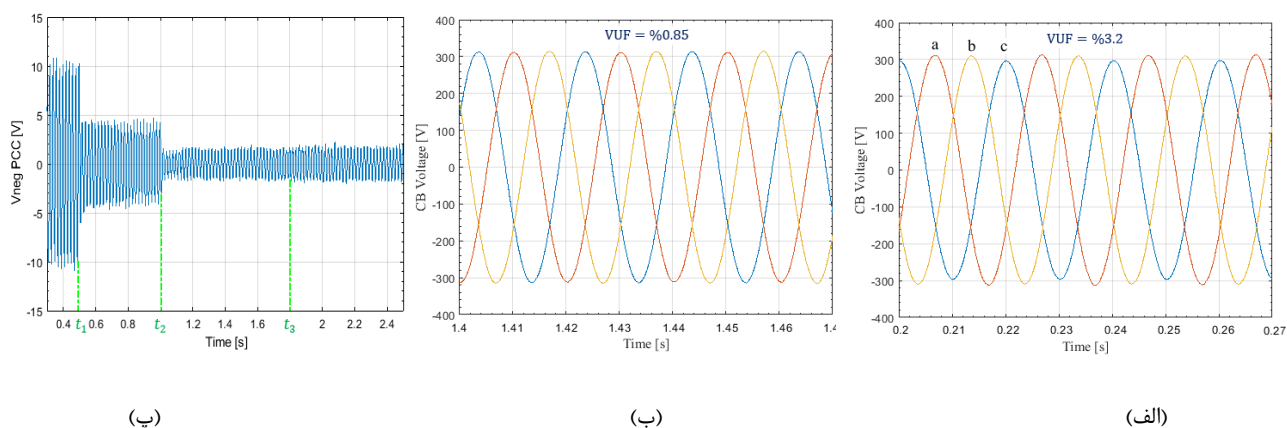


شکل (۱۰): ریزشبهه جزیره‌ای مورد استفاده در شبیه‌سازی کنترل

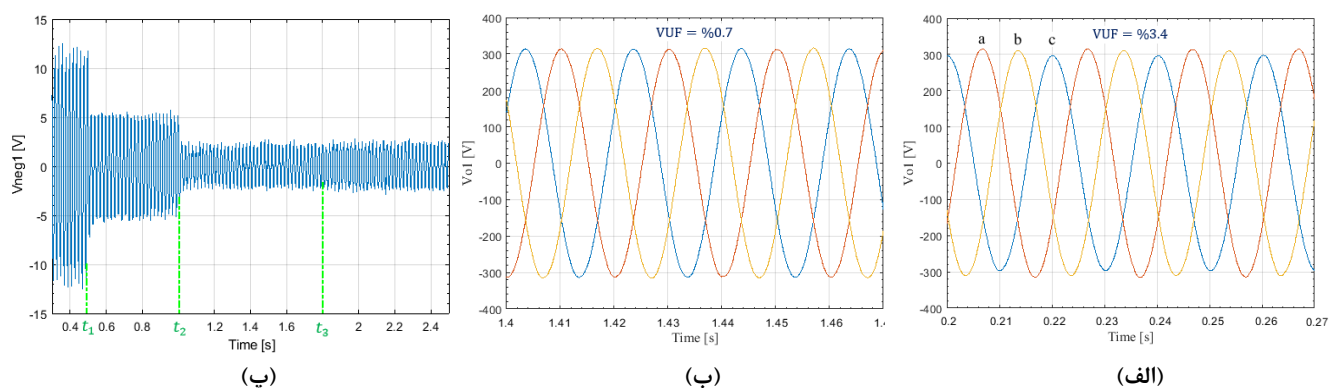
هماهنگی واحدهای کنترل‌شده ولتاژ و جریان

جدول (۱): پارامترهای سیستم قدرت ریزشبهه تحت مطالعه

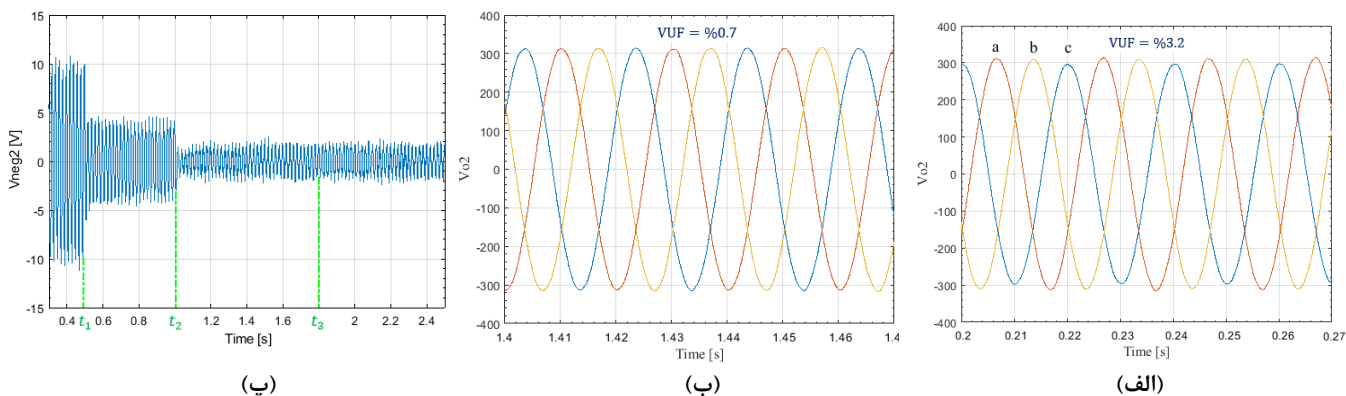
ولتاژ/فرکانس	فیلتر LCL	فرکانس کلیدزنی	ولتاژ dc
۲۳۰ v/۵۰ Hz	۱/۱mH/۲۵mF/۱/۱mH	۱۰ KHz	۶۵۰ V
بار نامتعادل $Z_{UB}(\Omega)$		بار سه‌فاز $Z_L(\Omega)$	
۹۵		۱۰۰+۸۵j	
امپدانس خطوط			
