اشتراک گذاری توان راکتیو و اصلاح هارمونیک ولتاژ در ریزشبکه‌های جزیره‌ای تکفاز با کنترل دروپ

مهدی روشندل*[۱]، علیرضا آبیاتی[۲]، رضا شکری[۳]

*۱- مدرس، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران، mahdiroshandel1404@gmail.com
۲- دانشجوی مهندسی کنترل، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران
۳- دانشجوی مهندسی برق، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۷

چکیده: زمانی که چندین اینورتر موازی در حالت عملکرد جزیره‌ای هستند، معمولا برای کنترل اینورترها از ساختار مشخصه کاهشی استفاده می‌شود. مشخصه کاهشی اینورترهای موجود در ریزشبکه را قادر می‌سازد که ولتاژ و فرکانس را به صورت غیر متمرکز کنترل کنند. روش مشخصه کاهشی همچنین اینورترها را قادر می‌سازد که توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بار را در بین خود به اشتراک بگذارند. این مقاله بر روی برخی از محدودیت‌های اینورترهای موازی تکفاز در حالت عملکرد جزیره‌ای با استفاده از مشخصه کاهشی تمرکز می‌کند. الگوریتم‌های کنترلی با هدف دنبال کردن محدودیت‌های اشتراک‌گذاری توان راکتیو و کاهش اغتشاشات هارمونیک ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (PCC) در حالت عملکرد جزیره‌ای پیشنهاد شده است. نتایج تجربی مناسب بودن الگوریتم‌های کنترلی را در رسیدن به اشتراک‌گذاری توان راکتیو و بهبود اغتشاشات هارمونیکی ولتاژ در PCC نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: توان راکتیو، هارمونیک ولتاژ، ریز شبکه، کنترل دروپ

۱- مقدمه

اینورترهای موازی موجود در یک میکروشبکه (MG) با استفاده از الگوریتم کنترل دروپ قادرند که به صورت جزیره‌ای عمل کنند [۱۵-۱]. کنترل دروپ قادر به تنظیم ولتاژ و فرکانس MG از طریق اینورتر-هاست. این کنترل کننده‌ها همچنین قادرند توان اکتیو و راکتیو اینورترها را که مورد نیاز بار است به اشتراک بگذارند، هرچند برخی محدودیت‌ها در این زمینه وجود دارد. مزیت اصلی روش کنترل دروپ این است که، این قابلیت‌ها از طریق اندازه‌گیری بدست می‌آیند. اگر چه روش کنترل دروپ دارای برخی محدودیت‌های عملکردی هستند، اما این روش بطور گسترده یکی از بهترین روش‌های موجود برای کنترل غیر متمرکز میکروشبکه‌هاست [۱۵-۱۰]

تکنیک کنترل دروپ، اینورتر را قادر می‌سازد که توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بار را با استفاده از انحراف ولتاز و فرکانس تامین کند.در لحظه اتصال MG به سیستم اصلی با توجه به انحراف ولتاژ و فرکانس روش کنترل دروپ نمی‌تواند چنین عملکردی داشته باشد. لذا این تکنیک‌ها تنها برای حالت جزیره‌ای قابل استفاده است [۷]. به علاوه دقت اشتراک گذاری توان و همچنین پایداری میکروشبکه می‌تواند تحت تاثیر این انحراف ولتاژ و فرکانس قرار گیرد [۱۶].

اشتراک توان بارهای محلی در بکارگیری سیستم‌های غیر متمرکز حائز اهمیت است. اینورترها باید بطور ایده‌آل توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بار را با توجه به قدرت اینورتر به اشتراک بگذارند. هنگامی که از کنترل دروپ استفاده می‌شود، اشتراک‌گذاری توان از طریق انتخاب ضرایب بهره مناسب صورت می‌گیرد. با این حال عدم تطابق امپدانس خط و امپدانس خروجی اینورتر باعث عملکرد مختلف اینورترهای موازی متصل به میکروشبکه می‌شود. از آنجا که توان راکتیو خروجی هر اینورتر به دامنه ولتاژ بستگی دارد، به جهت دروپ Q-E توان راکتیو اشتراک گذاشته شده توسط اینورترها در تعامل است. از سوی دیگر، تا زمانی که فرکانس میکروشبکه تحت تاثیر قرار نگیرد، قابلیت اشتراک گذاری توان

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019

اکتیو متاثر از این عدم تطابق نیست. فرکانس در MG تحت یک شرایط حالت پایدار که توان مورد تقاضای بار تامین می‌شود، ثابت می‌ماند. و نرخ توان ظاهری اینورترها از ماکزیمم آن تجاوز نمی‌کند. از این رو، توان اکتیو حتی در زمان اختلال با دقت بالا بین اینورترها به اشتراک گذاشته می‌شود. یک حلقه امپدانس مقاومتی مجازی، به جهت بهبود اشتراک توان در [۷]، [۸]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۹-۱۶] پیشنهاد شده است. حلقه امپدانس مجازی، امپدانس خروجی هر اینورتر را به وسیله اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در خروجی آن‌ها تنظیم می‌کند. با این حال برای بهبود اشتراک گذاری توان، حلقه امپدانس مجازی باید برای هر اینورتر تنظیم شود بطوری که امپدانس خروجی همه اینورترها برابر باشد. در عمل این روش با توجه به امپدانس خط و امپدانس فیلتر خروجی اینورترها بسیار دشوار است. از این رو اشتراک گذاری توان بین اینورترها هنوز به دست نیامده، اگرچه می‌توان به یک بهبود در این زمینه رسید. دیگر راه حل‌ها برای رسیدن به این هدف در [۵-۳]، [۲۰]، [۲۱] پیشنهاد شده است. ساختار سلسله مراتب مرکز کنترل میکروشبکه (MGCC) برای بازگرداندن ولتاژ و فرکانس به مقادیر نامی‌شان، در هنگام سنکرون سازی MG با سیستم اصلی در [۲] و [۷] پیشنهاد شده است. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی پایداری ولتاژ و فرکانس می‌تواند بدست آید. اما اشتراک گذاری توان میسر نیست چون هنوز در امپدانس خروجی اینورترها عدم تطابق وجود دارد.

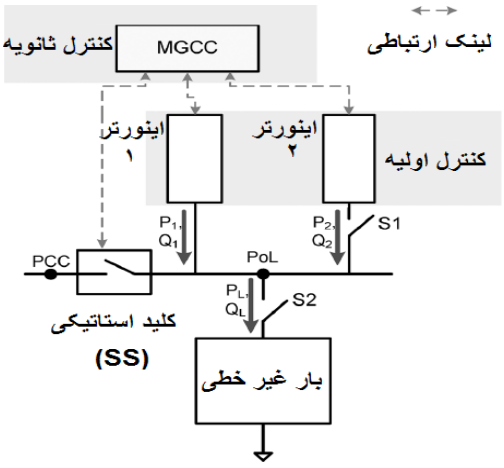
اینورترهای موازی با فیلتر خروجیLCL یک اینرسی کوچک و به طور موثر یک شبکه ضعیف تشکیل می‌دهند. هر جریان هارمونیکی که در این شبکه پخش می‌شود، باعث اعوجاج ولتاژ در نقطه اتصال مشترک (PCC) می‌شود. این ولتاژ هارمونیکی ممکن است پایداری MG را با توجه به رزونانس موجود به چالش بکشد [۲۲]. علاوه بر این با توجه به استانداردهای موجود، اعوجاج هارمونیک ولتاژ (THD) میکروشبکه باید کمتر از ۲/۵ درصد باشد [۲۳]. لذا میرایی هارمونیک باید به گونه‌ای باشد که میکروشبکه مطابق با این استانداردها عمل کند. تکنیک‌های مرسوم شامل نصب و راه‌اندازی فیلترهای فعال و غیر فعال برای متعادل کردن هارمونیک هستند. این روش‌ها ممکن است باعث ایجاد رزونانس و مشکلات پایداری شبکه شود. از این رو استراتژی کنترل اینورتر می‌تواند برای بهبود کیفیت توان مورد استفاده قرار گیرد [۲۲]. در [۲۴] نویسندگان پیشنهاد می‌کنند، که در نقطه PCC یک ولتاژ سینوسی با عملکرد غیر سینوسی اینورتر و کنترل مدولاسیون پهنای پالس تولید شود. الگوریتم‌های پیشنهادی هارمونیک ولتاژ را در PCC اصلاح می‌کند. یک روش با استفاده از دروپ G-Q با توجه به [۹]، [۲۲] و [۲۵] به جهت کاهش هارمونیک در یک سیستم سه فاز پیشنهاد شده است. دروپ G-Q باعث میرا شدن رزونانس هارمونیکی و کاهش اعوجاج فیلتر هارمونیکی بین اینورترها می‌شود. نویسندگان [۲۲] از بهره دروپ برای اصلاح تمامی هارمونیک‌های عرضه شده توسط اینورترها استفاده کرده‌اند در حالی که نویسندگان [۹] و [۲۵] به جبران برخی از هارمونیک‌های انتخابی پرداخته‌اند.

در این فصل بر روی برخی از محدودیت‌های الگوریتم کنترل دروپ در حالت جزیره‌ای تمرکز می‌شود. الگوریتم پیشنهادی به منظور اشتراک توان و کاهش THD ولتاژ در نقطه PCC در حالت عملکرد جزیره‌ای می‌باشد، و به شرح زیر است:

در بخش سوم، به شرح ساختار کنترل کننده اولیه، شامل حلقه امپدانس مجازی خازنی برای مشکل هارمونیک ولتاژ در PCC پرداخته شده است. بخش چهارم شامل اشتراک گذاری توان راکتیو، پایداری ولتاژ و فرکانس و شرح اصلاح هارمونیک ولتاژ در PCC، و خلاصه‌ای از نتایج تجربی در بخش پنج ارائه شده است، که مناسب بودن الگوریتم پیشنهادی در بهبود عملکرد جزیره‌ای MG را نشان می‌دهد.

۲- سلسله مراتب معماری میکروشبکه

بطور کلی، میکروشبکه دارای یک سری سیستم کنترلی که شامل لایه اولیه، ثانویه و ثالثیه است [۲]، [۷] و [۱۳]. سلسله مراتب معماری میکروشبکه در حالت عملکرد جزیره‌ای با در نظر گرفتن مدار تک‌فاز آن در شکل (۱) نشان داده شده است. که شامل دو اینورتر موازی با فیلتر-های LCL خروجی است. یک بار غیرخطی شامل یکسوکننده تک‌فاز با خازن صافی از طریق کلید S_2 به میکروشبکه متصل شده است. برای حالت عملکرد جزیره‌ای کلید استاتیک SS باز شده و اینورتر مستقلا برای تنظیم ولتاژ و فرکانس MG وارد عمل می‌شود. کلید S_1 در خروجی اینورتر۲ اجازه می‌دهد، که اینورتر خود را از طریق یک حلقه PLL هماهنگ سازد. تا ولتاژ مربوطه در PCC قبل از اتصال به میکروشبکه کمترین حالت گذرا را داشته باشد. لایه اولیه شامل یک الگوریتم کنترلی در ارتباط با اتصال اینورترها به MG است. این حلقه کنترلی قادر است فرکانس و ولتاژ MG و اشتراک گذاری توان اکتیو را در حالت عملکرد جزیره‌ای تنظیم کند.



شکل (۱): بلوک دیاگرام سلسله مراتب معماری میکروشبکه، شامل دو اینورتر موازی و یک بار غیرخطی که بار از طریق کلید S_2 به میکروشبکه اتصال می‌یابد.

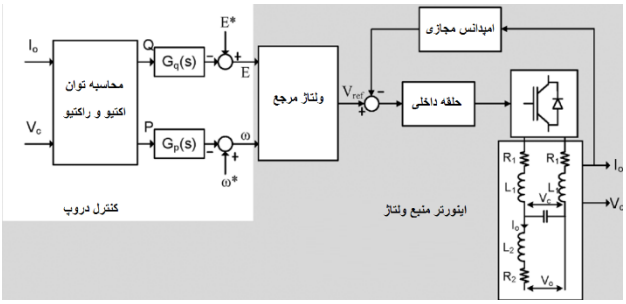
لایه کنترلی دوم، شامل مدیریت و بهینه سازی الگوریتم کنترلی برای عملکرد مطلوب میکروشبکه است. این الگوریتم کنترلی در

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

MGCC اجرا شده، که کلید استاتیک SS و اینورترها در میکروشبکه، انتقال و دریافت اطلاعات را از طریق یک لینک ارتباطی دو طرفه با پهنای باند کم انجام می‌دهند. ترافیک در این لینک ارتباطی به جهت این‌که اطلاعات تنها برای اینورتر ارسال می‌شود، حداقل است. چنین چیزی عملکرد بهینه MGCC را در صورت بروز خطا در MG یا در سیستم ارتباطی تضمین می‌کند. لایه کنترلی سوم شامل تعامل چند میکروشبکه در سطح MGCC است، که در اینجا در نظر گرفته نمی‌شود.

۳- ساختار کنترلی اینورترهای موازی

بلوک دیاگرام حلقه کنترلی اولیه برای پیاده‌سازی روی اینورترها در حالت عملکرد جزیره‌ای در شکل (۲)، نشان داده شده است. کنترل توان اکتیو و راکتیو اینورترها با اندازه‌گیری جریان و ولتاژ محلی صورت می‌گیرد. ولتاژ مرجع، ورودی حلقه کنترل داخلی است. سپس ولتاژ توسط الگوریتم کنترلی تعیین می‌شود.



شکل (۲): بلوک دیاگرام حلقه کنترلی اولیه و تپولوزی سخت افزار اینورتر.

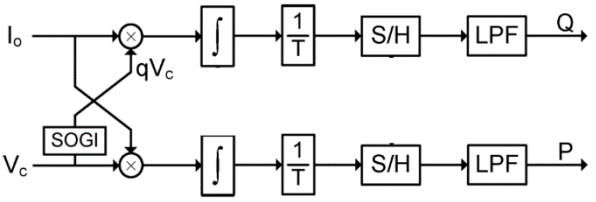
۳-۱- حلقه کنترل خارجی

در حالت عملکرد جزیره‌ای اینورتر به عنوان منبع ولتاژ عمل می‌کند (VSI)، تا ولتاژ و فرکانس میکروشبکه تنظیم شود. توان اکتیو عرضه شده به بار در برابر فرکانس (دروپ P-W) و توان راکتیو عرضه شده در برابر ولتاژ (دروپ Q-E) می‌باشد. ورودی کنترل کننده توان اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده که محصول V_C، I_o و qV_C و بطور موثر نتیجه یک چرخه مطابق شکل۳. است. توابع کنترل دروپ می‌توانند توسط روابط زیر بیان شوند:

$$\omega = \omega^* - G_P(s)\,(P-P^*) \qquad (۱)$$

$$E = E^* - G_q(s)\,(Q-Q^*) \qquad (۲)$$

که در اینجا، P توان اکتیو خروجی اینورتر، Q توان راکتیو خروجی، $G_P = Sm_d + m$ و $G_q = Sn_d + n$ دروپ توان اکتیو و راکتیو کنترل کننده، m و n بهره دروپ P-W و Q-E، m_d و n_d بهره مشتق P-W و Q-E می‌باشند. در این اینجا از کنترل کننده PD برای کنترل دروپ استفاده شده است، چون ترم انتگرالی موجب بی‌ثباتی MG می‌شود. توان اکتیو و راکتیو مرجع اینورتر با P^* و Q^* نشان داده می‌شوند، و در مدت عملکرد جزیره‌ای MG صفر هستند. دلیل آن این است که توان اکتیو و راکتیو خروجی اینورتر، همان توان مورد نیاز بار است.