$Z_{L3}(\Omega)$	$Z_{L2}(\Omega)$	$Z_{L1}(\Omega)$	
۰/۱+۰/۵j	۰/۱+۰/۵j	۰/۱+۰/۵j	



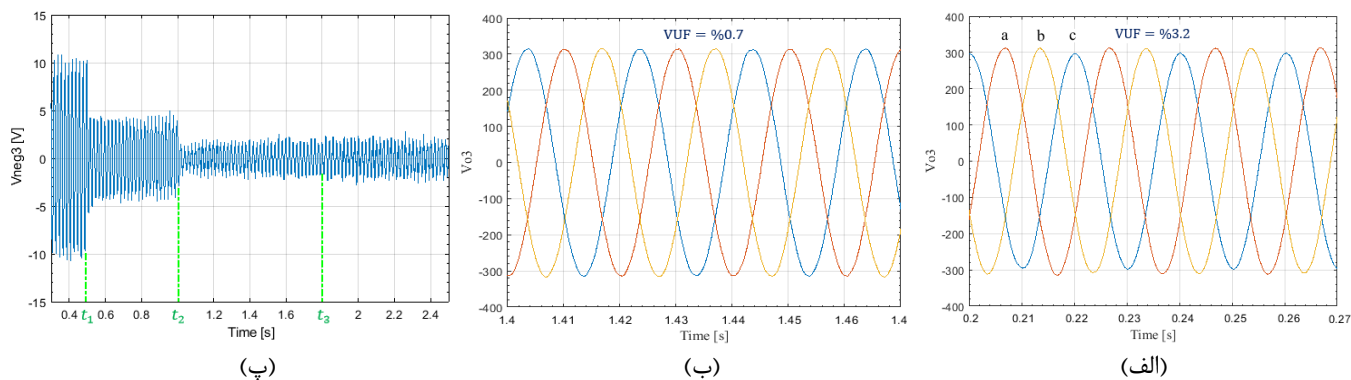
شکل (۱۲): ولتاژ نقطه اتصال مشترک (PCC): (الف) قبل از جبران‌سازی، (ب) بعد از جبران‌سازی، (پ) ولتاژ توالی منفی فاز a



شکل (۱۳): ولتاژ خروجی واحد کنترل ولتاژ (DG_1): (الف) قبل از جبران‌سازی، (ب) بعد از جبران‌سازی، (پ) ولتاژ توالی منفی فاز a



شکل (۱۴): ولتاژ خروجی واحد کنترل جریان (DG_2): (الف) قبل از جبران‌سازی، (ب) بعد از جبران‌سازی، (پ) ولتاژ توالی منفی فاز a