شکل (۳): محاسبه توان اکتیو و راکتیو که در اینجا i_o جریان خروجی و V_c ولتاژ دو سر خازن می‌باشد. دوره T وابسته به دروپ فرکانس ω و LPF یک فیلتر پایین گذر می‌باشد.

بهره‌های P-W و Q-E کنترل کننده به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند تا حداقل انحراف را با مقادیر اسمی E و W داشته باشند. بهره دروپ، برای عملکرد جزیره‌ای میکروشبکه به ترتیب با m_n و n_n نشان داده شده‌اند (که اندیس n مربوط به یک اینورتر خاص در MG است)، و معمولا به نرخ ماکزیمم توان اینورترها مرتبط می‌شوند. می‌توان نوشت:

$$m_n = \frac{\Delta\omega}{P_{Max}} \qquad (۳)$$

$$n_n = \frac{\Delta E}{Q_{Max}} \qquad (۴)$$

که در اینجا $\Delta\omega$ ماکزیمم انحراف فرکانس مجاز اینورتر، ΔE ماکزیمم انحراف ولتاژ اینورتر و همچنین P_{max} و Q_{max} حداکثر توان اکتیو و راکتیو خروجی اینورتر می‌باشد. چنین چیزی اینورترها را قادر می‌سازد که بر اساس ظرفیت نامی خود، سهمی از اشتراک توان را بر مبنای نیاز بار در زمانی که MG به حالت پایدار خود می‌رسد به اشتراک بگذارند. حالت اشتراک توان بین اینورترها بر حسب pu را می‌توان به وسیله $n_1Q_1 = n_2Q_2 = n_nQ_n$ و $m_1p_1 = m_2p_2 = m_np_n$ تعریف کرد.

۳-۲- حلقه کنترل داخلی

در صورتی که ولتاژ MG سنکرون با ولتاژ مرجع باشد، این ولتاژ از خروجی کنترل کننده تولید می‌شود. حلقه کنترل داخلی که برای مدل تک‌فاز اینورترها در نظر گرفته شده، شامل یک حلقه ولتاژ و یک حلقه جریان است. هر دو حلقه کنترل بر اساس فرم مرجع و با استفاده از کنترل کننده نسبی-رزونانسی (PR) ساخته شده‌اند [۲۶]، [۲۷]. تابع انتقال غیر ایده‌ال کنترل کننده PR که از [۲۶] گرفته شده به شرح زیر است:

$$G(s) = K_P + \frac{K_i s}{s^2 + \omega_c + \omega^2} \qquad (۵)$$

که در اینجا، K_P بهره ترم نسبی، K_i بهره ترم رزونانسی، ω_C ترم کنترلی پهنای باند رزونانسی و ω فرکانس رزونانسی می‌باشد. در اینجا تابع تبدیل غیر ایده‌ال ترجیح داده شده، چون یک بهره محدود برای کنترل کننده فراهم می‌کند. و پهنای باند فرکانس رزونانسی می‌تواند کنترل شود. تابع تبدیل ایده‌ال شامل یک بهره بینهایت بوده، و در اینجا می‌تواند باعث مشکلات پایداری شود. تابع تبدیل برای ولتاژ و جریان به شکل زیر است:

$$G_V(s) = K_{PV} + \sum_{h=1,3,5,7,9} \frac{K_{iVh} s}{s^2 + \omega_{cIh} s + \omega_h^2} \qquad (۶)$$

$$G_I(s) = K_{PI} + \sum_{h=1,3,5,7,9} \frac{K_{iIh} s}{s^2 + \omega_{cIh} s + \omega_h^2} \qquad (۷)$$

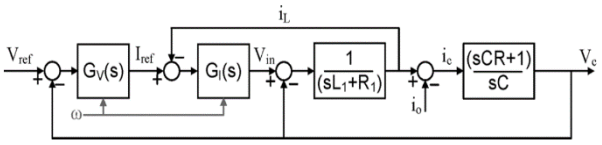
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

در اینجا، K_{pI} و K_{pV} بهره ترم نسبی، K_{ivh} و K_{ilh} بهره ترم رزونانس هارمونیکی، ω_{cvh} و ω_{cih} ترم کنترلی پهنای باند رزونانس هارمونیکی و ω_h فرکانس رزونانسی در هارمونیکی که $\omega_h = h\omega$ می‌باشد. و در اینجا به فرکانس دروپ بستگی دارد. تابع تبدیل PR برای کنترل کننده‌های جریان و ولتاژ از (۵) بدست آمده است. ترم h=1 در (۶) و (۷) نشان دهنده فرکانس اصلی است، که به وسیله الگوریتم کنترل دروپ تعیین می‌شود. علاوه بر این، اصلاح هارمونیک‌های انتخابی توسط ترم‌های رزونانسی اضافی گنجانیده شده تا اصلاح اعوجاج هارمونیک به وسیله حلقه امپدانس خازنی صورت گیرد (از هارمونیک مرتبه سوم تا نهم) که شامل یک کنترل حلقه بسته برای بهبود هارمونیک‌های انتخابی است. به منظور آنالیز پاسخ سیستم حلقه بسته و تعیین بهره کنترل کننده، یک بلوک دیاگرام مربوط به حلقه کنترلی داخلی همان طور که در شکل (۴). نشان داده شده بدست آمده است. یک مقاومت میرا کننده R برای فیلتر خروجیLCL قرار داده شده است. از شکل ۴. تابع تبدیل حلقه بسته به شرح زیر است:

$$V_c = \frac{G_I G_V Z_C}{Z_C + Z_L + G_I + G_I G_V Z_C} V_{ref} - \frac{Z_C(Z_L + G_I)}{Z_C + Z_L + G_I + G_I G_V Z_C} i_o \quad (۸)$$

که در اینجا $Z_L = R_1 + L_1 S$ و $Z_C = (1 + CRS)/CS$. توجه داشته باشید که، (S) نشان دهنده توابع در حوزه فرکانس است. بنابراین CLFT حلقه داخلی را می‌توان به سادگی توسط مدار معادل تونن مشخص کرد:

$$V_C(s) = G(s)\, V_{ref}(s) - Z_o(s)\, i_o(s) \quad (۹)$$



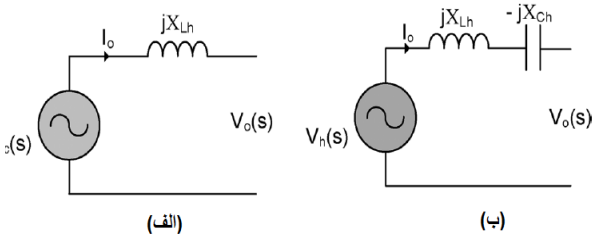
شکل (۴): بلوک دیاگرام حلقه کنترل داخلی. L_1 اندوکتانس سمت اینورتر، C فیلتر خازنی، R_1 مقاومت سمت اینورتر، R مقاومت میرایی، i_L جریانی که از طریق L_1 عبور می‌کند و i_o جریانی است که از طریق L_2 عبور می‌کند.

که در اینجا G(s) تابع تبدیل بهره ولتاژ و $Z_o(s)$ تابع تبدیل امپدانس خروجی را نشان می‌دهد.

۳-۳- حلقه امپدانس مجازی خازنی

بجای معرفی فیلتر اکتیو یا غیر اکتیو برای کاهش هارمونیک‌های اضافی در PCC یک حلقه امپدانس مجازی برای تعدیل هارمونیک ولتاژ با توجه به [۲۸] توسط نویسندگان پیشنهاد شده است. اصل اساسی در بکارگیری حلقه امپدانس خازنی مجازی، برای اصلاح افت ولتاژ القایی غیرخطی است. که با معرفی یک مولفه خازنی در اندازه‌های یکسان اما دارای یک تغییر فاز مخالف است.

مدار معادل تونن اینورتر همراه با فیلتر LCL خروجی در شکل (5a)، نشان داده شده است. امپدانس مجازی خازنی X_{ch} امپدانس سلفی X_{lh} همان طور که در شکل (5b). نشان داده شده است، حذف می‌کند.

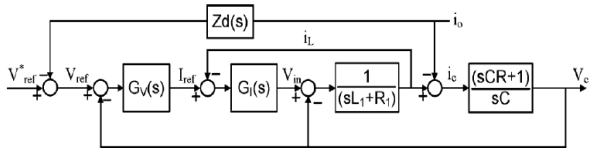


شکل (۵): مفهوم امپدانس مجازی خازنی. (الف) مدار معادل ساده شده تونن اینورتر همراه با فیلتر LCL خروجی. (ب) امپدانس مجازی X_{Ch} پیشنهادی که امپدانس سلفی X_{Lh} را جبران می‌کند.

شکل (۶)، نشان می‌دهد، حلقه امپدانس مجازی با حلقه کنترل داخلی اینورتر در تعامل است. ولتاژ خازنی فیلتر خروجی را می‌توان طبق رابطه زیر تعیین کرد:

$$V_{ref}(s) = V_{ref}^{*}(s) - i_o(s) Z_d(s) \quad (۱۰)$$

که در اینجا، $Vref^*$ ولتاژ مرجعی است که توسط حلقه کنترل خارجی مشخص می‌شود. $Vref$ ولتاژ اصلاح شده حلقه کنترل داخلی و $Z_d(s)$ امپدانس مجازی تابع تبدیل می‌باشد. $Vref$ در (۹) شامل یک افت ولتاژ خازنی به جهت وجود امپدانس مجازی است.



شکل (۶): بلوک دیاگرام حلقه داخلی همراه با امپدانس مجازی $Z_d(s)$ اضافه شده.

جهت وجود امپدانس مجازی است. تابع تبدیل امپدانس مجازی ($Z_d(s)$) شامل یک سری فیلتر باند-گذر به جهت تنظیم هر فرکانس هارمونیکی، که نیاز به میرایی دارد استفاده شده است (سوم، پنجم، هفتم و نهم). با استفاده از بلوک امپدانس خازنی آبشاری، Z_d را می‌توان طبق رابطه زیر تعریف کرد:

$$Z_d(s) = \sum_{h=3,5,7,9} \frac{\omega_{ch} k_{ch}}{s^2 + \omega_{ch} s + \omega_h^2} \quad (۱۱)$$

که در اینجا، K_{ih} بهره رزونانس هارمونیکی، ω_{ch} پهنای باند رزونانس هارمونیکی، ω_h فرکانس هارمونیک nام و K_{ch} بهره هارمونیک nام می‌باشد. با فرض این‌که پهنای باند ω_{ch} در فرکانس هارمونیکی nام مشخص شود، بطوری که تعامل با هارمونیک مجاور قابل اغماض باشد. سپس اندازه و فاز $Z_d(s)$ در هر فرکانس هارمونیکی را می‌توان با در نظر گرفتن هر هارمونیک بطور جداگانه برای تعیین بهره کنترل کننده بدست آورد و در رابطه (۱۱) جایگزین کرد. $Z_d(s)$ در هارمونیک nام را می‌توان به شرح زیر نوشت:

$$Z_d(s) = \frac{\omega_{ch} k_{ch}}{s^2 + \omega_{ch} s + \omega_h^2} \quad (۱۲)$$

که بهره K_{ch} را می‌توان از اندازه رابطه (۱۲) در $\omega = \omega_{ch}$ بدست آورد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

$$|Z_d(\omega)|_{\omega=\omega_h} = \frac{k_{ch}}{\omega_h} \quad (۱۳)$$

در اینجا، $|Z_d(\omega)|_{\omega=\omega_h}$ برابر اندازه امپدانس قسمت سلفی شبکه در فرکانس هارمونیکی nام می‌باشد. از (۱۲) زاویه فاز فرکانس هارمونیکی nام -90° است. مقاومت امپدانس مجازی R_V که بطور معمول برای بهبود ثبات MG و اشتراک توان بین منابع میکروشبکه می‌باشد [۷]، [۸]، [۱۳]، [۱۷]، Z_d با اضافه کردن R_V به صورت:

$$Z_d(s) = R_V - \sum_{h=3,5,7,9} \frac{\omega_{ch} k_{ch}}{s^2 + \omega_{ch} s + \omega_h^2} \quad (۱۴)$$

که R_V در تمام فرکانس‌ها عمل کرده و در نتیجه، اندازه و فاز فیلتر تعیین شده در (۱۱) تحت تاثیر قرار می‌گیرد. با فرض این‌که پهنای باند ω_{ch} در فرکانس هارمونیکی nام با صرف نظر از تعامل هارمونیک‌های مجاور تعیین شود، اندازه و فاز $Z_d(s)$ با در نظر گرفتن اثر هر هارمونیک به طور جداگانه برای مشخص شدن بهره کنترل کننده طبق (۱۴) تعیین می‌شود. Z_d به شرح زیر می‌باشد:

$$Z_d(s) = R_V - \frac{\omega_{ch} k_{ch}}{s^2 + \omega_{ch} s + \omega_h^2} \quad (۱۵)$$

سپس، بهره K_{ch} را می‌توان از اندازه رابطه (۱۵) در $\omega = \omega_{ch}$ بدست آورد.

$$|Z_d(\omega)|_{\omega=\omega_h} = \frac{\sqrt{(\omega_h R_V)^2 + K_{ch}^2}}{\omega_h} \quad (۱۶)$$

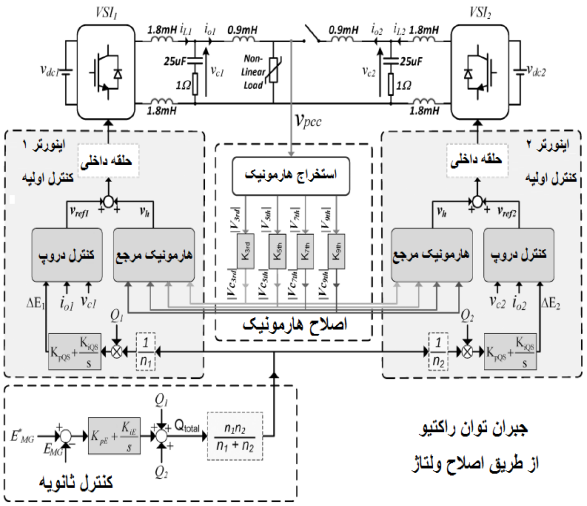
از (۱۵) زاویه فاز فرکانس هارمونیکی nام چنین بدست می‌آید:

$$\angle Z_d(\omega)_{\omega=\omega_h} = tan^{-1}\left(\frac{-R_V \omega_H}{K_{Ch}}\right) - 90 \quad (۱۷)$$

از این رو، امپدانس مجازی مقاومتی، اثرات امپدانس خازنی مجازی را در اصلاح فرکانس‌های هارمونیکی کاهش می‌دهد. زیرا اندازه و فاز مورد نظر را نمی‌توان از (۱۴) بدست آورد.