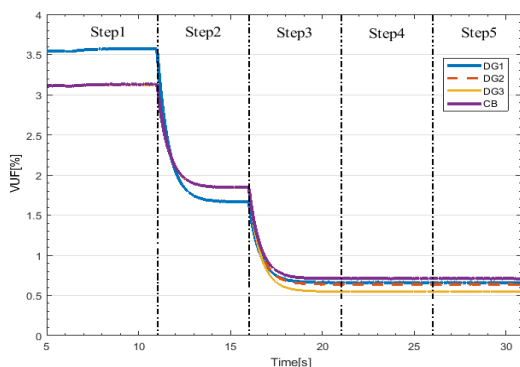


شکل (۱۵): ولتاژ خروجی واحد کنترل شده جریان (DG_3): (الف) قبل از جبران‌سازی، (ب) بعد از جبران‌سازی، (پ) ولتاژ توالی منفی فاز a

۶-۲- حالت دوم: با در نظر گرفتن ظرفیت محدود اینورتر و توان نامتعادل

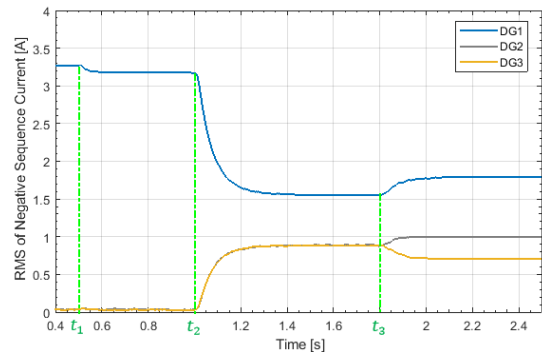
همان‌طور که می‌دانیم وظیفه اصلی اینورتر، تزریق توان به ریزشبهه است و هر گونه جبران‌سازی به عنوان یک مسئولیت اضافی بر عهده آن قرار می‌گیرد. در این میان باید به این نکته توجه شود که بخش قابل توجهی از ظرفیت اینورتر صرف تزریق توان به ریزشبهه می‌شود و هر مورد دیگری باید با توجه به ظرفیت باقی‌مانده انجام گیرد. در بخش (۱-۶) محدودیت در ظرفیت مازاد اینورتر در نظر گرفته نشد. در واقع در آنجا هدف ارزیابی طرح کنترل با ساده‌سازی سیستم بود. در این بخش ظرفیت محدود اینورتر و همچنین توان نامتعادل در معادلات مد نظر قرار گرفته است. در این راستا، توان ظاهری اینورترهای کنترل جریان، ۵ درصد بیشتر از بیشینه توان قابل دریافت از واحدهای تولید پراکنده در نظر گرفته شده است تا ظرفیتی برای جبران‌سازی فراهم شود. حداکثر توان دریافتی از واحدهای CCM برابر با ۱۵۰۰ w می‌باشد. بنابراین، ظرفیت توان ظاهری نامی با احتساب ۵ درصد ظرفیت اضافی برابر با ۱۵۷۵VA می‌باشد. پارامترهای سیستم قدرت و کنترل مانند بخش (۱-۶) در جداول (۱) و (۲) آورده شده‌اند با این تفاوت که امپدانس خط DG_3 دو برابر امپدانس خط واحدهای دیگر انتخاب شده است. ارزیابی سیستم کنترل در پنج گام به صورت زیر انجام می‌شود:

- ✓ گام اول ($6 \leq t < 11$): اتصال واحدهای کنترل جریان
 - ✓ گام دوم ($11 \leq t < 16$): فعال‌سازی حلقه امپدانس مجازی توالی منفی در واحد VCM
 - ✓ گام سوم ($16 \leq t < 21$): فعال‌سازی حلقه ادیمیتانس مجازی پیشنهاد شده در واحدهای CCM
 - ✓ گام چهارم ($21 \leq t < 26$): فعال‌سازی کنترل اکتیو معکوس برای واحدهای CCM با در نظر گرفتن توان نامتعادل مطابق (۲۰)
 - ✓ گام پنجم ($26 \leq t < 31$): تغییر مرجع توان اکتیو DG_2
- اتصال واحدهای CCM یک ثانیه پس از شروع ثبت داده‌ها یعنی در ثانیه ۶ انجام می‌گردد. در اینجا برای حفظ اختصار تنها تغییرات ضریب عدم تعادل ولتاژ در شکل (۱۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در اثر جبران‌سازی در گام دوم و سوم مقادیر VUF به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابند.