۴- ساختار کنترلی ثانویه

انحراف ولتاژ و فرکانس از مقادیر اسمی‌شان با توجه به الگوریتم دروپ، با فاکتورهای مختلفی از جمله امپدانس بار، تعداد اینورترهای متصل شده به MG و بهره دروپ استفاده شده بستگی دارد.



شکل (۷): دیاگرام کلی میکروشبکه پیشنهادی.

با توجه به عملکرد غیر متمرکز اینورترها، تنها می‌توان شکل موج محلی جریان و ولتاژ را اندازه‌گیری کرد. اگر هر اینورتر برای تنظیم ولتاژ و فرکانس خود به جهت بازگرداندن MG به حالت اولیه، به طور مستقل و بدون فیدبکی از سایر اینورترها وارد عمل شود، پایداری میکروشبکه به خطر می‌افتد. بلوک دیاگرام کامل میکروشبکه پیشنهادی همراه با حلقه کنترل ثانویه در شکل (۷)، نشان داده شده است.

۴-۱- حلقه اصلاح توان راکتیو

دیاگرام اشتراک گذاری توان راکتیو قابل اجرا در MGCC در شکل ۷. نشان داده شده است. مقدار توان راکتیو اینورترها که به MG تزریق می‌شود، با Q_1 و Q_2 مشخص می‌شود. MGCC مجموع توان راکتیو تامین شده به وسیله اینورترها را مشخص می‌کند. که این کار با در نظر گرفتن بهره دروپ Q-E اینورترها صورت می‌گیرد. از این رو مقدار توان راکتیو مورد تقاضا از هر اینورتر طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q_x^* = \frac{Q_{total}}{n_x \sum_{i=1}^{k} \frac{1}{n_i}} \quad (۱۸)$$

این مقدار توان راکتیو، به وسیله بهره دروپ اینورترها مشخص می‌شود. در رابطه بالا، Q_{total} توان راکتیو تامین شده توسط همه‌ی اینورترهای متصل به MG، Q_x^* توان راکتیو مورد تقاضا برای اینورتر xام، n_x بهره دروپ اینورتر xام و $\sum_{i=1}^{k} \frac{1}{ni}$ مجموع بهره ضرایب اینورترهای اتصال یافته به MG است. (۱۸) یک معادله عمومی برای تعیین تقاضای توان راکتیو اینورترهای متصل به MG و برای هر ترکیبی از بهره دروپ اعمال می‌شود، که آیا اینورترها دارای بهره دروپ یکسان‌اند یا نه[۲۹]، [۳۰]. پس برای زمانی که اینورترها برای اولین بار به MG اتصال میابند، هر اینورتر بهره دروپ خود را به MGCC می‌فرستد تا قادر باشد توان راکتیو مورد تقاضا را به صورت دقیق تخمین بزند. توان راکتیو اینورترها سپس توسط یک کنترل کننده PI، برای هر یک از اینورترها تنظیم می‌شود. تا هرتغییر اضافی در دامنه ولتاژ اینورترها که به ترتیب ΔE_1 و ΔE_2 است در نظر گرفته شود. چون پخش توان راکتیو به دامنه ولتاژ بستگی دارد. انحراف ولتاژ اضافی باعث می‌شود که توان راکتیو خروجی بین اینورترها به اشتراک گذاشته شود. تقسیم توان راکتیو برای هر اینورتر از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta E_x = k_{PQS}(Q_x^* - Q_x) + k_{iQS} \int (Q_x^* - Q_x)\, dt \quad (۱۹)$$

که در اینجا K_{PQS} و K_{iQS} بهره تقسیم توان کنترل کننده PI، و ΔE_x انحراف ولتاژ اضافی که باید به کنترل دروپ اضافه شود. E_x باید توسط اینورتر محدود شود تا از حداکثر دامنه مجاز عبور نکند. نتایج شبیه سازی برای اشتراک گذاری توان در [۲۹]، [۳۰] آمده است.

۴-۲- حلقه بازسازی ولتاژ

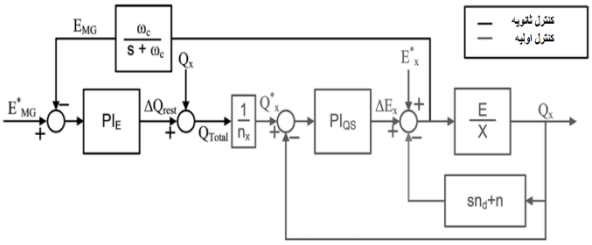
بازسازی ولتاژ در MGCC همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده با الگوریتم آبشاری توان راکتیو، اصلاح می‌شود. مانیتورینگ کلید

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

SS میکروشبکه، ولتاژ P_{oL} و فراهم کردن MGCC با اندازه‌گیری مقدار rms ولتاژ از طریق یک لینک ارتباطی با پهنای باند کم صورت می‌گیرد. سپس MGCC ولتاژ MG را از طریق یک کنترل کننده PI، که یک تغییر اضافی را در توان راکتیو مورد تقاضا ΔQ_{rest} ایجاد می‌کند و بر ولتاژ خروجی همه‌ی اینودترها تاثیر گذاشته و در نتیجه ولتاژ کاهش/ افزایش می‌یابد. و می‌توان آن را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\Delta Q_{rest} = k_{PE}(E^*_{MG} - E_{MG}) + k_{iE}\int (E^*_{MG} - E_{MG}) \quad (۲۰)$$

در اینجا، K_{pE} و K_{iE} بهره اصلاح ولتاژ کنترل کننده PI هستند. E^*_{MG}، ولتاژ مورد نظر MG و E_{MG} ولتاژ اندازه گیری شده می‌باشد. بلوک دیاگرام ساده شده برای تنها یک اینورتر، شامل حلقه کنترل آبشاری در شکل (۸) آمده است.



شکل (۸): بلوک دیاگرام حلقه کنترل آبشاری با حلقه اشتراک‌گذاری توان راکتیو، که در اینجا PI_E و PI_{QS} مربوط به کنترل‌کننده PI به جهت اصلاح ولتاژ و اشتراک‌گذاری توان می‌باشند.

۴-۳- حلقه بازسازی فرکانس

الگوریتم اصلاح فرکانس اجرا شده در MGCC در [۷] نشان داده شده است. مانیتورینگ کلید SS میکروشبکه، ولتاژ P_{oL} و فراهم کردن MGCC با اندازه‌گیری مقدار rms ولتاژ از طریق یک لینک ارتباطی با پهنای باند کم صورت می‌گیرد. سپس MGCC فرکانس MG را از طریق یک کنترل کننده PI تنظیم می‌کند. و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\Delta\omega_{rest} = k_{PF}(\omega^*_{MG} - \omega_{MG}) + k_{iF}\int (\omega^*_{MG} - \omega_{MG})\,dt \quad (۲۱)$$

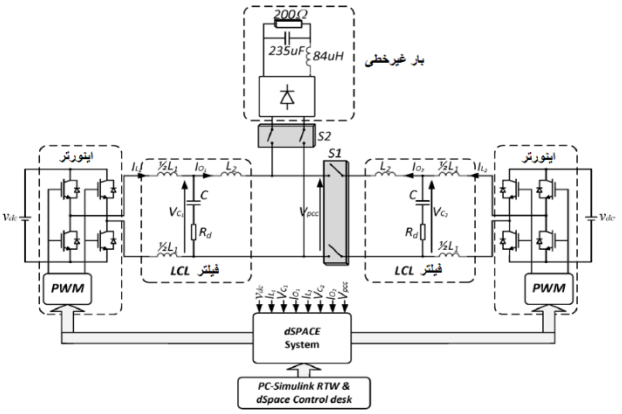
در اینجا، K_{PF} و K_{iF} بهره اصلاح فرکانس کنترل کننده PI، W^*_{MG} فرکانس ولتاژ مورد نظر MG و W_{MG} فرکانس اندازه‌گیری شده می‌باشد.

۴-۴- اصلاح هارمونیک ولتاژ

علاوه بر امپدانس مجازی خازنی استفاده شده در حلقه کنترلی اولیه اینورتر، یک حلقه ثانویه برای اصلاح هارمونیک ولتاژ در نظر گرفته شده تا هارمونیک در PCC بیشتر کاهش یابد. حلقه کنترل ثانویه پیشنهادی در شکل (۷) نشان داده شده است. هارمونیک ولتاژ در PCC با v_{pcc} نشان داده می‌شود. اندازه و پلاریته هارمونیک‌ها $(v_{3rd}, v_{5th}, v_{7th}, v_{9th})$ به وسیلع انتگرال‌های درجه دوم چند تعمیمه (MSOGI) استخراج شده [۳۱]. و به MGCC فرستاده می‌شوند. جایی که یک کنترل کننده P برای هر هارمونیک قرار داده شده تا مقدار اصلاح هارمونیک ولتاژ مشخص شود $(v_{c3rd}, v_{c5th}, v_{c7th}, v_{c9th})$. توجه داشته باشید، چنانچه یک ترم انتگرالی به کنترل کننده P اضافه شود، کنترل کننده ناپایدار می‌شود. سپس خروجی کنترل کننده P برای اینورترهای MG فرستاده می‌شود. جایی که شکل موج هارمونیک ولتاژ، V_h، بر اساس اطلاعات فاز محلی تولید می‌شود. سپس این اطلاعات به ولتاژ مرجع بدست آمده از الگوریتم کنترلی و حلقه امپدانس مجازی خازنی اعمال می‌شود.

۵- نتایج تجربی

تنظیمات سخت‌افزار در شکل (۹) نشان داده شده است. شامل دو اینورتر FC302 Danfoss، ۲/۲ کیلو وات با فیلتر خروجیLCL و یک بار غیرخطی (یکسوکننده تک‌فاز با خازن صافی) پارامترهای نامی برای فیلتر خروجی به شرح زیر می‌باشد: $L_1 = 3.6\,mH$، $R_1 = 0.04\Omega$، $L_2 = 0.9\,mH$، $R_2 = 0.01\Omega$ و R = 1Ω ،C = 25μH. یک dSPACE DS1103PCC برای پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی استفاده شده است. فرکانس نمونه برداری از ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده، و فرکتنس الگوریتم کنترلی و PWM، ۱۲ کیلو هرتز می‌باشد. حلقه داخلی و خارجی کنترل اینورتر، در یک کنترل کننده dSPACE DS1103 اجرا شده است. بهره کنترل کننده PR در طراحی عبارت‌اند از: $K_{PV} = 0.5$ ، $K_{PI} = 2$، $K_{iV} = 0.2\ \omega h$، $K_{iI} = 0.02\omega h$ ، $\omega_{cvh} = 0.001\omega h$ و $\omega_{cIh} = 0.001\omega h$. نمودار بد کنترل کننده داخلی در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

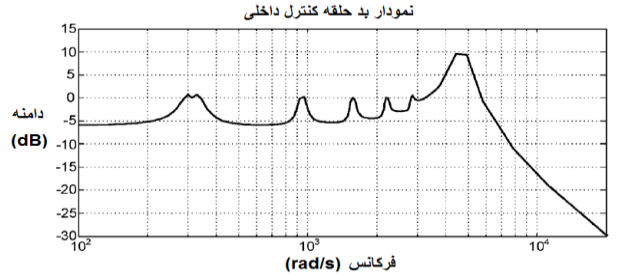


شکل (۹): شماتیک اجرای سخت‌افزار.

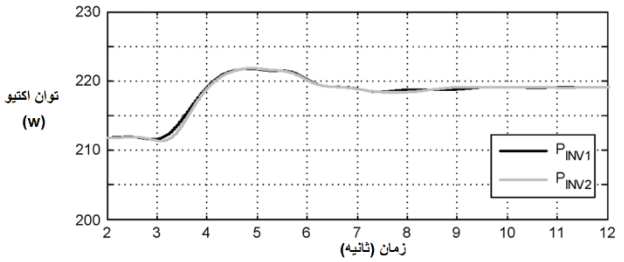
به‌علاوه، حلقه امپدانس مجازی خازنی و حلقه کنترل خارجی برای عملکرد جزیره‌ای به اجرا درآمده است. برای نتایج تجربی ارائه شده در این بخش، بهره دروپ P-W، m = 0.008 و Q-E، n = .01V/VAR برای هر دو اینورتر در نظر گرفته شده است. این بهره‌ها از (۳) و (۴) تعیین شده‌اند. برای آنالیز اثر کنترل کننده ثانویه روی MG، الگوریتم جبران‌ساز، زمانی که میکروشبکه به حالت پایدار خود رسیده روشن

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

شده است. پهنای باند حلقه داخلی برای اشتراک‌گذاری توان به‌گونه‌ای طراحی شـده، که از حلقه خارجی اصلاح ولتاژ سریع‌تر باشد. برای یک اجرای قوی‌تر بهره‌هـای کنترل کننـده بـه صـورت: $K_{PF} = 0.1$، K_{iF} 1.5، $K_{PE} = 80$، $K_{iE} = 100$ ، $K_{PQS} = 0.001$ ، $K_{iQS} =$ 0.016 اسـت. حلقه کنترل ثانویه در ۳/۱ ثانیه فعال شـده، که باعث می‌شـود متوسط توان حقیقی خروجی هر اینورتر از ۲۱۲ به ۲۱۹ وات افزایش یابد همان‌طور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

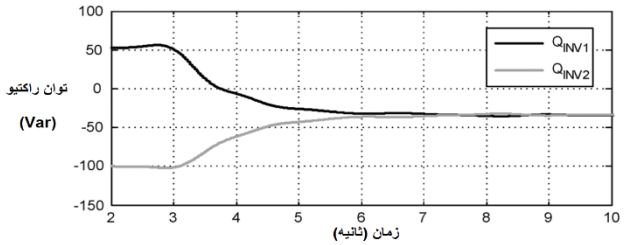


شکل (۱۰): نمودار بد تابع تبدیل $(V_C(s)/V_{ref}(s))$ برای فیلتر با پارامترهای $L_1 = 3.6$ mH، $R_1 = 0.04\Omega$، $L_2 = 0.9$ mH، $R_2 = 0.01\Omega$، $R = 1\Omega$ و $C = 25\mu H$.



شکل(۱۱): توان اکتیو خروجی اینورترها، حلقه کنترل ثانویه در t = 3.1s فعال می‌شود.