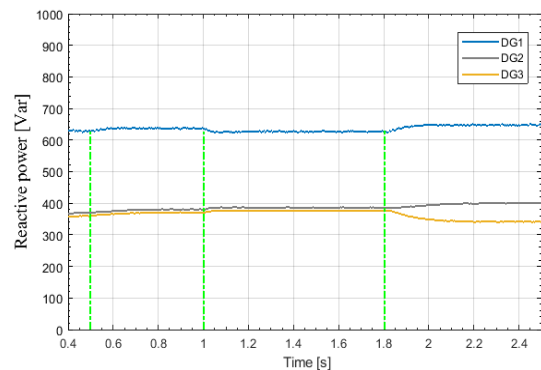


شکل (۱۸) تغییرات ضریب عدم تعادل ولتاژ در مراحل مختلف

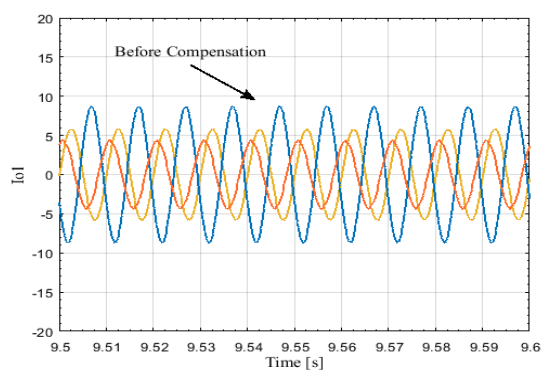
شکل (۱۶) مقدار موثر جریان توالی منفی خروجی واحدهای تولید پراکنده را نشان می‌دهد. پس از فعال شدن حلقه ادیمیتانس مجازی، مولفه توالی منفی جریان DG_2 و DG_3 در t_2 افزایش می‌یابند، زیرا این واحدها جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ را از این لحظه شروع می‌کنند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان توالی منفی به صورت مناسب مطابق با ظرفیت باقی‌مانده میان واحدهای کنترل جریان تقسیم شده است. این مزیت موجب سادگی و افزایش کارایی سیستم کنترل می‌شود، زیرا نیاز به لینک‌های ارتباطی و ایجاد حلقه‌های اضافی جهت بالانس کردن سهم هر واحد برای ایجاد یک اشتراک جبران‌سازی مناسب از بین می‌رود. در لحظه t_3 با افزایش امپدانس خط بین DG_3 و PCC، جریان توالی منفی که DG_3 تامین می‌کند کاهش یافته و DG_1 و DG_2 این مقدار را پوشش می‌دهند. این امر از آنجا ناشی می‌شود که سیستم کنترل نمی‌تواند امپدانس اضافه شده را کاهش دهد. در حقیقت این یک وضعیت خوب برای ریزشبهه می‌باشد، زیرا واحدی که از نقطه PCC دورتر است کمتر در جبران‌سازی شرکت می‌کند کاهش تلفات و بالا رفتن بازدهی کل سیستم می‌شود [۲۱].



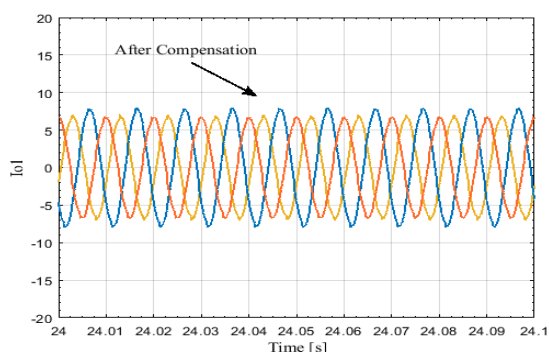
شکل (۱۶) اشتراک جریان توالی منفی واحدهای کنترل ولتاژ و جریان شکل (۱۷) توان راکتیو منابع را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، واحدهای کنترل جریان نیز در تامین توان راکتیو مشارکت داشته و بر طبق رابطه (۱۸) بخشی از توان راکتیو بار را تامین می‌کنند. در لحظه t_3 جریان توالی منفی تزریقی توسط DG_3 کاهش یافته و ولتاژ پایانه آن (E_g) کمی افزایش می‌یابد و در نتیجه انحراف ولتاژ ($E^* - E_g$) در رابطه (۲۱) در پایانه این واحد کاهش می‌یابد که این امر موجب کاهش مشارکت DG_3 در تامین توان راکتیو می‌شود. در واقع به انحراف ولتاژ پایین‌تر واکنش کمتری نشان داده خواهد شد.



شکل (۱۷) توان راکتیو تولیدی واحدهای کنترل ولتاژ و جریان

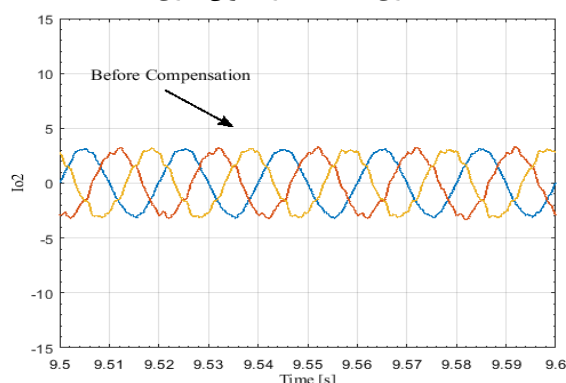


(الف)

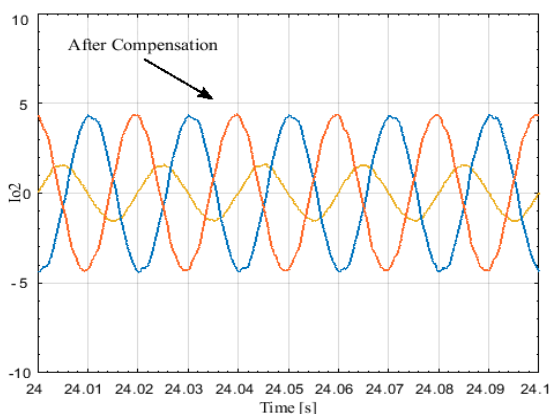


(ب)

شکل (۲۱) جریان خروجی DG_1 (کنترل ولتاژ): (الف) قبل از جبران سازی، (ب) بعد از جبران سازی



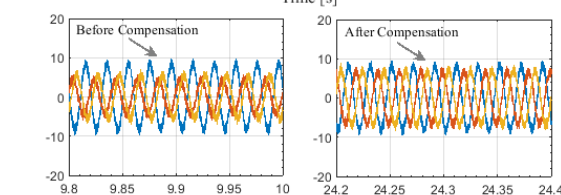
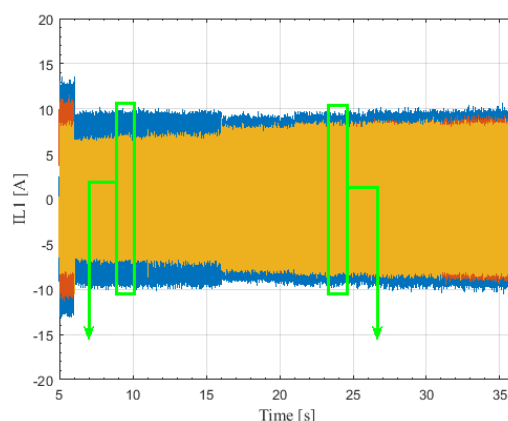
(الف)



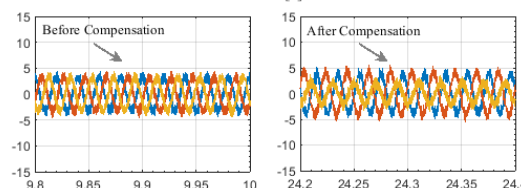
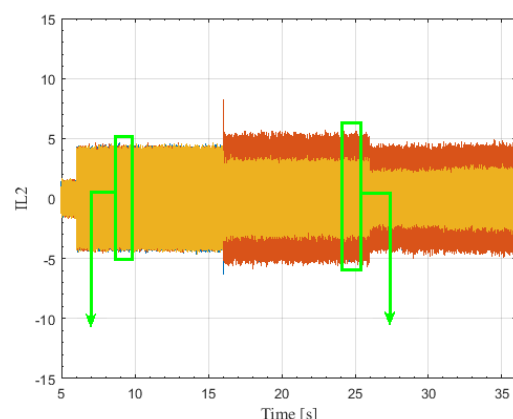
(ب)

شکل (۲۲): جریان خروجی DG_2 (کنترل جریان): (الف) قبل از جبران سازی، (ب) بعد از جبران سازی