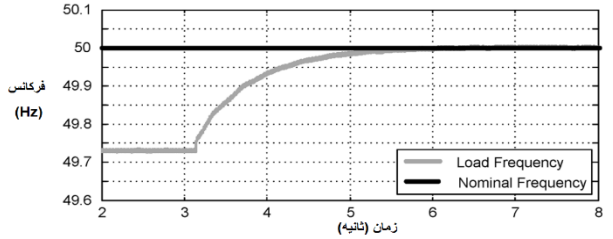
اشترک‌گذاری توان اکتیو بین اینورترها متاثر از بار غیرخطی نبوده و از ماکزیمم توان ظاهری هر اینورتر فراتر نرفته است. افزایش توان حقیقی خروجی اینورترها نتیجه مسـتقیم اصـلاح توان راکتیو و بازسـازی الگوریتم اصلاح ولتاژ می‌باشد. الگوریتم بازسازی سبب تنظیم ولتاژ شده به‌طوری که توان راکتیو بین اینورترها نیز به اشـتراک گذاشته شود. در این تنظیمات ممکن اسـت ولتاژ بار در حالت عملکرد جزیره‌ای وابسته به ولتاژ خروجی اینورترباشـد و در نتیجه سـبب افزایش دامنه ولتاژ اصـلاح نشـده در pcc می‌شـود. از این رو، توان در مقاومت خروجی یکسـوکننده تلف شده و باعث می‌شود توان خروجی هر اینورتر افزایش یـابد. بعد از فعال شـدن حلقه کنترلی ثانویه در ۳/۱ ثانیه، هر اینورتر توان راکتیو در حد VAR ۳۴- بعد از یک زمان نشـسـت ۳ ثانیه‌ای مطابق با شکل ۱۲. تامین می‌کند.



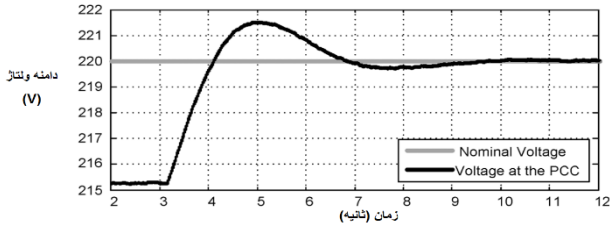
شکل (۱۲): توان راکتیو خروجی اینورترها، حلقه کنترل ثانویه در t = 3.1s فعال می‌شود.

بدون جبران‌سـازی، توان راکتیو به اشـتراک گذاشـته نمی‌شـود و اینورترهـا به ترتیب توان‌های ۵۰Var و ۱۰۰Var- تامین می‌کنند. از این رو، اشـتراک‌گـذاری توان راکتیو با معرفی یک حلقه کنترلی برای جبران‌سـازی توان بدسـت‌آمده و یک جریان راکتیو اضـافی توسـط هر اینورتر عرضه شده و عدم تطابق اجزای خروجی به حداقل رسیده است. همان‌طور که در شکل (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است انحراف ولتاژ و فرکـانس الگوریتم دروپ $\Delta f = 0.27$ Hz و $\Delta E = 4.7$ V اسـت. فرکانس میکروشـبکه بعد از یک زمان نشست ۳ ثانیه‌ای در مقدار نامی خود اصلاح شده است همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. به‌طور مشـابه ولتاژ MG بعد از یک زمان نشـسـت ۸ ثانیه‌ای در مقدار اسمی خود مطابق با شکل (۱۲) بازسازی شده است.

تسـت‌های اضـافی به منظور بررسی اثر الگوریتم خازنی به منظور اصـلاح هارمونیک ولتاژ در PCC صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی حلقه امپدانس مجازی خازنی توسـط نویسندگان [۸۹] نشان داده شده اسـت. مقایسـه هارمونیک بدسـت‌آمده از نتایج تجربی راه‌اندازی شکل (۹)، برای اینورترهای موازی که یک بار غیرخطی را تامین می‌کنند در شکل ۱۵. آمده است. THD ولتاژ در نتیجه الگوریتم پیشنهادی از ۳/۲ درصد به ۱/۵ درصد کاهش یافته است.

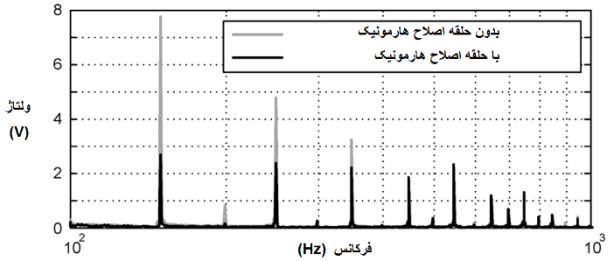


شکل (۱۳): فرکانس میکروشبکه، حلقه کنترل ثانویه در t = 3.1s فعال می‌شود.



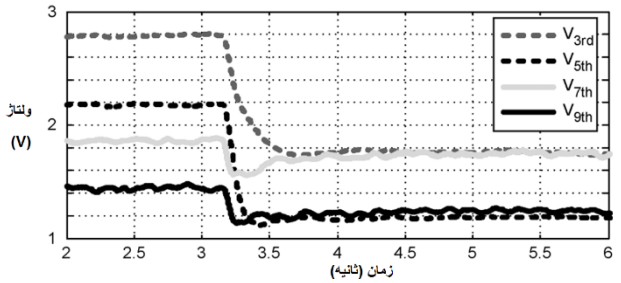
شکل (۱۴): ولتاژ میکروشبکه، حلقه کنترل ثانویه در t = 3.1s فعال می‌شود.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]



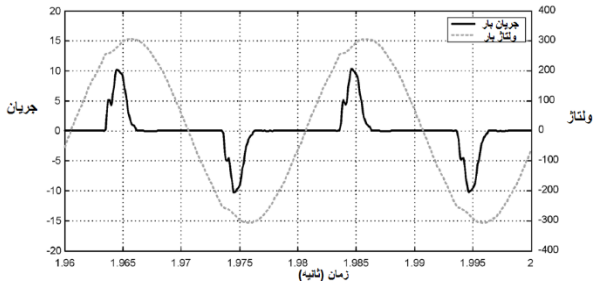
شکل (۱۵): دامنه هارمونیک ولتاژ اندازه‌گیری شده در P_{OL}.

هنگامی که حلقه ثانویه فعال شـــده، هارمونیک ولتاژ به صـــورت چشم‌گیری ضـعیف شده است، مطابق شکل (۱۶) و حالت ماندگار در کمتر از ۱ ثـانیه بدســـت آمده اســـت. که نشـــان از توانایی الگوریتم پیشنهادی است.



شکل (۱۶): دامنه هارمونیک ولتاژ اندازه‌گیری شده در P_{OL}. حلقه کنترل ثانویه در t = 3.1s فعال شده و میکروشبکه در حالت ماندگار می‌باشد.

ولتاژ و جریان بار بعد از اعمال الگوریتم پیشـــنهادی (بعد از حالت ماندگار و اصلاح هارمونیک) در شکل ۱۷. نشان داده شده است.



شکل (۱۷): جریان و ولتاژ بار در حالت ماندگار همراه با اصلاح هارمونیک ولتاژ.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد یک میکروشبکه تک‌فاز در حالت جزیره‌ای در نظر گرفته شده است. در اینجا راه‌حل‌هایی برای اشتراک‌گذاری توان و کاهش THD ولتاژ به جهت وجود بار غیر خطی ارائه شده است. حلقه کنترل ثانویه برای اشـتراک‌گذاری توان راکتیو پیشـنهاد شده است در حـالی کـه مشـــکـل انحراف ولتـاژ و فرکانس از مقادیر نامی، به جهت اســـتفاده از مشـــخصـــه کاهشـــی را نیز برطرف می‌کند. حلقه کنترل پیشـنهادی توان راکتیو خروجی اینورترها و ولتاژ ریزشـبکه را از طریق انحراف ولتاژ ΔE_x که به الگوریتم کنترل دروپ اضـافه می‌شود، تنظیم می‌کند. جبرانسـازی فرکانس ریزشبکه با اضافه کردن انحراف فرکانس به الگوریتم کنترلی، که توســط MGCC مشــخص می‌شــود صــورت می‌گیرد. نتـایج تجربی عملکرد پویـا حلقـه کنترل ثـانویـه را زمانی که ســـیســـتم به حالت ماندگار خود رســـیده را نشـــان می‌دهند. قبل از جبرانساز اینورترها به ترتیب توان راکتیو ۵۰Var و ۱۰۰Var- تامین می‌کنند در حالی که بعد از فعال شـــدن حلقه کنترل ثانویه در ۳ ثانیه هر دو اینورتر توانی معـادل ۳۴Var- عرضـــه می‌کننـد. از این رو بـا پیشـــنهاد حلقه کنترلی جریان راکتیو اضـافی عرضـه شـده توسـط هر اینورتر که ناشی از عدم تطابق اجزای خروجی است، به حداقل می‌رسد.