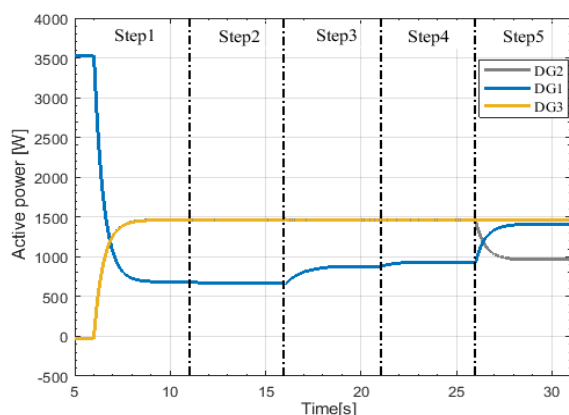
شکل‌های (۱۹) و (۲۰) جریان سلف فیلتر DG ها را نشان می‌دهند. شکل (۱۹) مربوط به واحد کنترل ولتاژ می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود پس از جبران سازی، جریان این واحد متعادل تر می‌شود که این امر به دلیل تقسیم بار کاری بین این واحد و واحدهای کنترل جریان پس از فعال شدن ادمیتانس مجازی می‌باشد. از طرفی با توجه به شکل (۲۰) جریان DG_2 پس از فعال شدن ادمیتانس مجازی به دلیل بر عهده گرفتن بخشی از مسئولیت جبران سازی نامتعادل شده است. همچنین مقداری اغتشاش در جریان دیده می‌شود که به دلیل استفاده از حلقه پیش‌خور برای ولتاژ لینک dc بوجود آمده است که در هنگام عبور از فیلتر حذف می‌شود و در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که رفتار DG_3 مشابه DG_2 می‌باشد.



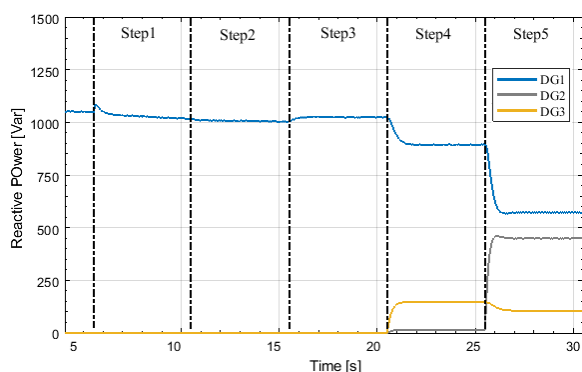
شکل (۱۹) جریان سلف فیلتر LCL واحد DG_2 (کنترل ولتاژ)



شکل (۲۰) جریان سلف فیلتر LCL واحد DG_2 (کنترل جریان)



شکل (۲۳): اشتراک توان اکتیو واحدها در مراحل مختلف

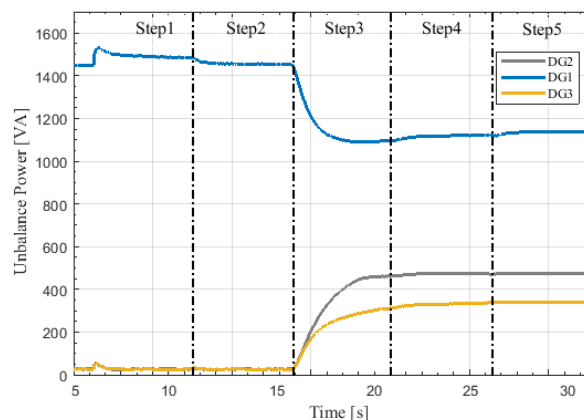


شکل (۲۴): اشتراک توان راکتیو واحدها در مراحل مختلف

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش کنترل هماهنگ بین واحدهای کنترل ولتاژ و جریان در یک ریزشبهه جزیره‌ای پیشنهاد شده است. در واقع، با در نظر گرفتن واحدهای کنترل جریان در ریزشبهه و مشارکت آنها در جبران‌سازی عدم تعادل ولتاژ، سیستم کنترل این واحدها توسعه داده شد. در این راستا، ابتدا نحوه عملکرد واحد کنترل ولتاژ و جریان برای تولید سیگنال‌های مرجع با استفاده از نمودار بلوکی و تحلیل نمودار بد هر واحد مورد بررسی قرار گرفت. سپس، حلقه ادمیتانس مجازی در واحدهای کنترل جریان با توجه به ظرفیت مازاد اینورتر جهت کنترل عدم تعادل ولتاژ با اولویت اول تنظیم شد. همچنین، روش کنترل اکتیو معکوس نیز با در نظر گرفتن توان نامتعادل در تعیین ضرایب اکتیو و ریزشبهه در سیستم کنترل این واحدها لحاظ شد تا به طور هماهنگ با کنترل اکتیو واحد کنترل ولتاژ در تزریق توان راکتیو مشارکت داشته باشند. همچنین نشان داده شده است که با در نظر گرفتن ظرفیت محدود اینورتر و تاثیر آن بر نحوه اولویت‌بندی جبران‌سازی عدم تعادل و توان راکتیو در واحدهای کنترل جریان، مقدار جبران‌سازی محدود بوده و استفاده از ادوات به‌ساز جهت جبران‌سازی بیشتر اجتناب‌ناپذیر است. در نهایت، شبیه‌سازی طرح کنترل برای تایید اثربخش بودن ساختار ارائه شده انجام شد و نتایج حاصل از آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

شکل (۲۳) توان نامتعادل DGها را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، پس از فعال شدن ادمیتانس مجازی در گام سوم، واحدهای CCM در تامین توان نامتعادل مشارکت می‌کنند. نکته قابل توجه این است که کل ظرفیت مازاد DG₂ به جبران‌سازی عدم تعادل یعنی تامین توان نامتعادل ($S_U = \sqrt{1575^2 - 1500^2} = 480 \text{ VA}$) اختصاص یافته است.



شکل (۲۵): نحوه تامین توان نامتعادل توسط واحدهای کنترل ولتاژ و جریان

شکل (۲۴) نحوه تقسیم توان اکتیو توسط واحدهای ریزشبهه را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، واحدهای CCM می‌توانند با وجود عدم تعادل ولتاژ، توان‌های مرجع خود (۱۵۰۰ وات) را به ریزشبهه تزریق کنند. به عبارت دیگر، تزریق جریان توانی منفی و راکتیو توسط این واحدها تاثیری در تزریق توان اکتیو مرجع‌شان به ریزشبهه ایجاد نمی‌کند. علاوه بر این، تغییر گام توان مرجع DG₂ در ثانیه بیست و ششم بر پایداری سیستم تاثیر ندارد. در شکل (۲۵)، توان راکتیو تولید شده توسط DGها و تاثیر تغییرات توان اکتیو بر آن نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود واحدهای CCM می‌توانند پس از فعال کردن کنترل اکتیو معکوس خود در گام چهارم بر اساس اندازه‌گیری ولتاژ خروجی در اشتراک توان راکتیو مشارکت کنند. در ابتدا تمام توان راکتیو بار توسط DG₁ تامین می‌شود که به عنوان واحد VCM کار می‌کند و دامنه ولتاژ را بر اساس روش کنترل اکتیو تنظیم می‌نماید. لازم به ذکر است که در اینجا برای اعمال ضرایب کنترل اکتیو و اکتیو معکوس پیشنهاد شده بر اساس رابطه (۲۰)، مقدار انحراف ولتاژ برابر با ۲۲ ولت فرض شده است.

پس از فعال شدن کنترل اکتیو و اکتیو معکوس و با در نظر گرفتن توان نامتعادل در گام چهارم، DG₂ در تامین توان راکتیو شرکت نمی‌کند، زیرا تمام ظرفیت مازاد آن به جبران‌سازی عدم تعادل و ارائه توان نامتعادل اختصاص داده شده است. این به این معنی است که شیب اکتیو معکوس که در شکل (۸-ب) نشان داده شده است، برای این DG بر اساس رابطه (۲۱) به صفر رسیده است. در گام پنجم، پس از کاهش توان مرجع این واحد، ظرفیت مازاد آن افزایش یافته و این واحد می‌تواند در پشتیبانی از توان راکتیو مشارکت کند.