یـک حلقـه امپـدانس مجـازی به جهت تعدیل هارمونیک ولتاژ (از مرتبه سوم تا نهم) در PCC پیشنهاد شده است. THD ولتاژ در PCC زمانی که هر دو اینورتر توان مورد نیاز بار غیرخطی را تامین می‌کنند از ۳/۲ درصـــد بـه ۱/۵ درصـــد کاهش یافته اســـت. با معرفی الگوریتم گنجانیده شـده اضـافی برای کاهش هرچه بیشتر هارمونیک‌های ولتاژ، مقدار THD ولتاژ از ۱/۵ درصـد به ۱ درصـد کاهش یافته است. نتایج بدسـت آمده از آزمایش‌ها مناسب بودن الگوریتم پیشنهادی در کاهش هارمونیک‌های ولتاژ را نشان می‌دهد.

مراجع

[1] J. P. Lopes, C. L Moreira, A. G. Madureira, *"Defining control strategies for analysing microgrids islanded operation."* In 2005 IEEE Russia Power Tech, pp. 1-7, 2005.

[2] C. K. Sao, P. W. Lehn, *"Autonomous load sharing of voltage source converters"* IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 1009-1016, 2005.

[3] Q. C. Zhong, *"Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel"* IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 4, pp. 1281-1290, 2011.

[4] Y. W. Li, C. N. Kao, *"An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid"* IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 12, pp. 2977-2988, 2009.

[5] C. T. Lee, C. C. Chu, P. T. Cheng, *"A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters"* IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 4, pp. 1980-1993. 2012.

[6] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, 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. 2010.

[7] J. M. Guerrero, L. Hang, J. Uceda Antolín, *"Control of distributed uninterruptible power supply systems"* IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 8, pp. 2845-2859, 2008.

[8] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, *"Selective compensation of voltage harmonics in an islanded microgrid"* In 2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (pp. 279-285). IEEE. 2011, February.

[9] J. C. Vasquez, R. A. Mastromauro, J. M. Guerrero, M. Liserre, *"Voltage support provided by a droop-controlled multifunctional inverter"* IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 11, pp. 4510-4519. 2009.

[10] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuna, M. Castilla, J. Miret, *"Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

19th Iranian Conference on Electrical Engineering, pp. 1-6, IEEE. 2011, May.

[25] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A. V. Timbus, *"Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems"* IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 53, No. 5, pp. 1398-1409. 2006.

[26] A. Hasanzadeh, O. C. Onar, H. Mokhtari, A. Khaligh, *"A proportional-resonant controller-based wireless control strategy with a reduced number of sensors for parallel-operated UPSs"* IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 1, pp. 468-478. 2010.

[27] A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines, J. M. Guerrero, *"Cooperative control with virtual selective harmonic capacitance for harmonic voltage compensation in islanded microgrids"* In IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 5619-5624, 2012, October.

[28] A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines, J. M. Guerrero, *"Secondary control for reactive power sharing in droop-controlled islanded microgrids"* In 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1627-1633, 2012, May

[29] A. Micallef, M. Apap, C. S. Staines, J. G. Zapata, A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines, J. M. Guerrero, *"Secondary control for reactive power sharing and voltage amplitude restoration in droop-controlled islanded microgrids"* In 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), pp. 492-498, 2012, June.

[30] P. Rodriguez, A. Luna, I. Candela, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines, J. M. Guerrero, *"Grid synchronization of power converters using multiple second order generalized integrators"* In 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp. 755-760, 2008, November.

impedance" IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 54, No. 2, pp. 994-1004. 2007.

[11] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. D. V. De Vicuna, M. Castilla, J. Miret, *"Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters"* IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 5, pp. 1461-1470. 2006.

[12] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, M. Castilla, L. G. de Vicuña, *"Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems"* IEEE Transactions on industrial Electronics, Vol. 56, No. 3, pp. 726-736. 2008.

[13] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus,, A. Woyte, J. Driesen, R. Belmans, *"A voltage and frequency droop control method for parallel inverters"* IEEE Transactions on power electronics, Vol. 22, No. 4, pp. 1107-1115. 2007.

[14] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, A. Luna, P. Rodríguez, R. Teodorescu, *"Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes"* IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 56, No. 10, pp. 4088-4096. 2009.

[15] J. M. Guerrero, L. G. De Vicuna, J. Matas, M. Castilla, J. Miret, *"Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control"* IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 52, No. 4, pp. 1126-1135. 2005.

[16] W. Yao, M. Chen, J. Matas, J. M. Guerrero, Z. M. Qian, *"Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing"* IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 2, pp. 576-588. 2010.

[17] J. Matas, M. Castilla, L. G. De Vicuña, J. Miret, J. C. Vasquez, *"Virtual impedance loop for droop-controlled single-phase parallel inverters using a second-order general-integrator scheme"* IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 25, No. 12, pp. 2993-3002. 2010.

[18] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, *"Secondary control scheme for voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid"* IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 2, pp. 797-807. 2012.

[19] Y. A. R. I. Mohamed, E. F. El-Saadany, *"Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids"* IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 6, pp. 2806-2816. 2008.

[20] R. Majumder, B. Chaudhuri, A. Ghosh, R. Majumder, G. Ledwich, F. Zare, *"Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop"* IEEE transactions on power systems, Vol. 25, No. 2, pp. 796-808. 2009.

[21] T. L. Lee, P. T. Cheng, *"Design of a new cooperative harmonic filtering strategy for distributed generation interface converters in an islanding network"* IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 22, No. 5, pp. 1919-1927. 2007.

[22] *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems*, IEEE pp.1547-2003, 2003.

[23] H. Patel, V. Agarwal, *"Control of a stand-alone inverter-based distributed generation source for voltage regulation and harmonic compensation"* IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, pp. 1113-1120. 2008.

[24] M. Savaghebi, A. Jalilian, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, T. L. Lee, *"Voltage harmonic compensation of a microgrid operating in islanded and grid-connected modes"* In 2011

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Reactive Power Sharing and Harmonic Voltage Modification in Single Phase Island Micro-Grid with Drop Control

Mehdi Roshandel[1*], Alireza Abiati[2], Reza Shokri[3]

*1- Lecturer, Khatam Al-Anbia Air Defense University, Tehran, Iran,
mahdiroshandel1404@gmail.com
2- Student of Control Engineering, Khatam Al-Anbia Air Defense University, Tehran, Iran
3- Electrical Engineering Student, Khatam Al-Anbia Air Defense University, Tehran, Iran

Abstract: When several parallel inverters are in islands operating mode, the droop control scheme is usually used to control the inverters. The droop control method enables the inverters of a Micro-Grid to control the voltage and frequency of the network in a decentralized regulation behavior. The drop control method also enables the inverters to share the required active and reactive powers of the load between themselves. This paper focuses on some of the limitations of single phase parallel inverters using the drop control characteristic in island operating mode. Some controller algorithms have been proposed to pursue the reactive power sharing constraints and to reduce harmonic voltage disturbances at the PCC in island mode. The empirical results show the suitability of controller algorithms to achieve reactive power sharing and improve voltage harmonic disturbances in PCC.

Keywords: Reactive power, Voltage harmonics, Micro-grid, Drop control

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.1.2]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]