مراجع

- [13] X. Zaho, L. Meng, C. Xie, J. M. Guerrero, X. Wu, "A Unified Voltage Harmonic Control Strategy for Coordinated Compensation with VCM and CCM Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, no. 8, pp. 7132-7147, Aug. 2018.
- [14] S.Y. Mousazadeh Mousavi, A. Jalilian, M. Savaghebi, J.M. Guerrero, "Coordinated Control of Multifunctional Inverters for Voltage support and Harmonic Compensation in a Grid-connected Microgrid," *Electric Power Systems Research*, Vol. 155, pp. 254–264, Feb. 2018.
- [15] مهدی ثوابی فیروز آبادی، "طراحی و هماهنگی کنترل‌کننده‌های مبدل‌های واسط سیستم‌های تولید پراکنده به منظور بهبود کیفیت توان در ریزشبکه‌ها" رساله دکتری، دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۱.
- [16] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electrical Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, IEEE Std. 1459-2010.
- [17] S.Y. Mousazadeh Mousavi, A. Jalilian, M. Savaghebi, J.M. Guerrero, "Autonomous Control of Current and Voltage Controlled DG Interface Inverters for Reactive Power Sharing and Harmonics Compensation in Islanded Microgrids," *IEEE Trans. Power Electronic*, Vol. 33, no.11, pp. 9375 - 9386, Nov. 2018.
- [18] J. He, Y.W. Li, F. Blaabjerg, "An Enhanced Islanding Microgrid Reactive Power Imbalance Power, and Harmonic Power Sharing Scheme," *IEEE Transactions on Power Elec.*, vol. 30, no. 6, pp. 3389–3401, June 2015.
- [19] L. S. Czarnecki, P. M. Haley, "Unbalanced Power in Four-Wire Systems and Its Reactive Compensation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, no.1, pp.53-63, Feb. 2015.
- [20] S.Y. Mousazadeh Mousavi, A. Jalilian, M. Savaghebi, J. M. Guerrero, "Flexible Compensation of Voltage and Current Unbalance and Harmonics in Microgrids," *Energies*, 10:1568, 2017.
- [21] C. Blanco, D. Reigosa, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero and F. Briz, "Virtual Admittance Loop for Voltage Harmonic Compensation in Microgrids," *IEEE Trans. Ind. App.*, Vol. 52, no. 4, pp. 3348-3356, July-Aug. 2016.
- [22] T. L. Lee, S. H. Hu, Y. H. Chan, "D-STATCOM with Positive-Sequence Admittance and Negative-Sequence Conductance to Mitigate Voltage Fluctuations in High-Level Penetration of Distributed Generation Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 60, no. 4, pp. 1417 - 1428, April 2013.
- [1] M. H. J. Bollen et al., "Power Quality Concerns in Implementing Smart Distribution-Grid Applications," *IEEE Transactions Smart Grid*, Vol. 8, no. 1, pp. 391 - 399, Jan. 2017.
- [2] Y. Han, P. Shen, X. Zhao, and J. M. Guerrero, "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids," *IEEE Trans. on Power Elec.*, Vol. 32, no. 3, pp. 2427-2451, March 2017.
- [3] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian and H. A. Talebi, " Decentralized Sliding Mode Control of WG/PV/FC Microgrids Under Unbalanced and Nonlinear Load Conditions for On- and Off-Grid Modes," *IEEE System Journal*. vol. 12, no. 4, Dec. 2018.
- [4] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, "Autonomous Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, Vol. 60, no. 4, pp. 1390 - 1402. April 2013.
- [5] J. Saroha, M. Singh, D. K. Jain, "ANFIS Based Add-on Controller for Unbalance Voltage Compensation in Low Voltage Microgrid" *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, no. 12, pp. 5338-5345, Dec. 2018.
- [6] افراسیابی، مرتضی، رک‌رک، اسماعیل، "یک کنترل هماهنگ جهت بهبود کیفیت ولتاژ توسط اینورتر واسط منابع تولید پراکنده"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال شانزدهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۸.
- [7] M. Savaghebi, Q. Shafiee, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "Adaptive Virtual Impedance Scheme for Selective Compensation of Voltage Unbalance and Harmonics in Microgrids," *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, CO, pp. 1-5, 2015.
- [8] L. Meng, et al., "Tertiary Control of Voltage Unbalance Compensation for Optimal Power Quality in Islanded Microgrids" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 29, no. 4, pp. 802 815, Oct. 2014.
- [9] M. H. Andishgar, et al., "Voltage Quality Enhancement in Islanded Microgrids with Multi-Voltage Quality Requirements at Different Buses", *IET Gen. Trans. & Dist.*, Vol. 12, no. 9, pp. 2173-2180, Apr. 2018.
- [10] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. Vicuña and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, Jan. 2011.
- [11] D. Wu, F. Tang, J.M Guerrero, J.C Vasquez, G. Chen and L. Sun, "Autonomous Active and Reactive Power Distribution Strategy in Islanded Microgrids," 29th Annual IEEE Applied Power Electron. Conf. and Exposition (APEC), pp. 2126-2131, Mar. 2014.
- [12] D. Wu, Fen Tang, J. C. Vasquez and J. M. Guerrero, "Control and Analysis of Droop and Reverse Droop Controllers for Distributed Generations," 11th International Multi-Conf. on Systems, Signals & Devices, pp.1-5, Barcelona, Spain, 2014.